

# Lagring av fossilfri vätgas i inklädda berggrumslager redo för industrialisering

*Nu finns tekniken som skapar mer flexibilitet  
och lönsamhet vid industriell produktion och  
användning av vätgas.*

HYBRIT

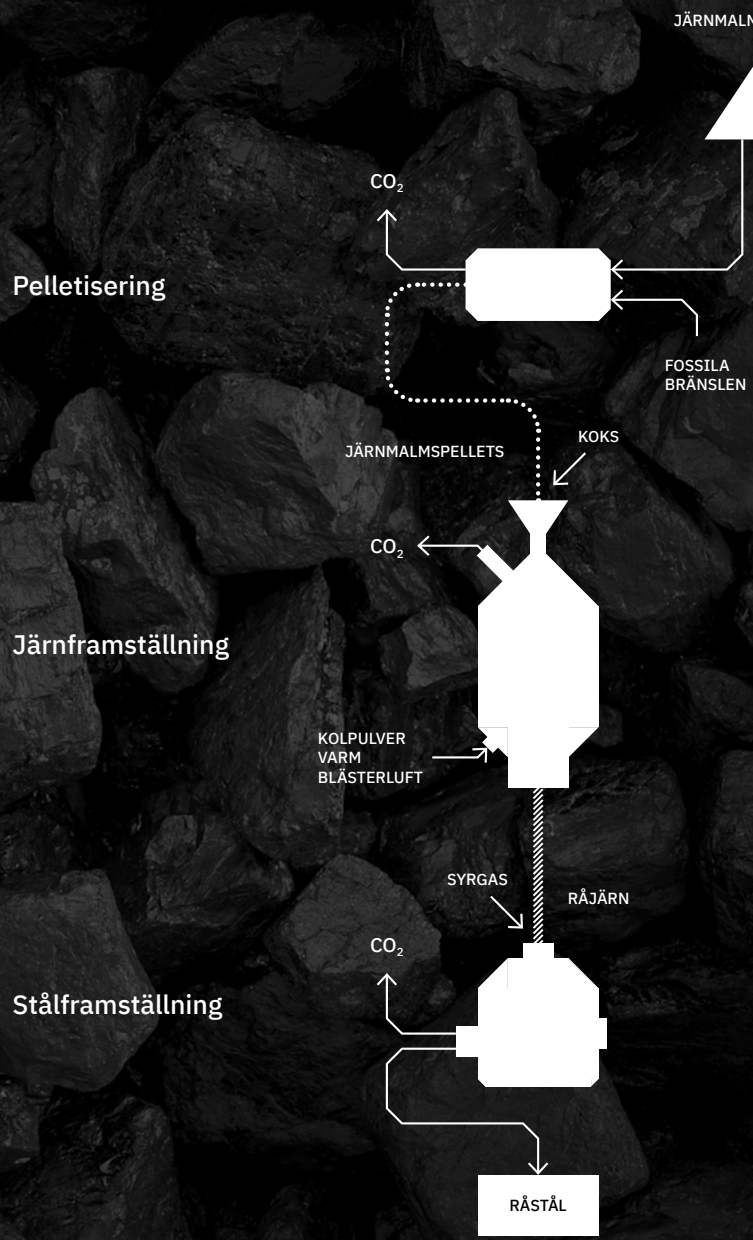
SSAB

 LKAB

VATTENFALL 

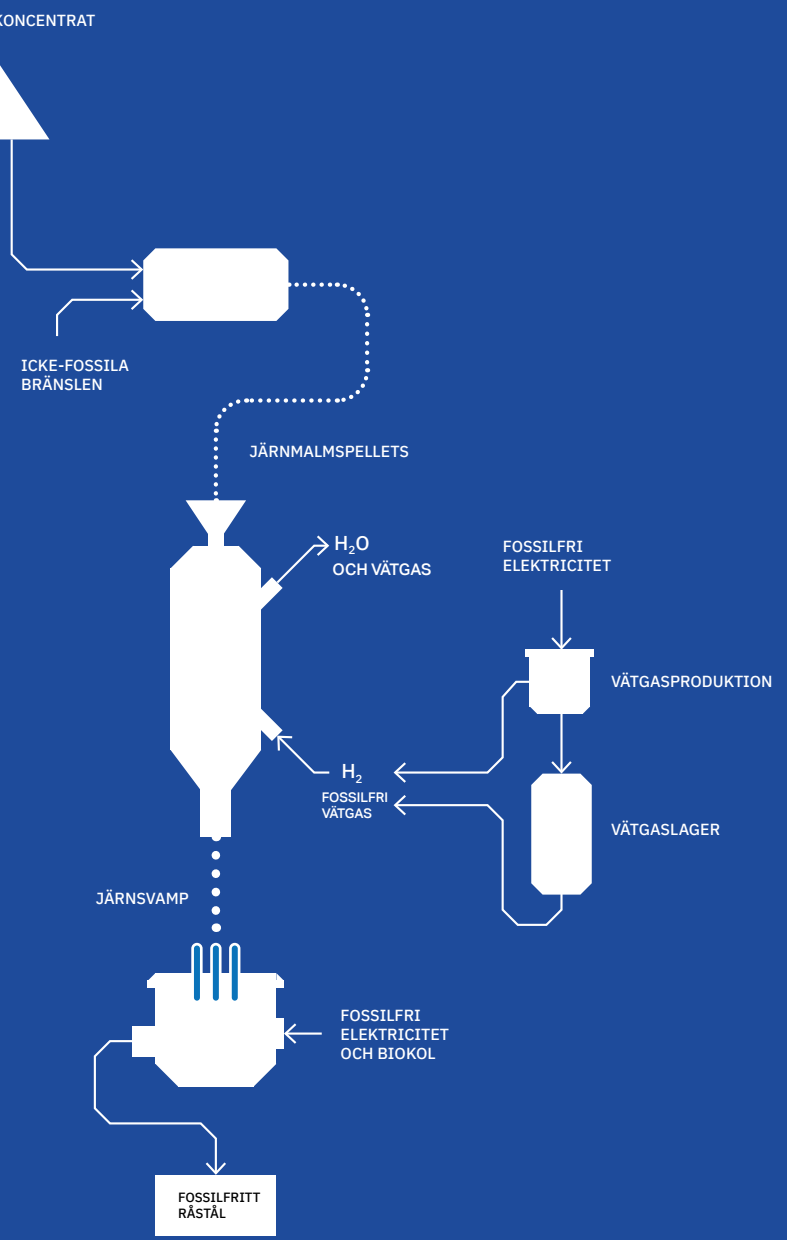
Februari 2025  
[hybritdevelopment.se](https://hybritdevelopment.se)

# Traditionell malmbaserad ståltillverkning



2,2 ton CO<sub>2</sub>e/ton stål\*

# HYBRIT®



0,0 ton CO<sub>2</sub>e/ton stål\*

# HYBRIT® – världens första fossilfria stålproduktion

Europas och Sveriges klimatmål stakar ut vägen mot ett fossilfritt samhälle. För att hålla nere den globala uppvärmningen och nå nettonollutsläpp av växthusgaser från 2045 krävs en omställning av industrin.

Idag står stålindustrin för en stor andel av industrins koldioxidutsläpp, motsvarande 7 % av de globala och över 10 % av de svenska utsläppen. Dagens stålframställning är beroende av fossilt kol, framför allt för att reducera malm (järnoxid) till rent järn i masugnar. Det senare står för cirka 85–90 % av de totala koldioxidutsläppen vid malmbaserad stålframställning.

