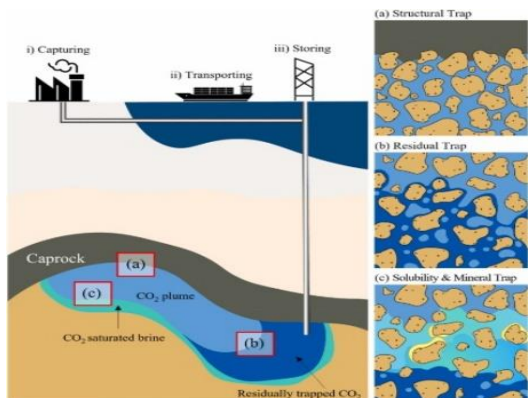


REDUKTIONSPROCESSER FÖR JÄRNMALM

Underlag för bedömning av produktion av järnsvamp till
Sveriges specialstålverk



2024-12-20

Rutger Gyllenram

Peter Samuelsson

Anders Werme

Om författarna:

Författarna är alla processmetallurger från KTH.

Rutger Gyllenram är Technologie Licentiat i Stål- och Metallproduktionsteknik 2001 och driver sedan 1991 utvecklingsbolaget Kbolde & Partners AB.

Peter Samuelsson är docent i Produktionsteknik särskilt Stål och Metallindustri och disputerade 2017 i Metallurgisk Processvetenskap efter en karriär vid Ovako, Danieli, Outokumpu och nuvarande Alleima.

Anders Werme är docent och disputerade 1987 i Stål- och Metallproduktionsteknik. Därefter följde en karriär i SSAB och ArcelorMittal.

Peter Samuelsson och Rutger Gyllenram är grundare av FerroSilva AB för produktion av järnsvamp med biogen syngas.

Omslag:

Idag övergår allt fler masugnsbaserade verk till skrotbaserad stålframställning i ljusbågsugn. För att hantera en möjlig framtida skrotbrist med produktion av järnsvamp med ett klimatavtryck nära noll så finns idag tre möjliga reduktionsmedel: naturgas kombinerat med koldioxidinfångning och lagring (CCS), vätgas från elektrolys av vatten med el med lågt klimatavtryck och biogen syngas från skogsbioprodukter kombinerat med CCS för att skapa en kolsänka.

Attribution:

Järnsvamp (DRI) från Emirates steel UAE och fragmenterat skrot från STENA Huddinge.
Foto: Rutger Gyllenram

Carbon Capture and Storage (CCS) av Kyuhyun Kim, Donghyun Kim, Yoonsu Na, Youngsoo Song, and Jihoon Wang -
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10750052/>, CC BY 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=153257957>

Skogsbioprodukter i form av grenar och toppar (GROT) insamlat av Sveaskog vid sjön Vållem, Ulricehamn. Foto: Rutger Gyllenram.

El-transmission av Nixdorf, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=182375>

Förord

Den malmbaserade stålindustrins arbete med att sänka utsläpp av klimatgaser som i Sverige tog fart i och med lanseringen av Hybrit och senare H2Greensteel, nuvarande Stegra, innebär nya processer och processkedjor och en stor mängd ingående teknologier med varierande mognadsgrad. En ökad användning av ljusbågsugnen i dessa nya processsystem medger en ökad användning av skrot och då det blev uppenbart att omställningen troligen kommer att påverka tillgången på rent skrot för den ljusbågsugnsbaserade specialstålsindustrin beslutade Jernkontorets TO23 2021 att bidra till denna sammanställning över nya reduktionsprocesser och underliggande teknologier för att underlätta beslutsfattande.

Initiativet kom från Rutger Gyllenram och Peter Samuelsson och hade inledningsvis ett rent tekniskt fokus men efter ett första seminarium för avrapportering på Jernkontoret 2022 där även en marknadsstudie utförd av Anders Werme ingick så inbjöds Anders att bidra till rapporten.

Att beskriva stålindustrins arbete med att sänka klimatutsläppen och utrustningsleverantörernas processalternativ har varit som att skjuta på ett rörligt mål. Det har varit svårt att avgöra de olika processernas mognadsgrad utifrån företagens erbjudanden och skilja på vad som är ett företags idé om en framtida utveckling och vad som faktiskt är beslutade planer. Utöver detta kan det vara svårt att avgöra om författare av akademiska artiklar, medvetet eller omedvetet, färgats av vad de vill skall vara sant och därmed inte i tillräcklig mån kritiskt granskat försöksresultat. Exempel är inställning till infångning och lagring av koldioxid, CCS, val av reduktionsmedel och mognadsgrad hos olika teknologier. Detta är naturligtvis en försiktighet som författarna själva måste underkasta sig.

Ett stort tack till Wenjing Wei för insamling av material och Niloofar Arzpeyma och Joel Gustavsson som bidragit med modeller för arbetet. Alla vid tiden för insatsen vid Kobolde & Partners AB. Tack även till industridesigner Alexandra Fransson som förtjänstfullt har gjort ikoner och processbilder till kapitel 3-5.

Joachim von Schéele har bidragit med granskning av diskussion och slutsatser vilket varit värdefullt.

Vi vill slutligen tacka Olle Sundqvist, TO23, och Robert Vikman, Jernkontoret, för stöd och tålamod med att arbetet har tagit väsentligt längre tid än ursprungligen planerat men hoppas att föreliggande arbete skall bidra till fortsatta diskussioner och beslut kring försörjning av järnråvara till svenska verk.

Stockholm, Västerås och Luxemburg i december 2024

Rutger Gyllenram

Peter Samuelsson

Anders Werme

Sammanfattning

Avveckling av masugnar i Europa med ökad efterfrågan på skrot och järnsvamp

EU tillsammans med Storbritannien producerade 2022 76 Mton råjärn i masugnar motsvarande c:a 82 Mton stål. Kravet på stålindustrin att ställa om till produktion med mycket låga utsläpp av växthusgaser gör att masugnsbaserade verk övergår till ståltillverkning i ljusbågsugn huvudsakligen med målet att utnyttja en kombination av skrot och järnsvamp med låga utsläpp av klimatgaser som råvara. Den produktionsmetod för järnsvamp som förespeglats marknaden i Europa är reduktion i schakt med vätgas som reduktionsmedel men i många fall med naturgas till att börja med. Vissa företag har fattat beslut om investeringar medan det i andra fall rör sig om kommunikation av en inriktning.

Exempel på företag som aviserat att de avser stänga masugnar är SSAB i Sverige och Finland, Voest i Österrike, Salzgitter och Saarstahl i Tyskland, Tata Steel i Nederländerna och Storbritannien samt British Steel i Storbritannien. TKS har tidigare meddelat att de avsåg bygga direktreduktionsverk med en elektrotackjärnsugn och behålla sina konvertrar medan ArcelorMittal har aviserat övergång till ljusbågsugnar för en del av sina verk men avvaktar för andra. Samtidigt uppträder nya företag som Stegra i Sverige och Blastr i Finland vilka skall producera stål från skrot och en hög andel egenproducerad järnsvamp. Idag finns det ett företag, GravitHy, i Frankrike som aviserar att man skall producera järnsvamp för avsalu samtidigt som EU-kommissionen försöker intressera länder med naturgas att producera järnsvamp för den europeiska marknaden baserat på vätgasreduktion eller reduktion med naturgas med infångning och lagring alternativt användning av koldioxid, CCUS.

En enkel kostnadsberäkning ger vid handen att järnsvamp producerad med vätgas i Europa blir väsentligt dyrare än järnsvamp framställd i MENA-regionen med naturgas och CCS vilket ger anledning att tro att de nya verken kommer maximera sin insats av skrot vilket riskerar att öka skrotpriserna drastiskt och skapa en bristsituation på rent skrot. En sådan brist på skrot av tillräckligt hög kvalitet skulle drabba den svenska specialstålindustrin med ökade råvarupriser och därmed försämrad global konkurrenskraft samt i värsta fall minskad tillgänglighet på råvara med sänkt produktion som följd. Det är därför av största vikt för specialstålverken att förstå vad som händer i omvärlden och att skapa förutsättningar för att på olika sätt säkra försörjning av järnråvara.

Reduktion av järn med låga utsläpp av växthusgaser

Det finns i princip fem alternativa sätt att reducera järnmalm med låga utsläpp av växthusgaser inom de närmaste decennierna: (1) Smältreduktion med fossilt kol och CCS, (2) Direktreduktion med fossil naturgas och CCS, (3) Direktreduktion med vätgas, (4) Direktreduktion med biogen syngas, eventuellt med CCUS för att skapa en kolsänka och slutligen (5) Smältreduktion med biogent kol.

Alternativ 1 och 2 är beroende av tillgång på geologiska formationer och infrastruktur för transport och lagring av koldioxid liksom kol och naturgas som utvunnits med låga utsläpp av metan. Alternativ 3 är beroende av tillgång på stora mängder el med låga utsläpp och alternativ 4 behöver certifierad biomassa och för att ge en kolsänka antingen avsättning för biogen koldioxid för industriellt bruk eller möjligheter till transport och lagring. Den tekniska mognadsgraden, ofta benämnd TRL i en skala från 1-10, är svår att uppskatta för de olika alternativen:

Alternativ 1 Smältreduktion som huvudsakligen omfattar versioner av masugnsprocessen har testats i pilotskala vid Mefos med goda resultat men ingen har idag gått vidare med fullskaleprojekt. Då det idag byggs nya masugnsverk och antalet unga masugnar är stort så finns det stora utvecklingsresurser och ett underlag för en snabb utveckling vilket kan vara avgörande. Alternativ 2 omfattar de båda processtyperna MIDREX och Energiron där den senare har avskiljning av drygt hälften av koldioxiden som en del av processen och där en modifiering till avskiljning av hela koldioxidmängden torde vara

hanterbar. MIDREX som är den dominerande processen verkar mindre inriktad mot CCS. CCS i sig har varit omdiskuterad som metod men idag är intresset stort och många projekt aviseras kontinuerligt och kan snart anses vara mogen teknik. Alternativ 3 är den väg som många verk verkar föredra, givet en god tillgång på vätgas till ett rimligt pris. Både MIDREX och Energiron hävdar att de har processer för 100% vätgas liksom Hybrit men faktum är att idag finns inget direktreduktionsverk i större skala som använder ren vätgas. I stället rekommenderar MIDREX att man använder naturgas för att sen öka vätgasinblandningen successivt. Förutom den metallurgiska processen så finns tecken på svårigheter att skala upp produktion av vätgas med elektrolysör. Alternativ 4 bygger på etablerad teknik för förgasning av biomassa respektive reduktion i schakt med en blandning av vätgas och kolmonoxid. Kombinationen är dock ny och en kunskapsuppbyggnad kring processintegration och råvaror behövs. Marknaden för biogen koldioxid med transporter är ännu ny. Slutligen är smältreduktion med träkol i alternativ 5 tveksamt då energin i pyrolysgaser i allmänhet inte tas tillvara.

Det enda alternativ som på kort tid kan nå industriell mognad är alternativ 2 baserad på Energiron som därför kan fungera som teknisk och ekonomisk referenspunkt för teknikutvecklingen.

Svårtolkad omvärldssituation

Mycket tyder på att de planer på att under kort tid ställa om de europeiska masugnsverken till reduktion med vätgas som aviserats nu revideras eller kan komma att revideras. Det kan innebära att även avvecklingen av systemet med fri tilldelning av utsläppsrätter kan behöva ses över med en inriktning på långsammare övergång till låga utsläpp för att inte slå ut den europeiska stålindustrin. I ett sådant läge blir frågan om skrotbrist mindre akut. Vid en situation där den vätgasberoende järnsvampsproduktionen inte kommer igång i större skala medan övergången till skrotbaserad produktion fortsätter så kommer det uppstå ett underskott på järnråvara om det inte kompenseras av egen produktion och/eller import av järnsvamp och tackjärn.

Egen produktion som inte baseras på vätgas kan bygga på alternativ 4 men begränsas av industriell mognad och infrastruktur för transport av biomassa och koldioxid och bedöms nå en maximal modulstorlek av 0.6 miljoner ton per år under de närmaste fem till tio åren.

Import torde ske från produktion enligt alternativ 2 där de bästa förutsättningarna finns i länder med billig naturgas vilket idag måste begränsas till MENA-regionen. DR-verk med naturgas byggs idag i moduler om minst 2 miljoner ton per år.

Den situation som de svenska specialstålverken står inför är inte unik utan delas med verk i hela EU och Storbritannien.

Handlingsalternativ för Sveriges specialstålverk avseende malmbaserad råvara

De svenska specialstålverken använder storleksordningen 2 Mton olegerat skrot per år. Om en rimlig inblandning av järnsvampsbriketter är 30% så ger det ett järnsvampsbehov på 600 kton. I en situation där även andra verk i Sverige behöver tillskott av järnsvamp så mångdubblas denna mängd. En kontinuerlig regional och global omvärldsanalys är väsentlig för att kunna fatta beslut.

Följande omedelbara aktiviteter som kan utvecklas till handlingsalternativ kan identifieras:

- A. Arbeta aktivt med att förbättra upparbetning och användande av skrot så att en hög andel av det i Sverige fallande skrotet kan utnyttjas.
- B. Följ utvecklingen av den globala marknaden för briketterad järnsvamp och undersök möjligheten att säkra tillgång till kvoter av produktionen.
- C. Följ utvecklingen för de nordiska vätgasinitiativen (produktionsalternativ 3) och bedöm möjligheten att från dessa köpa järnsvamp med rätt egenskaper och marknadsmässigt pris.
- D. Följ utvecklingen för det svenska initiativ som baseras på biogen syngas och bedöm möjligheten att från detta köpa järnsvamp med rätt egenskaper och marknadsmässigt pris.
- E. Följ marknaden för tackjärn för att klara eventuella bristsituationer även om klimatavtrycket påverkas.
- F. Sök allianser med företag av liknande storlek och liknande behov och realisera synergier.

Förord.....	3
Sammanfattning	4
1 Inledning	8
1.1 Bakgrund till denna rapport	8
1.2 Syfte	10
1.3 Disposition	10
1.4 Avgränsningar	10
1.5 Referenser	11
2. Grundläggande begrepp och mekanismer.....	12
2.1 Reduktion och reduktionstal	12
2.2 Reaktioner och reaktionsvärmen.....	13
2.3 Jämvikter	15
2.4 Reaktionshastighet	18
2.5 Det reducerade materialets ytegenskaper och reaktivitet	19
2.6 Diskussion.....	20
2.7 Referenser	20
3. Processer för stålproduktion från malm	21
3.1 Från malm och reduktionsmedel till järn	21
3.2 Dagens reduktionsprocesser för järnmalm.....	21
3.3 Från järn till stål	23
3.4 Diskussion.....	25
3.5 Referenser	25
4. Processernas utvecklingspotential.....	26
4.1 Sänkning av utsläpp av växthusgaser från dagens reduktionsprocesser	26
4.2. Masugnsprocessen	27
4.3 Alternativa smältreduktionsprocesser	29
4.4 Järnsvampsprocesser generellt.....	30
4.5 Kolbaserade järnsvampsprocesser	32
4.6 Gasbaserade järnsvampsprocesser	33
4.7 Diskussion.....	36
4.8 Referenser	38
5 Teknik bortom processförbättringar.....	39
5.1 Smältreduktion	39
5.2 Gasbaserad direktreduktion.....	39
5.3 Elektrolys	39
5.4 Möjliga processvägar 2050	39
5.5 Förutsättningar för utveckling och omställning	39
5.6 Referenser	48

6. Processekonomi	50
6.1 Bakgrund.....	50
6.2 Beräkningsförutsättningar	50
6.3 Investerings och driftskostnader	52
6.4 Priser och GWP för råvaror och energi.....	55
6.5 Kostnadskalkyler för DRI/HBI	57
6.6 Kostnadskalkyler för stål	58
6.8 Slutsatser och diskussion	59
6.9 Referenser	60
7 Järn- och stålfirmas energiomställningsstrategier	61
7.1 Stålmåterins kommunikerade strategier	61
7.2 Järnmålmåleverantörernas kommunikerade strategier	80
7.3 Utrustningsleverantörer för DRI anläggningar och deras produktutbud.....	83
8. Övergripande slutsatser.....	85

1 Inledning

1.1 Bakgrund till denna rapport

1.1.1 Risk för brist på skrotråvara med låg klimatpåverkan till ljusbågsugnar

Den globala uppvärmningen och järnmalsreduktionens roll i denna har fått världens stålföretag att söka efter strategier för att sänka sina utsläpp av växthusgaser. Europeiska Unionen har satt som mål att vara klimatneutralt 2050 vilket innebär att utsläpp av CO₂ antingen kommer regleras eller beläggas med ytterligare avgifter. Inför detta väljer ett flertal integrerade verk att övergå till ljusbågsugnsdrift med förväntad ökad efterfrågan på skrot med låga föroreningshalter och på järnsvamp som följd. På sikt kan en bristsituation uppstå vilken allvarligt skulle skada svensk specialstålindustri. Denna är skrotbaserad med högt förädlingsvärde och mycket låga utsläpp av växthusgaser. En viktig råvarubas för rent skrot är primärt skrot, så kallat verkstadsskrot, som faller i t ex SSAB:s verk i Borlänge och i fordonsindustrin. I en situation när detta av någon anledning styrs till andra verk uppstår ett underskott vilket svårigen kan ersättas på annat sätt än genom en kombination av förbättrad sortering/rening av insamlat sekundärt skrot och tillförsel av järnsvamp. En grov uppskattning är då att mellan 0.5 och 1 Mton järnsvamp behöver tillföras den svenska marknaden vid slutet av decenniet.

1.1.2 Tidigare teknikskiften inom produktion av råjärn och järnsvamp

Vid reduktion av järnmalm skiljer man mellan smältreduktionsprocesser där slutprodukten är ett smält råjärn och direktreduktionsprocesser som sker helt i fast fas för produktion av så kallad järnsvamp. När vi idag står inför en situation där en omställning av stålindustrin krävs är det naturligt att ett stort antal förslag till nya processer som alternativ till masugnsprocessen tas fram. En liknande situation upplevde världen efter energikrisen på 1970-talet då äldre integrerade stålverk stod inför ett generationsskifte. De alternativ som utvecklades då syftade främst till att ta bort behovet av agglomering av järnmalm och kol och därmed minska anläggningskostnader, energikostnader samt utsläpp av t ex stoft. De kostnadsjämförelser som gjordes vid tiden visade att masugnsprocessen hade ett högre kostnadsläge än alternativen och därmed borde kunna betraktas som en obsolet teknologi på väg att fasas ut. Så blev det inte och exempel på orsaker kan vara:

- Masugnsprocessen utvecklades vidare med t ex kolpulverinjektion samt lägre slaggmängder och kiselhalt i råjärnet jämfört med tidigare driftspraxis.
- Tid och utvecklingskostnader för utveckling av nya processer underskattades.
- Drift och anläggningskostnader för alternativen underskattades.

Av de svenska initiativen Elred, Inred och Plasmasmelt överlevde ingen som råjärnsprocess. Den alternativa smältreduktionsprocess som nått störst framgång är Corex baserad på styckemalm, pellets och kolpulver. Finex är en variant av Corex som utnyttjar slig som järnråvara. Corex och Finex vilka presenteras i kapitel 4 marknadsförs idag av Primetals Technologies och är i drift eller byggts i totalt sju moduler vid fem verk i Indien, Kina och Sydafrika. Ett exempel på en smältreduktionsprocess baserad på finkornig malm, slig, och kolpulver och som fortfarande är under utveckling i Europa är HISarna som drivs av Tata Steel med en pilotanläggning i IJmuiden. Andra projekt är OxyCup, Redsmelt och Tecnoled.

När Dr P Schmöle gjorde en presentation vid konferensen Stahl 2011 i Düsseldorf och året efter i Rio [Schmöle et al 2012] listade han följande förslag till smältreduktionsprocesser utöver de ovan nämnda vilka idag inte nått industriell användning:

AISI Direct Steelmaking, Ausiron, Basset, Bouchet-Imphy, CCF, CIP, Clean Smelt, De Sy, DIOS, DLM, Dored, Elektrofließbett, Elkem Kiln, Elkem Shaft, Fastmelt, Finmelt, Finsmelt, Flame Smelting, Gridsmelter, H-D, Hismelt, Hydromet, IDI, IFCON, ITmk3, Jet Smelting, Kwiksteel, Orcarb, ORF, Primorec, PSH, Republic Steel, Romelt, Rotored, Sidcomet, Strategic-Udy, Stuerzelberg, VOEST.

Utöver dessa kan Technored som utvecklas av malmföretaget Vale för reduktion med biomassa och kallbundna briketter och det svenska projektet Ironman från ScanArc nämnas.

Även järnsvampsprocesser har utvecklats genom åren. Av de processer som de svenska pionjörerna Wiberg (Wiberg-processen), Siurin (Höganäsprocessen) och Santén (Plasmared) utvecklade är det bara Höganäsprocessen som idag är i drift. Dagens järnsvampsproduktion sker i schaktugnsprocesser som Midrex, Energiron och Pered, roterugnsprocesser som SL/RN, Accar, SIIL och DRC-Azoon samt karusellugnar som Fastmet och Inmetco. De senare har funnit en nisch med upparbetning av restmaterial. Fluidbäddar med högt tryck som Finmet har varit i drift men verkar nu fasats ut men nämns fortfarande som existerande processalternativ. En svensk batchprocess för vätgas, huvudsakligen för reduktion av restmaterial i en klockugn, GreenIron, är under utveckling.

Även inom järnsvampsframställning listade Dr Schmöle processvarianterna och utöver de ovan nämnda så kan noteras följande processförslag vilka dock idag inte nyttjas industriellt men där utveckling kan pågå och kan dyka upp i framtiden:

Aachener Drehofen, Arex, Armco, Arthur D. Little, Bgrimm, BTX, Carbotherm, CHB, Circofer, Circored, CO-C, Comet, Danarex, DAV, DryIron, Echevarria, Esso- A.D. Little, Esso-Fior, Finsider, Freeman, Ghaem, Heat-Fast, HIB, Hi-QIP, H-Iron, ICEM, Iron Carbide, Jindal, Kalling-Avesta, Kalling-Domnarvet, Kawasaki, Kinglor-Metor, Koho, Krupp-Codir, Krupp-Eichenwamm, Krupp-Renn, Madaras, Mahalaxmi, Mini, Novalfer, NSC, Nu-Iron, Osil, Popuri, Primus, Purofer, RedIron, R-N, Salem, Shenwu, Spirex, SPM, Stelling, TDR, Tisco, Ugine.

1.1.3 Teknikskifte för sänkt CO₂-utsläpp från stålindustrin

Då ökningen av världsproduktionen tyder på att mer än 50% av världens produktionskapacitet för stål utgörs av masugnsbaserade verk som tillkommit de senaste 20 åren så är det rimligt att anta att dessa kommer att vara i drift även efter 2050 och kommer behöva genomföra processförändringar för att sänka CO₂-utsläppen. Det kan gälla allt från mindre besparingar genom förändring av råvaror och energikällor till drastiskt byte av masugnsprocessen till en alternativ råjärnsprocess. En teknologi som kan användas av såväl smältreduktionsprocesser som direktreduktionsprocesser för att sänka CO₂-utsläppen är Carbon Capture and Storage, CCS, vilken bör beaktas. En viktig reservation när det gäller användning av fossila bränslen är utsläpp av växthusgaser vid brytning av kol och utvinning av naturgas.

Med början 2004 och ett antal år framåt genomfördes projektet ULCOS, där utvecklingen av järnmalsreduktion följde fyra linjer samt den femte komponenten CCS:

1. ULCOS-BF - en masugnsprocess med syrgas, toppgascirkulation och CCS/CCU
2. HIsarna - en smältreduktionsprocessen med CCS
3. ULCORED - en vätgasbaserad DR-process med vätgas från naturgas och med CCS.
4. ULCOLysis och ULCOWin – elektrolys av smält järnoxid respektive en suspension av järnoxid i en alkalisk lösning till järn och syrgas
5. CCS – Lagring av CO₂ i marken i Florange-trakten, Frankrike

Målet för ULCOS var att sänka CO₂-utsläppen med 50%. Det är oklart hur erfarenheterna från ULCOS-BF har förvaltats. En plan att bygga om en masugn vid ArcelorMittals verk i Florange och kombinera med CCS har inte verkställts. HIsarna drivs vidare i Tata Steels regi. ULCORED-projektet byggde på uppbyggnad av en pilotugn i Luleå men den kom inte till stånd. ULCOWin skalas upp internt inom ArcelorMittals forskningsanläggning i Metz i företaget Siderwin och senare av John Cockerill som processen Volteron medan idéerna från Ucolysis lever vidare i Boston Metals process MOE. Under 2022 har ArcelorMittal vid olika tillfällen kommunicerat en roadmap som bygger på en kombination av ULCOS-BF och ULCORED]. Teknikleverantören SMS som även är agent för MIDREX har vid samma tillfälle kommunicerat att de kan leverera denna teknik som ett första steg i en omvandlingsprocess.

Järnsvamp produceras idag huvudsakligen från naturgas av fossilt ursprung vilket ger en produkt med lägre klimatpåverkan än tackjärn men högre än skrot. Som alternativ till naturgas vid framställning av

järnsvamp kan syngas från biomassa eller vätgas användas. Dessa tre gasalternativ: naturgas, vätgas och biogen syngas, får alla anses vara möjliga i en framtid, där lönsamheten är beroende av bland annat priserna på utsläppsrätter, råvarutillgång, råvarupris och den allmänna tekniska utvecklingen.

Processutveckling beskrivs i kapitel 4 och 5 medan planerade och beslutade projekt i kapitel 7 men ämnet är även föremål för ett stort antal översiktsartiklar så se t ex [Birat et al 2021].

Inför dagens teknikutveckling finns det således all anledning för stålindustrin att kritiskt granska den rådande situationen och aktuella förslag för att finna såväl styrkor och möjligheter som svagheter och hot så tidigt som möjligt. Detta har gjorts av bland andra OECD-organet International Energy Agency, IEA [IEA 2020]. Föreliggande studie syftar till att klarlägga förhållandena i Sverige och möjligheterna för i första hand den svenska specialstålindustrin.

I samband med den svenska satsningen på smältreduktion gav professor John-Olof Edström ut en monografi med titeln ”Råjärnsprocesser: Sveriges FoU-behov”, med en genomgång av de olika handlingsalternativen vilken har varit inspirationskälla till arbetet med denna rapport.

Arbetet har utförts av Rutger Gyllenram, disposition och text, Wenjing Wei, research, Niloofar Arzpeyma och Joel Gustavsson har arbetat med modellering, samtliga är eller har varit anställda vid Kobolde & Partners AB; Anders Werme svarar för en marknadsöversikt; för diskussion och slutsatser svarar Rutger Gyllenram, Anders Werme samt Peter Samuelsson, M3Advice AB, som även varit projektledare och kvalitetsgranskare.

1.2 Syfte

Den svenska stålindustrins omställning är en angelägenhet som berör ett flertal industriella intressenter liksom myndigheter och politiker och för dessa kan ett neutralt underlag vara av värde. Detta tekno-ekonomiska underlag skall ge en förståelse för området och ge var och en möjlighet att gå vidare med egna beräkningar och bedömningar utefter industrispecifika och lokala förutsättningar. Den tänkta läsaren är en person med baskunskaper i naturvetenskap men som inte nödvändigtvis har detaljerade kunskaper om stålindustrin eller speciellt reduktionsmetallurgi.

1.3 Disposition

Efter en inledning i [kapitel 1](#) kring hur kriser tvingat fram processutveckling men att inte alla processförslag lyckats görs i [kapitel 2](#) en genomgång av de frågeställningar som möter en processutvecklare inom järnmalmreduktion exemplifierat hur frågor lösts tidigare. I [kapitel 3](#) beskrivs stålframställning där malm varit den huvudsakliga järnbäraren och i [kapitel 4](#) befintliga processer för järnmalmreduktion och deras potential att nå utsläpp nära noll. I [kapitel 5](#) beskrivs så de nya processer som är under utveckling, hur framtida processkedjor nära noll 2050 kan se ut och en listning av de kringliggande problemområden som måste hanteras. I [kapitel 6](#) redovisas kostnadsberäkningar för direktreduktionslinjer aktuella för ljusbågsugnsverk i Sverige och i [kapitel 7](#) redovisas ett antal stålgruv- och utrustningsföretags kommunicerade strategier å som de var i mars 2024. I [kapitel 8](#) görs så en summering.

1.4 Avgränsningar

En viktig aspekt på industrins förändringsarbete är de drivkrafter som påverkar beslut om forskning och investeringar. Frågan om vad som är ”grönt stål” är central idag liksom frågan om hur beslut skall fattas om ”gröna investeringar” och ”gröna inköp”. Antalet initiativ och metoder är stort och de flesta är fortfarande under utveckling vilket har behandlats i Jernkontorets projekt URSTARK [Jernkontoret 2023] och således inte behandlas här.

Detta arbete kan utgöra en första iteration av en löpande översiktlig teknikbevakning och är därför med nödvändighet ofullständigt. En inriktning har varit att skapa förståelse för teknikområdet men i övrigt fokusera på teknologier vars TRL medger att en anläggning kan vara i drift före 2030 på en normal industriell risknivå på en produktionsnivå per år över 300 kton. **Arbetet bygger till stor del på författarnas egna erfarenheter och dessa får anses som referens när externa källor inte anges.**

1.5 Referenser

- | | |
|--------------------|--|
| Birat et al 2021 | Birat J.-P., Patisson F., Mirgaux O., Hydrogen steelmaking, part 2: competition with other net-zero steelmaking solutions – geopolitical issues, <i>Matériaux & Techniques</i> 109, 307 (2021),
https://doi.org/10.1051/mattech/2021023 |
| Jernkontoret 2023 | URSTARK projektrapport |
| IEA 2020 | IEA (2020), <i>Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking</i> , OECD Publishing, Paris,
https://doi.org/10.1787/3dcc2a1b-en . |
| Schmöle et al 2012 | Schmöle, P. Lungen, H. B., Noldin, H.B. Keynote address to the 6th ICSTI – International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, 14th to 18th October, 2012 – Rio de Janeiro – RJ – Brazil |

2. Grundläggande begrepp och mekanismer

2.1 Reduktion och reduktionstal

Järn (Fe) finns i naturen huvudsakligen bundet till syre (O) i form av järnoxider eller bundet till syre och väte (H) i form av järnhydroxider. De vanligaste förekommande föreningarna att komma ifråga för reduktion till järn visas i [tabell 2.1](#). Notera att järnmalm även innehåller andra ämnen vilket behandlas i [kapitel 6.1](#).

Tabell 2.1 Järnföreningar i malmer

Förening	Trivialnamn	Formel	O/Fe	Oxidationstal
Hematit	Blodstensmalm	Fe_2O_3	1.5	III (trevärt)
Götit *		FeOOH ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	1.5	III (trevärt)
Magnetit **	Svartmalm	Fe_3O_4	1.33	III och II
Wüstit ***		$\text{Fe}_{0.95}\text{O}$	1.05	II (huvudsakligen tvåvärt)
* När Götit hettas upp bildas Hematit och vatten avgår. ** Magnetit är en stabil mellanform av Hematit och Wüstit. *** Wüstit är en instabil form vilken ofta skrivs FeO^* eller förenklas till FeO .				

En förenklad modell är att betrakta järnmalm eller järnmineral som kristaller som bildats ur en joniserad smälta eller gas, det vill säga atomer eller atomföreningar med positiv eller negativ laddning vilka bildar föreningar med neutral laddning.

Sålunda består hematit, Fe_2O_3 , av komponenterna: 2Fe^{3+} och 3O^{2-} och wüstit, FeO^* , av Fe^{2+} och O^{2-} .

Reduktion av järnoxid innebär en övergång av elektroner från en elektrongivare till järnatomen som därmed kompletterar sitt elektronskal. Elektrongivaren oxideras därmed när den lämnar ifrån sig elektroner.

Sålunda sker reaktionerna:

- $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$
- $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$

Elektrongivarna, dvs reduktionsmedlen, vid järnreduktion i fast fas är i huvudsak kolmonoxid (CO) och vätgas (H_2) enligt:

- $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (reduktion med vätgas)
- $\text{CO} \rightarrow \text{CO}^{2+} + 2\text{e}^-$ (reduktion med kolmonoxid)

samt i smälta syrejoner eller inlöst kol (C) enligt:

- $2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{e}^-$ (elektrolys där syre bildas vid anoden))
- $\underline{\text{C}} \rightarrow \underline{\text{C}}^{2+} + 2\text{e}^-$

För reduktion av trevärt järn till tvåvärt sker reaktionerna:

- $\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3^{2-} + \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-} + \text{H}_2^{+}\text{O}^{2-}$ (direktreduktion med gas)
- $\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3^{2-} + \text{C}^{2+}\text{O}^{2-} \rightarrow 2 \text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-} + \text{C}^{4+}\text{O}_2^{2-}$ (direktreduktion med gas)
- $\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3^{2-} + \text{O}^{2-} \rightarrow 2 \text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-} + \text{O}_2 + 2\text{e}^-$ (elektrolys av joniserad smälta)
- $\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3^{2-} + \underline{\text{C}} \rightarrow 2 \text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-} + \text{C}^{2+}\text{O}^{2-}$ (smältreduktion med inlöst kol)

För reduktion av tvåvärt järn till rent järn sker reaktionerna:

- $\text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2^{+}\text{O}^{2-}$ (direktreduktion med gas)
- $\text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-} + \text{C}^{2+}\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe} + \text{C}^{4+}\text{O}_2^{2-}$ (direktreduktion med gas)
- $\text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe} + \text{O}_2 + 2\text{e}^-$ (elektrolys av joniserad smälta)
- $\text{Fe}^{2+}\text{O}^{2-} + \underline{\text{C}} \rightarrow \text{Fe} + \text{C}^{2+}\text{O}^{2-}$ (smältreduktion med inlöst kol)

2.2 Reaktioner och reaktionsvärmen

Kemiska reaktioner kan antingen vara endoterma eller exoterma, dvs kräva energi eller avge energi. I [tabell 2.2](#) framgår reaktionsvärmen i form av entalpiförändringar vid rumstemperatur och anges som bakgrundsinformation. För processberäkningar används idag termodynamiska databaser som Thermocalc, Factsage eller HCS för att få data vid viss temperatur.

Tabell 2.2 Huvudsakliga reaktioner förknippade med reduktion av järnmalm, Fe_2O_3 och H_2 , CO och CH_4 . Ett negativt värde innebär att reaktionen är exoterm, dvs avger värme, och ett positivt att den är endoterm, dvs kräver värme. Sammanställningen är hämtad från Sun et al 2020.

