

KAPITEL 26



FIGUR 209. Rulle med galvaniseret stålplader der bliver ført ind i en skæremaskine. Shutterstock.

JERNMALM TIL STÅL

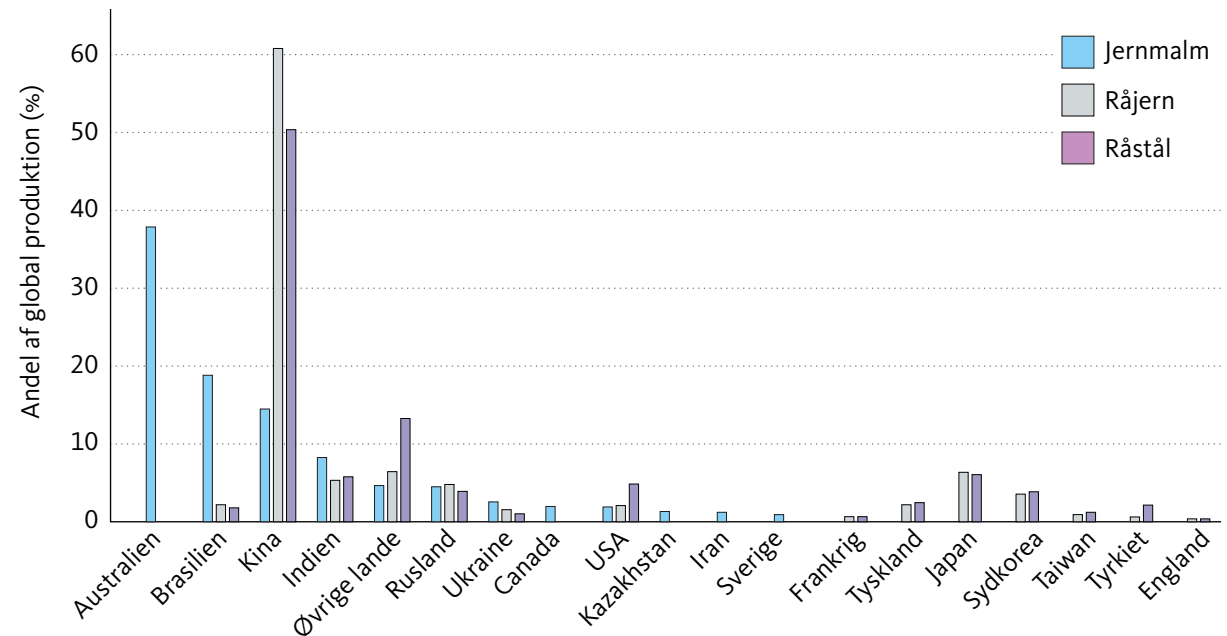
JERNMALM – ET AF DE VIGTIGSTE RÅSTOFFER

Jern er forudsætningen for vores infrastruktur og industri. Ingen huse, broer, biler, skibe og vindmøller vil kunne bygges uden jern. Derfor betragtes jern som det vigtigste af metalråstofferne. Det er også det fjerdestørste råstof målt i mængde, kun overgået af vand, sand og grus, som der udvindes mest af i verden. I jernminerne brydes de jernholdige mineraler hæmatit og magnetit, der samlet omtales som jernmalm, som altså er uforarbejdede jernminerale. Mineralerne skal gennemgå forskellige tekniske processer inden det kan omdannes til stål. I 2017 blev der udvundet ca. 1,2 mia. ton jernmalm fra alle verdens jernminer. Jernmalmen blev sammen med jernskrot forarbejdet til 1,7 mia. ton stål.

I det følgende vil vi først beskrive, hvordan jernmalme er dannet, hvordan de brydes, og hvilke miljøpåvirkninger dette kan have. Til slut gennemgår vi de processer, som omdanner jernmalm til forskellige typer af stål.

DANNELSE AF JERNMALM FORTÆLLER OM JORDENS UDVIKLING

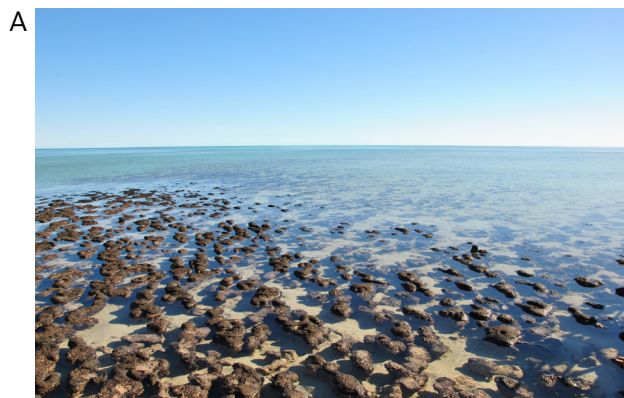
Der findes forskellige typer af jernmalme,



men den 'båndede jernmalm' er den vigtigste for verdens forsyning af jern.

Båndet jernmalm/jernformation eller forkortet til BIF (Banded Iron Formation) er sedimentære bjergarter, som består af jernoxidmineraler (hæmatit, magnetit, goethit) og siliciumrige mineraler. De er udfældet kemisk og danner millimetertynde lag, som ligger ovenpå hinanden og danner tykke sekvenser, der kan følges over flere kilometer

FIGUR 210. Søjlediagram som viser hvilke lande der bryder jernmalm, og hvilke der producerer råjern og stål. Efter USGS (2019).