I HYBRIT-processen reduceras i stället fossilfria järnmalmspellet till järn med hjälp av fossilfri vätgas – utan användning av fossilt kol. Resultatet blir så kallad järnsvamp (direktreducerat järn) som är en fast produkt. Restprodukten blir vatten. Sedan smälts järnsvampen i en ljusbågsugn, som drivs med fossilfri el. Den smälta produkten vidareförädlas till fossilfritt stål efter kundernas önskemål.

\* Processen ger små utsläpp av koldioxid som kommer av förbrukning av grafitелеktroder 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 ståttillverkning med masugnsteknik är 2,2 ton CO<sub>2</sub>e/ton stål.



# HYBRIT pilotprojekt: Vätgaslagring i bergtrum med LRC-teknik

HYBRIT har nu utvecklat tekniken för vätgaslagring i bergtrum genom ett projekt som utförts under perioden 2019–2024. Projektet innebar konstruktion, byggnation och drift av ett 100 kubikmeter stort vätgaslager i pilotskala, 30 meter under markytan. Lagret ligger i Svartöberget i Luleå.

## Anpassat koncept för vätgas

LRC står för lined rock cavern (inkladda bergtrum). Grundkonceptet för LRC-lagring har redan demonstrerats i industriell skala för naturgas i Skallen utanför Halmstad och det tekniska utvecklingsarbetet har därför tagit sin utgångspunkt i denna befintliga kunskap.

Konceptet behöver dock anpassas för lagring av vätgas, framför allt vad gäller materialval.

