

MASTERUPPSATS 2023

Lokalisering av framtidens stålproduktion

Felix Boye

ISSN 1102-3651

DIVISION OF ENVIRONMENTAL AND ENERGY
SYSTEMS STUDIES

LTH | LUND UNIVERSITY



Dokumentutgivare, Dokumentet kan erhållas från	Dokumentnamn
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA vid Lunds universitet Institutionen för teknik och samhälle Miljö- och energisystem Box 118 221 00 Lund Telefon: 046-222 00 00 Telefax: 046-222 86 44	Examensarbete
	Utgivningsdatum
	16/5 2023
	Författare
	Felix Boye

Dokumenttitel och undertitel

Lokalisering av framtidens stålproduktion
Analys av komparativa fördelar vid lokalisering av fossilfri stålproduktion bortom år 2030

Sammandrag

Stålindustrin är den industrisektor som har högst utsläpp i världen. Ståltillverkning tillskrivs cirka 8 % av världens totala CO₂-utsläpp. Från den utgångspunkten är behovet av djup avkarbonisering av stålindustrin är uppenbart. Det mest gynnsamma alternativet för att fasa ut fossila bränslen från produktionen av stål är att övergå till ståltillverkning från grönt väte. I denna rapport undersöks komparativa fördelar vid grön ståltillverkning för att avgöra vilka länder som är mest lämpade för investeringar i elektrolys för vätetillverkning och ljusbågsugnar för smältning av järnsvamp. Analysen har gjorts med hjälp av två olika tillvägagångssätt. Först görs en beräkning på kostnaden för att tillverka grönt stål med dagens kostnader på förnybar elproduktion och järnmalm. Priset på stålet beror till största del på kostnaden för förnybar energi. Resultatet från beräkningarna utgör en utgångspunkt för att uppskatta hur priserna kan se ut bortom 2030. De tre nationer som 2021 hade den mest fördelaktiga kostnadsbilden var Brasilien, USA och Indien med en total kostnad för ett producerat ett ton grönt stål på mellan 350 och 370 EUR. Sedan genomförs en uppskattning av framtida kostnader för grön stålproduktion. För att genomföra detta skapas en databas i programmet QGIS där relevant information för grön ståltillverkning samlas in. Utifrån fysiska parametrar såsom vinddensitet och solenergiproduktion anses en total kostnad på 305 EUR vara möjligt att uppnå i Chile. En kostnad som medför att grönt stål blir mycket konkurrenskraftigt mot konventionell ståltillverkning. De fyra länderna som anses ha de bästa förutsättningarna för grön ståltillverkning efter 2030 är Chile, Mauretanien, Australien och Brasilien. Slutsatserna baserades på förmågan att producera billig förnybar energi och tillgången till järnmalm för att undvika kostnader för järnmalmsimport. Tillgången till sötvatten togs också i beaktande men uppskattades till att inte vara en avgörande faktor för den totala kostnaden så länge kostnaden för förnybar elproduktion hålls tillräckligt låg.

Nyckelord

Grönt stål, Vätgas, Järnmalm, Förnybar elproduktion, Komparativa fördelar, Lokalisering

Sidomfång	Språk	ISRN
86 Sidor	Svenska	LUTFD2/TFEM—23/5196--SE + (1-86)

Lokalisering av framtidens stålproduktion

Analys av komparativa fördelar vid lokalisering av fossilfri
stålproduktion bortom år 2030

Felix Boye
fe2570bo-s@student.lu.se

June 14, 2023

Master's thesis work carried out at
the Division of Environmental and Energy Systems Studies, Lund
University.

Supervisors: Max Åhman, max.ahman@miljo.lth.se
Jonas Algers, jonas.algers@miljo.lth.se
Examiner: Lars J Nilsson, lars_j.nilsson@miljo.lth.se

Abstract

The steel industry is the most emitting industry sector in the world. Steelmaking attributes to around 8 % of the world's total CO_2 emissions. From that standpoint the need for deep decarbonization in the steel industry is evident. The most viable option for removing fossil fuels from the production of steel is to move to steelmaking from green hydrogen. In this report comparative advantages for green steelmaking are examined to determine which countries are most suited for investing in electrolysis for hydrogen making and electric arc furnaces for melting sponge iron. The analysis has been made using two different approaches. Firstly, a calculation is made on the cost of making green steel with today's prices. The price of the steel is mostly dependent on the cost of renewable energy. The result from the calculations constitutes a starting point for determining how prices can look beyond 2030. The three nations that currently have the most advantageous price point is Brazil, USA and India at a total price for a ton of green steel costing 350, 369 and 370 EUR respectively.

For the second approach a data base is made in QGIS where relevant information for green steelmaking is collected. Based on the information in the data base a estimation of future steel prices were made. Judging from physical parameters such as wind power density and solar power output an estimated price point of 305 EUR was deemed achievable in Chile. A price point making green steel highly competitive against conventional steelmaking. The four countries deemed to have the best conditions for green steelmaking beyond 2030 is Chile, Mauritania, Australia and Brazil. The conclusions were based on the ability to produce cheap renewable energy and the access to iron ore to reduce shipping costs. The access to freshwater was also taken into consideration but was estimated to not be a deciding factor for the price as long as the cost of renewable energy was low enough.

Keywords: Grönt stål, Vätgas, Järnmalm, Förnybar elproduktion, Komparativa fördelar, Lokalisering.

Acknowledgments

Detta examensarbete sätter punkt för min tid i Lund. Med en nu avlagd civilingenjörsexamen i Ekosystemteknik ser jag fram emot att möta nya utmaningar i arbetslivet.

Jag vill passa på att tacka alla de vänner jag har lärt känna under studierna och som har förgyllt studenttiden. Jag vill också tacka min familj för ert ständiga stöd i både med och motgångar. Slutligen vill jag tacka mina handledare Max Åhman och Jonas Algers för er vägledning genom detta arbete. Era råd och expertis har varit central för att detta arbete ska ha kunnat bli till.

Tack!

Felix Boye
June 14, 2023
Lund, Sweden

Contents

1	Inledning	3
1.1	Syfte	4
1.2	Frågeställningar	4
1.3	Avgränsningar	5
2	Metod	7
2.1	Analysprocess	7
2.1.1	Databas	8
2.1.2	Valet av produktionsfaktorer	8
2.1.3	Beräkning av komparativa fördelar	9
3	Bakgrund	13
3.1	Dagens stålproduktion	13
3.1.1	Konventionell produktion av primärt stål (malmbaserat)	13
3.1.2	Produktion av sekundärt stål (skrotbaserat)	13
3.1.3	Klimat effekter och energianvändning vid stålproduktion	14
3.1.4	Dagens stålindustri	15
3.1.5	Stålgeografi	17
3.2	Framtidens tillverkning av primärt stål med vätgas	19
3.2.1	Framtida produktionsvolymmer	21
3.3	Nyckeltekniker och faktorer för grön ståltillverkning	23
3.3.1	Vätgasproduktion	23
3.3.2	Förnybar elproduktion	25
3.3.3	Kostnad för grönt stål	30
4	Resultat	33
4.1	Databas	33
4.2	Komparativa fördelar	36
4.2.1	Uppskattning av framtida produktionskostnaden för grönt stål utifrån fysiska förutsättningar	37
5	Analys	39
5.1	Möjlig förflyttning av framtida stålproduktion.	39

5.1.1	Kostnadsutveckling	39
5.1.2	Dagens största producenter av primärt stål	40
5.1.3	Länder och regioner med goda komparativa fördelar	42
6	Diskussion	59
6.1	EUs framtida stålpolicy	59
6.2	Vidare utveckling av databasen	61
7	Slutsatser	63
7.1	Databasen	63
7.2	Kostnadsutveckling vid övergång till grön stålproduktion	63
7.3	Lämpliga länder för investeringar i grön stålproduktion	64
8	Referenser	67

Förkortningar

DRI	Direktreducerat järn
HDR	Vätgasreducerat järn
BF-BOF	Masugn och syrgasprocess
Grönt stål	Stål tillverkat med direktreducerat järn från grön vätgas.
EU ETS	Europeiska unionens handelssystem med utsläppsrätter.
QGIS	Geografiskt Informationssystem.
AWE	Alkalisk vattenelektrolys.
PEM	Protonbyttarmembran elektrolys.
SOEC	Solidoxidelektrolyscell.
HBI	Värmebriketerat järn.

1. Inledning

Stålindustrin står i dagsläget för runt 8 % av världens utsläpp (World economic forum, 2022). Tillsammans med övriga samhället behöver stålindustrin genomgå stora utsläppsminskningar de kommande åren för att komma i fas med de mål som stora delar av världens länder skrev under på FNs klimatkonferens i Paris 2015. Där fastslogs en mål på att hålla den globala uppvärmingen på väl under 2 grader Celsius jämfört med förindustriella nivåer. Med ytterligare ambition att begränsa uppvärmingen till 1.5 grader Celsius över förindustriella nivåer (United Nations, n.d.). För att uppnå målet om att begränsa uppvärmingen till 1.5 Celsius så behöver de globala utsläppen nå sin topp innan 2025 för att därefter vända nedåt och nå netto noll senast 2050 (United Nations, n.d.). Här kan stålindustrin vara en viktig beståndsdel då nya projekt inom fossilfri ståltillverkning har möjlighet att uppnå stora utsläppsminskningar i en av världens mest CO₂ intensiva industrier (Åhman, Olsson, et al., 2018). Det blir svårt att uppnå de mål som har antagits i Parisavtalet om industrin fortsätter att göra små framsteg inom rening av fundamentalt utsläppsintensiva produktionsmetoder. Det är därför av högsta vikt att etablera nya tillverkningsmetoder som kan uppnå verkligt stora utsläppsminskningar.

Stål är centralt i ett modernt samhälle. Den globala stålkonsumtionen väntas därmed öka i takt med att fler länder industrialiseras (IEA, 2020). Detta sätter press på stålindustrin att kunna leverera till den ökade efterfrågan samtidigt som deras utsläpp ska sjunka i en stadig takt. Stål kommer vara centralt i omställningen till ett samhälle med netto nollutsläpp 2050 och därmed spelar materialets klimatpåverkan en viktig roll. Stål kommer att behövas till den nya infrastruktur som krävs för förnybar elproduktion som vindturbiner, dammar och solpaneler. Det kommer även behövas i transportindustrin där en omställning till elektrifierade fordon kommer pågå under de kommande decennierna. Totalt tros stålbehovet öka med en tredjedel fram till 2050. (IEA, 2020) Stålindustrin är den tunga industri som släpper ut mest CO₂ och därför kan nya produktionsmetoder här ha stor effekt på de globala utsläppen. Stålindustrin täcker idag runt 75 procent av sitt energibehov med kol och att sänka denna andel är centralt för att lyckas sänka utsläppen. (IEA, 2020) Endast 11.8 procent av järn och stålindustrins stora energibehov täcktes av elektricitet år 2015 (Gielen et al., 2020). Kolberoendet är ett svårfrånkomligt faktum i traditionell ståltillverkning med en masugn då kolet behövs för att reducera järnmalmen (Suer, Traverso, and Ahrenhold, 2021).

Nya produktionsmetoder som ersätter kolet i tillverkningsprocessen med fossilfri vätgas har möjligheten att avlägsna fossil energi från ståltillverkningen (World economic forum, 2022). Idag är denna teknik ung men den ligger i startgroparna för att börja producera på allt större skala. Det är bland annat de två svenska företagen HYBRIT och H2 Green Steel som ligger i täten av implementering av produktionsanläggningar för fossilfri stålproduktion. (Leadit, n.d.) För att gå från testproduktion till en mer omfattande produktion av fossilfritt stål kommer det att krävas stora mängder förnyelsebar energi. Priset på fossilfritt stål spås av vissa bedömare att bli runt 20% högre än för traditionellt stål och tillgången till billig förnybar el är en viktig aspekt för att begränsa detta prisgap (Material Economics, 2019). Kostnaden på framtida utsläppsrätter är också en viktig aspekt för att begränsa prisskillnaden mellan traditionellt och fossilfritt stål. Med tiden så kommer de tillåtna utsläppsrätterna bli allt färre vilket kommer resultera i mycket högre kostnader för att släppa ut koldioxid (European Commission, n.d.). Något som bådär för att fossilfritt stål i framtiden kommer att säljas till ett konkurrenskraftigt pris. Kraven från samhället och företagare på sänkta utsläpp kommer troligen att accelerera denna process och det kan därmed finnas stora ekonomiska fördelar med att tidigt implementera en produktion av fossilfritt stål och få ett försprång i omställningen. (Åhman, Olsson, et al., 2018)

Järnmalmen och kolet har traditionellt varit grundstenarna i hela produktionskedjan och därför har stålproduktion historiskt varit centrerad kring där dessa råvaror finns. Närheten till viktiga marknader som USA och Europa var också viktig (D'Costa, 1999). I framtiden kan det dock vara andra resurser som är av större ekonomisk vikt i tillverkningen och därför ska grunden för denna rapport vara att genomföra en global analys av tillgången till de olika komponenter som är nödvändiga för tillverkningen av grönt stål. Målet är att utifrån dessa parametrar kunna identifiera områden som har komparativa fördelar till att producera fossilfritt stål. Även länder som idag exporterar stora mängder kol för ståltillverkning eller som har väletablerad masugnsinfrastruktur kan vinna på att tidigt ta steg för att övergå till en produktion med lägre utsläpp (Åhman, Olsson, et al., 2018).

1.1 Syfte

Syftet med rapporten är att utveckla en databas med information som kan användas för framtida analyser av projekteringsmöjligheter för fossilfri stålproduktion och testa användbarheten i en första enklare studie för att identifiera länder och regioner med komparativa fördelar för fossilfri stålproduktion.

1.2 Frågeställningar

- Hur ser kostnadsbilden ut för kolbaserat stål idag och hur kommer den att ändras vid övergången till grön stålproduktion baserat på förnybar el?
- Vilka länder eller regioner har bäst energimässiga och resursmässiga förutsättningar att producera grönt stål?
- Vilka konsekvenser får detta på den Europeiska ståltillverkningen.

1.3 Avgränsningar

Rapporten syftar enbart på att ge en översiktlig uppfattning av hur prisbilden på grönt stål kommer se ut globalt. Eftersom målet är att studera komparativa fördelar vid grön stålproduktion bortom år 2030 så kommer inte någon större vikt läggas på dagens policys utan mer på trender i olika regioner och hur prisutvecklingen kan se ut bortom 2030.

Ingen vikt läggs heller på hur stålindustrin är distribuerad inom länder. Stålverk förutsätts ligga i närheten av kusten för att järmalmen ska kunna transporteras till havs. I rapporten tas heller ingen hänsyn till nationell inrikespolitik utan endast på de fysiska förutsättningarna när det kommer till konkurrensfördelar för grön stålproduktion.

2. Metod

Arbetet syftar till att skapa en god bild av de komparativa fördelar som olika nationer har för fossilfri stålproduktion. För att uppnå detta så har två olika analyser som presenteras nedan genomförts.

2.1 Analysprocess

Analysen har genomförts med ett kombinerat hänsynstagande för prisbilden som beräknas fram med ekvation 2.5 samt information från databasen.

Först kommer de huvudsakliga produktionsfaktorerna som syns i figur 2.1 nedan att jämföras mellan en rad olika länder som kan tänkas relevanta för fossilfri stålproduktion. Ekvationen innefattar tillgången på järnmalm och kostnaden för att frakta den, dagens kostnad för förnybar energi samt kostnaden för att bygga ny infrastruktur och kostnaden för arbetskraft. Från ekvationen kommer en ungefärlig prisbild för fossilfri stålproduktion att genereras. Det är utifrån detta priset som en första jämförelse görs där några gynnsamma områden identifieras som har goda komparativa fördelar för grön stålproduktion.

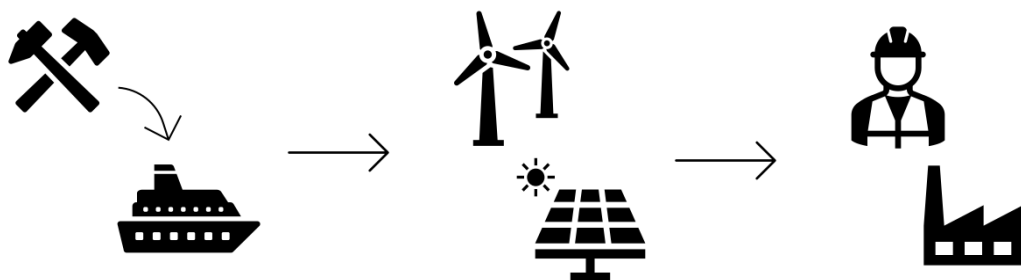


Figure 2.1: De mest relevanta produktionsfaktorerna som utgör ett underlag för att undersöka komparativa fördelar för grön stålproduktion. (Utvinning av järnmalm samt transporten av den, kostnader för förnybar energi och kostnader för produktion och arbetskraft.)

Efter att beräkningarna har genomförts och ett antal regioner med bra förutsättningar har identifierats så gjordes en närmare analys utifrån databasen. Denna analys kommer studera

fyra faktorer. Mängden järnmalm i närområden samt dess kvalitet (järninnehållet i malmen). Hur förhållandena för förnybar energi ser ut i området och hur det kan tänkas påverka kostnaden för förnybar energi framöver. Samt hur tillgången till vatten ser ut i området. Vattentillgången inkluderas då den kan utgöra en begränsande faktor vid produktionen av grön vätgas.

2.1.1 Databas

För att skapa en bättre bild av olika länders förutsättningar så sammanställdes data kring parametrar som är relevanta för fossilfri stålproduktion. Datan presenterades sedan i form av kartor som illustrerar förutsättningarna för stålproduktion på ett tydligt sätt. Utifrån kartorna kan resonemang föras kring om det finns fördelar, både miljömässiga och ekonomiska, med att omlokalisera några, eller i vissa fall, alla steg av produktionskedjan för stål i framtiden till länder eller regioner med bättre förutsättningar.

De parametrar som antas vara mest centrala för framtidens stålproduktion är följande och det är dessa som data ska insamlas kring:

- Tillgång till järnmalm
- Tillgång till skrot
- Potential för förnybar elproduktion. Det är de fysiska förutsättningarna som studeras vilka kan tänkas representera ett framtida elpris.
- Fördelningen av världens stålproducenter. Alla världens stålverk är inkluderade för att skapa en utgångspunkt för vart stålproduktionen är lokaliserad idag (2022). Informationen ger dessutom en bild över vart infrastruktur och expertis inom ståltillverkning finns.
- Tillgång till vatten för vätgasproduktion
- Kostnad för förnybar energiproduktion 2021

Datan som samlats in sammanställdes i kartor med hjälp av programmet QGIS (QGIS, 2023). QGIS är ett geografiskt informationssystem där olika geografiska parametrar tydligt kan illustreras. Målet är att olika potentialer ska kunna jämföras med hjälp av kartorna och på så sätt åskådliggöra olika fördelar med placering av stålproduktion på andra platser än de idag är lokaliserade. På samma gång blir det tydligt vilka av de länder som idag har traditionell stålproduktion som även har förutsättningar att producera grönt stål på samma plats.

2.1.2 Valet av produktionsfaktorer

Priset på råmaterialet och energikostnaderna är de största kostnadsposterna för både traditionell ståltillverkning samt vid produktion av grönt stål (Medarac, Moya, and Somers, 2020).

Vid produktionen av grönt stål är kostnaden för energi ännu viktigare än vid traditionell stålproduktion då det utgör en större andel av den totala kostnaden (Material Economics, 2019). Det är förutsättningarna att hålla nere dessa två kostnadsvariabler som kommer ha störst betydelse för olika länders komparativa fördelar. CAPEX kostnaderna och kostnaderna av arbetskraft är inte lika beroende av geografiska förutsättningar även om de skiljer sig något (Medarac, Moya, and Somers, 2020).

Skrot är också en viktig faktor men kommer inte att inkluderas i beräkningarna för kostnaden på grönt stål. Detta då tillgången på skrot inom landet inte har en lika tydlig påverkan på prisbilden för grönt stål. Stål är trots det en viktig resurs och kan därför med fördel inkluderas i en vidareutveckling i en modellen.

Den globala klimatpolitiken med till exempel utsläppsrätter och andra politiska mål och verktyg som påverkar priset på stål räknas inte in i de komparativa fördelarna. Detta då styrmedlen inte påverkar de faktiska förutsättningarna att producera grönt stål till ett konkurrenskraftigt pris och därmed inte heller de komparativa fördelarna. De är dessutom ämnade för att reglera bort traditionellt stål och kommer därmed inte belasta grönt stål med ökade kostnader.

2.1.3 Beräkning av komparativa fördelar

För att beräkna en regions komparativa fördelar när det kommer till att producera fossilfritt stål så är det några faktorer som är av särskild vikt. Genom att skapa en matematisk formel med de viktigaste parametrarna för det slutgiltiga priset på stålet så kan olika regioners lämplighet att producera grönt stål jämföras.

Produktionsfaktorer som är särskilt viktiga för grön stålproduktion är nedan nämnda punkter. Informationen till de två översta punkterna är hämtade från databasen.

- Priset på och tillgången till energi för produktionen. Eftersom fokuset är på fossilfritt stål så syftar priset här på kostnaden för förnyelsebar elektricitet.
- Tillgången till och kostnaden för järnmalm.
- Ytterligare kostnader som tillkommer vid stålproduktion med vätgas. Detta inkluderar CAPEX kostnader och kostnaden för arbetskraft som antas relativt lika för alla regioner och kommer inte utgöra en avgörande konkurrensfördel (Medarac, Moya, and Somers, 2020).

Ekvationen kommer generera en uppskattad kostnad för fossilfritt stål som kan ställas i relation med kostnaden i andra regioner.

Den första komponenten i ekvationen är kostnaden för den förnybara energin. Här används kostnaden för att generera den el som krävs för att producera tillräckligt med vätgas för tillverkningen av ett ton stål. Samt kostnaden för den elen som krävs för att driva ljusbågsugnen. För att få fram en kostnad för den totala elanvändningen så används följande ekvation

$$\left(50 \frac{kWh}{kg} \cdot 60kg\right) + 450kWh \cdot FEK_{EUR} = \theta \quad (2.1)$$

Komponenterna i ekvationen baseras på följande data: Det krävs runt 50 kWh för att producera ett kilo vätgas i en AWE elektrolysator (Nechache and Hody, 2021). Det används sedan cirka 60 kg vätgas för att producera ett ton stål (Bhaskar et al., 2022). Därifrån har den totala energimängd som krävs för att producera vätgasen etablerats. Till detta tillkommer den genomsnittliga energianvändningen i en ljusbågsugn (Logar and Škrjanc, 2021). Detta värde multipliceras sedan med kostnaden för att producera förnybar el i den aktuella regionen (FEK_{EUR}). Kostnaden för förnybar elproduktion avser antingen kostnaden för produktion från solceller eller vindkraft. Valet av produktionsmetod görs utifrån den som har det lägsta priset i det aktuella landet. Siffrorna för produktionskostnaden är från 2021 och kommer från IRENA (2021). Ekvationen genererar en ungefärligt elkostnad för att producera ett ton fossilfritt stål.

Nästa prisledd som är viktig att studera för de komparativa fördelarna är kostnaden för järnmalmen. Inköpspriset består huvudsakligen av kostnaden för dels själva järnmalmen och dels av transportkostnaderna. För att få ett ungefärligt pris på råmaterial i varje aktuellt land så multipliceras inköpspriset för malm på den globala råvaruhandeln med kostnaden för transport. Det globala inköpspriset av järnmalm är kraftigt fluktuerande och därför tas ett genomsnitt av priset de senaste 10 åren. Priset har då fluktuerat mellan 56 och 158 USD/ton. Ett snittpris identifieras kring 120 USD per ton (International Monetary Fund, n.d.). Priset avser kinesisk import av järnmalm med 62 procentigt järninnehåll men kan anses representativt för det globala råvarupriset. Kina är den överlägset största importören av järnmalm och deras inköpspris är därmed talande för råvarupriset globalt (Kim et al., 2022). En invändning när det kommer till priset på järnmalm är att grön ståltillverkning använder järnmalm med ett högre järninnehåll. Järnmalm av den kvalitén är inte lika tillgänglig och kan eventuellt driva upp priserna om utbudet är begränsat i relation till den framtida efterfrågan (Nicholas and Basirat, 2022).

Eftersom beräkningen avser att få fram en kostnad för grönt stål i EUR per ton stål så måste kostnaden för järnmalmen först konverteras från USD till EUR. Konverteringsfaktorn 1 USD = 0.92 EUR (2023-01-16) används. Slutligen multipliceras priset på järnmalmen med en faktor på 1.6 eftersom det används runt 1.6 ton järnmalm för att producera ett ton stål (World Steel Association, n.d.).

$$120 \cdot 0.92 \cdot 1.6 = 176,64EUR/ton \quad (2.2)$$

Den totala kostnaden av järnmalmen för att tillverka ett ton stål uppskattas till 177 EUR. Kostnaden för järnmalmen multipliceras sedan med en faktor som ska representera kostnaden att transportera varor till havs. Denna faktor är ett procentpåslag som läggs på kostnaden för råvaran när den lämnar exportnationen. Transportkostnaden är ett genomsnitt mellan olika länders transportkostnader för frakt till havs. Transportkostnaderna är hämtade från Shamika et al. (2021) och ett genomsnitt uppskattas till ett kostnadspåslag på 6%.

$$Transport(\%) \cdot 177 = Malm_{EUR} \quad (2.3)$$

Påslaget läggs endast på nationer som importerar all eller större delar av sin järnmalm. Nationer som är nära självförsörjande med järnmalm kommer därmed inte få ett kostnadspåslag för havstransport.