FIGUR 211. Stromatolitter og BIF i billeder.

A. Nulevende stromatolitter ved Shark Bay i Vestaustralien. Stromatolitterne er stort set identiske med de cyanobakterier, der i tidernes morgen dannede den ilt, der udfældede jernet i havene, som senere blev til de bandede jernformationer.



B. Bjergryg i Australien hvor de bandede jernformationer tydeligt kan ses som de rødlig horisontale bånd.

C. Udsnit af et stykke båndet jernformation, hvor de røde jernholdige bånd fremstår tydeligt.

Fotos fra Shutterstock.

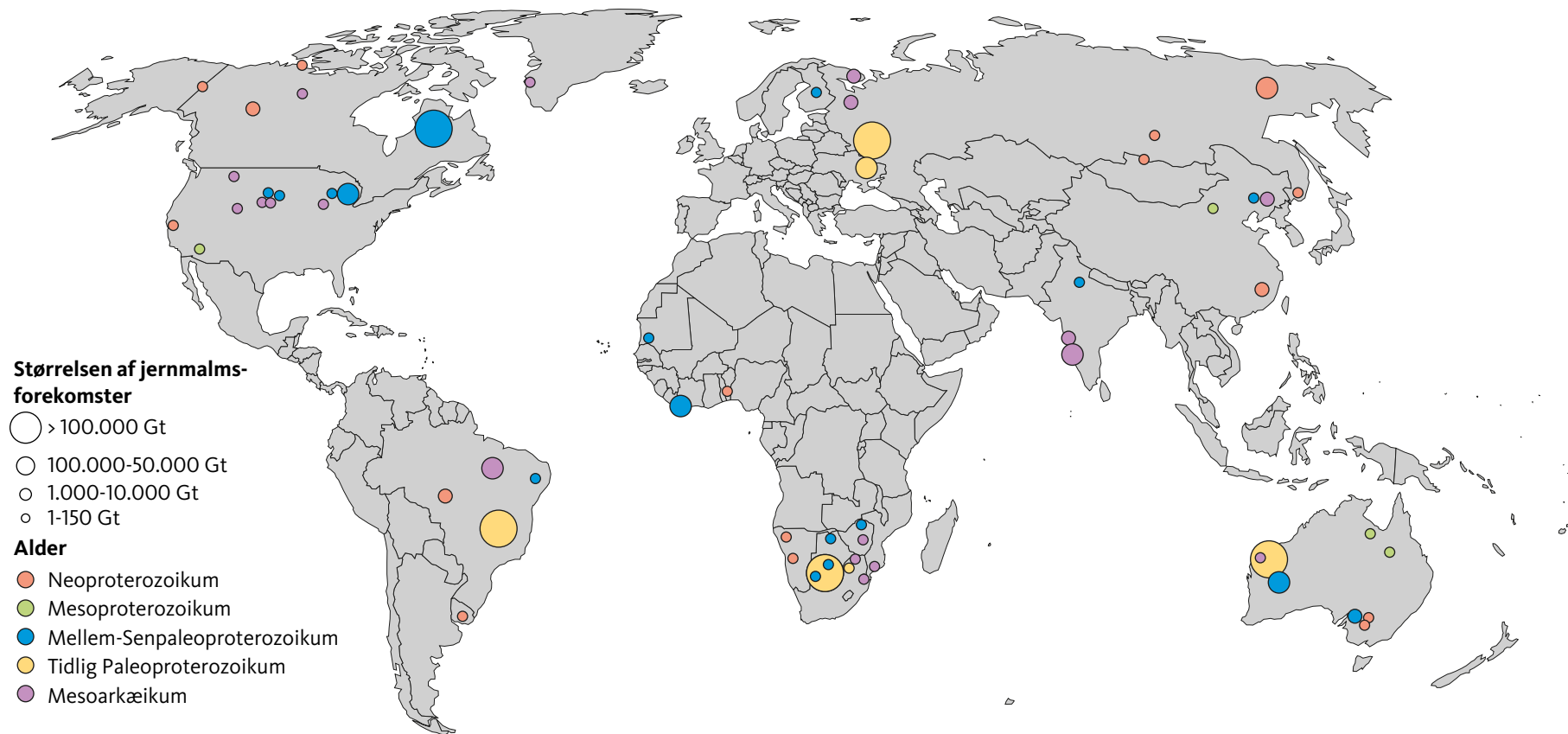


som røde, gule og sorte bånd (**figur 211. b, c**). BIF indeholder ofte 20-30 % jern, og nogle af dem indeholder også lidt guld.

I et geologisk perspektiv blev alle verdens BIF-forekomster dannet tidligt i jordens historie, nemlig for ca. 2,7-1,9 mia. år siden. Nogle af forekomsterne er efterfølgende deformeret og omdannet under senere geologiske hændelser.

Globalt er de største forekomster af jernmalm i form af BIF-forekomster spredt ud over hele jorden (**figur 212**).

