

# JERNKONTORETS FORSKNING

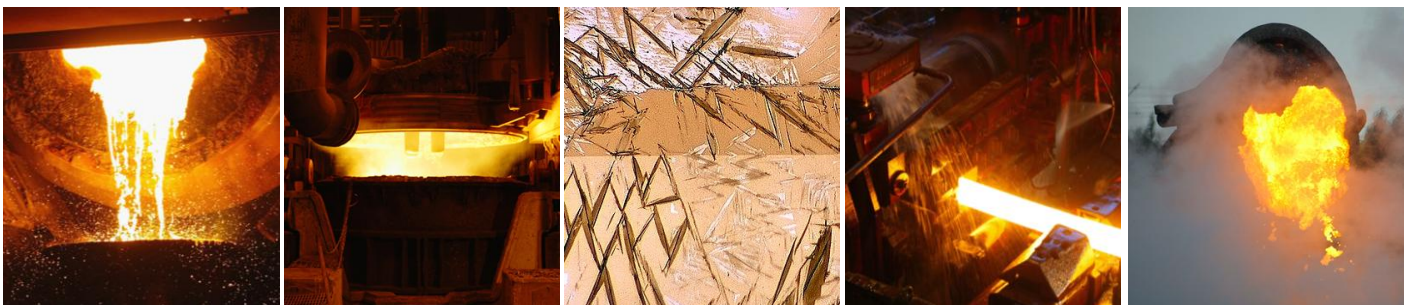
---

D 839

## Energiforskning inom svensk stålindustri

En syntesrapport inom  
Jernkontorets Energiprogram  
2006-2010

Utgiven 2012-03-20



## Sammanfattning

Stålindustrin är en av Sveriges viktigaste näringsgrenar och all verksamhet ligger utanför storstäderna. Stålframställningen kräver energirika reduktionsmedel för reduktion av järnmalm till järn samt energi för smältning av returmaterial (skrot) och för bearbetning till färdiga produkter. Sedan 1970-talet har Jernkontorets gemensamma tekniska stålforskning till stor del varit inriktad mot energieffektivisering i olika program med stöd från statliga bidragsgivare.

Denna rapport, som ingår i Stålindustrins energiforskningsprogram 2006-2010, innehåller en sammanställning baserat på bästa teknik idag och framkomna resultat i forskningsprogrammet samt påvisar kunskapsluckor och behov av ytterligare FoU-insatser.

Utvecklingen inom branschen är inriktad mot tillverkning av stålprodukter med högre prestanda än dagens vad gäller formbarhet, styrka och livslängd och som därför bidrar till ett samhälle med låg energianvändning och optimalt resursutnyttjande.

Många förbättringar kommer att ske i befintliga processer och på längre sikt utvecklas nya processkoncept genom stora internationella satsningar.

Viktiga insatsområden är:

- Magnetitmalmen – en svensk resurs
- Skrot – en allt dyrbarare och allt mer heterogen resurs
- Nya bränslen
- Energieffektivisering i processtegen och av systemen
- Avancerade stål

Utöver fortsatt FoU-verksamhet behövs myndighetsåtgärder för att underlätta t ex restenergi-utnyttjande och organisatoriska insatser av företagen för effektivare energianvändning.

Denna rapport är en del av slutrapporteringen av Jernkontorets Energiprogram. I slutrapporteringen ingår också:

1. Samlad slutrapport för Jernkontorets Energiprogram 2006-2010, Jernkontorets rapport nr D 838
2. Mer stål för mindre olja, el och kol (kunskapsöversikt), Jernkontorets rapport nr D 840

### Nyckelord:

Energi, energianvändning, energiforskning, svensk stålindustri

### Keywords:

Energy, Energy Use, Energy Research, Swedish Steel Industry

# Innehållsförteckning

<b>Förord</b>	<b>1</b>	
<b>1</b>	<b>Branschbeskrivning</b>	<b>2</b>
1.1	Dagens stålindustri	2
1.2	Utmaningar, hinder och mål	5
1.3	Energiforskning inom stålindustrin	7
1.4	Energi och miljö	10
<b>2</b>	<b>Malmbaserad ståltillverkning</b>	<b>19</b>
2.1	Inledning	19
2.2	Svensk järnmalm	20
2.3	Energieffektiviseringsmöjligheter	21
2.4	Råmaterialhantering	22
2.5	Kokstillverkning	23
2.6	Råjärnsframställning	23
2.7	Förbehandling av råjärn (Svavelrening)	29
2.8	Råståltillverkning	30
2.9	Skänkmetsallurgi	32
2.10	Energianvändning vid tillverkning av malmbaserat stål	36
<b>3</b>	<b>Skrotbaserad tillverkning</b>	<b>38</b>
3.1	Allmänt	38
3.2	Skrothantering	39
3.3	Förvärmning	42
3.4	Smältning	43
3.5	Skänkmetsallurgi / Efterbehandling	46
3.6	Rostfritt stål	50
<b>4</b>	<b>Gjutning</b>	<b>55</b>
4.1	Inledning	55
4.2	Stränggjutning	56
4.3	Götgjutning	61
4.4	Övriga gjutningsmetoder	62
<b>5</b>	<b>Värmning, värmebehandling och bearbetning</b>	<b>64</b>
5.1	Allmänt	64
5.2	Värmning och värmebehandling	69
5.3	Bearbetning	86
5.4	Processkedjan från värmning till färdig produkt	96
<b>6</b>	<b>Nya stålprodukter ger ökad energieffektivitet</b>	<b>100</b>
6.1	Allmänt	100
6.2	Utveckling av avancerade stål, egenskaper och användningsexempel	100
6.3	Miljöaspekter	104
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>106</b>
7.1	Drivkrafter för utvecklingen	106
7.2	Grundläggande krav för energieffektivisering	107
7.3	Utvecklingsbehov för ökad energieffektivisering	107
7.4	Framtidsbild	108
7.5	Forskningsprogram för ökad energieffektivisering	108



## Förord

I Jernkontorets avtal med Energimyndigheten rörande energiforskningsprogram för stålindustrin 2006-2010 ingår att en syntesrapport skall tas fram. I rapporten skall göras en sammanfattning och tolkning av verksamhetens resultat med dess nytta, som också skall sättas in i ett större sammanhang. Syntesrapporten skall innehålla en kunskapssammanställning och skall påvisa kunskapsluckor och behov av ytterligare FoU-insatser.

Denna rapport riktar sig i första hand till anslagsgivare och forskningsutförare. En kunskapsöversikt för en bredare målgrupp baserat på innehållet i syntesrapporten publiceras separat.

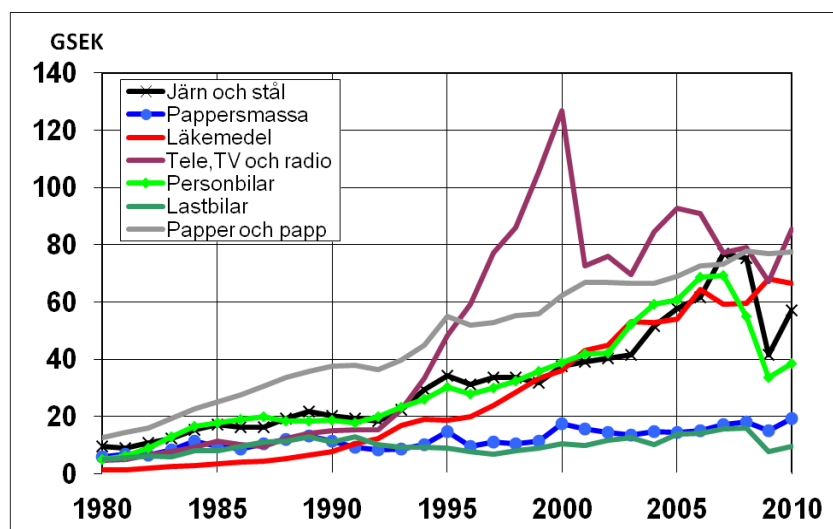
Rapporten har skrivits av:

Kapitel 1 och 7	Birgitta Lindblad, f d avd.chef Energi och Miljö, Jernkontoret
kapitel 2	Harry Pettersson, Jernkontoret
kapitel 3	Eric Burström, Inebricon AB och Robert Vikman, Jernkontoret
kapitel 4	Eric Burström, Inebricon AB och Harry Pettersson, Jernkontoret
kapitel 5	Anna Ponzio och Nils-Göran Jonsson, Jernkontoret och Håkan Lundbäck, Swerea MEFOS
kapitel 6	Jan-Olof Sperle, Sperle Consulting AB

# 1 Branschbeskrivning

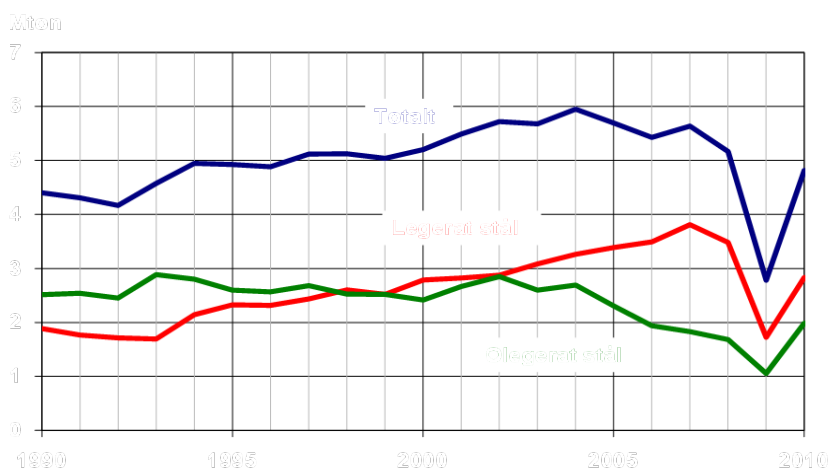
## 1.1 Dagens stålindustri

Stålindustrin är en av Sveriges viktigaste näringsgrenar. När det gäller varuexport är det tele, papper och läkemedel som är lika stora som stål, se **Figur 1**. Stålimporten är värdemässigt mindre än exporten, vilket gör att Sverige normalt har ett årligt betydande överskott i utrikeshandeln för stål på 15-30 miljarder kronor.



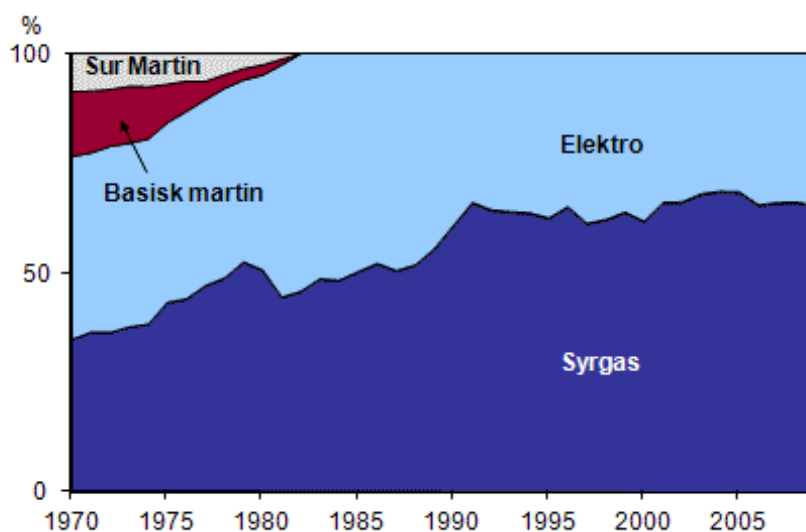
**Figur 1** Sveriges export av olika produktgrupper. *Källa: SCB, Kommerskollegium*

Produktionen av stål i Sverige framgår av **Figur 2**. Produktionen under år 2010 var drygt 4,8 Mton, dvs produktionsnedgången till följd av den globala finanskrisen under 2009 har till största delen återhämtats.



**Figur 2** Produktion av råstål i Sverige. *Källa: Jernkontoret*

Sedan början på 1980-talet används två stålframställningsprocesser i Sverige, syrgasstålprocessen där järnråvaran är 80-85% malm och resten skrot och den skrotbaserade elektroprocessen. Den tidigare betydande martin-processen upphörde 1982.



Figur 3 Stålproduktion i olika processer Källa: Jernkontoret

Enklare produkter som tillverkas i stort tonnage produceras inte längre i Sverige utan importerar. Exempel på sådana produkter är stång, balk och profiler i enklare stål, samt räls och armeringsjärn. Den svenska stålindustrin är efter en omfattande strukturrationalisering, som påbörjades under 1970-talet, specialiserad på högkvalitativa stål med stor andel höglegerade stål som gör att företagen är ofta världsledande på sina nischprodukter enligt Tabell 1.

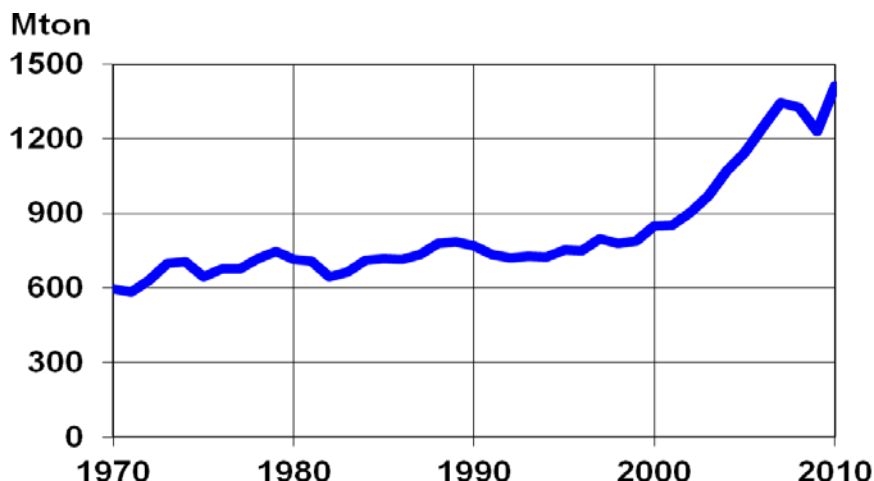
Tabell 1 Svenska företags betydelse på världsmarknaden. Källa: Jernkontoret

Produkt	Företag	Marknadsläge
Rostfritt stål	Sandvik	störst på sömlösa rör
	Outokumpu Stainless	ledande på rostfri plåt och höglegerade specialstål
	Outokumpu Stainless Tubular Products	en av de största på svetsade rör för processindustrin
	Fagersta Stainless	bland de ledande specialisterna på valstråd i Europa
Verktogsstål	Carpenter Powder Products	störst på pulverstål
	Uddeholm	störst
Snabbstål	Erasteel Kloster	störst
Kullagerstål	Ovako	störst
Handelsstål	SSAB	ledande på extra höghållfasta stål och störst på slitstål
	Höganäs	störst på järnpulver
	Sandvik Heating Technology (fd Kanthal)	störst på järnlegeringar för motståndsvärmning

Världsproduktionen av råstål var år 2010 1 414 Mton, se **Figur 4**. Kina har drastiskt ökat sin stålproduktion sedan sekelskiftet och är idag utan konkurrens den största stålproducenten och står för 46 % av världsproduktionen.

Länderna med den största råstålsproduktionen var 2010

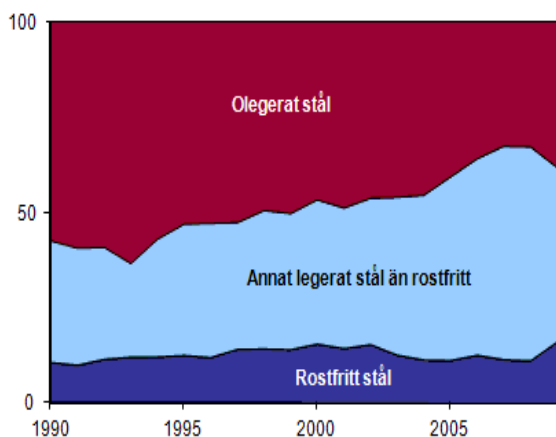
Kina	627 Mton
Japan	110 Mton
USA	81 Mton
Ryssland	67 Mton
Indien	67 Mton



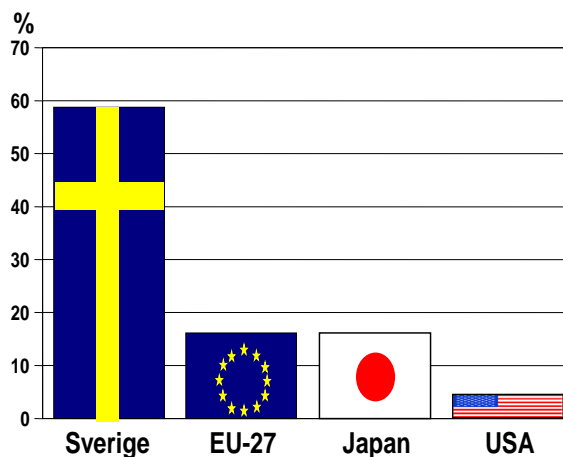
Figur 4 Världens råstålsproduktion 1970-2010. Källa: World steel association

I Europa hade Tyskland störst råstålsproduktion med 44 Mton. Sveriges produktion var 4,8 Mton. Det största stål företaget i världen är Arcelor-Mittal som producerade 98 Mton år 2010. Därefter följer 6 asiatiska stålverk. Plats nr 8 har US Steel med 22 Mton och nr 14 Thyssen Krupp med 16 Mton. SSAB med verk i Sverige och USA hade plats nr 36 med 5,8 Mton.

Den svenska stålproduktionen är unik i världen med ca 60% legerade stål och den andelen har successivt ökat under de senaste decennierna, se Figur 5. Övriga länder har en avsevärt lägre andel, se Figur 6.



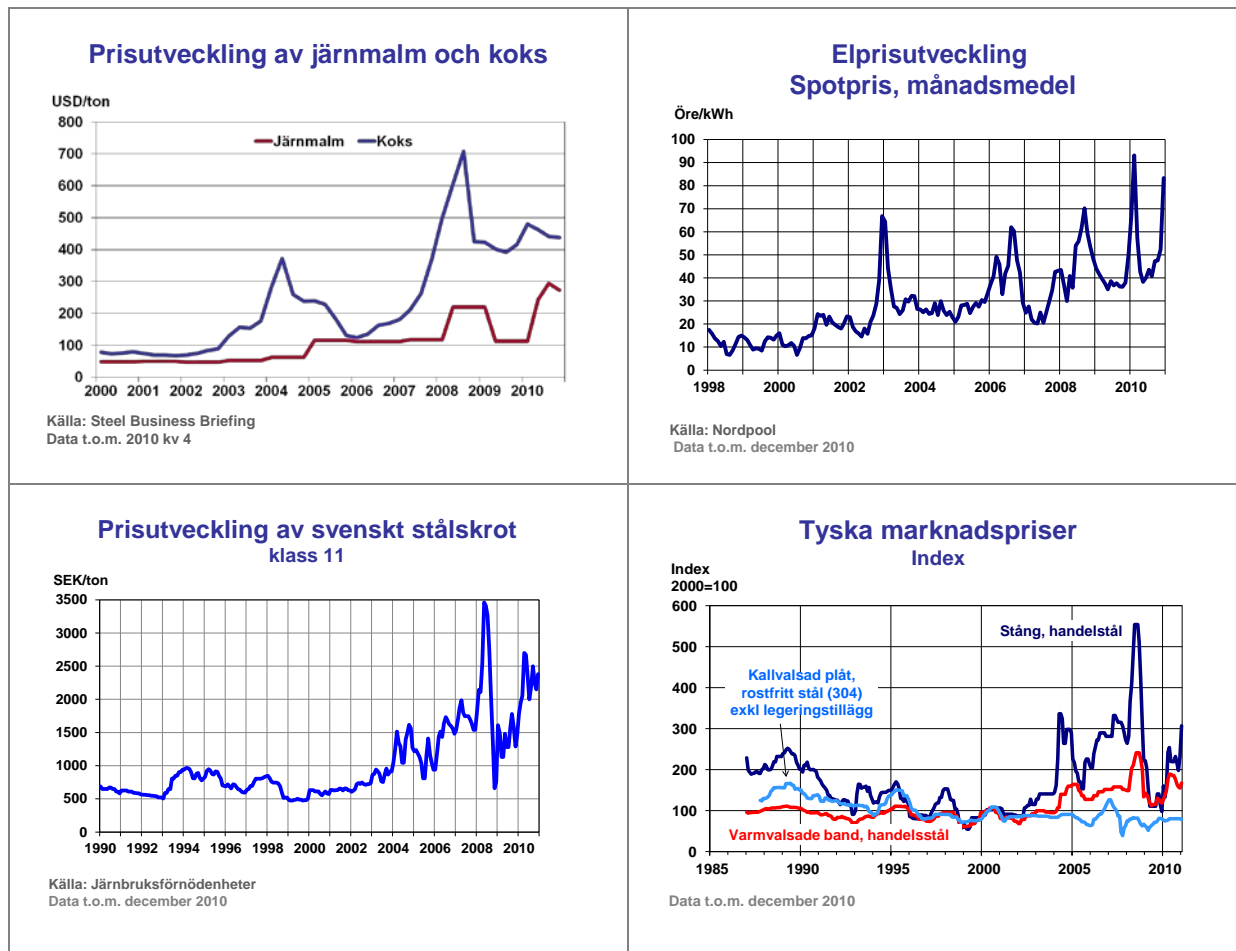
Figur 5 Stålproduktionen i Sverige procentuellt fördelad på produkt. Källa: Jernkontoret



Figur 6 Andel legerade stål i olika länder Källa: Jernkontoret



Under senare år har kostnaderna för några av de viktigare råvarorna för stålindustrin ökat drastiskt samtidigt som stålpriserna varit relativt oförändrade över en längre tid, se **Figur 7**.



**Figur 7** Prisutveckling på koks, el, skrot samt stålprodukter. *Källa Jernkontoret*

## 1.2 Utmaningar, hinder och mål

Utmaningarna när det gäller industrins energianvändning kommer från flera olika håll.

- Tillgång och pris på metallurgiska kol, olja, gas och elkraft beror på tillgängliga resurser men också på politiska beslut avseende utnyttjande av råvaror och produktionskapacitet.
- Miljölagstiftningen. I Miljöbalkens allmänna hänsynsregler sägs att verksamheter skall hushålla med energi och i första hand använda förnybara energikällor. Detta krav har blivit allt betydelsefullare vid miljöprövningen av företagen. Miljödombstolarna har i några fall beslutat om villkor gällande energihushållning i tillståndsbesluten. Krav på minskade utsläpp av svavel och kväve har bidragit till en övergång från olja till gasol.
- Klimatpolitiken. Inom EU har beslutats att utsläppen av växthusgaser skall minska med 20% under perioden 1990-2020. Om andra länder följer med skall utsläppen minska med 30%. Pågående period för EUs utsläppshandelssystem inom ramen för Kyoto-protokollet avslutas 2012. För utsläppshandelssystemet under nästa period gäller att utsläppen skall minska med 21 % mellan 2005 och 2020. Den viktigaste skillnaden mot tidigare period är att auktionering av utsläppsrätterna är

utgångspunkten och den fria tilldelningen sker centralt och baseras på riktmärken.

För den icke-handlande sektorn har EUs mål, -10 % mellan 2005 och 2020, delats upp per land och Sveriges åtagande ligger på -17 %. Riksdagen har beslutat att utsläppen av växthusgaser i Sverige skall reduceras med 40 procent till år 2020 jämfört med år 1990.

- Energipolitiken.

Riksdagens beslut om energipolitik och energiforskning i Sverige är framför allt baserat på två propositioner:

Proposition 2005/06:127      Forskning och ny teknik för framtidens energisystem

Proposition 2008/09:163      En sammanhållen klimat- och energipolitik - Energi

Partierna i regeringen slöt i februari 2009 en överenskommelse om en långsiktig och hållbar energi- och klimatpolitik. I denna sägs bl a att svenska företag och konsumenter måste ha en trygg energiförsörjning med långsiktiga spelregler och stabila villkor. Överenskommelsen slår fast att den svenska energipolitiken ska bygga på samma tre grundpelare som energisamarbetet i EU; ekologisk hållbarhet, konkurrenskraft och försörjningstrygghet.

Mål för den svenska energipolitiken till år 2020 är:

- att minst 50 procent av den svenska energin ska vara förnybar. EUs beslut säger att förnybar energi inom unionen skall öka från dagens 8,5 % till 20 %.
- att energieffektiviteten ökas med 20 procent mellan 2008 och 2020. Målet är sektorsövergripande och avser mängden tillförd energi per BNP-enhet i fasta priser. Som en följd av EG-direktivet (2006/32/EG) om energieffektivisering och energitjänster har riksdagen även antagit ett vägledande mål om minst 9 % effektivare slutlig energianvändning till år 2016 jämfört med genomsnittet för år 2001-2005.

Staten skall på energiområdet prioritera FoU-insatser där

- Sverige har eller kan förväntas bygga upp komparativa fördelar i kunskapsskapande
- Sverige har tillräcklig kritisk massa för kunskapsskapande
- Sverige har eller kan förväntas bygga upp fungerande industriella kluster
- FoU bidrar till att uppfylla de energipolitiska målen

Samtidigt har kravet på kommersialisering av framkomna resultat skärpts.

Målet för Energimyndighetens satsningar på forskning och teknisk utveckling är att bygga upp sådan vetenskaplig och teknisk kunskap och kompetens inom landet som behövs för att genom tillämpning av ny teknik och nya tjänster möjliggöra en omställning till ett långsiktigt hållbart energisystem i Sverige, samt att utveckla teknik och tjänster som kan kommersialiseras och därmed bidra till energisystemets omställning och utveckling såväl i Sverige som på andra marknader.

Energi och reduktionsmedel har alltid varit en stor kostnadspost inom järn- och stålindustrin. De första dokumenterade energibesparande åtgärderna skedde i början av 1800-talet när man började använda masugnsgasen i större skala. Inom Jernkontorets gemensamma forskning

fanns redan en organisation för hantering av energifrågor när dessa blev akuta under 1970-talets oljekriser. Det första forskningsprogrammet med statliga medel för energiforskning startade i mitten av 1970-talet.

Inom stålindustrins gemensamma forskning driver forskare vid högskolor, universitet och institut projekten tillsammans med berörda företag inom stålindustrin och dess leverantörer och kunder. Detta bidrar till att framkomna resultat snabbt kan omsättas i praktisk drift, ibland till och med under projektets gång. Ofta krävs dock investeringar vilket senarelägger användningen av resultaten. I enstaka fall kan resultaten kommersialiseras och säljas på marknaden som t ex processtyrningssystemet FOCS-RF för värmningsugnar.

### **1.3 Energiforskning inom stålindustrin**

Inom stålindustrins gemensamma forskning pågår flera större forskningsprogram, ramprogram eller projekt med olika grad av energirelevans. Finansiärer av samtliga program är stålindustrin samt staten m fl enligt nedan.

- Jernkontorets energiprogram 2006-2010 (Energimyndigheten)
- Strategiskt stålforskningsprogram 2007-2012 (VINNOVA)
- Verksamheten inom Jernkontorets Teknikområden
- Swerea MEFOS och Swerea KIMABs ramprogram 2012 (VINNOVA)
- Stålkretsloppet (Mistra)
- PRISMA (VINNOVA och KK-stiftelsen)
- Energikompetensprogrammet (Energimyndigheten. Etapp 3 avslutas 2011)
- Forskning inom RFCS (Research Fund for Coal and Steel inom EU)
- Forskning inom EUs Ramprogram

#### **1.3.1 Energiforskningsprogram**

Under 2000-talets första decennium har följande forskningsprogram med energiinriktning genomförts.

STÅL 2000, 1997-2001, med 40 miljoner kronor från Energimyndigheten och 156 miljoner kronor från industrin. Projekten avsåg utveckling av järn- och stålframställningsprocesserna till och med gjutning.

Stålindustrins värmnings-, bearbetnings- och materialpaket (VBM), 1999-2003, med 38 miljoner kronor från Energimyndigheten och 147 miljoner kronor från industrin. De flesta projekten rörde rostfria stål samt valsverksugnar.

MEFOS – nätverksprogram 2000-2002, med bidrag från Energimyndigheten på 14 Mkr inom bearbetningsområdet.

Stålindustrins metallurgipaket, METPKT, 2002-2006, med 75 miljoner kronor från Energimyndigheten och 272 miljoner kronor från industrin. Projekten avsåg utveckling av järn- och stålframställningsprocesserna till och med gjutning.

Det aktuella energiforskningsprogrammet pågick under perioden 2006-2010 med förlängning till 2011 för några projekt och omfattar 62 miljoner kronor från Energimyndigheten och 165 miljoner kronor från industrin. Programmet omfattar följande projekt.

- Minsta möjliga koksförbrukning i masugnen (JK 21064)
- Energieffektiv raffinering av råjärn (JK 21065)
- Styrning och övervakning av slaggbildningsförloppet i ljusbågsugnen (JK 23028)
- Utveckling av stränggjutningskokill med mjukkylande egenskaper för gjutning av sprickkänsliga stål (JK 24050)
- Energieffektivare driftstrategi för valsning av avancerade stålprofiler (JK 32074)
- Energibesparing genom snabbare värmning och glödning (JK 43027)
- Ugnstyrning och överordnad processanalys (JK 51054)
- Minskad användning av fossil energi i stålindustrin genom högtemperaturförgasning (JK 51053)

Projekten finns redovisade i senare kapitel samt i bilaga.

### **1.3.2 Utvärderingar av tidigare energiforskningsprogram**

Fyra olika utvärderingar av energiforskningsprogram har gjorts sedan 1999. Slutsatserna rörande resultaten varierar beroende på vilka kriterier som använts vid bedömningen. När utvärderingen görs i anslutning till avslutningen av ett program har oftast industrin inte hunnit anpassa sig fullt ut till de framkomna resultaten. En kvalificerad beräkning av den framtida energisparpotentialen bör därför ge ett betydligt bättre resultat än att endast redovisa faktiska besparingar vid avslutningen av forskningsprogrammet. Alternativet är att göra utvärderingen minst fem år efter avslutningen av programmet.

Professor John Olof Edström undersökte 1999 på uppdrag av Jernkontoret satsningar och resultat av statsstödd energirelaterad forskning. Som tidsperiod för ekonomiska satsningar valdes perioden 1983-1992 och som resultatperiod 1988-1997, dvs en tidsförskjutning på fem år. Hans slutsatser var att den beräknade energikostnadsbesparingen under perioden uppgick till två gånger satsningen. Enligt en undersökning inom EUs forskning kan man anta att ca 30 % av energieffektiviseringen under en period beror på forskningsinsatser. Professor Edström beräknade att under i övrigt identiska produktionsförhållanden har utsläppen av koldioxid minskat med 23 % från 1987 till 1997.

ÅF utvärderade år 2001 på uppdrag av Energimyndigheten programmet "Stålindustri 2000" med processmetallurgisk inriktning. Energisparpotentialen bedömdes vara 0,98 TWh per år.

Stålindustrins värmnings-, bearbetnings- och materialpaket 1999-2003 utvärderades år 2003 av Carl Bro Energikonsult, Jernkontoret och professor J O Edström. Därutöver gjorde en internationell granskningsgrupp en värdering i vilken 84 % av projekten fick godkänt. Energieffektiviseringspotentialen bedömdes i de tre utvärderingarna vara 0,32 TWh/år, 1,40 TWh/år och 1,20 TWh/år. Skillnaden i bedömning mellan Carl Bro Energikonsult och de två övriga beror på att Carl Bro Energikonsult ansåg att underlaget ej var tillräckligt bra för några projekt för att kunna göra en beräkning och att sparpotentialen efter 10 år var betydligt lägre än vad Jernkontoret och professor Edström angivit.

ÅF utvärderade år 2003 MEFOS nätverksprogram och bedömde att energisparpotentialen ungefär motsvarade vad som sagts i ansökan.

Stålindustrins metallurgipaket utvärderades av Carl Bro Energikonsult i samband med att paketet avslutades. Samtliga projekt fick omdömet att de viktigaste, och i två fall samtliga, tekniska mål var uppfyllda. Med två undantag ansågs resultaten ha högt tekniskt och vetenskapligt värde och kvalitet. Den bedömda energirelevansen ansågs på 10 års sikt överstiga de mål som angivits i ansökan.

### **1.3.3 Stålforskningsprogrammet**

VINNOVA och Jernkontoret har ett gemensamt branschprogram under 2007-2012, som omfattar 122,5 miljoner kronor vardera från VINNOVA och industrin. Programmet, som är ett av de statliga strategiska forskningsprogrammen, har en inriktning mot materialteknik och processutveckling, där energieffektivisering vanligtvis har en underordnad betydelse i målbeskrivningen.

### **1.3.4 Stålkretsloppet**

Stålkretsloppet är ett miljöforskningsprogram som spänner över hela stålets kretslopp. Visionen för programmet är "En sluten tillverkning och användning av stål i samhället". Forskningsprojekten förväntas leda till:

- resurs- och energisnålare tillverkning av stål
- miljösämare användning av stål i konstruktioner
- underlättad användning av stålskrot och restprodukter

Målet är att minska energianvändningen med 600 GWh och utsläppen av koldioxid med 1 Mton samt förbättra återvinningen av legeringsämnen i stål. Programmet genomförs i två etapper, en första etapp 2004–2008 och en andra etapp 2009-2012. Programmet finansieras gemensamt av Mistra (Stiftelsen för miljöstrategisk forskning) med 97 miljoner kronor samt gruv-, stål-, verkstads- och återvinningsindustrin, med minst 87 miljoner kronor.

### **1.3.5 PRISMA**

PRISMA – Centre for Process Integration in Steelmaking – är ett Institute Excellence Centre som etablerades 2006 på Swerea MEFOS. Sedan 2010 pågår den andra treåriga etappen. Programmet finansieras av offentliga forskningsfinansiärer och sju industripartners. Arbetet inom PRISMA skall leda till övergripande lösningar för att öka resurseffektiviteten i hela tillverkningssystemet från gruva till färdig produkt och är koncentrerat till tre inriktningar.

- Energieffektivitet
- CO<sub>2</sub>-effektivitet
- Materialeffektivitet

### **1.3.6 Energikompetensprogrammet**

Jernkontoret har sedan 2005 drivit ett energikompetensprojekt med stöd från Energimyndigheten. Syftet har varit att utveckla ett effektivt och attraktivt utbildnings- och informationsnätverk för informations-, kunskaps- och erfarenhetsutbyte rörande energieffektiviserande åtgärder inom gruv- och stålindustrin. Inom projektet har en webbaserad energihandbok utvecklats. Den nuvarande etappen avser vidareutveckling av dels det webbaserade nätverket, dels kunskapsöverföring genom endagskonferenser vid stålverk med olika aspekter på energieffektivisering som tema.

### **1.3.7 EU- och RFCS-forskning**

Svensk stålindustri har sedan Sverige blev medlem i EU aktivt deltagit i den europeiska stålforskningen inom RFCS, Research Fund for Coal and Steel. Projekt med energirelevans har berört utveckling av råmaterial för masugnen, skrotsmältning, stränggjutning samt processtyrnings- och kylsystem i valsverken. Det största pågående projektet är ULCOS – ultra low carbon dioxide steelmaking, se vidare kapitel 2.

### **1.3.8 Övrig gemensam forskning**

Gemensam teknisk forskning inom stålindustrin bedrivs inom Jernkontorets tekniska forskningsverksamhet samt inom ramprogrammen vid Swerea MEFOS och Swerea KIMAB. En icke obetydlig del av denna forskning har energirelevans.

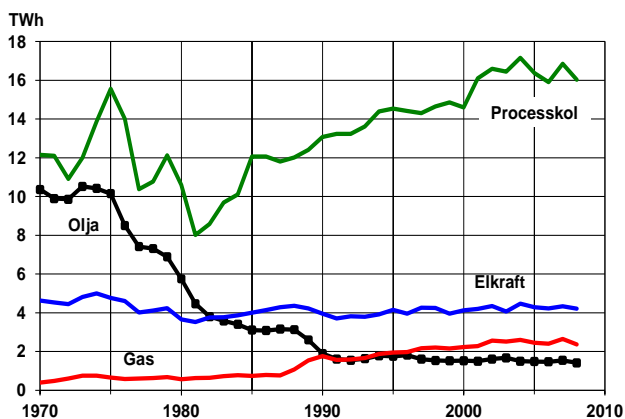
## **1.4 Energi och miljö**

### **1.4.1 Energianvändning**

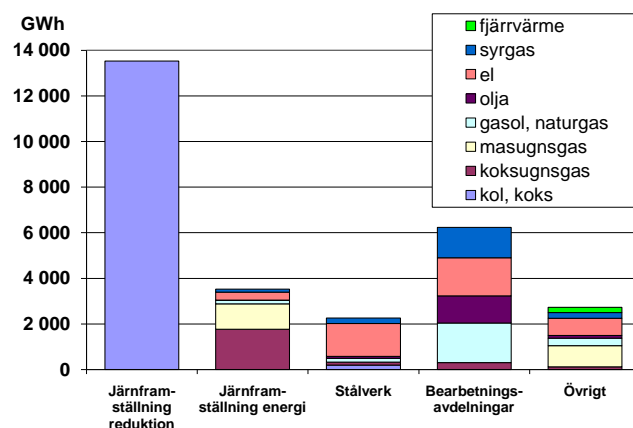
Energin har alltid varit och kommer att förbli en av de viktigaste produktionsfaktorerna inom järn- och stålindustrin. I forna tider placerades järnverken vid forsar som gav vattenkraft och i skogsbygder med tillgång på bränslen för träkolstillverkning. Majoriteten av stålverken är fortfarande placerade i Mellansverige. De stålverk som tillkommit under 1900-talet finns vid kusten i Luleå och Halmstad för att underlätta transporterna.

Ur energisynpunkt är de malmbaserade eller integrerade järnverken med masugnar och stålverk med syrgaskonvertrar helt dominerande. Bakgrunden härtill är att i deras energibalans inräknas den koks som krävs för masugnsprocessen som reduktions- och legeringsmedel. Mellan 60 och 80 % av den totala energianvändningen inom ett malmbaserat järnverk är knuten till masugnsprocessen. För att producera ett ton göt och ämnen åtgår för den malmbaserade produktionen ca 4600 kWh/ton och för skrotbaserad ca 900 kWh/ton (Jernkontorets energistatistik).

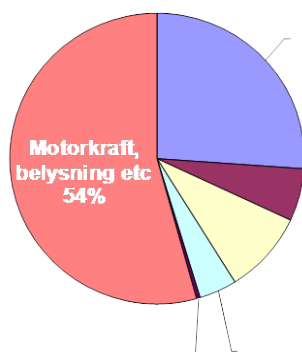
Karakteristiskt för stålindustrin är att flertalet av de energikrävande processerna sker vid hög temperatur. Energin används huvudsakligen i processer där arbetstemperaturen överstiger 1000 °C. Detta förhållande innebär att stålverken för att kunna upprätthålla produktionen behöver tillgång till högvärdiga energibärare såsom kol- och oljeprodukter, gas (gasol eller naturgas) och elkraft. Det är svårt att använda lågvärdiga bränslen som biobränslen dels av energiskäl, dels på grund av att förbränningen av bränslet oftast sker i samma rum som det material som skall värmas finns. Detta ställer stora krav på atmosfär och bränslets askhalt för att inte materialkvaliteten skall försämrats. Forskning pågår i Sverige och utomlands att söka lösa dessa tekniska problem. Om detta lyckats kan begränsad tillgång på biobränslen bestämma i vilken omfattning övergång från fossila bränslen till biobränslen kan ske bli begränsande.



Figur 8 Användning av processkol och energi vid svenska stålverk. Källa: Jernkontoret



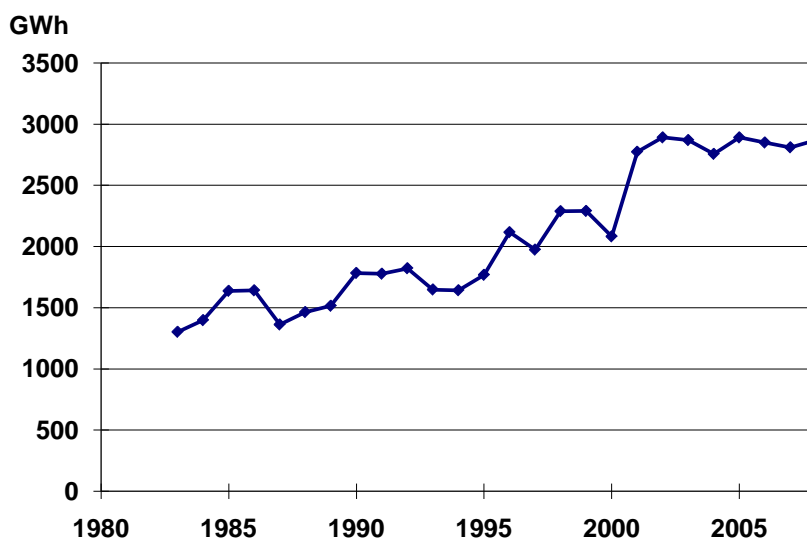
Figur 9 Användning av energi och processkol inom järn- och stålindustrins processer 2008. Källa: Jernkontoret



Figur 10 Järn- och stålindustrins elanvändning 2008. Källa: Jernkontoret.

I stålindustrins högtemperaturprocesser bildas stora mängder restenergi, vilka är alltför lågvärdiga för att kunna utnyttjas direkt i processerna. I första hand utnyttjar man dessa restenergi i värmväxlare för förvärmning av förbränningsluft samt för intern lokaluppvärmning. Successivt har stålverken blivit inkopplade i kommunernas fjärrvärmenät för leverans av restenergi, se Figur 11. Restenergimängderna överstiger dock ofta det lokala behovet och måste därför delvis kylas bort. Konkurrens om fjärrvärmeleverans finns dessutom från kommunernas värmeverk och sopförbränningsanläggningar.

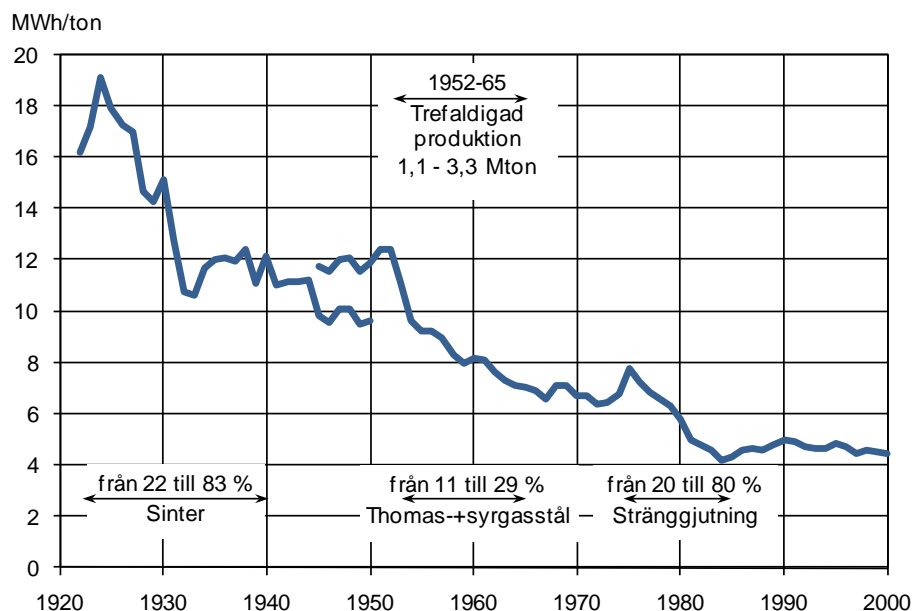
Processgaser från koksverk, masugnar och syrgaskonvertrar inom malmbaserade verk kan användas i kraftvärmeverk för produktion av både elenergi och fjärrvärme. Ett exempel är LuleKraft AB i Luleå, som försörjor orten med Sveriges billigaste fjärrvärme baserad på SSAB:s processgaser. Processgaserna har sitt ursprung i processkolet. Övrig restenergi kommer huvudsakligen från förbränning av gas och olja i värmningsugnar. Leveranserna innebär minskade koldioxidutsläpp i samhället.



Figur 11 Försäljning av restenergier (processgaser, elkraft, ånga och hetvatten) från stålindustrin. Källa: Jernkontoret

#### 1.4.2 Energieffektivisering

Insatser för att minska energianvändningen vid järnverken finns dokumenterade sedan 1830-talet. Statistik över energianvändningen finns från början av 1900-talet. Den specifika energianvändningen per ton råstål under 1900-talet framgår av **Figur 12**. I figuren har också inlagts processförändringar som påverkat energianvändningen. Det framgår tydligt att en större minskning av energianvändningen sker endast vid införande av ny teknik.



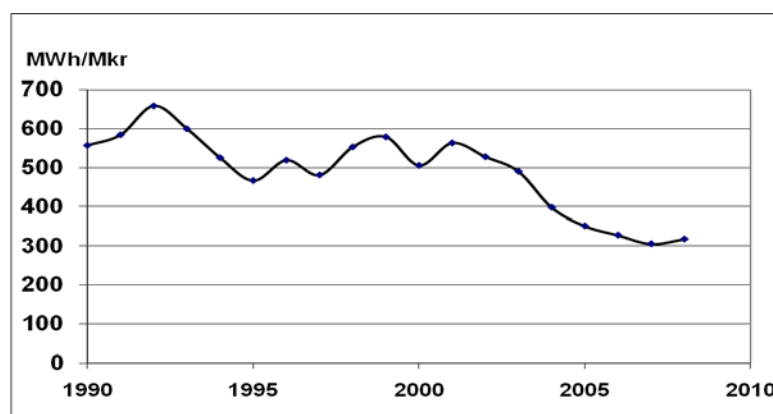
Figur 12 Historiskt perspektiv på svensk stålindustris användning av energi inkl processkol, MWh per ton handelsfärdigt stål. Källa: Jernkontoret



En förbättrad energieffektivitet med ett brett perspektiv kan uppnås på olika sätt.

- Förbättrat materialutbyte
- Ökad produktivitet
- Överhoppade processteg och värmningar
- Rationellare produktion
- Förbättrade egenskaper hos stålet
- Energieffektivisering hänförlig till insatsvaror
- Förbättrat utnyttjande av restenergier
- Förbättrat utnyttjande av biprodukter
- Organisatoriska förändringar

Sedan 1990 har stålindustrins energianvändning per krona rörelseintäkter i det närmaste halverats. Den största minskningen har skett sedan millenniumskiftet, se **Figur 13**.



**Figur 13** Stålindustrins energianvändning per krona rörelseintäkter (fast penningvärde) under tiden 1990-2008. Källa: Jernkontoret

Fortsatt energieffektivisering kräver olika styrmedel. I många fall behövs ytterligare forskning och utveckling samt fullskaleförsök. I andra fall kan ekonomiska styrmedel ge positiva resultat. Ett sådant exempel är användning av restenergier för elproduktion, som skulle underlättas om restenergier ingick i elcertifikatsystemet.

#### 1.4.3 Att räkna på energieffektiviseringen

Kan man säga något om hur stor effektiviseringen av svensk stålindustri varit mellan exempelvis 1970 och 1990 och mellan 1990 och 2010? Det enkla svaret är: Visst, något kan man säga. Man kan till exempel enkelt räkna energianvändningen per ton producerat råstål. Men speglar det verkligen effektiviseringen av branschen?

Länders produktion och förbrukning av stål anges ofta i termer av just råstål, med vilket avses göt och gjutna ämnen klara för vidare bearbetning. Så även i Sverige. Råstål tillverkas i Sverige på två sätt: Via syrgasmetoden eller via ljusbågsugn. I ljusbågsugnen används uteslutande skrot, som smälts med hjälp av el. I syrgasprocessen används cirka 20 % skrot och 80 % råjärn, som i sin tur tillverkas i masugn.

Med den fördelning av råstål tillverkat i syrgasprocess respektive i ljusbågsugn som rådde i Sverige år 2010 står tillverkningen av råstål för omkring två tredjedelar av branschens totala energianvändning. Av energianvändningen fram till råstål står råjärnstillverkningen från malm (masugnen) för nära 90 %. Det betyder att syrgasmetoden är betydligt mer energikrävande än ljusbågsugnen. Den svenska stålindustrins totala energianvändning är alltså starkt beroende av andelen råjärn i råstålstillverkningen. Detta måste man kompensera för när man räknar på effektiviseringen av branschen.

En tredjedel av energin används dock i senare processteg som värmebehandling respektive varm- och kallbearbetning, samt till verksinterna transporter, uppvärmning och. Dessa processteg ser helt olika ut beroende på vilken typ av stål som tillverkas. Förändras produktprogrammen, förändras därför energianvändningen, oaktat om processerna effektiviserats eller ej. Detta måste man också kompensera för om för att kunna dra slutsatser om effektiviseringen.