Typ av reaktion	Reaktion	Reaktionsvärme kJ/mol vid 298K	Nr
Reduktion med CO	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	- 43.221	1
	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	19.288	2
	$\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$	- 10.920	3
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$	- 23.389	4
Reduktion med H_2	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$	- 2.071	5
	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 \rightarrow 3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$	60.438	6
	$\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	30.229	7
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$	100.060	8
Reformering av CH_4	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$	206.083	9
	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{CO}$	247.233	10
Krackning av CH_4	$\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$	74.810	11
Reduktion med CH_4	$\text{FeO} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{Fe} + 2\text{H}_2 + \text{CO}$	236.312	12
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{Fe} + 6\text{H}_2 + 3\text{CO}$	718.309	13
Uppkolning	$3\text{Fe} + 2\text{CO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2$	- 149.829	14
	$3\text{Fe} + \text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{H}_2\text{O}$	- 108.679	15
	$3\text{Fe} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + 2\text{H}_2$	97.404	16
	$3\text{FeO} + 5\text{CO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + 4\text{CO}_2$	- 182.590	17
	$3\text{Fe} + \text{C} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$	22.594	18
Grafitisering	$2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$	- 172.423	19
Vattengasreaktionen	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$	- 41.150	20
Kolförgasning	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$	131.273	21

För reduktion med CO så är reaktionerna exoterma förutom reduktion av magnetit till hematit som är endoterm. Det kan utnyttjas vid agglomerering av magnetiter då värmebehovet för operationen till del kan täckas med oxidationsvärme, dvs den omvända reaktionen. För reduktion med vätgas gäller det

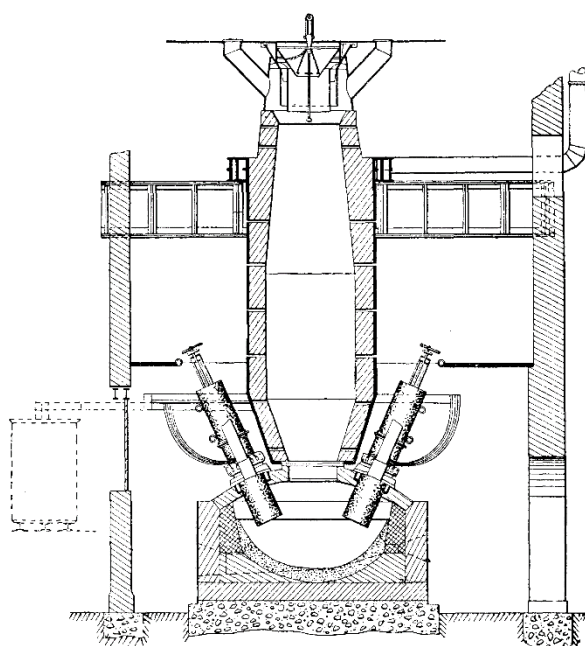
motsatta förhållandet då magnetitreduktion är svagt exoterm medan övriga reaktioner är endoterma. Detta innebär att värme måste tillföras för att inte reaktionerna skall avstanna. Den metod som används idag är att tillföra det värmets genom att förvärma vätgasen till en temperatur som kompenserar för reaktionsvärmets eller ha en tillräcklig gasmängd som värmer upp reaktanterna med värmeöverföring.

Reformering av CH_4 till CO och H_2 respektive krackning till C(s) och H_2 är även de endoterma reaktioner som kräver värme. I naturgasbaserade processer tillförs denna värme idag normalt genom värmeväxlare och förbränning av toppgas men med minskande elpris och ökande kostnad för emission av CO_2 är det möjligt att vi framöver åtminstone delvis värmer med elektricitet.

Bildning av Fe_3C med CH_4 kräver värme medan uppkolning till järnkarbid med CO är exoterm vilket har betydelse vid uppkolning av järnsvamp

Det skall vidare nämnas att summareaktionen 8 i många artiklar ges reaktionsvärmets 99 kJ/mol. Inlösning av grafit i flytande järn följt av reduktion av flytande FeO^* är en endoterm reaktion och har således en kylande effekt. Att öka kolhalten i en smälta med injektion av kol kräver således värme.

Kol och naturgasbaserade processer använder reaktionsvärme eller förvärmad bläster för att kontrollera värmebalansen i processen men med framväxten av elektriska ugnar för skrotsmältning föddes också idén om elektriska reduktionsugnar för järn. Figur 2.1 visar Jernkontorets försöksverk i Trollhättan 1910. Man fick dock väldigt liten förreduktion i schaktet jämfört med masugnen på grund av låga gasmängder



Figur 2.1 Jernkontorets försöksverk i Trollhättan 1910 [JKA 1911]

och senare varianter saknade schakt men hade ofta andra former av förreduktion. Elektrohyttor fanns på ett flertal orter i Sverige och försåg bland annat bessemerverk med råjärn.

Senare generationer av elektrotackjärnsugnar använde så kallade "Söderbergselektroder" nedsänkta i en förreducerad malmråvara, därav namnet Submerged Arc Furnace, SAF. Idag används dessa ugnar för legeringsframställning och endast en elektrotackjärnsugn är i drift för smältning av förreducerad ilmenitsand på Nya Zeeland.

Ugnstypen är dock åter aktuell för smältning av järnsvamp med hög halt av gångart vilket behandlas nedan. Då järnsvamp till största delen är metallisk kan man dock inte ha elektroderna nedsänkta i den osmälta chargin.

Andra intressanta processförslag som inte heller överlevde är t ex McDowell-Wellman processen, som under 1960-talet utvecklades för att ersätta masugnen i gjuterier och Elred som utvecklades av ASEA under 1970-talet.

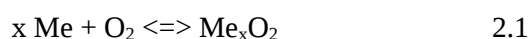
Den förra förreducerade kolblandade obrända

pellets i en gastät bandugn (travelling grate) för att sedan slutreducera i en SAF, troligen med grafitelektroder. Den senare förreducerade slig i en cirkulerande fluidbädd och smälte och slutreducerade därefter i en likströmsugn där godset infördes i ugnen genom en ihålig grafitelektrod. [Ban 1973]

2.3 Jämvikter

För att en reaktion skall ske krävs en drivande kraft, d v s att den leder till en sänkning av systemets fria energi ΔG . Vi lånar beskrivningen i Edström et al, dock med ändrad numrering:

En oxids stabilitet karakteriseras av det aktuella grundämnets förmåga att binda syre. Bildningen av en oxid ur exempelvis x moler metall (Me) och en mol syrgas kan skrivas:



Fria energin (drivande kraften) för bildning av en mol metalloxid enligt (2.1) kan skrivas:

$$\Delta G = \Delta G^0 + R T \ln \frac{a_{\text{Me}_x\text{O}_2}}{(a_{\text{Me}})^x p_{\text{O}_2}} \quad 2.2$$

ΔG^0 = Gibbs fria bildningsenergi då reaktanterna befinner sig i sina standardtillstånd d v s aktiviteterna $a_{\text{Me}_x\text{O}_2}$ och $a_{\text{Me}} = 1$ liksom p_{O_2} .

R = allmänna gaskonstanten

T = absoluta temperaturen (K)

Vid kemisk jämvikt är $\Delta G^0 = 0$ och ekv 2.2 kan skrivas:

$$\Delta G^0 = - R T \ln \frac{a_{\text{Me}_x\text{O}_2}}{(a_{\text{Me}})^x p_{\text{O}_2}} \quad 2.3$$

Under antagande att metall och oxid hela tiden befinner sig i sitt standardtillstånd kan (2.3) skrivas:

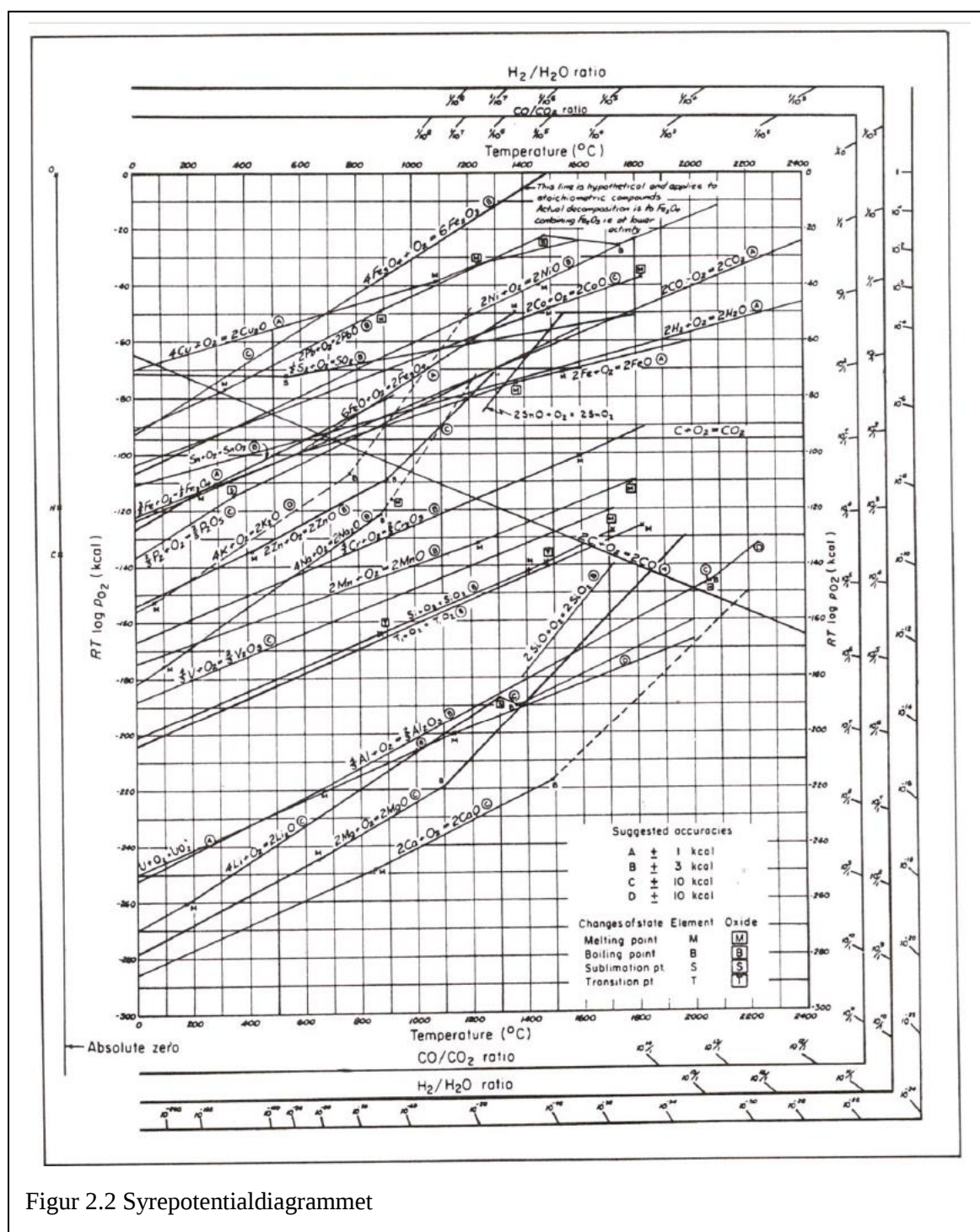
$$\Delta G^0 = R T \ln p_{\text{O}_2} \quad 2.4$$

Detta uttryck anger den syrepotential under vilken en ren oxid sönderdelas i syre och metall. Ekv (2.4) presenteras ofta i diagramform. Det så kallade syrepotentialdiagrammet är ett för metallurgen värdefullt hjälpmedel, som anger olika oxiders inbördes stabilitetsförhållande. (Figur 2.2)

Ju större negativt värde på ΔG^0 som föreligger vid bildning av en viss oxid, desto stabilare är oxiden. Detta innebär att de mest stabila oxiderna i figur 2.2, CaO, MgO och Li_2O , ligger lägst i syrepotentialdiagrammet.

Som tidigare nämnts gäller syrepotentialdiagrammet i figur 2.2 vid aktiviteten 1 för oxid och metall, d v s för rena ämnen. Detta är ett förhållande som normalt ej gäller i praktiken. I malmer ingående oxider är ofta kemiskt bundna till varandra, varvid jämviktsförhållandena förändras.

Då metalloxidaktiviteten minskar, vrids jämviktslinjerna i syrepotentialdiagrammet medurs varvid det krävs mer reducerande förhållanden – lägre syrepotential – för att framställa den rena metallen.

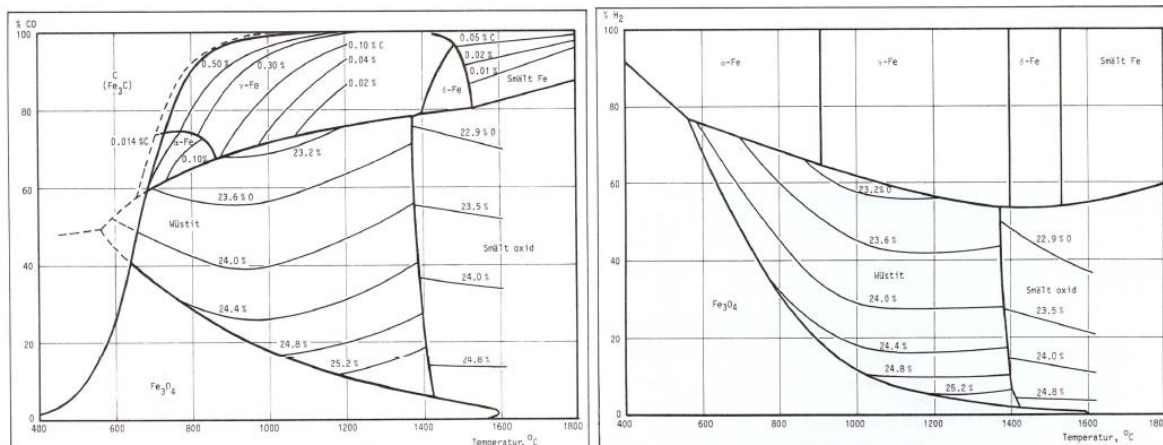


Figur 2.2 Syrepotentialdiagrammet

För element "ädlare" än Fe som t ex nickel, Ni, molybden, Mo och koppar Cu, sker reduktionen i allmänhet före reduktion av järn medan mindre ädla element som mangan, Mn, i huvudsak förblir oxider, vilket är exempel på förhållanden som kan studeras i syrepotentialdiagrammet.

Jämviktsförhållanden för CO/CO_2 , $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ och syreaktiviteten framgår av syrepotentialdiagrammets skalar i marginalen. Som framgår så minskar syreaktiviteten med ökande relativa halter av CO och H_2 vilket kan studeras i [figur 2.3](#), till vänster för CO/CO_2 och till höger för $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$.

Jämvikterna gör att all gas inte kan utnyttjas fullt ut i en process utan att man måste räkna med ett visst gasutnyttjande lägre än 1. Avgaserna kan brännas för att utnyttja värmeinnehållet eller återcirkuleras efter det att CO_2 och H_2O tagits bort. Vattengasreaktionen där CO_2 reagerar med H_2 till CO och H_2O gör att hela systemet måste tas i beaktande vid beräkningar.



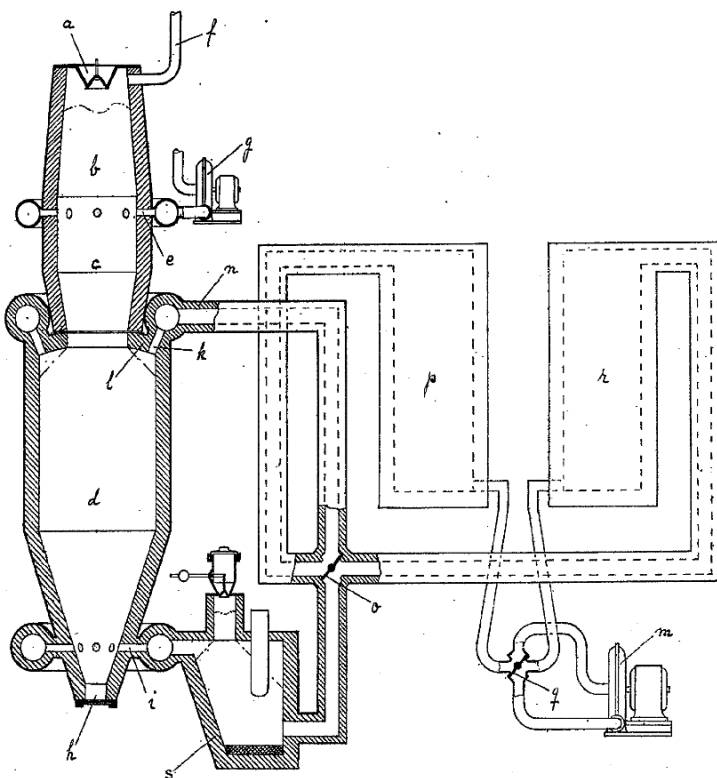
Figur 2.3 Jämviktssystemen Fe-C-O (v) samt Fe-H-O (h) vid 1 atm tryck. Vid 1000 C sker reduktion från magnetit till wüstit vid en CO-halt av minst 20% och från wüstit till järn vid minst 70%. För vätgas är motsvarande värden 10% respektive 63%. Figurerna hämtade från Edström et al 1981.

Idag används den energirika avgasen som lämnar reduktionsprocesserna ofta som bränsle eller befrias från koldioxidkomponenten och återcirkuleras. Masugnsprocessen använder toppgasen för bland annat blästerförvärmning, Midrex för att reformera och värma ingående naturgas och Hyl/Energiron använder

en del av toppgasen för att värma ingående naturgas medan en del renas från koldioxid och recirkuleras. Vid regenerering av toppgas så kyles gasen så vatten avgår varefter koldioxiden binds vid ett reagens i en skrubber och avskiljs.

Martin Wiberg, sedermera professor på KTH, föreslog i sitt examensarbete en process där endast så mycket toppgas som behövdes för reduktion av magnetit och hematit lämnades kvar i övre delen av schaktet medan resten togs ut i mitten av schaktet och kolades upp i en separat karburator. Figur 2.4 visar den skiss som ingår i Wibergs svenska patent. Ett flertal ugnar uppfördes i Sverige vilka försåg skrotbaserade verk med ren järnråvara.

Processen var mycket energieffektiv med högt gasutnyttjande och Wiberg menade att även andra gastyper skulle kunna komma ifråga som t ex generatorgas.

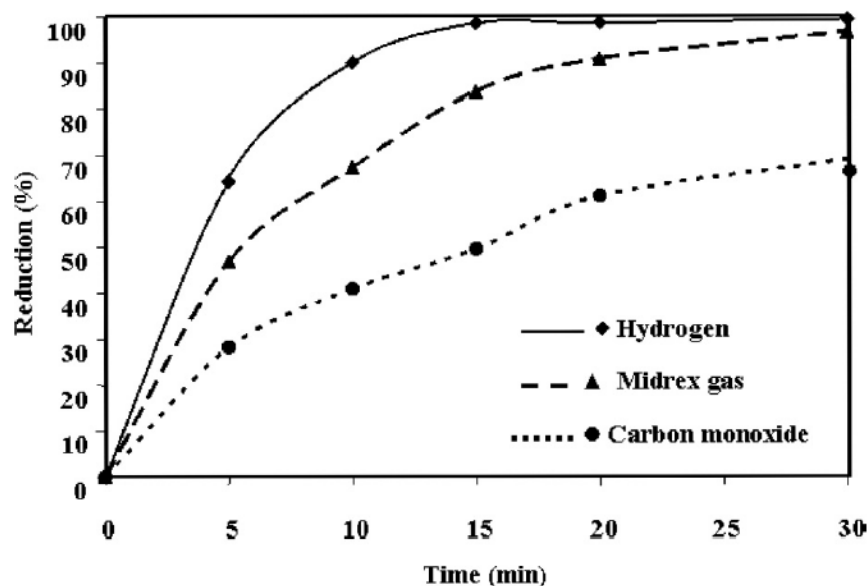


Figur 2.4 Wibergprocessen [Wiberg 1918]

2.4 Reaktionshastighet

Reaktionshastigheten vid järnreduktion beror av ett flertal faktorer som malmegenskaper, temperatur och gasblandning.

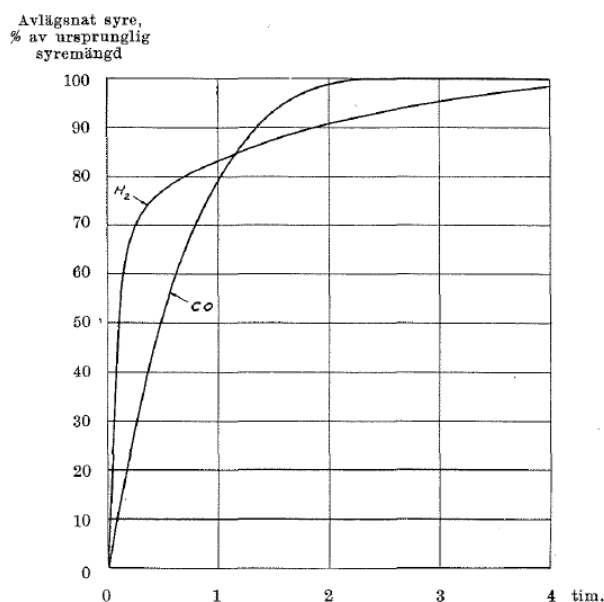
Bonalde et al. studerade reduktion av hematitpellets vid 850°C med 2 l/min av H₂, CO respektive en



gasblandning av 55.7% H₂, 34% CO, 6.3% CO₂ och 4% CH₄ vilket kan motsvara MIDREX-processen. Som framgår av figur 2.5 så är reduktion med CO långsammare än reduktion med H₂ och blandgasen ligger strax under den för H₂. I detta försök så uppnår man full metallisering på 30 minuter med H₂.

Figur 2.5 Reduktion av hematitpellets med H₂, CO och reformerad CH₄ typ MIDREX. [Bonalde et al.]

Den här observationen kan jämföras med en studie av Wiberg 1940 som gjorde försök med kuber om



8 mm med reduktionstemperaturen 1000°C. Detta skulle kunna motsvara reduktion av styckemalm. Wiberg fann att reduktion med H₂ sker snabbare än reduktion med CO upp tills ungefär 70% av malmens syre avlägsnats vilket framgår av figur 2.6.

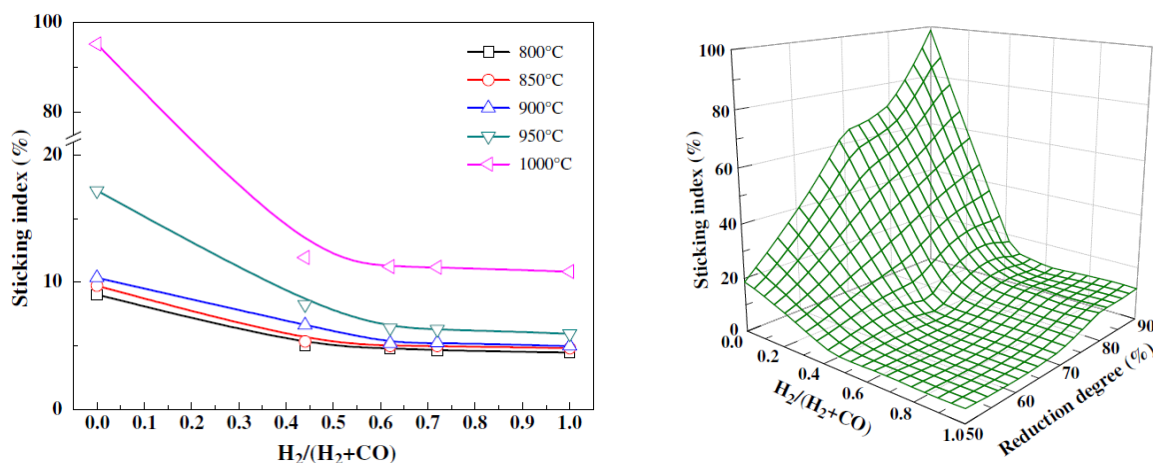
Wiberg konstaterar vidare att en optimal blandning för en hög reaktions-hastighet är 75% CO och 25% H₂ vilket ger fullständig reduktion på 1 ½ timme medan det tar 2 timmar med CO och mer än 4 med ren H₂. Förklaringen till skillnaden mellan H₂ och CO anges av Edström vara reaktioner med kol som skapar gasexpansion vilket bryter upp materialet och gör det åtkomligt för diffusion.

Figur 2.6 Reduktion av 8 mm kuber av hematitmalm, Kiruna A vid 1000°C.

Vattengasreaktionen där CO₂ kan återreducera vattenånga till vätgas har studerats av Kolbinsen vid NTU som menar att det kan finnas anledning att förfinas den experimentella tekniken och studera samverkan mellan CO/CO₂ och H₂ med utrustning som kan efterlikna schaktugnsprocessens olika zoner. [Kolbinsen 2024]

2.5 Det reducerade materialets ytegenskaper och reaktivitet

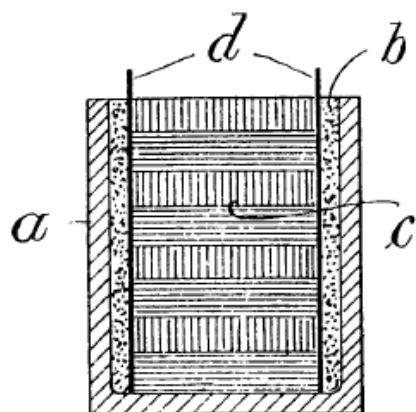
När syret tas bort ur malmen skapas en svampformig struktur där det vid höga metalliseringsgrader lätt bildas bryggor mellan malmkorn som gör att de fäster vid varandra. Detta kladdningsfenomen, som på engelska kallas sticking, tilltar med ökande temperatur och efter c:a 50% CO även med ökande CO-halt vilket framgår av [figur 2.7](#) som hämtats från en studie av Yi et al 2013.



Figur 2.7. Inverkan på kladdning av temperatur och H_2/CO -förhållande (till vänster) och av reduktionsgrad och H_2/CO -förhållande (till höger).

Ett sätt att minska kladdningen är att i direktreduktionsanläggningar ytbelägga (engelska to coat) pellets i en cementslurry med ett par kg cement per ton pellets vilket försvårar att bryggor bildas mellan kulorna. Som framgår av den högra figuren så ökar kladdningstendensen med ökande reduktionsgrad vilket gör att man i processalternativ där kladdning varit ett problem har avbrutit reduktionen vid en lägre reduktionsgrad och gjort slutreduktionen i flytande fas. Detta var t ex idén i Elred som nämns ovan.

Ett intressant sätt att lösa kladdningsproblemet visas i [figur 2.8](#) för reduktion av malm med fast kol vilket enligt ovan torde vara problematiskt. Det är den metod som Sieurin tog patent på 1911 och som



innebar att man la ett lager av krossat keramiskt material (b) mellan reduktionsgodset (c) och ugnsväggen (a). Konsten var att ha ett metallrör (d) som höll isär materialen under chargeringen och som sedan kunde lyftas bort utan att lagerstrukturen skadades. Reduktionsgodset kunde sen kladda ihop (sintra) utan att det hindrade att man tömde ugnen på det reducerade materialet. Processen är fortfarande i drift i Höganäs.

Metoden att undvika kladdning genom att lägga ett lager av ett material som inte skadar chargen och inte fäster i anläggningen förekommer även i andra sammanhang som t ex att lägga ett lager redan bränd pellets på som underlag för obrända pellets vid bandsintring.

Figur 2.8 Sieurins metod att undvika kladdning.

Nyreducerad järnsvamp har en stor specifik yta med rent järn och en hög reaktivitet, d v s benägenhet att reagera med i första hand syre. För att den inte skall återoxidera kan man kompaktera den till briketter, så kallad HBI som står för Hot Briquetted Iron, transportera den varm i skyddsgasatmosfär till nästa processteg, så kallad varm DRI eller HDRI eller kyla den kontrollerat i atmosfär som inte är oxiderande för att bli kall DRI eller CDRI.

2.6 Diskussion

Järnreduktion är bland de mest studerade metallurgiska reaktionerna och idag kan man med databaser och beräkningsprogram skapa värme- och massbalanser som väl beskriver en enskild process i sin helhet eller indelad i reaktionszoner eller celler. Vad som är svårt är att beräkna inverkan av variationer som t ex fluktuerande råvaruanalys, kanalbildning i en packad bädd, infodringsslitage, mekaniskt slitage och olika typer av kladdningsfenomen eller reaktioner med infodring eller andra delar av processutrustningen vilka alla helt kan förändra uppträdandet i en metallurgisk process. Det är därför viktigt med transparens i offentligt finansierade projekt så att vi tidigt får erfarenheter från pilotförsök och tidiga fullskaleinvesteringar på ett sätt så att resurser för omställningen kan allokeras optimalt.

2.7 Referenser

- Ban 1973 Ban T.E., Direct Electric Smelting of Hot Prereduced Iron Ore, Proceedings of the 46th Annual Meeting, Minnesota Section AIME and 34th Annual Mining Symposium of University of Minnesota. 1973, pp. 95-102.
Referenced by: Moore J.J. An Examination of the New Direct Smelting Processes for Iron and Steelmaking, Journal of metals, June 1982.
- Bonalde et al 2005 Bonalde A., Henriquez A., Manrique M., Kinetic Analysis of the Iron Oxide Reduction Using Hydrogen- Carbon Monoxide Mixtures as Reducing Agent, ISIJ International, Vol 45 (2005) No 9, pp. 1255-1260
- Edström et al 1981 Edström J.O., Engelbert T., Selin R., Werme A., Wijk O. Stålförframställning ur fosforrik järnmalm, Styrelsen för teknisk utveckling, STU, information 256–1981.
- Kolbinsen 2024 Samtal vid SAM18 i Jönköping 2024.
- Leffler et al 1911 Leffler J. A., Odelberg E., Nyström E., Redogörelse för Jernkontorets försöksverk i Trollhättan, Jernkontorets Annaler 2011.
- Sieurin 1912 Förfaringssätt vid reduktion av malm medelst fast kolhaltigt ämne. Svenskt patent 33585.
- Sun et al 2020 Sun G., Li B., Guo H., Yang W., Li S., Guo J., Thermodynamic Study on Reduction of Iron Oxides by $H_2 + CO + CH_4 + N_2$ Mixture at 900 C, Energies 2020, 13, 5053; doi:10.3390/en13195053
- Wiberg 1940 Martin Wiberg, Om reduktion av järnmalm med koloxid, väte och metan, Jernkontorets Annaler, Årg. 124. H. 5. 1940.
- Wiberg 1918 Förfaringssätt och ugn för reduktion av malmer och dylikt. Svenskt patent 46507
- Yi 2013 Yi L., Huang Z., Jiang T., Sticking of iron ore pellets during reduction with hydrogen and carbon monoxide mixtures: Behavior and mechanism, Powder Technology 235 (2013) 1001-1007

3. Processer för stålproduktion från malm

3.1 Från malm och reduktionsmedel till järn

Av världens stålproduktion 2022 med 1888 Mton kom 72% från syrgaskonvertrar och 28% från elektriska ugnar. Malmproduktionen var 2456 Mton och smältreduktionslinjen med produktion av råjärn, huvudsakligen i masugn, producerade 1301 Mton råjärn medan direktreduktionslinjen producerade 126 Mton järnsvamp. För EU, Storbritannien och Turkiet var stålproduktionen för de tre områdena 153 Mton, 7 Mton respektive 40 Mton medan den procentuella fördelningen mellan konverter och elektrisk ugn var 56/44, 82/18 respektive 28/72. Råjärnsproduktionen var 71 Mton, 5 Mton respektive 9 Mton medan direktreduktionen av järnmalm till järnsvamp för ståltillverkning var obetydlig [worldsteel 2024].

Naturgasbaserad direktreduktion står för ungefär 80% och kolbaserad direktreduktion står för resterande 20% av järnsvampsproduktionen [MIDREX 2023]. Som riktmärken för CO₂-emissioner per ton stål för linjerna kan man ange 2,4 ton för masugnslinjen, 1 ton för gasbaserad direktreduktionslinje, 2,7 ton för kolbaserad direktreduktionslinje och 0,6 ton för skrotbaserad stålframställning.

Historiskt har styckemalm varit den huvudsakliga råvaran vid järnframställning men den har minskat i betydelse på grund av minskade reserver av lämplig råvara och ökade krav på låga kiselhalter i processerna. Den huvudsakliga malmråvaran för världens masugnar är idag sinter vilken tillverkas från sinterfines med inblandning av basiska och sura slaggbildare, restprodukter som till exempel stoft samt bränsle som till exempel koksgrus. Fördelar med sinter är förutom goda reduktions- och smältegenskaper att den produceras lokalt vid verket och kan optimeras för den lokala energi och råvarusituationen. En nackdel är att sinterverk ofta utgör en stor utsläppskälla för föroreningar som till exempel stoft. Pellets som är den andra stora malmråvaran och som används för både råjärnsprocesser och järnsvampsprocesser tillverkas av malmkoncentrat som på grund av långt driven malning och anrikning inte lämpar sig för sintring. Pelletsverk kan ligga vid ett integrerat stålverk men är lika ofta eller oftare lokaliserade i anslutning till gruva och anrikningsverk eller vid logistiska knutpunkter. Pellets har generellt en lägre halt av gångart än sinter och ger en lägre slaggmängd i efterföljande smältsteg.

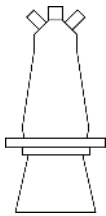
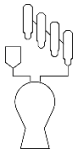
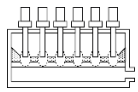
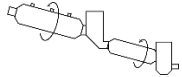
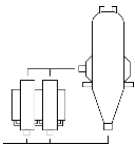
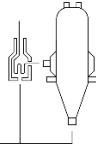
Masugnsprocessen har historiskt sett varit fossilfri då den utnyttjade träkol som reduktionsmedel. Koks började successivt ersätta träkol i större skala först vid mitten av 1800-talet då en torrdestillationsprocess för stenkolk, koksningsprocessen, som uppfunnits under 1700-talet togs i allmänt bruk. I denna tas flyktiga ämnen bort och lämnar en porös kolprodukt med hög hållfasthet och anpassad reaktivitet. Enklare kol som ångkol kan användas som reduktionsmedel i masugnen som injektkol eller i processer där koksens hållfasthet inte behövs.

Anläggningar för agglomerering som sinterverk, pelletsverk och koksverk är kapitalintensiva och som nämdes i inledningen har många utvecklingsprojekt syftat till att ta fram processer där agglomerering inte varit nödvändig. Trots decennier av utveckling så är de huvudsakliga insatsvarorna i reduktionsprocesser sinter respektive pellets och för masugnen är det huvudsakliga reduktionsmedlet koks.

3.2 Dagens reduktionsprocesser för järnmalm

De reduktionsprocesser som idag är i drift, eller varit det under det senaste decenniet, visas i [tabell 3.1](#). Det finns i huvudsak fyra råjärnsprocesser där masugnsprocessen är den klart dominerande och de nyare processerna Corex och Finex vilka löst delar eller hela problematiken med agglomerering av malm och kol men som ännu inte slagit igenom i större skala. Tackjärnsugnar för smältning och slutreducering av järnsvamp bör även de nämnas bland smältreduktionsprocesserna då de efter en lång tids tillbakagång åter anses ha en plats, nu för att från järnsvamp skapa ett råjärn lämpligt för ståltillverkning i konverter och för att likt masugnen kunna skilja av gångartsämnen i sämre malm med endast små järnförluster. Järnsvampsprocesser kan vara kolbaserade eller gasbaserade. Av de kolbaserade är olika typer av rullugnsprocesser de vanligast förekommande och av de gasbaserade är MIDREX dominerande följd av HYL/Energiron. Processerna diskuteras i detalj i [kapitel 4](#).