Blandt forskerne er der en vis uenighed om, hvordan BIF-forekomsterne egentligt er dannet. Den mest anvendte forståelse bygger på følgende forhold: I denne tidlige periode af Jordens historie var oceanerne relativt sure (lav pH), og der var ikke ilt i atmosfæren, så derfor blev jern ikke udfældet men transporteret i opløsninger videre til oceanerne. I oceanerne var der liv i form af blågrønalger (cyanobakterier), som dannede ilt som resultat af deres fotosyntese (**figur 211. a**). Da frit jern er ustabil, når der tilføres ilt, blev det opløste jern omdannet til jernoxider, som blev udfældet i tynde lag. I perioder, hvor jernindholdet var mindre, blev der udfældet



FIGUR 212. Fordelingen af de største forekomster af jernmalm. BIF-forekomsten ved Pilbara i Vestaustralien menes at indeholde mere end 300.000 Gt jernmalm. I dette område er der flere store, åbne miner, som producerer jernmalmskoncentrater, som transporteres med minernes egne tog til Dampier mere end 1.000 km væk. I Brasilien er Carajas-minen den største producent af jernmalm med anslået 7,2 Gt jernmalm pr. år. Efter Bekker et al. (2010).

mere silicium end jern, som dermed dannede vekslende lag af jern og silikater. Disse lagvise udfældninger af jern og silikater er foregået igen og igen gennem millioner af år og har dannet de store BIF-forekomster, man kender i dag. På et tidspunkt har cyanobakterierne frigivet så meget ilt til atmosfæren, at jern udfældede inden det nåede oceanerne (figur 213).

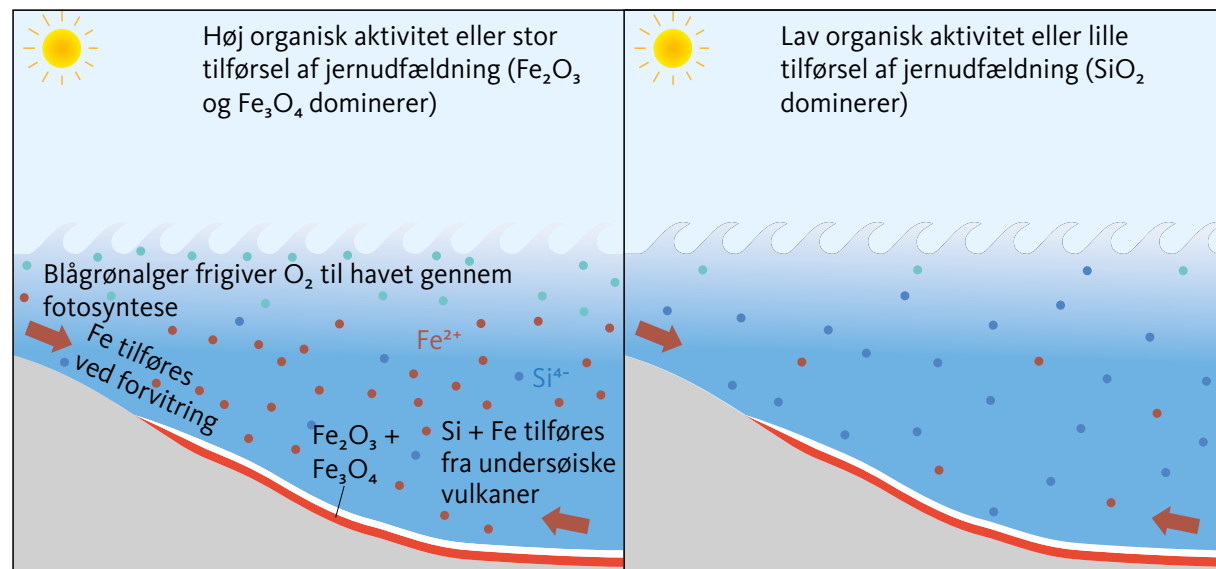
Australien og Brasilien har længe været de to største producenter af jernmalm fra BIF-forekomster, men også Kina, USA og Canada har store produktioner (figur 210).

BIF-FOREKOMSTER I GRØNLAND

Af speciel interesse for rigsfællesskabet er de tre meget store BIF-forekomster i Grønland.

- Isua-forekomsten i Vestgrønland dannet for 3,8 mia. år.
- Itilliarsuk-forekomsten, også i Vestgrønland dannet for 2,9 mia. år.
- Melville Bugt-BIF-forekomsten, som er dannet for ca. 2,7 mia. år siden.

Isua-forekomsten i Grønland har ikke alene haft betydning for forståelsen af, hvor-



dan BIF-forekomster dannes, forskning i Isua-områdets bjergarter har også haft en meget vigtig betydning for vores forståelse af Jordens tidligste geologiske udvikling og livets opståen. I sedimenter fra Isua-området har forskere fundet kulstof i nogle af de tynde sedimentlag. Ved at undersøge kulstoffets isotopsammensætning kunne forskerne konstatere, at kulstoffet var dannet ved fotosyntese, hvilket peger på, at der må have været liv i havet på dette tidspunkt for 3,8 mia. år siden.