Det primära problemet för att räkna på effektiviseringen nedströms gjutningen är att det inte finns statistik på vilka stål som tillverkas, och i vilka mängder, på den detaljnivå som behövs. Den statistik som samlas in globalt, liksom i Sverige, omfattar som regel endast försåld mängd handelsfärdigt stål. Handelsfärdigt stål är ett samlingsbegrepp som inkluderar allt stål som är klart att säljas indelat i ett antal huvudproduktgrupper.

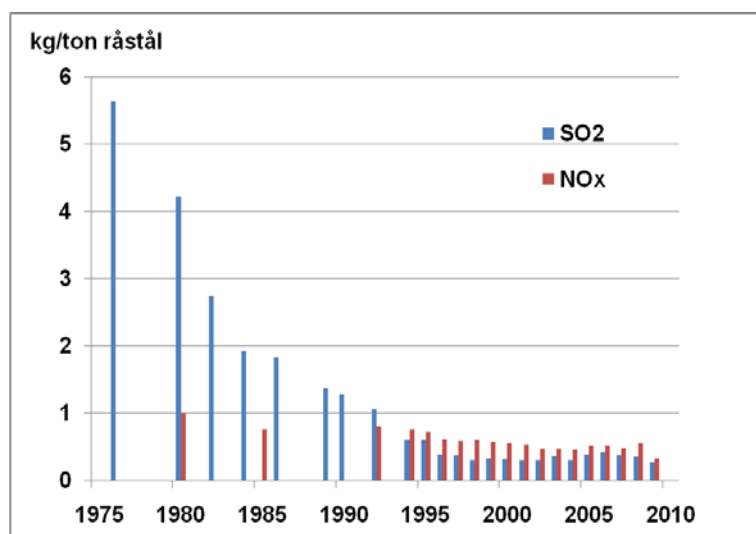
Mängden försåld handelsfärdigt stål är inte heller densamma som mängden tillverkat handelsfärdigt stål. Stål kan exempelvis ligga i lager eller passera distributörer över ett årsskifte. Dessutom går flöden av halvfabrikat mellan de olika stålverk och att få ett säkert grepp om alla sådana flöden skulle kräva att detaljerad samlades in och sammanställdes. Om ens möjligt skulle detta vara mycket arbetskrävande.

Det bästa sättet att analysera effektiviseringen av branschen är alltså att sammanväga olika bräkningar, alltifrån hur den totala energianvändningen varierat mot olika räknebaser, till hur den specifika energianvändningen varierat i ett visst processavsnitt.

#### **1.4.4 Miljöaspekter**

Användningen av energi ger utsläpp av koldioxid, svaveldioxid och kväveoxider från järn- och stålprocesser samt värmnings- och värmebehandlingsugnar i bearbetningsavdelningar. Utsläppen har dock successivt minskat. Energieffektivisering, användning av gasol istället för olja samt användning av lågsvavlig olja har minskat utsläppen av svaveldioxid. Minskning av utsläppen av kväveoxider har åstadkommit genom förbättrad förbränningsteknik samt installation av gasrening.

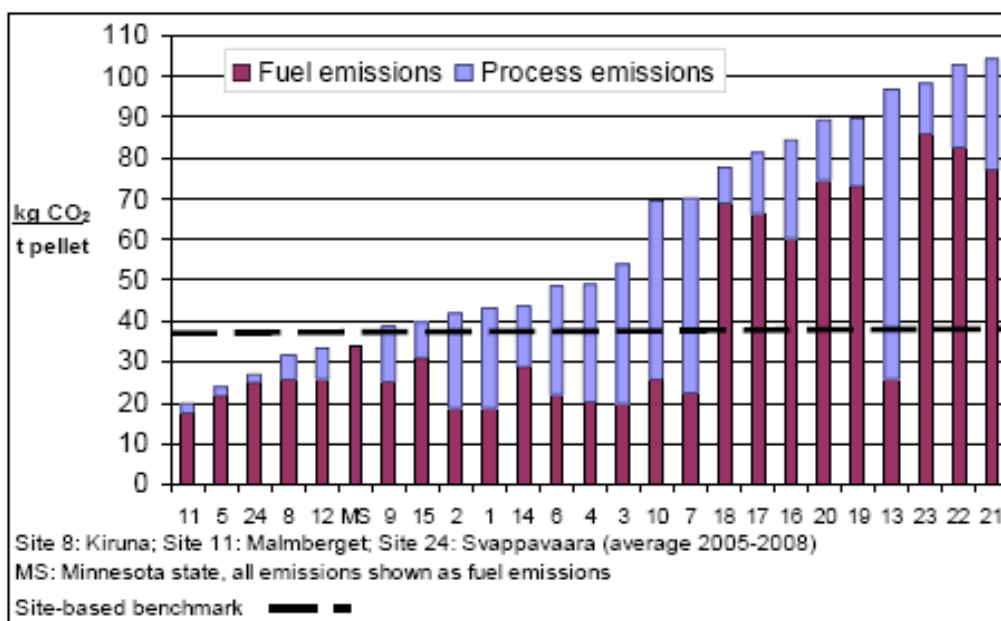
Alltsedan miljöskyddslagens tillkomst 1969 har miljöinvesteringar bidragit till ökad energianvändning. Framför allt kräver gasreningen vid olika processer stor fläktkapacitet och de slutna vattensystemen pumpkapacitet.



Figur 14 Utsläpp av svaveldioxid och NOx Källa: Jernkontoret

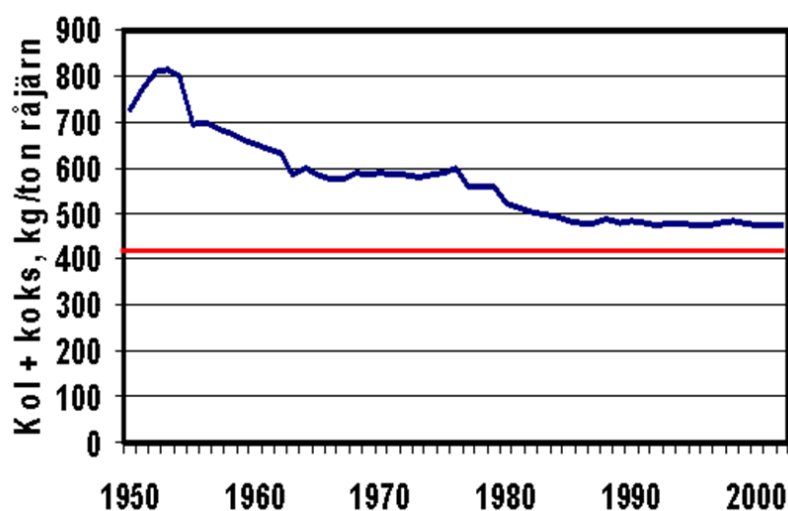
Utsläppen av koldioxid beror huvudsakligen på användningen av kolprodukter för reduktion av järnmalm i masugnarna. Sett till hela branschen ger ökad andel malmbaserad ståltillverkning ökade utsläpp även om den specifika energianvändningen i processerna minskar. För de avancerade höghållfasta stål som SSAB tillverkar måste man tills vidare utgå från malm. Användningen av svensk järnmalm som består av magnetit och som förädlas av LKAB till pellets särskilt anpassade för bl a masugnar, ger dock en kraftig minskning av utsläppen av koldioxid, se **Figur 15**. LKABs anläggningar är nr 8, 11 och 24 i bilden. Anläggningarna i bilden använder alla magnetit som järnmalmsråvara och de 10 bästa ingår i benchmark-beräkningen. Utsläppen av koldioxid från sintring och pelletisering av hematit är i storleksordningen 250 resp 115 kg/ton sinter, pellets.

Sedan 1993 används enbart pellets från LKAB som järnråvara i svenska masugnar.



Figur 15 Utsläpp av koldioxid från pelletisering. Källa: L. Hooey, *Benchmarking of carbon dioxide emissions from iron ore pelletizing - final report*. Swerea-MEFOS, MEF10043, 2010

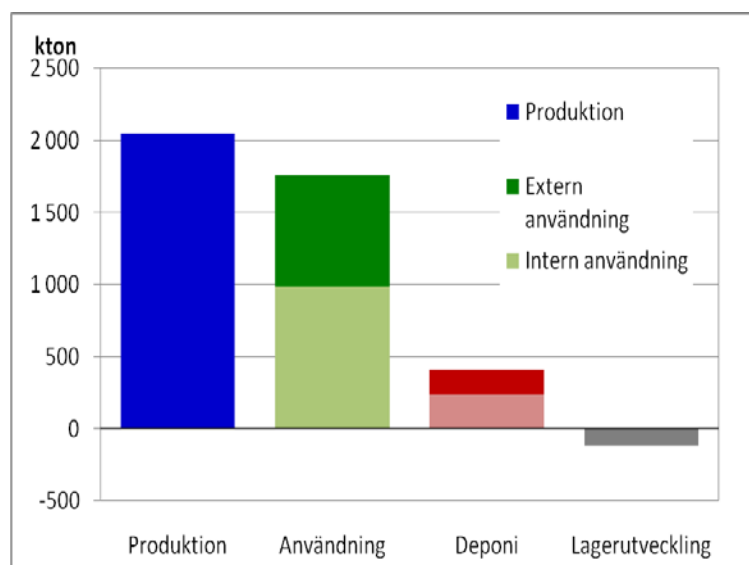
Vid sidan av användningen av kol och koks som reduktionsmedel är förbränning av olja och gas i värmnings- och värmebehandlingsugnar samt vissa legeringar och elektrodena i ljusbågsugnar källor till utsläpp av koldioxid. Kontinuerligt arbete för rationellare processvägar, effektivare processer, byte av energibärare och ökad restenergianvändning har bidragit till minskade utsläpp. Ett exempel är användningen av kol och koks i masugnen, se **Figur 16**.



**Figur 16** Användning av kol och koks i svenska masugnar. Den röda linjen markerar vad som i dag är möjligt att uppnå med dagens teknik. *Källa: Jernkontoret*

IVL har i rapporten Swedish long-term low carbon scenario - Exploratory study on opportunities and barriers, B 1955, bedömt att bl a användningen av metallurgiska kol i stålindustrin är svår att helt ersätta med förnybara alternativ. En del av dessa processutsläpp kan minskas med CCS (carbon capture and storage), men trots detta kommer det att finnas en viss mängd kvarvarande processemissioner.

Parallellt med järn- och ståltillverkningen produceras andra material vars ursprung är stålprocesserna. De till tonnaget största restprodukterna är slagg, glödskal, gasreningsstoff och slam. Ca 80 % återanvänds internt eller externt eller upparbetas, se **Figur 17**. Produkter med slagg som råvara används som vägbyggnadsmaterial med lägre energianvändning som följd genom att väggkroppen kan göras tunnare. I cementprodukter utnyttjas granulerad masugnsslagg. s k hyttsand, som ersättning för kalksten, varvid såväl energianvändning som utsläpp av koldioxid minskar.



**Figur 17 Hantering av restprodukter vid svenska stålverk 2008.**  
*Källa: Jernkontoret.*

#### 1.4.5 Systemaspekter

Stålindustrin har en aktiv roll i kedjan råvaror – materialframställning – produkttillverkning – kund – återvinning av uttjänta produkter. Det har blivit allt mer intressant att vid process- eller produktförändringar studera miljökonsekvenserna i hela kedjan. Många livscykelanalyser har visat att oftast är användningen av produkterna mest miljöstörande, medan materialframställningen har en underordnad betydelse.

Inom forskningsprogrammet ”Stålkretsloppet” har LCA-tekniken använts för bedömning av de ingående projektens resultat beträffande energianvändning och miljökonsekvenser. Baserat på 2005 års produktion och projekten inom programmet har befintlig processteknik jämförts med ny teknik. Av tabell 2 framgår att effektivisering av råvaruanvändningen överstiger de förbättringar som kan åstadkommas i stålverkens processer.

**Tabell 2 Miljövärdet av Stålkretsloppets projekt. Potentialen är baserad på resurseffektivisering med 34 kton/år legeringar, 630 kton/år pellets och 57 kton/år kalk. Källa: Jernkontoret.**

Potential	Koldioxid	Energi
Råvaruframställning	- 1 600 kton/år	- 5 100 GWh/år
Ståltillverkning	- 240 kton/år	- 1 200 GWh/år
Summa	- 1 800 kton/år	- 6 300 GWh/år

Motsvarande studie av konsekvenserna av övergång till höghållfasta stål i fordonssektorn visar en minskning av energianvändning och koldioxid som är betydligt större i användarledet än vid tillverkningen, se tabell 3. Andra studier av nya sk innovativa stål i stationära tillämpningar ger samma resultat. Tabell 3 visar att om ett ton höghållfast stål används i stället för konventionella stål inom fordonssektorn minskar energianvändning och utsläpp av koldioxid mer än den svenska stålindustrins motsvarande användning och utsläpp under ett år.

**Tabell 3 Miljövärde av Stålkretsloppets projekt – fordonssektorn.**  
**Exemplet är baserat på att 1 Mton höghållfast stål ersätter 1,3 Mton konventionellt stål.**  
**Källa Jernkontoret.**

<b>Potential</b>	<b>Koldioxid</b>	<b>Energi</b>
Råvaruframställning	- 200 kton	- 1 200 GWh
Ståltillverkning	- 400 kton	- 2 100 GWh
Drift 10 år	- 7 400 kton	- 25 200 GWh
Summa	- 8 000 kton	- 28 500 GWh

Liknande slutsatser har dragits i en tysk studie där man beräknat utsläppen av koldioxid i åtta olika stålapplikationer. Resultaten visar att en tredjedel av den planerade minskningen av koldioxid i Tyskland till år 2020 endast kan åstadkommas med hjälp av innovativa stålprodukter. (Kerkoff Hans Jürgen. Steel can be relied on. Stahl und Eisen 131 (2011) nr 6/7, sid S12).

## 2 Malmbaserad ståltillverkning

### 2.1 Inledning

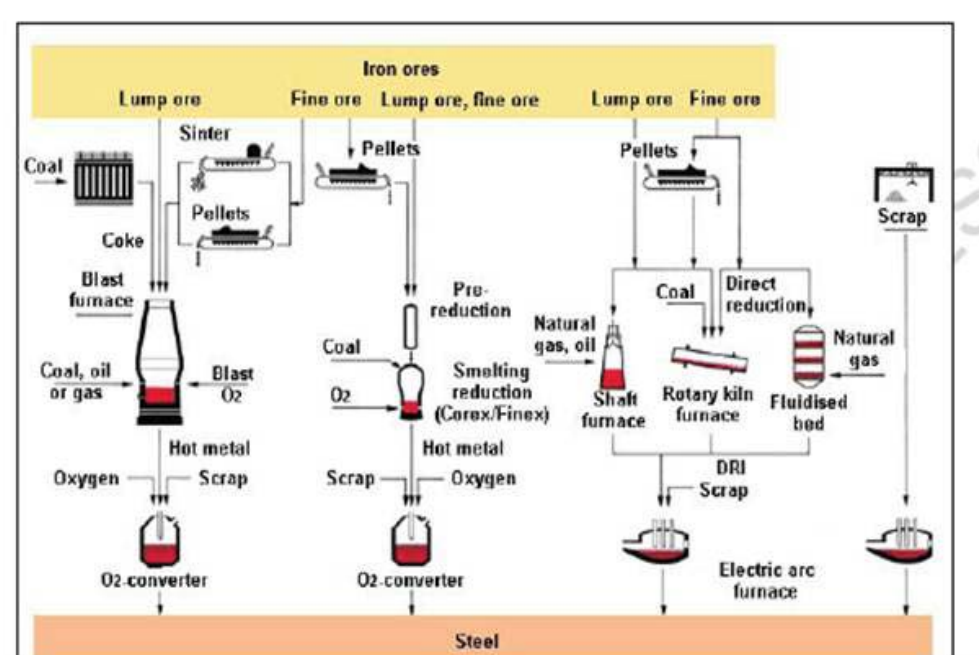
#### 2.1.1 Reduktion av järnmalm

Den dominerande processen för stålframställning ur malm är via masugn - syrgaskonverter. I masugnen reduceras malmen till järn och järnet tar upp kol och smälter till ett råjärn med 4,5 % kol. Masugnsprocessen kräver koks och järnmalm i styckeform för att fungera och är en kontinuerlig process. I konvertern färskas råjärnet till råstål genom att kolet oxideras bort. Malmbaserade verk är ofta stora med en årskapacitet på 3-8 Mton på grund av de skalfördelar som då uppnås i t. ex. sinterverk, masugnar och bandvalsning i bredbandverk.

Malmbaserade stålverk har ofta egna koksverk där koks tillverkas genom torrdestillation av stenkol. Järnmalm anrikas vid gruvan till 55-70 % Fe och den finkorniga malmen (sligen) sintras i sinterverk belägna i anslutning till masugnen. Koksverk och sinterverk kräver stora anläggningar före processen för blandning/homogenisering av kol och malm samt efter denna för krossning/siktning av tillverkad koks och sinter. Som komplement till den egna sintern köper verken in styckemalm och pellets. Pellets tillverkas i regel vid gruvorna där mycket finkornig slig rullas till kulor och sintras till pellets i kulsinterverk.

De enda storskaliga alternativa processvägarna till masugnen är järnsvamptillverkning (Direct Reduced Iron, DRI) i schaktugn och smältning av denna i ljusbågsugn samt Corexprocessen i kombination med syrgaskonverter (se **Figur 18**). I järnsvamptillverkning, där naturgas används som reduktionsmedel, reduceras malmen vanligtvis i en schaktugn utan att smälta. Järnsvampprocessen kräver tillgång på billig naturgas för att vara ekonomisk. Tillverkad DRI används som jungfrulig råvara i ljusbågsugnar och ersätter skrot.

Världsproduktionen av råjärn uppgick år 2008 till 928 Mton och för DRI till 66 Mton.



Figur 18 Olika vägar för stålframställning. Källa: *Steel Manual, VDEh*

### 2.1.2 Ståltillverkning och gjutning

För färskning av råjärnet till råstål används syrgaskonvertrar (BOF, Basic Oxygen Furnace). Vanligtvis används konvertrar där syrgasen blåses genom en lans mot stålbadets yta, vilket är principen för den ursprungliga LD-processen utvecklad i Linz-Donawitz i Österrike kring 1950. Det finns också bottenblåsande syrgaskonvertrar (OBM eller Q-Bop) som utvecklades ur den ursprungliga Bessemerprocessen (första lyckade blåsningen 1858 i Edsken, Gästrikland, Sverige) som använde luft. Bottenblåsning ger bättre omrörning av badet och därigenom en snabbare process. Moderna LD-konvertrar är därför utrustade med bottendysor genom vilka kväve/argon kan blåsas för att röra om badet (LBE = LD Bottom Equilibrium). Förutom råjärn används upp till 20 % skrot i LD-konvertern och kalk, dolomit och malm tillsätts som slaggbildare. De största LD-konvertrarna klarar av chargevikter på 400 ton. Råstålet tappas och legeras i en stålskänk före gjutningen. För att homogenisera stålet (analys och temperatur) rörs det om genom spolning med argon via lans och/eller spolstenar i skänkbotten. Denna behandling är tillräcklig för att kunna gjuta enklare stålsorter. Oftast är stålverken utrustade för en mer omfattande skänkmetsallurgisk behandling av hela eller delar av produktionen (omrörning med slag för svavelrening, vakuumbehandling, värmning/kylning, legering under skyddsgas, trådmatning eller genom injektion i stålet).

I moderna verk har stränggjutning av det flytande råstålet direkt till ämnen ersatt götgjutning och valsning av göt till ämnen. Där götgjutning används är det av dimensionsskäl och för tillverkning av utgångsmaterial för smide. Fortfarande finns det specialtonnage som inte kan stränggjutats till fullgod ämneskvalitet och därför måste götgjutas.

### 2.1.3 Järnsvamptillverkning

Någon tillverkning av järnsvamp eller DRI för ståltillverkning finns inte längre i Sverige. Höganäs tillverkar järnsvamp för sin pulvertillverkning. Några elektrostålverk importerar DRI som komplement till skrotet för att få en insats med mindre metalliska föroreningar. Om naturgas förs iland i Nordnorge till rimlig kostnad finns möjligheten att ett järnsvampverk kan byggas där. LKAB, Höganäs och Statoil arbetar med ett sådant projekt. LKAB är redan idag ledande tillverkare och leverantör av högvärdig DRI-pellets till järnsvampverk i Asien med tillgång av billig naturgas. Bra pellets för DRI-processer måste ha mycket hög Fe-halt och låg SiO<sub>2</sub>-halt för att inte ge stora, energikrävande slaggmängder vid smältning i ljusbågsugn.

## 2.2 Svensk järnmalm

För SSAB:s två verk, i Luleå och Oxelösund, är järnråvaran malm. Till skillnad från de flesta stålverk i världen har SSAB utvecklat sina sinterverk och valt att använda enbart pellets. SSAB är också unikt i Europa eftersom man har tillgång till högkvalitativ malmråvara från närbelägna svenska gruvor.

I de lappländska malmfälten bryts magnetitmalmer som LKAB tillverkar pellets av. Med LKAB konkurrerande exporterande gruvor med pelletsverk bryter i de flesta fall hematitiska malmer som oftast inte kan anrikas till så höga järnhalter som magnetiten. Magnetitmalm är en bristvara på världsmarknaden. För att bränna pellets med hematitisk råvara går det åt fyra gånger så mycket energi som då utgångsmaterialet är magnetit. Tata Steel, Holland som är det enda europeiska pelletsverket utanför Sverige tar därför en del av sin malm från LKAB.

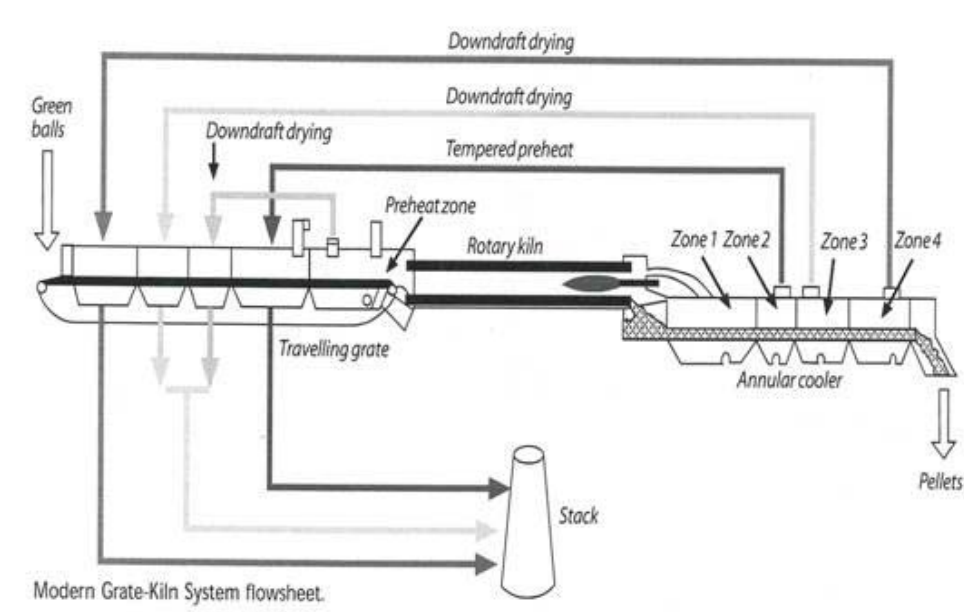
Även i den nya gruvan i Pajala (Northland Iron Ore), som öppnas nästa år och i de nygamla gruvprojekten Grängesberg och Blötberget-Håksberg, tänkta att öppnas 2014-2015, är malmineralet magnetit. Dessa företag tänker leverera malm till kontinentala järnverk med sinterverk/pelletsverk. Det är möjligt att anrika även dessa malmer till ett pelletskoncentrat



men då måste det finnas ett pelletsverk här i landet som kan ta emot malmen. I ett globalt perspektiv skulle pelletstillverkning av dessa malmer ge energieffektivare ståltillverkning med mindre CO<sub>2</sub>-utsläpp. Att bygga ett nytt pelletsverk innebär dock en betydligt större investering än nyöppnandet av en gruva.

### 2.2.1 Tillverkning av pellets

Malmen som bryts i LKAB:s gruvor i Malmberget och Kiruna mals och anrikas magnetiskt till en finkornig slig som är en nästan helt ren magnetit. Till denna sätts önskade basiska slaggbildare som olivin och kalk. Sligen rullas till kulor som bränns (sintras) i LKAB:s pelletsverk. Det finns två typer av processer, grate-kiln (bandrullugn) och straight grate (bandmaskin). Processen är uppdelad i zoner, torkning, förvärmning, sintring och kylning. Den varma/heta luften från kylaren används för torkning och förvärmning av de rullade, fuktiga kulorna samt i brännaren. I sintringszonen oxideras magnetiten till hematit vilket är en exoterm reaktion. I Grate-kiln sker torkning och förvärmning på ett kontinuerligt band, bränningen i en roterande ugn och kulsintern kyls i en cirkulär kylare (se **Figur 19**). I Straight grate sker hela processen på ett kontinuerligt band med ett bäddlager av kulor för att skydda bandet. Processen är uppdelad i zoner och den varma luften från kylaren används för torkning, förvärmning och i brännarzonen. Grate-kiln systemet är energieffektivare än straight grate



**Figur 19** Pelletstillverkning enligt grate-kiln förfarandet. Källa: *Metso Minerals*

Magnetitoxidationen gör det möjligt att framställa pellets med en mycket låg energianvändning. Den bidrar med c:a 60 % av processens energibehov. Som bränsle används kolpulver (c:a 5 kg/ton). Den pellets som tillverkas håller hög järnhalt och lågt slagginnehåll. LKAB har sex mycket stora pelletsverk i Kiruna, Malmberget och Svappavaara med en sammanlagd produktionskapacitet på 24 miljoner ton pellets. LKAB:s pelletstillverkning är BAT när det gäller energieffektivitet och CO<sub>2</sub>-utsläpp.

### 2.3 Energieffektiviseringsmöjligheter.

Masugnen kräver styckeformig järnråvara för att fungera. Som beskicksningsmaterial används sinter, pellets och styckemalm. De flesta stålverk (inkl. SSAB:s europeiska konkurrenter) har egna sinterverk där de överför huvuddelen av sin järnråvara till styckeform. I dessa måste

grövre sliger användas, som i regel håller lägre järnhalter än sligen till pelletsverken, för att nå önskad produktivitet. I regel tillsätts alla slaggbildare till sinterblandningen och denna styrs mot önskad slaggbasicitet i masugnen. I sinterverken används koksgrus som bränsle (45 kg/ton).

SSAB och de finska masugnarna skiljer sig från de flesta av sina europeiska konkurrenter genom en beskickning av enbart pellets med hög Fe-halt samt LD-slagg och kalksten som ger möjlighet att styra slaggbasiciteten. Trots tillsatserna har SSAB en mycket låg slaggmängd (150 – 160 kg/ton råjärn) medan vanlig sinter ger slaggmängder på 220-300 kg/ton råjärn. De olivinpellets som används är också lättreducerade. Bränsleanvändningen i SSAB:s masugnar är bland de lägsta i Europa på grund av en lättreducerbar beskickning, låg slaggmängd och god styrning av processen.

#### *Kopplat till Energimyndighetens mål*

Om vi räknar LKAB:s pelletstillverkning ur magnetitmalm och SSAB:s masugnspraxis med låg slaggmängd som en enhet och jämför den med ett normalt, integrerat stålverk i Europa har Sverige ett mycket energi- och CO<sub>2</sub>-effektivt sätt att framställa råjärn.

Energiåtgången från malm till råjärn räknat per ton producerat råjärn vid tillverkning med LKAB:s pellets i SSAB:s masugnar är 450 kWh/ton lägre än i en genomsnittlig europeisk masugn med huvudsakligen sinter som beskickning<sup>1</sup>. CO<sub>2</sub>-utsläppen från malm till råjärn blir för LKAB:s pellets i SSAB:s masugnar 250 kg CO<sub>2</sub>/ton råjärn lägre än med sinter i de bästa europeiska masugnarna. Orsaken till skillnaderna är den lägre användningen av fossila bränslen i pelletsverken och högvärdigare malm i SSAB:s masugnar.

#### *Andra energieffektiviseringseffekter*

En ökning av produktionen av pellets i LKAB:s kulsinterverk med 2 Mton/år genom malm-brytning av magnetit i sidogruvor i Malmfälten ger globalt en energieffektivisering på max 600-700 GWh/år om kulsintern ersätter sinter som järnråvara i en europeisk masugn. Ett nytt kulsinterverk i Mellansverige med en kapacitet av 3 Mton/år som producerar järnmalmspellets för export ger på samma sätt en energieffektivisering i något europeiskt järnverk med max 900-1000 GWh/år.

#### *Miljö- och klimatteffekter*

En ökad svensk export av järnmalmspellets på 5 Mton/år som ersätter sinter i de europeiska masugnarna minskar CO<sub>2</sub>-utsläppen inom EU med 800 kton/år och skulle på så sätt bidra till att uppfylla EU:s 2020-mål.

## **2.4 Råmaterialhantering**

SSAB saknar egna sinterverk och behöver därför inte de stora homogeniseringsanläggningar som är typiska för stora malmbaserade verk. Kulsintern kommer från en leverantör och behöver därför inte homogeniseras. Den har från tillverkningen en snäv fraktion, 75 % mellan 9 och 12.5 mm, och går via materialfickor till rensiktning innan den transporteras på band till masugnen.

---

<sup>1</sup> Beräkning av Mikael Larsson, Swerea-MEFOS

## 2.5 Kokstillverkning

Båda SSAB-verken har egna koksverk, som inte täcker behovet av koks vid full produktion i masugnarna utan extern koks måste importeras (i Luleå c:a 10 % av behovet och i Oxelösund 40 %). Koksverket i Oxelösund är från 1950-60-talen och det i Luleå är byggt på 1970-talet. Båda verken är moderniserade och har fått ugnarna ommurade några gånger.

Tillverkning av koks sker genom torrdestillation av stenkolk i ugnsbatterier under c:a 18 timmar. Därefter trycks koksen ur ugnen och släcks med vatten. Koksen krossas och siktas före transport till masugnen. Koksverket måste gå kontinuerligt då ugnarna inte tål att svalna. SSAB önskar sänka förbrukningen av koks i masugnen bl. a. genom injektion av kolpulver genom formorna.

Koksen ska förutom att vara bränsle och reduktionsmedel i masugnen bära upp beskickningen och säkerställa permeabiliteten för gasen i schaktet och flödet av råjärn/slagg ut ur stället. Hög kolinjektion och pelletsbeskickning innebär mindre koks i masugnen. Den mindre mängden koks ställer hårdare krav på kokskvaliteten, koksens hållfasthet vid höga temperaturer, då uppehållstiden i masugnen ökar. Kokskvaliteten påverkas av valet av kolsorter i kolmixen och koksningstiden. Ett annat krav är att koksen ska hålla jämn och låg fukthalt för att underlätta avsiktning av fint material.

Gasen från koksverken används efter att ha renats från tjära mm. som bränsle inom verken t.ex. för värmning av skänkar och som bränsle i kraftvärmeverk. Voestalpine i Linz och något nordamerikanskt verk injicerar koksgasen som bränsle i masugnen.

### 2.5.1 Utvecklingsbehov.

- Koksen till masugnarna har krav på en viss minsta styckestorlek. Den avsedda finandelen används vanligen som bränsle i sinterverk om sådant finns. SSAB saknar sinterverk och säljer därför den avsedda finandelen. Utvecklingsarbete behövs för att hitta optimal användning för denna.
- Det borde gå att utveckla metoder att hitta mer värdefull användning av koksugns gas, T. ex. Användning i reduktionsprocesser
- Ett annat viktigt utvecklingsområde är att hitta metoder för att förlänga livslängden på ugnsbatterierna.
- Ersättning av metallurgiska kol med t.ex. restmaterial och plast vid kokstillverkning.
- Optimering av koksens varmhållfasthet och reaktionsförmåga med gasen för att undvika ackumulering av fines. Studier av koksens sönderfallsmekanismer

## 2.6 Råjärnsframställning

### 2.6.1 Masugnsprocessen

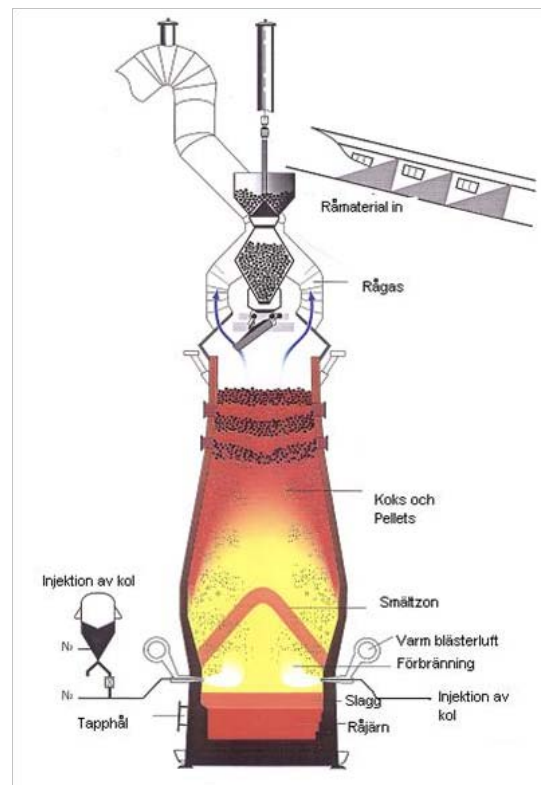
Masugnen är den enda processen som används i landet för att tillverka järn ur malm för stålframställning. Höganäs tillverkar dock järnsvamp ur höganrikad järnmalmsslig genom reduktion med kolpulver i en tunnelugnsprocess (Höganäsprocessen). Årsproduktionen är 100 kton. Järnsvampen används för tillverkning av järnpulver.

Av den årliga råstålsproduktionen i Sverige på 5.7 Mton kommer 65 % eller 3.7 Mton från SSABs anläggningar i Luleå och Oxelösund med råjärn från masugnar som huvudsaklig insatsvara. Som enskilda produktionsorter är SSAB:s verk små för att vara malmbaserade. Tillsammans gör de SSAB till en medelstor tillverkare av malmbaserat stål i Europa.

Masugn 3 i Luleå är den största masugnen i Sverige, byggd år 2000. I storlek motsvarar den en medelstor europeisk ugn. Den uppgraderades i storlek men det mesta av kringutrustningen, som råmaterialhantering, blåsmaskin, kolinjektionsanläggning och varmapparater, fanns sedan tidigare men hade moderniserats och uppgraderats i förväg.

Ugnarna i Oxelösund är mindre och små i jämförelse med europeiska verk. Under 2010 har de utrustats med nya varmapparater och under 2011 kommer den större ugnen, masugn 4, att muras om. **Figur 20** visar en masugn i genomskärning.

SSAB:s masugnar har en beskickning som består av 100 % pellets plus slaggbildare som LD-slagg, kalksten samt briketter tillverkade av diverse interna restprodukter. Koks och pellets plus slaggbildare chargerar med hjälp av en roterande ränna. Denna rörelse är programmerad och styrs så att önskad gasfördelning i schaktet uppnås genom att skiktjockleken av koks och pellets över tvärsnittet kontrolleras. Genom den höga järnhalten i pelletsen är slaggmängden i jämförelse med andra europeiska verk låg, c:a 150 - 160 kg/ton.



**Figur 20 Masugnen. Källa: SSAB EMEA**

Masugn 3 i Luleå har två tapphål och arbetar med övertryck på toppen medan de mindre ugnarna i Oxelösund är lågtrycksmasugnar med ett tapphål. Alla masugnarna drivs med syrgasanrikad bläster som förvärms i varmapparater till 1100-1200°C. Genom formorna injiceras malt stenkolspulver för att ersätta en fjärdedel av koksen. På båda orterna injiceras därför över 100 kg kolpulver per ton. Syrgasanrikningen anpassas till kolinjektionen och produktionstakten.

Förlusterna i masugnen utgörs av hyttstötet. Järnhalten i slaggen är försumbar. Hyttstötet kommer till hälften från koks respektive sinter/pellets. Det grövre hyttstötet återförs i processen genom att det ingår i briketter som chargerar på masugnen eller genom att det injiceras tillsammans med kolpulver. Det våtavskiljda hyttslammet deponeras idag men försök utförda inom projektet JK 21064 visar att det kan injiceras efter behandling i tornado.

En jämförelse mellan europeiska masugnar visar att masugnar med 100 % pellets i beskickningen (dvs. de svenska) har större stoffförluster än masugnar med en beskickning som huvudsakligen består av sinter. En orsak är förmodligen att kulorna i styckeform skiljer sig för mycket från koksen. De är mindre, har en snäv storleksfördelning och får då en annan ras-

vinkel vid chargering. Pellets med högre densitet kan nöta koksen och bilda fines som ger stoft.

#### *2.6.1.1 Bästa teknik för råjärnsframställning ger energieffektiv malmbaserad ståltillverkning*

Bränsleanvändningen, koks och injicerat kolpulver, mätt som kg/ton råjärn, ligger för alla tre masugnarna bland de lägsta jämfört med de europeiska järnverken under 2000-talet. Detta innebär att de svenska masugnarna är mycket energieffektiva och har lägst CO<sub>2</sub>-utsläpp i Europa. För att behålla denna ställning krävs ständigt pågående utveckling. De svenska masugnarna använder 100 % pellets vilket ger en låg slaggmängd. De har idag moderna varmapparater som ger en hög blästertemperatur och som tillsammans med syrgasanrikning gör det möjligt att injicera 100-150 kg kol/ton råjärn genom formorna. (Den lägre siffran gäller Oxelösund där kapaciteten i kolmalningsanläggningen är begränsande.) Detta är mindre än för de europeiska masugnar, som lyckats bäst med kolinjektion, vilka uppnår 200 kg injicerat kolpulver per ton råjärn.

BAT för råjärnsframställning med låg bränsleanvändning innebär användning av järnmalm (pellets) med hög Fe-halt för lägsta möjliga slaggmängd i masugnen, högsta möjliga blästertemperatur, högsta möjliga syrgasanrikning på blästerluften och så stor injektion av kol genom formorna som är möjligt utan att processen störs. Råjärnstillverkning i dagens stora masugnar kräver en beskickning av klasserad sinter, styckemalm eller pellets med snäv styckefraktion. Både järnbärarna och koksen måste vara rensiktade från finandelen under 5 mm och chargeringen av dessa måste styras så att en bra gasgenomströmning i schaktet uppnås. Producerad toppgas från masugnen ska användas som energikälla internt i verket och/eller i ett externt kraftvärmeverk. Grundförutsättningen är att stabil, jämn drift kan upprätthållas. Detta kommer att ge en låg bränsleanvändning (=energieffektiv ståltillverkning).

De svenska masugnarna har nått mycket långt på detta område. Fortsatt forskning på området "drift av masugn med 100 % pellets" är dock nödvändig om vi ska behålla vår ställning och Sverige även i fortsättningen ha en energieffektiv malmbaserad ståltillverkning. Vi har förutsättningen i den svenska malmen.

#### **2.6.2 Smältreduktion**

Corexprocessen är en smältreduktionsprocess i två steg, som inte använder koks. Järnmalmen förreduceras i ett första steg och smälts sedan i en smältreaktor med hjälp av kol och syrgas. Produkten blir ett smält råjärn. Processen ger ett stort gasöverskott som måste kunna användas på lämpligt sätt för att ge acceptabel ekonomi. Produktionskapaciteten i ett 10-tal anläggningar runtom i världen uppgår till mindre än 20 Mton.

#### **2.6.3 Forskning inom Jernkontoret**

Stål 2000: JK 21050, JK 21054 Styrning av slaggbildning i masugn

Stålintustrins metallurgipaket 2001-2005: JK 21057 Förbättrad hållfasthet hos koks vid höga temperaturer, JK 21059 Closed loop-styrning av masugn

Jernkontorets energiprogram 2006-2010: JK 21064 Minsta möjliga koksanvändning i masugn

I det 2010 avslutade projektet JK 21064 "Minsta möjliga koksanvändning i masugn" visades att det var möjligt att öka kolinjektionen med 20-25 kg/ton och spara koks på en av masugnarna. Arbetet fortsätter utanför projektet på masugnarna i Oxelösund sedan nya varmapparater för högre blästertemperatur körts in. Hyttsot kunde injiceras tillsammans med kol utan att det störde processen. Tornadobehandling av slam från reningen av masugns gasen gav

ett injicerbart pulver. Injektionsförsök med hyttslammet genomförs på LKAB:s experiment-masugn inom RFCS projektet "Flexinject" (RFSR-CT-2008-00001). I samma RFCS-projekt visades också att huvuddelen av fallande hyttstot i Oxelösund kunde injiceras. Projektet har visat var i masugnen och varför hyttstot bildas. Effektivare siktning av chargerade material, pellets och koks, vid masugnarna skulle minska hyttstotmängden. Andra åtgärder är att förbättra pellets mekaniska hållfasthet genom processförändringar i pelletsverket och att optimera chargeringen av pellets för att undvika kanalbildning i schaktet.

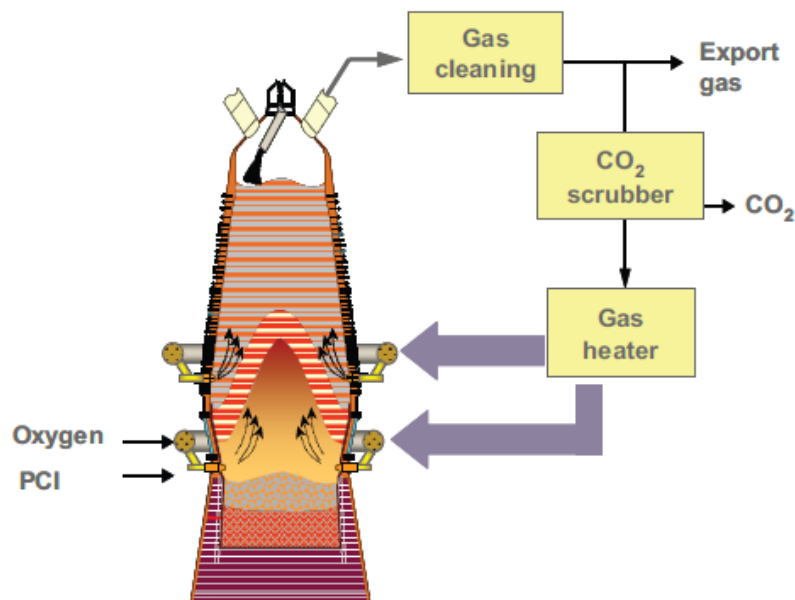
#### 2.6.4 ULCOS-projektet

Inom Europaforskningen pågår med stöd från EU:s ramprogram och RFCS ett stort, långsiktigt projekt, ULCOS, med målet att utveckla metoder för framställning av stål ur järnmalm med en femtioprocentig reduktion av CO<sub>2</sub>-utsläpp jämfört med nuvarande masugnsprocess.

Projektet är ett sexårigt EU-projekt med en ursprunglig budget på 75 miljoner euro och 48 partners i 15 länder. Svenska deltagare är LKAB, SSAB, Swerea-MEFOS och Luleå tekniska universitet.

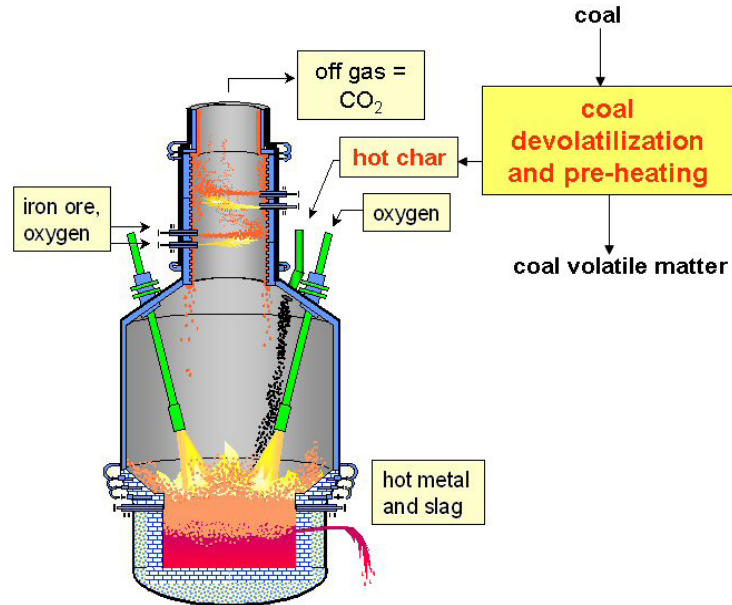
I en första fas om 18 månader inventerades, kreerades och analyserades ett mycket stort antal alternativa tillverkningsvägar baserat på olika energislag, kol, naturgas, el och biomassa. Därefter prioriterades fyra olika baskoncept som samtliga uppfyller kravet på 50 % CO<sub>2</sub> – reduktion nämligen:

- **TGRBF** (Top Gas Recycled Blast Furnace). Syrgasmasugn med "urtvättning" av CO<sub>2</sub> ur avgasen som därefter återförs till masugnsprocessen



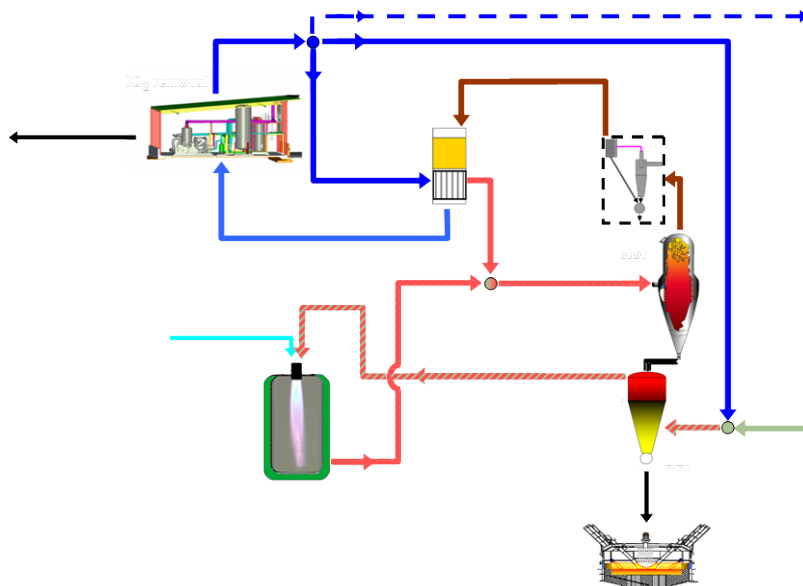
Figur 21TGRBF. Källa: LKAB

- **HISARNA** Ett så kallat smältreduktionskoncept där malm och kol injiceras tillsammans med syrgas i en reaktor. Fördelen med denna metod är att man varken behöver koksverk eller sinterverk. Den stora utmaningen är framförallt processens instabilitet.



Figur 22 HISARNA. Källa: LKAB.

- **ULCORED** är ett koncept baserat på reduktion av järnmalm med gas (naturgas eller från förgasning av kol) följt av smältning i ljusbågsugn



Figur 23. ULCORED. Källa: LKAB

- **LCOWIN** är en metod för att med hjälp av elektrolys (jämför aluminiumframställning) framställa järn. (Källa: LKAB)

De tre första metoderna förutsätter CCS (CO<sub>2</sub> Capture and Storage) d.v.s. avskiljning och lagring av CO<sub>2</sub> på stora djup i s.k. aquifiers, antingen havs- eller landbaserade. ULCOS-projektet avslutades 2010 men fortsätter enligt plan i ULCOS II med bl.a. fullskaletest av masugnskonceptet inklusive djuplagring av CO<sub>2</sub> samt test med HISARNA i stålverket i IJmuiden, Nederländerna. Intressant för svensk del är att masugnskonceptet utvecklats och testats i LKAB:s försöksmasugn i Luleå. Målet har varit att sänka CO<sub>2</sub> och inte primärt energianvändningen, men både HISARNA (ca 15 GJ/t) och ULCORED (13,5 GJ/t) innebär en potentiell sänkning av energianvändningen om 20 – 25 % jämfört med konventionell masugn (ca 18 GJ/t). Energin är beräknad för all användning från gruva till valsad plåt.

#### **2.6.5 Energieffektiviseringsmöjligheter vid råjärnsframställning.**

*Kopplat till Energimyndighetens mål.*

En halvering av stoftmängden från 18 till 9 kg sot per ton ger en energieffektivisering räknat på landets hela råjärnsproduktion med c:a 180 GWh/år.

En ökning av kolinjektionen med 40 kg/ton (motsvarande 50 % av skillnaden till bästa europainivå) ger en minskad koksanvändning med 32 kg/ton och en energieffektivisering på c:a 110 GWh/år.

