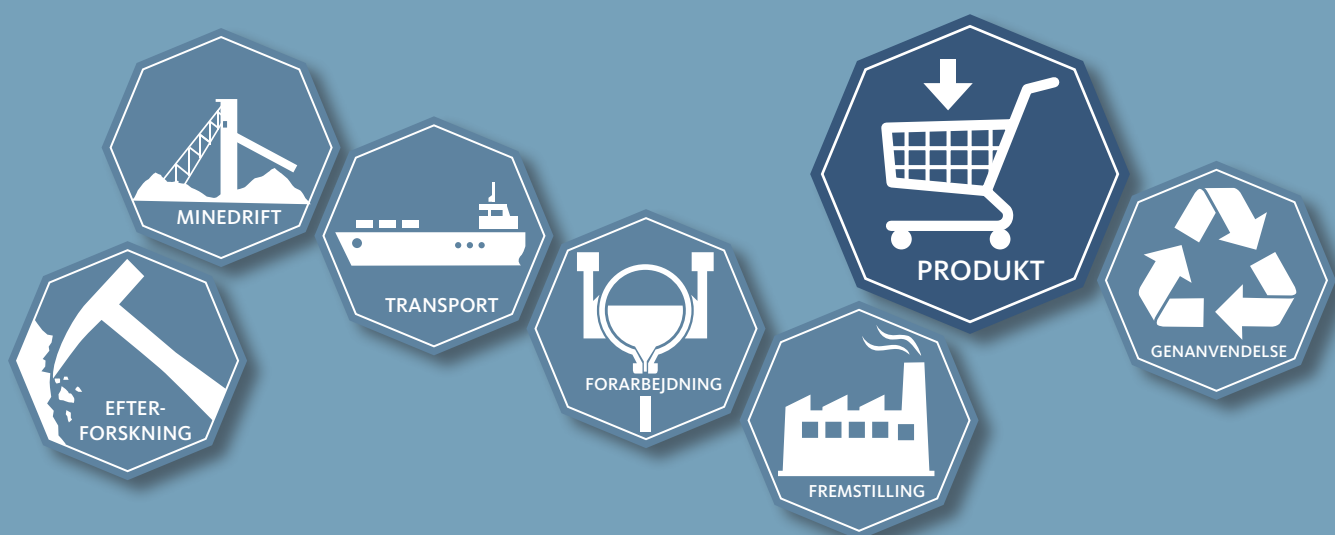


Dansk industris brug af mineralske råstoffer – beskrivelse af udvalgte forsyningskæder

Per Kalvig og Jakob Kløve Keiding

MiMa rapport 2023/4



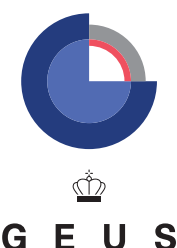
Dansk industris brug af mineralske råstoffer – beskrivelse af udvalgte forsyningskæder

Per Kalvig og Jakob Kløve Keiding

MiMa rapport 2023/4



VIDENCENTER FOR MINERALSKE RÅSTOFFER OG MATERIALER
DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND



Dansk industris brug af mineralske råstoffer – beskrivelse af udvalgte forsyningskæder

MiMa rapport 2023/4

Forfattere: Per Kalvig & Jakob Kløve Keiding

*Afdelingen for Kortlægning og Mineraler Råstoffer
De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland
Øster Voldgade 10
1350 København K*

Repro: GEUS

December 2023

ISBN: 978-87-7871-597-5

© Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) under
De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)
Energi-, Forsynings- og Klimaministeriet
Øster Voldgade 10
1350 København K

Indholdsfortegnelse

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Forkortelser | 7 |
| Ordforklaring | 9 |
| Figuroversigt | 10 |
| Tabeloversigt | 13 |
| Sammendrag | 16 |
| English Summary | 17 |
| Introduktion | 18 |
| Referencer..... | 19 |
| 1. Aluminium og bauxit | 20 |
| 1.1 Introduktion..... | 20 |
| 1.2 Anvendelser og sektorer | 20 |
| 1.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder | 21 |
| 1.4 Global forsyning | 21 |
| 1.4.1 Geologi | 21 |
| 1.4.2 Globale bauxitreserver | 22 |
| 1.4.3 Global aluminiumproduktion..... | 23 |
| 1.4.3.1 Selskaber som indgår i forsyningskæderne for bauxit, alumina og aluminium... 26 | |
| 1.4.4 Fremstilling af aluminium..... | 26 |
| 1.4.5 Klima- og miljøpåvirkning | 28 |
| 1.5 Handel | 30 |
| 1.5.1 Priser | 33 |
| 1.6 Det danske forbrug..... | 34 |
| 1.7 Perspektiver | 35 |
| 1.8 Referencer..... | 36 |
| 2. Bor | 38 |
| 2.1 Introduktion..... | 38 |
| 2.2 Anvendelser og sektorer | 38 |
| 2.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder | 39 |
| 2.4 Global forsyning | 39 |
| 2.4.1 Geologi | 39 |
| 2.4.2 Globale borreserver..... | 40 |
| 2.4.3 Global borproduktion | 41 |
| 2.4.3.1 Selskaber involveret i produktion og forarbejdning af bor..... | 42 |
| 2.4.4 Fremstilling af borprodukter..... | 44 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------|------------|
| 2.4.5 | Klima- og miljøpåvirkning | 45 |
| 2.5 | Handel | 46 |
| 2.5.1 | Priser | 48 |
| 2.6 | Det danske forbrug af bor og dets økonomiske betydning..... | 49 |
| 2.7 | Perspektiver..... | 50 |
| 2.8 | Referencer | 51 |
| 3. | Jern og stål | 53 |
| 3.1 | Introduktion | 53 |
| 3.2 | Anvendelser (end-use) og sektorer | 53 |
| 3.3 | Genanvendelse og substitution | 54 |
| 3.4 | Global forsyning..... | 55 |
| 3.4.1 | Geologi | 55 |
| 3.4.2 | Globale jernmalmsreserver | 55 |
| 3.4.3 | Global jernmalmsproduktion | 57 |
| 3.4.3.1 | Selskaber involveret i jernmalmsproduktion..... | 59 |
| 3.4.4 | Global stålproduktion | 60 |
| 3.4.4.1 | Selskaber involveret i stålproduktion | 62 |
| 3.4.4.2 | Kritiske råstoffer i stålproduktion | 63 |
| 3.4.5 | Klima og miljøpåvirkning..... | 65 |
| 3.5 | Handel | 66 |
| 3.5.1 | Priser | 75 |
| 3.6 | Det danske forbrug | 75 |
| 3.7 | Perspektiver..... | 77 |
| 3.8 | Referencer | 78 |
| 4. | Kobber | 80 |
| 4.1 | Introduktion | 80 |
| 4.2 | Anvendelser og sektorer..... | 80 |
| 4.3 | Genanvendelse og substitutionsmuligheder | 81 |
| 4.4 | Global forsyning..... | 82 |
| 4.4.1 | Geologi | 82 |
| 4.4.1.1 | Biprodukter | 83 |
| 4.4.2 | Globale kobberreserver | 83 |
| 4.4.3 | Global kobberproduktion | 84 |
| 4.4.4 | Fremstilling af kobberråvarer..... | 87 |
| 4.4.5 | Klima- og miljøpåvirkning | 89 |
| 4.5 | Handel | 90 |
| 4.5.1 | Priser | 97 |
| 4.6 | Det danske forbrug | 97 |
| 4.7 | Perspektiver..... | 98 |
| 4.8 | Referencer | 99 |
| 5. | Nikkel | 101 |
| 5.1 | Introduktion | 101 |
| 5.2 | Anvendelser og sektorer..... | 101 |
| 5.3 | Genanvendelse og substitutionsmuligheder | 102 |
| 5.4 | Global forsyning..... | 102 |
| 5.4.1 | Geologi | 102 |

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4.1.1 | Biprodukter | 104 |
| 5.4.2 | Globale nikkelereserver..... | 104 |
| 5.4.3 | Global nikkelerproduktion | 105 |
| 5.4.4 | Fremstilling af nikkelerprodukter..... | 108 |
| 5.4.5 | Klima- og miljøpåvirkning | 109 |
| 5.5 | Handel | 110 |
| 5.5.1 | Priser | 116 |
| 5.6 | Det danske forbrug..... | 117 |
| 5.7 | Perspektiver | 117 |
| 5.8 | Referencer..... | 119 |
| 6. | Vanadium | 121 |
| 6.1 | Introduktion..... | 121 |
| 6.2 | Anvendelser og sektorer | 121 |
| 6.3 | Genanvendelse og substitutionsmuligheder | 122 |
| 6.4 | Global forsyning | 122 |
| 6.4.1 | Geologi | 122 |
| 6.4.2 | Globale vanadiumreserver | 124 |
| 6.4.3 | Global vanadiumproduktion..... | 124 |
| 6.4.3.1 | Selskaber involveret i vanadiumminedrift..... | 125 |
| 6.4.4 | Fremstilling af vanadium | 126 |
| 6.4.5 | Klima- og miljøpåvirkning | 126 |
| 6.5 | Handel | 127 |
| 6.5.1 | Priser | 130 |
| 6.6 | Det danske forbrug..... | 130 |
| 6.7 | Perspektiver | 132 |
| 6.8 | Referencer..... | 132 |
| 7. | Wolfram | 134 |
| 7.1 | Introduktion..... | 134 |
| 7.2 | Anvendelser og sektorer | 134 |
| 7.3 | Genanvendelse og substitutionsmuligheder | 135 |
| 7.4 | Global forsyning | 135 |
| 7.4.1 | Geologi | 135 |
| 7.4.1.1 | Mineraler og biprodukter | 136 |
| 7.4.2 | Globale wolframreserver | 137 |
| 7.4.3 | Global wolframproduktion..... | 137 |
| 7.4.3.1 | Selskaber med aktiviteter i produktion og forarbejdning af wolfram | 138 |
| 7.4.4 | Fremstilling af wolfram | 140 |
| 7.4.5 | Klima- og miljøpåvirkning | 141 |
| 7.5 | Handel | 142 |
| 7.5.1 | Priser | 147 |
| 7.6 | Det danske forbrug af wolfram og dets betydning for dansk økonomi..... | 147 |
| 7.7 | Perspektiver | 149 |
| 7.8 | Referencer..... | 149 |
| 8. | Zink | 151 |
| 8.1 | Introduktion..... | 151 |
| 8.2 | Anvendelser og sektorer | 151 |

| | | |
|---------|------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.3 | Genanvendelse og substitutionsmuligheder | 152 |
| 8.4 | Global forsyning..... | 152 |
| 8.4.1 | Geologi | 152 |
| 8.4.1.1 | Zinkminerale, biprodukter og kompanionmetaller | 152 |
| 8.4.2 | Globale zinkreserver..... | 152 |
| 8.4.3 | Global zinkproduktion | 154 |
| 8.4.3.1 | Selskaber involveret i produktion og forarbejdning af zink | 156 |
| 8.4.4 | Fremstilling af zinkprodukter..... | 156 |
| 8.4.5 | Klima- og miljøpåvirkning | 158 |
| 8.5 | Handel | 159 |
| 8.5.1 | Priser | 163 |
| 8.6 | Det danske forbrug | 163 |
| 8.7 | Perspektiver..... | 165 |
| 8.8 | Referencer | 165 |

Forkortelser

| | |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AMT | Ammonium metatungstat |
| APT | Ammonium paratungstat |
| BF | Blast Furnace |
| BIF | Båndede jernformationer |
| BOF | Basic Oxygen Furnace |
| CCS | Carbon Capture and Storage (fangst og lagring af CO ₂) |
| CIF | Carriage and Insurance Paid to a given harbour |
| CIS | Sammenslutning af følgende lande: Armenien, Azerbajjan, Belarus, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Moldova, Rusland, Tadjikistan og Uzbekistan |
| CO ₂ e | Carbon dioxide equivalent; omfatter alle drivhusgasser |
| DRI | Direct Reduction of Iron |
| EAF | Electric Arc Furnace |
| EI | Economic Importance (anvendt i kritikalitetsvurderinger) |
| EO _L -RIR | End of Life Recycling Input Rate |
| EO _L -RR | End of Life Recycling Rate |
| EV | Electrical vehicle |
| fob-priser | Free On Board priser (leverandøren betaler de lokale omkostninger) |
| GHG | Green House Gas (drivhusgasser) |
| IOA | Iron-oxide-apatite |
| IOCG | Iron-oxide-copper-gold |
| ISA | International Seabed Authority |
| HPA | High Purity Aluminium |
| HPAL | High Pressure Acid Leach |
| HSLA | (vanadium in) High Strength Low Alloy (steel) |
| HRC | Hot Rolled Coil |
| Kton | Kiloton |
| Li-ion | Lithium ion |
| LME | London Metal Exchange |
| Mt | Millioner ton |
| n.a. | Not available |
| NdFeB | Neodymium-jern-bor (legering anvendt til magneter) |
| NPI | Nickel Pig Iron |
| PGM | Platin-gruppe-metaller (Platin Group Metals) |
| PM | Permanent magnet |
| REE | Sjældne jordartsmetaller (Rare Earth Elements) |
| RIR | Recycling Input Rate |
| RoW | Rest of the World (lande udenfor Kina) |
| SHFE | Shanghai Futures Exchange |
| SI-EI | Substitution Index – Economic Importance |
| SI-SR | Substitution Index – Supply Risk |
| SRE | Supply Risk Exploitation |
| SRP | Supply Risk Processing |
| TFG | Textile fiber glass |
| TFT LCD | Thin-film-transistor liquid crystal display |
| TMP | Tungsten Metal Powder |
| UAE | United Arab Emirates |

| | |
|-------|----------------------------------------------|
| USGS | United States Geological Survey |
| USMCA | Toldunion bestående af USA, Mexico og Canada |
| VFRB | Vanadium Redox Flow Batterier |
| WC | Wolframkarbid |
| wt. % | Weight percent (vægtprocent) |

Ordforklaring

| | |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Austenitisk stål | Højt indhold af legeringsmetallerne nikkel og krom |
| Crude steel | Nyt stål/råstål |
| Levetiden af geologiske reserver | Det antal år som de påviste reserver vil række til med et givet forbrug/år |

Figuroversigt

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figur 1-1 | Sektorfordeling af aluminiumforbruget i 2020 og forventet fordeling i 2030 | 21 |
| Figur 1-2 | Oversigt over nogle af verdens største bauxitforekomster, fordelt på karst- og lateritbauxit. | 22 |
| Figur 1-3 | Fordeling af kendte større bauxitreserver. | 23 |
| Figur 1-4 | Oversigt over produktion af bauxitmalm i de ti største produktionslande i 2021 | 25 |
| Figur 1-5 | Oversigt over produktion af aluminium i de ti største produktionslande i 2021. | 26 |
| Figur 1-6 | Oversigt over historisk produktion af bauxit, alumina og aluminium i perioden 2000-2020 | 27 |
| Figur 1-7 | Generisk procesdiagram for fremstilling af alumina og aluminium | 28 |
| Figur 1-8 | Sankey-diagram for handel med bauxitmalm i 2020. | 32 |
| Figur 1-9 | Sankey-diagram for handel med aluminiumoxid/alumina i 2020 | 33 |
| Figur 1-10 | Sankey-diagram for handel med råaluminium i 2020 | 33 |
| Figur 1-11 | Prisudvikling for aluminium i perioden 2000-2020. | 34 |
| Figur 1-12 | Aluminium og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvækst som funktion af forsyningsrisikoen i Danmark | 35 |
| Figur 1-13 | Aluminiumforbruget fordelt på sektorer i 2020 og 2030. | 36 |
| Figur 2-1 | Anvendelsesfordelingen af bor i 2018. | 39 |
| Figur 2-2 | Oversigt over historisk produktion af borater i perioden 2000-2021 | 41 |
| Figur 2-3 | Oversigt over nogle af verdens største borproducerende land. | 42 |
| Figur 2-4 | Generisk procesdiagram for fremstilling af borprodukter. | 45 |
| Figur 2-5 | Sankey-diagram for eksport-import af borax i 2020. | 47 |
| Figur 2-6 | Sankey-diagram for eksport-import af borat i 2020. | 47 |
| Figur 2-7 | Sankey-diagram for eksport-import af boroxid og borsyre i 2020. | 48 |
| Figur 2-8 | Prisudvikling for bor i perioden 2000-2020 | 49 |
| Figur 2-9 | Bor og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvækst som funktion af forsyningsrisikoen. | 50 |
| Figur 3-1 | Anvendelsesområder for stål i procent i 2020. | 54 |
| Figur 3-2 | Forventninger til efterspørgslen af jernskrot frem mod 2050 | 55 |
| Figur 3-3 | Geografisk fordeling af de største jernmalmsreserver i 2021 | 57 |
| Figur 3-4 | Jernmalmsproduktion i perioden 2000-2021. | 58 |
| Figur 3-5 | Geografisk fordeling af jernmalmsproduktionen i 2022. | 58 |
| Figur 3-6 | Geografisk fordeling af råstålproduktionen i 2022. | 59 |
| Figur 3-7 | Råstålproduktion i Mt i perioden 1970-2022. | 61 |
| Figur 3-8 | Generisk procesdiagram for fremstilling af jern- og stålprodukter | 62 |
| Figur 3-9 | Sankey-diagram for global handel med jernmalm i 2020. | 72 |
| Figur 3-10 | Sankey-diagram for global handel med pig iron i 2020. | 73 |
| Figur 3-11 | Sankey-diagram for global handel med jern- og stålskrot i 2020. | 73 |
| Figur 3-12 | Sankey-diagram for global handel ferrolegeringer i 2020. | 74 |
| Figur 3-13 | Sankey-diagram for global handel med varmvalset jern i 2020. | 74 |
| Figur 3-14 | Sankey-diagram for global handel med valset rustfrit stål i 2020 | 75 |
| Figur 3-15 | Prisvariationer for jernmalm, koks og jernskrot i perioden 2008-2022. | 76 |
| Figur 3-16 | Historiske priser for stålprodukterne hot rolled coil og valset stål. | 76 |
| Figur 3-17 | Jern og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvækst som funktion af forsyningsrisikoen i Danmark. | 77 |
| Figur 4-1 | De vigtigste anvendelsesområder for kobber i 2021. | 81 |
| Figur 4-2 | Oversigt over forekomster af kobber. | 82 |

| | | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figur 4-3 | Oversigt over kobberreserverne i de ti lande, der i 2021 havde de største reserver.. | 84 |
| Figur 4-4 | Mineralefterforskningsaktiviteter for kobber, budgetter, resulterende antal fund og omkostninger til nye fund | 84 |
| Figur 4-5 | Oversigt over historisk produktion af kobber i perioden 2000-2021..... | 85 |
| Figur 4-6 | Produktion af kobbermalm i 2021 i de ti største produktionslande..... | 86 |
| Figur 4-7 | Generisk procesdiagram for fremstilling af kobber..... | 89 |
| Figur 4-8 | Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for kobbermalm-koncentrat..... | 94 |
| Figur 4-9 | Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 udfældet kobber.. | 94 |
| Figur 4-10 | Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for råkobber..... | 95 |
| Figur 4-11 | Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for raffineret kobber.. | 95 |
| Figur 4-12 | Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for HS4 74.08 kobber wire..... | 96 |
| Figur 4-13 | Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for kobberskrot... .. | 96 |
| Figur 4-14 | Kobberpris for perioden 2000-2021..... | 97 |
| Figur 4-15 | Kobber og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvæksten som funktion af forsyningsrisikoen..... | 98 |
| Figur 5-1 | Global fordeling af nikkels industrielle anvendelser i 2022..... | 102 |
| Figur 5-2 | Oversigt over nogle af de største geologiske nikkelforekomster..... | 103 |
| Figur 5-3 | Geografisk oversigt over de ti lande der har de største registrerede nikkelreserver.. | 105 |
| Figur 5-4 | Oversigt over historisk produktion af nikkelmalm (opgjort som nikkelindhold) i perioden 2000-2022 | 106 |
| Figur 5-5 | Geografisk oversigt over de ti lande der udvandt mest nikkelmalm i 2021..... | 108 |
| Figur 5-6 | Generisk procesdiagram for produktion af nikkel og nikkelprodukter ved henholdsvis traditionel pyrometallurgisk proces og hydrometallurgisk proceser..... | 109 |
| Figur 5-7 | Sankey-diagram for handel med nikkelmalm i 2020..... | 114 |
| Figur 5-8 | Sankey-diagram for handel med nikkelmatte i 2020..... | 114 |
| Figur 5-9 | Sankey-diagram for handel med rånikkel i 2020..... | 115 |
| Figur 5-10 | Sankey-diagram for handel med nikkelbarrer i 2020..... | 115 |
| Figur 5-11 | Sankey-diagram for handel med nikkelskrot i 2020..... | 116 |
| Figur 5-12 | Prisudvikling for nikkel i perioden 2000-2022..... | 117 |
| Figur 5-13 | Nikkel og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvæksten som funktion af forsyningsrisikoen..... | 118 |
| Figur 6-1 | Global anvendelse af vanadium opgjort i 2023 | 121 |
| Figur 6-2 | Oversigt over nogle af de største vanadiumforekomster fordelt på geologiske typer.. | 123 |
| Figur 6-3 | Oversigt over historisk produktion af primær vanadium i perioden 2000-2022..... | 124 |
| Figur 6-4 | Generisk procesdiagram for vanadium..... | 127 |
| Figur 6-5 | Sankey-diagram for handel med vanadiumoxider og -hydroxider i 2020..... | 129 |
| Figur 6-6 | Sankey-diagram for handel med ferrovanadium i 2020..... | 130 |
| Figur 6-7 | Prisudvikling for vanadiumpentoxid (V ₂ O ₅) og ferrovanadium (FeV-80) i perioden 2000-2022..... | 131 |
| Figur 6-8 | Vanadium og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvæksten som funktion af forsyningsrisikoen..... | 131 |
| Figur 7-1 | Fordeling af wolfram i forhold til produkttyper og industriel anvendelse | 135 |
| Figur 7-2 | Oversigt over nogle af de største geologiske forekomster af wolfram, fordelt på type.. | 136 |
| Figur 7-3 | Oversigt over de ti lande som udvinder mest wolfram | 138 |

| | | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figur 7-4 | Oversigt over historisk produktion af wolfram (WO_3) i perioden 2000-2022..... | 138 |
| Figur 7-5 | Generisk procesdiagram for fremstilling af wolfram..... | 142 |
| Figur 7-6 | Sankey-diagram for global handel med wolframalm i 2020..... | 146 |
| Figur 7-7 | Sankey-diagram for global handel med wolframpulver i 2020..... | 146 |
| Figur 7-8 | Sankey-diagram for global handel med wolframskrot i 2020..... | 147 |
| Figur 7-9 | Prisudvikling i Kina i perioden 2011-2022 for wolframmineralkoncentrat (65 % WO_3), APT og wolframkarbid.. | 148 |
| Figur 7-10 | Wolfram og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvæksten som funktion af forsyningsrisikoen..... | 148 |
| Figur 8-1 | Fordeling af zink i forhold til industrielle sektorer i 2020..... | 151 |
| Figur 8-2 | Oversigt over de lande, der har de største reserver af zinkalm..... | 153 |
| Figur 8-3 | Oversigt over nogle af verdens største zinkproducerende land.. | 154 |
| Figur 8-4 | Oversigt over historisk zinkproduktion fra miner i perioden 2000-2022..... | 155 |
| Figur 8-5 | Generisk procesdiagram for produktion af zinkprodukter | 158 |
| Figur 8-6 | Sankey-diagram for handel med zinkalm i 2020..... | 162 |
| Figur 8-7 | Sankey-diagram for handel med råzink i 2020 | 162 |
| Figur 8-8 | Sankey-diagram for handel med zinkskrot i 2020..... | 163 |
| Figur 8-9 | Prisudvikling for zink i perioden 2000-2020..... | 164 |
| Figur 8-10 | Zink og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvækst som funktion af forsyningsrisikoen i Danmark. | 164 |

Tabeloversigt

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1-1 | Kommercielt vigtige aluminiumminerale | 22 |
| Tabel 1-2 | Oversigt over globale bauxitreserver i 2022 | 23 |
| Tabel 1-3 | Produktionen af bauxit i 2021 fordelt på de største producentlande | 24 |
| Tabel 1-4 | Produktionen af alumina i 2021 fordelt på de største producentlande | 24 |
| Tabel 1-5 | Produktionen af aluminium (Mt) fordelt på de største producentlande | 25 |
| Tabel 1-6 | Oversigt over nogle af de største bauxitminer og/eller aluminaproducenter. Produktion angivet for 2022 | 29 |
| Tabel 1-7 | Oversigt over varekoder for en række almindelige handelsvarer i forsyningskæderne for aluminium | 30 |
| Tabel 1-8 | De vigtigste eksport- og importlande for bauxit i 2020 | 31 |
| Tabel 1-9 | De vigtigste eksport- og importlande for alumina i 2020 | 31 |
| Tabel 1-10 | De vigtigste eksport- og importlande for råaluminium i 2020 | 32 |
| Tabel 2-1 | Kommercielt vigtige bormineraler | 40 |
| Tabel 2-2 | Verdens borreserver i 2022 opgjort for seks lande | 40 |
| Tabel 2-3 | Produktionen af boratminerale | 42 |
| Tabel 2-4 | Oversigt over de betydeligste producenter af primære borprodukter | 43 |
| Tabel 2-5 | Oversigt over forbrug af råstof, vand og energi til fremstilling af 1 ton raffineret borprodukt | 46 |
| Tabel 2-6 | Vigtige kommercielle borprodukter, med angivelse af borindhold | 46 |
| Tabel 2-7 | International handel med udvalgte borprodukter i 2020 | 46 |
| Tabel 2-8 | Varekøb foretaget af primære og sekundære sektorer, hvor MiMa har identificeret indhold af bor | 49 |
| Tabel 3-1 | Oversigt over de mest anvendte mineraler til fremstilling af jern og stål | 56 |
| Tabel 3-2 | Udviklingen i jernmalmsreserver fra 2000 til 2021 | 56 |
| Tabel 3-3 | Geografisk og kapacitetsmæssig oversigt over den vestlige verdens 20 største jernmalmsproducenter | 60 |
| Tabel 3-4 | De 40 største stålsmelteværker og produktion i 2022 | 63 |
| Tabel 3-5 | Oversigt over hyppigt anvendte ferrolegeringer og deres funktion | 64 |
| Tabel 3-6 | Oversigt for seks udvalgte varekategorier, HS-koder, tabeller og figurer for de vigtigste handelsrelationer mellem landene | 66 |
| Tabel 3-7 | Oversigt over handelskoder for jern- og stålvarer med angivelse af værdi (2020) | 67 |
| Tabel 3-8 | Oversigt over global handel med jernmalm i 2020 | 68 |
| Tabel 3-9 | Oversigt over handel med pig iron i 2020 | 68 |
| Tabel 3-10 | Oversigt over global handel med jern- og stålskrot i 2020 | 69 |
| Tabel 3-11 | Handel med ferrolegeringer i 2020 | 70 |
| Tabel 3-12 | Handel med ferrolegeringer i 2020, med angivelse af de største eksport- og importlande | 70 |
| Tabel 3-13 | Oversigt over handel med varmvalset jern i 2020 | 71 |
| Tabel 3-14 | Oversigt over handel med valset rustfrit stål i 2020 | 72 |
| Tabel 4-1 | Kommercielt vigtige kobberminerale | 83 |
| Tabel 4-2 | Verdens kobberreserver opgjort for 13 lande | 85 |
| Tabel 4-3 | Global produktion af kobbermalm i 2021 | 86 |
| Tabel 4-4 | Oversigt over de 20 størst producerende kobberminer i 2021 | 87 |
| Tabel 4-5 | Eksempler på større investeringsselskabers ejerandele i de kobberproducerende selskaber | 88 |
| Tabel 4-6 | Oversigt over energiforbrug til fremstilling af kobber | 90 |

| | | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 4-7 | De vigtigste kobbervaregrupper og tilhørende eksportværdier for 2020. | 91 |
| Tabel 4-8 | De fire største eksportlande og deres tre største eksportlande for kobbermalm-koncentrat i 2020 | 91 |
| Tabel 4-9 | De fire største eksportlande og deres største aftagerlande for udfældet kobber i 2020.. | 92 |
| Tabel 4-10 | De fire største eksportlande og deres største aftagerlande for råkobber i 2020. | 92 |
| Tabel 4-11 | De fire største eksportlande og deres største importlande for Refined Copper i 2020 | 92 |
| Tabel 4-12 | De fire største eksportlande og deres største importlande for HS4 74.08 Copper Wire i 2020. | 93 |
| Tabel 4-13 | De fire største eksportlande og deres største importlande for Copper Scrap i 2020 | 93 |
| Tabel 5-1 | Kommercielt vigtige nikkelminerale..... | 104 |
| Tabel 5-2 | Verdens nikkelreserver i 2021 opgjort i 9 lande | 105 |
| Tabel 5-3 | Global produktion af nikkel i 2021. | 106 |
| Tabel 5-4 | Oversigt over nogle af de største nikkelminer og -selskaber | 107 |
| Tabel 5-5 | Oversigt over energiforbrug og CO ₂ -belastning for produktion af forskellige nikkel-råvarer | 110 |
| Tabel 5-6 | De vigtigste råstoffer og HS-varekoder for nikkelforsyningskæderne, med angivelse af handelsværdi i 2020 | 111 |
| Tabel 5-7 | De fire største eksportlande og deres tre største aftagerlande for nikkelmalm i 2020 | 111 |
| Tabel 5-8 | De fire største eksportlande og deres største aftagerlande for nikkelmatte i 2020.. | 112 |
| Tabel 5-9 | De fire største eksportlande og deres største aftagerlande for rånikkel i 2020 | 112 |
| Tabel 5-10 | De fire største eksportlande og deres største importlande nikkelbarrer i 2020 | 113 |
| Tabel 5-11 | De fire største eksportlande og deres største importlande for nikkelskrot i 2020.. .. | 113 |
| Tabel 6-1 | Kommercielt vigtige vanadiumminerale. | 123 |
| Tabel 6-2 | Mest anvendte materialer til udvinding af vanadium fra sekundære ressourcer. ... | 123 |
| Tabel 6-3 | Produktionen af primær vanadium i ton fordelt på de største producentlande | 125 |
| Tabel 6-4 | Oversigt over miner/smeltværker, som bryder vanadium som enten hoved- eller biprodukt. | 125 |
| Tabel 6-5 | Oversigt over efterforskningsprojekter, som bryder vanadium som enten hoved- eller biprodukt. | 126 |
| Tabel 6-6 | Oversigt over handlede produkter af vanadium i 2020, med angivelse af handelsværdi og varekode. | 128 |
| Tabel 6-7 | De vigtigste eksport- og importlande for vanadiumoxider og -hydroxider i 2020... .. | 128 |
| Tabel 6-8 | De vigtigste eksport- og importlande for ferrovanadium | 129 |
| Tabel 7-1 | Typiske wolframminerale, lødighed og potentielle biprodukter fordelt for nogle af de vigtigste geologiske typer med wolfram. | 136 |
| Tabel 7-2 | Verdens wolframreserver i ton WO ₃ 2001, 2010 og 2022. | 137 |
| Tabel 7-3 | Wolframproduktion i ton | 139 |
| Tabel 7-4 | Oversigt over store miner, som bryder wolfram som enten hoved- eller biprodukt.. .. | 139 |
| Tabel 7-5 | Ufuldstændig oversigt over efterforsknings- og produktionsprojekter..... | 140 |
| Tabel 7-6 | Oversigt over større virksomheder involveret i fremstilling af wolframprodukter... .. | 141 |
| Tabel 7-7 | Oversigt over handlede produkter af wolfram med angivelse af handelsværdi og varekode. | 143 |
| Tabel 7-8 | De vigtigste eksport- og importlande for wolfram malm og -koncentrat i 2020..... | 144 |
| Tabel 7-9 | De vigtigste eksport- og importlande for wolframpulver i 2020 | 144 |

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 7-10 | De vigtigste eksport- og importlande for wolfram og artikler heraf i 2020 | 145 |
| Tabel 7-11 | De vigtigste eksport- og importlande for wolframfilamenter i 2020..... | 145 |
| Tabel 7-12 | De vigtigste eksport- og importlande for wolframskrot i 2020..... | 145 |
| Tabel 8-1 | Verdens zinkreserver opgjort for de 10 lande med største reserver | 153 |
| Tabel 8-2 | Produktionen af zink (ton) fordelt på de største producentlande..... | 155 |
| Tabel 8-3 | Oversigt over nogle af største zinkminer (2020)..... | 156 |
| Tabel 8-4 | Oversigt over efterforsknings- og produktionsprojekter | 157 |
| Tabel 8-5 | Input og CO ₂ -udledning ved fremstilling af 1 ton raffineret zinkprodukt | 159 |
| Tabel 8-6 | Oversigt over varekoder for en række større handelsvarer i forsyningskæderne for zink, med angivelse af værdi i 2020..... | 159 |
| Tabel 8-7 | De vigtigste eksport- og importlande for zinkmalm i 2020..... | 160 |
| Tabel 8-8 | De vigtigste eksport- og importlande for råzink i 2020 | 161 |
| Tabel 8-9 | De vigtigste eksport- og importlande for zinkskrot i 2020..... | 161 |

Sammendrag

Som konsekvens af øget global befolkning og købekraft oplever Verden en hurtig voksende efterspørgsel på mineralske råstoffer, og specielt med særlig stor vækst på en række specialråstoffer knyttet til den grønne omstilling. De store vækstrater og utilstrækkelig infrastruktur til forarbejdning af råstofferne, i kombination med geopolitiske konflikter, udfordrer forsyningsikkerhederne for mineralske råstoffer og dermed de nationale økonomier. I Danmark, hvor forbruget helt overvejende er udtrykt i forbrug af forarbejdede mineralske råvarer og færdige produkter heraf, er udfordringerne for forsyningskæderne derfor mindre transparente, men tilsvarende alvorlige.

Nærværende rapport, som er en kvalitativ analyse af otte råstoffers forsyningskæder (aluminium/bauxit, bor, jern/stål, kobber, nikkel, vanadium, wolfram og zink) påpeger nogle af de forhold i forsyningskæderne, som kan få betydning for forsyningsituationen frem mod 2030. Disse råstoffer er udvalgt, da de har betydning for dansk industri.

De forsyningsmæssige udfordringer for de undersøgte råstoffer varierer, men er generelt kendetegnet ved at være komplekse, med mange specialiserede led i forsyningskæderne, utilstrækkelig forsyningskædeinfrastruktur, begrænset geografisk diversitet og tendenser til monopoliseringer af hele eller vitale dele af forsyningskæderne. Ingen af råstofferne kan karakteriseres som 'forsynings sikre'.

De geologiske reserver for de otte råstoffer er ikke umiddelbart en begrænsende faktor. Men lange udviklingstider fra efterforskning til nye aktive miner og udvikling og opbygning af forretningsmodeller for de mange nødvendige led af forarbejdende industrier betyder, at forsyningskæderne kun vanskeligt vil kunne opfylde de efterspørgselsforventninger, der er frem mod 2030 og 2040. Etablering af en stabil råstofforsyning – også til den grønne omstilling – forudsætter hurtig og diversificeret kapacitetsopbygning af alle led i forsyningskæderne fra mineralefterforskning, minedrift, råstofforarbejdninger og til råvarefremstilling. Sådanne nødvendige udbygninger er ikke under etablering i lande uden for Kina.

English Summary

As a consequence of the increased global population and purchasing power, the world is experiencing a rapid growth in demand for mineral resources, particularly with significant growth in a range of specialty raw materials associated with the green transition. The high growth rates and inadequate infrastructure for processing these raw materials, combined with geopolitical conflicts, challenge the supply security of mineral resources and consequently national economies. In Denmark, where consumption is predominantly expressed in the consumption of processed mineral raw materials and finished products thereof, the challenges for supply chains are less transparent but equally serious.

This report, which is a qualitative analysis of eight raw material supply chains (aluminum/bauxite, boron, iron/steel, copper, nickel, vanadium, tungsten, and zinc), highlights some of the conditions in the supply chains that may impact the supply situation leading up to 2030. These raw materials are selected because they are relevant to the Danish industry.

The supply challenges for the examined raw materials vary but are generally characterized by their complexity, with many intricate links in the supply chains, inadequate supply chain infrastructure, limited geographic diversity, and tendencies towards monopolization of entire or vital parts of the supply chains. None of the raw materials can be characterized as 'supply secure.'

The geological reserves for the eight raw materials are not an immediate limiting factor. However, long lead times from exploration to new active mines and the development and establishment of business models for the many necessary links in processing industries mean that supply chains will struggle to meet the demand expectations leading up to 2030 and 2040. Establishing a stable raw material supply, including for the green transition, requires rapid and diversified capacity building in all links of the supply chains, from mineral exploration and mining to raw material processing and production. Such necessary expansions are not underway in countries outside of China.

Introduktion

Den globale økonomiske vækst og voksende befolkningstal afspejler sig i et stærkt stigende forbrug af mineralske råstoffer. De mineralske råstoffer, som er forudsætning for fremstilling af efterspurgte varer, fremskaffes igennem komplicerede forsyningskæder, omfattende mineralefterforskning, minedrift og forarbejdninger af mineralerne til råvarer, og udvikles i forhold til udbud og efterspørgsel, hvor særligt nye teknologier påvirker efterspørgslen. For eksempel har teknologier knyttet til elektronik, kommunikation og datatransmissioner siden 1990'erne udviklet en efterspørgsel på råstoffer, der ikke tidligere har været i fokus (fx gallium, platingruppemetaller (PGM), selen, siliconmetal, sjældne jordartsmetaller (REE), tantal m.fl.). Efterfølgende har internationale og nationale klimapolitiske 2030- og 2050-mål for reduktion af GHG-udslip bevirket, at en global omstilling til vedvarende energikilder i hele samfundsstrukturen er under implementering. Midlerne hertil er især solceller, vindmøller, batterier/energilagring og eltransmission; denne udvikling har accelereret efterspørgslen på en række råstoffer. Det forventes eksempelvis, at behovet for kobber allerede i 2030 vil være øget med 40 % og nikkel med 100 %; tilsvarende er der også forventning om øget behov for mange andre nøgleråstoffer til den grønne omstilling (Hund *et al.* 2020, IEA 2021, Watari *et al.* 2020). Så kraftig opskalering i produktion af mineralske råstoffer som dermed fordres, er ikke tidligere set i historien og den nødvendige hastige vækst er i misforhold til det faktum, at igangsætning af nye miner typisk tager minimum 10 år, og ofte længere. I tillæg til disse udfordringer for forsyningskæderne for mineralske råstoffer er en række geopolitiske forhold med krige og politisk ustabile lande og ikke mindst Kinas dominans i mange af forsyningskæderne. Kina har en monopollignende status, hvilket skyldes politiske industristrategier, egne råstofressourcer, langtidsaftaler med udenlandske råstofleverandører og udvikling og opbygning af komplette forsyningskæder for en lang række nøgleråstoffer. EU og en række lande monitorer regelmæssigt denne udvikling (kritikalitetsanalyser), og EU vedtog november 2023 en råstofforordning (European Critical Raw Materials Act) (EC 2023b) med henblik på at opbygge kompetencer og infrastruktur for forsyninger af mineralske råvarer.

På denne baggrund har Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) på opdrag fra Erhvervsstyrelsen kortlagt dansk industris forbrug af mineralske råstoffer og deres råstofafhængigheder. Undersøgelsen er udført som to dele: i) en kortlægning af mineralske råstoffers kritikalitet i Danmark (Clausen *et al.* 2023), og ii) nærværende rapport, som er en kvalitativ analyse til belysning af årsager til og risici for evt. råstofkritikalitet i dansk industri. Den kvantitative analyse blev publiceret sommeren 2023 (Clausen *et al.* 2023) mens den kvalitative råstofanalyse præsenteres her.

Denne kvalitative analyse giver en kortfattet gennemgang af otte råstoffers forsyningskæder (bauxit/aluminium, bor, jern og stål, kobber, nikkel, vanadium, wolfram, zink), herunder påpegning af forventede forsyningsudfordringer frem mod 2030. Disse råstoffer er udvalgt, da de enten indgår i resultaterne i den kvantitative analyse af økonomisk vigtige råstoffer for dansk økonomi (Clausen *et al.* 2023), eller fordi de kan blive forsyningsmæssigt udfordret i de kommende år. Blandt de udvalgte råstoffer har EU Kommissionen i 2023 (EC 2023a) vurderet aluminium, bor, vanadium og wolfram som kritiske råstoffer, samt vurderet kobber og nikkel som strategiske råstoffer. Råstofferne sjældne jordartsmetaller, kobolt og lithium er ikke beskrevet i nærværende rapport, da de er behandlet separat i henholdsvis Kalvig (2021) og Tan & Keiding (2023). Selv om PGM er vurderet som kritisk for dansk økonomi (Clausen *et al.* 2023), er denne råstofgruppe ikke vurderet i nærværende rapport, da MiMa allerede har igangsat analyse herom, som publiceres i 2024.

Analysen er udarbejdet på baggrund af offentligt tilgængelige informationer, som er indsamlet til formålet, og giver summariske beskrivelser af råstofferne og deres forsyningskæder for de mest dominerende anvendelsesområder, med henblik på at pege på de vigtigste årsager til råstofkритikaliteten. Der er tilstræbt en ensartet gennemgang og præsentation af data for alle otte udvalgte råstoffer, det bør dog noteres, at der er forskelle i datagrundlag og -dækning, samt at specifikke forhold gør sig gældende for enkelte råstoffer, hvilket afspejler sig i lidt varierende kapitelopbygning.

Det skal ligeledes bemærkes, at analyserne, trods det danske fokus, altdominerende beskriver de overordnede globale tendenser på både udbuds- og efterspørgselsiden. Forhold for betydning for dansk økonomi, baseret på resultater i første delrapport (Clausen *et al.* 2023), er kort sammenfattet, ligesom det danske forbrug af de respektive undersøgte råstoffer er kortfattet belyst. Det vil i analysen ikke være muligt at knytte råstofforbruget direkte til specifikke danske virksomheder. Det globale perspektiv er afgørende, idet danske industrivirksomheder primært er 'komponent'-industrier, der fremstiller varer på basis af importerede komponenter eller råmaterialer. Det betyder, at hvad angår halvfabrikata og komponenter, er forsyningsudfordringerne for de danske virksomheder globale og almindeligvis ikke transparente. Rapporten er udarbejdet med henblik på at tilvejebringe information om forsyningsmæssige forhold, som giver danske interessenter mulighed for at forholde sig til egne risici i forhold til de udvalgte råstoffer.

Referencer

- Clausen, R.J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. & Vind, I. 2023: Dansk industris brug af mineralske råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/gpub/32051>
- European Commission (EC) 2023a: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- European Commission (EC) 2023b: Critical Raw Materials Act. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en
- Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T.P., Laing, T. & Drexhage, J. 2020: Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. 110 p.
- IEA 2021: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency (IEA) 283 pp. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Kalvig, P. 2021: Sjældne jordartsmetaller (REE). Forekomster, forarbejdning, forbrug, forsyning og forventninger. https://mima.geus.dk/udgivelser/sjaeldne_jordartsmetaller_ree-3/
- Tan, J. & Keiding, J.K. 2023: The cobalt and lithium global supply chains: Status, risks and recommendations. MiMa rapport 2023/3. https://data.geus.dk/pure-pdf/MiMa-R_2023_03_web.pdf
- Watari, T., Nansai, K. & Nakajima, K. 2020: Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. Resources, Conservation and Recycling, 155, 104669.

1. Aluminium og bauxit

1.1 Introduktion

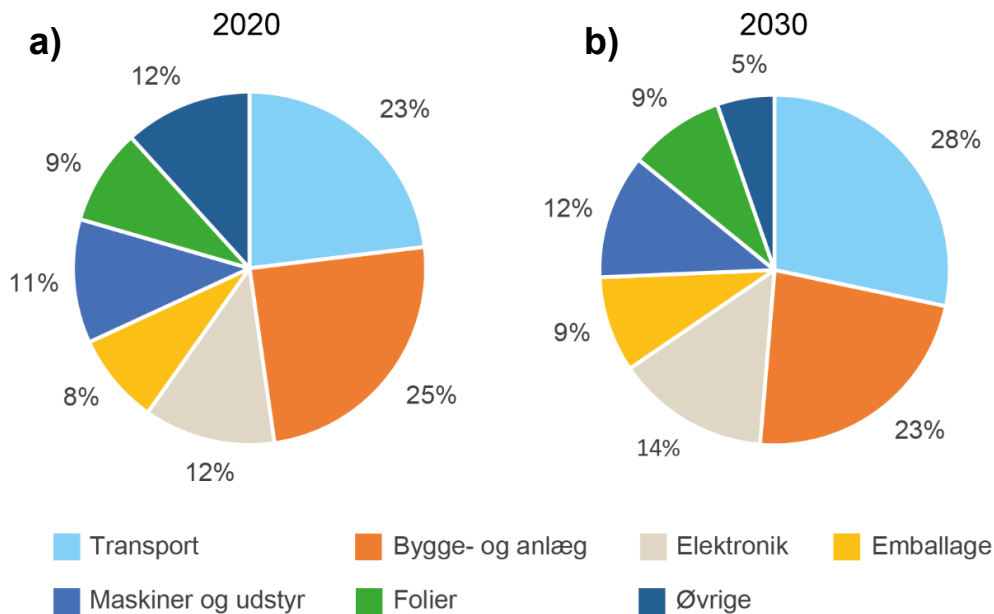
Aluminium (Al) med atomnummer 13 i det periodiske system er et blødt, let ($2,71 \text{ g/cm}^3$) metal, som smelter ved $660 \text{ }^\circ\text{C}$ og koger ved $2.519 \text{ }^\circ\text{C}$. Den lave vægtfylde, styrke, korrosionsbestandighed og gode elektriske ledningsevne gør aluminium industrielt meget anvendeligt. Aluminium har mange forskellige anvendelser og benyttes bl.a. til legeringer i byggeindustrien, fremstilling af transportmidler, emballage til fødevarer, maskindele og i elektronik. Bjergarten bauxit er råstof til fremstilling af aluminium (se afsnit 1.4.4) og brydes i mange lande med Australien, Kina og Guinea som største producenter. Forarbejdningen til alumina (Al_2O_3) foretages især i Kina, Australien og Brasilien, mens Kina, Indien og Rusland er de største producenter af aluminium. Fremstilling af aluminium har et betydeligt miljø- og klimaaftryk. Den globale efterspørgsel af aluminium til især transportmidler forventes at vokse 40 % frem mod 2030. Derudover er metallet et vigtigt råstof til en række teknologier til den grønne omstilling. EU Kommissionen har siden 2020 og igen i 2023 klassificeret bauxit som et kritisk råstof i Kommissionens opgørelse af kritiske råstoffer (EC 2020, 2023).

1.2 Anvendelser og sektorer

Aluminium er et sølvgråt metal med mange attraktive egenskaber: Det er let, stærkt og korrosionsbestandigt. Herudover er det fleksibelt, nemt at formgive, ugiftigt, afgiver ikke smag og har gode varme- og elektriske ledningsegenskaber. Dette har ført til meget alsidig industriel anvendelse af aluminium (Figur 1-1a). Især aluminiums vægtreducerende egenskaber (massefylden er $\frac{1}{3}$ af stål) har givet det en fordel i forhold til mange andre materialer. For eksempel er den vægtreducerende egenskab vigtig for transportsektoren, herunder især biler og fly, hvor aluminium anvendes på grund af denne egenskab i kombination med høj styrke, som gør det anvendeligt til både chassis- og motordele; og overordnet er udviklingen af elbilmarkedet en væsentlig faktor i vækstscenarierne for aluminium. Der er desuden et voksende aluminiumsforbrug i både den elektriske og elektroniske sektor, som især er knyttet til udbygning af el-forsyningsnet fra solcelleanlæg og offshore vindmølle anlæg, hvor aluminium kan substituere traditionel anvendelse af kobber, men aluminium er også en væsentlig komponent i fremstilling af selve solcelleanlæggene.

Anvendelserne af aluminium i bygge- og anlægsindustrien er særligt til facader, vinduesrammer og konstruktionsmaterialer, hvor vægt og korrosionsbestandighed har betydning; der er dog ikke forventninger til betydelige ændringer i bygge- og anlægssektorernes anvendelser frem mod 2030 (Figur 1-1b).

I 2020 blev der globalt produceret ca. 86,2 millioner ton (Mt) aluminium, hvoraf anvendelser til fremstilling af biler, fly og tog og til konstruktionsmaterialer i bygge- og anlægsindustrien aftog omkring halvdelen af produktionen; resten blev især anvendt til elektronik, emballage og alufolier (CRU 2022) (Figur 1-1). Frem mod 2030 forventes efterspørgslen på aluminium at blive ca. 119,5 Mt, en vækst på næsten 40 %; især transportsektoren, som forventes at øges fra ca. 19,9 Mt i 2020 til 31,7 Mt i 2030, og den elektriske sektor, herunder også solcelleanlæg, som forventes at øges fra 10,4 Mt i 2020 til 15,6 Mt i 2030, er årsagen til den store vækst (CRU 2022). Det forventes desuden, at Kina vil forblive den største producent af aluminium.



Figur 1-1 Sektorfordeling af aluminiumforbruget i 2020 (86,2 Mt) og forventet fordeling af 119,5 Mt i 2030. Kilde: CRU (2022).

1.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder

Der er en betydelig genanvendelse af aluminiumprodukter. I EU er genanvendelsen ca. 32 % (EoL-RR). Et ton aluminiumskrot modsvarer omkring otte ton bauxit, og energiomkostningerne til fremstilling af alumina kan reduceres væsentligt (antageligt >50 % besparelse/kg Al) (Kolbeinsen 2020) med reduceret CO₂-belastning til følge, hvilket er en væsentlig årsag til, at man ønsker at genanvende aluminium på trods af at blandinger af legeringsmetaller bevirker, at der ofte sker en vis nedgradering af skrotmaterialet.

EU Kommissionen (EC 2023) har estimeret substitutionsindekset til 0,86 og 0,82 for henholdsvis SI-SR og SI-EI. De fleste substitutionsovervejelser, som involverer aluminium, går dog mest den modsatte vej: Erstatning af fx kobber med aluminium.

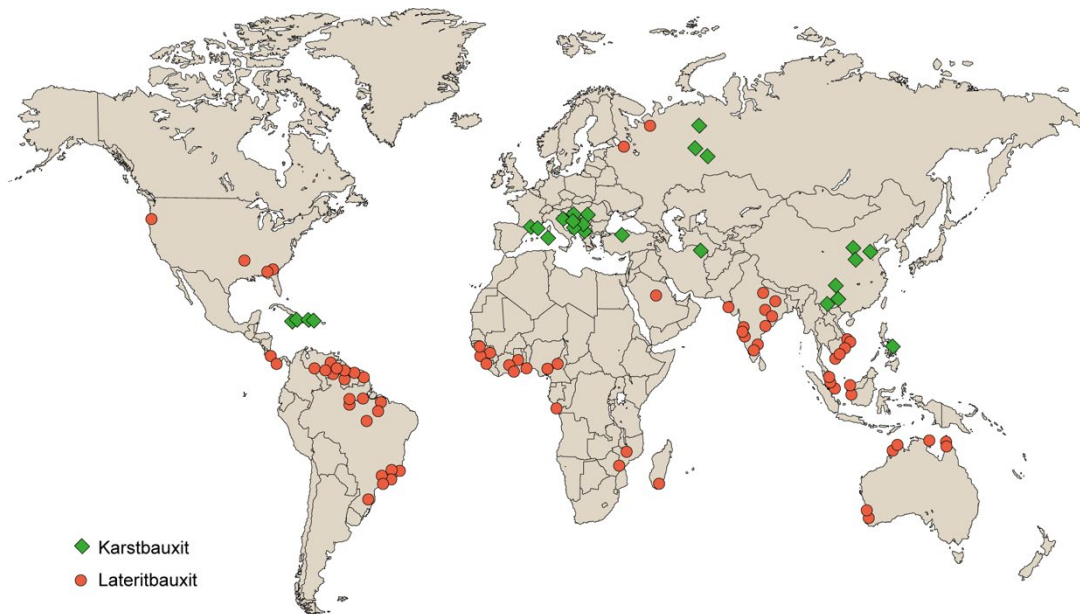
1.4 Global forsyning

1.4.1 Geologi

Bauxit, som er malmen/råstoffet til fremstilling af aluminium, er en brunlig aluminiumrig bjergart, som domineres af en blanding af aluminiumoxidminerale. Hovedparten af forekomsterne findes i tropiske områder, oftest som 2-5 m tykke overfladenære lag, og er dannet som resultat af forvitring af granitiske bjergarter. Bauxitbjergarter opdeles i to hovedgrupper i forhold til deres mineralogiske sammensætning:

1. Lateritbauxit: gibbsit, boehmit (Al₂O₃), kaolinit, kvarts (SiO₂), goethit og hematit (Fe₂O₃), anatas og rutil (TiO₂), calcit, apatit og crandallit (CaO).
2. Karstbauxit: boehmit, diaspor (Al₂O₃), kaolinit, kvarts, chamosit, illit (SiO₂); hematit, goethit, naghemit og magnetit (Fe₂O₃); anatas, rutil og ilmenit (TiO₂); calcit, apatit og crandallit (CaO).

Bauxitforekomster findes mange steder (Figur 1-2), men de kendte attraktive forekomster er licensbelagt af et lille antal konkurrerende mineselskaber.



Figur 1-2 Oversigt over nogle af verdens største bauxitforekomster, fordelt på karst- og lateritbauxit. Baseret på Meyer (2004).

De vigtigste mineraler i bauxit er aluminiumoxiderne gibbsit, boehmit og diaspor (Tabel 1-1), sidstnævnte mineral har samme kemiske sammensætning som boehmit, men lettere og hårdere Bauxit indeholder desuden en del silikatmineraler, som skal fjernes inden råstoffet anvendes til fremstilling af alumina.

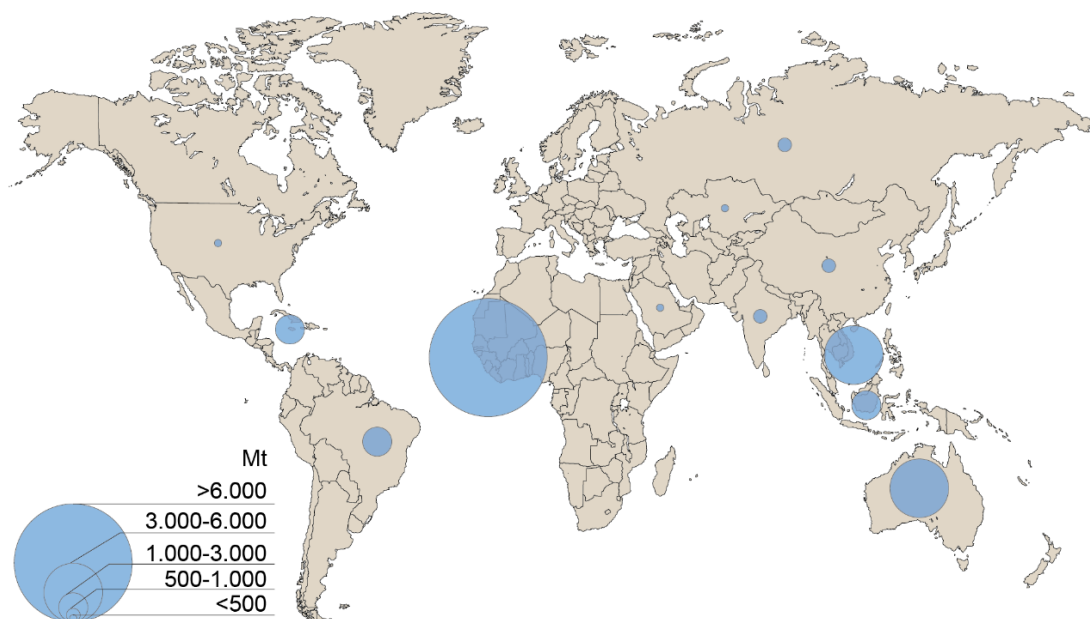
Tabel 1-1 Kommercielt vigtige aluminiummineraler.

| Mineral | Kemisk formel | Al-indhold (Al %) |
|---------|--------------------------|-------------------|
| Boehmit | $\text{AlO}(\text{OH})$ | 45 |
| Diaspor | $\text{AlO}(\text{OH})$ | 45 |
| Gibbsit | $\text{Al}(\text{OH})_3$ | 37 |

1.4.2 Globale bauxitreserver

USGS har opgjort de globale bauxitreserver til ca. 31 mia. ton og omfatter både karsttype bauxit og laterittype bauxit hvoraf sidstnævnte er den vigtigste type. Reservernes geografiske fordeling fremgår af Figur 1-3 og er bl.a. koncentreret i Vestafrika. Over halvdelen af de opgjorte reserver findes i Guinea, Vietnam og Australien (Tabel 1-2). De opgjorte reservers levetid rækker til mere end 400 år ved det nuværende forbrug, hvilket, sammenlignet med mange andre råstoffer, er højt. Med et forventet stærkt stigende forbrug vil der dog være behov for øget efterforskning for at finde fremtidens ressourcer, da levetiden med en stigning på 7 % pr. år ellers vil være reduceret til ca. 100 år i 2050.

Den årlige produktion af bauxit domineres af få lande med Australien som langt det betydeligste (Tabel 1-3).



Figur 1-3 Fordeling af kendte større bauxitreserver. Baseret på Meyer (2004).

Tabel 1-2 Oversigt over globale bauxitreserver (Mt) i 2022 opgjort på 12 lande og kategorien 'øvrige'. Kilde: USGS (2023).

| Bauxitreserver | 2022 (USGS) |
|----------------|-------------|
| Guinea | 7.400 |
| Vietnam | 5.800 |
| Australien | 5.100 |
| Brasilien | 2.700 |
| Jamaica | 2.000 |
| Indonesien | 1.000 |
| Kina | 710 |
| Indien | 660 |
| Rusland | 500 |
| Saudi Arabien | 180 |
| Kasakhstan | 160 |
| USA | 20 |
| Øvrige | 5.199 |
| Total | 31.330 |

1.4.3 Global aluminiumproduktion

Aluminiumproduktion omfatter fire trin hvori semiprodukterne for hvert trin indgår i globale værdikæder: (i) brydning og forbehandling af bauxitmalm (15-25 % Al); (ii) fremstilling af alumina (oftest ved anvendelse af Bayer-proces); (iii) fremstilling af råaluminium ved anvendelse af elektrolytisk smeltning (Hall-Heroult-proces); og (iv) forarbejdning af råaluminium og fremstilling af plader, folier, rør, wire m.m.

I 2021 blev 95 % af den globale bauxitproduktion på 304 Mt foretaget i 10 lande, hvoraf Australien, Kina og Guinea producerede henholdsvis 110 Mt, 86 Mt og 85 Mt bauxit (Tabel 1-3), mens kun en ubetydelig produktion lå i Europa (Grækenland). I perioden fra 2000 til 2021 udgjorde den

årlige vækst i produktionen af bauxit næsten 7 % (Figur 1-6, øverst), mens den årlige vækst i produktionen af aluminium var ca. 2 % (Figur 1-6, midten). Data for produktionen af alumina i samme periode er ikke tilgængelige, men tilgængelige data for 2015 til 2021 viste en vækst på 14 % i denne periode (Figur 1-6, nederst). Kinas dominerende rolle øges ned igennem forsyningskæden (Tabel 1-3 til Tabel 1-5 og Figur 1-4 til Figur 1-6). I 2021 producerede Kina ca. 22 % af bauxitmalmen og var desuden medejere af flere store udenlandske miner og havde dermed adgang til 50 % af aluminaproduktionen og 56 % af aluminiumproduktionen.

Tabel 1-3 Produktionen af bauxit (Mt) i 2021 fordelt på de største producentlande. Kilde: USGS (2022).

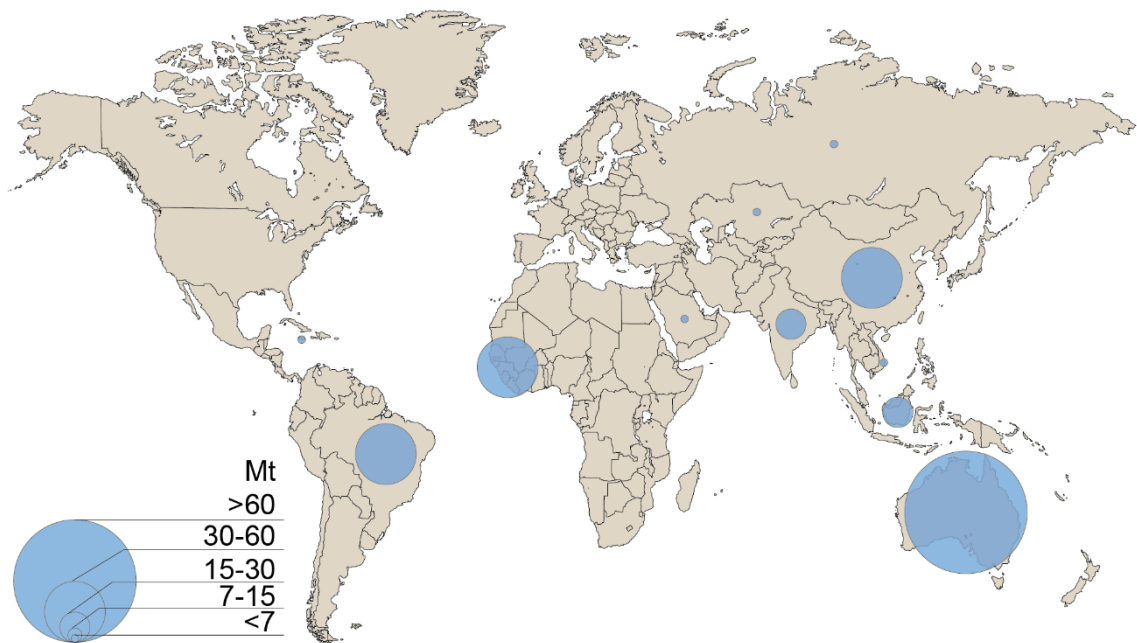
| Produktionsland – bauxit | 2021 (USGS) |
|--------------------------|-------------|
| Australien | 110 |
| Kina | 86 |
| Guinea | 85 |
| Brasilien | 32 |
| Indien | 22 |
| Indonesien | 18 |
| Rusland | 6,2 |
| Jamaica | 5,8 |
| Kasakhstan | 5,2 |
| Saudi Arabien | 4,3 |
| Vietnam | 3,5 |
| Øvrige | 12,0 |
| Total | 390 |

Tabel 1-4 Produktionen af alumina (Mt) i 2021 fordelt på de største producentlande. Kilde: USGS (2022).