Slutligen inkluderas en faktor som motsvarar de ytterligare kostnader som tillkommer grön stålproduktion. Den består huvudsakligen av CAPEX kostnader då grön ställtillverkning kräver investeringar i nya anläggningar. För att få fram ett ungefärlig annualiserad investeringskostnad så görs en beräkning utifrån siffror från West (2020) som anger investeringskostnaden för ett stålverk med direktreduction från vätgas. Annuiteten beräknas utifrån en livslängd på 25 år och en ränta på 10%.

$$574EUR/ton \cdot \frac{10}{1 - (1 + 10)^{-25}} = 63.25EUR/ton \quad (2.4)$$

Till det tillkommer kostnader för arbetskraft som motsvarar runt 33 EUR / ton stål (Medarac, Moya, and Somers, 2020). 33 EUR är ett genomsnitt mellan de högre kostnaderna för arbetskraft i EU och USA på runt 40 EUR och de billigare arbetskraftskostnaderna i exempelvis Indien och Brasilien på mellan 24 och 29 EUR / ton stål (Medarac, Moya, and Somers, 2020). Den övriga kostnaden blir då $\Sigma \approx 96$ EUR per ton grönt stål.

Den slutgiltiga ekvationen för komparativa fördelar inom grön ställtillverkning blir följande och genererar ett ungefärligt pris för att tillverka grönt stål under de aktuella förutsättningarna:

$$\theta + Malm_{EUR} + \Sigma = K_{EUR} \quad (2.5)$$

3. Bakgrund

3.1 Dagens stålproduktion

En överblick över konventionell tillverkning av primärt stål och hur stålindustrin är fördelad i dagsläget presenteras här. Sekundär ståltilverkning från skrot studeras även. Miljöproblematik med konventionell stålproduktion överblickas.

3.1.1 Konventionell produktion av primärt stål (malmbaserat)

Produktionen av primärt stål utgör runt 70% av dagens stålproduktion (Åhman, Olsson, et al., 2018). Primärt stål är stål som utgår från järnmalm vilket innebär att råvaran inte är tidigare behandlad. Processen inleds med brytandet av järnmalm. Järnmalmen som extraheras från gruvor innehåller syre och kol som behöver avlägsnas för att tillverka stål. För att sänka syrehalten i järnmalmen används i huvudsak en masugn. I masugnen används koks för att reducera bort syret. Produkten av detta processteg är tackjärn. Det flytande tackjärnet förs sedan genom en syrgasprocess för att sänka kolhalten på legeringen. Resultatet från syrgasprocessen är stål. Stålet genomgår sedan ofta skänkmetsallurgi för att alterera legeringen och skapa optimala förutsättningar inför gjutningen. När stålet har uppnått den renhetsgrad som önskas gjuts det och valsas ut i det format som önskas av beställaren.(Åhman, Olsson, et al., 2018) Denna konventionella produktionsmetod genererar ett genomsnittligt utsläpp på 2.2 ton CO₂ per ton producerat stål. Den absoluta majoriten av detta utsläpp härstammar från järnmalmreduktionen i masugnen. (Suer, Traverso, and Ahrenhold, 2021)

3.1.2 Produktion av sekundärt stål (skrotbaserat)

Stål kan också produceras genom återanvändning av skrot. Då smälts skrotet i en ljusbågsugn och går direkt vidare till skänkmetsallurgi för att få fram färdigt stål. (Åhman, Olsson, et al., 2018) Användningen av denna produktionsstyp varierar mycket mellan olika länder då den kräver stor tillgång till skrot. Vare sig den kommer från import eller från inom landets gränser. Skrot kan också blandas in i konventionell stålproduktion där det ersätter järnmalm till en viss grad och kan bidra till en bättre tillverkningsprocess. (Bureau of International Recycling, 2022) När stål tillverkas från återvunnet stål i en ljusbågsugn genereras utsläpp på runt 0.3 ton CO₂ per ton producerat stål.(Suer, Traverso, and Ahrenhold, 2021)

3.1.3 Klimateffekter och energianvändning vid stålproduktion

Energikonsumtion

Stålproduktion är en mycket energikrävande process. Traditionell ståltillverkning via en masugn kräver runt 18,8 GJ energi per ton stål som produceras från det att järnmalmen kommer in i fabriken till den färdiga produkten. Om processen istället sker med direktreducerat järn och en ljusbågsugn kommer energibehovet ner till 15,6 GJ per ton stål som produceras. Vilken energikälla som används skiljer sig mycket mellan de två olika produktionsvägarna. Den traditionella vägen använder en stor del kemisk energi, det vill säga energi som utvinns vid förbränning av exempelvis kol och naturgas. Direktreducering av järn och ljusbågsprocessen däremot kräver en mycket högre andel elektricitet. En övergång till en helt elektrifierad stålindustri kommer kräva stora investeringar i den fossilfria elproduktionen. (Lauri, 2021) Till skillnad från exempelvis cementtillverkning som är en annan stor utsläppare av växthusgas så kommer majoriteten av stålproduktionens utsläpp från energianvändning. Genom att reducera utsläppen från energianvändningen kan de totala utsläppen från ståltillverkningsprocessen därför reduceras kraftigt. (World economic forum, 2022) Energibärarna i stål och järnindustrin såg ut som följande 2015 men andelarna lär vara snarlika hur de ser ut idag (2023) då ingen större elektrifiering ännu har skett.

	Energianvändning (EJ/år)	Andel %
Metallurgiskt kol och koks	24.1	70.0
Annat kol	6.1	17.4
Masugnsgas och koksugnsgas	-3.3	-9.6
Naturgas	2.3	6.7
Olja	0.4	1.2
Biomassa	0.1	0.4
Elektricitet	4.0	11.8
Värme	0.6	1.9
Totalt	34.4	100.0

CO₂-utsläpp och luftföroreningar från ståltillverkning

Utsläppen från stålindustrin förorenar både lokalt men även på större skala, genom att bidra till den globala uppvärmingen. De största utsläppen av växthusgaser är i form av koldioxid, kväveoxider och svaveloxider. Stora utsläppsminskningar av dessa gaser har gjorts de senaste decennierna genom exempelvis effektivare processer och bränslen likväl som rökgasrening som extraherar miljöfarliga ämnen från utsläppen. Trots det så är utsläppen från växthusgaser från stålproduktion fortfarande höga. Den största källan till koldioxidutsläpp, vilket är den till mängden främsta växthusgasen från processen, är det kol som används för att reducera järnet i masugnar och järnsvampsverk. Detta kol genererar ca 90% av ståltillverkningens totala koldioxidutsläpp. (Jernkontoret, 2022)

3.1.4 Dagens stålindustri

Dagens stålindustri är till stor del lokaliserad i Kina där 52.9 procent av världens stål producerades år 2021 (World Steel Association, 2022). Mängden stålverk i Kina kan ses i figur 3.1 där fördelningen av alla stålverk på östra halvklotet syns i databasen. Kinas dominans inom ståltilverkning är ett fenomen som har växt fram under senare decennium i en industri som är under ständig förflyttning. Tio år tidigare, 2011 så var Kinas andel av den globala stålproduktionen 45,1 procent och har sedan dess varit på en ständig uppgång (World Steel Association, 2022). Med en historisk tillbakablick är det dock tydligt att det under de senaste hundra åren har varit andra länder som USA, Japan och Västra Europa som har dominerat ståltilverknigen (D'Costa, 1999). Med fri handel har höga produktionskostnader historiskt drivit ståltilverknigen från välställda kapitalistiska länder (D'Costa, 1999). Många av länderna som förlorar arbetstillfällen på grund av denna omlokalisering har inrättat tullar på stål för att motverka förlusten av ytterligare stålproduktion. Bland annat för att motverka det statliga stöd Kina ger till sin stålproduktion som ger ojämna konkurrensförhållanden (Jernkontoret, 2021). 2021 så var 8 av de tio största stålproducenterna baserade i Asien vilket är ett tydligt tecken på de lokaliseringsförflyttningar som har gjorts de senaste decennierna (Global Data, 2021).

En aspekt som historiskt har resulterat i förflyttning av vilka länder som producerar mycket stål är sjunkna kostnader i gammal teknik och oviljan att anamma ny teknik på bekostnad av sin redan existerande infrastruktur. Denna aspekt kan tillskrivas en del av ansvaret för den stora förflyttning som gjordes de årtionden efter andra världskriget då stora förändringar skedde ur ett stålperspektiv. Förskjutningar skedde från stålproducerande länder och områden som USA och Europa till nya producenter utan någon större befintlig stålindustri som exempelvis Japan och Sydkorea (Diaz-Morlan and Saez-Garcia, 2016).

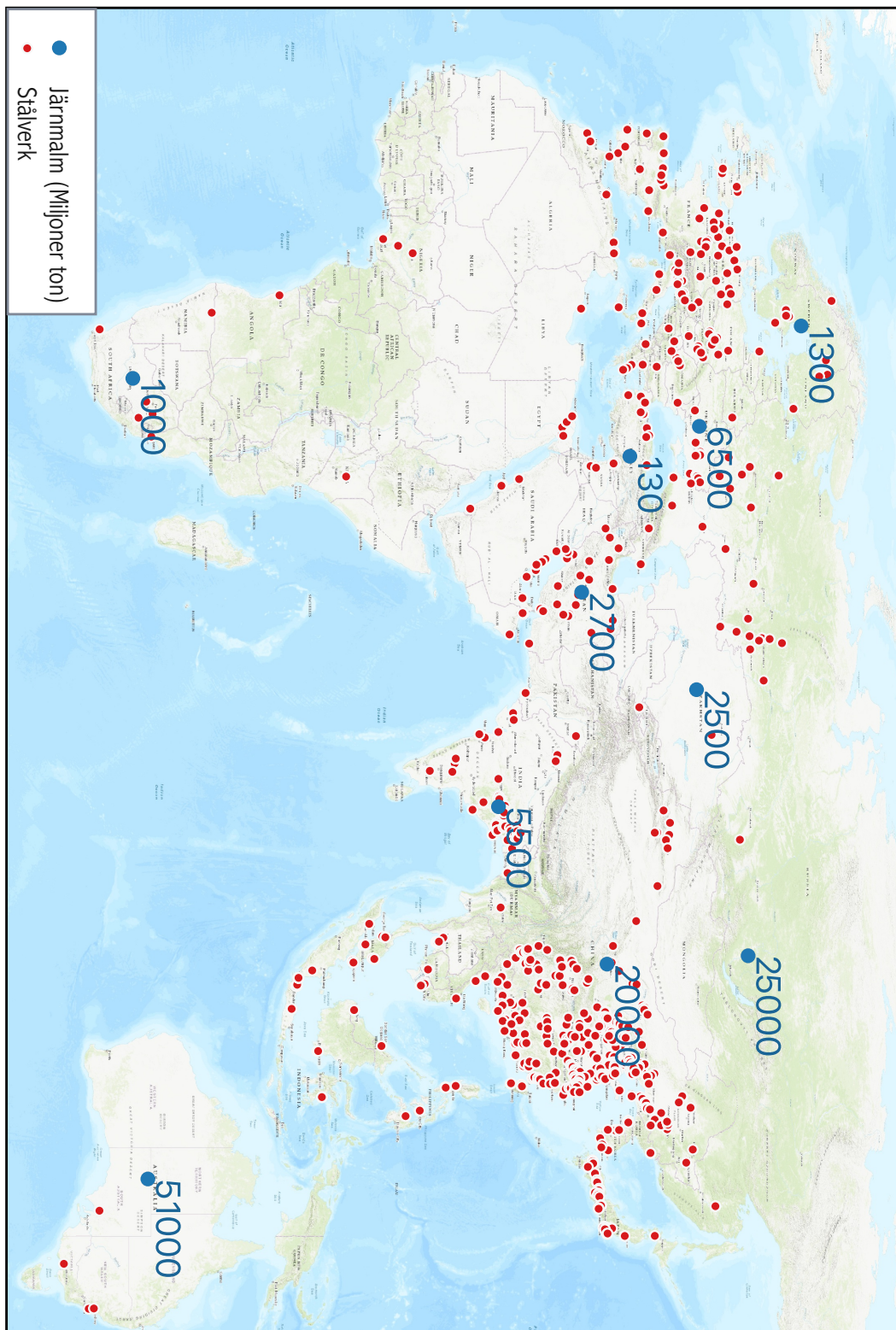


Figure 3.1: Utdrag ur databasen som visar dagens stålverk på delar av östra halvklotet samt en uppskattning av malmreserverna hos de länder som utvinner mest.

3.1.5 Stålgeografi

Utöver faktiska fysiska förutsättningar för att producera stål så finns det flera andra aspekter som spelar in i vilka länder som är och som har varit historiskt framstående inom stålindustrin. Detta kan vara aspekter som tradition, lagar och regelverk, handelsavtal och tillgång på kompetens inom ståltillverkning. Att samla produktionen nära järnmalmen och kolet har varit ett logiskt val ur aspekterna minskade kostnader och utsläpp från transporter vilket historiskt sett har haft betydelse. Handelspolicy och lägre kostnader för transport kan dock ändra på den dynamiken (Gielen et al., 2020).

Policy kan vara ett verktyg som gynnar nya tekniker och omställningar i industrin. Det finns dock exempel där de gör motsatsen. Ett exempel på policybeslut, som har potential att snedfördela investeringar i ståltillverkning, är de olika kvoter som ingår i EU och UK ETS. I UK ETS är kostnaderna idag större på utsläppsrätter från el-produktion än på masugnsståltillverkning vilket sätter ljusbågsugnar i en konkurrensmässig nackdel. Då ljusbågsugnarna är en central del i fossilfri stålproduktion så kan detta ha negativa konsekvenser för teknikens utveckling (Richardson-Barlow et al., 2022).

Då kostnaden på CO₂ utsläpp är en central faktor i det fossilfria stålet konkurrenskraft är policyfrågor inom detta området av stor vikt att analysera och justera till att lämpa sig bättre för att inkludera nya tekniker (Richardson-Barlow et al., 2022). Eftersom kostnaderna för utsläppsrätter har ökat avsevärt den senaste åren så kommer påverkan på Europas industrier att minska sina utsläpp att öka hastigare än vad det tidigare har gjort (EMBER, 2022). EU har den mest ambitiösa klimatpolitiken och har implementerat åtgärder för att styra industrin mot med hållbara lösningar. För att minska "läckage" av CO₂, vilket innebär att produktion flyttar ut ur EU till regioner med lägre CO₂ kostnader, så har EU implementerat andra lättnader som ska underlätta för unionens industrier att fortsatt vara konkurrenskraftiga även med höga CO₂ kostnader. Dessa lättnader är exempelvis att känsliga industrier kan få undgå avgifter för förnybar energi och få vissa undantag från energiskatter. De har också inneburit ett antal gratis utsläppsrätter som allokeras till företag som är känsliga för konkurrens utanför unionen (Åhman, Arens, and Vogl, 2022).

Dessa åtgärder har hjälp mot CO₂ läckage då endast vissa fall av detta har identifierats. Däremot så har de ekonomiska lättnadens minskat industriernas behov att dra ner sina utsläpp. Investeringar i långsiktiga och djupgående avkarboniseringsprojekt har inte skett i den grad som var önskat dels eftersom det inte har varit ekonomiskt nödvändigt med de rådande CO₂ kostnaderna i unionen (Åhman, Arens, and Vogl, 2022). Visst CO₂ läckage har dock identifierats inom den Europeiska stålindustrin (Jakob et al., 2022). Det är huvudsakligen genom importen av semi-färdiga stålprodukter. Det är efter reduceringen av järnmalm, vilket är den mest CO₂ intensiva delen av stålproduktionen, som mycket av de semifärdiga produkterna importas till EU och därefter färdigställs. På så sätt undkommer den del av processen som associeras med de högsta utsläppen EUs utsläppshandel (Jakob et al., 2022). EU importerar årligen 60 Mt stålprodukter. Många av dessa produkter hade medfört högre kostnader om de producerades i EU och ingick i handeln med utsläppsrätter. Med ett antaget pris på 50 EUR/t CO₂ så hade kostnaderna för utsläppsrätter utgjort mellan 8% och 15% av produktens totala värde. En kostnad på utsläpp som kan vara tillräcklig för att sätta kostnaden för konventionellt stål i paritet med grönt stål (Åhman, Arens, and Vogl, 2022).

EU tänker dra in på de ekonomiska lättnader som konkurrenskänsliga företag har åtnjutit när EUs gränsjusteringsmekanism för koldioxid implementeras 2026. Bland annat kommer de gratis utsläppsrätterna försvinna då de inte längre behövs för att undvika läckage av koldioxid. Indragande av de gratis utsläppsrätterna kommer att höja priserna för koldioxidutsläpp och därmed öka takten i vilken europeiska företag behöver dra ner sina utsläpp (European Commission, 2021).

Internationell handel

Transportlederna för handel med järnmalm och stål kan ändras i en framtid med ökad produktion av direktreducerat järn från förnybar el. I omdragningen av transportererna finns det både ekonomiska och utsläppsmässiga vinster att göra. Att transportera järnsvamp istället för järnmalm innebär en viktminskning på runt en tredjedel vilket medför ekonomiska fördelar. Om stålet tillverkas med vätgas kan även transportkostnaden för kol undvikas. För produktion i masugn medföljde transport av ca ett halvt ton kol för varje ton järnmalm som skickades. För transportsträckan västra Australien till Qingdou i Kina, som är en av de rutter där mest järnmalm och kol transporteras, kan detta medföra ekonomiska besparingar på runt 15 USD per ton transporterad järnsvamp. Denna besparing medför en ekonomisk vinning för produktionslandet av järnsvampen utöver det ökade värdet på produkten de levererar. En osäkerhet i denna kalkyl är att järnsvamp behöver transporteras i en kväveatmosfär vilket kan kräva andra fartyg och en ökad kostnad på så vis (Gielen et al., 2020). Alternativt kan malmreduktionen skeppas som HBI vilket är komprimerad järnsvamp. Denna metod kräver även den ökade kostnader från de energiförluster som tillkommer vid komprimeringen (IIMA, 2023).

Sänkta kostnader för transporter kan ha positiva effekter för de globala utsläppen. Tillräckligt låga transportkostnader möjliggör för en uppdelad leveranskedja där olika regioner kan göra det som de har de bästa förutsättningarna för. Förnybar vätgas kan exempelvis produceras där det finns tillgång till mycket billig förnyelsebar energi. Stålet kan sen med fördel produceras på en plats med sofistikerad infrastruktur och teknisk expertis inom området som kan bidra till att sänka utsläppen genom en effektiv produktion. En välfungerande internationell handel kan dessutom bidra till att nya tekniker snabbare sprider sig globalt genom att det finns öppna handelsvägar som möjliggör för tekniskt utbyte (Jakob et al., 2022). Transportutsläppen är oftast små i jämförelse från produktionen av produkterna som skickas. Detta medför att det går att sänka utsläppen om man producerar olika produkter där förutsättningarna är optimala och sen transporterar de till nästa steg i värdekedjan. Men på samma sätt som utsläppsminskningar kan uppnås genom en väletablerad världshandel så kan motsatsen ske om inte rätt instrument är på plats. Om inte någon form av koldioxidtull eller annan gränsjusteringsmekanism för koldioxid finns så hämmas de regioner med CO₂ certifikat och med ambitiösa miljöarbeten. Kostnaderna för koldioxidutsläpp behöver dock vara höga för att berättiga förflyttandet av industrin till en annan plats (Jakob et al., 2022).

Gränsjusteringsmekanismer är av största vikt för att undvika att CO₂ tung industri försvinner till områden med lägre klimatambitioner. En avsaknad av en tull av detta slag är en bidragande faktor till att nationer tvekar med införa allt för ambitiösa CO₂ begränsningar. Utan en justeringsmekanism av detta slag kan det vara svårt att möta de utsläppsminskningar

som krävs för att uppnå de mål som ställs i enlighet med Parisavtalet. En anledning till att gränsjusteringsmekanismer stöter på motstånd är komplikationerna med att implementera de så att de fungerar i enlighet med WTOs regelverk. Mekanismerna kan uppnå effekter som inskränker frihandeln på sätt som bryter mot WTOs stadgar (Åhman, Arens, and Vogl, 2022). WTOs stadgar begränsar även möjligheterna till en klimatklubb som implementerar gränsjusteringsmekanismer för CO₂ runt sina gränser. Detta eftersom CO₂ priset vid gränsen då endast får vara satt i paritet med det lägsta CO₂ priset inom klimatklubben (Jakob et al., 2022). Ett problem som kan begränsa möjligheten för expansion av klimatklubben då det kan sänka ambitionsnivån inom hela samarbetet.

En invändning mot skapandet av en klimatklubb av något slag är att den skulle slå hårt mot utvecklingsländer och sätta de i ett underläge (Jakob et al., 2022). Detta motsätter artikel 3 i FNs klimatkonvention som säger att alla nationer ska arbeta mot samma mål men med olika ansvar utifrån sina respektive förmågor. Om OECD länderna skulle börja handla med gröna produkter inom en klimatklubb skulle det skapa en marknad på villkor som utvecklingsländer kan ha svårt att konkurrera inom. Justeringsmekanismen tar då inte ländernas respektive förutsättningar i åtanke då de industrialiserade länderna borde ta ett större ansvar (Åhman, Arens, and Vogl, 2022).

Av de stora stålproducerande ekonomierna är det bara EU och USA som importerar mer stål än vad de exporterar. Detta innebär att både EU och USA måste förlita sig på andra nationer för att tillfredsställa sin stålkonsumtion. I dagsläget är både Kina och Ryssland två av de största exportörerna av stål. Efter Rysslands invasion av Ukraina under 2022 så belades Ryssland med sanktioner från både EU och USA. Konsekvenserna har blivit att EU och USA får vända sig till andra länder som exempelvis Brasilien, Japan och Sydkorea för att kunna införskaffa samma produkter. När västvärldens relation till Kina blir kyligare, på grund av spänningar efter Kinas motvilja att fördömma Rysslands invasion och Kinas anspråk på Taiwan, så ökar västvärldens behov till alternativa importländer. Eftersom Kina är världens största stålexportör så finns det ett visst beroende på stålmarknaden av Kinas produkter. Detta försvårar möjligheterna för EU och USA att utöva påtryckningar på Kina om liknande produkter inte kan införskaffas på andra håll. Det ligger därför i både EUs och USAs intresse att stålproduktionen i västvärlden ökar (OECD, 2022).

Utöver sanktioner och handelsrelationer så är tullar viktiga verktyg för att påverka handelsflöden. Kinas avskaffande av importtullar på kol kommer troligen bidra till en ökad produktion av billigt stål i landet. Detta i kombination med ytterligare subventioner från den kinesiska staten till landets stålindustri sänker priset på kinesiskt stål. EU har därför inrättat antidumpnings-tullar som ska motverka importen av varor som säljs för mycket lägre priser än stålprodukter som har producerats inom unionen (OECD, 2022).

3.2 Framtidens tillverkning av primärt stål med vätgas

Det finns alternativa sätt att tillverka primärt stål än att använda en masugn. Vid användandet av alternativa produktionsvägar finns det potential att uppnå stora utsläppsminskningar.