FIGUR 213. Der er flere forskellige teorier om, hvordan bandede jernmalme er dannet. Den mest udbredte er, at Jordens atmosfære var iltfattig tidligt i Jordens historie, og at blågrøn-alger senere producerede ilt, hvorefter jern ikke længere var mobilt, og derfor udfældede på bunden af oceanerne i tykke lag af sedimenter. MiMa (2019).

Men der findes også enkelte eksempler på BIF-forekomster, der er dannet for ca. 700 mio. år siden. På dette tidspunkt var hele Jorden dækket af en iskappe. Man formoder derfor, at iskappen 'isolerede' oceanerne fra tilgang af oxygen, og jern kunne igen komme på opløst form i oceanerne, hvorefter det blev udfældet, da iskappen smeltede og oceanerne blev oxideret.

ISUA-JERNMALMEN GRØNLAND – EN AF VERDENS ÆLDSTE BJERGARTER

I den indre del af Godthåbsfjorden i Vestgrønland, helt oppe ved kanten til indlandsisen, ligger Isua-jernmalmforekomsten (figur 214). Denne jernmalmforekomst findes i 3,5 mia. år gamle lagserier af sedimenter og vulkanitter, som senere er blevet deformeret under bjergkædefoldninger. I dag ses den som en 2-4 km bred zone, kaldet Isua-grønstensbæltet. Isua er ikke blot verdens ældste jernmalm, det er også nogle af de ældste bjergarter der kendes.

Flere mineselskaber har undersøgt mulighederne for at udvinde jern fra BIF-forekomsten ved Isua. Mineralefterforskningen skal kortlægge malmens tredimensionelle



FIGUR 214. Infrastruktur for Isua-projektet. Mine og oparbejdningsanlæg ligger ved iskanten i ca. 1.000 m højde og ca. 100 km fra den havn, hvorfra man regner med, at jernmalmkoncentratet skal udskibes. Det kræver etablering af en lang vej, broer og et rørsystem til transport af malm fra minen til havnen. Efter Orbicon (2013).

udstrækning og dermed sandsynliggøre, hvor meget der findes under overfladen. Med disse oplysninger kan mineingeniører og geologer planlægge, hvordan en eventuel mine skal anlægges, og om det kan betale sig at udvinde malmen. Til dette bruger man (næsten) altid to metoder:

- Geofysiske målinger, hvor man med instrumenter installeret på en helikopter eller et fly, kan registrere forskelle i bjergarternes magnetiske egenskaber flere hundrede meter under overfladen.
- Boringer i undergrunden i de områder, hvor de geofysiske resultater indikerer, at der kan være malm.

Ved Isua er der boret rigtig mange huller med en samlet længde på mere end 7.600 m. For at få viden om hvor meget malm der er, hvor høj lødighed malmen har og for at forstå malmens rumlige udbredelse og dermed til at beregne malmressourcen, dvs. at man kan bestemme det mineraliserede legeme, er prøverne fra boringerne analyseret kemisk.

PLANER FOR EN JERNMALMMINE VED ISUA

Det er planen, at der skal etableres en åben mine, hvor jernmalmen sprænges ud; de

store stykker vil blive kørt til at knuseanlæg i nærheden af minen, hvor det knuses og formales, indtil malmens kornstørrelse svarer til finkornet sand. Efterfølgende skal den nedknuste malm behandles med magneter, som separerer de magnetiske mineraler fra de ikke-magnetiske. Det magnetiske materiale er jernmalmmineralerne, også kaldet jernmalmkoncentratet.

En jernmine ved Isua vil kræve, at der etableres en ca. 100 km lang vej fra minen, der ligger ca. 1.000 m.o.h., til det mulige udskibningsted i Godthåbsfjorden (figur 214). Det kinesiske mineselskab, General Nice Group, som i 2019 har retten til at bryde jern fra Isua, har foreslået, at knusning, formaling og magnetseparation udføres ved minen tæt på indlandsisen. De påtænker at transportere jernmalmkoncentratet fra anlæggene ved minen til havnen via et rørsystem; på denne måde kan jernmalmkoncentratet ved hjælp af tyngdekraften glide fra minen til havnen. Den del af malmen, som ikke er magnetisk, og derfor ikke indeholder jern, har ikke økonomisk værdi og omtales som tailings, der skal deponeres i lavninger i nærheden af minen. Det er i princippet finkornet sand blandet med vand. Vandet fra tailings skal

renses inden det kan udledes.

