

Energimyndighetens titel på projektet – svenska HYBRIT Pilotanläggning - genomförbarhetsstudie	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska HYBRIT Pilot plant - Pre-Feasibility Study	
Universitet/högskola/företag Hybrit Development AB	Avdelning/institution
Adress c/o SSAB, Box 70, 101 20 Stockholm	
Namn på projektledare Per Lundström	
Namn på ev övriga projektdeltagare	
Nyckelord: 5-7 st	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten, LKAB, Vattenfall, SSAB samt Hybrit Development AB.

Arbetet har genomförts i delprojekt uppdelade i teknikområden med i huvudsak specialister från de deltagande företagen. I vissa delar av studien har även externa resurser köpts in. Delar av arbetet har redan under projektiden resulterat i att två större pilotprojekt beviljats medel från Energimyndigheten. Styrgruppen har utgjorts av styrelsen för samriskbolaget Hybrit Development AB.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Summary	2
Inledning/Bakgrund	3
Genomförande	4
Resultat	5
Huvudprocesser	5
Beskrivning av övergripande process/flöde	6
Lokalisering, tillstånd och logistik	7
Layout, teknikområden och avgränsningar	9
Plan för experimentell utveckling	12
Kalkyler för investering och drift	15
HYBRIT Initiativet och vätgaslagring	16
Diskussion	18
Slutsatser, måluppfyllelse	21
Referenser	22
Bilagor	22

Sammanfattning

HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology (HYBRIT) är ett initiativ vars målsättning är att ställa om hela värdekedjan för malmbaserad ståltillverkning från ett kolbaserat system till ett system baserat på vätgas och fossilfri elektricitet. Ur ett energisystemsperspektiv ska alltså den huvudsakliga energibäraren kol ersättas av el och vätgas.

HYBRIT Initiativet är tänkt att utvecklas och provas i industriell skala. Genomförandestudien har syftat till att klarlägga förutsättningarna för en pilotanläggning, dess grundläggande utformning, lokalisering samt teknikval för den fortsatta utvecklingen. Delar av arbetet har redan under projekttiden resulterat i två beslutade och uppmärksammade pilotprojekt, som är startade andra halvåret 2018.

Sverige har ett mål om nettonollutsläpp av växthusgaser år 2045. Masugnarna i stålindustrin står för en stor del, ca 10 procent, av utsläppen av fossil koldioxid i Sverige. Utvecklingen av HYBRIT Initiativet, att producera stål med hjälp av vätgas, är ett nödvändigt och viktigt steg i industrins omställning mot minskande utsläpp av växthusgaser. Pilotstudierna som beskrivs i denna rapport är också ett absolut steg för att nå dessa mål. Utöver redan beslutade pilotprojekt bedöms att ytterligare experimentell utveckling krävs för att utveckla en totalt fossilfri pelletsproduktion samt för att utveckla lagring av vätgas för att möjliggöra en bättre symbios med varierande förnybar elproduktion.

Summary

HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology (HYBRIT) is an initiative whose aim is to redesign the entire value chain for ore-based steel production from a coal-based system to a system based on hydrogen and fossil-free electricity. Thus, from an energy system perspective, coal as the main energy carrier will be replaced by electricity and hydrogen.

The HYBRIT initiative is intended to be developed and tested on an industrial scale. The implementation study has aimed at clarifying the prerequisites for a pilot plant, its basic design, location and technology choices for further development. Parts of the work have already resulted in two granted pilot projects, which started in the second half of 2018.

Sweden has a target of zero greenhouse gas net emissions by 2045. The blast furnaces in the steel industry account for a large part, about 10 percent, of fossil carbon dioxide emissions in Sweden. The development of the HYBRIT initiative, producing steel using hydrogen, is a necessary and important step in the industry's shift towards reducing greenhouse gas emissions. The pilot studies described in this report are also an absolute step towards achieving these goals. In addition to the pilot projects already decided, it is estimated that further experimental development is required to develop a total fossil-free pellet production and to develop hydrogen storage in order to enable better symbiosis with renewable power generation.

Inledning/Bakgrund

Projektet, och föreliggande rapportering av projektet, syftar till att göra en genomförbarhetsstudie inför pilotanläggning inom HYBRIT Initiativet. Studien syftar till att klarlägga förutsättningarna för en pilotanläggning, dess grundläggande utformning, lokalisering samt teknikval för den fortsatta utvecklingen. Delar av arbetet har under projektiden resulterat i två beslutade pilotprojekt^{1,2}, dels rörande ”pilotprojekt fossilfri pellets” (projektnummer P46752-1), dels rörande ”pilotprojekt fossilfri järn-, stål- och vätgasproduktion” (projektnummer P46751-1). De slutsatser som dragits tidigare under arbetet med dessa ansökningar repeteras delvis i denna rapport men har kompletterats med ytterligare resultat som framkommit under projektets slutskede.

HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology (HYBRIT) är ett initiativ vars målsättning att ställa om hela värdekedjan för malmbaserad ståltillverkning från ett kolbaserat system till ett system baserat på vätgas och fossilfri elektricitet. Ur ett energisystemsperspektiv ska alltså den huvudsakliga energibäraren kol ersättas av el och vätgas. HYBRIT Initiativet är tänkt att utvecklas och provas i industriell skala genom att utnyttja de mycket goda förutsättningar som råder i Sverige:

- Här finns en god tillgång på fossilfri el och den förväntas vara så under överskådlig tid.
- Här finns Europas största järnmalmgruva.
- Här finns flera platser där stål produceras i stor skala.
- Här finns kompetens inom berörda områden och en tradition att genom samarbeten i nätverk lösa stora utmaningar.

Sverige har ett mål om nettonollutsläpp av växthusgaser år 2045. Masugnarna i stålindustrin står för en stor del, ca 10 procent, av utsläppen av fossil koldioxid i Sverige. Utvecklingen av HYBRIT Initiativet, att producera stål med hjälp av vätgas, är ett nödvändigt och viktigt steg i industrins omställning mot minskande utsläpp av växthusgaser.

Hittills utfört och pågående arbete inom HYBRIT Initiativet utgörs av en samverkan mellan industri och högskola/institut. Hybrit Development AB (samriskbolag skapat av SSAB, LKAB och Vattenfall) samordnar utvecklingsarbetet samtidigt som utvecklingsavdelningarna inom företagen SSAB, LKAB och Vattenfall leder arbetet inom sina respektive teknikområden; järn- och stålproduktion (SSAB), reduktionsprocesser och pelletstillverkning (LKAB), vätgasproduktion och elsystemet (Vattenfall).

I samverkan med institut och högskolor genomförs specifika studier inom områden som tidigare identifierats i behov av ytterligare undersökning: politiska styrmedel och makroeffekter (LU och SEI), övergripande systemanalys (Swerea MEFOS), nedsmältning och stålproduktion (KTH), reduktionsstudier (KTH och LTU), pelletsproduktion/värminningsprocesser (LTU, Swerea MEFOS och RISE-ETC), vätgasproduktion och lagring (KTH).

Inom ramen för ett tidigare projekt³ genomfördes en omvärldsanalys där leverantörer av framtida nyckelkomponenter besöktes i syfte att förstå nulägesstatus och framtida teknikutmaningar.