*Miljö- och climateffekter*

Mindre stoftförluster sänker koksanvändningen med c:a 4 kg/ton råjärn och CO<sub>2</sub>-utsläppen med 45 kton/år.

#### **2.6.6 Utvecklingsbehov.**

Minska stoftförlusterna från masugnen.

- Effektivare rensiktning av koks och pellets så nära masugnen som möjligt. Styrning av fukthalt i koks för att minska medföljande fines
- Förbättrad beskickningsteknik. Den mätning av skiktjocklekarna och beskickningsytans rörelse, som tagits fram inom JK 21064, bör användas för optimering av gasflödet och tidig upptäckt av processtörningar som orsakar stoftförluster.
- Förändrad beskickningsteknik. Utveckling av råmaterialfördelningen över tvärsnittet genom radarmätningar och modifiering av beskickningsprogram. Inblandning av koks i järnbärlager.
- Mekaniska egenskaper (nötning) hos koks och pellets. I JK 21064 Masugnsprojektet har det i en studie visats att pellettexturen (och hållfastheten) varierar beroende på var på bandet i straight grate processen den legat. Samband mellan pellettextur och reduktionsegenskaper och hållfasthet under reduktion.
- Injektion av reduktionsgas i masugnsschaktet.



Öka kolinjektionen.

- Fortsätta det arbete som har påbörjats inom JK 21064 och RFCS-projektet Flexinject.
- Utveckling av Cowper-tekniken så att bläster-temperaturer på 1300°C kan nås (förvärmad förbränningsluft, enbart syrgas och recirkulation av rökgaser). Högre bläster-temperatur gynnar ökad kolinjektion.
- Förbättrad kolförbränning genom bättre syreförsörjning till kolpartiklarna.
- Injektion i formnivå av alternativa reduktionsmedel.

Ökad återvinning av restprodukter genom agglomering och direktreduktion.

## **2.7 Förbehandling av råjärn (Svavelrening)**

Svavelrening av råjärn genom injektion via lans av kalciumkarbid och/eller magnesium i torped eller överföringsskänk är den normala metoden som används i Europa. Raffinering till mycket låga svavelhalter görs normalt selektivt efter tappning från LD.

De svenska verken följer den normala, europeiska praxisen att svavelrena råjärnet. I Luleå svavelrenas råjärnet genom injektion av kalciumkarbid och magnesium i överförings-skänken från torped till konverter. Injektionen görs selektivt för varje charge och beror på svavelkravet för den stålsort som ska tillverkas. I Oxelösund svavelrenas råjärnet genom injektion av kalciumkarbid i torpeden. Svavelrening till mycket låga halter görs selektivt efter stålsortskrav i skänken efter tappning från LD.

Vid råjärnsavsvavlingen hamnar en del av råjärnet, 2-5 %, i slaggen som förluster. Förlusterna är högre vid svavelrening i torped. Järnet kan återvinnas genom att slaggen krossas och järnet tas tillvara genom magnetseparation och chargerats på masugnen. Den omagnetiska fraktionen går till deponi. Högkvalitativa stål ska i regel ha låg svavelhalt. Långt driven svavelrening ökar råjärnsförlusterna.

### **2.7.1 Forskning inom Jernkontoret**

Jernkontorets energiprogram 2006-2010: JK 21065 Energieffektiv raffinering av råjärn

Projektet visade att det med en flussande mineral tillsats till kalciumkarbiden är möjligt att sänka råjärnsförlusterna väsentligt vid svavelrening i överföringsskänk. Genomförda försök har visat på en årlig besparing på 145 GWh. 221 GWh/år tros komma att uppnås inom 5 år genom modifiering av slaggen med slaggbildare (ex.vis nefelinsyenit) och optimering av konceptet i kombination med Mg injektion. Råjärnsförlusterna är större vid svavelrening i torped och det är möjligt att införa samma teknik även i denna.

### **2.7.2 Energieffektiviseringsmöjligheter vid förbehandling.**

*Kopplat till Energimyndighetens mål.*

Genom att fullt ut implementera den teknik som testats inom JK 21065 kan råjärnsförlusterna vid svavelrening i skänk i Luleå sänkas från 2,5 % till 1 %. Detta ger en energieffektivisering med 270 GWh/år.

## Miljö- och climateffekter

Då råjärnsförlusterna minskar behöver mindre råjärn tillverkas vilket sänker CO<sub>2</sub>-utsläppen med 50 kton/år. Tillsats av flussande mineral gör stoftet från processen mindre miljöpåverkande än tidigare.

### 2.7.3 Utvecklingsbehov

- Råjärnsförlusterna är stora, vilket visades i det just avslutade projektet "Energieffektiv raffinering av råjärn". Teknik med industrimineral tillsats utvecklad i projekt JK 21065 Energieffektiv raffinering av råjärn optimeras för Luleåförhållanden och provas under Oxelösundförhållanden.
- Förfinna de mineraltekniska metoderna för upparbetning av slagg, dvs. separering av järnandelen från de omagnetiska svavelinnehållande komponenterna.
- Reagenseffektiviteten är ca 15 %, dvs. 15 % av den teoretiska potentialen för reagentet kalciumkarbid reagerar med svavel till kalciumsulfid

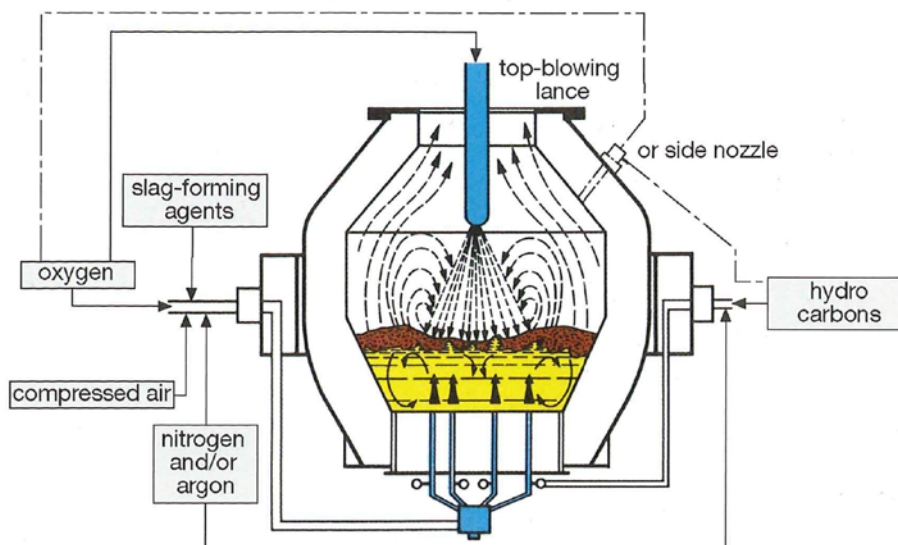
## 2.8 Råstålstillverkning

Råstål tillverkas i LD-konvertrar med bottenpolningsfunktion (LBE). I Luleå finns två konvertrar med chargevikten 130 ton. I Oxelösund finns en konverter på 220 ton. I konvertrarna färskas råjärnet och insmält skrot med syrgas.

Konvertern i Oxelösund är utbytbar (8 tim stopp) medan konvertrarna i Luleå muras om på plats (2 dygn stopp). Kampanjlängden mellan omställningarna är 2500-3500 charger. LBE innebär att botten har dysor för omrörning med argon och/eller kväve vilket ger effektivare slaggbildning och minskar oxidationen av järn till slagen.

### 2.8.1 Syrgaskonvertrar

Figur 24 visar en principskiss över en konverter med lans och dysor för bottenpolning.



Figur 24. Konverter med topplans och dysor för omrörning med inertgas. Källa: *Steel Manual*, VDEh.

- Konvertrarna chargerar med svavelrenat råjärn och skrot. Andelen skrot är 15-20 %. Dessutom sätts slaggbildare som dolomitkalk, järnmalm och bränd kalk till chargin före blåsstart och även under blåsningen. Färsknigen innebär att kolhalten sänks från c:a 4.5 % till 0.04-0.05 % genom att syrgas blåses via lans mot badytan. Luleå har subblansar (mäter temperatur) och avgasanalyssystem installerade på båda konvertrarna. Med hjälp av dessa mätningar och indata som råjärnsanalys och syrgasflöde kan processförloppet följas.

Slaggbildarna ska ge en slag som kan ta upp fosfor och kisel som oxiderats från råjärnet under blåsningen. Under blåsningen stiger temperaturen men också järnoxidhalten i slaggen på grund av oxidation av kol och järn. Järnförlusterna till slaggen ökar i slutet av blåsningen. Både för processekonomi och tidhållning är det väsentligt att veta när man har rätt temperatur och analys på kol samt ofta även vanadin och fosfor och då avbryta blåsningen för provtagning eller direkt tappning. Om blåsningen drivs längre stiger syrehalten kraftigt i stålet vilket är negativt för legeringsutbytet vid tillsats under tappning.

Omrörning av badet med argon/kvävgas genom bottenpolningen sänker järnoxidhalten i slaggen, utjämnar syrehalten i stålet och förhindrar överblåsning.

Råstålet ska vid tappning ha en förutbestämd temperatur och kolhalt. Det är dessa mål konverterprocessen styrs emot. Tappkolhalt och tapptemperatur beror på stålsort och planerad skänkmetsallurgisk behandling.

Rätt temperatur och kolhalt och ett stål tappat i skänken utan att ugnsslagg följer med ger förutsättningar för en optimal skänkmetsallurgisk behandling. Konvertrarna är utrustade med system för att detektera när slaggen kommer vid tappning i kombination med slaggstoppare.

För låg temperatur eller för hög kolhalt vid tappning kräver omblåsning. Om skänkmetsallurgin kräver höga tapptemperaturer innebär detta mer slitage på infodringen men den enda ökningen i energiåtgång är meranvändningen av syrgas. Många LD-verk har som Oxelösund skänkgagnar för effektiv värmning och legering/ behandling av stål för hela eller del av produktionen och kan på så sätt hålla tapptemperaturerna nere.

I syrgaskonverterern oxideras en del av järnet till järnoxid och återfinns som sådan i ugnsslaggen. En del av ugnsslaggen kan återanvändas som slaggbildare i masugnen.

Den energi som används i syrgaskonverterern finns huvudsakligen som kemisk energi i råjärnet.

### **2.8.2 Forskning inom Jernkontoret**

Stål 2000: JK 21051 Konverterstyrning

Stålindustrins metsallurgipaket 2001-05: JK 21058 Automatisering av LD-processen

Jernkontorets energioprogram 2006-2010: JK 21065 Energieffektiv raffinering av råjärn

Vid konverteringen minskas kolhalten i järnet. Då måste bl.a. bränd kalk tillsättas för att fånga upp föroreningar i metallen. Projektet JK 21065 har visat att det går att minska kalktillsatsen genom att återanvända kalk som redan använts i en annan del av tillverkningskedjan (som slaggbildare i skänk). Eftersom kalken som används vid konverteringen används igen i masugnen, betyder det att samma kalk kan användas i tre processer. Då kalken kräver energi vid brytning och bränning (preparering) innan användningen i stålverket, innebär resultaten att den totala energianvändningen kan minskas.

### **2.8.3 Energieffektiviseringsmöjligheter.**

*Kopplat till Energimyndighetens mål.*

Bränd kalk ersätts av recirkulerad skänkslagg i processen. I projektet visades på en möjlig

effektivisering på 5 GWh/år.

Ökad gasåtervinning i Luleå efter ombyggnad av fläktsystem. Potentialen är en energieffektivisering på 49 GWh/år.

Optimerad gasåtervinning i Oxelösund ger energieffektivisering.

Höjt järnutbyte ger energieffektivisering. +0,1 % i utbyte ger en indirekt effektivisering på c:a 10 GWh/år.

#### **2.8.4 Utvecklingsbehov**

Effektivare gasåtervinning.

- Ett optimerat totalt system för omhändertagande av gas från masugn, syrgaskonvertrar och koksverk, vilket för SSAB i Oxelösund skulle kunna innebära en högre användning av masugns- och syrgaskonvertergas i värmningsugnarna i valsverket istället för koksugns gas. Detta skulle kunna innebära att koksgas kan användas för tillverkning av transportbränsle.
- Mer högvärdig gas till gasåtervinning skulle kunna minska gasmängderna och därmed minska antalet tillfällen då LD-gasklockan är full och nygenererad LD-gas måste facklas. Detta skulle kunna möjliggöras med en ny, förbättrad gasanalysmätning online tillsammans med en bättre styrning av fläktsystemet (Luleå).

Dynamisk styrning av LD-processen

- Dynamisk styrning av syrgasblåsning, automatisering av blåsning, tillsatser mm. Med förbättrad mätteknik kan processen optimeras ytterligare.
- Fosforhalten i råvarorna (pellets och koks) ökar de närmaste åren vilket ger en högre P-halt i råjärnet. Fosforreningen i konvertern måste bli effektivare.
- Tvåslaggsförfarande för att tillverka stål med mycket låga fosforhalter.
- Bättre temperaturstyrning i kedjan konverter – skänkmetsallurgi - stränggjutning skulle kunna sänka tapptemperaturerna. Detta kan förbättras genom utveckling av mätteknik för bättre kontroll av temperaturstatus i skänkar i stålverket.

Bättre råstål till skänkmetsallurgi

- Effektivare slaggstoppning genom t.ex. förhindrande av vortexbildning.
- Förbättrad bottenspolning som ger högre järnutbyte, kortare blåstid, mindre aluminiumanvändning vid desoxidation.

### **2.9 Skänkmetsallurgi**

Råstålet färdigställs i skänkmetsallurgin där stålet desoxideras, legeringar sätts till och stålet får den önskade temperaturen för stränggjutningen. Desoxidationen är nödvändig för att inte legeringar ska oxideras av det lösta syret i stålet och gå förlorade i slaggen. Medföljande ugnsslagg innehåller järnoxid som också kan oxidera legeringarna. En snabb bildning av flytande slagg krävs för att hindra att stålet oxideras genom luftens syre. Genom omrörning med argon som tillförs via spolsten i skänkbotten eller genom lans utjämnas temperaturen och analysen på stålet i skänken och provtagning görs.

Det finns flera typer av efterbehandlingsoperationer och efterbehandlingsapparatur allt beroende på vilken produkt som man tillverkar. De viktigaste operationerna som tillämpas är

justering och homogenisering av stålet med avseende på analys och temperatur, rening av stålet med avseende på inlöst kol, syre, väte och svavel samt modifiering och avskiljning av oxider och andra icke-metalliska inneslutningar.

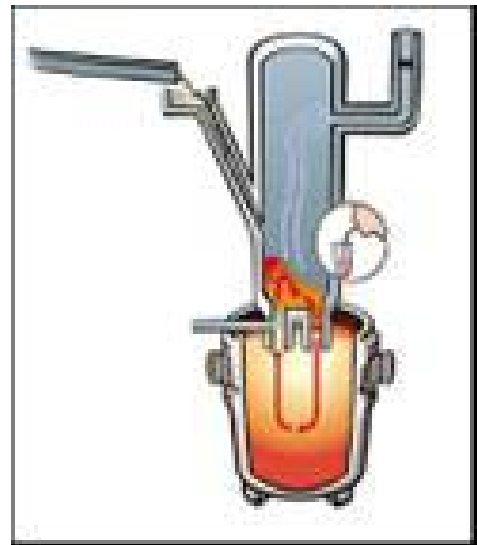
### 2.9.1 SSAB

Värmning/kylning/slutlegering görs i Luleå i en CAS-OB-anläggning (CAS-OB = Composition Adjustment Stirring Oxygen Blowing). Värmningen sker kemiskt genom att aluminium bränns med syrgas via lans och kylningen görs genom tillsats av kylskrot. Tillsatser av legeringar sker i en klocka mot blankt stålbad utan slagg och under skyddsatmosfär för att nå ett högt och kontrollerat legeringsutbyte. Legeringarna tillsätts både i styckeform och genom trådmatning. Större delen av produktionen går denna väg. I Luleå görs all svavelrening på råjärnet före konverteringen.



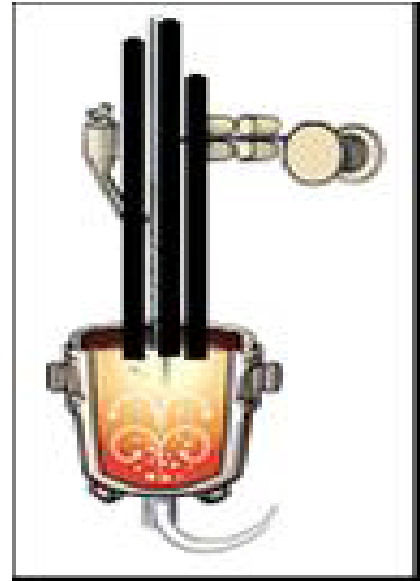
Figur 25. CAS-OB. Källa: SSAB EMEA

Produkter med krav på mycket låg kolhalt, t.ex. ULC och elektroplåt, avkolas i en RH-anläggning, som även används för avgasning av högkolhaltiga stål. Dessa stålsorter slutlegeras även i denna anläggning och skänken går direkt till gjutning.



Figur 26. RH-anläggning Källa: SSAB EMEA

I Oxelösund finns skänkkugn för värmning/varmhållning av stålet och vakuumavgasning i tank för att ta bort syre och väte. Allt stål svavelrenas genom omrörning med argon som tillförs via spolsten och/eller lans under en kalciumaluminatslagg. Värmning/varmhållning används också för att få ihop lämpliga sekvenser på gjutmaskinerna.



Figur 27. Skänkkugn. Källa: SSAB EMEA

### *Slutprodukter*

Slutprodukterna i Borlänge är varmvalsad, kallvalsad och belagd tunnplåt i tjocklekar från 0.4 till 16 mm. Mikrolegerade höghållfasta stålsorter dominerar. Krav på snäv analys, bra ytor och slagghenhet är viktiga.

Grovplåt valsas i Oxelösund i tjocklekar från 4 till 100 mm. Kylta och härdade stål är dominerande produkter. Krav på låga vätehalter är viktigt liksom inre kvalitet (frihet från segringar).

SSAB har valt som inriktning att specialisera sig på höghållfasta och kylta stål och dessa nischprodukter utgör en mycket hög andel av produktionen. Företaget är världsledande inom valda segment. På så sätt skiljer sig stålverken inom SSAB mot de flesta stålverk i Europa och världen vilka har en betydligt högre andel av låglegerade bulkprodukter.

Den valda inriktningen kräver att SSAB har en flexibel tillverkning (kundanpassade stålsorter) och kan hålla korta leveranstider. Tillverkning av nischprodukter, flexibilitet och korta leveranstider påverkar energieffektiviteten negativt då den kräver planerade utbytesförluster i stålverket vilket inte är fallet i ett verk som tillverkar bulkprodukter i långa serier.

#### **2.9.2 Skänkmellurgins betydelse för slutprodukten**

- CAS-OB är teknik för låglegerade HSLA-stål. Kemisk värmning och möjlighet att kyla samt legering i inert atmosfär på en slaggfri yta genom en keramisk klocka.
- Skänkkugn är teknik för avancerade höghållfasta stål och härdbara stål. Möjlighet till elektrisk värmning samtidigt som legering tillsätts.
- Styrning av temperaturen på stålet i skänk från tappning från konvertern till gjutning ur skänk är viktig för tillverkningssäkerheten och påverkar både föregående processteg (konverter eller ljusbågsugn) och efterföljande (gjutmaskinen).
- Desoxidationen av stålet och avskiljning av bildade desoxidationsprodukter under skänkbehandlingen är av väsentlig betydelse för stålets slagghenhet och tillverknings-säkerheten vid gjutningen.

### 2.9.3      **Forskning inom Jernkontoret**

Stål 2000: JK 23047 Avskiljning av inneslutningar i skänk och gjutlåda

Jernkontorets energiprogram 2006-2010: JK 21065 Energieffektiv raffinering av råjärn

I JK 23047 modellerades strömningen i skänk vid induktiv och/eller gasomrörd smälta. Viss modellering gjordes av reaktioner mellan slag och metall och mellan gas och stål. Projektet gav en ökad förståelse för makrokinetikens inverkan på processen. Flera stålverk utnyttjade detta till att optimera sina processer. Användning av skänkslagg som slaggbildare i syrgaskonvertern för att ersätta en del av den brända kalken provades i JK 21065 (vid smältning av en skänkslagg krävs energi, som återvinns i syrgaskonvertern). En effektiviseringsmöjlighet på 5 GWh/år påvisades i Luleå.

### 2.9.4      **Utvecklingsbehov.**

- Temperaturstyrning från konverter till gjutning är mycket viktig. Mätning av temperatur på stål i ugn och i skänk är jämförelsevis säker. Inverkan av tillsatser av legeringar och slaggbildare på ståltemperaturen i skänk är väl kända. Trots detta måste en stor del av chargerna värmas eller kylas för att få rätt temperatur till gjutningen, vilket också stjälar tid från andra operationer. Den stora osäkerheten är värmeinnehållet i skänkens infodring efter brännare, tömning och varierande väntetider med eller utan lock.
- Temperaturstyrning och behovet av värmning kontra kylning. Utred vad som är mest energieffektivt.
- Bättre avskiljning av desoxidationsprodukter och minskad reoxidation för att förhindra igensättningar i gjutningen. Detta ökar det metalliska utbytet och bidrar därmed till en minskad energianvändning per enhet produkt.
- Keramik i stålskänkar. Användning av keramik, isolering av skänkar samt övrig keramik. Stålindustrin har ett behov av att kompetensen inom industrin, på bransch-instituten och högskolorna höjs på det keramiska området.

## 2.10 Energianvändning vid tillverkning av malmbaserat stål

### 2.10.1 Tillverkning

Vid tillverkning av stål med järnmalm som råvara används energi främst i masugnen vid reduktionen av sinter/pellets till järn och vid tillverkningen av sinter eller pellets. Masugnen kräver styckeformiga råvaror för att processen ska fungera. Koks/koksgrus från koksverket och malt kolpulver ger energin in i den malmbaserade metallurgin. Koksverket blir stålverkets energikälla. Injektion av kolpulver genom formorna kan dels ersätta en del av koksen i masugnen men även ge en energieffektivisering. En ökning av kolinjektionen med 10 kg/ton råjärn ersätter 8 kg koks motsvarande 27 GWh/år.

Vid färskning i syrgaskonvertern och smältning av skrottpillsatsen är det kemisk energi i råjärnet som används och under den skänkmetsallurgiska färdigställningen och gjutningen är det huvudsakligen termisk energi ur det smälta stålet som förbrukas. Råstålet som tappas ur konvertern ska ha en övertemperatur som motsvarar temperaturförlusten hos stålet under den skänkmetsallurgiska behandlingen fram till stelandet i gjutmaskinen. Om temperaturförlusten blir för stor eller behandlingstiden blir för lång kan stålet värmas med elektroder i en skänkuugn eller kemiskt genom att syrgas förbränner aluminium. Denna del av energitillförseln är dock försumbar jämfört med energiåtgången i sinterverk och masugn. Vid inbränning eller varmhållning av den eldfasta infodringen i skänkar och gjutlådor används i regel koksugns gas eller hyttgas i brännarna.

### 2.10.2 Alla delprocesser använder elenergi men fossil energi dominerar.

Energikällan i den malmbaserade metallurgin är stenkol. För att masugnsprocessen ska fungera krävs att kolet, som används som bränsle och reduktionsmedel, är styckeformigt. Stenkolen bakas ihop till koks i koksverket genom en torrdestillationsprocess. Elektrisk energi används för att driva utrustning i koksverket men koksugnsbatteriet värms huvudsakligen genom eldning med den egna gasen från stenkol. Koksverket producerar koks som används i masugnen och koksugns gas som används i koksverket, för värmning av varmapparaterskänkar-ugnar och överskottet används i kraftvärmeverk.

I ett sinterverk drivs bandet, fläktar, krossar och siktare med el medan energin för själva sinteringen kommer från koksgrus som sätts till sinterblandningen. Vid tändningen av sinterblandningen används gasbrännare med hyttgas eller koksugns gas som bränsle. Ett typiskt europeiskt sinterverk använder c:a 50 kg koksgrus/ton sinter. Koksgruset står för 85-90 % av energiåtgången och elen för 5-10 %. Totala energianvändningen är 400 kWh/ton sinter.

Även i ett pelletsverk används elenergi för att driva band, kiln, kylare, fläktar och siktare m.m. medan olja/kolpulver används i brännare för att nå upp till sintringstemperaturen. I ett verk med magnetitmalm som råvara, som i de svenska verken, står oxidationen till hematit för c:a 60 % av processens energibehov. I ett sådant verk blir elens andel av energianvändningen högre än i ett verk med hematit som insats då fläktar används för att återföra energi ur avgaserna till processen. Totalt blir dock energianvändningen väsentligt lägre i ett magnetitbaserat verk, 80 kWh/ton jämfört med 180 kWh/ton. I ett typiskt verk i norra Sverige utgör el därför c:a 20-25 % av energitillförseln i processen medan resten utgörs av kolpulver eller olja.

I masugnen drivs blåsmaskinerna med el medan energin för reduktion och upphettning av beskickningen kommer från förbränningen av koks. Masugnen är en motströmsreaktor där energin från förbränningen mycket effektivt förs över till beskickningen. (Gastemperaturen vid förbränningen är 2300 °C och hyttgasen som lämnar schaktet håller 150°C.) En del av den CO-rika hyttgasen används för att värma varmapparaterna som förvärmer blästerluften till



1200 °C. Överskottet av hyttgasen används i kraftvärmeverk för att producera el och fjärrvärme eller som bränsle i värmebehandlingsugnar. Masugnsprocessen förbrukar c:a 4950 kWh/ton råjärn som koks och injektionskol.

Konvertermaskineri, transportband och traverser som används för att flytta material drivs elektriskt. Rullar och pumpar i stränggjutningen drivs elektriskt. Den totala elanvändningen inklusive all kringutrustning är mindre än 5 % av den totala energianvändningen.

Som framgår av ovanstående dominerar dock användningen av fossil energi och elenergi-användningen utgör en mindre del av insatt energi i ett malmbaserat stålverk. Vi får en energi-effektiv malmbaserad ståltillverkning om vi kan tillverka råjärn med låg bränsleanvändning men utbytesförluster senare i kedjan (stålverk och stränggjutning) försämrar energieffektiviteten.

### **2.10.3 Inverkan av utbytet i de olika processtegen på energianvändningen.**

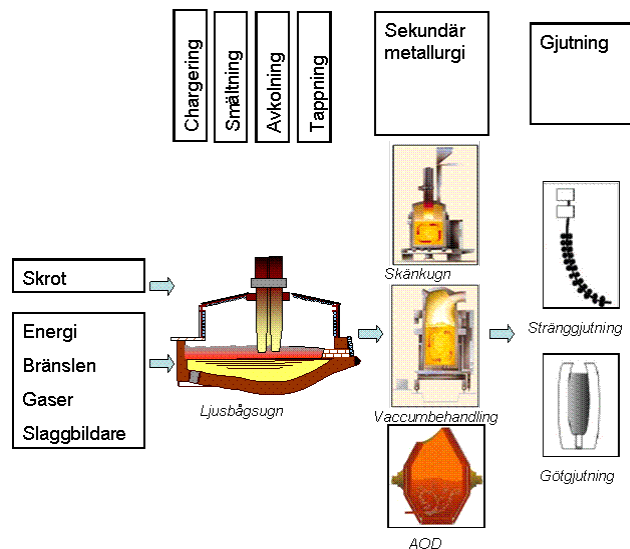
Stålverkets slutprodukt är stränggjutna ämnen för valsning. Innan dess ska ett antal processteg passeras: Sinter/pelletsverk, masugn, råjärnsavsvavling, syrgaskonverter, skänkmetsallurgi, stränggjutning och ämnesbehandling. Alla dessa processer ger ett primautbyte som går vidare till nästa steg. All fossil energi sätts in i de första stegen i tillverkningskedjan för att tillverka råjärn. Utbytesförluster i de senare stegen innebär att mer råjärn måste tillverkas för att få önskad mängd färdigt stål och detta kommer att förbruka mer energi. Energianvändningen i ett stålverk bör räknas på prima levererad produkt.

### 3 Skrotbaserad tillverkning

#### 3.1 Allmänt

Svenskt stål är synonymt med högkvalitativa specialstål som till största delen exporteras över hela världen. Alla skrotbaserade verk baserar sin produktion på återvunnet skrot – köpskrot och fallande skrot inom verken - samt ferrolegeringar. Trots råvarans mycket varierande sammansättning och kvalitet lyckas man alltså tillverka stål med högt ställda krav på renhet och produktgenskaper.

I Halmstad tillverkar Höganäs AB järnpulver för pulverstål, Ovako gör kullagerstål i Hofors, i Hagfors gör Uddeholms AB verktygsstål, Scana Steel tillverkar smidda specialprodukter i Björneborg, Erasteel gör snabbstål i Söderfors, Åkers gör valsar och rostfritt stål framställs i både Avesta, Sandviken och Hallstahammar. Även vid ett handelsstålverk som Ovakos stålverk i Smedjebacken tillverkas i dag högkvalitativa hårdbara stål.



Figur 28. Översiktlig beskrivning av skrotbaserad metallurgi. Källa: Eric Burström/Swerea MEFOS

Samtliga elektrostålverk använder stora mängder stålskrot som efter insamling och sortering bearbetas på olika sätt innan det skickas till stålverken. Där lastas skrotet in i smältugnarna och det flytande stålet går sedan till olika behandlingssteg innan det gjutes och sänds till manufakturering.

Tillverkningskedjan för svenskt specialstål är mycket varierande beroende på den produkt som tillverkas. Någorlunda likartad är endast smältningen som nästan uteslutande görs i ljusbågsugnar (alternativt induktionsugnar, endast mindre tonnage) medan efterbehandling uppvisar stora olikheter och gjutningen sker antingen till s.k. göt eller kontinuerligt via stränggjutning.

Ljusbågsugnar för skrotsmältning finns i Smedjebacken, Hofors, Hagfors, Halmstad, Björneborg, Söderfors, Avesta och Sandviken. Råvaran skrot består av internt i verken recirkulerat skrot, fallande skrot från verkstadsindustrin och köpskrot. I Avesta och Sandviken tillverkas rostfritt stål med högt innehåll av krom och nickel och de utgår därför främst från sådant skrot för att återvinna de dyra legeringarna. Övriga verk utgår huvudsakligen från olegerat skrot men alla tillsätter varierande mängder ferrolegeringar som ex.vis. innehåller kisel, mangan, krom, nickel, molybden, vanadin, bor och niob.

Smältningen av skrot är den enskilt största förbrukaren av energi på de skrotbaserade stålverken, men den totala energikonsumtionen påverkas också indirekt av utbyten vid

efterföljande behandlingssteg; skänkbehandling, gjutning, valsning och övrig bearbetning inom verket.

## 3.2 Skrothantering

### 3.2.1 Processbeskrivning

I Sverige genereras ca 3 miljoner ton skrot årligen varav cirka 1 miljon ton går på export. Eftersom allt skrot tas tillvara och smälts om, sparas stora mängder energi jämfört med om det skulle ersättas med stål från malmbaserad tillverkning, ca 3700 kWh/ton. Med 2010 års prisnivå på ca 2000 kr/ton betyder det att skrotet utgör ett kapital på 6 miljarder kronor och i jämförelse med malmstål, en energiresurs motsvarande 11 TWh/år.

Skrothanteringen sköts i Sverige av ett antal oberoende firmor men störst och dominerande är Stena AB. Skrotet klassas efter sammansättning, föroreningsgrad och form - mer eller mindre tungt skrot. En del skrot, såsom vitvaror och bilar, fragmenteras med efterföljande avskiljning av icke önskvärda beståndsdelar som elledningar av koppar. I Sverige finns nio fragmenteringsanläggningar med en sammanlagd årskapacitet om ca 750 000 ton<sup>2</sup>.

Skrot innehåller alltid föroreningar i varierande mängd (fluff, fett, olja, plast, färgrester o.s.v.) som kan tyckas vara fördelaktiga ur energisynpunkt men som är svåra att utnyttja eftersom de oftast brinner upp tidigt under kraftig rökutveckling. De är därför oönskade av stålverken. Andra komponenter som inte är önskvärda utgörs av energikrävande barlastmaterial (jord, glas, cement m.m.). Skrot kan även innehålla föroreningselement som medför att en kostsam rening (fosfor, svavel) eller stor utspädning (ex. koppar) behövs.

Koppar i skrotet har sedan länge utgjort ett problem och har delvis lösts vid fragmenteringsanläggningarna. Ett problem är dock svårigheten att detektera koppar i skrot varför en del måste handsorteras.

En viktig tendens är att skrotets sammansättning blir mer och mer komplex. Det blir allt svårare att hitta ”rent skrot”, d.v.s. skrot med låga legeringshalter. Exempelvis håller s.k. ”Bilbunt” förhöjda halter av mangan och fosfor p.g.a. att de numera legeras med dessa element för att förbättra de mekaniska egenskaperna hos produkterna. Rostfritt stål legeras i högre utsträckning med mangan för att på så sätt spara nickel. T.o.m. tenn kan användas som legeringsämne för rostfritt stål.

Företag som Uddeholm och Höganäs måste i högre utsträckning än förut lita till ”ren” järnråvara i form av tackjärn (från masugnar) eller DRI/HBI (Direct Reduced Iron resp. Hot Briquetted Iron). DRI/HBI framställs från malmer genom reduktion med naturgas eller kol framförallt i länder som Indien, Iran, Saudi-Arabien, Ryssland, Mexiko och Venezuela. I Sverige är det särskilt Höganäs som använder DRI dels genom egen produktion i Höganäs och dels i Halmstad där importerad DRI smälts tillsammans med skrot.

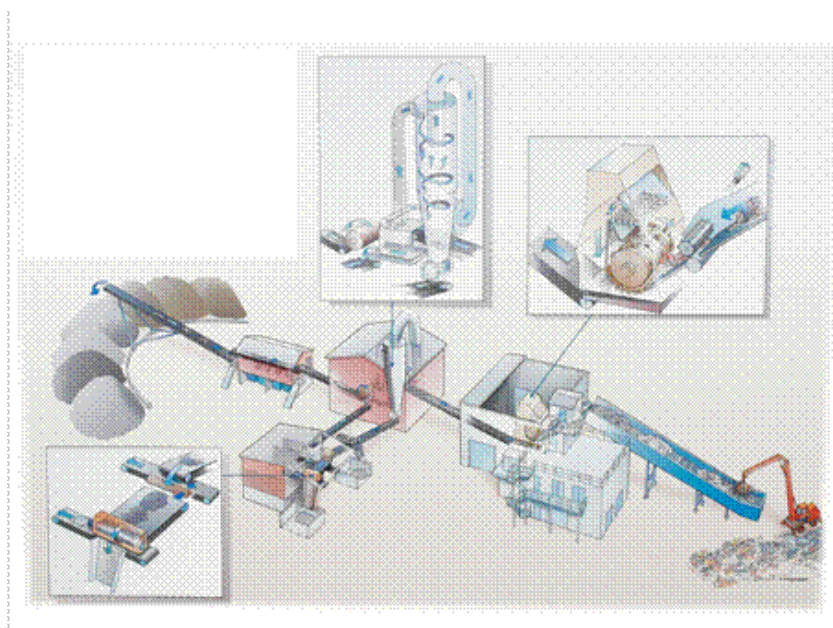
På grund av skrotets ökade komplexitet och bristen på ”rent” skrot framstår det som mycket viktiga utmaningar för framtiden att säkert kunna omvandla skrot till högvärdigt stål liksom att säkra tillgången på rena råvaror (DRI, tackjärn o.s.v.).

I **Figur 29** visas ett exempel på upparbetning av insamlat skrot i en s.k. fragmenteringsanläggning. Hoppresade bilar, kylskåp och andra vitvaror skickas till en hammarkvarn där skrotet sönderdelas och delas upp genom vindsiktning i en tung metall-del och en lätt organisk

---

<sup>2</sup> Privat kommunikation G Mathisson JBF (Järnbruksförbundet)

del. Den lätta fraktionen som kallas Fluff (engelska ASR, Automobile Shredder Residue) innehåller plast, tyg o.s.v. och har ett högt värmevärde men innehåller tyvärr också ämnen som koppar och klor och är därför ett material som inte lätt kan återvinnas.



**Figur 29.** Schematisk bild av en återvinningsanläggning. *Källa: Kuusakoski OY Skelleftehamn.*

Skrothanteringen i Sverige sköts av ett antal oberoende företag. Sortering och klassning sker efter den s.k. Skrotboken, utgiven av den svenska stålindustrin i samarbete med skrotbranschen.

### **3.2.2 Energieffektiviseringsmöjligheter**

*Kopplat till Energimyndighetens mål*

Ett maximalt omhändertagande av skrot spelar stor roll för energiutnyttjandet. De forskningsinsatser som görs på området syftar till att sortera skrot på ett effektivare sätt och att finna metoder att bättre utnyttja element i skrotet som legeringsämnen. För vissa stålsorter kan element ses som nyttiga legeringselement medan de i andra ses som föroreningar.

*Miljö och climateffekter*

Varje ton stål tillverkat från skrot i stället för malm minskar CO<sub>2</sub>-utsläpp med ca 1,3 ton<sup>3</sup>.

### **3.2.3 Forskning inom Jernkontoret**

De insatser som har gjorts – eller är pågående - i JK-regi sker främst inom det Mistra-finansierade programmet "Stålkretsloppet" men även inom andra kommittéer har sådana insatser utförts.

- **Fragmentering:** Flödena vid fragmenteringsanläggningar har kartlagts för att klargöra hur väl separeringen av olika materialsorter görs och kan göras. Genom

---

<sup>3</sup> Ref 3 J P Birat, Steel and CO<sub>2</sub> – the ULCOS program, CCS and Mineral Carbonisation using Steelmaking Slag, [www.ulcos.org](http://www.ulcos.org)

att utveckla tekniken att finfördela skrotet kan variationerna i dess sammansättning och densitet minskas.

- **Laseranalys:** Analysering av skrot med hjälp av laserteknik för att få fram den kemiska sammansättningen är en teknik som utvecklas för snabb bestämning av skrotets metallinnehåll. Stålintustrin väntas här få tillgång till en teknologi som kan komma att reducera behovet av jungfruliga metaller vid användning av skrot för tillverkning av nytt stål.
- **Skrotflödet i samhället:** Forskning pågår för att kartlägga det totala skrotflödet i samhället. Med bättre kunskaper skapas förutsättningar för ökad återvinning och bättre styrning av skrotsorter för optimerad skrotanvändning. Stålintustrin får möjlighet att effektivisera sin energianvändning, stora ekonomiska värden tas till vara och miljöbelastningen minskar.
- **Föroreningar = värdefulla legeringselement:** Att det som hittills har betraktats som skadliga föroreningar, t.ex. nickel och koppar i kolstål i stället kan ses som värdefulla legeringselement genom att dessa påverkar vissa materialegenskaper positivt och att genom detta synsätt "tillåta" en högre användning av skrot vid tillverkning av stål som tidigare krävt en malmbaserad metallurgi, ger stora möjligheter för svensk stålindustri.
- **Högre legeringsutbyten.** Inom Stålkretsloppet pågår ett par projekt med mål att öka utbytet av legeringsmetaller genom att dels minska förlusterna till slaggen, dels utvinna metaller ur slaggen. I båda fallen erhålls en slagganalys som underlättar vidare användning.
- **JK 23019:** Inom bruksforskningskommittén JK 23019 förs ett ständigt arbete med att förbättra "Skrotboken", d.v.s. det verk som tjänar som riktlinjer för klassning av skrot. Dessutom bevakas situationen vad gäller radioaktiv kontaminering i skrot.

#### **3.2.4 Utvecklingsbehov**

Som tidigare nämnts spelar ett maximalt omhändertagande av skrot en stor roll för energieffektiviseringen inom stålindustrin. Skrot, ferrolegeringar och oxidiska råvaror används i varierande mängd vid de svenska verken. Att utnyttja dessa maximalt kan spara stora energimängder i form av minskat råvarubehov, alternativt minskad frekvens av skrotchager som beror på okänd råvarusammansättning. Exempel på utvecklingsbehov inom området ges nedan.

- Skrotet bör renas från komponenter som ger problem i senare delen av produktionskedjan som t.ex. zink som hamnar som stoft i rökgasreningen och/eller organiskt material som omöjliggör tät ugnsmältning
- Nya smältkoncept för ökat utbyte av legeringsmetaller
- Återvinning av brännskrot, d.v.s. metallråvara som hamnar i våra hushållssopor samt ursortering av koppar ur brännskrotet
- Automatiska detekteringsmetoder behövs för en snabb och säker bestämning av skrotets sammansättning
- Direkt smältning av fragmenterat skrot inkl. utnyttjande av restenergin i "fluff"
- Vidareutveckling av metodiken för laseranalys som metod att sortera skrot

### 3.3 Fövärmning

#### 3.3.1 Processbeskrivning

Samtliga svenska smältugnar är satsvis matade kärl där skrotet chargerats, ett ugnsvälv svängs på och smältningen startas. Vid några av verken förvärms skrotet genom att den varma gasen från smältugnen dras genom skrotkorgarna. På detta sätt befrias skrotet från is, snö och vatten. Därmed minskar risken för explosioner vid chargeringen. Samtidigt minskar energibehovet vid smältning något (10 – 20 kWh/ton)

I dag utnyttjas värmen i avgasen för torkning och viss fövärmning dock begränsat av miljöskäl p.g.a. att, i skrotråvaran förekommande, olja och fetter brinner upp under bildande av miljöbelastande förbränningsprodukter. Många försök har genom åren gjorts att återvinna energin från avgaser men även att förvärma skrotet separat. Syftet är naturligtvis att minska energibehovet för själva smältförloppet. Teoretiskt skulle bortåt en fjärdedel av smältenergin, ca 100 kWh/ton, kunna ersättas på detta sätt. Detta har visat sig vara mycket svårt, speciellt i diskontinuerligt arbetande processer även om otaliga koncept har föreslagits och utprovats (elugnar med integrerade schakt, Contiarc m.fl.). Fristående fövärmningsanläggningar har tidigare varit i bruk men lagts ner och nya förslag har ännu inte realiserats i driftskala.

#### 3.3.2 Energieffektiviseringsmöjligheter

*Kopplat till Energimyndighetens mål*

Kombinerad fövärmning och ytrening av skrot är ett exempel på nytänkande med stor energieffektiviseringspotential. Förvämt skrot skulle kunna minska elförbrukningen vid smältning med upp till 100 kWh/ton (fövärmning till 600°C = 92,5 kWh/t) eller bortåt 150 GWh/år.

*Miljö och climateffekter*

Separat fövärmning inklusive gasrening utanför smältugnen ger renare skrot och därigenom mindre utsläpp av komplexa kolväten och andra skadliga komponenter i rökgaser. En stor fördel med en fristående fövärmningsanläggning är också att gasmängden som skall renas är mycket mindre jämfört med gasmängden från ljusbågsugnen och möjliggör därför ett bättre omhändertagande av besvärliga gaskomponenter.

#### 3.3.3 Forskning inom Jernkontoret

Ytrening av skrot är en teknik som ska bredda användningen av färg- och metallbelagt skrot som råvara till ett ökat antal stålsorter. För stålindustrin innebär användning av ytrenat och förvämt skrot att både energi-användning och koldioxidutsläpp kan reduceras. Dessutom kan den avdrivna zinkbeläggningen komma att återanvändas inom zinkindustrin. Projektet JK 88020 "Skrotrening" ingår som en viktig del i Stålkretsloppet finansierat av Mistra och de svenska stålverken. Projektet fortsätter som ett RFCS-projekt med benämningen PROTECT

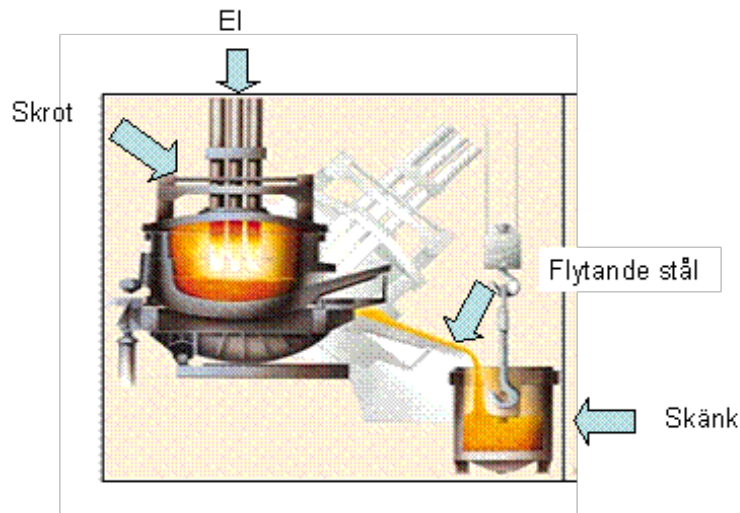
#### 3.3.4 Utvecklingsbehov

Man bör sträva efter att ersätta elbehov vid smältning med energi från restprodukter som finns tillsammans med skrotet. Exempelvis är energimängden "fluff" från fragmentering av bilar så stor att den skulle räcka till att smälta allt skrot i Sverige. Separat smältning av skrot med energirika restprodukter bör undersökas.

Separat rening av försinkat skrot för att erhålla en flexiblare användning av skrotet, en bättre zinkråvara och minska stoftmängden i ljusbågsugnen. Detta gäller även skrot till LD-processen.

### 3.4 Smältning

I en ljusbågsugn chargerar man skrot genom att valvet med grafit elektroderna svängs åt sidan och skrotkorgen töms i ugnen. När skrotet är smält tappas det flytande stålet (temp ca 1700°C) i ett transportkärl (skänk) för vidare behandling före gjutning.



Figur 30. Ljusbågsugnen. Källa: Uddeholm

#### 3.4.1 Processbeskrivning

I figur 30 visas en schematisk skiss av en ljusbågsugn och hur den arbetar. Smältningen av skrot och andra råvaror sker i ugnar med chargevikter mellan 30 och 130 ton. En alternativ smältmetod utgörs av induktionsugnar i upp till 10 tons skala. Skrot chargerar genom att valvet med grafit elektroderna svängs åt sidan och skrotkorgen töms i ugnen. När skrotet är smält tappas det flytande stålet i ett transportkärl, skänk, för vidare behandling före gjutning.

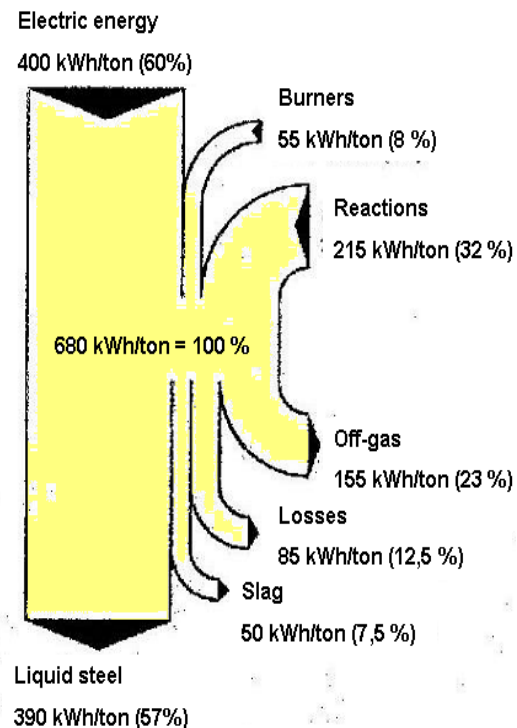
En jämförelse av typiska energibalanser för ljusbågsugnar och olika typer av stålprodukter visar inte på några dramatiska skillnader. Total energiförbrukning per ton i själva ljusbågsugnen varierar mellan 650 och 800 kWh/ton för låglegerade och höglegerade stålsorter. Ljusbågsugnarnas specifika elförbrukning (smältkraft) varierar normalt mellan 400 och 700 kWh/ton beroende på skrotkvalitet och tillverkad stålsort. Andra tillsatsenergier är kol för skumning (ca 5 kg/ton) och syrgas (mellan 3 – 20 m<sup>3</sup>n/ton) för att skära skrot och färska bort inlöst kol och oxidera andra element, t.ex. fosfor.

Ugnarna chargerar med två till fyra skrotkorgar per smältning. Smältningen tar mellan 50 och 120 min och under den senare delen av smältningen injiceras kol och syrgas för att få ett skummande slaggsikt som möjliggör att ugnen kan köras med hög effekt fram till tappningen.

De flesta svenska ljusbågsugnar är utrustade med brännare för att möjliggöra en ytterligare energiinsats. Brännarna är placerade i de s.k. cold spots, mellan elektroderna. Energin blir därigenom mer jämnt fördelad i ugnen och nedsmältningsförloppet blir snabbare.

