

# Fossilfri stålproduktion redo för industrialisering

*Nu finns tekniken för att eliminera mer än 10 %  
av Sveriges CO<sub>2</sub>-utsläpp.*

HYBRIT

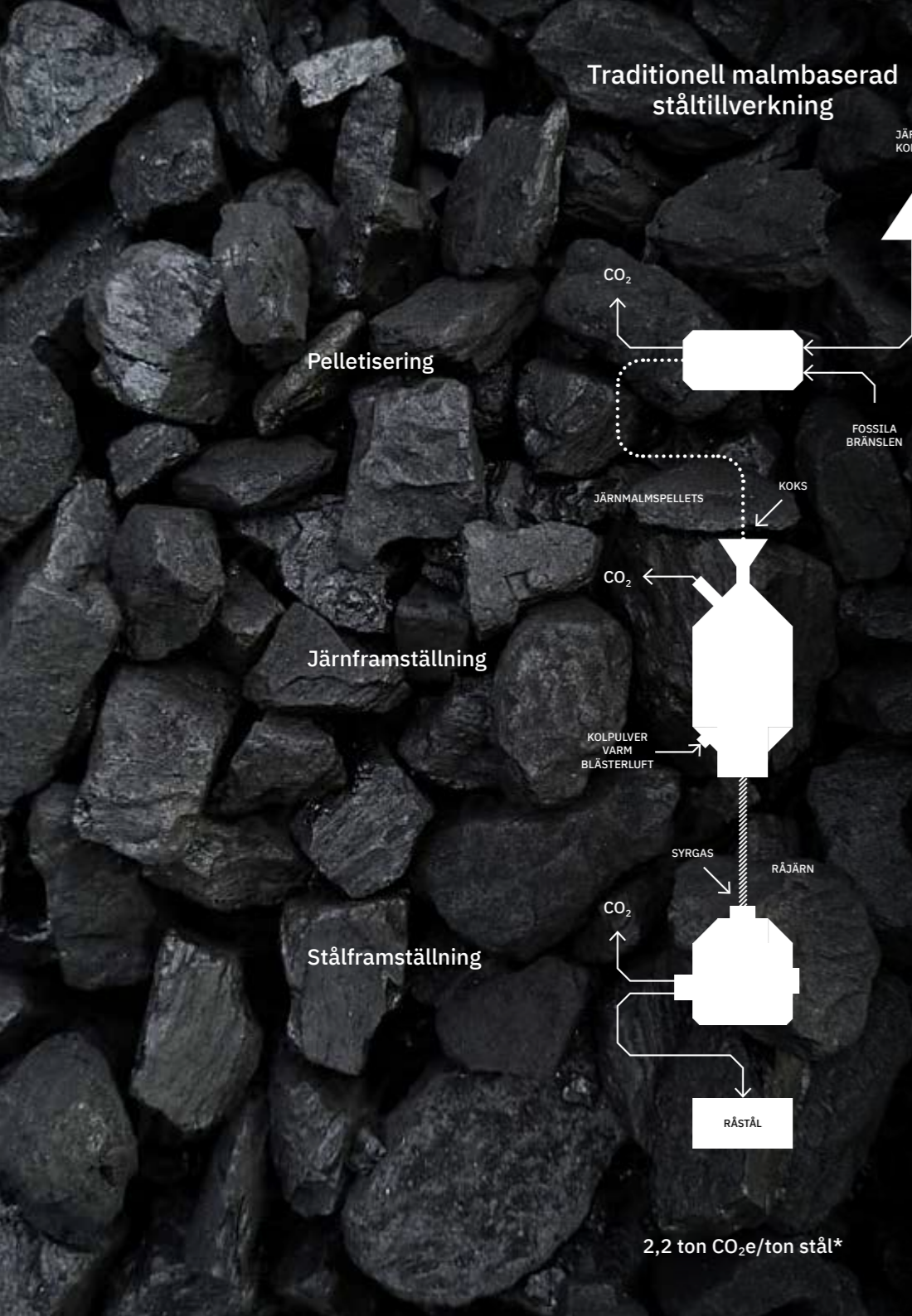
SSAB

LKAB

VATTENFALL 

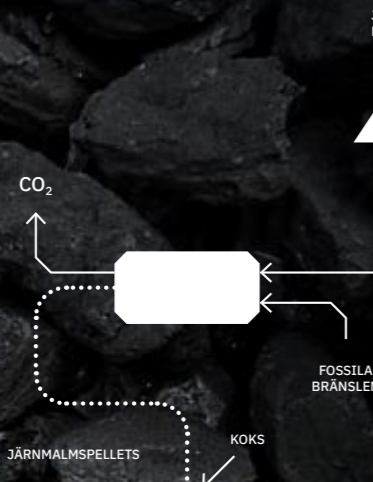
Augusti 2024  
[hybritdevelopment.se](https://hybritdevelopment.se)