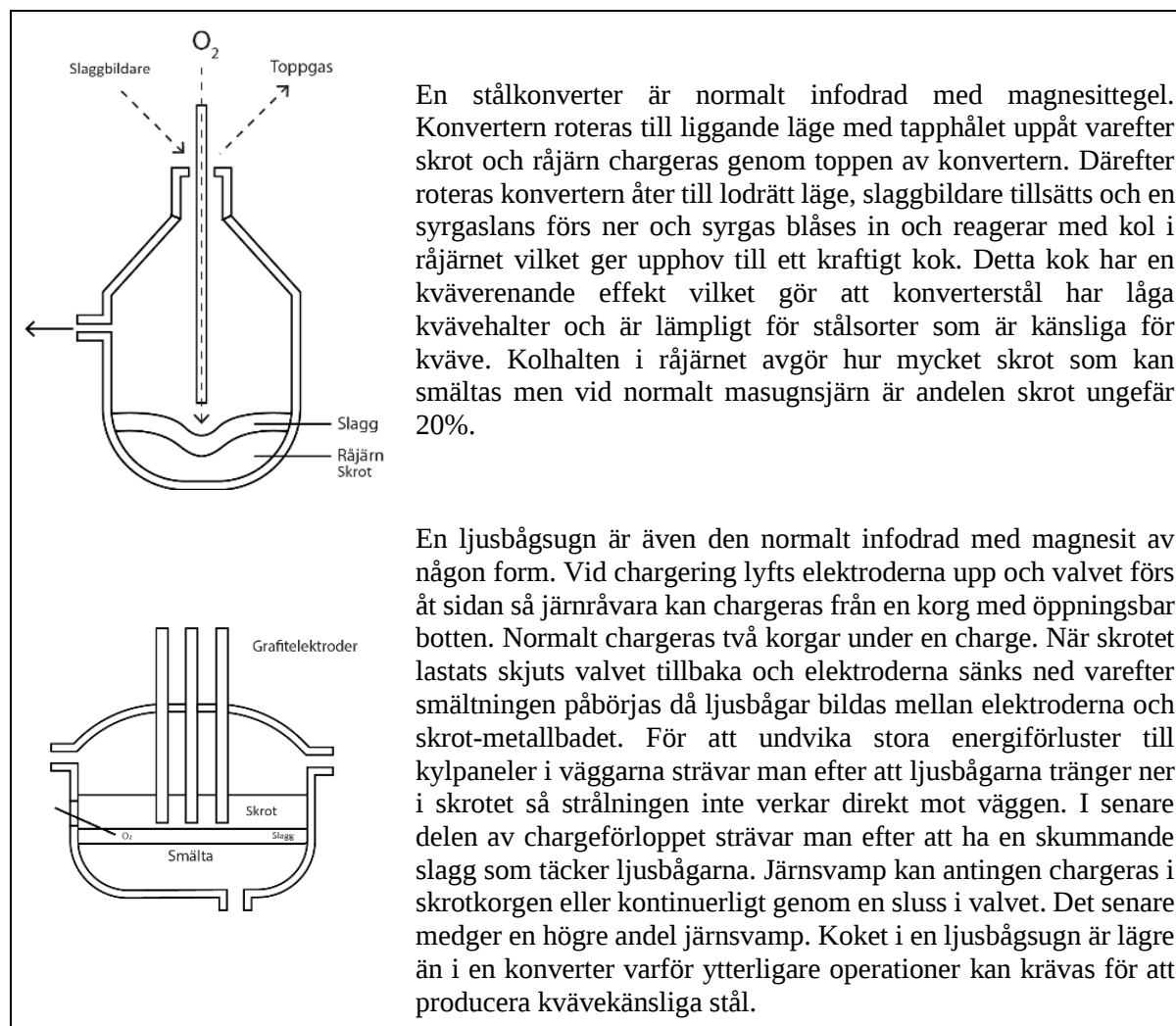
Tabell 3.1 Produktion av järn från järnmalm enligt de processvägar som används idag. Processerna behandlas i detalj i kapitel 4.

Produkt typvärden	Processtyp	Process	Utseende	Malmråvara	Reduktions- medel
Råjärn Flytande T: 1480–1520 C: 4.2% Si: 0.3–0.8%	Schaktugn	Masugn		Sinter, pellets, styckemalm	Koks, kol mm
	Schakt + reaktor	Corex		Pellets, styckemalm	Kolfines
	Fluidbäddar + reaktor	Finex		Fines	Kolfines
	Tackjärnsugn	Six in line		Järnsvamp	Kol
Järnsvamp Fast, i form av DRI eller HBI C: 2–4% Metalliserings- grad (andel Fe som metalliskt järn): 92–94% SiO ₂ :1–5% beroende på råvara	Roterugn	SL/RN		Pellets, styckemalm	Kol
	Karusellugn	Fastmet		Järn/kolpellets	Koks/kol
	Retort	Höganäs		Fines	Koks/kol
	Schaktugn	MIDREX		Pellets	Naturgas
	Trycksatt schaktugn	HYL/ Energiron		Pellets	Naturgas
	Fluidiserade bäddar	Finmet		Fines	Naturgas

3.3 Från järn till stål

3.3.1 Konverter och ljusbågsugn

Råjärn blir till stål normalt i en stålkonverter tillsammans med c:a 20% skrot medan järnsvamp normalt smälts i en ljusbågsugn tillsammans med 20-80% skrot. Principerna för en stålkonverter och en ljusbågsugn visas i figur 3.1. I båda processerna sänks badets kolhalt genom att syre blåses in, så kallad färskning.



Figur 3.1 Principen för en stålkonverter (överst) och en ljusbågsugn (nederst). Skillnaderna i metallurgiska egenskaper förklarar varför vissa företag överväger att behålla sin konverterprocess och ersätta masugnen med en direktreduktionsugn följt av en elektrisk tackjärnsugn. Det finns andra typer av elektriska ugnar men de har en sämre förmåga att utnyttja järnsvamp och utelämnas därför.

3.3.2 Kisel i råjärn och gångartselement i järnsvamp

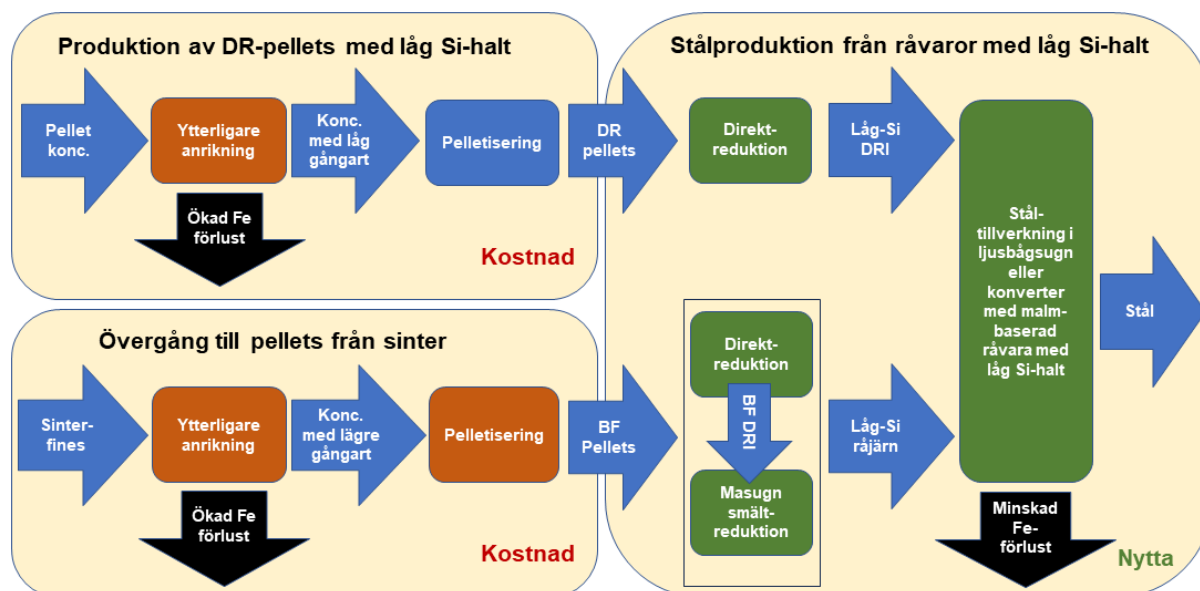
Råjärnsprocesser har som produkt ett flytande råjärn med för masugnsprocessen en temperatur kring 1500 C med 4.2% kol som riktvärde. Huvuddelen av den gångart som finns i malmen som de sura oxiderna SiO_2 , Al_2O_3 och TiO_2 och de basiska CaO och MgO samt tillsatta slaggbildare och askan från ingående koks, kol och andra råvaror går till den slagg som bildas i processen. Hur mycket av råvarornas kisel som löses in i råjärnet beror på komplexa samband men modern masugnsdrift ger ett råjärn med 0.3-0.8% Si. Ett indikativt tal är att cirka 20% av ingående kisel löses in. De reducerande betingelserna i processen gör att förluster av järn till slagg är mycket låga och FeO-halten i en masugnsslagg ligger kring 0.3%. Samma förhållanden kan anses gälla för övriga smältreduktionsprocesser ovan förutom elektrotackjärnsugnar där kolhalter kring 2% diskuteras.

I den efterföljande konverterprocessen färskas järnet till stål med syrgas varvid kolhalten sänks till nivåer oftast under 0.8% och inte sällan ned till 0.05% eller lägre. Vid dessa nivåer kan jämviktshalten för FeO i konverterslaggen ligga i intervallet 20-40%. Då i princip all kisel i råjärnet går till slaggen så innebär detta att en låg kiselhalt i råjärnet ger låga slaggmängder och därmed låga järnförluster.

Till skillnad från råjärnsprocesser så ger direktreduktionsprocesser en fast produkt, järnsvamp, där alla gångartselement från malmen är kvar. Om järnsvampen smälts i en efterföljande ljusbågsugnsprocess under oxiderande förhållanden bildas på samma sätt som i stålkonvertern en slagga med hög FeO-halt. För att undvika stora slaggmängder med höga järnförluster bör halten av sura gångartsoxider i järnsvampen hållas så låg som möjligt. Detta är endast möjligt med en malmråvara av mycket hög renhet.

Som framgår av resonemanget ovan så har malmråvarans renhet stor betydelse för processekonomin i ståltillverkningssteget. Gångartshalten, vilket ofta förenklas till halten av kisel (Si) kan för vissa malmer där gångarten ligger i separata korn minskas genom att malmen mals till finare fraktioner varefter kiselrika korn avskiljes. Med dessa följer i allmänhet en del järn så operationen innebär förluster. Således måste förlusten av järn i malmberedningsskedet vägas mot förluster av järn vid ståltillverkningen. Då det ofta rör olika företag så är det här viktigt att ha ett långsiktigt väl fungerande system med kvalitetspremier som gör att malmföretagen väljer att investera i ökad anrikning.

Hur stor del av den globala malmbasen som kan anrikas till masugns pellets (BF-pellets) med låg kiselhalt, dvs runt 2% SiO₂ eller till pellets för direktreduktion och smältning i ljusbågsugn (DR-pellets) med en kiselhalt runt 1% SiO₂ är oklart. Högre priser på rena malmprodukter kan motivera större järnförluster och möjliggöra att nya gruvor med högvärdig malm öppnas även om förhållandena i övrigt inte är optimala. I [figur 3.2](#) visas fallen där malm för direktreduktion anrikas vidare (övre fallet) respektive malm ursprungligen avsett för sinter anrikas ytterligare och pelletiseras för användning direkt i masugn eller för direktreduktion och senare smältreduktion.



Figur 3.2 Kostnader och nytta med anrikning och agglomerering av järnmalm. Till vänster ses operationer som utförs av malmföretag. I det övre fallet ger lägre halt av kisel i malmen lägre järnförluster i ljusbågsugnen. I det nedre fallet ger lägre mängd kisel i masugnsbeskickningen en lägre kiselhalt i råjärnet och därmed lägre järnförluster i konvertern. Kisels inreduktion i masugnens råjärn är emellertid en komplex process och inte nödvändigtvis linjär. Efter [Gyllenram et al 2021].

3.3.3 Kol i järnsvamp

Järnsvamp från fast kol och naturgas löser in en viss mängd kol som bildar järnkarbid enligt kapitel 2.2. Hur mycket kol som är optimalt beror dels på metalliseringsgraden och dels på om den skall smältas i en ljusbågsugn eller i en elektrotackjärnsugn. En normal kolhalt för gasbaserad DRI är 2-3% vid metalliseringsgraden 92-94% vilket normalt är mer än tillräckligt för att reducera resterande järnoxid. Fördelen med att ha kolet i järnsvampen i stället för att blåsa in den som kolpulver i smältan är att det redan är inlöst i järnet och reagerar med järnoxiden i smält form med korta diffusionsavstånd. Den bildade koldioxiden bidrar till ”koket” och kvävereningen. En järnsvamp som skall smältas i en elektrotackjärnsugn och skall ge ett råjärn med en kolhalt kring 2% bör rimligen ha en väsentligt högre kolhalt.

[Hornby & Brooks 2021] ger en god överblick över förutsättningarna för smältning av järnsvamp och behandlar bland annat järnsvamp utan kol vilket blir produkten vid direktreduktion med vätgas utan efterföljande uppkolning. Medan utbytet för kol i järnsvamp som reagerar med inlöst syre i metall och slag är 95% så ligger utbytet från kol som är chargerat eller injicerat, och som först skall lösas in i metall och slag innan det kan reagera med inlöst syre, mellan 24% och 76%.

3.4 Diskussion

Dagens stålprocesser har optimerats efter andra förutsättningar än de som troligen kommer råda framöver. Konverterprocesserna har kunnat smälta ungefär 20% skrot med ett råjärn kring 4.2% C. I en framtid när kolhalten i råjärn från en elektrotackjärnsugn ligger kring 2% så kommer skrot-smältningskapaciteten halveras. Det innebär att man kommer kunna dubblera halterna av spårämnen i kylskrot jämfört med dagens krav förutsatt att effekterna från ett lägre kolkok inte inverkar.

Ljusbågsugnar har under de senaste 50 åren utvecklats till att få upp till 50% av energimängden från fossila bränslen och resten från el. En förändrad kostnadsbild när det gäller utsläpp av CO₂ respektive alternativa kolkällor kan leda till andra typer av praxis och annan typ av ugnsdesign.

Det gäller således nu mer än någonsin att ha ett öppet sinnelag när man skall göra prognoser och utvecklingsplaner.

3.5 Referenser

- | | |
|-------------------------|--|
| Edström et al
1981 | Edström J.O., Engelbert T., Selin R., Werme A., Wijk O. Stålframställning ur fosforrik järnmalm, Styrelsen för teknisk utveckling, STU, information 256–1981. |
| Gyllenram et al
2021 | Gyllenram, R., Arzpeyma, N., Wei, W., Jönsson P.G. Driving investments in ore beneficiation and scrap upgrading to meet an increased demand from the direct reduction-EAF route. <i>Miner Econ</i> 35 , 203–220 (2022). https://doi.org/10.1007/s13563-021-00267-2 |
| Hornby & Brooks
2021 | Hornby S., Brooks G., Impact of Hydrogen DRI on EAF Steelmaking, Direct from MIDREX q2 2021. https://www.midrex.com/tech-article/impact-of-hydrogen-dri-on-eaf-steelmaking/ |
| MIDREX
2023 | 2022 World Direct Reduction Statistics, https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf |
| worldsteel
2024 | Steel Statistical Yearbook 2023, A cross section of steel industry statistics 2013-2022, https://worldsteel.org . |

4. Processernas utvecklingspotential

4.1 Sänkning av utsläpp av växthusgaser från dagens reduktionsprocesser

Dagens fokus på stålindustrins koldioxidutsläpp gör att ett stort antal förslag läggs fram för förändring i existerande processer. I tabell 4.1 listas möjliga förändringar som kan göras genom mer eller mindre stora ingrepp i dagens anläggningar. [Babixh et al. 2015, Roudier et al. 2012, Pardo et al. 2013, Mousa 2019]

Tabell 4.1 Principiella förändringar som leder till lägre CO₂-emissioner i befintliga processer.

Process	Byte av reduktionsmedel / energikälla	Fokus för energieffektivisering	CCS
Masugn	- Förreducering av malm med naturgas, bio-syngas, vätgas eller biokol. - Injektion av naturgas, bio-syngas, vätgas eller biokol. - Byte av koks till biokoks.	- Minskad slaggmängd - Ökat gas-/energiutnyttjande - Cirkulation - Syrgas i stället för luft - Utnyttja spillvärme	1
Corex	Byte till biokoks eller biokol	- Minskad slaggmängd - Utnyttja spillvärme	
Finex			
Six in line	- Byte till biokoks eller biokol - Söderbergselektroder av biogent material	- Chargering där materialet döljer väggarna för ljusbågen - Utnyttja spillvärme	
SL/RN	- Byte till biokoks eller biokol - Bio-syngas, vätgas eller biokol som värmekälla	- Minskad slaggmängd - Ökat gasutnyttjande - Syrgas i stället för luft - Utnyttja spillvärme	
Fastmet		Uppskalning	
Höganäs		Utnyttja spillvärme	
MIDREX	- Vätgas eller bio-syngas - Uppkolning med biogas	Minskad slaggmängd	2
HYL / Energiron			3
Finmet			

Infångning av CO₂ kan ske ur avgaser som även innehåller kväve men det är fördelaktigt om avgasen är nära kvävefri då kväve ökar kostnaden för avskiljning av ren CO₂. Linde rapporterar att man med sin teknik HISORP® avskiljer CO₂ i processerna COREX/MIDREX, COREX, Finex och Hyl. [Linde 2024]

- 1) Avgas från kolbaserade processer som normal masugns gas innehåller stora mängder kväve. Syrgasmasugn med cirkulerande toppgas ger en toppgas med låga halter kväve.
- 2) MIDREX recirkulerar en del toppgas utan att ta bort CO₂ och förbränner resterande del med luft för att reformera naturgasen till syngas. Denna avgas innehåller kväve.
- 3) HYL/Energiron separerar CO₂ ur cirka 50% av genererad toppgas vilken idag kan gå till CCS. Övrig toppgas förbränns med luft för gasförvärmning och innehåller därmed kväve. Om förvärmningen sker genom förbränning med syre eller om gasförvärmning sker med el minskar kostnaderna för CCS.

För de flesta av punkterna i tabell 4.1 finns viktiga begränsningar.

1. Minskning av slaggmängd i reduktionsprocessen genom övergång från sinter till pellets i masugnsprocessen kräver en kraftigt ökad pelletskapacitet i världen.
2. En minskad slaggmängd i övriga processer kräver en ökad anrikning av malmråvara vilket kan ge upphov till stora järnförluster till anrikningsrester om anrikning alls är möjlig.
3. Masugnsprocessen behöver en viss mängd höghållfast koks för att fungera vilket begränsar möjligheterna till byte av reduktionsmedel.
4. Produktion av bio-syngas, bio-koks och bio-kol kräver tillgång till biomassa.
5. Produktion av vätgas kräver tillgång till stora mängder fossilfri el.
6. Möjligheterna till en framgångsrik CCS beror på hur ren CO₂ som kan separeras. Kväve och svavelföreningar fördyrar processen.

Som framgår av resonemanget ovan så är råjärnsprocesser mindre beroende av malmråvarans halt av gångarter då processlinjen innehåller två steg där det bildas en slag. Då det första är under reducerande betingelser och med ett förhållande CaO/SiO₂ nära 1 medger det borttagning av kisel och andra sura oxider med låg kalkförbrukning och låga järnförluster.

Den lösning för järnsvamp från pellets med hög kiselhalt som föreslås är ett extra smältsteg under reducerande betingelser. En högkolhaltig järnsvamp smälts då i en elektrisk ugn, i sammanställningen representerad av en "six in line" elektrotackjärnsugn, för att skapa ett råjärn lämpligt för en traditionell konverter. Detta förfarande är trots att ugnstypen är väl etablerad dock ännu på försöksstadiet för denna typ av järnsvamp och elektrotackjärnsprocessen är under utveckling.

Som framhölls i kapitel 2 så sker reduktion av FeO till Fe vid en högre halt av CO respektive H₂ än reduktion av Fe₃O₄ till FeO vilket gör att man i masugnsprocessen får en toppgas med ett gasutnyttjande, etaCO, beräknat som CO₂/(CO₂+CO) kring 50%. Detta tillsammans med behovet av att agglomerera råvarorna för masugnen har varit drivande för att ta fram förslag till nya råjärnsprocesser.

De flesta av de förslag som kommit fram genom åren har haft det gemensamt att man delat upp processen i två steg där man i ett första steg reducerar pellets eller slig till en lämplig metalliseringsgrad i ett schakt eller en fluidbädd och sedan genomför slutreduktion i en smältreaktor med eller utan tillförsel av elenergi. De nya råjärnsprocesser som nått kommersiell drift är Corex och Finex vilka bygger på förreduktion i ett schakt eller fluidbäddar och slutreduktion i en kolförgasningsreaktor.

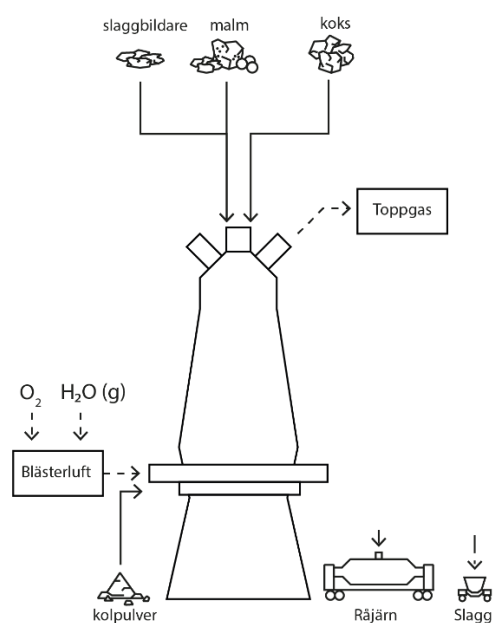
Gemensamt för de fyra smältreduktionsprocesserna i sammanställningen är ett kolrikt råjärn för vidare behandling i en syrgaskonverter medan järnsvamp kan förädlas vidare på ett flertal sätt men där ljusbågsugnen är den i dag förhärskande processen.

4.2. Masugnsprocessen

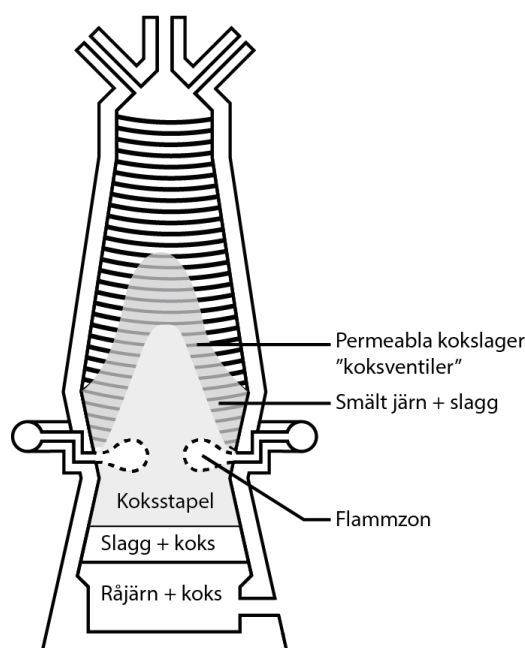
4.2.1 Principer

En masugn består huvudsakligen av ett motströmsschakt där malmråvara och fasta tillsatser chargeras i lager varvat med lager av koks genom en sluss i ugnens övre del. Varm blästerluft, syrgas och ånga blåses in genom formor i ugnens nedre del. I formorna injiceras olika former av reduktionsmedel som kolpulver, plast, gummi, olja eller naturgas genom lansar.

Blästerluft, syre och ånga reagerar med koks i ugnens nedre del samt med de injicerade reduktionsmedlen till en reduktionsgas bestående av CO och H₂ vilken stiger upp i schaktet. De huvudsakliga materialen visas i [figur 4.1a](#). Jämviktsförhållandena vid järnmalsreduktion gör att den utgående toppgasen består av en blandning av CO₂, CO, H₂ och vattenånga tillsammans med kväve. Blästerluftens kväve kan ses som en onödig barlast men har stor betydelse för värmeöverföringen från ugnens nedre del till beskickningen i ugnens övre del.



Figur 4.1a Masugnens råmaterial och produkter



Figur 4.1b Masugnens inre struktur

I den smältzon som uppstår i den nedre delen av ugnen är malmlagren svår genomträngliga medan gasen kan passera genom så kallade koksfönster vilket visas i [figur 4.1b](#). Av figuren kan förstås att en viss mängd höghållfast koks är nödvändig för att processen skall fungera. En minsta koksmängd om 250 kg/ton råjärn har antagits vid byte av koks mot kolinjektion [Poveromo 2021]. Denna mängd torde även gälla vid byte till andra metoder för att sänka koksförbrukningen vilka behandlas nedan.

4.2.2 Förändringar av befintlig masugnsdrift

Utöver normala inkrementella processförbättringar i styrning och materialkontroll som ingår i löpande processutveckling så kan utsläpp av CO₂ minskas genom att:

1. Minska behovet av energi genom ny råmaterialstrategi
2. Byta energibärare
3. Öka gasutnyttjandet i processen genom ny processdesign

1. Minskat energibehov

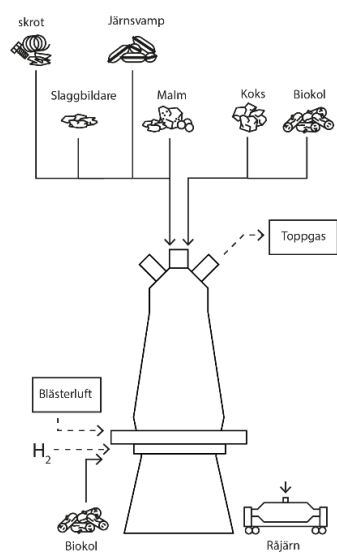
Genom att sänka kiselhalten i sinter eller helt gå över till pellets så kan slaggmängden i masugnen minskas och eventuellt även kiselhalten i råjärnet även om det sambandet är mindre direkt. Hooey et al visar att övergång från sinter till pellets med lägre slaggmängd som följd har stor inverkan på koksförbrukningen [Hooey 2014]. Den fördel som sintern har som mottagare av stoft kan ersättas med kallbundna briketter vilka chargerar med malmen.

2. Fossilfria energislag eller energislag med lägre CO₂-utsläpp

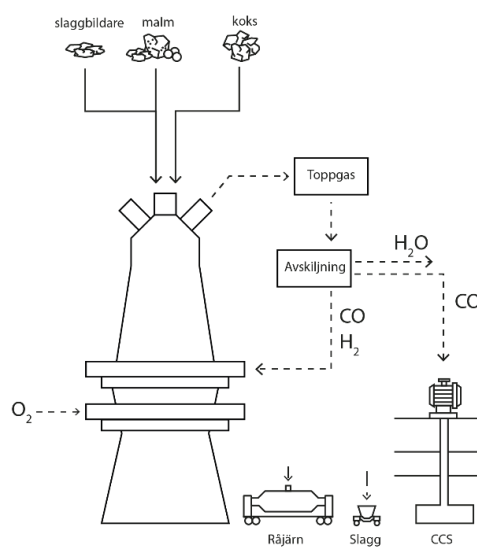
Några möjligheter att ändra energikällorna visas i [figur 4.2a](#).

- Chargerering av biokol tillsammans med malmråvaran i stället för småkoks
- Injektion av bio-syngas eller vätgas i stället för kolinjektion
- Injektion av bio-kol
- Chargerering av skrot eller förreducerat material som t ex järnsvamp

De är alla förhållandevis enkla att genomföra inom ramen för en normal masugnsanläggning och kan ersätta koks ned till den gräns som ges av behovet av koksfönster.



Figur 4.2a Alternativa råvaror



Figur 4.2b Syrgasmasugn med CCS

3. Öka gasutnyttjandet i processen

Genom att utnyttja metoder för kväve- och/eller CO₂-avskiljning, ökning av syrgashalten i blästern och genom injektion av returgas i formor på olika nivåer i masugnen kan ett stort antal processalternativ skapas. Om endast en del kväve i blästerluften byts ut mot syrgas så kan en så kallad balanserad syrgasmasugn uppnås. Kvävet kan dock helt tas bort i en syrgasmasugn med återföring av toppgas som visas i [figur 4.2 b](#). [Zhang et al. 2021] Denna process har utvecklats inom ULCOS-projektet och i denna används syrgas i stället för luft som bläster varvid man undviker energiåtgången för att värma upp kväve. Då kväve i normal ugnsdrift har en viktig uppgift att föra värme från den nedre delen av ugnen till den övre för att värma ingående material så återcirkuleras toppgasen i formor i övre delen av schaktet efter koldioxidavskiljning och förvärmning. Avskild koldioxid är lämplig för vidare hantering och lagring. Processen har testats i LKAB:s försöksmasugn i Luleå med gott resultat.

4.3 Alternativa smältreduktionsprocesser

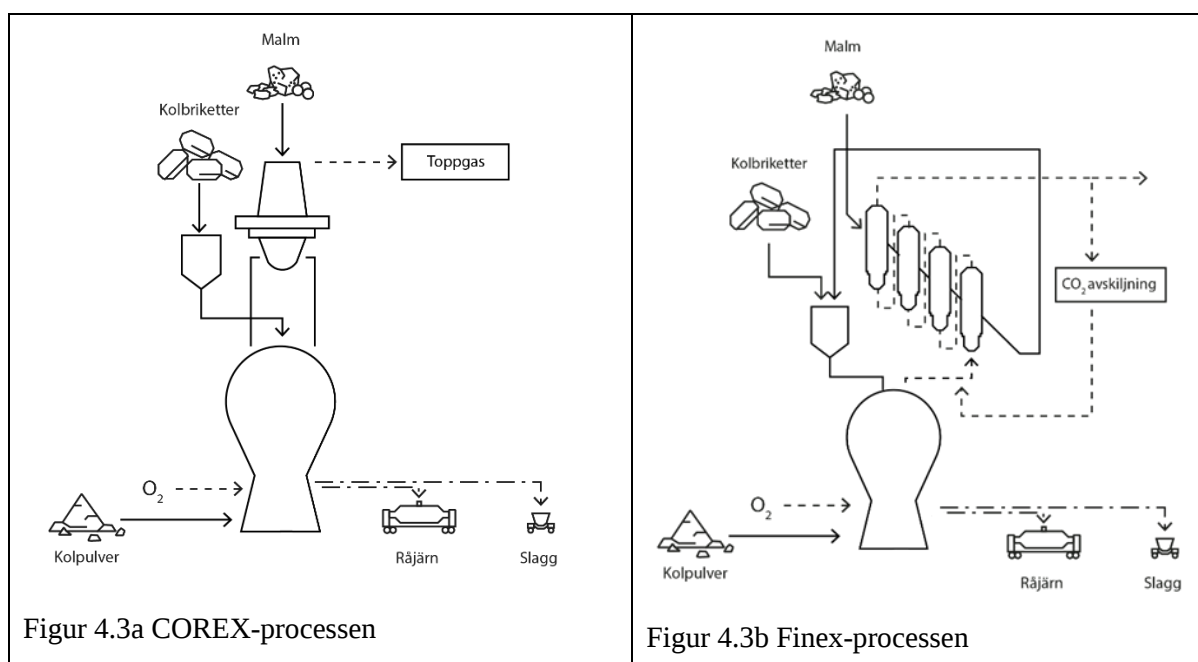
4.3.1 Corex

Corex är en råjärnsprocess som marknadsförs av Primetals och är/har varit i drift eller är under uppförande i:

- Indien: AM/NS India 2xC-2000 (0,8 Mton/år), Jindal South West 2xC-2000 + 1 MIDREX
- Kina: Bayal Steel 1xC-3000 (2,5 Mton/år), Baosteel 1xC-3000
- Sydafrika: ArcelorMittal 1xC-2000 + 1 MIDREX

Processen bygger på förreduktion av pellets eller styckemalm i ett reduktionsschakt och slutreduktion och smältning i en reaktor (eng: Melter Gasifier) som framgår av [figur 4.3a](#). Reduktionsgasen genereras genom injektion av syrgas och kolpulver i reaktorns nedre del och stoft och syrgas högre upp. Gasen förs därefter in genom formor i ett reduktionsschakt där malmråvaran förreduceras till kring 60% metallisering varefter den förs in i övre delen på reaktorn tillsammans med kol eller kolbriketter. [Primetals 2024-1]

Corexprocessen är flexibel när det gäller kolråvaror och ett stort antal varianter finns där den genererade gasen används bland annat som reduktionsgas till järnsvampsproduktion parallellt med råjärnsproduktionen eller går vidare till elproduktion.



4.3.2 Finex

Liksom Corex marknadsförs Finex idag av Primetals och är i drift i POSCO Pohang i Sydkorea

Processen bygger på samma reaktor men i stället för pellets och styckemalm förreducerar den slig i fluidiserade bäddar, som i princip är en Finmet, till en metallisering av 60-85% vilken briketteras innan den förs in i reaktorn vilket visas i [figur 4.3b](#).

Primetals uppger att Finex har en CO₂-emission motsvarande 97% av det globala medelvärdet för masugnar utan CCS och 55% med CCS. [Primetals 2021-2] Det höga värdet med CCS torde bero på att avgasen från kraftverket inte går till CCS. Lite svårt att förstå.

4.4 Järnsvampsprocesser generellt

I rena direktreduktionsprocesser reduceras järnmalm i form av fines, styckemalm eller pellets, till järnsvamp även kallad DRI efter den engelska benämningen "Direct Reduced Iron". Den producerade järnsvampen kan därefter användas i varmt tillstånd HDRI, kylas för lagring och/eller transport, CDRI, eller briketteras till järnsvampsbriketter vilka kallas HBI efter den engelska beteckningen "Hot Briquetted Iron". Som reduktionsgas används normalt en blandning av kolmonoxid, CO och vätgas, H₂, av i normala fall fossilt ursprung i form av naturgas, kol eller olja. Se [kapitel 2](#) för jämförelse mellan gasernas reduktionsegenskaper.

Utveckling av processerna med syfte att minska utsläpp av koldioxid sker enligt två principer: reduktionsgas eller reduktionskol framställs från biomassa vilket ger reduktion enligt liknande förutsättningar som med fossila reduktionsmedel eller reduktionsgas i form av ren vätgas vilken framställs i huvudsak från el. Reduktion med ren vätgas kräver förändringar i processen för att kompensera reduktionsreaktionernas värmeunderskott. En medelväg till det senare alternativet är att stegvis öka andelen vätgas i fossil eller biogen reduktionsgas genom en extra tillsats och en gräns på 90% tillsats av vätgas har nämnts.

Världens DRI produktion var 126 Mton 2022. Störst produktion har Indien, Iran, Ryssland, Mexico och Saudi Arabien som producerar 33.74Mton, 28.52Mton, 8.03Mton, 5.97Mton respektive 5.79Mton. De gasbaserade DR-processerna producerar nästan 74% % av världens DRI. MIDREX står för cirka 60 % av världens DRI-produktion, följt av HYL/Energiron 13%. Rullugnar som SL/RN står för cirka 24%

av världsproduktionen och övriga processer som Fastmet och Höganäsprocessen för resten. Jämförelsen av olika DR-processer visas i Tabell 4.2.

Tabell 4.2 Jämförelsen av DR processer [MIDREX 2019, Sah et al. 2016, Morris 2001]

	Kolbaserade processer		Gasbaserade processer		
Teknik	SL/RN kap 4.5.1	Fastmet kap 4.5.2	MIDREX kap 4.6.1	HYL /Energiron kap 4.6.2	FINMET kap 4.6.3
Leverantör	Lurgi	Kobelco	Primetals MIDREX SMS	Tenova /Danieli	Primetals
Produktion andel i världen	c.a 24%	1 Mton	60.5%	13.2%	-
Ugn	Rullugn	Karusellugn	Schaktugn	Schaktugn högtryck	Fluidiserade bäddar
Järnmalm	Pellet /styckemalm	Fines	Pellet /styckemalm	Pellet /styckemalm	Fines
Reduktionsmedel idag	Kol	Kol	Naturgas	Naturgas	Naturgas
Reduktionsmedel utveckling	(Biokol)	(Biokol)	Biogen gas Vätgas	Biogen gas Vätgas	Biogen gas Vätgas
Produkt	DRI/HBI	DRI/HBI	DRI/HBI	DRI/HBI	HBI
Ugn	Rullugn	Karusellugn	Schaktugn	Schaktugn högtryck	Fluidiserad
Temperatur °C	1000-1100	1250-1350	760-1000	850-1030	690-780
Tryck (kpa)	-	-	30	500	1120
Tryck (bar)	-	-	0,3	5	11.2
Processtider (h)	8-10	0,2	4-6	4-6	6-7
Reformator	Ingen	Ingen	Catalytic H ₂ O+CO ₂	Auto- catalytic steam	Catalytic steam
Gasförhållande H/C	-		3-4	8-19	9-10
Gasutnyttjande (H ₂ +CO)/ (H ₂ O+CO ₂)	-		11-12	11-19	12-14
Metallisering%	92-93	85-92	92-95	92-95	92-93
C%	0.2-0.5	1-6	1-3.5%	0.5-5.5	1-1.5
Malm (t/ tDRI)	1.47		1.42	1.45	1.6
Naturgas (GJ/t DRI)	-		9.4	10-11	15-27
Kol (t/t DRI)	0.8		-	-	-
EI (kWh/t DRI)	60-80		95-115	0-90	250
Vatten (M3/ t DRI)	2-3		1.2-1.5	1.8	2.5

I en gasbaserad DR-process produceras reduktionsgasen genom kemisk reformering av en blandning av naturgas och avgas från ugnen för att producera en gas som är rik på väte (H₂) och kolmonoxid (CO). Kol/oljebaserade processer genererar emellertid den reducerande gasen genom kolförgasning i ugnen och generering av vätgas genom vattengasreaktionen.