Ugnsgaserna leds via kylda kanaler till stoftrening där zink från galvaniserat skrot hamnar. Till gasreningen går också luft från kringutrustningar och lokaler vilket gör att behandlade gasmängder blir mycket stora. Totala flöden på över 1 000 000 m<sup>3</sup>n/tim är inte ovanliga.

I **Figur 31** visas ett exempel på energibalans för en ljusbågsugn. Det smälta stålet har en temperatur av ca 1700°C och för själva smältningen av ett ton stål samt upphettning till tapptemperatur krävs 350 – 390 kWh/ton.



**Figur 31** Energibalansen för en modern effektiv ljusbågsugn. Källa: Eric Burström och Ehle et al, *Finger shaft technology : Latest improvements and results, Steel World, vol. 3, No 2, p. 24/32.s*

Anmärkningsvärt är hur mycket energi som förloras via avgaserna (20 – 30 %). Detta beror på skrotets innehåll av brännbara ämnen (plast, fett, olja, färger o.s.v.) som gör att måste man ha en förhållandevis öppen ugn och stora luftöverskott.

Ett intressant alternativ till svenska ljusbågsugnar, Consteel-processen<sup>4</sup>, som finns etablerad på många håll, bl.a. i Norge, är en kontinuerlig smältmaskin där alltså valvet inte behöver svängas av vid chagering. Förvärmning av skrotet sker på det långa chageringsbandet vilket gör den mycket energieffektiv. I **Figur 32** visas en skiss över en sådan anläggning.

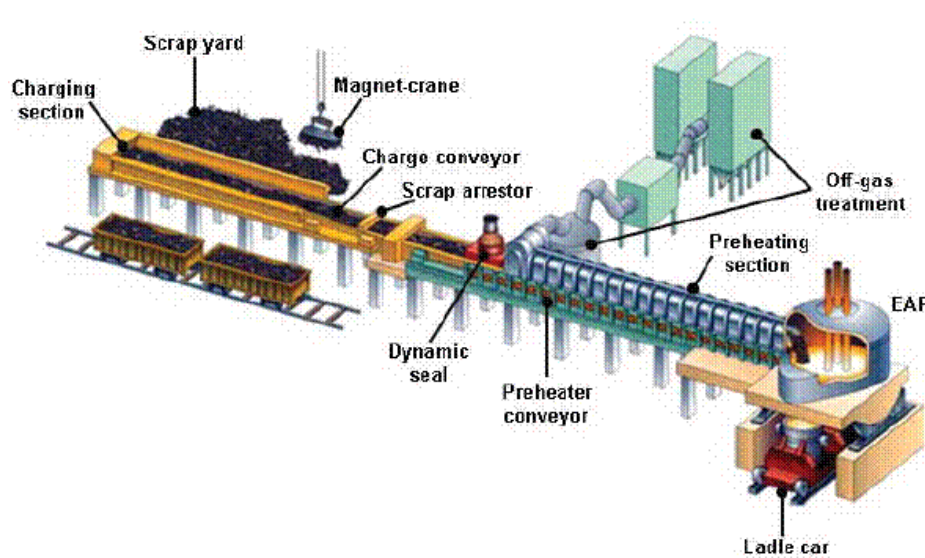
Typiskt och gemensamt för ugnarna är att ungefär 20 % eller 100 – 150 kWh/ton är förluster till avgas<sup>5</sup>. Här ingår både fysisk och kemisk (oförbränd vätgas och kolmonoxid) energi. Flera koncept har utprovats för att ta tillvara den fysiska energin genom värmeväxling med avgas i ett schakt i direkt anslutning till ugnsfatet och den kemiska energin genom efterförbränning av kolmonoxid i ugnsrummet/skrotet.

Samtliga svenska ljusbågsugnar körs enligt förbestämda smältprogram som är avpassade för det material som lastats in.

<sup>4</sup> P Agenti, M Bianchi Ferri, The EAF technology evolution and Consteel system, Innovation in EAF and in Steelmaking Processes, Milan, 27 – 28 May 200

<sup>5</sup> H Pfeifer, Energy Balance of the Electric Arc Furnace, Electrical Engineering of Arc Furnaces, Hamburg, Sept 16 – 19, 2003





**Figur 32.** Consteelprocessen. En kontinuerligt matad smältprocess där skrotet tillsätts via ett lamellband där skrotet förvärmns. Källa: P Agenta, M Bianchi Ferri, *The EAF technology evolution and Consteel system, Innovation in EAF and in Steelmaking Processes, Milan, 27 – 28 May 2009.*

### 3.4.2 Energieffektiviseringsmöjligheter

Eftersom verkningsgraden för tillförd energi i en ljusbågsugn endast är 50-60 %, finns stora möjligheter till energieffektiviseringar<sup>6</sup>. Att, för befintliga ugnar, arbeta i områden med de energiförluster som förekommer är självklart nödvändigt. Upplastningsstrategier för att skapa bra smältförhållanden, förvärmning av skrot, utnyttjande av energi i plast, fluff m.m. genom förbränning i ugnsutrymmet samt utveckling av skumslaggspraxis är några exempel på sådana områden. Nya processer, t.ex. Consteelprocessen, **figur 32**, kan ge energieffektiviseringar genom att det inte är nödvändigt att stanna processen för att lasta in mer råvaror eftersom ugnen här matas kontinuerligt med lättsmält skrot.

#### *Kopplat till Energimyndighetens mål*

Effektiv förbränning i ugnsrummet ger möjlighet till direkt besparing av elenergi mellan 20 och 100 kWh/ton beroende på verk, motsvarande 40 - 200 GWh/år i Sverige.

#### *Miljö och climateffekter*

Bättre förbränning, tät ugn och kontinuerliga smältprocesser betyder lägre bildning och utsläpp av skadliga komponenter i rökgaser.

### 3.4.3 Forskning inom Jernkontoret

Inom Stålindustrins metallurgipaket 2002-2006 genomfördes projektet " Statistisk analys av skrot och power-off tid vid svenska ljusbågsugnsverk", (JK 23027). Projektet byggde vidare på ett tidigare energiforskningsprojekt som ledde fram till POS, ProcessOptimeringsSystemet vilket installerades på fyra stålverk. Genom projektet kunde legeringsämnehaltena predikteras bättre och power-offtiderna minskas. Den totala energieffektiviseringen uppskattades till 66 GWh/år.

I Jernkontorets energiprogram 2006-2010 ingick projektet JK 23028, "Styrning och övervakning av slaggbildningsförloppet i ljusbågsugnen". Genom projektet ökades kunskapen

<sup>6</sup> D Zuliani et al, EFSOP Holistic Optimization of Electric Arc Furnaces – Past, Present and Future, Innovation in EAF and in Steelmaking Processes, Milan, 27 – 28 May 2009

om slaggbildningsförloppet, framför allt vad gäller det för rostfria stålsorter. Modeller för feldetektering i skrotåvarans sammansättning togs fram. Sammantaget kan detta leda till en årlig energieffektivisering på 39 GWh.

Inom Stålkretsloppet har ett antal projekt drivits med miljö- och därmed också energieffektiviseringssyfte:

- "Ökat metallutbyte vid smältning av stål" är teoretiskt möjligt genom metallurgisk manipulering under smältförloppet. Målet är att skapa sådana förhållanden att metaller överförs till stålet i stället för till slaggen. Detta innebär minskat behov av jungfruliga metaller, samtidigt som slaggen kan ges nya användningsområden.
- "Återvinning av slag" är tekniskt möjligt genom utveckling av nya metoder för lakning av olika metaller ur slagger, t.ex vanadin, och behandling av slagger så att de kan användas som t.ex isoleringsmaterial eller cementråvara. Vissa slagger kan också användas som ny slaggbildare i stålprocessen, vilket minskar behovet av ny kalk. Återvinning av slag minskar både behovet av deponering och förbrukningen av nya naturresurser vid ståltillverkningen.

#### 3.4.4 Utvecklingsbehov

Eftersom ljusbågsugns energiförluster är tidsberoende, utgår de de utvecklingsbehov som finns ofta från produktivitetshöjningar. Även andra åtgärder som förbättrad mätteknik kan minska energiförlusterna<sup>7</sup>.

- Vidareutveckling av mätteknik för snabb analysering av ugnsgaser samt implementering av teknik för efterförbränning i ugnsrummet.
- Fortsatt utveckling av skumslaggsteknologi för smältning av rostfritt och höglegerat stål genom tillsats av gasalstrande briketter i ugnen.
- Undersökningar av fördelarna med ett mer kontinuerligt smältförlopp vad gäller avgasrening, eltillförsel, kemisk energi etc.

### 3.5 Skänkmetsallurgi / Efterbehandling

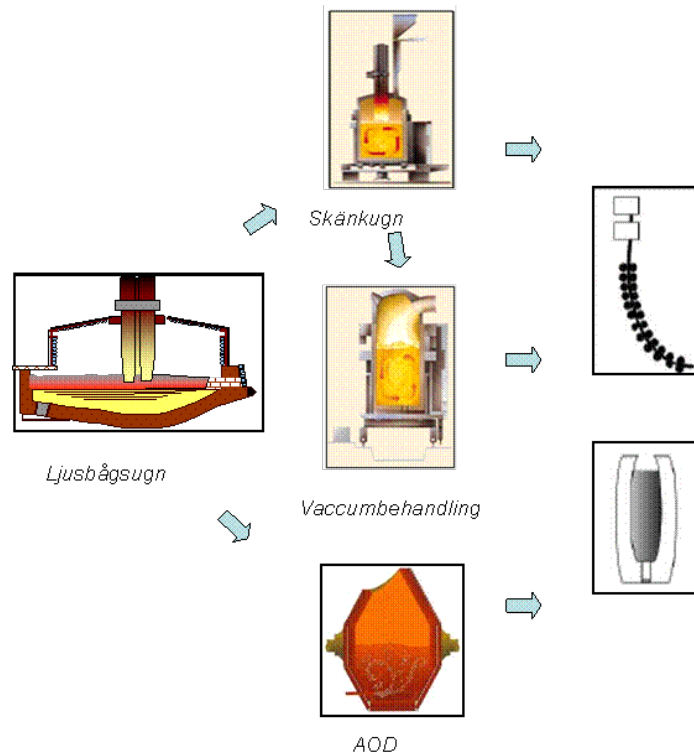
#### 3.5.1 Processbeskrivning

Alla svenska stålverk, integrerade såväl som skrotbaserade, har någon form av efterbehandling av det flytande stålet efter tappningen från smältugnen och före gjutningen. Tidigare gjordes allt metallurgiskt arbete i primärugnarna men under 1970-talet kom ljusbågsugnen att i ökande grad användas endast för smältningsarbete - raffinering kom att utföras i skänkbearhandlingsstationer eller skänkgugnar.

I **Figur 33** visas en sammanställning av olika efterbearhandlingsoperationer. Efter smältning i ugnen tappas det flytande stålet i en gjutskänk och transporteras till en bearhandlingsstation för att desoxideras, legeras och färdigställas för gjutning. Den önskvärda temperaturen för gjutningen ställs in, antingen genom påvärmning med ljusbågar eller svalning genom naturlig värmeledning, strålning och konvektion. Bearhandlingstiden i skänk varierar från fall till fall men är normalt kopplad till takten i stålverket, d.v.s. ca. 60 minuter.

---

<sup>7</sup> H J Krasing et al, Laserbasierte Nachverbrennungssteuerung im Elektrolichtbogenofen, Stahl und Eisen 126 (2009) Nr. 9



**Figur 33. Förenklad bild av efterbehandling i svenska verk. Källa: Eric Burström**

Vanliga skänkmetsallurgiska operationer är.

- Desoxidation för sänkning av syrehalten
- Värmning (el)
- Leering, grov- och finjustering av sammansättningen
- Vakuumbesandling för avlägsnande av inlöst väte och kväve
- Omröring för homogenisering av stålet med avseende på sammansättning och temperatur och inneslutningsavskiljning med gas, alternativt med induktion
- Säker tillsats av reaktiva legeringselement (kol, svavel, titan, bor, som vid tillsats på annat sätt, t.ex. under tappning, skulle ha reagerat med slaggen och därigenom gått förlorade)
- Eventuell besandling med kalcium eller andra element för inneslutningsmodifiering

Införandet av skänkgugnsprocessen betydde att det blev möjligt att styra chargen till rätt temperatur och sammansättning och därigenom åstadkomma en högre flexibilitet. Detta var inte minst viktigt för att kunna sekvensgjuta, dvs. gjuta flera charger utan avbrott och därigenom spara både energi och höja utbyten. Skänken blev i och med utvecklingen på 1970-talet en viktig metallurgisk apparat och inte endast ett transportkärl.

Införandet av skänkgugnsprocessen betydde att det blev möjligt att styra chargen till rätt temperatur och sammansättning och därigenom åstadkomma en högre flexibilitet. Detta var inte minst viktigt för att kunna sekvensgjuta, dvs. gjuta flera charger utan avbrott och därigenom spara både energi och höja utbyten.

### 3.5.2 Skänkmetsallurgi och produktkvalitet

Den s.k. skänkmetsallurgiska praxisen varierar från företag till företag. Beroende på vilken slutprodukt som avses tillverkas och vilka egenskaper som eftersträvas har de olika verken valt sin teknik och sin egen praxis.

För företag som tillverkar stålsorter (kul- och rullager, grov stång samt verktygsstål) med krav på låga halter av lösta gaser, framför allt väte, är vakuumenteknik en nödvändighet. Exempel på sådana är Scana Björneborg, Uddeholm och Ovako Hofors.

För företag som har extrema krav på inneslutningarnas storlek och form är den skänkmetsallurgiska praxisen helt avgörande för resultatet. Detta gäller bl.a. för tillverkare av stål för kul- och rullager, rakblad samt verktyg. Exempel på sådana företag är Sandvik, Uddeholm och Ovako Hofors.

För att stränggjutningen eller atomiseringen ska kunna ske obehindrat, d.v.s. att den ska kunna genomföras utan avbrott p.g.a. att gjutror eller munstycken blir igensatta av oxidiska inneslutningar, krävs en noggrant styrd skänkmetsallurgisk behandling. Exempel på företag för vilka detta är viktigt är SSAB EMEA, Outokumpu Stainless, Ovako Bar i Smedjebacken och Höganäs i Halmstad.

För företag med krav på att träffa rätt i temperatur och med samtidiga krav på snäva sammansättningsintervall vid en viss tid för att upprätthålla sekvenser vid gjutningen, är skänkgugnen ett viktigt hjälpmedel. Utan långa sekvenser förloras produktivitet, kvalitet och därigenom ekonomi. Exempel på sådana företag är SSAB EMEA och Ovako Bar i Smedjebacken.

För företag med hög andel av dyra legeringsämnen; krom, nickel och molybden är det viktigt att ha långa behandlingstider i skänk för att få tid att ta extra prover och justera precis så mycket som behövs för att klara en given specifikation. De nämnda elementen tillsätts i form av energikrävande jungfrueliga råvaror. För sådana ändamål krävs tillgång till skänkgugn. De företag som arbetar inom denna sektor är Sandvik och Outokumpu Stainless.

De svenska stålföretagen är ofta världsledande i sina nischer, mycket tack vare den i Sverige långt utvecklade skänkmetsallurgin. SSAB:s höghållfasta stål för lastbilsflak och Uddeholms verktygsstål med avsevärt längre livslängder jämfört med standardmaterial<sup>8</sup>, är bara några exempel på stål som tagits fram med skänkmetsallurgin som nödvändigt verktyg.

För verktygsstål tillkommer dessutom ESR-behandling (Electro Slag Refining) efter gjutningen. Övriga specialugnar som används för material med särskilt höga krav är t.ex. VAR (Vacuum Arc Remelting).

### 3.5.3 Energieffektiviseringsmöjligheter

Av betydelse för energiförbrukningen under behandlingen i skänk är skänken och dess egenskaper, allt från förvärmningen med brännare, slitage, genombrottsrisk, jämnhet i gasspolning till att man av olika orsaker inte måste hålla fler skänkar i omlopp än absolut nödvändigt.

Den metsallurgiska operationen med ofta stora legeringsmängder ger betydande energiåtgång för att smälta in legeringarna och ställer krav på precision i temperatur och analys. Tid- och temperaturstyrning blir väldigt avgörande liksom störningsfria flöden i verket.

---

<sup>8</sup> Privat kommunikation, Ewa Sjöqvist Persson, Uddeholms AB

Energiförlusterna och järnförlusterna kan också bli betydande när man separerar slagg från stål genom s.k. slaggdragning.

Den direkta energiförbrukningen under skänkbehandlingen är i jämförelse med smältningsoperationen, ganska liten. Den avgörande effekten på energiförbrukning som skänkmetsallurgin har är den som uppkommer i efterföljande steg.

#### *Kopplat till Energimyndighetens mål*

Exempelvis skulle förbättrad tid- temperaturstyrning till i genomsnitt 1°C lägre temperatur betyda mer än 1,3 GWh/år i Sverige. Förbättrad skänkhantering och optimering av legeringstillsetser i ett LCA-perspektiv har en betydande inverkan på energiförbrukningen.

### **3.5.4        Forskning inom Jernkontoret**

Under 1970- och 80-talen bedrevs många stora projekt inom det skänkmetsallurgiska området. Injektionstekniken utvecklades av företag som Scandinavian Lancers och skänkgugntekniken av ASEA och SKF Steel. Ett flertal forskningsprojekt utfördes på MEFOS, numera Swerea MEFOS och KTH, bl.a. inom olika Jernkontorskommittéer. Ett antal internationella konferenser, Scaninject hölls med tre års mellanrum. Konferensserien fortsätter under 2000-talet men med det bredare samlingsnamnet Scanmet.

Inom Jernkontorets gemensamma forskning har projekt genomförts projekt med direkt och indirekt inverkan på energihushållning:

- Inom JK 23043 och JK 23045 "Reduktion av kalciumaluminater..." och "Optimering av skänkmetsallurgin..." lyckades man öka stålets renhet från icke-metalliska inneslutningar. Detta medför förbättrade materialegenskaper för Ovacos kullagerstål och Uddeholm verktygsstål.
- Inom JK 23044 och JK 23051 "Slagginneslutningsmodifiering REM..." och "Cloggingkontroll..." bedrevs forskning med syfte att öka materialutbytet vid gjutning av stålsorter som behandlas med någon eller några av de sällsynta jordartsmetallerna; cerium, lantan, neodym m.fl.
- Inom JK 23052 "Igensättningar" bedrivs ett arbete med sikte på att genom skänkmetsallurgi begränsa mängden inneslutningar som sätter igen gjutrören vid stränggjutning. Dessutom provas möjligheten att "rensa" gjutrören från igensättningar under pågående gjutning.

JK 23045 och JK 23052 ingår i Strategiskt stålforskningsprogram 2007-2012, medan de tre övriga projekten finansierades av medlemsföretagen.

Avancerade produkter med optimala materialegenskaper har varit svensk stålindustrins framgångsrecept. För att ligga i framkant vad det gäller materialegenskaper krävs dock en kontinuerlig satsning på att förbättra renheten i stålet. Projektet studerar hur inneslutningar av icke metalliska föreningar som förorenar stålet uppkommer under skänkbehandling. Målet är att på samtliga deltagande verk optimera skänkprocessen för högsta möjliga renhet.

### **3.5.5        Utvecklingsbehov**

Utvecklingsbehovet för skänkmetsallurgi i Sverige vad gäller energieffektivitet är i första hand kopplat till vad som händer i efterföljande processer; modifiering av inneslutningar för ökat utbyte vid stränggjutning eller förbättring av materialegenskaperna för att åstadkomma längre livslängd eller lägre vikt hos slutprodukterna.

Några framtida områden med behov av utveckling inom skänkmetsallurgiområdet är

- LCA-styrd optimering av legeringstillsatser/ legeringstyper/ bearbetningsmetoder/ för att nå hög kvalitet och minskat global energi/miljöpåverkan (gäller hela processkedjan – skrot t.o.m. användning, integration av samhälle/processer)
- Fortsatt utveckling av stålets renhet vad gäller icke-metalliska inneslutningar och halter av lösta gaser
- Tid- och temperaturstyrning till ökad precision för att minska energiförbrukningen
- Fortsatt forskning för att minska igensättningar vid gjutning av igensättningsbenägna stålsorter.

### 3.6 Rostfritt stål

#### 3.6.1 Processbeskrivning

Rostfritt stål är stål med höga halter av krom, över 11 %, där ett mikroskopiskt passivskikt av kromoxid hindrar stålets vidare oxidation. I många fall innehåller stålet även höga halter av nickel, molybden och andra element. Allt stål korroderar under speciella betingelser, så även s.k. rostfritt stål varför en mer adekvat benämning på materialet borde vara ”rosttrögt stål”.

Den helt övervägande delen rostfritt stål i Sverige – och världen - tillverkas genom ett förfarande där stålet smälts i en ljusbågsugn och färdigställs i en AOD-konverter. De svenska verk där rostfritt stål tillverkas via den nämnda processvägen är Outokumpu Stainless i Avesta och Sandvik Materials Technology i Sandviken. Stålsorter med höga kromhalter tillverkas också i mindre mängder och med hjälp av andra förfaranden än ovan vid Sandvik Heating Technology i Hallstahammar och Uddeholms AB i Hagfors.

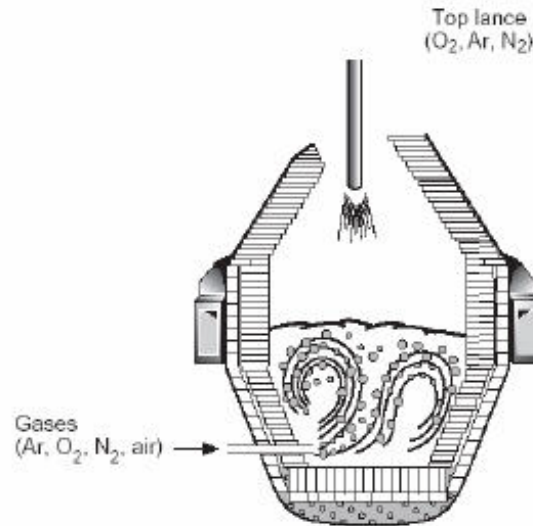
I ljusbågsugnen smälts köpskrot, internt recirkulerat returstål, återvunnet material från upp- arbetning av slagg samt legeringar som högkolhaltig ferrokrom och nickel. Under nedsmältningen, vilken görs med el, tillsätts kalk som slaggbildare. Syrgas samt kolpulver och ev. andra material tillsätts för kromoxidreducering, slaggs-kumning och underlättande av nedsmältningen. I vissa fall kan också ferrokisel tillsättas för reducering av under nedsmältningen oxiderat krom. Eftersom nedsmältningen sker öppet, under luftatmosfär, oxideras krom kraftigt i ljusbågsugnen.

Nedsmältningförloppet för rostfritt liknar det för kolstål, beskrivet tidigare i rapporten, med *en* viktig skillnad. För rostfritt trappas ugnseffekten ned kraftigt mot slutet av smältningen för att undvika slitage på infodringen. Skumningsegenskaperna för ”rostfria” slagger är inte tillräckligt goda eller reproducerbara för att kunna utnyttjas till att hålla en hög effekt när badet är smält och inlastat skrot inte längre skyddar ugnsväggarna från strålningen från ljusbågarna.

I **Figur 34** visas en bild av en AOD-konverter. AOD - Argon Oxygen Decarburization, är en metallurgisk process speciellt utvecklad för tillverkning av rostfritt stål. Processen innehåller tre delsteg:

- Färs-kning, d.v.s. sänkning av kolhalten genom syrgasblåsning. Kolhalten i råstålet från ljusbågsugnen är vanligen 1-1,5 % medan den i det färdiga materialet oftast är lägre än 0,05 %.
- Reducering, d.v.s. återförande av under färs-kningen oxiderat krom genom tillsats av kisel och/eller aluminium. Efter reduceringen innehåller slaggen oftast mindre än 1 % krom-oxid.

- Raffinering, d.v.s. sänkning av svavelhalten genom avdragning av den reducerade slaggen och tillsats av ny kalk samt omröring med argon. Genom detta förfarande kan svavelhalten i stålet sänkas till långt under 10 ppm.



**Figur 34. AOD-konverter. Källa: [www.keytometals.com](http://www.keytometals.com) Production of Stainless Steel: Part Two**

Under AOD-processen justeras smältans sammansättning genom tillsats av olika legeringar, t.ex. ferrokrom, nickel, ferronickel och ferromolybden. Stålets kvävehalt justeras uppåt genom att blåsa in kvävgas i smältan samt neråt genom att spola ur stålet med argon.

Under färskningen (syrgasblåsningen) i AOD förekommer två konkurrerande reaktioner; oxidation av kol och oxidation av krom. Den förstnämnda är den önskade och det är hur väl processen kan styras för att gynna denna som avgör hur stor förbrukning av processgaserna och reduceringsmedlen blir. Nedan beskrivs de reaktioner som förekommer och den jämvikt mellan kol- och kromoxidation som uppkommer.



3x[1] – [2] ger jämvikten



Vid färskningens start är kolhalten hög och oxidationen av kol gynnas därför. I takt med att kolhalten sjunker oxideras mer och mer krom. Jämvikten [3]drivs därmed åt vänster.

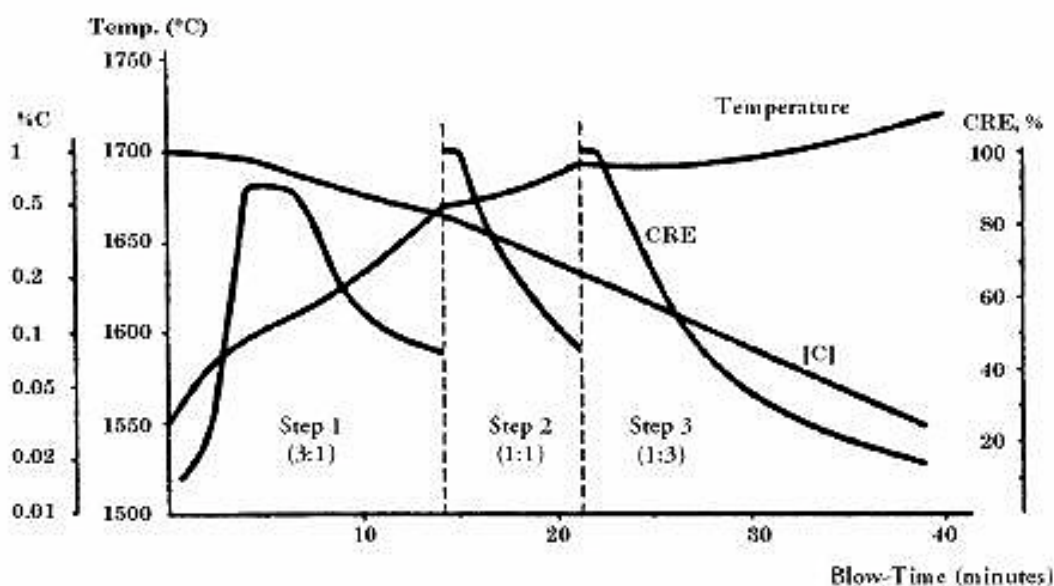
Genom att späda ut bildad kolmonoxid med en inertgas, kvävgas eller argon, kan jämvikten [3] drivas åt höger. Utspädningen görs genom att andelen inertgas stegvis ökas i förhållande till syrgasen. Typiska mängdförhållanden mellan syrgas och inertgas kan vara 3:1, 1:1, 1:3 och 1:9. Ju lägre kolhalt smältan innehåller, desto lägre syrgas-/inertgasförhållande krävs.

I **Figur 36** visas ett typiskt färskningsförlopp i en AOD-konverter, d.v.s. hur kolhalt och temperatur förändras samt hur det s.k. CRE-talet varierar under processen. CRE-talet anger hur mycket av syrgasen som används kol definieras som:

$$CRE = [\text{Mängd syrgas för koloxidation}]/[\text{Totalmängd syrgas}] \times 100$$

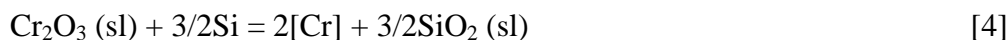
Vid färskningens start är kolhalten hög (i figuren 1 %) och temperaturen ganska låg - här ca. 1550 °C. I början oxideras inlöst kisel och krom (lågt CRE-tal) varvid temperaturen stiger. När allt kisel har oxiderats och temperaturen stigit kommer färskningen igång (CRE-talet stiger till 80-90 %). I takt med att kolhalten sjunker drivs jämvikten [3] åt vänster och oxidationen av krom blir mer uttalad. I detta läge växlas steg så att en större andel inertgas används. Jämvikten [3] drivs ånyo åt höger i och med att partialtrycket för CO sjunker och färskningen tar fart igen.

Från AOD-konvertern skickas stålet till en skänkgugn för färdigställning innan det gjuts som göt eller i stränggjutningsanläggning.



Figur 35 Typiska CRE-tal, temperatur- och C-haltsförlopp under AOD-processen. Källa: [www.keytometals.com](http://www.keytometals.com) Production of Stainless Steel: Part Two

Efter färskningen har, trots att mycket har gjorts för att ge oxidationen av kol de bästa förutsättningarna, en hel del krom oxiderats. Kromet i slaggen återvinns genom att slaggen reduceras med kisel (FeSi) eller aluminium enligt [4] eller [5]. För att få en slag som verkar svavelrenande och inte är alltför aggressiv mot infodringen, tillsätts också kalk vid reduceringen.



Den vid reduceringen bildade slaggen tappas av och ny kalk tillsätts för raffinering enligt [6]. Svavelhalten kan på detta sätt sänkas till önskad halt, t.o.m. till under 10 ppm.



AOD-konvertern för framställning av rostfritt stål i Sverige är samtliga bottenblåsta. Inget verk använder topplans för att påskynda färskningen under steg 1.



Beräkningsmodeller används för att prediktera kolhalt och temperatur under färskningen och mätning av avgasens sammansättning och temperatur görs för att indirekt få en uppfattning om hur processen går. Trots mätningar och beräkningar är en stor del av processövervakningen baserad på manuell temperaturmätning och provtagning på det smälta stålet.

Andra tekniker för tillverkning av rostfritt stål är VOD, där partialtrycket för koloxid sänks med hjälp av vakuum. Det finns vissa processtekniska skillnader mellan AOD och VOD som gör att det i en VOD är lättare att nå extremt låga kol- och kvävehalter, men till priset av längre färskningstider och större foderslitage. En variant som kombinerar VOD- med AOD-teknik är VODC. I Norden finns ingen VOD och endast en VODC i drift (Metso i Tammerfors) .

### **3.6.2 Energieffektiviseringsmöjligheter**

AOD-processens energiekonomi avgörs av hur väl tillförd syrgas används under processen, d.v.s. om mer syrgas än nödvändigt förbrukas kommer detta att innebära att förbrukningen av reduceringsmedel, kisel eller aluminium, kommer att öka. Båda elementen är mycket energi-krävande, aluminium mest, för sin tillverkning.

#### *Kopplat till Energimyndighetens mål*

Totalt förbrukas, förutom skrot, energi i form av råvaror som ferrokisel, aluminium, tegel även gaser som syrgas, argon och kväve med ett totalt energiinnehåll mellan 150 och 350 kWh/ton.

Energieffektiviseringspotentialen i tillverkningsprocessen för rostfritt stål finns till stor del i ljusbågsugnen med t.ex. bättre skrotsortering och införande av skummande slagpraxis men också i AOD-processen genom effektivare styrning av konverteringsförloppet.

En ytterligare stor post i processekonomin för AOD är förbrukningen av eldfast material. För en LD-konverter är foderlivslängden ca. 3000 charger medan den för en AOD-konverter, med dess bottenblåsningsteknik och aggressiva slaggar är ca. 100 charger.

Återvinning av processgaser, ex. argon ur avgaser i stället för ur luft är en idé som kräver både forskningsinsatser och stora investeringar.

#### *Miljö och climateffekter*

Vid framställningen av rostfritt stål emitteras i storleksordningen dubbelt så mycket koldioxid som vid framställning av låglegerat stål, men i många applikationer kan man göra miljövinster t.ex. betongarmering i rostfritt stål som avsevärt förlänger broars livslängd.

### **3.6.3 Forskning inom Jernkontoret**

Inom Jernkontorets TO23 har ett, av teknikområdet internfinansierat, projekt drivits med syfte att styra konverterprocessen bättre genom mätning av avgastemperatur och – sammansättning, JK 23038. Målet med projektet var att utveckla en förbättrad grundmodell för temperaturprediktion i AOD-konvertern, baserat på framförallt avgasanalys. Målsättningen med arbetet var också att den avgasbaserade modellen skulle ge beslutsstöd för stegväxlingar åt operatören. Det finns idag outnyttjade möjligheter att genom mätningar och behandling av mätdata förbättra kontroll och styrning av AOD konvertern. Arbetet fortsatte inom JK 23036 och JK 21066

Dagens styrmodeller har en temperaturträffsäkerhet i storleksordningen  $\pm 20^\circ$  C. En konkurrenskraftig tillverkning kräver en god processtyrning av blåsförloppet. Genom rätt styrning av syrgas/inertgas förhållandet i AOD konvertern kan stora besparingar erhållas med avseende på inertgas, ökad produktivitet och ökad träffsäkerhet i önskad analys och temperatur.

#### 3.6.4 Utvecklingsbehov

Energieffektiviseringspotentialen utgörs både av effektiviserat smältförlopp i ljusbågsugn genom exempelvis införande av skummande slaggspraxis med minskade kromförluster och en förbättrad färskningsprocess som medför ett mindre reduceringsmedelsbehov och minskad förbrukning av eldfast material. Områden som ur process- och energisynpunkt är värda att arbeta vidare med är:

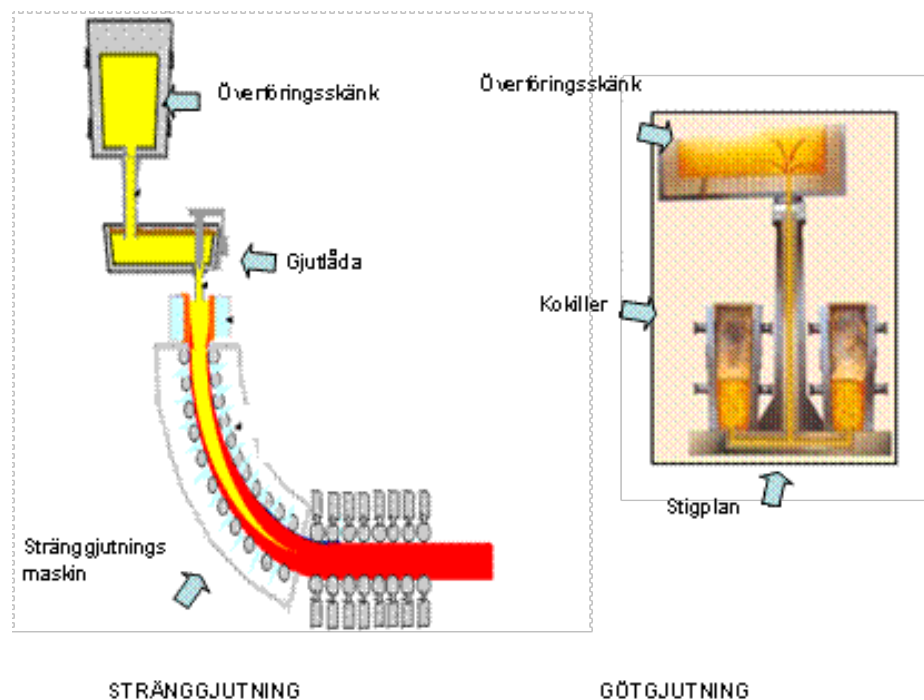
- Fortsatt utveckling av skumslaggsteknologi för smältning av rostfritt och höglegerat stål genom tillsats av gasalstrande briketter i ugnen.
- Effektivare styrning av konverteringsförloppet kan bl.a. minska kromförluster, genom att hålla det s.k. CRE-talet nära 100 % under hela processen. Detta påverkar förbrukningen av processgaser, reduceringsmedel d.v.s. ferrokisel och aluminium samt kalk positivt
- Effektivare skrotsortering, förvärmning av skrotet
- Återvinning av argon ur processgaser
- Kartläggning och utveckling av processteknik kopplat till VODC och toplansanvändning
- Utveckling av reduceringsmedelanvändandet så att energianvändandet, processekonomi och materialegenskaperna blir optimerade
- Eldfast förbrukning i slagglinjen samt i området kring dysorna (AOD)

## 4 Gjutning

Stålet gjuts till ämnen kontinuerligt i stränggjutningsanläggningar eller till göt genom göt gjutning. Vid stränggjutning töms skänken töms via ett keramiskt skyddsrör ned i en mellanbehållare (gjutlådan) från vilken stålet rinner genom ett gjutrör ned i en kyld kopparkokill av en viss form. Ett stålskal bildas och detta dras ur kokillen som en sträng genom en gjutbåge av rullar under kontinuerlig kylning med vatten. När strängen lämnar maskinen är den genomstelnad och kan delas upp i ämnen. Normalt gjuts ett antal charger efter varandra, i sekvens. Vid göt gjutning tappas stålet i gjutformar, s.k. kokiller där stålet får stelna till göt.

### 4.1 Inledning

Svensk stålindustri var mycket tidigt ute med att införa stränggjutningstekniken. Denna teknik eliminerar processteget valsning av göt till ämnen vilket sparar energi och höjer utbytet. De första maskinerna byggdes kring 1960 vid stålverken i Motala och Halmstad och var avsedda för gjutning av billets som utgångsmaterial för valsning av armeringsjärn.



**Figur 36 Stränggjutning respektive göt gjutning. Stränggjutning används där man har möjlighet att gjuta kontinuerligt dvs. större tonnage av samma kvalitet. Göt gjutning används när man producerar starkt varierande kvaliteter och dimensioner (framförallt stora dimensioner). Källa: University of Liverpool och Uddeholm**

De första stränggjutningsmaskinerna för slabs inom de verk som blev SSAB byggdes av Concast i Domnarvet och Oxelösund 1966-1968 följt av en maskin från DEMAG i Domnarvet 1974. Den första maskinen i Domnarvet var den tredje böjda slabsmaskinen i världen som togs i drift. Under de första 10 åren utvecklades tekniken och driftsäkerheten och huvuddelen av det göt gjutna tonnaget överfördes till stränggjutning. År 1980 stängdes det sista götvalsverket inom SSAB som då var ett av de första stålverken i Europa som gick över till 100 % stränggjutning. Efter SSAB:s bildande 1978 byggdes den första slabsmaskinen i

Luleå 1980. I samband med att SSAB avvecklade den metallurgiska verksamheten i Borlänge 1989 flyttades produktionen från strängarna i Domnarvet till ytterligare en ny maskin i Luleå med start 1989.

De rostfria verken i Avesta och Sandviken tog stränggjutningsmaskiner i drift omkring 1980 men Sandviken behöll göt gjutning för stålsorter som av främst kvalitetsskäl inte gick att stränggjuta. Ett kontinuerligt utvecklingsarbete har sedan dess lett till att det göt gjutna tonnaget har minskat.

Idag stränggjuts ca 90 % av den svenska stålproduktionen. Andelen göt gjutning, 10 %, är jämfört med övriga EU hög och förklaras med den svenska stålindustrins specialisering mot legerade, svårgjutna stål. En annan förklaring är att göten används som utgångsmaterial för smide av produkter i grova dimensioner.

Stränggjutningsmaskiner finns idag vid stålverken i Avesta, Sandviken, Smedjebacken, Oxelösund och Luleå. Göt gjutning används i Hofors, Hagfors, Björneborg, Söderfors, Sandviken och Hallstahammar. Stålverket i Halmstad tillverkar pulver genom vattenatomisering av stålflödet.

Moderna maskiner kan gjuta snabbare, har bättre rullstöd, effektivare kylning och ofta dynamisk soft reduction. Stränggjutningsmaskinerna i svenska verk har moderniserats i omgångar. Stålverken följer utvecklingen och utredningar om framtida investeringar görs regelbundet.

## 4.2 Stränggjutning

Stränggjutningsmaskiner typbenämns efter tvärsnittets form och dimensioner. Billetsmaskiner har ett kvadratisk tvärsnitt med en sida mindre än 150 mm. Bloomsmaskiner har ett kvadratisk eller rektangulärt tvärsnitt med sida >150 mm där förhållandet bredd/tjocklek <2. Slabsmaskiner har ett rektangulärt tvärsnitt med förhållandet bredd/tjocklek är större än 2. I billets- och bloomsmaskiner gjuts stålet i regel i 3 – 6 strängar. Maskiner för slabs byggs med 1-2 strängar. Antal strängar/maskin bestäms av chargestorlek och stålugnens/konverterns chargetid.

En stränggjutningsmaskin (**Figur 36**) består av en gjutlåda i vilken skänken töms och stålet rinner genom denna via ett gjutrör ner i en vattenkyld kopparkokill, där ett stålskal bildas. Strängen dras ut genom en gjutbåge av rullar och kyls med vatten. Då strängen är genomstelnad skärs den upp till ämnen för valsning.

### 4.2.1 Slabsmaskiner.

Stränggjutningsmaskinerna i Luleå är böjda, med rullar i utbytbara segment i gjutbågen. Strängen kyls med luft – vatten och riktas i flera punkter i riktverket. Maskinerna har vridtorn för sekvensgjutning och teknik med byte av gjutlåda och gjutrör används. Den äldsta maskinen fick ny gjutbåge i början av 2000-talet. Kokillerna är byggda för att ändra bredd under gjutning och praxis för att ändra stålsort är utvecklad för att klara långa sekvenser och hög produktivitet.

Strängarna i Oxelösund är idag av Voesttyp, vertikalböjda med små rullar och vattenkylning. Den vertikala delen är ca 3m. Gjutbågen är hel. Kokillerna är byggda för att ändra bredd under gjutning och praxis för att ändra stålsort finns utvecklad, men maskinernas placering gör att längre sekvenser bara kan gjutas på en maskin i taget. Den ena maskinen kan ställas om mellan gjutningarna för att gjuta slabs med 290mm tjocklek avsedda för valsning av

tjockare grovplåt. Maskinerna är ursprungligen byggda på 80-talet och ersatte då de första Concast-maskinerna. Gjutbågarna är ombyggda och förlängda samt försedda med en zon för statisk "soft reduction" för att förbättra inner-kvaliteten. Oxelösund använder buktiga kokillsidor (IMMODCO-tekniken) för att minimera förekomsten av hörnsprickor. Tekniken utvecklades inom den gemensamma Jernkontorsforskningen 1994-2004. SSAB:s maskiner gjuter normalt 220 mm tjocka ämnen i bredder från 800 mm till 1700 mm.

Strängen i Avesta är böjd med rullar i utbytbara segment i gjutbågen. De ändrar inte bredd under gjutning men har teknik för byte av stålsort genom skrotning av minimerad blandzon. De gjuter 140, 200 och 250 mm tjockt och bredder mellan 1000 och 2080 mm.

Gjutning av tunna slabs med direktvalsning i ett bredbandverk till band är ett energi-effektivare sätt att tillverka tunnplåt. Denna tillverkningsväg kräver gjutning av ämnen med felfria ytor och lämpar sig mindre bra för en del avancerade stålsorter. SSAB:s struktur med gjutning av ämnen i Luleå och Oxelösund och valsning av ämnen i bredbandverket i Borlänge talar också emot ett införande av denna teknik.

Gjutning av band och direktvalsning till varmband i kolstål används av Nucor i USA. Processen har den nackdelen att den fungerar bäst med aluminiumfria stål, vilket har gjort att den inte varit aktuell med dagens produktprogram inom SSAB.

#### **4.2.2 Bloomsmaskin.**

Sandviken har den enda bloomsmaskinen i landet. Vid bloomsgjutning används buktiga smalsidor (IMMODCO) av kvalitets skull. Maskinen kan ställas om mellan gjutningarna och gjuta klenare billets vilket då eliminerar en valsningsoperation.

#### **4.2.3 Billetsmaskin.**

Smedjebacken gjuter billets (120 mm fyrkant). Maskinen byggdes om av Concast i slutet av 90-talet för att kunna gjuta med högre hastigheter.

#### **4.2.4 Energieffektivisering vid stränggjutning.**

Införandet av stränggjutningstekniken eliminerade ett processteg, valsning av göt till ämnen, vilket innebar en energieffektivisering och utbytshöjning. Beroende på typ av göt och dimensioner på ämnen ökade utbytet från råstål till ämne från 60-80 % till 90-95 %. Energieffektiviseringen, då en stålsort läggs om från götgjutning till stränggjutning, uppgår till c:a 1000 kWh/ton.

Varmchagering av gjutna ämnen i valsverkets värmningsugn minskar energibehovet med 100-200 kWh/ton beroende på temperaturen på ämnena. Det är oftast svårt att genomföra fullt ut på grund av svårigheter med planeringen av valsningen.

Processkedjan kan också effektiveras genom gjutning till nära slutform. Gjutning av tunna slabs kopplat till direktvalsning i ett bredbandverk till band är ett energieffektivare sätt att tillverka tunnplåt. Investeringskostnaden (gjutmaskin + bandverk) blir hög och förfarandet har fortfarande kvalitetsbegränsningar. Sandvikens lyckade överföring av en del av produktionen från blooms till klenare billets ger en mindre värmning på 400 kWh/ton.

Gjutning av band och direktvalsning till varmvalsade band används hos Nucor i USA men kräver aluminiumfria stål. Thyssen-Krupp direktgjuter band av rostfritt i en försöksanläggning i Italien. Tunnslabsgjutning i tjocklekar runt 50 mm är etablerad teknologi särskilt vid verk som nyanläggs. En fördel med tunnslabsgjutning/bandgjutning är energieffektiviseringen genom att man kommer nära slutprodukten utan behov av

uppvärmning. En annan fördel kan vara den finkornighet som uppnås genom snabbare stelning och har visat sig kunna ge högre samtidig duktilitet och hållfasthet. En tredje fördel är den relativa okänsligheten för koppar och tennhalterna i stålet (rödskörhet) då glödskalbildningen blir liten jämfört med ett konventionellt verk.

#### **4.2.5 Begränsningar.**

Alla stålsorter kan ännu inte stränggjutas av kvalitets skäl bl. a. pga sprickkänslighet och segringar. Andra begränsningar är tonnagemässigt små serier eller behovet av mycket stora dimensioner som exempelvis är fallet vid smedjan i Björneborg. Stränggjutning ger ett renare stål än götgjutning då stålet passerar genom en gjutlåda där slagger kan avskiljas.

Skänkmetsallurgin och stränggjutningen ger förluster i form av rusor genom att stål fryser på väggar. Dessa förluster blir relativt små räknat per ton i ett högproduktivt stålverk där en skänk används för ett stort antal charger och stålet gjuts i långa sekvenser.

Större inverkan på utbytet har avbrutna gjutningar orsakade av t.ex. igensättning eller genombrott. Stål blir kvar i skänken och en del av den gjutna strängen måste skrotas.

Typiska problem vid stränggjutning har att göra med igensättning i gjutrör som orsakar stopp eller sänkt gjuthastighet framförallt vid låga kiselhalter och specialstål med höga cerium- eller titanhalter. Igensättningar minskar möjligheten till energibesparande sekvensgjutning.

Strömningsbilden i kokillen är avgörande för stålets kvalitet, gjutpulvrets funktion och förhindrande av sprickbildning vid ojämnt stelning. Sprickbildning och föroreningar av olika slag försämrar utbytet och ökar specifik energiförbrukning eftersom en del stål måste skickas till hyvling/slipning eller omsmältning.

Långa sekvensgjutningar befrämjar produktiviteten i stålverket och sänker utbytesförlusterna pga mindre start- och ändskrot. För att nå långa sekvenser i ett flexibelt verk som satsar på korta leveranstider krävs att teknik för stålsortsbyte och breddändring under gjutning används. Denna teknik medför planerade utbytesförluster men vinsten förutom produktivitet är att kunden snabbare kan få sin beställda plåt.

#### **4.2.6 Forskning inom Jernkontoret**

Den gemensamma forskningen har under de senaste 15 åren varit inriktad mot att kunna gjuta avancerade stålsorter med hög produktivitet och utan defekter som kräver ytbehandling av ämnena. I samtliga fall har energieffektiviseringspotentialen varit betydande.

Målen har varit att

- Förstå hur inre sprickor och segringar uppkommer under stränggjutning samt att hitta vägar för att undvika dessa defekter.
- Förhindra reoxidation av stålet och tillväxt av igensättningar.
- Studera strömning i gjutlåda och kokill och förhindra neddragning av slagg i stålet.
- Studera uppkomst av ytsprickor och finna sätt att undvika dessa.
- Gjuta med högre hastigheter med bibehållen kvalitet.