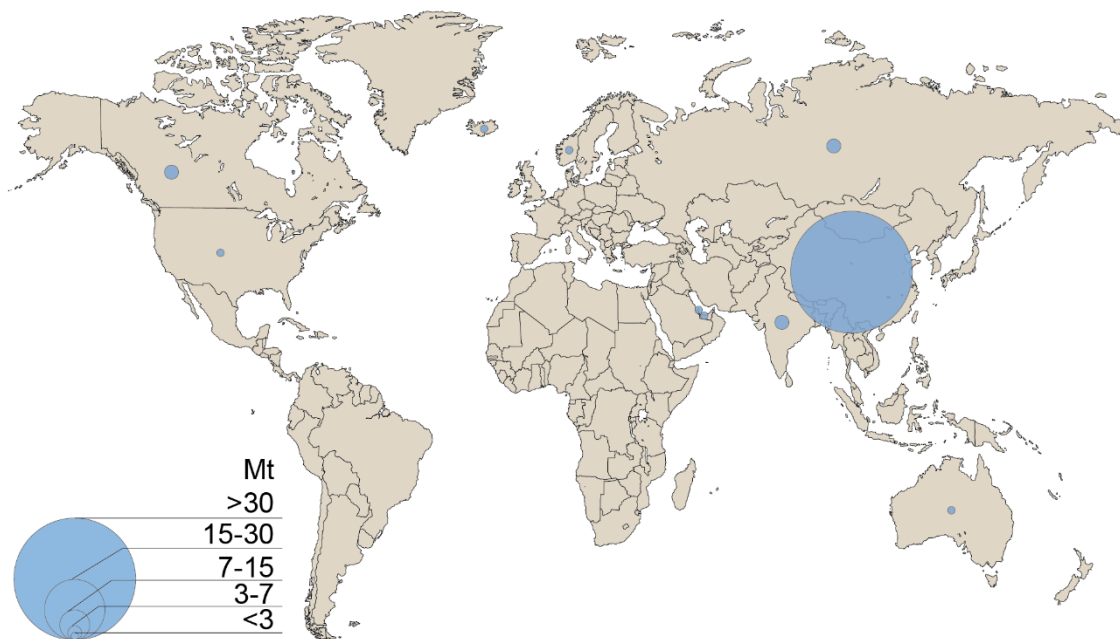
| Produktionsland – alumina | 2021 (USGS) |
|---------------------------|-------------|
| Kina | 74 |
| Australien | 21 |
| Brasilien | 11 |
| Indien | 6,8 |
| Rusland | 3,1 |
| Emiraterne | 2,0 |
| Tyskland | 1,9 |
| Irland | 1,9 |
| Saudi Arabien | 1,8 |
| Ukraine | 1,7 |
| Spanien | 1,6 |
| Canada | 1,5 |
| Indonesien | 1,5 |
| Kasakhstan | 1,5 |
| Vietnam | 1,4 |
| Jamaica | 1,2 |
| USA | 1,0 |
| Guinea | 0,4 |
| Øvrige | 3 |
| Total | 138,3 |

Tabel 1-5 Produktionen af aluminium (Mt) fordelt på de største producentlande. Kilder: USGS (2022) og WMD (2022).

| Produktionsland – aluminium | 2021 (USGS) | 2020 (WMD) |
|-----------------------------|-------------|------------|
| Kina | 39 | 37 |
| Indien | 3,9 | 3,6 |
| Rusland | 3,7 | 3,9 |
| Canada | 3,1 | 3,1 |
| Emiraterne | 2,6 | 2,5 |
| Australien | 1,6 | 1,6 |
| Bahrain | 1,5 | 1,5 |
| Norge | 1,4 | 1,3 |
| Island | 0,9 | 0,7 |
| USA | 0,9 | 1,0 |
| Øvrige | 9,4 | 8,8 |
| Total | 68,0 | 65,0 |



Figur 1-4 Oversigt over produktion af bauxitmalm i de ti største produktionslande i 2021 (USGS 2022; se også Tabel 1-3).



Figur 1-5 Oversigt over produktion af aluminium i de ti største produktionslande i 2021 (USGS 2022; data i Tabel 1-5).

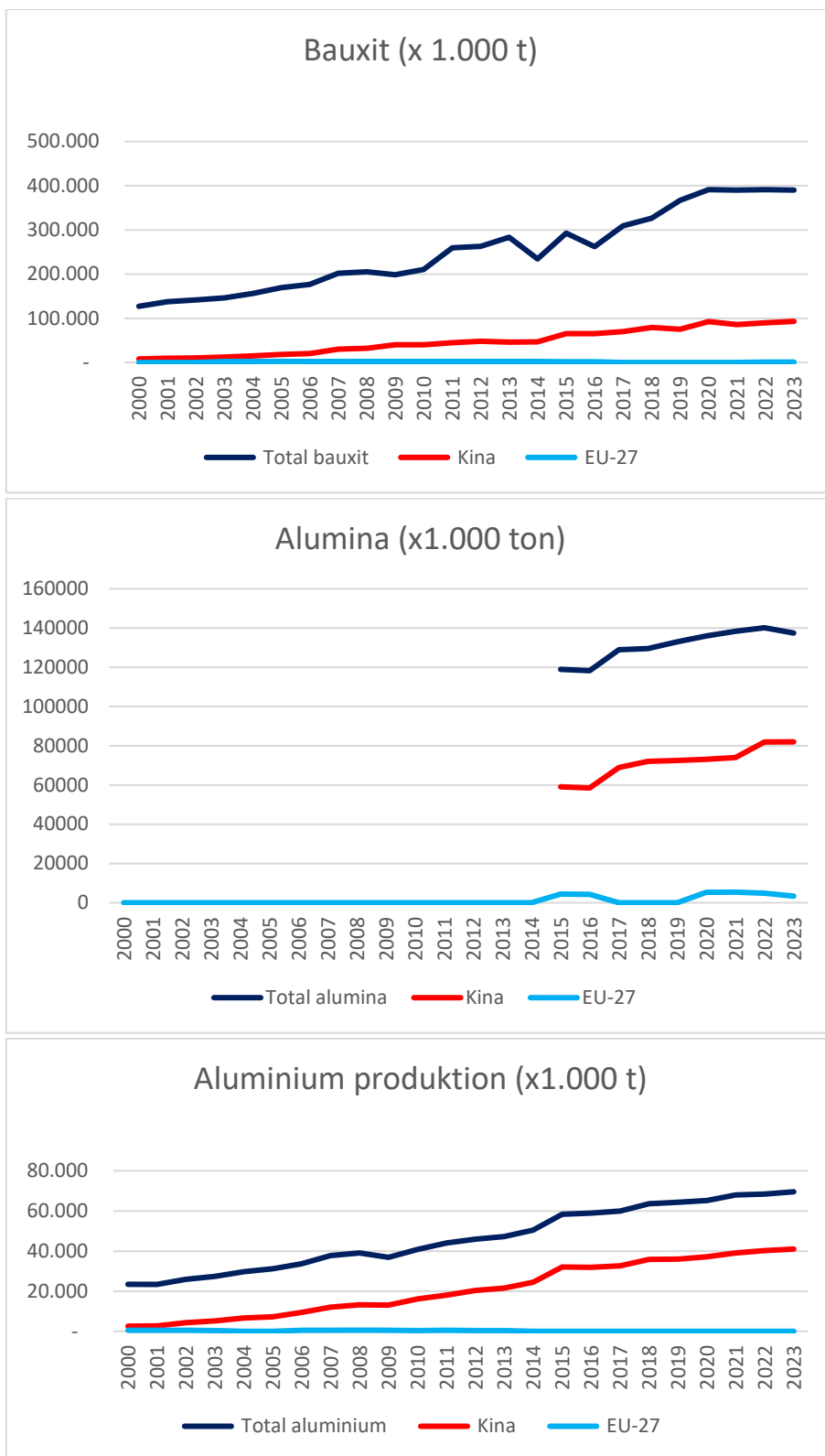
1.4.3.1 Selskaber som indgår i forsyningskæderne for bauxit, alumina og aluminium

Forsyningskæderne for aluminium er i betydeligt omfang vertikalt integrerede, og selskabernes hovedaktiviteter i kæderne fremgår kun undtagelsesvis. Blandt de største bauxitproducenter er Alcoa Corp, Aluminium Corporation of China (Chinalco), Rio Tinto, Vale og Norsk Hydro, hvilket fremgår af Tabel 1-6, hvor de største bauxitminer og aluminaproducenter ses.

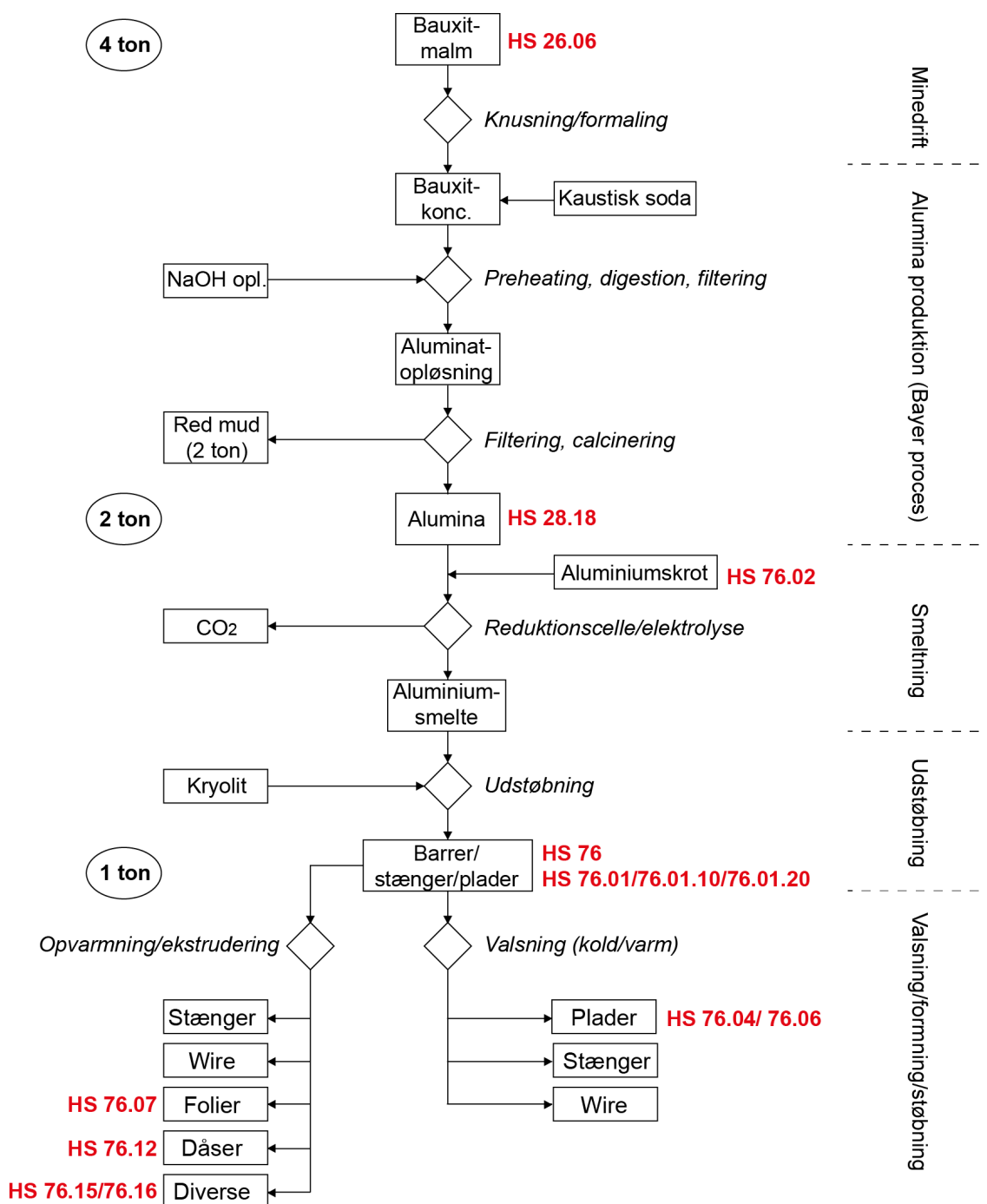
1.4.4 Fremstilling af aluminium

Til fremstilling af 1 ton aluminium forbruges ca. 4-5 ton bauxitmalm, hvorfra der først produceres 2 ton alumina, som er råstof til aluminium; til fremstillingen anvendes der desuden en række proceshjelpestoffer som kaustisk soda og syntetisk kryolit.

Ved produktion af alumina fremkommer der ca. 2 ton 'red mud' (svarende til halvdelen af bauxitmalm) (se afsnit 1.4.5), som udgør en potentiel ressource for jern, titan samt sjældne jordartsmetaller, men som samtidig også er en betydelig miljøudfordring. Figur 1-7 viser et generisk procesdiagram med angivelse af varekoder for bauxit, alumina og en række større råvareprodukter.



Figur 1-6 Oversigt over historisk produktion af bauxit, alumina og aluminium i perioden 2000-2020.
 Kilde: USGS (2000-2022).



Figur 1-7 Generisk procesdiagram for fremstilling af alumina og aluminium med angivelse af udvalgte handelsvarekoder (HS-koder).

1.4.5 Klima- og miljøpåvirkning

Der er omfattende klima- og miljøpåvirkning ved produktion af aluminium, der i 2022 var ansvarlig for ca. 3 % af den globale direkte industrielle CO₂-udledning (IEA 2022). Pr. ton produceret aluminium er udledningen ca. 16 ton CO₂e (De Berker 2022). CO₂-udledningen fordeler sig typisk med mindre end 1 % til minedrift af bauxit, 17 % til behandling af malmen (refining) og 83 % til smeltning, hvortil der forbruges 16 MWh/ton aluminium. I Kina blev 80 % af al aluminium fremstillet med kul som energikilde og udgjorde i 2021 5 % af Kinas CO₂-udledning (Milewski 2022). CO₂-

aftrykket vil derfor afhænge helt af, hvilken energikilde der anvendes. Desuden reducerer brug af aluminiumskrot CO₂-udledningen med næsten 90 %.

Rødslam, 'red mud', er et restprodukt fra fremstilling af alumina ved Bayer-processen, og da materialet er stærkt alkalisk, opbevares det oftest i store bassiner. De kemiske og fysiske forhold, i kombination med at der dannes ca. dobbelt så meget red mud som produceret aluminium, gør, at dette restprodukt er en betydelig miljøudfordring. Der forskes derfor intenst i mulig nyttiggørelse af red mud, bl.a. som filler i cement (Evens 2016).

Tablet 1-6 Oversigt over nogle af de største bauxitminer og/eller aluminaproducenter. Produktion angivet for 2022. Kilder: Mining Technology (2023) og diverse selskabshjemmesider.

| Navn | Miner/procesanlæg | Produktion (Mt bauxit) |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------|
| Alcoa Corp | Huntly Mine, Australien | 25,4 |
| Alcoa Corp/AWAC | Willowdale Mine, Australien | 9,7 |
| Aluminium Bahrain BSC | Bahrain | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Boffa Bauxite Mine, Guinea | 10,7 |
| Aluminium Corporation of China | Pingguo Mine, Guangxi | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Huaxing Mine, Shanxi | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Guizhou Mine, Guizhou | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Shanxi Other Mines, Shanxi | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Zunyi Mine, Guizhou | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Maochang, Guizhou | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Xiaoguan, Henan | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Luoyang Mine, Henan | n.a. |
| Aluminium Corporation of China | Yangguan, Shanxi | n.a. |
| Century Aluminium Company | USA | n.a. |
| CVG Bauxilum | n.a. | n.a. |
| China Hongqiao Group Co Ltd | Kina | n.a. |
| Emirates Global Aluminium | GAC Mine, Guinea | 11,5 |
| Hindalco | n.a. | n.a. |
| Government of Guinea | Sangaredi Mine, Guinea | 15,8 |
| NALCO | Panchpatmali Mine, Indien | n.a. |
| Norsk Hydro | Paragominas Mine, Brasilien | 7,6 |
| Novelis (Hindalco Industries) | USA | n.a. |
| Odisha Mining Company | Kodingamali Mine, Indien | n.a. |
| Rio Tinto | Gove Mine, Australien | 11,8 |
| Rio Tinto | Weipa Mine, Australien | 34 |
| Rio Tinto | 14 aluminium smeltere i Australien, Canada, New Zealand, Oman | n.a. |
| RUSAL | Timan Mine, Rusland | n.a. |
| RUSAL | North Urals Mine, Rusland | n.a. |
| Saudi Arabian Mining Company | Al Ba'itha Mine, Saudi Arabia | 5 |
| South 32 Ltd | Boddington Bauxite Mine, Australien | 13,5 |
| Vale | MRN, Brasilien | 10,5 |

1.5 Handel

Verdenshandlen med produkter med relation til værdikæderne for aluminium udgjorde i 2020 ca. 178 mia. USD fordelt på mange handelsvarekoder fra bauxitmalm, alumina, rå-aluminium og aluminium-råvarer (Tabel 1-7).

Aluminium og dets legeringer bliver handlet på London Metal Exchange (LME), der er en af verdens største metalbørser. En stor del af aluminiumshandlen foregår desuden ved bilaterale aftaler med udgangspunkt i priser fra LME. I Tabel 1-7 ses en oversigt over varekoder for nogle af de almindeligste aluminiumshandelsvarer, mens Tabel 1-8, Tabel 1-9 og Tabel 1-10 viser de vigtigste import- og eksportlande for bauxit, alumina og råaluminium.

Tabel 1-7 Oversigt over varekoder for en række almindelige handelsvarer i forsyningskæderne for aluminium, med angivelse af værdi (mia. USD) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| HS4 | HS6 | Varekodebeskrivelse | Værdi (mio. USD) | Værdi (mio. USD) |
|-------|----------|------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| 26.06 | | Aluminium ore (bauxite) | 5.500 | |
| 28.18 | | Aluminium oxide (alumina) | 13.100 | |
| 76.01 | | Raw aluminium | 49.600 | |
| | 76.01.10 | Aluminium unwrought, not alloyed | | 25.800 |
| | 76.01.20 | Aluminium unwrought, alloyed | | 23.800 |
| 76.02 | | Waste and scrap, aluminium | 11.200 | |
| 76.04 | | Aluminium bars | 15.600 | |
| | 76.04.29 | Bars, rods and other profiles, aluminium alloyed | | 9.610 |
| 76.06 | | Aluminium plating | 28.200 | |
| | 76.06.12 | Aluminium alloy rectangular plate, sheet | | 23.200 |
| 76.07 | | Aluminium foil | 12.400 | |
| | 76.07.11 | Foil, aluminium, not backed, rolled but nfw | | 5.600 |
| | 76.04.21 | Profiles, hollow, aluminium, alloyed | | 4.830 |
| 76.10 | | Aluminium structures | 13.600 | |
| | 76.10.90 | Aluminium structures and parts nes, for construction | | 9.100 |
| 76.12 | | Aluminium cans | 5.900 | |
| | 76.12.90 | Aluminium casks, drums, boxes etc | | 5.900 |
| 76.15 | | Aluminium housewares | 5.800 | |
| | 76.15.10 | Aluminium table/kitchen/household articles | | 5.550 |
| 76.16 | | Other Aluminium products | 17.00 | |
| | 76.16.90 | Articles of aluminium, nes | | 16.200 |
| | | | 177.900 | 129.500 |

Tabel 1-8 De vigtigste eksport- og importlande for bauxit (HS4 26.6) i 2020. Den globale handelsværdi udtrykker den samlede eksportværdi. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Guinea | 3.007 | Kina | 2.104 |
| | | Spanien | 169 |
| | | For. Arab. Emirater | 151 |
| | | India | 127 |
| Australien | 1.069 | Kina | 1.049 |
| | | Sydkorea | 14 |
| | | USA | 5 |
| | | Guinea | 0 |
| Indonesien | 585 | Kina | 585 |
| Brasilien | 174 | Canada | 58 |
| | | Irland | 48 |
| | | Grækenland | 17 |
| | | Saudi Arabien | 16 |
| Subtotal | 4.834 | | |
| Øvrige | 666 | | |
| Total | 5.500 | | |

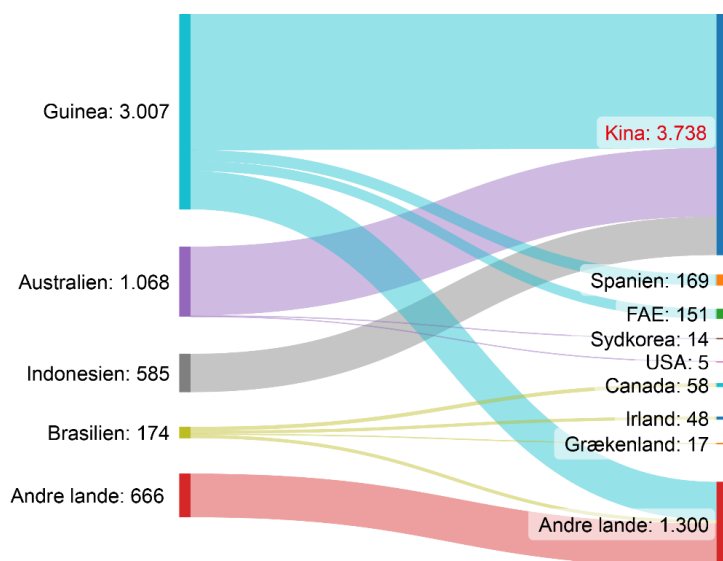
Tabel 1-9 De vigtigste eksport- og importlande for alumina (HS 28.18) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Australien | 3.590 | Kina | 667 |
| | | For. Arab. Emirater | 527 |
| | | Rusland | 420 |
| Brasilien | 2.433 | Canada | 980 |
| | | Norge | 558 |
| | | USA | 275 |
| Kina | 892 | Sydkorea | 153 |
| | | Japan | 101 |
| | | USA | 76 |
| Tyskland | 705 | Italien | 73 |
| | | Frankrig | 68 |
| | | Kina | 65 |
| Subtotal | 7.619 | | |
| Øvrige | 5.461 | | |
| Total | 13.080 | | |

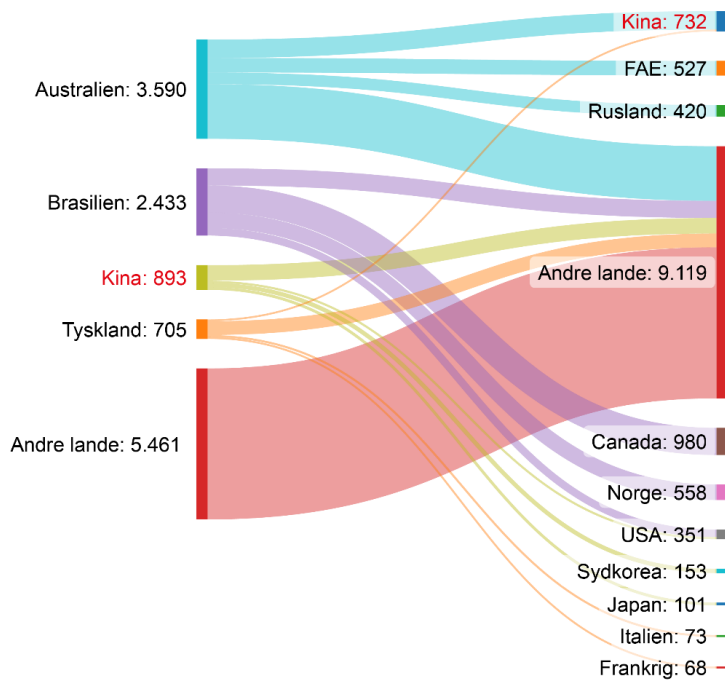
Tabel 1-10 De vigtigste eksport- og importlande for råaluminium (HS 76.01) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| Canada | 5.482 | USA Holland Mexico Grækenland | 4.504 669 196 27 |
| Rusland | 4.472 | Tyrkiet Holland Japan Sydkorea | 793 618 565 318 |
| For. Arab. Emirater | 4.402 | USA Japan Malaysia Taiwan | 818 489 369 367 |
| Indien | 3.897 | Malaysia Sydkorea Singapore Kina | 1.333 903 245 242 |
| Subtotal | 18.253 | | |
| Øvrige | 31.339 | | |
| Total | 49.592 | | |

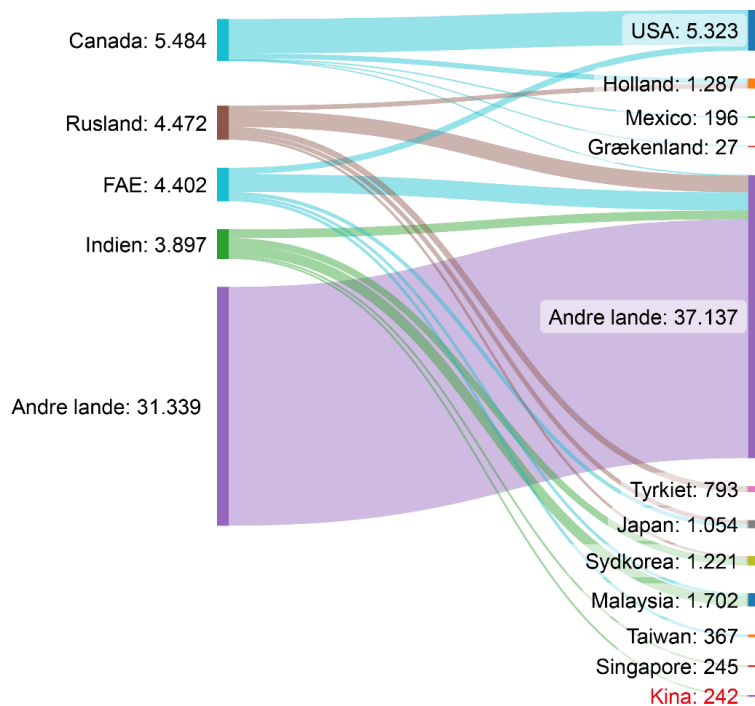
Den internationale handel med bauxit domineres af Kinas import, som helt overvejende kommer fra Guinea, Australien og Indonesien, som næsten udelukkende eksporterer til forarbejdning i Kina, hvor omkring halvdelen af verdens aluminaproduktion foregår. Australien, som er verdens største bauxitproducent, producerer selv store mængder alumina, som eksporteres til mange forskellige lande; Kina eksporterer kun lidt alumina. Handlen med rå-aluminium, som er den største aluminiumvaregruppe, er markant diversificeret; Canada, Rusland, de Forenede Arabiske Emirater og Indien er de største eksportører og står tilsammen for ca. $\frac{1}{3}$ af denne eksport. Handelstallene, illustreret i Sankey-diagrammer (Figur 1-8 til Figur 1-10) indikerer, at Kinas industrielle behov for aluminium sikres igennem forarbejdning af egne og importerede bauxitressourcer fra få store producenter.



Figur 1-8 Sankey-diagram for handel med bauxitmalm (HS 26.06) i 2020. Alle værdier er i mio. USD, baseret på Tabel 1-8.



Figur 1-9 Sankey-diagram for handel med aluminiumoxid/alumina (HS 28.18) i 2020. Alle værdier er i mio. USD, baseret på Tabel 1-9.

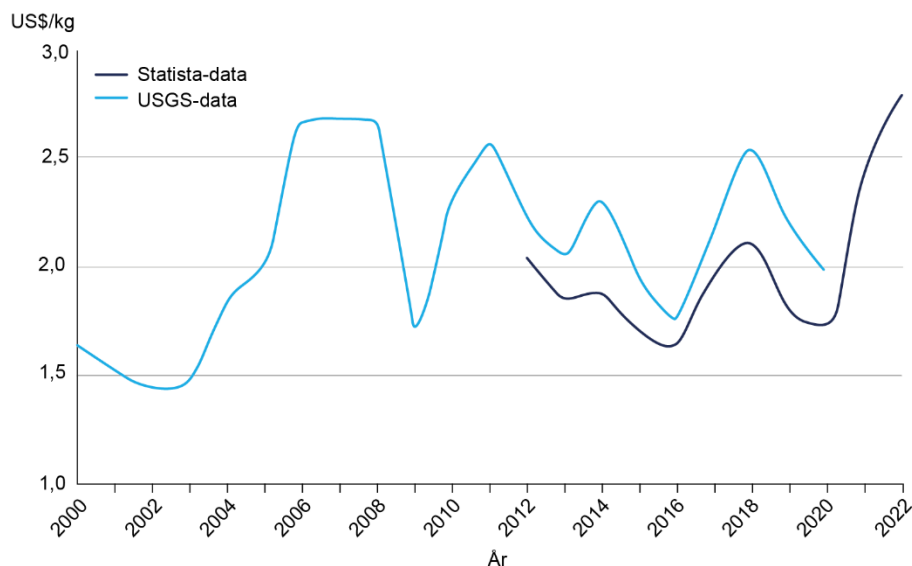


Figur 1-10 Sankey-diagram for handel med råaluminium (HS 76.01) i 2020. Alle værdier er i mio. USD, baseret på Tabel 1-10.

1.5.1 Priser

Bauxitprisen er afhængig af kvaliteten (reaktivt $Al_2O_3\%$; silikaindhold, kornstørrelse, mineralogi), og varierer fra 41 USD/ton til 54 USD/ton alle CIF Kina (dvs. at prisen er inkl. fragt og forsikring til havn i Kina) (november 2023), men har været nogenlunde stabil fra 2014 til 2020, hvorefter der

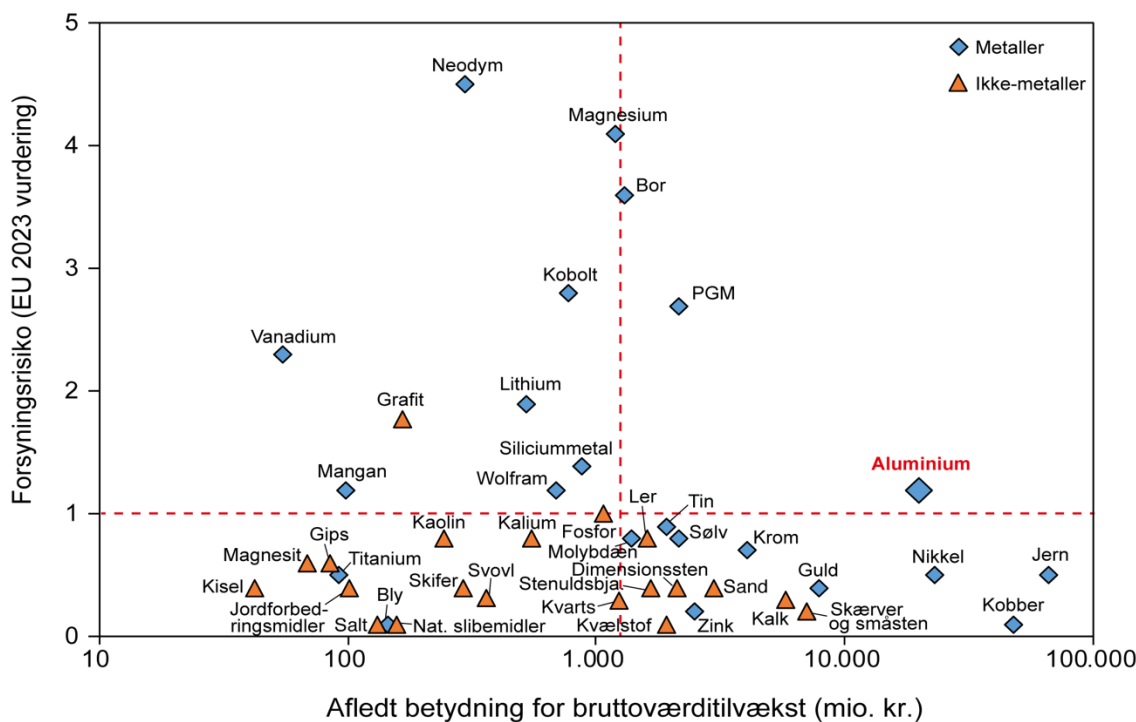
frem til midten af 2022 var en markant stigning i prisindekset, som siden har være faldende. Priserne for alumina har over de sidste 20 år generelt været stærkt stigende med mindre fald under finanskrisen i 2008-09, i 2020-22 og er i november 2023 omkring 200 USD/ton. Denne stabilt, stigende tendens for alumina adskiller sig fra de prisudsving, der ses for aluminium, hvor priserne siden 2000 har udvist store variationer med laveste priser i 2008, 2015 og 2020, og de mest markante toppe i 2011, 2014, 2018 og 2022; i november 2023 er prisen ca. 2.260 USD/ton. Prisniveauer for bauxit varierer mellem forskellige kilder, men tendenserne er overensstemmende og indikerer, at priserne for 2022 udgør en ny periode med høje priser (Figur 1-11).



Figur 1-11 Prisudvikling for aluminium i perioden 2000-2020. Kilder: Screen2 Aluminium factsheet (2023) og Statista (2023).

1.6 Det danske forbrug

Aluminium er et af de vigtigste mineralske råstoffer for Danmark og har den fjerdestørste økonomiske betydning for råstoffer til den danske industri (Figur 1-12). Aluminium, og produkter hvori metallet indgår, havde i 2019 en eksportværdi for Danmark på 20 mia. kr. Danske virksomheder har varekøb med aluminium for 21 mia. kr. og metallet kan relateres til 28.000 beskæftigede i Danmark (Clausen *et al.* 2023). Omkring 50 % af det aluminium, der i 2019 blev brugt i Danmark, indgår i materialekomplekse produkter, som er kendetegnet ved komplekse forsyningskæder, hvor det er vanskeligt at finde råstofoprindelsen og forsyningsrisikoen. Anvendelserne for aluminium i Danmark er mangearterede og sammenlignelig med det globale forbrug.



Figur 1-12 Aluminium og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvækst som funktion af forsyningsrisikoen i Danmark. Af de undersøgte råstoffer er aluminium sammen med bor og platin-gruppemetaller (PGM) vurderet som kritiske for dansk industri efter vurderingskriterierne benyttet af Clausen et al. (2023). Figur modificeret efter Clausen et al. (2023).

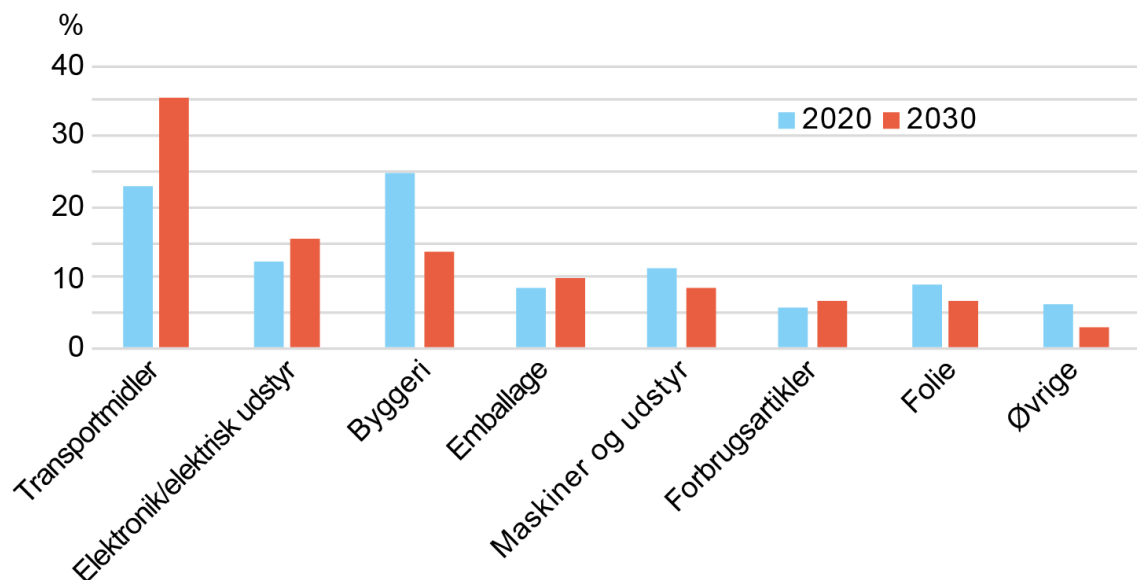
1.7 Perspektiver

Bauxit brydes i ca. 30 lande, hvoraf Australien, Kina og Guinea producerer næsten $\frac{3}{4}$ af den globale bauxitproduktion. Alumina produceres ligeledes i mange lande, herunder lande uden egen bauxitproduktion. Kina er verdens største aluminaproducent (ca. 50 %), efterfulgt af Australien og Brasilien med henholdsvis 8 % og 5 %. Aluminium fremstilles i mange lande, i de fleste på basis af importeret alumina; og Kinas dominans på aluminiumproduktion er yderligere styrket, da 57 % af produktionen foregår her, efterfulgt af Rusland (6 %) og Indien (6 %). Omkring 20 vertikalt integrerede selskaber producerer hovedparten af bauxit og alumina, hvor Alcoa Corp, Aluminium Corporation of China (Chinalco), Government of Guinea, South32 Ltd. og Rio Tinto er de største. Chinalco er også en af de største aluminiumproducenter i Kina, hvor andre store producenter bl.a. er China Hongqiao, Yunnan Aluminum og Shandong Xinfu Aluminum Group.

EU Kommissionen vurderer (EC 2023), at aluminium/bauxit har høj økonomisk betydning for EU (EI: 5,8), samt at den samlede forsyningsikkerhed ligeledes er høj (SRE:1,2; SRP:0,5), dog med produktion af bauxit som det mest sårbare, og derfor klassificeres aluminium/bauxit som et kritisk råstof. Aluminium/bauxit betragtes ligeledes som et kritisk råstof i USA, Canada og Kina (Clausen et al. 2023).

Frem mod 2030 forventes efterspørgslen på aluminium at stige som følge af et voksende forbrug til elektriske produkter, i byggeriet og til emballage i især fødevarerindustrierne. Der forventes herudover en stigende efterspørgsel på aluminium fra bil- og flyindustrierne, hvor aluminium i

stigende omfang erstatter rustfrit stål, da det har lavere vægt og i øvrigt har nogle af de samme egenskaber. Der er også forventninger om, at aluminium vil blive efterspurgt til stærkstrøms-el-kabler. Markedet for aluminium til Li-ion-batterier, i form af aluminiumoxid (HPA), forventes også at være et betydeligt vækstområde. Samlet vurderer Aluminium Stewardship Initiative (2019), at efterspørgslen på aluminium vil øges fra 33,3 Mt i 2020 til 119,5 Mt i 2030, hvoraf $\frac{2}{3}$ af efterspørgslen vil være fra Kina og det øvrige Asien. Milewski (2022) forventer, at hovedparten af væksten vil være knyttet til fremstilling af transportmidler og til elektriske og elektroniske industrier (Figur 1-13).



Figur 1-13 Aluminiumforbruget fordelt på sektorer i 2020 og 2030. Baseret på Milewski (2022).

De meget høje forventede vækstrater for aluminium kan blive vanskeliggjort af en række forhold, bl.a. Kinas stærke dominans i alle led fra aluminaproduktion til færdige produkter og andre geopolitiske forhold. Desuden kan indførelse af fx strengere miljøkrav til deponering af til red mud, krav til CO₂-reduktioner til den samlede aluminiumproduktion og høje energipriser dæmpe væksten. Høje energipriser har allerede medført lukninger og reduktion af produktion i Europa; i Kina har der været reducerede produktioner som følge af lav vandstand ved nogle vandkraftværker, som leverer strøm til produktionen, som dog er kompenseret på andre anlæg. I tillæg hertil kommer de pålagte handelssanktioner mod Rusland.

1.8 Referencer

Aluminium Stewardship Initiative 2019: The Aluminium Stewardship Initiative. Available at: <https://aluminium-stewardship.org/> (Accessed: 6 August 2019)

Clausen, R. J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. and Vind, I. 2023: Dansk industris brug af minerale råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/gpub/32051>

CRU 2022: Opportunities for aluminium in a post-Covid economy. CRU Reference ST2342-21

De Berker, A. 2022: Understand your aluminum emissions. Published on Carbon Chain website 27 June 2022: <https://www.carbonchain.com/blog/understand-your-aluminum-emissions>

- European Commission (EC) 2020: Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) – Final report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c0d5292a-ee54-11ea-991b-01aa75ed71a1/language-en>
- European Commission (EC) 2023: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- Evans, K. 2016: The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 316-331.
- IEA 2022: Aluminum <https://www.iea.org/energy-system/industry/aluminium>
- Kolbeinsen, L. 2020: The beginning and the end of the aluminium value chain. *Materiaux & Techniques* 108, 506, 2020
- Meyer, F.M. 2004: Availability of Bauxite Reserves, *Natural Resources Research* Vol 13, no 3 Sept 2004
- Milewski, A. 2022: Aluminium supply shutting down as demand set to rise. The Oregon Group website besøgt 1/11-23) <https://theoregongroup.com/commodities/aluminium-supply-shutting-down-as-demand-set-to-rise/>
- Mining Technology 2023: <https://www.mining-technology.com/marketdata/ten-largest-bauxites-mines/?cf-view>
- Observatory of Economic Complexity World (EOC World) 2023: Database <https://oec.world/>
- Screen2 Aluminum factsheet 2023: Screen2 Factsheets updates based on the EU Factsheets 2020 Aluminium and bauxite. https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/06/SCREEN2_factsheets_ALUMINIUM.pdf
- Statista 2023: Average aluminum prices from 2012 to 2022. <https://www.statista.com/statistics/276643/aluminum-prices-since-2003/>
- USGS 2000-2023: Mineral commodity summaries 2000-2023: U.S. Geological Survey <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>
- World Mining Data (WMD) 2022: Vol 37, 28 April 2022 <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>

2. Bor

2.1 Introduktion

Bor (B) er grundstof nr. 5 i det periodiske system og er et vigtigt råstof med bred industriel anvendelse til bl.a. glas, glasfiber, magneter, keramiske produkter, gødningsstoffer og rengøringsmidler. I naturen findes bor i mineraler, der foruden bor består af oxygen og andre grundstoffer, og i 'brines' (vandige opløsninger med højt indhold af almindelige salte Na, K, B, I, Li m.fl.); bor udvindes fra begge typer. Både bormineraler og -brines anvendes til fremstilling af borat, borax og borsyre, som både har direkte kemiske anvendelser og desuden indgår ved fremstilling af specialmaterialer. Yderligere forarbejdning til borkomposit-højstyrkematerialer udføres af specialvirksomheder.

Tyrkiet og USA er langt de største producenter af bor. Produktionen i Tyrkiet domineres af det statejede tyrkiske selskab Eti Maden og i USA af det amerikanske registrerede US Borax (ejet af Rio Tinto), som også er de dominerende producenter af produkter i de øvre og mellemste dele af forsyningskæderne; disse to selskaber stod i 2021 for ca. 75 % af den globale produktion af borat. Både Tyrkiet og USA eksporterede størstedelen af deres produktion til Kina, og Kina udfører ca. 80 % af processering og produktion i de nedre dele af forsyningskæderne, fx borkarbider og andre specialprodukter (Sun 2022).

Bor blev vurderet som et kritisk råstof af både EU i 2020 og 2023 (EC 2020, 2023) samt af Japan i 2020 og i 2023 for Danmark (Clausen *et al.* 2023). Branchen vurderer, at der frem mod 2028 vil være et forsyningsunderskud på ca. 2 Mt borsyre-ækvivalenter (Sun 2022).

2.2 Anvendelser og sektorer

Det største forbrugsområde for bor er til borsilikatglas, isoleringsmaterialer, glasfibre og E-glas (electrical grade glass) (Figur 2-1). Tilsætning af bor sænker smeltepunktet for glassmelten og øger glassets termiske og fysiske styrke og anvendes derfor til bl.a. varmeresistent glas (pyrex-glas), glasfiber og industrielt samt optisk glas. Bor tilsættes både i form af mineralkoncentrater og raffinerede borater som fx boraxpentahydrat og borsyrer. Borsilikatglas indeholder 7-15 % B_2O_3 ; til glasvævet i vindmøllevinger anvendes 5-10 % B_2O_3 .

Keramiske produkter: Bor bruges både som fluxmiddel til nedsættelse af smeltetemperatur og tilsættes til glasurer og emaljer for at øge brugsstyrken.

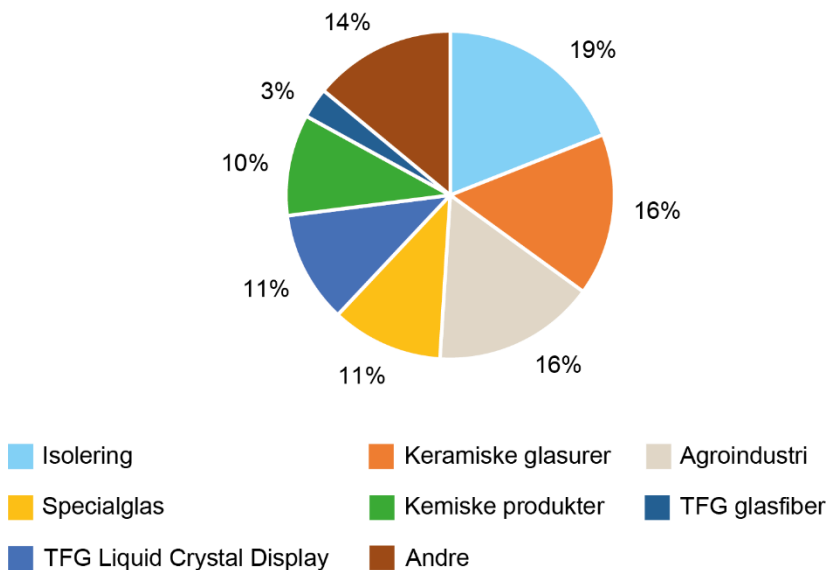
Bor anvendes som perborat i vaskepulver og rengøringsmidler, hvor det bleges, blødgør vand og fjerner snavs.

Bor bruges som additiv til stål- og ferrolegeringer, hvor det bidrager til øget materialestyrke. Bor indgår også i stærke magneter som NdFeB-typer; borindholdet i disse magnettyper er typisk omkring 1 %.

Bor anvendes til fremstilling af bornitrid (borazon), der er et af de hårdeste kendte materialer, og til fremstilling af borkarbider, titanborid og wolframborider, som ligeledes har meget høje hård-

heder og smeltepunkter. Nogle af disse forarbejdes til højteknologiske kompositmaterialer og anvendes i militær- og luftfartsindustrierne.

Bor tilsættes gødningsstoffer som mikronæringsmiddel. Til dette formål er bormineraler med indhold af calcium ikke egnede, og derfor foretrækker gødningsindustrien de amerikanske forekomster. Herudover anvendes bor bl.a. til: kemikalier til brandslukningsudstyr, teflon, plastlag på fiberoptikkabler, træimprægneringsmidler, katalysator ved smeltning af kobber og bly, medicinske og kosmetiske produkter og vandbehandling. Desuden vurderes diboran (B_2H_6), pentaboran (B_5H_9), decaboran ($B_{10}H_{14}$) og alkaliboron at kunne blive fremtidige raketbrændstoffer (Helvaci 2017).



Figur 2-1 Anvendelsesfordelingen af bor i 2018. Borater er råstoffer, som har mange forskellige anvendelsesområder. Kilde: Cann (2018).

2.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder

De fleste anvendelser af borprodukter giver kun undtagelsesvis mulighed for genanvendelse, og genanvendelsesraten er derfor kun 1 % (EOL-RR) (EC 2023).

Til de fleste anvendelser, hvor bor indgår, kan råstoffet ikke erstattes uden, at det sker på bekostning af ydelsen eller slutkvaliteten af det endelige produkt (Screen2 Boron factsheet 2023). Til glas- og keramiske produkter kan bor substitueres med fosfater. Hvor bor anvendes til fremstilling af rengøringsmidler, kan det erstattes med klor og enzymer; i emaljer kan lithiumprodukter erstatte bor. EC (2023) har estimeret, at for EU er bors substitutionsindeks SI-RR: 0,99 og SI-EI: 0,99.

2.4 Global forsyning

2.4.1 Geologi

De største opgjorte forekomster findes i Kina, Tyrkiet, Tibet, Japan, USA og Serbien (USGS 2022). De mest højlødige forekomster, som bl.a. findes i Tyrkiet, indeholder op til 30 % borat (B_2O_3); i de fleste forekomster er borindholdet dog betydeligt mindre. Selve dannelsesmåden har

betydning for, hvilke bormineraler der er dannet i forekomsterne og har dermed betydning for, om der kan være andre kommercielle mineraler eller råstoffer i borforekomsterne, som fx lithium. Det er netop forskelle i dannelsesmåden, der er årsag til, at Tyrkiet primært indvinder colemanit, USA mest kernit, og at produktionerne i Rusland og Kina primært er baseret på datolit. Med dette følger, at de store forekomster i Tyrkiet domineres af calciumborater, mens forekomsterne i USA domineres af natriumborater (Warran 2020). I Tabel 2-1 ses de kommercielt vigtige bormineraler.

Der kendes mere end 250 forskellige borholdige mineraler. De mest almindelig er silikater som turmalin og axinit, men omkring 90 % af verdensproduktionen er baseret på følgende fem mineraler: colemanit, kernit, tincal/borax, datolit og ulexit. Mineralerne adskiller sig især ved forskelle i indholdet af bor, natrium, calcium og krystallinsk vand og har dermed forskellige fordele og ulemper i relation til både råstofforarbejdning og anvendelse.

2.4.2 Globale borreserver

Verdens samlede reserver af borater opgives almindeligvis i B₂O₃-ækvivalenter. De globale reserver af borater er opgjort til omkring 1.340 Mt, hvoraf langt størstedelen findes i Tyrkiet (Tabel 2-2). Med de nuværende kendte borreserver vil produktionen kunne række til flere hundrede år, men de globale opgørelser er meget usikre, fordi der anvendes forskellige opgørelsesmetoder, og en del lande, som fx Argentina, Bolivia og Tyskland, ikke opgør deres borressourcer (USGS 2023). Samlet set er hverken størrelse eller datakvalitet sikre, og en del af reserverne kan muligvis ikke indgå i en fremtidig produktion.

Tabel 2-1 Kommercielt vigtige bormineraler. Kilde: Helvaci (2017).

| Mineral | Kemisk formel | Borindhold (B ₂ O ₃ wt.%) | Vigtige produktioner |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Boracit | Mg ₃ [B ₇ O ₁₃]Cl | 62 | |
| Colemanit | Ca ₂ B ₆ O ₁₁ · 5H ₂ O | 51 | Tyrkiet (regionerne: Emet, Bigadic, Kestelek) USA (lille produktion i Death Valley) |
| Datolit | CaBSiO ₄ (OH) | 22 | Rusland; Kina |
| Kernit | Na ₂ B ₄ O ₆ (OH) ₂ · 3H ₂ O | 51 | USA (Kramerforekomsten) |
| Ludwigit | Mg ₂ FeBO ₅ | 17 | Kinas produktion er mest baseret på ludwigit |
| Pandermit | Ca ₂ B ₅ O ₇ (OH) ₅ · H ₂ O | 50 | n.a. |
| Sassolit | H ₃ BO ₃ | 56 | n.a. |
| Tincal/borax | Na ₂ [O ₂ B ₄ O ₅ (OH) ₄] · 8 H ₂ O | 36 | Tyrkiet (Kirka), USA (Boron), Argentina (Tincalayu og Loma Blanca) |
| Ulexit | NaCa[B ₅ O ₆ (OH) ₆] · 5H ₂ O | 43 | Tyrkiet (regionerne: Emet, Bigadic, Kestelek) |

Tabel 2-2 Verdens borreserver i 2022 opgjort for seks lande; hertil kommer en række lande som ikke angiver denne type data. Kilde: USGS (2023).

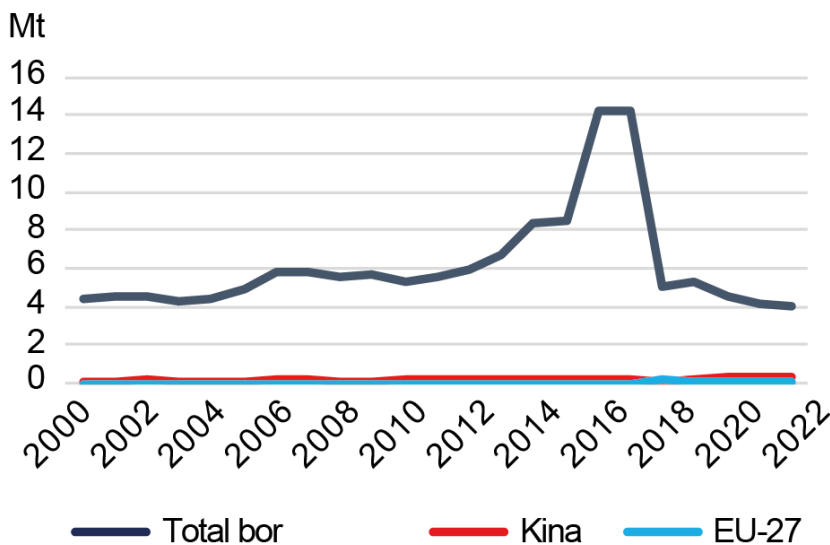
| Borreserver (B ₂ O ₃ -ækvivalenter) | Mt (B ₂ O ₃) |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| USA | 40 |
| Chile (ulexit) | 35 |
| Kina (boric oxide equivalent) | 21 |
| Peru (crude borate) | 4 |
| Rusland (datolite) | 40 |
| Tyrkiet (refined borate) | 1.200 |
| Total | 1.340 |

2.4.3 Global borproduktion

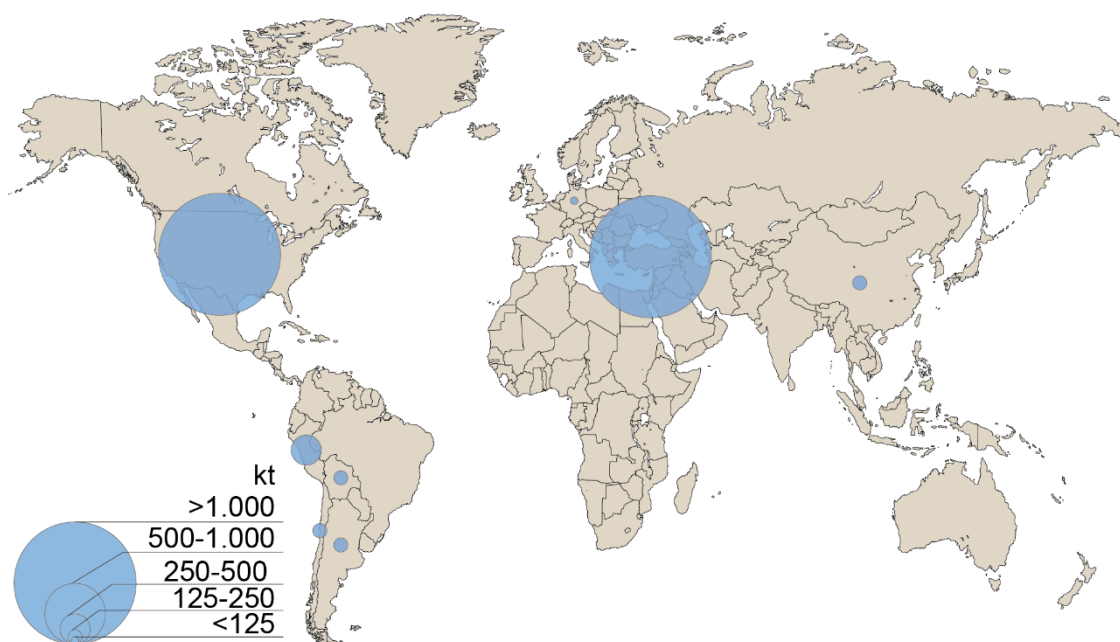
USGS udarbejder årlige opgørelser af den globale produktion af bormineraler (borat); opgørelserne er dog kun retningsgivende som følge af uensartede opgørelsesmetoder landene imellem, og fordi USA af strategiske årsager har fravalgt at oplyse om egne produktioner. I det følgende er USA's produktion estimeret til ca. 60 % af den tyrkiske produktion (Elevli *et al.* 2022). I perioden 2000-2012 var den samlede boratproduktion 4-5 Mt/år, derefter en betydelig stigning frem mod 2017, hvor produktionen var op til 14 Mt/år; herefter faldt produktionen og var i 2021 på laveste niveau i 20 år (Figur 2-2). Der er ikke fundet forklaring på hverken den markante stigning eller de senere års faldende produktion. Kina råder kun over lavlødige borforekomster, og produktion af bormineraler i Kina har været mindre end 10 % af den globale produktion, dog med en lille stigning siden 2019; Kina er derfor afhængig af import (Figur 2-2).

I 2021 udgjorde den samlede boratproduktion omkring 4 Mt, hvoraf Tyrkiet og USA stod for omkring 75 %, mens den øvrige produktion kom fra Kina, Chile og Bolivia med henholdsvis 380.000 ton, 300.000 ton og 210.000 ton. Derudover var der små volumener fra Tyskland, Rusland, Argentina og Kasakhstan (Tabel 2-3). I Figur 2-3 ses en oversigt over nogle af de største producentlande af bor, men nogle af de større bormineral og selskaber er vist i Tabel 2-4.

WMD (2022) angiver den globale boratproduktion i 2020 til ca. 3,6 Mt B₂O₃, hvilket er et fald i forhold til de foregående 4 år, hvor produktionen var over 4 Mt B₂O₃.



Figur 2-2 Oversigt over historisk produktion af borater i perioden 2000-2021. Kilde: USGS (2000-2022). Bemærk: USA har ikke opgivet egen produktion siden 2005, og produktionen er derfor estimeret som 60 % af Tyrkiets produktion.



Figur 2-3 Oversigt over nogle af verdens største borproducerende land. Baseret på data fra USGS (2023).

Tablet 2-3 Produktionen af boratminerale, opgjort af USGS (2023), Statista (2023) og WMD (2022). Data viser store indbyrdes forskelle.

| Produktionsland/mineral | 2021 (USGS) | 2020 (Statista) | 2020 (WMD)) |
|------------------------------|--------------|-----------------|-------------|
| Argentina, råmalm | 71.000 | 70.000 | 134.604 |
| Bolivia, ulexit | 210.000 | 200.000 | 258.019 |
| Chile, ulexit | 300.000 | 400.000 | 288.10 |
| Iran, uspecificeret | - | - | 1.495 |
| Kasakhstan, uspecificeret | - | 30.000 | 30.000 |
| Kina, boric oxide equivalent | 380.000 | 250.000 | 250.000 |
| Peru, crude borate | 50.000 | 110.000 | 43.645 |
| Rusland, datolite ore | 80.000 | 80.000 | 85.000 |
| Tyrkiet, refined borates | 1.700.000 | 2.400.000 | 1.680.000 |
| Tyskland, compounds | 120.000 | 120.000 | - |
| USA | c. 1.200.000 | - | 1.680.000 |
| Total | c. 4.000.000 | 3.660.000 | 3.601.366 |

2.4.3.1 Selskaber involveret i produktion og forarbejdning af bor

Den globale produktion af borater domineres af to producenter:

- 1) Det tyrkiske statsejede ETI Maden som kontrollerer verdens største boratforekomster i Tyrkiet (overvejende colemanit og mindre andele tincal). Produktion 2019: 2 Mt. Omkring 95 % af produkterne blev eksporteret (Elevli *et al.* 2022).
- 2) US Borax, datterselskab af Rio Tinto. Produktion 2019: 1 Mt borat (boraxpentahydrate, boraxdecahydrate og borsyre på basis af tincal og kernit. US Borax producerer desuden anhydridborat-produkter på basis af boraxdecahydrat (Elevli *et al.* 2022).

Tabel 2-4 Oversigt over de betydeligste producenter af primære borprodukter.

| Land | Selskab | Råstofressourcer | Produktion | Bemærkninger |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Argentina | Minera Santa Rita (MSR) | Saltsøforekomster i provinserne Jujuh, Salta og Catamarca. 6 mio. ton | 60.000 ton/år. Forventet udvidelse til 75.000 ton/år | MSR har overtaget Borax Argentina S.A. fra Allkem Ltd (august 2022) mod at Allkem Ltd kan købe lithiumprodukterne. |
| | Tincalayu | Tincalayu borax-forekomst. | 130.000 ton/år | Mindat (2022) |
| | Ulex Empresa Minera | Bryder hydroboracit og colemanit i Sol de Manana minen; Salta-provinsen | Ukendt – men lille | Ulex (2022) |
| Bolivia | | Salar de Coipase, der brydes evaporitter | Ukendt | |
| | Industrial Tiorra | Saltsøforekomsterne Laguna Capina og Challviri (ulexit) | 15.000 ton/år (borsyrer) | Borates Today (2022c) |
| Chile | Allkem Ltd | Salar de Atacama-forekomsten i Chile (open cast) | | |
| Iran | | Gharah Gol-minen, Zanjan-provinsen | | University of Tehran (2023) |
| Kasakhstan | | Inderborskiy-minen | Evaporit/salt-dome (colemanit og ulexit) | USGS (2022) |
| Kina (se også tekst) | | Ludwigit-produktion i provinserne Liaoning og Quinhai | | Borates Today (2022a) |
| Peru | Inkabor | Ulexit fra Laguna Salinas | | Kun produktion i april-november |
| Rusland | Ikke identificeret | Dalnegorski-minen bryder borsilikater. Malmledighed: 6-12 % B ₂ O ₃ | Ca. ⅓ af landets borproduktion (dvs. 50.000 ton i 2021) | Warren (2020) |
| | | Tayzhonoye-minen i Sakha-Yakutia-regionen | | Biprodukt til jernmalm |
| | MMC Bor | Ukendt | | Integreret borproducent som på basis af datolit producerer calciumborat, bo anhydrid, borsyre og natriumperborat, og ferro-boron (ca. 200 ton/år). |
| | JSC Aviabor | Ukendt | | Kemisk virksomhed der producerer borat, borsyrer og specialprodukter som fx borane complexes, borehydrides, organoboranes. |
| Tyrkiet | Eti Maden | Kestelek-mine | Colemanit/ulexit og produktion af borsyre | |
| | | Bigadic-mine | Colemanit/ulexit og produktion af borsyre | |
| | | Emet-mine | Colemanit/ulexit og produktion af borsyre | |
| | | Kirka-mine | Tincal og produktion af borsyre | |
| Tyskland | Ukendt | Ukendt | | Borproduktion som biprodukt til kalium, der indvindes fra permiske saltaflejringer. |
| USA | US Borax | Boron-minen, Californien (tincal, kernit) | | |

Disse to virksomheder kontrollerer omkring 75 % af verdensmarkedet af borater, fordelt med ca. 42 % fra ETI Maden og 33 % fra US Borax. Den resterende del af produktionen forestås af bl.a. American Borate (USA), Allkem Ltd. (Chile), Inkabor (Peru, Bolivia), Searles Valley Minerals Inc, (Sydafrika) og Minera Santa Rita (Argentina). Det skal bemærkes, at Aluminum Corporation of China Ltd (Chinalco) er største aktionær (14,6 %) i Rio Tinto, og at Kina dermed har interesser i US Borax' produktion i USA.