Det är via denna metod vätgas kan användas för att reducera järnmalmen och på så sätt frångå de stora utsläpp som medföljer den fossila förbränningen i masugnen. Direktreducering med vätgas är inget nytt koncept men har under de senaste åren utvecklats i en större grad då det finns ett större intresse från investerare att finansiera projekt av denna typ. Ett intresse för att finansiera och använda grönt stål är nödvändigt för att processen ska komma till användning då det i dagsläget är dyrare att producera stål med denna metod än via en traditionell masugn (Wang et al., 2021). Kostnaden för att producera grönt stål har gått ner avsevärt de senaste åren i takt med att priset på förnybar energi och elektrolysörer har sjunkit. (Pimm, Cockerill, and Gale, 2021)

När vätgas används för direktreducering reduceras järnmalmen till järnsvamp. Ett flödeschema för hur processen ser ut anges i figur 3.2. Järnsvampen kan därefter användas direkt i ljusbågsugnen och på så sätt undvika fossila bränslen i processen. Detta förutsätter att elen som används är förnyelsebar. (Åhman, Olsson, et al., 2018) För att avlägsna fossila bränslen från värdekedjan behövs "grön vätgas" användas. Det innebär att vätgasen är tillverkad från elektrolys av vatten med hjälp av förnyelsebar energi. Det finns andra tillverkningsmetoder som kallas "blå vätgas" där inte heller något koldioxid släpps ut i atmosfären men där fossila bränslen fortfarande är del i processen. Koldioxidutsläppen i blå vätgas undviks genom carbon capture and storage (CCS) teknik som fångar upp koldioxiden som avges från processen. (Wang et al., 2021)

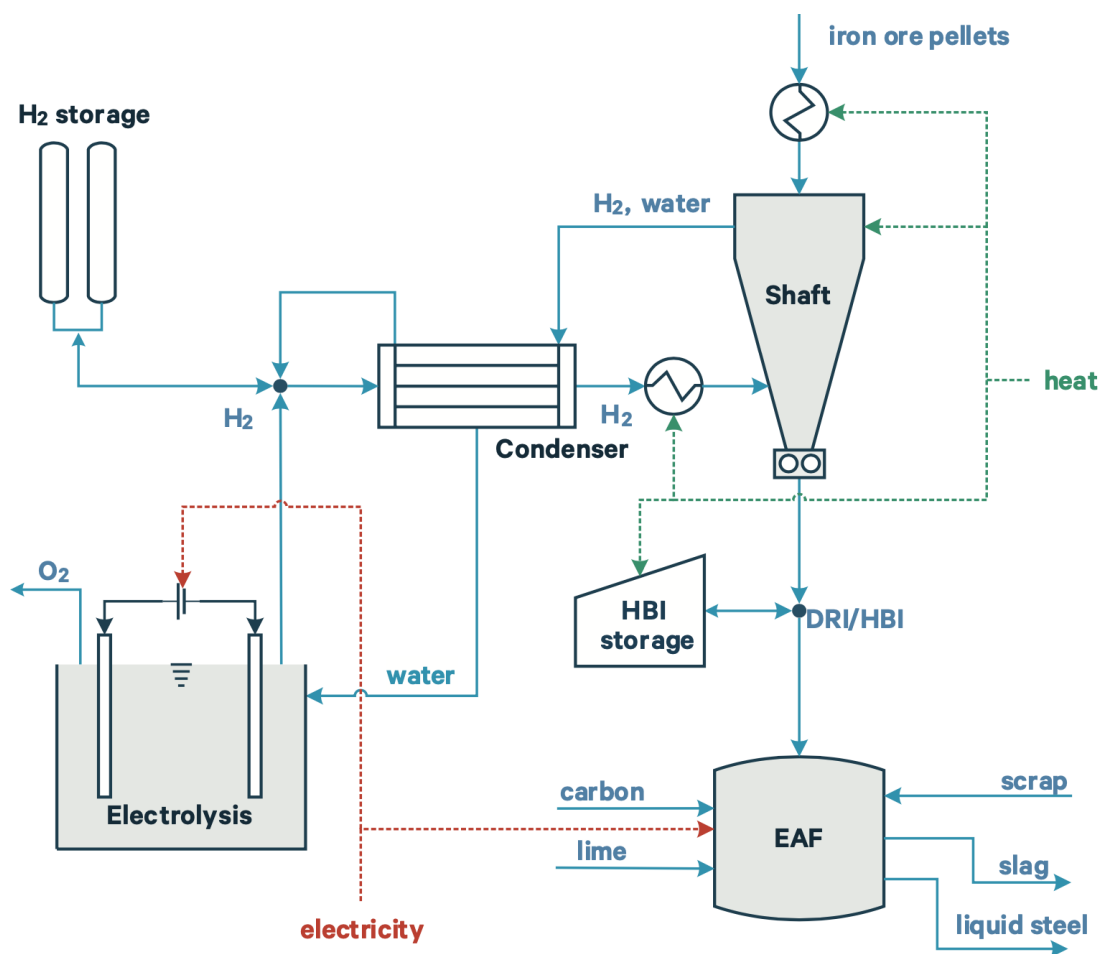


Figure 3.2: Flödesschema för produktion av grönt stål. Figuren är skapad av Vogl, Åhman, and Lars J Nilsson (2018)

3.2.1 Framtida produktionsvolym

Då både efterfrågan på stål men även tillgången på järnskrot spås öka framöver kan det vara komplicerat att bedöma behovet av järnmalsreducering med hjälp av vätgas.

Tillgången till skrot tros gå mot en kraftig ökning i många utvecklingsländer de kommande decennierna. Detta eftersom det fortfarande finns stora behov av utökad infrastruktur och annan bebyggelse som kräver mycket stål. Detta genererar i sin tur en ökad andel stålskrot i samhället.

Särskilt Kina lär se kraftigt ökade volymer av skrot under de kommande trettio åren. Tillgången till skrot i Kina spås av Çiftçi (2018) dubblas mellan åren 2018 till 2050. En ökning från 200 Mt till 400 Mt. Tillgången på stora mängder skrot sänker behovet av masugnar och kan bidra till lägre utsläpp från stålproduktionen och dessutom ett minskat behov av brytning av råmaterial. (Çiftçi, 2018)

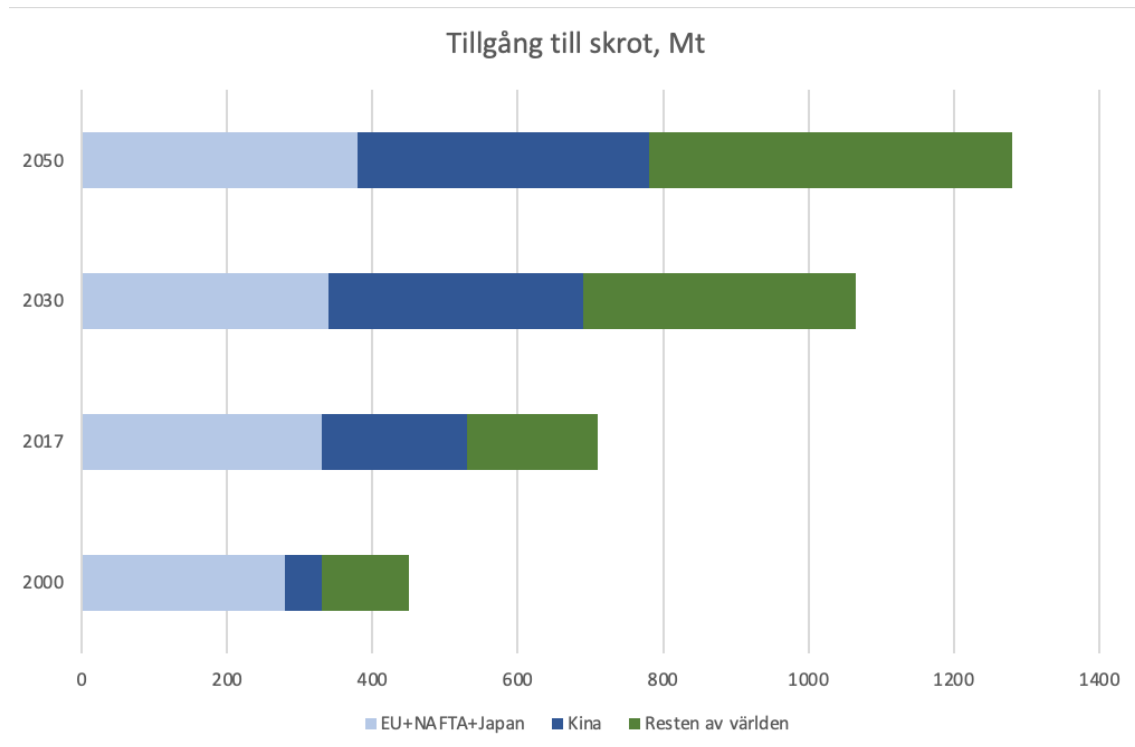


Figure 3.3: Framtida volymer av tillgängligt skrot. Baserat på siffror från Çiftçi (2018)

I utvecklade länder kommer denna ökning inte alls vara lika betydande. Exempelvis kommer mängden järnskrot öka från 320 Mt till 350 Mt i NAFTA, EU och Japan tillsammans under samma period. En jämförelse liten ökning som erbjuder en begränsad möjlighet att sänka CO₂ utsläppen i regionen enbart genom ökad återvinning. (Çiftçi, 2018) Återvinningsgraden av stål är hög (80-90%) så majoriteten av det stål som producerats stannar i systemet. Tiden som stålet stannar i systemet innan återvinningen är runt 40 år och det är med andra ord relativt långa löptider innan det stål som tillverkas idag når återvinning (Lauri, 2021). En cirkulär ekonomi som endast använder återvunnen stål är därför inte möjlig idag då stålbehovet fortsätter att öka vilket det förväntas göra bortom 2050. (Lauri, 2021)

De totala internationella handelsvolymerna av skrot var år 2021 ca 110 Mt. Nästan en fjärdedel av denna volym importeras av Turkiet (25 Mt). (Bureau of International Recycling, 2022) Trots detta så är USA det land som har störst andel skrot i sin stålproduktion. 15 av de 33 stålverken som producerar stål med enbart skrot låg i USA år 2019. Totalt så har ca 55 procent av USAs stålverk en ljusbågsugn som antingen är integrerad med en masugn eller arbetar självständigt med enbart skrot eller järnsvamp. Globalt så låg andelen stålverk med en ljusbågsugn på 27 procent. (Medarac, Moya, and Somers, 2020) Produktionen från skrot i ljusbågsugnar globalt spås öka från 0.42 till runt 1.0 Gt mellan åren 2019 till 2050. Eftersom den totala produktionsnivån av stål inte spås öka i samma takt om ens alls till 2050, enligt vissa bedömare som exempelvis Bataille and Eng (2021), så kan stålverkningen från skrot potentiellt utgöra runt hälften av den totala stålproduktionen. De förutspår en total årlig produktionsvolym på mellan 1.9 och 2.5 Gt till 2050 (Bataille and Eng, 2021).

3.3 Nyckeltekniker och faktorer för grön ståltillverkning

Vätgasproduktionen är en essentiell del av tillverkningen av grönt stål. Vätgasproduktionen beskrivs under denna sektion tillsammans med faktorer för produktion av förnybar elektricitet som är en viktig del bakom kostnaden för vätgasen. En allmän kostnadsbild för grönt stål beskrivs även.

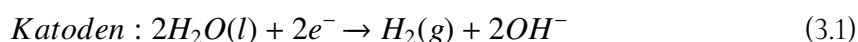
3.3.1 Vätgasproduktion

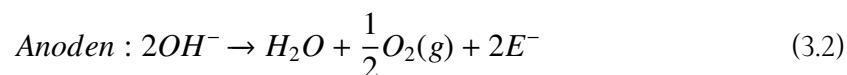
Även om väte är ett vanligt förekommande grundämne så återfinns det sällan i fri form utan är oftast bundet i molekyler med andra grundämnen. På grund av detta krävs en process för att separera väteatomer från molekyler som innehåller väte. Det vanligaste kväveinnehållande ämnet som används i denna process idag är metan. (Dincer, 2021) För att uppnå nollutsläpp genom vätgasproduktion med förnybar elektricitet används vatten i stället för metan. Det finns även så kallad blå vätgasproduktion som brukar ångreformerar metan där CCS används för att samla in utsläppen. Denna process har inte heller några koldioxidutsläpp men den är däremot inte förnyelsebar (IRENA, 2022b). År 2021 så hade 95% av den vätgas som producerades sitt ursprung i fossila bränslen. Investeringar krävs därmed för att övergå till en fossilfri vätgasproduktion (REN 21, 2021a). Dessa krävda investeringar börjar ta fart och många har insett vätgasens viktiga roll som energilager och som verktyg för att avlägsna utsläpp från svårkonverterade sektorer som stål och flygindustrin. Dessa stora investeringar tros resultera i att förnybar vätgas kommer genomgå samma prisutveckling som vind och solkraft, som bara på ett decenium har gått från dyra el-produktionsmetoder till den billigaste produktionsmetoden på många platser. I den privata sektorn har över 300 miljarder amerikanska dollar öronmärks för vätgasproduktion fram till 2030 (Puliti, 2022). Dessa stora investeringar spås få priset på vätgas med låga CO₂ utsläpp att falla drastiskt och nå 1.3 USD per kg till år 2030. (Puliti, 2022) Det kan jämföras med dagens pris på vätgas producerat med el som har låga CO₂ utsläpp, som ligger på mellan 3,2 och 7,7 USD per kg enligt International Energy Agency (IEA, n.d.).

Elektrolys

För att separera vätgasen från syret i vattenmolekylen används elektrolys. Det finns olika typer av elektrolys men gemensamt mellan metoderna är att de kräver mycket el. De tre huvudsakliga elektrolysmetoderna är AWE, PEM och SOEC där alla tekniker har olika mognadsgrad och olika fördelar.

AWE (Alkalisk vattenelektrolys) Används till stor del idag och har i dagsläget störst potential att tillverka vätgas i mer omfattande skala. För processen används en alkalisk elektrolyt som har en PH på över 7. Genom processen erhålls följande produkter:





AWE har relativt hög verkningsgrad på runt 65% och konsumerar cirka 50 kWh för att producera ett kilo vätgas. Nackdelen med AWE elektrolys är att processen inte kan hantera så snabba omställningar och kräver därmed en kontinuerlig energitillförsel. AWE processen kan därför med fördel kombineras med PEM (Protonbyttarmembran elektrolys) som på bekostnad av en lite sämre verkningsgrad har både snabbare uppstart och nedstängning av processen. PEM processen stängs ned på sekunder medans AWE kan ta upp till 10 minuter att stängas av

PEM (Protonbyttarmembran elektrolys) Har som ovan nämnt fördelen av att vara mycket snabbmanövrerad. Elektrolysisprocessen kan initieras och avslutas inom några sekunder. PEM har dessutom en relativt lång livslängd på runt 10 år. Detta är dock endast hälften av livslängden hos en AWE elektrolysör (Nechache and Hody, 2021). PEM elektrolysörer är dessutom kompakta så att de inte tar stora ytor i anspråk, de är effektiva och producerar vätgas av hög kvalitet samtidigt som processen även genererar syrgas (O_2). Nackdelen med PEM elektrolysörer är att de kräver mycket ädelmetaller vilket gör att de är dyrare i relation till AWE elektrolysörer (Shiva Kumar and Himabindu, 2019).

SOEC (Solidoxidelektrolyscell) har utvecklats intensivt under den senaste tiden då metoden spås kunna uppnå mycket hög verkningsgrad. Processen som drivs i temperaturer på runt 700-800 grader Celsius kan kraftigt reducera den el som krävs för att genomföra elektrolysen. Framförallt om denna värme kan uppnås med restvärme från någon annan process. Ett högre kraft till vätgas ratio har möjligheten att reducera kostnaden på vätgasen och göra den mer konkurrenskraftig mot vätgas från metan eller andra fossila bränslen. SOEC är fortfarande under utvecklingsstadiet men spås kunna vara en ledande teknik för vätgasproduktion inom 10 år (Nechache and Hody, 2021). En nackdel med SOE celler är att de i dagsläget har en kort livstid på runt 2-3 år i relation till PEM och AWE celler som har livslängder på 10, 20 år. Denna aspekt kan vara viktig att förbättra för att få företag att investera i SOEC teknik (Nechache and Hody, 2021).

Potentialen för fossilfri vätgasproduktion beror till hög grad på tillgången till förnyelsebara energikällor. Där det redan finns mycket, eller där potentialen för att bygga sol och vindkraft är hög, kommer även förutsättningarna för storskalig vätgasproduktion att vara goda. Vätgas har fördelen att det är en bra energilagrare som går att transportera och möjligheten finns därför att producera vätgas när utbudet av förnybar el är högt för att sedan kunna använda vätgasen när behovet finns. På så sätt kan en process som använder sig av vätgas fortlöpa med mer jämna utgifter, och utan större störningar, än en process som beror direkt på den tillfälliga elproduktionen. Nackdelen med en variabel produktion av detta slag är att ytterligare investeringar i lagringen av vätgasen behövs (IRENA, 2022b).

Vattenåtgång

Utöver möjligheterna att tillgå förnyelsebar el så spelar även tillgången på färskvatten en viktig roll vid elektrolys. Något varierande beroende på elektrolysmetod och teknik, så är åtgången på färskvatten mellan 10.01 och 22.40 liter per kg H_2 . Kvalitén på vattnet har också

betydelse för vattenåtgången (Simoes et al., 2021). EUs vätgasstrategi siktar på en elektrolyskapacitet på 6GW till 2024. Med denna kapaciteten finns möjligheten att producera 1 miljon ton av vätgas (Simoes et al., 2021). En vätgasproduktion på denna nivå kommer vara påfrestande för färskvattensreserver. Att producera ett ton stål kräver ca 60 kg vätgas. (Bhaskar et al., 2022) Det innebär att ett ton fossilfritt stål kräver mellan 600.6 och 1344 liter färskvatten.

$$10.01 \text{ (liter vatten / kg } H^2) \cdot 60 \text{ (kg } H^2 \text{ / ton stål)} = 600.6 \text{ (liter vatten / ton stål)} \quad (3.3)$$

$$22.40 \text{ (liter vatten / kg } H^2) \cdot 60 \text{ (kg } H^2 \text{ / ton stål)} = 1344 \text{ (liter vatten / ton stål)} \quad (3.4)$$

Med en stålindustri som 2021 producerade 1951 miljoner ton stål rör det sig om stora volymer vatten. (World Steel, n.d.) Det ställer krav på en god tillgång på färskvatten i de regioner där vätgasen ska produceras.

Alternativt kan saltvatten avsaltas med exempelvis omvänd osmos i de länder som har tillgång till salt eller bräckt vatten men inte sötvatten i tillräckligt hög grad. Att avsalta vatten är dock en energikrävande process som ställer krav på ännu högre produktion av förnybar energi. Denna kostnaden kommer i slutändan tillskrivas det gröna stålet och göra produkten dyrare. Att avsalta en kubikmeter vatten genom omvänd osmos konsumerar mellan 2.5 och 4.0 kWh per kubikmeter renat vatten. Energiåtgången beror på halten salt och förgreningar i vattnet och hur effektiv tekniken som används är (U.S department of energy, 2019). Energiåtgången för att avsalta vatten är därmed relativt låg i relation till den totala energikonsumtionen för produktion av grönt stål. Den totala energiåtgången för att producera ett ton grönt stål är runt 15,6 GJ energi vilket motsvarar ungefär 4300 kWh (Lauri, 2021). Att avsalta vatten för ett ton stål konsumerar ungefär 3 kWh el vilket är lite i sammanhanget.

3.3.2 Förnybar elproduktion

För att producera grön vätgas genom elektrolys krävs stora mängder förnybar el. Vätgasen kan transporteras men det finns ekonomiska fördelar med att ha vätgasproduktionen i nära anslutning till stålproduktionen. Olika platser på jorden är olika lämpade för förnybar elproduktion. Av den anledningen kan det finnas fördelar med att producera stål på platser där tillgången av fossilfri energi är god. Efterfrågan på förnybar el kommer troligen att öka i framtiden och en god potential att bygga ut elproduktionen är därför viktigt. Som en indikator för detta har produktionskapaciteten från solceller ökat från 39 Gigawatt 2010 till runt 760 Gigawatt tio år senare (REN 21, 2021a). Konkurrensen om den förnybara elen kan dock bli stor om inte utbyggnaden sker i den takt som marknaden kräver. 2019 var endast 16.1 procent av den energi som används inom industrin och jordbruket förnyelsebar. Då omställningen sträcker sig över hela samhället innebär det att många branscher kommer vara spekulanter för mer förnyelsebar energi (REN 21, 2021b). Stålindustrin kan själva få en 11-13 faldig ökning av sitt el-behov för att uppnå netto nollutsläpp. Det i sig kräver en årlig investering på runt 6 miljarder USD (Energy Transitions Commission, 2021). Då priset på grön vätgas är ytterst beroende av elpriset så är kostnaden för elproduktionen en viktig aspekt i en investeringskalkyl för nya anläggningar (Energy Transitions Commission, 2021). På dessa grunder så utgör billig förnybar elproduktion en av de viktigaste aspekterna för att driva på

hållbarhetsomställningen. En hastig elektrifiering, med förnyelsebar energi, av samhället är central för att kunna fasa ut fossila bränslen. En sådan omställning är tekniskt möjlig men kommer innebära utmaningar och krav på stora investeringar. För hela samhället att övergå till förnyelsebar elproduktion kommer dessutom kräva stora investeringar i energilagring. Något som vätgas kan bidra till och som kommer att leda till en mer stabil kostnad för energi. (Bogdanov et al., 2021)

Potentialen för utbyggnad av sol och vindkraft beror huvudsakligen på, dels hur landskapet och markanvändningen ser ut i området och dels på energin i vinden och från solen på platsen. Länder och områden med mycket skog har exempelvis svårare att placera ut både vind och solkraft, utan att göra större ingrepp på naturen, gentemot länder med mycket öppna ytor som exempelvis USA, Australien och Saudiarabien. I en markanalys utförd av International Renewable Energy Agency (IRENA) så exkluderades all skog, våtmark och skyddade områden från den tillgängliga markytan när vind och solkraftsetableringsmöjligheter studerades. För solceller exkluderades även odlingsmark då den obrukbara arealen blir så stor för solcellsparkar. I figur 3.4 är de marktyper som är aktuella för förnyelsebar elproduktion på land markerade som ifyllda staplar medans de markslag som förhindrar etablering har markerats med rutnät.

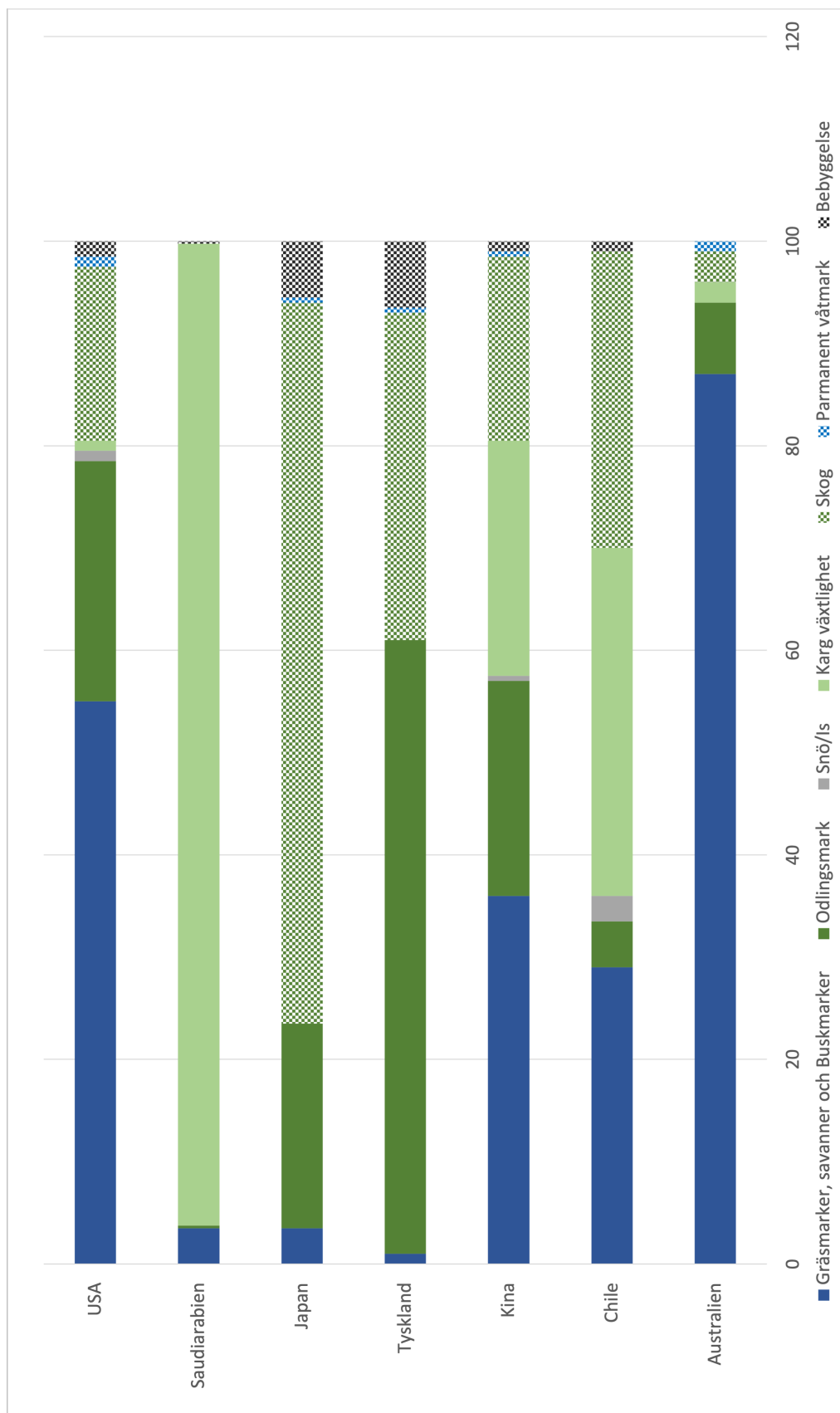


Figure 3.4: Marktyper i utvalda länder. Baserat på siffror från IRENA (2022b)

Figuren gör det tydligt att olika länder har avsevärt olika förutsättningar när det kommer till tillgängliga markarealer. Till det adderades även lutningen på terängen. Lutningen kan också vara en begränsande faktor vid etablering och IRENA har satt den maximalt tillåtna lutningen för vindkraft till 20% och 5% för solceller. Detta innebär att bergstäta regioner och nationer kan ha svårare att placera ut både vidnturbiner och solpaneler. (IRENA, 2022b)

Staplarna i figur 3.5 illustrerar hur många procent av landets areal som är kompatibel med landbaserad vindkraft. I diagrammet inkluderas utöver de marktperer som möjliggör för vindkraft även lutningen. Det innebär att landområden där lutningen är över 20% inte räknas med i diagrammet (IRENA, 2022b).