Jämfört med de kolbaserade processerna, rapporteras de gasbaserade ha följande fördelar [Sah et al. 2016]:

- Mindre kapitalkostnad: kapitalkostnaden per ton installerad kapacitet för kolbaserade anläggningar är 1.2-2 ggr så höga som för gasbaserade anläggningar.
- Hög produktivitet: Produktiviteten i gasbaserade anläggningar kan vara 11t/m³ medan kolbaserade anläggningar är 0.5-0.9t/m³ i genomsnitt.
- Bättre DRI kvalitet: Kvalitet av DRI produkter speciellt metallisering och kolinnehåll är också högre för gasbaserade anläggningar.

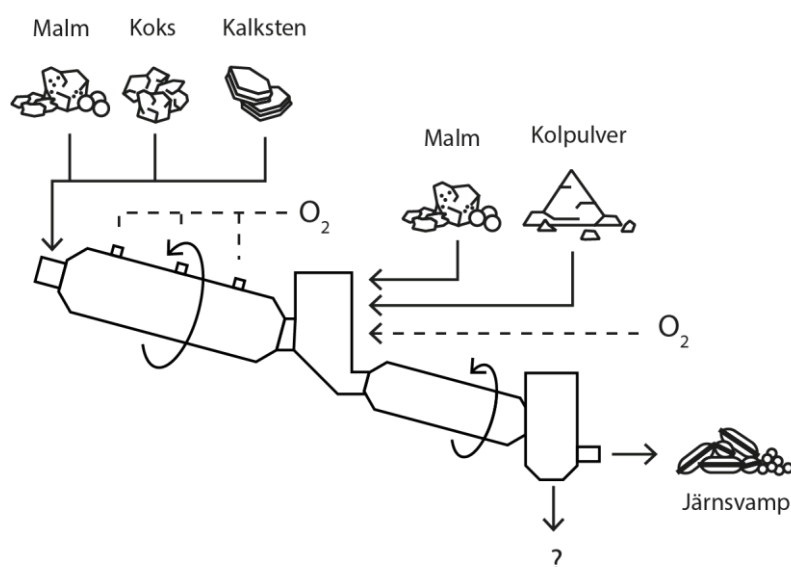
Genom att helt eller delvis byta ut fossilt kol och kolväten som reduktionsmedel mot antingen biogen reduktionsgas, biogent kol eller vätgas så kan mängden CO₂ som emitteras minskas och ett stort antal projekt pågår inom området vilket beskrivs i följande avsnitt.

Genom att utgå från malmfines som i FINMET eller från en enklare kallbunden pellets tillverkad på plats som i Fastmet eller en satsvis ugn, kan tillverkning av brända pellets undvikas. Detta medger både en lägre malmkostnad och lägre miljöbelastning vid malmberedning och utvecklingsprojekt har pågått länge och pågår fortfarande. Trots att de i teorin är fördelaktiga så har de inte vunnit någon större framgång.

4.5 Kolbaserade järnsvampsprocesser

4.5.1 SL/RN

Rullugnsprocesser är de vanligast förekommande kolbaserade direktreduktionsprocesserna. Marknadsledande är SL/RN vilket står för Stelco, Lurgi, Republic Steel, National Lead [Sah et al. 2016]. Järnmalm i form av styckemalm eller pellet chargerats i en roterugn tillsammans med kol som reduktionsmedel och kalksten eller dolomit för att absorbera svavel. Utloppsändan är försedd med en brännare där finfraktioner av malm och kol injiceras med luft som bärgas enligt figur 4.4. Typiska processtider i SL/RN är 10 timmar [DOE 2000]. Ugnen är uppdelad i två processzoner: i förvärmningszonen sker reduktion till Wüstit vid 1000 °C och i reduktionszonen sker slutreduktion till cirka 93 % metallisering 0.1-0.2% kolhalt vid 1000-1100 °C [DOE 2000].



Figur 4.4 SL/RN processen

Installationer av dessa processer är vanliga i länder med tillgång till styckemalm och kol som t ex Indien och Iran.

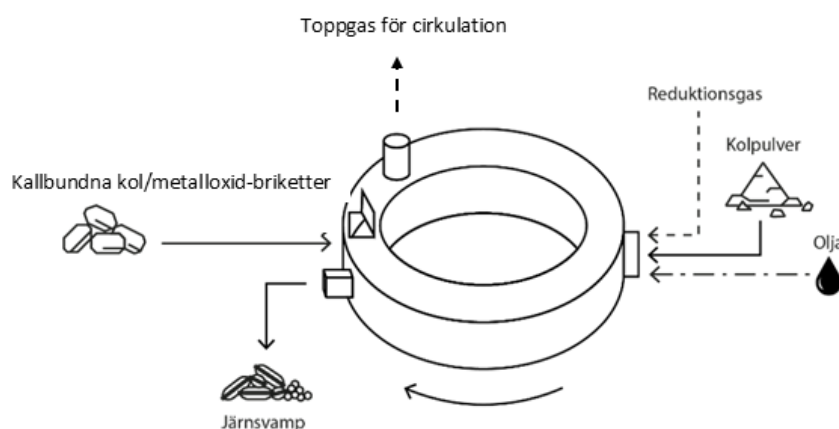
Rullugnsprocesser kan konverteras till fossilfri drift vilket kräver tillgång till biomassa för biokol och biogas samt grön el för drift av anläggningen.

4.5.2 Fastmet

Fastmet är en kontinuerlig process utvecklad och marknadsförd av Kobelco i Japan. Processen som består av en karusellugn eller direktöversatt ”roterande hårdugn” enligt figur 4.5, chargeras med ett eller två lager så kallat kallbundna självreducerande pellets eller briketter. Dessa är tillverkade av en blandning av järnmalmkoncentrat, reduktionsmedel (kol eller koks) och bindemedel eller olika typer av restmaterial.

Chargen värms till 1250 - 1350 °C av gasol/olje-/kolpulver-brännare placerade längs hela ugnen och genomloppstiden är 12 minuter. Toppgasen används efter rening delvis vid pellets/briketttillverkning och recirkuleras delvis med reduktionsgasen. Produkten är pyrofor och måste briketteras direkt. [Nasralla 2001]

Det finns idag 6 installationer av Fastmet enligt företagets hemsida, alla i Japan, och den totala produktionen är 1 Mton/år. Användningen är huvudsakligen för att upparbeta stoft och restprodukter men kan användas för reduktion av järnmalm i liten skala. [Fastmet 2024]



Figur 4.5 Fastmet processen

Fastmet kan konverteras till fossilfri drift vilket kräver tillgång till biomassa för biokol och biogas samt tillgång till grön el.

4.6 Gasbaserade järnsvampsprocesser

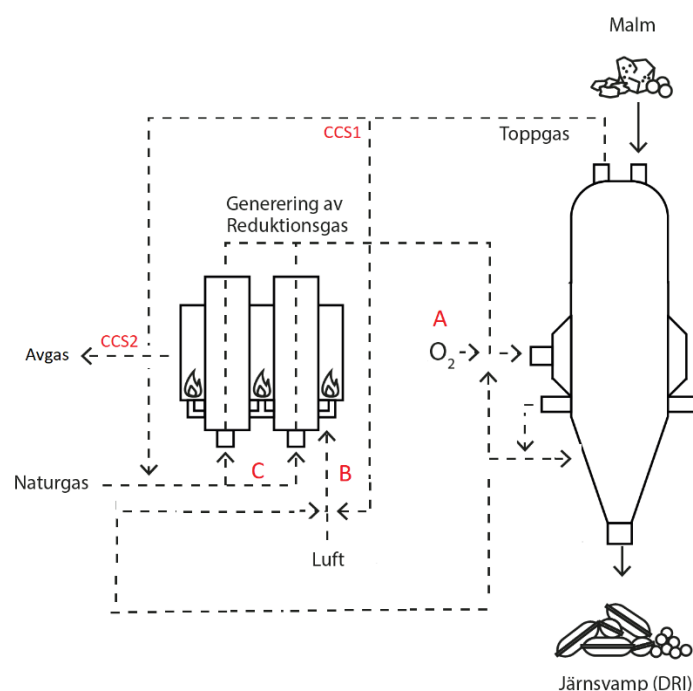
Gasbaserade järnsvampsprocesser som använder naturgas måste först reformera naturgasens metan med vattenånga, koldioxid och/eller syrgas till kolmonoxid och vätgas. Reformering är en energikrävande reaktion vilket framgår av kapitel 2.2 och den behöver dessutom någon form av katalysator. Skillnader mellan de gasbaserade processerna framgår av [tabell 4.2](#).

4.6.1 MIDREX

Den dominerande järnsvampsprocessen MIDREX® vilken marknadsförs av Primetals, SMS och MIDREX, består av ett schakt och anläggningar för gashantering. Processen förekommer i olika utföranden men följer i stort samma grundprincip [MIDREX 2024-1, MIDREX 2024-2] och en variant visas i [figur 3](#).

I MIDREX-processen används nickelkatalysatorer och värmen genereras genom att en del av processens toppgas som efter rening består av CO, CO₂ och H₂, förbränns med luft och ett eventuellt tillskott av naturgas. Resterande toppgas blandas med naturgas och förs i rör genom brännkammaren varvid en varm syngas bildas. Denna blåses tillsammans med mer naturgas och en del syrgas in i schaktet vid en temperatur kring 900 °C och består då till 90–92% av en blandning av H₂ och CO och med en resterande del CO₂, CH₄ och högre kolväten.

MIDREX beskrivs i [figur 4.6](#) där pellets och/eller styckemalm förs in i schaktets överdel via en sluss. Gasen reducerar malmen till DRI med 92–95% metallisering. I undre delen av schaktet kylv järnsvampen till cirka 700 °C och kolas upp till 2–5% C genom ett cirkulerande flöde av CO/CO₂ spetsad med färsk naturgas. Den avgas som lämnar brännkammaren passerar en värmeväxlare där samtliga gaser i systemet utom kylgasen förvärms.



Figur 4.6 Förenklad bild av MIDREX DR-process

Processen kan försees med utrustning för carbon capture på två ställen. Dels omedelbart efter att toppgasen renats, i figuren märkt CCS1, och dels efter värmeväxlaren där avgaserna lämnar genom en skorsten, i figuren märkt CCS2. Många anläggningar är idag förberedda för det första alternativet vilket skulle reducera utsläppen med storleksordningen 50%, men ingen har ännu valt att utnyttja detta. Det andra alternativet är betydligt mer kostsamt då det innebär hantering av en förbränningsgas med stora mängder kväve vilket först måste avlägsnas innan koldioxiden kan separeras.

En befintlig MIDREX-anläggning kan öka mängden vätgas och byta ut upp till 30% av naturgasen mot vätgas utan att några förändringar i anläggningen behöver göras. För nya anläggningar finns idag två varianter för vätgas: MIDREX flex och MIDREX H2. Det första alternativet innebär att man börjar med naturgas och ökar sedan successivt vätgasmängden genom att byta ut naturgas i tre delar av anläggningen märkta med A, B och C i figuren. Allteftersom vätgasmängden ökar minskar gasreformerings roll och anläggningen blir mer av en gasförvärmare. I MIDREX H2 har följaktligen reformeraren bytts ut mot en förvärmningsanläggning och ingen katalysator behövs längre. MIDREX hävdar, baserat på beräkningar och laborietester, att det är möjligt att nå 100% vätgas och att detta ger en högre metalliseringsgrad än med syngas. När vätgashalten ökar så ökar även reduktionsgasens endoterma effekt vilken kan mötas med högre gastemperatur eller högre gasflöde. De förefaller i diskussioner tveksamma att gå till mer än 90% vätgas där det finns naturgas och ser MIDREX H2 som en utmaning.

Förutom naturgas så finns idag MIDREX-verk som utnyttjar andra typer av syngas, t ex toppgas från Corex utan reformering, varför utnyttjande av biogen syngas torde vara i linje med processkonceptet.

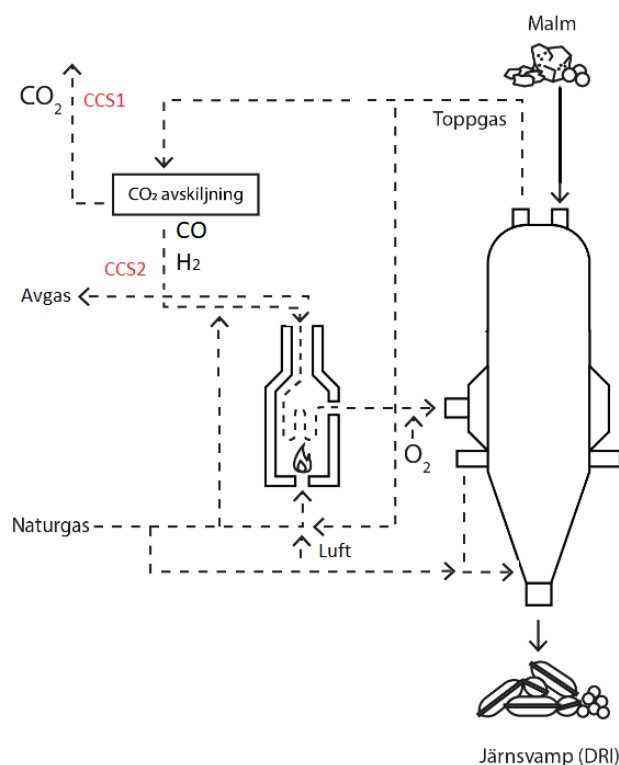
4.6.2 HYL/Energiron

HYL eller Energiron som den även kallas, marknadsförs av Tenova och Danieli och består liksom MIDREX av ett schakt och anläggningar för gashantering enligt figur 4.7. Processerna har likheter men även väsentliga skillnader vilket framgår av tabell 4.2 och figur 4 som är en förenkling efter [Sah et al. 2016] och [DOE 2000]. En uppfattning som framförs är att MIDREX är enklare och mer stabil men har högre CAPEX och OPEX än en HYL/Energiron vilken dock kan vara instabil med lägre tillgänglighet på grund av en mer komplex funktion för reformering.

Schaktet är trycksatt till 500 kPa (5 bar) och pellets och/eller styckemalm förs in genom en sluss i toppen. Reduktionsgas av 900 °C som består av naturgas, vattenånga och O_2 , H_2 , CO och CO_2 blåses in under högt tryck genom formor i mitten på schaktet. Vid det höga trycket katalyserar rent järn, i form av järnsvamp i schaktet, reformeringen av metangasen till H_2 och CO. Toppgasen torkas och passerar en skrubber för CO_2 -avskiljning, innan den blandas ut med naturgas och ånga, värms och slutligen spetsas med syrgas till ny reduktionsgas. Syret är här nödvändigt för att oxidera en del av naturgasens metan till kolmonoxid och tillföra extra värme.

I ett annat flöde blåses en blandning av naturgas och processgas in i botten på ugnen för att kyla och kola upp järnsvampen. Processgas tas ut under nivån där reduktionsgasen blåses in, torkas, blandas ut med naturgas och blåses in i botten igen.

Den CO_2 som tas ut efter rening av toppgasen är färdig för CCUS, vilket görs vid Emirates Steel, medan den gas som används för värmning av processgas innehåller kväve och måste kväverenas först.

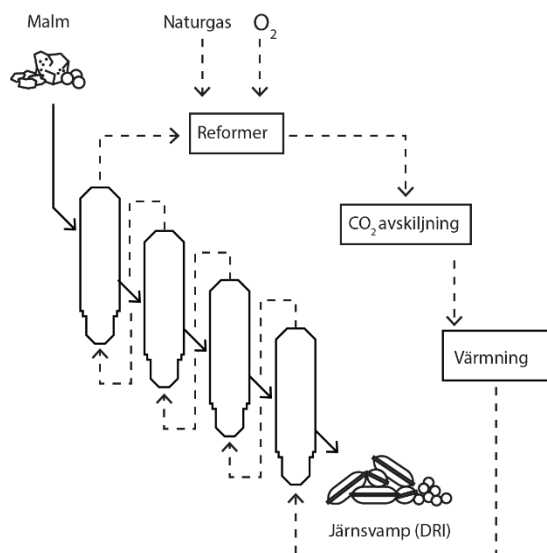


Figur 4.7 Förenklad bild av HYL / Energiron

HYL/Energiron kan enligt leverantörer konverteras till drift med 100% vätgas eller biogas.

4.6.3 FINMET

I Finmet-processen, tidigare kallad Fior och idag marknadsförd av Primetals, reduceras malmfines med reformerad naturgas i en serie med fyra fluidiserade bäddar vilket visas i [figur 4.8](#). Råvaror är järnmalmsfines under 12mm. Malmen förvärms, torkas och reduceras under processen. Reduktion utförs vid en medelhög reduktionstemperatur på 690–780 °C, men vid ett mycket högt tryck på 1120 kPa (11.2 bar). Processen producerar järnsvampsbriketter HBI då reducerade fines är pyrofora, dvs återoxideras lätt.



Finmet har varit i drift vid verken Orinoco Iron Puerto Ordaz, Venezuela (1 Mton/år) och BHP DRI Port Hedland Australien (2 Mton/år). Idag är verken nedlagda på grund av bristande lönsamhet bland annat till följd av underhållskostnader orsakade av det höga arbetstrycket.

Som synes så utgör Finmet försteget till Finex med den skillnaden att man går till en lägre reduktionsgrad före en separat slutreduktion, se [figur 4.3b](#). Förutom att det sänker processtiden så minskar det risken för kladdningsfenomen och troligen behovet av höga tryck.

Finmet är i första hand intressant då processen utgör grunden för utvecklingen av FINEX (se ovan) och de nya vätgasalternativen HYREX och HYFOR (se [kap 5](#)).

Figur 4.8 FINMET process

4.7 Diskussion

Då en så stor del av världens stålproduktion sker i integrerade verk med kokswerk, sinterverk, masugn och stålverk med konverterteknologi, och då huvuddelen av dessa verk är yngre än 30 år så är sannolikheten att dessa ersätts med helt ny teknologi inom de närmaste 30 åren låg.

En utveckling kan tänkas ske stegvis:

1. Chagering av förreducerad råvara som järnsvamp med låga utsläpp och skrot. Detta görs idag i vissa verk med 30% av järnflödet.
2. Energieffektivisering som t ex minskning av slaggmängd: Detta innebär t ex nedläggning av sinterverk och investeringar i anrikning av malm och byggnation av pelletsverk. Tidshorisont torde vara fram till 2035.
3. Eventuellt injektion av vätgas i masugnsprocessen: Torde kunna ske i den takt fossilfri el blir tillgänglig.
4. Byte från fossilt kol till biokol: Detta är möjligt till mindre del för masugnen men helt möjligt för Corex och Finex som bygger på att kunna använda enklare kol.
5. Ombyggnad av masugnen enligt nytt koncept med syrgas och toppgasrecirkulation.
6. Full implementation av CCS: Torde vara enklare eller till och med kräva steg 5 först.

En masugn ställs idag om med intervall på 15–30 år innebärande en större renovering med byte av vitala delar. Ett omställningskoncept mot minskade CO₂-utsläpp vore värdefullt att ta fram för den stora mängd masugnsverk som idag finns inte minst i nyligen industrialiserade länder.

Direktreduktionsprocesser har historiskt endast haft en begränsad andel av den malmbaserade järnproduktionen. De har haft framgång där det funnits billig naturgas som i fallet med MIDREX och HYL/Energiron eller där man av olika orsaker önskat använda lokala icke koksande kol som SL/RN. I de fall man varit beroende av importerade råvaror har masugnslinjen behållit sin ledande position. Fördelarna med att använda järnmalmsfines som råvara för att slippa agglomereringssteget som i Fastmet och Finmet är stora men trots detta har dessa processer inte slagit igenom.

Kommer då strävan efter fossilfri tillverkning att ändra förhållandet mellan masugnslinje och direktreduktionslinje fram till 2050? Helt klart är att DR-processerna har möjlighet att använda en högre grad av förnybara reduktionsmedel än masugnsprocessen även om praktiska driftresultat ännu inte publicerats när detta skrivs. Viktiga frågor vid användning av syngas/vätgas som väntar på svar är:

- uppnådd reduktionsgrad
- produktivitet
- energianvändning
- möjlighet till uppkolning vid användning av vätgas som reduktionsmedel
- möjlig användning av ”kolfri” DRI i ljusbågsugn

Hur en övergång från masugn till DR slutligen påverkar råvarusituationen i Sverige behandlas vidare i slutdiskussionen.

4.8 Referenser

- Babixh et al. 2015 A. Babich, D. Senk, 17 - Recent developments in blast furnace iron-making technology, Editor(s): Liming Lu, Iron Ore, Woodhead Publishing, 2015, Pages 505-547, ISBN 9781782421566,
- Brent et al 1997 Brent, A.; Mayfield, P.; Honeyands, T.: FLUIDISED BED PRODUCTION OF HIGH QUALITY HOT BRIQUETTED IRON FOR STEELMAKING, Conference paper 1997
- DOE 2000 Ironmaking Process Alternatives Screening Study Volume I: Summary Report; US Department Of Energy, DOE, 2000.
- Fastmet 2024 <https://www.kobelco.co.jp/english/products/ironunit/fastmet/>
- Hooey et al, 2014 HOOEY L., RIESBECK J., WIKSTRÖM J.-O., BJÖRKMAN B., Role of Ferrous Raw Materials in the Energy Efficiency of Integrated Steelmaking, ISIJ International, Vol. 54 (2014), No. 3, pp. 596–604
- Linde 2024 Presentation vid Jernkontoret Joachim von Schéele.
- MIDREX 2023 World Direct Reduction Statistics, 2023. Available online
- MIDREX 2024-1 <https://www.midrex.com/tech-article/fueling-the-future-of-ironmaking-midrex-flex/>
- MIDREX 2024-2 <https://www.midrex.com/tech-article/midrex-h2-ultimate-low-co2-ironmaking-and-its-place-in-the-new-hydrogen-economy/>
- Morris 2001 Morris, A.E. Iron Resources and Direct Iron Production. In Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Buschow, K.H.J., Cahn, R.W., Flemings, M.C., Ilshner, B., Kramer, E.J., Mahajan, S., Veyssi re, P., Eds. Elsevier: Oxford, 2001; <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00755-5pp.4302-4310>.
- Mousa, 2019 Mousa, E. (2019). Modern blast furnace ironmaking technology: potentials to meet the demand of high hot metal production and lower energy consumption. Metallurgical and Materials Engineering, 25, 69-104.
- Nassaralla 2001 Nassaralla, C.L. Iron Production. 2001; 10.1016/B0-08-043152-6/00754-3pp. 4296-4301.
- Pardo et al. 2013 Pardo, Nicol s & Moya, José Antonio, 2013."Prospective scenarios on energy efficiency and CO  emissions in the European Iron & Steel industry," Energy, Elsevier, vol. 54(C), pages 113-128.
- Poveromo, 2021 Reference: Poveromo J.J. Current blast furnace reductant strategies, AIST webinar, 2021
- Primetals 2024-1/2 Primetals Factsheet on COREX and Factsheet on FINEX
- Roudier et al. 2012 Roudier, S., Sancho, L., Remus, R., & Aguado-Monsonet, M. (2012). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control.
- Sah et al. 2016 Sah, R.; Dutta, S. i) Direct Reduced Iron: Production. 2016; 10.1081/E-EISA-120050996pp. pp 1082-1108.
- Zhang et al, 2021 Zhang, W., Dai, J., Li, C., Yu, X., Xue, Z., & Saxen, H. (2021). A Review on Explorations of the Oxygen Blast Furnace Process. *Steel Research International*, 92(1). <https://doi.org/10.1002/srin.202000326>

5 Teknik bortom processförbättringar

5.1 Smältreduktion

Utöver vidareutveckling av masugnsprocessen, COREX och FINEX som nämns i kapitel 4 så finns åtminstone fem smältreduktionsprocesser värda att nämna vilka visas i [tabell 5.1 a och b](#). De är alla beroende av biogent kol för att ge låga utsläpp. TecnoRed kan sägas vara en förenkling av tråkölsmasugnen med lägre krav på både kol och malmråvarans hållfasthet. HIsarna och företrädaren HIsMelt har troligen höga krav på råvarornas konformitet för att skapa en stabil turbulent reaktionszon men kräver i gengäld inte agglomerering. Slutligen utgör elektrotackjärnsugnar som six-in-line och OSBF smältreduktionsprocesser när de används för att smälta järnsvamp med kvarvarande oxidiskt järn som skall reduceras. I dessa fall behövs biogent kol både för nya typer av elektroder och som extra kolinsats för att kola upp råjärnet.

5.2 Gasbaserad direktreduktion

Som visas i kapitel 4 så är direktreduktion med reformerad naturgas eller förgasat fossilt kol väl etablerat i processerna MIDREX och HYL/Energiron och förstegen till COREX och Finex. Kravet på fossilfrihet har gett upphov till ett antal nya processförslag för järnsvamp som visas i [tabell 5.2 a och b](#). Även om Hybrit inte var först med ren vätgas som reduktionsmedel så får projektet sägas vara det som startade denna utvecklingslinje och även påverkade MIDREX och HYL/Energiron att presentera sina vätgaskoncept. Den verkliga pionjären är dock fluidbäddprocessen Circored som varit i drift med ren vätgas och som idag följs den av Hyfor och Hyrex. GreenIron är en batchprocess med små krav på råvaran som även den använder vätgas och har sin egen nisch. FerroSilva skiljer sig från de övriga då processen huvudsakligen har biomassa som reduktionsmedel.

5.3 Elektrolys

Två elektrolysprocesser som är under utveckling visas i [tabell 5.3](#). Gemensamt är att de begränsas av processens natur med en viss största cellstorlek och att de batchvis levererar ett rent järn utan kol.

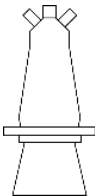
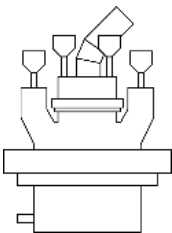
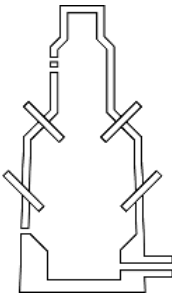
5.4 Möjliga processvägar 2050

Ett försök att beskriva hur dominerande lågutsläppande processlinjer kommer se ut kring 2050 redovisas i [tabell 5.4](#). Om man betänker att ett kvartssekel är kort tid och att vi inte kommit särskilt långt sen sekelskiftet så förefaller en konservativ bedömning av vad som är möjligt att göra som rimlig. I scenariot ingår optimalt utnyttjande av resurserna malm, skrot, fossila bränslen, vätgas, biomassa, el och möjlighet till koldioxidlagring. Fullt utnyttjat ger detta möjlighet till nya handelsmönster och nya malm- och DR-produkter. Små satsvisa processer som elektrolys-celler och GreenIron kommer hitta nischer där storleken inte är en begränsning utan rent av en fördel men kommer inte vara volymproducenter.

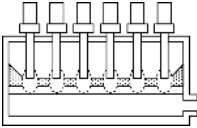
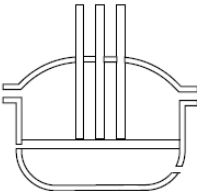
5.5 Förutsättningar för utveckling och omställning

Som framgår av avgränsningarna i kapitel 1 så ingår inte drivkrafter för förändring i denna rapport. Däremot finns det ett antal andra områden med nyckelteknologier och metoder som påverkar utvecklingen. Några exempel redovisas i [tabell 5.5 a och b](#). Det finns goda exempel på hur nya processer slagit igenom i stålindustrin på kort tid som syrgasfärskning av råjärn och stränggjutning gjorde i mitten av förra seklet. Man skall dock minnas att de ursprungliga patenten då hade hunnit bli närmare hundra år gamla och fördröjningen kan skyllas på att någon eller några komponenter saknats i den lösning som slutligen lyckades.

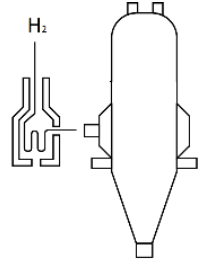
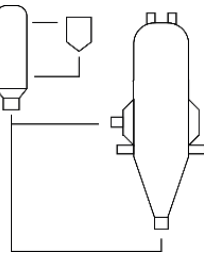
Tabell 5.1 a Råjärnsprocesser under utveckling eller som åter uppmärksammas.

Processtyp	Process	Utseende	Malmråvara	Reduktionsmedel	Kommentar
Schaktugn	Träkolmasugn		Sinter, pellets, styckemalm	Träkol från planterad Eucalyptus och annan skogsråvara	Träkol är inte lika hållfast som koks varför träkolmasugnar är i storleksordningen 40-350 tusen ton per år [Scarpinella et al 2011]. Kolningen som inte fullt ut utnyttjar energin i flyktiga ämnen har rapporterats i vissa fall medföra hållbarhetsproblem [Teixeira 2022] och då kol i masugnen används både för reduktion och för smältning i ett land med vattenkraft så är processen inte optimal. Idag föreslås nya projekt och även om produktionen är avsedd för lokal industri så kan på sikt det därför dyka upp tackjärn från dessa på marknaden framöver.
Schaktugn	Tecnored		Kallbundna briketter	Biokol/ träkol från planterad Eucalyptus	Gruvföretaget Vale utvecklar idag denna process som kan utnyttja agglomerat med lägre hållfasthet som kallbundna briketter och träkol samt andra kolbärare [Tecnored 2024]. Fördelar jämfört med etablerade processer är mindre krav på anrikning och behov av nya pelletsverk. En demonstrationsanläggning på 75 tusen ton per år är i drift idag. Modulstorleken i den första kommersiella anläggningen som planeras tas i bruk 2025 är 250 tusen ton per år [Vale 2024]. Planen är att kolinsatsen skall vara 100% biogen förutom eventuella restprodukter som plast. Även här kan på det sikt dyka upp tackjärn med låga utsläpp på marknaden framöver
Flash + CCS	HIsarna Utvecklad ur HISmelt		Sinterfines	Kolpulver	HIsarna och företrädaren HISmelt är de integrerade smältreduktionsprocesser som helt undviker agglomerering som kommit längst för att övervägas för industriell drift. Processiden är att fint kolpulver och slig reagerar i en turbulent ström/flamma i övre delen av ugnen för att sen slutreduceras i en smälta i botten. HISmelt drevs ett tag i Australien och flyttade sen till Kina men har nu återuppstått i Australien [Goodman 2019]. HIsarna utvecklades i med stöd av EU med en pilot i Tata steels verk i Ijmuiden och kan halvera utsläpp av CO ₂ jämfört med masugnslinjen [van Boggelen et al. 2018]. En större anläggning övervägs nu för Indien [Tatasteel 2024]. För att få låga utsläpp måste den kompletteras med CCS och/eller utnyttja biokol.

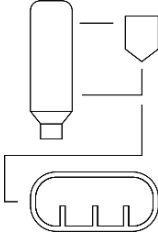
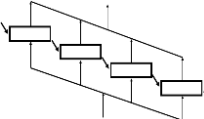
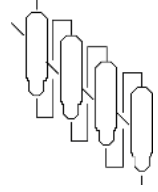
Tabell 5.1 b Råjärnsprocesser under utveckling eller som åter uppmärksammas (forts).

Elektro- tackjärnsugn (Smelter)	Six in line		Förreducerad järnråvara/DRI	Biokol / Söderberg- elektroder	I processen smälts DRI under masugnslika förhållanden och kan därför utnyttja DRI med hög halt av gångart utan stora järnförluster. Vid hög metalliseringsgrad kan inte elektroderna sänkas ner i godset som vid ferrolegeringstillverkning då de då riskerar kortslutning. För att undvika stora värmeförluster så chargerar råmaterialen så de bildar en vall mot väggarna i ett kvadratiskt ugnsrum. Processen saluförs av Metso, SMS och Primetals vilket beskrivs på dessa företags hemsidor. Kolhalten bedöms bli kring 2%.
	OSBF Open Slag Bath Furnace		Förreducerad järnråvara/DRI	Biokol / grafit- eller Söderberg- elektroder	En OSBF är en rund elektrotackjärnsugn som kan utnyttja grafitelektroder eller Söderbergselektroder mot ett bad med slagg och råjärn. Även här måste väggarna troligen skyddas med antingen påfruset material eller en vall av material. Målkolhalten är 4%. OSBF marknadsförs av Tenova och en bild finns på hemsidan. [Cavaliere et al. 2022, Esterhuizen et al. 2023] Söderbergselektroder som används i båda dessa processer består av en massa som matas in i en form uppiifrån och ”bakas” till fast fas under vägen ner till ugnsrummet. Pastan består idag till stora delar av tjära från koksningssprocessen vilket på sikt måste ersättas av andra källor.

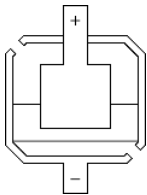
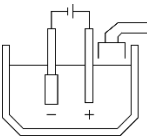
Tabell 5.2 a Järnsvampsprocesser under utveckling eller som åter uppmärksammats.

Processtyp	Process	Utseende	Malmråvara	Reduktionsmedel	Kommentar
Schaktugn	Hybrit		Pellets	Vätgas från elektrolysör	Hybrit bygger på ett reduktionsschakt från Tenova men är i övrigt ett egenutvecklat processkoncept där vätgas från elektrolysörer reducerar DR-pellets. En försöksperiod i en pilotugn i Luleå där olika gassammansättningar liksom gastemperaturer och gasflöden har testats är nu avslutad och nästa steg är en demonstrationsanläggning på 1.3 Miljoner ton per år i Gällivare med tidigare aviserad byggstart 2025. Den projektrapport som publicerades 2024 beskriver huvudsakligen vilka moment som ingått i projektet och slutsatser om produkten kolfri DRI och HBI samt erfarenheter från elektrolysörer [HYBRIT 2024]. Systemet för gasrecirkulation är patenterad [US 2024/0279759]. Hybrit har nått hög metalliseringsgrad men resursåtgången för att nå denna har ännu inte publicerats. Projektföreträdare kommunicerar en viss oro över den tekniska mognadsgraden hos dagens elektrolysörteknologi.
	FerroSilva		Pellets	Syngas från förgasad biomassa	FerroSilva är ett projekt som bygger på existerande lösningar där biomassa förgasas i en fluidiserad bädd varefter den injiceras dels som reduktionsgas och dels som uppkolningsgas på samma sätt som i en traditionell järnsvampsprocess med reformerad naturgas. Både cirkulerande fluidbädd (CFB) och Dubbel fluidbädd med cirkulerande bäddmaterial (DFB) har tagits med i utredningen. Toppgasen torkas och den biogena koldioxiden avskiljs och kan antingen lagras eller säljas för att bli E-bränsle eller för annat ändamål. Därmed uppstår en så kallad kolsänka. Projektet som syftar till en demonstrationsanläggning om 50 tusen ton per år i Hofors med start 2028 föregicks av en omfattande förstudie som resulterade i ett flertal akademiska publikationer som beskriver processen i detalj. Nurdiawati et al. 2023, Zaini et al. 2023]

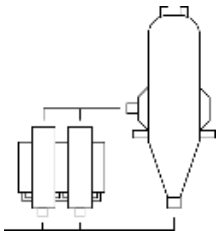
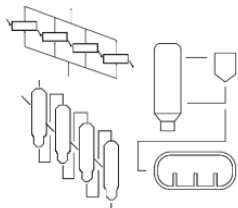
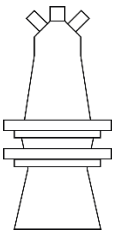
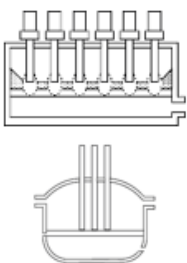
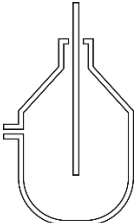
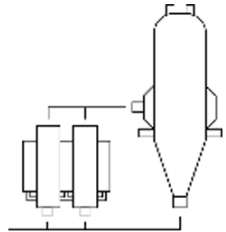
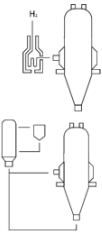
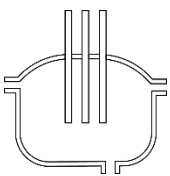
Tabell 5.2 b Järnsvampsprocesser under utveckling eller som åter uppmärksammats (forts).