Der er en betydelig vertikal integration i borforsyningskædernes øvre og mellemste dele. Herudover er der en række virksomheder som producerer borprodukter på basis af indkøbt bormineral, som fx Boron Specialities LLC (USA) og JSC Aviabor (russisk registreret).

Kinesiske mineselskaber står for 10 % af den globale produktion og forsyner ca. 1/3 af det kinesiske marked. Mere end 80 % af Kinas produktion af borater produceres i Liaoning-provinsen, ca. 10 % i Tibet og 6 % i Quinhai-provinsen, hvor hovedparten af ressourcerne er mineralet ludwigit (Borates Today 2022a). Malmene fra Liaoning-provinsen indeholder 7-20 % B_2O_3 , hvorimod saltsøforekomsterne i Quinhai indeholder ca. 3,3 % B_2O_3 og produceres fra mineralerne ulexit, pinnoit og tincal.

Kina forarbejder egne og importerede råstoffer til borax, borhydroxider, perborater, borsyrer, bor-karbider, fluorborater, bortrifluorid, ferroboration, borhalider og borider. Da Kinas egne ressourcer er lavlødige, er hovedparten af den kinesiske produktion af borprodukter baseret på importerede borrarstoffer.

2.4.4 Fremstilling af borprodukter

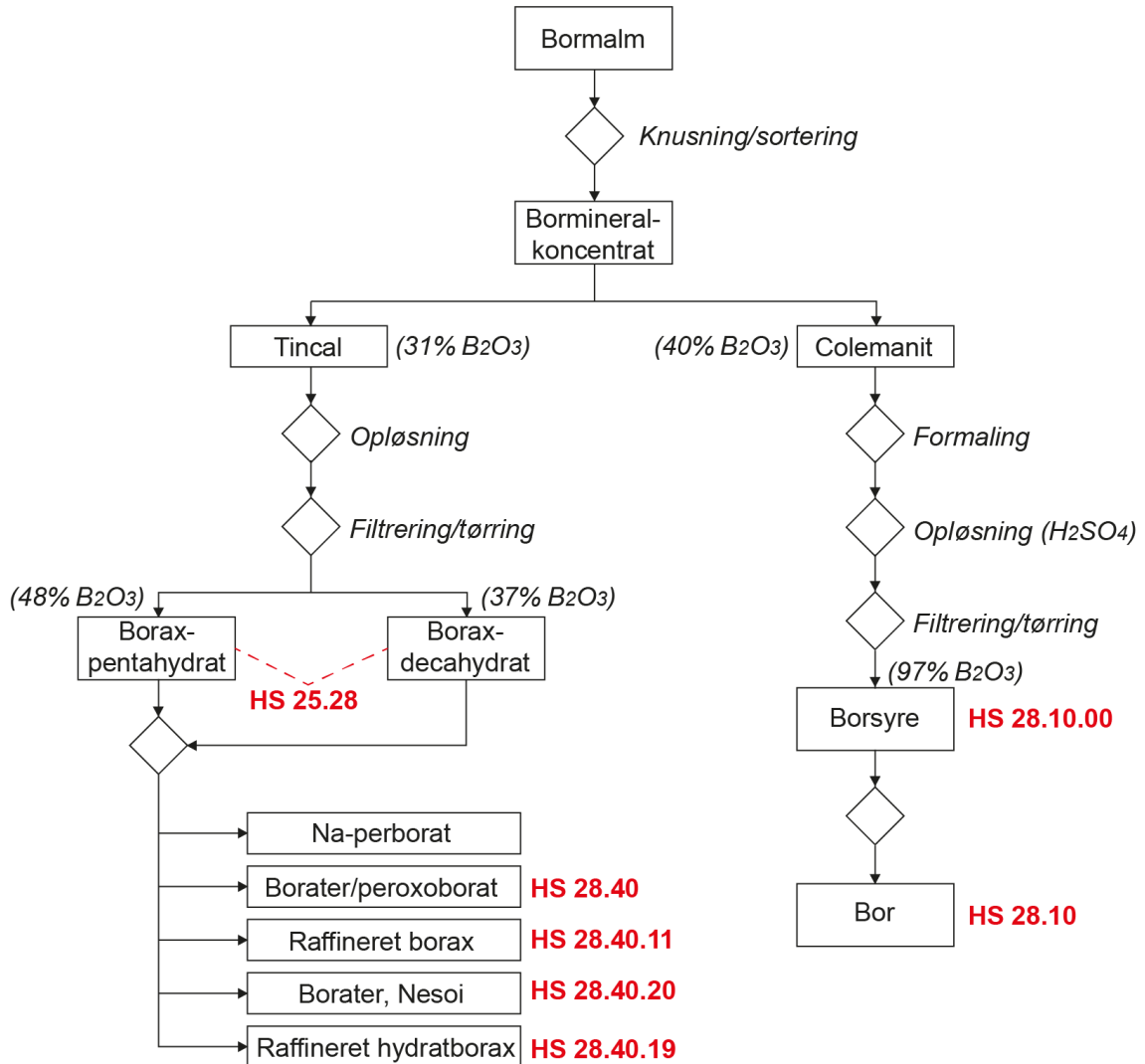
Forsyningskæderne for bor er almindeligvis stærkt vertikalt integrerede, så samme selskab udfører både mineraludvinding, forarbejdning af malmen og fremstiller raffinerede produkter (frem til 3. derivat). Derfor er det vanskeligt at opdele forsyningskæder for borprodukterne i øvre, mellem og nedre dele af forsyningskæderne. Nedenstående gives en gennemgang af de typiske processer fra brydning af bormineraler/behandling af borholdige brines til nogle færdige råvarer (se også Figur 2-4).

Minedrift/indvinding: Hovedparten af indvindingen af bor udføres som minedrift i åbne miner; herudover indvindes bor fra evaporitter (grundvand/overfladevand med særligt højt saltindhold). Behandlingen af malmen/evaporitten varierer i forhold til det dominerende bormineral:

- Behandling af tincal/borax-malm: Malmen knuses og opløses i kogende vand, og ikke-opløselige bestanddele frasorteres. Den borholdige opløsning udkrystalliseres, filtreres og tørres; produkterne er typisk boraxpentahydrat og boraxdecahydrat. Boraxpentahydrat anvendes til fremstilling af anhydratborax, og boraxdecahydrat anvendes især til fremstilling af rengøringsmidler.
- Behandling af ulexit-koncentrat omfatter følgende procestrin: opløsning i vand, filtrering, kalcinerings (625-850 °C), formaling og sortering. Produkterne anvendes enten direkte eller indgår som råstof i yderligere forarbejdning.
- Behandling af colemanit-malm omfatter følgende procestrin: Nedknusning og udsortering af colemanit; opløsning af colemanit i soda, hvorved der dannes natriumborat, som anvendes til fremstilling af borsyre. Borsyren filtreres, centrifugeres og sælges enten som krystal eller pulver (Elevli *et al.* 2022).
- Behandling af datolit-malm (indgår kun i de russiske produktioner): Malmen knuses og opløses i soda, hvorved der fremstilles borsyrer, som ved behandling med natriumkarbonat omdannes til decahydratborax (Warren 2020).

Produktion af borsyre og boraxdecahydrat udføres verden over af virksomheder, som ikke selv bryder malmen, men indkøber semiprodukterne hertil; fx eksporterer Tyrkiet 75 % af deres produktion som råborat.

Energi-, vand- og råstofforbrug til fremstilling af borsyre, boraxpentahydrat, boraxdecahydrat og natriumperborat er vist i Tabel 2-5, hvoraf det fremgår, at især vandforbruget er markant.



Figur 2-4 Generisk procesdiagram for fremstilling af borprodukter med angivelse af en række handelsvarekoder (HS-koder).

2.4.5 Klima- og miljøpåvirkning

De klimatiske og miljømæssige påvirkninger ved fremstilling af borprodukter varierer både i forhold til, hvilket mineral der anvendes som råstof, og hvilket produkt der fremstilles. Türkbay *et al.* (2022a, b) rapporterer vand- og energiforbrug samt CO₂eq for produktion af en række forskellige borprodukter (Tabel 2-5); afhængigt af procesruten vil værdierne i tabellen skulle adderes.

Tabel 2-5 Oversigt over forbrug af råstof, vand og energi til fremstilling af 1 ton raffineret borprodukt. Kilde: Türkbay et al. (2022a, b), baseret på data fra 1987.

| Bormineral | Forbrug af borråstof, vand og energi per ton borprodukt | | | | Produkt 1 ton |
|--------------|---------------------------------------------------------|----------|------------------------|---------------------|------------------|
| | Ton | EI (kWh) | Vand (m ³) | CO ₂ -eq | |
| Colemanit | 1,5 | 130 | 25 | 495 | Borsyre |
| Tincal | 2,3 | 130 | 45 | 566 | Boraxpentahydrat |
| Tinal | 1,7 | 125 | 14 | 1.248 | Boraxdecahydrat |
| Konc. tincal | 1,1 | 110 | 6 | 1.701 | Natriumperborat |

2.5 Handel

En oversigt over vigtige kommercielle borprodukter er vist i Tabel 2-6. Handelsstatistikker giver kun mulighed for at vurdere enkelte af de kommercielle borprodukter, heriblandt mineralkoncentreter. Den internationale handel for borat (HS 28.40), bor (HS 28.10.) og borax (HS 25.28) udgjorde mere end 2 mia. USD. i 2020 (Tabel 2-7).

Tabel 2-6 Vigtige kommercielle borprodukter, med angivelse af borindhold. Kilde: Helvaci (2017).

| Produkt | Kemisk formel | Typisk borindhold (B ₂ O ₃ %) |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Boraxdecahydrate | Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O | 30 |
| Boraxpentahydrat | Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O | 47 |
| Borsyre | H ₃ BO ₃ | 56 |
| Boraxanhydrat | B ₂ O ₃ | 100 |
| Natriumperborat | NaBO ₃ ·4H ₂ O | 22 |
| Rå-boraxanhydrat | Na ₂ B ₂ O ₃ | 69 |

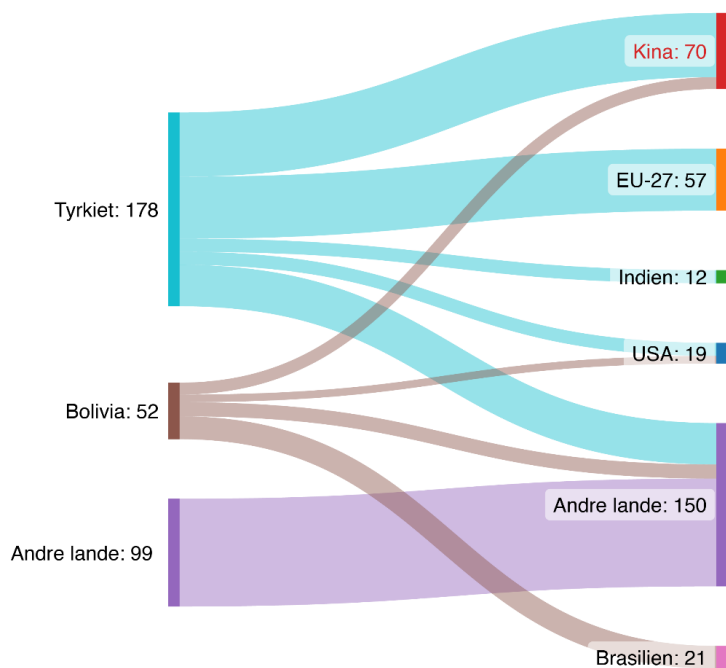
Tabel 2-7 International handel med udvalgte borprodukter i 2020, med angivelse af handelskode og -værdi. Kilde: OEC World (2023).

| HS-kode | Varekodebeskrivelse | Værdi (mio. USD) |
|----------|----------------------------------------|------------------|
| 25.28 | Borax | 404 |
| 28.40 | Borates | 1.100 |
| 28.40.11 | Disodium tetraborate (refined borax) | 73 |
| 28.40.19 | Disodium tetraborate – refined | 855 |
| 28.40.20 | Borates of metals except refined borax | 157 |
| 28.10 | Boron | 538 |

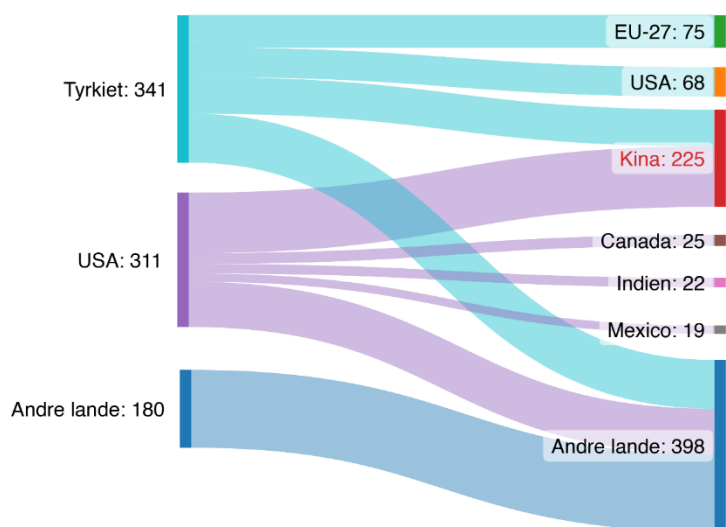
Tyrkiet og USA har domineret markederne for borprodukter i mere end 20 år, og i 2020 stod de to lande for ca. ¾ af eksporten – med Kina som en ubetydelig eksportør og producent. Omvendt gælder, at Kina dominerer importen, som aftager c. 17% af borax eksporten (HS 25.28); 34% af bor eksporten (HS 28.10) og 27% af borat eksporten (HS28.40).

Eftersom Tyrkiet og USA dominerer markederne for borprodukter, er de også helt dominerende i forhold til eksport af borat (HS 28.40) og bor (HS 28.10) med henholdsvis 78 % af verdenshandlen for borat og 58 % målt i handelsværdien af verdenshandlen for bor; for borax (HS 25.28) er eksporten domineret af Tyrkiet og Bolivia med henholdsvis 54 % og 16 %. Det fremgår desuden, at Kina er verdensledende importør for alle tre produkter og er USA's vigtigste importør for borat og

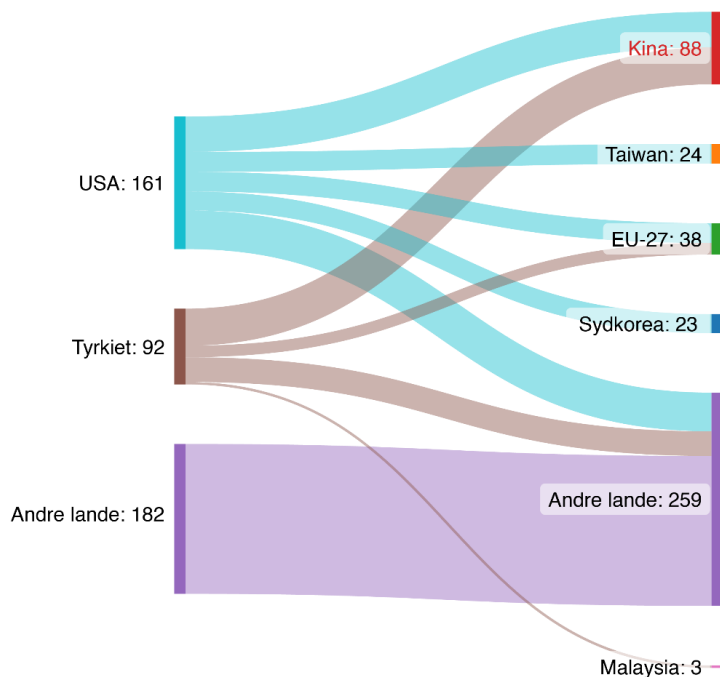
bor, endda med stigende betydning set over perioden 2010-2020. Disse handelsrelationer er illustreret i Sankey-diagrammer i Figur 2-5 til Figur 2-7.



Figur 2-5 Sankey-diagram for eksport-import af borax (HS 25.28) i 2020. Alle værdier i mio. USD. Baseret på OEC World (2023).



Figur 2-6 Sankey-diagram for eksport-import af borat (HS6 28.40) i 2020. Alle værdier i mio. USD. Baseret på OEC World (2023).



Figur 2-7 Sankey-diagram for eksport-import af boroxid og borsyre (HS 28.10) i 2020. Alle værdier i mio. USD. Baseret på data fra OEC World (2023).

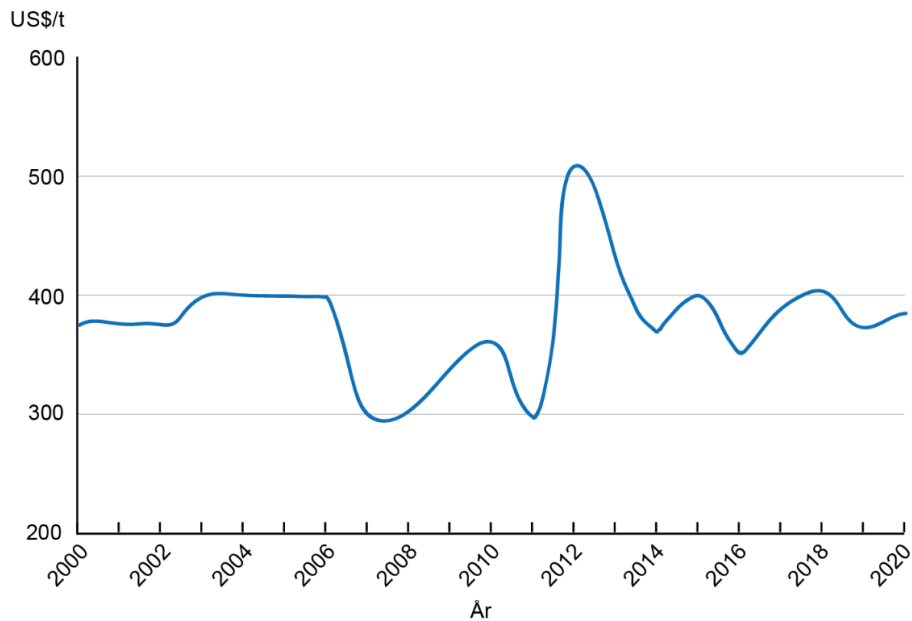
2.5.1 Priser

Priserne for bormineralkoncentrater er bestemt af borindholdet samt indhold/fravær af især calcium, natrium og kalium; for de afledte produkter indgår desuden energiforbruget i prisdannelsen. Prisen for bor er vist i Figur 2-8 og efter kraftige variationer i 2007 og de følgende år, har prisen været relativt stabil fra 2013 og frem til 2020. Prisvolatiliteten for borater lå på omkring 8 % mellem 2016 og 2020 (Screen2 Boron factsheet 2023), ligeledes har importpriserne for de mest almindelige borprodukter (borsyrer og boraxpentahydrat) til EU har været nogenlunde stabile i perioden 2010-2020.

Global Market Insights (2021) vurderer, at markedet for bormineraler og -kemikalier i 2020 udgjorde 3.363 mio. USD, og med en årlig vækst på 4,3 % vil det i 2027 udgøre ca. 4.500 mio. USD. Væksten skyldes især øget forbrug til energireduktion (isoleringsmaterialer o.l.) samt til glas og keramiske materialer, som indgår i konstruktionsindustrien.

Markedet for colemanit-produkter udgjorde i 2020 ca. 175 mio. USD og forventes at stige til 235 mio. USD i 2027. Global Market Insights (2021) forventer, at det globale marked for bormineral og -kemiske produkter til glas og keramiske formål vil udgøre omkring 3.000 mio. USD i 2027.

Nye markeder forventes at have en betydelig indvirkning på efterspørgslen efter borater, eksempelvis anvendelser af borater indenfor vedvarende energiteknologier, hvilket kan påvirke priserne de kommende 2-3 årtier (Bobbà *et al.* 2020; Widmer *et al.* 2015). Trods denne udvikling forventes prisændringer at forblive begrænsede, da der foregår vedvarende investeringer i nye boratfabrikker, hvilket bidrager til at kunne opretholde tilstrækkelig forsyning til den fremtidige efterspørgsel (Screen2 Boron factsheet 2023).



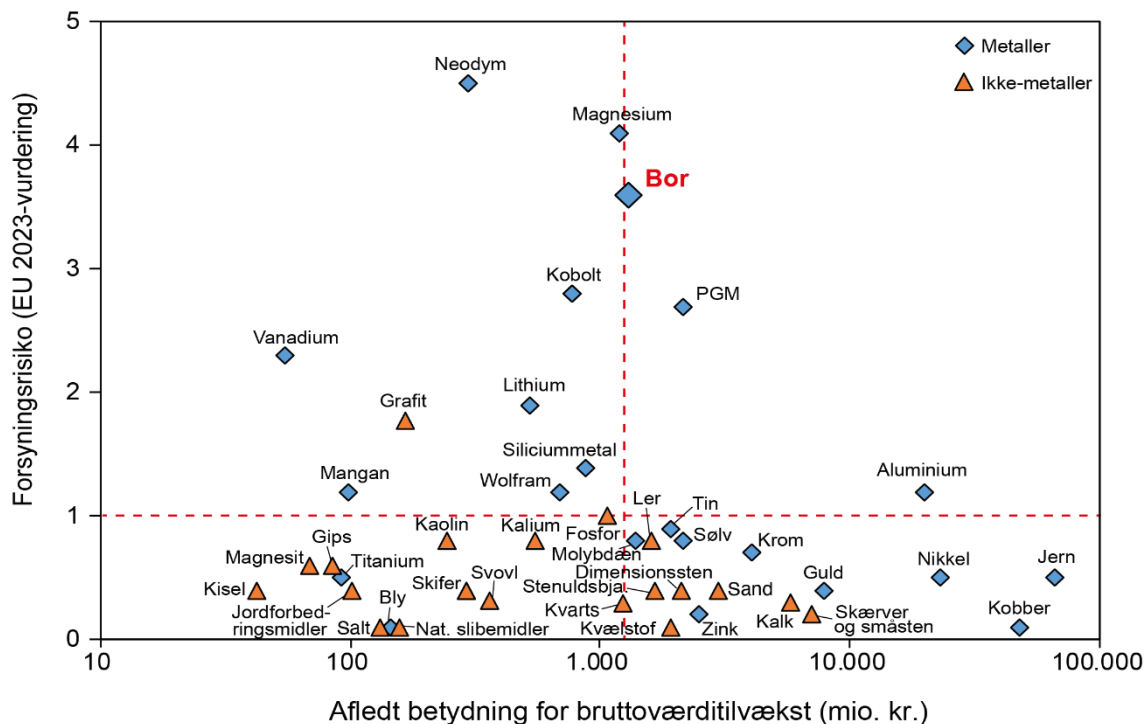
Figur 2-8 Prisudvikling for bor i perioden 2000-2020. Kilde: Screen2 Boron factsheet (2023).

2.6 Det danske forbrug af bor og dets økonomiske betydning

Anvendelsen af borstoffer i Danmark er ikke kortlagt. Clausen *et al.* (2023) vurderede dog den økonomiske betydning af bor for dansk industri og fandt at bors vigtigste anvendelse er glasfiber til vindmøller (Tabel 2-8), hvor det forbedrer stivhed, stræk- og trykstyrke (Mishnaevsky *et al.* 2017). Clausen *et al.* (2023) fandt desuden, at bor må betragtes som et kritisk råstof (Figur 2-9).

Tabel 2-8 Varekøb foretaget af primære og sekundære sektorer, hvor MiMa har identificeret indhold af bor. Baseret på Clausen *et al.* (2023).

| Vare | Købspris (mia. kr.) | Bors andel af råmateriale- omkostningerne | Købspris (mia. kr.) (bors andel) | Formål |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Glasfiber | 2,1 | 68 % | 1,5 mia. kr. | Glasfiber (formentlig til vindmøller) |
| Permanentmagneter til vindmøller | 0,4 | 0,2 % | 0,008 | Permanentmagneter til vindmøller |
| Diverse kemikalier | 0,018 | 100 % | 0,018 | Diverse formål |



Figur 2-9 Bor og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvækst som funktion af forsyningsrisikoen. Af de undersøgte råstoffer er aluminium sammen med bor og platingruppermetaller (PGM) vurderet som kritiske for dansk industri efter vurderingskriterierne benyttet af Clausen et al. (2023). Figur modificeret efter Clausen et al. (2023).

2.7 Perspektiver

Udvinding og produktion af bor udføres i en del lande, hvoraf dog Tyrkiet og USA er helt dominerende med tilsammen næsten $\frac{3}{4}$ af den globale produktion, efterfulgt af Kina (10 %), Chile (8 %) og Bolivia (5 %). Udvinding og produktion af bor kontrolleres af to store selskaber: det statsejede ETI Maden i Tyrkiet og US Borax.

De eksisterende globale forsyningskæder af borprodukter må vurderes som sårbare, som følge af at væsentlige dele af produktionen domineres af få selskaber i få lande, samt Kinas dominerende rolle som verdensledende importør af borax (HS 25.28), bor (HS 28.10) og borater (HS 28.40) og producent af værdiforædlede borprodukter, som fx borkarbider (>80 % fra Kina). Dette er også udtrykt i EU Kommissionens analyser, som siden 2014, og igen i 2023, har vurderet bor som et kritisk råstof med væsentlig økonomiske betydning for EU (EI: 3,1), og som kun i meget begrænset omfang kan substitueres. Tilsvarende blev både udvinding og processering af borprodukter vurderet som forsyningsudfordrede (SRE: 3,6; SRP: 1,4) (EC 2020, 2023). De fleste andre lande, med undtagelse af Japan, har dog ikke klassificeret bor som et kritisk råstof.

Der er forventninger til en stærkt stigende efterspørgsel af borprodukter, som et resultat af stigende forbrug i landbrugsindustrien, den keramiske industri, glasindustrien samt anvendelsesområder i tilknytning til grønne teknologier, herunder som råstof til NdBF_e-magneter. Elevli *et al.* (2022) forventer dog stabile markeder for borprodukter til den keramiske industri, landbrugsindustrien og den kemiske industri, men forventer en 8-10 % vækst til glasfiberindustrierne, som i 2023 forventes at aftage ca. 68 % af de ca. 2 Mt, der afsættes til disse industrier. Mining Journal

(2018) forventer en samlet årlig vækstrate på 6 %, og 5E Advanced Materials (2022) forventer, at forbruget i 2030 er ca. 9 Mt, hvilket er en fordobling af 2020-forbruget. Samtidig forventer 5E Advanced Materials (2022), at forbruget i 2050 er ca. 50 Mt, svarende til en årlig vækstrate på ca. 8,5 %; disse forventninger til kraftigt forøget forbrug skal muligvis ses i relation til at 5E Advanced Materials er en potentiel ny producent.

Borates Today (2022b, d) forventer, at resultatet af stigende forbrug og fravær af alternativer vil øge forsyningsudfordringerne frem mod 2030, og at der allerede i 2028 vil opstå et underskud på ca. 2 Mt borsyre-ækvivalenter. Det har ikke været muligt at verificere denne vurdering, da: (a) data for den eksisterende globale produktion er usikre; (b) der foreligger ikke data for USA's produktion; (c) forskellige opgørelsesmetoder er årsag til store variationer i nationale opgørelser; (d) potentialet for forøgelse af de eksisterende produktioner er ukendt; og (e) fordi bor vil være et biprodukt til nogle af de kommende lithiumproduktioner; eksempler på en sådan kobling blandt de nye efterforskningsprojekter er bl.a. Jadar-projektet i Serbien samt projekterne Rhyolite Ridge og Fort Cadiz i USA.

De industrielle anvendelser af bor, der primært anvendes i kemiske forbindelser i glasmaterialer, kemikalier, hårdmetaller, rengøringsmidler og gødningsmidler, giver kun mulighed for helt ubetydelig genanvendelse. Desuden er der kun begrænset mulighed for substitution. Da der forventes øget efterspørgsel og ikke tilsvarende produktionsøgning frem mod 2030, må det antages, at forsyningen af bor yderligere udfordredes allerede inden for en kort årrække.

2.8 Referencer

- 5E Advanced Materials 2023: Boron: A critical super material. [Boron 101 – 5E Advanced Materials, Inc](#)
- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F. & Pavel, C. 2020. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU – a Foresight Study. In JRC. <https://doi.org/10.2873/58081>
- Borates Today 2021: Boron: The Holy Grail of aerospace and defense. June 7, 2021.
- Borates Today 2022a: Country Profile of China Borates. January 29, 2022. ([Country Profile Of China | Borates Today](#))
- Borates Today 2022b: Boron: New Suppliers ramp up for production. April 24, 2022, Science, Chemistry, Mining [Boron: New Suppliers Ramp Up For Production | Borates Today](#)
- Borates Today 2022c: Country Profile of Bolivia. January 19, 2022. [Country Profile Of Bolivia | Borates Today](#)
- Borates Today 2022d: New suppliers ramp up for production. April 24, 2022. [Boron: New Suppliers Ramp Up For Production | Borates Today](#)
- Cann, C. 2018: Borates suddenly interesting Mining Journal 2018 ([Borates suddenly interesting - Mining Journal \(mining-journal.com\)](#))
- Clausen, R. J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. and Vind, I. 2023: Dansk industris brug af mineralske råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/gpub/32051>
- European Commission (EC) 2020: Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) – Final report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c0d5292a-ee54-11ea-991b-01aa75ed71a1/language-en>

- European Commission (EC) 2023: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- Elevli, B., Yaman, I & Laratte, B. 2022: Estimation of the Turkish Boron Exportation to Europe. MDPI (Mining 2022, 2(2), 155-169; <https://doi.org/10.3390/mining2020009>)
- Global Market Insights 2021: Boron Minerals and Chemicals Markets. November 2021. [Boron Minerals and Chemicals Market Statistics - 2027 \(gminsights.com\)](https://www.gminsights.com)
- Helvacı, C. 2017: Borate deposits: An overview and future forecast with regard to mineral deposits. Journal of Boron 2 (2) 59-70, 2017.
- Mindat (2022): Tincalyu Mine, Antofagasta de la Sierra Department, Catamarca Province, Argentina. <https://www.mindat.org/loc-51.html>
- Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H.N., Beauson, J., McGugan, M. & Sørensen, B.F. (2017): Materials for wind turbine blades: an overview. Materials 2017, 10, 1285, Nov. 2017.
- Observatory of Economic Complexity World (EOC World) 2023: Database <https://oec.world/>
- Screen2 Boron factsheet 2023: Screen2 Factsheets updates based on the EU Factsheets 2020 Boron. https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCREEN2_factsheets_BO-RO-1.pdf
- Sun, K. 2022: A centre piece for decarbonisation: boron flies under the radar. Market Index. [A centre piece for decarbonisation: boron flies under the radar \(marketindex.com.au\)](https://www.marketindex.com.au)
- Türkbay, T., Laratte, B., Çolak, A., Çoruh, S. & Elevli, B. 2022a: Life Cycle Assessment of Boron Industry from Mining to Refined Products. Sustainability, MDPI, 2022, 14 (3), pp.1787.
- Türkbay, T., Bongono, J., Alix, T. Laratte, B. & Elevli, B. 2022b: Prior knowledge of the data on the production capacity of boron facilities in Turkey. Cleaner Engineering and Technology 10 (2022) 100539.
- Ulex Empresa Minera 2020: www.ulex.com
- University of Tehran 2023: Abstract on the Gharah-Gol borate deposit. - (ut.ac.ir)
- USGS 2000-2023: Mineral commodity summaries 2000-2023: U.S. Geological Survey <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>
- USGS 2022: Producer in Kazakhstan with commodities Boron-Borates, Potassium, Gypsum-Anhydrite, Clay. Mineral Resource Data System (MRDS). [Index \(MRDS #10055357\) B \(usgs.gov\)](https://mrds.usgs.gov/entry/10055357)
- Warran, J. 2020: Geology and production of saline borate salts. Feb. 29, 2020; [www.saltwork-consultants.com. https://saltworkconsultants.com/downloads/57%20Borates.pdf](https://saltworkconsultants.com/downloads/57%20Borates.pdf)
- Widmer, J. D., Martin, R. & Kimiabeigi, M. 2015: Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. Sustainable Materials and Technologies, 3, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.02.001>
- World Mining Data (WMD) 2022: Vol 37, 28 April 2022 <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>

3. Jern og stål

3.1 Introduktion

Grundstoffet jern (Fe) med atomnummer 26 er et vidt udbredt sølvgråt, formbart, magnetisk og relativt tungt ($7,8 \text{ g/cm}^3$) metal, som i sin rene form smelter ved $1.538 \text{ }^\circ\text{C}$ og koger ved $2.861 \text{ }^\circ\text{C}$. Ved legering med andre metaller kan smelte- og kogepunktet nedbringes. Jern anvendes helt overvejende til fremstilling af stål, som er et kompositmateriale bestående af jern, kulstof og legeringsmetaller. Stål er et vitalt materiale i alle moderne samfund, hvor det indgår i produktionen af infrastruktur, produktion af transportmidler, maskiner og mange andre industrier. I 2022 blev der produceret mere end 1.840 Mt stål, baseret på 2.600 Mt jernmalm fra især Australien og Brasilien og 600 Mt jernskrot. Kina er langt den største producent af stål, og forbruget er siden 2000 steget med 1,7 % pr. år. Jern vurderes ikke som et kritisk råstof, og der udarbejdes ikke kritikalitetsvurderinger for stål. Men til fremstilling af stål anvendes der udover jern en række hjælpestoffer, hvoraf flere vurderes som kritiske råstoffer i EU og andre lande, hvorfor forsyningskæderne for stål kan være udfordrede. World Economic Forum (2022) forventer, at stålforbruget i 2050 er øget med ca. 30 % i forhold til 2022; dette svarer til en samlet stålproduktion på ca. 2.400 Mt (World Economic Forum 2022). I nærværende gennemgang af jern og stål behandles de som to separate produktioner.

Den globale stålproduktion udleder 7-11 % af den samlede årlige CO₂-emission (EU Parliamentary Research Service 2021, Hasanbeigi 2022) og med den forventede vækst i stålforbruget, foregår der mange tests og implementeringer af emissionsreducerende metoder.

3.2 Anvendelser (end-use) og sektorer

I 2021 blev mere end halvdelen af den samlede stålproduktion anvendt til konstruktioner i bygninger og infrastruktur (52 %), efterfulgt af bilindustri, tog og skibe (17 %), mekanisk udstyr (16 %), metalprodukter (10 %), elektrisk udstyr (3 %) og udstyr i husholdninger (2 %) (Figur 3-1). Der er betydelige afvigelser fra land til land, idet lande med store jern- og stålforbrugende industrier og stor udbygning af infrastruktur anvender mest. Dette illustreres af Kina i 2020 forbrugte 58 % af næsten 1,9 mia. ton produceret stål, og de resterende ca. 850 mio. ton blev forbrugt af det øvrige Asien (9 %), EU-28 (8 %), USMCA (6 %), Indien (5 %), CIS (3 %), Japan (3 %), Afrika (3 %), Mellempøsten (3 %), samt ca 2 % fordelt på resten af verden (World Steel, 2021).

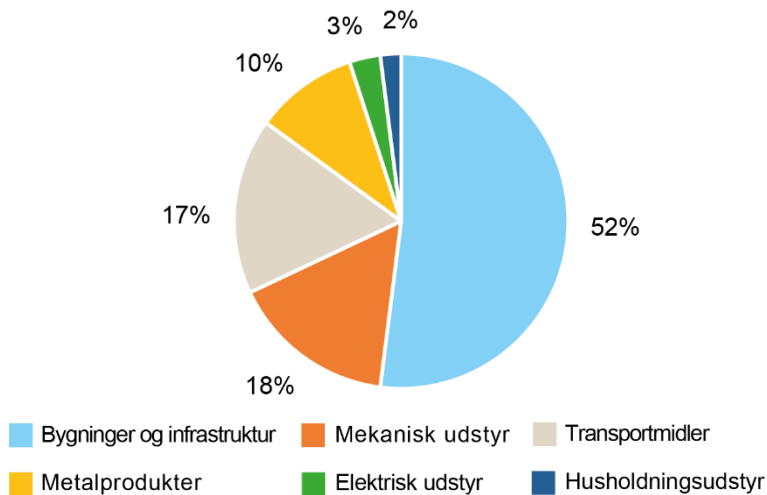
Der anvendes flere klassifikationstyper for stål, som typisk er baseret på (a) materialets kemiske sammensætninger (indhold af kulstof og legeringsmetaller), (b) deres form og funktion eller (c) stålets fysiske egenskaber. De fleste opdelinger tager udgangspunkt i følgende fire hovedtyper: karbonstål, legeringsstål, rustfrit stål og værktøjsstål.

Karbonstål er en fællesbetegnelse for stål legeret med kulstof i mængde fra 0,05 til 2,1 %. Til bygninger og infrastruktur anvendes primært undertyper tilhørende gruppen af karbonstål med lavt kulstofindhold, og det er derfor den type, der produceres mest af.

Legeringsstål indeholder et eller flere af metallerne aluminium, kobber, nikkel, titan, mangan m.fl., som typisk udgør >5 %. Det anvendes, hvor der er behov for et korrosionsrobust materiale, der kan forarbejdes.

Rustfrit stål, som indeholder 10-20 % krom, nikkel og molybdæn, er korrosionsresistent og anvendes derfor bl.a. til fødevarerudstyr, medicinalindustrien og maritime industrier; i 2022 udgjorde produktionen af rustfrit stål 55 Mt.

Værktøjsstål anvendes, hvor der er behov for et materiale med stor slidstyrke; denne type stål er derfor karakteriseret ved at indeholde legeringsmetallerne kobolt, wolfram, molybdæn og vanadium.



Figur 3-1 Anvendelsesområder for stål i procent i 2020. Kilde: Statista (2022).

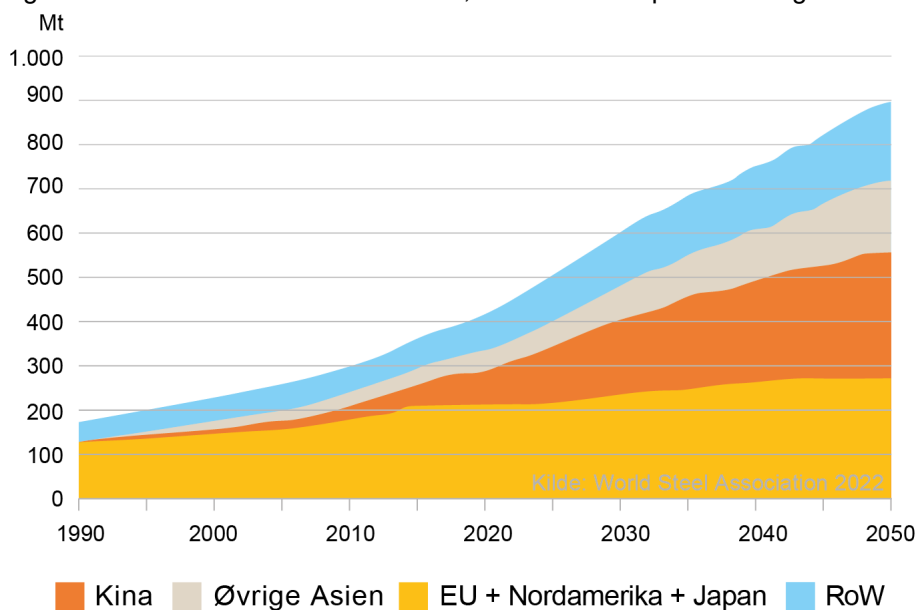
3.3 Genanvendelse og substitution

Jernskrot er eftertragtet som råstof til fremstilling af nye jern- og stålprodukter, og der er betydelige ressourcemæssige gevinster ved anvendelse af skrot til fremstilling af stål, da der ved fremstilling af 1 ton stål fra jernskrot spares 1,4 ton jernmalm, 0,8 ton kul, 0,3 ton kalksten og additiver; i tillæg reduceres CO₂-udledningen med 1,7 ton CO₂, og vandforbruget reduceres med 40 % (Screen2 Iron ore factsheet 2023). Ifølge Arcelormittal (2023) genanvendes omkring 85-90 % (EoL-RR) af alt stål globalt. Dog varierer genanvendelsesgraden mellem forskellige sektorer og er omkring 50 % for elektriske apparater, 85 % for byggeri og op til 90 % for bil- og maskinindustrien (Allwood 2016). Selvom genanvendelse af jern og stål allerede dækker en betydelig del af det globale forbrug, og kan yderligere effektiviseres, er de tilgængelige mængder jernskrot utilstrækkelige til at dække råstofbehovet til fremstilling af nyt stål. Dette skyldes, at det globale stålforbrug generelt øges med 1-2 % pr. år, skrotalderen er 40 år og indsamlingseffektiviteten er betydeligt under 100 % og aldrig vil være fuldkommen.

I 2030 forventes der at være ca. 600 Mt skrot til rådighed, hvoraf ca. 30 % er fra Nordamerika, EU og Japan, mens 25 % er fra Kina. Frem mod 2050 vil de vestlige landes skrotmængder være i samme størrelsesorden som i dag, hvorimod især Kinas skrotmængder vil vokse, så der forventes at være ca. 900 Mt jernskrot til rådighed for stålproduktionen i 2050 (Figur 3-2). Visse metaller, bl.a. kobber, kan ikke separeres fra jernskrot og kan derfor ikke genanvendes; desuden kan et forhøjet kobberindhold på sigt forringe stålqualiteten, hvilket har betydning for, hvordan stålet efterfølgende kan anvendes.

Ved fremstilling af stål er det ikke muligt at substituere jern med andre metaller. For at reducere forbruget af jern – og reducere klimaaftrykket – er udviklingsarbejdet mere rettet mod at erstatte

stål med andre materialer, herunder træ og beton til bygge- og anlægsopgaver, samt komposit- og letmetalmaterialer til andre sektorer, herunder transportmidler og maskinindustrien.



Figur 3-2 Forventninger til efterspørgslen af jernskrot frem mod 2050. Kilde: World Steel Association (2022).

3.4 Global forsyning

3.4.1 Geologi

Jernmalm udnyttes fra forekomster i både sedimentære, magmatiske og metamorfe geologiske miljøer. Forekomster af sedimentære bandede jernformationer (BIF) er den vigtigste jernmalms-type og brydes for at udnytte de jernholdige mineraler magnetit og hæmatit. Nogle af de største BIF-forekomster kendes fra Brasilien, Australien, Indien og USA; i Grønland tilhører Isua-jernmalmsforekomsten denne gruppe. Guld udvindes enkelte steder som biprodukt fra BIF-forekomster.

Jern findes i en lang række af mineraler, hvoraf specielt jernoxiderne hæmatit, magnetit og titanomagnetit er langt de vigtigste, da de indeholder mest jern (Tabel 3-1); de mest anvendte forarbejdningsmetoder er skitseret i Figur 3-8 og omtales i afsnit 3.4.4 Global stålproduktion.

Magmatiske jernmalmsforekomster opdeles i IOA (Iron-Oxide-Apatite)- og IOCG (Iron-Oxide-Copper-Gold)-forekomster, hvor magnetit, titanomagnetit og hæmatit er de dominerende Fe-malmmineraler i disse typer. IOA- og IOCG-forekomster udnyttes især i Sydamerika, Asien, Afrika og Australien; i Sverige er Kiruna og Grängesberg ligeledes af denne type. Kobber og guld (IOCG), sjældne jordartsmetaller (REE), guld, sølv og kobolt er biprodukter som udnyttes flere steder.

3.4.2 Globale jernmalmsreserver

Opgørelser over globale malmreserver er dynamiske og generelt ikke præcise, idet de påvirkes i op- og nedadgående retning af tilskud fra ny mineralefterforskning, jernmalmspriser,

omkostninger og evt. ny teknologi. I perioden 2000 til 2020 er de globale jernmalmsreserver øget fra ca. 140 mia. ton til 183 mia. ton, hvoraf hovedparten findes i Australien, Brasilien, Rusland og Kina (Tabel 3-2) (USGS 2020-2023). Men da jernmalmsproduktionen i perioden er øget, er det antal år, som reserverne vil række i forhold til efterspørgslen i opgørelsesåret, reduceret med ca. 50 % fra 140 produktionsår i år 2000 til 69 år i 2022.

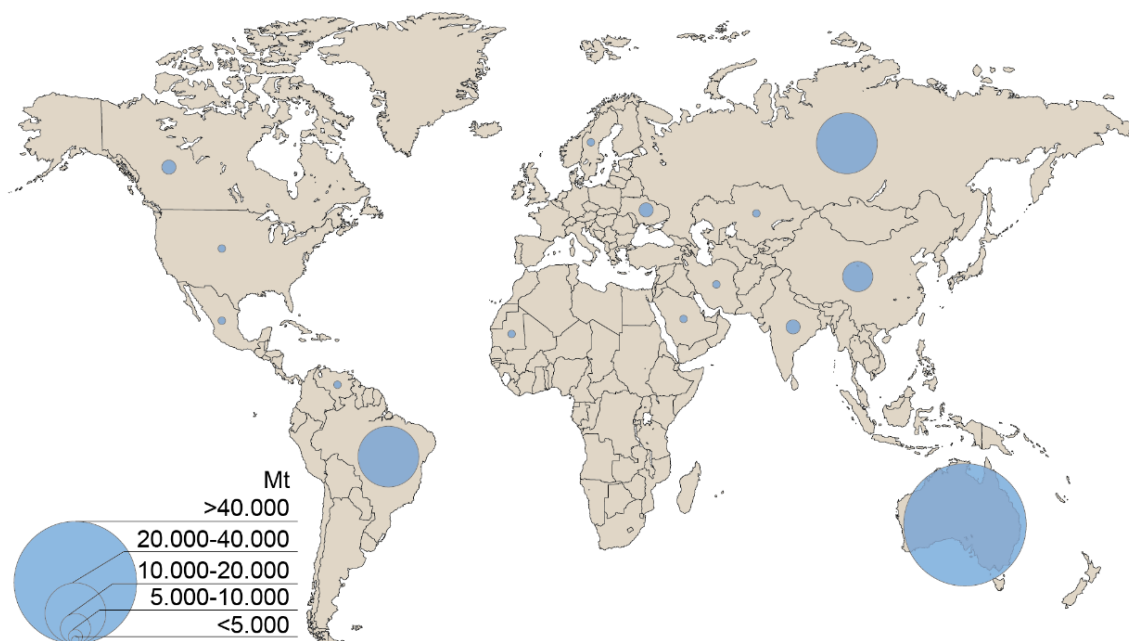
I Figur 3-3 ses den geografiske fordeling af verdens største jernmalmsreserver.

Tabel 3-1 Oversigt over de mest anvendte mineraler til fremstilling af jern og stål.

| Mineral | Kemisk formel | Jernindhold (vægt%) | Anvendelse | Jernmalmstype |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| Hæmatit | Fe_2O_3 | 70 | Vigtigt | Sedimentære (BIF), magmatiske, metamorfe |
| Magnetit (titano-magnetit) | Fe_3O_4 ($\text{Fe}(\text{Fe},\text{Ti})_2\text{O}_4$) | 60-70 | Vigtigt | Sedimentære (BIF), metamorfe |
| Limonit | $\text{FeO}(\text{OH})_n\text{H}_2\text{O}$ | 40-60 | Tidligere vigtigt i særligt Europa | Sedimentære |
| Siderit | FeCO_3 | 30-48 | Marginalt | |
| Goethit | $\text{FeO}(\text{OH})$ | <60 | Mest som biprodukt med hæmatit og magnetit | Sedimentære |
| Chamosit | $(\text{Fe}_2, \text{Mg})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{O})_8$ | low | Mest som biprodukt med hæmatit og magnetit | |
| Pyrit | FeS_2 | 45-53 | Bruges kun få steder | Sedimentære, magmatiske, metamorfe |

Tabel 3-2 Udviklingen i jernmalmsreserver fra 2000 til 2021. Kilde: USGS (2000-2022).

| Reserver (x1.000.000) | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2021 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| USA | 10.000 | 6.900 | 6.900 | 11.500 | 3.000 |
| Australia | 18.000 | 15.000 | 24.000 | 54.000 | 51.000 |
| Brasilien | 7.600 | 23.000 | 29.000 | 23.000 | 34.000 |
| Canada | 1.700 | 1.700 | 6.300 | 6.300 | 6.000 |
| China | 25.000 | 21.000 | 23.000 | 23.000 | 20.000 |
| Indien | 2.800 | 6.600 | 7.000 | 8.100 | 5.500 |
| Iran | n.a. | 1.800 | 2.500 | 2.700 | 2.700 |
| Kasakhstan | 8.300 | 8.300 | 8.300 | 2.500 | 2.500 |
| Mauretanien | 700 | 700 | 1.100 | n.a. | n.a. |
| Mexico | n.a. | 700 | 700 | n.a. | n.a. |
| Rusland | 20.000 | 25.000 | 25.000 | 25.000 | 29.000 |
| Sydafrika | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Sverige | 3.500 | 3.500 | 3.500 | 3.500 | 1.300 |
| Ukraine | 22.000 | 30.000 | 30.000 | 6.500 | 6.500 |
| Venezuela | | 4.000 | 4.000 | | |
| Øvrige | 17.000 | 11.000 | 11.000 | 18.000 | 18.000 |
| Total | 137.600 | 160.200 | 183.300 | 185.100 | 180.500 |



Figur 3-3 Geografisk fordeling af de største jernmalmsreserver i 2021 (USGS 2022).

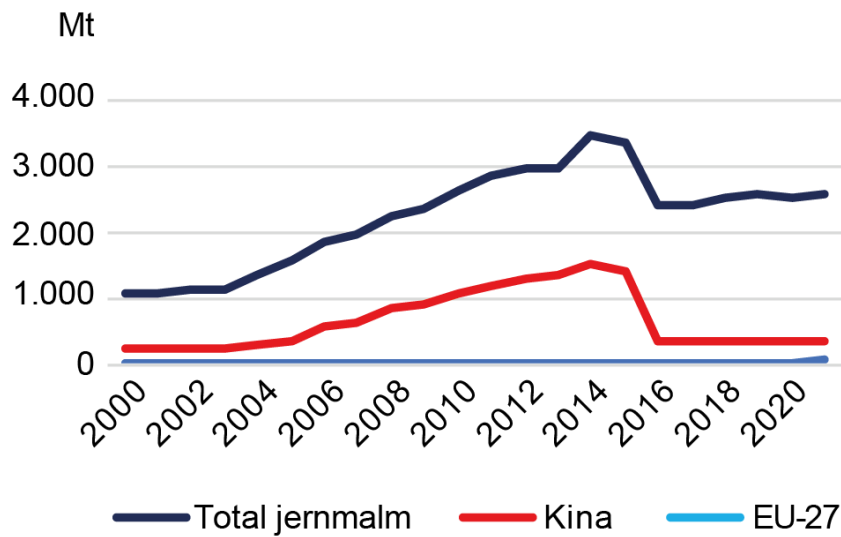
Store nye jernmineprojekter er under udvikling/etablering i Australien (bl.a. Iron Bridge Project, Hawsons, CEIP, Eliwana, South Frank, Koodaideri), Vestafrika (Simandou og Nimba i Guinea, Tonkolili i Sierra Leone, Baniaka i Gabon), Brasilien (bl.a. Jiboia, Capanema og Jambreiro). Forekomster med højt jernindhold (>65 %) er særligt attraktive, da jern- og stålværkerne kan erstatte BOF-behandling med DRI efterfulgt af EAF, da metoden er mindre CO₂-belastende (se afsnit 3.4.4 Global stålproduktion). Disse krav kan kun opfyldes af få af de kommende projekter og kan forsinke reduktionen af klimabelastningen fra stålproduktionen (S&P Global 2022).

3.4.3 Global jernmalmsproduktion

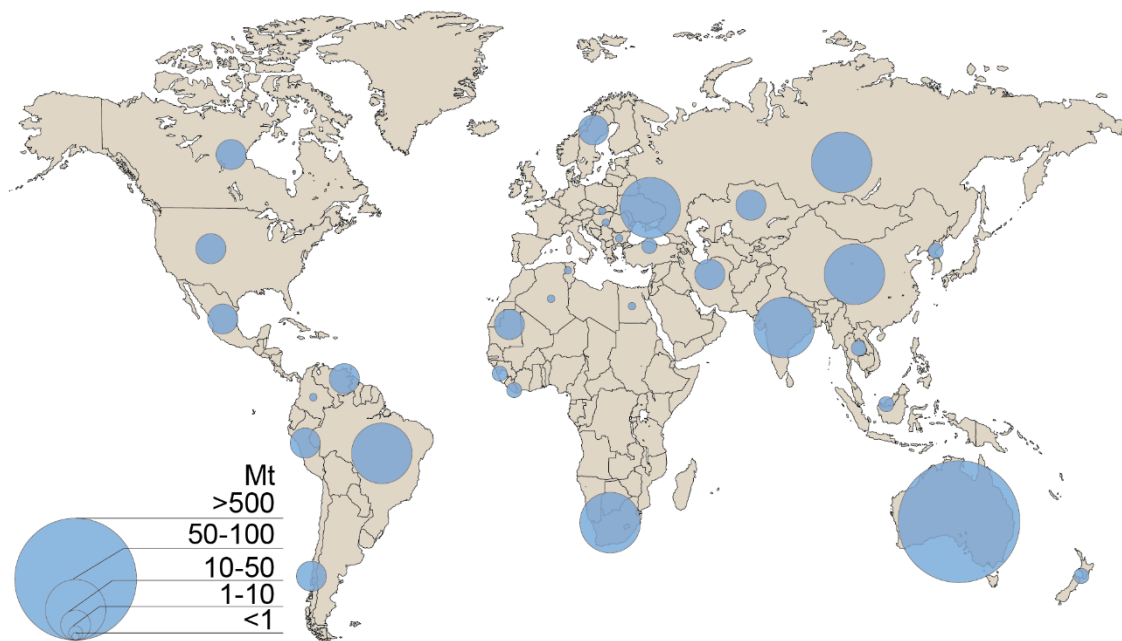
I 2022 blev der produceret ca. 2,6 mia. ton jernmalm, som især blev udvundet i Australien (33 %), Brasilien (15 %), Kina (14 %) og Indien (11 %); Sverige var den eneste europæiske producent (1 %).

Jernmalmsproduktionen voksede med ca. 200 % i perioden 2000-2015 og er steget med omkring 2 % pr. år med Kina som den dominerende producent. Efter 2015 blev Kinas produktionsfald blev især kompenseret af Australien, som i perioden 2012-2016 havde en stærkt voksende produktion og siden 2016 har været den største producent af jernmalm. Det store fald i Kinas produktion af jernmalm i 2015-2016, tilskrives et stort prisfald på jernmalm i 2014-2016, som medførte, at en del private jernminer i Kina i Anhui og Shandong måtte lukke (S&P Global 2016). MiMa finder det sandsynligt, at reduktionen af Kinas jernmalmsproduktion også beror på ændrede industristrategier, hvor Kina i stigende omfang udliciterer råstofforsyningen og udbygger/udvikler de mellemste og nedre dele af værdikæderne. Kinas forsyningssikkerheden for jernmalmen er knyttet op på finansielle og tekniske aftaler med udenlandske mineselskaber.

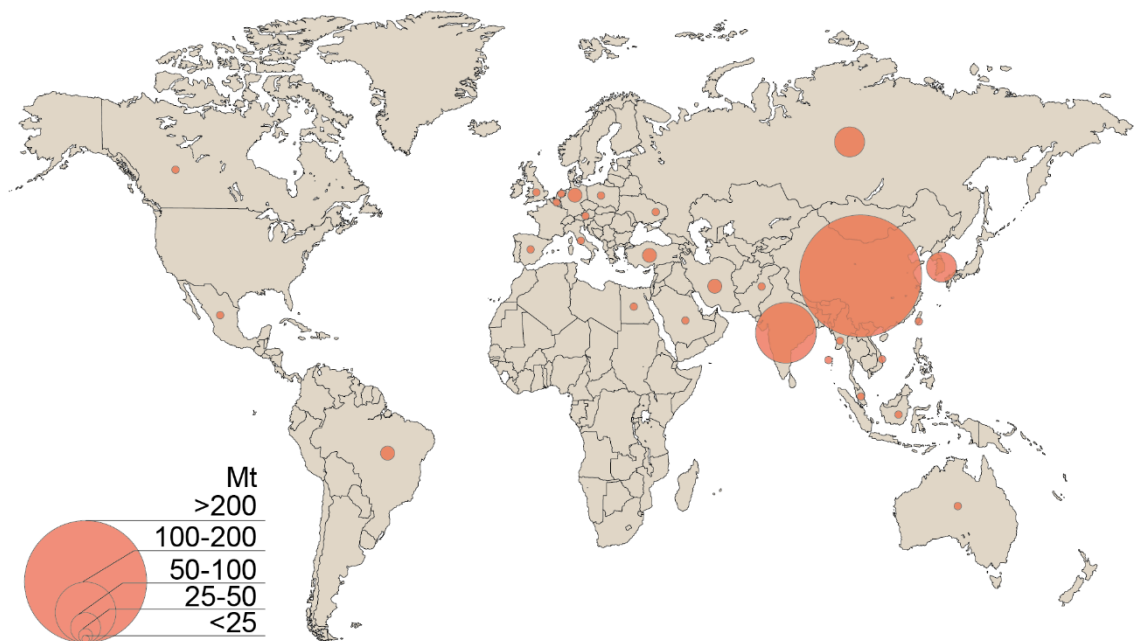
I Figur 3-5 ses den geografiske fordeling af jernmalmsproduktionen i 2022, og i Figur 3-6 ses den geografiske fordeling af råstålproduktionen i 2022.



Figur 3-4 Jernmalmsproduktion i perioden 2000-2021. Kilde: USGS (2000-2022).



Figur 3-5 Geografisk fordeling af jernmalmsproduktionen i 2022. Kilde: USGS (2023).



Figur 3-6 Geografisk fordeling af råstålproduktionen i 2022. Kilde: World Steel Association (2023).

3.4.3.1 Selskaber involveret i jernmalmsproduktion

De 20 største jernminer, med en samlet produktion på ca. 1,2 mia. ton jernmalm, kontrolleres af 10 mineselskaber, hvoraf de tre største, Rio Tinto (26 %), Vale (24 %) og BHP (22 %), producerede næsten $\frac{3}{4}$ af jernmalmen i 2021 (Tabel 3-3). De dominerende selskaber er geografisk koncentreret, idet BHP kun opererer jernmalmsminer i Australien; Vale og Anglo America kun i Brasilien, men Rio Tinto afviger fra dette mønster og opererer i både Australien og Canada. Den russiske jernmalmsproduktion udgjorde 61 Mt i 2021 og blev produceret af selskaberne Metalloinvest og Novolipetsk. Ejerforholdene for de fire største selskaber domineres af investerings- og ventureselskaber, hvoraf flere har betydelige andele i flere af selskaberne. Rio Tinto afviger som før fra de øvrige store vestlige selskaber ved, at næsten 15 % ejes af Aluminium Corporation of China Ltd (Chinalco); ejerkredsen af Fortescue Metals, Metalloinvest og Novolipetsk domineres af få enkeltpersoner.

De fire store vestlige jernmalmsproducenter har alle etableret betydelige vertikalt integrerede værdikæder for jern- og stålproduktion. Der er ikke tilgængelige opgørelser for de store mineselskabers kunderelationer, herunder i hvilket omfang jernmalmsproducenterne leverer til egne eller andre jern- og stålværker i det land, hvor malmen brydes. Det fremgår imidlertid af eksportopgørelser, at der eksporteres store mængder jernmalmskoncentrat til Kina fra især Australien og Brasilien (se afsnit 3.5 Handel), hvor det indgår i kinesiske værdikæder. Kinas store behov for jernmalm dækkes dels af egenproduktion og dels af store mængder jernmalm produceret af få vestlige selskaber i især Australien og Brasilien.

Tabel 3-3 Geografisk og kapacitetsmæssig oversigt over den vestlige verdens 20 største jernmalmsproducenter. Mining Intelligence Data (2022).