## Traditionell malmbaserad ståltillverkning

### Pelletisering



### Järnframställning

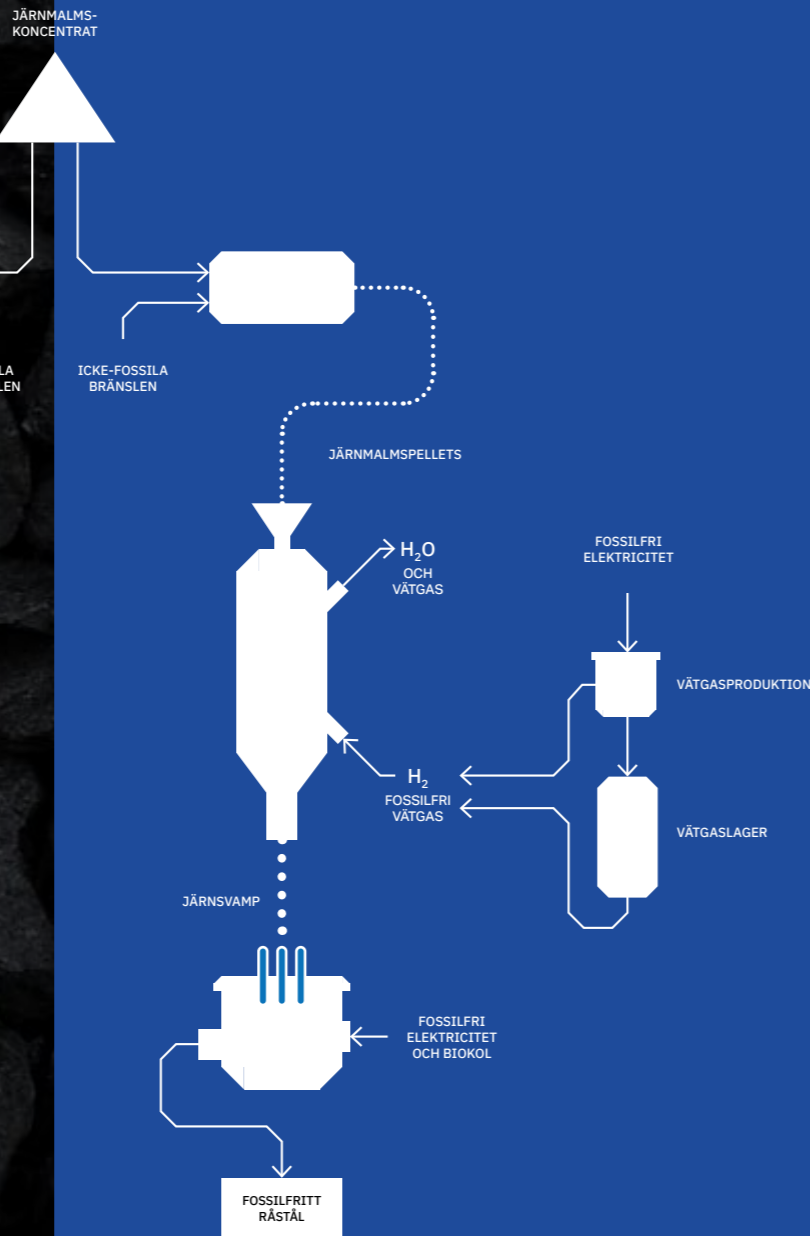


### Stålframställning



2,2 ton CO<sub>2</sub>e/ton stål\*

## HYBRIT®



0,0 ton CO<sub>2</sub>e/ton stål\*

# HYBRIT® eliminerar CO<sub>2</sub> från järn- och stålindustrin

Stålindustrin står för en stor andel av industrins koldioxidutsläpp, motsvarande 7 % av de globala och minst 10 % av de svenska utsläppen. Europas och Sveriges nationella klimatmål visar tydligt vägen – det krävs en omställning av industrin för att nå netto nollutsläpp av växthusgaser från 2045.

Dagens stålframställning är beroende av fossilt kol för tillförsel av energi och för att reducera järnoxid till rent järn i masugnar. Masugnsprocessen står för cirka 85-90 % av de totala koldioxidutsläppen vid malmbaserad stålframställning.

I HYBRIT-processen reduceras i stället fossilfria järnmalmspellets till järn med hjälp av enbart vätgas utan användning av fossilt kol. Järnet har en porös struktur och kallas järnsvamp, direktreducerat järn eller DRI (Direct Reduced Iron). Restprodukten blir vatten.

Med HYBRIT-tekniken undviks utsläpp av koldioxid helt.

# 0,0

ton CO<sub>2</sub>e/ton stål\*

\* Processen ger små utsläpp av koldioxid som kommer av förbrukning av grafittektroder och tillsats av slaggbildare i ljusbågsugnen. Dessa utsläpp är mindre än 0,05 ton CO<sub>2</sub>e/ton stål vilket avrundas till 0,0 ton CO<sub>2</sub>e/ton stål. Typiskt värde för malmbaserad ståltillverkning med masugnsteknik är 2,2 ton CO<sub>2</sub>e/ton stål.

# Fokus på teknikutveckling för industriell skala

Nu avslutas det mest omfattande av HYBRITs pilotprojekt. Det har pågått från 2018 fram till sommaren 2024 och inkluderat fossilfri produktion av järnmalmspellets, vätgasbaserad direktreduktion av järnmalm, vätgasproduktion genom elektrolys av vatten och framställning av råstål genom smältning av järnsvamp i ljusbågsugn.