Stål 2000

JK 24041 Stelning, kylning, produktivitet

JK 24042 Prediktering av kvalitet

JK 24043 Strömning i gjutlåda-kokill

Stålindustrins metallurgipaket 2002-06:

JK 24045 Ökad produktivitet vid stränggjutning genom högre hastigheter

JK 24046 Reoxidationsfri gjutning med fokus på transienta förlopp

JK 24047 Gjutning av segringskänsliga stål vid högre hastigheter

Jernkontorets energiprogram 2006-2010: JK 24050 Mjukkyld kokill

Målet med projektet var att halvera energianvändningen för ämnesytfel genom att utveckla ett kokillkoncept, som medger mjukare kylning av det först bildade stålskalet, vilket minskar risken för spänningar och sprickbildning. Omfattande försök visade att det är möjligt att minska energianvändningen med drygt 35 GWh per år om man kan lösa vissa tekniska problem. Det finns intresse att fortsätta arbetet med detta i ett uppföljningsprojekt.

#### **4.2.7 Energieffektiviseringsmöjligheter.**

Energieffektiviseringen ligger till största delen i att utbytet har ökat genom färre avbrutna gjutningar och då mindre ämnesbehandling/skrotning behövs. Några stålsorter, som tidigare inte kunde stränggjutna, stränggjuts nu med ännu större utbytesvinst. Utmaningen ligger i att produktutvecklarna kommer med nya avancerade stålsorter som är svårare att stränggjuta felfritt. Ny teknik, som IMMODCO-kokillen med buktiga kokillplattor, Mjukkyld kokill med kokillplattor med olika värmeledningsegenskaper och gjutpulver med anpassade egenskaper för svårgjutna stålsorter, har utvecklats och implementerats inom den gemensamma forskningen för att möta kraven.

Inom projektet JK 24050 Utveckling av mjukkyld kokill inom Energiprogrammet 2006-2010 har det visats att tekniken med värmedämpande skikt i kokillens överdel reducerar värmeflödet med ca 20 % och att det är möjligt att gjuta sprickkänsliga stålsorter med betydligt lägre variationer i värmeflöde genom att undvika starkt kristalliserande gjutslaggar. Fortsatt utveckling av kokillen och metod för att fästa det värmedämpande skiktet i kopparkokillen är nödvändigt. En feasibility study för implementering vid SSAB, Luleå gjordes för att skynda på implementering av kokillen där. Effektiviseringspotentialen uppskattades till 35 GWh/år.

Den stora energieffektiviseringspotentialen vid gjutning är möjligheten att vidareutveckla stränggjutningsmetoderna så att mindre tonnage måste götglasas, s.k. varmt flöde och gjutning nära slutform. Historiskt har detta varit den främsta orsaken till förbättrade utbyten d.v.s. att vid kontinuerlig gjutning blir mängden prima stål långt över 90 % medan det vid gjutning i göt blir stor andel av stålet som inte kan användas. Om all götglasning skulle ersättas med stränggjutning skulle mer än 100 GWh/år kunna sparas<sup>9</sup>. Förbättrat utbyte ger i och för sig möjlighet till ökad produktivitet men i en begränsad marknad slås därför också de ineffektiva företagen ut till förmån för de med höga utbyten.

---

<sup>9</sup> Konsensus Teknikområde 24 Gjutning och stelning

Varmt flöde, dvs. att materialet aldrig får kylas ner från gjutning t.o.m. varmbearbetning, kan spara avsevärd energi. Besparingspotentialen är svår att bedöma men ett verk uppger att energieffektiviseringspotentialen för 200 000 ton stål varmchargerat för deras del skulle innebära ca 40 GWh/år<sup>10</sup>.

Bättre ytor på ämnen i sprickkänsliga stålsorter sänker hyvlings-/slipförluster och ger en energieffektivisering med 35 GWh/år enligt JK 24050 Mjukkyld kokill. Färre avbrutna gjutningar pga igensättning ger en utbytesförbättring<sup>11</sup>.

#### 4.2.8 Utvecklingsbehov.

Bättre ämnesytor vid stränggjutning och mindre ämnesbehandling

- Vi har arbetat med problemet i tidigare program med stöd från Energimyndigheten. I Stål 2000 och i de två följande energipaketerna gjordes lyckade försök med IMMODCO-kokillen. Kokilltypen används nu i Oxelösund och Sandviken. Fortsatt forskning för optimering av kokillgeometrin behövs för att IMMODCO-konceptet skall tillämpas hos övriga stränggjutande verk och för grövre dimensioner i Oxelösund.
- Ytterligare försök för att minska ytfelen har gjorts i projektet Mjukkyld kokill. Forskningen har gett lovande resultat och bör fortsätta.
- Optimering av kokilloscillering kan ge bättre ämnesytor.
- Flödesdämpande åtgärder för stålflöde till kokill.

Igensättningar

- I Stålforskningsprogrammet pågår ett projekt, JK 23052 Igensättningar, till 2012 för att minska problemen med dessa. Det keramiska systemet med gjutlåda, gjutrör och skyddsror ... ”lufttäta gjutsystem” är fortfarande inte färdigutvecklat.

Inre kvalitet

- Vidareutveckling av soft reduction.

Bättre ämnesutbyte

- SSAB använder teknik för breddändring under gjutning och samgjutning av olika stålsorter för att kunna optimera tiden med stål i kokill vilket ger planerade utbytesförluster. En optimeringsstudie kommer att kunna sänka dessa.

Gemensamma studier. Benchmarking

- Benchmarking av tunnslabgjutning - direktvalsning. Gemensam utvärdering av vilka stålsorter som kan gjudas, kvalitetsutfall, energieffektiviseringen, kostnader för drift och investering.
- Automatisk inspektion av ämnen. Gemensam sammanställning av dagsläget.
- Slaggrenhet

---

<sup>10</sup> Privat kommunikation Bo Rogberg Sandvik

<sup>11</sup> Carl-Åke Däcker, Christer Eggertsson, S. Peter Andersson, Anders Salwén, Swerea KIMAB. Development of a CC mould with soft cooling properties for casting of crack sensitive steel grades. Final Report. Jernkontorets rapport D 835. 2010s



- Ämnesegenskaper hos höghållfasta/spröda ämnen och temperaturförlopp vid stackning kopplat till kvalitet etc.
- Återvinning av restvärme från kylbäddar för billets och valsade ämnen

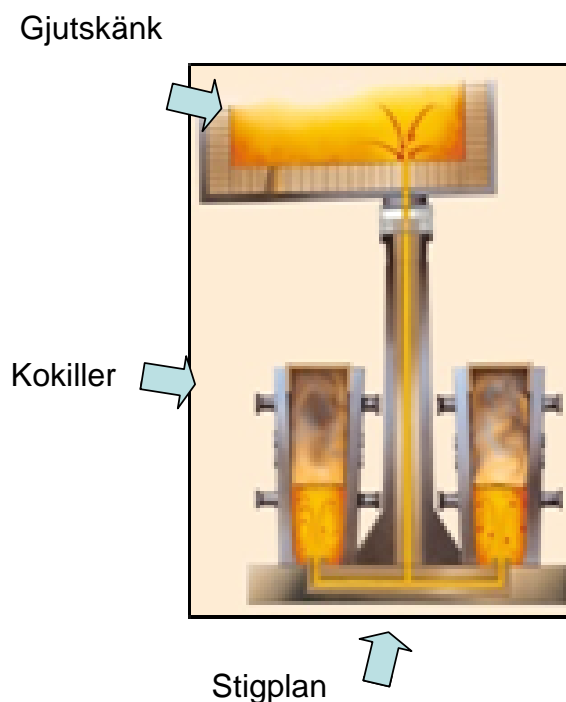
### 4.3 Götgjutning

Traditionellt har stål hållts i gjutformor, s.k. kokiller där stålet fått stelna till göt. Götgjutningen är i dag en väl utvecklad och sofistikerad process med stigplan för att fylla stålet på ett bättre sätt än att hålla rakt ner i en kokill, sjunkboxar för att förhindra onödiga materialförluster längst upp i götet (pipen) o.s.v. Valsningen av göten till ämnen sänker utbytet ytterligare.

Materialutbytet vid götgjutning/valsning till ämnen blir betydligt lägre jämfört med stränggjutning (ca 60-80 % respektive 90-95 %).

Götgjutning tillämpas därför när man tillverkar material i litet tonnage eller extrema dimensioner. Exempelvis krävs ofta mycket stora göt (över 1m i diameter och över 50 ton) för att smida verktyg till pressning av platt-TV skärmar, verktyg för pressning av bilplåt och smidning av vevaxlar till vindkraftverk och stora båtmotorer. Ett annat skäl kan vara svårigheten att stränggjuta vissa avancerade sprickkänsliga eller segringsbenägna stålsorter.

Det är således uppenbart att det är svårt att ersätta all götgjutning även i framtiden även om det ligger i företagets intressen att förbättra utbyten och minska energiförbrukningen. Utbytet vid götgjutning förbättras genom olika åtgärder även om man knappast når samma nivå som vid stränggjutning.



**Figur 37. Götgjutning används när man producerar starkt varierande kvaliteter och dimensioner (framförallt stora dimensioner). Källa: Uddeholm**

#### 4.3.1 Forskning inom Jernkontoret

Några i tidigare STEM-program

Jernkontorets metallurgipaket 2002-2006

JK 24048 Kvalitetshöjning vid göt gjutning

JK 24049 Implementering av 06-göt gjutning

STÅL 2000: JK 24044 Götformens inverkan på den inre strukturens bildningsförlopp i göt

Strategiskt stålforskningsprogram 2007-2012: JK 24053 GötGjutNextGeneration

#### 4.3.2 Utvecklingsbehov.

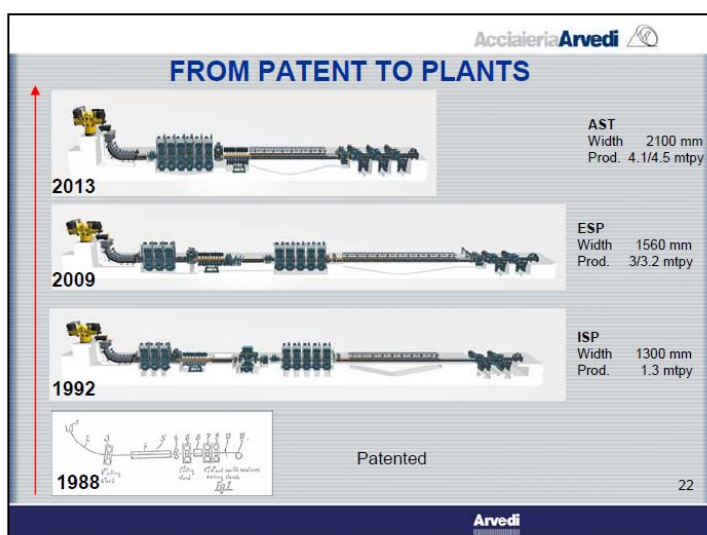
- Ökning av utbyte genom minskad andel porer och slagginneslutningar.
- Minskning av pipe-förluster vid göt gjutning
- Återvinning av restvärme från kylbäddar för valsade ämnen

#### 4.4 Övriga gjutningsmetoder

Efter gjutning följer olika typer av bearbetning såsom valsning, smidning, skärning, fogning o.s.v. innan man får fram en färdig produkt. Man har därför tagit fram olika alternativa metoder för att komma så nära slutform som möjligt utan stora bearbetningsbehov.

##### 4.4.1 Direktgjutning

Vid produktion av plåt kan man istället för att gjuta slabs med en tjocklek om 15 – 20 cm och efterföljande värmning och valsning, gjuta tunna slabs med tjocklek ca 5 cm som matas direkt in i ett valsverk för att nå sluttjocklek. Metoden är numera vanligt förekommande.



Ett annat alternativ är direkt gjutning till tunnplåt som provats under många år men som bara finns i produktionsskala vid ett amerikanskt verk. En alternativ metod som utvecklats i Sverige och Tyskland är under uppförande i stor skala i tyska Salzgitter. Här gjuts stål 10 mm tjockt på ett kylt kopparband och matas sen direkt till ett valsningssteg

**Figur 38.** Gjutning nära slutform. Bilden visar utvecklingen av Arvedis metod för kombinerad tunnslabsgjutning och varmvalsning.

Källa: Arvedi S.p.a.<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> G Arvedi et al, Arvedi ESP first thin slab endless casting and rolling results, Ironmaking and Steelmaking 2010, vol 37, p. 271 – 275

#### 4.4.2 Pulverformning

Ett alternativ till gjutning är tillverkning av pulver som sedan kompakteras och sintras till slutlig form. Järn och metallpulvret framställs genom reduktion av mycket ren järnmalm (Höganäsmetoden), smältning av skrot för vattenatomisering eller atomisering med gas. Höganäs är världsledande när det gäller produktion av järnpulver.

Pulverformade produkter tillverkas av flera svenska företag som Carpenter, Erasteel, Uddeholm, Sandvik och Bodycote Surahammar. Efter atomisering formas produkten och sammanpressas under högt tryck och sintras vid förhöjd temperatur (HIP Hot Isostatic Pressing)

Järnpulver är dyrt jämfört med gjutet stål men den stora fördelen med pulverformning är att man t.ex.:

- undviker maskinbearbetning och att man har mycket högt materialutbyte (typiskt 97%)
- kan tillåta mycket stora legeringsvariationer
- slipper problemet med segringar, dvs. får en mycket jämn struktur
- kan få kontrollerad porositet för självsmörjning eller filtertillverkning

Järnpulver används framförallt för tillverkning av olika komponenter, ytbeläggning, svetsning och till kemisk och metallurgisk industri.

Exempel på intressanta tillämpningar är bl.a. Osprey-metoden där de atomiserade smälta dropparna sprutas mot en form till önskad tjocklek. Metoden har bl.a. använts för tillverkning av rör men även billets. Fördelen är också här en tät och segringsfri produkt. Ett annat område är att använda järnpulver vid tillverkning av mjukmagnetiska komponenter där pulvrets magnetegenskaper i tre dimensionella riktningar används för att tillverka mer kompakta motorer och liknande.

## 5 Värmning, värmebehandling och bearbetning

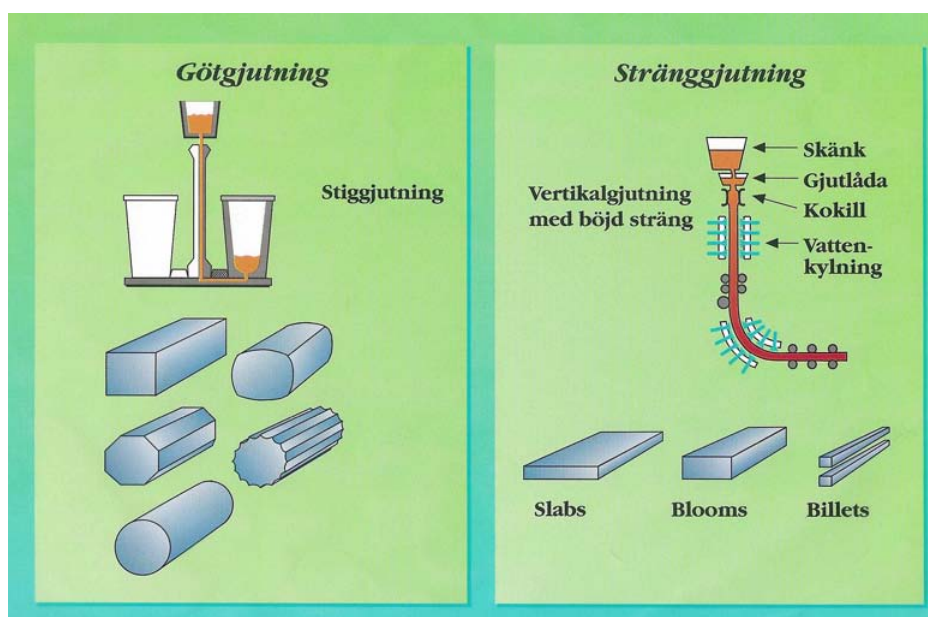
### 5.1 Allmänt

Den största delen av de svenska stålverkens tillverkning utgörs av produkter som ska bearbetas och förädlas ytterligare efter gjutningen genom olika bearbetningsoperationer och värmebehandling. Detta kapitel handlar om energianvändningen i dessa processer. Fokus ligger på huvudprocesserna. Med bearbetning avses här operationer där stålet bearbetas plastiskt, det vill säga så att det permanent ändrar form.

#### 5.1.1 Övergripande processbeskrivning

Bearbetningen görs utifrån ett gjutet ämne: Slabs, blooms, billets eller göt i olika former (se **Figur 39**). Göt tillverkas genom satsvis gjutning och kan ha olika form och användas för olika typer av produkter. Göt kan både valsas och smidas. Varmvalsning från göt sker oftast i två steg. Först valsas göten till ämnen som kontrolleras och ytbehandlas (bortslipning av ytfel).

Slabs, blooms och billets stränggjuts i princip undantagslöst. Slabs används för att genom valsning tillverka platta produkter, främst plåt och band, medan billets används för att tillverka långa produkter (stång, tråd, rör). I många fall ytbehandlas (ex. slipas) de gjutna ämnena innan de skickas till valsverket eller smedjan.



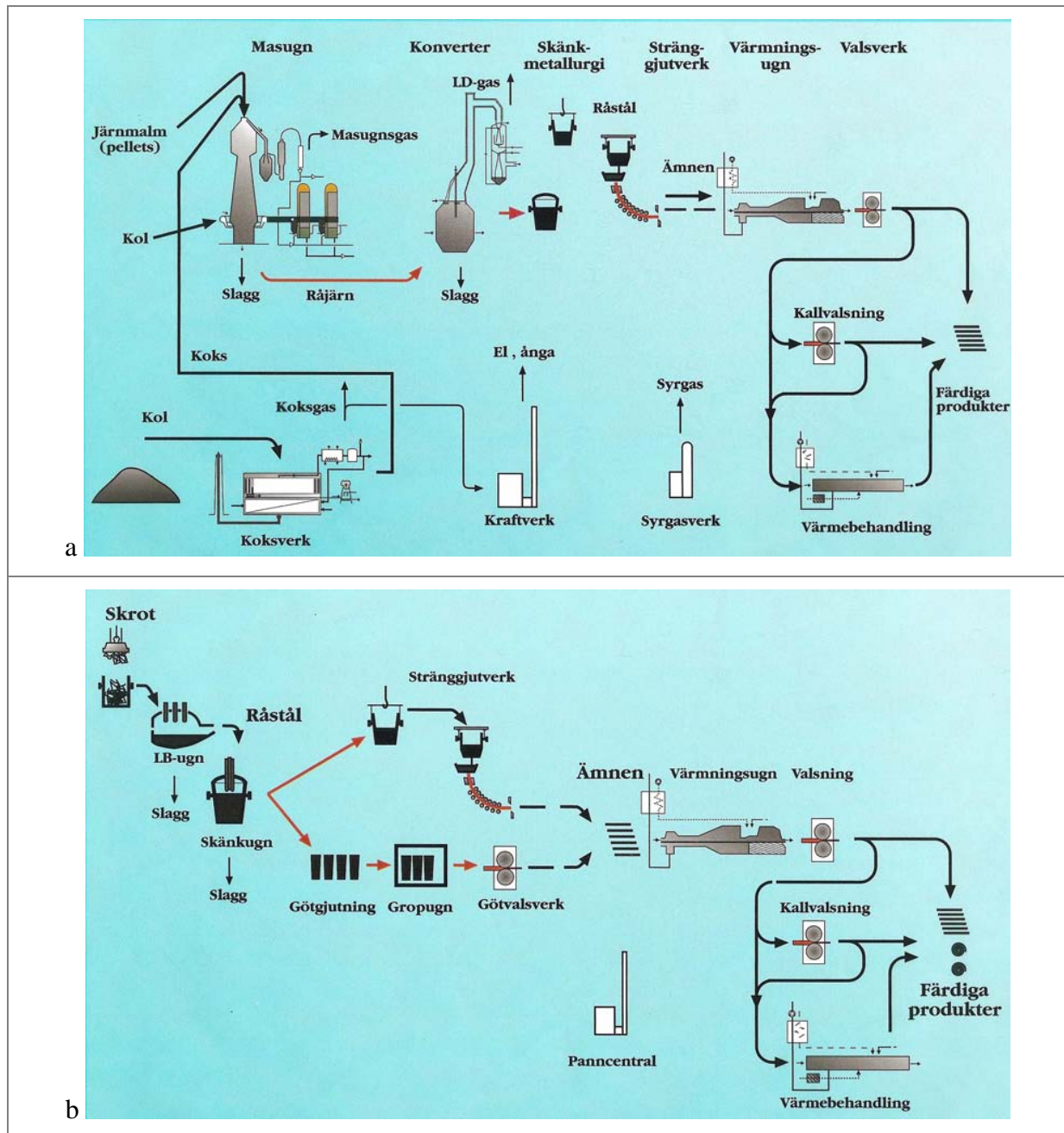
**Figur 39.** Olika typer av ämnen. *Källa: Jernkontorets utbildningspaket, del 8.*

I och med att bearbetningen är produktberoende i än högre grad än processerna uppströms i tillverkningsprocesserna, varierar processföringen från verk till verk och produkt till produkt. En enkel schematisk beskrivning av de vanligaste processvägarna finns i **Figur 40**.

Stålämnen värms (eller påvärms) varefter de varmbearbetas. Vissa stålsorter processas vidare genom kallbearbetning och/eller värmebehandling. Genom att på olika sätt kombinera värmebehandling, kylning och bearbetning åstadkoms speciella materialegenskaper, exempelvis ultrahög hållfasthet.

Man skiljer på varm- och kallbearbetning. Under varmbearbetning sker, beroende på temperaturen, rekristallisation och återhämtning i materialet, det vill säga kristallstrukturen i

materialet deformeras och ombildas. Under kallbearbetning sker inte detta, varför materialet deformationshårdnar. Ett kallbearbetat stål kan värmas upp för att rekristallisera och får därigenom tillbaka de hållfasthetsegenskaper som det hade innan kallbearbetningen.



Figur 40. Processväg från a) malm och b) skrotämne till färdiga produkter. Källa: Jernkontorets utbildningspaket

### 5.1.2 Bearbetningsoperationer hos de svenska stålverken

Karaktäristiskt för de svenska stålproducenterna är att de har en relativt hög andel avancerade stål och är specialiserade inom sina respektive nischer. Tabell 4 visar på vilka orter som bearbetningsoperationer förekommer.

Tabell 4 Bearbetningsoperationer hos Jernkontorets medlemsföretag

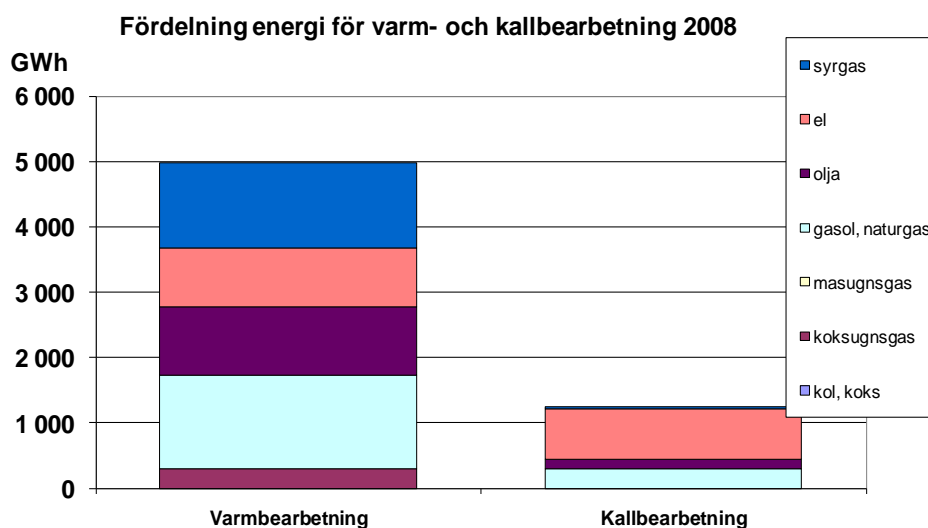
Företag	Ort	Huvudsakliga produkter	Varmvalsning	Smide	Kallvalsning	Tråd-dragning	Värme-behandling
Boxholm Stål	Boxholm	Kalldragen stån (varav 60% automatstål)				X	
Böhler Uddeholm Precision Strip AB	Munkfors	Kallvalsade precisionsband			X		X
Erasteel Kloster AB	Långshyttan	Valstråd och dragen tråd av snabbstål	X				
	Söderfors	Ämnen och pulver av snabbstål		X			
	Vikmanshyttan	Kallvalsade band av snabbstål			X		
Fagersta Stainless AB	Fagersta	Valsad och dragen tråd av rostfritt stål	X			X	X
FN-Steel Hjulbro AB	Linköping	Spännlina				X	X
Outokumpu Stainless AB	Avesta	Plåt och band av varmvalsat rostfritt stål	X		X		X
	Degerfors	Varmvalsad plåt av rostfritt stål	X				X
	Långshyttan	Precisionsband av rostfritt stål			X		X
	Torshälla	kallvalsad plåt av rostfritt band			X		X
Ovako Bar AB	Smedjebacken	Stång av olegerat och legerat stål	X				X
	Boxholm	Stång av olegerat och legerat stål	X				X
Ovako Hofors AB	Hofors	Ämnen, grov stång, rör, ringar av kullager-/leg. Konstruktionsstål	X	X			X
	Hällefors	Stång av kullager-/legerat konstruktionsstål	X				X
Ovako Tube and Ring	Hofors	Rör och ringar av kullager-/legerat konstruktionsstål		X			
Ramnäs Bruk AB	Ramnäs	Kätting för off-shore installationer		X			X
Ruukki Sverige AB	Virso	Svetsade rör av olegerat stål	X		X		X
AB Sandvik Materials Technology	Sandviken	Ämnen, stång av rostfritt stål samt borrarstål	X	X			
	Sandviken	Sömlösa rör av rostfritt stål samt speciallegeringar	X		X		X
	Sandviken	Precisionsband och härdade band av rostfritt stål	X		X		X
-Sandvik Wire and Heating Technology	Halstahammar	Tråd, band, värmesystem (motståndsmaterial), bimetal	X		X	X	X
	Sandviken	Precisionsband och svetsmaterial				X	
Scana Steel Björneborg AB	Björneborg	Formsmide		X			X
Scana Steel Booforge AB	Karlskoga	Friformssmide, lyftgafflar, värmebehandling		X			X
Scana Steel Söderfors	Söderfors	Valsad och smidd stång, valsade profiler	X	X			X
SSAB EMEA	Oxelösund	Ämnen och grovplåt av höghållfast slit-, och konstruktionsstål	X				X
	Borlänge	Ämnen till tunnplåt av höghållfast/ultrahöghållst stål	X		X		X
Surahammars Bruk AB	Surahammar	Kallvalsad, kisellegerad elektroplåt	X		X		X
Suzuki Garphyttan AB	Garphyttan	Legerad och rostfri fjädertråd				X	X



### 5.1.3 Energianvändningen nedströms gjutningen

Den totala energianvändningen nedströms gjutningen varierar typiskt mellan 1100 – 1700 kWh/ton beroende på produkt och produktionsprocess<sup>13</sup>. Totalt för den svenska stålindustrin använde bearbetningsavdelningarna drygt 6 TWh 2008<sup>14</sup>, vilket motsvarar en knapp fjärdedel av den totala energianvändningen. Delar man denna siffra med råstålsproduktionen samma år fås en specifik energianvändning på i medeltal närmare 1300 kWh/ton. För enskilda stålsorter kan variationerna vara mycket stora. Energianvändningen i processavsnitten nedströms gjutningen är produktberoende i än högre grad än processavsnitten uppström gjutningen och att jämföra specifika energital för olika stål och därur dra slutsatser om processernas effektivitet är därmed inte rättvisande. Energitalen måste på något sätt sättas i relation till förädlingsvärdet.

**Figur 41** visar hur svensk stålindustris energianvändning fördelade sig på processavsnitten ”varmbearbetning” och ”kallbearbetning” år 2008. De flesta värmebehandlingsoperationerna sorterar i statistiken under ”kallbearbetning”, men undantag finns.



**Figur 41. Energianvändningen i svensk stålindustri fördelat på processtegen varm- och kallbearbetning. Källa: Jernkontorets Energistatistik**

Sammantaget gäller att varmbearbetning är det processavsnitt som näst efter masugn använder mest energi; enligt statistiken totalt nästan 5000 GWh/år i svensk stålindustri ett normalår, inräknat syrgas och el. Detta motsvarar ungefär 20 % av den totala primärenergianvändningen. Den största delen av energianvändningen i varmbearbetningen, 60 %, utgörs av bränslen (koks gas, gasol, olja) till värmningsugnarna, medan ca 18 % av el (ca

<sup>13</sup>K. Hoen et al. Energy and resource efficiency for hot rolling mills. Proceedings of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry. Dusseldorf 27 June – 1 July, 2011.

<sup>14</sup> Jernkontorets energistatistik 2008

50 GWh/år<sup>15</sup>), som till största delen används i valsverken. Normalt brukar vara att själva valsningen använder ungefär en femtedel så mycket energi som värmningsugnar<sup>16</sup>.

Kallbearbetningen sker i de flesta fall utan att stålet värms (däremot värms stålet av deformations- och friktionsvärmets under själva valsningen). Den energi som används i kallbearbetningen utgörs alltså primärt av el för att driva valsarna och el och bränslen till värmebehandlingsugnar. En rimlig uppskattning är att någonstans kring 350 GWh/år<sup>17</sup> el (ca 9 % av den totala elanvändningen i stålindustrin) används för själva kallbearbetningen (exempelvis kallvalsning och tråddragning) i svenska stålverk.

Energianvändningen för värmebehandling utgör en relativt liten del av stålindustrins totala energianvändning. Utifrån den statistik som samlas in är det rimligt att anta att endast omkring en tjugondel av stålindustrins bränsleanvändning (på energibas och exklusive koks och kol) används för värmebehandling medan motsvarande siffra för el är 9 %<sup>18</sup>.

Med anledning av vad som ovan beskrivits, faller det sig naturligt att den branschgemensamma energiforskningen vad det gäller effektivisering av primärenergianvändningen nedströms gjutningen, som är ämnet för detta kapitel, lagt fokus vid värmningsugnar och varmbearbetningsprocesserna.

#### 5.1.3.1 Utbyte

Av stor betydelse för energianvändningen i stålindustrin är utbytet till färdig produkt. Utbytet påverkas av materialförluster, som glödska-förluster och slipförluster, och av internt fallande skrot, som ändklipp.

Det finns ingen statistik på i vilka processteg det faller mest skrot inom svensk stålindustri och variationerna i utbyte är mycket stora från verk till verk och från produkt till produkt. I och med att svenska stålproducenter har en stor andel högt förädlade produkter, med hög kvalitet och snäva toleranskrav, är utbytet från färdigt ämne till produkt i branschen, räknat som tonnaget av handelsfärdigt stål dividerat med tonnaget producerat råstål, drygt 80%<sup>19</sup>. För riktigt svårtillverkade stålsorter kan utbytet dock vara så lågt som 25 %.

Ur ett energiperspektiv innebär varje utbytesförbättring en energieffektivisering i specifik mening. Bilden kompliceras visserligen en aning av att exempelvis glödska och fallande skrot ofta finner en användning, internt eller externt, men det står klart att utbytesförbättringar spelar en stor roll i effektiviseringen av branschen. Detta kan illustreras med att det för att producera ett ton stål från malm normalt används mellan 5 och 6 MWh<sup>20</sup>, vilket innebär att

---

<sup>15</sup> Jernkontorets Energistatistik 2008; Elanvändningen i ”varmbearbetning” uppgick till 908 GWh/ år, medan elanvändningen för ”värmning” uppgick till 242 GWh/år. Under antagandet att all värmning i statistiken sorterar under ”varmbearbetning” gäller alltså att resterande 666 GWh/år används för valsning/smide.

<sup>16</sup> K. Hoen et al. Energy and resource efficiency for hot rolling mills. Proceedings of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry. Dusseldorf 27 June – 1 July, 2011.

<sup>17</sup> Jernkontorets Energistatistik 2008; Elanvändningen i ”kallbearbetning” uppgick till 762 GWh/ år, medan elanvändningen för ”värmebehandling” uppgick till 380 GWh/år. Under antagandet att nästan all värmebehandling i statistiken sorterar under ”kallbearbetning” gäller alltså att det mesta av resterande 378 GWh/år används för valsning/tråddragning.

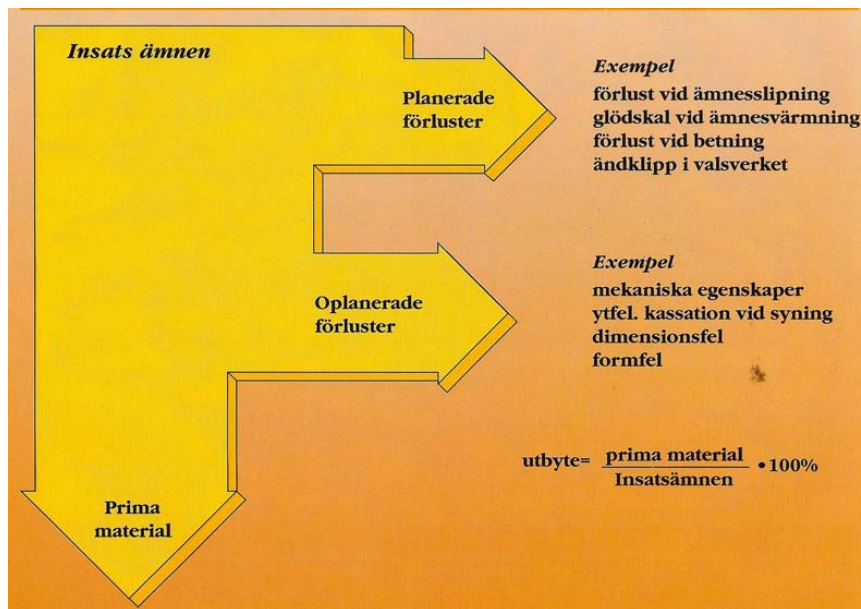
<sup>18</sup> Jernkontorets energistatistik 2008.

<sup>19</sup> Jernkontorets statistik.

<sup>20</sup> K. Hoen et al. Energy and resource efficiency for hot rolling mills. Proceedings of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry. Dusseldorf 27 June – 1 July, 2011.



varje ton stål som går förlorat någonstans mellan värmningen och den färdiga produkten innebär en nästan lika stor energiförlust. Utbytesförbättringar är ofta kopplade till produktkvalitet och logistiken, samt kontrollen av dessa båda. Här kan åtgärder längs hela processkedjan, även i de processteg som själva inte tillhör de största energianvändarna i ståltillverkningsprocessen, som exempelvis valsningen, alltså spela stor roll för energieffektiviteten.



Figur 42. Utbytet betydelse för produktionen. Källa *Jernkontorets utbildningspaket*.

## 5.2 Värmning och värmebehandling

### 5.2.1 Processbeskrivning

#### 5.2.1.1 Värmning inför bearbetning

Varmbearbetning (valsning eller smide) sker vid en temperatur på 1050 °C till 1300°C. Det vanligaste är att ämnena värms i en värmningsugn, men de kan också komma i ett varmflöde (det vill säga med ett visst värmeinnehåll) direkt från gjutningen, satsvis eller kontinuerligt. Det finns exempel på fullt kontinuerliga processer där stålet direktgjuts, ibland relativt tunt, och sedan går direkt in i ett valsverk (se 5.4.1.1).

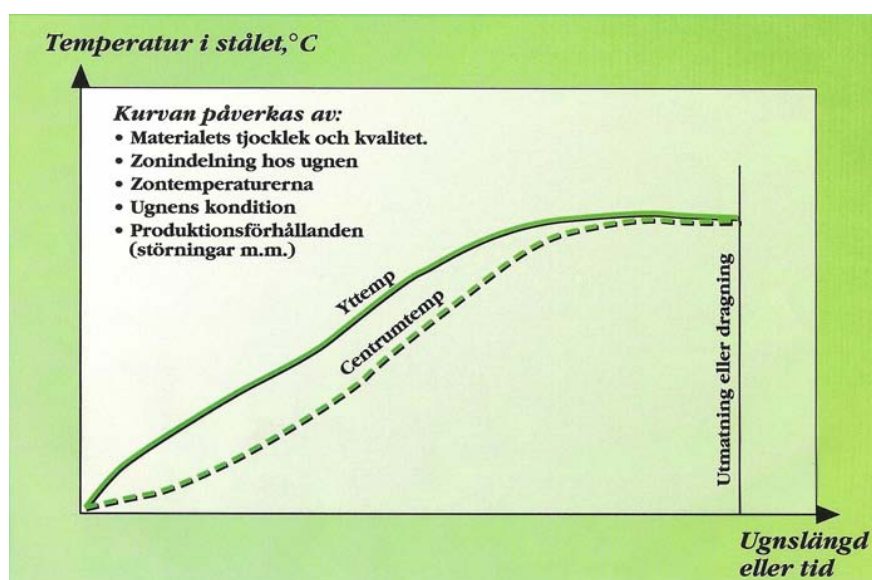
De ugnar som används för att värma stålet kan vara av många olika utföranden. Alla ugnar som värmer ämnen till ett efterföljande valsverk arbetar kontinuerligt. Vanliga typer är stegbalksugn, där ämnena ligger med ett visst mellanrum och lyfts steg för steg genom ugnen av lyftbalkar, s k stegbalkar, eller genomskjutningsugn, där ämnena skjuts i en obruten sträng genom ugnen av en inskjutningsanordning. Valsverksugnar är i regel bränsleeldade. I Sverige används mest gasol, olja eller processgaser från järn- och ståltillverkning. På kontinenten är även naturgas vanligt. Ugnarna är oftast indelade i flera temperaturzoner så att värmningen följer den önskade "värmningskurvan" (se nedan) på sin färd genom ugnen.

Ugnar som värmer stora ämnen till en smidespress arbetar ofta satsvis och kan vara både, fossileldade eller elektriskt värmda (ofta induktionsugnar vid mindre ämnesstorlekar). Gropugnar, där ämnena ställs ned i uppvärmda gropar, är typiska för värmning av göt.

Det är viktigt att temperaturfördelningen i stålet under hela värmningen kontrolleras för att stålet ska få rätt egenskaper. Värningsugnar regleras vanligen på ugnstemperaturen. Att man inte styr direkt på stålets temperatur beror på svårigheter att mäta denna. Regleringen sker genom att termoelement i ugnsrummet mäter den aktuella ugnstemperaturen, ”ärvärdet” och jämför det med ett ”börvärde”. ”Börvärdet” är en optimal ugnstemperatur som definierats för varje stålsort och varje zon/tid. Avviker ärvärdet från börvärdet ökar eller minskar regulatorn pådraget till brännarna för att ändra på ärvärdet, så att avvikelsen minskar eller helst försvinner.

I enklare system ges börvärdet av ett väl definierat riktvärde för varje stålsort (ett ”recept”) för den aktuella stålsorten. I mer avancerade system ges börvärdet av ett överordnat styrsystem som beräknar värdet utifrån ärvärden på temperaturen och fysikaliska modeller av värmningen som gör en uppskattning av ämnets temperatur och relaterar detta till den för den aktuella ståltypen ideala värningskurvan.

Hur stålets yt- och centrumtemperatur typiskt varierar under värmningsprocessen visas i **Figur 43**.



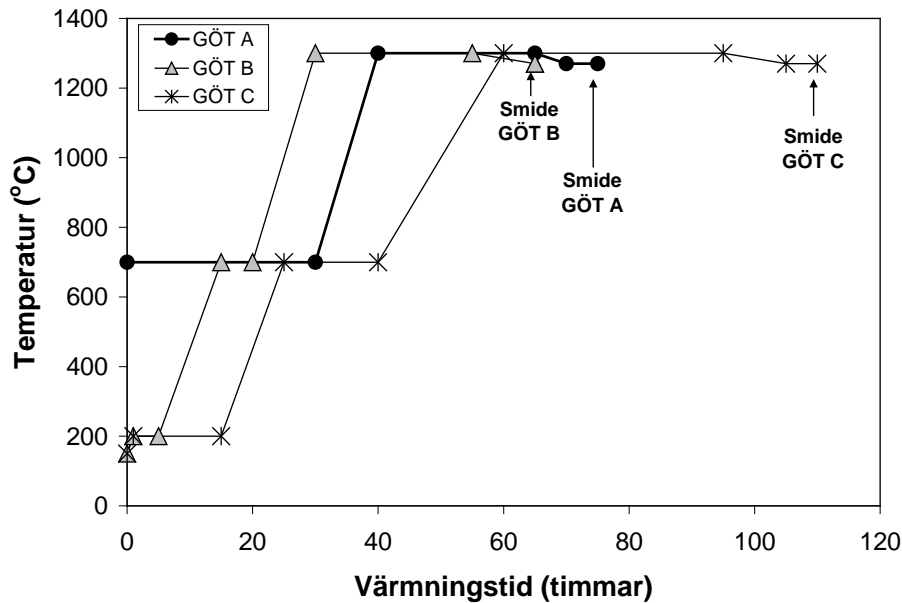
**Figur 43.** Typisk kurva för stålets yt- och centrumtemperaturer vid värmning. *Källa: Jernkontorets utbildningspaket, del 7.*

Temperaturregleringen i varje ugnszon är i regel kompletterad med en kvotreglering som ger rätt förhållande mellan luft- och bränslemängder till brännarna över hela reglerområdet. Denna kvotreglering baseras på uppmätta bränsle- och luftflöden till brännarsystemet. I mer avancerade system är kvotregleringen kopplat till stålqualität så att olika börvärden för kvoten väljs för olika stålsorter.

Ugnstrycket regleras med avgasspjället eller med en varvtalsstyrd fläkt för att hålla trycket marginellt högre än omgivningens tryck.

Värmning inför smide utförs som nämndes ovan oftast i satsvisa ugnar. I och med att göten oftast är betydligt tjockare än slabs, blooms och billets tar det lång tid att genomföra värmningen. Även här är det givetvis viktigt att värma stålet enligt den ideala kurvan för att uppnå de eftersträvade materialegenskaperna. **Figur 44** visar exempel på värningsförfarande inför smide för tre stålsorter. Göt C, som är det mest energikrävande stålet i exemplet

tillbringar sammanlagd 110 timmar (drygt fyra och ett halvt dygn!) i ugnen innan götet är klart för smide.



Figur 44. Exempel på värmningsprogram för tre olika stålsorter. Källa: Uddeholm

### 5.2.1.2 Värmebehandling

Många stålsorter som varmbearbetats eller kallbearbetats värmebehandlas. Värmebehandling görs för att ta bort inre spänningar från tidigare behandling (t.ex. härdning, kallvalsning eller ojämn kylning), för att förfina kornstruktur och kornstorlek, för ökad tånjbarhet, för att underlätta vidare bearbetning (t.ex. smide eller valsning) eller för att förbättra de mekaniska egenskaperna (t.ex. hårdhet, seghet och slitstyrka). Under värmebehandling värms stålet enligt ett visst temperaturprogram, och i vissa fall i närvaro av en skyddsgas eller annan en speciell atmosfär så att materialets struktur och egenskaper förändras på önskat sätt. Vid värmebehandlingsoperationer styrs alltid svalningsförloppet enligt ett visst schema. I Tabell 5 finns de vanligaste värmebehandlingsmetoderna kort beskrivna.

Tabell 5 Vanliga värmebehandlingsoperationer. Källa Jernkontoret.

Operation	Ändamål	Anm.
<b>Homogenisering</b>	För att ge vissa stål optimala egenskaper	Glödning vid relativt hög temperatur under lång tid
<b>Etappglödning</b>	Sänker stålets hårdhet så att härd- och svalningssprickor undviks.	Innebär strukturom-vandling av stålet.
<b>Väteglödning</b>	Minska för höga vätehalter genom diffusion.	Måste föregås av etapp-glödning för att åstad-komma strukturomvandling

<b>Regenererings-glödning</b>	För att ge vissa stål optimala egenskaper före mjukglödning	Forcerad kylning i specificerade kylmedier.
<b>Mjukglödning</b>	Ge materialet lämplig hårdhet före maskinbe-arbetning samt lämplig utgångsstruktur för vidare värmebehandling.	Innefattar styrd svalning i en eller flera etapper
<b>Härdning</b>	Ge materialet hög hårdhet.	Innefattar styrd kylning i specificerade kylmedia. Skall följas av anlöpning snarast möjligt.
<b>Anlöpning</b>	Ge materialet önskad leveranshårdhet	För de flesta stålsorter krävs anlöpning i två omgångar med mellanliggande svalning till rumstemperatur.
<b>Normalisering</b>	Lika mjukglödning	

För många stålverk är tendensen, sedan länge, att nya kvalificerade stålsorter ställer allt högre krav på olika typer av värmebehandling medförande längre och mer varierande tider i olika värmnings- och värmebehandlingsugnar. Ofta måste känsliga stålsorter förvärmas i en separat ugn innan värmning till bearbetningstemperatur sker, i andra fall kan en värmebehandling (homogenisering) behöva ske i värmningsugnen omedelbart före slutvärmning till bearbetningstemperatur och i andra fall åter krävs en kombination av förvärmning och homogenisering före värmning.

En operationsföljd för t ex en vanlig verktygsstålsort kan se ut som följer (operationer som kapning, blästring, provning, syning m.m. undantagna):

1. Etappglödning av elektrod (vissa stålsorter)
2. Omsmältning (vissa stålsorter), i enstaka fall två gånger
3. Förvärmning före smide alternativt valsning
4. Homogeniseringsglödning (vissa stålsorter)
5. Värmning till varmbearbetningstemperatur
6. Smidning alternativt valsning
7. Omvärmning, ibland flera gånger (vissa stålsorter respektive vissa dimensioner)
8. Fortsatt smide
9. Etappglödning av stång
10. Ev. väteglödning ( om för höga vätehalter i stålet)
11. Regenereringsglödning för att nå rätt struktur för mjukglödning (vissa stålsorter)
12. Svalning
13. Mjukglödning (de flesta stålsorter)

14. Vissa stålsorter kan i stället för mjukglödning ha härdning och flera anlöpningsoperationer (seghärdning)
15. Ibland förekommer att mjukglödgat material tas in för ny värmebehandling, seghärdning

Värmebehandlingsugnar kan vara kontinuerliga med utförande liknande ämnesvärmningsugnarna, men där transporten ofta sker med hjälp av vattenkylda rullar genom ugnen, eller satsvisa (t. ex. vagnugnar, klockugnar). Temperaturen är lägre än i värmningsugnarna (200°C till 1200°C). Styrningen av ugnen skiljer sig inte principiellt från värmningsugnarna även om det för alla ugnstyper inte finns lika sofistikerade styrsystem utvecklade som för de stora kontinuerliga valsverksugnarna.

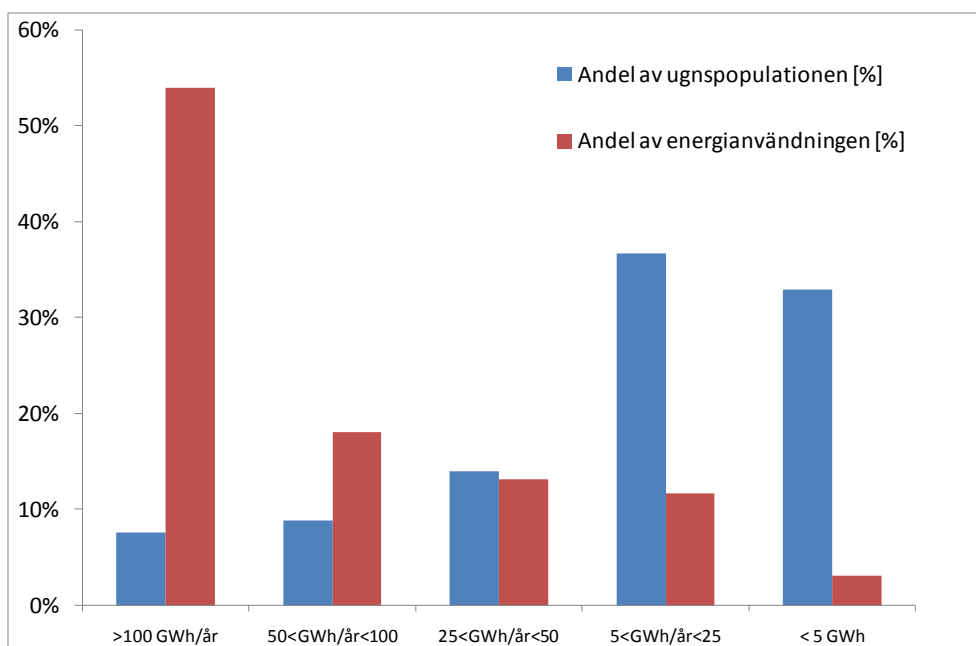
Många värmebehandlingsugnar är elvärmda eftersom det möjliggör en enklare temperaturreglering och kontroll av atmosfären. De elvärmda ugnarna har högre verkningsgrad och lägre ugnsslitage.