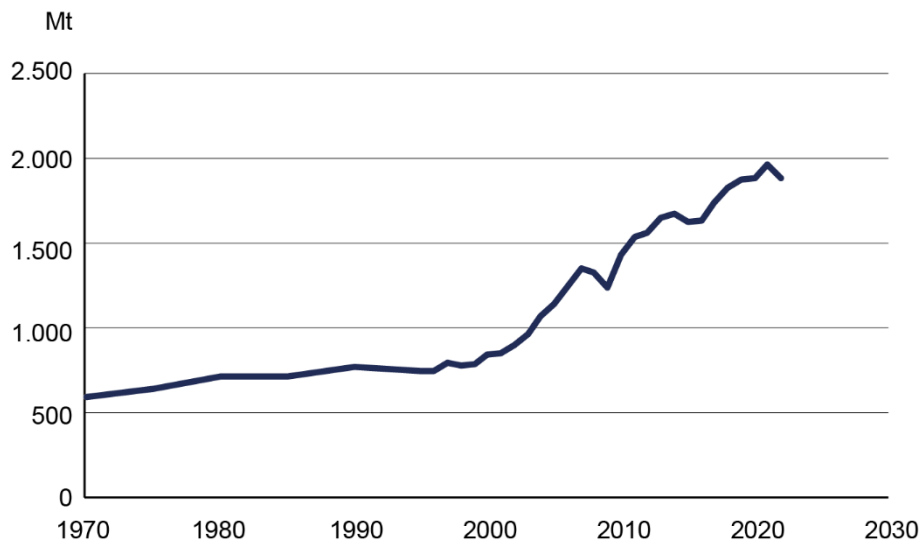
| Lokalitet | Land | Ejer | 2021 (Mt) | 2020 (Mt) |
|------------------------------|------------|----------------------------|-----------|-----------|
| Hammersley Mines and Channar | Australien | Rio Tinto | 207 | 220 |
| Northern System | Brasilien | Vale | 185 | 192 |
| Vargem Grand | Brasilien | Vale | 31 | 25 |
| Fortescue Operation | Australien | Fortescue Metals | 183 | 180 |
| Paraopeba | Brasilien | Vale | 24 | 23 |
| Mariana | Brasilien | Vale | 21 | 18 |
| LKAB Group | Sverige | LKAB | 27 | 27 |
| Itabira | Brasilien | Vale | 24 | 23 |
| Area C and Yandi | Australien | BHP Group | 148 | 142 |
| Newman and Jimblebar | Australien | BHP Group | 132 | 147 |
| Hope Downs and West Angelas | Australien | Rio Tinto | 81 | 83 |
| Robe Valley | Australien | Rio Tinto | 26 | 30 |
| Minas Rio | Brasilien | Anglo American | 23 | 24 |
| Mont-Wright | Canada | ArcelorMittal | 23 | 23 |
| Sishen | Sydafrika | Kumba Iron Ore | 29 | 25 |
| Lebedinsky | Rusland | Metalloinvest | 22 | 22 |
| Mikhailovsky | Rusland | Metalloinvest | 19 | 18 |
| Stoilensky | Rusland | Novolipetsk Steel | 20 | 19 |
| Carol Lake | Canada | Rio Tinto | 16 | 18 |
| Minas Centrais | Brasilien | Vale | 20 | 16 |
| Dataigou Mine | Kina | Glory Harvest Group | 22 | |
| Yuanjiachun mine | Kina | Taiyuan Iron & Steel Group | 12 | |
| Qidashan Mine | Kina | Anshan Iron & Steel Group | 11 | |
| Hujiamiaozi Mine | Kina | Ansteel Group | 8 | |

3.4.4 Global stålproduktion

Den globale produktion af råstål (crude steel) udgjorde i 2022 ca. 1.900 Mt og er siden 2000 vokset med næsten 225 % som resultat af generel forbedring af verdensøkonomien, befolkningsvækst, urbanisering, voksende transportsektor og infrastrukturudbygninger, som alle er områder med stort forbrug af stål. En betydelig del af væksten i efterspørgslen er relateret til Kina, men også væksten i produktionen er knyttet til Kina, hvor andelen af den globale produktion af råstål er vokset fra ca. 15 % i 2000 til ca. 53 % i 2022.

I Figur 3-7 ses råstålproduktionen fra 1970 til 2022. Den globale stålproduktionskapacitet har de seneste 20 år været ca. 30 % større end den aktuelle produktion, og der er tendens til at denne margin er stigende (OECD 2023).

Metallet jern er ikke et mekanisk stærkt eller kemisk robust materiale, og det har derfor kun meget begrænset anvendelse på denne form, men jern er til gengæld råstof til fremstilling af stål. Stål er betegnelsen for de materialer, der fremstilles af råjern (pig iron/hot metal iron/direct reduced iron) ved en række procestrin, hvori indgår smeltning, tilsætning af fluxmidler, legeringsmetaller, udstøbning og valsning til plader, barrer eller stænger med specifikke mekaniske, termiske og kemiske egenskaber, som efterfølgende forarbejdes til de færdige produkter.



Figur 3-7 Råstålproduktion i Mt i perioden 1970-2022. Kilde: World Steel Association (1970-2023).

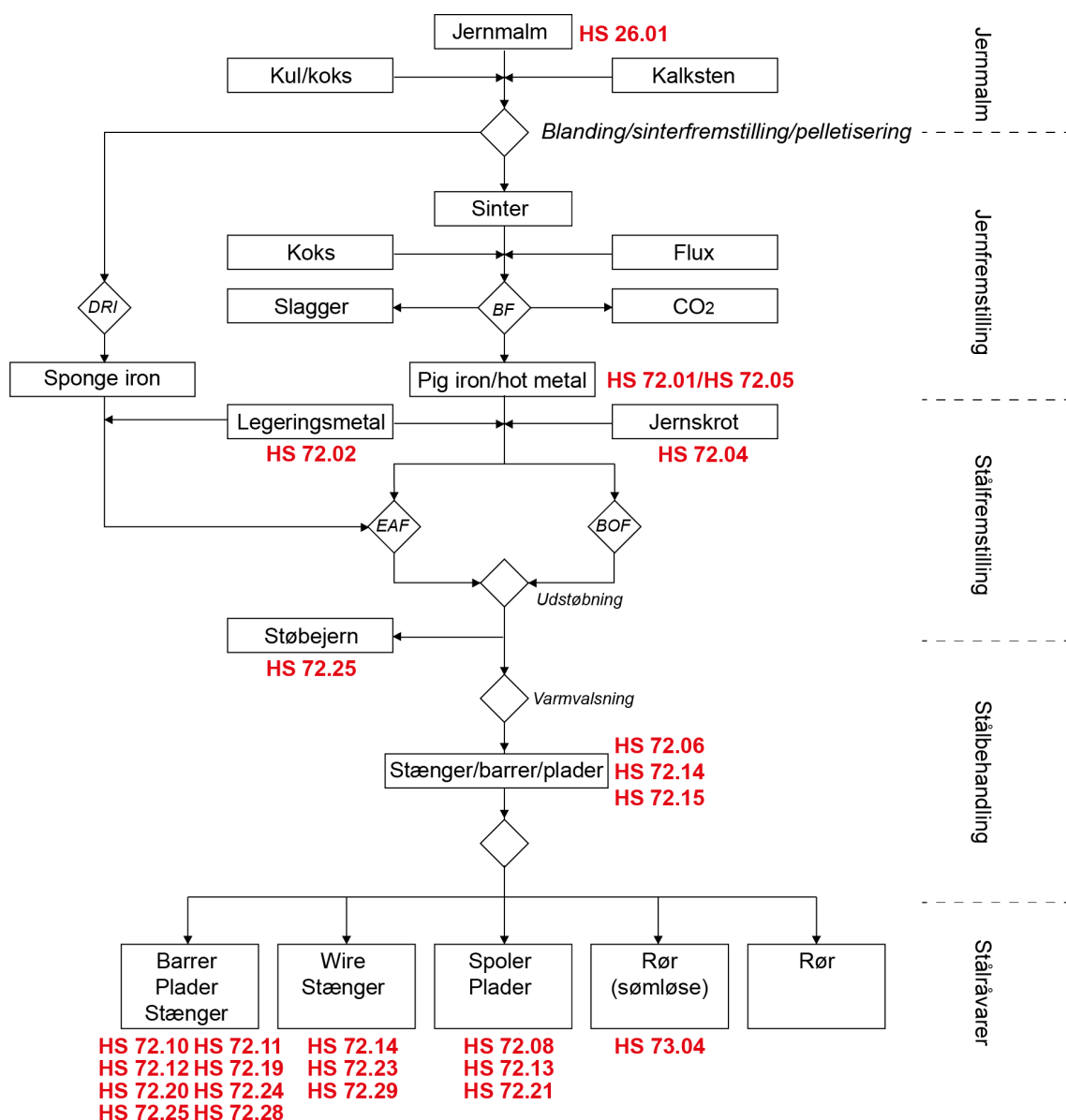
Første behandling af jernmalm er knusning, hvorefter de jernholdige mineraler udsorteres til et mineralkoncentrat. Denne behandling foretages almindeligvis ved minen, og kun jernmalmskoncentraterne sendes til smelteværkerne, hvor det blandes med fluxmidler, der fungerer hjælpestoffer til reduktion af jernoxid til jern og CO₂. Fluxmidlerne omfatter kulstof i form af koks, grafit eller gas samt calcium og magnesium, ofte i form af lime/dolomit, og evt. olivin samt fluor til justering af smeltens pH. Til fremstilling af 1 ton pig iron anvendes ca. 1,4 ton sintermateriale, 0,5 ton koks og 0,25 ton kalksten/dolomit; ved processen dannes ca. 0,3 ton affaldsslagger.

Efterfølgende anvendes tre forskellige metoder til fremstilling af stål (Figur 3-8):

- Integreret metode: Her anvendes der en højovn (Blast Furnace (BF)) efterfulgt af behandling i en ovn med indblæsning af oxygen (Basic Oxygen Furnace (BOF)). Til fremstilling af 1 ton stål bruges der ved denne metode ca. 1,4 ton jernmalm, ca. 0,1 ton jernskrot, ca. 0,8 ton metallurgisk kul og ca. 0,3 ton kalksten.
- Lysbue-ovn (Electric Arc Furnace (EAF))-metode: Anvender især jernskrot og direkte reduceret jern eller smeltet jern fra BF. Til fremstilling af 1 ton stål anvendes ca. 0,7 ton jernskrot, ca. 0,6 ton jernmalm, ca. 0,15 ton kul og ca. 0,1 ton kalksten.
- Direkte-reduktions-metode (Direct Reduction of Iron (DRI)): Anvender CO (carbon monoxid) og brint (H) fra naturgas eller kul, hvor jernmalm reduceres på fast form. Efterfølgende anvendes typisk EAF-ovne til selve stålfremstillingen. DRI-metoden er under indfasning, da den har et mindre klimaaftryk.

I 2021 blev BOF-metoden anvendt til produktion af ca. $\frac{2}{3}$ af den globale stålproduktion, mens EAF-metoden blev anvendt til den resterende $\frac{1}{3}$; i Kina er stålproduktionen fordelt med ca. 9/10 og 1/10 til henholdsvis BOF og EAF. Globalt blev der i 2021 produceret ca. 1.400 Mt stål med BOF-metoden, hvortil der blev anvendt 1.300 Mt pig iron/jern fra BF og 240 Mt jernskrot; der blev produceret ca. 560 Mt stål med EAF-metode, som forbrugte ca. 60 Mt pig iron/jern fra BF, 120 Mt direkte reduceret jern og 450 Mt jernskrot.

Et generisk procesdiagram for jern- og stålfremstillingen med angivelse af nogle typiske produkter er vist i Figur 3-8; nogle af de vigtigste handelskoder (HS-koder) ses på figuren.



BF: Blast Furnace BOF: Basic Oxygen Furnace DRI: Direct Reduced Iron EAF: Electric Arc Furnace

Figur 3-8 Generisk procesdiagram for fremstilling af jern- og stålprodukter med angivelse af udvalgte handelsvarekoder (HS-koder).

3.4.4.1 Selskaber involveret i stålproduktion

I Tabel 3-4 ses de 40 største stålmelteværker og deres produktion i 2022. I 2022 var de største stålproducerende lande Kina (1.013 Mt), Indien (1.215 Mt), Japan (89 Mt), USA (81 Mt) og Rusland (72 Mt), men stålindustrien er, i modsætning til jernmalmsproduktionen, fordelt på flere hundrede selskaber. Blandt disse producerede de 40 største værker i 2022 tilsammen ca. 1.400 Mt stål. Som resultat af Kinas råstof- og industristrategiske satsninger dominerer Kina alle direkte og afledte værdikæder knyttet til jern- og stålproduktionen og råder over halvdelen af de største værker, som samlet producerer ca. halvdelen af den globale produktion. Kinas produktionssystemer er overvejende baseret på processer som involverer BF, efterfulgt af BOF og EAF, hvilket resulterer i en relativ høj CO₂-udledning.

Tabel 3-4 De 40 største stålsmelteværker og produktion i 2022. Kilde: World Steel Association (2023).

| Rangordning | Stålsmelte- og/eller valseværker | Land | Mt |
|-------------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | China Baowu Steel Group | Kina | 131,84 |
| 2 | ArcelorMittal | Luxembourg | 68,89 |
| 3 | Ansteel Group | Kina | 55,65 |
| 4 | Nippon Steel | Japan | 44,37 |
| 5 | Jiangsu Shagang | Kina | 41,45 |
| 6 | Hesteel Group | Kina | 41,00 |
| 7 | POSCO | Syd Korea | 38,64 |
| 8 | Jianlong Steel | Kina | 36,56 |
| 9 | Shougang | Kina | 33,82 |
| 10 | Tata Steel | Indien | 30,18 |
| 11 | Shandong Iron and Steel Group | Kina | 29,42 |
| 12 | Delong Steel | Kina | 27,90 |
| 13 | JFE | Japan | 26,20 |
| 14 | Valin Steel Group | Kina | 26,2 |
| 15 | JSW Steel | Indien | 23,4 |
| 16 | Nucor Corporation | USA | 25,7 |
| 17 | Fangda Steel | Kina | 20,2 |
| 18 | Hyundai Steel | Syd Korea | 19,6 |
| 19 | Liuzhou Iron and Steel | Kina | 18,8 |
| 20 | Steel Authority of India Limited | Indien | 17,9 |
| 21 | Novolipetsk Steel | Rusland | 17,3 |
| 22 | IMIDRO | Iran | 16,7 |
| 23 | Baotou Steel | Kina | 16,5 |
| 24 | United States Steel Corporation | USA | 16,3 |
| 25 | Cleveland-Cliffs | USA | 16,3 |
| 26 | China Steel | Taiwan | 16,0 |
| 27 | Jingye Steel | Kina | 15,4 |
| 28 | Techint | Argentina | 14,9 |
| 29 | Hebei Sinogiant Group | Kina | 14,3 |
| 30 | Gerdau | Brasilien | 14,2 |
| 31 | CITIC Limited | Kina | 14,0 |
| 32 | Magnitogorsk Iron and Steel Works | Rusland | 13,6 |
| 33 | Rizhao Steel | Kina | 13,6 |
| 34 | Evráz | Rusland | 13,6 |
| 35 | Zenith Steel Group | Kina | 12,8 |
| 36 | Shaanxi Iron and Steel | Kina | 12,4 |
| 37 | Tsingshan Stainless Steel | Kina | 12,4 |
| 38 | Steel Dynamics | USA | 12,2 |
| 39 | Guangxi Shenglong Metallurgical | Kina | 12,2 |
| 40 | ThyssenKrupp | Tyskland | 12,0 |

3.4.4.2 Kritiske råstoffer i stålproduktion

Legeringsmetaller til stålindustrien, ferrolegeringer, tilsættes for at give stålprodukterne egenskaber, som gør dem egnede til specifikke anvendelser (Tabel 3-5). Ferrolegeringer fremstilles næsten udelukkende til forbrug i stålindustrien og er derfor en del af forsyningskæderne for jern- og stålproduktion. En række legeringsråstoffer omfatter vigtige metaller, som er vurderet kritiske af EU i 2023 (markeret med rød i Tabel 3-5) (EC 2023), det er fx ferromangan, ferrosilicium,

ferronikkel, ferrowolfram, ferrovanadium og ferroniobium. Kina importerer en betydelig andel af den globale produktion af ferronikkel fra Indonesien, Ny Kaledonien og Myanmar og ferroniobium fra Brasilien, Singapore og Canada og eksporterer selv bl.a. ferrosilicium, ferromolybdæn, ferrowolfram.

Tablet 3-5 Oversigt over hyppigt anvendte ferrolegeringer og deres funktion; røde markeringer angiver råstoffer, som er vurderet kritiske for EU i 2023. Kilder: EC (2023); Griggs (2023) og Matmatch (2023).

| Grundstof | wt.% i forhold til stål | Funktion | Omtrentlig andel (%) som anvendes i stålindustrien |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Aluminium | 0,95-1,30 | Anvendes som deoxideringsmiddel; forhindrer vækst af austenitiske korn | ? |
| Bismuth | - | Forbedrer forarbejdningsegenskaber | 30 |
| Bor | 0,001-0,003 | Øger styrken | |
| Carbon (grafit) | 0,05-2,1 | Øger mekanisk styrke, hårdhed; til ildfast materiale | 50 |
| Fluor | n.a. | pH-regulator | 36 |
| Fosfor | n.a. | Uønsket, øger skørhed. Det øger hårdhed med nedsætter bearbejdningsevnen. | |
| Krom | 0,5-2,0 | Øger hårdhed, fordi det danner karbider | |
| | 4-18 | Øger korrosionsresistens; rustfrit stål: typisk 12% Cr | |
| Kobolt | 0 - 10 | Reducerer vækst af korn og øger varmeresistens | 50 |
| Kobber | 0,1-0,4 | Øger korrosionsresistens, men nedsætter forarbejdningsevnen (derfor max 0,5%) | |
| Bly | n.a. | Forbedrer forarbejdningsegenskaber | |
| Mangan | 0,25-0,40 | Reducerer skørhed | |
| | >1 | Øger hårdhed; øger svejseegenskaber | |
| Molybdæn | 0,2-9 | Øger de andre legeringsmetallers egenskaber. Danner karbider og øger dermed styrken. | |
| Nikkel | 2-5 | Øger sejhed | 75 |
| | 12-20 | Øger korrosionsresistens | |
| Niobium | | Øger styrke og hårdhed | 70 |
| Kvælstof | n.a. | Øger styrke og hårdhed, da der dannes nitrid; øger skørhed. | |
| Silicium | 0,2-0,7 | Øger styrke og hårdhed | ? |
| | 2 | Øger 'fjeder'-styrke | |
| | >2 | Øger magnetiske egenskaber | |
| Svovl | 0,08-0,15 | Almindeligvis uønsket. Men lidt forbedrer forarbejdningsegenskaber | |
| Titan | n.a. | Reducerer martensinitisk hårdhed i krom-stål. | 10 |
| Wolfram | 1 - 12 | Øger hårdhed og slidbarhed ved høje temperaturer. | 80 |
| Vanadium | 1 - 10 | Øger styrke uden at ændre forarbejdningsegenskaber og vækst af mikrostrukturer. | 95 |

Til stålframstilling anvendes der desuden en række proceshjælpestoffer, som EU har vurderet som kritiske, fx fluor, hvoraf ca. 1/3 af produktionen anvendes til pH-regulering i stålindustrien, og grafit, hvoraf ca. 1/2 af produktionen forbruges i stålindustrien som både proceshjælpestof og til framstilling af ildfaste materialer.

I det omfang legeringsmetaller og hjælpestoffer i stålindustrien ikke kan substitueres med ikke-kritiske råstoffer, kan det være relevant at betragte stål som et kritisk råstof.

3.4.5 Klima og miljøpåvirkning

Jern- og stålfremstilling har et højt klimaaftryk idet fremstilling af 1 ton stål udleder ca. 1,8 ton CO₂. april 2021 var forventningen at stålproduktionen i 2021 ville være ansvarlig for omkring 7 % af de globale CO₂-udledninger og for ca. 4 % af EU's udledning (EU Parliamentary Research Service 2021). Ifølge Hasanbeigi (2022) udleder jern- og stålproduktion 11 % af verdens CO₂-udledninger og bidrager med 7 % af alle GHG emissioner.

CO₂-udslip fra stålindustrien skyldes det store energiforbrug fra fossile energikilder i forbindelse med minedrift, malmbehandling og transport af jernmalm fra minen til smelteværket og med de efterfølgende processer, der omdanner jernmalm til stål. De største CO₂-bidrag er knyttet til de processer, hvor kul/karbon anvendes som reduktionsmiddel til at fjerne jernmalms indhold af oxygen ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$), samt til kalcineringsprocessen, som reducerer indholdet af siliciumoxid, svovl og fosfor, hvortil der traditionelt anvendes kalksten, som omdannes til bl.a. CO₂ ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).

Stålindustrien anvender flere strategier til reduktion af CO₂-udledningen, herunder bl.a.:

- Skift til grønne energikilder.
- Erstatning af kul med brint (H), hvorved spildproduktet er vand og/eller metan (CH₄), som alternative reduktionsmidler; metan findes i naturgas og er let tilgængeligt, hvorimod brint kun produceres i meget begrænset mængde.
- CO₂-fangst og -deponering (CCS), som er teknologier, der på sigt kan bidrage til reduktion af CO₂-udledningen. Eksempelvis indeholder topgas fra BF både CO₂ og reduktionsmidlerne H₂ og CO, hvoraf CO₂ kan indfanges og deponeres og reduktionsmidlerne genanvendes i ovnen, hvorved CO₂-udledningen reduceres med op til 75 % (Afanga *et al.* 2012).
- Øget brug af jernskrot, da det reducerer CO₂-udslippet med 1,5 ton CO₂/ton stål (World Steel Association 2022).
- Nye ovnteknologier, herunder Hisarna-jernmalmsprocessen (Tata Steel 2020), hydrogen-plasma-metoden (EU Parliamentary Research Service 2021), 'hydrogen direct reduced iron'-metoden (H₂ DRI) og jernmalms-elektrolyse-metoden (Boston Metal 2022).
- Reduktion af de stålforbrugende industriers stålbehov.

For at jern- og stålindustrien kan blive CO₂-neutrale i 2050, vil det kræve investeringer på omkring 1.400 mia. USD til teknologiomstillinger i de forarbejdende industrier og CCS-systemer til opsamling og deponering af ca. 470 Mt CO₂ (Wood Mackenzie 2022). For at nå målet vil det desuden forudsætte, at jern- og stålindustrien i 2050 har adgang til ca. 2.000 GW 'grøn' strøm, ud af den globale kapacitet på 27.000 GW, som skal til for at Verden er CO₂-neutralt i 2050 (PWC 2022).

Produktion af 'grønt stål' er mere energiforbrugende end 'almindeligt' stål. For eksempel er fremstilling af H₂ til erstatning af koks, kul og naturgas som reduktionsmiddel energikrævende. Hvor BOF-anlæg ikke kan erstattes med EAF, vil der blive etableret forsmeltere, som øger energiforbruget. Som følge heraf vil produktion af et metrisk ton grønt stål ved hjælp af den H₂-baserede DRI- og EAF-rute bruge minimum 3 MWh (vedvarende energi) i forhold til en fuldt integreret højovn – basis oxygen ovn (BF-BOF), som forbruger ca. 0,1 MWh (Baroyan *et al.* 2023).

3.5 Handel

Den internationale handel med jern og stål er en af de største varegrupper med en samlet værdi i 2020 på ca. 900 mia. USD (HS 72 + HS 73). En oversigt over en række af disse produkter og tilhørende handelsværdi er vist i Tabel 3-7. For seks udvalgte varekategorier, der i et vist omfang repræsenterer værdikæderne fra mine til rustfrit stål, er der udarbejdet oversigter over de vigtigste handelsrelationer mellem landene. Dette er illustreret i en række tabeller og figurer, se oversigt over dette i Tabel 3-6.

Tabel 3-6 *Oversigt for seks udvalgte varekategorier, HS-koder, tabeller og figurer for de vigtigste handelsrelationer mellem landene.*

| Varekodebeskrivelse | HS-kode | Tabel | Figur |
|----------------------|---------|------------------------|------------|
| Jernmalm | 26.01 | Tabel 3-8 | Figur 3-9 |
| Pig iron | 72.01 | Tabel 3-9 | Figur 3-10 |
| Jern- og stålskrot | 72.04 | Tabel 3-10 | Figur 3-12 |
| Ferrolegering | 72.02 | Tabel 3-11, Tabel 3-12 | Figur 3-12 |
| Varmvalset jern | 72.08 | Tabel 3-13 | Figur 3-13 |
| Valset rustfrit stål | 72.19 | Tabel 3-14 | Figur 3-14 |

Handel med jern- og stålprodukter er registreret i henhold til forskellige varekoder; nærværende oversigt for handlen er baseret på HS-varekoder. Hovedgrupperne for forsyningskæderne for jern og stål er angivet i et procesdiagram (Figur 3-8); herudover er værdierne for de valgte varekoder for 2020 anført i Tabel 3-7.

Den globale jernmalmseksport er fordelt på mange lande, hvor Australien, Brasilien, Sydafrika, Ukraine og Canada er de største eksportlande. Kina er det helt dominerende importland af jernmalm (HS 26.01), som i 2020 udgjorde ca. 60 % af handlerne, og Kina er derfor største handelspartner for de fem største jernmalmsproducerende lande; for Australien og Brasilien udgjorde handlen med jernmalm med Kina henholdsvis 81 % og 63 %. Kina dominerer også den globale handel med pig iron (HS 72.01), hvoraf hovedparten er fra Brasilien med mindre mængder fra Rusland, Ukraine, Indonesien, Japan og Indien. Rusland havde i 2020 en betydelig eksport til USA, Tyrkiet og Italien; Ukraine eksporterede mest til USA. Det er derfor forventeligt, at der er sket betydelige ændringer i eksportmønsteret som følge af vedtagelsen af internationale handels-sanktioner mod Rusland i 2022. Jernskrot (HS 72.04) er i lighed med jernmalm råstof til jern- og stålprodukter; handlen med skrot domineres på eksportsiden af USA, Tyskland, Holland, England og Japan, men på importsiden er der ingen speciel dominans. Omkring 50 % af handel med ferrolegeringer (HS 72.02), som er et vigtigt råstof til stålfremstilling, eksporteres fra Indonesien, Sydafrika, Brasilien, Indien og Kasakhstan med Kina som det største importland (ca. 30 %).

Generelt viser handelsmønsteret for produkter i de øvre dele af forsyningskæderne for jern- og stål tydeligt Kinas behov for at supplere egne jernmalmsproduktioner med importerede råstoffer; Kinas import af jernskrot (HS 72.04) er dog ubetydelig. Handelsmønstrene for nedstrøms semi-produkter, som fx valset jern (HS 72.08) og valset rustfrit stål (HS 72.19) viser, at både eksport og import er fordelt på mange lande; mønstrene viser også, at Kina eksporterer værdiforædlede stålprodukter.

Table 3-7 Oversigt over handelskoder (HS-system) for jern- og stålvarer med angivelse af værdi (2020). Handelskoder ses også i Figur 3-8. Kilde: OEC World (2023).

| Varekodebeskrivelse | HS-kode | Værdi (mio. USD) |
|-------------------------------------------------------|----------|------------------|
| Iron ore | 26.01 | 220.000 |
| Iron ore, conc, not iron pyrites | 26.01.11 | 193.000 |
| Iron ore, concentrate, not iron pyrites, agglomerated | 26.01.12 | 27.100 |
| Iron oxides and hydroxides | 28.21 | 1.130 |
| Iron and steel | 72 | 550.000 |
| Pig iron | 72.01 | 7.160 |
| Ferro alloys | 72.02 | 43.300 |
| Iron reductions | 72.03 | 6.470 |
| Ferrous waste and scrap | 72.04 | 56.600 |
| Granules and powder of pig iron | 72.05 | 2.770 |
| Iron and non-alloy steel in ingots | 72.06 | 651 |
| Iron or non-alloy steel – semifinished | 72.07 | 42.200 |
| Iron or non-alloy steel; flat rolled; hot rolled | 72.08 | 73.600 |
| Iron or non-alloy steel, flat rolled cold rolled | 72.09 | 22.200 |
| Coated flat-rolled iron | 72.10 | 72.400 |
| Large flat-rolled iron | 72.11 | 6.000 |
| Large coated flat-rolled iron | 72.12 | 5.890 |
| Hot-rolled iron bars | 72.13 | 19.100 |
| Raw iron bars | 72.14 | 24.600 |
| Other iron bars | 72.15 | 3.390 |
| Iron blocks | 72.16 | 17.900 |
| Iron wire | 72.17 | 9.500 |
| Stainless steel ingots primary forms | 72.18 | 5.680 |
| Large flat-rolled stainless steel | 72.19 | 40.300 |
| Flat-rolled stainless steel | 72.20 | 6.030 |
| Hot-rolled stainless steel bars | 72.21 | 2.450 |
| Other stainless steel bars | 72.22 | 7.200 |
| Stainless steel wire | 72.23 | 2.870 |
| Steel ingots | 72.24 | 4.490 |
| Flat-rolled steel | 72.25 | 38.700 |
| Flat-rolled iron | 72.26 | 4.230 |
| Steel bars | 72.27 | 5.910 |
| Other steel bars | 72.28 | 14.900 |
| Steel wire | 72.29 | 3.480 |
| Iron or steel articles | 73 | 355.000 |
| Iron Pipes | 73.04 | 21.700 |

Tabel 3-8 Oversigt over global handel med jernmalm i 2020 (HS4 26.01). Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Australien | 118.091 | Kina | 95.718 |
| | | Japan | 9.101 |
| | | Sydkorea | 7.921 |
| | | Taiwan | 2.655 |
| | | Vietnam | 1.393 |
| Brasilien | 46.208 | Kina | 28.891 |
| | | Malaysia | 2.827 |
| | | Japan | 1.907 |
| | | Bahrain | 1.794 |
| | | Oman | 1.288 |
| Sydafrika | 7.675 | Kina | 2.116 |
| | | Holland | 1.059 |
| | | Mozambique | 908 |
| | | Tyskland | 628 |
| | | Japan | 627 |
| Ukraine | 6.829 | Kina | 2.918 |
| | | Tjekkiet | 650 |
| | | Østrig | 535 |
| | | Polen | 533 |
| | | Slovakiet | 441 |
| Canada | 5.760 | Kina | 2.093 |
| | | Japan | 612 |
| | | Tyskland | 491 |
| | | Frankrig | 489 |
| | | Sydkorea | 312 |
| Subtotal | 178.804 | | |
| Øvrige | 41.430 | | |
| Total | 220.235 | | |

Tabel 3-9 Oversigt over handel med pig iron (HS4 72.01) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Rusland | 1.342 | USA | 426 |
| | | Tyrkiet | 329 |
| | | Kina | 230 |
| | | Italien | 208 |
| | | Polen | 30 |
| Brasilien | 1.145 | Kina | 637 |
| | | USA | 199 |
| | | Holland | 86 |
| | | Mexico | 56 |
| | | Hong Kong | 36 |
| Ukraine | 1.050 | USA | 541 |
| | | Kina | 201 |
| | | Saudi Arabien | 119 |
| | | Tyrkiet | 55 |
| | | Italien | 47 |
| Japan | 172 | Kina | 125 |
| | | Taiwan | 20 |
| | | Syd Korea | 17 |
| Indonesien | 166 | Kina | 166 |
| Indien | 140 | Kina | 123 |
| | | Nepal | 5 |
| Subtotal | 4.015 | | |
| Øvrige | 66 | | |
| Total | 4.781 | | |

Tabel 3-10 Oversigt over global handel med HS4 72.04 Jern- og stålskrot i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| USA | 7.805 | Tyrkiet | 1.576 |
| | | Mexico | 1.054 |
| | | Vietnam | 625 |
| | | Bangladesh | 593 |
| | | Taiwan | 590 |
| Tyskland | 5.418 | Belgien | 1.114 |
| | | Italien | 955 |
| | | Holland | 867 |
| | | Luxembourg | 442 |
| | | Finland | 291 |
| Holland | 4.173 | Tyrkiet | 1.343 |
| | | Tyskland | 616 |
| | | Finland | 598 |
| | | Belgien | 415 |
| | | Egypten | 282 |
| England | 3.968 | Tyrkiet | 947 |
| | | Egypten | 636 |
| | | Pakistan | 432 |
| | | Spanien | 301 |
| | | Bangladesh | 295 |
| Japan | 3.767 | Sydkorea | 1.739 |
| | | Vietnam | 993 |
| | | Taiwan | 337 |
| | | Kina | 211 |
| | | Malaysia | 137 |
| Subtotal | 25.131 | | |
| Øvrige | 31.453 | | |
| Total | 56.584 | | |

Tabel 3-11 Handel med ferrolegeringer (HS4 72.02) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| Indonesien | 7.156 | Kina | 6.327 |
| | | Indien | 495 |
| | | Taiwan | 194 |
| | | Sydkorea | 98 |
| | | Holland | 10 |
| Sydafrika | 4.325 | Kina | 1.055 |
| | | For. Arab. Emi. | 611 |
| | | Indonesien | 533 |
| | | USA | 372 |
| | | Sydkorea | 292 |
| | | Mozambique | 244 |
| Brasilien | 3.700 | Kina | 1.001 |
| | | Holland | 542 |
| | | USA | 338 |
| | | Sydkorea | 308 |
| | | Japan | 289 |
| Indien | 3.113 | Kina | 442 |
| | | Italien | 25 |
| | | Japan | 250 |
| | | Sydkorea | 228 |
| | | Taiwan | 220 |
| Kasakhstan | 2.572 | Kina | 925 |
| | | Japan | 564 |
| | | USA | 238 |
| | | Indonesien | 165 |
| | | Sydkorea | 164 |
| Subtotal | 20.866 | | |
| Øvrige | 22.456 | | |
| Total | 43.322 | | |

Tabel 3-12 Handel med ferrolegeringer i 2020, med angivelse af de største eksport- og importlande. Kilde: OEC World (2023).

| HS6 | Handelsvare | Eksportværdi (mio. USD) | Eksportland 1 | Eksportland 2 | Eksportland 3 | Importland 1 | Importland 2 | Importland 3 |
|----------|-----------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 72.02.60 | Ferro Ni | 12.000 | Indonesien* | Brasilien | Ny Kaledo. | USA | Tyskland | Holland |
| 72.02.41 | Ferro Cr >4%C | 8.949 | Sydafrika | Kasakhstan | Tyrkiet | Kina | Indonesien | Japan |
| 72.02.30 | Ferro Si-Mn | 5.060 | Indien | Ukraine | Georgien | USA | Tyrkiet | Italien |
| 72.02.21 | Ferro Si >55%Si | 4.410 | Kina | Rusland | Norge | Japan | Sydkorea | Tyskland |
| 72.02.93 | Ferro Nb | 3.130 | Brasilien** | Canada | Holland | Kina | Holland | Japan |
| 72.02.70 | Ferro Mo | 2.700 | Sydkorea | Kina | Chile | Holland | USA | Tyskland |
| 72.02.11 | Ferro Mn >2%C | 1.740 | Indien | Malaysia | Frankrig | USA | Tyskland | Holland |
| 72.02.19 | Ferro Mn <2%C | 1.430 | Norge | Syd Korea | Indien | USA | Holland | Tyskland |
| 72.02.92 | Ferro V | 1.030 | Østrig | Tjekkiet | Kina | Holland | Tyskland | USA |
| 72.02.99 | Ferro nes | 920 | Kina | Brasilien | DR Congo | Kina | Tyskland | Indien |
| 72.02.49 | Ferro Cr<4%C | 727 | Rusland | Kasakhstan | Tyrkiet | Sydkorea | Japan | USA |
| 72.02.29 | Ferro Si <55%Si | 609 | Norge | Holland | Kina | Holland | Tyskland | Sydkorea |
| 72.02.91 | Ferro Ti | 342 | Rusland | England | Tyskland | Holland | Tyskland | Brasilien |
| 72.02.80 | Ferro W | 157 | Kina | Rusland | Holland | Holland | Japan | Tyskland |
| 72.02.50 | Ferro Si Cr | 131 | Kasakhstan | Polen | Kina | USA | Tyskland | Japan |

* 60 %, ** 73 %

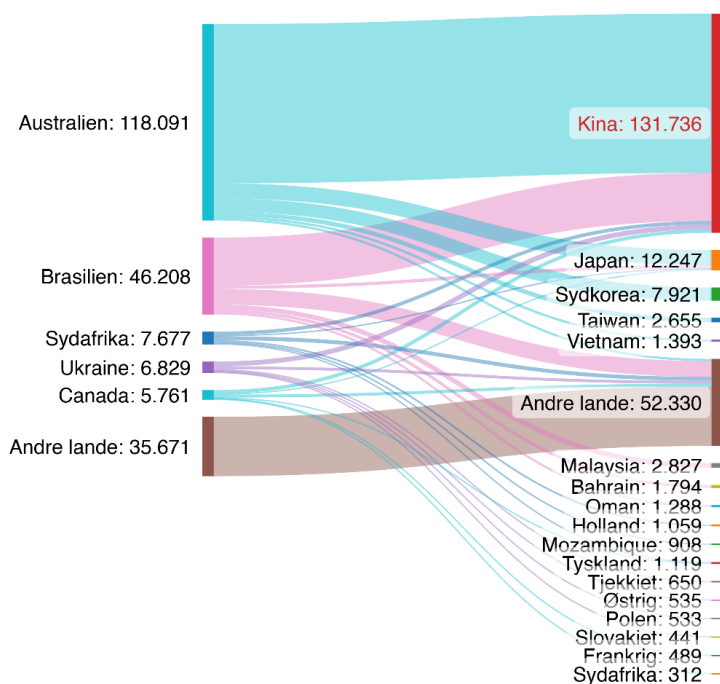
Som eksempel på handel med væsentlige stålprodukter er udvalgt varmvalset stål (HS4 72.06) og flat rolled stainless steel (HS4 72.19) (Tabel 3-13 og Tabel 3-14), hvoraf det fremgår at Kina har betydelige handler med disse værdiforædlede produkter, og som i væsentligt omfang er fremstillet på basis af importeret jernmalm.

Tabel 3-13 Oversigt over handel med HS4 72.08 varmvalset jern i 2020. Kilde: OEC World (2023).

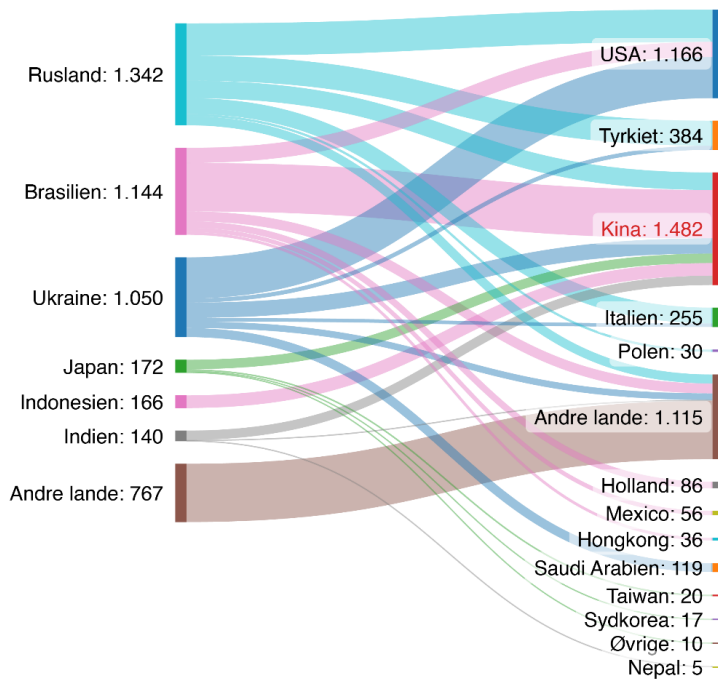
| Eksporland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Japan | 10.850 | Sydkorea | 1.898 |
| | | Thailand | 1.566 |
| | | Kina | 1.371 |
| | | Vietnam | 771 |
| | | Indonesien | 498 |
| Sydkorea | 6.183 | Japan | 827 |
| | | USA | 769 |
| | | Indien | 696 |
| | | Vietnam | 568 |
| | | Kina | 552 |
| Rusland | 5.384 | Tyrkiet | 1.220 |
| | | Polen | 521 |
| | | Vietnam | 445 |
| | | Italien | 312 |
| | | Usbekistan | 289 |
| Indien | 5.226 | Vietnam | 1.286 |
| | | USA | 805 |
| | | Italien | 701 |
| | | Tyrkiet | 491 |
| | | Nepal | 278 |
| Kina | 3.757 | Sydkorea | 690 |
| | | Vietnam | 536 |
| | | Saudi Arabien | 286 |
| | | Pakistan | 157 |
| | | Philippinerne | 139 |
| Subtotal | 31.400 | | |
| Øvrige | 42.169 | | |
| Total | 73.569 | | |

Tabel 3-14 Oversigt over handel med HS 72.19 Valset rustfrit stål i 2020. Kilde: OEC World (2023).

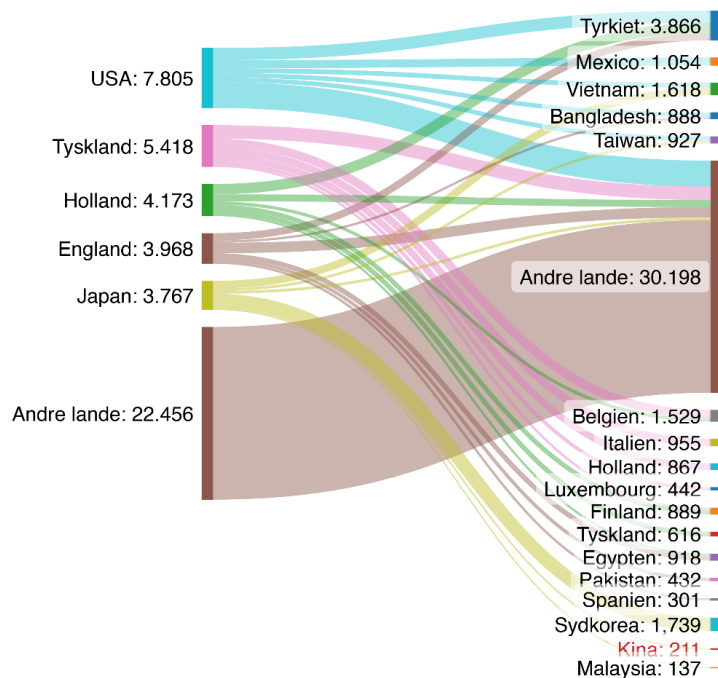
| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Indonesien | 6.676 | Kina | 2.353 |
| | | Taiwan | 1.794 |
| | | Vietnam | 525 |
| | | Italien | 433 |
| | | Malaysia | 422 |
| Kina | 6.618 | Sydkorea | 744 |
| | | Taiwan | 674 |
| | | Tyrkiet | 602 |
| | | Rusland | 572 |
| | | Vietnam | 514 |
| Belgien | 3.447 | Frankrig | 1.403 |
| | | Tyskland | 775 |
| | | Italien | 391 |
| | | Polen | 130 |
| | | Holland | 108 |
| Finland | 3.145 | Holland | 1.481 |
| | | Tyskland | 703 |
| | | Italien | 308 |
| | | Sverige | 67 |
| | | Kina | 56 |
| Taiwan | 2.416 | USA | 428 |
| | | Italien | 293 |
| | | Belgien | 255 |
| | | Japan | 117 |
| | | Canada | 102 |
| Subtotal | 22.302 | | |
| Øvrige | 18.013 | | |
| Total | 40.315 | | |



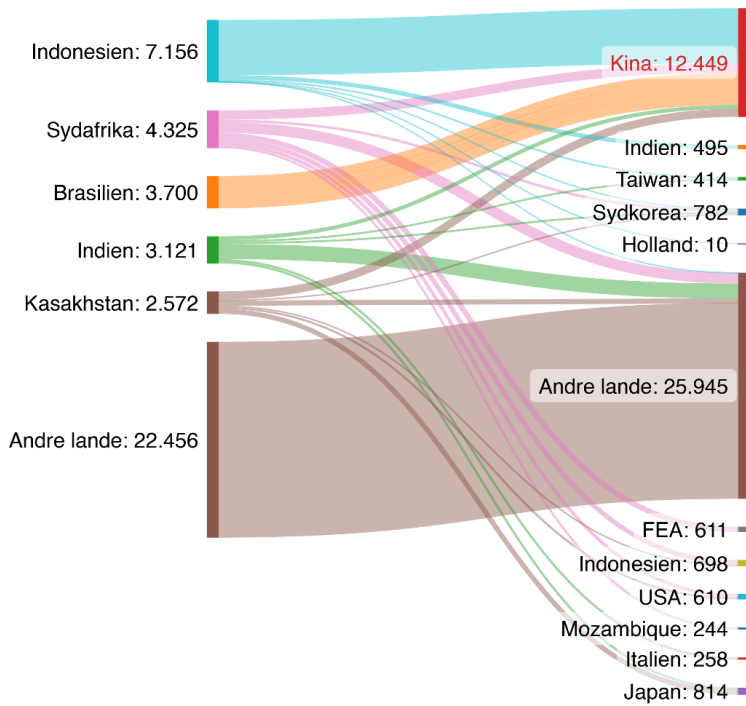
Figur 3-9 Sankey-diagram for global handel med jernmalm (HS 26.01) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 3-8.



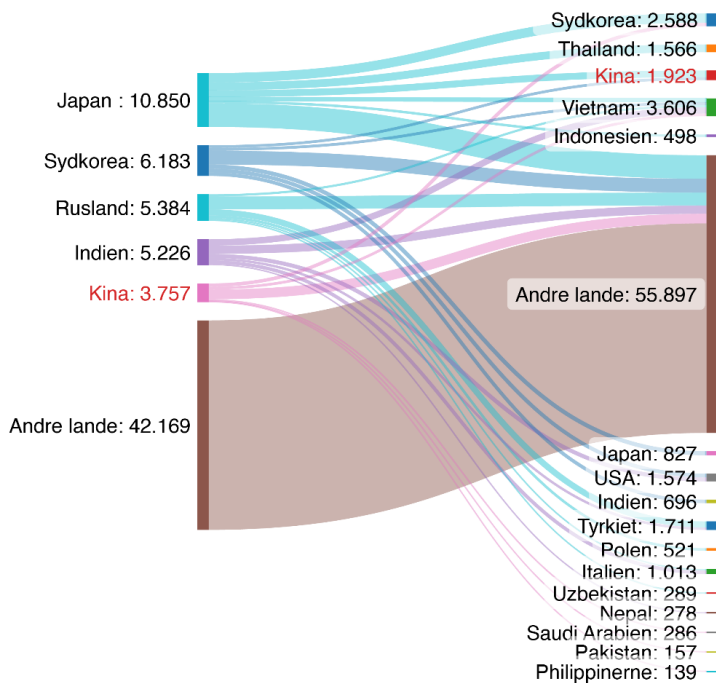
Figur 3-10 Sankey-diagram for global handel med pig iron (HS 72.01) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 3-9.



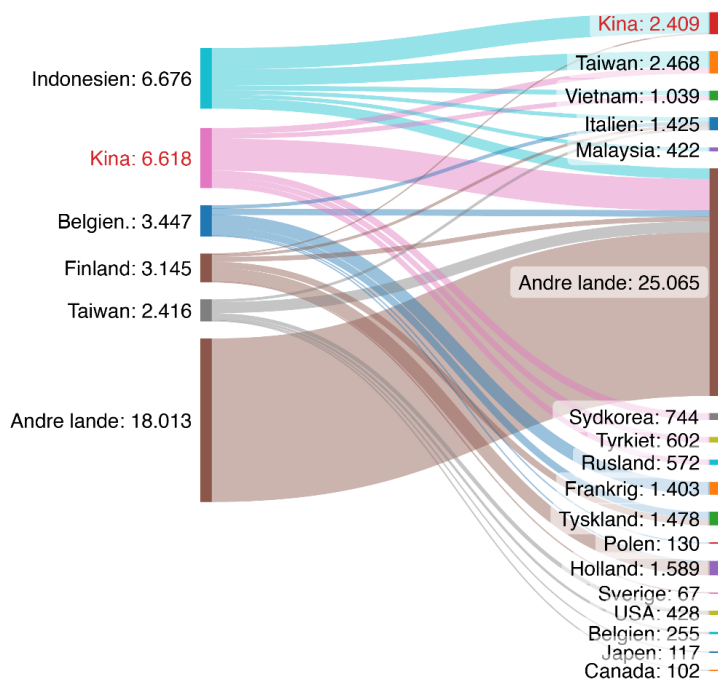
Figur 3-11 Sankey-diagram for global handel med jern- og stålskrot (HS 72.04) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 3-10.



Figur 3-12 Sankey-diagram for global handel ferrolegeringer (HS 72.02) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 3-11 og Tabel 3-12.



Figur 3-13 Sankey-diagram for global handel med varmvalset jern (HS 72.08) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 3-13.



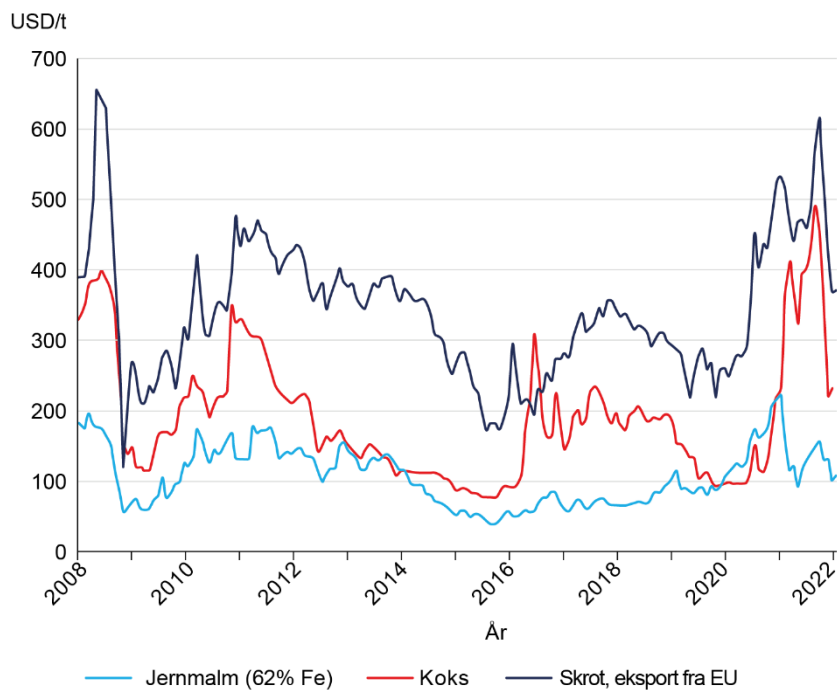
Figur 3-14 Sankey-diagram for global handel med valset rustfrit stål (HS 72.19) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 3-14.

3.5.1 Priser

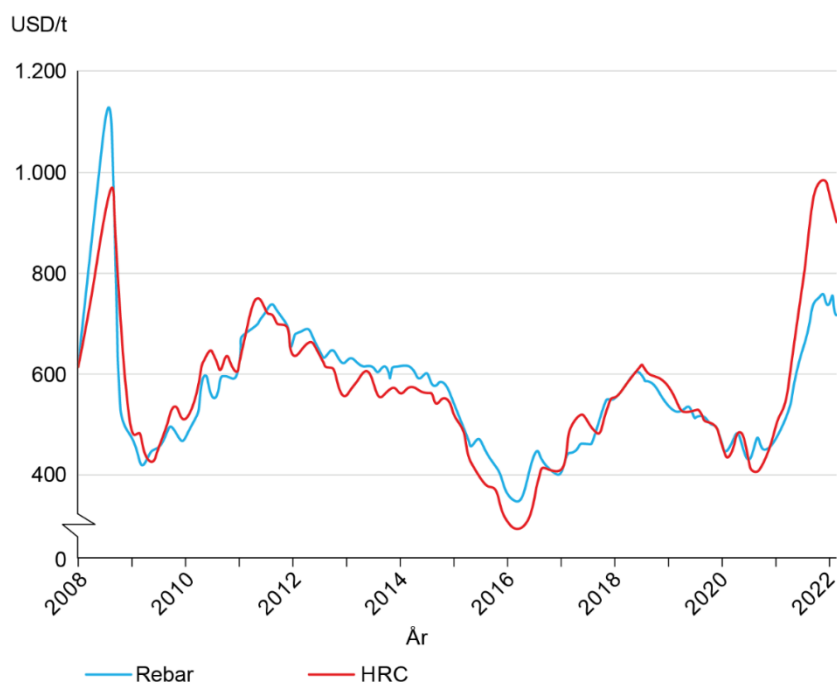
Jern og stålpriserne er cykliske og afspejler især udviklinger i de globale økonomier samt enkeltstående begivenheder, som fx COVID-19, som resulterede i faldende forbrug og dermed faldende priser. Senest har også krigen mellem Ukraine og Rusland og den resulterende handelsembargo på russiske varer påvirket Ruslands store andele af verdenshandlen med jern- og stålprodukter negativt. Eksempler på denne dynamik er vist i Figur 3-15, hvor priserne i perioden 2008-2022 for jernmalm, koks og jernskrot ses. Brancheanalytikere opererer med 3-4 års priscykler og forventer, at lave priser frem mod 2025 bliver afløst af en højprisperiode i 2028 (Steel on the net 2023); de historiske ændringer for stålprodukterne hot rolled coil (HRC) og valset stål (rebar) er illustreret i Figur 3-16.

3.6 Det danske forbrug

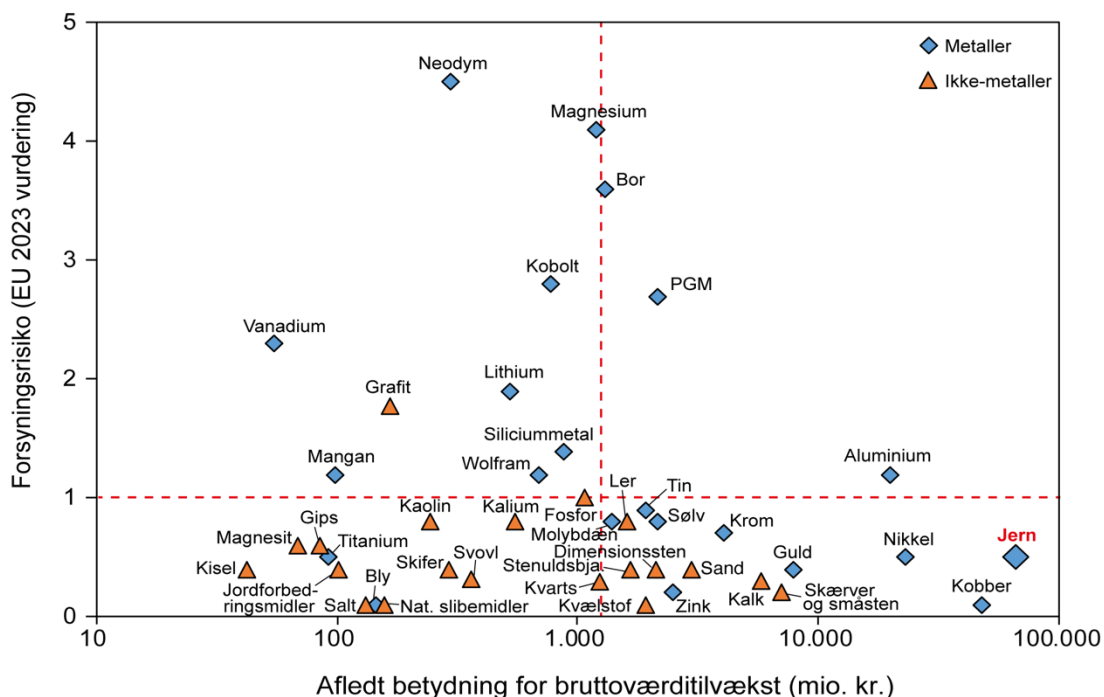
Stål er et vitalt råmateriale for danske industri-, bygge- og anlægsvirksomheder og kan ikke substitueres i nævneværdig grad. Danske virksomheder indkøbte i 2020 jern og stål for 16,4 mia. kr. og varer af jern og stål for 36,9 mia. kr., som dermed udgjorde ca. 10 % af industriens samlede varekøb. Omkring halvdelen blev anvendt af industrivirksomheder og ca. 20 % i bygge- og anlægssektorer; den resterende del blev overvejende anvendt af forsyningssektoren. Den afledte betydning for bruttoværditilvæksten er den højeste blandt 36 råstoffer og er estimeret til ca. 95 mia. kr. i 2019 (Figur 3-17) (Clausen *et al.* 2023). EU Kommissionen vurderer forsyningsrisikoen som meget lille. Det skal dog nævnes, at ståls typiske legeringsmetaller, som kan være kritiske for EU, ikke indregnes i vurderingen (EC 2023).



Figur 3-15 Prisvariationer for jernmalm, koks og jernskrot i perioden 2008-2022. Kilde: OECD (2023).



Figur 3-16 Historiske priser for stålprodukterne hot rolled coil (HRC) og valset stål (rebar). Priserne er gennemsnitlige eksport-fob-priser (USD/ton). Kilde: Steel on the net (2023).



Figur 3-17 Jern og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvækst som funktion af forsyningsrisikoen i Danmark. Af de undersøgte råstoffer er stål ikke et kritisk råstof, da EU vurderer forsyningsrisikoen som lav (Clausen et al. 2023).

Det danske forbrug af og handel med jern- og stålsrot, og de udfordringer der er knyttet hertil, er behandlet nærmere i Tan et al. (2020).

3.7 Perspektiver

Jernmalm bliver produceret i mange lande og af mange selskaber, men med en klar tendens til stigende dominans af få aktører. I 2022 producerede Australien, Brasilien, Kina og Indien ca. 2/3 af jernmalmen, heraf kom ca. halvdelen fra Australien. Den globale jernmalmsproduktion er siden 2000 vokset med ca. 2 % pr. år. Denne store vækst har bevirket at mineralefterforskningen har været utilstrækkelig til at holde reserverne i balance, og levetiden er reduceret fra 140 produktionsår i 2000 til ca. 70 år i 2022. Jernmalmsproduktion uden for Kina domineres af mineselskaberne Rio Tinto, Vale og BHP og i Kina af især Glory Harvest Group, Taiyuan Iron & Steel Group og Anshan Iron & Steel Group. Mineralefterforskningsprojekter har ført til en stigning i de globale jernmalmsreserver, og nye store jernmalmsminer forventes at åbne de kommende år i bl.a. Vestafrika og Australien, men da den samlede produktion har været hurtigt stigende, har det alligevel resulteret i faldende levetid for reserverne. Med den stærke dominans af få store, effektive jernmalmsproducerende selskaber med aktiviteter i få lande vurderes forsyningssituationen at have et godt potentiale til at indfri de kommende års stigende efterspørgsel. Men set fra en geopolitisk og markedsorienteret vinkel kan forsyningssituationen for jernmalm vurderes som udfordret (bl.a. illustreret i Figur 3-9), da mere end halvdelen (55 %) af den vestlige verdens jernmalmsproduktion eksporteres til Kina.

I EU Kommissionens kritikalitetsvurderinger (EC 2023) behandles jernmalm og stål samlet. I 2023 blev jernmalm/stål vurderet som et råstof med stor økonomisk betydning (EI: 7,2), men for-

syningsrisikoen for både minedrift af jernmalm og jern- og stålproduktionen blev vurderet som lave (henholdsvis SR-minedrift: 0,5 og SR-stålfremstilling: 0,2). Til stålfremstilling anvendes ud over jern en række reduktionsmidler og legeringsmetaller, hvoraf flere af disse i flere lande vurderes som kritiske råstoffer (fx kobolt, titanium, vanadium og wolfram). Forsyningsvurderinger for disse råstoffer skal medtages for at vurdere forsyningsituationen for stål, men er ikke medtaget i denne analyse, og denne problematik er ikke behandlet i nærværende rapport.

Stålforbruget forventes at vokse til 1,7 mia. ton i 2025 og 1,85 mia. ton i 2030 for derefter af stagnere (Accenture Strategy 2017; Lutter 2021). Hvis de forventede tilgængelige mængder jernskrot medregnes vil der i alt være ca. 2,25 mia. ton jernmalm i 2025 og 2030 til rådighed – og brug; herefter forventes forbruget at falde.

Efterspørgslen forventes at være størst for EAF-stål, som har mindre klimaaftryk end BOF-stål; EAF-stål forventes dog kun at øges fra ca. 30 % i 2020 til 37 % i 2030.