Cirkulerande fluidiserad bädd följt av bubblande fluidiserad bädd	Circored		Fines	Vätgas	Denna process som var i drift på Trinidad vid millenieskiftet men som blev olönsam när järnsvampspriset föll kraftigt 2002 [Loch et al. 2002] utvecklas idag av Metso som ett försteg till en six in line smelter för malm med hög halt av gångart. Reduktion av fines 0.1-2 mm reduceras i en cirkulerande fluidiserad bädd till 65-80% metallisering vilket tar 20-30 minuter och fortsätter sedan i en bubblande fluidbädd, indelad i celler för bättre kontroll, under ytterligare 150-180 minuter till en reduktionsgrad av 95%. Orsaken till skillnaden i tid i de två zonerna är att den första styrs av konvektion och den senare av diffusion vilket kräver mer tid. Arbetstemperatur är 850-900°C. Finare koncentrat och restmaterial kan mikrogranuleras före reduktion [Pandei et al. 2023].
Fluidiserade bäddar i serie	Hyfor		Fines	Vätgas	Hyfor processkoncept med fluidbäddar har utvecklats av Primetals. Processerna är tänkt att bestå av ett antal reaktorer i serie där material matas in i ena änden och kommer ut som DRI i den andra efter att ha passerat alla reaktorer. Hyfor använder vätgas med en uppskattad förbrukning på 550-600 Nm ³ /ton DRI och till skillnad mot Finmet som använder motström så matas alla reaktorer parallellt med färsk reduktionsgas vid en låg reduktionstemperatur för att undvika kladdningsfenomen. För närvarande finns en pilotanläggning med en reaktor men en demonstrationsanläggning planeras när försöken i piloten är avslarade. [Spreitzer et al. 2022]
	Hyrex		Fines	Vätgas	Överdelen på Finex som konverterats till vätgas och som skall producera en järnsvamp som skall smältas i en elektrotackjärnsugn.
Klockugn	GreenIron		Kallbundna pellets	Vätgas	GreenIron är en svenskutvecklad process som innebär att en behållare med kallbundna pellets eller andra agglomerat av metalloxider ställs in i en klockugn som sen evakueras och fylls med varm vätgas. Reaktionszonen vandrar från toppen av behållaren till botten och vatten förs ut under ugnen och värmebalansen upprätthålls med värmeelement i ugnsväggen. En uppskalning från pilot till produktionsanläggning är under uppförande i Sandviken. [GreenIron 2024]

Tabell 5.3 Elektrolysprocesser under utveckling. Båda dessa processer kräver enligt uppgift ett mycket rent malmkoncentrat.

Processtyp	Process	Utseende	Malmråvara	Reduktionsmedel	Kommentar
Ektrolyscell hög temperatur	MOE Molten Oxide Electrolysis (liknande Ulcowin)		Järnmalmsskoncentrat	Elektrolys i smält fas	MOE utvecklas och marknadsförs idag av Boston Metals i USA. Utöver pilotanläggningen i Boston så byggs idag en anläggning för reduktion av järn, niob och tantal ur avfall från tennproduktion i Brasilien [Duckett 2024]. Smältelektrolys av metalloxider innebär att oxiden löses in i en oxidsmälta med en nedsänkt inert anod. Oxidernas syre avgår som syrgas och metallen bildar ett bad i botten på ugnen ovanpå katoden. Se reaktioner i kapitel 2.1. Processen körs vid en temperatur över 1600 och producerar ett kolfritt järn, troligen med de legeringsämnen som följer med malmen som oxider. Tanken är att produkten skall kunna färdigställas i en skänknugn d v s en enkel elektrisk ugn för legering och gasrening. Processen bygger på autogen infodring, dvs oxider som fryser på ugnsväggen och skyddar den. Järnoxidens aggressiva karaktär liksom en badnivå som stiger och faller gör detta tillsammans med elektrodmaterial till en utmaning. En kommersiell anläggning kommer bestå av många celler då möjligheterna till att skala upp en cell är begränsade och en cell med 600kAmp strömstyrka kan ge c:a 10 ton järn/dygn. [Winn 2024]
Elektrolyscell låg temperatur	Volteron (tidigare Siderwin och Ulcowin)		Järnmalmsskoncentrat	Elektrolys i alkalisk suspension	Volteron utvecklas av John Cockerill med Arcelor Mittal som intressent. Processen innebär att malmkoncentrat förs ner i en alkalisk lösning och en ström läggs på mellan anod och katod. Vid anoden utvecklas vätgas medan rent järn fälls ut på katoden. Man arbetar nu på en demonstrationsanläggning för 40-100 tusen ton per år att tas i drift 2027 och för en fullskaleanläggning senare detta decennium. [Siderwin 2023] Liknande projekt finns i USA. [Electra 2024]

Tabell 5.4 Scenario för kostnadseffektiva processvägar för stål med låga utsläpp efter 2050.

Reduktion 1	Reduktion 2	Ståltillverkning	Kommentar
 	 		Det talas allmänt om DR-pellets för råvara som har låga halter av gångart. Det är dock något som har med det efterföljande ståltillverkningen att göra och all pellets kan reduceras till järnsvamp. Som beskrivs i kapitel 3 kräver järnmalm med höga halter av gångart dock ett smältsteg i reducerande atmosfär före ståltillverkningen för att undvika stora energi och materialförluster vilket behandlas i denna ruta. Troligtvis kommer vi inte klara av att avveckla de fossila reduktionsmedlen till 2050. Naturgas för direktreduktion och koks för smältreduktion i masugn kommer fortsatt användas men nu tillsammans med CCS. Då möjligheter att lagra koldioxid ofta finns i närheten av naturgasfält så är troligen CCS-kostnaderna lägst där och högre vid masugnar där man måste transportera koldioxiden långa sträckor. Ett annat skäl att chargera järnsvamp är att minska behovet av koksande kol vilket tros bli en bristvara. Järnsvamp för masugnar behöver inte ha samma reduktionsgrad som järnsvamp för ljusbågsugnar varför det är möjligt att en ny typ av masugns-DRI kan hitta en marknad. Det är tydligt att teknikleverantörerna ser kombinationen av fluidiserade bäddar som ett naturligt steg före en elektrotackjärnsugn. Genom att man inte behöver gå så långt i reduktionsgrad utan kan göra slutreduktionen i steg två så undviker man problem med kladdning och långa uppehållstider. Det är svårt att samla upp koldioxid från en tackjärnsugn eller en syrgaskonverter utan att få in kväve varför målet bör vara att tillräcklig mängd biogent kol i masugnsprocessen används, samlas in och lagras och att det kol som används i tackjärnsugnarnas elektroder är biogent.
 			Vi kommer i framtiden troligen använda såväl naturgas som vätgas och biogen syngas vid reduktion av järnmalm till järnsvamp med hög metalliseringsgrad. Den största mängden kommer med stor sannolikhet att komma från länder med billig naturgas och möjligheter till CCS. Höga halter gångart i järnsvampen ökar material- och energiförluster i en ljusbågsugn, ett fenomen som är lineärt. Vid låg andel järnsvamp och hög andel skrot så är problemet hanterbart varför man inte bör överdriva malmkvalitéfrågan för specialstålverk annat än mangan och fosfor som är problematiska vid ståltillverkning under reducerande förhållanden.

Tabell 5.5 a Exempel på frågeställningar rörande nyckelområden för utvecklingen mot lågutsläppande processer

Område	Några identifierade frågeställningar	Kommentarer huvudsakligen byggda på egna erfarenheter och privata diskussioner med personer aktiva inom respektive område.
Malm	• Produktion av pellets/DR-pellets • Produktion av slig för fluidbäddar • DRI-produktion vid gruva eller stålverk • Produktion av högre koncentrat för elektrolys	En stabil pelletspremie behövs för att säkerställa de investeringar i pelletsverk som utbyggd DRI-produktion kräver. Fluidbäddar är känsliga för kornstorlek och särskilda fluidbäddsfines kan bli en ny produkt för malmföretag. Tillgång till reduktionsmedel till låg kostnad är avgörande för produktion av DRI i anslutning till gruva eller stålverk. Elektrolysprocesser behöver mycket rena koncentrat.
Skrot	• Undvikande av föroreningar • Utnyttjande av legeringsämnen • Hantering av logistik och fördelning av kostnader	En noggrannare sortering av skrot med utnyttjande av ny teknologi för att undvika föroreningar och utnyttja legeringsämnen kommer bli viktigare när andelen malmbaserat material minskar i Europa. Fler skrotfraktioner i mindre poster kommer ställa krav på företagens logistiksystem samt aktualiserar frågan om vem som skall betala.
Elproduktion	• Tillgång/tillgänglighet • Pris • Miljöaspekter	Den dag stabil tillgång på el med låga utsläpp och till ett rimligt pris inte är en begränsande faktor så kommer frågan om reduktion av malm med låga utsläpp att vara lätt att lösa. Detta oavsett om vi kommer reducera med vätgas, syngas med CO och H ₂ som regenereras till ny syngas eller där CO ₂ avskiljs och lagras. Vi är dock inte där än.
Elnät	• Tillståndsfrågor för utbyggnad • Kapacitet • Förmåga att anpassa tillgång och efterfrågan över stora områden	Produktion av vätgas med elektrolysör kräver stora mängder el och därmed behövs en hög överföringskapacitet i nätet. Utbyggnad har i dag en ledtid på decennier snarare än år, delvis på grund av tillståndsfrågor. Slutligen kräver en ökad användning av sol- och vindkraft flexibla nät som kan fördela kraft över stora områden.
Elektrolysör	• CAPEX, OPEX och tillgänglighet • Kapacitet, flexibilitet och energiutnyttjande • Möjliga gaser att reducera	Även om utveckling av elektrolysörer är intensiv så finns frågetecken kring hur mogen teknologin är för att skala upp till de stora vätgasbehov som prognosticeras, liksom hur flexibel produktionstakt och tillgänglighet påverkar kostnader. Slutligen är fortsatt utveckling av elektrolysörer som kan regenerera koldioxid till kolmonoxid viktig.

Tabell 5.5 b Exempel på frågeställningar rörande nyckelområden för utvecklingen mot lågutsläppande processer (forts)

Område	Några identifierade frågeställningar	Kommentarer huvudsakligen byggda på egna erfarenheter och privata diskussioner med personer aktiva inom respektive område.
Fossil utvinning	• Utvinning utan utsläpp av klimatgaser • Transport utan utsläpp av klimatgaser • Övervakning och rapportering	Fossilt kol innehåller flykt som avgår i form av den kraftiga klimatgasen metan som släpps ut: när gruvor ventileras, från dagbrott och vid transport av kol. Även naturgaskällor har läckage vid utvinning och transport. Åtgärder för läckageminskning liksom övervakning via satellit och rapportering är idag under snabb utveckling i många länder och gynnas av stigande energipriser och klimatavgifter.
Biomassa	• Hållbart utnyttjande av skogsresurser • Transporter och lagring • Användning för maximal nytta	Grunden för att utnyttja skogsresurser är en konsensus i samhället kring hur detta kan göras hållbart med avseende på bland annat biodiversitet och markanvändning. Då densiteten är låg är effektiva transportsystem centralt. Priset kommer avgöra hur mycket som kan samlas in och hur det används. Bio-CCS kan komma bli avgörande.
CCUS (1)	• Smart produktion för ren CO₂ • Effektiva logistikkedjor • Övervakning och rapportering för massbalansberäkningar	En kostnadseffektiv avskiljning, transport och lagring av koldioxid kräver att gasen är ren både från kväve och föroreningar som svavel. Om möjligt bör det ske genom förändringar i processen så den ger en ren CO ₂ . En effektiv logistik med bil-tåg-båt är avgörande för ekonomin och övervakning för redovisning av andelen biogen CO ₂ .
CCUS (2)	• Elektrolysörteknologi för att regenerera CO₂ till CO • Teknologi för att reducera CO₂ till C(s) och O₂	Den dag vi har tillgång till stora mängder av el med låga utsläpp till överkomligt pris så upphör behovet av CCS-kapacitet då vi kan regenerera reduktionsgas och lagra kolet i koldioxiden som primärt kol.
Livscykelanalys	• Tillämpning av bokföringsmetod och konsekvensmetod • Fördelning av last mellan produkter i komplexa system • Användning av olika typer av inhandlade krediter	Omställningen av stålindustrin innebär ianspråktagande av begränsade resurser i en omfattning att man kan ifrågasätta tillämpning av bokförings-LCA (faktiska utsläpp i EPD:er) och förorda konsekvens-LCA (alternativa utsläpp). En aktuell fråga är utsläpp för elproduktion där man kan argumentera för att använda data för faktiskt använd el, genomsnittsdata eller data för marginalproduktion. Allokering av CO ₂ -utsläpp mellan produkter liksom regler för CO ₂ -krediter kan oxå behöva ses över då en bioprodukt som t ex masugnsslagg är en trång resurs och ersätter en produkt med höga utsläpp. En optimering av resursanvändning och utsläppsminimering kräver en metodik som inte leder till suboptimering. Slutligen är så kallad offsetting och handel med krediter av betydelse. Hur vi skall räkna på befintlig produktion och investeringar i framtiden kommer troligen bero av hur dagens system påverkar hur väl vi lyckas sänka utsläppen.

5.6 Referenser

- van Boggelen et al 2018 van Boggelen, JWK.; Meijer, HKA.; Zeilstra, C.; Hage, H.; Broersen, P.: Hisarna - Demonstrating low CO₂ ironmaking at pilot scale, Conference: SteelIVIA Dubai, September 2018
- Cavaliere et al. 2022 Cavaliere, P.; Perrone, A.; Silvello, A.; Stagnoli, P.; Duarte, P. Integration of Open Slag Bath Furnace with Direct Reduction Reactors for New-Generation Steelmaking. Metals 2022, 12, 203. <https://doi.org/10.3390/met12020203>
- Duckett 2024 Duckett, A.: Boston Metals' electrified process starts extracting valuable metals from mining slag, The chemical engineer, March 28, 2024.
- Electra 2024 <https://www.electra.earth>
- Esterhuizen et al. 2023 Esterhuizen, A.; Jonker, P.: Tenova's iBlue open slag bath furnace design: Fundamental design decisions for a DRI melter, METEC ESTAD 12-16 June 2023
- Goodman 2019 Goodman, N.J.: From Australia to China....and Back Again?, in Proceedings Iron Ore 2019, pp 313 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- GreenIron 2024 www.greeniron.se
- Hybrit 2024 HYBRIT Development AB, HYBRIT Pilot Fossilfri järn-, stål- och vätgasproduktion, Slutrapport till Energimyndigheten Dnr 2018-005825, 2024-08-26
- Loch et al. 2002 Loch, C.; Terwiesch, C.: Pumping Iron at Cliffs & Associates - The Circored Iron Ore Reduction Plant in Trinidad, Case study INSEAD-Wharton, France/USA 2002.
- Nurdiawati et al. 2023 Anissa Nurdiawati, Ilman Nuran Zaini, Wenjing Wei, Rutger Gyllenram, Weihong Yang, Peter Samuelsson: Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process, Journal of Cleaner Production 2023-03, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136262>
- Pandey et al. 2023 Pandey, P.; Lang, S.; Köpf, M.; Haimi, T.: CIRCORED FINE ORE DIRECT REDUCTION AND DRI SMELTING - PROVEN TECHNOLOGIES FOR THE TRANSITION TOWARDS GREEN STEEL, 9:th agglomeration abm week, 7th edition, August 1st-3rd, 2023, São Paulo, SP, Brazil
- Scarpinella et al. 2011 Scarpinella, C.; Takano, C.; Tagusagawa, S.; Mourao, M.; Lenz e Silva, G.: CHARCOAL IRONMAKING: A CONTRIBUTION FOR CO₂ MITIGATION, Conference: Fray International Symposium, Metals and Materials Processing in a Clean Environment, Cancun, Mexico, December 2011
- Siderwin 2023 <https://zenodo.org/records/7785032#.ZCVyxXZByUk>
- Spreitzer et al. 2022 Spreitzer, D.; Wurm, J.; Hiebl, B.; Rein, N.; Wolfinger, T.; Sterrer, W.; Fleischander, A.: HYFOR – HYdrogen-based Fine-Ore Reduction Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 59 No. 2 (June 2022)
- Tatasteel 2024 <https://www.tatasteel.com/corporate/wealsomaketomorrow/innovation/>
- Tecnored 2024 <https://www.tecnored.com.br>

Teixeira 2022	Teixeira, F.: Behind Brazil's 'green' charcoal industry, illegal deforestation and workers' misery, The Japan Times, Jan 5, 2022
US 2024/0279759	HYDROGEN GAS RECYCLING IN A DIRECT REDUCTION PROCESS, United States Patent Application Publication, Pub. No. US 2024/0279759 A1, Pub. Date: Aug. 22, 2024
Vale 2024	https://vale.com/sv/w/vale-starts-work-on-tecnoreds-first-commercial-plant-in-maraba-pa-which-will-contribute-to-the-decarbonization-of-the-steel-industry
Winn 2024	Winn, Z.: Making steel with electricity, MIT News, May 22, 2024
Zaini et al. 2023	Ilman Nuran Zaini, Anissa Nurdiawati, Joel Gustavsson, Wenjing Wei, Henrik Thunman, Rutger Gyllenram, Peter Samuelsson, Weihong Yang: Decarbonising the iron and steel industries: Production of carbon-negative direct reduced iron by using biosyngas, Energy Conversion and Management, 2023-04, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116806

6. Processekonomi

6.1 Bakgrund

Som framgår av inledningen så är utgångspunkten för denna rapport att den svenska marknaden behöver tillföras åtminstone 0.5–1 Mton järnsvamp vid slutet av detta decennium för att säkerställa behovet av ren råvara till specialstålsindustrin. Denna kan importeras eller framställas lokalt efter investering i nya anläggningar. I tabell 5.5b anges under punkten "Livscykelanalys" att man vid trånga resurser kan behöva använda konsekvensanalys i stället för den allmänt använda bokföringsmetoden då förändringarna i ländernas energisystem är så genomgripande t ex vid övergång till vätgas från elektrolysörer som reduktionsmedel. Liknande resonemang kan föras om biomassa och andra trånga resurser och även om synsättet verkar användas inom synen på el i taxonomin så väljer vi här en klassisk bokföringsmetod.

6.2 Beräkningsförutsättningar

Syftet med beräkningarna är att visa hur produktionskostnaderna för stål påverkas av respektive process egenskaper och kostnadsläget för ingående resurser.

Jämförande processberäkningar av den typ som redovisas här är just jämförande. Resultaten är beroende på kvalitén på indata men fel i indata bedöms till stor del ta ut varandra när man studerar differenser. Absolutvärden är naturligtvis intressanta, men för jämförelser av denna typ, är differensen mellan alternativ av större intresse. Absolutvärdet skall dock i alla lägen vara realistiskt.

Det finns idag i huvudsak fyra utvecklingslinjer för storskalig produktion av järnsvamp vilka visas i [tabell 6.1](#) där reduktion med naturgas förväntas ske i MENA-regionen (Middle East North Africa), medan reduktion med vätgas och biogen syngas samt den efterföljande ståltillverkningen i alla fyra fallen förutsätts ske i Sverige. Den första har utsläpp av klimatgaser motsvarande dagens produktion med naturgas med möjlighet att minska utsläppen genom inblandning med vätgas även om detta inte tas med i beräkningarna. De tre sista har nära noll utsläpp tack vare CCS, vätgas och biogen råvara. Den sista görs till en koldioxidsänka genom infångning och lagring/användning av den biogena koldioxiden. Produktion med vätgas kan kombineras med naturgas eller biogen syngas för uppkolning av järnsvamp men inte heller detta tas med i beräkningarna då vi inte vet hur detta kommer göras.

Tabell 6.1 Huvudalternativ för storskalig produktion av järnsvamp.

1	NG (+H ₂)	Produktion med naturgas med möjlig inblandning av extra vätgas. (Midrex Flex, Energiron) Representerar vad vi kan köpa idag från MENA.
2	NG/CC	Produktion med naturgas med koldioxidinfångning. (Som Energiron vid Emirates steel) Representerar vad vi kan komma att köpa från MENA efter viss processutveckling.
3	H ₂ (+NG)	Produktion med vätgas med möjlig inblandning av naturgas. (Hybrit, Midrex H ₂ , Energiron) Representerar ett möjligt svenskt alternativ.
4	SG/CC	Produktion med biogen syngas med koldioxidinfångning. Representerar ett möjligt svenskt alternativ.

Alternativskiljande kostnader för järnsvamp visas i [tabell 6.2](#) och konsekvenser vid stålproduktion i [tabell 6.3](#) och allt annat är lika i de olika beräkningarna.

Tabell 6.2 Alternativskiljande kostnadsfaktorer för järnsvampsproduktion.

1	Investeringens storlek används för beräkning av kapitalkostnader, CAPEX, och för att uppskatta underhållskostnader vilka ingår i driftskostnaden, OPEX. En uppskattning av investeringen för de olika alternativen ges i tabell 6.4. Investeringar för DRI-produktion har delats upp i schakt, gasproduktion samt koldioxidavskiljning samt för ståltillverkning för en ljusbågsugn.
2	Produktionskostnad för ny landbaserad vindkraft ligger kring 32 EUR/MWh och har satts som minimum för ett långsiktigt elpris med det dubbla, 64 EUR/MWh, som maximum. Muselemani et al har räknat på en produktionsmix av 70% vind- och 30% solkraft med vätgaslager för såväl reduktion och elproduktion för perioder utan sol och vind. Vid dessa antaganden blir elpriset 45.5 USD/MWh vilket motsvarar 41 EUR/MWh. För Sverige används mixen 20 gCO ₂ /kWh och för MENA 400 g/kWh.
3	Naturgaspriset för olika lokaliseringar varierar mellan 1-3 EUR/GJ (2.8-8.3 EUR/MWh) i MENA, 3-4 EUR/GJ (8.3-11.1 EUR/MWh) i USA till omkring 10-15 EUR/GJ (27.8-41.7 EUR/MWh) terminal Nederländerna. [Privata samtal] med specialister inom råvaror i MENA och globalt] [Platts 2024] [S&P 2024]. GWP för läckage av metan vid naturgaskällor har satts till 22.6 kg CO _{2eq} /GJ för alternativ 1 och 4.5 kg för alternativ 2 då vi antar att detta kommer förbättras kraftigt de närmaste åren. Naturgaspriser redovisas normalt i USD/MBTU men anges här i EUR/GJ vilket är en faktor 0.9 lägre (0.95/1.055) med dagens dollarkurs.
4	Vätgas antas produceras med elektrolysörer och priset är beroende av elpriset och elektrolysörens verkningsgrad som i denna studie har satts till 63%. Vilket ger 278 kWh/GJ. Effektivt energivärde för vätgas (LHV) är 3 kWh/Nm ³ med vikten 90g/Nm ³ fås 33.3 kWh/kg. Muselemani et al beräknar vätgaskostnaden till 4.84 USD/kg vilket motsvarar 4.36 EUR/kg eller 130 EUR/MWh vilket inkluderar såväl CAPEX som OPEX. Utsläpp i samband med vätgasproduktion sätts till utsläppen för den el som åtgår 5.56 kg CO _{2eq} /GJ vilket kan anses vara en konservativ bedömning.
5	Biomassa från skogsbiprodukter handlas på börs och nyttjas idag till större delen för fjärrvärme. Historiskt har priset legat kring 17 EUR/MWh vilket kan anses vara ett minimum. Högre pris ger ett ökat utbud då täckningsbidraget för transportkostnader ökar. Ett tak torde ligga där biomassa inte längre är lönsamt för fjärrvärme på lång sikt och sätts här till 25 EUR/MWh. Utsläpp för transport av biomassa uppskattas till 16 kg CO _{2eq} /ton.
6	Pris för DR-pellets FOB baseras på ett marknadspris på malm med 65% Fe plus en DR-pelletspremie och dessa tillsammans uppskattas till 170 USD/ton Fe. Till detta kommer en fraktkostnad. På 30 USD/ton pellets vilket ger 146.3 CIF USD/ton pellets motsvarande 140 EUR/ton. Då samma malm används försummas utsläppen för produktion och transport av pellets.
7	Kostnader och intäkter för omhändertagande av insamlad koldioxid varierar kraftigt beroende på geografiskt läge och typ av koldioxid. Biogen koldioxid har ett marknadspris vid källan medan fossil koldioxid i länder med olje- och naturgasproduktion kan avyttras vid källan utan kostnad då den kan användas för att öka trycket i oljekällor. Borttransport med tåg/båt/pipeline till lagringsområden inklusive lagring kan uppskattas till 50-100 EUR/ton men har utelämnats i beräkningarna.
8	Utsläppsätter och kostnader förknippade med import av järn och stålråvaror till EU, CBAM, varierar över tiden. Just nu ligger ETS på 60 EUR/ton men förväntas öka när mängden utsläppsätter minskar. Ett riktvärde på 100 EUR/ton CO _{2eq} fossil CO ₂ används i beräkningarna och en kredit på 100 EUR/ton för biogen koldioxid.

Tabell 6.3 Alternativskiljande kostnader stålproduktion

1	Transportkostnaden för HBI från MENA regionen beräknas som 30 EUR/ton för transport. Transporten påverkar koldioxidutsläppen som sätts till 200 kg CO _{2eq} /ton HBI för sjö och tågtransport.
2	Kolhalten i järnsvamp som sätts till 2% bidrar till "koket" i ljusbågsugnen. Skillnad i kolhalt måste kompenseras med injektkol. Kol som tillsätts som injektkol har ett sämre utbyte än kol i järnsvamp och som utbyte anges ofta 60%. Då det är osäkert hur vätgasalternativen kommer se ut så antas utbytet 100% i beräkningen för ljusbågsugn.
3	Kol kan antingen vara fossilt eller biogent vilket har konsekvenser både för priset och utsläppsvärden. I beräkningarna förutsätts biogent kol.
4	Samma logik för elpris och utsläpp för elproduktion som för direktreduktion gäller för ståltillverkning. Pris och värde behöver inte vara detsamma som för järnsvampen.
5	En marknadspremie för fossilfrihet utöver premie för låga utsläpp är möjlig och kan uppskattas till 30 EUR/ton stål men har utelämnats i beräkningarna.

Basdata för beräkningarna visas i [tabell 6.4](#).

Tabell 6.4 Basdata för beräkningar.

Kalkylränta	%	8
Underhåll	% av investering	3
Övrigt fast (räknas i kalkylen in under underhåll)	% av investering	2
Ekonomisk livslängd	år	20
Tillgänglighet	%	97

6.3 Investerings och driftskostnader

6.3.1 DR-anläggning

Den nominella kapaciteten för DR-verken är 1000 tusen ton per år. Vid behov räknas Investeringskostnader om från 1 Mton enligt: $I_2 = I_1 \cdot (V_2/V_1)^{0.67}$ där I är investeringskostnader och V är produktionsvolym. Investeringskostnader bygger på inflationsjusterade publicerade data och ingenjörsmässiga antaganden för anläggningar [Lockwood-Greene 2000], [Pissot 2021], [Thunman 2018], [Thunman 2021].

Dessa kostnader motsvarar bara en del av vad som normalt ingår i en anläggning som byggs på ny industrimark varför verkliga investeringskostnader som inkluderar markberedning, infrastruktur mm är väsentligt större. För jämförelser där dessa kostnader tar ut varandra fungerar de dock troligen väl. Investerings- och driftskostnader för de DR-verk som ingår i studien visas i [tabell 6.5](#).

Tabell 6.5 Investerings- och driftkostnader för DR-verk. DR-processen är en schaktugn med olika typer av reduktionsgas och eventuell användning av CO₂ infångning för Carbon Capture, CC.

Beräkning	A1	A2	A3	A4
DR-Process	NG (+H ₂)	NG-CC	H ₂ (+NG)	SG-Bio
CO ₂ infångning		Ja		Ja
Investeringar (MEUR)				
Schaktugn	275	275	275	275
Gassystem	125	125	360	235
CO ₂ infångning	-	65	-	Inkluderad i gasanläggningen
Totalt	400	465	635	510
Drift (MEUR/år)				
Underhåll	16	18.6	25.4	20.4
Driftpersonal	3	3	3	3
Overhead	1.8	1.8	1.8	1.8
Totalt/år	20.8	22.4	29.2	24.2
Åtgångstal /ton DRI				
Reduktionsgas (GJ)	11	13	7.9 (motsvarar 12.6 GJ el eller 3.5 MWh el)	12
El (kWh)	100	200	100	300
Vatten (Nm ³)	0.2	0.2	0.2	0.2
Syrgas (Nm ³)	8	8	8	8
NG=Naturgas, H₂= Vätgas, SG-Bio=Biogen syngas, CC koldioxidinfångning färdig för transport				

I sammanställningen i tabell 6.5 så är det bara alternativ 1 där det finns verkliga processdata att tillgå och data för alternativ 2-4 har uppskattats/beräknats med alternativ 1 som riktmärke. Endast investeringskostnad med underhållskostnad, gasanvändning och elanvändning har gjorts alternativskiljande. Syrgas och processvatten har olika roller i processerna och har rimligen olika åtgångstal men i brist på erfarenhetsdata har de satts lika. De har tagits med för att betona att vi behöver bättre dokumentation av processerna och förhoppningsvis så kommer mer publiceras framöver.

6.3.2 Stålverk

Data för ett ljusbågsugnsverk redovisas i [tabell 6.5](#). Beräkningar görs för en chargevikt om 100 ton med inblandning av 20 ton DRI/HBI.

Tabell 6.5 Investeringskostnader, fasta driftkostnader, basdata samt förbrukningstal för ljusbågsugn

Investerings och fasta driftkostnader samt basdata		
Investering	MEUR	300
Underhåll	MEUR/år	12
Personal	MEUR/år	1.2
Overhead	MEUR/år	0.5
Chargevikt	ton	100
Tapptemperatur	C	1650
Power on	MW	57
Power off	min	15
Värmeförlust Power on	MW	11
Värmeförlust Power off	MW	4
Post Combustion	%	40
Standard förbrukningstal		
Oxy-fuel NG brännare	kWh/charge	4000
Syrgas	Nm3/ton	15
Elektroder	kg/MWh	4.2
Vatten	m3/min	1
Standardkostnader		
Övrigt	EUR/ton stål	10
Slagghantering	EUR/ton slagg	30
Stofthantering	EUR/ton stoft	30

6.4 Priser och GWP för råvaror och energi

Priser och GWP för använda råmaterial anges i tabellerna 6.6-6.8. Pris på el, biomassa, naturgas vilka visas i [tabell 6.6](#) kommer tillsammans med kapitalkostnader, frakt och koldioxidavgifter vara alternativskiljande för framställning av DRI/HBI.

Tabell 6.6 Priser och GWP Scope 1, 2 och 3 för råvaror och energi med prisvariation.

Råvara med prisvariation		Pris (EUR)			GWP (kg CO _{2eq}) - Referens	
Reduktionsmedel	Enhet	Låg	Normal	Hög	Scope 3	
El	MWh	32	41	64	10	(EEA, 2019)
Biomassa	(GJ) MWh	(4.4) 16	(5.56) 20	(6.9) 25	3	
Naturgas	GJ (MWh)	1 (3.6)	5 (18)	12 (43.2)	5.6	
Vätgas elkostnad (verkningsgrad 63% i elektrolys)	GJ (MWh) [kg]	14,1 (50.8) [1.69]	18.1 (65.1) [2.17]	28,2 (101.6) [3.44]	4.4	

När det gäller att förstå värdet av DRI/HBI och hur det kommer utnyttjas så måste kvalitet och pris sättas in i ett framtidsscenario där det finns brist på rent skrot. I [tabell 6.7](#) har priserna för tackjärn och skrot relaterats till priset på DRI/HBI framställd med naturgas i MENA-regionen.

Tabell 6.7 Priser, kopparhalt och GWP Scope 3 för järnbärare för DRI/HBI och för stål.

Råvara utan prisvariation		Pris (EUR)	Fe utbyte	Cu (%)	GWP (kg CO _{2eq}) - Referens	
Järnbärare	Enhet	Normal			Scope 3	
DR-pellets	ton Fe	170 USD/ton Fe + 30 USD /ton pellets = 140 EUR/ton CIF		0.004	137	(Worldsteel,2021)
Importerad HBI för ljusbågsugn fritt svenskt verk	ton	450	91.5	0.006	0	Nollat vid CBAM
Verkstadsskot EAF (E2/E8-)	ton	HBI/0.9 = 500	95.3	0.25	0	Försummas
Tackjärn (nytt från masugn) C=4% , Si=0.5%	ton	1.1 * E2/E8- = 550	92.5	0.006	0	Nollat vid CBAM
X prima verkstadsskrot masugn (E2/E8+)	ton	1.2 * E2/E8- = 600	95.9	0.05	0	Försummas
Insamlingsskrot (E1/E3)	ton	0.8 * E2/E8- = 400	91.5	0.3	0	Försummas

När masugnarna i Europa stänger och ersätts av ljusbågsugnar så påverkar det tillgången på malmbaserat verkstadsskrot som normalt har mycket låga halter av spårämnen som koppar samtidigt som efterfrågan på rent skrot ökar. Denna kan delvis täckas genom en kombination av minskad export av skrot från EU och förbättrad upparbetning och sortering men tillförsel av järnråvara i form av järnsvamp och eventuellt tackjärn kommer bli nödvändig.

Beräkningarna för HBI i [kapitel 6.5](#) pekar på ett pris fritt verk i Sverige på 450 EUR/ton. Denna kostnad måste således täckas för att en långsiktig försörjning skall kunna säkerställas. Idag betalas HBI ungefär $0.9 \cdot \text{pris}$ för verkstadsskrot E2/E8 vilket ger ett skrotpris på $450/0.9=500$ EUR/ton. Vi väljer detta pris som riktmärke för en framtida skrotmarknad där HBI flödar in när verkstadsskrotet inte räcker.

På sikt kommer mängden spårämnen i verkstadsskrot E2/E8 att öka då allt fler stålsorter som tidigare gjordes från malmbaserat stål kommer komma från ljusbågsugnar med huvudsakligen skrotråvara. Masugnar kommer finnas kvar och vi kan därför tänka oss att en ny skrotklass E2/E8+ kommer komma fram. Pris för detta skulle kunna vara $1.2 \cdot \text{verkstadsskrot E2/E8}$ dvs 600 EUR/ton.

Enklare skrot betalas efter utbyte och förekomst av föroreningar och i denna beräkning antar vi ett enklare skrot med högre kopparhalt och mer ickemetalliska föroreningar till $0.8 \cdot \text{priset}$ för verkstadsskrot dvs 400 EUR/ton.

Slutligen kan vi som alternativ till järnsvamp tänka oss tillförsel av tackjärn från masugnar eller träkolsmasugnar. Tackjärn betalas historiskt $1.1 \cdot \text{pris}$ på verkstadsskrot vilket ger 550 EUR/ton. Vi antar att detta pris inkluderar eventuell CBAM och ETS varför detta inte förs in i resonemanget.

Övriga råmaterial, som visas i [tabell 6.8](#), är inte direkt alternativskiljande förutom kol som har högre förbrukning när järnsvampen är framställd med vätgas och inte kolats upp.

Tabell 6.8 Priser för övriga råmaterial och energibärare.

Råvara		Pris (EUR)	GWP (kg CO _{2eq} /enh)			GWP Ref.
Råvara utan prisvariation	Enhet	Pris (EUR)	1	2	3	
Kalk	ton	500			950	(Worldsteel,2021)
Dolomitkalk	ton	600			1100	(Worldsteel,2021)
Magnesittegel	ton	600			63.6	(Boenzi, 2019)
Kolpulver	ton	1000			360	(Arzpeyma, 2021)
Gasol	GJ	0.12	61		6.2	(Arzpeyma, 2021)
Elektroder	ton	4000			0.65	(Worldsteel,2021)
Syrgas	Nm3	0.05			0.005	Antar 0.5kWh
Vatten	m3	0.1			0	(Arzpeyma, 2021)

6.5 Kostnadskalkyler för DRI/HBI

Beräkningar för järnsvamp har gjorts med optimeringsverktyget RAWMATMIX® för fyra produktionslinjer som kan agera som typfall vilket presenteras i [tabell 6.9](#).