Pågående och planerade studier utförs i laboratorieskala där grundläggande mekanismer klargörs och basalternativen med störst potential fastställs. Då dessa slutsatser är baserade på relativt småskaliga försök, vilka också normalt sker under en kort tidsperiod, är förhållandena vitt skilda från industriell produktion.

En industriell process baseras i och för sig på samma kemiska och fysikaliska grundprinciper, men skaleffekter och krav på kontinuerlig funktion över tid kräver att ytterligare undersökningar genomförs.

För att efterlikna en industriell process och fastställa grundläggande principer, teknikval, processfönster, skaleffekter samt krav på kringutrustning, bör undersökningar ske i pilotskala. För att minska teknikrisken är undersökningar i pilotskala i många fall ett krav innan steget kan tas till en storskalig demonstrationsanläggning.

En pilotanläggning kan närmast liknas vid en mycket liten fabrik, typiskt 1-2 ton ton metall i timmen i kontinuerlig drift (t ex schaktugn) eller 8-12 ton i satsvisa processer (t ex ljusbågsugn). Trots sin skala ställer pilotanläggningen industriella krav på infrastruktur, säkerhet, miljö, logistik och bemanning för att fungera.

Genomförande

Projektet har under tiden 2018-01-24 till 2018-09-28 genomförts som ett huvudprojekt och tre delprojekt. Styrgruppen bestod av Martin Pei (SSAB), Andreas Regnell (Vattenfall), Åsa Sundqvist (LKAB), Eva Petursson (SSAB), Mikael Nordlander (Vattenfall), Susanne Rostmark (LKAB) samt Olle Wijk (oberoende). I samband med projektstart utsåg styrgruppen Per Lundström (LKAB) till huvudprojektledare och projektet delades upp i de tre delprojekten; 1) Pellets, 2) DRI/H₂, 3) Stål. Inom vart och ett av delprojekten utsågs delprojektledare och processledare för att utforma respektive processkoncept, anläggningsutformning samt kalkyler för investerings- och driftskostnader för första stegen av experimentell utveckling.

I delprojekt ”pellets” har Thomas Nordström (LKAB) fungerat som delprojektledare och Roger Karlsson (LKAB) som processledare.

I delprojekt direktreduktion och vätgasframställning, ”DRI/H₂”, har Per Lundström (LKAB) fungerat som delprojektledare och Nicklas Simonsson (Vattenfall) och Gunilla Hyllander (LKAB) som processledare.

I delprojekt ”stål” har Björn Astermo (SSAB) fungerat som delprojektledare och Niklas Kojola (SSAB) som processledare. Inom delprojekten har ytterligare expertis från LKAB/SSAB/Vattenfall medverkat. För utredning av tekniska förutsättningar och begränsningar inom bygg och mark, maskinsystem, rör, VVS, elkraft och automation har även externa konsulter anlåtts.

Arbetet i genomförbarhetsstudien har genomförts i två iterationer där den första sammanställningen av resultat resulterade i ett tidigt ställningstagande i industrin som i april 2018 resulterade i två projektansökningar som ledde till beviljade projekt¹².

I den andra och avslutande iterationen har fördjupade studier genomförts, dels för att förbereda kommande pilotverksamhet inom de områden som tidigare identifierats, dels för att studera möjlig experimentell utveckling inom ytterligare områden som inte resulterade i ansökningar i första vågen.

Resultat

Huvudprocesser

De tänkta pilotstudierna spänner över den malmbaserade värdekedjan för ståltillverkning från pelletsverk, via järnframställning, till stålverket. Ansatsen att järnmalmen skall reduceras med hjälp av vätgas framställd med fossilfri elektricitet gör att vätgasframställning genom elektrolys av vatten tillkommer som ett nytt processteg. Även eventuell transport och lagring av vätgasen är nya komponenter i produktionssystemet. Vätgaslagring kan också komma att bli en viktig länk i den nya värdekedjan och behandlas i ett separat resultatavsnitt.

Pelletsproduktion

Pelletsverken i Kiruna, Svappavaara och Malmberget producerar idag järnmalmspelletts med fossila utsläpp som kommer från användning av eldningsolja, stenkol och naturgas. I Kiruna och Svappavaara är verken av typen grate-kiln där pelletsen sintras vid hög temperatur i en rullugn där värme tillförs genom förbränning av eldningsolja och/eller stenkol. I Malmberget är pelletsverken i stället av typen straight-grate där sintringen sker i en rörlig bädd där värme tillförs genom förbränning av eldningsolja. I ett av dessa pelletsverk sker värmeförsel delvis genom förbränning av naturgas (LNG).

För att göra en omställning till fossilfri drift krävs olika former av tekniksprång, som dessutom kan skilja sig åt för de två olika typerna av sintringsteknologi som nämns ovan. Processerna är redan idag utformade för att vara energieffektiva genom att nyttja reaktionsvärme från mineralet och genom att varma gasströmmar återförs processen för att torka och förvärma pellets före sintring vid högre temperatur.

Järnframställning

Reduktion av järnmalm i HYBRIT Initiativets koncept sker i fast fas och precis som i existerande direktreduktionsprocesser produceras metalliskt järn som benämns Direct Reduced Iron (DRI) eller järnsvamp på svenska. En kompakterad/briketterad variant av produkten kallas även Hot Briquetted Iron (HBI). Produktionsförfarandet är snarlikt existerande schaktugnsbaserade direktreduktionsprocesser med skillnaden att naturgas bytts ut mot vätgas, vilket påverkar fundamentala reaktionsmekanismer, processutformning och val av driftsparametrar. Befintliga direktreduktionsverk finns vanligtvis i länder med god tillgång till naturgas till lågt pris. Senaste åren har olika företag i gruv- och

stålindustrin utvecklat planer att drastiskt sänka fossila koldioxidutsläpp för att bidra till nationella och globala klimatmål, som i sin tur har lett till ett förnyat intresse för direktreduktion som en alternativ processväg för malmbaserad stålframställning. Idag finns det ingen direktreduktionsutrustning i Norden som är relevant för HYBRIT Initiativet.

Vätgasframställning genom elektrolys

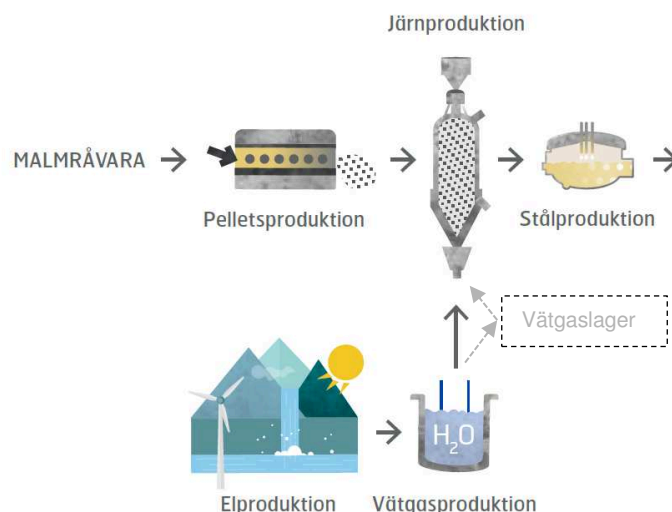
Vätgas till järnmalsreduktionen skapas genom elektrolys av vatten. Detta är en väl beprövad teknik men som idag har begränsad användning då det är billigare att producera vätgas från fossilbaserade alternativ. Även om vattenelektrolys får anses som en beprövad teknik är den fortfarande en ny komponent i järn- och stålframställningsprocesskedjan. Elektrolysörens prestanda, kostnadsbild och möjligheter till energiåtervinning och eventuell integrering med kringliggande delsystem kommer ha en avgörande påverkan på produktionskostnaden för fossilfritt stål. Producerad vätgas används direkt för järnframställning eller mellanlagras i vätgaslager.