3.8 Referencer

- Allwood, J. M. 2016: A bright future for UK steel: A strategy for innovation and leadership through up- cycling and integration. University of Cambridge, pp. 1–16.
- Arcelormittal 2023: <https://corporate.arcelormittal.com/sustainability/by-products-scrap-and-the-circular-economy>
- Accenture Strategy 2017: Steel demand beyond 2030. Presentation to OECD, 2017. https://www.oecd.org/industry/ind/Item_4b_Accenture_Timothy_van_Audenaerde.pdf
- Afanga, K, Mirgaux, O. & Patisson, F. 2012: Assessment of Top Gas Recycling Blast Furnace: A Technology To Reduce CO₂ Emissions in the Steelmaking Industry. Carbon Management Technology Conference. OnePetro. [doi:10.7122/151137-MS](https://doi.org/10.7122/151137-MS).
- Baroyan, A. Kravshenko, O., Prates, C., & Vercammen, S. & Zeumer, B. 2023: The resilience of steel: Navigating the crossroads. The resilience of steel: Navigating the crossroads | McKinsey.
- Boston Metal 2022: Molten Oxide Electrolysis for steel decarbonization. Fact Sheet. <https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/>
- Clausen, R. J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. & Vind, I. 2023: Dansk industris brug af mineralske råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/qpub/32051>
- European Commission (EC) 2023: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- EU Parliamentary Research Service (EPRS) 2021: Carbon-free steel production. Cost reduction options and usage of existing gas infrastructure. Scientific Foresight Unit PE 690.008 April 2021, [https://www.europarl.europa.eu/Reg-Data/etudes/STUD/2021/690008/EPRS_STU\(2021\)690008_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/Reg-Data/etudes/STUD/2021/690008/EPRS_STU(2021)690008_EN.pdf)
- Hasanbeigi, A. 2022: Steel Climate impact. An international benchmarking of energy and CO₂ intensities. Report 31 pp. Global Efficiency Intelligence website <https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities>
- Lutter, P. 2021: Green transformation needs clear orientation: Forecasting the steel demand in 2030. New Supply [BC Newssupply_012_en.pdf](https://www.bronk-company.com/BC_Newssupply_012_en.pdf) (bronk-company.com)
- Matmatch 2023: <https://matmatch.com/learn/material/alloy-steel>
- Mining Intelligence Data 2022: <https://www.miningintelligence.com/top-20-iron-ore-producers/>

- Observatory of Economic Complexity World (EOC World) 2023: Database <https://oec.world/>
- OECD 2020: Steel market developments, Q4 2020: <https://www.oecd.org/industry/ind/steel-market-developments-Q4-2020.pdf>.
- OECD 2022: Steel market developments, Q4 2022: [https://one.oecd.org/document/DSTI/SC\(2022\)11/FINAL/en/pdf](https://one.oecd.org/document/DSTI/SC(2022)11/FINAL/en/pdf)
- PWC 2022: Bridging the gaps: Setting the stage for an orderly energy-system transition. (<https://www.pwc.com/gx/en/issues/esg/the-energy-transition/bridging-gaps-to-reach-energy-transition-goals.html>)
- Screen2 Iron ore factsheet 2023: Screen2 Factsheets updates based on the EU Factsheets 2020 iron ore. <https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCREEN2-factsheets-IRON-ORE.pdf>
- S&P Global 2016: China's run-of-mine iron ore output falls 7.7% on year to 1.38 bil Mt in 2015 (<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/012616-chinas-run-of-mine-iron-ore-output-falls-77-on-year-to-138-bil-Mt-in-2015>).
- S&P Global 2022: Lack of high-quality iron ore supply threatens steel's green push. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/lack-of-high-quality-iron-ore-supply-threatens-steel-s-green-push-70947714>
- Statista 2022: Distribution of steel end-usage worldwide in 2022, by sector, <https://www-statista.com/statistics/1107721/steel-usage-global-segment/>
- Steel on the net 2023: Steel market outlook & forecasts for 2024 2025 prices. <https://www.steelonthenet.com/market-outlook.html>.
- Tan, J., Wehde, M.V., Brønd, F. & Kalvig, P. 2020: Udfordringer for bæredygtig genanvendelse af dansk jern- og metalkrot. MiMa rapport 2020/2. <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/steel-data-viewer/>
- Tata Steel 2020: Hisarna – Building a sustainable steel industry. Tata Steel Fact Sheet 2020 <https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/tata-steel-europe-factsheet-hisarna.pdf>
- USGS 2000-2023: Mineral commodity summaries 2000-2023: U.S. Geological Survey <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>
- Wood Mackenzie 2022: Decarbonizing global iron ore and steel industry by 2050 necessitates urgent action and USD 1.4 trillion of investment. News Release Wood Mackenzie [https://www.woodmac.com/press-releases/decarbonising-global-iron-ore-and-steel-industry-by-2050-necessitates-urgent-action-and-us\\$1.4-trillion-of-investment/](https://www.woodmac.com/press-releases/decarbonising-global-iron-ore-and-steel-industry-by-2050-necessitates-urgent-action-and-us$1.4-trillion-of-investment/)
- World Economic Forum 2022: Net-Zero Industry Tracker, 2022 Edition https://www3.weforum.org/docs/WEF_NetZero_Industry_Tracker_2022_Edition.pdf
- World Steel Association 1990-2023: World Steel in Figure annual reports <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics>
- World Steel Association 2022: Scrap use in the steel industry (Fact sheet) <https://www.saisi.org/wp-content/uploads/2021/06/Scrap-Fact-Sheet.pdf>
- World Steel Association 2023: World Steel in Figure <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/#world-crude-steel-production-1950-to-2021>
- World Steel in figures 2021: [2021-World-Steel-in-Figures.pdf \(worldsteel.org\)](https://worldsteel.org/2021-World-Steel-in-Figures.pdf)

4. Kobber

4.1 Introduktion

Kobber (Cu) med atomnummer 29 i det periodiske system er et formbart, sejt metal med særdeles gode varme og elektriske ledningsevner, hvilket i kombination med en stor korrosionsbestandighed gør kobber anvendeligt til en lang række formål. Kobber smelter ved 1.085 °C og koger ved 2.562 °C. Kobber blev allerede 8.000 år f.v.t. brugt til mønter og dekorationer og har været et nøgleråstof siden den industrielle udvikling og er desuden central for grønne energiteknologier. Derfor er der store vækstrater i forbruget af kobber, som forventes at fortsætte frem mod 2050. I 2021 blev der brugt 26,7 Mt kobber, hvoraf ca. 32 % var baseret på genanvendelse (Copper Alliance 2023). Hovedparten af kobber anvendes i forskellige typer legeringer, bl.a. messing og bronze.

Kobber brydes i mange lande, hvoraf dog Chile, Peru, Kina og Den Demokratiske Republik Congo (DR Congo) i 2022 producerede mere end 60 % af verdensproduktionen; Kina dominerer de forsyningskæder, der forarbejder kobber til industrielt anvendelige råmaterialer, og kinesiske industrier er også storforbrugere af kobber. EU Kommissionens definerede i marts 2023 kobber som et strategisk råstof på grund af dets centrale rolle i den grønne omstilling; analysen vurderede ikke kobber som et kritisk råstof, hvilket særligt skyldes at forsyningskæderne ikke i væsentligt omfang er domineret af enkeltlande (EC 2023).

4.2 Anvendelser og sektorer

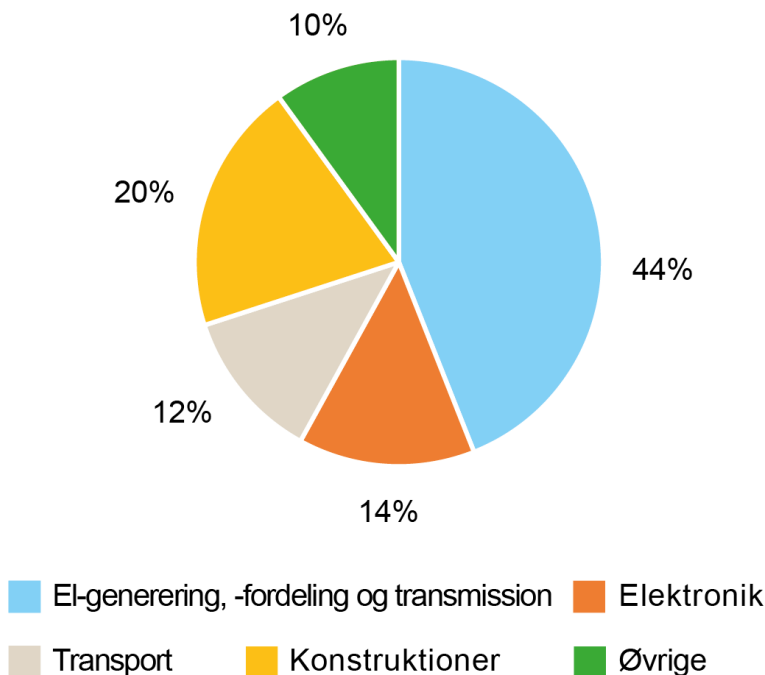
Kobber anvendes i særdeleshed på grund af metallets elektriske ledningsevne, korrosionsresistens eller varmeledning. Kobber indgår let i legeringer med andre metaller så som tin (bronze), zink (messing) og nikkel (nysølv). I disse legeringer ændres kobbers fysiske og kemiske egenskaber, og kobber får mange nye anvendelsesmuligheder, særligt i byggeindustrien til eksempelvis fremstilling af elektriske kabler, stikkontakter, vandrør og kedler. I industrien anvendes kobberlegeringer desuden i siliciumchips, hvor det gør mikroprocessorerne hurtigere og mere energi-effektive, eller til varmevekslere, hvor man udnytter kobbers høje varmeledningsevne. I Figur 4-1 ses de vigtigste anvendelsesområder for kobber i 2021.

Elforsyning og elektronik: Kobber anvendes både til ledningsnet og printplader og mere end ⅓ af kobberforbruget er knyttet til kobbers elektriske ledende egenskaber. Der anvendes 3-8 ton kobber/MW i vindmøller og ca. 60 kg/elbiler. Den grønne omstilling vil betyde udbygning af elnettet, og frem mod 2050 forventes det at være det helt dominerende anvendelsesområde for kobber.

Byggeri: Kobbers fysiske egenskaber i kombination med gode forarbejdningsegenskaber har gjort kobber meget anvendt i byggeriet til forsyningsystemer for vand, varme og elektricitet. I moderne boliger anvendes omkring 200 kg kobber.

Transportsektor: Kobber indgår især i de elektriske systemer i biler, tog og fly. En konventionel bil indeholder omkring 25 kg og elbiler omkring det dobbelte. Der er dermed et betydeligt vækstmarked for kobber; tilsvarende bliver der brugt store mængder kobber til fremstilling af fly (ca. 4.000 kg kobber til store flytyper).

Der er herudover forbrug af kobber til bl.a. medicinsk udstyr på grund af kobbers antimikrobielle egenskaber, og til industrielt udstyr, varmeveksler, ventiler, kondensatorer og beholdere til aggressive væsker.



Figur 4-1 De vigtigste anvendelsesområder for kobber i 2021 (Copper Alliance 2022a).

4.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder

Det vurderes, at ca. $\frac{2}{3}$ af alt kobber produceret til dato – 690 Mt – stadig er i produktion. Kobber er et af de metaller, som har den højeste genanvendelsesrate, og i 2021 udgjorde genanvendelsesraten ca. 32 % af den globale produktion på 26,7 Mt (RIR) (ICA-Recycling Brie 2022). I EU er genanvendelsesraten (EoL-RIR) for kobber estimeret til 55 % (EC 2023) og til ca. 30 % globalt (ICA 2021). Hovedparten af kobber til genanvendelse kommer fra elektronik- og elektriske industrier, efterfulgt af maskinindustrier samt bilindustrierne; en mindre del kommer fra bygninger og infrastruktur.

Den betydeligste del af kobbergenanvendelsen og -handlen foregår i Kina, Indien, Japan og Sydkorea. Genvindingsindustrien for kobber domineres af en række store internationale koncerner, i Vesten omfattende blandt andre Glencore, Aurubis AG, Commercial Metals Company, Schnitzer Steel Industries Inc., Umicore, Kuusakoski Group OY og Sims Metal Management Ltd. Værdien af genanvendt kobber udgjorde i 2022 ca. 27 mia. USD og forventes at stige til 43 mia. USD i 2031 (Recycled Copper Market 2023).

Substitution for kobber skønnes at være omkring 1 % (Kalvman-Schueler 2022) og har dermed kun ringe betydning. Der er dog forventninger til, at aluminium vil substituere kobber til fremstilling højvoltskabler; udviklingen i dette marked er dog påvirket af kobber-aluminium-prisdifferencen, som hidtil ikke har været fordelagtig for denne udvikling.

4.4 Global forsyning

4.4.1 Geologi

Kobber findes i forskellige geologiske forekomststyper, hvoraf følgende er mest udbredt:

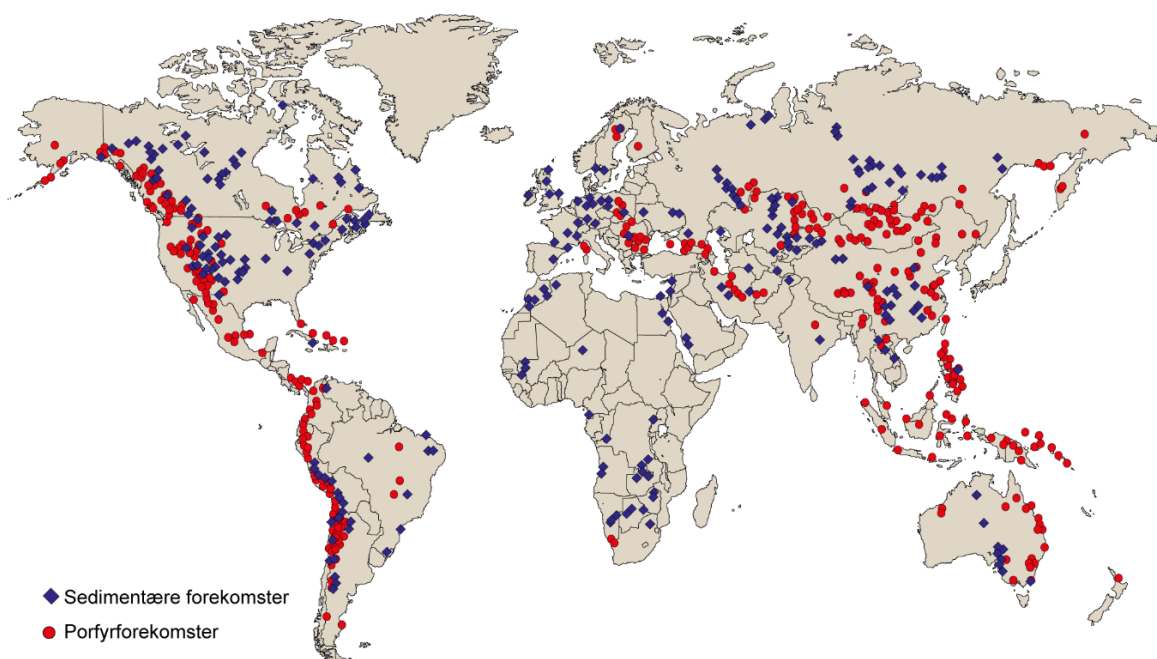
- A. Porfyrokobberforekomster, som typisk findes i områder, hvor oceanisk skorpe har været trykket ned under den kontinentale skorpe, og den derved dannede smelte efterfølgende er trængt op i de overliggende bjergarter; guld kan være biprodukt i denne type. Porfyrforkomster forekommer mange steder, men er særligt hyppig i Andesbjergene, det vestlige Nordamerika og i det Indonesiske Øhav.
- B. Kobberholdige sedimenter, hvor kobber er udfældet i sandsten, skifer, kalksten o.l.; typen dominerer i 'Kobberbæltet' i Zambia og DR Congo og kendes fra Østeuropa (Kupferschiefer); de indeholder typisk ~2 % Cu, og kobolt udvindes stedvist som biprodukt.

På Figur 4-2 ses en oversigt over verdens største kobberforekomster.

Porfyrforkomster dominerer den globale kobberproduktion, og de tre største kobberminer er af denne type og er Kennecott (Utah, USA), Chuquibambilla (nordlige Chile) og Escondida (Atacama, Chile); de sedimentære typer bidrager med ca. 30 % af den globale produktion (Thaarup 2017). Den sedimentære type kendes i Grønland fra bl.a. Thule Bassinet og Jameson Land. Yderligere information vedrørende kobberpotentialet i Grønland kan findes i Stensgaard *et al.* (2011) og Rosa *et al.* (2023).

Begge typer kobberforekomster kan være domineret af kobbersulfider og kobberoxider, eller kombinationer af disse grupper, ofte med kobberindhold <0,6 %.

Værdien af kobberforekomster bestemmes ikke alene af størrelsen og lødigheden, men også af sammensætningen af de kobberholdige mineraler (og evt. biproduktmineraler), da dette har betydning for omkostningerne til at frigøre kobber fra malmen.



Figur 4-2 Oversigt over forekomster af kobber (porfyrforkomster og sedimentære forekomster). På basis af USGS.

Kobber indgår i mange forskellige mineraler, men udnyttes især fra kobberoxider og -sulfider; jern indgår typisk i disse mineraler (Tabel 4-1). Chalcopyrit er det mest anvendte kobbermineral og omkring halvdelen af verdens kobberproduktion stammer fra dette mineral (BGS 2007), men chalcocit, cuprit og covellit er også kommercielt vigtige.

Tabel 4-1 Kommercielt vigtige kobbermineraler.

| Mineral | Kemisk formel | Cu-indhold (vægt%) |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Gedigent kobber | Cu | >98 |
| Bornit | Cu ₅ FeS ₄ | 63 |
| Chalcopyrit | CuFeS ₂ | 35 |
| Chalcocit | Cu ₂ S | 80 |
| Covellit | CuS | 66 |
| Cuprit | Cu ₂ O | 89 |
| Azurit | Cu ₃ (CO ₃) ₂ Cu(OH) ₂ | 55 |
| Malachit | Cu(CO ₃)Cu(OH) ₂ | 58 |

4.4.1.1 Biprodukter

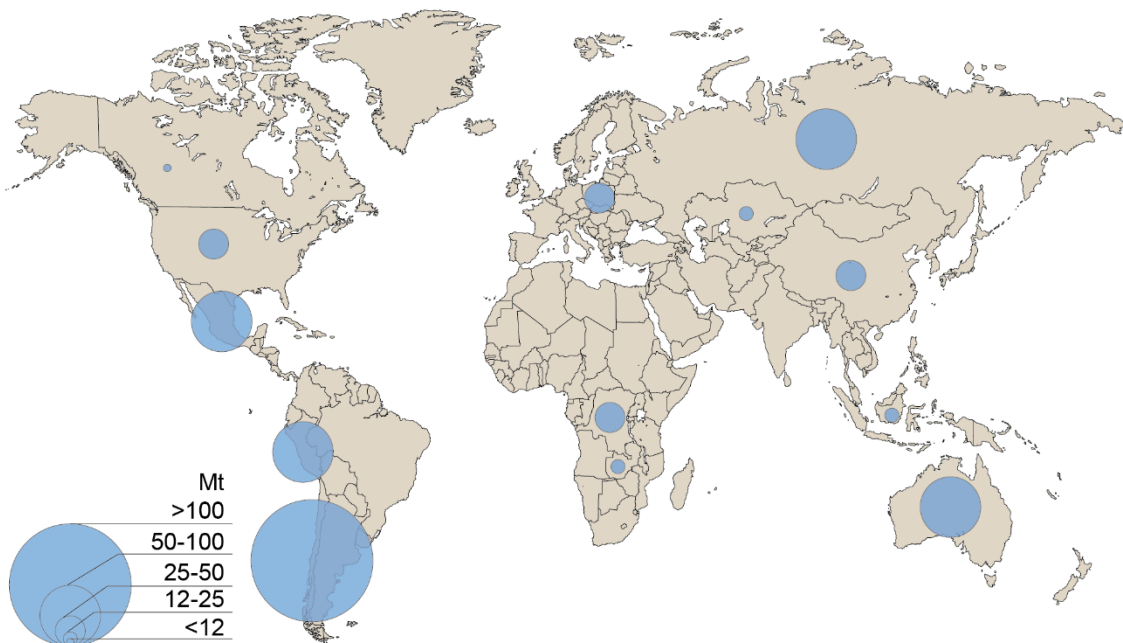
Kobberforekomster indeholder ofte en række andre kommercielle mineraler som varierer i forhold til dannelsesmåden: Porfyroforekomster har især potentiale for at indeholde molybdæn, sølv og guld; de sedimentære forekomster indeholder typisk kobolt, og fra massiv-sulfid-kobberforekomster (ikke nævnt ovenfor) udnyttes især bly og zink. Sådanne biprodukter adskilles fra kobbermineralerne ved behandling i minen og handles som mineralkoncentrater til forarbejdning andetsteds.

Kobbermineraler kan desuden indeholde små mængder af vigtige metaller, som ikke fremgår af mineralets kemiske formel. Denne gruppe omtales som kompanionmetaller og er vigtige til produktion af især antimon (Sb), bismuth (Bi), selen (Se), tellurium (Te) og rhenium (Re). McNulty *et al.* (2022) har estimeret at der potentielt årligt kan udvindes ca. 1.500 ton antimon, 1.600 ton bismuth, 4.200 ton selen og 800 ton tellurium ved udvinding af kobber. For tellurium og selen er det næsten dobbelt så meget, som i dag udvindes fra alle råstoffer.

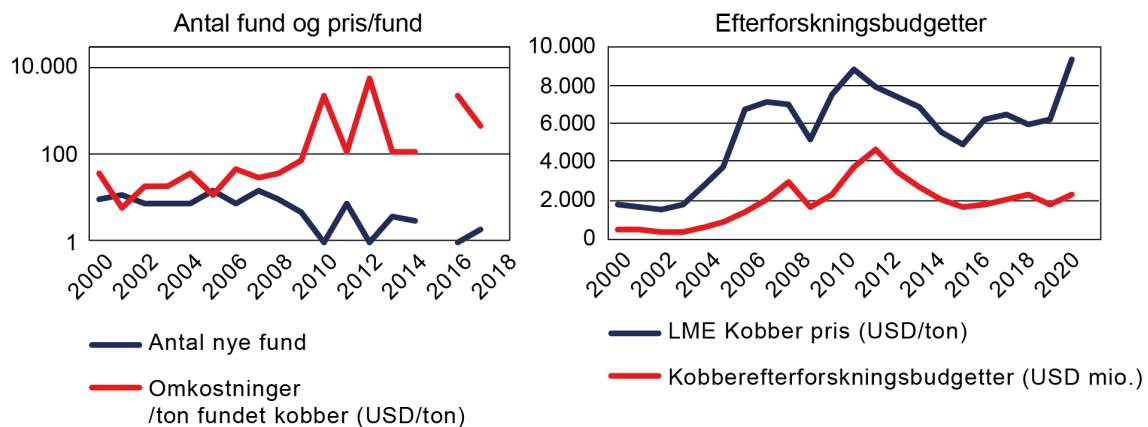
4.4.2 Globale kobberreserver

USGS (2023) angiver kobberreserverne for 13 lande samt en række uspecificerede lande til at udgøre 876 Mt kobber (Tabel 4-2). Disse reserver er tilstrækkelige til 42 års produktion baseret på kobberbehovet i 2021. Da der forventes store vækststigninger frem mod 2050 er den reelle levetid betydeligt mindre. Det skal bemærkes, at reserverne opgjort af USGS for perioden 2000 til 2021 viser, at levetiden for de globale reserver er øget fra ca. 25 år i 2002 til ca. 42 år i 2021. Det er uklart, i hvilket omfang de nye reserver er relateret til eksisterende miner, eller om det er et resultat af nye projekter. I modsætning til USGS' data viser data fra DeCoff (2022), (i) at antallet af fund generelt er faldet i perioden fra 2000-2021; (ii) at prisen pr. ton fundet kobber generelt er stigende; (iii) at de årlige nye fund siden 2007 i gennemsnit kun har udgjort ca. 10 Mt, og (iv) at mineralefterforskningsaktiviteterne er stærkt korreleret med kobberpriserne, med stigende aktivitet ved høje priser. I Figur 4-3 ses de 10 lande, der i 2022 rådede over de største kobberreserver.

I Figur 4-4 ses mineralefterforskningsaktiviteter for kobber, budgetter, resulterende antal fund og omkostninger til nye fund.



Figur 4-3 Oversigt over kobberreserverne i de ti lande, der i 2021 havde de største reserver (se også Tabel 4-2).



Figur 4-4 Mineralefterforskningsaktiviteter for kobber, budgetter, resulterende antal fund og omkostninger til nye fund (DeCoff 2022).

4.4.3 Global kobberproduktion

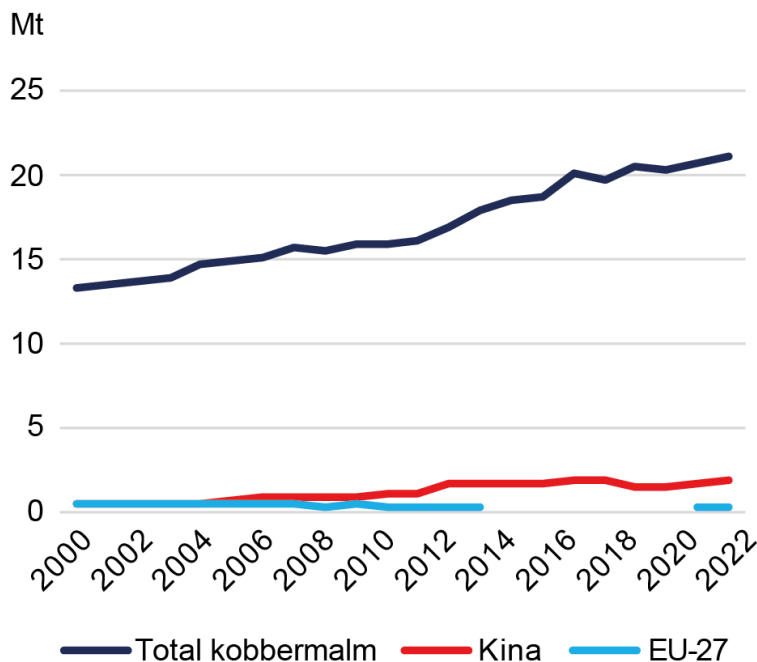
Kobberproduktion omfatter primærproduktion fra miner og sekundærproduktion fra kobberskrot; derfor skelnes der ofte imellem mineproduktionen og raffineret produktion, idet den sidste kategori også inkluderer skrotproduktionen.

Den globale kobbermalmsproduktion er steget med 63 % i perioden fra 2000 til 2021, hvor produktionen var ca. 20,4 Mt (Figur 4-5); hovedparten blev igennem hele perioden produceret i Chile, Peru, Indonesien og Rusland. Herudover er mere end 20 lande, heriblandt Kina, involveret i produktion af kobbermalm, dog med små produktioner. EU-27 har kun en lille kobbermalmsproduktion, som især er i Polen og Cypern (Tabel 4-3 og Figur 4-6).

Væksten i perioden er baseret på både udbygning af eksisterende miner og igangsætning af nye produktioner med de største vækstrater i Peru, Chile, Mexico og Zambia. Chile har dog en faldende produktion i disse år på grund af forsinket udbygning af nogle af de store miner.

Tabel 4-2 Verdens kobberreserver opgjort for 13 lande; hertil kommer en række lande som ikke angiver denne type data. Kilde: USGS (2023).

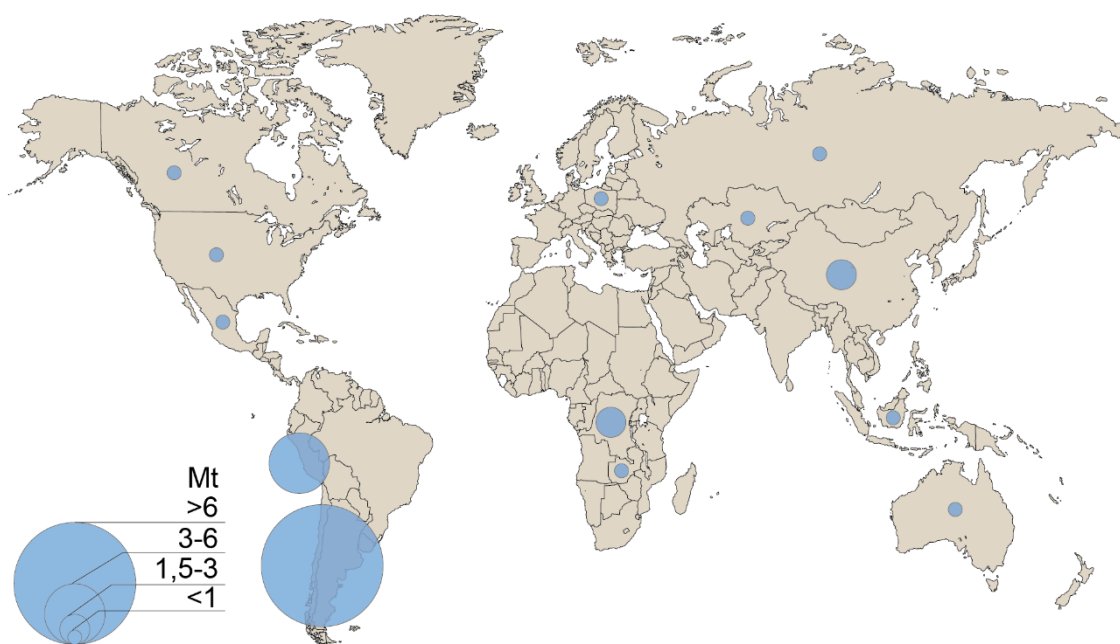
| Land | Reserver 2021 (USGS) (Mt) |
|------------|---------------------------|
| Chile | 200 |
| Australien | 93 |
| Peru | 77 |
| Rusland | 62 |
| Mexico | 53 |
| USA | 48 |
| DR Congo | 31 |
| Polen | 31 |
| Kina | 26 |
| Indonesien | 24 |
| Zambia | 21 |
| Kasakhstan | 20 |
| Canada | 10 |
| Øvrige | 180 |
| Total | 876 |



Figur 4-5 Oversigt over historisk produktion af kobber i perioden 2000-2021. Kilde: USGS (2000-2022).

Tabel 4-3 Global produktion af kobbermalm i 2021. Kilde: USGS (2023).

| Land | Produktion (x1.000 ton) | Andel af global produktion (%) |
|------------|-------------------------|--------------------------------|
| Chile | 5.600 | 31 |
| Peru | 2.200 | 12 |
| Kina | 1.880 | 10 |
| DR Congo | 1.800 | 10 |
| USA | 1.200 | 7 |
| Australien | 900 | 5 |
| Zambia | 830 | 5 |
| Rusland | 820 | 4 |
| Indonesien | 810 | 4 |
| Mexico | 720 | 4 |
| Canada | 590 | 3 |
| Kasakhstan | 520 | 3 |
| Polen | 390 | 2 |
| Øvrige | 2.800 | 15 |
| Total | 18.260 | 100 |



Figur 4-6 Produktion af kobbermalm i 2021 i de ti største produktionslande (se også Tabel 4-3).

Kobberproduktionen domineres især af omkring 10 store selskaber, som leverede ca. 50 % af den globale produktion i 2020 (Tabel 4-4). Blandt aktionærerne i ni af de ti børsnoterede mineselskaber indgår en eller flere af 12 store kapitalfonde (Tabel 4-5), heriblandt Black Rock, Vanguard og Fidelity, som er verdensledende kapitalfonde. Det fremgår af tabellen, at aktionær-andelen af denne gruppe investorer varierer betydeligt, fra Southern Copper med <1 % af aktierne til First Quantum, hvor denne gruppe investorer ejer ca. 37 %.

Kinas rolle i den globale mineindustri uden for Kina omfatter både kinesisk relaterede selskabers direkte engagement med egne licenser og mineaktiviteter, joint venture-aftaler og som aktionærer i andre selskaber (fx Rio Tinto). Den første gruppe omfatter især aktiviteter i DR Congo, Zambia,

Peru og Serbien og skønnes at omfatte en produktion på 1-2 Mt kobber pr. år. Kinesiske selskabs involvering som mindretalsaktionærer i vestlige kobberminer er ikke opgjort, ligesom off-take til kinesiske smelteværker/raffinaderier også er ukendt.

Table 4-4 Oversigt over de 20 størst producerende miner, som samlet producerede ca. 1/3 af den globale kobberproduktion i 2021. Data fra diverse åbne kilder; ikke komplet.

| Selskab | Mine | Land | Produktion (ton) | Forventet nedlukning (år) |
|----------------------------------------------|-----------------------------|------------|------------------|---------------------------|
| BHP | Olympic Dam Mine | Australien | 205.000 | 2061 |
| BHP Billiton | West Musgrave (Succoth) | Australien | | |
| CMOC (80)/Sumitomo Corp | Northparkes | Australien | | |
| Glencore | CSA mines | Australien | | |
| Glencore Plc | Mount Isa Copper Mine | Australien | 92.000 | 2023 |
| Glencore Plc | Ernest Henry | Australien | | |
| Kingsgate Consolidated | Calingiri | Australien | | |
| Newcrest Mining | Cadia Mine | Australien | 106.000 | 2047 |
| OZ Minerals | Prominent Hill Mines | Australien | 63.000 | 2031 |
| OZ Minerals | Carrapateena Mine | Australien | 55.000 | 2039 |
| Rio Tinto | Winu | Australien | | |
| Khoemacau Mining Company | Khoemacau Mine | Botswana | 60.000 | |
| Centerra Gold | Mount Milligan Mine | Canada | 39.000 | 2030 |
| Copper Mountain Mining | Copper Mountain Mine | Canada | 41.000 | 2051 |
| GT Gold | Tatogga (Saddle) | Canada | | |
| Newcrest Mining | Red Chris Mine | Canada | 33.000 | 2043 |
| Taseko Mines | Gibraltar Mine | Canada | 57.000 | 2039 |
| Teck Resources | Highland Valley Copper Mine | Canada | 130.000 | 2040 |
| Anglo American | Los Bronces | Chile | 340.000 | 2057 |
| Antofagasta (60)/(JX Nippon+Mitsubishi (40)) | Los Pelambres | Chile | 380.000 | |

4.4.4 Fremstilling af kobberråvarer

Produktion af kobber begynder med brydning af malmen (ofte <1 % kobber) og slutter efter en lang række af forarbejdningsstrin med plader af 99,99 % kobber. Disse plader kaldes ofte katodekobber, som er det råprodukt, der indgår i slutprodukterne.

De mest almindelige malmtyper, kobberoxider og -sulfider, behandles med to forskellige metoder: hydrometallurgi for oxiderne og pyrometallurgi for sulfiderne. Oxidforekomsterne er ofte store og relativt overfladenære, men har lavere lødighed end sulfiderne. Selvom der skal udvindes og forarbejdes mere malm fra oxidtypen, er forarbejdningsprocessen billigere sammenlignet med processering af sulfidtyper; sidstnævnte type har almindeligvis højere lødighed, er mindre og kan ligge dybt. Valg af metoder til brydning – åben eller lukket mine – og processering bestemmes ud fra bl.a. mineralsammensætning, koncentration og tonnage, og hvor langt under overfladen forekomsten ligger. Malmforekomster indeholder ofte både kobberoxider og -sulfider.

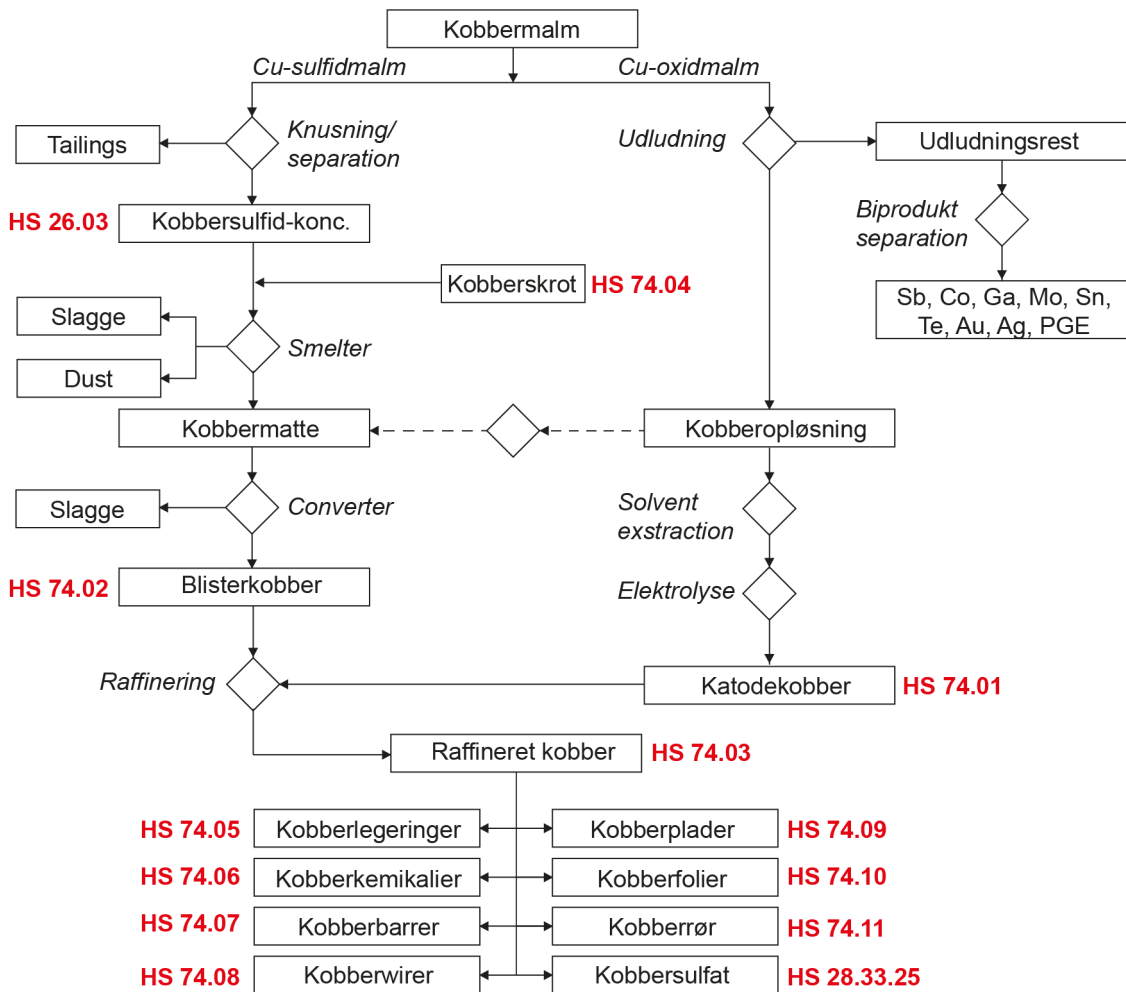
Tabel 4-5 Eksempler på større investeringselskabers ejerandele i de kobberproducerende selskaber. Data fra diverse åbne kilder.

| Mineselskab / Investeringselskab | Antofagasta | BHP | First Quantum | Freeport-McMoRan Inc. | Glencore | Grupo Mexico | KGHM | Southern Copper | Zijin Mining Group Company Ltd |
|---------------------------------------------------------------|-------------|-----|---------------|-----------------------|----------|--------------|------|-----------------|--------------------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| Baillie Gifford & Co. | | | 1,5 | | | | 0,9 | | 1,8 |
| BlackRock Fund Advisors | 1,4 | 0,5 | | 2,1 | 1,6 | | | | 4,2 |
| BlackRock Investment Management (UK) Ltd. | 0,9 | 1,1 | 2,0 | | 2,9 | | | | |
| BlackRock México SA de CV Asesor en Inversiones Independiente | | | | | | 0,8 | | | |
| Capital International Ltd. | | | 2,5 | | | | | | |
| Capital Research & Management Co. (World Investors) | | | 13,3 | | 1,4 | 2,5 | | 0,6 | |
| Capital Research & Management Co. (Global Investors) | | | 10,8 | 5,6 | | | | | |
| Fidelity Investments Canada ULC | | | | 2,2 | | | | | |
| Fidelity Management & Research Co. LLC | 0,9 | | 4,8 | 5,0 | | | | | |
| GIC Pte Ltd. (Investment Management) | | | | | | | | | 7,9 |
| Vanguard Investments Australia Ltd. | | 0,6 | | | | | | | |
| The Vanguard Group, Inc. | 1,1 | 2,5 | 2,1 | 7,8 | 2,7 | 1,3 | 1,9 | | 3,2 |
| Samlet aktieandel | 4,2 | 4,7 | 36,9 | 22,7 | 8,5 | 4,6 | 2,8 | 0,6 | 17,1 |

De første trin af brydningen er den samme for både åbne og lukkede miner: sprængning, udlastning og knusning. Den efterfølgende processering af malmen foregår af flere specialiserede virksomheder, men foregår typisk som vist på Figur 4-7. Fremstilling af kobber fra oxidmalm omfatter følgende behandlingstrin: (i) Bunker af knust malm oversprøjtes med svovlsyre, som trænger igennem malmbunken og opløser kobberoxidminerale (heap leaching); (ii) den kobberholdige væske opsamles, og kobberopløsningen separeres fra (Solvent Extraction) (60-70 % Cu); og (iii) ved efterfølgende elektrolysebehandling fremstilles katodekobber (99,9 % Cu). Fremstilling af kobber fra sulfidmalm omfatter følgende behandlingstrin: (i) De kobberholdige sulfidminerale separeres fra malmens øvrige minerale til et kobbermineralkoncentrat, der er en handelsvare; de fraserede minerale er et spildprodukt som deponeres i tailingsbasiner; (ii) smeltning af kobbersulfidminerale (ved ca. 1.300 °C), hvor det resulterende produkt er kobbermatte (58-60 % Cu), (iii) kobbermatte behandles i en konverterovn, hvor resterende jern og svovl fjernes, hvorved de resulterende produkter er såkaldt blisterkobber (98 % Cu) og anodekobber (99 % Cu); 'urenheder' som fremkommer i trin (ii) kan indeholde kommercielle biprodukter, som efterfølgende behandles særskilt; og (iv) elektrolytisk behandling af anodekobber, hvorved der fremstilles katodekobber (99,99 %), som anvendes til fremstilling af plader, rør, kabler m.m.

Genanvendelse af kobberskrot og -legeringer sker ved (i) smeltning og (ii) oprensning af urenheder fra skrotmaterialet.

Kina dominerer forarbejdning af kobber; 10 af de 20 største raffineringsanlæg ligger i Kina, heraf er fire af de fem største, som samlet har en kapacitet på ca. 7 Mt, svarende til ca. 33 % af den globale kapacitet. Tre af de 20 største anlæg, med en samlet kapacitet på ca. 1,6 Mt, ejes af den chilenske stat (Bell 2021). De nye anlæg til raffinering af kobber forventes især at blive etableret i Chile, Peru og Mexico samt i Asien i Kina, Japan og Indien (Businesswire 2022).



Figur 4-7 Generisk procesdiagram for fremstilling af kobber, med angivelse af nogle af de almindelige handelsvarer (HS-koder).

4.4.5 Klima- og miljøpåvirkning

Kobbers CO₂-balastning varierer i forhold til malmtypen, mængden af kobberskrot som tilføres, produktionsmetode (valg af metode er dog især knyttet til malmens mineralogi) og energiform. Flere analytikere vurderer, at kobber i 2022 bidrog med 0,2-0,3 % af den globale CO₂-udledning. Udledningen pr. ton metalkobber er beregnet til ca. 4 ton CO₂e (Carbon Chain 2023), hvilket er betydeligt højere end for stål; kobbers udledning kan opdeles i ca. 1 ton CO₂e for fremstilling af kobberkoncentrat, mens de efterfølgende forarbejdningstrin udgør ca. 3 ton CO₂e (Carbon Chain 2023) med en fordeling på 80 %, der forarbejdes pyrometallurgisk og 20 % hydrometallurgisk,

samt på at genanvendt kobber udgør ca. 40 % af den samlede produktion af kobber. Isoleret set er belastningen ved anvendelse af kobberskrot 0,2-1,9 ton CO₂e/ton Cu.

Moreno-Leiva *et al.* (2019) har estimeret fordelingen af energiforbruget til fremstilling af kobber, hvoraf det fremgår, at den pyrometallurgiske metode er 20 % mere energikrævende end den hydrometallurgiske metode (se Tabel 4-6).

Vandforbruget er stærkt varierende i forhold til mineralogi, metode og beliggenhed; men der er ikke fundet retvisende data.

Tabel 4-6 Oversigt over energiforbrug til fremstilling af kobber. Baseret på *The Warren Centre* (2020).

| Pyrometallurgisk metode | | | | Hydrometallurgisk metode | | | |
|-------------------------|------|---------------|------|--------------------------|------|-----------------|------|
| Energitype | GJ/t | Procestrin | GJ/t | Energitype | GJ/t | Procestrin | GJ/t |
| Diesel | 17 | Mining | 10 | Diesel | 11 | Mining | 10 |
| Elektricitet | 20 | Smeltning | 9 | Elektricitet | 13 | Hydrometallurgi | 14 |
| | | Koncentrering | 13 | | | | |
| | | Raffinering | 5 | | | | |
| Total | 37 | Total | 37 | Total | 24 | Total | 24 |

4.5 Handel

Verdenshandlen med kobbermalm og kobberartikler udgjorde i 2020 ca. 377 mia. USD og hører dermed til blandt de meget handlede varer; en opgørelse over nogle af de vigtigste varegrupper er vist i Tabel 4-7. Handlen med de enkelte varegrupper har igennem de seneste 20 år udvist store udsving, både som følge af varierende efterspørgsel knyttet til verdensøkonomien og til udsving i LME-kobberpriserne i perioden, som vist i Figur 4-5. Det fremgår bl.a., at den generelle trend for handel med kobberkoncentrat og råkobber er steget i perioden, hvorimod en række af de andre varegrupper af forarbejdede produkter har været faldende. Disse trends må antages at skyldes Kinas stigende opkøb af uforarbejdede råvarer, som forarbejdes og forbruges i Kina, og dermed i betydeligt omfang, eksportøkonomisk set, indgår i eksport af andre varegrupper end de kobberrelaterede. Nogle af de vigtigste handelsrelationer for de udvalgte kobbervarer er vist i Tabel 4-8 til Tabel 4-13 og i Sankey-diagrammer i Figur 4-8 til Figur 4-13. Værdikæderne for kobber er karakteriseret ved at få lande og et lille antal virksomheder dominerer både minedrift og de første led i bearbejdningen af malmen, samt at Kina dominerer importen af disse produkter og af kobberskrot, hvor de efterfølgende forarbejdes.

Der er betydelige forskelle i handelsmønstret for de fire største producentlande af primær kobber, Chile, Peru, Kina og DR Congo, som i 2020 producerede ca. $\frac{2}{3}$ af den globale produktion: Peru eksporterer næsten udelukkende kobber i form af mineralkoncentrater (HS 26.03); Chile er verdens største eksportør af kobbermineralkoncentrat og har desuden en betydelig eksport af blisterkobber (HS 74.01); eksporten fra DR Congo er domineret af raffineret kobber (HS74.03); og Kina har ingen betydende eksport af kobber, men er verdens største importør af kobbermineralkoncentrat (HS 26.03), blisterkobber (HS 74.02), raffineret kobber (HS 74.03) og kobberskrot (HS 74.04).

Blandt de 10 største virksomheder involveret i handel med kobber er fire selskaber kinesisk ejet (Jiangxi Copper, Golden Dragon, Ningbo Jintian Group og Tongling Nonferrous Metal) samt tre tyske selskaber (Aurubis, Wieland og Mueller Industries).

Tabel 4-7 De vigtigste kobbervaregrupper og tilhørende eksportværdier for 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Varekodebeskrivelse | HS2 | Eksportværdi (mio. USD) | HS4 | Eksportværdi (mio. USD) | HS6 | Eksportværdi (mio. USD) |
|------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------|-------|-------------------------|----------|-------------------------|
| Copper ore (and concentrates) | | | 26.03 | 61.300 | | |
| Copper articles | 74 | 161.000 | | | | |
| Precipitated copper | | | 74.01 | 1.230 | | |
| Copper matte | | | | | 74.01.10 | 1.230 |
| Cement copper (precipitated) | | | | | 74.01.20 | - |
| Raw copper (=unrefined copper), Cu-anodes, electrolyti refin. Cu | | | 74.02 | 14.400 | | |
| Refined copper | | | 74.03 | 71.800 | | |
| Scrap copper | | | 74.04 | 19.200 | | |
| Copper alloys | | | 74.05 | 400 | | |
| Copper powder | | | 74.06 | 1.000 | | |
| Copper bars | | | 74.07 | 5.000 | | |
| Copper Wire | | | 74.08 | 16.800 | | |
| Copper plating | | | 74.09 | 7.000 | | |
| Copper foil | | | 74.10 | 6.600 | | |
| Copper pipes | | | 74.11 | 6.400 | | |
| Copper housewares | | | 74.18 | 700 | | |
| Other copper products | | | 74.19 | 3.400 | | |
| Copper sulphate | | | | | 28.33.25 | 600 |
| | | 161.000 | | 216.000 | | 21.830 |

Tabel 4-8 De fire største eksportlande og deres tre største eksportlande for kobbermalmkoncentrat (HS4 26.03) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Chile | 21.400 | Kina | 13.100 |
| | | Japan | 3.782 |
| | | Sydkorea | 1.257 |
| Peru | 9.227 | Kina | 5.864 |
| | | Japan | 1.041 |
| | | Sydkorea | 953 |
| Australien | 3.845 | Kina | 1.376 |
| | | Japan | 1.131 |
| | | Sydkorea | 656 |
| Canada | 3.115 | Japan | 805 |
| | | Kina | 769 |
| | | Sydkorea | 568 |
| Total | 61.827 | | |

Tabel 4-9 De fire største eksportlande og deres største aftagerlande for udfældet kobber (HS4 74.01) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Finland | 370 | Rusland | 354 |
| | | Japan | 13 |
| | | Tyskland | 4 |
| Chile | 163 | Rusland | 151 |
| | | Sydkorea | 12 |
| | | Cambodia | 1 |
| Canada | 144 | Norge | 75 |
| | | Sydkorea | 36 |
| | | Bulgarien | 20 |
| Mexico | 76 | Sydkorea | 38 |
| | | Rusland | 19 |
| | | Belgien | 14 |
| Total | 1.222 | | |

Tabel 4-10 De fire største eksportlande og deres største aftagerlande for rå kobber/blisterkobber (HS4 74.02) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Zambia | 5,8 | Schweitz | 2,3 |
| | | Kina | 1,2 |
| | | Namibia | 1,1 |
| Chile | 1,9 | Kina | 1,1 |
| | | Canada | 0,4 |
| | | Sydkorea | 0,3 |
| Namibia | 1,4 | Kina | 0,9 |
| | | Belgien | 0,2 |
| | | Tyskland | 0,1 |
| Bulgarien | 1,0 | Belgien | 0,6 |
| | | Tyskland | 0,4 |
| | | Italien | - |
| Total | 14,4 | | |

Tabel 4-11 De fire største eksportlande og deres største importlande for HS4 74.03 Refined Copper i 2020. Kilde: OEC World (2023).

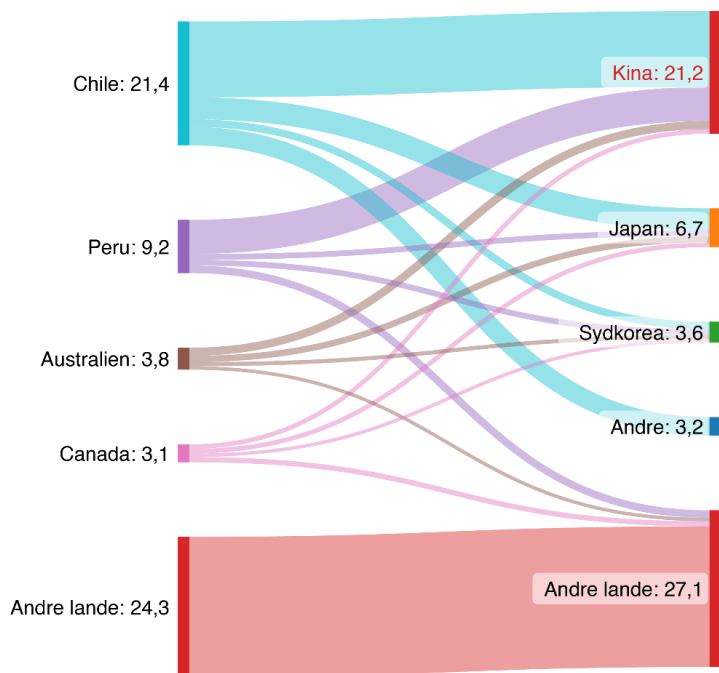
| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Chile | 14,5 | Kina | 7,1 |
| | | USA | 2,6 |
| | | Sydkorea | 1,2 |
| DR Congo | 11,1 | Kina | 4,1 |
| | | Tanzania | 1,5 |
| | | Singapore | 0,7 |
| Rusland | 5,0 | Kina | 1,7 |
| | | Holland | 1,7 |
| | | Tyrkiet | 0,4 |
| Japan | 4,7 | Kina | 1,9 |
| | | Indien | 0,8 |
| | | Taiwan | 0,8 |
| Total | 71,8 | | |

Table 4-12 De fire største eksportlande og deres største importlande for HS4 74.08 Copper Wire i 2020. Kilde: OEC World (2023).

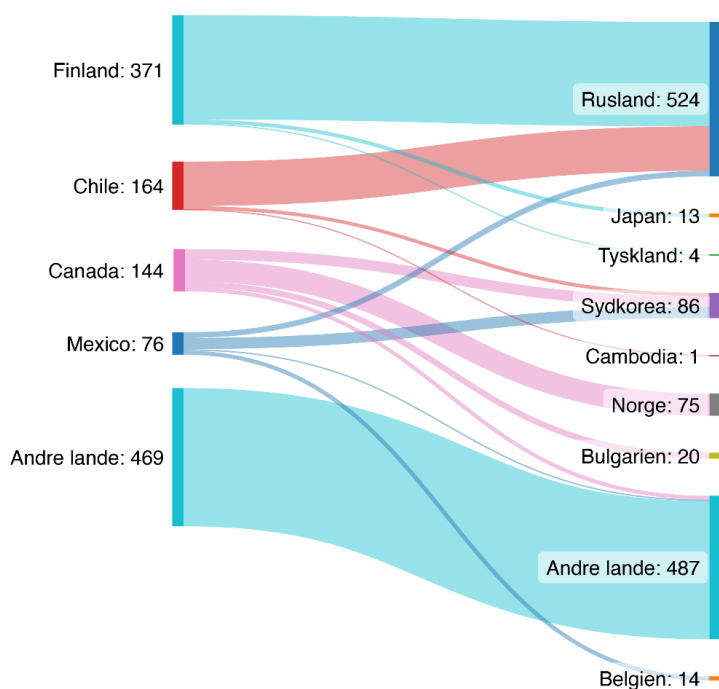
| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Tyskland | 2.521 | Italien Polen Australien | 486 259 238 |
| For. Arab. Emir. | 1.671 | Saudi Arabien Indien Oman | 765 277 233 |
| Rusland | 1.345 | Kuwait Qatar Sydafrika | 482 189 169 |
| Canada | 976 | USA Nicaragua Sydafrika | 965 4 2 |
| Total | 16.814 | | |

Table 4-13 De fire største eksportlande og deres største importlande for HS4 74.04 Copper Scrap i 2020. Kilde: OEC World (2023).

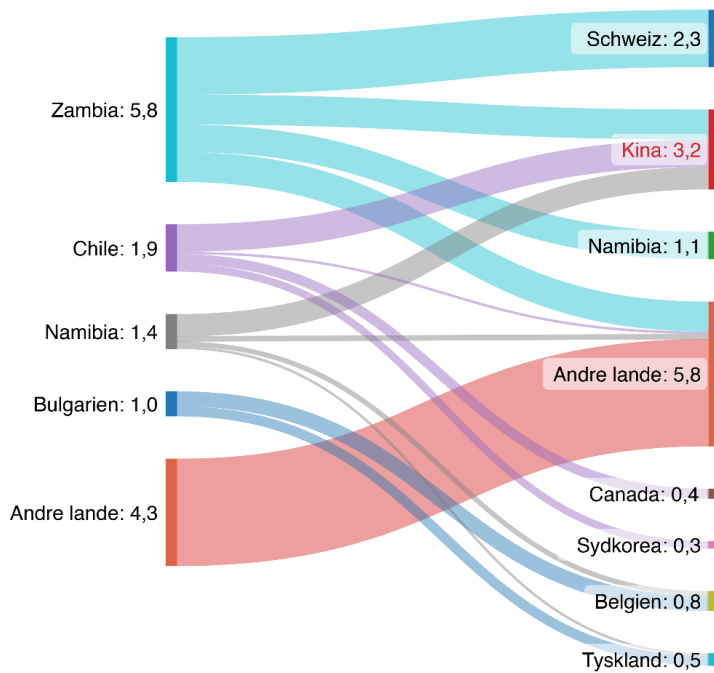
| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| USA | 2.713 | Kina Sydkorea Malaysia | 501 347 325 |
| Tyskland | 1.521 | Belgien Østrig Polen | 194 184 164 |
| Japan | 1.219 | Kina Malaysia Sydkorea | 795 229 70 |
| Holland | 990 | Tyskland Belgien Rusland | 445 191 101 |
| Total | 19.233 | | |



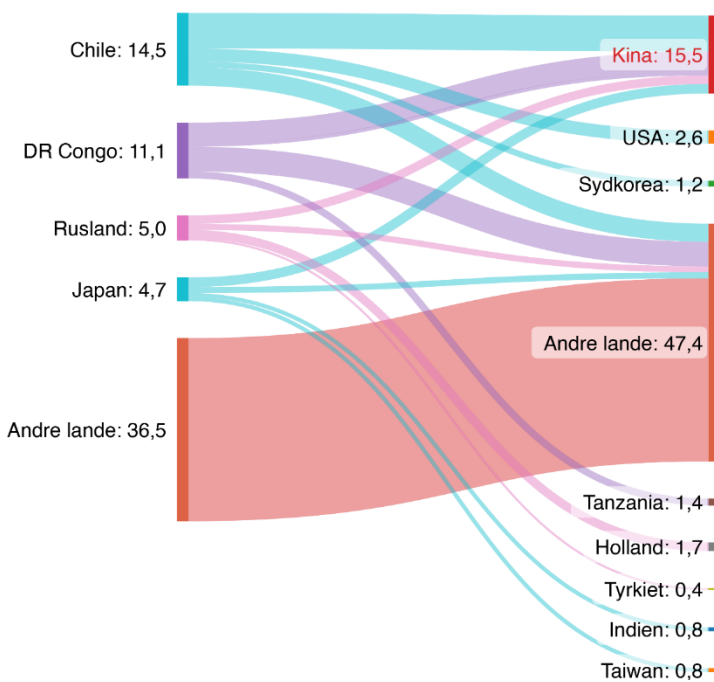
Figur 4-8 Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for HS4 26.03 kobbermalmkoncentrat. Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 4-8.



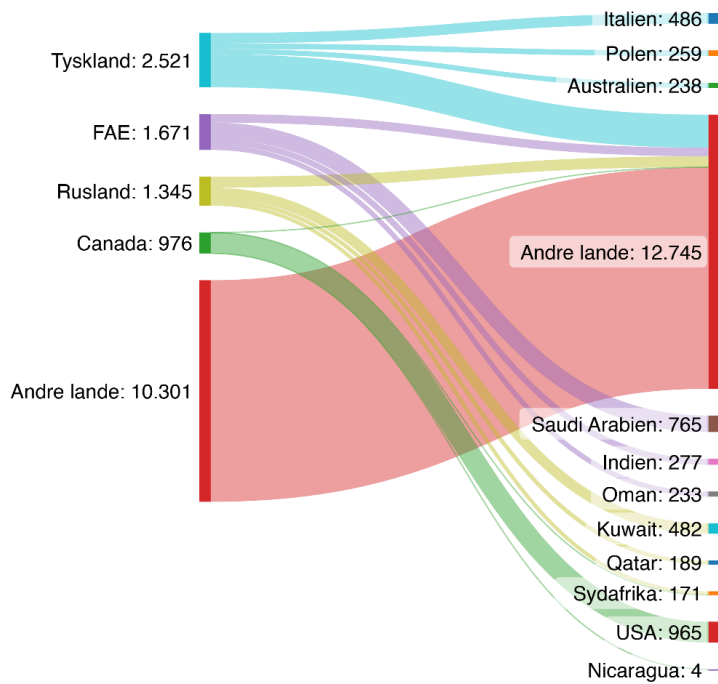
Figur 4-9 Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for HS4 74.01 udfældet kobber. Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 4-9.



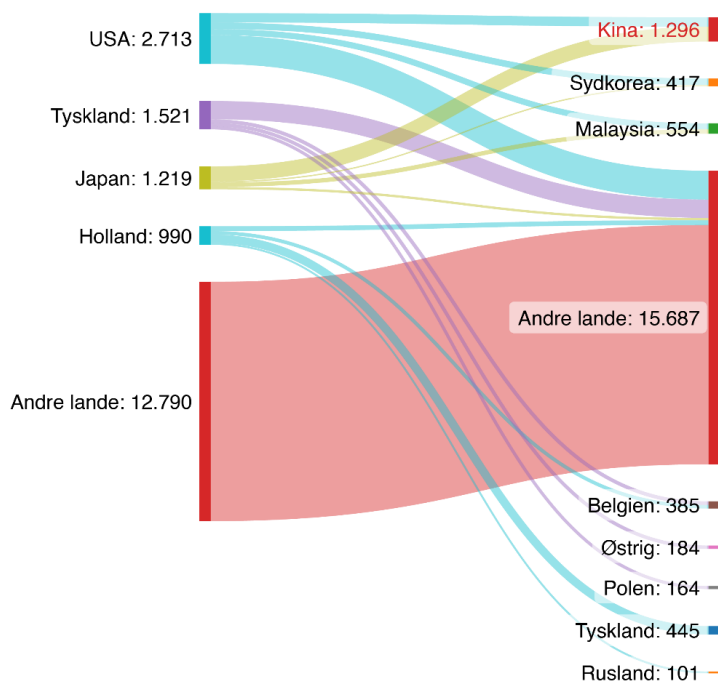
Figur 4-10 Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for HS4 74.02 råkobber (blisterkobber). Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 4-10.



Figur 4-11 Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for HS4 74.03 raffineret kobber. Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 4-11.



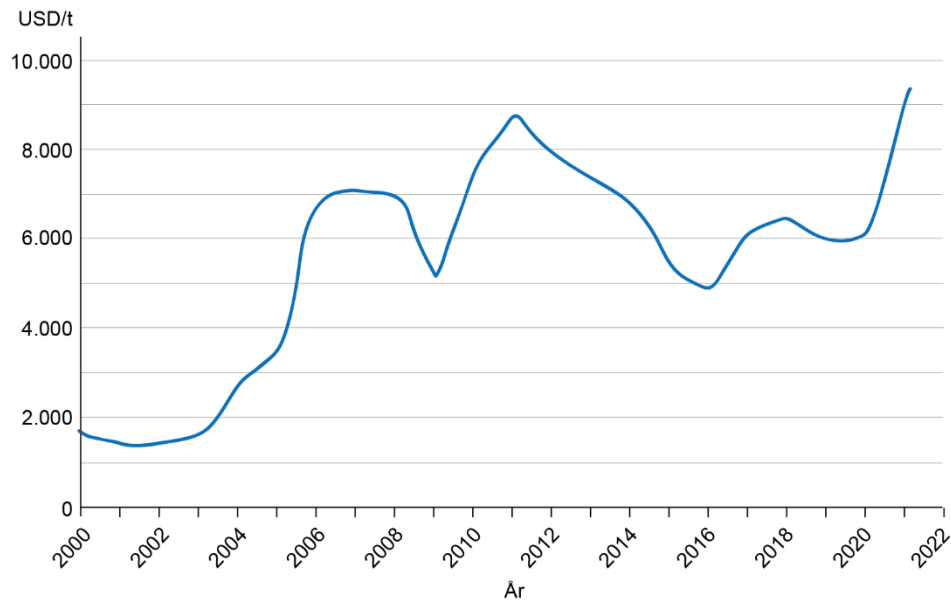
Figur 4-12 Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for HS4 74.08 kobber wire. Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 4-12.



Figur 4-13 Sankey-diagram for de vigtigste eksport- og importlande i 2020 for HS4 74.04 kobberskrot. Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 4-13.