## 5.2.2 Beskrivning av dagsläget inom svensk stålindustri

### 5.2.2.1 Ugnar inom svensk stålindustri

#### Enkätundersökningen 2002

I samband med att Jernkontoret tog fram en rapport om villkor för NO<sub>x</sub>-emission 2002 genomfördes en enkätundersökning där data från energianvändning och produktion från 64 värmningsugnar och 51 värmebehandlingsugnar samlades in. **Figur 45** visar utgående från svaren i den undersökningen hur storleksfördelningen för ugnsparken ser ut inom svensk stålindustri, samt energianvändningen fördelat på de olika storlekssegmenten. Som framgår används mer än hälften av bränslet i ett fåtal mycket stora ugnar (>100 GWh/år). Det stora flertalet ugnar är dock relativt små (< 25 GWh/år) men bränsleförbrukningen i dessa många ugnar uppgår sammanlagt till endast omkring 15 % av den totala bränsleförbrukningen i bearbetningssteget.



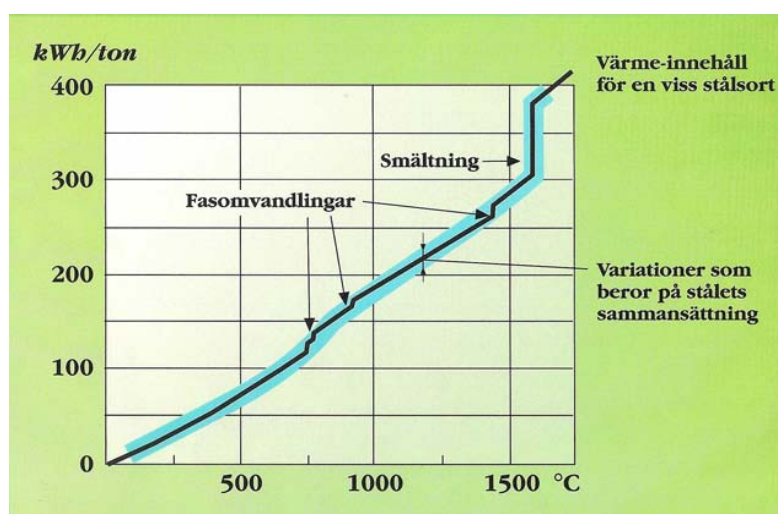
**Figur 45. Energianvändningen i stålindustrins bränsleledade värmnings- och värmebehandlingsugnar fördelade på ugnstorlek . Källa: Enkätundersökning 2002.**

## Enkätundersökningen 2010

Under 2010 genomfördes en ny enkätundersökning i syfte att samla underlag för beskrivningen av dagsläget i denna rapport. I denna ställdes betydligt fler frågor om ugnarnas teknik än i undersökningen 2002, men svarsutfallet blev lägre: Data från totalt för 54 värmningsugnar och 28 värmebehandlingsugnar samlades in. Eftersom data från majoriteten av värmningsugnarna (varibland samtliga av de största) inkom kan generella slutsatser om ugnsparkens status på goda grunder dras utifrån data. Detta gäller dock inte värmebehandlingsugnarna där det statistiska underlaget inte räcker för att dra generella slutsatser om ugnsparken status.

### 5.2.2.2 Värmning inför bearbetning

Tumregeln är att det för att värma ett stålämne krävs ca 20 kWh/ton för varje 100°C (se **Figur 46**). Detta motsvarar entalpihöjningen i stålet och ger en teoretisk gräns för vilken värme som minst måste tillföras ämnet. Hur mycket värme som behövs för att värma ett ämne inför bearbetning varierar högst betydligt beroende på ämnets dimension, tid i ugn, sluttemperatur och chargeringsstemperatur. Om ämnena som chargerats i ugnen har en temperatur på 600°C minskar exempelvis bränsleförbrukningen med omkring 35 % i jämförelse med om ämnena chargerats vid rumstemperatur.



**Figur 46. Entalpihöjningen i stål vid värmning . Källa: Jernkontorets utbildningspaket.**

Det finns uppskattningsvis ett sextiotal värmningsugnar i svensk stålindustri. I en energikartläggning som genomfördes för långa produkter inom svensk stålindustri varierade de specifika värmningstalerna från cirka 300 kWh/ton (för varmchargerat material) till närmare 1000 kWh/ton<sup>21</sup>. För värmning av stora göt från rumstemperatur till värmningstemperatur kan det handla om så mycket som 2000 kWh/ton. En stor del av dessa skillnader härrör från skillnader i temperaturnivåer och värmningsförfarande (vilket i sin tur beror på vilka stål som produceras i de olika ugnarna). Det är därmed ofta inte rättvisande att direkt utifrån ugnens specifika energianvändning dra slutsatser om dess effektivitet i förhållande till andra ugnar

<sup>21</sup> Valsningsrelaterad energiförbrukning för deltagande valsverk inom TO32-projektet "Energieffektivare driftsstrategi för valsning av avancerade stålprofiler". MEF08071K (Konfidentiell rapport)

även om den givetvis kan återspegla skillnader mellan ugnarnas status och teknik. Framför allt de stora kontinuerliga ugnarna har en hög teknisk nivå och ligger förhållandevis nära eller vid industriell "state-of-the-art" medan vissa, framför allt mindre satsvisa ugnar, har enklare teknik.

Under 1990-talet utvecklades brännartekniken kraftigt. Nya energieffektiva tekniker som regenerativa brännare och oxyfuel togs fram (5.2.3.1). Vid en enkätundersökning som genomfördes för stålindustrins värmnings- och värmebehandlingsugnar 2002 brändes omkring 50 % av bränslet i konventionella brännare utan förvärmning av förbränningsluften, medan 45 % brändes i brännare utrustade med rekuperatorer. De nya energieffektivare brännarteknikerna användes än så länge i relativt få ugnar, vilka stod för ungefär 5 % av energianvändningen i undersökningen. En enkätundersökning utförd under 2010<sup>22</sup>, som dock inte utgjorde en komplett inventering av ugnsparken, antydde att relativt många brännarbyten har ägt rum sedan 2002: 22 % av tonnageet värmdes 2010 i ugnar som använde en förvärmningstemperatur över 600°C eller syrgasförbränning. Den del av tonnageet som värms helt utan förvärmning, var dock fortfarande relativt hög, strax över 40 %. Flera projekt inom Jernkontorets forskningsverksamhet har arbetat med brännarteknik, nu senast i projektet *Energibesparing genom snabbare värmning och glödning* som sökt minska trösklarna för att införa modern brännarteknik (oxyfuel och DFI) i glödgningslinjerna genom att studera process- och materialpåverkan (se även 5.2.5.1).

Ju mer avancerade och ju bättre intrimmade ugnens styrsystem är, desto bättre är förutsättningarna att köra ugnen på ett energieffektivt sätt. En modern ugn använder en kvotreglering som är automatiserad och tar hänsyn till bränslekvalitet och i bästa fall även ståltyp när börvärdet sätts (se även 5.2.3.1). Enkätundersökningen 2010 visade att någonstans kring tre fjärdedelar av ugnarna hade en kvotreglering som tog hänsyn till bränslekvalitet. 11 % av de ugnar som rapporterades in i undersökningen kvotreglerades därutöver på ståltyp. Eftersom det är de största ugnarna som har de mest avancerade systemen så ökar den senare siffran till 43 % om man räknar med varmt tonnage som bas.

Typiskt kan användningen av ett överordnat styrsystem medföra en energieffektivisering på 10-15 %, främst tack vare att övervärmning undviks<sup>23</sup>. Om man ser till antalet ugnar är utnyttjandet av modellbaserad reglering ännu relativt lågt och i många fall används relativt enkla modeller. Enkätundersökningen 2010 antyder att omkring en fjärdedel av värmningsugnarna använde överordnade styrsystem (FOCS). Återigen är de större ugnarna som verkar ha de mest avancerade och bäst intrimmade systemen. Beräknat per varmt tonnage stiger därmed andelen som styrs med överordnad reglering till närmare 60 %.

Utvecklingen av FOCS har skett inom Jernkontorets forskning i över 30 år och systemen förbättras hela tiden genom nya funktioner och bättre modeller. I projektet *Ugnsstyrning och överordnad processanalys* som ingick i Jernkontorets Energiprogram 2006-2010 förbättrades användarvänligheten och ett nytt FOCS-system för gropugnar togs fram (se även 5.2.5.1)

En falskhals när det gäller ugnarnas styrsystem är kvaliteten på den indata som används. Som redan nämnts är det idag inte praktiskt möjligt att styra direkt på stålets temperatur, varför man styr på vägg- och gastemperaturer, vilka bestäms genom mätningar. Väggtemperaturen mäts i regel i en liten "skål" i väggen med ett termoelement instuckat. Ett problem är att dessa

---

<sup>22</sup> Enkätundersökning genomförd av Jernkontoret inom ramen för syntesarbetet.

<sup>23</sup> Information på Swerea MEFOS hemsida: <http://www.swerea.se/sv/mefos/Kunskapsomraden/Simulering-och-modellering/FOCS/>



mätningar är mycket känsliga för gasströmningarna i ugnen vilket givetvis påverkar kvaliteten i styrsystemets beräkningar. Gastemperaturen mäts i regel med en fast installation. Att finna bättre metoder för temperaturmätning som klarar den tuffa miljön i ugnarna är sedan länge ett högtintressant område. Inom Jernkontoret gjordes 2003 en utredning av möjliga tekniker för temperaturmätning i valsverksugnar<sup>24</sup>. Dock kvarstår i hög grad problematiken. I det pågående Stålforskningsprogrammet arbetar ett projekt med att finna bättre metoder för temperaturmätning vid glödning och inom TO51 har initiativ tagits till ett nytt projekt med målet att finna nya tekniker för att mäta temperaturen i en punkt i ugnsrummet<sup>25</sup>.

### 5.2.2.3 Värmebehandling

Energianvändningen för värmebehandling utgör en relativt liten del av stålindustrins totala energianvändning. En rimlig uppskattning utifrån tillgänglig statistik är att endast knappt 6 % av stålindustrins bränsleanvändning (på energibas och exklusive koks och kol) används för värmebehandling. Motsvarande siffra för el är 9 %<sup>26</sup>.

Det finns uppskattningsvis ett sextiotal bränsleeldade värmebehandlingsugnar inom svensk stålindustri. I den enkätundersökning som genomfördes 2010, där dock data för endast hälften av dessa samlades in, hade en femtedel av det värmebehandlade tonnaget, värmts i ugnar med en luftförvärmningstemperatur på över 600°C eller syrgasförbränning. Det är en något högre andel än för värmningsugnarna. I och med att svarsunderlaget för värmebehandlingsugnarna var så begränsat är det dock ingen slutsats som ska lyftas till generalitet.

Av värmebehandlingsugnarna för vilka svar erhöles i enkätundersökningen, var det bara 14 % av ugnarna som har överordnade styrsystem vilket tyder på att det inom värmebehandlingen fortfarande är vanligt att köra ”på recept”. Detta torde stålindustrin ha gemensamt med andra värmebehandlande sektorer, exempelvis gjuteribranschen. Med varmt tonnage som räknebas stiger dock siffran till 64 %, eftersom de stora kontinuerliga glödninglinjerna har överordnade styrsystem.

För många stålverk är tendensen sedan länge att nya kvalificerade stålsorter ställer allt högre krav på olika typer av värmebehandling medförande längre och mer varierande tider i värmebehandlingsugnarna. Ofta måste känsliga stålsorter förvärmas i en separat ugn innan värmning till bearbetningstemperatur sker, i andra fall krävs en värmebehandling (homogenisering) i värmningsugnen omedelbart före slutvärmning till bearbetningstemperatur och i andra fall åter krävs en kombination av förvärmning och homogenisering före värmning. Med tanke på att stålverken ofta har fler än 100 olika stålsorter på sitt program, var och en med varierande dimensionsområde är det uppenbart att stålens "tid i ugn" varierar högst betydligt.

## 5.2.3 Internationell utblick

### 5.2.3.1 Värmning inför bearbetning

#### *Ugns- och brännarteknik*

Under 1990-talet skedde en kraftig utveckling inom förbränningsteknik i syfte att öka energieffektiviteten i värmningen. De tekniker som togs fram byggde på att ta vara på

---

<sup>24</sup> J. Niska, *Temperature measurement techniques for rolling mill furnaces*, 2003, Jernkontoret rapport TO51-39

<sup>25</sup> Projektansökan till Energimyndigheten: *Ny teknik: direkt mätning av ämnestemperatur och ugnsatmosfär i värmningsugnar* (diarienummer 35330-1)

<sup>26</sup> Jernkontorets energistatistik 2008.



rökgasenergin genom att förvärma förbränningsluften i rekuperatorer<sup>27</sup> eller regenereratorer<sup>28</sup> eller på att använda syrgas istället för luft som oxidant (oxyfuel). Därtill utvecklades brännarnas design i syfte att åstadkomma en jämnare temperaturfördelning i ugnsrummet för att minska bildningen av NOx och effektivisera värmeöverföringen till stålet.

Moderna regenerativa tekniker bygger på att reducera syrehalten i den förvärmade luften med hjälp av indragning – entrainment - av rökgaser in i luftstrålen som injiceras in i ugnen. Bränslet introduceras sedan in i luftstrålen för att få en längre reaktionstid med den utspädda luften och därmed även sänka flamtemperaturen (s.k. slow mixing). Är förvärmnings-temperaturen tillräckligt hög kan man åstadkomma ett flamlöst läge. Det finns en rad olika regenerativa förbränningstekniker (FLOX, HTAC, HiTAC, HPAC) vilka samtliga bygger på samma grundläggande principer: hög temperatur på förbränningsluften och ”slow mixing”.

Oxyfuel-brännare skiljer sig egentligen inte ifrån en luftbrännare på något annat sätt än att ren syrgas används istället för luft. Den nya generationen oxy-fuel brännare använder sig av flamlös förbränning. Det finns heller ingenting som principiellt hindrar värmeåtervinning via rekuperatorer och regenereratorer vid syrgasförbränning men eftersom avgasvolymerna är betydligt mindre och värmeöverföringen i ugnen bättre är inte värmeåtervinningen av lika avgörande betydelse för ugnens verkningsgrad som vid luftförbränning. Linde gas har utvecklat autoregenerativa oxyfuelbrännare för strålningsstuber, men de finns ännu inte i fullskalig drift<sup>29</sup>. Experimentella data från ämnesvärmning visar att energieffektiviseringar på upp till 200 kWh/ton är möjliga med modern oxyfuelteknik. Oxyfuelteknik lämpar sig speciellt bra det är en produktivitetsökning som eftersträvas och möjliggör en uppgradering av befintliga ugnar utan den större kostnad, miljö och energibelastning som det innebär att bygga helt nytt.

Lansning av syrgas i lufteldade ugnar (HLL, High Level Lancing) kan användas för att höja ugnens verkningsgrad. Detta har bland annat framgångsrikt testats i SSABs värmningsugnar i Borlänge<sup>30</sup>.

En klassificering av brännartypen utgående från oxidationsmedel finns i **Tabell 6**. I tabellen finns också angivet vilket energibehov (grova uppskattningar) som kan förväntas med respektive teknik i jämförelse med konventionell förbränning (kallluftsförbränning).

Regenerativ teknik och oxyfuel är fullt kommersiella tekniker, om än ej för i alla tillämpningar. I dag har det skett över 120 installationer av Oxyfuel brännare i stålindustrin världen över<sup>31</sup>. Regenerativ teknik har också tillämpats i många värmningsugnar, även ett fåtal i Sverige. I jämförelse med övriga världen har den europeiska stålindustrin varit mer

---

<sup>27</sup> I en rekuperator är luft och avgaser skilda åt av ett värmeledande material genom vilket värmnet passerar från de heta rökgaserna till den kalla förbränningsluften. Med rekuperatorer kan man sänka avgastemperaturen till 300-600°C i en stålvärmningsugn.

<sup>28</sup> I en regenererator sker istället värmeväxlingen genom att ett värmelagrande material omväxlande passeras av heta rökgaser och kall luft. Typiskt är således att använda sig av brännarpar som arbetar växelvis, men det finns också exempel på regenerativa brännare med inbyggda regenereratorpar och således kan en regenerativ förbränning genomföras med endast en brännare. Med regenereratorer kan man sänka avgastemperaturen till 100-300°C i en stålvärmningsugn.

<sup>29</sup> Tomas Ekman, AGA AB (member of the Linde group)

<sup>30</sup> C. Wang et al., *Modeling analysis on potential energy saving in a Swedish rolling mill*. Proceedings of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry. Dusseldorf 27 June – 1 July, 2011.s

<sup>31</sup> Tomas Ekman, AGA AB (Linde group)

avvaktande inför de nya brännarteknikerna varför de framför allt vunnit mark i USA, Japan, Kina och Indien. Installationerna ökar dock även i Europa.

Förutom att regenerativ teknik och oxyfuel effektiviserar ugnen och reducerar utsläppen av NOx, möjliggör de också användning av mer lågvärdiga gaser (som masugns gas och syntesgas) även för högtemperaturtillämpningar. Experimentella studier visar t.ex att masugns gas och LD-gas (värmevärde omkring 3 resp. 7 MJ/Nm<sup>3</sup>) kan användas istället för naturgas i omvärmningsugnar med hjälp av regenerativ teknik<sup>32</sup>. Oxyfuelteknik för användning av masugns gas i omvärmningsugnar har studerats i ett RFCS-projekt<sup>33</sup> (se även 5.2.5.2). Inom projektet såg man att det inte var möjligt att uppnå efterfrågad temperatur i värmningsugnen utan att blanda in högvärdig gas. Genom att förvärma masugns gasen tror man sig dock kunna komma förbi detta problem, men ytterligare studier krävs. Än så länge har fokus legat på stålindustrins processgaser, och inte på andra lågvärdiga gaser som exempelvis syntesgas. Linde har dock installerat oxyfuel för förbränning av syntesgas (värmevärde typiskt kring 4-5 MJ/Nm<sup>3</sup>) i en anläggning för trådglödning i Kina, som uppges fungera väl<sup>34</sup>.

**Tabell 6 Förbränningstekniker och energibehov. Källa: Jernkontoret.**

				Förbränning	Energi behov		
Luft	Konventionell förbränning	Alla brännare för kall luft		Normal	100%		
				Stegvis	100%		
	Rekuperativ Förbränning	Rekuperativa brännare			Normal	90	
					Stegvis	85	
					Flamlös	85	
					Extern rekuperator	Normal	90
						Stegvis	85
						Flamlös	85
	Regenerativ förbränning	Regenerativa brännare		En regenerator per brännare	Normal	70	
					Stegvis	70	
					Flamlös, HiTAC	65	
					Fler regeneratorer per brännare	Normal	
Stegvis							
Flamlös, HiTAC						65	
Extern regenerator				Normal	70		
				Stegvis			
				Flamlös			
Syrgas	Oxy-Fuel förbränning			Normal	50		
				Stegvis	50		
				Flamlös	45		

<sup>32</sup> W. Adler et al. *CO2 reduction by regenerative heat recovery in process gas fired reheating furnaces*. Proceedings of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry. Dusseldorf 27 June – 1 July, 2011.

<sup>33</sup> RFCS projekt RFSR-CT-2006-00008, "CO2RED – CO2 reduction in reheating furnaces", 2006-07-01 – 2010-06-30.

<sup>34</sup> Tomas Ekman, AGA AB (Linde group)

## *Ugnsstyrssystem*

Moderna ugnsstyrssystem kan i korthet sägas bestå av ett överordnat och ett underordnat styrssystem.

Exempel på ett överordnat system är FOCS (Furnace Optimization Control System) som reglerar ugnstemperaturen med hjälp av värmningsmodellen STEELTEMP<sup>®</sup>. FOCS är det vanligaste överordnade styrsystemet i Svensk stålindustri. I nyare system är värmningsmodellen tvådimensionell (STEELTEMP<sup>®</sup> 2D). En tredimensionell modell finns för slabs, vilken används för beräkningar off-line, men är än så länge svår att implementera i styrningen då tillräckligt bra mätvärden för randvillkoren saknas. FOCS finns idag för kontinuerliga valsverksugnar (FOCS-RF) men även ett system för gropugnar (FOCS-PF) har utvecklats inom det pågående energiforskningsprogrammet (se avsnitt 5.2.5.1).

Ett modernt överordnat system styr börvärdena för ugnens olika temperaturzoner utifrån givna och för stålsorten specifika värmningskurvor och förmår optimera bränsleförbrukningen, och kan användas för taktstyrning (val av dragningsstakten med hänsyn till ugnens och valsverkets kapacitet), adaptation av ugnstemperaturen till mått temperatur/kraft/moment i valsverket och för beräkning av mängden bildad glödskal på ämnena.

En modern kvotreglering tar hänsyn till bränslekvalitet och ståltyp och en modern tryckreglering är kopplad i feed forward till de viktigaste påverkande faktorerna (exempelvis lucköppningar).

FOCS framkopplingsblock är inte prediktivt i den meningen att varje reglerhändelse optimeras som den första i en optimal följd av reglerhändelser givet en viss tidshorisont. Det finns dock exempel på att prediktiv teknik (mer specifikt DNPC, en kommersiell teknik för NMPC, Nonlinear Model Predictive Control) tillämpats i styrning av värmningsugnar<sup>35</sup>. I och med att värmningsmodellerna är icke linjära, blir också det prediktiva styrsystemet icke linjärt, vilket kräver speciella lösningsmetoder för optimeringen. Styrsystemet har, enligt forskarna, medfört att övervärmningen minskat, vilket lett till en energieffektivisering på 10 %.

### *5.2.3.2 Värmebehandling*

Brännarutvecklingen för värmebehandlingsugnar skiljer sig inte nämnvärt från den för värmningsugnar.

## **5.2.4 Effektiviseringsmöjligheter**

### *5.2.4.1 Effektivisering av värmnings- och värmebehandlingsugnar*

Vad som beskrivs i föregående avsnitt tyder på att det finns en relativt stor potential att öka energieffektiviteten i många av stålindustrins mindre ugnar genom att byta teknik till industriell "state-of-the art" (exempelvis genom brännarbyten och installation av mer avancerade styrssystem). Ett viktigt arbete ur energieffektiviseringssynpunkt är att höja tekniknivån för de ofta mindre ugnar som behöver moderniseras. I detta fall är det knappast forskning som behövs, utan snarare ett organiserat erfarenhetsutbyte företagen emellan som kan spela en roll samt incitament för att genomföra exempelvis brännarbyten. En grov uppskattning av storleken på effektiviseringspotentialen torde ligga någonstans kring ett par hundra GWh/år, om man räknar med den energi som används i ugnarna i fråga samt att

---

<sup>35</sup> E. Nederkoorn et al. Nonlinear Model Predictive Control of Walking Beam Furnace. Proceedings of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry. Dusseldorf 27 June – 1 July, 2011.

energianvändningen kan effektiviseras med ca 40 % vid byte av kalluftbrännare till moderna oxyfuel- eller regenerativa brännare, och ytterligare 10 % genom förbättrad styrning. Den teknoekonomiska potentialen är dock sannolikt lägre.

Vad det gäller brännarteknik, finns det exempelvis vissa aspekter som försvårar implementering av kommersiell ”state-of-the-art” i vissa ugnar. I och med att det handlar om ett stort antal relativt små ugnar blir brännarbyten förhållandevis dyra, med långa återbetalningstider. Därtill kommer det faktum att många av dessa ugnar används för värmning och värmebehandling av avancerade stålsorter där osäkerheter rörande produktkvaliteten gör att man ogärna byter ugnsatmosfär (”man vet vad man har, men inte vad man får”). Det är alltså viktigt att ny brännarteknik demonstreras med avseende på produktkvalitet och driftsäkerhet i relevanta tillämpningar. Detta har till exempel gjorts i projektet *Energieffektivare värmning och glödning* som ingick i Jernkontorets Energiprogram 2006-2010 (se även 5.2.5.1). Det finns också vissa tillämpningar där moderna förbränningstekniker ännu inte demonstrerats. Det gäller exempelvis takbrännare.

Det faktum att överordnade styrsystem inte finns utvecklade för alla av de ugnstyper, bidrar också till att den teknoekonomiska potentialen skiljer blir lägre. Även denna problematik adresserades i Jernkontorets Energiprogram 2006-2010, där man inom projektet *Ugnstyrning och överordnad processanalys* tog fram ett FOCS-system för gropugnar (se även 5.2.5.1). De största energianvändarna bland ugnarna i de svenska verken ligger vis eller förhållandevis nära state-of-the-art vad det gäller reglersystemen och har sedan länge överordnade styrsystem. Detta gör att potentialen för att effektivisera med hjälp av trimning och utveckling av dessa system är, procentuellt sett, relativt modest i förhållande till det fall man går från ett tillstånd av mer eller mindre manuell reglering. Därmed är dock inte sagt att potentialen är oansenlig, framför allt inte om man räknar in de utbyteshöjningar som kan åstadkommas med hjälp av en bättre kontroll på produktkvaliteten. Man ska hålla i minnet att en minskning av övervärmning med 5°C i de större ugnarna effektiviserar energianvändningen med någonstans kring 60 GWh/år<sup>36</sup>. Räknar man därutöver på den effektivisering som kommer av ökat utbyte, ökar potentialen ytterligare.

I och med att kundkraven ökar, med fler och kortare kampanjer samt snävare toleranser som följd, behöver ugnarnas och styrsystemens flexibilitet ökas för att energieffektiviteten inte ska minska. Detta ställer krav på utvecklingen av styrsystemen. Därtill kommer krav på flexibla lösningar, både vad det gäller bränslen och ex. syrgaslansning som gör att styrsystemen måste modifieras. Dessa områden är lämpliga för branchgemensam forskning. Därtill kan det vara intressant att utveckla överordnade styrsystem för ytterligare några frekvent använda ugnstyper.

#### 5.2.4.2 Omställning till bränslen med lägre koldioxidutsläpp

En stor utmaning för stålindustrin är att sänka koldioxidutsläppen. Värmningsprocesserna skulle kunna lämpa sig för övergång till förnyelsebara bränslen med lägre eller inga koldioxidutsläpp. Redan inom Jernkontoret Energiprogram 2006-2010 ingick ett projekt, *Minskad användning av fossil energi genom högtemperaturförgasning av biomassa och avfall*, med fokus på att utveckla en förgasningsteknik lämplig för stålindustrins ugnar (se även 5.2.5.1). Oaktat vilken teknik som används för att producera biobränslet, finns det dock

---

<sup>36</sup> Skattning av potentialen inför ansökan om projekt *Ny teknik: direkt mätning av ämnestemperatur och ugnsatmosfär i värmningsugnar* (Energimyndighetens diarienummer 35330-1)

en rad grundläggande villkor som måste uppfyllas om biobränslebaserade lösningar ska få spridning i stålindustrin:

- Tillgänglighet av bränslet på marknaden i tillräcklig omfattning och till ett tillräckligt konkurrenskraftigt pris
- Teknik för effektiv förbränning kan utvecklas som tillfredsställer de värmningskrav som ställs
- Påverkan på ämnen vid värmning inte är skadlig
- Restprodukter går att hantera på ett för samhället och industrin acceptabelt sätt
- Att infrastruktur kring hanteringen av förnyelsebara bränslen inte skapar större miljöproblem än förbränning av fossila bränslen

Stålindustrin har i egen regi gjort undersökningar kring tillgänglighet på marknaden och ser att det i framtiden sannolikt kommer att finnas tillräckliga mängder biobränsle på marknaden. Det är därför av stor vikt att kunna ta nästa steg och anpassa vidareförädling/förbränning och se till att skadliga effekter på värmda stålämnen inte uppstår.

För att stålbranschen skall kunna använda sig av förnyelsebara bränslen till en rimlig kostnad är det tydligt att det krävs att en blandning av olika bränslen kan användas. Detta innebär både logistiska och tekniska utmaningar. Om tekniska koncept för förbränning av förnyelsebara bränslen i stålvärmningsugnar skulle kunna utvecklas skulle stålbranschen som helhet kunna minska sina utsläpp av koldioxid med 62 kton CO<sub>2</sub> per år 2020, baserat på produktionen år 2008<sup>37</sup>.

Nyare förbränningsteknik, ofta utvecklad och använd främst av energi- och miljöskäl, förändrar från gängse förbränning värmefflödena i ugnstrymmet. Som exempel kan nämnas flamlös förbränning, regenerativ teknik men speciellt alla typer av syrgasanrikad förbränning som t.ex. separat syrgas injektion (HLL). Gemensamt är att relationen mellan mätt väggtemperatur och flamgastemperatur skiljer sig mot vanlig förbränning. En viktig aspekt är att modeller och styrsystem som används inom nordisk stålindustri är förberedda att kunna hantera de olika varianterna av förbränningsteknologi, liksom en ökad användning av flertalet olika bränslen i en och samma ugn.

Jernkontoret har i en projektansökan till Energimyndigheten adresserat dessa frågeställningar<sup>38</sup>.

## **5.2.5 Forskning och utveckling**

### *5.2.5.1 Inom Jernkontoret*

#### *Energiforskningsprogrammet*

Jernkontoret har under lång tid drivit ugnsteknisk forskning inom Teknikområde (TO) 51 – Energi och ugnsteknik. Bland annat har man bidragit till utvecklingen av regenerativa brännare under 1990-talet. Utveckling av FOCS och STEELTEMP är ett annat exempel på hur TO51 deltagit i en långsiktig utveckling (de första forskningsinsatserna i ämnet gjordes på 70-talet). FOCS-STEELTEMP är för övrigt den produkt från den gemensamma forskningen

---

<sup>37</sup> Skattning av potentialen inför ansökan om projekt *Förnybara bränslen i stålvärmningsugnar* (diarienummer 35386-1). Bygger på antagandet att 10 % av det fossila bränslet i stålindustrins värmningsugnar ersätts.

<sup>38</sup> Projektansökan till Energimyndigheten: *Förnybara bränslen i stålvärmningsugnar* (diarienummer 35386-1)

som sålts mest utomlands (idag av ABB och Prevas). Energimyndigheten, och dess föregångare STU, har varit en viktig delfinansiär av den energirelaterade forskningen.

Inom det senaste i raden av gemensamma satsningar från stålindustrin och Energimyndigheten, Jernkontorets Energiprogram 2006-2010, handlar fyra av de åtta projekten om värmning och bearbetning, varav framförallt tre berör värmningen.

Projektet *Snabbare värmning och glödning*<sup>39</sup> har utvärderat olika tillämpning av konventionella, Oxyfuel, flamlös Oxyfuel och flamkontakt brännare, s.k. DFI för värmning och glödning av stål. Fokus har legat på möjligheterna att öka produktionshastigheter med bibehållna materialegenskaper, utan att påverka senare processteg, som exempelvis betning. Ett stort antal stålsorter, som kolstål, austenitiska, ferritiska och duplexa (ferritisk-austenitisk) har undersökts i projektet. Projektet har visat att endast hanterbara begränsningar uppstod vid användning av Oxyfuel som ny brännarteknik, vilket givetvis underlättar fortsatt implementering av tekniken i svensk stålindustri.

Vid projektets start fanns 36 ugnar med Oxyfuelteknik<sup>40</sup> i Sverige, varav de flesta var ugnar för ämnesvärmning. Sedan dess har antalet oxyfuelinstallationer i svensk stålindustri ökat. Därmed kan en del av projektets effektiviseringspotential på totalt 75 GWh/år, anses ha infriats. Därtill förväntas oxyfueltekniken vinna ytterligare mark inom de kommande åren. De positiva resultaten från projektet har framförallt betydelse för att Oxyfuel installeras i glödgningslinjerna.

Projektet *Ugnsstyrning och överordnad processanalys*<sup>41</sup> består av fem delprojekt. De tre första handlar om att utveckla systemet FOCS-STEELTEMP<sup>®</sup> i 2D, bland annat genom att förbättra användarvänligheten, att infoga nya och mer sofistikerade värmningsmodeller och genom att ta fram en helt ny tillämpning, närmare bestämt för gropugnar. Resterande två delprojekt handlar om att utnyttja multivariata metoder för att förbättra regleringen vid kontinuerlig glödning med hjälp av en kombination av fysikaliska och statistiska modeller och att identifiera processavvikelser längs hela processkedjan värmning-valsning-glödning-färdig produkt. Vid projektslut hade en effektivisering på 36 GWh/år vara uppnått inom projektet och vid full implementering räknar man med potentialen 110 GWh/år.

I projektet *Minskad användning av fossil energi i stålindustrin genom högtemperaturförgasning av biomassa*<sup>42</sup>, ett doktorandprojekt till största delen utfört på KTH, togs den så kallade högtemperaturförgasningstekniken från lovande resultat i lab-skala till en teknik redo för att skalas upp till demo-storlek. Kopplingen till stålindustrin bestod i att tekniken förväntades ge en relativt högvärdig syntesgas, som skulle passa stålindustrins krav på höga flamtemperaturer. Tekniken står i begrepp att kommersialiseras, i ett första steg för CHP (Combined Heat and Power production). En rimlig potential för införandet av alternativa bränslen inom stålindustrin anses vara 10 % av bränslebehovet för ämnesvärmning inom 10 år (vilket motsvarar drygt 200 GWh/år). Som redan nämnts, krävs dock en hel del utredning-, utvecklings- och forskningsarbete innan detta kan ske vilket adresseras i ett nytt projektförslag<sup>43</sup>.

---

<sup>39</sup> Energimyndighetens projekt 30118-1 (JK 43027)

<sup>40</sup> Enligt AGA AB (Linde Group)

<sup>41</sup> Energimyndighetens projekt 30117-1 (JK 51054)

<sup>42</sup> Energimyndighetens projekt 30123-1 (JK 51053) – Minskad användning av fossil energi i stålindustrin genom högtemperaturförgasning av biomassa och avfall.

<sup>43</sup> Projektansökan till Energimyndigheten: *Förnybara bränslen i stålvarmning* (diarienummer 35386-1)

### Övriga forskningsprogram

Även i det program som delfinansieras av VINNOVA (Strategiskt Stålforskningsprogram för Sverige 2007-2012 eller ”Stålforskningsprogrammet”) pågår ett projekt med betydelse energianvändningen och framför allt utbytet vid värmebehandling. I projektet, kallat *Temperaturbestämning för optimal glödning*<sup>44</sup>, undersöks hur temperaturstyrning vid glödning kan göras bättre ex. genom att med IR pyrometermätning i glödningssugnar avskärma den störande bakgrundsstrålningen. Projektet har genomfört FTIR spektral emissivitetmätningar på rena och oxiderade stålytor och gastemperaturmätningar med olika tekniker för bättre randvillkorsbestämning i glödningssugnar. Vad det gäller att förbättra mätningarna av väggtemperaturen provar man hos SSAB i Borlänge just nu med termoelement inbyggda i ugnens murverk. Genom att mäta temperaturen i väggen i två till tre punkter räknar man sig fram till temperaturen på ugnens innervägg. Projektet angränsar till ett RFCS-projekt OPTIMET<sup>45</sup> inom vilket man försöker skapa en integrerad simulator för att prediktera temperatur, mikrostruktur och mekaniska egenskaper efter glödning hos både långa och platta produkter. Kan man styra temperaturen i glödningen bättre, kan man sannolikt minska övervärmning vilket ger energieffektivisering men kanske viktigare är att förutsättningar för att klara hårda kvalitetskrav ökar vilket i sin tur förbättrar utbytet och därigenom minskar den specifika energianvändningen.

#### 5.2.5.2 I övrigt

Inom såväl regenerativ teknik som oxyfuel pågår en ständig brännarutveckling inom olika tillämpningsområden. De eventuella höjningar av verkningsgraden som åstadkoms i förhållande till redan existerande teknik är dock relativt modesta i och med att effektiviteten på dessa typer utav förbränningssystem redan är så pass hög. Inte desto mindre är denna tekniska utveckling viktig då även en liten verkningsgradshöjning kan spara stora mängder bränsle i många tillämpningar.

Ett exempel på ett projekt som demonstrerar modern brännarteknik inom stålindustrin är CO2RED, ett projekt inom RFCS som dels studerar regenerativ teknik i takbrännare och sidobrännare och dels studerar användning av oxyfuel för förbränning av masugns gas i pilotskala<sup>46</sup>. Swerea MEFOS har installerat en oxyfuel brännare utvecklat av AGA-Linde som ger låga NOx-utsläpp vid förbränning av gasol berikad masugns gas och med ett prestanda som ger möjligheten att maximera produktiviteten med 100% gasol-oxyfuel eller maximera ekonomin vid lägre produktivitet med masugns gas-gasol-oxyfuel blandningar.

Vad det gäller tillämpning av biomassa inom stålindustrin och då framför allt i värmningen har till exempel Linköpings universitet genomfört en studie tillsammans med Sandvik Materials Technology<sup>47</sup>.

Också inom styr- och reglerteknik finns RFCS-projekt. Exempel är Cognitive control<sup>48</sup> och Flatness control<sup>49</sup> som studerar larmhantering under kallvalsning, galvanisering och

---

<sup>44</sup> JK 51055 – *Temperaturbestämning för optimal glödning*

<sup>45</sup> OPTIMET ”*Optimisation of the metallurgical structures and mechanical properties by improving the heat treatment processes in flat and long production lines with new setup and control methods*” RFCS-projekt, July 2007-Dec. 2010

<sup>46</sup> RFCS projekt RFSR-CT-2006-00008, “CO2RED – CO2 reduction in reheating furnaces”, 2006-07-01 – 2010-06-30

<sup>47</sup> M. Johansson, M. Söderström. Bio-syngas Fuel in the Steel Industry’s Heating Furnaces, a Case study on Feasibility and CO2 mitigation effects.

glödning respektive temperaturjämnhet i glödgningsugnar, samt HYDRAS<sup>50</sup>, vars målsättning är att spara energi genom att kontrollera och styra vätehalten i grövre långa stålprodukter.

## 5.2.6 Utvecklingsbehov

### 5.2.6.1 Effektivisering av värmnings- och värmebehandlingsugnarna

Utredning/Teknikprovning/Kunskapsöverföring (+ 0 år efter projektslut)

- **Effektivisering mindre ugnar genom att höja deras tekniknivå**  
Inventeringen av ugnarna visar att det finns en teoretisk förbättringspotential framförallt i de mindre värmnings- och värmebehandlingsugnarna. Hur stor är den teknoekonomiska potentialen med bas i redan kommersiell teknik? En gång identifierad, skulle den potentialen kunna ligga till grund för förslag på åtgärder för att öka effektiviteten i dessa ugnar (erfarenhetsutbyte, gemensam teknikupphandling, gemensam teknikverifiering etc.)
- **Metodutveckling för genomgripande analys av värmeflödena i en verklig ugn.**  
När en energibalans upprättas för en äldre ugn är det vanligt att en relativt stor del, till och med 10 %, av energianvändningen inte kan förklaras. Genom att göra en mer genomgripande analys av värmeflödena skulle man kunna besvara frågor som -Hur långt är man i verkligheten ifrån designvärden?, -Vilka felkällor finns i mätningar och beräkningar och, -Hur noggrant kan resultatet rimligen vara? Den kunskapen skulle sedan kunna användas för att effektivisera ugnen.
- **Gemensamma tester av högemissiva beläggningar**  
På marknaden finns beläggningar som påstås öka ugnens verkningsgrad. Priserna är höga och det är intressant att gå samman i ett bruksforskningsprojekt för att utvärdera materialen. Frågor som behöver besvaras är exempelvis: Är beläggningarna så bra som de utlovar? Lönar det sig? Vad har användningen för inverkan på värmväxlingen?

Demonstration (+ 0 år efter projektslut)

- **Demonstration av modern brännarteknik i specifika tillämpningar.**  
Innan man implementerar en teknik vill man försäkra sig om att processtabilitet, drift och produktkvalitet inte påverkas. För att få in modern brännarteknik på bred front kan det i många fall behövas att tekniken demonstreras i just en viss tillämpning. Exempel på ett tillämpningsområde som behöver demonstreras är mattor av takbrännare (en grov uppskattning är att ca 10 % av energin går i sådana brännare).
- **Minska inläckaget av luft**  
Otäta ugnar leder till värmeförluster och i oxyfueleldade ugnar är det också väsentligt

---

<sup>48</sup> RFCS projekt RFSR-CT-2010-00037, "Cognitive Control – Cognitive control systems in steel processing lines for minimised energy consumption and higher product quality", 2010-07-01 – 2013-12-31

<sup>49</sup> RFCS projekt RFSR-CT-2010-00015, "Flat Strip Control – Controlling flatness of strips in furnace of continuous annealing/galvalising lines", 2010-07-01 – 2013-12-31

<sup>50</sup> RFCS projekt RFSR-CT-2009-00030, "HYDRAS – Hydrogen assessment in steel products and semi-products", 2009-07-01 – 2012-06-30



att minska inläckage av luft för att inte termisk NO<sub>x</sub> ska bildas. Det finns exempelvis en patenterad metod för att tätta ugnsluckor, men denna behöver demonstreras<sup>51</sup>.

- **Billiga robusta metoder för att bestämma randvillkor till ex. STEELTEMP**  
De beräkningar som utförs i dagens överordnade styrsystem använder ugnens väggtemperatur som randvillkor. Att mäta väggtemperaturen i ugnen är svårt. Att utveckla billiga robusta metoder för att bestämma randvillkoren kan bygga på temperaturmätning eller off-line beräkningar med fysikaliska modeller (CFD) eller en kombination av båda.
- **Länka kvalitetsbrister/haverier till processparameterar**  
Fortsatt utveckling av multivariata metoder.

Utveckling (+ 1-5 år efter projektslut)

- **Ännu effektivare brännarlösningar**  
Är energimängden tillräckligt stor kan redan en marginell höjning av verkningsgraden betyda stora bränslebesparingar. Förbränningstekniker som kan utvecklas är regenerativ oxyfuel och katalytiska brännare.
- **Göra STEELTEMP mer flexibelt för kombination med alternativa beräkningsmoduler**  
Med STEELTEMPs nuvarande kod är det svårt att koppla på egna beräkningsmoduler. Om det var lätt att lägga till egna beräkningar för exempelvis randvillkor skulle styrsystemen kunna utnyttjas bättre.
- **3D FOCS-STEELTEMP-system on-line**  
Idag är det inte möjligt att använda 3D beräkningar on-line i själva styrsystemet. Dessutom behöver 3D-modellen utvecklas för fler case (finns idag för RF).
- **Förbättrade körplaner vid värmning av olika poster med olika dragtemperaturer**  
Energieffektiviteten skulle kunna ökas om ugnarnas körscheman var bättre anpassade efter posternas dragtemperatur.
- **Olika tekniker för samkörning av olika ugnar till ett valsverk**  
Genom att bättre planera ugnsdriften för en ugnspark som helhet, skulle energieffektiviseringar kunna göras. För detta krävs att logistiksystem utvecklas så att driften optimeras med hänsyn till både respektive ugn optimala energieffektivitet och kombinationen av dessa.
- **Övervakningssystem som visar aktuellt läge ur energieffektivitetssynpunkt**  
Med ett användarvänligt gränssnitt som i realtid åskådliggör för såväl operatörer som ingenjörer hur ugnen presterar i jämförelse med ett "ideal" skulle underlätta för att köra ugnen på ett energieffektivt sätt.
- **Modeller för ugnsatmosfärens sammansättning och värmefflöde till ämnena**
- **Mer flexibel reglering för olika produktionsvolymmer.**
- **Robust återkoppling av temperaturnivå från mätningar i valsverk till ugn.**  
Förbättra modell och randvillkor (beskrivning och mätning) för valsning. Kan även inbegripa förbättrad temperaturmätning på övergångsheta.

---

<sup>51</sup> Mats Gartz, iDEVO, <http://www.idevo.se/>.

Forskning (> 5 år efter projektslut)

- **Direktmätning av ämnestemperatur och ugnsatmosfär i värmningsugnar**

Styrbarheten av ugnen skulle kunna ökas om man i realtid och med precision kunde bestämma temperatur och sammansättning hos gasen i en fri punkt i ugnsrummet.

- **Recirkulation av rökgaser**

Genom att använda recirkulation av rökgaserna som en styrbar parameter skulle man kunna balansera H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> halt efter behov med hjälp av O<sub>2</sub>-balans.

- **Metoder för att förutsäga underhållsbehov**

Om man utifrån loggade data kan förutsäga när underhåll och planerade stopp skall genomföras på ett klokare sätt.

- **”Diffusa” sensorer**

Tusen givare, ett mätvärde.

#### 5.2.6.2 Omställning till bränslen med lägre koldioxidutsläpp

Utveckling (+ 1-5 år efter projektslut)

- **Användning av lågvärdiga bränslen (som masugnsgas och syntesgas)**

Lågvärdiga bränslen som syntesgas från förgasning och masugnsgas används inte alls för värmning och värmebehandling inom stålindustrin idag. För att komma upp i tillräckligt höga flamtemperaturer för att kunna dessa gaser för värmning krävs regenerativ teknik eller oxyfuel. Det finns exempel på men användning av lågvärdiga gaser för värmning inom stålindustrin, men för att anpassa teknik till de bränslen och material som är aktuella för svensk stålindustri krävs utvecklingsarbete. Man behöver förstå vad dessa typer av bränslen ställer för krav på brännaren, processen och processutrustningen. Faktorer som skulle behöva undersökas är materialpåverkan (både på stålet och på utrusningen ur ett underhållsperspektiv) och styrbarheten.

## 5.3 Bearbetning

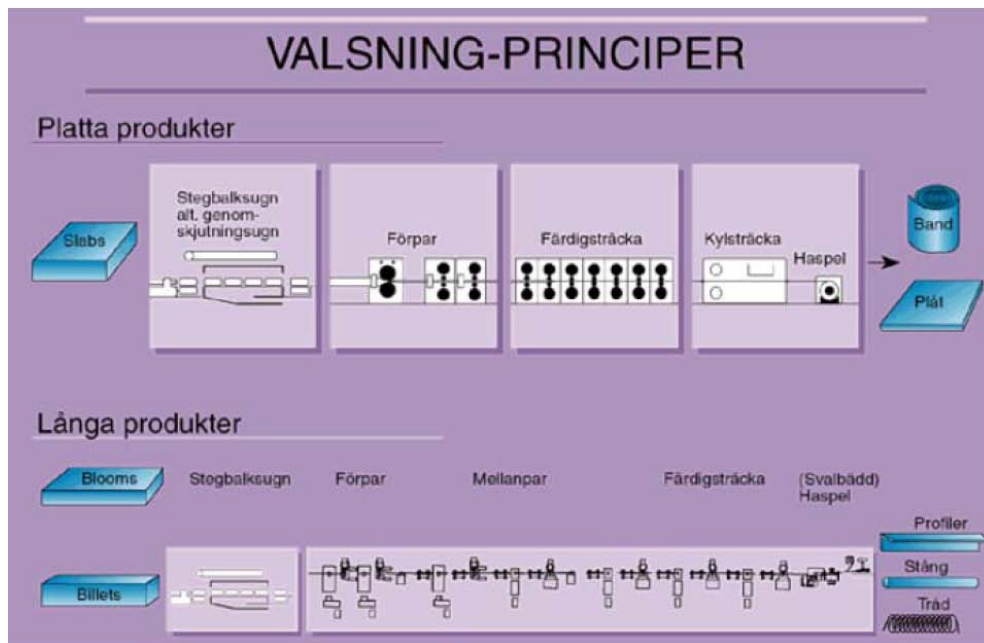
### 5.3.1 Processbeskrivning

#### 5.3.1.1 Varmbearbetning

När ämnena har nått rätt temperatur för valsning eller smide, transporteras de från ugnen till valsverket eller smedjan. Före bearbetningen avlägsnas glödskalet genom högrycksspolning med vatten för att glödskalet inte ska valsas in i produkten och ge ytfel. Att avlägsna glödskalet är speciellt viktigt för produkter med höga krav på ytorna, särskilt plåt och band.

#### *Varmvalsning*

Varmvalsning är den vanligaste metoden vid plastisk bearbetning av stål. Bearbetningen sker då ämnet passerar mellan två roterande valsar. Processtegen vid valsning av platta och långa produkter framgår av **Figur 47**.



**Figur 47** Översiktlig processbeskrivning för valsning av platta och långa produkter. *Källa: Jernkontorets utbildningspaket*

Valsningen kan ske kontinuerligt, dvs i en riktning, eller reversibelt, vilket innebär att det varma stålet, hetan, passerar fram och tillbaka mellan valsarna flera gånger. De flesta valsverk i Norden har en blandning av reversibel valsning och kontinuerlig valsning, där reversibel valsning används i början av valsningsprocessen, där ämnesdimensionerna är stora och valsningshastigheterna låga, medan kontinuerlig valsning används i slutet av valsverket, t ex i mellan- och slutsträckan vid stång- eller trådvalsning.