HYBRITs processkoncept har sin utgångspunkt i forskningsresultat kopplade till befintlig teknik för järn- och ståltillverkning. En ny vätgasbaserad värdekedja kräver samtidigt ny kunskap om processprinciper som kan leda till förändringar av nuvarande tekniklösningar.

Fokus för HYBRITs tekniska utveckling har varit att bygga upp kompetens och skapa tekniska förutsättningar för implementering av HYBRITs fossilfria process i en fullskalig produktion.

Tester och utveckling i semi-industriell skala – så kallad pilotutveckling – har därför haft en central plats. Stora delar av utvecklingsarbetet har genomförts i anläggningar som motsvarar fullskaliga industriella produktionsmiljöer vad gäller både utrustning och processtyrning men med lägre produktionskapacitet. Utvecklingen har haft en bred ansats där varje processteg i HYBRITs processkedja har undersökts.

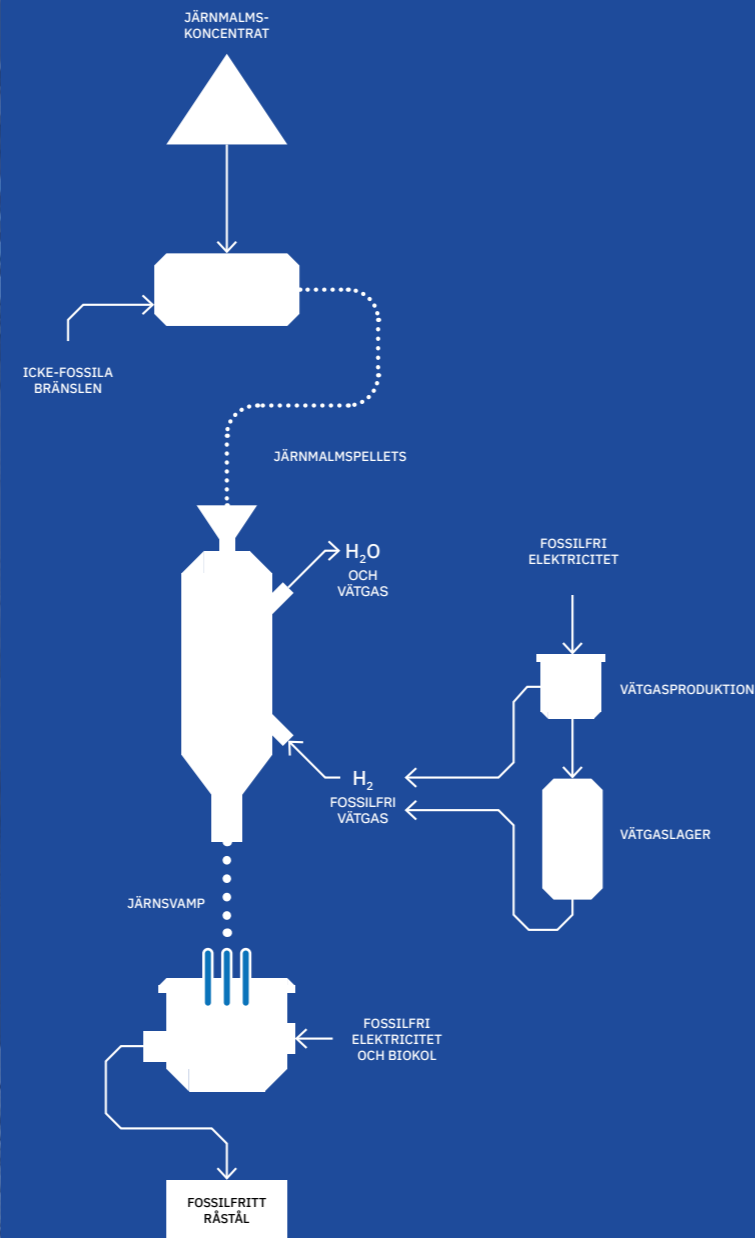
## Huvudresultat:

- HYBRIT har utvecklat en ny vätgasbaserad teknik som möjliggör en effektiv fossilfri järn- och stålproduktion med 0,0 ton CO<sub>2</sub>e-utsläpp per ton stål (Scope 1 och 2).
- Val av processinställningar och teknik har validerats genom försök i pilotskala för en sammanhängande värdekedja från malm till stål.
- Värdekedjan bygger på en ny järnsvampsprodukt med unika egenskaper.
- Inga nya tekniska hinder har identifierats. Resultaten banar vägen för att fortsätta utvecklingen och implementera HYBRIT-tekniken i industriell skala.





# HYBRIT®



# Verifierad utveckling i varje steg

## Fossilfri produktion av järnmalmspellets

Tillverkningsprocessen för fossilfria järnmalmspellets har utvecklats vid LKABs pelletsverk i MalMBERGET under 2020-2021. Processens fossila bränslen har ersatts med bioolja som är 100 % förnybar. Se mer på sid 16.

## Vätgasbaserad direktreduktion i semi-industriell skala

En pilotanläggning för direktreduktion av järnmalm med vätgas i Luleå togs i drift hösten 2020 och våren 2021 producerades den första fossilfria järnsvampen där järnmalm reducerats med enbart vätgas. Se mer på sid 8.