1. **NG (+H₂):** Produktion med naturgas i MENA + CBAM + Frakt till Sverige. Möjligheten att spä naturgasen med vätgas (Midrex Flex) finns men har inte tagits med i beräkningen.
2. **NG/CCS:** Produktion med naturgas i MENA + infångning och förvätskning av CO₂, CBAM och frakt till Sverige. Kostnad för borttransport och lagring av CO₂ har inte tagits med men är troligen lägre i MENA än andra lokaliseringar och torde ej överstiga 100 EUR/ton järnsvamp.
3. **H₂ (+NG):** Produktion med vätgas i Sverige + ETS för scope 2/3-utsläpp och lokal transport av DRI till stålverk. Kostnader för vätgaslager har ej tagits med. Uppkolning av järnsvampen med naturgas har inte heller den tagits med utan priset gäller en järnsvamp med högre järnhalt men utan kol vilken måste tillsättas i ljusbågsugnen.
4. **SG/CCS:** Produktion med biogen syngas med infångning och förvätskning av biogen CO₂ + ETS för scope 2/3-utsläpp och lokal transport av DRI. Eventuell intäkt från försäljning av biogen CO₂ har inte krediterats.

Tabell 6.9 Produktionskostnader för järnsvamp inklusive koldioxidavgifter och frakt till svenskt verk enligt fyra processvägar. För el, naturgas, biomassa och vätgas har medelpriserna i tabell 6.6 använts.

Järnsvamp	NG (+H ₂)	NG/CCS	H ₂ (+NG)	SG/CCS
Klimatavtryck CO ₂ eq/ton	0.865	0.3	0.23	0.198
Malm	188.67	188.67	192.52	188.67
NG	55.00	65.00		
El för H ₂			126.25	
Biomassa				66.72
El för anläggning	3.60	7.20	3.60	10.80
Övrigt	0.42	0.42	0.42	0.42
Summa rörliga kostnader	247.69	261.29	322.79	266.61
Fasta kostnader	20.76	23.35	30.13	25.15
Summa rörliga och fasta kostnader	268.45	284.64	352.92	291.76
Kapitalkostnader	40.74	47.36	64.68	51.94
Kostnad DRI vid DR-verk	309.19	332.00	417.59	343.70
ETS / CBAM	86.50	30.00	23.00	19.80
Kostnad efter CO₂-justering	395.69	362.00	440.59	363.50
Transport till stålverk	30.00	30.00	10.00	10.00
Kostnad vid stålverk	425.69	392.00	450.59	373.50

Idag ligger ETS-kostnaden på 60 EUR/ton CO₂, i beräkningarna har kostnaden uppskattats till 100 EUR/ton CO₂ medan många hävdar att den kommer stiga över 200 EUR/ton CO₂ inom en inte alltför avlägsen framtid. En sådan utveckling kommer tvinga fram vätgasinblandning i alternativet NG (+H₂) och på sikt få detta alternativ att närma sig alternativet H₂ (+NG). NG/CCS kommer med tillägg av lagringskostnader hamna kring 500 EUR/ton och i det perspektivet behövs det bara en höjning av ETS med drygt 50 EUR/ton CO₂ för att alternativet H₂ (+NG) skall bli jämförbart med naturgasalternativen. Den sista processlinjen SG/CCS visar sig konkurrenskraftig mot alla de övriga processlinjerna om hantering av biomassa kan göras på ett rationellt sätt.

6.6 Kostnadskalkyler för stål

I ett scenario där alltmer verkstadsskrot kommer från ljusbågsugnar ökar behovet av ren järnråvara. I beräkningsfallen i tabell 6.10 jämförs ett normalfall med en förmodad framtida E2/E8 från ljusbågsugn med fall där man tillsatt 10 ton av en råvara med låga halter koppar. Råmaterialanalyserna framgår av tabell 6.7 och målanalysen är 0.25% Cu.

Andelen verkstadsskrot på skrotmarknaden brukar av återvinningsföretagen uppges vara kring 40% medan det behov som räknats fram för referensfallet är närmare 60% vilket innebär en brist på verkstadsskrot. Genom inblandning av en begränsad del, 10 ton, mycket ren råvara kan andelen insamlingsskrot ökas och mängden verkstadsskrot E2/E8 – EAF minskas till en rimlig andel kring 35%. Vi kan alltså tänka oss en värdering mot verkstadsskrot E2/E8 utifrån energianvändning och produktivitet i ljusbågsugnen som idag och en komponent som beror på den fördelaktiga analysen och möjligheten att lasta mer orent skrot vilket ändrar dagens värderingsprincip.

Tabell 6.10 Optimerade produktionsdata för 100 ton stål med analyskravet %Cu < 0.25 där charger med 10 ton tillsats av tackjärn, HBI och verkstadsskrot från masugnslinjen jämförs med ett referensfall med endast verkstadsskrot från ljusbågsugn och insamlingsskrot.

Råstål i skänk		Referens	Tackjärn	HBI	X Prima
E2/E8 - EAF	ton/charge	61.00	34.53	35.53	37.31
E1/E3 Insamlingsskrot	ton/charge	43.51	60.96	60.32	57.64
Tackjärn	ton/charge		10.00		
NG (+H2) HBI	ton/charge			10.00	
E2/E8 + X prima	ton/charge				10.00
Kalk	ton/charge	1.58	1.61	1.67	1.65
Dolomit	ton/charge	1.72	2.36	2.33	2.07
Infodring	ton/charge	0.05	0.05	0.05	0.05
El	MWh/charge	49.03	48.73	51.44	49.69
Kolpulver	kg/charge	571.77	46.14	441.57	492.23
Slagg	kg/charge	7255.09	8528.60	8856.13	8102.29
Power on	min	51.62	51.29	54.15	52.30
Produktionskostnad	EUR/ton	599.96	590.09	592.00	601.17
Skillnad mot referens	EUR/ton		- 9.87	-7.96	1.21
Priskorrigerig för tillsats	EUR/ton		98.70	79.60	-12.10
Pris för tillsats	EUR/ton		550.00	450.00	600.00
Korrigerat pris (ViU)	EUR/ton		648.70	529.60	587.90
Korrigerad faktor mot E2/E8 -EAF	(-)		1.30	1.06	1.18

Intressant är att pridfaktorn som indikerar Value in Use, ViU, för tackjärn, järnsvamp och E2/E8 + från masugnsvägen borde ligga kring 1.3, 1.06 respektive 1.18 snarare än 1.1, 0.9 och 1.2 som antagits i kapitel 6.4.

För att bedöma vad en råvaruleverantör kan få för järnråvaran så måste kostnader för CBAM och ETS räknas från det korrigerade priset vilket naturligtvis beror på respektive produkts värde på utsläpp för scope 1-3. En tillsats på 10 ton tackjärn ökar klimatavtrycket med 0.186 CO_{2eq}. Om tackjärnet innehåller 4% C och i övrigt har ett klimatavtryck på 1.7 kg CO_{2eq}/kg. I detta exempel så blir då kostnaden för ETS för tackjärn c:a 18.6 EUR för en tillsats om 10 ton. Det korrigerade priset skulle således bli 648.7 – 18.6 = 630.1 vilket ger en faktor mot E2/E8-EAF på 1.26.

6.8 Slutsatser och diskussion

De två beräkningarna i detta kapitel är uppbyggda enligt samma princip. De utgår från ett referensfall och presenterar sen alternativ till detta där fokus har lagts på det som är just alternativskiljande. Tanken är att osäkerheter i indata skall ta ut varandra och att skillnaderna mellan alternativen skall vara signifikanta. Det är helt klart att de identifierade kostnaderna måste följas upp kontinuerligt och beräkningarna uppdateras löpande. Redan nu kan man använda resultaten för att förstå hur olika förändringar i kostnader kommer påverka metodernas konkurrenskraft.

6.8.1 Tillförsel av HBI

Produktion av järnsvamp med reformerad naturgas som utgör referensfall för HBI sker idag främst i MENA-regionen och det är nog därifrån vi kan vänta oss material för avsalu innan Ryssland åter kommer in på marknaden. Storleken på utsläppsrätter i framtiden kommer vara helt avgörande för konkurrenskraften hos lågutsläppande alternativ som produktion med naturgas och CCS, vätgas och biogen syngas.

Förutom osäkerheten kring utsläppsrätternas storlek så är kostnaderna för borttransport och lagring av koldioxid beroende av lokala förutsättningar vilket påverkar tolkningen av alternativ 2. Vi har därför valt att helt utelämna den tills det kommer bättre marknadsdata. Den som önskar ha ett värde kan lägga på 100 EUR/ton HBI som en rimlig övre skattning.

Förutsatt tillgång på elkraft så är vid vätgasreduktion den stora osäkerheten förhållandet mellan produktivitet, metallisering och gasutbyte vilket är välkänt för reduktion med reformerad naturgas men inte publicerats för vätgas. Den produktion som planeras i Stegras anläggning i Boden kommer ge oss de första indikationerna. Övriga osäkerheter är verkliga driftkostnader på större elektrolysörer över tid och funktion hos eventuella vätgaslager. Frågan om hur man hanterar HBI utan kol är aktuell men vi vet inte idag hur den kommer hanteras och har utelämnats.

Storskalig produktion av biogen syngas att användas som reduktionsmedel har även den inneboende osäkerheter även om själva reduktionen är identisk med reduktion med reformerad naturgas. Biomassa är ett material med varierande sammansättning och en anläggning måste kunna hantera detta. Då biomassan är voluminös är logistiken avgörande samtidigt som tillgången inte bedöms vara ett problem. Alternativ 4 har möjlighet till avsalu av biogen CO₂ men värdet av denna beror på kvalitén varför denna inte krediterats.

Den slutsats man kan dra är att den HBI som behövs inom EU troligen initialt kommer från normal naturgasbaserad produktion men att med ökande ETS och CBAM kommer ersättas av de övriga alternativen beroende på lokala förutsättningar. Vi kan även förvänta oss att processerna alltmer kommer likna varandra och optimeras utifrån lokala förutsättningar.

6.8.2 Ståltillverkning med begränsad tillgång till rent skrot

Järnråvara från malm vid stålproduktion i ljusbågsugn kommer få en ökad betydelse när konkurrens om rent skrot ökar. Med de förutsättningar som gäller i beräkningarna så gör en inblandning av 10% primär (malmbaserad) råvara att förhållandet mellan verkstadsskrot och insamlingsskrot får ett förhållande som kan motsvara den som marknaden erbjuder. Järnsvamp får i det fallet ett högre värde jämfört med verkstadsskrot från ljusbågsugn (1.06) än vad som ges av endast järninnehållet (0.9).

En annan viktig slutsats är att tackjärn framstår som ett fungerande alternativ vid en plötslig skrotbrist trots det högre klimatavtrycket. Slutligen så kommer skrot från masugnslinjen framgent ha ett högt värde.

6.9 Referenser

- Arzpeyma, 2021 Arzpeyma, Niloofar & Gyllenram, Rutger. (2021). RAWMATMIX Standard materials and energy sources 20210110. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32940.69760>
- Boenzi, 2019 Boenzi, Francesco & Ordieres-Meré, Joaquín & Iavagnilio, Raffaello. (2019). Life Cycle Assessment Comparison of Two Refractory Brick Product Systems for Ladle Lining in Secondary Steelmaking. Sustainability. 11. 1295. <https://doi.org/10.3390/su11051295>
- EEA, 2019 EEA, Greenhouse gas emission intensity of electricity generation, 2019, available online: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-10/#tab-chart_2
- Lockwood
Greene, 2000 Lockwood Greene, 2000. Ironmaking Process Alternatives Screening Study Volume I: Summary Report. <https://doi.org/10.2172/885549>
- Muslemani et al.
2024 Muslemani H., Craen S., Butterworth P., Duma D., Lambert M.: Ironing out the way for Green Steel - Financing a Green Hydrogen-based Ironmaking Plant in an Emerging Market, *Oxford Institute for Energy Studies*, OIES Paper: CM10, 2024
- Nurdiawati et al.
2023 Anissa Nurdiawati, Ilman Nuran Zaini, Wenjing Wei, Rutger Gyllenram, Weihong Yang, Peter Samuelsson: Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process, *Journal of Cleaner Production* 2023-03, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136262>
- Pissot 2021 Pissot S, Thunman H, Samuelsson P, Seemann M. Production of Negative-Emissions Steel Using a Reducing Gas Derived from DFB Gasification. *Energies* 2021;14:4835. <https://doi.org/10.3390/en14164835>.
- Platts 2024 Platts US Natural Gas Slides Sept2024 (private communication)
- Thunman 2018 Thunman et al, Advanced biofuel production via gasification – lessons learned from 200 man-years of research activity with Chalmers research gasifier and the GoBiGas demonstration plant, *Energy Science and Engineering* 2018; 6(1): 6–34, <https://doi.org/10.1002/ese3.188>
- Thunman 2019 Thunman et al, Economic assessment of advanced biofuel production via gasification using cost data from the GoBiGas plant, *Energy Sci Eng.* 2019;7:217–229, <https://doi.org/10.1002/ese3.271>
- Zaini et al. 2023 Ilman Nuran Zaini, Anissa Nurdiawati, Joel Gustavsson, Wenjing Wei, Henrik Thunman, Rutger Gyllenram, Peter Samuelsson, Weihong Yang: Decarbonising the iron and steel industries: Production of carbon-negative direct reduced iron by using biosyngas, *Energy Conversion and Management*, 2023-04, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116806>
- Worldsteel, 2021 Worldsteel, CO₂ Data Collection, User Guide, version 10, 2021, Available online <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/CO2-data-collection-user-guide-version-10.pdf?x98447>

7 Järn- och stålföretagens energiomställningsstrategier

I detta avslutande kapitel tar vi så en titt på hur företagen i järnmalms- och stålindustrin kommunicerar sina planer och åtgärder till följd av energiomställningen. Det är dock viktigt att komma ihåg att den information som sprids publikt är färskvara och i många fall förändras snabbt i takt med att förståelsen för klimatomställningsutmaningen djupnar.

Det har naturligtvis inte heller varit möjligt att följa samtliga företag som är verksamma i industrin. Fokus har lagts på de stora aktörerna och företag med intressanta initiativ. Nätet är också finmaskigare för de nordiska stålföretagens konkurrenter i Europa, särskilt de som idag är masugnsbaserade.

Eftersom den traditionella ”järn- och stålindustrin” (stålverken) är den dominerande källan till branschens CO₂-utsläpp kommer koncentrationen att ligga på denna del i förädlingskedjan, men något mer kortfattat berörs också de traditionella ”järnmalmsleverantörerna”. Dessa kommer sannolikt att behöva, där så är möjligt, förändra sitt produktutbud för att behålla konkurrenskraft i takt med att omställningen går vidare. Dessutom görs en kort sammanfattning av strategierna för de företag som specialiserar sig på att leverera de kritiska direktreduktionsanläggningarna för järntillverkningen, ”utrustningsleverantörerna”.

Företagen listas i alfabetisk ordning i respektive underkapitel.

7.1 Stålundustrins kommunicerade strategier

7.1.1 Traditionella stålföretag i Europa

De företag och verk som har sin hemvist inom EU har under en längre tid arbetat under EU's allt tuffare regelverk för energiomställningen. Det speglas också i företagens kommunicerade strategier och aviserade åtgärder:

ArcelorMittal (Europamål för scope 1&2: -35% till 2030, koldioxidneutrala till 2050). [1-10],

ArcelorMittal's strategi tycks ha tre axlar; en ”Smart carbon route” där masugnar fortfarande används men med minimerade CO₂-utsläpp, en ”Innovative hydrogen route” där DRI framställs genom vätgasreduktion och en ”Circular steel route” där skrot används som järnråvara. Man försöker utveckla ett antal standardteknologier som, baserat på lokala förutsättningar, ska kunna användas av verken i gruppen.

Det ska noteras att ArcelorMittal Europe's CEO, Geert van Poelvorde, i en intervju så sent som i februari 2024 säger att han med de under överskådlig tid förväntade prisnivåer på vätgas i Europa inte kommer att kunna stödja investeringar i vätgasbaserad ståltillverkning. Detta speglas också i de projekt som genomförts eller är under genomförande.

I november 2024 tillkännagjordes att företaget för sin europeiska verksamhet:

- Är mycket tveksamt till lönsamheten för vätgasbaserad DRI.
- Ser svårigheter att lönsamt implementera också naturgasbaserad DRI
- Kommer att avvakta ”final investment decisions” för DRI-projekt

Däremot tycks de verk som planerar satsningar på ljusbågsugnar som ersättning för masugnar/syrgasstålsugnar kunna fortsätta arbeta på dessa projekt.

Två konkreta energiomställningsprojekt som till dags dato färdigställts eller är under genomförande är:

I belgiska Gent har en torrefieringsanläggning för framställning av biokol och en CCU-anläggning för tillverkning av bio-etanol tagits i drift vid en av de två masugnarna. Anläggningen är dock av begränsad storlek.

I spanska Gijon har bygget av en 1.1 Miljoner ton per år ljusbågsugn påbörjats. Den ska försörja de anläggningar i Gijon som tillverkar långa produkter och ersätter en masugn.

I övrigt kommunicerar verken i gruppen olika lösningar för hur man långsiktigt avser närma sig fossilfri produktion: Verk för verk har följande åtgärder kommunicerats men investeringsbeslut saknas ännu:

- Gent, Belgien (ca 5 miljoner ton per år)
 - En masugn nyttjar biokol framställt genom torrefiering. Denna CO₂ ”avskiljs” från masugns gasen och används för produktion av etanol i en bakteriell process (LanzaTech). Produktionen har påbörjats 2023/2024.
 - Den andra masugnen ersätts med ett 2.5 miljoner ton per år DRI-torn och två konventionella ljusbågsugnar. DR-schaktet ska köras på naturgas och/eller vätgas. Investeringskostnaden uppskattas till 2 b€ och tycks ha beviljats ett stöd på 280 m€ från den belgiska staten.
- Gijon, Avilles och Sestao, Spanien (ca 4 miljoner ton per år)
 - Det första steget omfattar en 1.1 Miljoner ton per år ljusbågsugn för långa produkter. Byggnationen av ugnen har påbörjats och leds av ingenjörsföretaget Saralle. Investeringskostnaden uppges till 213 M€.
 - Långsiktigt installeras ett 2.3 miljoner ton per år DRI-schakt installeras i Gijon. Detta förser Sestao's befintliga ljusbågsugn och Gijons nya ljusbågsugn med DRI. Investeringskostnaden för det totala projektet har uppgetts till 2.2 b€.
 - Gijon har erhållit 450 m€ från spanska staten.
 - I dagsläget verkar konkurrenskraftig vätgas inte kunna tillverkas i Spanien så sannolikt kommer naturgas att användas initialt.
 - Inga planer har än offentliggjorts för komplexets resterande masugnsproduktion.
- Hamburg, Tyskland (ca 700 tusen ton per år)
 - Det mindre, befintliga DRI-tornet byggs om till en 100 tusen ton per år pilotanläggning för vätgasreduktion med startår 2025 men nu tycks vätgastillförseln vara ifrågasatt. Har erhållit 55 M€ från tyska staten, 110 M€ i total investering.
 - Det större befintliga DRI-tornet med en kapacitet på närmare 600 Miljoner ton per år byggs om i ett andra steg.
- Duisburg, Tyskland (ca 500 tusen ton per år)
 - Ersätter sitt BOF-stålverk (som idag köper externt råjärn) med ljusbågsugn. Räknar möjligen med att jämte skrot kunna få vätgasreducerad DRI från Hamburg.
- Bremen, Tyskland (ca 3 miljoner ton per år)
 - Ersätter en masugn med ett DR-schakt och sannolikt två ljusbågsugnar. Om investering sker i DR-schaktet kommer det sannolikt att inledningsvis köras på naturgas. Har erhållit 1,3 b€ från tyska staten och regionen för projektet (i vilket också inkluderas Eisenhuttenstadt).
 - I ett senare skede planeras för DRI-produktion från vätgas. Det har nämnts att vätgasen kan komma från ”Verbunds Hydrogen Coastal Pipeline”.

- Eisenhuttenstadt, Tyskland (ca 1,5 miljoner ton per år)
 - Räknar med att stänga sina två masugnar och övergå till ljusbågsugnstillverkning. Sannolikt en ljusbågsugn, men två nämns i vissa källor.
- Dunkirk, Frankrike (ca 5 miljoner ton per år)
 - En pilotanläggning för ”carbon capture” med aminer (teknologi från Axens) har uppförts vid en av masugnarna. Har också samarbete med Equinor’s projekt Northern Lights för CCS.
 - Räknar med att ersätta två av tre masugnar med direktreduktion till 2026. DRI-anläggningen på 2.5 Miljoner ton per år matar två ljusbågsugnar. Franska staten stödjer projektet med 850 m€.
- Fos sur Mer, Frankrike (ca 3 miljoner ton per år)
 - Verket blir skrotbaserat med två ljusbågsugnar. Första ugnen på plats före 2030. Studerar också CCUS.
 - Det uppges att franska staten kommer att stödja ArcelorMittal med totalt 1,7 b€ för omställningsprojekten i Dunkirk och Fos.
- Dabrowa Gornica, Polen (ca 3 miljoner ton per år)
 - Räknar med att ersätta sina tre masugnar med DRI-H2. Konkreta planer ej kommunicerade.

ArcelorMittal samarbetar dessutom med det belgiska företaget John Cockerill om att utveckla lågtemperaturelektrolys av järnmalm i den s.k. Volteron-processen. Det producerade järnet smälts i ljusbågsugn. Man bygger utvecklingen på resultaten från det EU-stödda projektet Siderwin och har som avsikt att från 2027 tillverka mellan 40 och 80 tusen ton per år som i ett senare steg ska skalas upp till mellan 300 och 1000 tusen ton per år.

Det bör också nämnas att ArcelorMittal i Europa för närvarande köper upp aktörer i leveranskedjan för skrot till stålindustrin, via sitt affärsområde AMDS. Hittills har aktörer med en sammanlagd insamlingskapacitet på 1.3 Miljoner ton per år köpts upp i Europa och UK.

Ovako (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2022). [3, 11-12]

Ovako är idag ett skrotbaserat stålföretag med anläggningar i Sverige och Finland (ca 1 miljoner ton per år). Verket i Hofors har varit ledande för fossilfria teknologier av vilka särskilt kan nämnas:

- Hofors, Sverige
 - Grön el för smältning, valsning, värmning etc.
 - 20 MW elektrolysöranläggning (Nel Hydrogen) för vätgasproduktion tagen i drift.
 - Ämnesvärmning till 1200 C med vätgas.
 - Elektrisk värmning för värmebehandling (<1000C)

Salzgitter (Mål för scope 1&2: -95% till 2033). [13-20]

Salzgitter driver sedan 2015 utvecklingsprogrammet SALCOS (Salzgitter Low CO₂ Steelmaking) och räknar med att ersätta sina tre masugnar, 4,7 miljoner ton per år, med två DR-schakt och tillhörande ljusbågsugnar.

- Salzgitter, Tyskland
 - En 1.9 miljoner ton per år ljusbågsugn har upphandlats av Primetals och ska vara i drift 2025.
 - Har beställt det första DR-schaktet med en kapacitet på 2,1 Miljoner ton per år från Tenova/Danieli/HYL - Energiron ZR. Idrifttagning förväntas 2026.
 - DR-schaktet kommer initialt att köras på naturgas med möjlighet att addera upp till ca 5% vätgas från egen 100 MW elektrolysoranläggning från Andritz och Hydrogen Pro.
 - Hela verket beräknas vara omställt till DR-drift 2033.
 - Erhåller stöd på 1 b€ från den tyska staten.

SSAB (Mål för scope 1&2: till största del fossilfria kring 2030). [18, 21-24]

SSAB's strategi är att lägga ned sina masugnar i Sverige och Finland, totalt ca 5 miljoner ton per år, och uppföra minimills med ljusbågsugnar. Vätgasreducerad DRI kommer att levereras från "Hybrit's demo-anläggning" och från de andra DRI-anläggningar LKAB avser att bygga.

- Oxelösund, Sverige
 - Investering i 280 tons ljusbågsugn (chargevikt 190 ton) som kommer att tas i drift Q4 2026. Chargeras sannolikt med främst skrot initialt och i ett senare skede DRI från Hybrit/LKAB's demonstrationsanläggning i Gällivare. Behåller övriga anläggningar för grovplåttillverkning. Investeringskostnaden uppges till drygt 6 miljarder SEK.
- Raahe, Finland och Luleå, Sverige
 - Minimills för bandtillverkning via ljusbågsugnar uppförs omkring 2028-2030. DRI från LKAB's anläggningar.
 - Investeringskostnaden i Luleå beräknas till 4,5 b€ och stöd från EU och staten erhålls med 145 M€.

Stahl Holding Saar (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2045). [25-30] Figur 7.1.

SHS är holdingbolaget för Saarlands järn och stålindustri. Dotterbolaget Rogesa har två masugnar, ca 4 miljoner ton per år, och levererar råjärn till verken i Dillingen och Völklingen. Har nyligen installerat anläggningar för koksugns gasinjektion i sina masugnar.

SHS kommer att lägga ned en 2 Miljoner ton per år masugn och installera ett DR-schakt hos Rogesa (2 Miljoner ton per år, SMS/Midrex Flex) och dessutom två ljusbågsugnar, en i vardera Dillingen och Voelklingen. Schaktet körs initialt på naturgas och förhoppningsvis en mindre mängd vätgas som levereras via pipeline. Investeringskostnaden för den första fasen anges till 4.6 b€ och den tyska staten och delstaten bidrar med stöd på 2,6 b€. Ljusbågsugnen i Dillingen levereras av Primetals och den i Voelklingen på 190 ton (transformator 300 MVA) av SMS. Den senare ska enligt plan tillverka sin första smälta under september 2028.

Den andra masugnen läggs ned innan 2035 och man kommer att köpa skrot och DRI från externa källor för att kunna framställa knappt 5 Miljoner ton per år råstål.



Figur 7.1. Det DR-schakt och den EAF som SHS avser installera hos Rogesa och Dillingen.

Tata Europe (Mål för scope 1&2 i Holland: -35% / -40% till 2030, i England -30% till 2030, koldioxidneutrala till 2045). [18, 31-34]

Tata Europe Holland benämner sitt utvecklingsprogram Zeremis. Man avbröt 2021 de utredningar som initierats avseende CCS i Nordsjön från befintliga masugnar i Ijmuiden. Enligt uppgift på grund av att folkopinionen i Ijmuidens närhet inte tolererar emissionerna från koksverk, sinterverk och masugnar.

- Ijmuiden, Holland (ca 5 Miljoner ton per år)
 - Ett första av två DRI-schakt ska vara taget i drift före 2030. Danieli/Tenova (Energiron Alliance) är leverantör. Schaktet ska initialt kunna köras på naturgas men det ultimata målet är vätgas. DRI-schakten planerades initialt förses smelters för tillverkning av råjärn till befintliga syrgasstålkonvertrar, men det tycks nu som att det första schaktet kommer att mata en ljusbågsugn (325 ton – 2.6-2.8 Miljoner ton per år – 180 MW - Tenova). Man räknar med att få delar av sin elförsörjning från TenneT's havsbaserade vindkraftsparken.

Den andra masugnen ersätts efter 2030 och kommer sannolikt att mata två elektriska smältugnar för produktion av råjärn.

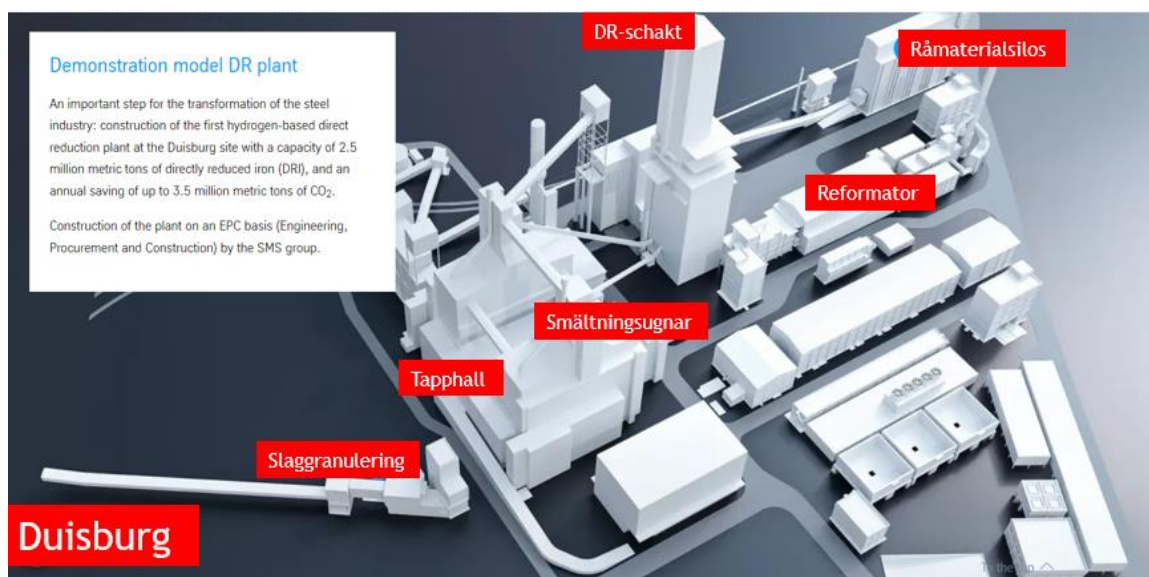
Stöd från EU och den nederländska uppges uppgå till 3 b€.

- Port Talbot, England (ca 3 Miljoner ton per år)
 - Kommer att avveckla båda sina masugnar under 2024 och ersätta dessa med en ljusbågsugn (Tenova, 450 ton/h). Investeringen uppgår till 1,25 M£ och erhåller stöd från den brittiska staten på 580 M£.

ThyssenKrupp Stahl (Mål för scope 1&2: -30% till 2030, koldioxidneutrala till 2045). [18, 35-41]
Figur 7.2.

Thyssen arbetar efter två utvecklingslinjer; 1) DRI från vätgas; 2) ”Carbon to Chem”. Fullt omställda räknar man med att tillverka hela sitt järnbehov, drygt 10 miljoner ton per år, med vätgasreduktion.

- Duisburg, Tyskland
 - Har i försök studerat vätgasinjektion i masugn, men drar slutsatsen att volymerna kommer att vara begränsade.
 - ”Carbon to Chem” från befintliga masugnar fokuserar på produktion av ammoniak och metanol.
 - Räknar med att ha ett första 2.5 Mton DRI-schakt i drift 2027. SMS/Paul Wurth/Midrex är kontrakterade och schaktet blir av typ Midrex-Flex. Initialt används naturgas. Schaktet ska i den senast kommunicerade planen fördes med två smelters och befintligt konverterstålverk används. Thyssen har dock under hösten 2024 sagt att de omprövar sin ursprungliga plan p.g.a. för höga kostnader. Detaljer angående den modifierade planen har ännu ej publicerats men innebär sannolikt att smältugnarna som avsågs tillverka råjärn inte byggs utan ersätts med en eller flera ljusbågsugnar.
 - Vätgasleveranser via pipeline förväntas i ett senare skede. Investeringssumman anges till 3,3 b€ och stödet från den tyska staten till 0,55 b€ samt 1,45 b€ för täckande av ökade driftkostnader. Period för detta oklar.
 - Nästa DRI-schakt kommer kring 2030 och därefter ytterligare 2 schakt fram till 2045.
 - Har bland annat följande samarbeten för framställningen av vätgas: BP (blå och grön vätgas), Equinor (blå och grön vätgas); Steag (500 MW elektrolysör).



Figur 7.2 Thyssens första direktreduktionsanläggning i Duisburg som den presenteras på bolagets hemsida (inklusive förklarande text på svenska).

Voest Alpine (Mål för scope 1&2: -30% till 2030, koldioxidneutrala till 2050). [18, 42-45]

Voest har beslutat att deras fyra masugnar successivt ska läggas ned och ersättas med ljusbågsugnar. Dock är försörjningen av järnråvara, ca 5 miljoner ton per år, till ljusbågsugnarna fortfarande under diskussion.

- Linz och Donawitz, Österrike
 - 2 masugnar kommer att läggas ned före 2030, en i Linz och en i Donawitz.
 - Ljusbågsugnarna (Linz - 1600 tusen ton per år/180 ton/ca 1 b€/ Primetals, Donawitz - 850 tusen ton per år/450 M€/ Danieli) kommer att chargerats med skrot och DRI. 420 tusen ton per år DRI kommer att köpas från den DRI-anläggning i Texas där man nu sålt majoritetsandelen (80%) till ArcelorMittal, men fortfarande äger 20%.
 - Man ser tillgången på grön elenergi för vätgasreduktion i Österrike som ett problem.
 - Arbetar med flera mer långsiktiga projekt för vätgas: Pyrolys av naturgas, HYFOR fluidbäddreduktion, SUSteel plasmastödd vätgasreduktion m.fl.

7.1.2 Nya och unga stålföretag i Europa

Blastr-green steel [46-49]

Ungt norskt bolag som har en inledande finansiering säkrad för fullföljande av en ännu ej tydligt kommunicerad plan.

- Planerar för ett 6 Miljoner ton per år pelletsverk, sannolikt i Redcar på engelska nordsjökusten. Investeringskostnad 1.2 b€. Har även tittat på lokaliseringar i Norge.
- Planerar dessutom för ett 2.5 Mton stålverk i Ingå, Finland. 2 Miljoner ton per år DR-schakt med Midrex-Flex teknologi från Primetals. 300 ton AC EAF. Lokaliseringen har valts p.g.a. dess goda anslutning till elnätet och man räknar med att förbruka 6 TWh per år.
- Verket ska reducera CO₂ utsläppen med 95% jämfört med traditionell ståltillverkning och investeringskostnaden uppges till 4 b€.

GravitHy [50,51]

Ungt franskt bolag med välrenommerade ägare. Planerar för DRI-tillverkning med vätgas.

- Fos sur Mer, Frankrike
 - Planerar för ett 2 Miljoner ton per år DRI-H2 verk som ska producera DRI/HBI. HBI'n beräknas kunna avsättas till kunder såväl i Frankrike som på den internationella marknaden. Byggstart 2026 och driftstart 2028. Investeringskostnad 2.2 b€.
 - Har kontrakterat det spanska företaget IDOM för "basic engineering". Har också ett "letter of intent" med franska EDF avseende kärnkraftsel för delar av sitt elbehov. Man samarbetar också med Vale för att utvärdera möjligheterna att tillverka kallbundna järnmalmshbriketter i Fos.

Hybrit/LKAB [18,52,53]

Ungt utvecklings och teknik-bolag helägt av LKAB, SSAB och Vattenfall. Utvecklar tekniker för produktion av vätgas-reducerad DRI.

- Luleå, Sverige (Hybrit)
 - Idrifttagen DRI-H2 pilotanläggning med schaktugnskoncept som resulterat i ett antal godkända patent inom området. Projektet avslutades 2024.
- Gällivare, Sverige (LKAB)
 - LKAB, som avser nyttja Hybrits resultat från pilotanläggningen, arbetar på en 1.35 Mton DRI-H2 demo-anläggning. Miljötillstånd förväntas hösten 2025 varefter ett slutgiltigt investeringsbeslut kan tas.
 - Ugnen ska leverera DRI till SSAB Oxelösund.
 - 500 MW elektrolysörer för tillverkningen av vätgas.
 - Beräknar investeringskostnaden till 16 miljarder SEK (1,5 b€). Har tidigare erhållit 143 M€ från EU's innovationsfond. Under 2024 har stöd på 3,1 miljarder SEK från Energimyndigheten beviljats.

Hydnum Steel [54]

Planerar för ett 2,6 Miljoner ton per år stålverk i Puertollano, Spanien. Första etappen inkluderar ett ljusbågsugnsbaserat minimill för varmvalsade band. I ett andra och tredje steg byggs ett DR-schakt för vätgasreduktion och kallvalsningsanläggningar. Samarbetar med Vale för att utvärdera om kallbundna järnmalmsbriketter kan användas i DRI-schaktet.