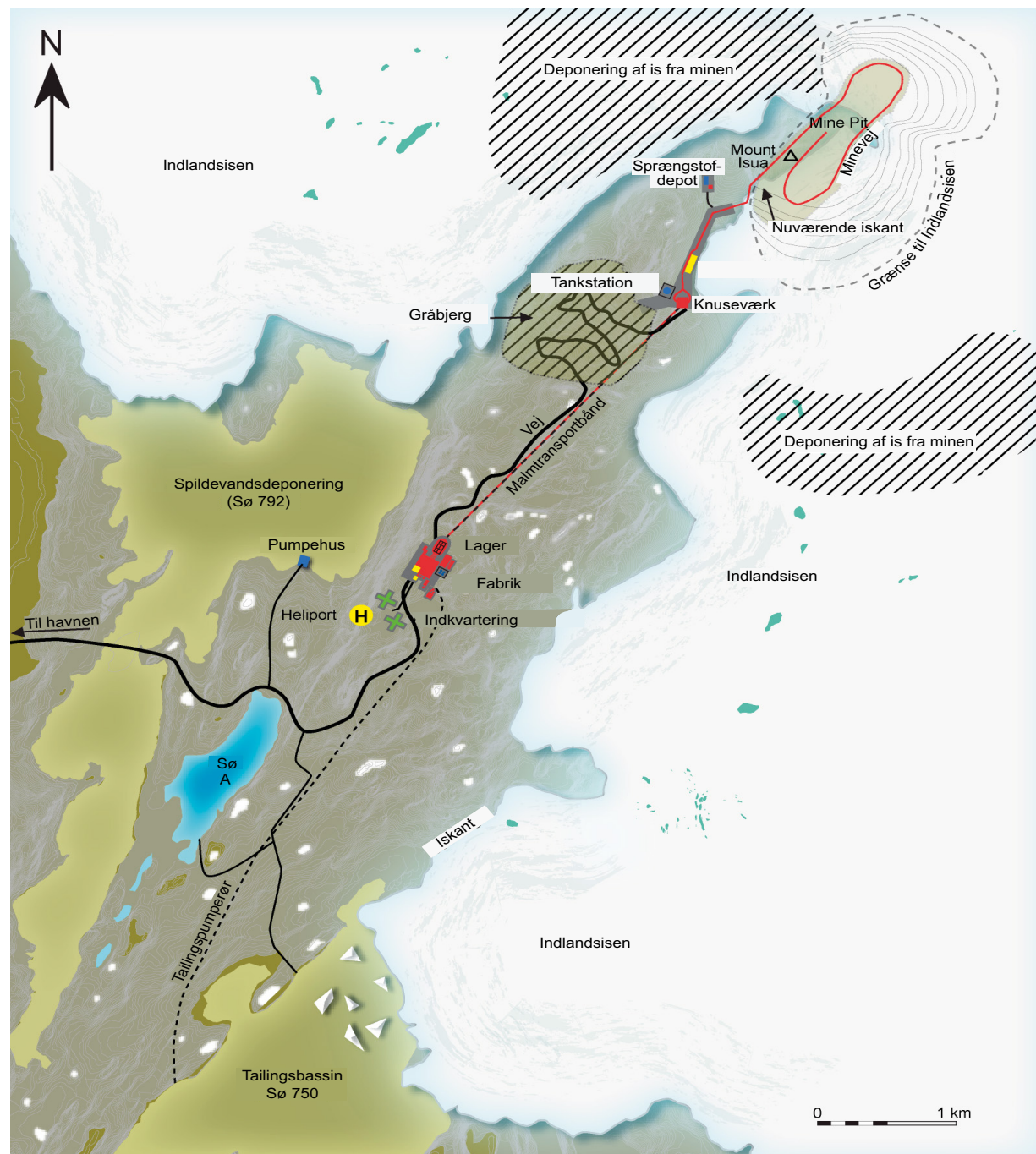
Beregninger foretaget på baggrund af de geofysiske målinger, boringer og analyser af materialet viser, at Isua-forekomstens reserve er 114 mio. ton malm med et gennemsnitligt jernindhold på 37 %. Herudover har selskabets geologer anslået ressourcen til 837 mio. ton jernmalm. Mineselskabet beregnede i 2012, at der ville være tilstrækkeligt med malm til 10 år, hvis der blev produceret 1 mio. ton jernmalm om måneden. Men da man ikke kan lave en mine med lodretstående kanter, fordi minen så ville styrte sammen, skal kanterne have en vinkel på omkring 45 grader; det betyder, at der skal brydes mindst 30 % ekstra bjergart (gråbjerg), som ikke indeholder jern. For at kunne producere 1 mio. ton jernmalm er den samlede mængde der skal brydes hver måned i størrelsesordenen 1,3 mio. ton. Denne ekstra mængde gråbjerg skal også deponeres i nærheden af minen.

MILJØUDFORDRINGER FOR ISUA-MINEN

Alle miner har mindst to store miljømæssige udfordringer:

- Udledning af forurenende stoffer til

FIGUR 215. Plankort for en eventuel produktion af jernmalm fra Isua. Det ses, at den åbne mine er omgivet af indlandsis på tre sider. Sø 750 er tænkt til brug for deponering af tailings. Efter Orbicon (2013).



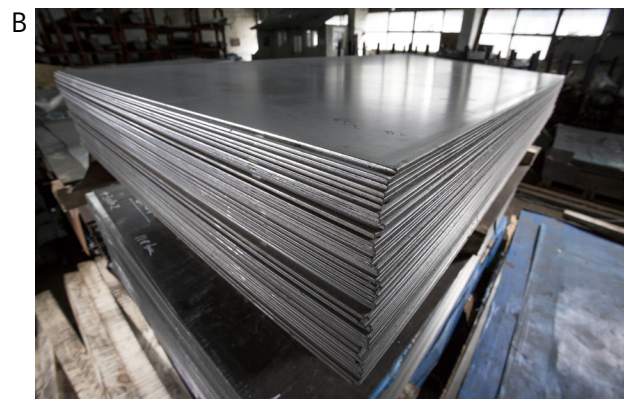


FIGUR 216. Stålproduktion i billeder.