Ståltillverkning (råstål)

Järnsvampen utgör råvara för ståltillverkningen vid vilken den smälts i en ljusbågsugn, ofta tillsammans med en viss andel recirkulerat stålskrot. Ljusbågsugnen använder elenergi för att smälta järnråvara och olika tillsatser innan ugnen tappas. Efter skänkbekning gjuts en mellanprodukt i form av stålämnen vilka antingen säljs på marknaden eller vidareförädlas. Ljusbågsugnen är idag en etablerad ståltillverkningsprocess och globalt sett den näst vanligaste stålproduktionsmetoden efter konverterprocessen som omvandlar masugnens råjärn. För lägre tillverkningskostnad och högre kvalitet används också normalt ansevärliga mängder fossilt kol i processen för att i) sänka järnets smältpunkt, ii) tillföra kemisk energi och iii) erhålla en skummande slag för högre termisk effektivitet och minskat slitage på elektroder och ugnskärl. Kol är alltså, tillsammans med el, nyckelkomponent i modern ljusbågsugnspraxis och det finns idag ingen känd processpraxis för storskalig fossilfri malmbaserad ståltillverkning via ljusbågsugn.

Beskrivning av övergripande process/flöde

HYBRIT Initiativet baserar sig på den övergripande målsättningen att byta ut koks mot vätgas för att under järnframställningssteget endast släppa ut vattenånga istället för koldioxid. Denna åtgärd medför ett paradigmskifte och en radikal minskning/eliminering av totala CO₂-utsläppet från ståltillverkning. Utöver detta ingår andra insatser, framförallt införande av fossilfria bränslen eller helt alternativa värmningstekniker vid malmförädlingen.



Figur 1 HYBRIT Initiativets huvudprocesser

Dessa fristående industriella processer kan i teorin lokaliseras på olika geografiska platser men kan även kombineras på olika sätt med olika effekt på logistik och mellanprodukter. En ansats under genomförandestudien har varit att pilotanläggningar skall byggas så att de kan köras var för sig, och inte kampanjmässigt måste sammanfalla. Vätgasproduktionen bör sannolikt vara sammanbunden med direktreduktionsprocessen. Hittills utförda förarbeten har dock inte helt klarlagt om det är mest optimalt att förlägga järnproduktionen integrerad med pelletsprocessen eller med nedsmältningen i stålverket.

Lokalisering, tillstånd och logistik

Pellets

Även om åtgärder i denna process inte leder till de största utsläppsminskningarna i specifika termer inom HYBRIT Initiativets värdekedja innebär LKAB:s totala produktion att de totala CO₂-utsläppen från pelletsproduktionen är substantiella då LKAB:s produktion överstiger avsetningen inom HYBRIT mångfald. En fossilfri pelletprocess är dessutom avgörande för att göra hela värdekedjan fossilfri. Genomförandestudien har berört sintringen av pellets som är den största CO₂-källan vid framställning av järnmalm pellets.

Två aktiviteter/lokaliseringar är aktuella.

1. Biooljeförsök i befintlig produktionsstruktur

Projektering och anläggande av biooljeanläggning för bandugnsverket i MalMBERGET. Anläggningen skall efter anläggande och idrifttagning/intrimningar kunna producera processvärme till pelletsmaskinen för full produktion av pellets med lika produktkvalitet som med fossilt bränsle. Då det enligt tidigare studier är lämpligt att göra försök med bioolja i pelletsverk av typen straight-grate möjliggör detta endast lokalisering till MalMBERGET då det är enda platsen som LKAB har

denna typ av verk. Den experimentella utvecklingen bedöms kunna ske inom befintliga tillstånd.

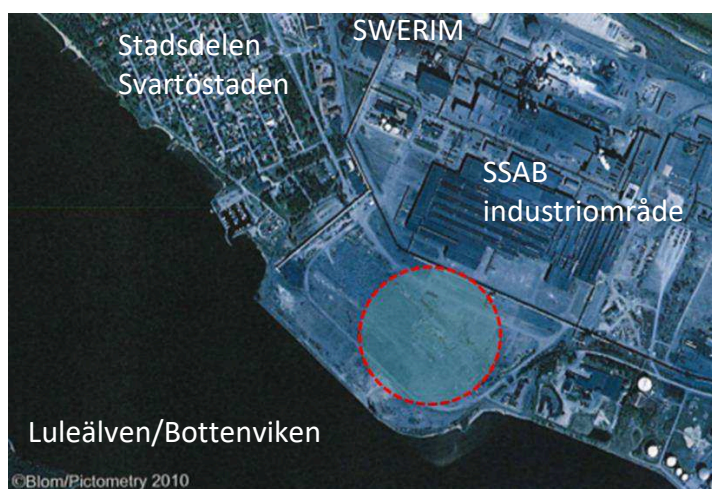
2. Pilotskaleförsök med biobränslen och plasma

För att möjliggöra en helt fossilfri pelletsproduktion måste även försök för grate-kilnprocessen genomföras. I detta skede bedöms försök i fullskala inte möjligt med avseende på driftsäkerhet, produktenskaper, reglerbarhet och optimering. För övergång till plasma gäller dessa osäkerheter även straight grate-processen. Forskning och utveckling av dessa behöver därför inledas med experimentell utveckling i pilotskala.

Dessa försök planeras i pilotanläggningen Experimental Combustion Furnace (ECF) i Luleå. ECF utgör en central komponent i LKAB:s utvecklingskedja för nya bränslen.

DRI/H₂

Utveckling av fossilfria industriella processer med direktreduktionstekniken är ett nytt utvecklingsområde. Baserat på tidigare erfarenheter fokuserades arbetet tidigt på att undersöka förutsättningarna att bygga en järnframställningspilot med en kapacitet på ca 1 ton DRI (HBI) per timme och med en processutformning som är snarlik befintliga naturgasbaserade direktreduktionsanläggningar, men med möjlighet att hantera en process baserad på 100% vätgas. En omfattande lokaliseringsutredning med som mest nio aktiva alternativ har genomförts. Då det handlar om nyanläggning av en pilotprocess har tillståndsfrågor liksom logistik och tillgång till elkraft och media spelat en stor roll för lokaliseringen. Inget alternativ kunde i sig avskrivas, men slutlig rekommendation och beslut fattades att lokalisera anläggningen till den så kallade NJA-kajen, ett område inom SSAB:s industriområde som på senare tid nyttjats som upplagsmark. En stor fördel med denna lokalisering var att SSAB:s befintliga miljötillstånd kan nyttjas och att bygglovsärenden underlättades av att det sedan tidigare fanns en detaljplan (PL396 Del av Svartöstad 13:36) antagen för området som stödde uppförandet av en forskningsanläggning.