## Kolfri järnprodukt ger en konkurrenskraftig värdekedja för järn och stål

Att ta fram en konkurrenskraftig värdekedja från malm till stål har varit ett centralt fokus för HYBRITs arbete. Detta har uppnåtts genom att konsolidera och integrera resultat från kedjans olika delprocesser. Analysen visar att kolfritt direktreducerat järn är väl lämpat för industriell tillämpning i SSABs och LKABs produktionssystem. Se mer på sid 10.

## Smältning av fossilfri järnråvara i ljusbågsugn i samarbete med Swerim

HYBRIT har i samarbete med forskningsinstitutet Swerim utvecklat en effektiv och fossilfri process för smältning av fossilfria järnråvara till råstål i ljusbågsugn. Experimenten visar att den fossilfria smältningen ger ett stål som håller samma kvalitetsnivå som dagens fossila malmbaserade stål. Se mer på sid 14.

## Vätgasproduktion och lagring

HYBRITs pilotanläggning i Luleå inkluderar elektrolysörer för produktion av vätgas för reduktionsprocessen. Elektrolysörerna levererar även vätgas till pilotanläggningen för lagring av vätgas vid Svartöberget i Luleå. Pilotlagret togs i drift sommaren 2022 och används för validering av process och teknik för en storskalig lagring av vätgas i ett underjordiskt stålklävt berggrum. Se mer på sid 19.

## Industriell processpraxis etablerad

Effektiv användning av råvaror och energi har varit en viktig utvecklingsfråga för HYBRIT. Under pilotfasen har en så kallad processpraxis etablerats, vilket bekräftar att processen är lika eller bättre gällande energieffektivitet, utnyttjande av resurser och säkerhet jämfört med järn- och stålindustrins branschstandarder. Se mer på sid 20.

## Innovation inom tid och budget

Inom relativ kort tid har HYBRIT utvecklat en omfattande teknisk kompetens och kunskap gällande HYBRIT-processen och fossilfri teknik. Pilotprojektet har levererat utvecklingsresultat i enlighet med högt ställda förväntningar på utsatt tid och budget. Samarbetet mellan olika organisationer har varit avgörande för framgången.

# Från järnmalmspelletts till järn med vätgas

I HYBRITs direktreduktion omvandlas järnmalmspelletts till järn med hjälp av enbart vätgas.

- Järnmalmspelletts matas in i toppen av en schaktugn och bädden av pellets rör sig långsamt nedåt. En uppåtgående ström av het vätgas reagerar med syret i pelletsen och lämnar schaktet i toppen som vattenånga.
- Det reducerade järnet smälter inte utan är hela tiden i sin fasta ursprungliga pelletsform.
- Produkten lämnar schaktet antingen varm eller kall. Varm järnsvamp kan kompakteras till briketter.

## Pilotförsök för direktreduktion

- Försök i pilotanläggningen pågår i perioder på 6-8 veckor åt gången, dygnet runt. Sammanlagda tiden för testning fram till 2024 är 61 veckor.
- Reduktion av järnmalmspelletts med enbart vätgas svarar mot 75 % av drifttiden i piloten.
- Processens mekanismer har karaktäriserats genom tester av 175 olika processlägen.
- Järnsvamp har producerats under lång tid vid stabila processförhållanden. Mer än 5000 ton fossilfri järnsvamp har producerats hittills.

**Ett validerat processkoncept har levererats till LKAB och SSAB för implementation i full skala.**

Järnsvampspelletts (DRI – Direct Reduced Iron) och järnsvampsbriketter (HBI – Hot Briquetted Iron).



## Tekniken bakom direktreduktionen

Vätgasreduktion skiljer sig från reduktion baserad på naturgas, till exempel när det gäller reduktionens kemi och processens värmeomvandling (termodynamik). Kunskapen från HYBRITs utvecklingsarbete har lett fram till en process som är fossilfri, energieffektiv och ger järnsvamp av mycket hög kvalitet – 98-99 % metalliseringsgrad och 0 % kol.

Vid försöken i pilotskala har olika processförhållanden utvärderats. Olika sammansättning och temperaturer på reduktionsgasen har testats. Trycket och uppehållstiden i schaktet har också varierats.

Delprocesser kopplade till vätgasreducerat järn har utarbetats och jämförts med motsvarande delprocesser för naturgasbaserade produkter. Exempel är passivering av DRI och brikettering till HBI för att göra produkten mindre reaktiv. Olika metoder för fossilfri värmning av reduktionsgasen har utvärderats, med tester av gaseldade och elektriska värmare samt partiell förbränning med syrgas.



Provtagning av järnsvampen kan även ske från insidan av reduktionsschaktet när anläggningen är i säkert läge.

# HYBRIT® gör fossilfrihet till verklighet



Våra resultat i semi-industriell skala visar att HYBRIT möjliggör ett radikalt steg för att eliminera CO<sub>2</sub>-utsläpp vid järn- och stålframställning.