A. Stålproduktion i elektrisk drevne smelteovne.

B. Færdigproducerede stålplader klar til brug i industrien.

C. Store skibe til transport af jernmalm kan laste op til ca. 180.000 ton malm. Til Isua-projektet i Vestgrønland vil der skulle bruges omkring 1-2 skibe af denne størrelse hver uge året rundt. Fotos af Shutterstock.



vandmiljøet og atmosfæren.

- Deponering af tailings.

En mine ved Isua vil have behov for at deponere meget store mængder tailings og gråbjerg. Hvis vi antager, at malmen indeholder omkring 50 % jernholdige mineraler (hæmatit og magnetit), udgør tailings også ca. 50 %. Det vil sige, at der skal deponeres lige så meget, som der eksporteres, hvilket er omkring 12 mio. t/år. Der er altså brug for kæmpestore, naturlige lavninger i terrænet, som kan fungere som 'bassiner', hvor tailings og gråbjerg kan deponeres forsvarligt. Dette er en meget stor udfordring i det arktiske miljø og særligt i et område, hvor der forekommer store mængder smeltevand fra indlandsisen. Hvis det strømmende vand kommer i kontakt med tailings, kan vandet transportere opløste stoffer og finkornet materiale over store afstande med store miljøødelæggelser til følge.

Herudover vil der være brug for at rense det vand, som er blevet brugt i processen, hvor jernmineralerne adskilles fra de øvrige mineraler, og det vand, som naturligt strømmer ind i minen, før det udledes, hvilket er teknisk udfordrende. Vandet som strømmer

ind i minen består både af nedbør og smeltet indlandsis, som forekomsten ligger lige op af.

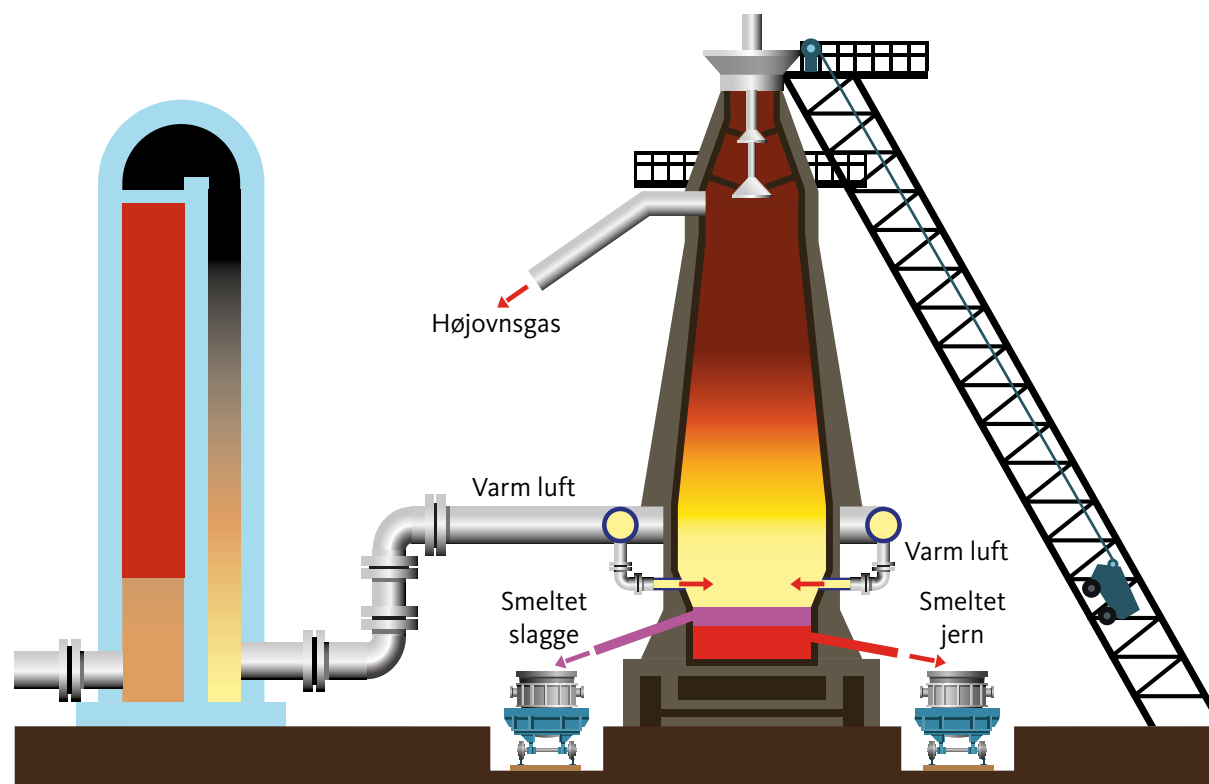
Før myndighederne giver tilladelse til etablering af en ny mine, skal selskabet levere en såkaldt VVM-redegørelse (Viden om Virkninger på Miljøet) med beskrivelse af de mulige miljøpåvirkninger samt detaljerede planer for, hvordan de vil håndtere miljøproblemer i forbindelse med deres konkrete projekt.