4.5.1 Priser

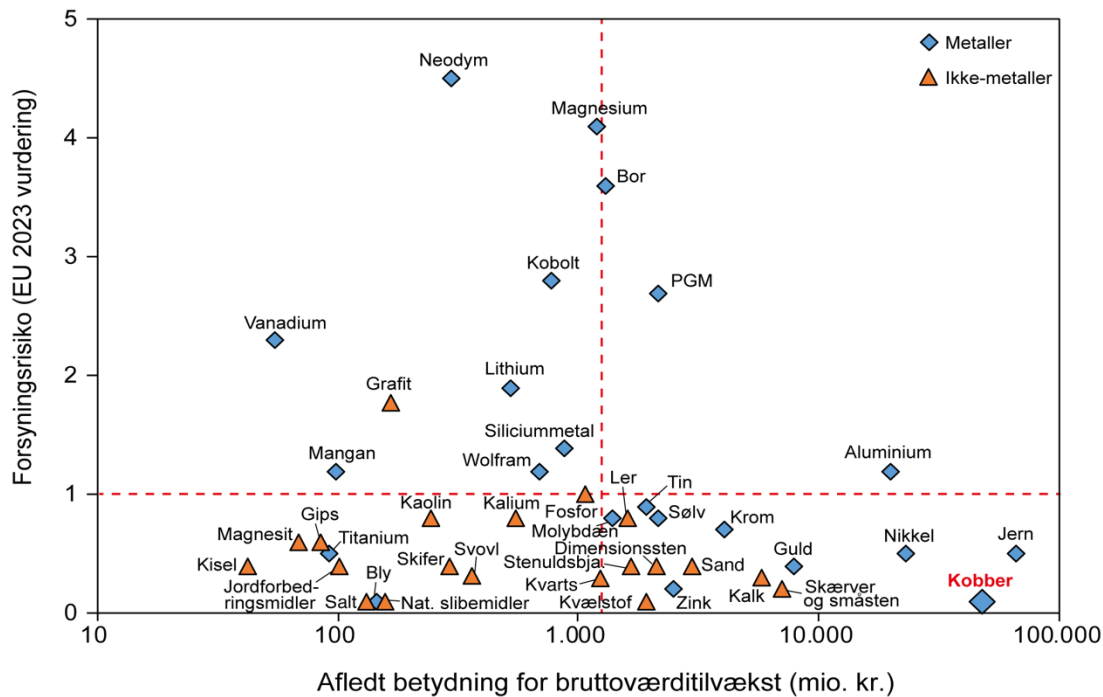
Set over perioden 2000-2020 er kobberpriserne steget omkring 350 %, men dog med betydelige fald i recessionsperioden 2008-10 og igen med fald fra 2012 til 2017 (Figur 4-14). Markederne forventer stigende priser i de kommende år, som følge af den kraftige vækst i efterspørgslen, der er et resultat af den grønne omstilling. Denne tendens kan desuden blive påvirket i opadgående retning, hvis omkostningerne til mineralefterforskning og igangsætning af nye miner øges (se afsnit 4.4.2 Globale kobberreserver).



Figur 4-14 Kobberpris (USD/ton) for perioden 2000-2021. Kilde: DeCoff (2022).

4.6 Det danske forbrug

Kobber er et af de vigtigste mineralske råstoffer for Danmark og har stor økonomisk betydning for dansk industri. De primære og sekundære erhvervs varekøb for kobber var i 2019 48,4 mia. kr. og kobber beskæftigede svarende til 30.000 personer i dansk industri (Clausen *et al.* 2023), og metallet har den næststørste betydning for den afledte bruttoværditilvækst af mineralske råstoffer benyttet i Danmark, kun overgået af jern (Figur 4-15). Kobber benyttes altovervejende i Danmark indenfor fremstillingsindustrien (ca. 67 % af varekøbene) og byggeanlægsbranchen (ca. 29 % af varekøbene), hvor det primært indgår i materialekomplekse produkter (ca. 92 % af alle varekøb) (Clausen *et al.* 2023). Typiske produkter omfatter maskiner, pumper, køretøjer, kobberlegeringer, elektronik, elmotorer og transformatorer. Kobber er ligeledes et nøgleråstof til en række teknologier til den grønne energiomstilling, hvor det bl.a. benyttes til generatorer, varmevekslere samt eltransmission.



Figur 4-15 Kobber og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvæksten som funktion af forsyningsrisikoen. Figuren er modificeret efter Clausen et al. (2023).

4.7 Perspektiver

Chile producerer ca. 23 % af verdens kobbermalm og producerer sammen med Australien, Peru og Rusland 50 % af den globale produktion. Den resterende del af produktionen er fordelt på mange lande, hvoraf omkring halvdelen af produktionen er i politisk udfordrede lande.

Ud af verdens næsten 240 aktive kobberminer (McNaulty et al. 2022) producerer 20 miner ca. 30 % af verdens kobbermalm og ejes/kontrolleres af en snes mineselskaber som fx Anglo American, Antofagasta, BHP Billiton, Codelco, Glencore, MMC Norilsk Nickel og Tech Resources. En række af disse selskaber samt flere store kinesiske mineselskaber opererer miner i flere lande, heriblandt CMOG Group med aktiviteter i bl.a. Peru, DR Congo og Zambia. Trods den stærkt stigende produktion af kobber er de globale reserver øget over de seneste 20 år. Men der er kun gjort få store nye fund siden 2010, som er relativ ringere kvalitet, og derfor forventes øgede produktionsomkostninger fremover. Der er usikkerhed knyttet til, om Chiles kan opretholde den store produktion, da produktionsomlægninger og forsinket igangsætning af nye miner har påvirket produktionen negativt. Hertil kommer generelle bekymringer knyttet til det faktum, at det tager minimum 10 år og ofte at igangsætte nye store kobberminer, og at mange af de store fund der blev gjort i begyndelsen af 2010'erne, endnu ikke er kommet i produktion.

EU Kommissionen (EC 2023) vurderer, at kobber har stor økonomisk betydning (EI: 4,0), men anser forsyningsrisici indenfor både produktion af kobbermalm (SRE: 0,1) og processeret kobber (SRP: 0,1) som små. Som udtryk for kobbers store betydning har EU Kommissionen dog besluttet at klassificere kobber som et strategisk råstof, selvom det ikke opfylder de tekniske kriterier for denne kategori. Canada og Kina vurderer kobber som kritisk, mens USA, England, Japan og Indien ikke vurderer kobber som et kritisk råstof. Det skal bemærkes, at kritikalitetsvurderinger

udføres på basis af forudgående års statistiske data og ikke kan anvendes til vurderinger af fremtidige forsyningsudfordringer.

Produktionen af kobberråvarer er fordelt på mere end 200 smelteværker fordelt i mange lande, hvor Kina dog har langt den største kapacitet med bl.a. 10 af verdens smelteværker og desuden ejer/medejer smelteværker udenfor Kina (fx Chiquicamata-smelteværket i Chile). Den globale omlægning til CO₂-frie energiteknologier, transmissionsnet og eltransportmidler, bl.a. drevet af Kinas dominerende forsyningskæder, bevirker, at IEA (2023) forventer, at der vil være en efterspørgsel på 37 Mt kobber i 2030 og 40 Mt i 2050, hvoraf genanvendt kobber i 2030 vil være 10 % og øges til 20 % i 2050. Andre analytikere forventer at efterspørgslen af kobber vil være 50 Mt i 2035, hvilket vil resultere i et produktionsunderskud af kobbermalm på op til 10 Mt (American Journal of Transportation 2022; Mills 2023). Det er generelt opfattelsen, at den globale kapacitet til smeltning og raffinering af kobbermalm ikke er udfordret.

4.8 Referencer

- American Journal of Transportation 2022: Copper supply deficit of 6 million tons by 2030 threatens renewables, EVs, as investment lags demand. Posted by AJOT 14. Jan. 2022. (<https://ajot.com/news/copper-supply-deficit-of-6-million-tons-by-2030-threatens-renewables-evs-as-investment-lags-demand>)
- BGS 2007: Commodity profile copper. <http://www.bgs.ac.uk/downloads/directDownload.cfm?id=1410&noexcl=true&t=Copper%20>
- Bell, Terence 2021: The Largest Copper Smelters. ThoughtCo, August 11, 2021, www.thoughtco.com/the-20-largest-copper-refineries-2339744
- Businesswire 2022: <https://www.businesswire.com/news/home/20221214005580/en/Global-Copper-Market-Analysis-Report-2022-Mined-Copper-Production-Refined-Copper-Production-Consumption-First-Use-End-Use-Region-Size-and-Trends-with-Forecast-up-to-2027---ResearchAndMarkets.com>
- Carbon Chain 2023: Understand your copper emissions. <https://www.carbonchain.com/blog/understand-your-copper-emissions#what-causes-coppers-emissions>
- Clausen, R. J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. & Vind, I. 2023: Dansk industris brug af mineralske råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/gpub/32051>
- Copper Alliance 2022: ICA RecyclingBrief-202201-A4-R2.pdf (<https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2022/02/ICA-RecyclingBrief-202201-A4-R2.pdf>)
- DeCoff, S. 2022: Copper discoveries – Declining trend continues. S&P Global Market Intelligence (2022), <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/research/copper-discoveries-declining-trend-continues>
- European Commission (EC) 2023: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1> ICA-Recycling Brief 2022: ICA-Recycling Brief (20220201-A4 <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2022/02/ICA-RecyclingBrief-202201-A4-R2.pdf>).
- Kalvman-Schueler, K. 2022: Copper substitution Survey 2022. DMM Advisory Group 2022; <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2022/03/Substitution.pdf>
- McNulty, B.A., Jowitt, S. M. & Belousov, I. 2022: The importance of geology in assessing by- and coproduct metal supply potential; a case study of antimony, bismuth, selenium, and tellurium within the copper production stream. Economic Geology (2022) 117 (6): 1367-1385.

- Mills, Rick 2023: The global copper market is entering an age of extremely large deficits. Mining.com, July 25, 2023 (<https://www.mining.com/the-global-copper-market-is-entering-an-age-of-extremely-large-deficits/>)
- Observatory of Economic Complexity World (EOC World) 2023: Database <https://oec.world/>
- Recycled Copper Market 2023: Recycled Copper Market Outlook 2031. Company website: <https://www.transparencymarketresearch.com/recycled-copper-market.html>
- Rosa, D. Kalvig, P. Stendal, H and Keiding, J.K. 2023: Review of the critical raw material resource potential in Greenland. MiMa rapport 2023/1, 121 pp. <https://doi.org/10.22008/gpub/32049>
- Stensgaard, B.M., Kalvig, P. & Stendal, H. 2011: Quantitative mineral resource assessment: Sediment-hosted copper in Greenland. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/104, 170 pp. <https://doi.org/10.22008/gpub/28832>
- Thaarup, S.M. 2017: Kobber. MiMa faktaark. <https://doi.org/10.22008/gpub/38041>.
- USGS 2000-2023: Mineral commodity summaries 2000-2023: U.S. Geological Survey <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>
- Warren Centre 2020: Zero Emission Copper Mine of the Future. University of Sydney, May 2020, <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2020/07/Emissions-Copper-Mine-of-the-Future-Report.pdf>

5. Nikkel

5.1 Introduktion

Nikkel (Ni) med atomnummer 28 i det periodiske system er et sølvgråt metal med højt smeltepunkt (1.455 °C) og en kombination af efterspurgte egenskaber, heriblandt korrosionsresistens, høj styrke og duktilitet, selv ved meget lave temperaturer. Derudover har nikkel har fordelagtige elektriske og magnetiske egenskaber og anvendes derfor bredt indenfor mange sektorer. Det største anvendelsesområde for metallet er som legeringsmetal i rustfrit stål, som udgør omkring 70 % af den globale nikkelproduktion. Nikkel er desuden blevet et vigtigt nøgleråstof til den grønne omstilling med hurtigt voksende forbrug til forskellige batterityper. Samlet set har nikkel stor industriel betydning for en bred gruppe af slutprodukter indenfor bl.a. bygninger og konstruktioner, metalvarer, transportsektor og elektronik, og ikke mindst eltransportmidler, og metallet er økonomisk set det tredjevigtigste mineralske råstof for dansk industri (Clausen *et al.* 2023). Samlet blev der i 2022 brugt næsten 3 Mt nikkel (Nickel Institute 2023a). I naturen forekommer nikkelminerale i intrusioner, i tropernes forvitrede lateritjorde samt i mangannoduler i dybhavet, men udvindes kun fra de to førstnævnte typer. De kendte reserver onshore er tilstrækkelige til ca. 35 år, hvis forbruget er ca. 3 Mt/år.

Nikkel er ikke vurderet som et kritisk råstof af EU Kommissionen i 2023, men er klassificeret som et strategisk råstof, fordi nikkel er et vigtigt råstof i den grønne omstilling samt i forsvars- og rumfartsindustrier (EC 2023).

5.2 Anvendelser og sektorer

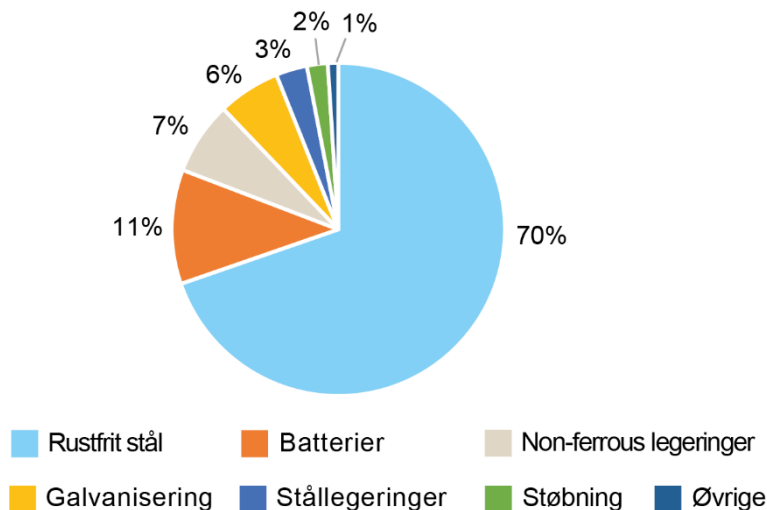
Det største marked for nikkel er til fremstilling af rustfrit stål, hvor nikkel (ca. 8-40 % Ni) indgår sammen med jern (ca. 50-70 % Fe) og krom (18-25 %); korrosionsbestandigheden og styrken bestemmes især af nikkelinholdet.

Nikkel legeret med forskellige metaller, herunder især jern, samt kobber, aluminium, kobolt, m.fl. har magnetiske egenskaber, som bl.a. anvendes i elektronik, generatorer i biler, langdistance-telefonkabler og ultralydstransducere i undervandsforsvarsteknologi. Nogle af disse legeringer har handelsnavne som Permalloy og Alnico. Andre legeringer med nikkel anvendes til at modvirke termal ekspansion; denne legering benævnes ofte Invar.

Markedet for nikkel til Li-ion-batterier forventes at vokse med 7 % årligt frem mod 2030 og bliver dermed det næstvigtigste forbrugsområde for nikkel.

Nikkel anvendes i kemiske stoffer, som fx nikkelsulfat og nikkelklorider, som begge især bruges til forskellige typer af elektrokemisk overfladebehandling. Herudover anvendes en del nikkel-sulfamat, nikkelflobora, nikkelcarbonyl m.fl.

I Figur 5-1 ses den globale fordeling af nikkels industrielle anvendelser i 2022.



Figur 5-1 Global fordeling af nikkels industrielle anvendelser i 2022. Kilde: Nickel Institute (2023a).

5.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder

Nikkels høje pris (se afsnit 5.5.1) og efterspurgte egenskaber er gode incitamenter til høj genanvendelse. I 2019 udgjorde nikkелgenanvendelsen (EOL-RR) 60 % globalt (IEA 2021), mens 16 % af EU's nikkелproduktion kom fra genanvendt nikkел (EOL-RIR) i 2022 (EC 2023).

Til fremstilling af høj-kvalitetsstål er der ikke mange muligheder for at erstatte nikkел. Nikkelfri specialstål anvendes i nogle sammenhænge i stedet for rustfrit stål. Titaniumlegeringer kan ligeledes delvist substituere for nikkелmetal eller nikkелbaserede legeringer i korrosive, kemiske miljøer. Desuden har både plast og keramiske materialer potentialer til at substituere nikkел. I stålindustrien eksperimenteres der også med brug af plastlegeringer som substitution for nikkел, men endnu er materialeegenskaberne for ringe. Desuden forskes der i at erstatte nikkел i superlegeringer med keramiske materialer. Lithium-ion-batterier kan til nogle formål erstatte nikkел-metalhydrid-batterier.

5.4 Global forsyning

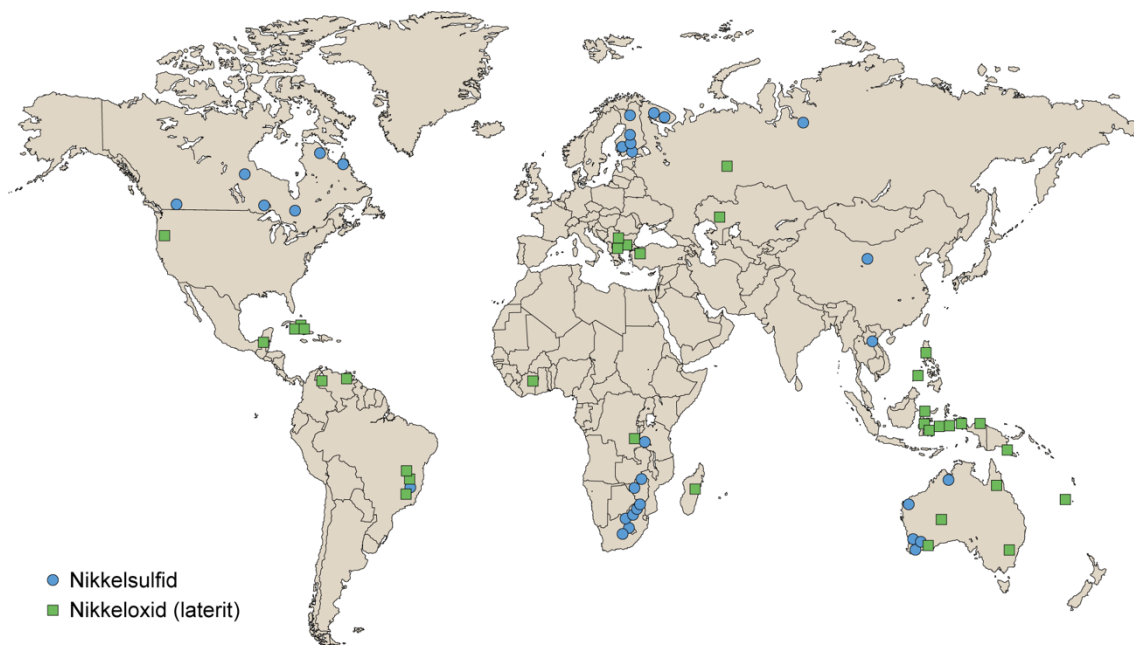
5.4.1 Geologi

I naturen forekommer nikkел i magmatiske intrusioner, i tropernes forvitrede lateritjorde samt i mangannoduler og skorper i dybhavet, hvoraf sidstnævnte dog ikke udnyttes. Den geografiske fordeling af nogle af verdens største nikkелminer efter type er vist i Figur 5-2.

De magmatiske sulfidforekomster er dannet i tilknytning til mafiske og ultramafiske magmaer og udnyttes fra flere forskellige geologiske typer:

- a) ofte knyttet til bjergartstypen norit. Denne type indeholder desuden ofte kobber, kobolt og platingruppemetaller. Nikkелindholdet i de malme, der brydes, er typisk 1-2 %, som overvejende er findes i nikkelsulfidminerale. De store nikkelforekomster Stillwater i USA og Bushveld i Sydafrika er af denne type.

- b) komatiitforekomster, dannet som linseformede legemer med både nikkel 1-5 % og kobber (0,1-0,3 %); kan desuden indeholde platingruppemetaller. Typen kendes fra bl.a. Thompson i Canada og fra forekomster i Zimbabwe.
- c) basaltnikkelforekomststypen er knyttet til kontinentale spredningszoner; denne type udnyttes i Norilsk-Talnakh-regionen i Sibirien, Rusland.



Figur 5-2 Oversigt over nogle af de største geologiske nikkelforekomster. Kilde: Nickel Institute (2023a).

De tropiske forvittringsjordene, laterit, forekommer som 2-25 m mægtige, overfladenære lag med stor horisontal udstrækning. Laterit er rigt på jern og aluminiumhydroxider og kan desuden indeholde økonomiske mængder af nikkel og kobolt. Nikkelindholdet er typisk fordelt med en øvre, mindre rig zone (0,5-1 % Ni) og en nedre, rigere zone (1,5-3 % Ni), som desuden kan indeholde kobolt. Typiske mineraler er nikkelholdig limonit i den øvre zone og garnierit i den nedre. De to typer adskiller sig og ved, at limonitforekomsterne ofte er meget store (10-100 Mt bauxitmalm), men relativt lavlødige, hvorimod garnieritforekomster har lidt højere lødighed, men ofte betydeligt mindre (<100 Mt bauxitmalm). Begge typer forekommer hovedsageligt i lande indenfor det ækvatoriale bælte, herunder Ny Kaledonien, Philippinerne, Indonesien, Columbia og Cuba; herudover findes der fossile forekomster i andre klimazoner, som fx Grækenland.

Der er desuden – potentielt – store forekomster i dybhavene knyttet til polymetalliske noder og skorper. Der er dog kun foretaget få indledende undersøgelser af mængderne og kvalitetene af disse forekomster, og der foregår ingen kommerciel dybhavsminedrift. Foreløbige vurderinger af den International Seabed Authority (ISA) angiver, at forekomsterne af polymetalliske noder på havbunden dækker områder på omkring 3 mia. km², hvoraf der er efterforskningslicenser på 1,28 mio. km² (NORI 2022). Licensbetingelser for udvinding af denne type er endnu ikke godkendt af ISA. De polymetalliske noder indeholder 0,5-1,3 % Ni (Hein *et al.* 2020); dybhavets ressourcer er dårligt kvantificeret, men vurderes at være større end de kendte terrestriske ressourcer. En nylig undersøgelse viste, at Ni-Co-Cu-forekomster fra dybhavsforekomster har et mindre klimaftryk sammenlignet med traditionelle magmatiske forekomster og lateritforekomster (Benchmark Mineral Intelligence 2023), men der er udbredt bekymring for miljøpåvirkninger ved dybhavs-

minedrift (fx Sharma 2015; Durden *et al.* 2019; Washburn *et al.* 2019), og eventuelle økologiske og biodiversitetsmæssige konsekvenser er ukendte.

I Grønland findes flere eksempler på nikkelforekomster relateret til magmatiske intrusioner. Den væsentligste nikkelforekomst findes nord for Maniitsoq i Vestgrønland inden for det såkaldte noritbælte, som i de senere år er efterforsket af North American Nickel Inc. Nikkelmineraliseringerne i området synes knyttet til en række mindre intrusive noritlegemer, som tilsammen danner et ca. 75 km langt og 10 km bredt bælte med et højt indhold af nikkel (ca. 4 %) og kobber. Yderligere information om nikkelpotentialet i Grønland kan findes i Rosa *et al.* (2014, 2023).

Der anvendes flere forskellige nikkelholdige mineraler, hvoraf de vigtigste er pentlandit, pyrrhotit og garnierite; samt i mindre omfang også millerit, niccolit gersdorffit m.fl. (Tabel 5-1).

Tabel 5-1 Kommercielt vigtige nikkelmineraler.

| Mineral | Kemisk formel | Almindeligste forekomsttype |
|------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Chalcopyrit | (Cu,Ni)FeS ₃ | Mafiske intrusioner |
| Garnierit | (Ni,Mg) ₃ Si ₂ O ₅ (OH) | Laterit |
| Gersdorffit | NiAsS | Mafiske intrusioner |
| Limonit (nikkel) | (Fe,Ni)I (OH) | Laterit |
| Millerit | NiS | Mafiske intrusioner |
| Pentlandit | (Ni,Fe) ₉ S ₈ | Mafiske intrusioner |
| Pyrrhotit | (Fe,Ni)S | Mafiske intrusioner |

5.4.1.1 Biprodukter

Nikkelforekomster kan i tillæg til nikkelmineraler også indeholde andre mineraler med kommercielt indhold af fx kobber, kobolt og platingruppemetaller, som kan separeres ud i selvstændige mineralprodukter under behandling af malmen. Sådanne produkter defineres ofte som biprodukter, hvor selve sammensætningen af biprodukterne er knyttet til den geologiske dannelsesmåde af nikkelforekomsten.

Nikkelmineraler indeholder desuden ofte små mængder af andre metaller, hvoraf nogle kan udnyttes kommercielt. En del af disse metaller fremgår ikke af mineralets kemiske formel; denne gruppe omtales ofte som 'kompanionmetaller' eller bare 'biprodukter' og omfatter fx indium (In), kobolt (Co), molybdæn (Mo), rhenium (Re) og selen (Se). Kompanionmetaller danner ikke egne mineraler i forekomsten, og kan derfor først kun udvindes i forbindelse med smeltning og raffinering af hovedmineralet. Indholdet af kompanionmetaller er forskelligt mellem de forskellige geologiske forekomsttyper og er generelt højest i de magmatiske typer; indholdet varierer desuden indbyrdes mellem samme forekomsttyper.

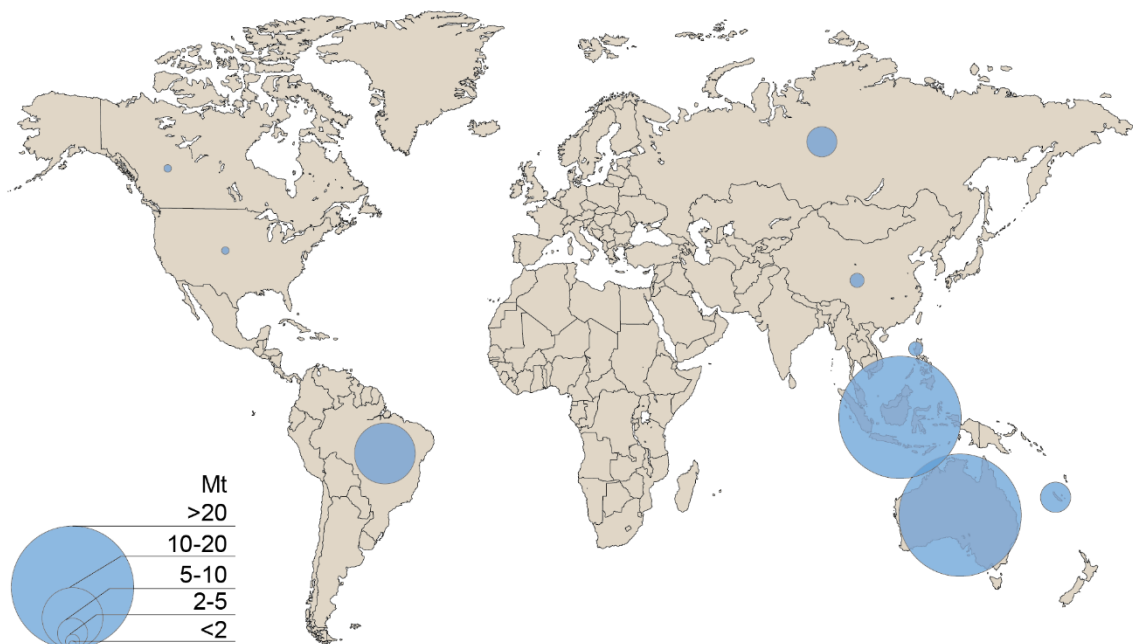
5.4.2 Globale nikkelreserver

De påviste globale nikkelreserver udgør omkring 100 Mt (Tabel 5-2) og findes især i syv lande hvoraf hovedparten af reserverne findes i Australien, Indonesien og Brasilien (Figur 5-3). Reserverne voksede i perioden 2000-2021 fra 57 Mt til ca. 95 Mt, men da forbruget i samme periode er vokset hurtigere end mineralefterforskning har tilføjet til reserverne, er reservernes levetid faldet fra ca. 46 år til nu ca. 33 års forbrug. Hovedparten af reserverne er knyttet til laterittyper.

Herudover er der nikkelressourcer på ca. 130 Mt med et indhold på 1 % nikkel samt en række mindre kendte ressourcer, bl.a. mangannoduler på havbunden. I tillæg hertil findes der kendte nikkelforekomster, som endnu ikke er vurderet.

Tabel 5-2 Verdens nikkelreserver i 2021 opgjort i 9 lande; hertil kommer en række lande som ikke angiver denne type data. Kilder: Statista (2022c) og USGS (2023).

| Land | USGS (Mt) | Statista (Mt) | Dominerende type |
|---------------|-----------|---------------|-------------------------------------------------------|
| Australien | 21 | 21 | Ca. $\frac{1}{3}$ sulfidtype og $\frac{2}{3}$ laterit |
| Indonesien | 21 | 21 | Laterit |
| Brasilien | 16 | 16 | Laterit |
| Rusland | 7,5 | 7,5 | Sulfidtype |
| Ny Kaledonien | n.a. | 7,1 | Laterit |
| Philippinerne | 4,8 | n.a. | Laterit |
| Kina | 2,8 | 2,1 | Sulfidtype |
| Canada | 2,0 | 2,2 | Sulfidtype |
| USA | 0,3 | 0,4 | Sulfidtype |
| Øvrige | 20 | 20 | |
| Total | 95,4 | 97,3 | |



Figur 5-3 Geografisk oversigt over de ti lande der har de største registrerede nikkelreserver. Kilde: USGS (2023).

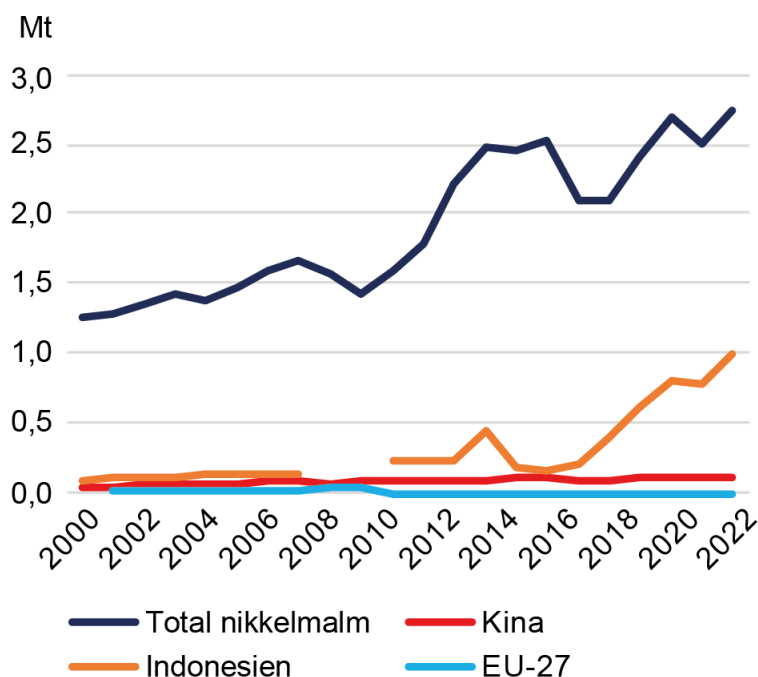
5.4.3 Global nikkelproduktion

Nikkelproduktionen er siden 2000 mere end fordoblet fra ca. 1,3 Mt i 2000 til 2,8 Mt i 2021, hvor særligt Indonesien har bidraget til væksten og i 2021 producerede omkring $\frac{1}{3}$ af verdensproduktionen (Tabel 5-3 og Figur 5-4). Kina er en meget beskeden producent af nikkel og har, for at sikre sig eget store behov, etableret et samarbejde med Indonesien, som indebærer opbygning af miner, forarbejdningsanlæg og aftageraftaler.

I 2020 var den samlede nikkelproduktionen fordelt med 35 % fra sulfidmalm og 65 % fra lateritmalm, hvoraf hovedparten er fra saprolit-laterit (McKinsey & Comp. 2020).

Tabel 5-3 Global produktion af nikkel i 2021, opgjort af USGS (2023).

| Land | 2021 (ton) |
|---------------|------------|
| Indonesien | 1.000.000 |
| Philippinerne | 370.000 |
| Rusland | 250.000 |
| Ny Kaledonien | 190.000 |
| Australien | 160.000 |
| Canada | 130.000 |
| Kina | 120.000 |
| Brasilien | 100.000 |
| USA | 18.000 |
| Øvrige | 410.000 |
| Total | 2.748.000 |



Figur 5-4 Oversigt over historisk produktion af nikkelmalm (opgjort som nikkelindhold) i perioden 2000-2021. Kilde: USGS (2000-2023).

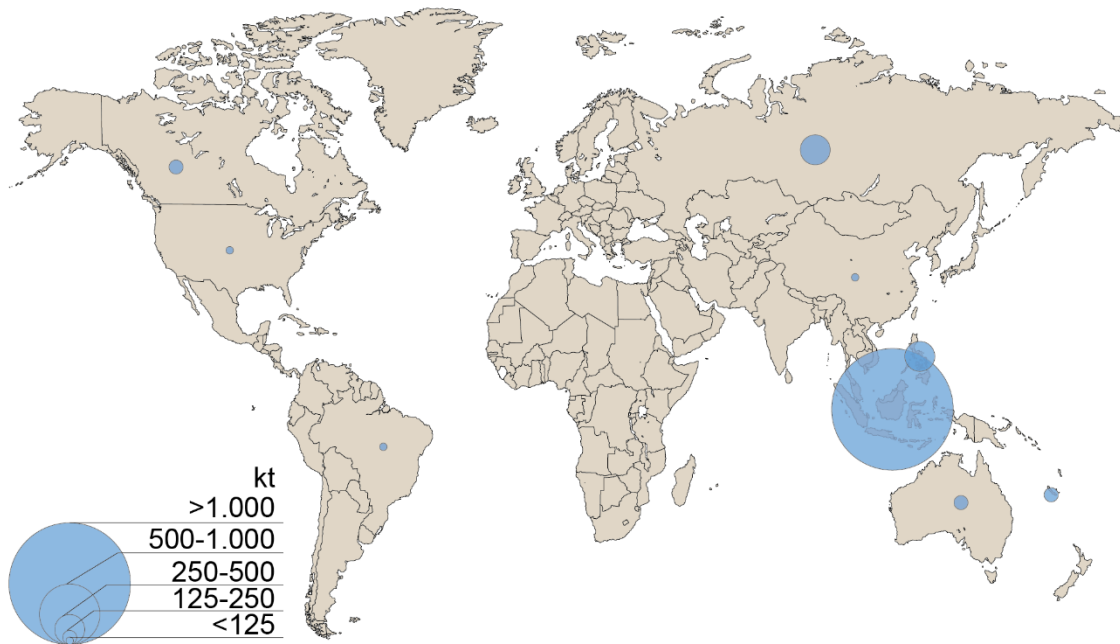
Nikkel brydes i mere end 25 lande med produktion af både nikkel fra sulfid- og laterittyper. Siden årtusindeskiftet er produktionen ændret fra at være domineret af sulfidmalme til i dag at være domineret af lateritmalm. Brydningsmetoderne afhænger af forekomsternes størrelse, lødighed og dybde. Lateritforekomsterne, som er overfladenære, produceres altid fra en åben mine. Oftest anvendes 'strip mining'-metoden, hvor overjorden først fjernes og deponeres, hvorefter malmen graves op; ved ophør af minen reetableres området ved brug af deponeret overjord. Da lateritlagene kun udgør 5-25 m, og lødighederne er lave, er det meget store områder, som indgår i minedriften. I Ny Kaledonien skal der til produktion af 1 Mt nikkelmalm stripes ca. 20 ha landområde, svarende til 500 Mt overjord, og der produceres 5 Mt tailings.

En oversigt over de mest producerende nikkeldineselskaber, deres aktivitet og årlige primærproduktion på basis af offentligt tilgængelige oplysninger er vist i Tabel 5-4. Det fremgår heraf, at de fem største nikkeldineselskaber er Norinickel, Nickel Asia Corp (NAC), Glencore, Solway og Vale, som i 2021 stod for ca. 20 % af den globale produktion. Blandt de store producenter er desuden det indonesisk statsejede Ashan Aluminium og en række kinesiske mineselskaber, som fx Tsingshan og Zhejiang.

Tabel 5-4 Oversigt over nogle af de største nikkeldineselskaber og -selskaber (Mudd & Jowitt 2022).

| Selskab | Mine | Land | Produktion ton 2021/22 | Forventes i produktion frem til |
|----------------------------------------------|--------------------------|------------|------------------------|---------------------------------|
| BHP | Mount Keith | Australien | 39.000 | 2037 |
| BHP | Leinster | Australien | 21.000 | 2033 |
| First Quantum Minerals | Ravensthorpe | Australien | 29.000 | 2051 |
| Glencore | Murrin Murrumbidgee | Australien | 30.000 | 2042 |
| IGO | Nova Bollinger | Australien | 29.000 | 2027 |
| Anglo American | Barro Alto | Brasilien | 35.000 | 2040 |
| Glencore | Raglan | Canada | 38.000 | 2027 |
| Vale | Voiseys Bay | Canada | 40.000 | 2034 |
| Terrafame | Talvivaara mine | Finland | 29.000 | - |
| Asahan Aluminium | Gag Island | Indonesien | 27.000 | - |
| Asahan Aluminium | Pomalaa | Indonesien | 26.000 | - |
| CNGR Advanced Materials | Sulawesi | Indonesien | 30.000 | - |
| Hengjaya Mineralindo | Hengjaya Mine; Morwali | Indonesien | 19.000 | - |
| Huake Nickel Indonesia/Tsinghsan | Weda Bay Industrial Park | Indonesien | 40.000 | 2069 |
| Indonesia Asahan Aluminium (INALUM) | Pomalaa | Indonesien | 23.000 | - |
| Nickel Asia Corp (NAC) | Taganito Mine | Indonesien | 74.000 | 2049 |
| Nickel Asia Corp (NAC) | Rio Tuba Mine | Indonesien | 47.000 | 2028 |
| QMB New Energy Materials/Tsinghsan | Morowali Industrial Park | Indonesien | 75.000 | - |
| Solway | Asara Mine | Indonesien | 30.000 | - |
| Solway Investment Group | Asera Mine | Indonesien | 32.000 | - |
| Solway Investment Group | Bahoomahi | Indonesien | 20.000 | - |
| South32 Ltd | Cerro Matoso Mine | Indonesien | 43.000 | 2049 |
| Tsinghsan | Huashan | Indonesien | 45.000 | - |
| Vale/ Sumitomo/PT Indonesia Asahan Aluminium | Sorowako Mine | Indonesien | 79.000 | 2045 |
| Yiwan Mining | Yiwan Mine | Indonesien | 43.000 | - |
| Youshan Nickel Indonesia/Tsinghsan | Weda Bay Industrial Park | Indonesien | 34.000 | - |
| Zhejiang Huayou Cobalt | Morowali Industrial Park | Indonesien | 75.000 | - |
| MMC Norilsk | Kola MMC Mine | Rusland | 145.000 | - |
| MMC Norilsk | Oktyabrsky | Rusland | 53.000 | 2025 |
| MMC Norilsk | Komsomolsky | Rusland | 42.000 | - |
| MMC Norilsk | Taimyrsky | Rusland | 42.000 | 2038 |
| MMC Norilsk | Skalistsy | Rusland | 25.000 | 2043 |
| MMC Norilsk | Kola MMC | Rusland | 23.000 | - |
| First Quantum Minerals | Enterprise (expl) | Zambia | 20.000 | - |

I Figur 5-5 er vist en oversigt over de ti lande, som udvandt mest nikkel i 2021, baseret på information fra USGS 2022.



Figur 5-5 Geografisk oversigt over de ti lande der udvandt mest nikkelmalm i 2021. Kilde: USGS (2022).

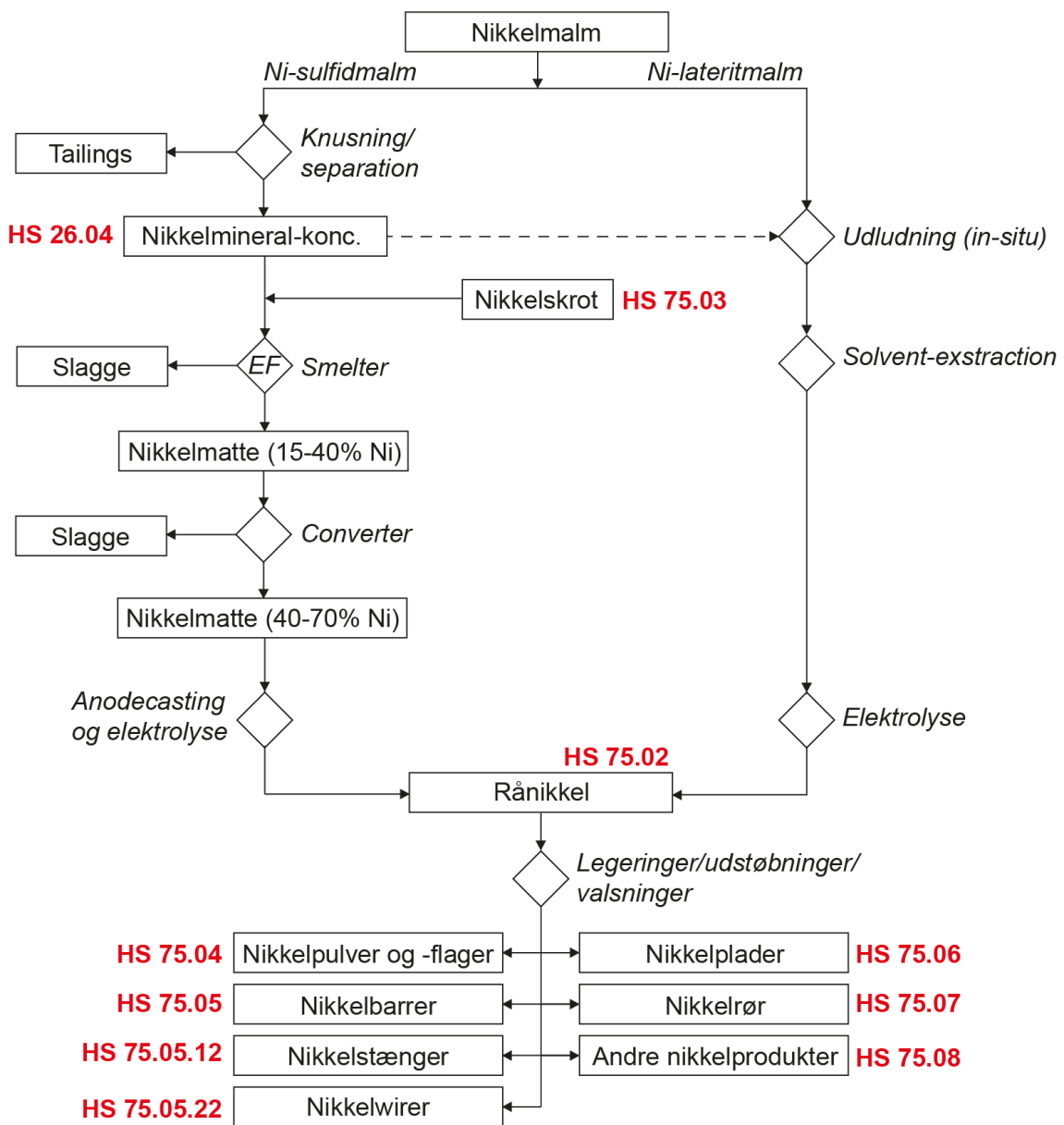
5.4.4 Fremstilling af nikkelprodukter

Nikkelindustriens forsyningskæder er i betydelig grad domineret af vertikalt integrerede virksomheder, og det har derfor ikke været muligt at identificere hverken lande eller selskabernes produktion af nikkelmatte, 'nickel pig iron' samt efterfølgende nikkelprodukter.

Der anvendes forskellige metoder til behandling af Ni-sulfidmalm og Ni-laterit (Figur 5-6):

- Sulfidmalmen knuses, formales og flotteres, og der fremstilles et koncentrat af sulfidminerale (10-20 % Ni). Sulfidmineralkoncentratet behandles med H_2SO_4 og smeltes (ved $1.350\text{ }^\circ C$), hvorved der dannes nikkelmatte (Ni-Fe-sulfid) (25-45 % Ni) eller kobber-jernnikkelmatte (70-80 % Cu-Ni). Matten behandles efterfølgende i en roterende konverter, og der dannes nikkelmatte (70-75 % Ni), der kan anvendes til fremstilling af nikkelkatomateriale og andre 'Class 1'-råvarer (> 99,9 % nikkel)). Kobber og andre biproduktmetaller (fx platingruppemetaller, guld, sølv, tellurium og selen) skal efterfølgende separeres fra.
- Lateritmalmen knuses og mineralernes indhold af vand (35-40 %) fjernes ved tørring i rotéovn. Herefter konverteres nikkeloxid til nikkelmetal i en smelteovn ($1.360-1.610\text{ }^\circ C$), hvorved der dannes uraffineret ferronikkel, der efter oprensning af indhold af karbon og svovl primært anvendes til produktion af rustfrit stål.
- En alternativ proces til behandling af lateritmalm er 'High Pressure Acid Leach' (HPAL)-teknologien, som især anvendes til produktion af 'Nickel Pig Iron' (NPI) på basis af lavlødige lateritmalme; NPI anvendes som nikkellegeringsmateriale ved produktion af stål. HPAL-metoden anvendes dog også til fremstilling af Class 1-produkter fra højlødige lateritmalme, og metoden forventes at blive dominerende i forhold til at forsyne Class 1-produkter til Li-ion-industrien.

I 2019 kom hovedparten af Class 1-produkter fra miner i Rusland (20 %), Canada (19 %), Australien (14 %), Kina (10 %) og Indonesien (7 %) og blev processeret i Kina (25 %), Rusland (15 %), Japan (14 %), Canada (12 %) og Australien (10 %) (McKinsey & Comp. 2020).



Figur 5-6 Generisk procesdiagram for produktion af nikkel og nikkelprodukter ved henholdsvis traditionel pyrometallurgisk proces og hydrometallurgisk proces, med angivelse af udvalgte handelsvarekoder (HS-koder) for hel- og halvferdige produkter.

5.4.5 Klima- og miljøpåvirkning

Nikkelproduktion har, med et højt vandforbrug på 193 m³/ton nikkel (Meissner 2021) samt udledninger fra smelteværker af svovldioxid, nitrooxider og partikler, betydelige miljøpåvirkninger.

Klimabelastningen for produktion af nikkel er meget afhængig af malmtypen og -kvaliteten samt af, hvilket produkt der estimeres; nikkelproduktionen er opgjort til at bidrage med 0,27 % af den globale emission (Nickel Institute 2022b). Wai *et al.* (2020) har estimeret GHG-emission og energi-

forbrug knyttet til fire forskellige nikkelprodukter, nikkelmetal (Ni), nikkelloxid (NiO), ferronikkel (FeNi) og nikkel pig iron (NPI), som viser, at emissionen er op til 30 ton CO₂e/ton NiO; emissionen kan dog være op til 60 ton CO₂e/ton Ni, såfremt nikkel fremstilles via en NPI-rute fra lateritmalm. Energiforbruget er 370 GJ/ton; emissionen er beregnet med de eksisterende blandede energikilder, og det er vist, at ved brug af vandkraft vil emissionen kunne reduceres væsentligt (Tabel 5-5). Men nogle af de største reduktioner opnås ved brug af højlødig malm; tendensen er imidlertid at lødighederne er faldende, og at lateritmalme er volumenmæssigt størst.

Tabel 5-5 Oversigt over energiforbrug og CO₂-belastning for produktion af forskellige nikkelråvarer. Baseret på Wei et al. (2020).

| | Beskrivelse | Ni | NiO | FeNi | NPI |
|--------------------------------------|---------------------------|-----|-----|------|-----|
| Emission (1) (CO ₂ e/ton) | Eksisterende energikilder | 14 | 30 | 6 | 7 |
| Emission (2) (CO ₂ e/ton) | Potentiel (Hydro) | 7 | 17 | 5 | 7 |
| Energiforbrug (GJ/t) | Eksisterende | 170 | 370 | 110 | 60 |
| Energiforbrug (GJ/t) | Malm: 0,5 % Ni | 200 | | | |
| Energiforbrug (GJ/t) | Malm: 1 % Ni | 120 | | | |
| Energiforbrug (GJ/t) | Malm: 2 % Ni | 50 | | | |

5.5 Handel

Nikkelmarkederne omfatter både nikkelminerale ('nikkelmalm') og semiprodukter fremstillet i flere af forsyningskædens trin, hvorom der anvendes følgende markedstermer:

- Class 1 nickel (=refined nickel): Nikkelprodukt >99,8 % Ni (fx cathodes, briquettes, pellets).
- Class 2 nickel: Nikkelprodukt <99,8 % Ni (fx NPI, FeNi).
- NPI: Nickel Pig Iron – lavt nikkelindhold produceret fra lateritnikkelmalm (3-14 % Ni).
- FeNi: Ferronikkel – lavt nikkelindholdprodukt (15-35 % Ni).
- Nikkelmatte: typisk 30-60 % Ni.

De største varegrupper for udvalgte nikkelprodukter, fordelt på eksport- og importlande er vist i Tabel 5-7 til Tabel 5-11. Det fremgår heraf, at Kina er et af de største importlande for nikkel, hvilket traditionelt har været styret af Kinas verdensdominerende rolle som stålproducent.

Tabel 5-6 De vigtigste råstoffer og HS-varekoder for nikkelforsyningskæderne, med angivelse af handelsværdi i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Nikkelvarekodeoversigt | HS2 | mio. USD | HS4 | mio. USD | HS6 | mio. USD |
|----------------------------|-----|----------|-------|----------|----------|----------|
| Nickel Ore | | | 2604 | 3700 | | |
| Ferro nickel | | | | | 72.02.60 | 8.900 |
| Nickel articles | 75 | 26.400 | | | | |
| Nickel mattes | | | 75.01 | 6.200 | | |
| Nickel mattes | | | | | 75.01.10 | 3.700 |
| Nickel oxide sinteres | | | | | 75.01.20 | 2.500 |
| Raw nickel | | | 75.02 | 11.100 | | |
| Nickel unworught/not alloy | | | | | 75.02.10 | 10.100 |
| Nickel unworught/alloy | | | | | 75.02.20 | 1.000 |
| Scrap nickel | | | 75.03 | 900 | | |
| Nickel powders and flakes | | | 75.04 | 1.200 | | |
| Nickel bars | | | 75.05 | 2.900 | | |
| Bars, rods and profiles | | | | | 75.05.12 | 1.700 |
| Wire, nikkel alloy | | | | | 75.05.22 | 1.100 |
| Nickel sheets | | | 75.06 | 1.300 | | |
| Nickel pipes | | | 75.07 | 1.00 | | |
| Other nickel products | | | 75.08 | 1.800 | | |
| Nickel sulfat | | | | | 28.33.24 | 600 |

Tabel 5-7 De fire største eksportlande og deres tre største aftagerlande for nikkelmalm (HS4 26.04) i 2020. Dog aftager Kina hele Australiens produktion. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|---------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Philippinerne | 1.504 | Kina | 1.387 |
| | | Japan | 107 |
| | | Sydkorea | 9 |
| Ny Kaledonien | 538 | Kina | 304 |
| | | Japan | 280 |
| | | Sydkorea | 150 |
| Australien | 308 | Kina | 308 |
| Subtotal | 2.602 | | - |
| Øvrige | 1.088 | | - |
| Total | 3.690 | | - |

Tabel 5-8 De fire største eksportlande og deres største aftagerlande for nikkematte (HS4 75.01) i 2020.

Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Canada | 1.211 | Norge England Sydkorea | 995 193 15 |
| Rusland | 1.193 | Finland Schweiz Kina | 910 169 61 |
| Indonesien | 1.172 | Japan England Sydkorea | 776 344 33 |
| Finland | 570 | Kina Norge Frankrig | 185 138 117 |
| Subtotal | 4.146 | | |
| Øvrige | 2.044 | | |
| Total | 6.190 | | |

Tabel 5-9 De fire største eksportlande og deres største aftagerlande for rånikkel (HS4 75.02) i 2020.

Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Rusland | 2.265 | Kina Schweiz Tyskland | 715 658 331 |
| Canada | 1.522 | USA Kina Holland | 761 207 177 |
| Australien | 1.508 | Kina Singapore Japan | 417 201 193 |
| Norge | 1.311 | Holland Kina England | 551 161 128 |
| Subtotal | 6.605 | | |
| Øvrige | 4.521 | | |
| Total | 11.126 | | |

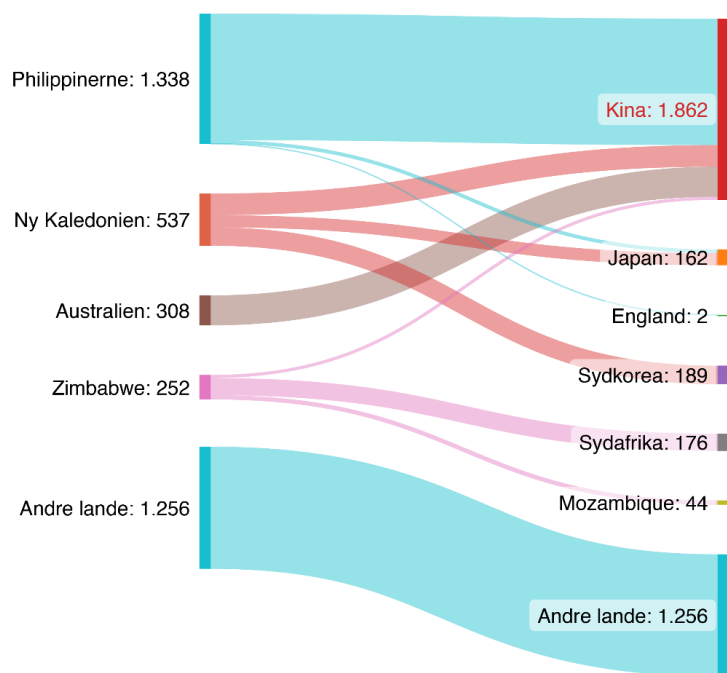
Tabel 5-10 De fire største eksportlande og deres største importlande nikkelbarrer (HS4 75.05) i 2020.
Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| USA | 734 | Kina | 124 |
| | | Mexico | 122 |
| | | Frankrig | 87 |
| Tyskland | 416 | USA | 74 |
| | | Italien | 56 |
| | | England | 51 |
| Østrig | 337 | Tyskland | 208 |
| | | England | 39 |
| | | USA | 17 |
| Frankrig | 288 | Tyskland | 86 |
| | | Schweiz | 75 |
| | | USA | 42 |
| Subtotal | 1.775 | | |
| Øvrige | 1.092 | | |
| Total | 2.867 | | |

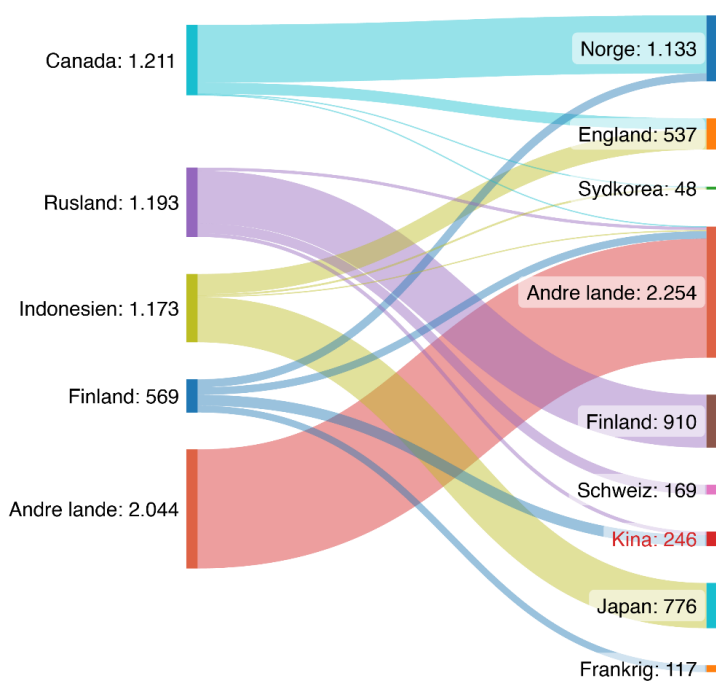
Tabel 5-11 De fire største eksportlande og deres største importlande for nikkelskrot (HS4 75.03) i 2020.
Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|---------------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| For. Arab. Emirater | 264 | Pakistan | 258 |
| | | Indien | 4 |
| | | England | 1 |
| USA | 90 | Canada | 39 |
| | | Japan | 11 |
| | | England | 9 |
| England | 77 | USA | 42 |
| | | Sverige | 8 |
| | | Tyskland | 5 |
| Tyskland | 47 | Sverige | 10 |
| | | USA | 10 |
| | | England | 5 |
| Subtotal | 479 | | |
| Øvrige | 415 | | |
| Total | 894 | | |

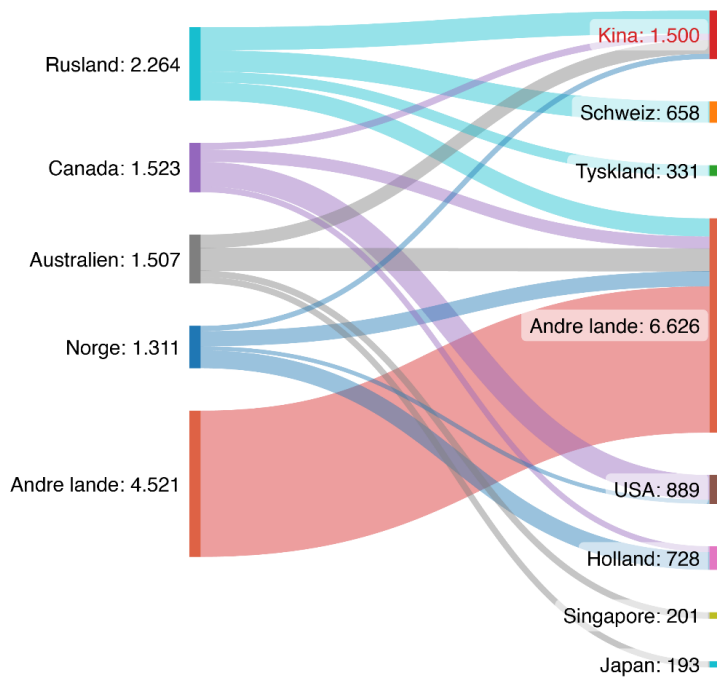
Den internationale handel med nikkelprodukter viser, at de store minelande generelt også er de største eksportlande af nikkelmineralkoncentrat (HS 26.04) og nikkelmatte (HS 75.01). Blandt de undersøgte varegrupper udgør eksportværdierne fra blot fire lande 55-66 %, mens resten er fordelt på mange lande. Kina er det land, der importerer mest nikkelmineralkoncentrat, som helt overvejende importeres fra Phillippinerne, Ny Kaledonien og Australien, og Kina er også største importland af rånikkel (HS 75.02) og visse nikkelsemiprodukter som nikkelbarrer (HS75.05). Der foreligger imidlertid ikke handelsdata som kan belyse værdikæderne for Indonesiens store primærproduktion, som kun er markant i eksport af nikkelmatte (HS75.01); denne uklarhed kan evt. tilskrives ændringer i landets industripolitik, som skal sikre øget værditilvækst på al produktion, og derfor kun indgår i én af de undersøgte varegrupper. Store mængder nikkelmatte importeres til Norge og Finland fra henholdsvis Canada og Rusland. Data for handel med nikkelskrot (HS 75.05) viser importrelationer mellem især en række vestlige industrilande og viser desuden, at næsten 30 % af eksport-importen er fra de Forenede Arabiske Emirater (FAE) til Pakistan, men uden angivelse af forudgående import til FAE. Relationerne mellem de eksport- og importlande for de fem største varegrupper er vist i Sankey-diagrammer (Figur 5-7 til Figur 5-11).



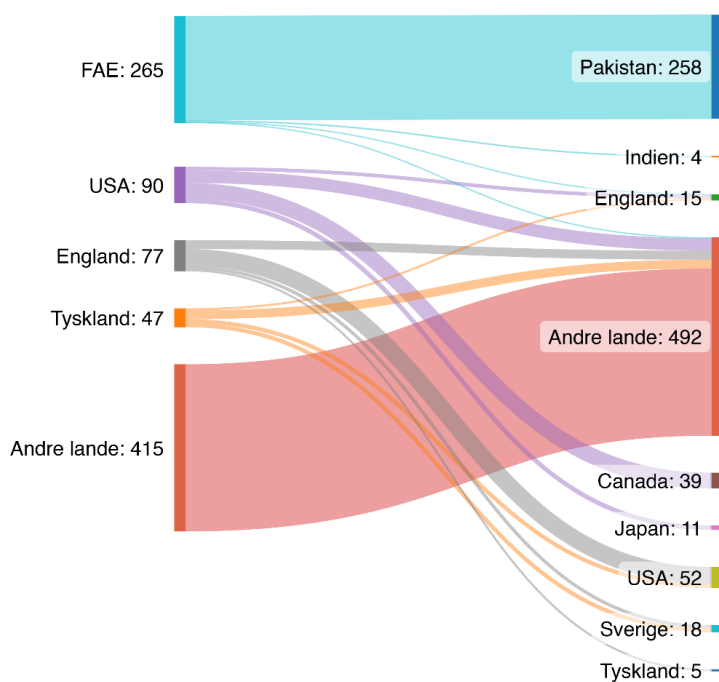
Figur 5-7 Sankey-diagram for handel med nikkelmalm (HS 26.04) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 5-7.



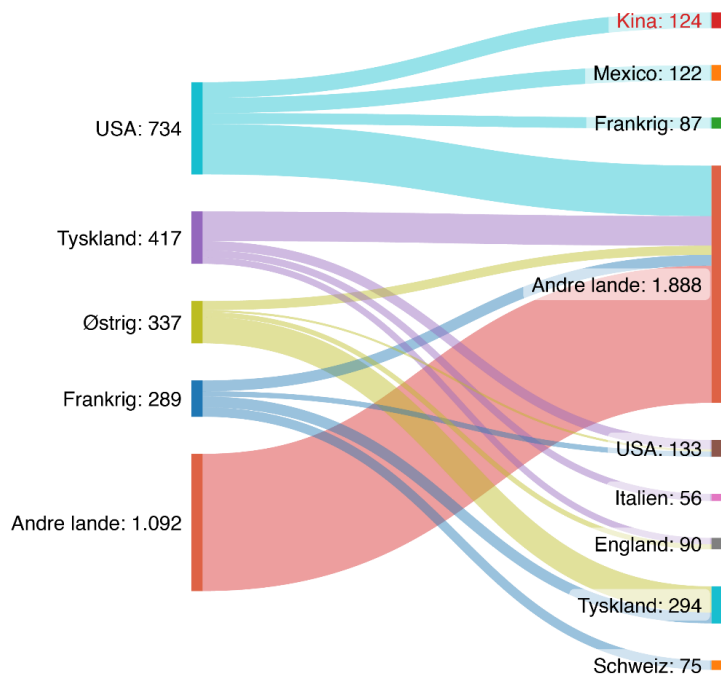
Figur 5-8 Sankey-diagram for handel med nikkelmatte (HS 75.01) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 5-8.