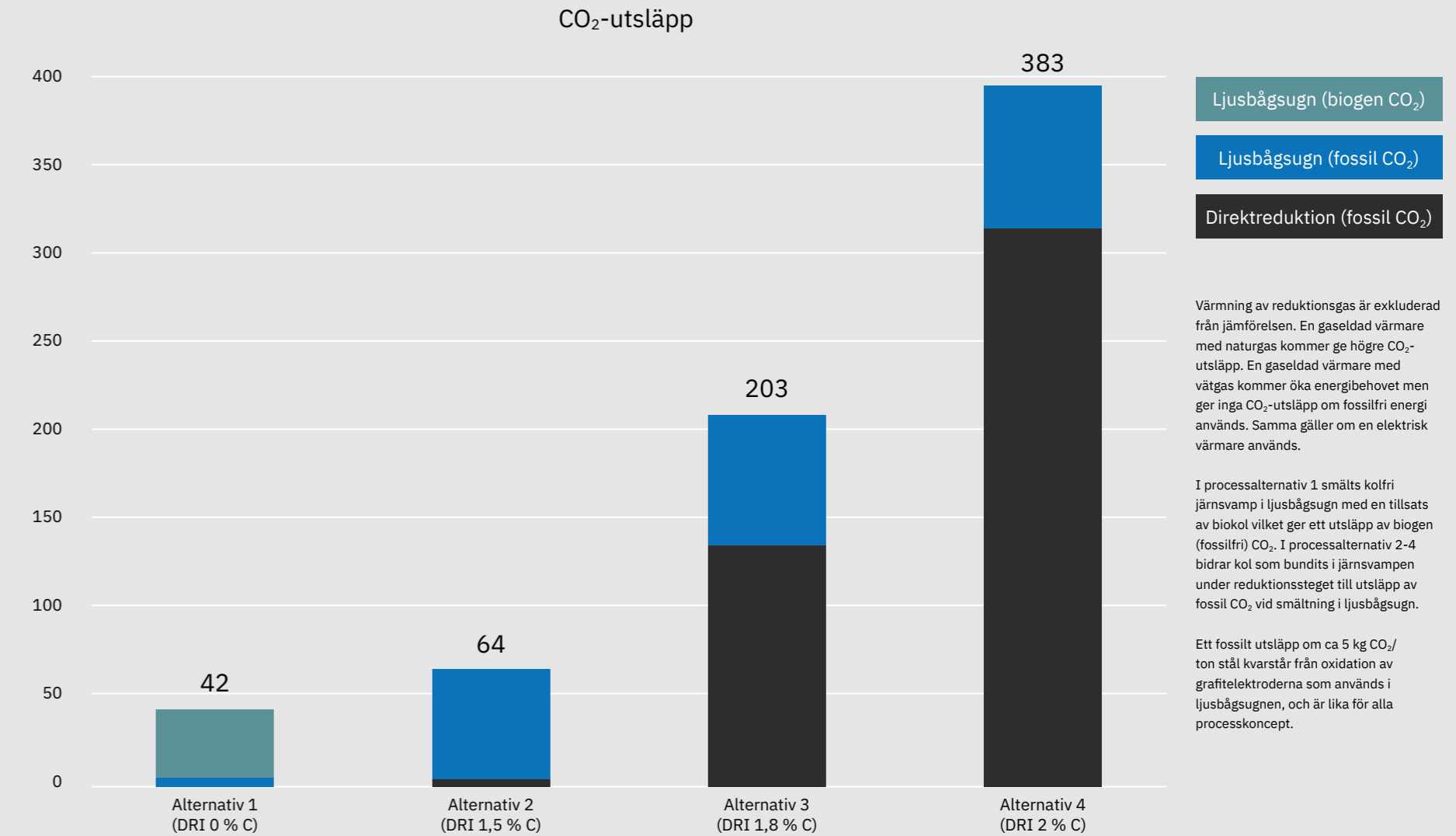
Ett stort antal försök vid pilotanläggningen för direktreduktion och för smältning i ljusbågsugn har givit experimentella resultat som på ett jämförbart sätt visar CO<sub>2</sub>-utsläppen för olika processalternativ. Några exempel är:

1. Direktreduktion av järnmalmspellet med enbart vätgas. Biokol tillförs ljusbågsugnen vid smältning av järnsvampen. **Detta är HYBRIT-processens huvudalternativ.**
2. Direktreduktion av järnmalmspellet med enbart vätgas men järnsvampen tillförs kol efter reduktionssteget med hjälp av till exempel naturgas.

3. Direktreduktion av järnmalmspellet med i huvudsak vätgas men järnsvampen tillförs kol i samband med reduktionen då en mindre mängd naturgas tillförs vätgasen.
4. Direktreduktion av järnmalmspellet med konventionell teknik baserad på naturgas.