Figur 2 Lokalisering av pilotanläggning för direktreduktion

Vid den detaljerade lokaliseringen har hänsyn tagits till en eventuell framtida förläggning av en ny järnväg, den s k Norrbottniabanan, samt möjligheter att ordna in- och uttransporter via Uddebovägen och på så sätt undvika tunga transporter i anslutning till närliggande bostadsområden. Media, elkraft och viss vattenhantering kan samordnas med SSAB.

Stål

Eftersom en ljusbågsugn i experimentell skala (8-10 ton) sedan tidigare finns vid Swerea MEFOS i Luleå och därmed också är samlokaliserad med platsen för det tänkta DRI-schaktet så har denna valts som försöksanläggning i kommande pilotprojekt. Denna ljusbågsugn har tidigare använts för experiment med DRI-råvara. Den logistiklösning som då användes fungerade bra och kan användas även i HYBRIT Initiativet. Lösningen baseras antingen på att säckar, s k ”big bags” med DRI lossas från lastbil eller att DRI flaktransporteras och bulkhanteras med hjullastare och skopa. Lagring sker i materialhus under tak. Det ska också vara möjligt att synkronisera järn- och ståltillverkning experimentellt (direkt flöde av varm eller kall DRI).

Tillstånd, logistik och media genom nyttjande av befintlig struktur.

Lösningen att nyttja en befintlig försöksanläggning kräver viss samordning (anpassning) med annan verksamhet.

Layout, teknikområden och avgränsningar

Pellets

Aktiviteter inom detta processområde är också i förlängningen avgörande för att kunna bedöma potentiella synergier mellan malmbehandling baserad på dagens teknik, framtida pelletiseringsprocesser och de nyutvecklade vätgas- och direktreduktionsprocesserna.

1. Delprojekt Malmberget levererar en anläggning vilken det går att genomföra ett försök på ca ett år för test av bioolja i Malmbergets bandugnsverk (BUV). Olika energibärare kan ställa olika utrustnings- och dimensioneringskrav. Inledningsvis designas anläggningen för bränsle av typen tallbeckolja för att i ett senare läge kunna bygga om anläggningen till att kunna använda pyrolysolja eller snarlika flytande biobränslen.

Försöket avbryts om stora störningar uppstår på tex produktkvalitet, påbyggnader, murverk eller miljö. Om inget allvarligt inträffar som medför stora störningar fortsätter försöket under totalt ca 12 månaders tid från idrifttagning.

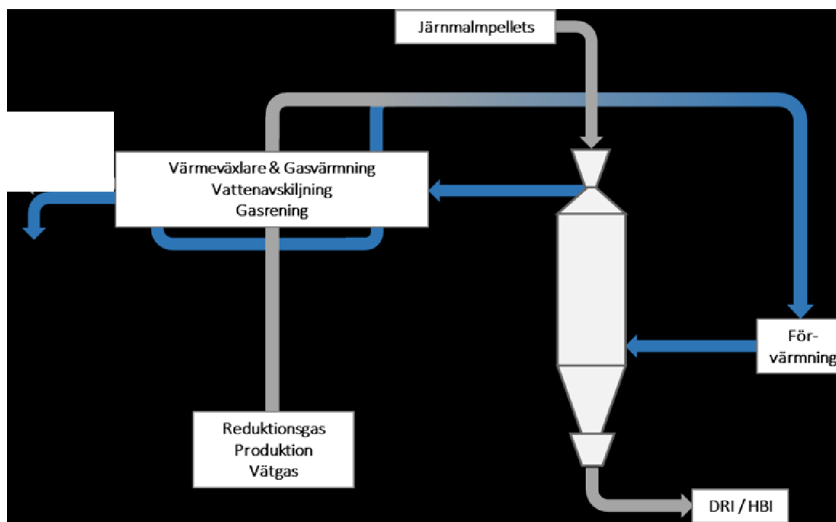
2. Försök i ECF möjliggör utvärdering av nya energibärare och brännartekniker i en säker miljö som simulerar de unika och varierande processförhållanden som råder i LKAB:s pelletsverk. Dessa förhållanden karaktäriseras exempelvis av stort syreöverskott, höga massflöden på processgas, samt cirkulerande hematitstoft som interagerar med aska och flamma. ECF-försök kan genomföras med den experimentella utrustningen

konfigurerad för såväl straight-grate (SG) som grate-kiln (GK). Omställningsprocessen mellan de två konfigurationerna är omfattande varför flera skilda kampanjer planeras i projektet – minst en för varje processtyp.

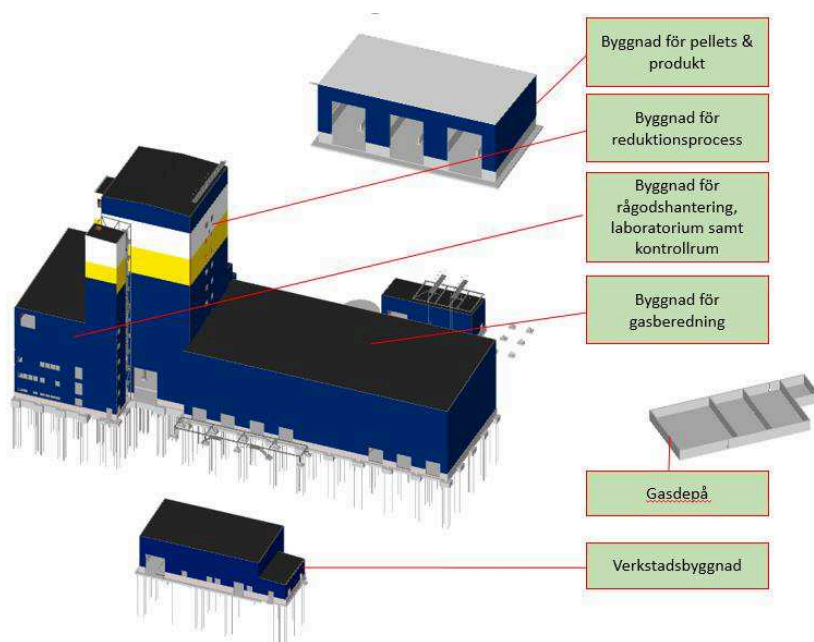
DRI/H₂

Planerade utvecklingsarbeten inom HYBRIT Initiativets pilotprojekt krävs en anläggning med flexibilitet för test av olika reduktionsprocesslösningar och anläggningsdelar i pilotskala.

Omfattning av planerad anläggning beskrivs som processflöde i Figur 3 samt bygglayout Figur 4. Som redan nämnts planeras med en kapacitet på ca 1 ton DRI (HBI) per timme. Föreslagen skala och omfattning tillgodoser kravbilden för HYBRIT Initiativets pilotförsök och erbjuder flera fördelar jämfört med anläggningar i mindre skala: en kontinuerlig process tillåter test och utvärdering av ett övergripande processflöde med möjlighet för utredning av skaleffekter, stöd för ett eller flera alternativa processflöden och utveckling av fossilfri uppkolning av produkten, möjlighet att tillverka både DRI och HBI, samt produktionskapacitet för kampanjvis direkt flöde av produkterna för nedsmältning i ljusbågsugn. Dessutom kan anläggningen utnyttjas för utbildning och design av en anläggning i större skala (demoskala).