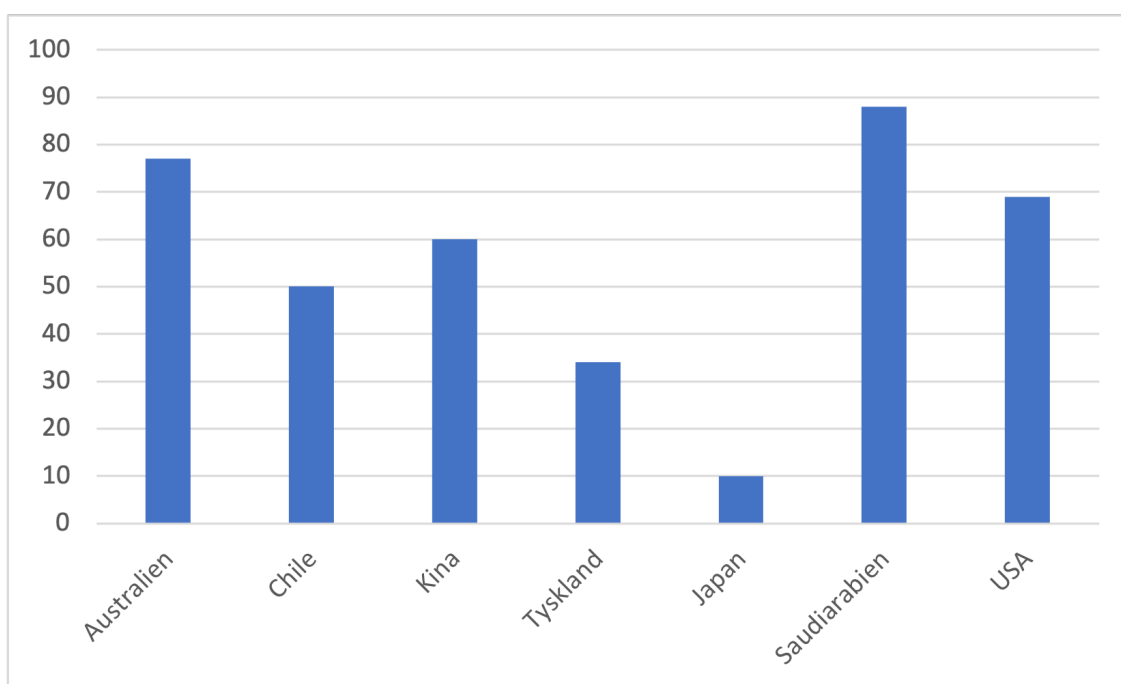


Figure 3.5: Procent av landytan som är kompatibel med landbaserad vindkraft. Baserat på siffror från IRENA (2022b)

Vindpotential

Vindkraft genererade år 2021 1870 TWh elektricitet. Det är en ökning med 273 TWh från året innan vilket motsvarar en ökad produktion på 17 procent. 2021 års ökning av elproduktion från vinden var rekordsnabb och indikerar de gynnsamma förutsättningar som vindkraft har i dagsläget. Det kan också utläsas från att vindkraft var det förnyelsebara energislag som ökade sin generationsvolym mest 2021 sett i procent. (IEA, 2022d) Både snabbt sjunkande produktionskostnader kombinerat med ökade ambitioner på att fasa ut fossila energibärare gör vindkraft till en attraktiv investering. (IRENA, n.d.) Trots att vindkraftsproduktionen ökar snabbt så är utvecklingen blygsam gentemot de nivåer som krävs för att nå nollutsläpp till 2050.

2020 ökade kapaciteten för vindkraftsproduktion med 113 GW vilket är den största ökningen hittills. Men tillväxttakten uppnår inte ens hälften av de nivåer som krävs för att ligga i

fas med 2050 målet. För netto-noll scenariot behövs en årlig vind-kraftsökning på 250 GW (IEA, 2022d). En ökning av denna magnitud kräver ett påskyndat vinkraftsetablerande globalt. Tillväxttakten är idag ojämnt fördelad mellan länder där Kina står för en mycket stor andel av den ökade kapaciteten. Av den totala ökningen i kapacitet 2020 stod Kina för nästan 51 procent. Av Kinas ökning härstammar en betydande andel från havsbaserad vindkraft. Kina stod för 80 procent av den ökade globala kapaciteten från havsbaserad vindkraft. Kina tillsammans med Storbritannien, Vietnam, Danmark och Nederländerna stod för hela 99,5 procent av tillskottet i produktionskapacitet från havsbaserad vindkraft (Global Wind Energy Council, 2022). Fler länder lär framöver utnyttja de möjligheter som havsbaserad vindkraft erbjuder. Detta då det ger en möjlighet för fossilfri elproduktion i kustnationer som är tätbefolkade och som endast har mindre landytor tillgängliga. Havsbaserad vindkraft behöver växa kraftigt för att nå netto noll till 2050. Till 2050 förutspår IRENA att 1000 GW havsbaserad vindkraft ska finnas tillgänglig för att möta framtidens behov av förnybar elektricitet. 1000 GW hade då motsvarat runt 17 procent av den totala förutspådda vindkrafts-kapaciteten. (IRENA, 2019)

Solpotential

Det senaste decenniet har det skett en explosionsartad utveckling av den globala produktionskapaciteten från solkraft. Denna utveckling är huvudsakligen ett resultat av en kraftig utbyggnad av solkraft i Kina. 2010 låg den globala kapaciteten på omkring 40 GW. Den siffran var 2021 ca 842 GW och innebär mer än 21-faldig ökning av produktionskapaciteten (IRENA, 2022c). Av den globala energiproduktionen från solkraft står Kina för över 250 GW och är därmed det land med överlägset störst produktionskapacitet (IRENA, 2022a). Den kraftiga utbyggnaden är till stor del ett resultat av sjunkande priser på solkraft och de ökande investeringarna i vinkraftsindustrin försätter att sänka priserna. I Kina har priserna per producerad kWh solel sjunkit med 77 procent mellan åren 2010 och 2018 (World Economic Forum, 2020). Men trots att solel redan idag är den billigaste elproduktionsmetoden i stora delar av världen så möter inte utbyggnaden de nivåer som krävs för att uppnå netto-nollutsläpp till 2050. För att nå dit krävs en trefaldig ökning av utbyggnadstakten. Det motsvarar en genomsnittlig årlig ökning på 25 procent fram till 2030. Stora ytterliga investeringar krävs för att uppnå denna takten. En viktigt förutsättning för solkraftens framgång är utbyggnad av elnätet i utvecklingsländer som har god potential till solkraft (IEA, 2022a). I Kina, USA, EU och Indien har det under 2021 och 2022 gjorts policyändringar som främjar en ökad elproduktion från solceller vilket lär generera en tilltagande utbyggnad i dessa regioner. Policymål och ambitioner om sänkta utsläpp är idag viktiga för att driva utbyggnaden av förnybara energikällor (IEA, 2022b).

Andelen utökad produktion från solceller i storskaliga parker minskade i andel under 2021 till att utgöra 52 procent. Detta beror delvis på att det på många platser börjar bli svårare att hitta ytor för att anlägga solparker. Det har medfört att uppförandet av solceller på bostadshus samt industrilokaler har ökat sin andel till 28 respektive 19 procent av den totala kapacitetsökningen (IEA, 2022b).

3.3.3 Kostnad för grönt stål

De olika utgifter som utgör kostnaden för tillverkning av grönt stål är viktiga att studera för att avgöra vilka specifika parametrar som är centrala vid placering av ny produktion. Den totala kostnaden av ståltillverkningen kan öka med runt 20% med produktionsmetoder som medför lägre utsläpp. Då kostnaden för järnmalmen inte skiljer avsevärt mellan olika produktionsmetoder är det andra kostnadsposter som ligger bakom de högre utgifterna för grön stålproduktion. (Material Economics, 2019)

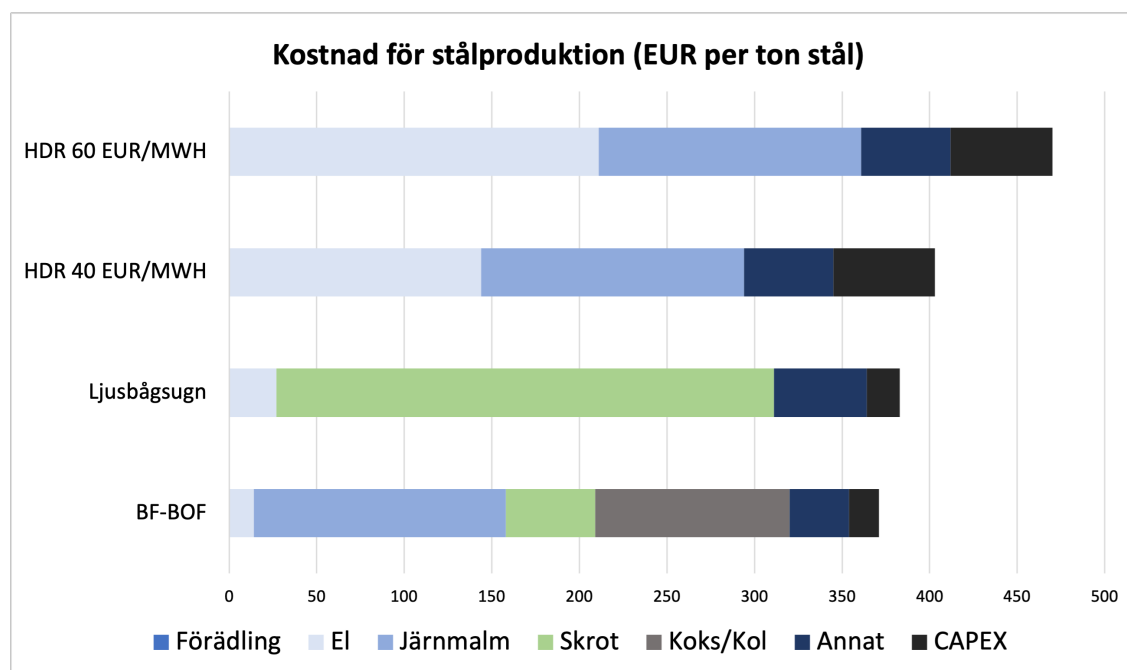


Figure 3.6: Kostnadsfördelning vid stålproduktion. Baserad på siffror från Material Economics (2019)

CAPEX utgifterna är högre vid fossilfri stålproduktion vilket är ofrånkomligt då investeringar måste göras i nya fabriker. För konventionell ståltillverkning via masugn och syrgasprocess finns redan infrastrukturen på plats och en lägre andel av kostnaden går därför till att finansiera fabriken. Utgifterna från elkonsumtion är där den betydande kostnadsskillnaden mellan BF-BOF och fossilfri produktion finns. I dagsläget så är den el som används för vätgasproduktion och ljusbågsugnen dyrare än kostnaden för kol till masugnen. Resultatet blir en kostnadskalkyl där grönt stål medför en högre prislapp.

Det blir i figur 3.6 tydligt att det är kostnaden för elektricitet som har störst inflytande på priset för grönt stål. Vikten av billig förnybar energi är därför betydande när lokaliseringen av nya projekt med grön stål ska planeras. (Material Economics, 2019) Den specifika energiåtgången för att producera ett ton flytande stål genom direktreducering med vätgas är ca 3.48 MWh i basfallet. En något lägre energikonsumtion än för att tillverka stålet via en masugn där energiåtgången är runt 3.68 MWh (Vogl, Åhman, and Lars J Nilsson, 2018). I masugnen tillförs det mesta av energin via kol och koks till skillnad från tillverkning med vätgas då all energitillförsel är via el. Med den ovan nämnda energiåtgången hamnar kostnaden på grönt stål inom spannet 361-640 EUR per ton stål beroende på elkostnaderna. För att en jämn-

vikt ska uppnås måste priset på elen vara nere på 40 EUR per megawattimme samtidigt som kostnaden för CO₂ utsläpp ökar till mellan 34 och 68 EUR per ton CO₂. (Vogl, Åhman, and Lars J Nilsson, 2018)

Under 2022 har priset på utsläppsrätter inom EU oscillerat kring 85 EUR per ton CO₂e. (EMBER, 2022) Ett pris på koldioxid som kan medföra att grönt stål blir konkurrenskraftigt med traditionellt stål ur ett kostnadsperspektiv med förutsättningen att elpriset är relativt lågt. Priset på elektricitet från solceller var 2021 i genomsnitt 48 USD/MWh globalt. (IRENA, 2021) Det motsvarar ca 44.5 EUR/MWh i dagens växelkurs (1 USD = 0.92 EUR 2023-01-16). Det innebär att om den sjunkande globala trend för priset på solenergi fortsätter så kan vi inom kort se grönt stål som ligger på prisnivåer som är snarlika med de hos konventionellt stål.

Kostnaden för arbetskraft har historiskt varit en viktig faktor i den totala kostnaden för stålproduktion. Den har motiverat stora förflyttningar mellan länder till regioner med låga arbetskortander (D'Costa, 1999). För dagens stålpris spelar kostnaden för arbetskraften dock en mindre betydande roll. Kostnader och intäkter för råvara, energi och kreditgenerering är mer betydande för den slutliga kostnaden. Även om EU har de näst högsta kostnaderna för arbetskraft med ett genomsnitt på 39 EUR/t stål så är skillnaderna små jämfört med råvarukostnaderna. Länder med billigare arbetskraft som Indien, Brasilien och Ukraina har arbetskraftskostnader på mellan 24 EUR/t och 29 EUR/t vilket innebär att en besparing på kring 10 EUR/t tillverkat stål kan göras genom att belägga industrin där (Medarac, Moya, and Somers, 2020). Den besparingen är dock begränsad gentemot kostnaderna för råmaterial som utgör 65 procent av den totala kostnaden för ståltillverkning inom EU. Råmaterialet kostar i genomsnitt 300 EUR/t inom Europa. Detta är den fjärde högsta kostnaden globalt men det är stora skillnader mellan medlemsländerna. Som lägst kostar råvaran 248 EUR/t vilket är konkurrenskraftigt med de flesta länderna utom Indien som har en råvarukostnad på 221 EUR/t.

Det blir här tydligt att kostnaden för arbetskraft är försvinnande liten i jämförelse. En viktigare parameter som gör att produktionskostnaderna generellt är höga i Europa är de övriga kostnaderna som innehåller exempelvis kostanden för CO₂ certifikat. Dessa utgifter ligger på runt 116 EUR/t och är en av de högre i världen. Totalt så tillhör Europa en av de regioner där stålproduktionen är som dyrast (Medarac, Moya, and Somers, 2020). En faktor som förmildrar kostnadsbilden för europeisk stålproduktion är att unionens ståltillverkare är duktiga att generera mervärde från processen. Detta rör sig exempelvis om energi, masugns gas och värme som kan säljas vidare. De är dessutom bra att generera värde från återvunna stålprodukter. På ett genomsnitt så sänks kostnaderna med hjälp av dessa intäkter med runt 83 EUR/t vilket vida överskrider exempelvis de högre arbetskraftskostnader som produktion belägen i Europa har (Medarac, Moya, and Somers, 2020). Ovan nämnda kostnader är för produktionen av varmvalsade stålrullar tillverkade i ett integrerat stålverk, men många av de kostnaderna kan vara talande även för andra produktionslag.

4. Resultat

4.1 Databas

Modellen som används för att bedöma lämpligheten för investeringar i grön stålproduktion har skapats i QGIS. Modellen innehåller 10 lager med information relevant för investeringsbeslut. En bild på modellen där ett urval av lagren är synliga kan ses i figur 4.1

- Det första lagret innehåller alla de idag aktiva stålverken. Detta för att skapa en bild av vart det idag finns infrastruktur och tradition kring att producera stål. Baserat på siffror från Global Energy Monitor (2022)
- Tillgången på järnmalm är även inkluderad hos de nationer med de största kända reservoarerna. Baserat på siffror från U.S. Geological Survey (2023a).
- Utöver tillgången på järnmalm finns det även siffror över järninnehållet i malmen hos de länderna med mycket järnmalm. Detta eftersom renhetsgraden hos järnmalmen kan vara intressant för investeringbeslut. Särskilt för tillverkning av grönt stål. Baserat på siffror från U.S. Geological Survey (2023a).
- De största importörerna av skrot är representerade i ett lager. Siffrorna säger inget om den inhemska tillgången av stålskrot men visar importen och säger därmed något om landets stålindustri och tillgång till ljusbågsugnar. Baserat på siffror från World Steel (2022).
- De största exportörerna av skrot är även de representerade och av samma anledning. Baserat på siffror från United States Geological Survey (2021).
- Mängden järnmalm som utvinns är också inkluderat för att visa vilka platser som idag har en utvecklad gruvdrift och förmåga att utvinna järnmalm. Datan är från 2021 och hämtad från U.S. Geological Survey (2023b).
- Ett lager med energipotentialen från solen har lagts in för att påvisa lämpligheten för förnybar elproduktion. Baserat på siffror från Global Solar Atlas (2019). Energipotentialen är viktig då elpriset är en betydande kostnadspost för grön stålproduktion (Material Economics, 2019). Siffrorna är presenterade i kilowattimme per kilowatt-peak per dag och representerar hur mycket en solpanel med en effekt på en kilowatt producerar under ett dygn.

- För att få en mer heltäckande bild av förutsättningarna för förnybar elproduktion inkluderas även ett lager med vindkraftstäthet som är ett mått på den energi som finns i vinden. I denna kartan visas kraften över en kvadratmeter på 100 meters höjd och datan är hämtad från Global Wind Atlas (n.d.). En kombination av både vind och solpotential är nödvändig för att kunna analysera förutsättningarna över hela världen.
- Tillgången på färskvatten är även det inkluderat då det är en viktig aspekt vid tillverkningen av vätgas genom elektrolys. Då grön vätgas utgör en stor del av produktionen av fossilfritt stål så är det viktigt att identifiera platser där elektrolysen kan genomföras kostnadseffektivt. Datan visar på relationen mellan vattenkonsumtion och tillgängligt grundvatten och dess påfyllandstakt. Datan kommer från World Resources Institute (2019).
- Kostnaden för att producera förnybar elektricitet 2021 inkluderas också för att kunna beräkna komparativa fördelar i dagsläget. Lagret är baserat på data från Coste.

4.2 Komparativa fördelar

Nedan är resultatet från beräkningarna av olika nationers komparativa fördelar inom fossilfri stålproduktion. Beräkningarna resulterar i ett ungefärligt pris för produktionen av grönt stål i respektive land utifrån de förutsättningar som råder där idag. Priserna är avrundade till närmsta heltal. En stor del av informationen bakom beräkningarna är hämtade från databasen. Vilka siffror som finns i databasen är angivet under delkapitel 2.1.1 i metoddelen. I kapitel 2 återfinns även de ekvationer som har används för beräkningarna som har genomförts vid skapandet av tabellen. Ekvation 2.5 användes för att få fram den totala kostnaden.

Kostnad för fossilfri stålproduktion i EUR/ton (2021)			
Land	Råmaterial (θ)	Kostnad för energi (FEK_{EUR})	Total kostnad (K_{EUR})
Australien (Sol)	177	134	409
Kina (Vind)	188	89	375
Brasilien (Vind)	177	75	350
Kanada (Vind)	188	94	380
Danmark (Vind)	188	127	413
Frankrike (Vind)	188	138	424
Storbritannien (Vind)	188	134	420
Sverige (Vind)	177	115	390
Tyskland (Vind)	188	163	449
USA (Vind)	177	94	369
Indien (Vind)	177	95	370
Japan (Sol)	188	274	560
Italien (Vind)	188	130	415
Sydkorea (Sol)	188	177	463
Spanien (Vind)	188	80	366
Turkiet (Vind)	188	142	428
Vietnam (Sol)	188	145	431

Beräkningarna i tabellen visar vad produktion av grönt stål hade kunnat kosta i respektive land med de lägsta priserna för förnybar elproduktion 2021. Tabellen visar därmed en lägesbild av kostanden för fossilfri stålproduktion och tar inte hänsyn till den långsiktiga fysiska potentialen för lägre produktionskostnader. Från beräkningarna blir det tydligt att kostnaden för att producera ett ton råstål kan variera mycket mellan olika länder. De komparativa fördelarna visar sig nu utifrån dagens priser på förnybar energiproduktion. Det blir utifrån siffrorna tydligt att stora stålproducenter som Japan, Sydkorea och Tyskland kan uppleva svårigheter att producera fossilfritt stål till ett konkurrenskraftigt pris.

För att få en bild av hur tillverkningskostnaderna kan se ut bortom 2021 så görs en analys av databasen. Från datalagren går det att identifiera områden med liknande eller bättre förutsättningar än de nationer som idag har låga produktionskostnader för förnybar energi. Vid liknade fysikaliska förutsättningar borde åtminstone samma pris gå att uppnå i framtiden. Genom en analys av databasen går det även att uppskatta priser i områden som idag inte har data på produktionskostnaden för förnybar energi. Detta innefattar stora delar av Afrika och Mellanöstern.

4.2.1 Uppskattning av framtida produktionskostnaden för grönt stål utifrån fysiska förutsättningar

Det land som hade de lägsta produktionskostanderna för förnybar energi 2021 var Brasilien. Detta uppnådde de med en kostnad på 0,0237 USD/kWh från landbaserad vindkraft. Med en utgångspunkt ifrån det priset på vindkraft och de fysiska förutsättningarna som råder i Brasilien kan en framtida global kostnadsuppskattning göras. I detta underkapitel görs därför en kostnadsuppskattning i ett antal länder av intresse utefter hur deras fysiska förutsättningar för förnyelsebar elproduktion förhåller sig till Brasiliens.

Vid inspektion av databasen framkommer det att Brasilien har relativt låg kraftdensitet i vinden på 100 meters höjd jämfört med andra länder. Medelkraften i vinden på hundra meters höjd på de 10% av Brasiliens landyta där det blåser mest är 326 W/m^2 . Om en jämförelse dras till Spanien som hade den näst lägsta energikostanden för att producera ett ton stål så låg kraften i vinden utifrån samma parametrar på 717 W/m^2 Global Wind Atlas (n.d.). Denna skillnad i kraft på runt 110% borgar för att Spanien skulle kunna uppnå en betydligt lägre produktionskostnad.

Längst hela ekvatorn är vindhastigheterna låga men strax norr om ekvatorn på den Afrikanska kontinenten är kraften i vinden hög. Här finns inga tydliga siffror på vad vindkraft kostar i dagsläget men utifrån de fysiska förutsättningarna kan de bli låga. Bäst förutsättningar i Afrika för landbaserad vindkraft identifieras på kontinentens nordvästra kust. Det är huvudsakligen länderna Mauretanien, Västsahara och Marocko som har de mest gynnsamma förutsättningar med en kraftdensitet på runt 750 W/m^2 på 100 meters höjd (Global Wind Atlas, n.d.). Med endast de fysiska förutsättningarna i åtanke så kan dessa länder troligen producera el från vindkraft med kostnader under 0.02 USD/kWh.

Från databasen ser vi även att den riktigt höga kraftdensiteten uppnås nära nord och sydpolen. Chile och Nya Zeeland har på sina 10% mest vindtäta områden en kraftdensitet på 3358 W/m^2 samt 2407 W/m^2 . Det innebär att Chile har strax över 10 gånger mer energi i luftmassan än över Brasilien och därmed skulle en turbin i Chile kunna producera mycket mer elektricitet än en likvärdig i Brasilien. Grönland och Norge har även de mycket goda vindförhållanden med en genomsnittlig kraftdensitet i vinden på 2238 samt 1408 W/m^2 på sin 10% mest vindtäta landyta (Global Wind Atlas, n.d.). Utifrån denna information blir det tydligt att 75 EUR/ton råstål i energikostnader är ett övre estimat av vad många nationer kommer kunna producera fossilfritt elektricitet för i framtiden.

Efter att ha fått en bild av vilka platser på jorden som skulle kunna uppå mycket låga elproduktionskostnader så görs en beräkningar utifrån olika länders förutsättningar för att närmare avgöra hur stora besparingar som kan göras genom att placera turbinerna på andra platser. För att beräkna kraften som en specifik turbin kan generera så används ekvationen nedan. För alla beräkningar används samma luftdensitet (ρ) på 1.225 kg/m^3 . En turbin med en radie på 50 meter används också i alla beräkningar vilket kan anses standard för ett modernt landbaserat vindkraftverk (US Department of energy, n.d.). Kapacitetsfaktorn (C_p) sätts till

42 procent vilket är ett genomsnitt av moderna vindkraftsinstallationer i USA (USGS, n.d.)

$$P = 0.5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (4.1)$$

Kraftproduktion vid olika vindhastighet		
Land	Genomsnittlig vindhastighet (m/s)	Kraftproduktion (W)
Brasilien	7.02	99,6 kW
Spanien	7.73	120,7 kW
Japan	7,78	122,3 kW
Australien	8.01	129,6 kW
Iran	8.41	142,9 kW
Marocko	8,84	157,9 kW
Kina	8,93	161,1 kW
Mauretanien	9,54	183,9 kW
Norge	9,75	192,1 kW
Nya Zeeland	11,39	262,1 kW

Utifrån beräkningarna blir det tydligt att många länder skulle ha potential att uppnå betydligt lägre kostnader för vindkraft än Brasilien har. Kraften som genereras i ett likvärdigt vindkraftverk på Nya Zeeland genererar 2,63 gånger mer elektricitet än om det stod i Brasilien. Denna skillnad kommer endast att bli större i framtiden med större vindturbiner som har högre kapacitetsfaktorer. Viktigt att tillägga är att dessa beräkningar görs utan landyt begränsningar i åtanke.