Stegra (tidigare H2 Green Steel) [18, 55-57]

Bolaget avser uppföra ett "greenfield" fossilfritt stålverk. Har under de senaste åren erhållit betydande finansiering för projektutvecklingen.

- Boden, Sverige
 - Har kommunicerat att projektet genomförs i två etapper och att slutmålet är ett 5 Miljoner ton per år stålverk för produktion av varma och kalla band.
 - För utveckling av första etappen har SMS/Paul Wurth/Midrex kontrakterats. Anläggningen inkluderar ett 1,8 Miljoner ton per år DRI-torn - Midrex-H2 - med elektrisk värmning av vätgasen. Man installerar också 700 MW elektrolysörer från Thyssen Krupp Nucera. Produktionen ska rampa upp under 2026.
 - Malmförsörjning från Vale, Brasilien och Rio Tinto, Kanada utreds.
 - PPA-kontrakt med norska Statkraft om 2 TWh fossilfri el per år, i 7 år. Har dessutom aviserat tillförsel med 2,3 TWh/år från Fortum, 0,75 TWh/år från Axpo och 1 TWh/år från Uniper.
 - Under tiden stålverket rampas upp kommer vätgas och HBI sannolikt att saluföras på marknaden.
 - Har erhållit stöd på 265 m€.

7.1.3 Traditionella japanska och koreanska stålföretag

Såväl Korea som Japan har förbundit sig att vara koldioxidneutrala till 2050. Därför har de koreanska och japanska järn- och stålföretagen relativt välutvecklade planer för hur deras omställningar ska genomföras. Det bör noteras att de stora stålverken i länderna är förhållandevis moderna och att masugnsflottorna, som dominerar, sannolikt har en betydande teknisk livstid kvar.

Hyundai Steel (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2050). [58, 59]

Hyundai Steel producerar årligen knappt 25 Mton stål i såväl masugnar (ca 50%) som ljusbågsugnar (50%) på tre platser i Korea - Danjing, Pohang och Gwanyang.

Utvecklingen planeras ske i etapper:

- Minimering av utsläppen från masugnar genom chargering av reducerat järn och användning av lågkolhaltiga reduktionsmedel (COG, NG, H₂). Dessutom återanvändning av CO från toppgas.
- Användning av i ljusbågsugn "försmält järn" i syrgasstålugnarna.
- Utveckling av hybrid-EAF teknologi (se nedan).
- Vätgasreduktion i ett senare skede

Man kallar sina "egenutvecklade" ljusbågsugnar för Hy-Arc. Dessa kommer nu att vidareutvecklas till en teknologi man benämner Hy-Cube (H³ = Hyundai Hydrogen Hybrid). Ugnarna kommer flexibelt att kunna chargerar med såväl skrot, DRI som masugnsråjärn. Detaljerna i denna teknologi har ännu inte tydligt kommunicerats men produktionssystemet förväntas få en första implementering till omkring 2030.

JFE (Mål för scope 1&2: -30% till 2030, koldioxidneutrala till 2050). [18,60]

JFE, som idag producerar drygt 25 miljoner ton per år, följer de nationella japanska strategierna utarbetade av METI (Ministry of Economy, Trade and Industry). Under innevarande årtionde kommer man att försöka minska CO₂-utsläppen genom energibesparingsåtgärder i befintliga anläggningar liksom ökad skrotanvändning, för perioden 2030-2040 kommer arbetet att koncentreras på åtgärder som koksugns gasinjektion, ytterligare ökad skrotanvändning, stora högproduktiva ljusbågsugnar, CCUS mm.

Det är intressant att notera att JFE etablerat ett samarbete med Emirates Steel Arkan och Itochu i Förenade Arabemiraten, där man tycks satsa på byggnation av en DRI-anläggning där reduktionsmedlet är naturgas och där CO₂-utsläppen sekvestreras i tidigare gas och oljefyndigheter. Den producerade järnsvampen ska levereras till Japan. Likaså undersöker man konkurrenskraftig CO₂-infångning från befintliga masugnar i Japan för vidaretransport och lagring i Malaysia.

Vad gäller CCU planerar man för en liten experimentell masugn i East Japan Works, Chiba, där man kommer att undersöka möjligheterna till framställning av syntetiskt metan från recirkulerad CO₂ och externt tillförd vätgas. Metanet kommer därefter att återinjiceras i masugnen

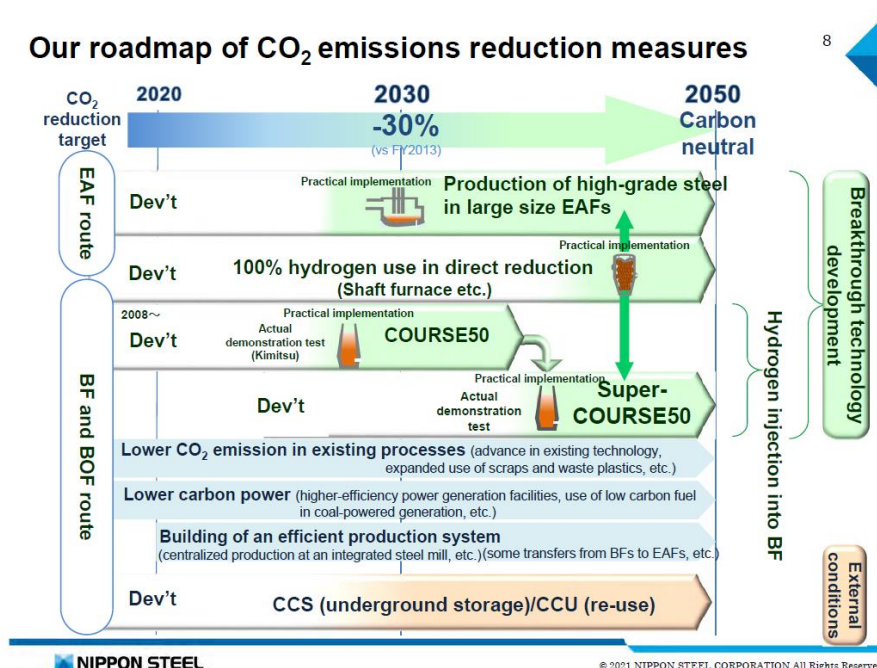
CCU för tillverkning av syntetiska bränslen utreds också och här är avsikten att förlägga tillverkningen i Australien där man räknar med att kunna tillverka konkurrenskraftig vätgas.

Ultimat ser man under decenniet 2040 till 2050 en nära nog fullständig övergång till skrotsmältning och vätgasbaserad järnmalmsmetallurgi. Vätgasen kommer sannolikt tillverkas externt och i många fall importeras.

Nippon Steel (Mål för scope 1&2: -30% till 2030, koldioxidneutrala till 2050). [18, 61]. Se figur 7.3.

Men en total produktion på ca 50 miljoner ton per år i Japan och dessutom verksamhet i länder som Indien, Sverige, Brasilien och USA arbetar den japanska delen av företaget efter de av METI (Ministry of Economy, Technology and Industry) nationellt uppdragna strategierna.

Detta innebär att man försöker minska CO₂-utsläppen från befintlig masugnsproduktionen i ett program benämnt COURSE 50 där energieffektiviseringar, koksugns gasinjektion, DRI-användning i masugn, CCUS etc. spelar nyckelroller.



Figur 7.3 Nippon Steel «Green Steel Initiative»

Man utreder också hur ljusbågsugns teknologi (smelters och ljusbågsugnar) kan införlivas i högproduktiva konverterstålverk.

I ett uppföljarprogram benämnt SUPERCOURSE 50 kommer DRI-tillverkning med vätgasreduktion, maximal vätgasanvändning i masugnarna liksom skrotsmältning att spela en allt större roll. Om implementerad, kommer vätgasen sannolikt att vara externt införskaffad.

Man utreder även utlokalisering av reduktionsanläggningar till Australien och Brasilien.

Hela omställningen förväntas kosta 30-40 b\$.

I det fall de planerade åtgärderna inte leder till koldioxidneutralitet kommer resterande utsläpp att neutraliseras genom köp av credits och offsets.

Posco (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2050). [18,62]

Posco satsar på två tillverkningsvägar för sina ca 40 miljoner ton per år. Järnmalm-baserad tillverkning kommer i framtiden att ske med den fluidbäddsbaserade vätgasreduktions-teknologin Hyrex som utvecklas tillsammans med Primetals (en del av Mitsubishi group). Erfarenheterna dras från de tidigare installerade Finex-anläggningarna. Vätgas kommer sannolikt att importeras. De fluidiserande bäddarna kommer att följas av smelters och de befintliga konverterstålverken utnyttjas.

Ljusbågsugnar för ny skrotbaserad (och möjligen HBI-baserad) tillverkning kommer att dessutom att installeras.

- Hyrex fluidbäddsutveckling:
 - 2021-2025 Hyrex lab-/pilot-utveckling
 - Demonstrationsanläggning: design startar 2024, försök från 2026-2028.
- Pohang, Korea
 - En ny ljusbågsugn för skrot/HBI-smältning kommer att installeras 2027.
 - Kommersiell Hyrex-anläggning: ombyggnad av den äldre Finex-anläggningen (1.5 miljoner ton per år) till Hyrex (1.0 miljoner ton per år) under 2028-2030.
 - Därefter fortsatt omställning av masugnar till Hyrex.
- Gwangyang, Korea
 - En ny ljusbågsugn för skrot/HBI-smältning kommer att installeras 2025.
 - Därefter ersättning av masugnar med Hyrex-anläggningar.

Posco har dessutom stålverk i Indonesien och i Indien. För dessa finns uppgifter om att de kommer att förses med DRI-ugnar inom 5 år. Reduktionsmedel ännu okänt. Man tittar också på möjligheten att uppföra ett 2 Miljoner ton per år direktreduktionsverk i västra Australien för produktion av HBI.

7.1.4 Traditionella kinesiska stålföretag

Kina har förbundit sig att vara koldioxidneutralt till 2060. Man har dessutom en ung masugnsflotta som har många års teknisk livstid kvar. Kina var också relativt sena i att annonsera mål för energiomställningen. Detta innebär att kinas stålindustri till nyligen inte annonserat planer och strategier. Dessa har dock börjat kommuniceras under senare tid.

Baowu (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2060). [3,18,63]

Världens största stålföretag, Baowu, med en produktion på närmare 120 miljoner ton per år, kommunicerar tre primära utvecklingsvägar för att bli koldioxidneutrala till 2060:

- 1) Den optimerade masugnen (HyCrof) vilken utnyttjar flera nya teknologier; recirkulering av CO, vätgasinjektion, pellets tillverkade av järnmalm och biomassa, CCUS och ökad skrotinsmältning i konverter.
- 2) Av biomassa delvis förreducerad järnmalm. Mikrovågsvärmning utnyttjas vid reduktionen. Den förreducerade malmen tror man ska kunna laddas i nuvarande masugnar eller HyCrof-ugnar.
- 3) Vätgasreducerad DRI.

Av konkreta åtgärder kan nämnas att man i augusti 2022 tog en HyCrof-försöksugn i drift där man avser pröva recirkulering av CO med tillsats av vätgas. På detta sätt tror man sig kunna minska koldioxidutsläppen med 25-30%.

I Zhanjiang har man också installerat en ny DRI-ugn (Energiron) som togs i drift i årsskiftet 2023/2024. Ugnen körs initialt på naturgas men i senare steg också på naturgas-koksugns gas-vätgas för att ultimata möjligen gå över till vätgas.

HBIS (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2060). [18,64,65]

Med en kapacitet av dryga 40 miljoner ton per år är HBIS Kinas till storlek fjärde ståltillverkare. Kommunicerade åtgärder är fåtaliga men man har nyligen tagit en 550 ktpy DRI-anläggning (Energiron) i drift i Zhangjiakou som successivt kommer att gå från ”konventionella reduktionsgaser” mot allt högre andelar vätgas. Man räknar på detta sätt med att sänka CO₂-utsläppen till i storleksordningen 250 kg CO₂/ton DRI.

Andra stora kinesiska stålföretag (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2060).

Det bör noteras att andra mycket stora kinesiska järn- och stålföretag ännu inte tydligt har kommunicerat hur de ska tackla energiomställningen. Till dessa hör: Ansteel (55 miljoner ton per år), Shagang (45 miljoner ton per år) och Shougang (35 miljoner ton per år).

7.1.5 Traditionella indiska stålföretag

Indien har förbundit dig att vara klimatneutralt till 2070 och få, eller inga, konkreta åtgärder har till dags dato kommunicerats. Däremot finns tendenser till att planer håller på att skapas liksom några enstaka konkreta åtgärder.

Tata Steel (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2070) [66]

Kommunicerar att man utreder möjligheten att uppföra en Easymelt ugn (ny teknologi under utvecklande av SMS/Paul Wurth) i Jamshedpur. Det hävdas att men med denna teknik, ett schakt där man i princip placerar en direktreduktionsugn (till del chargerad med koks) över en smältugn som får ytterligare nödvändig värme från plasmabrännare, kraftigt kan minska koldioxidutsläppen vid produktion av flytande råjärn (cirka en femtedel).

JSW Steel (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2070). [18,67]

JSW, med en produktion på knappt 20 Miljoner ton per år, har i sin ”roadmap” för energiomställningen angett följande prioriterade områden. 1) Energieffektivisering i befintliga processer 2) CCUS 3) Förbättrade råmaterial 4) Alternativa reduktionsmedel. I de prioriterade områdena ingår mer konkret en större andel förnybar elkraft, ökad användning av skrot och förbättrad kvalitet på lågvärdig järnmalm genom ökad anrikning.

AMNS India (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2070).

Avslutningsvis bör dock påpekas att AMNS India, som för närvarande tillverkar knappt 10 Miljoner ton per år i Indien, i sina ambitiösa expensionsprojekt för att expandera till närmare 25 Miljoner ton per år stålproduktion, tycks satsa på masugnsteknologi.

*7.1.6 Ett nytt stålföretag i MENA-regionen***Vulcan Green Steel** [68]

Är ett nytt stålföretag ägt av Jindal Shadeed Iron and Steel Company, som projekterar ett 5 Miljoner ton per år DR-baserat stålverk i Oman (två linjer om vardera 2.5 Mton med en investeringskostnad på 3 M\$). Man tror att det med Omans goda sol- och vindförutsättningar ska vara möjligt att på sikt framställa konkurrenskraftig vätgas som kan användas för DRI-produktionen. Dock kommer produktionen inledningsvis att använda naturgas.

Det kan i sammanhanget nämnas att Jindal Shadeed är i diskussioner om att överta tjeckiska Vitcovice Steel och att Vitcovice tecknat sig för att köpa ca 1 Miljoner ton per år DRI från Vulcan Steel,

7.1.7 Traditionella kanadensiska stålföretag

Kanada har liksom EU en stram lagstiftning vad gäller energiomställningen. Därför liknar strategierna och åtgärderna för de malmbaserade verken mycket de som vi ser i Europa.

Algoma (Mål för scope 1&2: -70% till 2025). [69,70]

Algoma övergår från malmbaserad till skrotbaserad tillverkning.

- Sault St Marie (ca 4 Miljoner ton per år)
 - Investerar 700 mCAD i två ljusbågsugnar (3,7 Miljoner ton per år) som kommer att tas i drift under 2024. Danieli levererar två 250 tons-ugnar (2*190 MVA).

ArcelorMittal (Koncernmål för scope 1&2: -25% till 2030, koldioxidneutrala till 2050). [3,18,71]

ArcelorMittal har två stålverk i Kanada som båda tycks röra sig mot vätgasbaserad DRI-framställning

- Contrecoeur (ca 1 Miljoner ton per år)
 - Har ersatt 7% av naturgasbehovet med vätgas i en av sina två befintliga DRI-torn under en försökskampanj. Räknar sannolikt med vätgasreduktion långsiktigt.
- Hamilton (ca 4 Miljoner ton per år)
 - Planerar för 2 Miljoner ton per år DRI och 2.4 Miljoner ton per år EAF-stål från 2028. Investeringskostnad 1.8 b\$ varav 0,9 b\$ erhålls i stöd från kanadensiska staten. DRI-anläggningen kan köras på naturgas initialt men byggs för vätgasreduktion.

7.1.8 Traditionella stålföretag i USA

Den amerikanska stålindustrin skiljer sig från mycket av världen i övrigt i och med att den till närmare 80% är skrotbaserad.

Nucor (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2022, CO₂-utsläpp – 35% till 2030). [72]

Nucor som producerar drygt 20 miljoner ton per år i ett 15-tal ljusbågsugnsbaserade ”mini-mills” har redan förklarat sig koldioxidneutrala i vad man kallar ”Equonic”-initiativet. Neutraliteten uppnås genom uppköp av ”carbon credits”. Man kommer dock att fortsätta minska sina CO₂-utsläpp genom bl.a. avtal om leveranser av grön el. Dock är ambitionsnivån måttlig. Man har uppgett att utsläppen ska minska från 1,1 till 0,9 ton CO₂/ton stål under åren fram till 2030.

Nucor samarbetar också med Exxon Mobile för att genomföra CCS från deras 2.5 Miljoner ton per år DR-schakt i Convent, Louisiana. Den infångade mängden bedöms bli 800 tusen ton per år och infångningen beräknas starta 2026.

Cleveland Cliffs (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2022, CO₂-utsläpp – 25% till 2030). [73]

Cliffs är det amerikanska stålbolag som har flest masugnar i drift. Totala produktionen uppgår till ca 16 miljoner ton per år. Man är integrerade med gruvor i Minnesota och Michigan, flera av dem med magnetitmalmer.

Förutom masugnarna, som huvudsakligen ligger vid de stora sjöarna med verk som Indiana Harbor och Burns Harbor, har man också ett nytt DRI-torn i Toledo, Ohio.

I kommunikationen till marknaden pekar man därför på möjligheterna att tillverka mer järnmalmspellets, göra energibesparingar i nuvarande tillverkning och 2023 genomfördes också vätgasinjektionsförsök i en av masugnarna i Indiana Harbor.

Man talar dessutom om att investera i ytterligare DRI/HBI från naturgas/vätgas och om möjligheterna att utnyttja CCS-teknik för CO₂-utsläpp från reduktionsprocesserna.

US Steel (Nippon Steel?) (Mål för scope 1&2: -20% till 2030). [18,74]

Nippon Steel har lagt ett bud på US Steel som i skrivande stund accepterats av bolagets ägare men ännu inte fått ”regulatory approval”.

USS har såväl masugnsbaserad tillverkning som mini-mills. Totala produktionen ligger på ca 12 miljoner ton per år.

I sin kommunikation pekar man på möjligheten att effektivisera nuvarande masugnsbaserade verk liksom att gå mot mer ljusbågsugnsbaserad tillverkning. 2020 ersatte man en masugn i Fairfield, Alabama med en 1.6 miljoner ton per år ljusbågsugn. Man planerar också ett 3 Miljoner ton per år ljusbågsugnsbaserat stålverk i närheten av egenägda valsverket Big River Steel i Arkansas. Dessutom säger man sig studera DRI-möjligheter för järnförsörjningen men då främst från naturgas.

7.1.9 Nya och unga stålföretag i USA med alternativa teknologier

Även om utvecklingstiden sannolikt är lång kan också nämnas några ”start-up” bolag som utvecklar och marknadsför elektrolysprocesser för framställning av järn. Om de är lyckosamma är de sannolikt mycket energisnåla.

Boston Metals [75]

Löser järnmalm i ett saltbad vid hög temperatur (över 1600 C) och genomför elektrolys med en inert anod. Elektrolysen producerar ett flytande järn.

Electra [76,77]

Löser järnmalmen genom lakning vid en temperatur under 60 C och genomför sedan elektrolys. Det utvunna järnet smälts sedan i en ljusbågsugn.

7.1.10 Traditionella latinamerikanska stålföretag

De flesta latinamerikanska länder har förbundit sig att vara koldioxidneutrala till 2050 och vi kan nu se att planer för omställningen växer fram även om få konkreta åtgärder ännu kommunicerats. Nedan två exempel:

Ternium (Mål för scope 1&2: -20% till 2030). [18]

Ternium, som producerar ca 14 miljoner ton per år stål i Mexico, Brasilien och Argentina talar i sina kommunicerade planer om att:

- 1) Öka andelen skrotbaserad ståltillverkning
- 2) Installera anläggningar för ”carbon capture” i Mexico (varav en del infångad CO₂ säljs till den lokala dryckesindustrin)
- 3) Delvis ersätta stenkol med träkol i de Argentinska och Brasilianska verken.
- 4) Satsa på projekt för att energieffektivisera i nuvarande verksamhet

Gerdau (Mål för scope 1&2: -12% till 2031, dock angivet i som reduktion per producerat ton). [78]

Gerdau producerar ca 30 miljoner ton per år stål i ett 10-tal länder i Latin- och Nordamerika. I huvudsak genom skrotbaserad tillverkning (73%). Man är också en stor producent av träkol och vill utöka denna.

Man uppger sig arbeta med planerna för att uppnå en koldioxidneutral tillverkning till 2050 med att delmål att fram till 2031 sänka sina genomsnittliga utsläpp från 0,93 till 0,83 kg CO₂/ton stål. Dock har man ännu inte pekat på konkreta åtgärder.

7.1.12 Referenser – Stålintustrins omställningsstrategier

1. Hydrogen Insights, 21/2 2024: <https://www.hydrogeninsight.com/industrial/green-hydrogen-is-too-expensive-to-use-in-our-eu-steel-mills-even-though-weve-secured-billions-in-subsidies/2-1-1601199>
2. Hydrogen Insights, 26/2 2024: https://www.hydrogeninsight.com/industrial/arcelormittal-set-for-1-3bn-grant-for-green-hydrogen-steel-project-days-after-firm-said-h2-is-too-expensive-to-use/2-1-1603666?utm_source=email_campaign&utm_medium=email&utm_campaign=2024-02-27&utm_term=recharge&utm_content=hydrogen
3. Worldsteel Open Forum. Available online: <https://worldsteel.org/media-centre/blog/open-forum-2022-presentations/>
4. Weser Kurier, Stahl aus Bremen soll grün sein. Available online: <https://www.weser-kurier.de/bremen/wirtschaft/bremer-stahlwerk-umstellung-auf-wasserstoff-beginnt-doc7iy6dm4yvkfe3t599v>
5. Stal. Green Steel: ArcelorMittal plant DRI-anlagen in Bremen und Eisenhüttenstadt. Available online: <https://stahl-punkt.de/wirtschaft-und-unternehmen/green-steel-arcelormittal-plant-dri-anlagen-in-bremen-und-eisenhuettenstadt/>
6. ArcelorMittal Deutschland. Auf dem Weg zum grünen Stahl – Unsere Strategie, Available online: <https://duisburg.arcelormittal.com/icc/arcelor-duisburg-de/broker.jsp?uMen=225105eb-017c-8e51-a18f-7ff407d7b2f2&uCon=bbd463e5-b391-6714-d297-3e40f2a4a10b&uTem=aaaaaaaa-aaaa-aaaa-aaaa-000000000042>
7. Kallanish Commodities. ArcelorMittal Poland considers DRI technology. Available online: <https://www.kallanish.com/en/news/steel/market-reports/article-details/arcelormittal-poland-considers-dri-technology-0321/>
8. ArcelorMittal Corporate. ArcelorMittal accelerates its decarbonization with a 1,7 billion investment programme in France supported by the French government. Available online: <https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-accelerates-its-decarbonisation-with-a-1-7-billion-investment-programme-in-france-supported-by-the-french-government>
9. Gomet. ArcelorMittal (Fos) vers une production décarbonée avec un seul haut-fourneau. Available online: <https://gomet.net/arcelormittal-fos-production-decarbonnee/>
10. Le Monde. Dunkerque: un démonstrateur de captage du CO₂ prêt à démarrer sur le site d'ArcelorMittal. Available online : <https://www.lemoniteur.fr/article/dunkerque-un-demonstrateur-de-captage-du-co2-pret-a-demarrer-sur-le-site-d-arcelormittal.2197717>
11. Ovako: Samrådsunderlag, Tillståndsansökan enligt miljöbalken för vätgasanläggning i Hofors.
12. Ovako först med storskalig produktion av vätgas. Bergsmannen 04, 2023,
13. Salzgitter: Strong signal for Salzgitter AG transformation program SALCOS. Available online: <https://www.salzgitter-ag.com/en/newsroom/press-releases/details/strong-signal-for-salzgitter-ag-transformation-program-salcosr-20105.html>
14. Salzgitter: Salzgitter AG places first order for SALCOS® plant. Available online: <https://www.salzgitter-ag.com/en/newsroom/press-releases/details/translate-to-englisch-salzgitter-ag-vergibt-ersten-auftrag-fuer-salcosr-anlagentechnik-20022.html>
15. Steel Times International. Salzgitter acquires €1 billion to fund decarbonization process. Available online: <https://www.steeltimesint.com/news/salzgitter-acquires-eur1-billion-to-fund-decarbonization-process>
16. Salzgitter: Salcos. Available online: <https://salcos.salzgitter-ag.com/en/salcos.html#c141552>
17. Uniper: Green Wilhelmshaven. Available online: <https://www.uniper.energy/projects-and-cases/green-wilhelmshaven>

18. Hydrogen Iron and Steelmaking Forum, co-organized by SSAB and Posco. Stockholm, 12-13/10 2022
19. Green Steel World. Salzgitter AG, LKAB sign technical cooperation agreement to produce green steel. Available online: <https://greensteelworld.com/salzgitter-ag-lkab-sign-technical-cooperation-agreement-to-produce-green-steel>
20. VDEh Steel Conference, Dusseldorf, Mars 2024
21. SSAB. Samrådsunderlag. Tillståndsansökan SSAB Luleå – Omställning av stålproduktion.
22. Modular Finance. SSAB inleder samråd inför omställning till fossilfri stålproduktion i Luleå Available online: <https://mf.n.se/cis/a/ssab/ssab-inleder-samrad-infor-omstallning-till-fossilfri-stalproduktion-i-lulea-5a17bbed>
23. Norrbottenskuriren. SSAB:s jättesatsning: "Vi kan, vi vill – men får inte" Available online: https://kuriren.nu/bli-prenumerant/artikel/r4dyxv8r/nk-2m2kr_s_22
24. Sveriges Television Nyheter. SSAB satsar 45 miljarder – bygger ny anläggning i Luleå. Available online <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/norrboten/ssab-bygger-ny-anlaggning-i-lulea>:
25. SHS web-page: <https://www.stahl-holding-saar.de/shs/en/news/press/robert-habeck-announces-eur-2-6-billion-in-prospective-funding-for-the-saarland-steel-industry-110202.shtml>
26. SHS. Vale und SHS unterzeichnen eine Absichtserklärung zur Entwicklung von Dekarbonisierungslösungen in der Stahlerzeugung Available online: <https://www.stahl-holding-saar.de/shs/de/presse/pressemitteilungen/vale-und-shs-unterzeichnen-eine-absichtserklaerung-zur-entwicklung-von-dekarbonisierungsloesungen-in-der-stahlerzeugung-104092.shtml>
27. SHS. Rogesa und der brasilianische Eisenerzpellet-Produzent Samarco unterzeichnen Absichtserklärung Available online: <https://www.stahl-holding-saar.de/shs/de/presse/pressemitteilungen/rogesa-und-der-brasilianische-eisenerzpellet-produzent-samarco-unterzeichnen-absichtserklaerung-103414.shtml>
28. Handelsblatt. "Gleicher Stahl, aber CO₂-neutral": Saar-Stahlwerke verabschieden sich vom Hochofen. Available online: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/karl-ulrich-koehler-im-interview-gleicher-stahl-aber-co2-neutral-saar-stahlwerke-verabschieden-sich-vom-hochofen/28420650.html>
29. Paul Wurth. LIBERTY, Paul Wurth and SHS - Stahl-Holding-Saar to develop major hydrogen-based steel making plant in France. Available online: <https://www.sms-group.com/press-and-media/press-releases/press-release-detail/liberty-paul-wurth-and-shs-stahl-holding-saar-to-develop-major-hydrogen-based-steel-making-plant-in-france>
30. Hydrogen Central. Rio Tinto Teams Up with Paul Wurth and SHS-Stahl-Holding-Saar on Low-Carbon Iron For Steel; HBI From Green Hydrogen. Available online: <https://hydrogen-central.com/rio-tinto-paul-wurth-shs-stahl-holding-saar-iron-steel-green-hydrogen/>
31. Tata Steel. Together towards a zero-carbon emissions, circular world Available online: <https://www.tatasteeleurope.com/sustainability/green-steel-solutions/zeremis>
32. Tata Steel. Tata Steel Nederland has signed contracts with three companies – McDermott, Danieli and Hatch – for the further technical preparations of the hydrogen route Available online : <https://www.tatasteeleurope.com/corporate/news/Tata-Steel-invests-65-million-euroin-next-phase-hydrogen-route>
33. Danieli. Tata steel chooses Energiron DRI technology to take a major step into green steel production. Available online : https://www.danieli.com/en/news-media/news/tata-steel-chooses-energiron-dri-technology-take-major-step-green-steel-production_37_751.htm#
34. Tata Steel webpage: <https://www.tatasteeleurope.com/corporate/news/a-difficult-day>

35. Thyssen-Krupp Stahl webpage: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/thyssenkrupp-steel-vergibt-milliardenauftrag-fuer-direktreduktionsanlage-an-sms-group.html>
36. ThyssenKrupp Steel. Into the future with green steel. Available online: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/company/sustainability/climate-strategy/>
37. Renew economy. German steel giant Thyssenkrupp plans 500MW green hydrogen plant Available online: <https://reneweconomy.com.au/german-steel-giant-thyssenkrupp-plans-500mw-green-hydrogen-plant/>
38. BP. BP und Thyssenkrupp Steel arbeiten zusammen, um die Dekarbonisierung der Stahlproduktion voranzutreiben. Available online: https://www.bp.com/de_de/germany/home/presse/pressemeldungen/dekarbonisierung-der-stahlproduktion-thyssenkrupp-und-bp.html
39. Equinor. Neue Energielösungen. Available online: <https://www.equinor.de/neue-energieloesungen>
40. Green Steel World. Anglo American and Thyssenkrupp Steel to collaborate on green steel technologies. Available online: <https://greensteelworld.com/anglo-american-and-thyssenkrupp-steel-to-collaborate-on-green-steel-technologies>
41. Green Steel World: Thyssenkrupp to build €2 billion hydrogen-powered DRI plant for low-CO₂ steel Available online: <https://greensteelworld.com/thyssenkrupp-to-build-e2-billion-hydrogen-powered-dri-plant-for-low-co2-steel>
42. Voest Alpine. Available online: <https://www.voestalpine.com/greentecsteel/en/breakthrough-technologies/>
43. Der Boersianer. VoestAlpine Eine Milliarde für grünen Stahl. <https://www.derboersianer.com/2022/04/voestalpine-eine-milliarde-fur-gruenen-stahl/>
44. Handelsblatt. Wasserstoff statt Kohle: Mit diesen Problemen kämpft Stahlhersteller Voestalpine beim Umbau. Available online: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/schwerindustrie-wasserstoff-statt-kohle-mit-diesen-problemen-kaempft-stahlhersteller-voestalpine-beim-umbau/28312186.html>
45. Voest Alpine webpage : <https://www.voestalpine.com/greentecsteel/en/>
46. Blastr – Green Steel. Available online: <https://www.blastr.no/>
47. Vanir. Blastr-Green Steel. Available online: <https://vaniras.no/How/>
48. Green Steel World. Blastr Green Steel and Cargill Metals sign MOU to supply fossil-free steel, Available online: <https://greensteelworld.com/blastr-green-steel-and-cargill-metals-sign-mou-to-supply-fossil-free-steel>
49. Cargill. Blastr Green Steel and Cargill Metals sign MOU for supply of green steel and to advance decarbonization of the ferrous supply chain. Available online: <https://www.cargill.com/2022/blastr-green-steel-and-cargill-metals-sign-mou>
50. Gravithy. Available online: <https://gravithy.eu/>
51. Steeltimes International. Sustainable steelmaker Gravithy announces company CEO. Available online: <https://www.steeltimesint.com/news/sustainable-steelmaker-gravithy-announces-company-ceo>
52. Hybrit. Fossilfritt stål – En gemensam möjlighet. Available online: <https://www.hybritdevelopment.se/>
53. Hybrit. Samråd – Demonstrationsanläggning i Gällivare kommun. Available online: <https://www.hybritdevelopment.se/samrad/>
54. Hydnum Steel webpage: <https://hydnumsteel.com/en/>

55. H2 Green Steel. Available online: <https://www.h2greensteel.com/>
56. Statkraft. H2 Green Steel partners with Statkraft for 14 TWh of renewable electricity. Available online: <https://www.statkraft.com/newsroom/news-and-stories/archive/2022/statkraft-signs-ppa-with-h2-green-steel/>
57. Vätgas Sverige. H2 Green Steel säkrar 3,5 miljarder euro i stöd för att tillverka fossilfritt stål. Available online: <https://vatgas.se/2022/11/09/h2-green-steel-sakrar-35-miljarder-euro-i-stod-for-att-tillverka-fossilfritt-stal/>
58. Green Steel World. Hyundai Steel to build 'Hy-Cube', a CO₂-neutral steel production system. Available online: <https://greensteelworld.com/hyundai-steel-to-build-hy-cube-a-co2-neutral-steel-production-system>
59. Steel Talk. Hy-Cube: A New Electric Furnace-based Carbon-neutral Production System Available online: <https://talk.hyundai-steel.com/global-english-post/hy-cube-a-new-electric-furnace-based-carbon-neutral-production-system/>
60. JFE Steel Corporation. JFE Steel, Emirates Steel and Itochu to Study Building Supply Chain of Ferrous Raw Material for Green Ironmaking with Low-carbon Emission Available online: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/release/2022/220901.html>
61. Nippon Steel. Nippon Steel Carbon Neutral Vision. Available online: <https://www.nipponsteel.com/en/csr/env/warming/zerocarbon.html>
62. Steel Times International. POSCO to invest \$14 billion in green steel technologies. Available online: <https://www.steeltimesint.com/news/posco-to-invest-14-billion-in-green-steel-technologies>
63. Baowu. Innovation spurs the green, low carbon and high quality development of steel industry. Available online: <https://custom.cvent.com/50B0343922FF4ECDB1E8A480B019DECF/files/event/863c8632136e41d7b446fc54dfd5feef/77ea6876e1f64004be248bbabfa85f88.pdf>
64. HBIS. HBIS Announces its Low Carbon & Green Development Action Plan. Available online: <https://www.hbisco.com/site/en/groupnewssub/info/2021/15999.html>
65. HBIS. HBIS Group and BMW Group Signed a Memorandum to Jointly Build a Green Low Carbon Steel Supply Chain. Available online: <https://www.hbisco.com/site/en /groupnewssub /info/2022 /16728.html>
66. <https://www.tatasteel.com/media/newsroom/press-releases/india/2023/tata-steel-limited-signs-a-mou-with-germany-s-sms-group-to-collaborate-on-decarbonisation-technology/>
67. Steel Times International. JSW Steel and SMS Group sign MOU to produce green steel. Available online: <https://www.steeltimesint.com/news/jsw-steel-and-sms-group-sign-mou-to-produce-green-steel>
68. Vulcan Green Steel Homepage : <https://vulcangreensteel.earth/>
69. Algoma. Algoma Steel Announces Final Investment Decision for Electric Arc Steelmaking. Available online: <https://algoma.com/algoma-steel-announces-final-investment-decision-for-electric-arc-steelmaking/>
70. Globe Newswire. Algoma Steel Selects Danieli as Technology Provider for New Electric Arc Steelmaking Facility Available online: <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/12/02/2344953/0/en/Algoma-Steel-Selects-Danieli-as-Technology-Provider-for-New-Electric-Arc-Steelmaking-Facility.html>
71. Green Steel World. Tenova to supply DRI technology for ArcelorMittal Dofasco plant in Canada Available online: <https://greensteelworld.com/tenova-to-supply-dri-technology-for-arcelormittal-dofasco-plant-in-canada>

72. Nucor. Our greenhouse gas reduction strategy. Available online: <https://nucor.com/greenhouse-gas-reduction-target-strategy>

73. Cleveland Cliffs. Sustainability Report 2021. Available online: https://d1io3yog0oux5.cloudfront.net/clevelandcliffs/files/pages/clevelandcliffs/db/CLF_SustainabilityReport_062022.pdf

74. US Steel. Roadmap to 2050. Available online: <https://www.ussteel.com/roadmap-to-2050>

75. Boston Metals. Available online: www.bostonmetals.com

76. Electra. Low-temperature iron with zero carbon emissions. Available online: <https://www.electra.earth/technology>

77. Steel Times International. Green iron company raises \$85m to decarbonize ironmaking Available online: <https://www.steeltimesint.com/news/green-iron-company-raises-85m-to-decarbonize-ironmaking>

78. Gerdau. Climate Change. Available online : <https://www2.gerdau.com/climatechange>

7.2 Järnmalmleverantörernas kommunicerade strategier

Energiomställningen ligger också högt på agendan för de traditionella järnmalmleverantörerna. Här nedan följer ett axplock av dessa och vilka typer av åtgärder de kommunicerar. Det ska noteras att Scope 1 och Scope 2 för en malmleverantör omfattar CO₂-utsläppen orsakade av den egna verksamheten samt utsläppen orsakade av råvaror, material, förnödenheter etc. som köps in för den egna verksamheten. Scope 3 är för en järnmalmleverantör de CO₂-utsläpp som orsakas av deras produkter i kundledet, dvs. järn och stålverken.