Figur 3 Övergripande processflöde för planerad HYBRIT DR och H₂ pilotanläggning



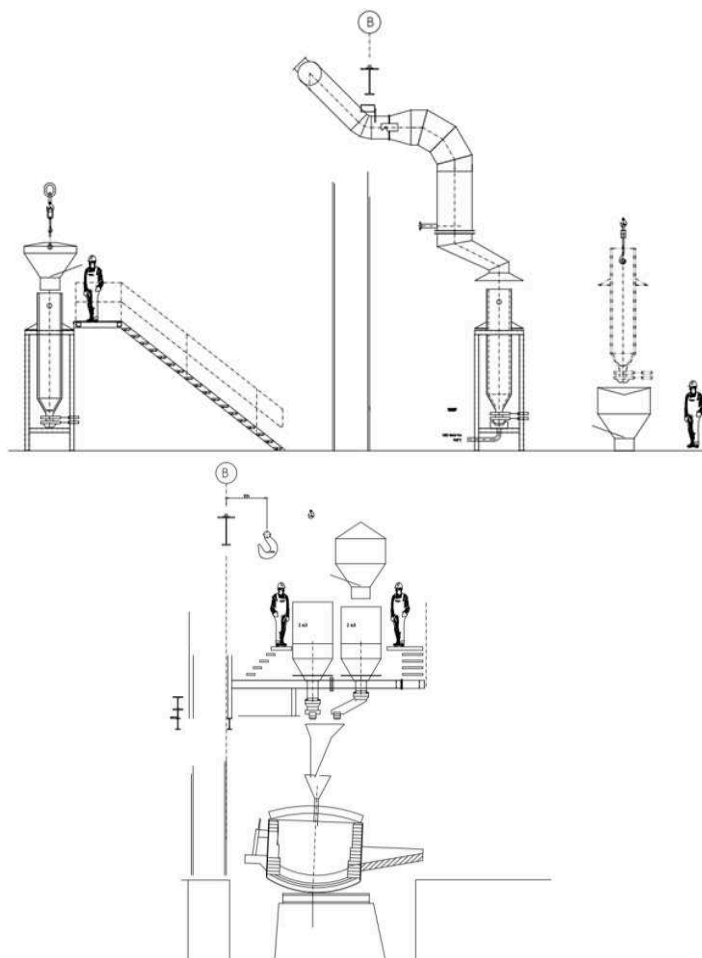
Figur 4 Byggnadslayout (inkl pålning till fast grund) DR och H₂ pilotanläggning

Stål

Ljusbågsugnen finns på Swerea MEFOS (SWERIM från okt -18) område i Luleå. Anläggningen kan modifieras genom

- Ombyggnation av befintlig lansmanipulator på LB-ugn för att kunna hantera två injektionslansar
- Förvärmningskapacitet DRI/HBI till 600°C
- Anpassning/tillägg av befintligt materialmatningssystem för att kontinuerligt chargera DRI/HBI
- Anpassning av befintligt system för injektion av biomaterial
- Bygga mediasystem för vätgas/propan till LB-ugn, både för injektionslans och brännare

Framtagen plan för förvärmningsutrustning visas översiktligt i Figur 5.



Figur 5 Fr. v.: Fyllning av förvärmningsbehållare, förvärmningsprocess, fyllning av materialkorg, charging av materialkorg till isolerad chargeringsficka för vidare kontinuerlig matning ner i ljusbågsugnen

Plan för experimentell utveckling

Pellets

Biooljeförsök i bandugnsverket

Efter avslutade försök i Malmbergets bandugnsverk kommer det att verifieras om bioolja går att använda som bränsle i straight-grate processen med avseende på följande kriterier:

- Hur påbyggnader i pelletsugnen påverkas jämfört med EO5 (eldningsolja)
- Hur pellets kvalitet påverkas
- Hur murverk påverkas jämfört med EO5
- Hur emissioner påverkas jämfört med EO5
- Hur bioolja inverkar på underhållsinsatser och drift
- Hur bränsleförbrukningen påverkas av biooljans egenskaper

Experimentkampanjer i ECF

Målsättningen med försökskampanjer i ECF är att säkerställa att nya biobränslen och plasmabrännare fungerar i pelletsverkens speciella miljö med avseende på flammans och askans egenskaper och emissioner. Försöken ska också bidra till att klarlägga nya värmningsteknikers tillgänglighet och möjligheterna att reglera processen effektivt. För plasmaspåret utgör ECF också ett unikt första försök för användning av plasma i pelletsverk.

ECF är också en central del i utformningen av brännare och parametrisering av förbränningen för minimering av emissioner för såväl nya som befintliga energiråvaror. ECF-kampanjerna syftar till att besvara följande forskningsfrågor helt eller delvis.

- Hur inverkar nya biobränslen och plasma på emissioner, flamlängd och värmeöverföring?
- Hur inverkar biobränslen och plasma på murverk och infodring?
- Hur påverkar biobränslen och plasma på uppbyggnaden av slagg och stoft?
- Specifikt för biobränslen ska försöken bidra ny kunskap om
 - Lämplig brännarutformning och brännarparametrisering för nya bränslen?
 - Logistik, hantering och lagring i driftnära förhållanden?
- Specifikt för plasma ska försöken bidra till att ge information om
 - Lämpliga bärgaser och hur driftparametrar såsom effekt och bärgasvolym inverkar på plasmas egenskaper och driftsäkerhet?
 - Hur plasma interagerar med stoft från järnmalm?

DRI/H2

Den experimentella utvecklingen av vätgasbaserad reduktion av järnmalm är central för hela HYBRIT Initiativet. Första delmålet är att driftsätta pilotanläggningen efter leverans och kvalificering från leverantörer. En viktig aspekt i detta är att säkerställa att rutiner och processer utvecklas och följs för att möjliggöra en säker och effektiv drift.

Totalt planeras tio övergripande försökskampanjer i pilotanläggningen mellan 2020 till 2024. Dessa kombineras med mindre försöksserier, och experimentella undersökningar som kan genomföras isolerade i en delmängd av utrustningen i anläggningen:

Kampanj 1-2: Initiala försökskampanjer för validering och verifiering av anläggningen samt utveckling av grundläggande rutiner och processer för driften. Naturgas används för att kalibrera anläggningen med en känd och väl etablerad industriell process. Detta används som referens för vidare försökskampanjer med vätgas som reduktionsmedel, och definition av parameter för en fossilfri reduktionsprocess.

Kampanj 3-5: Kampanjer för utveckling av en vätgasbaserad grundprocess för produktion av DRI. Validering av processfönster. Kartlägga och definiera processer för fossilfri uppkolning av produkten.

Kampanj 6-7: Kampanjer för validering av uppkolning och försök för att undersöka och definiera process för optimering av intern energiåtervinning. Utvärdering av alternativ värmningsteknik för reduktionsgas.

Kampanj 8-10: Kampanjer för att optimera processparameter för vätgasbaserad produktion av DRI och HBI. Kampanjer kan utnyttjas i utbildningssyfte för planerad nästa steg i uppskalning till demoskala.