Det var betydligt färre länder som hade uppnått sina lägsta produktionskostnader för förnybar energi genom solkraft än för vindkraft 2021. Denna trend kan dock brytas då kostnaden för solkraft sjunker kraftigt (IRENA, 2021). 2021 var det Australien som hade lägst produktionskostnad från solkraft. Utifrån databasen är det tydligt att Australien har mycket goda förutsättningar för att producera elektricitet från solen. På nästan 22% av Australiens landyta går det att producera över 5.20 kilowatt per kilowattpeak. I en stor del av de länder som angränsande till ekvatorn går det att uppnå lika höga eller högre elproduktion från solceller. Några av de högsta solinstrålningarna är det i länder strax söder om ekvatorn. Namibia har exempelvis endast 17% av sin landyta där solinstrålningen är under 5.20 kWh/kWp. Några länder på den sydafrikanska kontinenten har även de mycket hög solinstrålning. Det är huvudsakligen Chile som sticker ut i detta perspektiv med över 28% av sin landyta där kraftproduktionen överstiger 6.00 kWh/kWp (Global Solar Atlas, 2019). Det innebär att det teoretiskt skulle vara runt 15% billigare att producera el från solen på de 20 procent av Chiles landyta som är mest solintensiv gentemot de 20 mest solintensiva procenten i Australien.

5. Analys

5.1 Möjlig förflyttning av framtida stålproduktion.

När tekniken för grön stålproduktion gör intåg på den globala stålmarknaden så kommer troligen en förflyttning ske av vilka nationer som producerar mycket stål. Om denna förflyttning blir lika stor som efter tidigare tekniskifften återstår att se. Två kontinenter som idag producerar mycket stål är Europa och Asien. Många av de stålverk som ligger i Europa och Asien befinner sig på platser och i länder som kommer att ha svårigheter att producera stora mängder fossilfri el till låga elkostnader. Något som är avgörande för konkurrenskraften.

5.1.1 Kostnadsutveckling

De kostnader för att producera grönt stål som har beräknats i denna rapport sträcker sig mellan 350 och 560 EUR/ton vilket går att se i sektion 4.2. Det är ett brett spann som tyder på de kraftigt skilda förutsättningarna som olika nationer kommer ha för att producera grönt stål framöver. Dessa uppskattade kostnader stämmer överens med andra kostnadsuppskattningar på grönt stål som exempelvis den utförd av Material Economics (2019). Men faktum är att inom detta spann, som baseras på kostnaderna för av förnybar energi 2021, så finns det redan ett flertal länder som har möjlighet att uppnå kostnader som är i linje med produktionskostnaderna för konventionellt stål eller till och med lägre. Bortom 2030 kommer andelen länder som kan producera grönt stål till en lägre kostnad än konventionellt stål öka. Den utjämnade kostnaden för att producera el från solceller minskade med 85% mellan åren 2010 och 2020 och trenden håller i sig. Under ungefär samma 10 års period (2009-2019) minskade kostnaden för elproduktion från kolkraft endast med två procent. En minskning från 0.111 till 0.109 USD/kWh. Detta går att jämföra med dagens genomsnittliga kostnad för elproduktion från solceller på 0.04 USD/kWh (LAZARD, 2021). Med fortsatt teknikutveckling men även teknikspridning så kommer fler länder som har fördelaktiga fysiska förutsättningar att kunna producera stål till låga kostnader vilket beskrivs ytterligare i stycke 3.1.5.

Då grön stålproduktion redan idag kan vara ekonomiskt försvarbart på flera platser så kommer denna kostnadsutveckling på förnyelsebar energi endast att ytterligare stärka affären för direktreducerat järn från grön vätgas. Vad som behöver tas i åtanke vid denna analys är att intäkterna från försäljning av metalurgiskt kol kommer att försvinna med denna utveckling. Länder som har en tillgång till både stål och kol är eventuellt inte lika angelägna att skapa

rätt förutsättningar för stålproducenter att övergå till en grön stålproduktion. Även om den gröna stålproduktionen totalt sett skulle innebära lägre kostnader per ton stål.

I denna prisjämförelse har ekonomiska styrmedel så som kostnader för koldioxidutsläpp inte inkluderats. Dessa konstituerar inte komparativa fördelar mellan länder men är ändå viktiga att nämna. Flera nationer har redan någon form av system för att bestraffa utsläpp av växthusgaser. För att klara de mål som fastslagits i Parisavtalet, och som en klar majoritet av världens länder har ratificerat, så kommer troligen fler och kraftigare styrmedel av denna sorten att behövas. En högre kostnad på utsläpp av växthusgaser kommer gynna utvecklingen och implementationen av fossilfria teknologier. Även länder som inte har de optimala fysiska förutsättningarna för att producera grönt stål kan med rätt styrmedel uppnå en kostnadsbild där grön stålproduktion är billigare än konventionell stålproduktion.

5.1.2 Dagens största producenter av primärt stål

Idag är stora delar av världens stålproduktion lokaliserad inom EU och i Asien. Av denna anledning är dessa regioner av stort intresse vid en analys av framtida stålproduktion. I nästa del kommer en mer ingående analys göras av specifika länders förutsättningar att producera fossilfritt stål.

Europeiska Unionen

EU har några olika vägar att välja när det kommer till bemötandet av det teknikskifte som stålindustrin står inför. Beronde på vilken strategi som väljs så kommer omfördelningen av Europas ståltillverkning se olika ut.

- Om Europa väljer att satsa på att behålla den fullkomliga produktionskedjan för stål, från järnmalm till färdigt stål, inom sina gränser så är det naturliga valet att omlokalisera mycket av järnreduceringen till Norden. I Norden finns den största tillgången till järnmalm i Europa och även unionens lägsta elpris för konsumenter som inte är hushåll (Eurostat, 2022a). Utöver det har de nordiska länderna en av de mest förnybara energimixarna (Eurostat, 2022b). Detta är en lägesbild och kan komma att ändras till 2030. Länder som exempelvis Spanien börjar göra allt större investeringar i förnybar elproduktion och har goda förutsättningar för både vind och sol.
- Om valet istället faller på att det är mer ekonomiskt försvarbart att flytta delar av stålproduktionen utanför Europa så är norra Afrika och mellanöstern troliga kandidater. Där finns billig solenergi som kan resultera i att det görs besparingar på att omlokalisera produktionen dit. Om produktionen flyttas till norra Afrika så kommer transportvägarna till Europa vara korta och stål eller järnsvamp kan då importeras. Det rimligaste steget i detta scenariot är att flytta reduktionen av järnmalm utanför Europas gränser då det är detta steg i processen som är mest energikrävande. Färdigställningen av stålprodukten kan sedan göras inom EU då denna process inte kräver lika mycket energi.

Trots att EU har en tydlig gemensam plan för hur utsläppen från industrin ska minskas så går det inte att förbise nationella intressen. Traditionellt stålproducerade nationer som

exempelvis Tyskland och Italien kan ha invändningar från att flytta stålproduktionen från centraleuropa. I dagsläget har EU tullar som ska motverka att Europeiska företag lägger sin energiintensiva produktion utanför EU-ETS och sedan importerar produkterna (European Commission, 2021). Beroende på hur hög procentsats en klimat-tull kommer ha i framtiden så kan lönsamheten att behålla produktionen i Europa vara högre än att omlokalisera.

Asien

Västra Asien är den region i världen som producerar överlägset mest stål. Av denna anledning är det vägval asiatiska länder tar framöver centralt även för framtiden för den globala stålproduktionen. Markanden för fossilfritt stål kommer troligen att påverkas kraftigt av de beslut Kina, Japan och Sydkorea tar. Tillsammans producerar de en bra bit över hälften av världens stål och deras omställning till fossilfri stålproduktion kommer vara viktigt för utbudet av gröna stålprodukter på marknaden. Något som kan påverka EU i hög grad och lönsamheten för dess gröna stålproduktion.

Australien är en region som har en underutnyttjad potential för stålproduktion och så även för produktion av grönt stål. Både reduktionen av järnmalm och själva ståltilverknigen har potential att göras till relativt låga kostnader inom landet. Möjligheten att producera förnybar el till ett lågt pris är god och det finns en stor tillgång till järnmalm. Tillgången till järnmalm och solinstrålningen går att se i figur 5.1. Mycket av den produktion som idag sker i västra Asien hade därför med fördel kunnat omlokaliseras till Australien ur ett förutsättningsperspektiv.

Om det kommer vara lönsamt för Australien att investera i nya produktionsanläggningar beror på ett antal faktorer. Kina ger i dagsläget stora subventioner till sin inhemska stålproduktion som gör att utländska producenter har svårt att konkurrera till samma pris (European Commission, 2022). Om Kina bibehåller denna strategin kan det bidra till att stålproduktion stannar i landet även om elpriserna är relativt höga i Kina och förutsättningen för fossilfri elproduktion inte är lika god som exempelvis i Australien. Kina kan dock tänkas lämna någon del av produktionskedjan för utlandsproduktion. Det troligaste alternativet är i så fall att järnmalsreduktionen sker utomlands då den kräver mycket förnybar energi.

Under senaste decenniet har Kina investerat mycket pengar i Afrika och det finns därför möjlighet att landet väljer att öppna ny stålproduktion där. Kina är den snabbast växande utländska investeraren i Afrika och landet äger mycket infrastruktur så som hamnar på kontinenten. Kinas tillgång till infrastruktur i Afrika gör att det finns möjlighet för de att bedriva ståltilverkning på kontinenten och sedan transportera det från sina hamnar. (Sun, 2017)

Japan och Sydkorea utvecklade sin stålindustri under en period av kraftig ekonomisk tillväxt och industrialisering. Detta skedde efter andra världskriget och framförallt efter Korea-kriget i Sydkorea. Situationen i Japan och Sydkorea idag är inte densamma som den var då och förutsättningarna för att producera fossilfritt stål i dessa länder är inte alls lika goda som på andra platser. Japan är det land av de stora stålproducenterna som har högst priser på både solkraft och vindkraft. Något som kan utgöra en kraftig nackdel vid produktion av grön vätgas (IRENA, 2021). Relativt dåliga förutsättningar för både vindkraft och solinstrålning kombinerat med en begränsad tillgänglig landyta resulterar i höga kostnader per kWh.

Hur ländernas regeringar och de nationella stora stålföretagen agerar kommer ha stor betydelse för vart investeringar i grönt stål görs. Japan och Sydkorea har i förhållande till Kina en bättre relation till västvärlden vilket kan innebära att infrastrukturprojekt i Australien är troligare att komma från Japanskt eller Sydkoreanskt håll. Både Japan och Sydkorea har idag mycket höga priser på förnyelsebar elproduktion i ett globalt perspektiv. Om inte stora kostnanssänkningar uppnås inom det området så kommer det vara svårt att uppnå en konkurrenskraftig vätgasproduktion i dessa länder. Ett alternativ för Japans och Sydkoreas framtida stålproduktion skulle kunna vara att importera grön vätgas från länder som Australien men behålla stålproduktionen inom sina gränser. Både Japan och Sydkorea har en väletablerad infrastruktur i sina hamnar för gas-import genom LNG som har används i industrier och för elproduktion. Denna infrastruktur hade kunnat användas även för import av vätgas (Hannah Ritchie and Max Roser and Pablo Rosado, 2022).

5.1.3 Länder och regioner med goda komparativa fördelar

Olika platser på jorden är olika lämpliga för grön stålproduktion. Det finns många parametrar som är aktuella vid övervägning av gynnsamma etableringsplatser. Tillgången till eller möjligheten att producera förnybar el till ett lågt pris är en av dessa parametrar och har stor betydelse för stålets pris. Av denna andledning kommer en stor vikt läggas på den förnybara elproduktionen. Priset på grönt stål kan vara avgörande för dess genomslag. Särskilt eftersom efterfrågan på ett fossilfritt stål inte är tydligt etablerat. (Vogl, Åhman, and Lars J. Nilsson, 2021) Med en oklar efterfrågan och krav på stora investeringar i infrastruktur kan investerare tveka. Därför är det viktigt att ha en bild av vilka aspekter som är mest avgörande för kostanden att producera stålet och därefter identifiera hur det går att hålla nere kostnaden. För de regioner som vill behålla sin stålproduktion men inte har optimala förutsättningar för att producera grönt stål till ett lågt pris så krävs det att statliga subventioner eller att styrmedel införs.

Nedan är länder som har identifierats som intressanta för investeringar i grön stålproduktion. Identifieringen utgår huvudsakligen ifrån beräkningen av de komparativa fördelarna. Dessa siffror baseras på dagens kostnader för förnyelsebar elproduktion. Därefter görs en analys av respektive land utifrån databasen. Denna analys inkluderar en uppskattning av vad grön stålproduktion kan kosta i respektive land i framtiden baserat på dess fysiska förutsättningar.

Australien

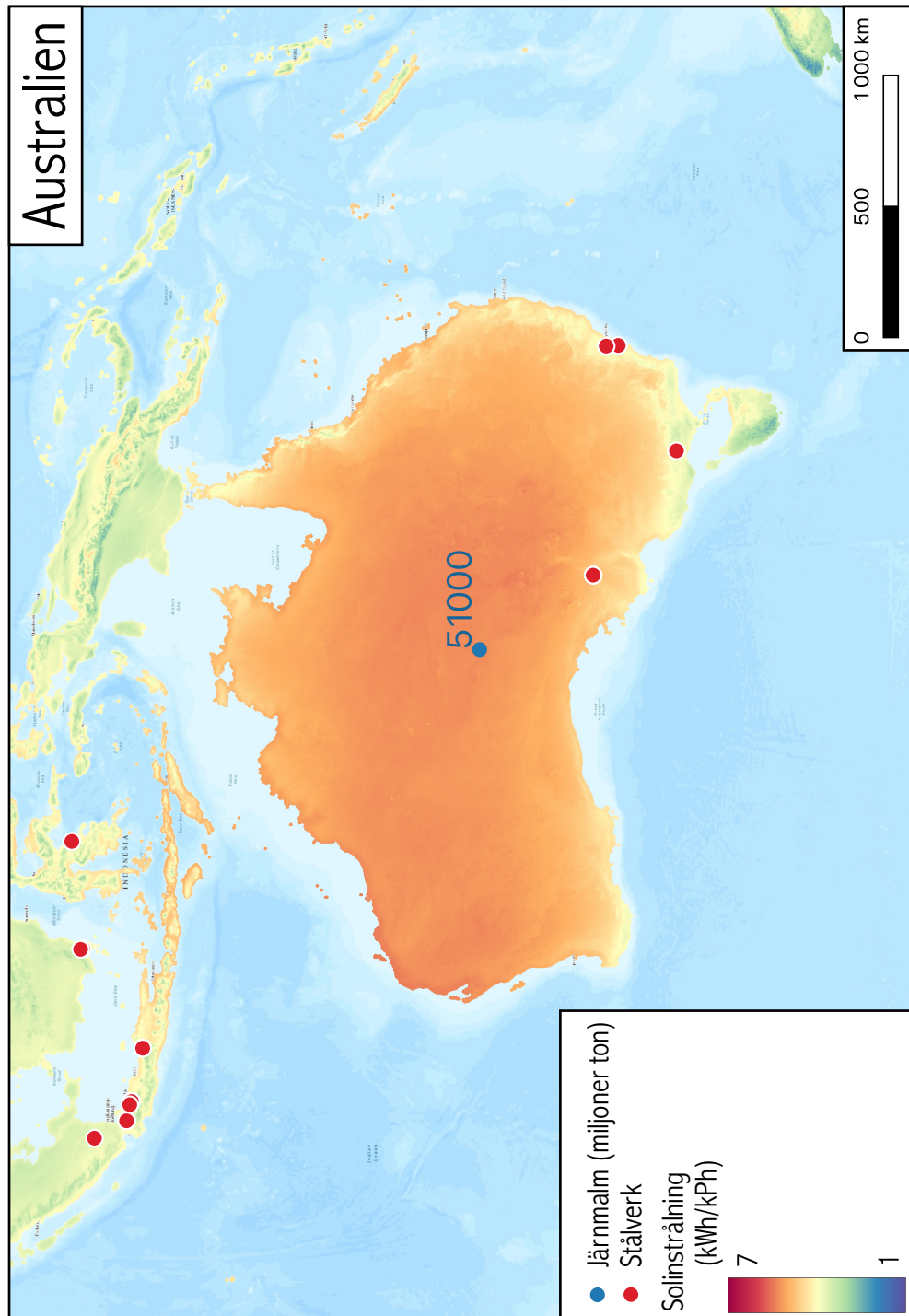


Figure 5.1: Solpotential över Australien. Den tillgängliga mängden järnmalm i Australien är också inkluderat. Utdrag ur databasen.

Ifrån beräkningarna från komparativa fördelar identifieras Australien som ett land med goda förutsättningar för grön stålproduktion. När detta relativt låga pris på 409 EUR/ ton stål kombineras med de ytterligare faktorer som identifieras i databasen så visar sig Australien ha mycket goda möjligheter att bli världsledande inom fossilfri-ståltillverknin. Först och främst finns det god tillgång till järnmalm (51000 miljoner ton) vilket går att se i figur 5.1. Databasen visar även att Australien årligen utvinner ca 900 miljoner ton järnmalm vilket gör de till den största producenten i världen. Tillgång på råvarorna för produktionen minskar transportbehovet och det gynnar Australiens ekonomi att själva förädla råvaran istället för att exportera malmen som har ett lägre värde (Venkataraman et al., 2022). Förvisso har detta redan varit fallet för Australien då de även har haft goda förutsättningar för BF-BOF produktion. Australien exporterar 39% av världens järnmalm och 19% av världens metallurgiska kol. Samtidigt producerar Australien endast 0,3% av världens stål (Venkataraman et al., 2022).

Utöver tillgång till järnmalm så har Australien mycket goda förutsättningar för produktion av förnybar energi. Både goda förutsättningar för elproduktion från solkraft men även goda förutsättningar för vindkraft till havs. Vindförhållandena är framförallt goda söder om Melbourne kring Tasmanien. Det finns heller ingen brist på landyta för etablering av elproduktion. Det finns mycket tillgänglig mark för att etablera solcellsparker, vindturbiner och infrastruktur för grön ståltillverkning. Som illustreras i bild 3.4 så är ca 95% av Australiens landyta kompatibel med förnybar elproduktion. Majoriteten av landytan utgörs av gräsmarker, savanner och buskmark. Vindkraft kan placeras på ca 75% av landytan enligt figur 3.5. De bästa vindförutsättningarna i Australien är vid den sydöstra kusten och havsbaserad vindkraft kan då också vara aktuellt. Majoriteten av de kustnära områdena i Australien har ingen vattenbrist vilket möjliggör för storskalig vätgasproduktion.

Norden

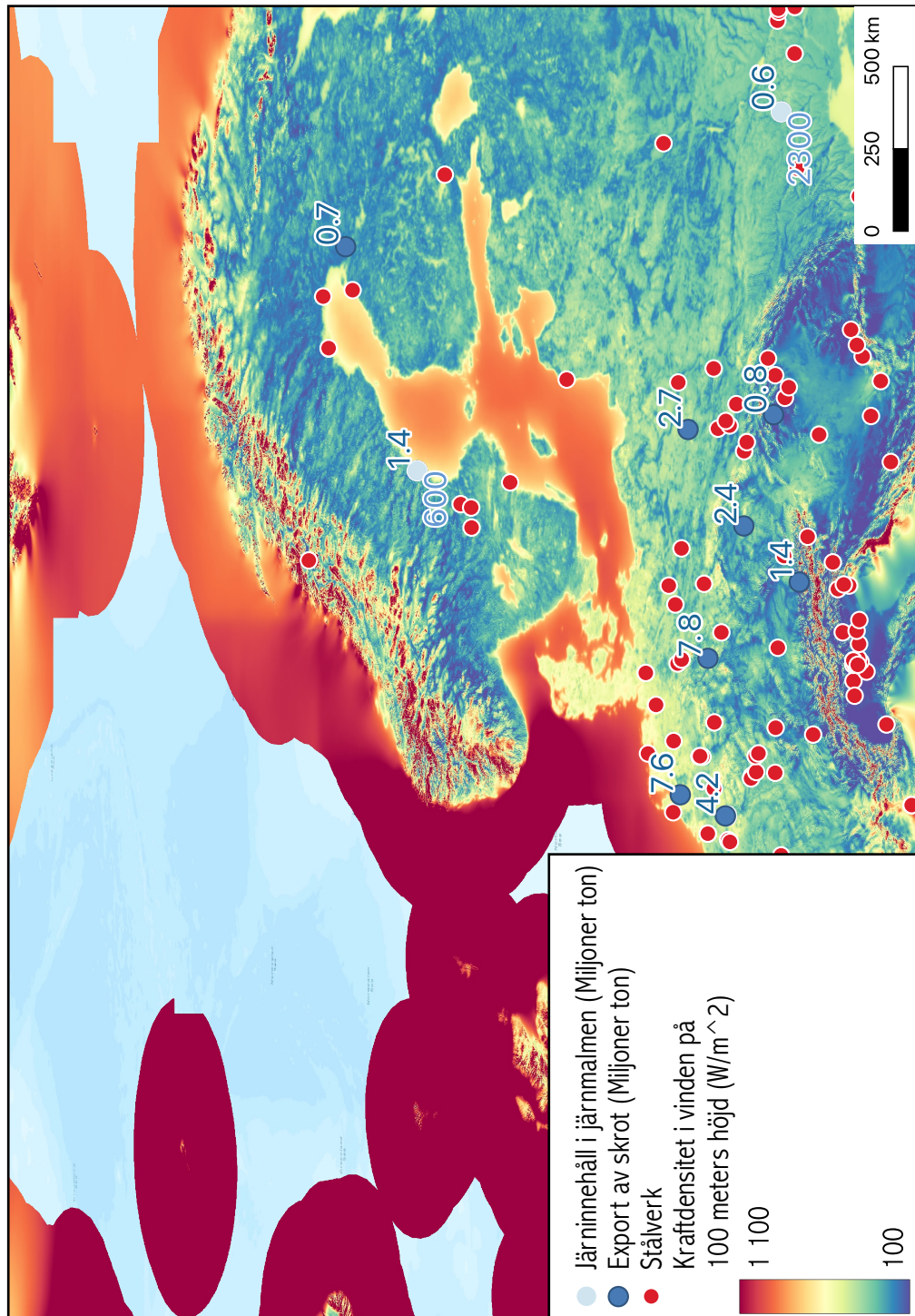


Figure 5.2: Vindpotential över norra Europa. Kartan visar energin i vinden som passerar genom en kvadratmeter hundra meter över marken [W/m^3]. Utdrag ur databasen

Likt Australien har stora delar av Norden goda förutsättningar för en fossilfri elproduktion. I Norden är förutsättningarna speciellt bra för vindkraft men även från vattenkraft vilket dock inte inkluderas i databasen eller vid beräkningen av de komparativa fördelarna. Vattenkraften utgör en stor del av Sveriges och Norges energiförsörjning och agerar som en viktig balanskraft i ett intermittert och förnyelsebart elsystem (Energimyndigheten, 2014). Längst kusterna är vindförhållanden mycket goda och förutsättningarna för att producera vätgas från förnybar energi är därmed fördelaktiga.

Utöver gynnsamma förhållanden för elproduktion så har Sverige stor tillgång till järnmalm och en väletablerad industri för att utvinna denna. Sammantaget finns det flera aspekter som talar för att Sverige skulle kunna producera grönt stål till ett konkurrenskraftigt pris. Att de svenska företagen HYBRIT och H2 Green Steel båda är föregångare inom omställningen till fossilfri stålproduktion är även det gynnsamt för Sveriges position. Det innebär att viktig kompetens har knutits till Sverige och marknadsandelar kan tas innan andra länder har hunnit accelerera sin produktion. Sverige är dessutom ett stort land till ytan i förhållande till sin population och därmed finns det tillgängliga platser för ny stålindustri och kraftproduktion. Att börja med en storskalig produktion av vätgas kan dessutom vara till gagn för Sverige i arbetet mot ökad energisäkerhet och bidra till effektivare frekvensreglering. Detta eftersom att produktionen av vätgas är gynnsam i ett variabelt elsystem då det är möjligt att producera vätgasen när det blåser mycket och elen är billig. På samma sätt kan produktionen av vätgas pausas under perioder med elbrist och höga elpriser och istället använda vätgasen som finns lagrad. Detta hjälper till att stödja det nordiska energisystemet så att elbehovet blir mer jämnt. Det är även fördelaktigt för stålproducenten ur ett kostnadsperspektiv då vätgasen kan tillverkas under perioder med låga elpris och sedan lagras (Vogl, Åhman, and Lars J Nilsson, 2018). Ett vätgaslager som är insprängt i berget har redan byggts i Luleå under HYBRIT-projektet och fler ska tillkomma. För att kunna lagra vätgasen i stora chakt i berggrunden krävs det att bergarten håller god kvalitet. Det är extra utmanande då vätgasen är den minsta molekylen som finns och i lagret trycksätts den till runt 250 bar. Det sätter stora krav på att förslutningen är helt tät och kan motstå mycket höga tryck. I Sverige finns det förutsättningar för att bygga vätgaslager på flera platser vilket är en fördel gentemot länder med en mer porös berggrund (HYBRIT, 2022).