**Den övergripande värdekedjeanalysen visar att bästa totaleffektivitet nås när järnmalmen reduceras nära nog fullständigt med vätgas i reduktionssteget och sedan smälts till råstål tillsammans med en minimal biokoltillsats i ljusbågsugnen.**

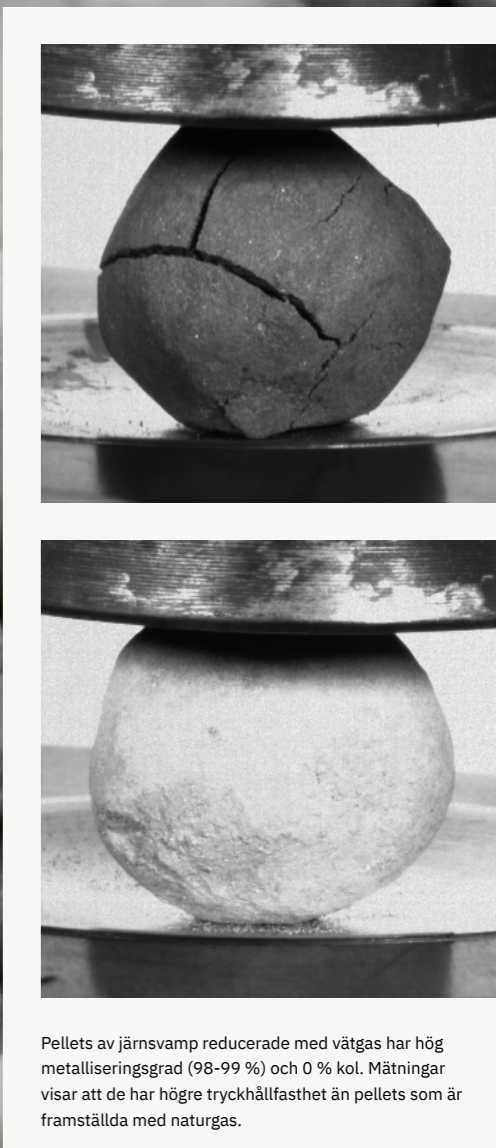
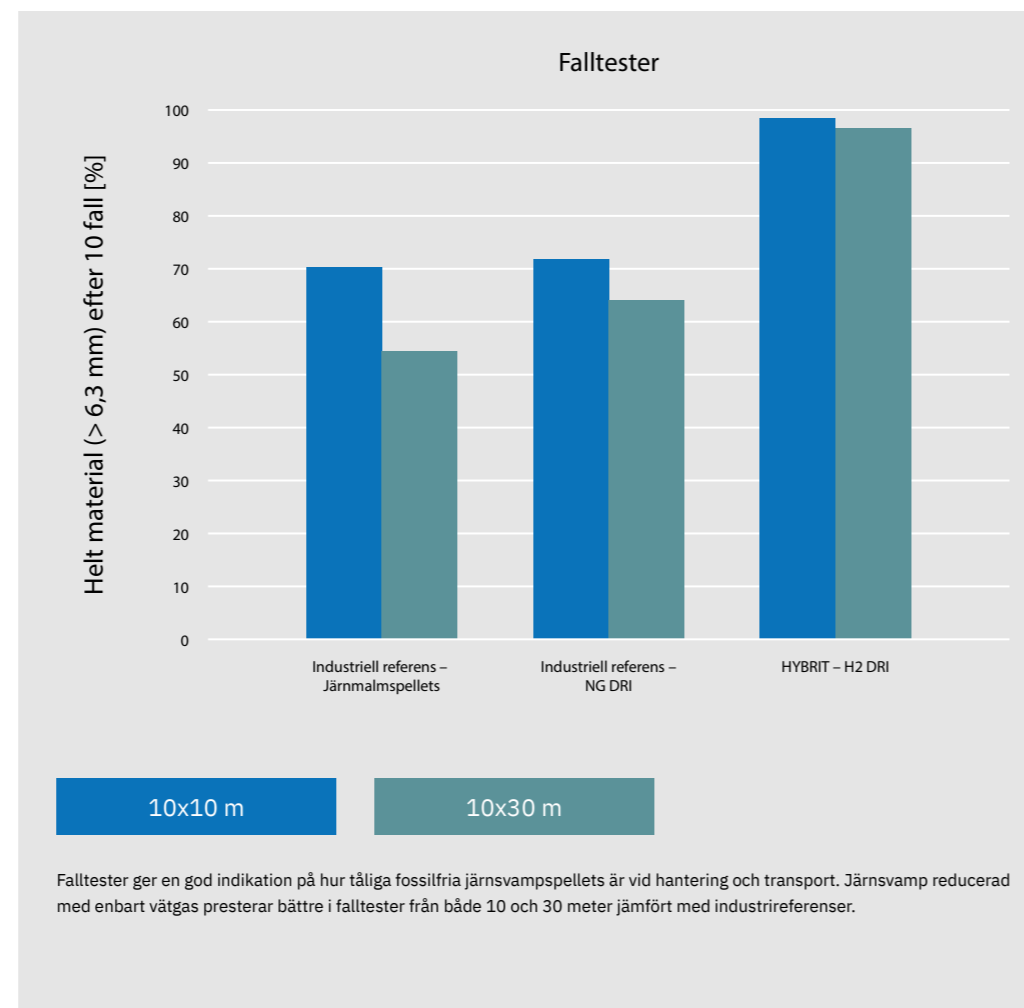
kg CO<sub>2</sub> / ton smält järnsvamp



# Ny järnsvampsprodukt med unika egenskaper

Pellets av järnsvamp reducerad med vätgas har väsentligt bättre egenskaper med hänsyn till transport, lagring och smältning jämfört med järnsvamp som reducerats med konventionella naturgasbaserade processer.