FRA JERNMALM TIL STÅL

Stål bruges til et utal af forskellige produkter, fra gryder, knive, gafler, beholdere, biler, bygningskonstruktioner, tog og skinner, broer og mange andre ting.

Til alle produkterne er der ønske om at stålet har helt særlige egenskaber; noget skal måske være rustfrit, andet skal være meget hårdt, mens noget tredje skal være nemt at svejse sammen. Derfor fremstilles der et utal af forskellige typer stål. Langt det vigtigste råstof til fremstilling af stål er jern, og råstof-fet til jern er jernmalm.

I 2018 blev der produceret ca. 1.500 mio. ton jernmalm i hele verden. En betydelig del af dette, blev fremstillet i højovne (figur 217).



Elleve lande dominerer produktionen med Australien, Brasilien og Kina som de største producenter (figur 210). Jernmalm, som typisk består af mineralerne hæmatit (Fe_2O_3) og magnetit (Fe_3O_4), skal forarbejdes for at blive til stål. Den første behandling af jernmalmen er en ristningsproces, hvor det

FIGUR 217. Det meste stål fremstilles ved at jernmalm smeltes i en ovn, hvor kul tilsættes som reduktionsmiddel, mens legeringsmetaller tilsættes for at give stålvaren de rigtige egenskaber. Efter Shutterstock.

rene jern adskilles fra oxidationen; denne reduktion af jernmalmineralerne sker ved at tilsætte kul, som reducerer jernoxiderne til metallet jern. Det rene jern kaldes råjern. Men råjern er ikke stærkt i sig selv og skal forarbejdes yderligere for at blive stærkt og for at få netop de egenskaber, som passer til de produkter, hvor det skal bruges. Det næste procestrin er stålfremstillingen, hvor råjernet tilsættes forskellige andre metaller, legeringsmetaller, som giver de ønskede stålegenskaber, lidt svarende til når man under madlavning tilsætter krydderier for at give maden en speciel smag.

Der er ikke nødvendigvis stålproduktion i de lande, som bryder jernmalm; det gælder eksempelvis Australien. Australien er en af verdens største producenter af jernmalm, men langt hovedparten af jernmalmen eksporteres til Kina, som fremstiller stålet, som efterfølgende eksporteres til bl.a. Australien, hvor det bruges i byggeri, industri osv. Kina er derimod et eksempel på et land som både har stor produktion af jernmalm og en stor stålindustri. Omvendt er der også mange lande, som ikke selv producerer jernmalm, men som forarbejder jernmalm til råjern og stål. Det gælder fx Tyskland, Japan og Sydko-

rea. Der foregår altså en betydelig international handel med jernmalm, i hvilken Kina er den dominerende spiller.

LEGERINGSMETALLERNE

Stål er en fællesbetegnelse for en jernlegering, der fremstilles ved at råjern blandes med andre metaller. De metaller der tilsættes, legeringsmetallerne, giver stålet nogle ganske bestemte egenskaber. Hvis en fabrik fx skal fremstille en gryde til induktionskomfur, er der brug for en type stål med høj varmeledningsevne til bunden, så gryden hurtigt bliver varm, den skal desuden være rustfri, hvilket kræver en anden type stål, og måske ønsker fabrikanten at undgå at håndtagene bliver varme og har derfor brug for en tredje type stål til håndtaget, som ikke må være varmeledende. Sådanne forskellige materialeegenskaber opnås ved at tilsætte legeringsmetaller som eksempelvis krom (Cr), vanadium (V) og nikkel (Ni).

- Cr: Øger slidstyrke, hårdhed og modvirker korrosion; bruges især til køkken- og hospitalsudstyr.
- V: Øger hårdhed og slidstyrke; bruges især til værktøj (bor) med stort slid.

- Ni: Øger styrken og modvirker korrosion; bruges især til motorer og turbineblade.

Legeringsmetallerne findes almindeligvis ikke sammen med jernmineralerne hæmatit og magnetit; de brydes i andre miner. Krom brydes som mineralet kromit, nikkel brydes ofte som mineralet pentlandit, og vanadium udvindes fra bl.a. magnetit og mineralet vanadit. Inden legeringsmetallerne kan tilsættes i stålprocessen, skal de altså brydes og forarbejdes, så de kommer på en kemisk form, som kan blandes med det smeltede råjern. For de tre nævnte legeringsmetaller vil krom typisk komme fra miner i Sydafrika og være forarbejdet der, vanadium udvindes især i Kina og Rusland og nikkel i Canada og Rusland. Efterfølgende er disse mineraler blevet forarbejdet til rene metaller. Da Kina er langt den største stålproducent, betyder det, at store mængder af disse legeringsmetaller skal fragtes flere tusinde kilometer til Kinas stålværker.

TRANSPORT AF JERNMALM OG STÅLRÅSTOFFER

Der findes ikke smelteværker i Grønland. Et jernmalmkoncentrat fra Isua vil derfor skulle transporteres fra Godthåbsfjorden til et

smelteværk, som kan omdanne jernmineraler til råjern. De fleste smelteværker ligger i lande i bl.a. Europa, Asien og Nordamerika, hvor der er et stort behov for stål, og jernmalmkoncentratet vil derfor skulle transporteres med skib over meget store afstande.