För att hantera svängningarna på elmarknaden förväntas även ett kommersiellt vätgaslager behöva fyllas och tömmas med högre frekvens och hastighet – jämfört med ett LRC-lager för naturgas. Även det innebär andra krav på konstruktion och drift av anläggningen. Tester av detta har genomförts med positiva resultat.

## Värdet med ett pilotprojekt

En lageranläggning i pilotskala har gett projektet möjlighet att uppdatera befintlig kunskap om och erfarenheter av LRC-lager – för att nu lagra vätgas. Ett lager i pilotskala lämpade sig även väl för att genomföra tester av flexibel drift och integration mot elmarknaden.

- LRC står för lined rock cavern (inkladda bergtrum).
- Grundkonceptet har demonstrerats för naturgas.
- Designen behöver anpassas för lagring av vätgas, framför allt vad gäller materialval och högre frekvens och hastighet vad gäller fyllning och tömning av lagret.
- Genom projektet har kunskap och erfarenheter kring LRC lager uppdaterats. Flexibel drift och integrering mot elmarknaden har testats i pilotanläggningen.

# Lagring reducerar rörliga kostnaden för vätgasproduktion

## Utmaningar för industriell produktion av vätgas

Utmaningen med en storskalig industriell produktion av fossilfritt stål med vätgas är att processen kräver stora mängder el. Vätgas produceras genom elektrolys av vatten med fossilfri el. I dagens elsystem varierar både produktion och efterfrågan på el över dygnet, mellan veckans dagar och mellan årets säsonger.

Dessa variationer i balansen mellan utbud och efterfrågan på el leder till variationer i elpriset. I det framtida elsystemet förväntas variationerna på framför allt produktionssidan att öka – i takt med att andelen väderberoende kraftslag, som vind och sol, blir större i elnätet. Då förväntas även variationerna i priset på el att öka och därmed efterfrågan på flexibilitet.

## Vätgaslagring skapar flexibilitet

För att hantera detta ingår vätgaslagring som en del i HYBRIT:s värdekedja. Genom att investera i ett vätgaslager och viss överkapacitet i vätgasproduktionen, kan perioder av låga elpriser nyttjas till att producera ett överskott av vätgas som sedan lagras. Under perioder av höga elpriser kan sedan vätgasen i lagret användas i processen, och därmed minskar elbehovet.

## Minskar driftskostnader och stabiliserar elnätet

Ett storskaligt vätgaslager kan på så sätt minska driftskostnaderna för den fossilfria stålproduktionen, genom att utnyttja variationerna i elpriset. Projektets simuleringar av framtida scenarier för elmarknaden visar att ett vätgaslager kan sänka driftskostnaden för industrins vätgasproduktion med 25–40 %. Det kan också jämma ut skillnaderna i tillgång och efterfrågan i elnätet.

# 25-40%

i sänkta driftskostnader\*

\* Potentialen för besparingar av driftkostnad med lager jämfört utan lager har uppskattats vara i intervallet 25–40 % utifrån simuleringar av olika framtida scenarier på elmarknaden.



Översikt av LRC-piloten  
Svartöberget, Luleå

~30 m

100 m<sup>3</sup>  
250 bar  
~100 MWh  
~2000 kg



# Uppbyggnad av LRC-lager

## Uppbyggnad av LRC

Ett LRC-lager består av ett utsprängt bergrum, format som en vertikal cylinder med avrundad topp och botten. Bergrummet förses med en gastät inklädnad som består av:

1. ett tätskikt av stålplåt (mot gasen)
2. kraftöverförande armerad betong (mellan plåt och berg)
3. ett glidskikt (mellan plåt och betong för att reducera friktionen)

Krafterna från det höga lagertrycket överförs via inklädnaden till bergmassan som har styrkan att stå emot mycket stora belastningar. Runt anläggningen finns ett dränagesystem som avlägsnar vatten under byggfasen och övervakar gastätheten under drift.

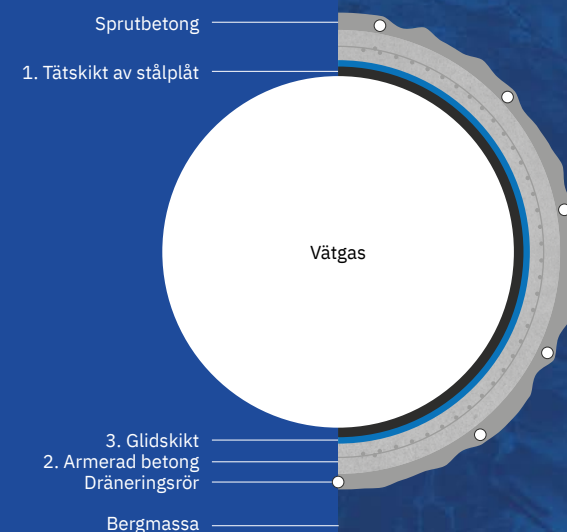
## Materialvalet viktigt

Materialvalet för bergrummets tätskikt har varit en av de viktigaste frågorna under designfasen. Ett stålmaterial har valts utifrån befintlig forskning och specifika laborietester, genomförda på uppdrag av HYBRIT. Materialet är beständigt mot vätets inverkan på materialet och klarar cyklisk belastning av frekvent tömning och fyllning av lagret.