Vätgasframställning genom elektrolys av vatten är en ny komponent i järn- och stålframställningsprocesskedjan vars prestanda, kostnader och möjligheter till energiåtervinning och eventuell integrering med kringliggande delsystem kommer ha en avgörande påverkan på produktionskostnaden för fossilfritt stål i framtida HYBRIT-anläggningar i demo-/kommersiell skala.

Därför finns en rad frågeställningar som berör denna delprocess:

- Validering av elektrolys-/kompressorprestanda, driftegenskaper och driftkostnader genom återkommande testkampanjer för att klarlägga prestanda och driftegenskaper över tid kopplat till degradering.
- Identifiera förbättringsåtgärder kopplat till storskaliga elektrolysanläggningar, som exempelvis
 - Möjlighet till energiåtervinning i form av spillvärme och användning av syrgas för att öka energieffektivitet och sänka produktionskostnad.
 - Modellutveckling och optimeringsstudier baserat på driftdata i syfte att säkerställa tillgång till tillförlitliga och aktuella simuleringsverktyg.

Då slutligt val av elektrolysisprocess för pilotanläggningen kommer vara föremål för en upphandlingsprocess efter projektidens utgång så kan vissa av de föreslagna delmålen och aktiviteterna komma att justeras något beroende på slutligt teknikval.

Stål

Målet med stålproduktionsforskningen i pilotskala är att ta fram en industriell praxis för fossilfri nedsmältning av vätgasreducerad DRI i ljusbågsugn. Mer specifikt innebär detta att utreda relevanta processnyckeltal för:

- Fossilfri slaggs-kunningspraxis
- Vätgasreducerade DRI-råvarans nedsmältningsegenskaper
- Optimal slaggspraxis utifrån raffinering och restprodukter

Dessa tre huvudområden har brutits ned till forskningsfrågeställningar till vilka lämpliga experimentella försökskampanjer sedan utarbetats. Nedan följer en översiktlig beskrivning av försökskampanjerna.

Försöken kommer att inledas med en referenskampanj där ljusbågsugnens processföring så nära som möjligt ska motsvara dagens standard för kommersiell stålproduktion i ljusbågsugn. Både helt skrotbaserad och helt DRI-baserad drift kommer att testas. Resultatet kommer att jämföras med publicerade referensdata från industriella ljusbågsugnprocesser. Utifrån denna jämförelse kommer den experimentella pilotutrustningens skalfaktorer gentemot fullskalig produktion att bestämmas. Dessa skalfaktorer kommer sedan att användas i kommande försökskampanjer för att kunna översätta experimentella resultat till effekter i industriell skala.

I en skunningskampanj kommer olika sätt att erhålla en skummande slagg utifrån fossilfria och tillgängliga reagens att testas. Ett grundkrav för att ett reagens ska testas utifrån duglighet för den gasbildande reaktionen är att reagenset sannolikt kommer att finnas tillgängligt ur ett långsiktigt hållbarhets- och ekonomiskt perspektiv varför en fördjupad sådan studie kommer föregå det experimentella arbetet.

Vätgasreducerad DRI-råvara kommer ge ett delvis nytt slaggsystem jämfört med det som erhålls vid nedsmältning av konventionell DRI. Under slaggföringskampanjen kommer detta slaggsystem att testas och optimeras utifrån raffineringsegenskaper, skunningsegenskaper samt potential att utvinna värdemetaller. Olika processpraxis, från konventionell satsvis smältning till mer kontinuerlig drift, kommer att simuleras för att identifiera den mest dugliga slaggen och processföringen.

DRI-råvarans nedsmältningsegenskaper kommer att granskas i en kampanj där matningshastigheten av råvaran, råvarans temperatur vid tillsats, samt råvarans kolhalt och metallisering kommer att varieras. Resultaten i denna kampanj kommer att ha stor inverkan hur den kommande industriella processen ska designas utifrån utrustnings- och produktivitetsperspektiv.

Avslutningsvis kommer möjligen också en renhetskampanj där teknik för atmosfärsskyddad nedsmältning testas med syfte att nå eller överträffa dagens högt ställda krav på renhet avseende luftelement i stålet.

Utöver svar på forskningsfrågeställningar kommer försökskampanjerna dessutom erbjuda värdefull möjlighet till utbildning och processförståelse för processens blivande operatörer, drifttekniker och processingenjörer.

Kalkyler för investering och drift

Kostnaden för genomförande av projekten har beräknats till 1 426 kSEK. Fördelning av kostnader per kostnadslag och huvudprocess sammanfattas i Tabell 1.

Tabell 1 Kostnadskalkyl för pilotförsök^{1 2}

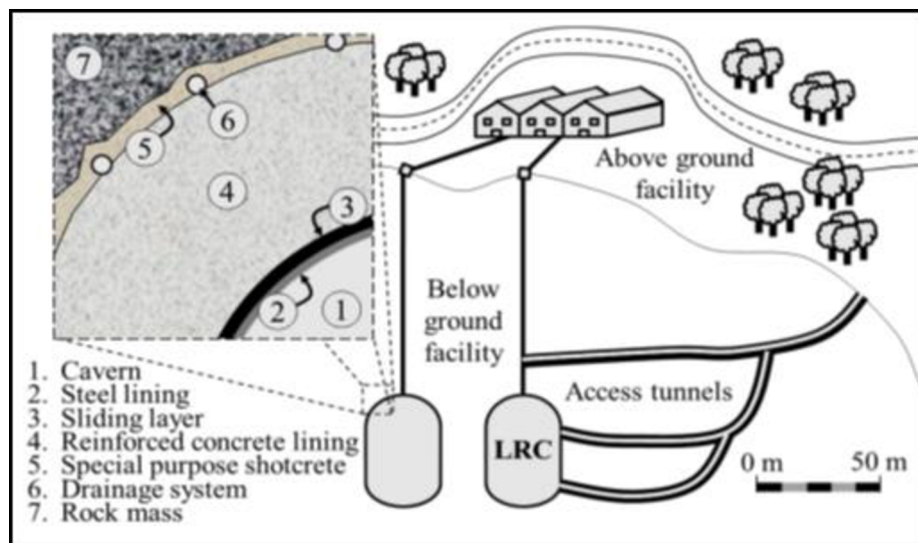
<i>Kostnad (MSEK)</i>	<i>Pellets</i>	<i>DR/H2/Stål</i>	<i>Summa</i>
<i>Utrustning</i>	78	875	953
<i>Resor</i>	<1	1	1
<i>Övriga kostnader</i>	20	136	156
<i>Material</i>	6	<1	7
<i>Lönekostnader</i>	17	282	299
<i>Laboratoriekostnad</i>	<1	5	5
<i>Köpta tjänster</i>	3	0	3
<i>Indirekta kostnader</i>	1	0	1
<i>Summa</i>	126	1299	1425

HYBRIT Initiativet och vätgaslagring

En omställning av svensk järn- och stålframställning från att använda kol och koks till att använda vätgas framställd genom elektrolys kommer att ha väsentlig påverkan på både elsystem och elmarknad. Tidigare³ och pågående⁴ analyser visar att storskalig lagring av vätgas skulle kunna spela en viktig roll i ett framtida svenskt energisystem med en förväntad ökande andel väderberoende intermittent kraftproduktion.