- Låg andel järnoxid och 0 % kol ger järnsvampen robusta mekaniska egenskaper. Produkten är tålig för tryck, nötning och fall. Därför minimeras förluster vid hantering och transport av produkten.
- Tester visar också att produkten har mycket bra och stabila kemiska egenskaper. Den åldras mycket långsamt och kan därför lätt lagras under en längre tid.
- En hög metalliseringsgrad (98-99%) betyder att det bara finns väldigt lite järnoxid kvar. Detta minskar förlusterna i värdekedjan och ger en lägre energiförbrukning vid smältning.



# Smältning av kolfri järnsvamp till fossilfritt stål

HYBRIT har utvecklat en säker, robust, produktiv och energieffektiv fossilfri process för produktion av högkvalitativt råstål. Processen har verifierats i pilotskala genom smältning av HYBRITs järnsvamp i Swerims 10-tonns ljusbågsugn i Luleå.

Järnsvampen matas in i ugnen tillsammans med slaggbildare, biokol och syrgas och smälts av värme från fossilfri el via elektroder doppade i slaggen.

Slaggbildare tillsätts både för att rena stålet och för att bilda ett isolerande täcke som maximerar energieffektiviteten och skyddar det flytande stålet mot kontaminering.

För minimal elektrodförbrukning och maximal energieffektivitet och produktivitet tillsätts biokol och syrgas som tillsammans med slaggen bildar en emulsion, en så kallad skummande slag.

Utvecklingen har skett genom tester av en mängd olika råmaterialegenskaper, tillsatsmetoder, processkonfigurationer och processinställningar.

## Pilotförsök i Swerims ljusbågsugn

- Kontinuerlig veckovis drift
- 12 veckor total testtid
- Fler än 400 försökssmältor
- Mer än 1000 ton stål har tillverkats

**En fossilfri process för smältning av kolfri järnsvamp har utvecklats och är redo att implementeras i full skala.**

## Varierade parametrar

### Järnbärare

- Typ: Järnsvamp (DRI) och varmkompakterad järnsvamp (HBI)
- Tillsatsmetod: Kontinuerlig matning och batchvis
- Kemiska egenskaper: Kolhalt och metalliseringsgrad

### Kolbärare

- Typ: Biokol och kompakterat biokol med olika storleksfraktioner
- Tillsatsmetod: Batchvis, injektion, toppmatning
- Kemiska egenskaper: Volatil andel, kolhalt

### Processparametrar

- Syremängd
- Kolmängd
- Produktivitet
- Slaggsammansättning





# Järnmalmspellets för direktreduktion

Pellets för direktreduktion är en anrikad järnmalmsprodukt tillverkad av främst höggradig magnetit. Tillverkningsprocessen för fossilfri järnmalmspellets har utvecklats vid LKABs industriella bandugnsverk i Malmberget. I pelletiseringsprocessen värms pelletskulorna upp så mycket att järnmalmspartiklarna delvis smälter ihop men de behåller sin porositet.

Den konventionella processens fossila bränslen har ersatts med bioolja som är 100 % förnybar. Försök med andra alternativa värmningstekniker har också genomförts, såsom vätgasförbränning och elektriska värmningstekniker.

- Världens första fossilfria pelletsverk finns i Malmberget och är i drift sedan HYBRITs pelletsprojekt avslutades 2021.
- 2023 producerade anläggningen 3,6 miljoner ton pellets och 50000 ton fossila CO<sub>2</sub>-utsläpp kunde elimineras.



I LKABs bandugnsverk i Malmberget används bioolja som bränsle i pelletiseringsprocessen.



Alkaliska elektrolysörer producerar all vätgas som används vid pilotanläggningarna för direktreduktion och vätgaslagring.

# Produktion och lagring av vätgas

Den fossilfria vätgasen är central i HYBRIT-processen. Pilotanläggningen i Luleå inkluderar produktion av vätgas genom att vatten delas upp i sina beståndsdelar väte och syre. Detta sker genom en elektrolysisprocess med hjälp av fossilfri elektricitet.

## Elektrolysörer

- Kommersiella alkaliska elektrolysörer installerades i Luleå 2021.
- Nominella produktionskapaciteten är 910 Nm<sup>3</sup>/h vilket motsvarar en effekt på cirka 4,5 MW.
- Elektrolysörerna har varit i drift mer än 9000 timmar.
- Anläggningen tillverkar all vätgas för direktreduktion och vätgaslagring.



## Vätgaslager

HYBRITs pilotanläggning för tester av lagring av fossilfri vätgas började byggas i maj 2021, och togs i drift efter sommaren 2022. Det ligger i anslutning till pilotanläggningen för direktreduktion, 30 meter under markytan i Svartöberget i Luleå. Vätgasen lagras i ett inklätt bergtrum (Lined Rock Cavern – LRC). Det har en volym på 100 m<sup>3</sup> och innehåller vätgas som är trycksatt upp till 25 MPa. Testning och utveckling gällande vätgaslagring pågår fortfarande.

Ett vätgaslager ger möjlighet att anpassa vätgasproduktionen efter elpriset samtidigt som reduktionsprocessens behov av vätgas tillgodoses. På så sätt skapas förutsättningar att kostnadseffektivt hantera svängningar i tillgången av förnybar el baserad på till exempel vind och sol.