En viktig komponent som talar för nordens förmåga att producera grönt stål är den höga graden fossilfri elproduktion som finns redan idag. Detta kommer underlätta för stål och vätgasproducenter att få tillgång till el med låga utsläpp som är en bra förutsättning för att ta investeringsbeslut de kommande 5-10 åren kring grönt stålproduktion. I Sverige så låg andelen elproduktion som genererats från fossila källor på under en procent 2021 (IEA, 2022c). Globalt så låg andelen elproduktion från fossila källor på 61.3 procent år 2021 (IEA, 2023) och därför krävs det att stora investeringar genomförs i många av världens länder för att kunna leverera fossilfri el. Enligt beräkningarna av de komparativa fördelarna så kostar det 390 EUR att producera fossilfritt stål i Sverige 2021. Det är 19 EUR mindre än vad det kostade i Australien vid samma tidpunkt. Och i Skandinavien är det Norge som har de bästa förutsättningarna för vindkraft enligt databasen och borde kunna uppnå ännu lägre priser. Många av de områden där Norge har goda vindförhållanden är dock i bergiga eller avlägsna områden och kan ha begränsad lämplighet för vindkraftsetablering. Som slutsats kan Norden ses som ett intresseområde för grön stålproduktion då mycket av investeringarna och

teknikutvecklingen har inletts här. Norden kommer dock ha svårt att uppnå de riktigt låga priserna på förnybar energi som vissa andra länder kan uppnå i framtiden.

Nordafrika

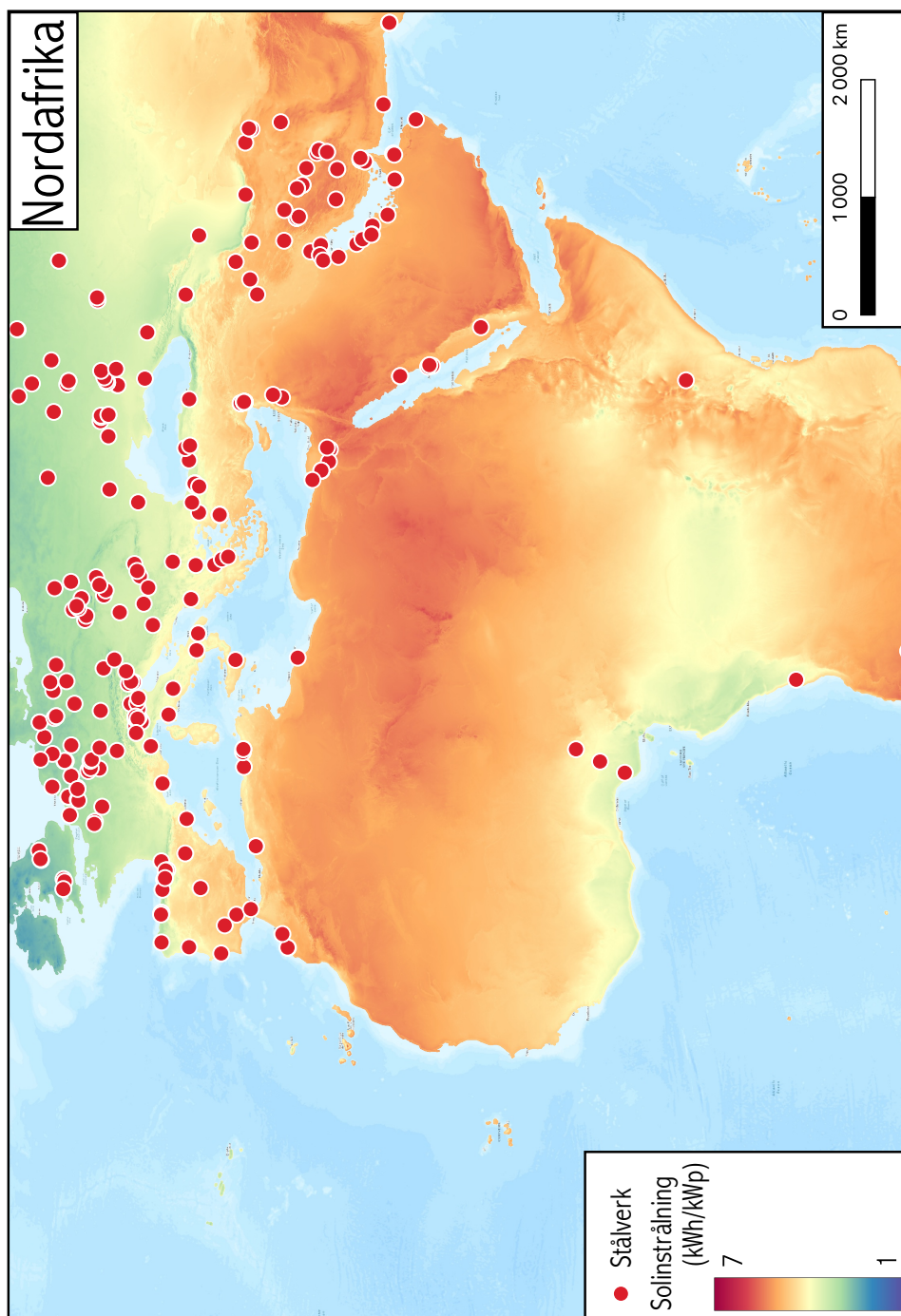


Figure 5.3: Solpotentialen över norra Afrika och mellanöstern. Bilden är ett utdrag ur databasen.

Flera länder i norra Afrika har pekats ut av World Economic Forum som de nationer som kan vinna mest på elproduktion från förnybar energi (World Economic Forum, 2018). Det är den mycket starka solinstrålningen i kombination med en brist på vatten som gör länderna extra lämpliga för solkraft. Varför solceller är lämpliga för länder med vattenbrist förklaras genom att den produktionsmetoden inte kräver någon vattenkylning vilket andra produktionsmetoder som exempelvis kärnkraft kräver.

Bristen på vatten kan dock medföra problem vid produktionen av vätgas. För att producera vätgasen klyvs vatten genom elektrolys. Färskvatten är därmed en grundsten för vätgasproduktion och kan utgöra ett hinder för delar av Nordafrika och mellanöstern trots de mycket goda förutsättningarna för att producera billig fossilfri el. Avsaltning av havssalt är en lösning för att öka tillgången på färskvatten men det i sig kräver också mycket energi och kommer öka kostnaden för stålet. Om vattenbehovet tillgodoses genom exempelvis Nilen eller annan vattenkälla kan förutsättningarna för fossilfri stålproduktion vara goda. Som nämns under sektionen för vätgasproduktion så är den energi som krävs för avsaltning inte så stor i förhållande till den totala energiåtgången för stålproduktionen. Om landet ligger vid kusten så är därmed avsaltning av havsvatten ett alternativ som inte innebär någon större konkurensnackdel gentemot länder med mycket färskvatten.

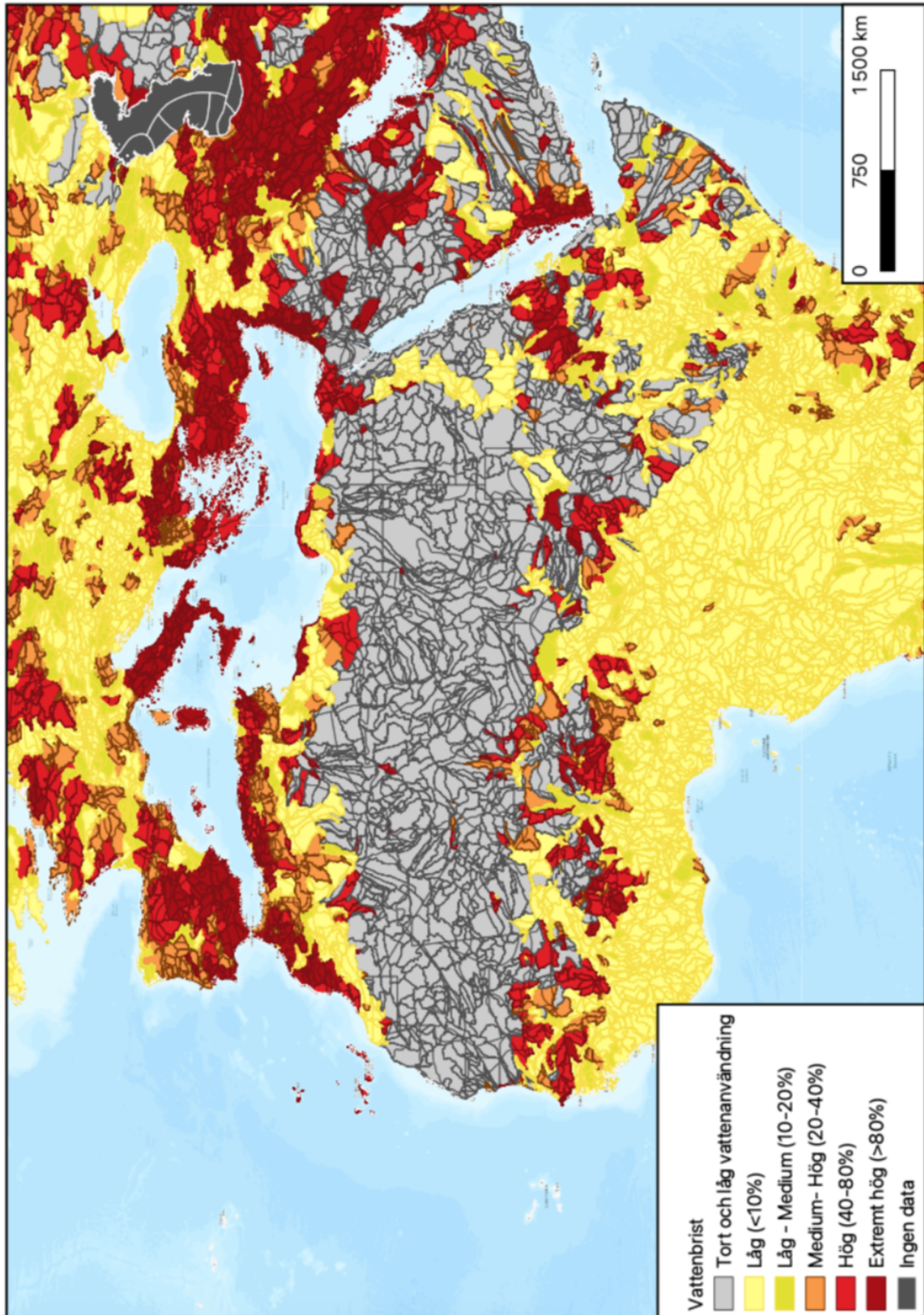


Figure 5.4: Karta över tillgången till vatten kring medelhavet. Bilden är ett utdrag ur databasen.

Som tydligt illustreras på kartan i figur 5.4 så har ett antal områden på den afrikanska sidan av medelhavet relativt god tillgång till vatten. Om det tillåts av andra faktorer, som exempelvis

terräng som lämpar sig för etablering, så kan det visa sig mycket fördelaktigt att genomföra elektrolys och tillverkning av grönt stål i regionen. Det är dock viktigt att notera att kartan visar om det finns brist på vatten med dagens vattenkonsumtion. Om industri implementeras med stor vattenåtgång så kan regionen snabbt nå en mer kritisk vattenbrist. Regionens vattenreserver bör därmed studeras ytterligare innan ett beslut tas.

Vattendrag som Nilen är dessutom en källa till konflikt i regionen då flera länder är beronde av dess vattentillförsel. Exploatering av Nilens vatten kan därför vara geopolitiskt känsligt då det kan orsaka problem med vattenbrist i länder nedströms (United Nations, 2020).

Stålproduktionskapaciteten i norra Afrika utgörs nästan uteslutande av ljusbågsugnar i dagsläget. Lejonparten av dessa är byggda inom de senaste 50 åren. Det kan implicera att det finns en kunskap om och en investeringsvilja i ljusbågsugnar som kan vara gynnsamt även för grön stålproduktion. Totalt så producerade dock Afrika endast runt 3 procent av världens stål 2019 och är därför i behov av stora investeringar för att kunna producera större volymer (Bataille and Eng, 2021). Det går tydligt att se i figur 5.3 att det är relativt få platser på den Afrikanska kontinenten som har befintlig stålproduktion. Detta medför en brist på kompetens inom ståltilverknin g vilket kan innebära ett kortsiktigt problem. På längre sikt kan dock kompetens inhämtas och en konkurrenskraftig stålindustri etableras i regionen.

Mauretanien

Mauretanien sticker ut som ett av de länder i norra Afrika som har speciellt goda förutsättningar att producera fossilfritt stål. Landet är majoritetsägare i Afrikas näst största stålproducent SNIM som är verksamma i Mauretanien (Burak Odabasi, 2022). Järnmalm är Mauretaniens största exportvara och det uppskattas finnas runt 1.1 Gt järnmalm kvar i marken (Taylor et al., 2016).

Utöver järnmalmen finns en stor potential att producera billig förnybar energi i landet. Både förutsättningarna för vind och sol är goda och tillsammans kan låga kostnader för grön vätgas uppnås. Utifrån beräkningar av kraften som gick att utvinnas från ett normalstort vindkraftverk i Mauretanien, som visas under resultatdelen, så framkom det att landet har betydligt bättre förutsättningar än Brasilien att generera el från vinden på de tio mest vindtäta procenten av sin landyta. För det normalstora vindkraftverket skulle 85 procent mer energi utvinnas i Mauretanien än i Brasilien. Eftersom Brasilien hade den lägsta kostnaden för el-generation från vindkraft 2021 på 0.0218 EUR/kWh så hade Mauretanien kunnat uppnå priser på $\frac{0.0218}{1.85}=0.0118$ EUR/kWh. En kostnad för förnybar el som hade bidragit till att få ner energikostnaderna för att producera ett ton fossilfritt stål till 41 EUR. Detta bortser från alla de andra faktorer som bidrar till att Brasilien uppnått så låga produktionskostnader och fokuserar endast på de fysiska förutsättningarna. Då denna rapport titta på hur grön stålproduktion kan utvecklas bortom 2030 så är det just de fysiska förutsättningarna som är av störst intresse då de består medans andra investeringsaspekter kan variera mycket över tid.

Det största problemet för Mauretanien att implementera en storskalig vätgasproduktion är tillgången till färskvatten. Från figur 5.4 blir det tydligt att majoriteten av Mauretaniens yta saknar tillgång till färskvatten och i de mindre områden där det finns en vattentillgång så är den redan idag kraftigt ansträngd. Detta skulle troligen innebära att Mauretanien får använda sig av avsaltat havsvatten för vätgasproduktionen. Med tillräckligt låga kostnader på

förnybar energi kan den totala stålkostnaden fortfarande bli konkurrenskraftig.

Brasilien

Brasilien hade år 2021 de lägsta energikostnaderna för att producera grönt stål och följaktligen även de lägsta totala kostnaderna för grön stålproduktion. Med en total kostnad på 350 EUR/ton stål har den fossilfria stålproduktionen i Brasilien redan idag möjlighet att uppnå konkurrenskraftiga priser med konventionell stålproduktion. Ifrån figur 3.6 så framkommer det att ett genomsnittligt pris på konventionellt stål ligger på runt 370 EUR/ton stål. Utifrån de siffrorna så finns potentialen för Brasilien att tidigt vinna marknadsandelar med en billig fossilfri stålproduktion.

Från figur 5.5 nedan framkommer det även att tillgången på färskvatten i dagsläget är god på den absoluta majoriteten av Brasiliens landyta. En farhåga för Brasiliens möjlighet att vara en ledande producent av grönt stål i framtiden är möjligheten att sänka kostnaden för sin energiproduktion ytterligare. Det finns ett antal länder som har bättre fysiska förutsättningar att producera förnyelsebar elektricitet för en lägre kostnad. Brasilien kan därför förlora sin position som den billigaste elproducenten och andra platser kanske är bättre lämpade bortom 2030. Detta till trots så kan det stål som Brasilien redan idag producerar göras till en lägre kostnad om det tillverkades via direktreduktion med grön vätgas. Dessa pris-förhållanden lär inte ändras utan snarare förstärkas i framtiden.

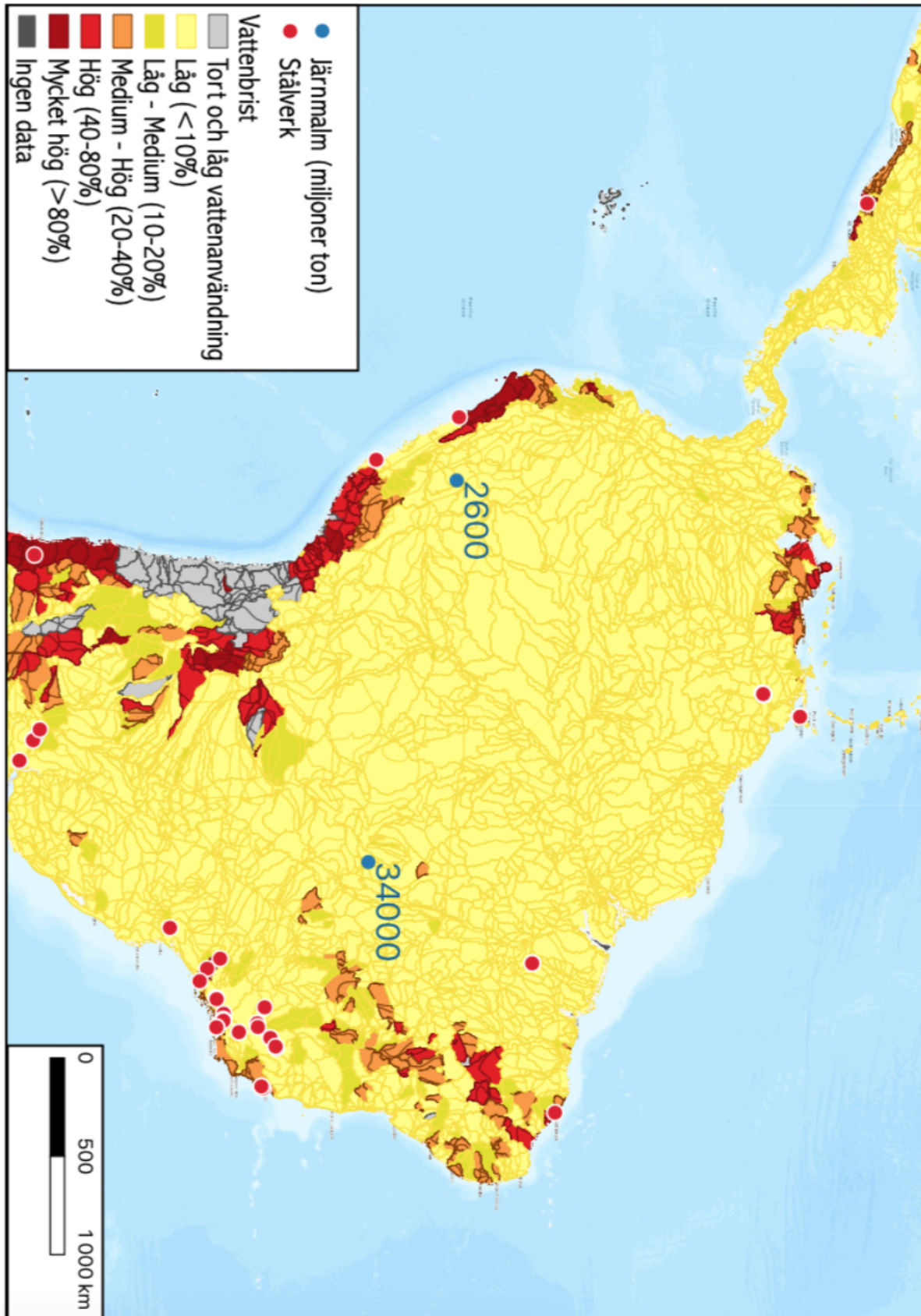


Figure 5.5: Karta över tillgången till vatten i och runt Brasilien. Bilden är ett utdrag ur databasen.

Mellanöstern

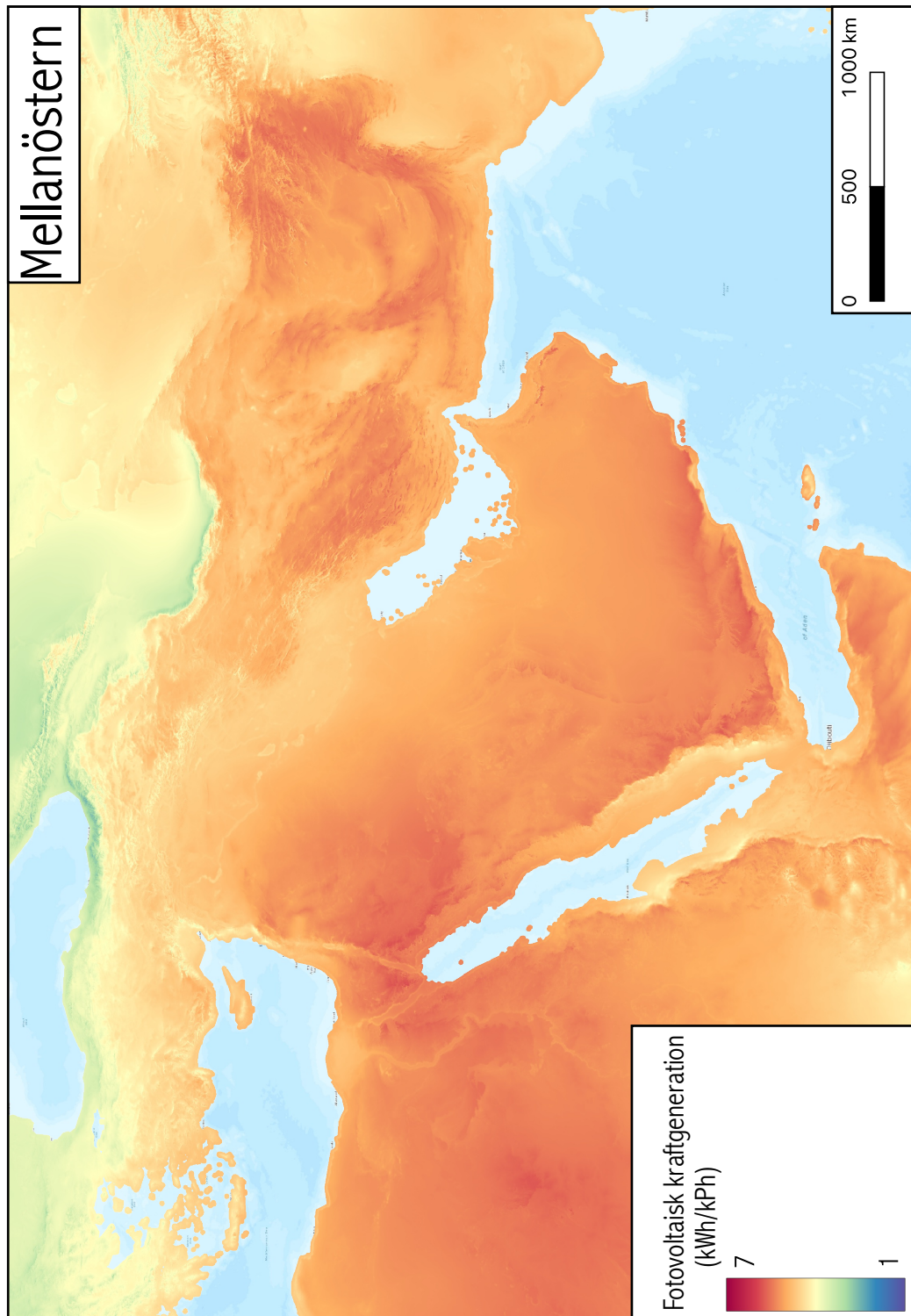


Figure 5.6: Karta på solpotentialen över arabiska halvön. Bilden är ett utdrag ur databasen.

Mellanöstern är ett område som är kraftigt etablerat inom utvinning och export av fossila energikällor. Tillgången till billiga fossila bränslen kan verka som ett ankare för investeringar i ny förnyelsebar infrastruktur. Länder i regionen har dock börjar gardera sig för en framtid där världen rör sig bort från fossila bränslen (EIU, 2023). Förutsättningarna för att göra denna förflyttning är i många mån goda då det finns möjlighet att producera solceller till en låg kostnad. Endast några få procent av landytan på den arabiska halvön har potential för solutvinning på under 4.40 kWh/kWh. Det finns därmed stora områden där mycket hög utvinningsgrad kan uppnås. Vilket kan ses i figurerna 3.4 och 3.5 så har Saudiarabien utöver mycket hög solinstrålning även mycket tillgänglig landyta som lämpar sig för etablering av solceller. Nästintill 90 procent av Saudiarabiens landyta är kompatibel för vindkraftsetablering och siffrorna för solkraft lär vara ännu högre då solceller även kan placeras i urbana områden.

Även angränsande områden till arabiska halvön som Egypten och Iran har mycket goda möjligheter att producera billig solceller. Ett flertal av länderna har solinstrålning i paritet med eller bättre än Australien. Det innebär att en kostnad för solceller, som är i nivå med eller lägre än Australiens kan uppnås. Iran har dessutom tillgång till järnmalm och har därför de fysiska förutsättningarna att uppnå en total kostnad för grönt stål på under 410 EUR/ton likt Australien. Från databasen identifieras att Iran utvann 50 miljoner ton järnmalm 2021. Det är mer än vad exempelvis Sverige och USA gjorde samma år.