Kännetecknande vid valsning av långa produkter är att man använder speciella spårserier för varje produkttyp. Spårserien har kalibrerats så att hetans tvärsnittsarea minskar för varje stick, samtidigt som formen alltmer närmar sig den slutgiltiga. Symmetriska profiler valsas i öppna spår där ämnet vrids mellan sticken, medan slutna spår används för färdigvalsning av osymmetriska profiler. Spårserien utformas (kalibreras) främst för att uppnå höga reduktioner och god genombearbetning. Spårkalibreringen beror av det valsade materialet, temperatur, valsdiameter, valsmaterial, valsverk etc. Idag finns avancerade datorhjälpmedel tillgängliga för kalibrering, bl a FEM-analys (Finita ElementMetoder). De sista sticken vid trådvalsning görs vanligen i trådblock, där sluthastigheten kan vara upp till 120 m/s.

Vissa stålsorter kyls i en kylsträcka (ACC = Accelerated Cooling) för att uppnå rätt materialegenskaper.

Då det bearbetade stålet fortfarande är varmt och efter eventuell kylning, riktas den i ett varmriktverk och får sedan svalna på en svalbädd.



**Figur 48.** Varmvalsning av stång. *Källa: Jernkontoret*

Varmvalsning av platta produkter sker med, i huvudsak, cylindriska valsar. Det som eftersträvas är en jämntjock produkt i såväl längs- som breddled.

Grovplåt är i allmänhet bredare än två meter och tjockare än ca 5 mm. Dessa valsas i huvudsak styckevis i reversibla valsverk med en valsstol, direkt från slabs till färdiga moderplåtar. Moderplåtarna riktas, värmebehandlas och kapas till kundplåtar.

Band är oftast smalare än två meter och valsas i kontinuerliga eller halvkontinuerliga verk med flera valsstolar. Sluttjockleken för varmvalsade band kan vara ned till ca 1 mm. Den vanligaste typen av varmbandverk är det halvkontinuerliga med ett reversibelt förpar och en slutsträcka med fem till sju valsstolar. I förparet valsas ämnena reversibelt från slabstjockleken, ca 200 mm, till en övergångstjocklek på 25-35 mm. Förparet är ofta även utrustat med vertikalt ställda valsar som valsar ämnens kanter för att styra bandets bredd. I slutsträckan valsas bandet sedan kontinuerligt, genom alla valsstolarna i följd, ned till den önskade sluttjockleken.

I vissa valsverk är slutsträckan ersatt med en enda reversibel valsstol. Eftersom bandet blir långt måste det rullas upp efter varje passage av valsverket. För att inte temperaturen ska falla för snabbt sker upprullning i ugnar, en på vardera sidan av valsverket. Denna valsverkstyp kallas Steckelvalsverk.



**Figur 49. Varmbandverk på SSAB EMEA. Källa: SSAB EMEA**

Efter avslutad valsning förs bandet utrullat på en rullbana genom en kylsträcka där det med vatten kyls ned till en bestämd temperatur innan det slutligen rullas till en rulle i haspeln.

Under valsningen och den efterföljande kylningen är det viktigt att bandets temperatur är noggrant styrd så att varje valsningssteg sker vid rätt temperatur och att temperaturen före och efter kylningen är den rätta. Tillsammans med stålets kemiska sammansättning bestämmer detta det färdigvalsade bandets hållfasthetsegenskaper. Även kylningshastigheten i kylsträckan är viktig. Genom att variera temperatur- och deformationshistorien kan olika egenskaper erhållas för samma materialtyp.

Förutom hållfasthetsegenskaper är även dimensionsegenskaper som tjocklek, längd, bredd och planhet viktiga. Dessa egenskaper mäts under valsningen och styrs till önskade mått med reglerdon i valsverket. Styrningen måste kompensera för att valsarna deformeras elastiskt av krafterna vid valsningen samt nöts och sväller av uppvärmningen från plåtar och band. På grund av slitaget måste valsar bytas ut med jämna mellanrum.

### *Smide*

Med smide menas att man åstadkommer en plastisk förändring hos arbetsstycket genom att bearbeta det med plana eller graverade verktyg. De två förekommande huvudprinciperna är sänksmidning och friformssmidning. Vid sänksmidning sker formningen av ämnet mellan slutna verktyg, s k sänken, till mer eller mindre färdiga konstruktionsdetaljer. Vid friformssmidning bearbetas ämnet vanligen mellan plana verktyg. Metoden tillåter större arbetsstycken än vid sänksmidning. Friformssmidning används för att framställa grova produkter av svårbearbetade material, som inte kan valsas på grund av gjutstruktur och där tvärsnittet inte är lika i längsled eller där antalet tillverkade enheter är få.

Vid friformssmidning tillverkas många typer av stångprodukter med cirkulära, rektangulära eller månghörniga tvärsnitt. Även stora plattor och skivor för flänsar tillverkas med friformssmidning. Genom s k formsmide kan mer komplicerade produkter framställas, t ex valsar med tappar eller långa axlar med flänsar.

### *Extrusion*

Extrusion är en metod för tillverkning av sömlösa rör (dvs rör som inte svetsats). Bearbetningen utgår från ett hålrat ämne, som framställts genom kapning och borring av grov

stång. En alternativ metod är att använda ett ämne av pulver som innesluts i en kapsel. Ämnet värms och pressas därefter ut genom ett munstycke (matris). Smörjning sker med glas som smörjmedel. Under extrusionen används ett dorn i ämnets hål.

### 5.3.1.2 *Kallbearbetning*

Kallbearbetningen genomförs utan att stålet värms. Exempel på kallbearbetningsoperationer är kallvalsning och tråddragning.

#### *Kallvalsning*

När ett band valsats har ned till ca 1 mm går det inte att fortsätta varmvalsning eftersom bandet kallnar för fort. Kallvalsning används därför för att ytterligare minska produktens tjocklek, till exempel för att producera tunnplåt eller folie, och medger också en bättre kontroll av ex. plåtens tjocklek och yta.

Kallvalsning kan ske i flera typer av valsverk. En vanlig typ är tandemvalsverk som består av flera valsstolar i rad där bandet valsas kontinuerligt genom alla valsstolar i följd i en riktning och rullas upp på haspel efteråt. Denna typ av valsverk har hög produktionskapacitet men är inte så flexibla. Antalet stick är bestämt av antalet valsstolar.

Om kravet på produktionskapacitet inte är så högt kan man kallvalsa fram och tillbaka i ett reversibelt valsverk med en valsstol och en haspel på var sida. Då kan man valsa hur få eller många stick som önskas tills bandet är färdigt eller för hårt att valsa vidare.

När bandet blivit mycket tunt måste valsdiametern vara liten för att få så högt valstryck att tjockleken kan reduceras. Dessa smala valsar måste stödjas med ett helt paket av valsar för att inte böjas för mycket av valstrycket. Denna typ av valsverk kallas mångvalsverk.

En speciell typ av kallvalsning görs i trimvalsverk eller glättvalsverk. I dessa valsverk reduceras tjockleken mycket litet men valsningen påverkar materialets hållfasthets- eller ytegenskaper.

Vid kallvalsning används rena oljor eller emulsioner av vatten och olja för att minska friktionen mellan valsar och band samt för att kyla banden som värms upp av deformationsarbetet.

Vid kallvalsningen bestäms inte hållfasthetsegenskaperna i samma grad av när deformationen sker. Däremot hårdnar materialet vid kallvalsning så att det till slut blir i stort sett omöjligt att deformera mer. Genom värmebehandling, glödning, kan materialet fås att mjukna och bli möjligt att deformera ytterligare. Genom omväxlande valsning och glödning kan banden valsas ned till tjocklekar på tiondelar eller hundradelar av en millimeter. Med hänsyn till materialets kemiska sammansättning och genom en kombination av valsning och värmebehandling kan materialet få önskade hållfasthetsegenskaper.

#### *Tråddragning*

Tråddragning används för många olika stålsorter, från kolstål till snabbstål och material för värmespiraler i ugnar. Syftet med tråddragning är att erhålla klenare dimensioner än vad varmvalsning ger ( $< \text{Ø } 5,5 \text{ mm}$ ), och/eller bättre ytor och mekaniska egenskaper, oftast förhöjd hållfasthet.

Innan tråddragningen betas den varmvalsade tråden i syrabad för att avlägsna oxider. Olika bad används beroende på om det är kolstål eller rostfritt material. Vid behov kan även en glödning ske före betning för att ge materialet rätt struktur för dragning.





**Figur 50** Tråddragning. Källa: Jernkontoret.

Själva dragningen sker i en dragskiva, oftast av hårdmetall. Vid dragning används smörjmedel av olika slag. För bra dragresultat måste smörjmedlet fästa bra på trådytan. Olika typer av dragning finns, alltifrån dragning i en dragskiva till dragning i tio skivor efter varandra. Snabbstålstråd dras med ett stick i taget och tråden förvärms 600 °C före varje dragning. Totalt dras fyra stick, ska tråden dras ytterligare måste den mjukglödgas först. För andra stålsorter, t ex rostfritt stål, dras betydligt fler drag efter varandra, 8–10 st, och totala reduktionen blir större, 85–90 %, innan glödning sker. Efter dragning sker påhaspling.

### 5.3.2 Bearbetning inom svensk stålindustri

I Sverige varmvalsas stål i Långshyttan, Fagersta, Avesta, Degerfors, Smedjebacken, Boxholm, Hofors, Hällefors, Sandviken, Hallstahammar, Söderfors, Borlänge, Oxelösund och Hagfors. Smide används framför allt för verktygsstål och kullagerstål. Bland de svenska stålverken förekommer smide hos Sandvik Materials Technology, Uddeholm i Hagfors, Scana Steel i Björneborg, Erasteel i Söderfors och Ovako i Hofors. Sandvik Materials Technology är den enda svenska ståltillverkaren som extruderar rör.

I Sverige kallvalsas stål i Munkfors, Vikmanshyttan, Avesta, Långshyttan, Torshälla, Hofors, Sandviken, Hallstahammar, Surahammar och Borlänge. Tråddragning förekommer i Långshyttan, Fagersta, Hofors, Linköping, Hallstahammar, Sandviken och Garphyttan.

Svenska valsare av platt producerar kolstål, rostfritt och/eller specialstål. Samtliga tillverkare är, på grund av sin relativa litenhet, inriktade mot nischprodukter som kräver specialkunnande och prismässigt tål tillverkning i mindre serier. Tillverkningen bygger på stor kännedom om kundernas behov och ett omfattande kundstöd är uppbyggt för att hjälpa kunderna att hitta rätt stål och rätt konstruktionssätt för sin tillverkning.

På kolstålssidan sker en förskjutning mot höghållfasta och ultrahöghållfasta stål för lätta och slitstarka konstruktioner. Stora investeringar görs och har gjorts för att höja hållfasthetsegenskaperna hos de tillverkade produkterna. Valsning av höghållfasta stål innebär större påfrestningar på valsverken i och med att det krävs högre krafter att valsa ned dessa i tjocklek. Samtidigt blir styrningen av temperatur- och deformationsförloppet viktigare för att nå rätt egenskaper. Valsning av höghållfasta material är mer energikrävande än valsning av enklare stålsorter. Vartefter materialen får högre hållfasthet så kommer önskemål att valsa till tunnare dimensioner eftersom slutprodukten kan göras av tunnare material med bibehållen

hållfasthet. Detta ökar kraven på valsverken eftersom större reduktioner måste tas på material som bjuder större motstånd.

Rostfritt material innehåller nickel och andra tillsatsmaterial vilket gör det dyrt och råvarukänsligt att tillverka. Trenden går mot att försöka ersätta dyra och strategiskt känsliga tillsatsmaterial som till exempel nickel med andra material och arbete pågår med framtagning av sådana legeringssammansättningar och metoder att framställa och bearbeta dessa.

Specialstål tillverkas i små poster till många kundkategorier. Utmaningen här ligger i att finna metoder att hantera omställningar på ett rationellt sätt så att tomgångstider och kassationsrisker minimeras.

Produktionen av valsade långa produkter hos valsverken i Sverige kännetecknas av en alltmer uttalad nischorientering och tillverkningen är sedan länge kundorderstyrd. Utrustningen är i många fall ganska gammal och har efterhand ändrats och anpassats för dagens produkter eller produktmix. Antalet formprodukter och stålsorter som tillverkas på ett företag är ofta stort och det är vanligt med korta serier. Produkterna har ofta ett högt teknikinnehåll och de har specifika egenskaper som efterfrågas av en kundkategori. Det högre teknikinnehållet i produkterna gör att förädlingsvärdet är högre än hos bulkprodukter vilket i sin tur minskar volymsberoendet i tillverkningen. Enklare produkter som tillverkas i stora tonnage i övriga världen tillverkas inte längre i Sverige utan importeras. Exempel på sådana produkter är stång, balk och profiler i enklare stål, samt räls och armeringsjärn. Dessa produkter är mycket hårt utsatta för priskonkurrens och tillverkningen kännetecknas av stora volymer, låga löner och närhet till kunderna. Marknaden för många av produkterna i Sverige är mogen och det förekommer även priskonkurrens från Asien. Huvuddelen av det tonnage som tillverkas i Sverige säljs på export. Under de närmaste åren förväntas inga stora investeringar eller tekniksprång beträffande tillverkningsmetoder och utrustning.

En grov uppskattning visar att investeringar i maskiner och utrustningar för valsverken ligger på ca 4-5 % av årsomsättningen över en längre period.

### **5.3.3 Internationella trender**

Nedan följer några exempel på internationella trender inom bearbetningsområdet.

En allmän internationell trend hos varmvalsverken är att höja produktiviteten genom att höja slutvalsningshastigheten och höja ämnesvikten. För att lyckas med detta fordras ofta ny utrustning i valsverken samt förbättrade styrsystem. Om man startar från ett grövre tvärsnitt på ämnet så tvingas man sänka valsningshastigheten i de första sticken eller öka slutvalsningshastigheten.

En annan teknik för att öka produktiviteten i linjerna och minska stillestånden är ”endless casting and rolling”(ECR) som bygger på idén att man ska skarva ämnen eller övergångsheter så att valsningen kan utföras med färre uppehåll. I praktiken kan man valsa uppemot 20 ämnen i en följd. Begränsningen utgörs av den uppvärmning som erhålls i utrustningen på grund av den kontinuerliga värmetillförseln under valsningen. Andra kända problem är det omfattande behovet av underhåll på svetsutrustningen.

Andra trender är att man går mot grövre tvärsnitt i den valsade slutprodukten. Detta ger ökade krav på inre egenskaper hos ämnet (göt eller stränggjutet) om man ser till lägre total reduktionsgrad och bibehållna krav på slutprodukten.

Andra utvecklingstrender är tillämpning av temperaturstyrd valsning och svalning för att åstadkomma önskade materialegenskaper hos C-Mn och C-Cr stål. Man utvecklar teknik för minskad värmebehandling efter valsning för QT-stål, och kullagerstål. Tack vare alltmer



avancerade beräkningsprogram och förfinade materialmodeller ökas möjligheten till att skapa nya designade material. Det kan gälla nya typer av finkornstål och utskiljningshärdande stål.

Avancerad modellering i 3D FE ("Finita Element") för deformationer och materialegenskaper ger nya möjligheter att simulera valsningsprocessen och därmed prediktera produkternas egenskaper. Genom avancerad modellering av forcerad kylning kan temperaturförloppet i produkterna styras på ett för produkttegenskaperna optimalt sätt.

För grövre profiler t.ex. balk tillämpas numera near net shape casting, vilket innebär att ämnen gjuts med en förform som liknar slutprodukten. Detta förfarande innebär att man får färre stick i valsningen och därmed en effektivare tillverkningsväg. På motsvarande sätt finns en trend för tillverkning av grov rundstång, och grova rör från cylindriska grova billets. För att denna processväg skall kunna införas behövs beräkningar för nya och anpassade spårserier samt tillhörande utrustning.

### **5.3.4 Effektiviseringsmöjligheter**

#### *5.3.4.1 Varmbearbetning*

Energiåtgången vid varmbearbetning utgörs i huvudsak av mekaniskt deformationsarbete. Detta kan minskas genom att deformera vid högre temperatur men då kommer mer energi att krävas vid värmningen samtidigt som värmestrålningsförlusterna blir högre. Det är inte sannolikt att detta sammantaget ger några energivinster. Troligtvis blir den sammantagna energiåtgången lägre om värmningstemperaturen sänks och bearbetningen sker vid en lägre temperatur men detta förutsätter att valsverket orkar med de högre valskrafterna som blir följderna och att temperatur-deformationshistorien kan hållas så att hållfasthetsegenskaperna uppnås.

Genom att införa smörjning vid varmvalsning har man påvisat att valskrafterna och deformationsarbetet kan sänkas vilket leder till lägre energiförbrukning.

Asymmetrisk valsning med osymmetri mellan övre och undre valsarna har påvisats som ett sätt att minska valskrafterna och därmed energiåtgången vid valsningen.

När det inte valsas i valsverket brukar ändå valsar och rullbanor rotera på tomgång. Tomgångsdrift är naturligtvis energikrävande men vinsten med att stanna utrustningen måste vägas mot den extraenergi som krävs vid uppstart. Tomgångskörning kan också minskas genom att samtidigt ha flera ämnen i arbete i olika delar av valsverket. Detta måste vägas mot de risker detta medför om något går snett. I kontinuerliga delar av valsverken finns det valsverk där ämnen eller övergångsheter svetsas ihop så att det inte blir någon tomgångskörning mellan banden.

Vid varmvalsning används kylvatten och luft i stora mängder för att kyla de valsade produkterna samt utrustningen i valsverket. Vatten- och luftflödena drivs med elmotordrivna pumpar och fläktar och flödena regleras i många fall genom strypning med ventiler. Detta gör att pumpar och fläktar ödslar energi genom att pumpa eller blåsa mot delvis eller helt stängda ventiler. Genom varvtalsstyrning av pumpar och fläktar kan flödena styras på ett mer energibesparande sätt men detta kräver stora investeringar i nya motordrifter.

Den energi som tillförts materialet i värmningsugnarna och vid bearbetningen avgår som värme till luft och vatten. Denna energi är lågvärdig men skulle kunna tillvaratas i värmelager under den varma årstiden och till uppvärmning av lokaler under den kalla årstiden.

Gjutning av tunna slabs eller gjutning av band direkt och sammankoppling av detta med erforderlig slutvalsning minskar behovet av både värmning och varmbearbetning och de energiförluster som är förknippade med dessa.

#### 5.3.4.2 Kallbearbetning

Vid kallbearbetning utgörs energiåtgången av deformationsarbete, tomgångsarbete och interna transporter. Deformationsenergin avgår till luft samt kyloljor och emulsioner.

En rimlig uppskattning är att någonstans kring ca 350 GWh/år<sup>52</sup> el (ca 9 % av den totala elanvändningen i stålindustrin) används för kallvalsning och tråddragning i svenska stålverk. På specifik basis ligger energitalen för elanvändning på ca 60 kWh/ton vid kallbearbetning.

Tomgångsenergin kan minskas genom planerad avstängning. Genom att bygga ihop flera processteg till kontinuerliga linjer kan transporterna minskas.

### 5.3.5 Forskning och utveckling

#### 5.3.5.1 Inom Jernkontoret

Energirelaterad forskning om bearbetning har också bedrivits Jernkontorets Teknikområden för platta produkter (TO31), för långa produkter (TO32) och för Tråd (TO33).

#### *Energiforskningsprogrammet*

Projektet *Energieffektivare driftstrategi för valsning av avancerade stålprofiler*<sup>53</sup> har arbetat med att minska energianvändningen vid värmning och valsning av långa produkter genom att förbättra värmningsprocessen och optimera utformningen av valsspår. Vid produktion av långa stålprodukter som stång och tråd värms och valsas ett stort antal olika stålsorter. Med dagens arbetssätt innebär detta att värmningsugnens temperatur måste höjas och sänkas och den komplicerade logistiken gör att material ibland måste omvärmas eller kasseras på grund av att det svalnat för mycket mellan värmning och valsning. Dessutom gör den avancerade valsningen med flera på varandra följande spår och stick att valsslitage i vissa punkter blir stort vilket innebär kostsamma driftstopp för valsbyte. För att råda bot på detta har man dels studerat tillämpning av varmhållningshuvor, påvärmning med induktionsugnar och förbättrad spårkalibrering.

Projektet har visat att man med hjälp av en värmningshuvor åstadkommer minskad tomgångskörning vid värmning samt förbättringar i utbyte då man undviker att material skrotas. En försiktig ansats är att utbytesförbättringar på 1 % av årstonnaget kan nås. Det motsvarar en energieffektivisering på 13,4 GWh/år för kolstål och 17,9 GWh/år för höglegerade stål.

Stilleståndsprocenten i dag är c:a 20 % av tillgänglig tid. Av den tiden är c:a 16 % stillestånd för omställning och 4 % för påvärmning. Om resultaten från projektet implementeras är det troligt att stilleståndstiden reduceras till 12 % för omställning och till 2 % för påvärmning vilket innebär en effektivisering på 33,4 GWh/år.

Den sammanlagda energieffektiviseringspotentialen för projekt beräknas därför till 64,7 GWh/år.

---

<sup>52</sup> Jernkontorets Energistatistik 2008; Elanvändningen i "kallbearbetning" uppgick till 762 GWh/år, medan elanvändningen för "värmebehandling" uppgick till 380 GWh/år. Under antagandet att all värmebehandling i statistiken sorterar under "kallbearbetning" gäller alltså att resterande 378 GWh/år används för valsning/tråddragning.

<sup>53</sup> Energimyndighetens projekt 22385-2 (JK 32074)

## Stålforskningsprogrammet

Inom projekten *Lowwear Hot Rolling och Lowwear Cold rolling*<sup>54</sup> arbetar man med att sänka vals slitaget under varm och kallvalsning. Lyckas man med detta innebär det att valsbyten kan ske med större mellanrum och dessutom kan planeras bättre vilket leder till mindre tomgångskörning.

Projektet *Höghastighetsvalsning*<sup>55</sup> kan också leda till en energieffektivisering genom att valsningshastigheten och därmed produktiviteten ökas med bibehållen eller höjd kvalitet på slutprodukten genom förändring av valsningsprocessen i befintlig grundutrustning. Faran vid väldigt hög valsningshastighet är lokal smältning pga. adiabatisk uppvärmning, vilket leder till kassationer och ökad energianvändning.

Detsamma gäller projektet *Tråddragning*<sup>56</sup> som söker höja tekniknivån i tråddragningsprocessen. Effektiviseringspotentialen i dessa projekt begränsas dock av att de aktuella tonnagen är relativt små.

Flera andra projekt inom Stålforskningsprogrammet söker förbättra produktkvaliteten i bearbetningen och öka utbytet i processerna. Lyckosamma resultat kan alltså ha betydande effekt på energieffektiviteten i processerna, enligt vad som diskuterades i avsnitt 5.2.7. Exempel på sådana projekt är *Modflat* och *Modellbaserad processanalys*<sup>57</sup>

### 5.3.6 Utvecklingsbehov

#### 5.3.6.1 Varmbearbetning

Utveckling (+ 1-5 år efter projekt slut)

- Induktiv påvärmning

De flesta valsverk hanterar många stålsorter med individuella värmningstemperaturer i sin produktion. På grund av olika värmningsrecept tvingas man göra uppehåll i värmningsprocessen för omställningar. Detta leder till en oönskad tomgångskörning som orsakar energiförluster. Problemet skulle kunna åtgärdas om man kunde ge samtliga stålsorter en initial värmning till en ”bastemperatur” i en konventionell värmningsugn. Utifrån stålsort ges därefter ytterligare en snabb påvärmning till den individuella temperaturen med en induktiv utrustning. För att genomföra konceptet behövs studier inom ett antal områden exempelvis optimering av värmningstemperatur, simulering av uppvärmningsförloppet, påverkan på material och egenskaper och utvecklande av processteknik och utrustning.

---

<sup>54</sup> JK 31052 och JK 31053

<sup>55</sup> JK 32077

<sup>56</sup> JK 33015

<sup>57</sup> JK 31057

- Optimering av valsningprocessen
  - Energioptimering av drift och styrning av utrustning
  - Energioptimering av valsning, stickserier och reduktioner
  - Återvinning av lågvärd spillvärme från luft och vatten
  - Ökad valsningshastighet, ökade kunskaper om materialegenskaper vid högre valsningshastigheter
  - Effektivare spårkalibrering med hjälp av 2,5 D FE simulering

- Optimering av processen vid materialutveckling

I samband med materialutveckling för nya och befintliga stålsorter finns en betydande energipotential i samband med minskad värmebehandling och minskade efterarbeten. Rubriker som bör nämnas inom detta område är:

- Temperaturkontrollerad valsning och forcerad kylning
- Optimering av produktgenskaper - minskad värmebehandling
- Snävare toleranser
- Effektivare process, modellering av materialegenskaper vid valsning
- Inverkan av deformationsgeometri
- Inverkan av temperaturhistorik
- Materialutveckling labgöt, pilotvalsning, materialkaraktärisering

## 5.4 Processkedjan från värmning till färdig produkt

### 5.4.1 Energieffektiviseringsmöjligheter

#### 5.4.1.1 Varmt flöde och färre stopp

I Sverige är det förhållandevis få av anläggningarna som har ett varmflöde och inget verk som har en helt kontinuerlig linje mellan gjutningen och bearbetningen (direktgjutning). Att tillvarata så mycket som möjligt utav värmnet från gjutningen genom att låta en så stor del som möjligt gå i varmt flöde till bearbetningen är något de flesta verk sedan länge jobbar med. Begränsningarna för varmflöde är i hög grad verks- och produktspecifika. Med tanke på att stålverken ofta har fler än 100 olika stålsorter på sitt program, var och en med varierande dimensionsområden, temperaturkurvor och tid i ugn är det ofta allt annat än logistiskt elementärt att införa varmflöde.

Även i de fall gjutningen och bearbetningen befinner sig nära varandra rumslig, kan varmt flöde försvåras av att ljusbågsugn, värmningsugn, bearbetning och kundorderstocken sällan har samma optimala serieordning. Exempelvis kan en optimal serieordning i ljusbågsugnen bygga på kontaminationsrisk (alltså på legeringshalterna), medan den i värmningsugnen bygger på sluttemperaturer (alltså för minsta möjliga tomgångskörning) och i valsningen på plåtens dimensioner. Till detta kommer kundens krav vad det gäller leveranstid, att de gjutna ämnena måste ytbehandlas innan de värms och bearbetas osv. Generellt kan man säga att detta pussel blir svårare ju mer avancerade och diversifierade verkets produkter är och ju kortare

serier som tillämpas, vilket för övrigt är typiskt för flera av de svenska verken som nischat sig mot smala kundsegment.

I början av nittioalet bedrevs gemensam forskning kring varmflöde. Föremål för studien var några av de ”flaskhalsar” som försvårar implementeringen av varmt flöde. Bland annat undersökte man möjligheten till varmslipning. Teknik för att föra varma ämnen från Luleå till Borlänge utvärderades också, men kunde aldrig implementeras på grund av SJs säkerhetskrav avseende brandskydd.

Den teoretiska potentialen för effektivisering genom varmt flöde från gjutningen till valsningen är givetvis stor i och med att varmflöde används i relativt begränsad utsträckning i Sverige. Under antagandet att endast cirka 10 % av tonnaget går i varmflöde idag, rör det sig om tresiffriga GWh /år. Givet den svenska stålproduktionens karaktär vad det gäller andelen specialstål och legerade stål, samt relativt begränsade tonnage och korta serier, blir den praktiska potentialen, åtminstone på kort och medellång sikt, betydligt lägre.

Kortsiktiga åtgärder för att åstadkomma varmt flöde är så pass verks- och företagsspecifika att gemensam forskning oftast inte är intressant. Däremot kan erfarenhetsutbyte företagen emellan vara viktigt.

Konceptet med ”micromills” med helt kontinuerliga linjer från gjutning till färdigvalsad produkt utvecklas ständigt.

Det första verket i Europa att bygga en helt kontinuerlig linje från stränggjutning till färdig plåt ligger i Cremona. Processen, Arvedi ESP, är utvecklad av Arvedi i sambete med Siemens VAI och består av en TSC (thin slab caster) följt av en HRM (High reduction mill), induktionsvärmning och ett slutvalsverk. Anläggningen kan producera plåt ner till 0,8 mm tjocklek i full bandbredd, även om man kommersiellt bara producerar ner till 1 mm än så länge. Linjen är i bruk sedan 2009 och producerar 60 % specialstål (höghållfasta låglegerade stål, dual phase etc.). Mätningar har visat att produktion av 3,5 mm varmvalsad plåt har kunnat produceras med endast 130 KWh/ton. I jämförelse med konventionell gjutning och värmning från 20°C före valsning, innebär detta en energieffektivisering med 75%<sup>58</sup>.

En speciellt intressant utveckling inom tillverkning av armeringsjärn bör också nämnas. Det handlar om MI.DA® ”Micromill” en teknik baserat på ”ECR” endless casting and rolling. Konceptet innebär direkt valsning av ett stränggjutet ämne, med minimal påvärmning, ”Endless rolling” och ”DRB” direct rolling and bundling. Tekniken tillämpas i en nystartad anläggning som ägs av CMC Steel i Arizona MIDA. Där sker framställning av armeringsprodukter i dimensionsområdet diam. 12-35 mm av lokalt skrot för en lokal marknad i volymer av 300 kton/år. Konceptet kännetecknas av en låg investeringskostnad, god lönsamhet och korta leveranstider. Enligt leverantören Danieli är det möjligt med 2 timmar mellan skrotsmältning och färdigt buntat material för leverans. Även här är den specifika energianvändningen är låg tack vare den integrerade produktionsmetoden.

Vad det gäller möjligheterna att införa fullt kontinuerliga processer i micromill-stil förutsätter detta stora investeringar i helt nya linjer. Teknikläget för dessa är dessutom sådant att det i dagsläget inte är tekniskt möjligt och/eller ekonomiskt rimligt för den typ av produkter och produktmixer som finns inom den svenska stålindustrin.

---

<sup>58</sup> G. Hohenbckler et al. Energy savings by the Arvedi ESP Technology and plant design. Proceedings of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry. Dusseldorf 27 June – 1 July, 2011.

På längre sikt är dock en samtidig utveckling mot ökad flexibilitet och kontinuitet sannolikt såväl viktig som oundviklig. Detta innebär stora utmaningar då flexibilitet (kundstyrd produktion, korta leveranstider, korta serier osv.) står i kontrast till de förutsättningar som traditionellt förknippas med hög grad av kontinuitet i processerna (få och enkla produkter, stora tonnager). Inom detta område kommer det sannolikt att finnas långsiktiga forskningsinsatser som med fördel kan göras gemensamt.

#### 5.4.1.2 Ökat utbyte längs hela linjerna

Det finns ingen statistik på hur högt utbytet är från gjutet ämne till produkt i svenska stålverk, men klart är att det sker materialförluster längs hela kedjan och att de för avancerade stålsorter kan vara mycket stora. Den största delen av det skrot som faller inom verket återanvänds internt eller externt, så ur materialsynpunkt sker endast begränsade skrotförluster. Däremot används ju energi onödigt till att hålla skrot recirkulerande i systemet. I och med att varje ökning av utbytet innebär en energieffektivisering motsvarande hela den "energikostnad" som materialet som annars gott förlorat haft dittills i värdekedjan (som tidigare nämnts omkring 4500 kWh/ton för utbytesförbättringar nedströms värmningsugnarna) utgör utbytesförbättringar en av de ur energieffektivitetssynpunkt mest effektfulla åtgärderna i bearbetningsprocessen.

Potentiella utvecklingsområden är exempelvis att minska förlusterna vid ändklipp samt att förbättra förutsättningarna att träffa rätt i materialkvalitet vad det gäller de riktigt svårproducerade stålen. Här är samverkan mellan mät-, styr- och analysteknik viktigt. Kan processparametrar längs hela kedjan, genom exempelvis multivariat analys, korreleras till kvalitetsparametrar on-line skulle förutsättningarna för minska mängden fallande skrot i linjen kraftigt förbättras. Multivariata system för att detektera processavvikelser längs produktionskedjan som ger fel i produkten är ännu inte speciellt vanliga internationellt, men exempel finns. Att utveckla fungerande system för detta är dock allt annat än elementärt, beroende på svårigheter att samla in rätt data, vilket visat sig inom ett av projekten inom Jernkontorets Energiprogram 2006-2010 (*Ugnsstyrning och överordnad processanalys*). Detta är således ett lämpligt område för gemensam forskning som på längre sikt kan ge stora effektiviseringar.

Ur energieffektiviseringssynpunkt är det också viktigt att stoppen blir så få och så korta som möjligt, och att så lite stål som möjligt måste tas ur linjen till följd av stoppen. Det gäller såväl planerade stopp som icke planerade. Dels minskar den typen av åtgärder tomgångskörningen, vilket får en direkt effekt på primärenergianvändningen, men lika viktigt är att stål som måste tas ur linjen och skrotas innebär utbytesförluster. Inom Jernkontorets energiprogram 2006-2010 arbetade ett av projekten, *Energieffektivare driftstrategi vid valsning av avancerade stålprofiler*, med att med hjälp av en varmhållningshuv, undvika att varma ämnen måste tas ur linjen vid korta stopp.

Ökat utbyte är generellt sett ett vanligt mål (och resultat) inom Jernkontorets forskning. Av de projekt som pågår inom stålforskningsprogrammet kan exempelvis nämnas *Höghastighetsvalsning*, *Tråddragning*, *Modflat* och *Modellbaserad processanalys* vilka kort beskrivits ovan (5.3.5.1)

#### 5.4.1.3 Nya effektivare processvägar för samma materialegenskaper

Ett sätt att minska energianvändningen är att eliminera värmebehandlingssteg och/eller sänka temperaturerna vid värmning/värmebehandling. Det handlar om att kombinera stålkemi, gjutning, värmning, bearbetning och kylning på ett sådant sätt att man via en ny alternativ och effektivare processväg uppnår samma goda materialegenskaper. Hör med Siwecki

Inom Jernkontorets program Stålkretsloppet finns ett projekt – *Valsningsteknik*<sup>59</sup> – tittar på just detta. Projektet har som mål att öka kunskaperna om vilka ämnesstrukturer som är optimala vid valsning av höghållfasta stål. Genom att ändra på processparametrar och legeringssammansättning så kan valsningstemperaturen för band- och grovplåt sänkas med bibehållna materialegenskaper. Projektet har också undersökt möjligheten att genom att förändra processföring i kedjan värmning-valsning-kylning eliminera ett värmebehandlingssteg (härdning) utan att materialegenskaperna förändras.

---

<sup>59</sup> JK 88041

## 6 Nya stålprodukter ger ökad energieffektivitet

### 6.1 Allmänt

Nya typer av avancerade stål utvecklas kontinuerligt och speciellt har utvecklingen under de senaste decennierna inneburit att helt nya stålkoncept sett dagen ljus. Den snabba utvecklingen kan exemplifieras med att 75 % av stålet i dagens nya bilar inte användes för tio år sedan. Nya avancerade stål karakteriseras av högre hållfasthet och slitstyrka, bättre formbarhet, svetsbarhet, seghet samt bättre korrosionsbeständighet och högtemperaturprestanda än dess föregångare. I vissa fall har dessa egenskaper, i motsats till vad som tidigare var möjligt kunnat kombineras i en och samma stålprodukt samtidigt som det i vissa fall utvecklas anpassade stål för speciella användningsområden.

Optimal användning av nya avancerade stålprodukter kräver att även konstruktion och tillverkning av stålkonstruktioner anpassas till de avancerade stålens egenskaper för att nå bästa materialeffektivitet. Detta sker genom ett ökat samarbete mellan materialspecialister, konstruktörer och produktionstekniker hos ståltillverkande och stålanvändande företag vid framtagning och användning av nya stålprodukter. Nya typer av avancerade stål kräver i vissa fall att nya verktygsmaterial för formnings- och skärningsverktyg utvecklas. Detta sker i Sverige genom olika "joint ventures" mellan tillverkare av verktygsstål och tillverkare av de nya avancerade stålen. Allt detta leder i sin tur till hög konkurrenskraft och en världsledande ställning för svensk stål- och verkstadsindustri.

För en hållbar utveckling krävs också ett helhetstänkande avseende såväl stålproduktionen som användningen av stålprodukter. Livscykelanalyser visar också att energianvändningen och miljöpåverkan för t.ex. fordon är större under användningsfasen än vid tillverkning av material och konstruktioner.

Avancerade stål t.ex. höghållfasta sådana, eller nötnings-, korrosions- och värmebeständiga stål är resurseffektiva ur ett livscykelperspektiv. En stor del av effektiviteten bygger på att stålets avancerade egenskaper utnyttjas på ett sådant sätt att konstruktioner görs starkare, lättare, effektivare eller beständigare. Kan man öka utnyttjandet av avancerade stål i konstruktioner och produkter, är effektiviseringspotentialen ur ett samhällsperspektiv stor. Tillsammans bidrar detta till ett samhälle med låg energianvändning och optimalt resursutnyttjande.

### 6.2 Utveckling av avancerade stål, egenskaper och användningsexempel

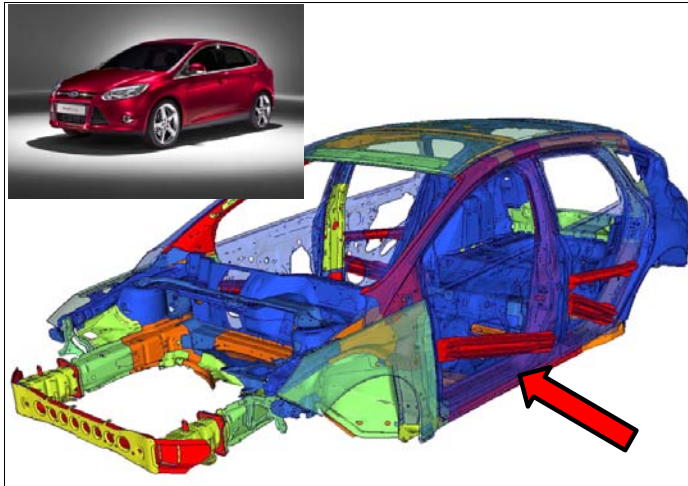
#### 6.2.1 Höghållfasta kolstål och slitstål

Utveckling av nya stålkoncept, utveckling av befintlig ståltillverkningsteknik och nyinvesteringar har möjliggjort utveckling av stålprodukter med allt lägre legeringsinnehåll för en given hållfasthet. När det gäller kolstålkoncept leder t.ex. mikrolegering till ökad hållfasthet hos stålet genom att små mängder av niob, vanadin och titan tillsammans med kol och kväve bildar hårda karbider och nitrider. Investering i kontinuerlig härdningsteknik öppnade också för s.k. kyllda stål, där man populärt uttryckt använder vatten som legeringselement.

Genom att använda kontinuerlig glödning och härdning av tunnplåt produceras idag s.k. tvåfasstål med olika andelar ferrit och martensit och helt martensitiska stål. Dessa stål karakteriseras förutom av lågt legeringsinnehåll av hög hållfasthet och mycket god formbarhet och svetsbarhet. Stålen som produceras på detta sätt är 4-5 ggr starkare än konventionella stål



och används i ökande omfattning inom bilindustrin inte minst i krockskyddsdetaljer. **Figur 51** ger exempel på hur det ett martensitiska höghållfasta stålet Docol 1400 används i tröskelbalken i Ford Focus för att öka krocksäkerhet och minska vikt. **Figur 52** ger ett annat exempel på hur den goda formbarheten hos Docol 1400 gjort det möjligt att tillverka ett fjädrande svankstöd till bilstolar i ett enda stycke istället för att nita ihop konstruktionen av flera detaljer i härdat fjäderstål. Detta gav ett starkare svankstöd med halva vikten, 20 ggr högre produktivitet vid tillverkning och en betydande resurs- och energieffektivisering till lägre totalkostnad.



**Figur 51. Tröskelbalk till Ford Focus i Docol 1400 för högre krocksäkerhet och lägre vikt, SSAB**



**Figur 52. Svankstöd till bilstol i Docol 1400 (till vänster) ger halva vikten och 20 gånger högre produktivitet, SSAB**

En möjlighet som följt av investeringar i kontinuerlig glödningsteknik av kolstål är att stålen kan göras relativt mjuka och formbara i leveranstillstånd medan de får sin slutliga höga hållfasthet genom deformations- och varmhårdnande vid tillverkning av konstruktionsdetaljerna. Varmhårdnande utnyttjas idag av bilindustrin för att höja hållfastheten med 50-150 MPa hos stålplåten vid ungstorkning av lacken.

Kylta höghållfasta konstruktionsstål i grövre dimensioner som tillverkats genom accelererad kylning eller seghårdning finns i hållfastheter från 500 till 1300 MPa. De högsta hållfasthetsnivåerna används företrädesvis i olika typer av kranar. **Figur 53** visar ett sådant exempel där stålet Weldox 1100 används i kranarm och stödben på en mobilkran. Fördelarna med det avancerade höghållfasta stålet är högre lyftvikt, lägre totalvikt och färre hjulaxlar som tillsammans resulterar i ökad energieffektivitet. Utvecklingen av höghållfast grovplåt har för kranstillverkare inneburit en enorm utveckling av lastkapaciteten. Den har ökat med inte mindre än en tiofaktor de senaste 25 åren. Denna utveckling har varit möjlig genom innovativa konstruktions- och tillverkningsmässiga anpassningar av tvärsnittssektionen hos kranarmen. Allt för att möjliggöra fullt utnyttjande av de avancerade höghållfasta stålen utan att sektionen bucklar.

Inom gruppen kylta kolstål utvecklas också olika typer av nötningsbeständiga stål. Idag är det möjligt att framställa dessa slitstål med hårdheter upp till 600 Brinell vilka ökar livslängden med upp till 8 gånger jämfört med ordinära stål. Genom optimering av legeringsinnehåll och materialstruktur kan dessa stål ges sådana formnings- och svetsegenskaper att stålen, trots sin höga hårdhet, kan användas som konstruktionsstål. På så sätt kombineras de två funktionerna bärighet och slitstyrka i samma material istället för att svetsa på speciella slitplåtar på ett mjukare konstruktionsstål. **Figur 54** visar ett exempel där ett slitstål som är fem gånger hårdare

och starkare än konventionellt stål möjliggör tillverkning av lätta och slitstarka dumperflak. Genom att arbeta med förstyvande bockning vid utformning av konstruktionen kan den lastbärande funktionen och slitstyrkefunktionen integreras och en betydande vikts- och energiminskning nås.



Figur 53. Weldox 1100 används i kranarm och stöbben på en mobilkran, SSAB



Figur 54. Lastbilsflak i 5 mm tjock HARDOX 450 ersätter 8 mm tjockt konventionellt stål vilket ger minskad vikt, ökad lastförmåga och lägre bränsleförbrukning, SSAB

## 6.2.2 Rostfria höghållfasta stål

Utvecklingen av höghållfasta rostfria konstruktionstål fick ett genombrott då duplexa stål kunde framställas i stor skala. Dessa stål består på samma sätt som tvåfasiga kolstålen av två faser, i detta fall austenit och ferrit. Hållfastheten hos de duplexa stålen är ca dubbelt så hög som hos konventionella s.k. diskbänksstål (4301), som har en sträckgräns på ca 210 MPa.

Inom det av Mistra stödda forskningsprogrammet ”Stålkretsloppet” har en fallstudie utförts på en tank för marmorslurry, **Figur 55**. Ett duplexstål LDX 2101 med 480 MPa i sträckgräns har här ersatt ett konventionellt stål 4301. Tankens vikt kunde då minskas från 57,4 ton till 38,3 ton dvs. med 33 %. Det betyder att de använda natur- och energiresurserna kunde minskas lika mycket motsvarande en energiresursbesparing på 212 MWh för varje tillverkad tank.



**Figur 55. Tank i duplex rostfritt stål LDX 2101 ger 33 % lägre vikt än konventionellt stål, Outokumpu**



**Figur 56. Tillverkning av överhettarslingor i stål Sanicro 25 till panna för kraftproduktion, Sandvik**

### 6.2.3 Rostfria korrosions- och temperaturbeständiga stål

Utvecklingen av stål med högre korrosions- och temperaturbeständighet medför en ökad effektivitet i befintliga kraftverk samt minskade utsläpp till miljön. Den höjning av processtemperaturen som på detta sätt medges leder till högre verkningsgrad och betydande energieffektivitet vid kraftproduktion.

En mycket stor andel av den elektricitet som används i världen idag genereras via förbränning. De heta rökgaserna leder över energi via värmeöverförande rör, ånga bildas som expanderar över en turbin som driver en generator. Verkningsgraden i pannan avgörs till stor del av ångans högsta temperatur och tryck.

Materialet i rören till överhettare måste utöver gott korrosionsmotstånd även ha hög varmhållfasthet och kryphållfasthet vid höga temperaturer samt god oxidationsbeständighet.

Sandvik Materials Technology har utvecklat ett speciellt stål för denna tillämpning, ett austenitiskt rostfritt stål, Sandvik Sanicro 25, med en kryphållfasthet vid 700°C på 100 MPa efter 100 000 h, vilket är ca 30 % högre än för befintliga austenitiska stål på marknaden. Användningen av Sandvik Sanicro 25 medför att verkningsgraden vid kraftproduktion kan höjas från 35 % till 50 %. Det innebär en besparing av både bränsle och koldioxidutsläpp med en tredjedel jämfört med dagens genomsnittspanna vid samma eleffektgenerering. I ett exempel från ett 900 MW kraftverk motsvarar det en minskning av koldioxidutsläppen med ca 300kg/MWh. **Figur 56** visar tillverkning av överhettarrörpaket till panna för kraftgenerering.

Vid utnyttjande av förnybara energikällor kan nya stål också ses som möjliggörare för den teknik som krävs. Svensk stålindustri levererar också redan nya material och produkter för att bidra till att få till stånd en effektiv produktion av elkraft och fjärrvärme från t.ex. sol och vind. För dessa nya material ställs ofta höga krav på egenskaperna vilket i sin tur innebär snäva krav på t.ex. kemisk sammansättning och mikrostruktur.

### 6.2.4 Pulvermaterial

Sverige har en världsledande ställning när det gäller pulvermaterial med över 50 % av världsmarknaden.

Hydroisostatisk pressning (HIP) av gasatomiserade stål i form av pulver ger möjlighet att tillverka skräddarsydda produkter med oregelbundna former och komplexa geometrier. Metoden har flera fördelar jämfört gjutgods och smide, både vad gäller design flexibilitet och



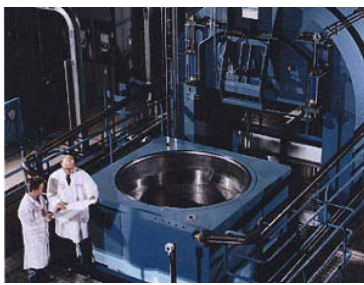
materialegenskaper. Detta innebär mindre maskinbearbetning och bättre materialutnyttjande. Den fina mikrostruktur som fås vid isostatisk pressning ger isotropa mekaniska egenskaper, dvs. egenskaper som är lika i alla riktningar. Isotropa egenskaper, utan segregeringar, kan också bidra till högre hållfasthet och lättare konstruktioner.

HIP produkter tillverkas vanligen av duplexa eller super-duplexa rostfria stål som har utmärkt motståndskraft mot väteinducerad spänningsskorrosion (HISC). Något som är av avgörande betydelse i flera offshore-tillämpningar.

Metoden kan också användas för att tillverka komponenter i material som svårigen kan tillverkas på annat sätt. Ett exempel är materialet Somalloy från Höganäs som förutom de traditionella fördelarna med pulvermaterial också har utmärkta elektriska och magnetiska egenskaper som ger lägre energiförluster när materialet används i kompakta elektriska motorer, transformatorer, induktiva komponenter och sensorer.

Till resurs- och energieffektivitet för komponenter tillverkade av pulvermaterial bidrar i första hand högre materialutbyten och energivinster på 10-12 kWh/kg stålprodukt. **Figur 57** och **Figur 58** visar exempel på HIP utrustning respektive detaljer tillverkade med HIP-metoden.

Vanligen är detaljerna relativt små men HIP-konstruktioner upp till 15 ton förekommer (offshore).