Resultat från försök vid pilotanläggningen visar att lagring kan minska den rörliga kostnaden för vätgasproduktion med upp till 40 %. Slutsatserna summeras när projektet avslutas i slutet av 2024. Vätgaslagret planeras dock vara i fortsatt drift fram till 2026.

# Konkurrenskraftig produktion verifierad

Under pilotfasen har alla delar i HYBRITs fossilfria värdekedja utvärderats. Delstegens tekniska och ekonomiska potential har bekräftats med avseende på:

## Säkerhet

HYBRITs pilotanläggningar designades redan i projekteringsfasen med säkerheten som första och högsta prioritet. Vid drift av anläggningarna har säkerheten genomsyrat allt arbete. Pilotanläggningarna har varit i drift sedan hösten 2020 och under denna tid har inga incidenter inträffat som äventyrat säkerheten för personalen eller anläggningen.

## Miljövänlig produktion

Fokus är på fossilfrihet i alla processteg. I övrigt är produktionen jämförbar med dagens processer. Omfattande mätningar och provtagningar har utförts i pilotskala för att förstå skillnader i restgaser och restmaterial jämfört med dagens konventionella processer och hur detta kan hanteras på bästa möjliga sätt för en framtida miljövänlig produktion. Ett exempel på detta är mängd och sammansättning på stoft som lämnar direktreduktionsschaktet och hur detta material kan nyttjas på bästa sätt i värdekedjan.

## Insatsvaror

Behovet av energi, råvaror och tillsatsmaterial har optimerats. Genom att utforska en rad olika processparametrars påverkan på produktkvalitet har ett processfönster för direktreduktion definierats.

## Produktivitet

Produktiviteten har maximerats för en konkurrenskraftig produktionskostnad. Genom att pilotförsöken inom direktreduktion och smältning genomförts i ett stort processfönster har den vätgasreducerade järnsvampens unika egenskaper definierats och optimerats.

## Stabilitet

Processen är robust med tillräckligt liten variation i utfall och genomförande.

## Produktkvalitet

Slutprodukten fossilfritt råstål uppfyller eller överträffar gällande kvalitetskrav.





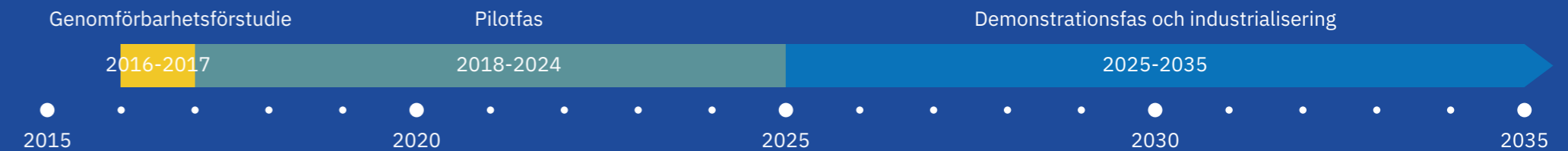
# Vägen till fossilfritt stål ligger öppen

HYBRIT-initiativets arbete fortskrider enligt plan. I nästa fas ska HYBRIT-processen implementeras i industriell skala. Pilotprojektets resultat och specifikationer gäller utifrån svenska förhållanden och har lagt en solid grund för industrialisering. Vägen ligger nu öppen för omställning av SSABs och LKABs produktionsanläggningar.

Förutsättningarna för en internationell omställning och/eller etablering av fossilfri järn- och stålproduktion med HYBRIT-processen kommer att skilja sig för andra geografier och stålbolag.

Inom HYBRITs initiativ finns bred kunskap om mekanismer och principer för vätgasbaserad reduktion av järnmalmspelletts och resulterande järnsvampsprodukter. Resultaten från pilotprojekten har därför relevans även utanför Sveriges gränser.

**HYBRITs tekniska utveckling i pilotskala fortsätter – för att bidra till en fossilfri ståttillverkning och en stor minskning av CO<sub>2</sub>-utsläppen.**



HYBRIT-initiativet startades 2016 av SSAB, LKAB och Vattenfall med syftet att skapa en helt fossilfri värdekedja från gruva till fossilfritt stål, med fossilfria pellets, fossilfri el och vätgas. Syftet med initiativet är att fasa ut användningen av kol och att i princip eliminera koldioxidutsläppen inom stålindustrin, motsvarande cirka 10 % av Sveriges totala CO<sub>2</sub>-utsläpp. Den 31 augusti 2020 togs pilotanläggningen för direktreduktion av järnmalm med vätgas i drift och i augusti 2022 togs pilotanläggningen för lagring av fossilfri vätgas i bruk. HYBRIT-tekniken, som validerats och optimerats under flera års utveckling med mycket lovande resultat, ska nu användas och vidareutvecklas i industriella tillämpningar.

HYBRIT är huvudsakligen finansierat av SSAB, LKAB och Vattenfall med stöd av Energimyndigheten.

**SSAB**

 **LKAB**

**VATTENFALL** 

 **Energimyndigheten**

**HYBRIT**  
 **FOSSIL-FREE STEEL**