7.2.1 Europeiska och kanadensiska järnmalmleverantörer

LKAB, Sverige (Mål för scope 1&2: -30% till 2030, koldioxidneutrala till 2045). [1-3]

Elektrifiering av underjordsverksamheten. Har provkört ett pelletsverk med bio-olja och gör möjligen fortsatt så. Delägare i Hybrit-projektet. Har tillkännagjort att man avser integrera framåt och bli en leverantör av DRI/HBI. Malmberget ställs om först och det första DR-schaktet blir på 1,3 Miljoner ton per år (Hybrits demonstrationsanläggning). Därefter byggs ytterligare två schakt på totalt 4-5 Miljoner ton per år. Kiruna/Svappavara ställs om från 2040. Totalt berörs ca 25 Miljoner ton per år järnmalm berörs på sikt.

Rio Tinto – IOC, Kanada (Koncernmål för scope 1&2: -50% till 2030, koldioxidneutrala till 2050). [4]

Förstudier med såväl Stahl Holding Saar som Salzgitter om tillverkning av vätgasreducerad DRI/HBI. Elförsörjning från vattenkraft.

ArcelorMittal Mining Canada (Koncernmål för scope 1&2: -25% till 2030, koldioxidneutrala till 2050). [5]

Har investerat 205 MCAD i en ny flotationsanläggning som möjliggör att produktionen av DRI-pellets ökar från 3 Miljoner ton per år till 10 Miljoner ton per år. Idrifttagen 2024.

7.2.2 Australiensiska järnmalmleverantörer

BHP (Mål för scope 1&2: -30% till 2030, koldioxidneutrala till 2040.) [2,5]

Har avsatt 4 b\$ för att uppfylla målet för 2030. Arbetar nu främst med eliminering av diesel som energikälla i gruvverksamheten. Är fullt medvetna att scope 3 utgör 97% av utsläppen i värdekedjan och har inlett samarbeten med fem stora kunder - Baowu, HBIS, Tata, Posco och JFE – i avsikt att minska CO₂-utsläppen vid järn- och ståltillverkningen.

Fortescue Metals (Mål för scope 1&2: koldioxidneutrala till 2030). [6]

Har satt ett högt mål om att bli koldioxidneutrala till 2030. Arbetar bland annat med grön elektrifiering, alternativa transportbränslen såsom ammoniak och vätgas. Har påbörjat projekteringen av en 2 GW (200 kton H₂) elektrolysör i Queensland. Satsar dessutom på magnetitmalmsprojekt såsom "Iron Bridge" och "Midwest Magnetite" då dessa malmer är lätta att anrika.

Rio Tinto (Koncernmål för scope 1&2: -50% till 2030, koldioxidneutrala till 2050). [2,7]

Har avsatt 7,5 b\$ för att uppfylla målet för 2030. Förnybar energi i Västra Australien utgör en grundpelare. Vad gäller scope 3 sker ett omfattande samverkansarbete med kunder. Företaget kommunicerar bland annat samarbete med Blue Scope Steel om vätgasreduktion och elektrisk smältning till råjärn (för Pilbara malm) liksom utveckling av en ny process för reduktion med biomassa vilken innefattar sambrikettering av malm och biomassa, uppvärmning till 600 C med delar av biomassan som bränsle och till högre temperatur med mikrovågor, då också reduktionen sker, innan smältning till råjärn (också för Pilbara-malm).

7.2.3 Sydamerikanska järnmalsleverantörer**Vale, Brasilien** (Mål för scope 1&2: -33% till 2030, koldioxidneutrala till 2050.) [2,7-9]

Har avsatt 4-6 b\$ för att uppfylla målet för 2030.

Vale har en betydande kapacitet för pelletsproduktion, 40-50 Miljoner ton per år, med anläggningar i Brasilien och Oman. Vattenkraft för grön elektricitet och biobränsle som energiråvara för pelletisering utgör två grundpelare i de brasilianska anläggningarna. Man har dessutom investerat 200 M\$ i kallbundna briketter som kommer att tillverkas i två anläggningar i Tubarao, med en kapacitet på 6 Miljoner ton per år från och med 2024.

Vale söker dessutom samarbeten för DRI-produktion och har sådana på under utredning i Saudiarabien (Ras-al-Kair, 4 Miljoner ton per år), UAE (Emirates Steel Arkan, Khalifa Economic Zone) och Oman (Duqm).

Samarco (50% Vale, 50% BHP), Brasilien (Mål ej tydligt kommunicerade)[10]

Har tecknat avtal med Stahl Holding Saar för gemensamt arbete kring möjligheterna att reducera CO₂-avtrycket vid järn och ståltillverkning genom leveranser av DRI-pellets till SHS.

7.2.4 Afrikanska järnmalsleverantörer**Anglo American** (Mål för scope 1&2: -30% till 2030, koldioxidneutrala till 2040.) [7,11]

Satsar på metaller som behövs för energiomställningen. Synes ha kommit långt med åtgärder för att köpa förnyelsebar energi för gruvdriften och utreder dessutom hur olika malmtransporter ska ske fossilfritt.

I Norden sker ett samarbete med Grangex beträffande ”off-take” från de planerade/återstartade gruvorna i Dannemora och Sydvaranger. Båda dessa gruvor planerar för högvärdig fines-/koncentratproduktion men är ännu ej tagna i drift.

ArcelorMittal Africa (Koncernmål för scope 1&2: -25% till 2030, koldioxidneutrala till 2050).[5]

- Liberia: Få konkreta åtgärder kommunicerade. Undersöker dock möjligheten att ersätta diesel med eldrift för vissa transportslag.
- Mauretanien: ”Prefeasibility study” med SNIM om uppförande av ett pelletsverk och en direktreduktionsanläggning.

Rio Tinto, Guinea (Koncernmål för scope 1&2: -50% till 2030, koldioxidneutrala till 2050.) []

- Simandou-projektet i Guinea kan bli en betydande leverantör av malm för DR-schakt inom något decennium.

7.2.6 Referenser – Järnmalsindustrins omställningsstrategier

1. LKAB. Available online: www.lkab.com
2. Hydrogen Iron and Steelmaking Forum, co-organized by SSAB and Posco. Stockholm, 12-13/10 2022
3. Tidningen Bergsmannen, 2022-04
4. International Mining. Rio's IOC to supply high-grade iron ore for low-carbon steel feedstock project. Available online: <https://im-mining.com/2021/02/16/rios-ioc-to-supply-high-grade-iron-ore-for-low-carbon-steel-feedstock-project/>
5. Worldsteel Open Forum. Available online: <https://worldsteel.org/media-centre/blog/open-forum-2022-presentations/>
6. Fortesque. FY 22 Climate Change Report. Available online: https://www.fmgf.com.au/docs/default-source/announcements/fy22-climate-change-report.pdf?sfvrsn=ac1ce6c4_2
7. Wood Mackenzie. Available online: <https://www.woodmac.com/horizons/pedal-to-the-metal-iron-and-steels-one-point-four-trillion-usd-shot-at-decarbonisation/>
8. Vale. Available online: <https://www.vale.com/brasil/en/aboutvale/news/pages/vale-announces-green-briquette-capable-of-reducing-co2-emissions-of-steelmaking-clients-by-up-to-10.aspx>
9. SHS. Available online: <https://www.stahl-holding-saar.de/shs/de/presse/pressemitteilungen/vale-und-shs-unterzeichnen-eine-absichtserklaerung-zur-entwicklung-von-dekarbonisierungsloesungen-in-der-stahlerzeugung-104092.shtml>
10. Samarco. Samarco and Rogesa signed a Memorandum of Understanding for studies related to decarbonization project in Europe Available online : <https://www.samarco.com/samarco-and-rogesa-signed-a-memorandum-of-understanding-for-studies-related-to-decarbonization-project-in-europe/?lang=en>
11. Anglo American. Climate change report 2021. Available online: https://www.angloamerican.com/~/_media/Files/A/Anglo-American-Group/PLC/sustainability/approach-and-policies/environment/climate-change-report-2021.pdf

7.3 Utrustningsleverantörer för DRI anläggningar och deras produktutbud

De tills idag tonnagemässigt dominerande processerna för direktreduktion av järnmalm har historiskt benämnts Midrex (processen utvecklades i USA) och HYL (processen utvecklades i México). HYL benämns idag Energiron.

Båda teknologierna baseras, som tidigare nämnts, på schaktugnar i vilka järnmalmspelletts reduceras med naturgas som reduktionsmedel till järnsvamp. De huvudsakliga skillnaderna mellan processerna är att Midrex-processen har en extern reformering av naturgasen till syngas medan reformeringen i HYL-processen sker i schaktet. HYL-processen arbetar dessutom vid ett högre tryck, 5-8 bar, medan Midrex-schaktet endast har någon bars övertryck.

Förutom schaktugnsprocesserna, i modifierad form, föreslår nu flera leverantörer vätgas-reduktion i fluidiserande bäddar, bland annat för att undvika tillverkningen av pellets från finmalda järnmalmskoncentrat.

7.3.1 Utrustningsleverantörer

De företag som idag främst tillhandahåller/utvecklar lösningar för vätgasreduktion är:

För schaktugnar:

Tenova-HYL (Italien - med rötter i Mexico) [1,2]

Tenova (som är ett dotterbolag till Techint) förvärvade HYL 2005. Processen marknadsförs nu under namnet **Energiron**. Danieli, Sinosteel E&T och möjligen fler företag uppträder som samarbetspartners vid genomförande av industriprojekt.

Midrex Technologies (USA) [1,3]

Midrex ägs sedan 1980-talet av Kobe Steel. Man samarbetar med Kobelco, Japan; Primetals Technologies, England; Paul Wurth (ägt av SMS), Luxemburg och möjligen fler företag för genomförande av industriprojekt. Processen marknadsförs som olika varianter av Midrex, exempelvis **Midrex-Flex** (extern reformering) och **Midrex-H2** (enbart värmning av vätgas).

Hybrit (Sverige - SSAB, LKAB och Vattenfall) [1,4]

Egenutvecklat koncept där Tenova-HYL har bidragit till pilotanläggningen i Luleå. Har antytt att hela eller delar av **Hybrit**-processen kommer att kommersialiseras.

För fluidiserande bäddar:

Posco/Primetals (Korea, England) [1,5]

Utvecklar/modifierar Primetals fluidbäddsteknologi Finex som finns i några anläggningar hos Posco till en vätgasbaserad process benämnd **Hyrex**.

Primetals (England) [1, 6]

Primetals, som tillhör Mitsubishi group, har även en ”egenutvecklad fluidbäddsbaserad process” som man benämner **Hyfor**. Detaljer är ännu relativt okända.

Metso/Outotech (Finland) [1,7]

Innehåller erfarenheten från den fluidbäddsbaserade **Circored**-anläggning som byggdes på Trinidad och som enligt uppgift har körts på vätgas under någon period. Utvecklar och marknadsför tekniken.

7.3.2 Utrustningsleverantörer – tendenser och trender

Av vad som framgår av från referenser publicerade av leverantörerna ovan tycks det som om schaktugnarna har ådragit sig det största intresset på marknaden till dags dato. SSAB/LKAB (Hybrit) och Posco (Hyrex) förespråkar naturligtvis de teknologier de själva utvecklar men vi undantar dessa från jämförelsen.

Tenova-HYL

- Delar av Hybrit's pilotanläggning.
- Salzgitters pilotanläggning på 100 kg/timme liksom det första kommersiella DR-schaktet i Salzgitter.
- Även Tata steel har tecknat kontrakt om leverans av ett Energiron schakt.
- HBIS, Zhang Jiakou, Kina (DRI-torn 550 kton/år, driftklart under 2022, som ultimata möjligen kommer att köras på 100% H₂ men troligen börjar köra på naturgas och koksugns gas).
- Baowu, Zhan Jiang, Kina (DRI-torn 1000 kton/år, driftklart i december 2023, som ultimata möjligen kommer att köras på 100% H₂ men troligen börjar köra på naturgas och koksugns gas).
- Tata Steel Europe, har tilldelat Danieli (som anlitat partnern Tenova-HYL) för designen av Ijmuidens nya DR-verk avsett för naturgas/vätgas.

Midrex

- Stegra (H2 Green Steel), har skrivit ett kontrakt med SMS/Midrex/Paul Wurth om leverans av Midrex-H2 anläggning. (SMS kommer dessutom att leverera ljusbågsugn, stränggjutning, varmvalsverk och kallvalsverk).
- Blastr har även tecknat kontrakt av en Midrex-H2 anläggning.
- Thyssen Krupp Steel har också anlitat SMS för leverans av den första DR-anläggningen (Midrex-Flex) till Duisburg. Ugnarna förses eventuellt med 2 st "smelters" per DR-schakt som tillverkas av SMS dotterbolag Metix från Sydafrika.
- SHS dotterbolag Rogesa har även tecknat kontrakt med SMS om en Midrex-Flex anläggning som initialt kommer att använda naturgas.

Inga leverantörer har till dags dato och så vitt känt sagt sig tecknat kontrakt för kommersiella fluidbäddar för vätgasreduktion. Voest och Primetals har dock byggt en Hyfor pilotanläggning vid Voest's stålverk i Donavitz.

Posco har också annonserat att man 2024 kommer starta konstruktion av en demo-anläggning för Hyrex. Anläggningen ska vara driftklar 2026. Man har också indikerat en av de befintliga, producerande Finex-anläggningarna kommer att byggas om till Hyrex under åren 2026-2028.

7.3.3 Referenser – Järnmalsindustrins omställningsstrategier

1. Hydrogen Iron and Steelmaking Forum, co-organized by SSAB and Posco. Stockholm, 12-13/10 2022
2. Tenova. Available online: <https://tenova.com/>
3. Midrex. Available online: <https://www.midrex.com/>
4. Hybrit. Available online: <https://www.hybritdevelopment.se/>
5. Posco. POSCO starts to design the HyREX demonstration plant. Available online: <https://newsroom.posco.com/en/posco-starts-to-design-the-hyrex-demonstration-plant/>
6. Primetals. Available online: <https://www.primetals.com/>
7. Metso:Outotec. Available online: <https://www.mogroup.com/>

8. Övergripande slutsatser

Hur påverkar utvecklingsläget de svenska skrotbaserade specialstålsföretagen?

Låt oss dela upp frågeställningen i fem delar: (1) hur kommer de ekonomiska drivkrafterna för att övergå till fossilfri ståltillverkning utvecklas? (2) hur kommer teknikutvecklingen att fortgå? (3) hur kommer råvarusituationen se ut? (4) hur kommer konkurrensen se ut? och slutligen (5) hur kommer kundefterfrågan se ut?

För att få ett så bra underlag som möjligt för fortsatt beslutsfattande måste våra svenska specialstålföretag skapa sig en egen god bild av läget och sedan handla därefter.

Vi som författat denna rapport sitter inte på några absoluta facit men kan bidra med vår syn på utvecklingsläget och vilken riktning den fortsatta utvecklingen möjligen kommer att ta.

(1) Hur kommer de ekonomiska drivkrafterna för fossilfri produktion att utvecklas?

Oavsett vad gemene man idag anser om den globala uppvärmningen tycks det som om forskarvärldens prognoser om effekterna av denna succesivt besannas. Det är därför sannolikt att den globala befolkningen i allt större utsträckning kommer att börja bejaka och stödja de åtgärder som krävs för att minska eller till och med eliminera de utsläpp av växthusgaser som är bovarna i dramat. Allt för att skydda sina egna liv eller livet för efterkommande.

Den dag detta inträffar kommer politiken att ha stöd för att införa ekonomiska styråtgärder som syftar till att förbättra situationen. Vi är inte där än, sett ur det globala perspektivet, men Europa framstår fortfarande som den kontinent där störst konsensus uppnåtts. Europa har därför också den sannolikt kraftfullaste lagstiftningen ur ett globalt perspektiv och kommer möjligtvis att kunna behålla det trycket på de aktörer som emitterar växthusgaser.

De svenska specialstålverken måste därför förhålla sig till och utvärdera vilka konsekvenser en fortsatt alltmer restriktiv lagstiftning inom området kommer att innebära.

Samtidigt sätter också lagstiftning och dess ekonomiska konsekvenser ribban för vad som kan göras sett ur ett företagsekonomiskt perspektiv. Att vara en föregångare och helt eliminera utsläppen, men till alltför hög kostnad, kommer att straffa sig. Men att vara för sen med sina åtgärder kommer också att sannolikt ha ett pris. Det är således nödvändigt att ha ”rätt timing” för de åtgärder man avser genomföra.

(2) Hur kommer teknikutvecklingen att fortgå?

Teknikförändringar kan ibland delas in i de som kan kallas banbrytande, på engelska ofta ”disruptive”, respektive de som kan kallas evolutionära dvs bygger på utveckling av etablerad teknik och existerande system. Medan de förra kräver stora förändringar och måste ske momentant kan de senare göras i mindre steg utan stora påfrestningar på andra system.

Historien visar att stålindustrin kan genomföra drastiska förändringar på kort tid. Exempel är syrgaskonverterns genomslag och införande av stränggjutning som båda gick på några decennier. Dessa har det gemensamt att de byggde på sekelgamla idéer som kunde genomföras tack vare ny teknik och kraftiga incitament gällande inte minst kostnader och energianvändning.

Men det finns också väldigt många exempel på hur processer, som sett mycket lovande ut på ritbordet, inte lyckats i verkligheten utan fallerat i såväl begränsad som full skala.

Frågan är vad som gäller nu? Dagens omställning bygger på processidéer med varierande mognadsgrad, en politisk påverkan av teknikval och en osäkerhet gällande framtida ekonomiska spelregler.

Som beskrivits i tidigare kapitel så har vi tre alternativa vägar för reduktion av järnmalm med låga utsläpp: fossilt kol eller naturgas kombinerat med infångning och lagring av koldioxid; el med låga

utsläpp, antingen som elektrolytisk sönderdelning eller genom reduktion med vätgas; och slutligen reduktion med biogent kol eller biogen syngas eventuellt kopplat till kolinfångning och lagring. Samtliga bygger till åtminstone delar på utveckling av ny teknik.

Till detta kommer möjligheten att tillverka stål utan jungfrulig järnråvara, utan i stället bygga tillverkningen på återvinning av skrot. Här är tekniken etablerad och behöver inte annat än finslipas.

Fler ljusbågsugnar!

Det är därför sannolikt, vilket också börjar utkristalliseras i kommunikationen från många stålföretag, att övergång från masugnsbaserad tillverkning till ståltillverkning via ljusbågsugn såväl är tekniskt säkert som relativt säkert ur ett konkurrensperspektiv, särskilt om skrot kan användas som järnråvara. Några av de järnmalm-baserade stålverk i Europa som aviserar att man kommer att bygga ljusbågsugnar och sannolikt till hög utsträckning förlita sig på skrotråvara vilket visas nedan och i tabell 8.1.

- Tata Steel, Port Talbot
- British Steel, Scunthorpe och Teeside
- ArcelorMittal, Fos
- Voest Alpine, Linz och Donavit
- Liberty Steel, Ostrava
- Moravia Steel, Trinice

men även SSAB som aviserat omställning av sina verk i Oxelösund, Luleå och Raahen kommer sannolikt inledningsvis att tvingas använda stora mängder skrot, innan LKAB's DRI-produktion kan ersätta delar av skrotbehovet. Bara dessa verk skulle alltså på 5 till 10 års sikt kunna förbruka 15-20 Mton skrot per år.

Till detta kommer de verk som aviserat att de också lokalt förutom ljusbågsugnar räknar med att uppföra DRI-anläggningar men sannolikt också kommer att efterfråga kanske 30% skrotråvara. Summerar man detta behov så uppgår det möjligen till kanske 5 Mton skrot/år på samma sikt.

Alltså är det inte omöjligt att det om 10 år förbrukas mer än 20 Mton skrot i Europa av verk där järnråvaran till dags dato varit järnmalm.

Fler naturgasbaserade DRI-anläggningar! ... men kanske också några med vätgas eller biogen syngas?

Med ett europeiskt perspektiv tycks det idag också sannolikt att det kommer att byggas ett antal DRI-anläggningar där reduktionen sker med hjälp av naturgas. Liksom för ljusbågsugnarna är teknologin etablerad och därmed den tekniska risknivån låg. Möjligen kommer tillgången till bra malmer för direktreduktion att i något skede bli begränsande, men det finns åtskilliga järnmalmprojekt under utveckling som skulle kunna ge de initialt efterfrågade volymerna.

Därför kommer sannolikt takten i implementering av naturgasbaserad DRI att bestämmas av när de masugnsbaserade järn och stålverken ser att kostnaderna för utsläppsrätter nödvändiga för masugnsruten skulle kunna motivera ett byte. Det är dock troligt att några anläggningar byggs i ett tidigt skede för att bland annat tillgodogöra sig diverse europeiska och statliga subventioner.

Om det kommer att byggas några anläggningar för framställning av vätgasreducerad DRI liksom biogasbaserad DRI återstår att se. För vätgasteknologin är tillgången på billig fossilfri el en stötesten. Men det kan finnas lokaliseringar som har goda förutsättningar. Sedan är tekniken ännu inte utprovad i full driftskala, men det må finnas aktörer som är villiga att satsa på att detta ändå är möjligt.

Vad gäller biogasbaserad direktreduktion är situationen liknande. Kommer biomassa att finnas tillgänglig till rätt pris och när kan de processteg som omvandlar denna till syngas sägas vara verifierade?

Tabell 8.1 Omställningstendenser för dagens europeiska masugnsbaserade stålverk.

Company	Site	Country	Eurofer capacity data			Current Production Processes				Future Production Processes						Estimated production kton crude steel/year as per 2023/2024	Comment
			Hot metal kton/year	Finished Steel kton/year	No of BF	BF	DR	BOF	EAF	BF	DR	SF Smelting	BOF	EAF w Scrap/DRI Hybrid			
SSAB	Luleå	Sweden	2200	2200	1	X		X					X		2200	Slab producer, Towards DRI from LKAB	
SSAB	Oxelösund	Sweden	1800	1700	2	X		X					X		1000	Scrap and towards DRI from LKAB	
SSAB	Raahe	Finland	2400	2600	2	X		X					X		2500	Towards DRI from LKAB	
AM	Hamburg	Germany	1100	1100	1		X		X		X		X		600	Remains ... but how much DR and how much scrap?	
AM	Bremen	Germany	3960	3800	2	X		X		X			X		3000	Scrap first. Plan says DR at later stage.	
AM	Eisenhuttenstadt	Germany	2340	2400	2	X		X		?			X		1500	EAF for scrap	
Salzgitter	Salzgitter	Germany	4800	5200	1	X		X	X	X			X		4500	Towards DRI-EAF in steps	
TKS	Duisburg	Germany	11600	11560	4	X		X		X	?	X	?		10000	Towards DR-hot metal in steps	
SHS	Dillingen/Völklingen	Germany	4790	5700	2	X		X		X			X		4000	One DR, EAF's in Dillingen and Voelklingen	
AM	Dabrowa Gornica	Poland	4500	5000	2	X		X		X			X		3700	3 EAF and DR beeing discussed .. but unclear.	
AM	Krakow	Poland	1310	2600	1										0	Mothballed and likely not restarted.	
Tata Europe	Ijmuiden	Netherlands	6310	7500	2	X		X		X	?		X		6500	Towards DR-hot metal in steps	
Tata Europe	Port Talbot	UK	4770	4900	2	X		X					X		2500	EAF for scrap and maybe imported DRI	
British Steel	Scunthorpe	UK	3590	3200	3	X		X					X		2500	EAF for scrap and maybe imported DRI	
NSSMC/USS	Kosice	Slovakia	2850	4500	2	X		X		X		X			4000	Unclear plan, beeing discussed with NSSMC.	
AM	Gent	Belgium	4430	5000	2	X		X		X			X		4500	DR at later stage	
Liberty	Ostrava	Czechia	3200	2200	3	X		Tandem					X	X	0	Hybrid EAF->Closure BF's->DRI? .. but company bankrupt	
Moravia Steel	Trinec	Czechia	2100	2400	2	X		X					X		1500	Also DRI?	
Voeat Alpine	Linz	Austria	4140	5000	3	X		X					X		4000	Discusses import of DRI	
Voest Alpine	Donawitz	Austria	1370	1370	2	X		X					X		1000	Discusses import of DRI	
AM	Dunkirk	France	6800	6750	3	X		X		X			X		4000	2,5 Mton DRI-schakt + 2 EAF	
AM	Fos	France	5160	5100	2	X		X					X		3000	May buy DRI?	
Liberty	Galati	Romania	3250	3200	2	X		X		X				X	2000	Does Liberty have money to proceed?	
AM	Avilles	Spain	See Gijon	4200	2	X		X		X		X			3000	Aviles remains with BF (Gijon) + BOF (Aviles)	
AM	Gijon		4480	1200						X				X	500	Gijon installs DR + hybrid EAF	
Accierie d'Italia	Taranto	Italy	9590	11500	4	X		X		X	?		X	?	2500	In administration and investments uncertain.	
																2,5 Mtpy DRI has been discussed.	
			102840	111880						13200	22100 (exkl TKS)			49800	74500 (Eurofer sums to 77 000 kton 2022)		

Finns det någon framtid för masugnsprocessen?

Ja, vi kan inte utesluta det även om masugnen, liksom naturgasbaserad DRI-framställning, är fossila processer. Skulle det kunna göras troligt att CCS (Carbon Capture and Storage) skulle kunna göras tillgängligt för stora kvantiteter CO₂ till rätt pris så uppstår möjligheten. Det finns också flera möjligheter att minska CO₂-belastningen från dagens masugnar ned till en viss nivå genom åtgärder såsom toppgasrecirkulering, begränsad injektion av gaser med innehåll av väte, charging av skrot mm.

(3) Hur kommer råvarusituationen att förändras?

Även denna fråga är komplex och innehåller ett antal delfrågor:

För de svenska specialstålverkens befintliga ljusbågsugnar kan man ställa sig tre frågor:

- Kommer den globala marknaden för järnsvamp och tackjärn balansera ett ökat behov av metalliserad järnråvara i den takt som masugnar ersätts med ljusbågsugnar globalt?
- Kommer svensk produktion av järnsvamp täcka de svenska företagens behov av ren järnråvara?
- Kommer ökade priser på rent skrot göra att återvinningssystemen förändras?
 - o Ökade investeringar i automatisk analysdetektering och sortering av fragmenterat skrot hos skrotföretag.
 - o Ökade investeringar vid stålverken för hantering och optimering av mindre skrotposter med känd analys.

Svaret på de två första frågorna är sannolikt nej. Skälet är att de stålverk som mäktar med att ställa om från masugnsrutten till elektrostrålrutten antingen räknar med att köra enbart på skrot eller med högre skrotinsatser än vad de använder i sin nuvarande processföring.

Detta innebär att skrotmarknaden i Europa kommer att förändras. Förvisso har Europa idag ett skrotöverskott om 20-30 miljoner ton per år som säljs till länder som Turkiet och Indien. Så teoretisk skulle det vara möjligt att försörja de verk i Europa som övergår till ljusbågsugnsdrift med ”inomeuropeiskt skrot” under det närmsta decenniet. Men prisnivån skulle sannolikt förändras radikalt och jakten på skrot med låga föroreningshalter skulle också den öka och höja priset för dessa produkter än mer.

Svaret på fråga tre skulle därför vara att investeringar i ett förbättrat återvinningssystem skulle komma till stånd och därmed öka tillgängligheten för dessa varor, dock till ett högre pris!

På längre sikt finns en strävan inom t ex fordonsindustrin att designa produkter som kan återvinnas med bibehållet metallvärde. Detta ställer stora krav på hela kedjan från produktdesign – dekonstruktion - återvinning.

Men för de svenska specialstålverken gäller också att hålla sig uppdaterade om ytterligare ett antal råvaror vars tillgänglighet och pris sannolikt kommer att avgöra i vilken takt de masugnsbaserade verken kan påbörja sin omställning. De viktigaste är:

- Reduktionsgaser – reformerad naturgas, vätgas och biogen syngas.
- Järnmalmerna passande för direktreduktion.

Dessutom är tillgången på infrastruktur för transport och lagring av koldioxid något som kommer påverka teknikvalen framöver.

Som framgått i rapporten utreder de flesta stålverk idag möjligheten att utföra DRI-framställningen i schaktugnar med efterföljande ljusbågsugnar. Schaktugnarna fungerar optimalt om järnmalmen pelletiserats (visserligen kan styckemalm också användas men järnhalten är då inte lika hög). Kapaciteten på dagens pelletsverk kommer inte kunna täcka den efterfrågan som blir resultatet om de omställningsprojekt som redovisats ovan blir realitet. Således måste mer pelletskapacitet tillkomma.

Dessutom måste naturligtvis föroreningshalten i det pelletskoncentrat som pelletiserats vara så låg att ljusbågsugnsdriften inte blir allvarligt lidande. Som tidigare nämnts är det bara några enstaka procent av dagens järnmalmprodukter som har denna egenskap.

(4) Hur kommer konkurrenssituationen att förändras?

Det är för oss inte uppenbart att konkurrenssituationen för de svenska specialstålverken kommer att förändras nämnvärt i negativ riktning. I grunden innebär klimatomställningen att vi måste lämna fossila teknologier och övergå till teknologier baserade på fossilfri elektricitet eller biomassa. Sverige har där ett bra utgångsläge i och med att vår nuvarande elproduktion i stort sett är fossilfri. Däremot måste den tillkommande energi som krävs för omställningen också göras fossilfri vilket är en utmaning.

En ännu större utmaning har dock våra europeiska grannländer som t ex Polen och Tyskland som dels måste ersätta befintlig fossilberoende elproduktion med fossilfri, dels tillse att tillkommande elproduktion också blir fossilfri. Detta kommer att vara kostsamt och påverka elpriserna, inte bara i Polen och Tyskland, utan i de flesta europeiska länder.

Så småningom uppkommer sannolikt nya jämvikter. Det kan vara att en del elkraftintensiv industri flyttar till områden där kostnaden för fossilfri energi är låg, Sverige kan vara ett sådant exempel, men om den svenska specialstålindustrin inte gör uppenbara misstag borde förutsättningarna för fortsatt tillverkning i Sverige vara goda.

(5) Hur kommer kundefterfrågan att se ut?

Efterfrågan på stål med låga utsläpp av klimatgaser kommer sannolikt att öka i takt med att den politiskt initierade lagstiftningen succesivt försämrar förutsättningarna för tillverkning av fossila produkter. Men det är tveksamt, att som många företag gör idag, räkna med att man får bättre betalt för en ”grön produkt”.

Det är heller inte särskilt sannolikt att konkurrens från länder utanför EU, som kanske lever med helt andra regelverk, nämnvärt skulle kunna få kundefterfrågan att förändras drastiskt.

Det är nog snarare så att klimatomställningen kommer att kräva produkter som den svenska specialstålindustrin har goda förutsättningar att tillverka och därmed komma oss, som företag och land, till godo.

Några avslutande råd och kommentarer:

Utöver detta har författarna identifierat sex avgörande punkter att förstå för en framgångsrik omställning i Sverige:

1. Beroende på val av reduktionsteknologi och reduktionsmedel kommer processerna att förbruka mer eller mindre primärenergi. Teknikvalet blir en fråga om lokala förutsättningar för en tilltänkt produktionsanläggning; i form av tillgången och kostnaden för elenergi, naturgas, biomassa etc. För elenergi gäller dessutom kravet att den skall ha så lågt utsläpp av CO₂ per kWh som möjligt, annars motverkas syftet med att reducera utsläppen av koldioxid.
2. Historien kan uppvisa ett stort antal förslag till reduktionsprocesser för framställning av metalliskt järn i någon form. Samtidigt kan det konstateras att väldigt få, om någon, process har realiserats i kommersiell skala. Orsaken till detta kan vara antingen på grund av tekniska svårigheter, operationella och underhållsrelaterade problem osv. Gemensamt för dessa orsaker är att de manifesteras som ökade kostnader per producerad järnenhet än konkurrerande alternativ.
3. Besläktat med ovanstående punkt 2 är att processförslagen inte uppfyller de grundläggande kriterierna för hållbar utveckling: dvs. ekologisk-, ekonomisk- och social hållbarhet. (Brundtland, FN 1987)
4. Det föreligger ett behov av fokuserad utbildning, forskning och utveckling inom processmetallurgi generellt, men i synnerhet kring reduktionsprocesser. Dessa är energiintensiva och med dagens teknik stora källor till koldioxidutsläpp, då de är baserade på fossilt kol. Forskning och utbildning är intimt sammankopplade och genererar både forskningsresultat såväl som utbildade ingenjörer och doktorer som kan bidra till industrins fortsatta utveckling.
5. Besläktad med punkt 4 angående ekonomiska resurser. Offentligt stöd till investeringar i grundläggande forskning om reduktionsprocesser, framtagande av prototyper och mindre demonstrationsanläggningar kan motiveras utifrån ett allmänt intresse och delning av risk i ett tidigt skede. Driftsanläggningar måste kunna finansieras på marknadsmässig grund, dvs. vara en attraktivt och hållbar investering.
6. Den ideologiskt drivna ståndpunkten att CCS är av ondo, måste omprövas. CCS är en del av en pragmatisk lösning av problemet med stålindustrins koldioxidutsläpp. Det är inte realistiskt att förvänta sig en massiv utbyggnad av fossilfri energiproduktion, läs elektricitet, under överskådlig tid då det kommer att förbruka en stor del av våra samhällens ekonomiska resurser. Användning av CCS-teknik kan ge oss tid och handlingsutrymme att ställa om världens energiproduktion och primära järnproduktion i en rimlig takt och frigöra ekonomiska resurser till denna omställning. Viktigt är dock att säkerställa under vilka förhållanden koldioxiden verkligen mineraliseras och om det kan finnas risk att den efter en tid läcker ut från utnyttjade lagringsområden.

Följande omedelbara aktiviteter som kan utvecklas till handlingsalternativ kan identifieras:

- A. Arbeta aktivt med att förbättra upparbetning och användande av skrot så att en hög andel av det i Sverige fallande skrotet kan utnyttjas.
- B. Följ utvecklingen av den globala marknaden för briketterad järnsvamp och undersök möjligheten att säkra tillgång till kvoter av produktionen.
- C. Följ utvecklingen för de nordiska vätgasinitiativen (produktionsalternativ 3) och bedöm möjligheten att från dessa köpa järnsvamp med rätt egenskaper och marknadsmässigt pris.
- D. Följ utvecklingen för det svenska initiativ som baseras på biogen syngas och bedöm möjligheten att från detta köpa järnsvamp med rätt egenskaper och marknadsmässigt pris.
- E. Följ marknaden för tackjärn för att klara eventuella bristsituationer även om klimatavtrycket påverkas.
- F. Sök allianser med företag av liknande storlek och liknande behov och realisera synergier.