Figur 5-9 Sankey-diagram for handel med rånikkel (HS 75.02) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 5-9.



Figur 5-10 Sankey-diagram for handel med nikkelbarrer (HS 75.05) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 5-10.



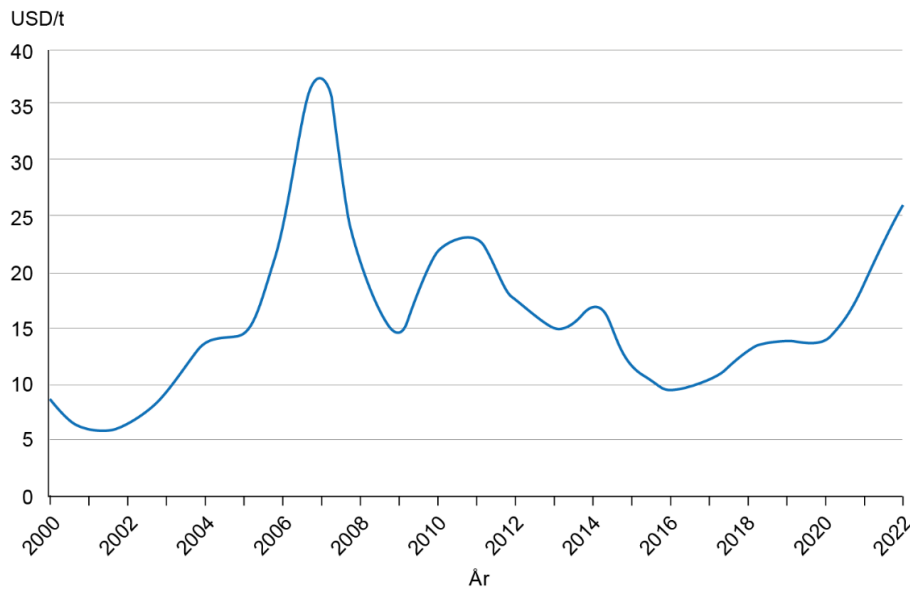
Figur 5-11 Sankey-diagram for handel med nikkelskrot (HS 75.03) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 5-11.

5.5.1 Priser

Markedet for nikkel er volatilt og er følsomt overfor geopolitiske hændelser; for eksempel bevirkede Ruslands invasion af Ukraine store prisstigninger, hvilket skyldes, at Rusland før invasionen producerede ca. 10 % af det globale nikkelforbrug og 15 % af Class 1-forsyningerne.

Nikkel prissættes og handles på internationale metalbørser, bl.a. på London Metal Exchange (LME), som dog har været under pres fra konkurrerende børser det seneste års tid pga. problemer med spekulation mod nikkel efter Ruslands invasion af Ukraine. I marts 2023 blev LME nødsaget til at standse handlen med nikkel og annullere handler, efter priserne på to dage steg med over 250 % til over 100.000 USD/ton, hvilket skyldtes en såkaldt 'short squeeze', hvor investorer, der har solgt nikkel i forventning om prisfald, er blevet tvunget til at dække positioner i et marked med lav likviditet. En enkelt nikkel future udgør 6 ton nikkel, og i løbet af januar i 2022 udgjorde efterspørgslen for nikkel futures c. 1,3 mio ton; markedet er efterfølgende stabiliseret.

I Figur 5-12 ses gennemsnitlige årlige priser for nikkel i perioden 2000-2022. Generelt har nikkelpriserne hidtil især været styret af produktion af stål og andre jernlegeringer, hvori nikkel indgår. Byggeboom i Kina i begyndelsen årtusindet og efterfølgende afmatning i økonomien efter finanskrisen i 2007 har haft en afgørende rolle for prisudviklingen. Andre vigtige begivenheder i løbet af de seneste 10 år omfatter eksportforbud for nikkel (og deres lempelser) i Indonesien, afbrydelser i nikkelleverancer i Philippinerne pga. minelukninger af miljømæssige årsager, COVID-pandemien og Ruslands invasion af Ukraine, alle faktorer som har medført stærkt fluktuerende priser på nikkel.



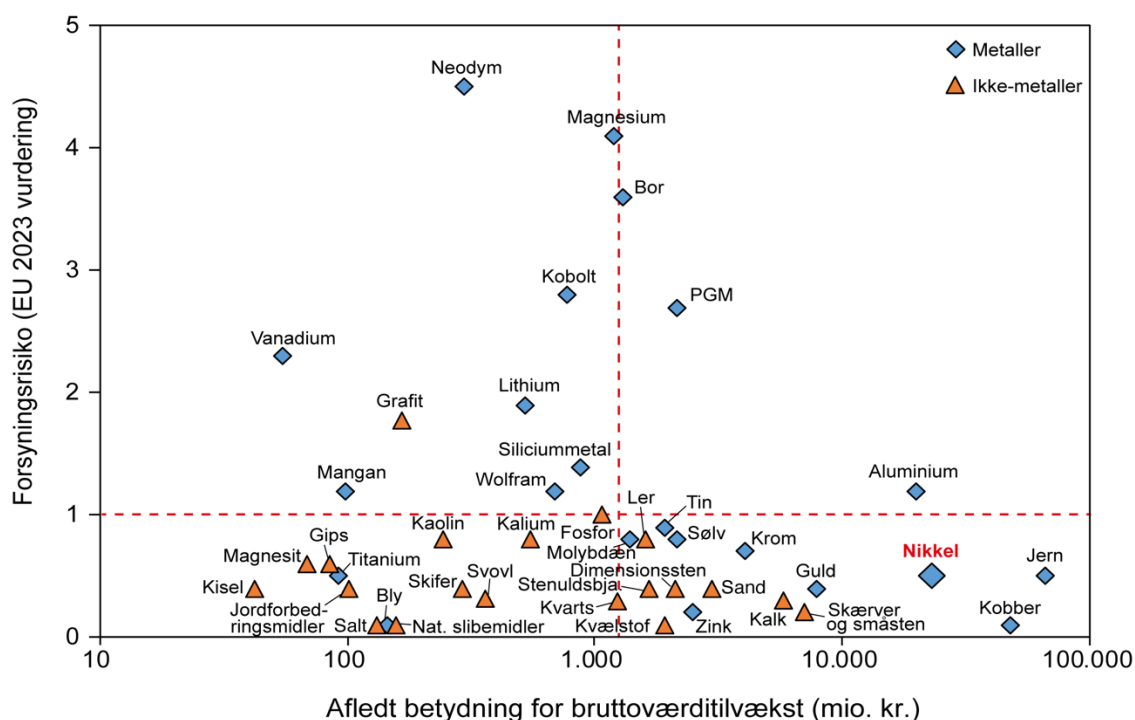
Figur 5-12 Prisdudvikling for nikkel i perioden 2000-2022. Kilde: Screen Nickel factsheet (2023) og Statista (2023a).

5.6 Det danske forbrug

Nikkel er et af de mest betydningsfulde råstoffer for dansk industri med en eksportværdi på 22 mia. kr. og varekøb for 48 mia. kr., mens 30.000 var beskæftiget i relation til nikkel i Danmark i 2019 (Clausen *et al.* 2023), og nikkel har den tredjehøjeste afledte betydning for bruttoværditilvæksten på 35 mia. kr., kun overgået af jern og kobber (Figur 5-13). Omtrent 60 % af de primære og sekundære varekøb i Danmark af nikkel indgår i materialekomplekse produkter, som er kendetegnet ved komplekse forsyningskæder, hvor det er vanskeligt at finde råstofoprindelsen og forsyningsrisikoen. Typiske slutprodukter i Danmark omfatter konstruktionsstål, procesanlæg og diverse rørtyper (Clausen *et al.* 2023).

5.7 Perspektiver

Produktionen af nikkel er siden 2000 steget med mere end 5 % pr. år og udgjorde i 2021 næsten 2,8 Mt. Efterforskningen har igennem de senere år været utilstrækkelig til at imødegå et fald i levetiden af de globale reserver. Hovedparten af verdens nikkelmalmproduktion finder sted i lande, hvor de politiske forhold er udfordrede, som fx Indonesien, Philippinerne og Rusland, hvilket vil kunne påvirke produktionen. Produktionen forestås af relativt få store selskaber, hvoraf de største nikkelmalmproducenter er det russiske selskab Norilsk (330.000 ton i 2022), Nickel Asia Corp. (NAC) i Indonesien (111.000 ton i 2022), samt Vale som producerer i både Canada og Indonesien (119.000 ton) (Tabel 1-4). Forsyningskædernes øvrige led domineres af Kina, og Indonesien er i samarbejde med kinesiske virksomheder i gang med at udvikle landets industrielle nikkelinfrastruktur.



Figur 5-13 Nikkel og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvæksten som funktion af forsyningsrisikoen. Figuren er modificeret efter Clausen et al. (2023).

EU Kommissionen vurderede i 2023 nikkel som et strategisk råstof, da nikkels økonomiske betydning blev vurderet som høj (EI: 5,7), som udtryk for at nikkel er et råstof, der kræver særlig opmærksomhed til trods for, at de estimerede forsyningsrisici for både nikkelmalm (SRE: 0,4) og processeret nikkel (SRP: 0,5), blev vurderet som lave, og nikkel dermed teknisk set ikke opfyldte kriterierne til strategiske råstoffer. Kritikalitetsvurderinger udføres på basis af foregående års produktioner og handler, og kan ikke anvendes i fremtidsscenerier. Nikkel er vurderet som kritisk råstof i England, USA, Japan, Indien, Canada og Kina. Men som nævnt har EU Kommissionen (2023) ikke vurderet nikkel som et kritisk råstof, hvilket især er begrundet i, at produktionen er fordelt ud på flere lande, der bl.a. omfatter Canada og Australien, som traditionelt er stabilt producerende lande, og fordi genanvendelsesgraden er relativ høj. Så som konsekvens af nikkels afgørende betydning for strategiske teknologier i Europa og forventede øgede efterspørgsel, er nikkel kategoriseret som strategisk råstof i EU (EC 2023).

Der er generelt enighed om, at væksten i Li-batteri-markederne vil påvirke efterspørgslen af nikkel frem mod 2030 med et samlet nikkelbehov på 3,5-4,5 Mt i 2030 (Benchmark Mineral Intelligence 2023) og 6 Mt i 2040 (Benchmark Source (2023); Fleishmann *et al.* (2023); Statista (2023b)). Kina forventes at have en årlig vækst i forbruget af nikkel på 11 %, efterfulgt af Canada (6 %), EU (5 %) og Japan (4 %). Frem til 2035 vil det største forbrugsområde for nikkel dog udgøres af rustfrit stål, hvorefter efterspørgsel på nikkel til batterier vil være helt dominerende. Disse høje vækstrater er en udfordring for forsyningsiden, og for at bidrage til sikre forsyninger har flere bilfabrikker investeret i både mineanlæg og forarbejdningsfabrikker; som fx Ford Motor Co.' 4,5 mia. USD-investering i mine- og procesanlæg i Indonesien (Donovan 2023). Indonesien forventer at producere ca. 60 % af den globale nikkelproduktion i 2030.

De fleste analytikere forventer et mindre forsyningsunderskud af nikkel i 2030 (fx Fleischmann *et al.* 2023)). Indonesien forventes at blive en betydelig fremtidig producent af nikkel med opbygning

af en integreret forsyningskæde for nikkelprodukter fra mine til færdige råstoffer til batteriindustrien, hvor det hele er baseret på landets egne store ressourcer, mange aktive miner og et forbud mod eksport af nikkelmalm (mindste forarbejdningsgrad er NPI-produkter). Kina er stærkt involveret, finansielt, handelsmæssigt, teknisk og rådgivningsmæssigt, i opbygningen af Indonesiens nikkelsektor med særligt sigte på at sikre forsyninger af nikkel til katoder i batterier til eltransportmidler.

En udfordring for fremtidige forsyninger er, at kun halvdelen af den globale nikkelproduktion, pga. nikkelforekomsternes mineralogi og/eller fremstillingsprocesser, kan anvendes til fremstilling af Class 1-produkter til Li-ion-batterier, da de andre færdige nikkelprodukter er kontamineret med jern og kobber (McKinsey & Company (2020).

5.8 Referencer

- Benchmark Source 2023: Nickel demand for batteries to overtake stainless steel in late 2030s. [Nickel demand for batteries to overtake stainless steel in late 2030s | Benchmark Source \(benchmarkminerals.com\)](https://benchmarkminerals.com)
- Benchmark Mineral Intelligence 2023: The Metals Company – Life Cycle Assessment for TMC's NORI-D polymetallic nodule project and comparison to key land-based routes for producing nickel, cobalt and copper. [https://metals.co/wp-content/uploads/2023/03/TMC NORI-D LCA Final Report March2023.pdf](https://metals.co/wp-content/uploads/2023/03/TMC_NORI-D_LCA_Final_Report_March2023.pdf)
- Clausen, R. J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. & Vind, I. 2023: Dansk industris brug af mineralske råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/gpub/32051>
- Donovan, B. 2023 Will we have enough nickel for our EVs in 2030? The Globe and Mail, April 17, 2023. www.theglobeandmail.com/investing/investment-ideas/article-will-we-have-enough-nickel-for-our-evs-in-2030/
- Durden, J. M., Lallier, L. E., Murphy, K., Jaekel, A., Gjerde, K., & Jones, D. O. 2018: Environmental Impact Assessment process for deep-sea mining in 'the Area'. Marine Policy, 87, 194-202.
- European Commission (EC) 2023: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- Fleischmann, J., Schaufuss, P.O., Linder, M., Hanicke, M., Hortsky, E., Ibrahim, D., Jautelat, S., Torscht, L. & Rijt van der A. 2023: Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. January 16, 2023: McKinsey & Comp Report. [Lithium-ion battery demand forecast for 2030 | McKinsey](https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/how-clean-can-the-nickel-industry-become)
- Hein, J. R., Koschinsky, A. & Kuhn, T. 2020: Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials. Nature Reviews Earth & Environment, 1(3), 158-169.
- IEA 2021: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- McKinsey & Company (2020): How clean can the nickel industry become? <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/how-clean-can-the-nickel-industry-become>
- Meissner, S. (2021): The impact of metal mining on global water stress and regional carrying capacities – A GIS based water impact assessment. Resources 2021, 10, 120. [Doi.org/10.3390/resources10120120](https://doi.org/10.3390/resources10120120)
- Mudd, G.M. & Jowitt, S.M. 2022: The new century for nickel resources, reserves and mining: Reassessing the Sustainability of the Devil's Metal. Economic Geology, Feb. 2022

- Nickel Institute 2023a: About Nickel. <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/>
- Nickel Institute, 2023b: How to calculate GHG emissions from nickel production. <https://nickelinstitute.org/en/blog/2022/may/how-to-calculate-ghg-emissions-from-nickel-production/>
- NORI 2020: Scoping document for a social impact assessment for the NORI-D Polymetallic nodule collection project. Report 103 pp. https://metals.co/wp-content/uploads/2022/12/NORI-D-SIA-Scoping-Dec_2022.pdf
- Observatory of Economic Complexity World (EOC World) 2023: Database <https://oec.world/>
- Rosa, D. Kalvig, P. Stendal, H and Keiding, J.K. 2023: Review of the critical raw material resource potential in Greenland. MiMa rapport 2023/1, 121 pp.
- Rosa D., Stensgaard, B.M. & Sørensen, L.L. 2013: Magmatic nickel potential in Greenland. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2013/57, pp. 134.
- Sharma, R. 2015: Environmental issues of deep-sea mining. Procedia Earth and Planetary Science, 11, 204-211.
- Screen2 Nickel factsheet 2023: Screen2 Factsheet updates based on the EU Factsheets 2020 Nickel. https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/03/SCREEN2_factsheets_NICKEL.pdf
- Statista 2023a: Average prices for nickel worldwide from 2014 to 2024 <https://www-statista.com/statistics/675880/average-prices-nickel-worldwide/>
- Statista 2023b: Renewable energy demand for nickel in worldwide in 2020, with forecast figures for 2030 and 2040, by sector and scenario. <https://www-statista.com/statistics/1258903/worldwide-nickel-demand-for-renewable-energy-by-sector-and-scenario>
- Statista 2023c: Reserves of nickel worldwide as of 2022, by country. <https://www-statista.com/statistics/273634/nickel-reserves-worldwide-by-country/>
- USGS 2000-2023: Mineral commodity summaries 2000-2023: U.S. Geological Survey <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>
- Wei, W., Samuelsson, P.B., Tilliander, A., Gyllenram, R. & Jönsson, P.G. 2020: Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Nickel Products. Energies, vol 13, Issue 21
- Washburn, T. W., Turner, P. J., Durden, J. M., Jones, D. O., Weaver, P., & Van Dover, C. L. 2019: Ecological risk assessment for deep-sea mining. Ocean & coastal management, 176, 24-39.
- WMD 2022 (World Mining Data): Vol 37, 28 April 2022 <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>

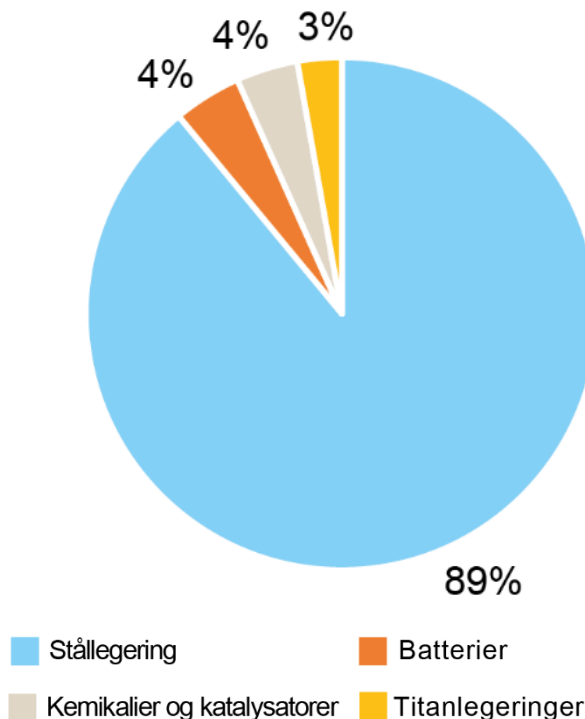
6. Vanadium

6.1 Introduktion

Vanadium (V) med atomnummer 23 er et sølvgråt metal, som i ren form er blødt og bøjeligt, og som har højt smeltepunkt (1.910 °C) og højt kogepunkt (3.407 °C). Vanadium er kemisk stærkt reaktivt og danner let forbindelser med andre metaller, og vanadium er derfor meget anvendt som legeringsmetal til materialer, hvor der er behov for ekstra styrke og korrosionsresistenshed; næsten 90 % af vandiumproduktionen anvendes til stål i byggerier (rebar-type) og bilindustrier. De kendte geologiske vanadiumreserver er store, men metallet udvindes hovedsageligt som biprodukt fra produktion af andre metaller, som dermed er styrende for mængden af vanadium på markedet. Vanadiumforbruget forventes at stige markant, hvor metallet sandsynligvis vil blive vigtig til fremstilling af Vanadium-Redox-Flow-Batterier (VFRB). Som konsekvens af Kinas dominerende rolle i forsyningskæderne for vanadium, er vanadium vurderet som et kritisk råstof i EU (EC 2023).

6.2 Anvendelser og sektorer

Vanadium anvendes primært til fremstilling af højstyrkestållegeringer, herunder rustfrit stål, specialstål, m.m., men metallet har også en vis anvendelse til kemikalier (katalysator til fremstilling af svovlsyre) samt til batterier (flowbatterier og V-Li-ion-batterier) og titanlegeringer (Figur 6-1). Efterspørgslen af vanadium til stål er bl.a. vokset som følge af ændrede krav til vanadiumindholdet i rebar-stål, men andelen af vanadium til fremstilling af VFRB er et vækstområde for vanadium (Mining Review Africa 2023).



Figur 6-1 Global anvendelse af vanadium opgjort i 2023. Kilde: Mining Review Africa (2023).

6.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder

Genanvendelsesraten for vanadium er varierende og dårligt estimeret (Petranikova *et al.* 2020), men er generelt vurderet til at være lav (EoL-RIR: 1-6 %) (EC 2023). Fokus for genanvendelse af vanadium er især vanadiumholdige slagger, som er affaldsprodukter fra stålværker, og som findes i store volumener. Nogle stålværker udnytter disse vanadiumressourcer, og flere vanadiumproducenter planlægger modifikationer af procesanlæg for at kunne udnytte disse slagger. Metoderne til forarbejdning af slagger vil typisk omfatte pyrometallurgiske metoder (ristning) efterfulgt af hydrometallurgiske metoder (udludning med natriumbikarbonat e.l.) (Sadeghi & Alamdari 2021).

Virksomheden Critical Metals arbejder på etablering af et genanvendelsesanlæg i Norden, hvor input er baseret på både skrot og restmaterialer fra nuværende og tidligere mine- og smelteaktiviteter fra bl.a. SSAB's stålværker i Luleå og Oxelösund i Sverige og Raahe og Pori i Finland. Det er estimeret at slaggerne indeholder 63.000 ton V_2O_5 , og der forventes en årlig produktion på 6.000 ton V_2O_5 (Critical Metals 2020).

Til de fleste anvendelser kan vanadium substitueres med andre metaller, dog med enten kvalitetstab og/eller øgede omkostninger til følge. Vanadium kan ikke substitueres, hvor det anvendes til vanadium-titanium-højkvalitetslegeringer til fly- og rumfartsindustri. Til legeringer er de mest anvendte substitutionsmetaller for vanadium mangan, molybdæn, niobium, titanium og wolfram (Screen2 Vanadium factsheet 2023). Til kemiske vanadiumprodukter, som anvendes som katalysatorer, kan vanadium substitueres med nikkel og/eller platin. Til vanadiumpigmentprodukter kan titan i et vist omfang substituere vanadium.

6.4 Global forsyning

6.4.1 Geologi

Vanadiumforekomster findes som magmatiske og sedimentære forekomster. Fra de magmatiske forekomster anvendes især vanadiumholdig magnetit, titanomagnetit, ilmenit og kromit. De sedimentære forekomster omfatter især tungsandsforekomster (placers), som ligeledes kan bestå af magnetit og titanomagnetit og stedvist af uran-vanadium-mineralet carnotit. De sekundære forvitningsforekomster kan indeholde bl.a. vanadinit og roscoelit, hvoraf det førstnævnte er associeret med bly-zink-mineraliseringer, og roscoelit bl.a. findes i olieskiferforekomster.

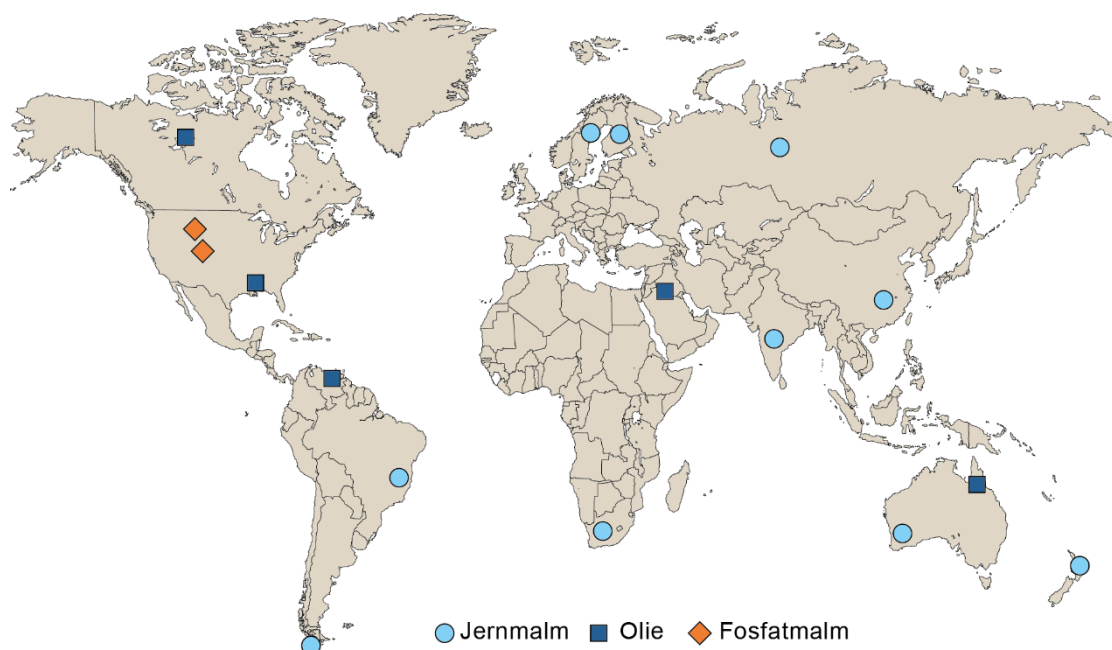
Vanadium er almindeligvis et biprodukt til en produktion af andre metaller, og der skal derfor etableres ekstra procestrin for at kunne udnytte vanadium fra mineralet.

I Figur 6-2 ses nogle af de største vanadiumforekomster fordelt på geologiske typer.

I tillæg til den primære biproduktion af vanadium udvindes vanadium også fra bl.a. metallurgiske slagger og restprodukter fra olieraffinering.

Vanadium danner kun få mineraler med højt vanadiumindhold, fx canotit og vanadit; de fleste kommercielle vanadiummineraler indeholder <5 %. Typisk vanadiumindhold i de primære mineraler er 1-2% V_2O_5 og >5 % V_2O_5 i sekundære materialer. Omkring 85 % af vanadium udvindes fra magnetit og titanomagnetit; resten udvindes fra ilmenit, slagger fra stålindustrien samt fra restprodukter fra aluminium- og magnesiummetalsmeltere, fosfatindustrien og fra flyveaske fra

kulkraftværker. Vanadiumindholdet i mineraler er vist i Tabel 6-1, mens indholdet fra sekundære udgangsmaterialer kan ses i Tabel 6-2. Blandt de sekundære ressourcer er skrot fra slutprodukter, ny-skrot og slagge fra stålindustrien.



Figur 6-2 Oversigt over nogle af de største vanadiumforekomster fordelt på geologiske typer. Modificeret efter Imtiaz et al. (2015).

Tabel 6-1 Kommercielt vigtige vanadiummineraler.

| Vanadiummineral | Kemisk formel | Vanadiumindhold (Vægt% V ₂ O ₅) | Typisk geologisk type |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------|
| Carnotit | K ₂ (UO ₂) ₂ (VO ₄) ₂ | 21,4 | Sedimentær |
| Coulsonit | FeV ₂ O ₄ | < 5 | Sekundær |
| Ilmenit | FeTiO ₃ | 0,3-0,6 | Magmatisk |
| Kromit | FeCr ₂ O ₄ | 0,2 | Magmatisk |
| Magnetit | Fe ₃ O ₄ | 0,1-0,6 | Magmatisk |
| Mottramit | Pb(Cu,Zn)(OH)(VO ₄) | 22,3 | Sekundær |
| Patronit | VS ₄ | 15-60 | Hydrothermal |
| Roscoelit | K(V ³⁺ , Al, Mg) ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂ | n.a. | Sekundær |
| Titanomagnetit | Fe(Fe,Ti) ₂ O ₄ | 0,4-3 | Magmatisk |
| Vanadinit | Pb ₅ (VO ₄) ₃ Cl | 19,6 | Sekundær |

Tabel 6-2 Mest anvendte materialer til udvinding af vanadium fra sekundære ressourcer.

| Vanadium-materiale | Vanadiumindhold (vægt% V ₂ O ₅) |
|-----------------------|--------------------------------------------------------|
| Stålslagge | 1 |
| Aske fra kul | <0,1 |
| Slagge fra bauxit | 0,03-0,2 |
| Slagge fra fosfatmalm | 0,2 |

6.4.2 Globale vanadiumreserver

De globale vanadiumreserver er opgjort til 26 Mt V_2O_5 (USGS 2023), hvoraf Kina, Rusland og Sydafrika råder over henholdsvis 37 %, 19 % og 13 %. Det er uklart, i hvilket omfang forekomster med lavt vanadiumindhold indgår i de globale opgørelser.

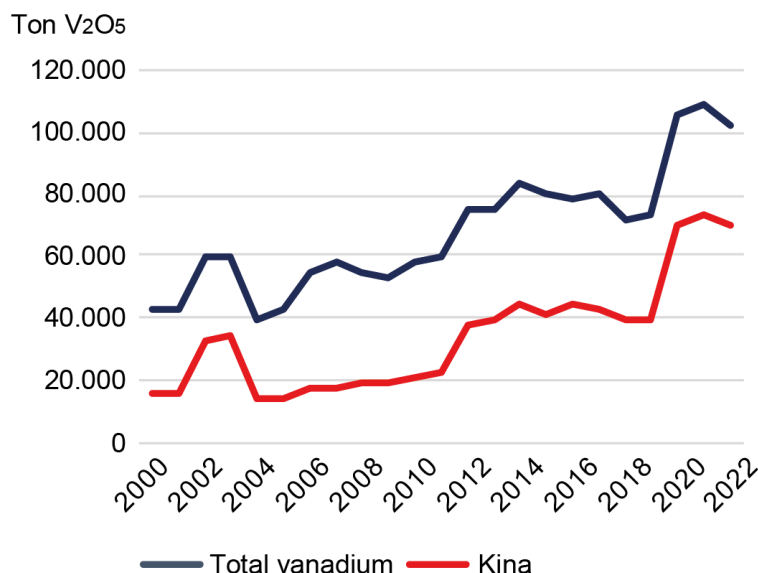
Vurderet i forhold til det nuværende globale forbrug på ca. 100.000 ton/år er de kendte reserver tilstrækkelige til mere end 250 års produktion. Som omtalt i afsnit 6.5 Handel er der analyser, der forventer 20 % årlige stigninger i forbruget, hvilket vil reducere levetiden for de nuværende reserver til omkring 25 år.

6.4.3 Global vanadiumproduktion

Ressourcerne til den globale vanadiumproduktion udgjorde i 2019 ca. 19 % fra malm med vanadium som hovedprodukt, 69 % biprodukt-vanadium fra jern- og titanproduktion, 12 % genanvendt vanadium samt vanadium udvundet fra bl.a. kulflyveaske, aluminium- og magnesiumproduktion (Perles 2020). Den historiske udvikling i produktionen af primær vanadium i perioden 2000-2022 udgjorde ca. 100.000 ton ren vanadium (Figur 6-3); produktion fra genanvendelse og sekundære udnyttelser er ikke omfattet. Malmproduktionen steg ca. 250 % i perioden, som især skyldtes vækst i Kina. I 2022 producerede Kina ca. 68 % af den globale mineralproduktion efterfulgt af Rusland, Sydafrika og Brasilien med henholdsvis 17 %, 9 % og 6 % (Tabel 6-3).

Det er de samme lande, der dominerer minedriften af vanadiumholdig malm, som også dominerer fremstillingen af vanadiumpentoxid (V_2O_5), dog suppleret med mindre produktioner fra bl.a. USA, Canada, Europa, Sydkorea og Japan.

I Figur 6-4 ses et generisk procesdiagram for vanadium.



Figur 6-3 Oversigt over historisk produktion af primær vanadium i perioden 2000-2022. Kilde: USGS (2000-2023).

Tabel 6-3 Produktionen af primær vanadium i ton fordelt på de største producentlande. Kilder: USGS (2023) og WMD (2023).

| Produktionsland | 2022 (USGS) | 2021 WMD |
|-----------------|-------------|----------|
| Kina | 70.000 | 63.800 |
| Rusland | 17.000 | 20.052 |
| Sydafrika | 9.100 | 8.799 |
| Brasilien | 6.200 | 7.212 |
| Total | 102.300 | 99.969 |

6.4.3.1 Selskaber involveret i vanadiumminedrift

Da vanadium hovedsageligt produceres som biprodukt fra mineraler, der brydes pga. deres indhold af jern, titanium og/eller krom, er der kun sporadiske oplysninger om efterforskningsprojekter, miner og smelteværker rettet mod vanadium. I Tabel 6-4 ses en ufuldstændig liste over mine/smelteværker, lande og selskaber, der bryder vanadium som hoved- eller biprodukt; i Tabel 6-5 ses ligeledes en ufuldstændig liste, denne gang over efterforskningsprojekter, lande og virksomheder.

Tabel 6-4 Oversigt over miner/smelteværker, som bryder vanadium som enten hoved- eller biprodukt. Oversigten er ufuldstændig, som følge af begrænset offentlig tilgængelig information.

| Mine/smelteværker | Land | Selskab |
|---------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------|
| Windimurra | Australien | Atlantic |
| Maracas Menchen | Brasilien | Largo Resources |
| Bulcari | Brasilien | Largo Resources |
| Kuranakh (K&S Mine) | Rusland | IRC Ltd |
| Baicao | Kina | China Vanadium _Titano-Magnetite Mining Comp |
| Panzhihua | Kina | Pangang Group Vanadium Titanium & Resources |
| Panzhihua | Kina | Panzhihua New Steel & Vanadium Co (største V-producent) |
| Sichuan | Kina | Desheng Group |
| Hebei | Kina | Hebei Iron & Steel Group (HBIS) Chengsteel (næststørste V-producent) |
| Tangshan, Hebei | Kina | Beijing Jianlong Heavy Industry Group |
| Melbourne | New Zealand | Blue Scope |
| Sobstvenno-Kachkanarskoye | Rusland | Evrz KGOK (mine) - Evraz NTMK (stålværk) |
| Witbank | Sydafrika | Evrz Highveld Steel and Vanadium steelworks |
| Mapochs | Sydafrika | Bushveld Vanchem |
| Vametco Vanadium | Sydafrika | Busheld Minerals |
| Rhovan | Sydafrika | Glencore |
| Brits | Sydafrika | Bushveld Minerals |
| Makopane | Sydafrika | Bushveld Minerals |
| Colorado | USA | Energy Fuels Inc |
| Arkansas | USA | US Vanadium LCC |

Tabel 6-5 Oversigt over efterforskningsprojekter, som bryder vanadium som enten hoved- eller bi-produkt. Oversigten er ufuldstændig, som følge af begrænset offentlig tilgængelig information.

| Efterforskningsprojekter | Land | Ejer |
|--------------------------|------------|---------------------------|
| Jervois | Australien | Arafura Resources |
| Saint Elmo | Australien | Multicom Ressource |
| La Blache | Canada | Argex Mining Inc |
| Buttercup | Canada | Prophecy Development Corp |
| Garinskoye | Rusland | IRC Ltd |
| Häggån | Sverige | Aura Energy |
| Routivare | Sverige | Beowulf |
| Airijoki | Sverige | Kendrick Resources |
| Hörby | Sverige | Province Resources Ltd |
| Gibellini Project | USA | Nevada Vanadium Mining |

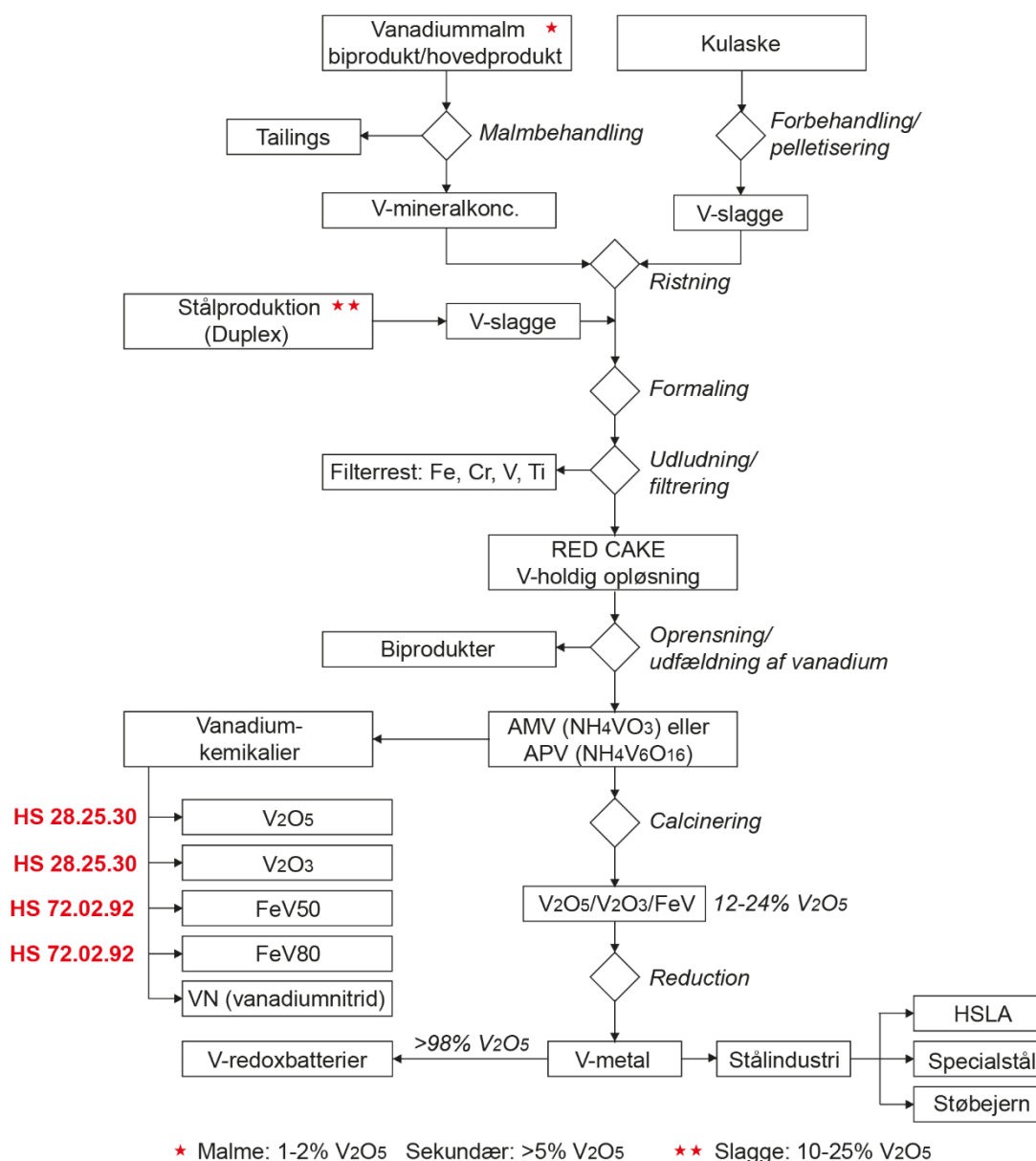
6.4.4 Fremstilling af vanadium

Forarbejdningsmetoder af vanadiumholdige råstoffer er illustreret i Figur 6-4 og omfatter enten pyrometallurgisk eller hydrometallurgisk raffinering. Den hydrometallurgiske metode omfatter typisk reduktion, ristningsproces (som omdanner råstofferne til vandopløselige salte) og efterfølgende udludning af de udfældede produkter (red cake); rester af vanadium i udludningsvæsken ekstraheres typisk vha. 'solvent extraction' og/eller ionbyttermetoder. Red cake forarbejdes via en række mellemtrin til vanadiumoxid (V_2O_5). I den pyrometallurgiske metode smeltes det vanadiumholdige koncentrat (fx V-Ti-magnetit), og der dannes en vanadiumholdig slagge og smeltet 'pig iron' (semi steel); vanadiumslaggen oxideres/ristes og udludes, og efterfølgende anvendes hydrometallurgiske metoder til fremstilling af vanadiumoxid (V_2O_5).

6.4.5 Klima- og miljøpåvirkning

Vanadiumproduktionen påvirker miljøet i negativ retning, da toksiske påvirkninger af planter og dyr er voksende; der er derfor øget bekymring for disse forureninger. Direkte årsagssammenhæng mellem vanadiumsmeltere og forurenede landbrugsjord er især rapporteret fra Kina (Imtiaz *et al.* 2015; Li *et al.* 2020). Diskussioner om, hvorvidt vanadium bør betragtes som toksisk metal pågår.

CO₂-bidraget fra vanadiumproduktion vurderes til ca. 16,2 ton CO₂ pr. ton V_2O_5 -produkt; dette høje niveau forventes at kunne reduceres ved introduktion af nye elektrokemiske teknologier (VanadiumCorp 2017).



Figur 6-4 Generisk procesdiagram for vanadium. Baseret på Nasimifer & Mehrabani (2022) og Lee et al. (2021).

6.5 Handel

En betydelig del af handlen med vanadiumforsyningskædens produkter opgøres ikke specifikt for vanadium, men i kombination med andre råstoffer; det gælder eksempelvis for handel med vanadiummineralkoncentrat, som opgøres sammen med niobium, tantal og zink (HS 26.15.90) (Tabel 6-6). En oversigt over den internationale handel med de to vanadiumspecifikke varer (HS6 28.25.30 Vanadiumoxider og -hydroxider og HS6 72.02.92 Ferrovandium) ses i Tabel 6-7 og Tabel 6-8.

Tabel 6-6 Oversigt over handlede produkter af vanadium i 2020, med angivelse af handelsværdi og varekode. Kilde: OEC World (2023).

| HS4 | Varer | Eksport (mio. USD) | HS6 | Varekodebeskrivelse | Eksport (mio. USD) |
|-------|--------------------|--------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 26.15 | Nb, Ta, V & Zr ore | 1.830 | | | |
| | | | 26.15.90 | Nb, Ta, V & Zr ore & concentrate | 527 |
| | | | 26.20.50 | Ash Residues containing V | - |
| | | | 28.25.30 | Vanadium oxides & hydroxides | 564 |
| | | | 72.02.92 | Ferro vanadium | 1.030 |
| | | | 81.12.40 | Vanadium, articles thereof, waste or scrap/powder | - |
| | | | 81.12.92 | Ga, Ge, Hf, In, Nb, Rh & V articles thereof, unwrought including waste and scrap/powder | 577 |

Vanadiumoxider (vanadater, V_2O_5) er råmateriale til mange forskellige industrier. Brasilien, Rusland, Sydafrika og Kina er de største eksportlande og stod i 2020 for $\frac{3}{4}$ af verdenshandlen, hvoraf en væsentlig del importeres af Tjekkiet, Holland, Sydkorea og USA; angiveligt udgør Ruslands eksport til Tjekkiet mere end 90 % af Ruslands eksport, som måske anvendes til fremstilling af ferrovanadium (Figur 6-5).

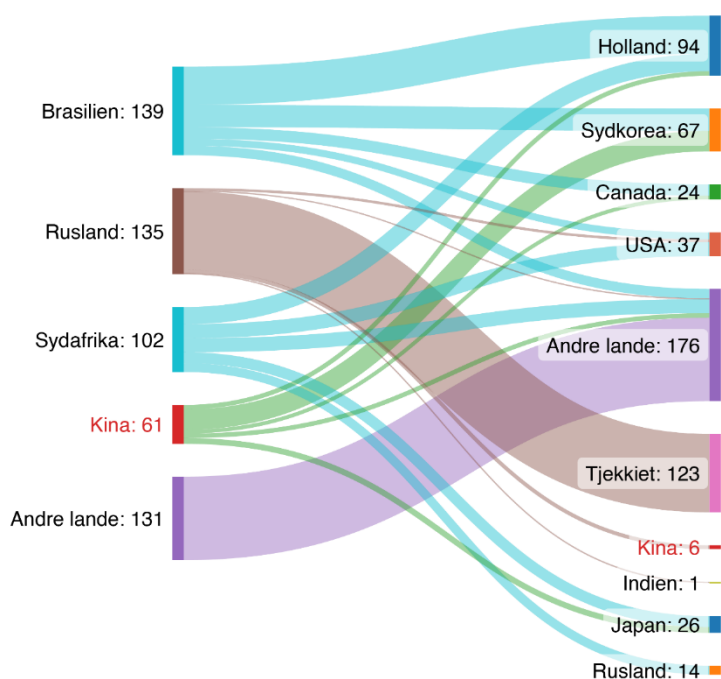
Eksporten af ferrovanadium var i 2020 domineret af Østrig, Sydafrika, Tjekkiet, Kina og Sydkorea, som samlet stod for ca. $\frac{3}{4}$ af eksporten, som blev importeret af en lang række lande, hvoriblandt Holland, Tyskland, Taiwan, Sydkorea og Japan var de største importlande (Figur 6-6).

Tabel 6-7 De vigtigste eksport- og importlande for vanadiumoxider og -hydroxider (HS6 28.25.30) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

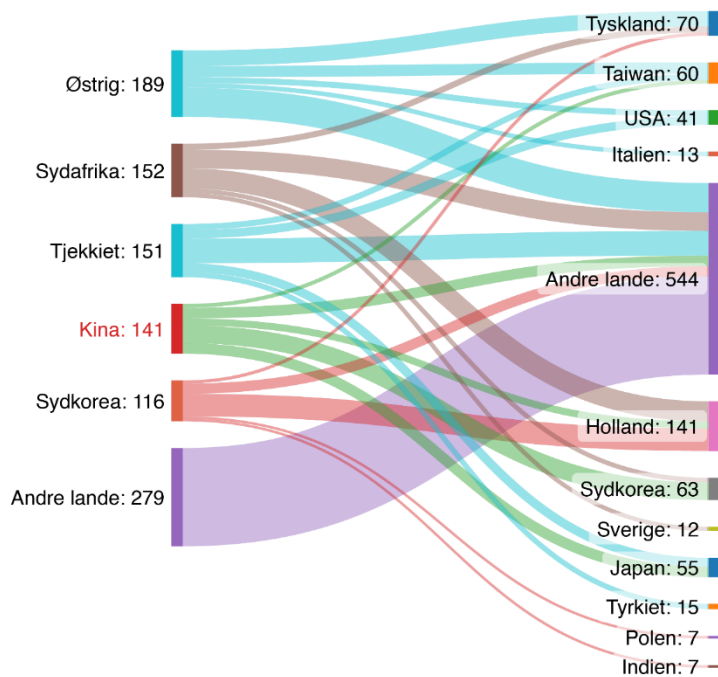
| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Brasilien | 138 | Holland | 60 |
| | | Sydkorea | 35 |
| | | Canada | 18 |
| | | USA | 11 |
| Rusland | 134 | Tjekkiet | 123 |
| | | Kina | 6 |
| | | USA | 3 |
| | | Indien | 1 |
| Sydafrika | 101 | Holland | 27 |
| | | USA | 22 |
| | | Japan | 17 |
| | | Rusland | 14 |
| Kina | 60 | Sydkorea | 32 |
| | | Japan | 9 |
| | | Holland | 7 |
| | | Canada | 6 |
| Subtotal | 443 | | |
| Øvrige | 121 | | |
| Total | 564 | | |

Tabel 6-8 De vigtigste eksport- og importlande for ferrovanadium (HS6 72.02.92). Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Østrig | 190 | Tyskland | 44 |
| | | Taiwan | 32 |
| | | USA | 17 |
| | | Italien | 13 |
| Sydafrika | 152 | Holland | 57 |
| | | Tyskland | 17 |
| | | Sydkorea | 13 |
| | | Sverige | 12 |
| Tjekkiet | 151 | Japan | 25 |
| | | USA | 24 |
| | | Taiwan | 17 |
| | | Tyrkiet | 15 |
| Kina | 140 | Sydkorea | 50 |
| | | Japan | 30 |
| | | Holland | 20 |
| | | Taiwan | 11 |
| Sydkorea | 116 | Holland | 64 |
| | | Tyskland | 9 |
| | | Polen | 7 |
| | | Indien | 7 |
| Subtotal | 749 | | |
| Øvrige | 278 | | |
| Total | 1.027 | | |



Figur 6-5 Sankey-diagram for handel med vanadiumoxider og -hydroxider (HS 28.25.30) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 6-7.



Figur 6-6 Sankey-diagram for handel med ferrovanadium (HS 72.02.92) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 6-8.

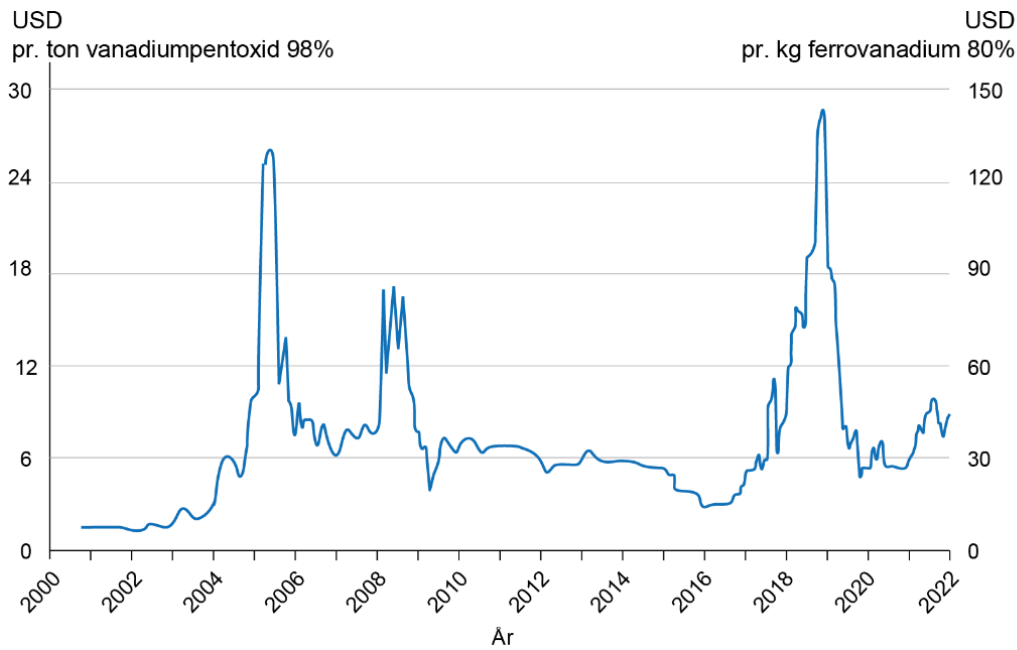
6.5.1 Priser

Vanadium handles ikke via børser. Priserne fastsættes af parterne, og anses for at være relativt volatile. Set over perioden 2000 til 2023 er den overordnede tendens dog et nogenlunde stabilt prisniveau for både vanadiumpentoxid (12-14 USD/kg) og ferrovanadium-80 (28-40 USD/kg), dog afbrudt af store prisudsving 2004-2005, 2008 og 2018-2019 (Figur 6-7); det efterfølgende fald kan være relateret til faldende efterspørgsel som følge af COVID-pandemien. Da produktionen af primær vanadium udføres af en mindre gruppe producenter, kan ændringer i et enkelt eller få selskaber påvirke prisudviklingen. For eksempel menes de store prisstigninger i 2018 at være udløst af konkursen af Highveld Steel & Vanadium i Sydafrika i kombination med reduktion i Kinas produktionskvoter; årsager for øvrige prisudsving er ukendte.

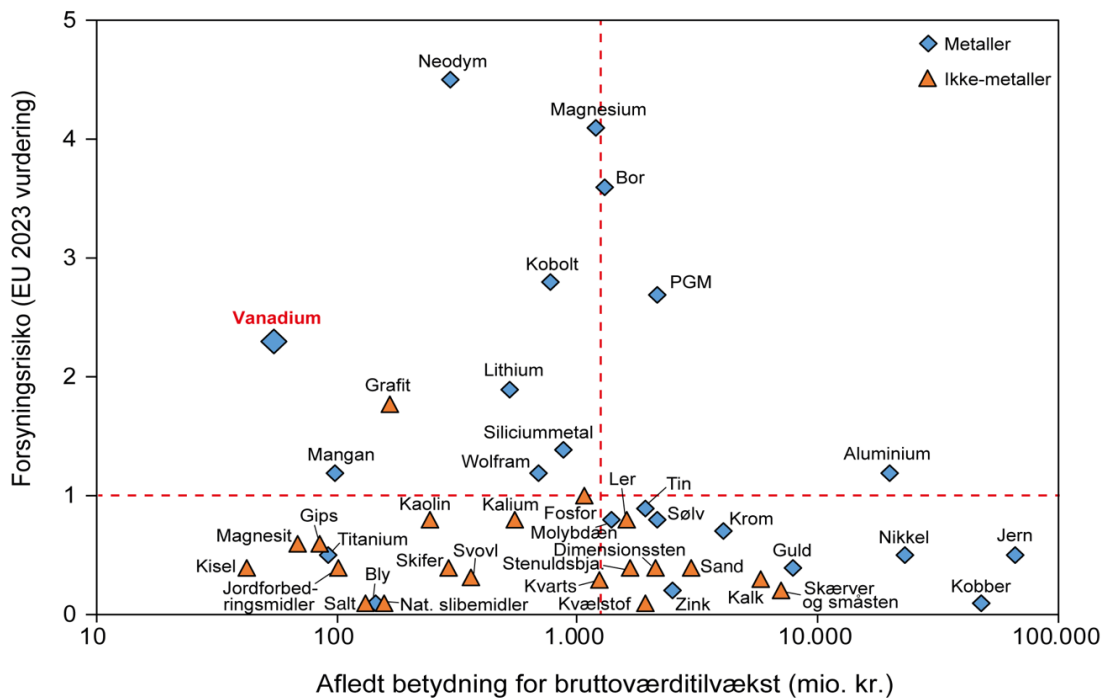
6.6 Det danske forbrug

Det danske forbrug af vanadium er dårligt kortlagt, men baseret på Tan *et al.* (2020) og Clausen *et al.* (2023) vurderes det, at forbruget i Danmark altovervejende er til rustfrit stål og specialståltyper, hvilket også gør sig gældende globalt set (se afsnit 6.2). Vanadium benyttes både i rustfrit og legeret stål samt i karbider i værktøjsstål. Til stål er mangan det mest almindelige legeringsmetal, men der bruges også store mængder vanadium samt andre metaller.

Clausen *et al.* (2023) vurderede, at vanadium har relativ lille betydning for den danske økonomi (Figur 6-8), men det skal pointeres, at vanadium er et råstof, som har dårlig datadækning i undersøgelsen, og der er derfor relativ stor usikkerhed knyttet til vanadiums afledte betydning for bruttoværditilvæksten og andre økonomiske parametre beregnet i Clausen *et al.* (2023).



Figur 6-7 Prisudvikling for vanadiumpentoxid (V_2O_5) og ferrovanadium ($FeV-80$) i perioden 2000-2022. Kilde: Vanadiumprice.com (2023).



Figur 6-8 Vanadium og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvæksten som funktion af forsyningsrisikoen. Figuren er modificeret efter Clausen et al. (2023).

6.7 Perspektiver

EU Kommissionen har siden 2017 vurderet vanadium som et kritisk råstof for EU, og i vurderinger fra 2023 blev den økonomiske betydning vurderet til 3,9 og forsyningsrisici for ekstraktion (SRE) og processering (SRP) til henholdsvis 2,3 og 1,7 (EC 2023). Vurderingen af vanadium som et kritisk råstof deles med England, USA, Japan, Indien og Canada; Kina, som er verdens største producent, vurderer ikke vanadium som et kritisk råstof.

Udvinning af vanadium som både hoved- og biprodukt, og efterfølgende processering og fremstilling af vanadiumråvarer, er koncentreret i Kina, Rusland, Sydafrika og Brasilien, og kun meget små mængder produceres i andre lande; genanvendt vanadium bidrager med 6-12 %. Tilsvarende er produktionen koncentreret i relativt få selskaber, som er involveret i vanadiumproduktion i flere lande; blandt de største producenter er Pazhuhua New Steel & Vanadium Co, Evraz, Bushveld Minerals og Largo Resources. Forsyningskæderne for vanadium er således karakteriseret ved vertikale integrationer, som er beliggende i geopolitisk udfordrede lande, hvilket afspejles i EU's kritikalitetsvurderinger.

Der er generelt forventninger til en voksende efterspørgsel på vanadium til (i) Vanadium-Redox-Flow-Batterier (VRFB), som – bl.a. i Kina – forventes at installere som 100-800 MW stationære netopkoblede anlæg til opbevaring og forsyning af overskudsenergi fra sol- og vindmølleanlæg, og som frem mod 2030 planlægges udbygget med 1.000 GW nye anlæg; og (ii) til voksende produktion af vanadiumholdigt stål og vanadiumholdige kemikalier, der aftager ca. 92 % af vanadiumproduktionen. Til VRFB forbruges ca. 10 ton V_2O_5 /MWh (McGahan 2023). Frem mod 2030 vil forbruget til at realisere Kinas VRFB-planer i givet fald udgøre omkring 10 mio. ton V_2O_5 – svarende til et gennemsnitligt årligt forbrug på 1,4 mio. ton V_2O_5 , hvilket på ingen måde er realistisk. Andre vurderer, at forsyningerne i 2030 vil udgøre ca. 140.000 ton og den reelle efterspørgsel er ca. 180.000 ton (Largo 2023).

De store vækstforventninger i kombination med at (i) vanadiumproduktionen er baseret på bi-/co-produktion, og derfor er følsom overfor prisændringer på følgetmetallerne, og (ii) vanadiumproduktionen domineres af relativt få, vertikalt integrerede producenter, hvoriblandt kinesiske industrigrupper er de betydeligste forbrugere, bevirker, at vanadiummarkedet må anses for forsyningsudfordret frem mod 2030.

6.8 Referencer

Clausen, R. J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. & Vind, I. 2023: Dansk industris brug af mineralske råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/gpub/32051>

Critical Metal 2020: Vanadium Recovery and LiB Recycling. Annual General Meeting, Sept. 2020. Company ppt-presentation. <https://www.criticalmetals.eu/reports/110-201007-CMS-AGM-Presentation-Vanadium-Recovery-and-LiB-Recycling.pdf>

European Commission (EC) 2023: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1> Imtiaz, M., Rizwan, M.S., Xiong, S., Tu, M.S. (2015): Vanadium, recent advancements and research prospects: A review. Environment International 80 (44): 79-88.

Largo 2023: Capital 10x Deep dive report (<https://capital10x.com/wp-content/uploads/2022/12/Capital-10X-Deep-Dive-Largo-Inc.pdf> - visited 20 Nov. 2023)

- Lee, J-C., Kurniawan, Kim, E-Y., Chung, K-W., Kim, R. & Jeon, H-S. 2021: A review on the metallurgical recycling of vanadium from slags: towards a sustainable vanadium production. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol 12, May-Ju 2021, pp 343-364.
- Li, Y., Zhang, B., Liu, Z., Wang, S., Yao, J. & Bortwick, A.G.L. 2020: Vanadium contamination and associated health risk of farmland soil near smelters throughout China. *Environmental Pollution*, Vol 263, Part A, Aug. 2020, 114540.
- McGahan, S. 2023: Vanadium electrolyte: the 'fuel' for long-duration energy storage. *Energy Storage News* website <https://www.energy-storage.news/vanadium-electrolyte-the-fuel-for-long-duration-energy-storage/>
- Mining Review Africa 2023: Energy storage now the second largest consumer of vanadium. *Mining Review Africa* June 2, 2023. <https://www.miningreview.com/battery-metals/energy-storage-now-the-second-largest-consumer-of-vanadium/>
- Nasimifar, A. & Mehrabani, J.V. 2022: A review on the extraction of vanadium pentoxide from primary, secondary, and co-product sources. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. IJMGE 56-4 (2022) 366661-382.
- Observatory of Economic Complexity World (EOC World) 2023: Database <https://oec.world/>
- Perles, T. 2021: Vanadium Market Analysis. Ppt-presentation TTP Squared Inc. <https://www.ferro-alloy.com/en/vanadium/TTP%20Squared%20market%20summary%203%20April%202020.pdf>
- Petranikowa, M., Tkaczyk, A.H., Bartl, A., Lapkovskis, V. & Tunsu, C. 2020: Vanadium sustainability in the context of innovative recycling and sourcing development. *Waste Management*, Vol 113, July 2020, pp 521-544. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20301707>
- Sadeghi, N. & Alamdari, E.K. 2020: An innovative method for recycling vanadium and valuable materials from high-lime steelmaking slag disposal. *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol 18, 2597-2606.
- Screen2 Vanadium factsheet 2023: Screen2 factsheets updates based on the EU Factsheets 2020 vanadium. https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/03/SCREEN2_factsheets_VANADIUM.pdf
- Tan, J., Wehde, M.V. Frederik Brønd, F. & Kalvig, P. 2020: Udfordringer for bæredygtig genanvendelse af dansk jern- og metalkrot. *MiMa rapport 2020/2*. 194 pp. <https://doi.org/10.22008/gpub/32048>
- USGS 2000-2023: Mineral commodity summaries 2000-2023: U.S. Geological Survey <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>
- VanadiumCorp 2017: Process Technology. <https://www.vanadiumcorp.com/investors/what-is-vanadium/>. Company website visited Sept. 2023.
- Vanadiumprice 2023: <https://www.Vanadiumprice.com>
- Veram Project 2023: Nine New Critical Raw Materials. Website: <http://veram2050.eu/nine-new-critical-materials/>. Visited Sept. 2023.
- World Mining Data (WMD) 2022: Vol 37, 28 April 2022 <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>

7. Wolfram

7.1 Introduktion

Wolfram¹ (W), som er nummer 74 i det periodiske system, er et sølvgråt, hårdt, tungt og korrosionsbestandigt metal (19,3 g/cm³) med ekstremt højt smeltepunkt (3.410 °C) og højt kogepunkt (5.555 °C). Disse egenskaber gør wolfram egnet til en række produkter, som især efterspørges af industrier, der fremstiller transportmidler, udstyr til minedrift og anlægsopgaver, energianlæg og forsvarsmateriel.