Förutom att agera som en buffert för att säkerställa ett jämnt och kontinuerligt flöde till DR-processen skulle ett storskaligt vätgaslager i kombination med lämplig dimensionering av vätgasproduktionens kapacitet utgöra ett viktigt verktyg för att öka flexibiliteten och möjligheten att balansera elsystemet. Detta genom att producera och lagra vätgas när elproduktionen är hög (och elpriserna lägre) och nyttja vätgas från lagret till HYBRIT Initiativets process när elproduktionen är låg (och elpriserna högre). Totalt sett skulle därmed kostnaden för anskaffning av el för produktion av vätgas minska i jämförelse med konstant elkonsumtion och utan vätgaslager. Analyser visar även att vätgaslagret möjliggör att mer vindkraft (eller annan intermittent elproduktion) får plats i systemet.

Slutsatsen är att storskalig lagring av vätgas skulle kunna ge signifikanta fördelar och därmed ses som en viktig komponent inom HYBRIT Initiativet.



Figur 6 Huvudprinciperna för Lined Rock Cavern tekniken
(med tillåtelse från KTH Jord- och bergmekanik, Johansson et al.)

Underjordisk trycksatt lagring är det idag primära och mest kostnadseffektiva alternativet för lagring av vätgas i stora mängder³. För svenska geologiska förhållanden, primärt kristallint berg, är Lined Rock Cavern (LRC) tekniken det mest lovande alternativet. Tekniken är demonstrerad för naturgas i Sverige sedan 2002 (Gaslager Skallen på västkusten med en volym på 40 000 m³). Tekniken är dock inte beprövad för vätgas. Därför måste nuvarande teknik och kunskap utvärderas samt anpassas. Ett viktigt steg i denna utveckling är empiriska försök där en prototyp (pilot) för utvärdering och demonstration byggs. Avgörande tekniska aspekter att bekräfta genom pilotförsök är exempelvis; absolut gastäthet och val av material för tätskikt, förmågan att prognosticera bergmassans respons, deformationsupptagning, säkerhets- och övervakningssystem samt termodynamiska aspekter såsom temperaturförändringar vid fyllning och tömning.

Utöver tekniska aspekter medför ett pilotförsök att ett vätgasanpassat LRC-koncept kan uppvisas, att samarbete med myndigheter kring tillståndsfrågor gällande lagring etableras samt dialog med allmänheten kring acceptansfrågor.

Ett antal möjliga lokaliseringar för ett pilotlager har identifierats och är under utredning. Optimal lokalisering av pilotlagret är i anslutning till planerad DRI/H₂-pilot eftersom vätgasproduktion med lämplig kapacitet kommer finnas på plats. Dock är det många andra faktorer förutom de rent tekniska och geologiska som måste falla på plats. Därför har inget slutligt beslut om lokalisering för ett pilotlager tagits inom ramen för genomförandestudien.

Diskussion

Pilotskala – syfte och betydelse för utvecklingen

Hittills framkomna tekniska resultat från HYBRIT Initiativets pågående studier har avgränsat de framtida alternativen samt identifierat viktiga tekniska undersökningspunkter i de olika processtegen. Pågående eller planerade fortsatta studier i pilotprojekten^{1 2} och/eller forskningsprojektet⁴ inom HYBRIT Initiativet hanterar bl a följande punkter:

- Fossilfri pelletsprocess; utformning av storskaliga fossilfria brännare.
- Direktreduktionsprocessen; reduktionsmekanismer, reaktionskinetik, processdesign, teknislösningar, dimensioneringskriterier samt utrustningsval.
- Stålframställningsprocessen; hantering av kolfri råvara och dess inverkan på processsystemet med fokus på smältning.
- Vätgasproduktion via elektrolys; teknikval och skaleffekter.
- Vätgaslagring; teknikval och -utveckling för storskalig lagring.
- Elsystemet; förbrukningar och balanseringsmöjligheter.
- Systemanalys: övergripande systemanalys samt utvärdering av olika integrationsalternativ.

Pågående och planerade studier av ovanstående utförs i laboratorieskala där grundläggande mekanismer klargörs och de mest potentiella basalternativen fastställs. Dessa slutsatser är baserade på småskaliga försök i laboratoriemiljö, vilket normalt ses som första steget i industriell utveckling, med förhållanden som är vitt skilda från en industriell produktionsmiljö.

För att utveckla nya produktionssystem krävs normalt en flerstegsutveckling där varje steg besvarar olika frågeställningar och där avståndet mellan varje steg är avvägt för att minimera utvecklingsrisker, Tabell 2.

Det finns tre huvudskäl varför en stegvis ansats är nödvändig i industriell utveckling av en ny strålframställningsprocess:

- i) Skalfaktorn mellan de olika stegen måste begränsas, framförallt i steget från Pilot till Demonstration då oväntade skaleffekter måste undvikas. Att gå direkt från Laborariestudier till Demonstration är mycket riskfyllt med stor sannolikhet för misslyckande.
- ii) Förutom själva skalan så är driftsförhållanden och körsätt mellan de olika stegen väsensskilda. Detta innebär att en hel del information saknas om ett steg utelämnas, vilket ökar risken att misslyckas avsevärt.
- iii) Finansiell risk. Om ett projekt, mot förmodan, bedöms som oframkomligt är det betydligt mindre förlorat om man avbryter i exempelvis steg 2 än steg 3.

Tabell 2 Utvecklingssteg i industriell utveckling

Steg	Benämning	Syfte	Karakteristik	TRL* nivå
1	Laboratorie-studier	Mäta grunddata. Utreda principiellt skilda alternativ. Fastställa termodynamiska och kinetiska mekanismer. Utveckla produktionsprincip.	Försök i laboratorium. Gram – kilogram per försök.	1-4
2	Pilot-studier	Utprova/verifiera olika produktionsprinciper. Studera skaleffekter, förbrukning och interaktioner. Utreda funktion hos utrustning. Utveckla ett produktionskoncept.	1-10 ton per timme. Försök i kampanjer.	5-6
3	Demonstration	Utprova produktionskoncept i driftsmiljö med kontinuerlig produktion utan stopp. Utreda långsiktiga effekter och slitage. Fastställa konsumtionstal. Utveckla/verifiera en industriell process.	250 – 500 kton/år Kontinuerlig drift	7
4	Produktion	Den industriella processen är bekräftad/etablerad.	500 - 2 500 kton/år Kontinuerlig drift	8-9

* TRL – Technology Readiness Level

Det långsiktiga målet för HYBRIT Initiativet är att stegvis höja TRL och att etablera den nya processen till 2035. Pilotstudierna bedöms vara ett helt nödvändigt steg för att nå dessa mål.

Behov av ytterligare pilotutveckling och demonstration – Nästa steg

Inom HYBRIT Initiativet är vi beroende av att samtliga delar i värdekedjan konverterar till fossilfri drift för att säkerställa en fossilfri slutprodukt (stål), även om enheterna i sig också agerar gentemot andra intressenter. Följaktligen har HYBRIT Initiativets pilot delats upp i ett antal delprojekt som agerar fristående och som var för sig kan genomföra en konvertering av sin industriprocess mot fossilfrihet utan externa beroenden. Figur 7 visar de påbörjade respektive planerade pilotprojekten och deras inbördes relation.

Pilot Fas 1a

Redan under första iterationen identifierades och fastställdes behovet av pilotprojekt rörande flera huvudprocesser. Pilotprojekt inom direktreduktion och vätagasframställning, samt smältförsök i ljusbågsugn (Projekt1) samt fossilfri pelletisering (Projekt 2), är redan startade.