## Anslutning ovan mark

Vätgasen transporteras i en cirka 3 km lång rörledning från tillverkningen (elektrolysörerna) till lagrets kompressorstation. Där omvandlas trycket från 7–9 bar till maximalt 250 bar genom att gasen komprimeras.

Vätgasen transporteras vidare i en högtrycksledning som ansluter till lagret för fyllning. Vid tömning skickas gasen tillbaka till en tryckreduceringsstation placerad i samma byggnad som kompressorn, och vätgasen transporteras tillbaka i rörledningen till förbrukaren.



# Framgångsrika tester av pilotlager

Projektet har med sina tester av pilotanläggningen i Luleå visat att vätgaslagring med LRC-teknik fungerar.

## Resultat i korthet:

- Under mer än två års drift med vätgas har anläggningens säkerhet, funktion och prestanda framgångsrikt demonstrerats.
- Cirka 3 800 timmars drift med vätgas med 94 % tillgänglighet har loggats.
- Trycknivån är maximalt på 250 bar (som motsvarar 2 500 m vattendjup).
- Maximal mängd lagrad vätgas är cirka 2 ton.
- Lagrets design, inklusive bergmassan och inklädnaden, har testats framgångsrikt tillsammans med lagringssystemets processutrustning.
- Lagret klarar av att tömmas och fyllas med en så pass hög frekvens och hastighet som krävs för att matcha svängningarna i elsystemet.
- Lagret har visats vara helt gastätt under hela perioden.

## Testkampanjernas utformning

Fyra testkampanjer med vätgas om vardera sex veckor har genomförts inom projektet. Inledande kampanjer fokuserade på att demonstrera lagrets säkerhet, funktion och prestanda på system och komponentnivå, testa driftstrategier och generera data för validering av modeller för simulering av lagret. Därefter följde testkampanjer där lagrets kommersiella potential testades genom att lagrets drift integrerades i realtid med elmarknaden.

Pilotlagret har även utsatts för accelererade mekaniska tester genom frekventa variationer mellan högt och lågt lagertryck. Genomförda tester motsvarar samma mekaniska belastning som under en förväntad livstid på minst 50 år av ett kommersiellt storskaligt lager.

3 800

timmars drift med  
94 % tillgänglighet

250 bar

maximalt tryck i vätgas-  
lagret under normal drift





Kompressorstation med högtrycksrörledning  
in till tunnelsystem och vätgaslager

# Bidrar med leveranssäkerhet och besparingar till industrier

Pilotlagret har integrerats med vätgasproduktion från elektrolysörer och levererat vätgas från lagret till två anläggningar. Dessa är HYBRIT:s egen pilotanläggning för direktreduktion och SSAB:s industriella koksgasnät, båda belägna på Svartöns industriområde i Luleå.

- Projektets tester har visat att vätgaslagring fungerar i värdekedjan, för att stödja en storskalig vätgasanvändare med leverans av vätgas.
- Lagret kan också fungera som ett reservsystem, om vätgasproduktionen faller ifrån eller om förbrukaren inte kan ta emot hela den tillgängliga mängden vätgas.

## Sänker driftkostnaderna för vätgasproduktion

Projektets tester tillsammans med Vattenfall har demonstrerat hur produktion och lagring av vätgas kan integreras i elsystemet (Nordpools spot- och intradagmarknad). Ett vätgaslager möjliggör en flexibel vätgasproduktion baserat på elmarknadens förutsättningar. Ett storskaligt vätgaslager stöttar därmed elsystemet, vilket i förlängningen potentiellt öppnar för ny elproduktion från alla fossilfria kraftslag.