Kina

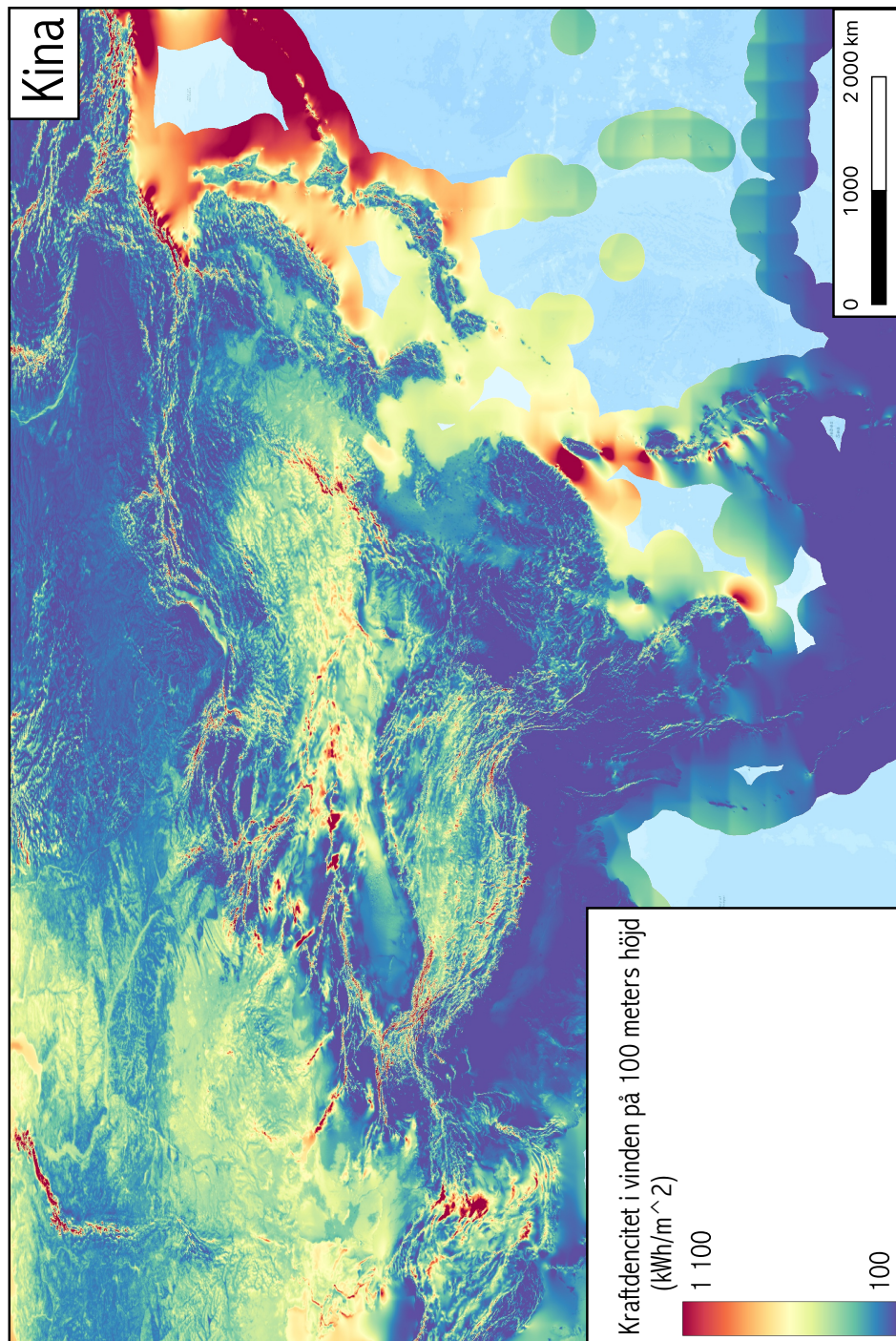


Figure 5.7: Karta på vindkraftsdensiteten 100 meter över Kina.

Kina är idag världens största stålproducent. Det innebär att Kinas agerande inför sin framtida stålproduktion är viktig. Det innebär även att landet har stor tillgång till expertis inom ståltillverkning och arbetskraft för stålindustrin. För att etablera en grön stålproduktion är

vätgasproduktionen väsentlig och här finns valet att själv producera den eller att importera den. Kina har inte lika goda förutsättningar för solkraft som exempelvis, MENA området, Australien och Chile och kan därav troligen inte uppnå konkurrenskraftiga priser på sikt med solet. Förutsättningarna för vindkraft är något bättre i Kina.

Som illustreras i figur 5.7 ovan så har Kina ett antal områden med relativt goda vindhastigheter över land. På de 10 % av Kinas landyta som har den högsta vindkraftsdensiteten på 100 meters höjd så är den genomsnittliga vindhastigheten 1,9 m/s mer än den genomsnittliga vindhastigheten i Brasilien utefter samma parametrar. Brasilien som 2021 hade den lägsta kostnaden för elproduktion från vinden. Det innebär att ett normalstort modernt vindkraftverk har en effekt på drygt 60 kW mer i Kina än Brasilien. I denna ekvation tas dock inte terrängen i beaktning. Från databasen går det att se att stora delar av de vindtätaste områdena i Kina ligger i bergiga områden där vindkraftsetablering inte är möjlig. Det kan därför vara svårt att få en tydlig bild över exakt vad förnybar elproduktion kan kosta i Kina framöver.

Chile

Chile sticker ut i databasen som det land som uppnår både en av de högsta vindkraftsdensiteterna i världen på 100 meters höjd i den södra delen av landet, samtidigt som solinstrålningen i norra Chile är en av de högsta i världen. Av denna anledning finns det goda grunder att förutspå att Chile kommer att uppnå mycket låga kostnader för förnybar elproduktion. På Chiles södra spets genererar ett normalstort landbaserat vindkraftverk drygt 2,5 gånger mer el än om det stod på ett av Brasiliens vindtätaste områden. Eftersom kostnaden för vindkraft härleds från investerings och operativa kostnader genom elproduktionen så borde Chile därmed kunna uppnå elproduktionskostnader på $\frac{0,0218}{2,5}=0,0087$ EUR/kWh. Om produktionskostnader på så låg nivå kan uppnås så kommer det resultera i att grönt stål blir betydligt billigare än konventionellt stål förutsatt att priserna på kol inte sjunker. Chile har dock en stor del av sin landyta som är bergstätt och på mycket hög höjd. Av den anledningen behöver ytterligare analyser göras för att se hur stora områden som finns där vindhastigheter i denna graden kan uppnås och samtidigt ha en terräng som gör det möjligt att placera ut vindkraftverk. Enligt figur 3.5 så är runt hälften av Chiles landyta tillgänglig för vindkraftsetablering. Det utgör förhållandevis stora arealer med tanke på Chiles storlek. Det går dock inte att avgöra om dessa tillgängliga arealer sammanfaller med områden med mycket höga vindhastigheter.

Utöver de goda förutsättningarna för förnybar energiproduktion så angränsar Chile till både Peru och Brasilien som har god tillgång till järnmalm och kan därför troligen leverera råmaterial till Chile för relativt låga kostnader. Chile har även en egen järnmalmsproduktion som utvann 19 miljoner ton 2021.

Farhågan för Chile likt flera andra länder med god solinstrålning är att vattentillgången är begränsad. I figur 5.5 så går det att se att vattentillgången är ansträngd i norra Chile. I södra delarna av landet ser situationen betydligt bättre ut så ett alternativ skulle vara att tillveka vätgasen mer söderut. Om kostnader för elproduktion på runt 0,009 EUR/kWh uppnås så går det att hålla stålproduktionen konkurrenskraftig trots att avsättning av havsvatten krävs. Omvänd osmos som är en vanlig form av avsättning kräver runt 3.5 kWh per m^3 renat vatten (Elsaie et al., 2023). För att producera den vätgas som behövs för att producera ett ton fos-

silfritt stål krävs mellan 0.6 och 1.34 m^3 färskvatten. Det innebär en energiåtgång på mellan $0.6 \cdot 3.5 = 2.1$ kWh och $1.34 \cdot 3.5 = 4,7$ kWh. Om elpriset är 0,0087 EUR/kWh ger det ett prisintervall på mellan 0.018 och 0.041 EUR för energin som krävs för att avsalta tillräckligt mycket vatten för vätgasproduktion till ett ton fossilfritt stål. Det går då tydligt att notera att detta inte är några kostnader som kommer ha någon större inverkan på Chiles konkurrenskraft för att tillverka billigt fossilfritt stål. Avsaltning av vatten medför även andra kostnader utöver de för energin men de anses försumbara ur detta perspektiv.

6. Diskussion

6.1 EUs framtida stålpolicy

Nu när stålindustrin återigen går mot ett stort teknikskifte är det centralt för EU att överväga sitt framtida ställningstagande. EUs beslut kring investeringar i grönt stål är av särskilt intresse då de är ledande i omställningen. Att vara en föregångare i teknikskiftet kan vara viktigt aspekt i att behålla eller utöka sin stålproduktion. Det kan dock även finnas fördelar i att flytta produktionen till mer geografiskt lämpade platser och istället handla med grönt stål eller direktreducerat järn.

Europeiska unionen har som mål att sänka sina utsläpp från stålindustrin med 80-95 procent till 2050 jämfört med 1990 års nivå. När de europeiska stålverken redan idag går på näst intill optimal effektivitet blir det en svår ekvation att lösa utan att tillföra nya tekniker. (EU Joint Research Centre, 2022) Teknikerna som finns till handa är då antingen att fortsätta med dagens produktionsmetoder men att använda CCS för att få ner utsläppen till atmosfären från stålverken. Alternativet är att använda grön vätgas för att producera fossilfritt stål. Det är den andra metoden som EU har som ambition att fokusera på i första hand då det medför att stålet blir fossilfritt från grunden (EU Joint Research Centre, 2022). EUs ambitioner i REPowerEU är att 30 procent av EUs ståltillverkning ska vara fossilfritt producerad med vätgas redan 2030. Det finns alltså redan tydliga planer inom EU att fasa ut kolet ur sin inhemska stålproduktion. Om EUs mål går att uppnå med stålproduktion innanför sina egna gränser utan att prisen på produkten blir allt för högt återstår att se och kommer att hänga på flera aspekter (EU Joint Research Centre, 2022).

Det finns dock stora incitament för EU att behålla sin stålproduktion. Den europeiska stålproduktionen sysselsätter 330 000 personer och genererar indirekt 2,5 miljoner arbetstillfällen. Stålindustrin är med andra ord viktig för den europeiska ekonomin och kan vara svår att ersätta. För länder som Tyskland som producerade 26 procent av EUs stål 2020 så blir denna effekten som kraftigast. (EU Joint Research Centre, 2022) För att Tyskland ska klara av att flytta sin stålproduktion till mer gynnsamma länder inom unionen kommer det troligen krävas olika typer av styrmedel och subventioner från EU. Alternativt att priset på utsläppsrätter blir så högt att produktion i Tyskland inte längre är lönsam. Om antalet utsläppsrätter inte revideras kommer det dock vara troligare att priset på utsläppsrätter går nedåt när stora utsäppsminskningar görs inom stålindustrin. Det kommer leda till ett tillfälligt överskott

på utsläppsrätter som kan förlänga den period då det kan vara lönsamt för Tyska företag att producera traditionellt stål inom tyskland.

En ytterligare risk för EU att vara först ute med att omvandla sin stålindustri är att den som tar täten i omvandlingen kan få finansiera dyrköpta misstag. (Vogl, Åhman, and Lars J. Nilsson, 2021) När tekniken har mognat brukar priset som en konsekvens att sjunka. Det kan gynna länder som följer EUs initiativ men ligger något efter. Det kan därför vara gynnsamt för EU att dela på kostnaderna av forskning och utveckling med det internationella samfundet eller andra internationella ståltilverkare.

Fördelarna med investera för att göra Europas industrier fossilfria är möjligheten att komma ifrån utomeuropeiska beroende. Detta hade ökat den inre försörjningssäkerheten och även ökat Europas möjlighet att utföra påtryckningar. Detta har blivit ytterst tydligt under 2022 när Ryssland invaderade Ukraina. EUs beroende av Rysk fossil energi utgjorde ett hinder från att snabbt avbryta alla betalningar till Ryssland och försvårade följeaktingen EUs möjligheter att förhindra rysslands finansiering av sitt krig. Då Europa importerar både kol och naturgas från Ryssland så påverkar detta även den Europeiska stålindustrin. Med stålproduktion från förnybar vätgas har Europa däremot möjlighet att bli fullkomligt självförsörjande. Just den förnybara vätgasen är en central pelare i EUs arbete att frigöra sig från beroende av importerad naturgas. Grön vätgas kan användas i flera industrier men inte minst inom stålindustrin. Investeringar i produktion av förnybar vätgas kan därför vara en viktig väg framåt för EU. Inte bara för att fasa ut fossil energi från stålindustrin men även andra svårkonverterade industrier.

De svårigheter EU möter i sina ambitioner att uppnå en fossilfri industri är att höja priserna på utsläppsrätterna utan att industrier börjar lämna unionen. För att skapa förutsättningarna för fossilfri stålproduktion att konkurrera på jämna villkor med konventionell stålproduktion krävs i dagsläget en kostnad på CO₂ som överstiger 50 EUR/ton vilket nämns i sektion 3.3.3. Det är en kostnad som femfaldigt överstiger kostnadsskillnaden för arbetskraft mellan EU och utvecklingsländer med billig arbetskraft. För att öka EUs möjligheter att behålla stålindustrin inom sina gränser, trots höga priser på utsläppsrätter, kan en implementation av en gränsjusteringsmekanism för koldioxid vara viktig. Detta för att upprätthålla konkurrensförutsättningar gentemot de länder som släpper ut mer stål i sin stålproduktion. För större genomslag kan en klimatklubb för andra regioner eller nationer med liknande klimatambitioner vara till nytta. Då handlas produkter fritt inom klubben men ett pris motsvarande kostnaden för CO₂ utsläppen tas ut för allt som importeras över klimatklubbens gränser. (Jakob et al., 2022) EU anser att en gränsjusteringsmekanism för koldioxid är en nödvändighet för att uppnå sina mål med att sänka sina utsläpp med 55% mellan 1990 och 2030. En av de stora svårigheterna i att införa en sådan mekanism är att inte samtidigt bryta mot WTOs riktlinjer. När EU inför sin version av en gränsjusteringsmekanism så uppstår möjligheten att sänka antalet gratis utsläppsrätter som nu allokeras ut på EU ETS. De gratis utsläppsrätterna har varit ett verktyg som har implementerats för att undvika kolläckor. När gränsjusteringen är på plats så kommer denna mekanism istället förhindra risken för läckor och därav kommer kostnaden för företag att släppa ut koldioxid att stiga. Detta kommer medföra ett effektivare styrmedel och ge större incitament för företag att uppnå stora utsläppsminskningar. Idag importerar EU en betydande andel av sin reducerade järnmalm för vidare processering inom

unionen. När ett CO₂ pris tillkommer vid importen så kan europeiskt reducerat järn plötsligt bli mer konkurrenskraftigt. Det kan generera ett uppsving för Europeisk järnreduktion vilket då med fördel kan göras med grön vätgas. Då kommer hela värdekedjan befinna sig inom EU vilket kommer generera ett högre värde inom Unionen.

EU avser att använda grön vätgas för att fasa ut kol ur flera svårkonverterade industrier och uppnå sina mål om klimatneutralitet. Detta kommer facilitera för investeringar i grön vätgasproduktion inom unionen. Samtidigt innebär det att stålindustrin kommer behöva konkurrera med flera andra industrier om det tillgängliga vätgasen. En följd av detta kommer vara en mycket hög elförbrukning och följeaktigen höga elpris. Av denna anledningen kan det vara en viktig del av EUs framtidsagenda att även importera vätgas från områden med billig förnybar energi. Detta kan exempelvis vara norra Afrika och Mellanöstern.

En viktig uppgift för EU är att lyckas skapa gynnsamma förutsättningar för industrier att kunna investera i nya tekniker som ersätter deras redan existerande stålverk. Masugnar har mycket lång livslängd och det behövs därför tydliga incitament för att företag ska kunna överge sina redan sjunkna kostnader. Utvecklingen hos den förnybara energisektorn har visat att detta är görbart och det viktigaste var där att övertyga de första industrierna att bryta loss från sina redan existerande investeringar och satsa på grönare teknik. Efter det skapades ett momentum inom energisektorn med allt lägre priser på förnybar energi som följd. Utvecklingen inom energisektorn kan här fungera som en ledstjärna för den utvecklingen som EU vill uppnå för stålindustrin. (Åhman, Arens, and Vogl, 2022) Även om det kan vara riskfyllt att ta på sig ledartröjan i teknikskiftet så kan det vara viktigt för att inte låta arbetstillfällen flytta till andra regioner. Det hade även marknadsfört europeiska unionen som ett nav för gröna investeringar.

6.2 Vidare utveckling av databasen

Databasmodellen som har skapats i QGIS har potential att bidra till framtida analyser kring etablering av ny stålproduktion eller flöden av råmaterial. Modellen kan fungera både som ett underlag för en global analys eller kring ett specifikt område av intresse. De lager som är inkluderade i modellen hjälper till att få en översiktlig bild av vart förutsättningarna finns för att producera grönt stål i framtiden. För att gå djupare på specifika komparativa fördelar och tydligare kvantifiera vilka effekter olika investeringsbeslut skulle ha kan tillskott till databasen behövas. Nedan beskrivs några möjliga tillskott för ett fortsatt arbete med databasen.

- För att utveckla modellen ytterligare så hade data kring auktionspriser för förnybar elproduktion kunnat vara användbart. Auktionspriser underlättar för en mer närtida analys då användaren vill få en överblick över hur prisbilden ser ut i dagsläget. I denna rapport har en analys bortom 2030 gjorts vilket har inneburit att fysiska förutsättningar har varit av större intresse.
- Att dela upp stålverken i databasen utefter teknikslag är också en vidare utvecklingsmöjlighet. På så sätt går det att få en bild över vilka produktionstyper som är dominanta i respektive land.

- En av de största förbättringspotentialerna för framtida arbete med databasen är att implementera någon form av beräkningsmodell. På så sätt skulle programmet kunna ge en kostnad för etablering av exempelvis förnybar energi för en specifik plats på kartan. Ekvationen i modellen skulle då kunna uppskatta ett pris utifrån alla de faktorer som är inkluderade i databasen. I dagsläget är databasen huvudsakligen illustrativ med möjlighet att hitta underliggande data för varje datalager för egna vidare beräkningar.
- För att få en mer heltäckande prisbild för förnybar energiproduktion finns det möjlighet att inkludera vattenkraft i modellen. Vattenkraften hade kunnat ge en mer nyanserad bild än den som ges av bara sol och vindpotentialer. Vattenkraften har dock nackdelen att den är svårare att skala upp vid ökat elbehov och är därför är inte lika central som en komparativ fördel.
- Slutligen hade det varit bra med information i databasen om vilka områden som är otillgängliga för vindkrafts respektive solkraftsetablering. Det skulle kunna vara ett datalager med exempelvis marklutning, skogsområden, naturskyddsområden och urbana områden. Med denna informationen hade det varit tydligare att se om ett område som identifieras ha goda förutsättningar för förnybar elproduktion även har landytor som tillåter detta.

Den skapade modellen har fungerat väl för den analys som genomförts i denna rapporten. Programmet GIS lämpar sig bäst för informationslagring och illustrativa analyser. Av denna anledningen så är det skapade verktyget användbart för arbeten av detta slag och kan vidareutvecklas därifrån. För arbeten som kräver en mer avancerad beräkningsmodell eller som vill utföra modelleringar så kommer GIS inte vara det mest lämpade programmet. Användningsområdet för databasen är därmed begränsad till en informationsportal för analyser.

7. Slutsatser

7.1 Databasen

Databasen har en lovande potential att kunna utvecklas som verktyg för vidare analytiskt arbete. Fördelen med databasen gentemot andra tillgängliga databaser är att flera relevanta faktorer för grön stålproduktion är samlade inom ett verktyg. Den är på så sätt nischad för analyser på just detta område men har god möjlighet att utvidgas för att även inkludera andra parametrar. De parametrar som är inkluderade har alla varit användbara för att komma fram till slutsatserna i detta arbete. Flödena av skrot har dock varit svårare att koppla till en komparativ fördel för grön stålproduktion. Det hade varit mer intressant för arbetet att inkludera siffror på tillgång till skrot inom varje land i databasen. Skrottillgången är mer permanent och ger en bättre grund för en undersökning av komparativa fördelar än vad handelsvolymerna av skrot gör. Denna analys skulle kunna bli något mer nyanserad om databasen innehöll siffror på inbäddat stål i varje nation. Specifika siffror på detta var dock svåra att tillgå.

7.2 Kostnadsutveckling vid övergång till grön stålproduktion

I dagsläget spås kostnaden för grön stålproduktion bli runt 20% högre än för konventionellt stål. Detta stämmer väl överens med genomsnittet på beräkningarna i denna rapporten av vad grön stålproduktion kan kosta i dagsläget. Dessa beräkningar utgår från 2021 års kostnader för förnybar elproduktion och från resultaten framkommer det att det redan idag finns en handfull länder där produktionen av grönt stål kan bli billigare än produktionen av konventionellt stål. Med det senaste decenniets utveckling av elproduktionkostnader från förnybara energikällor i åtanke så kommer listan på dessa länder bara bli längre. I de länder som hade de bästa fysiska förutsättningarna för att producera billig förnybar el så kan troligen kostnaderna på vätgasproduktionen pressas ner väsentligt. Genom att utgå från de kostnader som går att uppnå med 2021 års vindkraftsteknik så beräknades en teoretisk elproduktionskostnad i Chile till 0,009 EUR/kWh. Det hade inneburit en energikostnad på 30 EUR för att tillverka ett ton grönt stål. Totalt skulle ett ton grönt stål kosta runt 305 EUR att tillverka i Chile med de kostnaderna. Det är runt 70 EUR lägre än vad dagens produktion av konventionellt stål kostar.

Dessa potentiella elkostnader är dock spekulativa och det är svårt att veta hur kostnadsutvecklingen rör sig. Allt fler delar av samhället kommer vilja ha tillgång till förnybar energi i framtiden vilket kommer driva priserna uppåt. Det hänger därför på att elproduktionen utökas i en tillräcklig takt för att hålla elpriserna nere och göra det lönsamt att implementera gröna tekniker.

Vad som dessutom blir tydligt utifrån beräkningarna av de komparativa fördelarna är att lokalisering av produktionen blir allt viktigare. Låga transportkostnader har gjort att stålproduktionen har kunnat fördelas globalt. Med de nya produktionsteknikerna kommer dock priset vara mer beroende utav lokala förutsättningar.

Vatten har identifierats som en begränsande faktor vid produktion av vätgas och som förhindrar vissa regioner från att satsa på tekniken. Med de låga elkostnader som är möjliga att uppnå med förnybar elproduktion så utgör dock avsaltning endast en bråkdel av de totala kostnaderna för stålproduktionen. Det möjliggör för kustnära nationer som har goda förutsättningar för elproduktion men låg tillgång till färskvatten att ändå producera vätgas.

7.3 Lämpliga länder för investeringar i grön stålproduktion

I detta arbete identifieras ett antal nationer med särskilt goda förutsättningar för grön stålproduktion. Det finns ett flertal länder med relativt liknande förutsättningar när det kommer till att producera grönt stål. Det är dock några länder som sticker ut lite extra. Denna analys har gjorts enbart utifrån de fysiska förutsättningarna som länderna har och inte den stålpolitik som de bedriver för tillfället. Om policy och investeringsaspekter hade inkluderas så skulle utfallet troligen bli annorlunda. Nedan är de fyra länder som i rapporten identifieras ha bäst potential för grön stålproduktion bortom 2030.

Mauretanien

Mauretanien har en av de bästa förutsättningarna på den afrikanska kontinenten att producera billig förnyelsebar elektricitet. Förutsättningarna är bra för både vind och solkraft vilket är gynnsamt då de kompletterar varandra väl. Kombinationen av de två innebär att det går att producera vätgas till låga priser över fler timmar på året, eftersom det ofta antingen blåser eller att solen skiner. Mauretanien är dessutom Afrikas näst största producent av järnmalm och kan därför lokalisera hela processkedjan inom landet.

Chile

Chile har likt Mauretanien både mycket goda förutsättningar för både vind och solkraft. Landet kan uppnå några av de högsta effekterna i världen från både vind och sol vilket möjliggör för extremt låga elpriser i framtiden. Landet har goda tillgångar till vatten i de södra delarna av landet men kan komma att behöva ta till avsaltning av havsvatten för att tillfredsställa hela vattenbehovet. Chile har sin egen järnmalmproduktion men ligger framförallt nära Brasilien som har en mycket god tillgång till järnmalm.

Australien

Australien är världens största utvinnare av järnmalm och har dessutom de största järnmalmstillgångarna i världen. I dag är denna resurs underutnyttjad inom landet då majoriteten skickas på export. Australien har dock mycket goda förutsättningar för att börja producera grönt stål. Det finns stora tillgängliga landytor för etablering av förnybar elproduktion och framförallt är potentialen för solkraft mycket hög. Australien skulle kunna inhysa hela processen inom landet istället för att exportera järnmalm och kol som de gör idag. Detta skulle leda till ett högre exportvärde för landet samtidigt som de skulle kunna producera stål till konkurrenskraftiga priser.

Brasilien

Brasilien har efter Australien den största tillgången till järnmalm. Råmaterialet för stålproduktion finns därför tillgängligt. Utöver det identifierade rapporten Brasilien som det land som har bäst komparativa fördelar. Det innebär att Brasilien utifrån 2021 års kostnader för förnybar elproduktion skulle kunna tillverka grönt stål till lägst pris. Redan idag finns det därmed potential för Brasilien att producera grönt stål till 350 EUR/t vilket är en lägre kostnad än för konventionellt stål. Farhågan för Brasilien är hur denna kostnadsutveckling kommer se ut bortom 2030. Landet har inte riktigt lika god potential som de ovan tre nämnda länderna för billig förnybar elproduktion. Det är möjligt att andra länder kommer att producera betydligt billigare el framöver. Stora delar av Brasiliens yta är dessutom täckt av regnskog vilket kan vara svårt att kombinera med produktion av förnybar el.