**Figur 57. HIP-utrustning med kammaren öppen, AVURE**



**Figur 58. Exempel på detaljer tillverkade genom HIP, Metal Powder AB och Sandvik**

### 6.3 Miljöaspekter

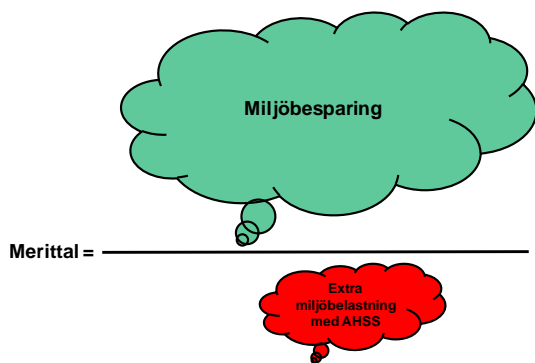
Besparingar i miljöbelastning uttryckt som olika typer av emissioner är starkt kopplade till de energieffektiviseringar som kan göras. Exempelvis har inom forskningsprogrammet ”Stålkretsloppet” framkommit att besparingen i koldioxid är 0,2-0,3 kg CO<sub>2e</sub><sup>60</sup> för varje kWh sparade energiresurser vid ståltillverkning (vagga till grind). Motsvarande värde vid förbränning av dieselbränsle är 0,26 kg CO<sub>2e</sub>/kWh energiresurser inklusive tillverkning av bränslet.

Som tidigare visats finns en stor potential för miljöbesparingar inom fordonssektorn. Varje million ton avancerat höghållfast stål som ersätter konventionella stål i den Europeiska fordonsflottan resulterar i en livscykelbesparing på 8 miljoner ton CO<sub>2e</sub> och 30 TWh icke förnyelsebara energiresurser. Över 90 % av dessa besparingar är relaterade till användning av fordonen. Detta understryker vikten av att inkludera användningsfasen när man bedömer miljövärdet hos avancerade stål.

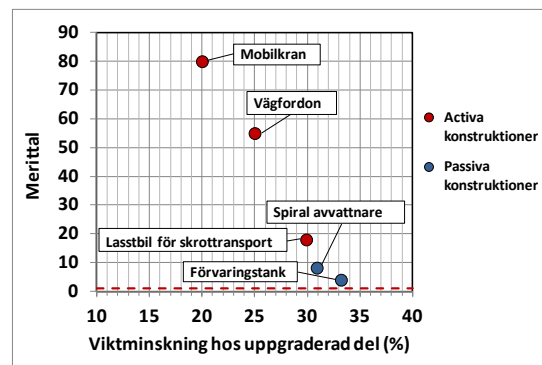
---

<sup>60</sup> CO<sub>2ekvivalenter</sub> där inverkan av andra gaser även vägs in

För att underlätta förståelsen av miljövärdet av att använda avancerat höghållfast stål, har ett generellt merittal definierats. Det görs genom att normalisera resultaten från de fallstudier som utförts inom ”Stålkretsloppet” och relatera miljöbesparingarna till de specifika emissioner som uppstår när avancerat höghållfast stål produceras i stället för konventionellt stål, **Figur 59**. Merittalet i en sådan analys kommer naturligtvis variera från ett användningsområde till ett annat. Dessutom kommer det att vara mycket större för aktiva än för passiva konstruktioner och kan vara så hög som 80 för aktiva och så lågt som 4 för vissa passiva strukturer. Merittal för fallstudierna som utförts inom stålkretsloppet redovisats i **Figur 60**. Dessa resultat bekräftar den stora skillnaden mellan aktiva och passiva konstruktioner. Merittalet definieras så att om värdet är över ett är det en miljömässig fördel att utföra en uppgradering till avancerade höghållfasta stål.



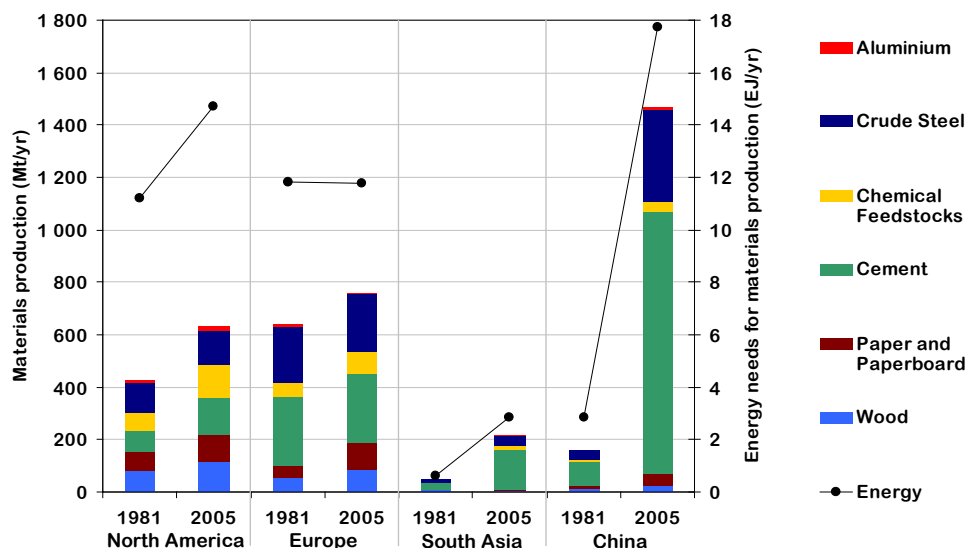
**Figur 59** Definition av merittal



**Figur 60.** Merittal för fallstudier

## 7 Slutsatser

Stål är den  
användning  
stålprodukt  
efterfrågan  
befolkning



Figur 61. Produktion av material och energianvändning i världen. Källa: IEA

Samtidigt kommer den internationella konkurrensen att öka vilket de svenska stålföretagen, vars produktion idag till 85-90 % går på export, kommer att känna av.

Sveriges järnmalmproduktion utgör 90 % av produktionen inom EU. Svensk tillverkning av stål från svensk järnmalm innebär en önskvärd inhemsk förädling av våra naturresurser. Den malmbaserade ståltillverkningen har därför en självklar plats i svenskt näringsliv trots de utsläpp av koldioxid som tillverkningen förorsakar. Den svenska magnetitmalmen kompletterad med den inhemska utvecklingen rörande pelletsprodukter för olika reduktionsprocesser ger en mycket energieffektiv processkedja.

Sverige producerar i förhållande till andra stålproducerande länder en hög andel legerade och avancerade stål. Denna ställning har åstadkommit genom en tidig nischstrategi och hög kompetens inom branschen samt ett utvecklat samarbete mellan stålföretagen och kunder. En svensk stålprodukt har ett ständigt ökande kunskaps- och teknikinnehåll och detta motiverar en plats i landets framtida näringsliv.

### 7.1 Drivkrafter för utvecklingen

Utvecklingsländernas utveckling mot ökad välfärd och världens ökande befolkning kommer att öka efterfrågan på stål under kommande decennier.

Prisutvecklingen på fossila bränslen kommer att fortsätta. Detta innebär enligt bland annat IEA att förnybara alternativ kommer att bli mer konkurrenskraftiga. ESTEP (European Steel Technology Plattform) påpekar att brist på koksande kol kommer att leda till ökade priser vilket, tillsammans med kostnader för utsläppsrätter, på längre sikt kommer att göra alternativa reduktionsmedel intressanta.

Skrot är en viktig råvara vid ståltillverkning. I takt med att produktionen inom stålindustrin och hos dess kunder blir alltmer effektiv kommer det att bli brist på skrot av hög kvalitet. En lägre kvalitetsnivå på skrotet riskerar att påverka energianvändningen och utbytet vid ståltillverkningen negativt.

Efterfrågan på järnmalm kommer att öka och detta kommer att göra malmfyndigheter med lägre halt av järn och högre halt av föroreningar intressanta. LKAB som försör SSAB med malmpellets bryter på allt djupare nivåer i gruvorna i Kiruna och Malmberget, vilket ger höjda utvinningskostnader om inte produktionen rationaliseras ytterligare.

## **7.2 Grundläggande krav för energieffektivisering**

För en hållbar utveckling krävs ett helhetstänkande avseende såväl stålproduktionen som användningen av stålprodukter. Livscykelanalyser är ett bra hjälpmedel att identifiera vilka åtgärder som är mest energieffektiva och visar ofta att energianvändningen och miljöpåverkan under användningsfasen är större än vid material- och produktframställningen.

För att önskvärda investeringar skall komma till stånd inom stålbranschen måste produktionen ske inom ramen för en av riksdag och regering beslutad positiv, långsiktig industripolitik. Ekonomiska och organisatoriska styrmedel kan vara nödvändiga för energieffektiviseringsåtgärder. Ett exempel är att om restenergier ingick i elcertifikatsystemet skulle möjligheterna att utnyttja restenergier för elproduktion öka och därigenom den totala restenergianvändningen.

Stålföretagen och branschens forskningsinstitut kan erbjuda välutbildade ungdomar intressanta och utvecklande arbetsuppgifter i produktionen och i forskningsverksamheten. Möjligheten till kortare eller längre utlandstjänst är stor. Utbildningen på högskolor och universitet samt deras och forskningsinstitutens forskningsresurser måste därför kunna täcka behovet av utbildad personal. Forskningsinsatserna bör göras på flera olika plan. Förutom företagets interna forskning är det nödvändigt med samarbete med övriga företag i stålbranschen, mellan högskolor, institut och stålverk, men också branschövergripande tillsammans med t ex transport- och energisektorn.

Företagen har ett ansvar att man har en bra organisation för uppföljning av energianvändning och genomförande av åtgärder för energieffektivisering. Ett fundamentalt krav för en önskvärd utveckling är att kapacitetsutnyttjandet i produktionen är optimalt.

## **7.3 Utvecklingsbehov för ökad energieffektivisering**

För att kunna hävda sig i den internationella konkurrensen kommer det att vara nödvändigt för den svenska stålindustrin att fortsätta med nisch-strategier, där man siktar in sig på avancerade produkter med högt förädlingsvärde och ett nära samarbete med kunder i specifika marknadsegment. Andelen avancerade stål (idag 62 % av produktionen) kommer därvid att öka ytterligare, samtidigt som det kommer att bli nödvändigt att korta tiden för utveckling av nya stålsorter. Produktionsanläggningen kommer att behöva producera fler stålsorter, dessutom i kortare kampanjer, för att tillgodose kundernas krav på kvalitet, egenskaper, format och korta leveranstider.

I och med att energi och råvaror blir dyrare kommer råvaror av sämre och varierande kvalitet att bli vanligare och nya bränslen, med lägre CO<sub>2</sub>-utsläpp, kommer sannolikt att bli konkurrenskraftiga och därmed introduceras. Processerna måste anpassas till detta. Om man

beaktar att produktionen samtidigt går i en riktning där kvalitetskraven (t ex. avseende renhet) höjs till följd av att andelen avancerade stålsorter ökar, är det en utmaning att bibehålla och öka materialutbyte och energieffektivitet.

Ökad effektivitet och utbyte i befintliga kraftverk samt minskade utsläpp till miljön kan ofta inte åstadkommas på ett signifikant sätt utan större processförändringar. Dessa innebär ofta ökade materialkrav på grund av t.ex. högre temperatur och mer korrosiva miljöer. För förbränningsugnar, rekuperatorer, turbinblad mm krävs stål med nya och bättre, ofta även skraddarsydda egenskaper. Vid utnyttjande av förnybara energikällor kan nya stål ofta ses som möjliggörare för den teknik som krävs. Svensk stålindustri levererar också nya material och produkter för att bidra till realisation av effektiv produktion av elkraft och fjärrvärme från t.ex. sol och vind. För dessa nya material ställs ofta höga krav på egenskaperna vilket i sin tur innebär snäva krav på t.ex. kemisk sammansättning och mikrostruktur. Vid energieffektiviseringar av svensk stålproduktion ställs, å ena sidan, hårda krav på att inte minska möjligheterna till fortsatt utveckling av innovativa stål. Å andra sidan kan, om de två drivkrafterna kombineras, en mer energieffektiv tillverkningsprocess underlätta utveckling och tillverkning av nya och bättre stål. Exempel på detta kan vara då ökad kontroll av processparametrar och resulterande produkt behövs för att styra driftsparametrar mot lägre energiutnyttjande. I dessa fall kan den totala effekten för projektet merfaldigas då det tillverkade stålet används i applikationer som sparar energi och miljö.

Det kommer också att vara nödvändigt att kompensera för ökade priser för råvaror och energi genom lägre produktionskostnader. Detta kan åstadkommas genom bland annat

- ökat kapacitetsutnyttjande och utbyte i processerna
- minskat antal mantimmar per förädlingsvärde
- energieffektivisering, såväl i processerna som genom samarbete med andra industrier och det kringliggande samhället.

## **7.4 Framtidsbild**

Utvecklingen inom branschen är inriktad mot tillverkning av stålprodukter med högre prestanda än dagens vad gäller formbarhet, styrka och livslängd och som därför bidrar till ett samhälle med låg energianvändning och optimalt resursutnyttjande. Samtidigt kommer stålet att produceras på sätt som närmar sig termodynamiska och fysikaliska gränser och som är en integrerad del i annan produktion inklusive samhällsfunktioner.

Många förbättringar kommer att ske i befintliga processer för stålframställning men i framtiden utvecklas också nya processkoncept, som endast kan förverkligas genom stora satsningar på tillämpad forskning i samarbete med industrin.

## **7.5 Forskningsprogram för ökad energieffektivisering**

Energiforskningsprogram inom stålindustrin bör uppfylla vissa generella kriterier.

- Hög energirelevans. Hela kedjan råvaror-stålproduktion-stålanvändning bör beaktas
- Hög industrirelevans som kopplar till viktiga utvecklingsbehov
- Stor medverkan från industrin



- Vidareutveckling inom områden där vi har bra kompetens i landet
- Fortsatta insatser inom intressanta projekt från tidigare FoU-program

I rapportens kapitel 2-5 finns förslag på projekt inom resp område som framkommit under arbetets gång. Dessa har inte genomgått en gemensam värdering utan måste ses som indikationer på intressanta områden.

I Energimyndighetens rapport FOKUS III – Energiintensiv industri (Temarapport ER 2010:03) finns ett antal områden angivna som intressanta för forskning, utveckling och demonstration fram till år 2020. Dessa områden finns också behandlade i denna rapport, som dock är mer forskningsinriktad.

Nedan finns ett övergripande förslag på insatsområden som är betydelsefulla för stålindustrin.

### **7.5.1 Råvaror och energiförsörjning**

#### *Magnetitmalm – en svensk resurs*

Magnetitmalm är en värdefull resurs, inte minst ur ett energieffektivitetsperspektiv. Svensk stålindustri har en konkurrensfördel i att ha inhemsk magnetitmalm och ur ett globalt perspektiv är det effektivt att stålproduktion från magnetitmalm sker i landet. Genom projekt som fokuserar på hur magnetitmalm ytterligare kan förädlas för användning i masugn, eller som ersättning för högkvalitativt skrot, lyfts potentialen för en globalt sett energieffektiv stålproduktion.

*Skrot och legeringsämnen - Allt dyrbare och allt mer heterogena resurser som måste utnyttjas effektivt!*

Stål har till skillnad från många andra material ett väl utvecklat kretslopp. De svenska stålverken använde 2,6 Mton skrot 2008. Den ökande efterfrågan på stål gör att insamlat skrot ej räcker för att täcka behovet av järnråvara för stålframställning.. Att återanvända stål är energieffektivt i jämförelse med att använda jungfruligt material. Den stora utmaningen ligger i att dels tillvarata skrotet i samhället i så hög grad som möjligt, dels att i processerna effektivt hantera skrot av lägre kvalitet och med en allt mer komplicerad sammansättning. Ju mer skrot som kan tillvaratas, desto mer energieffektivt kan stålets kretslopp bli.

Utvecklingen mot bättre utnyttjande av metaller som följer med malmen och skrotet samt tillsätts särskilt till smältan måste fortsätta. Området är särskilt viktigt för svensk stålindustri med sin höga andel av legerade stål. Som konsekvens erhålls biprodukter vid ståltillverkningen som det blir lättare att finna avsättning för.

#### *Nya bränslen*

Vi går sannolikt mot en situation med en mer diversifierad bränsleförsörjning och ett allt större inslag av lågvärdiga, i vissa fall tekniskt mer svårhanterliga, bränslen. Att introducera dessa i processerna innebär, förutom att förbränningssystemen måste anpassas till de nya bränslena, också förändringar i ugnsatmosfären vars eventuella negativa inverkan på stål kvaliteten måste motverkas.

### **7.5.2 Energieffektivisering**

#### *Energieffektivisering i processtegen*

Det är via tekniksprång i processerna som de verkligt stora ”effektiviseringsklippen” kan göras. Sådan processutveckling kräver på grund av sin högriskkaraktär och stora utvecklingskostnader både internationell samverkan och statlig och/eller EU-finansiering.

Resultaten tar dessutom tid att implementera i produktionen. Fortsatt utvecklingsarbete är därför befogat beträffande förbättring av befintliga processer. Ett område där svensk forskning har hög kompetens är t ex processtysystem. Vid introduktion av nya bränslen enligt ovan måste befintliga system vidareutvecklas.

#### *Energieffektivisering av systemen*

En samling energieffektiva enhetsoperationer skapar givetvis inte per automatik ett energieffektivt system. Utan att se till en helhet är risken för suboptimering stor. Genom att beakta större system – råvaruleverantörer + stålverket + kringliggande samhälle - säkerställs en optimal energieffektivitet.

### **7.5.3 Energieffektiva stålprodukter**

#### *Avancerade stål skapar effektiviseringsmöjligheter*

Avancerade stål (ex. höghållfasta stål eller speciellt korrosionsbeständiga stål) är resurseffektiva ur ett livscykelperspektiv. En stor del av effektiviteten bygger på att stålets avancerade egenskaper utnyttjas fullt ut i användarled, genom att produkter / konstruktioner exempelvis görs lättare eller inte måste bytas ut lika ofta. Kan man öka utnyttjandet av avancerade stål i konstruktioner och produkter, är effektiviseringspotentialen ur ett samhällsperspektiv stor.

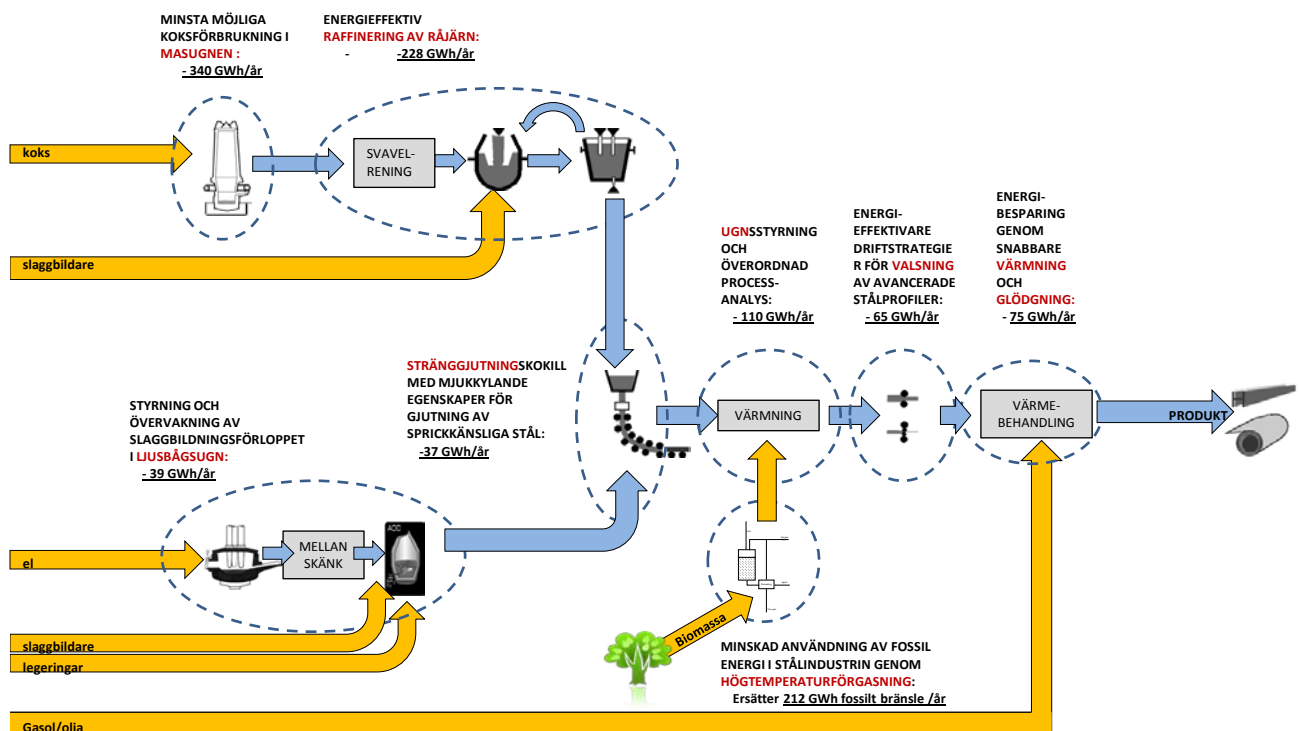
### **7.5.4 Organisation**

#### *Platta organisationer och korta beslutsvägar*

Även om de verkligt stora ”klippen” i effektiviseringshänseende ofta görs i ”tekniksprång” är potentialen att effektivisera energianvändningen genom relativt enkla - och ofta billiga - åtgärder betydande. Platta strukturer och korta beslutsvägar lyfts ofta fram som speciella styrkor hos svenska företag. Kan dessa styrkor utnyttjas för att öka medarbetarnas engagemang, och kreativitet och möjlighet att påverka i energiarbetet ökar möjligheterna att effektiviseringsåtgärder faktiskt blir av.

## Projektsammanfattningar

### Jernkontorets energiprogram 2006-2010



## JERNKONTORETS ENERGIPROGRAM 2006-2010

**P 30119-1 Minsta möjliga koksförbrukning i masugn (JK 21064)**

Utförare: Swerea MEFOS, KTH, LTU

Finansiering:	Energimyndigheten	16 159 Tkr
	Industrin	42 906 Tkr

Energieffektiviseringen ska i projektet uppnås genom tre huvudspår:

- Ersätta koks med injicerat kol
- Minska mängden hyttsot
- Användning av alternativa injektionsmedel till kol

Projektet har arbetat uppdelat på fyra delprojekt, Förbättrad injektion, Materialflöde i masugnsschakt och ställ, Koks samt Pellets.

Swerea MEFOS, Kungliga Tekniska Högskolan, Luleå Tekniska Universitet, LKAB och SSAB EMEA i Luleå och Oxelösund har i projektet bedrivit forskning genom utvärderingar, analyser och försökskampanjer i laboratorium på högskolorna, i LKAB:s experimentmasugn och i SSAB EMEA's produktionsmasugnar i Luleå och Oxelösund.

Huvudmålet för projektet var att genom olika angreppssätt minska förbrukningen av stenkolskoks i masugnen med 10,5 kg per ton producerat råjärn motsvarande 340GWh/år. Förbrukningen av koks ska minskas genom en ökad injektion av kol och/eller andra injektanter samt minskade materialförluster genom mindre generering av stoft. Projektet ska också öka processförståelsen genom att ta fram ingenjörsmässiga verktyg för utökade mätningar och modellering av delar av masugnen.

Två nya, unika mätmetoder baserade på mikrovågsteknik har använts i projektet och vidareutvecklats. Genom mätning av djupet på hålrummet innanför forman (raceway) och modellering av förbränningen har faktorer som gynnar ökad kolinjektion och injektion av hyttsot bestämts. Försök i SSAB:s masugnar har visat att kolinjektionen kan ökas och hyttsot injiceras motsvarande målen i projektet.

Den andra mätmetoden gäller ytprofilen på beskickningen i masugnen. Genom denna kan skiktjockleken för chargerad koks och pellets beräknas och gasfördelningen över ugnstvärsnittet uppskattas. Två modeller för värmeledning genom ställvägg och i tapphålsområdet har utvecklats för att kontrollera flödet av slaggråjärn i stället. Dessa mät- och modellverktyg, som redan implementerats vid SSAB, är nödvändiga för processkontrollen, då mängden koks minskar. Vid SSAB masugn 3 har koksåtgången sänkts från 320 kg/ton till nu 300 kg/ton utan processtörningar.

Hur och var i masugnen hyttsotet (stoftet som lämnar ugnen med gasen) bildas har kartlagts liksom vilka faktorer som påverkar storleken på förlusterna. För att minska förlusterna krävs investeringar som ligger utanför projektet.

Baserat på uppnådda resultat formuleras ett antal inriktningar för fortsatta studier.

## **P 30121-1 Energieffektiv raffinering av råjärn (JK 21065)**

Utförare: Swerea MEFOS, KTH

Finansiering:	Energimyndigheten	8 360 Tkr
	Industrin	39 960 Tkr

Energieffektiviseringen ska i projektet uppnås genom tre huvudspår:

- Mindre råjärnsförluster vid svavelrening.
- Återanvändning av slagg som ersättare för bränd kalk i LD-processen.
- Mindre stoftgenerering genom snabbare slaggbildning i LD ger tidigare start av gasåtervinningen.

Swerea MEFOS och Kungliga Tekniska Högskolan har tillsammans med SSAB EMEA i projektet visat att energi användningen vid ståltillverkning kan minskas med ~145 GWh per år. 221 GWh/år kommer att uppnås inom 5 år genom modifiering av slaggen med slaggbildare (ex.vis nefelinsyenit) och optimering av konceptet i kombination med Mg injektion. Arbete innefattar både Luleå och Oxelösund.

Svavel i råjärnet från masugnen tas bort vid svavelreningen. Här har projektet lyckats sänka metallförlusterna från råjärnet genom att tillsätta ett naturligt förekommande mineral vid reningen. På samma gång blir stoftet från svavelreningsprocessen mindre miljöpåverkande. Eftersom materialförlusterna blir mindre behöver masugnen tillverka något mindre järn, vilket sparar energi.

Vid konverteringen minskas kolhalten i järnet. Då måste bl.a. bränd kalk tillsättas för att fånga upp föroreningar i metallen. Projektet har visat att det går att minska kalktillsatsen genom att återanvända kalk som redan har använts i en annan del av tillverkningskedjan. Eftersom kalken som används vid konverteringen används igen i masugnen, betyder det att samma kalk kan användas i tre processer. Eftersom kalken kräver energi vid brytning och bränning innan användningen i stålverket, innebär resultaten att den totala energianvändningen kan minskas med 6 GWh/år inom 5 år efter ombyggnad i Luleå.

Forskningen har genomförts framförallt vid SSAB EMEA's stålverk i Luleå, men resultaten kan tillämpas i andra stålverk. Stålindustrin har visat stort intresse för forskningen. De nya forskningsresultaten kommer att tillämpas i den svenska stålindustrin.

**P 30122-1 Styrning och övervakning av slaggbildningsförloppet i ljusbågsugnen (JK 23028)**

Utförare: Swerea MEFOS, KTH

Finansiering:	Energimyndigheten	5 000 Tkr
	Industrin	27 170 Tkr

Swerea MEFOS och Kungliga Tekniska Högskolan har tillsammans med Outokumpu Stainless i projektet visat att energianvändningen vid skrotsmältning i Avesta kan minskas med ~23 GWh/år. Projektet har fokuserat på hur förändringar i skrotråvaran påverkar slaggbildningen i ugnen och hur en skummande slagg som täcker ljusbågarna kan bildas under smältningen av rostfritt skrot.

Förändringar över tiden i en skrotklass kan påvisas med en statistisk modell och avvikelser uppskattas med en utvecklad modell. Resultatet kan användas för att ändra tillsatser i ugnen.

Riktiselhalten i tappat råstål har sänkts varigenom slaggbildartillsats och slaggmängd i ugn minskat.

Metoder för petrografisk utvärdering och nya angreppssätt för termodynamiska beräkningar gällande jämvikter i rostfria slaggar har utvecklats. Slaggar har karakteriserats och slaggegenskaper uppskattats. Utifrån detta har ett recept för skumningsbriketter tagits fram och en teknik för att uppnå en skummande slagg genom kontinuerlig tillsats av briketter utprovats. Genom mindre förluster kan energianvändningen minskas med 4 GWh per år.

Genom att teknikerna sprids till övriga stålverk tros projektets totala effektiviseringspotential om 39 GWh/år vara uppnådd inom 10 år efter programslut.

## **P 30120-1 Utveckling av stränggjutningskokill med mjukkylande egenskaper för gjutning av sprickkänsliga stål (JK 24050)**

Forskningsutförare: Swerea KIMAB

Finansiering:	Energimyndigheten	4 000 Tkr
	Industrin	15 531 Tkr

Målet har varit att utveckla ett kokillkoncept, som ger en mjukare kylning av det först bildade stålskalet, vilket minskar risken för spänningar och sprickbildning, med ambitionen att kunna halvera energianvändningen för ämnesytfel, vilket ger en effektiviseringspotential på 30 GWh. Detta föreslår ske genom att fälla in ett värmedämpande skikt i överdelen av kopparkokillen bestående av en metall med låg värmeledningsförmåga som rostfritt stål eller nickel.

Projektet har omfattat modellering och design av det värmedämpande skiktet samt driftförsök hos SSAB EMEA Oxelösund, Sandvik Materials Technology och Outokumpu Stainless Avesta.

Resultaten från projektet kan kortfattat sammanfattas enligt följande:

COMSOL Multiphysics har använts för beräkning av nödvändiga skiktjocklekar, temperaturfördelningar i skiktet samt värmeöverföringar.

- Mjukkylning i överdelen av kokillen kan reducera värmeflödet i denna del med ca. 20 % och ger potential att gjuta sprickkänsliga stålsorter.
- Det mjukkylda skiktet kan appliceras med svetsning vilket dock innebär att nickel måste väljas som värmedämpande material. Vid ett försök med 46 charger i Oxelösund upptäcktes sprickor i nickelskiktet. Andra alternativ har undersökts, bl a beläggning med cold-sprayteknik, vilket kan innebära att rostfritt stål skulle kunna användas istället för nickel. Även cold-sprayskiktet uppvisade sprickbildning vid försök i Avesta vilket visar att fortsatt processutveckling krävs.
- En feasibility study gjordes för SSAB EMEA i Luleå. Denna visar på goda förutsättningar att implementera en mjukkylande kokill där, under förutsättning att de tekniska problemen med applicering av det värmedämpande skiktet kan lösas.

Energieffektiviseringspotentialen uppgår till mellan 35 och 37 GWh/år.

## **P 22385-2 Energieffektivare driftstrategi för valsning av avancerade stålprofiler (JK 32074)**

Utförare. Swerea MEFOS

Finansiering:	Energimyndigheten	4 858 Tkr
	Industrin	15 064 Tkr

Projektets mål är att visa på hur induktionsvärmning och varmhållningshuvar kan förbättra utbytet vid värmning och valsning av långa produkter och därmed minska energiförbrukningen. Vidare skall metoder utvecklas för industriell användning av FE-modellering vid spårkalibrering. Ett verksanpassat användarskal till temperaturberäkningsprogrammet Steeltemp® som gör det praktiskt möjligt att optimera stickserier med avseende på processtyrning och temperaturutveckling har också utvecklats.

Projektet har visat på metoder för att via induktiv värmning förbättra temperaturjämnheten längs ämnet, minska tiden för temperaturomställningar och reducera avkolningen.

Pilotförsöken med induktiv påvärmning visar att vid påvärmning av ett ämne som svalnat till 1000°C behövs 244-271 kWh/ton för att åter nå 1200°C i centrumtemperatur. För valsning av kullagerstål visar försöken att minsta avkolningen fås om grundvärmning görs i stegbalksugn till ung. 900°C följt av snabb påvärmning i induktionsugn till 1150°C.

Tillsammans med förbättrad utformning av varmhållningshuvar, och säkrare prediktering av hålltider i dessa, kan utbytesförbättringar och minskad tomgångskörning erhållas. Industriförsöken visar att en varmhållningshuv kan ge en ytterligare marginal vid driftsstörningar på upp till 6 minuter innan hetan måste tas ur linjen. Svalningshastigheten i varmhållningshuven blev 0,18-0,29°C/sek beroende av analys.

Förutom den industrinytta som det innebär att sänka energikostnaderna vid värmning och valsning, ger noggrannare modeller för spårserieberäkningar snävare toleranser och möjlighet att valsa mer krävande material med ett bättre resultat. Spårkalibrering med förenklade två-dimensionella FE-metoder har utvärderats via industriförsök och visat sig vara en snabb och tillförlitlig metod för att kalibrera komplexa profiler.

Energibesparingspotentialen inom projektets delar består i minskad tomgångskörning vid värmning samt förbättringar i utbyte då man undviker att material skrotas. Summeras dessa delar kan den sammanlagda energibesparingspotentialen uppskattas till 65 GWh/år.



## P 30118-1 Energibesparing genom snabbare värmning och glödning (JK 43027)

Utförare: Swerea KIMAB

Finansiering:	Energimyndigheten	6 000 Tkr
	Industrin	18 715 Tkr

Projektet har undersökt nya energibesparande värmnings- och glödgningsprocesser som kan användas vid tillverkning av i första hand rostfria stål men även kolstål. Brännartekniker som har utvärderas är konventionella, Oxyfuel, flamlös Oxyfuel och flamkontakt brännare, s.k. DFI. Projektet har baserats på försök i pilotanläggningar och driftsförsök i tillverkningsprocessen. Fokus har legat på möjligheterna att öka produktionshastigheter med bibehållna materialegenskaper, utan att påverka senare processteg som exempelvis betning. Från resultaten av experimenten har statistiska modeller utarbetats. Betning av glödgate prover genomfördes elektrolytiskt (neolyt) och i blandsyra ( $\text{HNO}_3/\text{HF}$ ).

Den generella slutsatsen är att omställning till oxyfuel-teknik ej medför några negativa effekter på materialegenskaper. Till exempel innebar förkortade glödningstider ingen inverkan på oxidlagrets tjocklek. Man har även kunnat demonstrera ytterligare energibesparingspotential genom att restenergi kan användas i första värmningszonen vilket medför en 30-40% kortare glödningstid.

Förvärmning av kolstålsband med DFI har genomförts i pilotskala och man visade bland annat att DFI-förvärmning avlägsnar oljor på band som annars måste tvättas i ett separat steg vilket innebär en stor miljöbesparingspotential.

I en annan kampanj har försök genomförts med glödning av rostfria rör. En signifikant nodulbildning observerades dock vid glödning i ugnsatmosfär med hög vattenhalt. Den ökade nodulbildningen medför att längre betningstider krävs i efterföljande processteg. Dock betas inte rörmaterialen i en kontinuerlig linje jämfört med bandmaterial, vilket möjliggör anpassningar i betningssteget.

Projektets slutresultat är en detaljerad beskrivning av hur tiden för glödning kan förkortas och därmed effektiviseras med olika metoder beroende på produktform som exempelvis råämne eller valsat material.

Energieffektiviseringspotentialen på 75 GWh/år kan sägas vara uppnådd med 56 GWh/år tack installationer av oxyfuelteknik. Inom fem år tros hela potentialen vara uppnådd.

## P 30117-1 Ugnsstyrning och överordnad processanalys (JK 51054)

Utförare: Swerea MEFOS, Prevas

Finansiering:	Energimyndigheten	8 000 Tkr
	Industrin	30 498 Tkr

Målet med projektet är att vid projektslut vid målverken ha implementerat helt nya reglersystem eller förbättrade versioner av befintliga sådana för kontinuerliga värmningsugnar, gropugnar och glödgningsugnar. Dessutom ska ett helt nytt övervakningssystem som identifierar processavvikelse längs produktionskedjan vilka potentiellt sänker produktkvaliteten ha utvecklats och testats i praktiken.

Projektet består av fem delprojekt:

Delprojekt 1 arbetar med att ta fram ett nytt verktyg för framtagning av framkopplingsvärden och tillhörande ideala värmningskurvor till STEELTEMP® 2D, som kan användas för optimering av materialegenskaper och/eller energianvändningen i valsverkens omvärmningsugnar, samt med att förbättra användarvänligheten och felhanteringen i STEELTEMP® 2D.

Delprojekt 2 arbetar med att ta fram och infoga nya och mer sofistikerade värmningsmodeller, baserade på STEELTEMP® 2D, till styrsystemet FOCS-RF. Meningen är att den nya värmningsmodellen ska vara densamma i alla FOCS-RF system och att samma modell ska användas on-line som i kalibratorerna.

Systemet fungerar så att värmningsmodellen kalibreras off-line med hjälp av så kallade lådförsök varpå den kalibrerade modellen används för att beräkna ämnestemperaturen on-line.

Delprojekt 3 syftar till att ta fram ett FOCS-system för en helt ny tillämpning, nämligen gropugnar. När detta implementeras erhålls kontroll på ämnets ytemperaturer och gradienter och det blir möjligt att använda högre ugnstemperaturer i värmningens början och därigenom korta nedvärmningstiden.

Delprojekt 4 arbetar med att ta fram ett multivariat regleringssystem för glödgningsugnar. Systemet baseras på att en kombination av fysikaliska och statistiska modeller. Genom detta kommer temperaturträffsäkerheten vid glödning att förbättras och på så sätt minskas antalet omglödningar.

Delprojekt 5 arbetar med att ta fram ett system baserat på multivariat processmodellering som identifierar processavvikelse längs hela kedjan värmning-valsning-glödning-färdig produkt. Genom övervakning via ett sådant system kommer processavvikelse som kan ge produktfel identifieras och åtgärdas redan innan de får genomslag i produkten.

Vid projektslut hade en effektivisering på 36 GWh/år varit uppnått inom projektet och vid full implementering räknar man med potentialen 110 GWh/år

## P 30123-1 Minskad användning av fossil energi i stålindustrin genom högtemperaturförgasning (JK 51053)

Utförare: KTH

Finansiering:	Energimyndigheten	4 000 Tkr
	Industrin	2 540 Tkr

Projektet har studerat högtemperaturförgasningstekniken som metod för att producera en i förhållande till andra förgasningsprodukter högvärdig industrigas för användning i till exempel stålindustrins värmningsugnar.

I projektet togs den så kallade högtemperaturförgasningstekniken från lovande resultat i lab-skala till en teknik redo för att skalas upp till demo-storlek. Kopplingen till stålindustrin bestod i att tekniken förväntades ge en relativt högvärdig syntesgas, som skulle passa stålindustrins krav på höga flamtemperaturer. Tekniken står i begrepp att kommersialiseras, i ett första steg för CHP (Combined Heat and Power Production).

HTAG-tekniken har skyddats genom patent och ett företag, Boson Energy, har bildats i syfte att kommersialisera tekniken. Boson Energy har förberett all teknisk dokumentation som krävs för att en DEMO-tillämpning ska kunna byggas och söker nu finansiering för ett sådant projekt.

Forskningen har bekräftat att HTAG-tekniken:

- ger en bränslegas med ett högre värmeinnehåll än jämförbara tekniker.
- ger en bränslegas med lägre föroreningsgrad (med avseende på tjära) än jämförbara tekniker.
- är relativt okänslig för variationer i bränslets partikelstorlek, värmevärde och fukttinnehåll.
- kan byggas extremt kompakt även vid atmosfärstryck i anläggningen tack vare den höga förgasningstemperaturen.

Projektets huvudskaliga leveranser är:

- två patent (pending)
- etablering av en ny förgasningsteknologi samt en påbörjad kommersialisering av den nya tekniken med bas i de två patenten och med fokus på småskalig CHP (inom företaget Boson Energy AB)
- en doktor (Anna Ponzio, disputationsdatum 2008-09-29) och en doktorand (Pavel Donaj, beräknas avlägga doktorsexamen under 2011)
- resultat publicerade i 19 publikationer i internationella tidskrifter och ett antal rapporter.

En rimlig potential för införandet av alternativa bränslen inom stålindustrin anses vara 10 % av bränslebehovet för ämnesvärmning inom 10 år, vilket motsvarar ca 212 GWh/år. Som redan nämnts, krävs dock en hel del utrednings-, utvecklings- och forskningsarbete innan detta kan ske.

## Ordlista

ACC	Accelerated Cooling
AOD	Argon oxygen decarburization
ASR	Automobile Shredder Residue (fluff)
Atomisering	Finfördelning av smält metall med hjälp av gas- eller vattenstrålar
BAT	Best available technic, ett begrepp som ofta förekommer i miljösammanhang
Billets	Gjutna klenare fyrkantämnen
Blooms	Gjutna grövre fyrkantämnen
Blåsmaskin	Del i masugnsanläggning för att driva in luft i masugnen
BOF	Basic oxygen furnace
BOP	Basic oxygen process
CAS-OB	Composition adjustment stirring oxygen blowing
CCS	Carbon capture and storage
Desoxidation	avlägsnandet av syre ur smält metall
Direktreduktion	reduktion av järnmalm vid så låg temperatur (800-900°C) att järnet inte smälter. Kallas också för järnsvamp-process
DFI	Direct Flame Impingement
DRI	Direct reduced iron (järnsvamp)
EAF	Electric arc furnace (ljusbågsugn)
ECR	Endless casting and rolling
FLOX	Flamlös oxidation, flamlöst koncept för låg NOx. Varunamn för brännare från WS-Warmeprozessstechnik GmbH, Tyskland
Fluff	Restprodukt vid fragmentering av skrot bestående av t ex textil, plast, gummi. Vanligt vid bilfragmentering
Flussmedel	Tillsatt material (t ex flusspat, aluminiumoxid) till slaggen för att sänka sdesd mäلتemperatur.
FOCS	Fuel Optimization Control System -RF: Reheating furnaces -PF: Pit furnaces
Forma	Ventil i masugnens underdel för inblåsning av luft
Fragmentering	Finfördelning av skrot genom krossning
FTIR	Fourier Transform Infra Red (spektroskopi)
Färskning	Oxidation av inlöst kol i smältan
Förvärmning med regenerator	Regenerativ förbränning och alla brännare med luft förvärmad via någon typ av regenerator, oftast >900 °C och högre
Gjutrör	Rör mellan skänk och gjutlåda för att förhindra lufttillträde runt stålstrålen.
Glödskal	Oxidskikt på stålytan
Handelsfärdigt stål	stål som är "färdigt för handel", dvs som fått en form som är ändamålsenlig för stålindustrins kunder. Exempel på handelsfärdigt stål är plåt, band, stång, profiler, tråd och rör. Handelsfärdigt stål får inte förväxlas med "handelsstål", en benämning som syftar på stålets kemiska sammansättning och inte dess form

## BILAGA 2

Handelsstål	i stort sett detsamma som "olegerat stål". Motsatsen är specialstål, som således definieras som legerat stål. Benämningarna torde ha sitt ursprung i det förhållandet att huvuddelen av det legerade stålet tidigare tillverkades för speciella ändamål och levererades direkt till kund medan en stor del av handelsstålet, det olegerade stålet, såldes via handeln (grossister). Observera att stål i sig självt är en legering. Benämningen "olegerat stål" används för att beteckna stål med särskilt låga legeringshalter.
Hematit	Järnmineral, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , som är den vanligaste järnmalmen. Kallas också blodstensmalm
HLL	High Level Lancing
HiTAC	Regenerativ förbränning men med "flamlöst" koncept för låg $\text{NO}_x$
HSLA stål	High Strength Low Alloyed stål
Hyttstoft	Grovt stoft som innehåller bl a järnoxid och kol och som avskiljs från masugns gasen.
Härdbara stål	Härdning, process med vilken man gör ett material hårdare och höjer dess sträckgräns.
Höghållfasta stål	ett stål där draghållfastheten, mätt som sträckgränsen, överstiger ett visst givet värde. Som exempel kan nämnas att vid tulldeklarering har t.o.m. 1995 tunnplåt med en sträckgräns om mer än 275 MPa betraktats som höghållfast. I många fall kräver man dock betydligt högre sträckgränser för att ett stål skall betecknas som höghållfast.
IEA	International energy agency
Induktionsugn	ugn för smältning av (huvudsakligen) skrot, där värmen åstadkoms genom elektrisk induktion.
Inertgas	Gas som inte reagerar med stålet eller dess innehåll. Ex. argon, kvävgas
IR	Infraröd
Konventionell förbränning	Ingen förvärmning av luften
Konverter	reaktor eller "behållare" för konvertering (omvandling) av smält metall till en önskad kemisk sammansättning (som dock normalt inte är den slutliga sammansättningen).
LBE	Lance bubbling equilibrium (combined blowing BOP)
LCA	Livscykelanalys
LD	Linz-Donawitz
Legerat stål	stål med fastställda minimigränser för legeringsämnen. Nedan visas minimigränserna, uttryckta i viktprocent, för några vanliga ämnen. För att betecknas som legerat måste ett stål innehålla minst ett av de angivna ämnena. Det bör observeras att halten av det viktiga legeringsämnet kol inte är avgörande för om stålet betecknas som legerat eller olegerat. Mangan 1,65 Kisel 0,6 Krom, nickel, kobolt, aluminium och volfram 0,3 Vanadin 0,1 Molybden 0,08 Bor 0,0008
Ljusbågsugn	ugn för smältning av (huvudsakligen) skrot där värmen åstadkoms genom de ljusbågar som bildas mellan kolelektroder och stålskrotet/stålbadet. I Sverige produceras ca 40 procent av allt stål i ljusbågsugnar
Magnetit	Järnmineral, $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , som utgör huvuddelen av LKABs produktion

## BILAGA 2

Metallurgiska kol	Kol som är lämpligt att förädla till koks. Krav finns på lågt innehåll av föroreningar samt gasinnehåll.
OBM	Oxygen bottom blowing metallurgy
Olegerat stål	stål med relativt låga halter av legeringsämnen (se legerat stål). Termen olegerat stål är i stort sett synonym med begreppen handelsstål och kolstål.
Oxy-fuel	Förbränning med syrgas
Partialtryck	Deltryck för en specifik gas i en gasblandning. I luft är partialtrycket för syrgas 0,21 atm.
POS	ProcessOptimeringsSystem
processkol	Kol som används för metallurgiska reaktioner
Q-BOP	Quick bottom blowing BOP
QT-stål	QuenchingTempering stål (seghärdat stål)
Raffinering	Sänkning av bl a svavelhalten i smältan (görs med tillsats av kalk)
Reducering	T ex tillsats av kisel eller aluminium för att återvinna krom ur slaggen
Regenerator	Värmeväxlare där ett värmelagrande material omväxlande passerar av heta rökgaser och kall luft
Rekuperator	Värmeväxlare där luft och avgaser är skilda åt av ett värmeledande material
RFCS	Research Fund for Coal and Steel
RH	Reinstahl-Heraeus, en vakuumbehandlingsmetod
Rostfritt stål	stål med minst 12 procent krom och högst 1,2 procent kol. Ofta är rostfria stål också legerade med andra metaller, t.ex. nickel och molybden.
Råstål	I statistiska sammanhang definieras råstål som stål i dess första stelnade form, dvs göt och ämnen (även flytande stål för gjutgods räknas som råstål). För metallurgen betyder termen råstål ofta flytande stål,
Sekundär metallurgi	Se skänkmetsallurgi
Skrotboken	Avtal mellan stålverk och skrothandeln om klassificering av skrotsorter
Skrotkorg	Behållare för att transportera skrot från skrotgården till ugnen
Skänkmetsallurgi	Färdigbehandling av flytande råstål i skänk. Se skänkgugn
Skänkgugn	ugn i första hand för temperaturjustering eller varmhållning. Här sker också ofta slutlig finjustering av stålets sammansättning. Från skänkgugnen går stålet till gjutning.
Slabs	Gjutna rektangulära plåtämnen
Smältenergi	Energi som åtgår för smältning av skrot.
syrgaskonverter	reaktor i vilken råjärn (flytande tackjärn) omvandlas (konverteras) till stål genom blåsning med syrgas. Det finns olika typer av syrgaskonvertrar. Den numera vanligaste är LD-konvertern och dess olika varianter.
Thomasprocessen	en variant av bessemerprocessen som tillät användningen av tackjärn med upp till 2,5 procent fosfor (fosfor är ett "gift" i stålsammanhang). Fosfor övergick i slaggen, som på grund av sina höga fosforhalter kunde användas som gödningsmedel (thomasfosfat). Thomasprocessen var i bruk i Sverige till i början av 1970-talet.
Tornado	Behållare för virvelvindsbehandling
Torped	behållare med ett torpedliknande utseende för transport av råjärn (flytande tackjärn) från masugn till stålverk

## BILAGA 2

Torrdestillation	Upphettning utan lufttillträde
ULC	Ultra low carbon
ULCOS	Ultra low carbon oxide steelmaking
varmapparat	Värmeväxlare vid masugn för inblåsningssluffen
VOD	Vacuum Oxygen Decarburization
VODC	VOD Converter
Vortex	virvel
värmebehandling	Upphettning till varierande temperaturer under varierande tidsperioder för att erhålla önskvärda inre materialegenskaper.
Värmning	Avser ofta upphettning av stålämnen till bearbetningstemperatur
Ämne	halvfabrikat av stål som framställs antingen direkt genom stränggjutning eller genom valsning/smidning av göt. Ämnen vidarebearbetas genom valsning eller smidning till handelsfärdigt stål. Beroende på i första hand tvärsnittets form uppdelas ämnen i slabs, billets och blooms

## **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)