Det er store mængder, der skal flyttes. Med de foreliggende produktionsplaner på omkring 1 mio. ton om måneden vil dette svare til, at der skal lastes en til to meget store fragtskibe hver uge (figur 216. c).

I 2018 blev der som nævnt produceret ca. 1.500 mio. ton jernmalm, som skal fragtes frem til jern- og stålværker. Ofte er disse transporter interkontinentale og foregår med skib. Det gælder fx for jernmalm, som brydes i Australien og Brasilien og forarbejdes til stål i Kina, hvilket også vil være tilfældet, hvis der etableres en jernmine ved Isua i Grønland.

I mange tilfælde skal malmen først transporteres med tog fra minen ud til havnebyer, og ofte er det mineselskaberne selv, der etablerer disse jernbaner. Transportomkostningerne i forbindelse med minedrift er betydelige, og miner der ligger tæt på udskibningshavne har en konkurrencefordel i forhold til de mi-

ner, som ligger langt inde på kontinenterne, og som derfor har højere transportomkostninger.

Der produceres ca. 1.800 mio. ton stål i verden hvert år (2018). Det betyder, at der udover de ca. 1.500 mio. ton jernmalm også skal transporteres ca. 300 mio. ton skrot, samt ca. 1.000 mio. ton kul og legeringsmetaller frem til stålværkerne. I mange tilfælde ligger jernværker og stålværker ikke i nærheden af hinanden, og råjernet skal derfor transporteres endnu en gang.

Når jernmalmen til sidst er omdannet til eksempelvis rustfri stålplader, skal disse transporteres til de fabrikker, som skal bruge pladerne. Det kunne være en rustfri stålplade, produceret i Kina af jernmalm fra Brasilien, som skal bruges af en fabrik i Tyskland, som fremstiller rustfri køkkenvaske, som sælges i et dansk byggemarked, hvor vasken til sidst monteres i en dansk bolig. I dette eksempel vil stålpladen sikkert blive sendt med skib til en tysk havneby og videre med tog til stålvaskefabrikken. De mængder, der skal til det danske byggemarked, er små, så transporten vil antagelig foregå med tog eller lastbil.

Det kunne også være en stålplade til bilindu-

strien. Så vil pladen først blive sendt til galvanisering, hvor den påføres et tyndt lag zink for at gøre den rustfri. Herefter sendes den fx til en fabrik i Korea, som valser pladerne tynde og sælger pladerne til en bilfabrik i Japan, hvor de bruger dem til bilkarosserier inden bilerne sælges i Danmark.

Stålpladen kunne også blive valset til tynde plader i Rusland, hvorfra de efterfølgende sælges til Vestas i Danmark, som bruger pladerne til at fremstille vindmølleårer, der efterfølgende bliver solgt til fx England eller Spanien. Alle disse led i forarbejdningen af råstoffer til produkter omfatter næsten altid transport, og ofte over meget store afstande.

Transport af råstoffer og varer, som traditionelt foregår som internationale handler, kan kun lade sig gøre fordi varerne kan transporteres billigt. Men hensyn til den store CO₂-udledning, som transporten medfører, kan tvinge råstofindustrien til at omtænke de vanlige handelsmønstre og måske etablere nye værdikæder, som reducerer de mængder, der skal transporteres.

FREMSTILLING AF STÅL BIDRAGER TIL CO₂-BE- LASTNINGEN

Fremstilling af stål er en stor klimabelastning, som skyldes afbrændingen af det kul, der bruges som reduktionsmiddel. Denne del blev alene i 2017 beregnet til at være omkring 1,8 ton CO₂ for hvert ton produceret stål, hvilket svarer til ca. 8 % verdens af den samlede CO₂-udledning. Herudover kommer den CO₂-udledning, som skyldes transporten af jernmalm, skrot, kul og legeringsmetaller, og de efterfølgende transportled med halvfabrikata og færdigvarer. Denne del kan ikke opgøres globalt, men et gæt er, at det antageligt er af samme størrelsesorden som den del, der stammer fra produktionen.

Genanvendelse af kasserede stålprodukter, ofte kaldet skrot, giver en betydelig CO₂-besparelse i forhold til at lave nyt stål fra jernmalm og råjern. Desuden sparer genanvendelse på jordens ressourcer.

NØGLEBEGREBER

- Jern
- Jernmalm
- Jernmalmkoncentrat
- Hæmatit
- Magnetit
- BIF (Banded Iron Formation)
- Legeringsmetal
- Råjern
- Stål
- VVM

REFERENCER

Bekker, A., Slack, J. F., Planavsky, N., Krapež, B., Hofmann, A., Konhauser, K. O., & Rouxel, O. J. (2010). Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes. *Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists*, 105(3), 467–508.

Orbicon. (2013). *Isua iron ore project environmental impact assessment (EIA) prepared for London Mining Greenland A/S*. Orbicon A/S.

Posth, N. R., Konhauser, K. O., & Kappler, A. (2013). Microbiological processes in banded iron formation deposition. *Sedimentology*, 60(7), 1733–1754.

USGS. (2019). *Mineral Commodity Summaries 2019*. U.S. Geological Survey.