8. Referenser

- Åhman, Max, Marlene Arens, and Valentin Vogl (2022). "Chapter 8: International cooperation for decarbonizing energy intensive industries: the case for a Green Materials Club". In: *Handbook on Trade Policy and Climate Change*. Edward Elgar Publishing. ISBN: 9781839103230. URL: <https://www.elgaronline.com/view/edcoll/9781839103230/9781839103230.00016.xml>.
- Åhman, Max, Olle Olsson, et al. (2018). *Hydrogen steelmaking for a low-carbon economy : A joint LU-SEI working paper for the HYBRIT project*.
- Bataille, Stiebert and Eng (2021). *GLOBAL FACILITY LEVEL NET-ZERO STEEL PATHWAYS TECHNICAL REPORT ON THE FIRST SCENARIOS OF THE NET-ZERO STEEL PROJECT*. URL: http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf.
- Bhaskar, Abhinav et al. (2022). "Decarbonizing primary steel production : Techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway." In: *Journal of Cleaner Production* 350. ISSN: 0959-6526.
- Bogdanov, Dmitrii et al. (2021). "Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability". In: *Energy* 227, p. 120467. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>.
- Burak Odabasi (2022). *ArcelorMittal studies pellet/DRI joint venture with Mauritania's SNIM*. URL: <https://www.kallanish.com/en/news/steel/market-reports/article-details/mauritanian-snim-inks-mou-with-arcelormittal-0522/>. (Hämtad: 19.03.2023).
- Bureau of International Recycling (2022). *WORLD STEEL RECYCLING IN FIGURES 2017 – 2021*.
- Çiftçi, Dr Baris Bekir (2018). *Blog: The future of global scrap availability*. URL: <https://worldsteel.org/media-centre/blog/2018/future-of-global-scrap-availability/>. (Hämtad: 01.11.2022).
- D'Costa, Anthony (Dec. 1999). *The Global Restructuring of the Steel Industry: Innovation, Institutions and Industrial Change*. ISBN: ISBN 0-203-42522-7 Master e-book ISBN 0-203-44594-5 (Adobe eReader Format) ISBN 0-415 -14 827-8 (Print Edition).
- Diaz-Morlan, Pablo and Miguel Saez-Garcia (2016). "The European Response to the Challenge of the Japanese Steel Industry (1950-1980)." In: *Business History* 58.1-2, pp. 244–263. ISSN: 00076791.

- Dincer, Ibrahim (2021). *Renewable Hydrogen Production*. Elsevier. ISBN: 0323851762. URL: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=cat07147a&AN=lub.6978172&site=eds-live&scope=site>. (Sidorna 35 - 90).
- EIU (2023). *Saudi Arabia launches world's largest solar-power plant*. URL: <https://www.eiu.com/n/saudi-arabia-launches-worlds-largest-solar-power-plant/>. (Hämtad: 22.03.2023).
- Elsaie, Yasser et al. (2023). "Water desalination in Egypt; literature review and assessment". In: *Ain Shams Engineering Journal* 14.7, p. 101998. ISSN: 2090-4479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101998>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447922003094>.
- EMBER (2022). *EU Carbon Price Tracker*. URL: <https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/>. (Hämtad: 05.01.2023).
- Energimyndigheten (2014). *Vad avgör ett vattenkraftverks betydelse för elsystemet*. URL: <https://www.energimyndigheten.se/4a45db/globalassets/nyheter/2014/vad-avgor-ett-vattenkraftverks-betydelse-for-elsystemet.pdf>.
- Energy Transitions Commission (2021). *The Net Zero Steel Sector Transition Strategy*. URL: <https://www.energy-transitions.org/publications/the-net-zero-steel-sector-transition-strategy/>.
- EU Joint Research Centre (2022). "EU climate targets: how to decarbonise the steel industry". In: *EU Science Hub*. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15_en.
- European Commission (2021). *Carbon Border Adjustment Mechanism: Questions and Answers*. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3661. (Hämtad: 24.01.2023).
- (2022). *EU counters steel subsidies resulting from export restrictions on raw materials and transnational subsidies from China*. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1774. (Hämtad: 01.05.2023).
 - (n.d.). *Emissions cap and allowances*. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/emissions-cap-and-allowances_en. (Hämtad: 09.03.2023).
- Eurostat (2022a). *Electricity price statistics*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers. (Hämtad: 24.01.2023).
- (2022b). *What is the share of renewable energy in the EU?* URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-4c.html>. (Hämtad: 24.01.2023).
- Gielen, Dolf et al. (2020). "Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study." In: *Journal of Industrial Ecology* 24.5, pp. 1113–1125. ISSN: 10881980.
- Global Data (2021). *Top 10 Steel Companies in the World in 2021 by Revenue*. URL: <https://www.globaldata.com/companies/top-companies-by-sector/construction/global-steel-companies-by-revenue/>. (Hämtad: 11.02.2023).
- Global Energy Monitor (2022). *Global Steel plant tracker*. URL: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/download-data/>. (Hämtad: 14.09.2022).

-
- Global Solar Atlas (2019). *Map and data downloads*. URL: <https://globalsolaratlas.info/download>. (Hämtad: 21.10.2022).
- Global Wind Atlas (n.d.). *GIS files & API access*. URL: <https://globalwindatlas.info/en/download/gis-files>. (Hämtad: 12.09.2022).
- Global Wind Energy Council (2022). *Global Wind Report 2022*. URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>.
- Hannah Ritchie and Max Roser and Pablo Rosado (2022). "Energy". In: *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/energy>.
- HYBRIT (2022). *HYBRIT: Unikt vätagaslager i Luleå tar form*. URL: <https://www.hybritdevelopment.se/hybrit-unikt-vaatgaslager-i-lulea-tar-form/>. (Hämtad: 15.02.2023).
- IEA (2020). *Iron and Steel Technology Roadmap*. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.
- (2022a). *SOLAR*. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar>. (Hämtad: 02.12.2022).
 - (2022b). *Solar PV*. URL: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>. (Hämtad: 15.12.2022).
 - (2022c). *Sweden*. URL: <https://www.iea.org/countries/sweden>. (Hämtad: 21.01.2023).
 - (2022d). *Wind electricity*. URL: <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>. (Hämtad: 25.01.2023).
 - (2023). *Electricity*. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>. (Hämtad: 21.01.2023).
 - (n.d.). *Global average levelised cost of hydrogen production by energy source and technology 2019 and 2050*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-levelised-cost-of-hydrogen-production-by-energy-source-and-technology-2019-and-2050>. (Hämtad: 28.09.2022).
- IIMA (2023). *Hot Briquetted Iron (HBI)*. URL: <https://www.metallics.org/hbi.html>. (Hämtad: 01.05.2023).
- International Monetary Fund (n.d.). *Primary Commodity Price System*. URL: <https://data.imf.org/?sk=471DDDF8-D8A7-499A-81BA-5B332C01F8B9>. (Hämtad: 08.03.2023).
- IRENA (Oct. 2019). *Future of wind*. URL: https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/oct/irena_future_of_wind_2019.pdf.
- (2021). *Renewable Power Generation Cost*. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>. (Hämtad: 21.10.2022).
 - (2022a). *Country Rankings*. URL: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. (Hämtad: 29.11.2022).
 - (2022b). *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part III – Green hydrogen cost and potential*. URL: <https://www.irena.org/Publications/2022/May/Global-hydrogen-trade-Cost>.
 - (2022c). *Regional trends*. URL: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Regional-Trends>. (Hämtad: 17.11.2022).
 - (n.d.). *Wind energy*. URL: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>. (Hämtad: 25.01.2023).
- Jakob, Michael et al. (2022). "How trade policy can support the climate agenda". In: *Science* 376.6600, pp. 1401–1403. DOI: 10.1126/science.abo4207. eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.abo4207>. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abo4207>.
-

- Jernkontoret (2021). *Frågor och svar om USA:s importtullar på stål*. URL: <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/stalmarknaden/usas-importtullar-pa-stal/>. (Hämtad: 15.02.2023).
- (2022). *Processernas miljöpåverkan*. URL: <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/processernas-miljopaverkan/>. (Hämtad: 15.02.2023).
- Kim, Yoochan et al. (2022). “Relationship of iron ore price with other major commodity prices.” In: *Mineral Economics: Raw Materials Report*, pp. 1–13. ISSN: 2191-2203.
- Lauri, Holappa (2021). *Challenges and Prospects of Steelmaking Towards the Year 2050*. [Elektronisk resurs]. MDPI AG. ISBN: 9783036527772.
- LAZARD (2021). *LAZARD’S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS — VERSION 15.0*. URL: <https://www.lazard.com/media/sptlfats/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>.
- Leadit (n.d.). *Green Steel Tracker*. URL: <https://www.industrytransition.org/green-steel-tracker/>. (Hämtad: 28.01.2023).
- Logar, Vito and Igor Škrjanc (2021). “The Influence of Electric-Arc-Furnace Input Feeds on its Electrical Energy Consumption.” In: *Journal of Sustainable Metallurgy* 7.3, pp. 1013–1026. ISSN: 2199-3823. URL: <https://ludwig.lub.lu.se/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=edssjs&AN=edssjs.E7FE41F5&site=eds-live&scope=site>.
- Material Economics (2019). *Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*.
- Medarac, H, J.A. Moya, and J Somers (2020). “Production costs from iron and steel industry in the EU and third countries”. In: *Journal of Cleaner Production* EUR 30316 EN. URL: https://www.eurofer.eu/assets/news/eu-technical-report-on-production-costs-from-the-iron-and-steel-industry-in-the-eu-and-third-countries/production_costs_from_the_iron_and_steel_industry_-_final_online.pdf.
- Nechache, Aziz and Stéphane Hody (2021). “Alternative and innovative solid oxide electrolysis cell materials: A short review”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149, p. 111322. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111322>.
- Nicholas, Simon and Soroush Basirat (2022). “Iron ore quality a potential headwind to green steelmaking – Technology and mining options are available to hit net-zero steel targets”. In: *ieefa*. URL: <https://ieefa.org/resources/iron-ore-quality-potential-headwind-green-steelmaking-technology-and-mining-options-are>.
- OECD (2022). *Steel trade and trade policy developments*. URL: [https://one.oecd.org/document/DSTI/SC\(2022\)13/FINAL/en/pdf](https://one.oecd.org/document/DSTI/SC(2022)13/FINAL/en/pdf).
- Pimm, Andrew J., Tim T. Cockerill, and William F. Gale (2021). “Energy system requirements of fossil-free steelmaking using hydrogen direct reduction”. In: *Journal of Cleaner Production* 312, p. 127665. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127665>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621018837>.
- Puliti (2022). *Hydrogen accelerates energy transition in developing countries*. URL: <https://blogs.worldbank.org/voices/hydrogen-accelerates-energy-transition-developing-countries>. (Hämtad: 15.10.2022).

-
- QGIS (2023). *A Free and Open Source Geographic Information System*. URL: <https://www.qgis.org/en/site/index.html>. (Hämtad: 19.03.2023).
- REN 21 (2021a). *Renewables 2021 Global status report*. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf.
- (2021b). *Renewables 2021 Global status report*. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf.
- Richardson-Barlow, Clare et al. (2022). “Policy and pricing barriers to steel industry decarbonisation: A UK case study”. In: *Energy Policy* 168, p. 113100. ISSN: 0301-4215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113100>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421522003251>.
- Shamika, Sirimanne et al. (2021). “REVIEW OF MARITIME TRANSPORT”. In: *United Nations Conference on Trade and Development*. ISSN: 0566-7682. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021ch3_en.pdf.
- Shiva Kumar, S. and V. Himabindu (2019). “Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review”. In: *Materials Science for Energy Technologies* 2.3, pp. 442–454. ISSN: 2589-2991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>.
- Simoës, Sofia G. et al. (2021). “Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production.” In: *Journal of Cleaner Production* 315. ISSN: 0959-6526.
- Suer, Julian, Marzia Traverso, and Frank Ahrenhold (2021). “Carbon footprint of scenarios towards climate-neutral steel according to ISO 14067.” In: *Journal of Cleaner Production* 318. ISSN: 0959-6526.
- Sun, Irene Yuan (2017). *The next factory of the world. how Chinese investment is reshaping Africa*. Harvard Business Review Press. ISBN: 9781501978050.
- Taylor, Cliff et al. (June 2016). “The F’derik-Zouérate Iron District: Mesoarchean and Paleoproterozoic Iron Formation of the Tiris Complex, Islamic Republic of Mauritania”. In: pp. 529–573. ISBN: 978-3-319-31731-1. DOI: [10.1007/978-3-319-31733-5_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31733-5_21).
- U.S department of energy (2019). *Desalination*. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/09/f66/73355-7.pdf>.
- U.S. Geological Survey (2023a). *Mineral commodity summaries 2023*. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>. (Hämtad: 07.02.2023).
- (2023b). *Mineral commodity summaries 2023*. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>. (Hämtad: 07.02.2023).
- United Nations (2020). *Water cooperation between States ‘key’ to Blue Nile dam project*. URL: <https://news.un.org/en/story/2020/06/1067402>.
- (n.d.). *The Paris Agreement*. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. (Hämtad: 07.03.2023).
- United States Geological Survey (2021). *Iron ore mine production by country 2021*. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-ore-statistics-and-information>.
- US Department of energy (n.d.). *How a Wind Turbine Works - Text Version*. URL: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version>. (Hämtad: 19.03.2023).
- USGS (n.d.). *How many homes can an average wind turbine power?* URL: <https://www.usgs.gov/faqs/how-many-homes-can-average-wind-turbine-power>. (Hämtad: 19.03.2023).
-

- Venkataraman, M. (1) et al. (2022). "Zero-carbon steel production: The opportunities and role for Australia." In: *Energy Policy* 163. ISSN: 03014215.
- Vogl, Valentin, Max Åhman, and Lars J Nilsson (2018). "Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking." In: *Journal of Cleaner Production* 203, pp. 736–745. ISSN: 0959-6526.
- (2021). "The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase". In: *Climate Policy* 21.1, pp. 78–92. DOI: 10.1080/14693062.2020.1803040. URL: <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1803040>.
- Wang, R.R. et al. (2021). "Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities." In: *Journal of Cleaner Production* 329. ISSN: 0959-6526.
- West, Kira (2020). *TECHNOLOGY FACTSHEET: HYDROGEN DIRECT REDUCTION STEEL-MAKING (HYBRIT) WITH ON-SITE ELECTROLYSIS*. URL: https://energy.nl/wp-content/uploads/h2-direct-reduction-factsheet_on-site-electrolysis-7.pdf. (Hämtad: 16.03.2023).
- World Economic Forum (2018). *Which countries could gain the most from renewable energy?* URL: <https://www.weforum.org/agenda/2018/05/these-20-water-stressed-countries-have-the-most-solar-and-wind-potential>. (Hämtad: 15.02.2023).
- (2020). *The future looks bright for solar energy*. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2020/01/the-future-looks-bright-for-solar-energy/>. (Hämtad: 05.11.2022).
- World economic forum (2022). *What is green steel and why does the world need more of it?* URL: <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/green-steel-emissions-net-zero/>. (Hämtad: 01.11.2022).
- World Resources Institute (2019). *Aqueduct Global Maps 3.0 Data*. URL: <https://www.wri.org/data/aqueduct-global-maps-30-data>. (Hämtad: 15.02.2023).
- World Steel (2022). *World steel in figures 2022*. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022-1.pdf?x98970>. (Hämtad: 12.11.2022).
- (n.d.). *World Steel in figures 2022*. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>. (Hämtad: 04.01.2023).
- World Steel Association (2022). *World Steel in Figures 2022*. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>. (Hämtad: 15.02.2023).
- (n.d.). *Raw materials*. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/raw-materials/>. (Hämtad: 10.03.2023).

Bilaga

Beskrivning av databasen

Databasen har skapats i det geografiska informationsprogrammet QGIS. Datan är representerad i nio olika kartlager som kan appliceras utifrån den information som är av intresse. För att använda databasen behöver programmet QGIS vara installerat på datorn. Programmet är gratis att ladda ner och kan hittas på QGIS (2023)

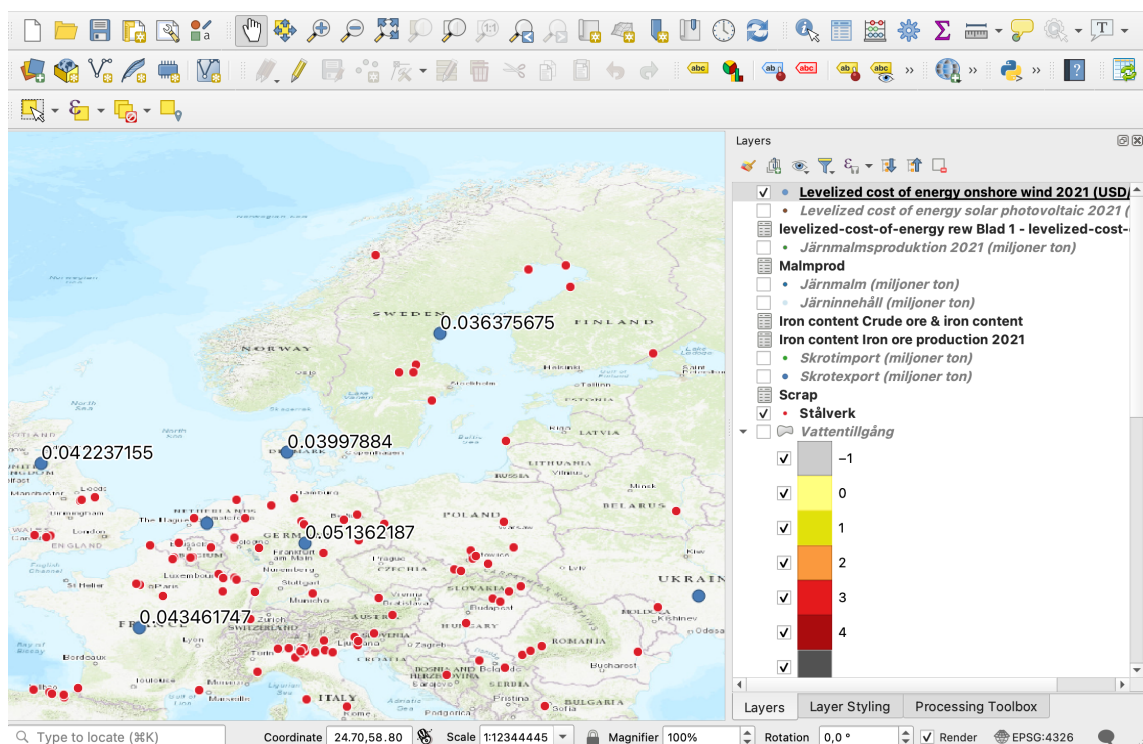


Figure 8.1: En skärmbild av databasen och panelen där de olika informationslagren kan appliceras.

I figur 8.1 syns ett utdrag ur databasen där ett antal av de valbara informationslagren är synliga. I nuläget är datan kring stålverk och kostnaden för vindkraft ikryssat i panelen och denna information visas därför i kartfönstret. I kartfönstret kan användare fritt röra sig över kartan till det område som är av intresse. Genom att dubbelklicka på ett kartlager i den högra

panelen så kan användare ändra ett antal parametrar. Det rör sig huvudsakligen om estetiska ändringar för att underlätta visualiseringen på kartan. Storlek och färg på symboler och text kan justeras och även namnen på lagren kan ändras.

Användare som har databasen nedlandat kan ladda upp ytterligare information till databasen eller uppdatera den informationen som är inlagd. Uppladdning av ytterligare data kan göras genom att dra in en fil med kompatibel data i arbetsfönstret eller att välja "New Layer". Om användaren vill göra ett utdrag ur databasen och generera en karta så välj "New Print Layout" i den översta panelen som ses i figur 8.2 nedan. Valet "New Print Layout" ger användaren möjligheten att skapa en karta av den informationen som för tillfället befinner sig i databasens kartfönster.

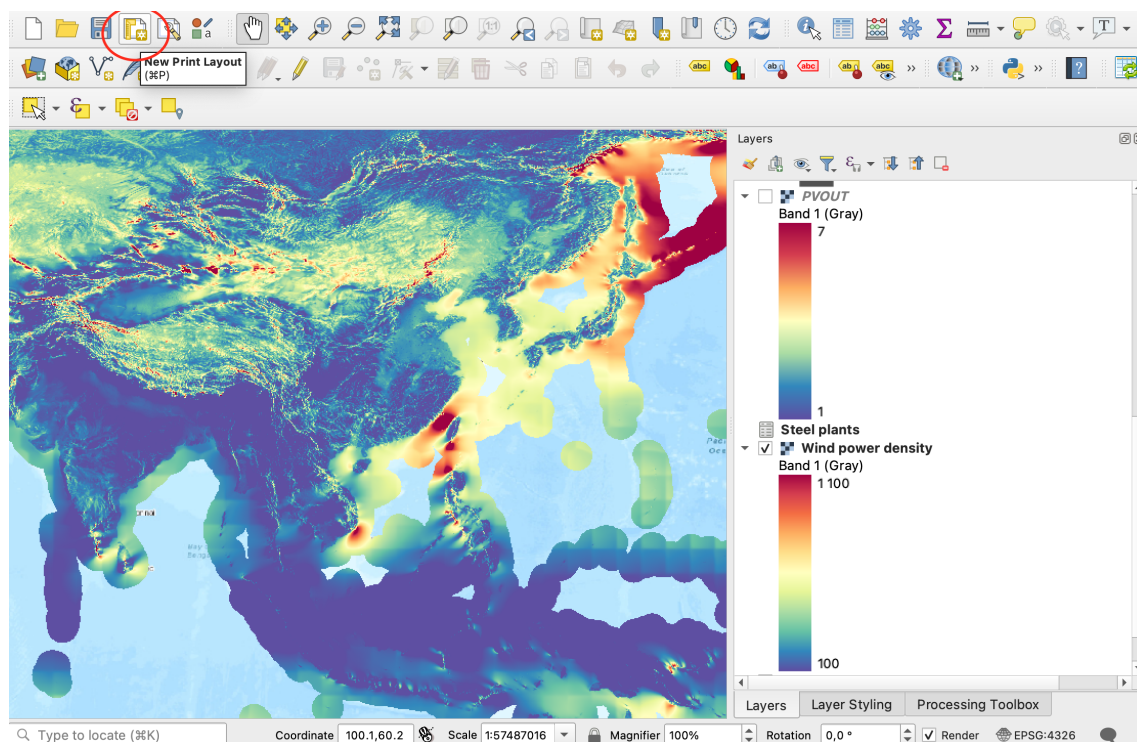


Figure 8.2: En skärmbild av databasen där "New Print Layout" är markerat i översta panelen.

Kartan appliceras genom att trycka på knappen i den vänstra panelen vilket ses nedan i figur 8.3. I den vänstra panelen finns även möjligheten att importera en legend till kartan.

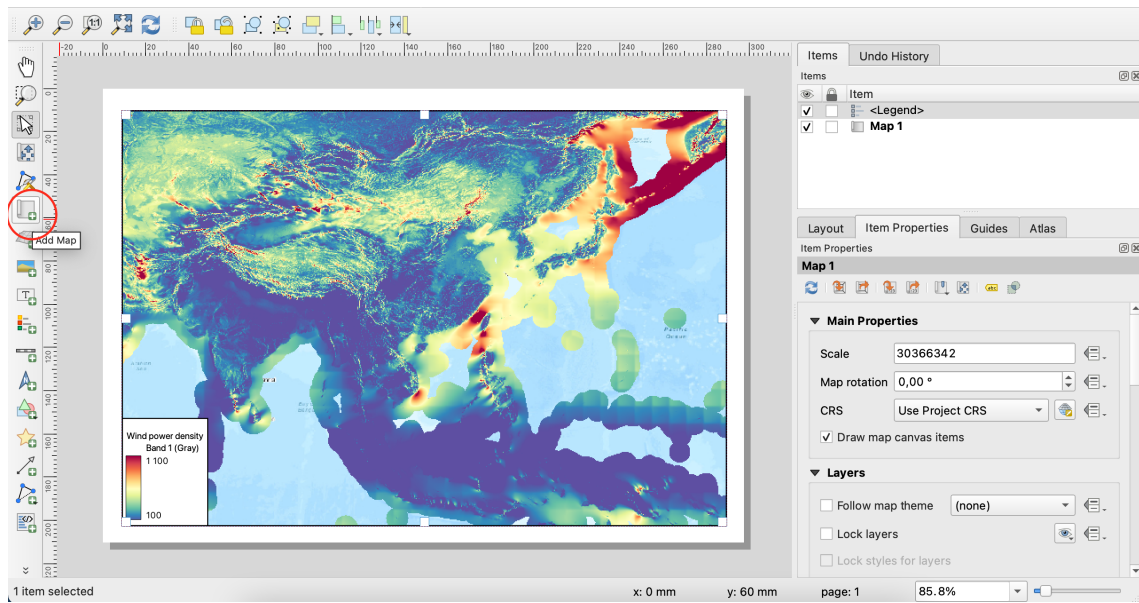


Figure 8.3: En skärmbild från kartverket i QGIS. I panelen till vänster är kommandot som importerar kartan från databasen markerat.