## Detta visar testerna mot elmarknaden:

- Drift och styrning av vätgassystemet har fullt ut automatiserats och i realtid integrerats mot Nordpool, på samma sätt som en kommersiell anläggning.
- Besparingar om 26–31 % av den rörliga driftskostnaden har praktiskt kunnat visas.
- Genomförda simuleringar av framtida scenarier för den svenska elmarknaden visar troliga besparingar på cirka 25–40 % av den rörliga driftskostnaden, då de första kommersiella anläggningarna tas i drift.
- Hur stora besparingarna kan bli beror på utvecklingen på elmarknaden, både vad gäller utbyggnad av kraftproduktion och överföringssystemet för el, samt hur den allmänna efterfrågan på el utvecklas.



# Säkerhet vid vätgaslagring

En viktig aspekt med vätgaslagring är säkerheten, eftersom vätgas i kontakt med syrgas ger en lättantändlig gas.

- Fördelen att lagra vätgas i bergtrum är att det inte kan ske någon antändning eller explosioner inuti ett bergtrum som är fyllt med 100 % vätgas.
- Lagrets djupläge är anpassat så att bergmassan med betryggande säkerhet håller emot den uppåtriktade kraften från det trycksatta lagret. Lagret är väl skyddat från yttre påverkan.
- För att förhindra svagheter i konstruktionen har materialet till lagret valts med omsorg och noggranna kvalitetskontroller genomförts vid byggnationen.

## Säkerhetssystem

Lagret är konstruerat med ett system för snabb detektering av läckande vätgas, samt uppsamling och avledning till säker plats – om det mot förmodan skulle uppstå en vätgasläcka.

- Lagret har visats vara gastätt under hela testperioden.
- Vid tester av säkerhetssystemet med simulerade gasläckage kunde även mycket små läckagemängder detekteras inom kort tid, så snabbt som inom 10 sekunder.
- Testerna har också verifierat att den läckande vätgasen samlas in i systemet och kan avledas till säker plats.



Ventilationsmast, Svartöberget



# Vätgaslagring stöttar omställningen till ett fossilfritt samhälle

Det finns flera fördelar med storskalig vätgaslagring, både för industriella verksamheter och för elnätet i stort. Den största fördelen är att vätgaslagring stöttar omställningen till ett fossilfritt samhälle, genom att den:

## 1. Sänker den rörliga driftskostnaden för vätgasproduktion

Genom att nyttja variationerna i elpriser kan man med vätgaslagring lagra el som vätgas när elpriset är lägre – och använda den lagrade vätgasen i den industriella processen när elpriset är högre. Besparingar på upp till 40 % av den rörliga driftskostnaden är möjliga, genom storskalig lagring av vätgas.

## 2. Skapar flexibilitet

Ett vätgaslager skapar flexibilitet för den industriella verksamhet som använder vätgas. Det skapar också robusthet mot störningar i vätgasproduktionen, eftersom det alltid finns vätgas tillgängligt i lagret som kan försörja produktionen.

## 3. Stabiliserar elsystemet

Storskalig vätgaslagring gör elsystemet mer robust, genom att balansera elsystemet både när tillgången är god och när efterfrågan är hög.

## 4. Jämnar ut prisvariationer på elmarknaden

Använt i stor skala kan vätgaslagring jämna ut prisvariationer på elmarknaden, vilket skulle gynna investeringar i ny elproduktion från alla fossilfria kraftslag. Genom att fördela om tillgång och efterfrågan på el på både tim- och veckobasis kan vätgaslager göra att mer variationer från väderberoende elproduktion kan balanseras i elsystemet.

- Rörliga driftkostnaderna för vätgasproduktion kan reduceras genom att nyttja variationerna på elmarknaden.
- Skapar robusthet mot störningar i produktionen. Vätgasen finns alltid tillgänglig.
- Balanserar elsystemet och jämnar ut elprisvariationer när det tillämpas storskaligt.
- Gynnar investeringar i ny elproduktion från alla fossilfria kraftslag.

# Redo för nästa steg

I och med HYBRIT:s pilotprojekt har man nu för första gången testat LRC-tekniken för lagring av vätgas och framgångsrikt genomfört en teknikutveckling med design, byggnation och tester med validering i pilotskala.

## Projektet visar att LRC-tekniken för storskalig vätgaslagring:

- finns tillgänglig, är testad och säker
- minskar rörliga driftskostnaderna för fossilfri stålproduktion
- har stor potential i industriella processer med vätgas
- är en viktig pusselbit för omställningen till ett fossilfritt samhälle
- kan bidra till mer robust elsystem och öka mängden förnybara kraftslag i elsystemet
- är mogen för nästa steg



Med den kunskap och de erfarenheter som projektet genererat är tekniken bevisad och redo för industrialisering. Detta möjliggör fortsatt utveckling av storskaliga kommersiella lageranläggningar i storleksordningen upp till 50 000 till 100 000 m<sup>3</sup>.



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**