Pilot Fas 1b

Ytterligare pilotutveckling som i dagsläget bedöms intressant benämns fas 1b i översikten. Den består av två projektområden:

Fördjupad pellets-pilot (Projekt 3)

Projekt 2 omfattar dels fundamentala uppvärmningsstudier, dels experimentella försök vid bandugnsverket i Malmberget. Projekt 3 kompletterar Projekt 2 genom att ta steg mot vidare experimentell utveckling och implementering vid den andra typen av pelletverk, som finns vid LKAB:s anläggningar i Kiruna och Svappavaara.

Befintlig försöksanläggning är i dagsläget av en typ som benämns ”Pot-furnace” där man satsvis pelletiserar motsvarande 100 kg malm. Vidare finns ”Experimental Combustion Furnace” (ECF) som nyttjas för rena förbränningstester utan järnmalmpellets.

Ingen av ovan anläggningar är lämpade för att utvärdera fullskaleimplementering av pelletiseringsprocesser. Detta gäller i synnerhet för den s.k. Grate-Kiln processen där enbart en huvudbrännare existerar för tillförsel av termisk energi till sintringsprocessen.

Behov finns därför att vidare utreda genomförbarheten avseende att uppföra en s.k. ”Experimental Pellet Plant” (EPP) för att utreda total fossilfri pelletisering samt generellt minskad energiförbrukning vid LKAB.

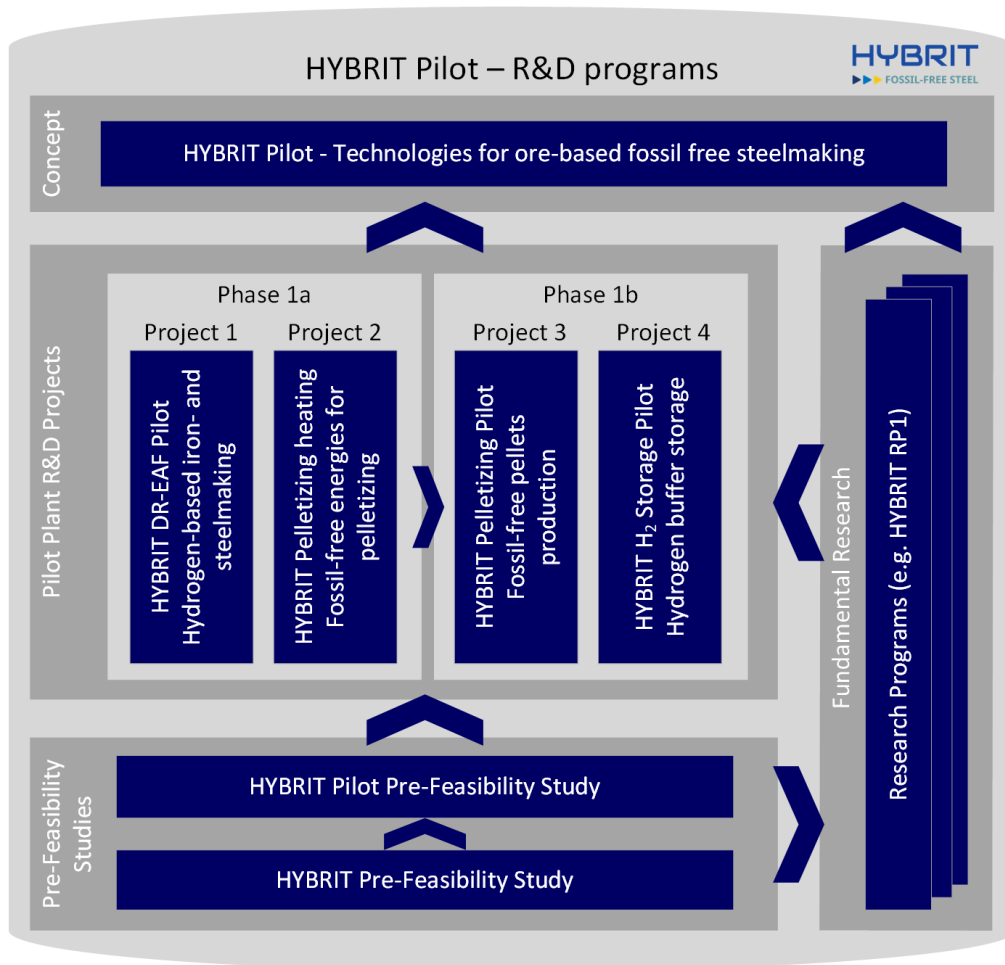
Kostnaden för ett sådant utvecklingssteg beror på skala, omfattning och lokalisering. En grov uppskattning av projektvolymen är 800 MSEK.

Vätgaslager (Projekt 4)

Projektet är under utredning men lokaliseringen är fortfarande olöst, och därmed är även den konkreta omfattningen av projektet en öppen fråga.

Total uppskattad kostnad för ett pilotlager för vätgas är för närvarande 150-200 MSEK beroende på lokaliseringen. I de angivna kostnaderna ingår även teoretiska studier och laboratorieförsök. Även återställningskostnader ingår i summan.

Pilotstudier av storskalig vätgaslagring är tekniskt motiverade, men en tillkommande aspekt av framtida betydelse är också utvecklingen av en praxis kring tillståndsfrågor och samhällets acceptans för denna typ av verksamhet.



Figur 7 Påbörjade respektive planerade projekt/forskningsprogram inom HYBRIT

Slutsatser, måluppfyllelse

Projektet syftade till att klarlägga förutsättningarna för en pilotanläggning, dess grundläggande utformning, lokalisering samt teknikval för den fortsatta utvecklingen. Arbetet i genomförbarhetsstudien har genomförts i tre delprojekt: Pellets, DRI/H₂ samt Stål. De tre delprojekten resulterade i ett fullständigt beslutsunderlag för två projektansökningar som ledde till beviljade projekt, ”pilotprojekt fossilfri pellets” (P46752-1), och ”pilotprojekt fossilfri järn-, stål- och vätgasproduktion” (P46751-1). Projektets mål anses därmed uppnått.

I den senare delen av projektet så har fördjupade studier och förberedelser kommande pilotverksamhet utförts. Således har de beslutade pilotprojekten fått en flygande start.

Utöver detta arbete har projektet studerat möjlig experimentell utveckling inom ytterligare områden som inte resulterade i ansökningar i första vågen. De två områden som i dagsläget är intressanta för ytterligare pilotutveckling beskrivs kortfattat i slutrapporten.

Referenser

1. HYBRIT Pilot Fossilfri pellets, 2018-06-13 - 2021-06-30, projektnummer P46752-1
2. HYBRIT Pilot Fossilfri järn-, stål- och vätgasproduktion, 2018-06-13 - 2024-06-30, projektnummer P46751-1
3. HYBRIT (HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology) – Fas 1, 2016-07-01 - 2018-02-28, projektnummer P42684-1, slutrapporterad
4. HYBRIT (HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology) – Forskningsprojekt, 2017-03-01 - 2021-06-30, projektnummer P42684-2

Bilagor

Administrativ bilaga (OBLIGATORISK)