Produktion af wolframprodukter er baseret på minedrift af wolframholdige mineraler, som udnyttes i mange lande, hvoraf Kina er helt dominerende, og Kina dominerer også produktion og handel med wolfram. Globalt blev der produceret ca. 85.000 ton wolframmineralkoncentrat i 2022 (USGS 2023). Der findes ingen opgørelser over den samlede årlige produktion af wolframmetalpulver, som er råmateriale til de fleste wolframprodukter, og andelen af genanvendt wolfram er også uafklaret. Wolframs vigtige industrielle betydning, koblet med Kinas dominans over forsyningskæderne, er årsag til, at en række lande betragter wolfram som et kritisk råstof, heriblandt EU (EC 2023).

7.2 Anvendelser og sektorer

Wolfram anvendes især i følgende fire industrielle sammenhænge:

Hårdmetal/karbid: Som wolframkarbid (WC), der er et materiale med en hårdhed lidt mindre end diamant. Da wolframkarbid både er hårdt, har høj styrke og kan kombineres med metalliske legeringsbindemidler, som kobolt, nikkel, og jern, anvendes det især til fremstilling af skære- og mineprodukter såsom bor, skæringsværktøjer og fræsere; dette område forbruger ca. 2/3 af produktionen.

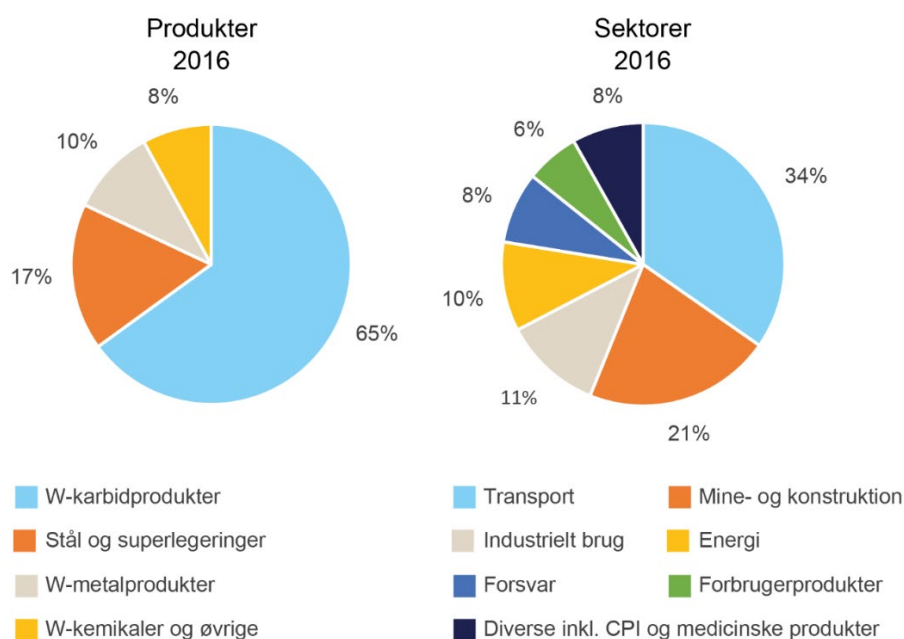
Legeringsmetal: Wolfram anvendes både som rent metal eller blandes med andre metaller til fremstilling af legeringer. Da wolframlegeringer er stærke og fleksible, resistente overfor slid og korrosion og er gode elektriske ledere, bruges de bl.a. til wolframstållegeringer til produktion af raketmotordyser, i turbineblade og slidbestandige dele og belægninger. Til visse ståltyper kan wolframindholdet udgøre op til 18 %.

Elektronik: Wolfram har et højt smeltepunkt (3.410 °C) og lavt damptryk, og bruges derfor i højtemperaturapplikationer såsom pærer, katodestrålerør og vakuumrørsfilamenter. På grund af wolframs ledende egenskaber, og da det ikke er kemisk reaktivt, bruges det også i elektroder i fx elektronmikroskoper. Herudover gør wolframs tolerance over for intens varme det anvendeligt indenfor elektronik, som fx sammenkoblingsmateriale i integrerede kredsløb mellem det dielektriske siliciumdioxidmateriale og transistorer.

Kemikalier: Wolframkemikalier anvendes i form af wolframoxider, wolframater, wolframsyre, silicowolframsyre, phosphowolframsyre eller wolframsulfider. Disse kemikalier bruges i olie- og smøremidler, minedrift, elektronik og medicinsk industri osv., samt som katalysatorer til afsvoevling i kulfyrede kraftværker.

Fordelingen mellem ovennævnte anvendelser er illustreret i Figur 7-1, som desuden viser, hvilke industrier der anvender disse produkter.

¹ Wolfram hedder tungsten på engelsk.



Figur 7-1 Fordeling af wolfram i forhold til produkttyper og industriel anvendelse; data fra 2016. Kilde: Zeiler et al. (2023).

7.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder

Genanvendt wolfram fra både nyskrot og end-use skrot udgør et betydeligt bidrag til det globale wolframforbrug. EoL-RR udgør ca. 30 % (Zeiler et al., 2021); mængderne af W-skrot forventes at øges med ca. 8 % pr. år (Asian Metal 2023). Tang et al. (2020) estimerer, at genanvendelsen i Kina kun er ca. 10 %.

Til visse formål kan wolfram substitueres med andre metaller; dette er tilfældet for fx wolframkarbid til skæreredskeer, her kan wolframkarbid substitueres med bornitrid, som har nogenlunde samme egenskaber. Til visse formål kan molybdæn og nikkel substituere wolfram i stål (Graedel et al. 2013). EC (2023) har estimeret EU's substitutionsindeks, SI-SR og SI-EI, til henholdsvis 0,86 og 0,82.

7.4 Global forsyning

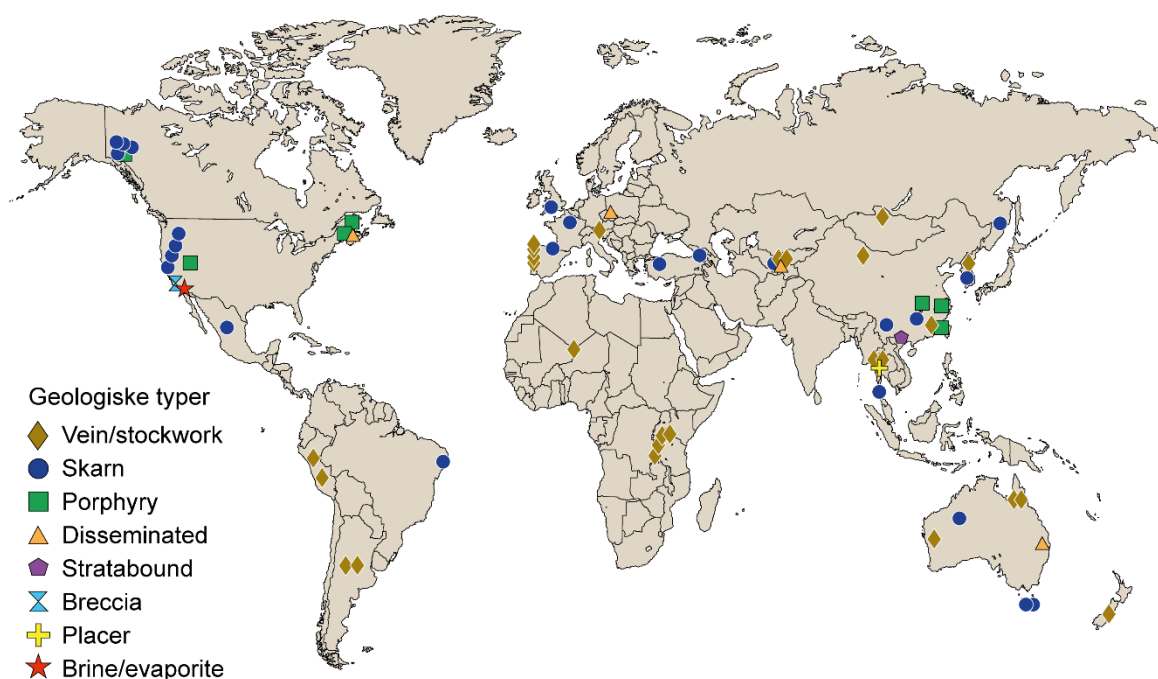
7.4.1 Geologi

Wolfram findes i en række forskellige geologiske miljøer, hvor malmen almindeligvis også indeholder andre økonomisk vigtige metaller. De vigtigste forekomsttyper er:

- Årer, dannet hvor metalholdige fluider er trængt ind i sprækker, ofte i granitiske bjergarter; wolframit er det dominerende wolframmineral og typiske biprodukter er tin, kobber, molybdæn. Wolframindholdet varierer typisk mellem 0,5-5 % WO_3 . Eksempler i Europa: Panasqueira, Portugal og San Fix, Spanien.
- Skarn-forekomster, hvor wolfram sammen med andre metaller er udfældet i karbonatbjergarter; scheelit er det dominerende wolframmineral og typiske biprodukter er kobber, molybdæn, zink og bismut. Lødheden varierer, men er typisk 0,3-1 % WO_3 . Eksempel i Europa: Los Santos, Spanien.

- Porfyrføremøster, dannet i tilknytning til subduktionszoner, wolfram findes i både scheelit og wolframit; typiske biprodukter er molybdæn, bismuth og tin. Lødheder er typisk 0,1-0,3 % WO₃. Eksempel i Europa: Mittersill, Østrig.
- Tungandsføremøster/placers, hvor wolfram findes både i form af scheelit og wolframit, typisk findes der desuden mineraler indeholdende tin, kobber, molybdæn, bismut og guld.

Wolframressourcerne i verden er knyttet til foldebælterne i det sydlige Kina, Thailand, Myanmar Sydkorea og Japan samt i det sydlige Sibirien, Kasakhstan, Usbekistan, Kirgisistan og Kaukasus, i det østlige Australien, i det vestlige Canada, USA, Bolivia og Peru, og i Europa i et bælte fra Tyskland og Tjekkiet gennem Frankrig, Spanien og Portugal (Figur 7-2).



Figur 7-2 Oversigt over nogle af de største geologiske føremøster af wolfram, fordelt på type. Kilde: Han et al. (2021). Mineraler og biprodukter

Der kendes mere end 30 wolframholdige mineraler, men kun scheelit (CaWO₄) og wolframit (Fe,Mn)WO₄ anses som kommercielle. Wolframmineraliseringer optræder i mange forskellige geologiske miljøer, som er retningsgivende for, hvilke wolframmineraler der findes og for biproduktpotentialer. De vigtige geologiske typer og mineraliseringer er anført i Tabel 7-1.

Tabel 7-1 Typiske wolframmineraler, lødheder og potentielle biprodukter fordelt for nogle af de vigtigste geologiske typer med wolfram.

| Geologisk type | Lødheder (WO ₃ %) | Wolframmineral | Kemisk formel | Biproduktpotentialer |
|----------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| Skarn/greisen | 0,3-1,4 | Scheelit | CaWO ₄ | Cu, Mo, Zn, Bi |
| Årer | varierende | Wolframit | (Fe,Mn)WO ₄ | Sn, Cu, Mo, Bi, Au |
| Porfyr | 0,1-0,4 | Wolframit+/- scheelit | (Fe,Mn)WO ₄ + CaWO ₄ | Mo, Bi, Sn |
| Pegmatit | 0,5-0,8 | Scheelit +/- wolframit | CaWO ₄ + (Fe,Mn)WO ₄ | Li, Be, Nb, Ta, REE, Sn |
| Placer | <0,5 | Wolframit+scheelit | (Fe,Mn)WO ₄ + CaWO ₄ | Sn, Cu, Mo, Bi, Au |

7.4.2 Globale wolframreserver

Der findes forskellige opgørelser over de globale reserver og ressourcer. USGS (2023) anslår de globale wolframreserver til ca. 3,4 Mt WO₃, hvoraf Kina råder over næsten halvdelen (1,8 Mt), Rusland ca. 400.000 ton og Vietnam 95.000 ton; i EU er der indberettet ca. 70.000 ton (Østrig, Portugal og Spanien). Herudover er der opgjort 1,4 Mt fordelt på en række øvrige lande, heriblandt Australien, Nordkorea og Vietnam. Hughes (2020) anslår i en opgørelse fra 2018, at Australiens ressourcer er ca. 400.000 ton WO₃ og Ruslands ca. 240.000 ton WO₃. Wolframreserverne blev for 2010 og 2020 opgjort til henholdsvis 1,9 Mt og 2,9 Mt (USGS 2001, 2011), hvoraf hovedparten af stigningerne, i lighed med stigningerne fra de seneste 10 år, er relateret til Kina (Tabel 7-2). Men opgørelserne er meget usikre, da branchen kun frigiver meget begrænset information. Reserveopgørelserne indeholder ikke oplysninger om forekomststypen, men på baggrund af Han *et al.* (2012) vurderes reserverne til at være domineret af scheelit knyttet til typerne årer og skarn. Det er derfor ikke muligt at foretage en retvisende opgørelse over de globale ressourcer, og dermed kan reservernes levetid ikke estimeres.

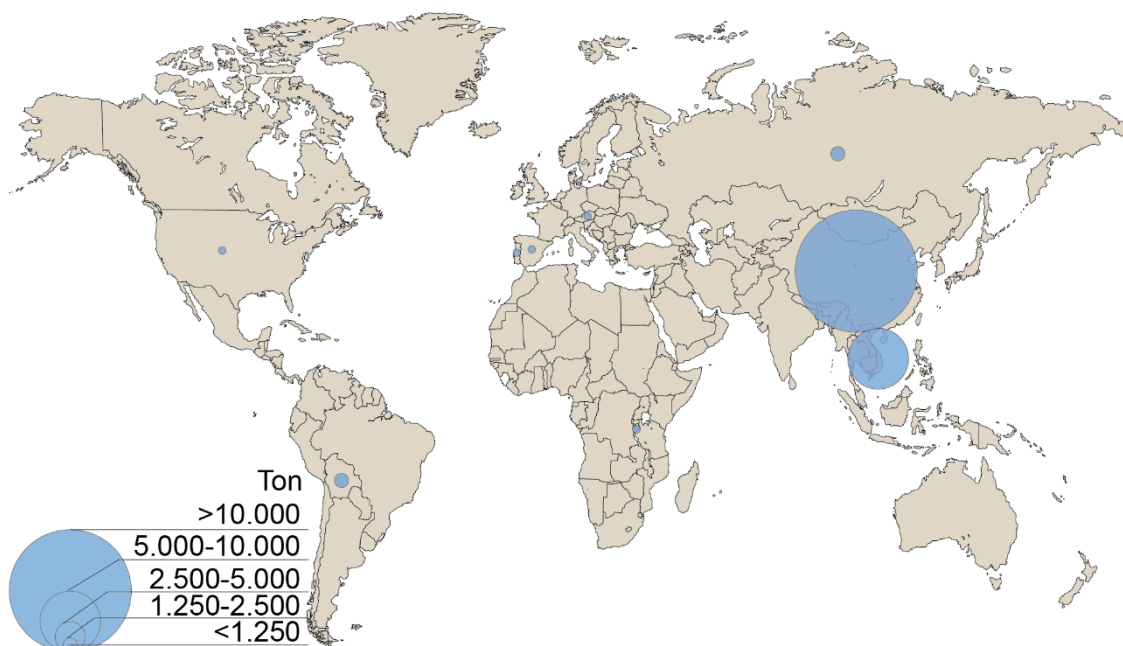
Tabel 7-2 Verdens wolframreserver i ton WO₃ 2001, 2010 og 2022 opgjort på 14 lande og kategorien 'øvrige'. Kilder: USGS (2001, 2011, 2023).

| Land | 2001 | 2010 | 2022 |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| USA | 140.000 | 140.000 | |
| Australien | 1.000 | | |
| Østrig | 10.000 | 10.000 | 10.000 |
| Bolivia | 53.000 | 53.000 | |
| Brasilien | 20.000 | | |
| Myanmar | 15.000 | | |
| Canada | 260.000 | 120.000 | |
| Kina | 820.000 | 1.900.000 | 1.800.000 |
| Portugal | 25.000 | 4.200 | 3.100 |
| Rusland | 250.000 | 250.000 | 400.000 |
| Spanien | | | 56.000 |
| Syd Korea | 58.000 | | |
| Thailand | 30.000 | | |
| Vietnam | | | 100.000 |
| Andre | 300.000 | 400.000 | 1.400.000 |
| Total | 1.982.000 | 2.877.200 | 3.769.100 |

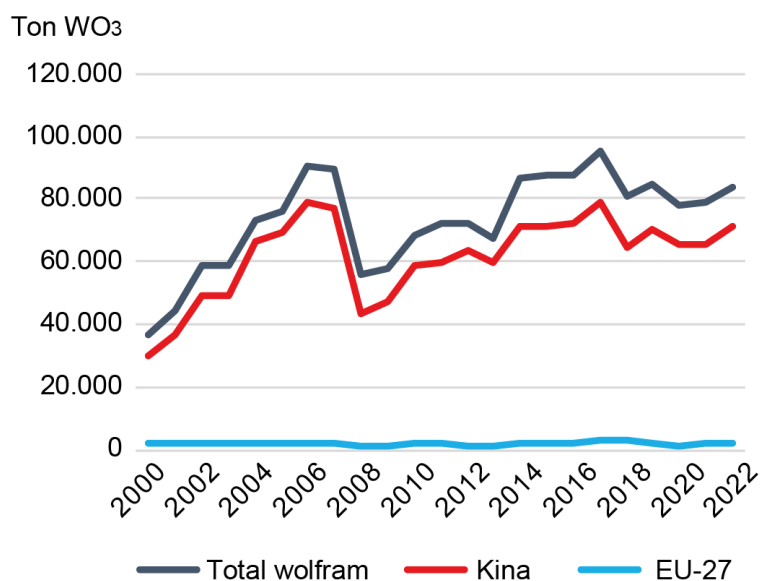
7.4.3 Global wolframproduktion

De seneste 22 års primærproduktion af wolfram fra minedrift afspejler den globale økonomiske udvikling og Kinas industrialiseringsstrategi; i mere end 20 år har Kina været den dominerende producent af wolfram i alle dele af værdikæderne og primærproduktionen af wolfram; EU har i samme periode været en marginal producent (Figur 7-3 og Tabel 7-3). Kina indførte i 2014 produktionskvoter for wolfram; produktionskvoten for 2023 tillader en produktion på 110.000 ton WO₃ produceret i Kina, hvilket er mere end den samlede produktion i Verden (Figur 7-4).

Minedrift af wolframminerale foregår både fra åbne og underjordiske miner, samt fra løse aflejringer (tungsandsforekomster).



Figur 7-3 Oversigt over de ti lande som udvinder mest wolfram (data fra Tabel 1-4).



Figur 7-4 Oversigt over historisk produktion af wolfram (WO₃) i perioden 2000-2022. Kilde: USGS (2000-2023).

7.4.3.1 Selskaber med aktiviteter i produktion og forarbejdning af wolfram

Der er kun begrænset information om primærproduktion af wolfram og om de største producenters bidrag i forsyningskæderne. I Tabel 7-4 ses en oversigt over store miner, som bryder wolfram som enten hoved- eller biprodukt, og i Tabel 7-5 ses tilsvarende en liste over efterforsknings- og produktionsprojekter med wolfram; begge er sammensat på grundlag af offentligt tilgængelige informationer og er ufuldstændige. Tabel 7-6 er en ufuldstændig oversigt over selskaber, som er involveret i værdikæderne af wolframprodukter.

Tabel 7-3 Wolframproduktion i ton. Kilder: USGS (2023) og WMD (2023).

| Produktionsland | 2022 (USGS) | 2020 (WMD) |
|-----------------|-------------|------------|
| Kina | 71.000 | 71.450 |
| Vietnam | 4.800 | 8.066 |
| Rusland | 2.300 | 2.274 |
| Bolivia | 1.400 | 1.347 |
| Rwanda | 1.100 | 1.075 |
| Østrig | 900 | 896 |
| Spanien | 700 | 400 |
| Portugal | 500 | 553 |
| USA | n.a. | n.a. |
| Øvrige | 1.400 | 1.446 |
| Total | 84.100 | 87.507 |

Tabel 7-4 Oversigt over store miner, som bryder wolfram som enten hoved- eller biprodukt. Ikke-komplet oversigt.

| Mine | Land | Ejer |
|------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------|
| King Island | Australien | Group 6 Metals |
| Kara Mine | Australien | Tasmania Mines Pty |
| Chojillia Mine | Bolivia | Comibol |
| Tasna | Bolivia | Comibol |
| Juan Tungsten Mine | Bolivia | Comibol |
| Xi'an Huashan | Kina | ChongYiZhangYuan Tungsten Group |
| Lianhuashan (Guangdong) | Kina | |
| Shizhuyuan (Hunan) | Kina | Hu Nan Shizhuyuan Non-ferrous Metal Ltd Corp. |
| Yaogangxian Tungsten Mine, Yizhang County, Chenzhou, Hunan | Kina | China Tungsten & High-tech Material Co. Ltd |
| Panasqueira | Portugal | Almonty Industries |
| Kordonnoe | Rusland | Primosky GOK |
| Novoorlovsky Mine | Rusland | |
| Vostok-2 | Rusland | Primosky GOK |
| Musha Ntungwa Mines | Rwanda | Trinity Metals Ltd |
| Rutongo Mines | Rwanda | Trinity Metals Ltd |
| Nakabingo | Rwanda | Trinity Metals Ltd |
| Los Santos mine (care & maint) | Spanien | Almonty Industries |
| Okbang | Sydkorea | |
| Sangdong | Sydkorea | Jinheung Mining Company/Almonty Industries |
| Climax | USA | Freeport-McMoRan Copper & Gold |
| Nui Phao | Vietnam | Masan Resources |
| Mittersill | Østrig | Wolfram Bergbaquou und Hütten AG |

Tabel 7-5 Ufuldstændig oversigt over efterforsknings- og produktionsprojekter. Dolphin W og Hemerdon Mine er under etablering.

| Projekt | Land | Ejer – hovedselskab | Geologisk type | Res- source | Lødighed (WO ₃ %) |
|-----------------------|------------|--------------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| Dolphin W-project | Australien | King Island Scheelite / Almonty Industries | Skarn | - | - |
| Hemerdon Mine | England | Tungsten West | Skarn | 26,7 Mt | 0,19 |
| Big Hill project | Australien | Tungsten Mining | Åre | - | - |
| Hatches Creek | Australien | Tungsten Mining | Åre | - | - |
| Kilba project | Australien | Tungsten Mining | Skarn | 5 Mt | 0,27 |
| Molyhil Tungsten | Australien | Thor Mining | Skarn | 9 kton | - |
| Mount Carbine | Australien | Icon Resources | Åre | - | - |
| Mount Mulgine project | Australien | Tungsten Mining | Åre | 145 kton | - |
| Watershed W project | Australien | Vital Metals/ Tungsten Mining | Skarn | - | - |
| Dublin Gulch | Canada | Victoria Gold Corp | Skarn | - | - |
| Dungarvon | Canada | Geodex Minerals Ltd | Åre | - | - |
| Mt Pleasant | Canada | Adex Mining Inc | Porfyr | 14,4 Mt | 0,26 |
| Sisson W-Mo - project | Canada | Northcliff Resources | Porfyr | - | - |
| Remoor | England | Strategic Minerals Plc | Åre | - | - |
| Xingluokeng (Fujian) | Kina | | Porfyr | 142 kton | - |
| Heinze Basin | Myanmar | n.a. | Placer | - | - |
| North Osterdalen | Norge | Playfair Mining Ltd | | - | - |
| Folldal | Norge | Playfair Mining Ltd | Skarn | - | - |
| RKV | Norge | Playfair Mining Ltd | | - | - |
| Barruecopardo | Spanien | Ormonde Mining | Åre | 8,7 Mt | 0,3 |
| Valteixal | Spanien | Almonty Industries | Skarn | 2,5 Mt | 0,34 |

7.4.4 Fremstilling af wolfram

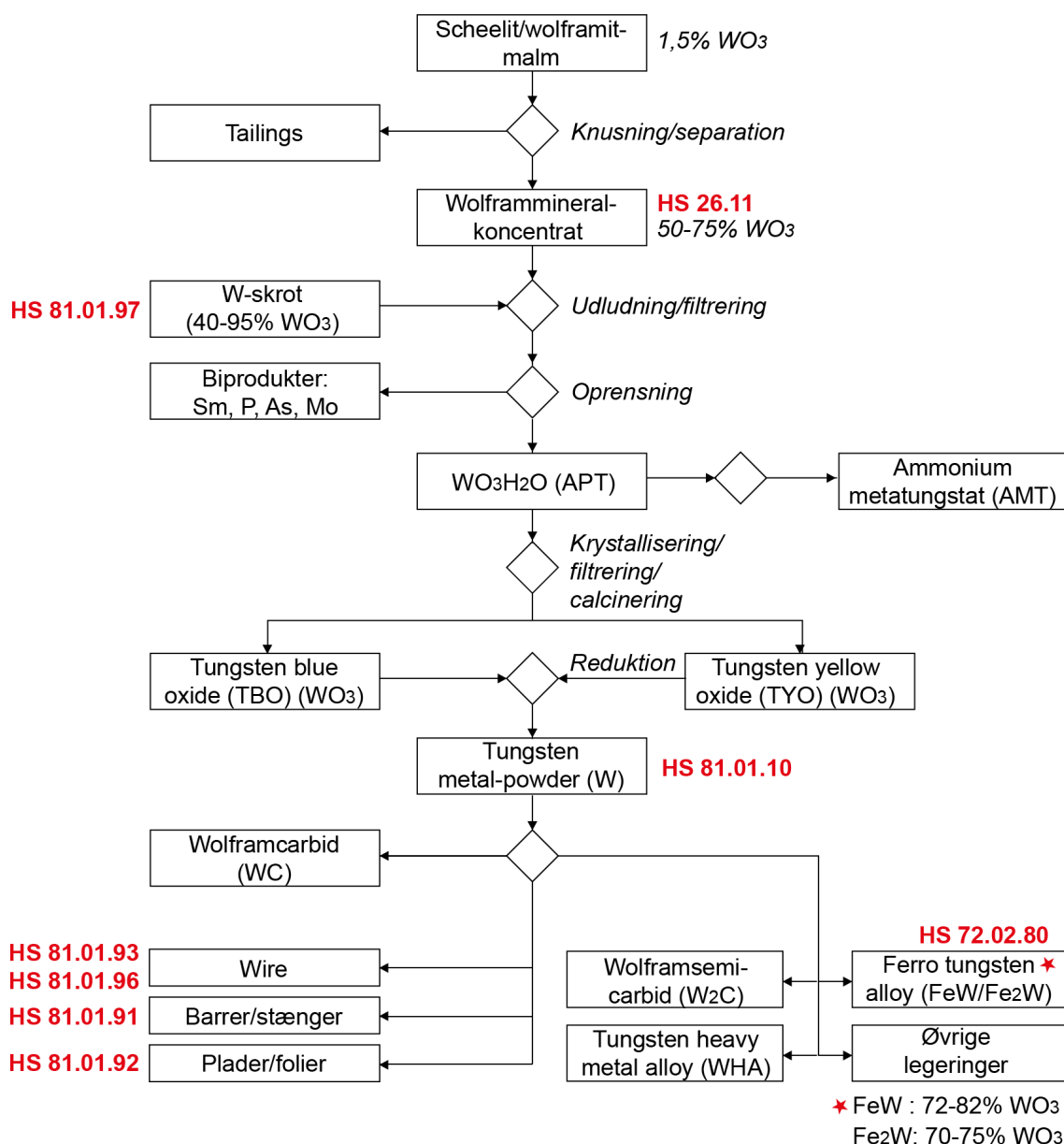
Processering af wolframmalm tilrettelægges i forhold til, om malmen domineres af wolframit eller scheelit samt i forhold til eventuelle biprodukter; typisk tin, kobber, molybdæn, zink, bismut og guld, som sidder i selvstændige mineraler. Typisk omfatter behandlingen knusning, formaling og efterfølgende separation (baseret på gravimetri), flotation, magnet og/eller elektrostatiske separation, hvorefter slutproduktet typisk er et mineralkoncentrat indeholdende 50-75 % WO₃. Mineralkoncentratet kan både anvendes direkte i stålindustrien og som råstof til fremstilling af wolframmetalpulver (TMP); de fleste produktioner involverer udludning og fremstilling af ammoniumparatungstat (APT), hvoraf noget bruges til fremstilling af ammoniummetatungstat (AMT), mens resten anvendes til fremstilling af wolframmetalpulver, som er råvarer til langt de fleste kommercielle wolframprodukter, herunder karbider, legeringer og udstøbte/valsede produkter (Figur 7-5). Leal-Ayala *et al.* (2015) anslår, at ca. 73 % af wolframmineralkoncentratet anvendes til fremstilling af TMP, og af dette anvendes ca. 70 % til fremstilling af wolframkarbider. Til fremstilling af 1 ton wolframkarbid forbruges ca. 2 ton wolframmineralkoncentrat; hovedparten af tabet ligger i processen til fremstilling af APT.

Table 7-6 Oversigt over større virksomheder involveret i fremstilling af wolframprodukter. Ufuldstændig liste.

| Selskab | Land | Selskab | Land |
|--------------------------------------------|------------|--------------------------------------------|-----------|
| Group 6 Metals Ltd | Australien | Zhuzhou Cemented Carbide Group Corp Ltd | Kina |
| Tungsten Metals Group Ltd | Australien | Zigong Cemented Carbide Co Ltd | Kina |
| Tungsten Mining NL | Australien | OC Oerlikon Corp | Schweiz |
| Venture Minerals Ltd | Australien | Saloro SLU | Spanien |
| Eurotungstene | Belgien | Sandvik Group | Sverige |
| Umicore N.V | Belgien | Taegu Tec Ltd | Syd Korea |
| Fireweed Metals Ltd | Canada | Lianyou Metals Co Ltd | Taiwan |
| OMCD SpA | Italien | Betek GmbH & Co KG | Tyskland |
| Advanced Material Japan Corp | Japan | Cronimet Ferroleq GmbH | Tyskland |
| ALMT Corp | Japan | Grondmet GmbH & Co Kg | Tyskland |
| Hitachi Metals | Japan | HC Starck Tungsten GmbH | Tyskland |
| Japan New Metals | Japan | Stadler Metalle eK – Handel & Aufbereitung | Tyskland |
| Kohsei Co Ltd - Kitakyushu Plant | Japan | American Elements | USA |
| Mitsubishi Materials Corp | Japan | Buffalo Tungsten Inc | USA |
| Sumitomo Corp | Japan | Extramet products LLC | USA |
| CERATIZIT | Kina | Federal Carbide Comp | USA |
| China Minmetals Non-Ferrous Metals Co | Kina | Global Tungsten & Powders | USA |
| China Tungsten & Hightech Materials Co Ltd | Kina | Greystone Alloys Inc | USA |
| Chongyi Zhangyuan Tungsten Co Ltd | Kina | Hyperion Materials & Technologies USA LLC | USA |
| Guangdong Xianglu Tungsten Co Ltd | Kina | Kennametal Inc | USA |
| Jiangxi Tungsten Holding Group Co Ltd | Kina | Mi-Tech Tungsten Metals LLC | USA |
| Jiangxi Yaosheng Tungsten | Kina | Tungco Inc | USA |
| Nanchang Cemented Carbide Ltd Co | Kina | Masan High-Tech Materials | Vietnam |
| Xiamen Tungsten Co | Kina | Wolfram Bergbau-und Hutten AG | Østrig |

7.4.5 Klima- og miljøpåvirkning

Hovedparten af det samlede energiforbrug til fremstilling af wolframkarbid fra et wolframmineral-koncentrat forbruges i procestrinene fra ATP til WC (wolframkarbid) (via WO_3 og W). Det er estimeret, at det samlede energiforbrug udgør 16 MWh/ton wolframkarbid; der arbejdes på at ændre processen til en karbotermisk reduktionsproces af mineral-koncentratet, hvorved det forventes, at energiforbruget kan reduceres med ca. 50 %. Den foreslåede direkte metode vil desuden reducere CO_2 udslippet med ca. 30 % samt reducere materialetab og udslip af miljøfarlige spildstrømme (Polini *et al.* 2021). Til fremstilling af 1 ton wolframkarbid anvendes ca. 117 m³ vand, som helt overvejende bruges i de hydrometallurgiske processer af mineral-koncentrater til fremstilling af ATP; som resultat af disse processer dannes der næsten 1 ton miljøfarligt affald pr. ton wolframkarbid.



Figur 7-5 Generisk procesdiagram for fremstilling af wolfram, med angivelse af udvalgte handelsvarekoder (HS-koder) for hel- og halvfærdige produkter Baseret på bl.a. Leal-Ayala et al. (2010).

7.5 Handel

Wolfram handles i en lang række forskellige former, bl.a. de allerede nævnte produkter/halvfabrikata som APT, ATM samt wolframmetalpulver (W) og wolframcarbide (WC), wolframtrioxide (WO_3), Tungsten Blue Oxide (TBO), ferrowolfram (FeW og Fe_2W). De alsidige produkter er afspejlet i komplekse handelsmønstre, som foregår enten via bilaterale aftaler direkte mellem de primære producenter, sekundære forarbejdningsvirksomheder og tertiære producenter eller via forhandlere (Keiding 2014). Handel med wolfram omfatter især hovedgrupperne wolframmalm (HS 26.01) og Wolfram og artikler heraf (HS81.01), som i 2020 udgjorde henholdsvis 217 mio. USD og 1.240 mio. USD (Tabel 7-7). Ingen af varegrupperne omfatter specifikt semiprodukterne APT og ATM, som er kommercielle produkter, og som danner grundlag for prissætninger.

Rwanda, Rusland, Bolivia, Myanmar og Portugal er de største eksportlande med wolframmalm (HS 26.11), og Kina importerer mest (Tabel 7-8 og Figur 7-6). I Europa importerer særligt Østrig og Holland wolframmalm, hvoraf en del importeres fra Rusland. Vietnams angiveligt betydelige produktion af wolframmalm resulterer ikke i eksport af de mest almindelige wolframvarer. Ingen af de tre største eksportlande af wolframmalm synes at eksportere forarbejdede wolframråvarer; der er dog et betydeligt sammenfald med at de lande, der importerer wolframmalm, også er de lande, der eksporterer wolframpulver (HS 81.02.10). Det gælder eksempelvis Kina, som desuden har stor egenproduktion af wolframmalm, samt USA og Østrig, mens råstofferne oprindelse til Tjekkiets eksport af wolframpulver ikke er klar (Tabel 7-9 og Figur 7-7). Der er en ret betydelig international handel med wolframskrot (HS 81.01.97), med Tyskland som det helt dominerende eksportland, suppleret af Japan, USA og Kina; handelsmønstret for denne handel viser, at der er en del lande, som både importerer og eksporterer skrot, fx USA, Tyskland og Kina (Tabel 7-12 og Figur 7-8).

Tabel 7-7 Oversigt over handlede produkter af wolfram med angivelse af handelsværdi og varekode. Kilde: OEC World (2023).

| HS4 | Varer | Eksport (mio. USD) | HS6 | Varekodebeskrivelse | Eksport (mio. USD) |
|-------|--------------|--------------------|----------|----------------------------------------------|--------------------|
| 26.11 | Wolfram malm | 217 | 26.11.00 | Wolframmalm og -koncentrater | 217 |
| 81.01 | Wolfram | 1.240 | 81.01.10 | Pulvere | 237 |
| | | | 81.01.91 | Ubehandlet wolfram; simpelt sintret | 477 |
| | | | 81.02.92 | Profiler, folier, simpelt sintret | - |
| | | | 81.01.93 | Wire | 111 |
| | | | 81.01.94 | Ubehandlet, stænger og bare; simpelt sintret | 109 |
| | | | 81.01.95 | Barrer og stænger | - |
| | | | 81.01.96 | Wire | 114 |
| | | | 81.01.97 | Waste and scrap | 392 |
| | | | 81.01.99 | Artikler | 416 |
| | | | 85.39.21 | Filament | 1.510 |

Tabel 7-8 De vigtigste eksport- og importlande for wolframmalm og -koncentrat (HS6 26.11.00) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Rwanda | 52 | Singapore | 14 |
| | | For. Arab. Emirater | 12 |
| | | Hong Kong | 11 |
| | | Luxembourg | 7 |
| | | Kina | 6 |
| Rusland | 34 | Østrig | 12 |
| | | Holland | 11 |
| | | Kina | 4 |
| | | USA | 4 |
| | | Sydkorea | 1 |
| Bolivia | 32 | USA | 14 |
| | | Kina | 11 |
| | | Holland | 3 |
| | | Østrig | 2 |
| | | Canada | 1 |
| Myanmar | 18 | Kina | 16 |
| | | Vietnam | 2 |
| Portugal | 14 | USA | 10 |
| | | Østrig | 4 |
| Subtotal | 149 | | |
| Øvrige | 67 | | |
| Total | 217 | | |

Tabel 7-9 De vigtigste eksport- og importlande for wolframpulver (HS6 81.01.10) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Kina | 72 | Sydkorea | 35 |
| | | USA | 13 |
| | | Japan | 11 |
| | | Canada | 3 |
| | | Nigeria | 2 |
| | | | |
| Tjekkiet | 30 | Østrig | 12 |
| | | Frankrig | 6 |
| | | Polen | 5 |
| | | Tyskland | 3 |
| | | Finland | 2 |
| | | | |
| USA | 28 | Canada | 18 |
| | | Tyskland | 2 |
| | | Mexico | 1 |
| | | Sydafrika | 1 |
| | | Holland | 1 |
| Østrig | 26 | Tyskland | 15 |
| | | USA | 6 |
| | | Frankrig | 2 |
| | | Italien | 1 |
| | | Tjekkiet | 0 |
| Canada | 15 | USA | 11 |
| | | Tyskland | 2 |
| | | Australien | 1 |
| | | Kina | 1 |
| Subtotal | 171 | | |
| Øvrige | 66 | | |
| Total | 237 | | |

Tabel 7-10 De vigtigste eksport- og importlande for wolfram og artikler heraf (HS4 81.01) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

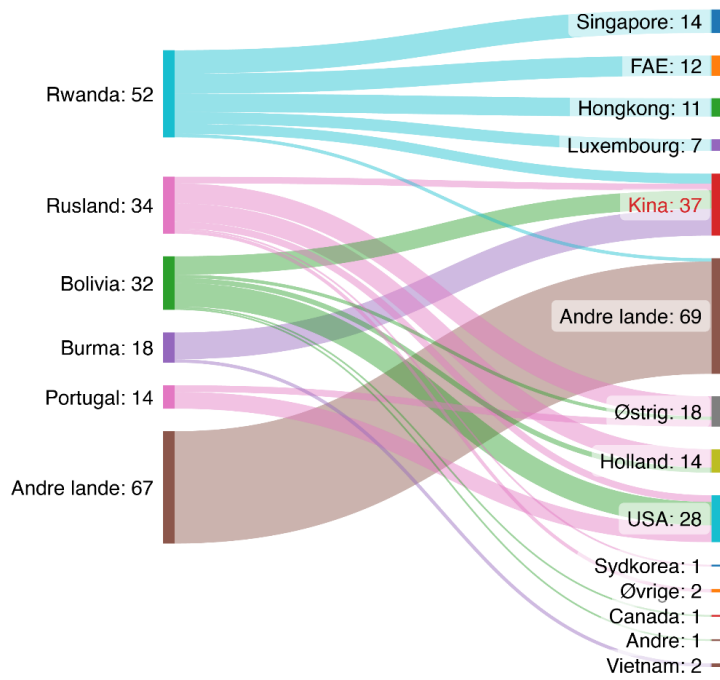
| Eksportlande | Eksportværdi (mio. USD) | Importlande | Importværdi (mio. USD) |
|--------------|-------------------------|-------------|------------------------|
| Kina | 333 | USA | 207 |
| Tyskland | 194 | Tyskland | 149 |
| USA | 111 | Japan | 109 |
| Japan | 110 | Østrig | 103 |
| Østrig | 68 | Sydkorea | 78 |
| Subtotal | 816 | | |
| Øvrige | 425 | | |
| Total | 1.241 | | |

Tabel 7-11 De vigtigste eksport- og importlande for wolframfilamenter (HS6 85.39.21) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

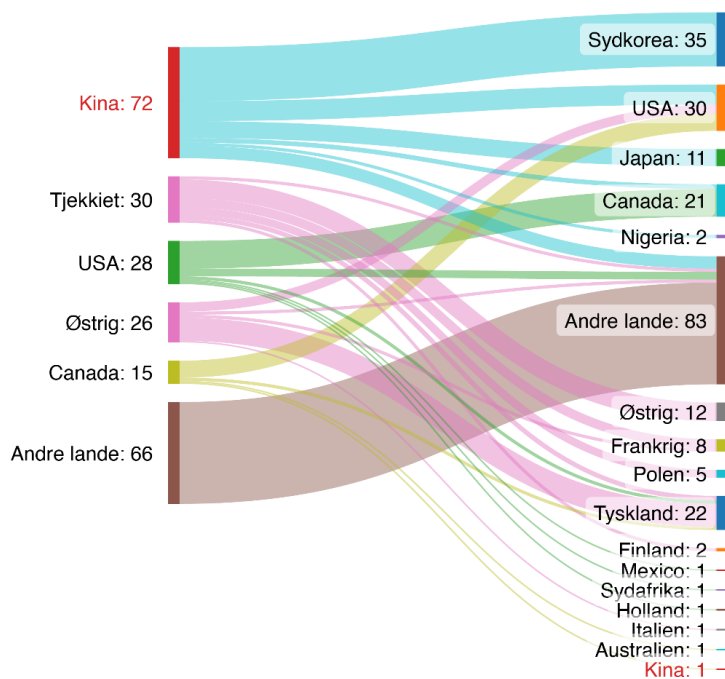
| Eksportlande | Eksportværdi (mio. USD) | Importlande | Importværdi (mio. USD) |
|--------------|-------------------------|-------------|------------------------|
| Kina | 455 | USA | 299 |
| Tyskland | 357 | Tyskland | 128 |
| Polen | 80 | Polen | 80 |
| Japan | 80 | Frankrig | 72 |
| USA | 67 | Kina | 50 |
| Subtotal | 1.039 | | |
| Øvrige | 469 | | |
| Total | 1.508 | | |

Tabel 7-12 De vigtigste eksport- og importlande for wolframskrot (HS6 81.01.97) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

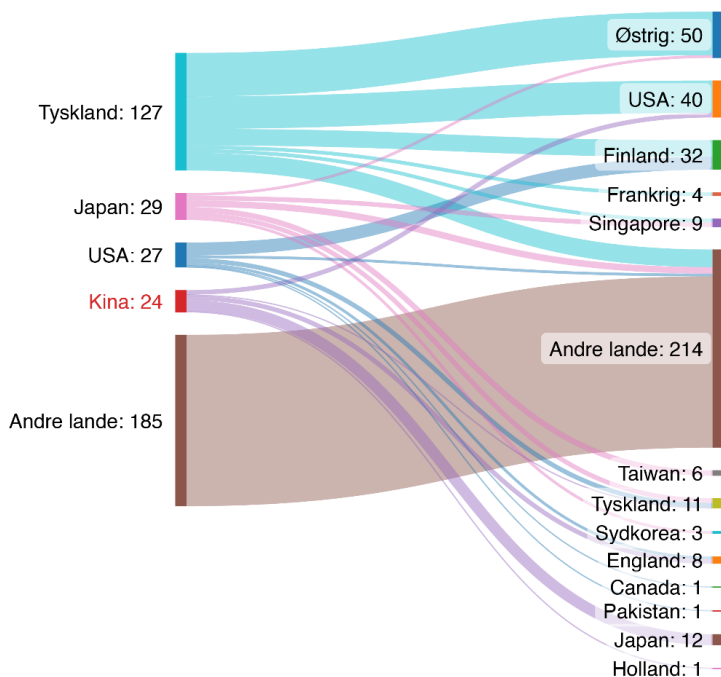
| Eksportlande | Eksportværdi (mio. USD) | Importlande | Importværdi (mio. USD) |
|--------------|-------------------------|-------------|------------------------|
| Tyskland | 127 | Østrig | 47 |
| | | USA | 35 |
| | | Finland | 18 |
| | | Frankrig | 4 |
| | | Singapore | 4 |
| Japan | 29 | Taiwan | 6 |
| | | Tyskland | 5 |
| | | Singapore | 5 |
| | | Sydkorea | 3 |
| | | Østrig | 3 |
| USA | 27 | Finland | 14 |
| | | Tyskland | 5 |
| | | England | 3 |
| | | Canada | 1 |
| | | Pakistan | 1 |
| Kina | 24 | Japan | 12 |
| | | England | 5 |
| | | USA | 5 |
| | | Tyskland | 1 |
| | | Holland | 1 |
| Subtotal | 207 | | |
| Øvrige | 185 | | |
| Total | 392 | | |



Figur 7-6 Sankey-diagram for global handel med wolframalm (HS4 26.11) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 7-8.



Figur 7-7 Sankey-diagram for global handel med wolframpulver (HS6 81.01.10) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 7-9.



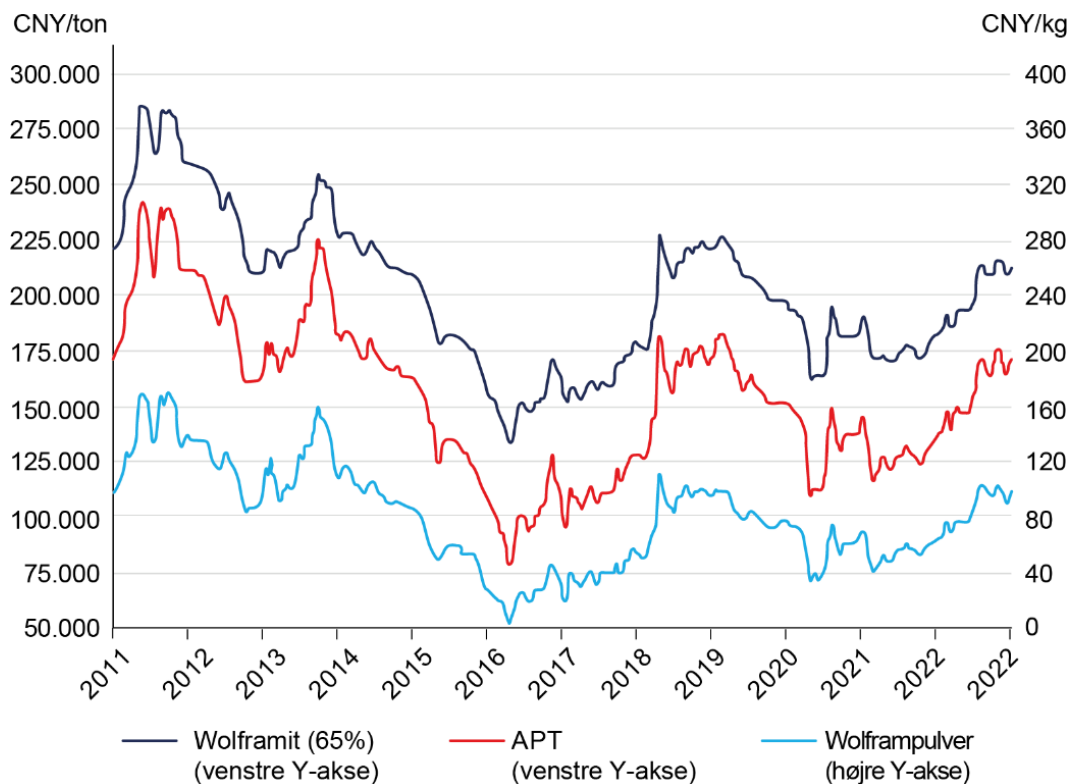
Figur 7-8 Sankey-diagram for global handel med wolframskrot (HS6 81.01.97) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på data fra Tabel 7-12.

7.5.1 Priser

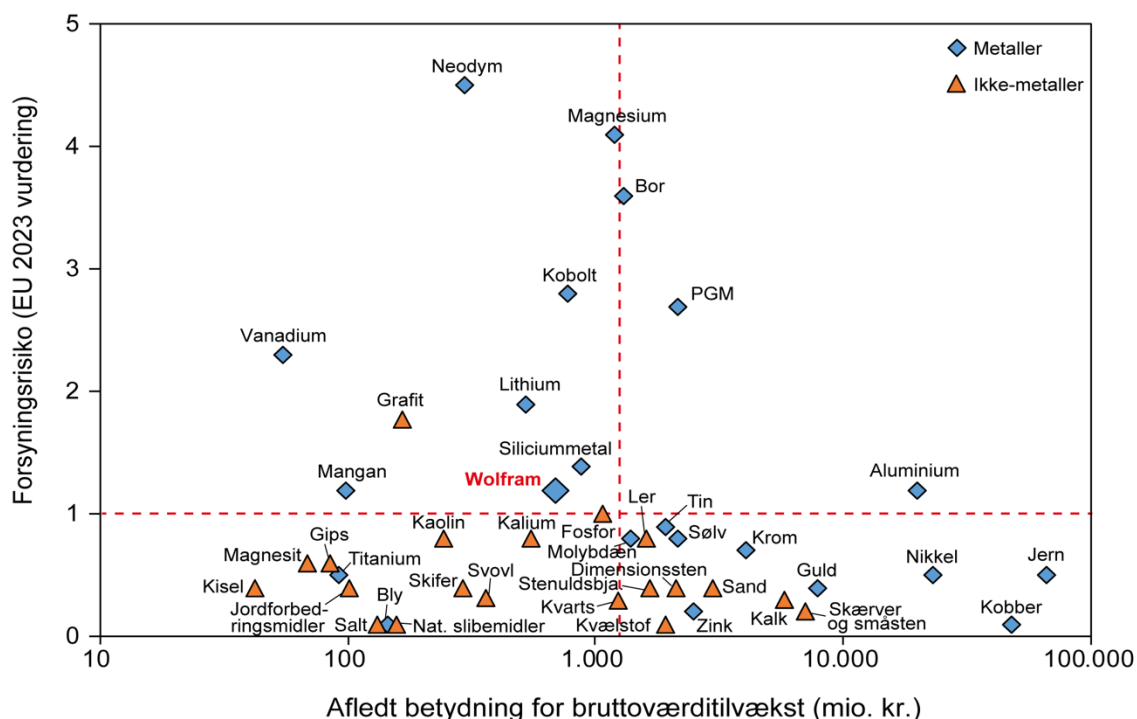
Wolfram, i form af mineralkoncentrat (scheelit og/eller wolframit) ($65\% \text{WO}_3$), APT og wolframkarbid handles på kinesiske børser, og prisændringer er afspejlet i alle tre produkttyper. Prisudviklingen for alle tre produkter har siden 2000 haft en stigende tendens, dog med et markant fald i 2016-2017. Siden 2020 har priserne været stigende som følge af voksende efterspørgsel, Kinas kvoteordninger for wolframproduktion og -eksport samt øgede miljøforanstaltninger og COVID-19. Analytikere forventer fortsatte prisstigninger i 2024. Det skal bemærkes, at prisudviklingen på wolframprodukter også påvirkes af indgåelse af langtidskontrakter mellem relativt få store selskaber, som fx Zhanyuan Tungsten Industries og Jiang Tungsten Group. I Figur 7-9 ses priserne i Kina for wolframit, APT og wolframpulver.

7.6 Det danske forbrug af wolfram og dets betydning for dansk økonomi

Wolfram benyttes i Danmark hovedsageligt til hårdmetaller (herunder karbider) og som legeringsmetal i stål og finder primært anvendelse i maskinindustrien i produkter som slid- og værktøjsstål. Varekøb for wolfram udgjorde 829 mio. kr. i 2019, og metallet kan for dette år relateres til eksport for omkring 1 mia. kr. og ca. 1.000 beskæftigede (Clausen *et al.* 2023). Wolfram er sammen med vanadium, de råstoffer som har lavest økonomisk betydning i Danmark af de otte undersøgte råstoffer i nærværende rapport (Figur 7-10). Det bør dog bemærkes, at datadækningen for wolfram (og vanadium) er lav i undersøgelsen, og dermed er behæftet med betydelig usikkerhed.



Figur 7-9 Prisudvikling i Kina i perioden 2011-2022 for wolframmineralkoncentrat (65 % WO_3), APT og wolframkarbid. China Tungsten (2022).



Figur 7-10 Wolfram og andre råstoffers afledte betydning for bruttoværditilvæksten som funktion af forsyningsrisikoen. Figuren er modificeret efter Clausen et al. (2023).

7.7 Perspektiver

EU Kommissionen vurderer wolfram som et kritisk råstof, da det har stor økonomisk betydning for EU (EI: 8,7) og desuden vurderes at have relativ høj forsyningsrisiko, som især vurderes knyttet til processeringen (SRP: 1,2), hvorimod forsyningsrisiko for ekstraheringen vurderes som lav (SRE: 0,5). Wolfram vurderes også som kritisk af England, USA, Japan, Canada og Kina, trods det forhold at Kina selv er den dominerende wolframproducent.

Den globale produktion af wolframmalm domineres af Kina (84 %) efterfulgt af Vietnam, Rusland, Bolivia og Rwanda, som samlet producerer ca. 11 %, og som samlet set betragtes som økonomisk/politisk ustabile lande. Forsyningskæderne for wolfram fra mine til wolframråvarer er domineret af få, vertikalt integrerede selskaber, som bl.a. China Tungsten & High-tech Material Co i Kina, Primosky GOK i Rusland, Comibol i Bolivia og Trinity Metals Ltd i Rwanda.

De mest efterspurgte produkter forventes i fremtiden at være hårdmetalkarbider, superlegeringer og sliddele, som især forventes efterspurgt af bilindustrien, flyindustrien, og de elektriske og elektroniske industrier. Den globale wolframindustri forventes at vokse fra ca. 120.000 ton i 2022 til 170.000 ton i 2030, svarende til ca. 6 % vækst (MMR 2023). For lande uden for Kina kan disse vækstscenarier blive en udfordring, som følge af Kinas produktionskvoter for (bl.a.) wolfram, som for 2023 er 110 kton mineralkoncentrat (65 % WO₃) (Reuters 2023), og som ikke forventes ændret i 2024; Kinas produktionskapacitet vurderes at være ca. 170.000 ton. Tang *et al.* (2020) forventer, at Kinas dominans over wolframproduktionen vil blive reduceret i de kommende år som følge af relativt lavlødige malmforekomster. Den høje vækstrate kan evt. imødekommes, hvis flere nye projekter i Australien, Canada, Norge og Spanien kommer i produktion, og såfremt forsyningskædeinfrastrukturen udvikles i lande uden for Kina.

7.8 Referencer

- Asian Metal 2023: <http://metlopedia.asianmetal.com/metal/tungsten/recycling.shtml> (besøgt nov. 21, 2023)
- China Tungsten 2022: (<http://news.chinatungsten.com/en/tungsten-product-news/146140-tpn-11061.html>)
- Clausen, R. J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. & Vind, I. 2023: Dansk industris brug af mineralske råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/gpub/32051>
- European Commission (EC) 2023: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- Graedel, T.E., Harper, E.M, Nassar, N. & Reck, B.K. 2013: On the materials basis of modern society. Proceedings of the National Academy of Science. Online ISSN: 1091-6490
- Han, Z., Golev, A. & Edraki, M. 2012: A review of tungsten resources and potential extraction from mine waste. Minerals 2021, 11(7), 701; <https://doi.org/10.3390/min11070701>
- Hughes, A. 2020: Australian Resource Reviews. Tungsten 2019. <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/mineral-resources-and-advice/australian-resource-reviews/tungsten>
- Keiding, J.K. 2014D: Wolfram (tungsten). Fakta om råstoffer 3, 4 pp. <https://doi.org/10.22008/gpub/38032>

- Leal-Ayala, D.R. Allwood, J.M., Petavratzi, E., Brown, T.J. & Gunn, G. (2015): Mapping the global flow of tungsten to identify key material efficiency and supply security opportunities. <https://core.ac.uk/download/pdf/33453755.pdf>
- MMR 2023: Tungsten market – Global industry analysis and forecast (2023-2029). [Tungsten Market - Global Industry Analysis and Forecast \(2023-2029\) \(maximizemarket-research.com\)](https://www.maximizemarket-research.com)
- Observatory of Economic Complexity World (EOC World) 2023: Database <https://oec.world/>
- Polini, R., Marcucci, A., D'Ottavi, C., Nunzinate, P. & De Filippis, P. 2021: Towards Green
- Tang, L., Wang, P., Graedel, T.E., Pauliuk, S., Xiang, K. Ren, Y. & Chen, W-Q. 2020: Refining the understanding of China's tungsten dominance with dynamic material cycle analysis. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 158, Jul 2020, 104829.
- Reuters 2023: China sets 2023 mining quota for tungsten concentrate at 110 ktons. <https://www.nasdaq.com/articles/china-sets-2023-mining-quota-for-tungsten-concentrate-at-111000-metric-tons>
- USGS 2023: Mineral commodity summaries 2020-2023: U.S. Geological Survey <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>
- Zeiler, B., Bartl, A. & Schuberts W-D. 2021: Recycling of tungsten: current share, economic limitations, technologies and future potential. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Vol 98, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436821000780>
- WMD 2022 (World Mining Data): Vol 37, 28 April 2022 <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>

8. Zink

8.1 Introduktion

Zink (Zn), der er grundstof 30 i det periodiske system, smelter ved 420 °C, koger ved 907 °C og har en massefylde på 7,1 g/cm³. Mere end halvdelen af zink anvendes til fremstilling af galvaniske produkter i byggeri og bilindustri og bruges desuden i legeringer som messing og bronze. Forekomster af zink findes i mange lande og brydes i miner i bl.a. i Kina, Australien, Peru og Mexico. Kina dominerer både malmudvinding, raffinering og forbruget af zink. I 2022 blev der udvundet ca. 13 Mt; der forventes en årlig vækst i efterspørgslen på ca. 2 % frem mod 2050. Prisen på zink forventes at stagnere frem mod 2025.

8.2 Anvendelser og sektorer

Zink har bred industriel anvendelse (Figur 8-1) og bruges især til fremstilling af følgende:

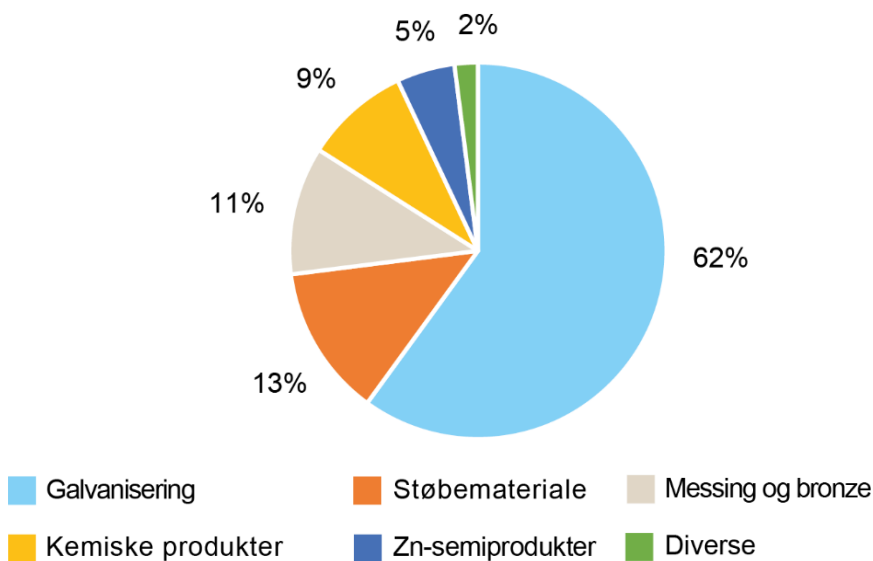
Galvanisering: Galvanisering er en overfladebehandling af stål og jern, som forhindrer/nedsætter rustdannelse, og er derfor særligt anvendeligt indenfor bilindustrien, infrastruktur som broer o.l. Omkring ¾ af produktionen anvendes til disse formål.

Støbemateriale: Zink anvendes til legeringer, der indgår til metalstøbninger (die-casting), og til brug for emner til elektronikindustrien.

Legeringer: Zink indgår ofte i legeringer med andre metaller for at opnå ønskede egenskaber som fx styrke, formstabilitet, varmeledningsevne, korrosionsbestandighed o.l. Messing er betegnelse for kobberzinklegeringer og kan indeholde op til 50 % zink, og er det største forbrugsområde til legeringer.

Kemiske produkter: Zinkoxid og -sulfid bruges til hvid og fluorescerende maling, gummi, kosmetik (tilføjer røde farver), farmaceutiske produkter, trykfarver, batterier, tekstiler, tilskud til dyrefoder m.m.

Øvrige anvendelser: Dentale og medicinske produkter; fungicider; smøremidler.



Figur 8-1 Fordeling af zink i forhold til industrielle sektorer i 2020. Kilde: Statista (2023).

Som slutprodukt anvendes 40 % af zink indenfor bygge og anlægssektoren, 22 % anvendes i transportsektoren, 12 % benyttes af industrisektoren, 12 % indgår i forbrugerprodukter og 3 % af efterspørgslen går til sundheds- og ernæringssektoren (Screen2 Zink factsheet 2023).

8.3 Genanvendelse og substitutionsmuligheder

Hovedparten af zink anvendes til galvanisering af stål, som typisk er produkter med lang levetid. Genanvendelse af zink opdeles i ny-skrot, som er spildprodukter fra produktion af zinkvarer, samt gammel-skrot, omfattende EoL-produkter og tailings. Det er dog kun en del af zink, der reelt bliver genanvendt, primært pga. ukomplet indsamling og procestab. EC (2023) har estimeret EoL-RIR til 34 %. Rostek *et al.* (2023) estimerer, at mængden af den samlede zinkgenanvendelse i 2019 udgjorde 6,2 Mt og vil kunne øges til 9-14 Mt i 2050.

Zink kan kun vanskeligt substitueres, når det anvendes til korrosionsbeskyttelse, men alternative syntetiske kompositprodukter kan til visse formål substituere for galvaniseret jern. EC (2023) har estimeret substitutionsindeks SI-EI til 0,77 og SI-SR til 0,8.

8.4 Global forsyning

8.4.1 Geologi

Zinkmalme, som ofte forekommer sammen med blymalme, dannes i forskellige geologiske miljøer: karbonatbjergarter (Mississippi Valley Type, MVT), vulkanske, massive sulfidmalme (VMS), i hydrotermale og skarnmineraliseringer, mens de i de sedimentære bjergarter findes i skifer, ler eller sandsten (sedimentære exhalative bjergarter, SEDEX).

8.4.1.1 Zinkminerale, biprodukter og kompanionmetaller

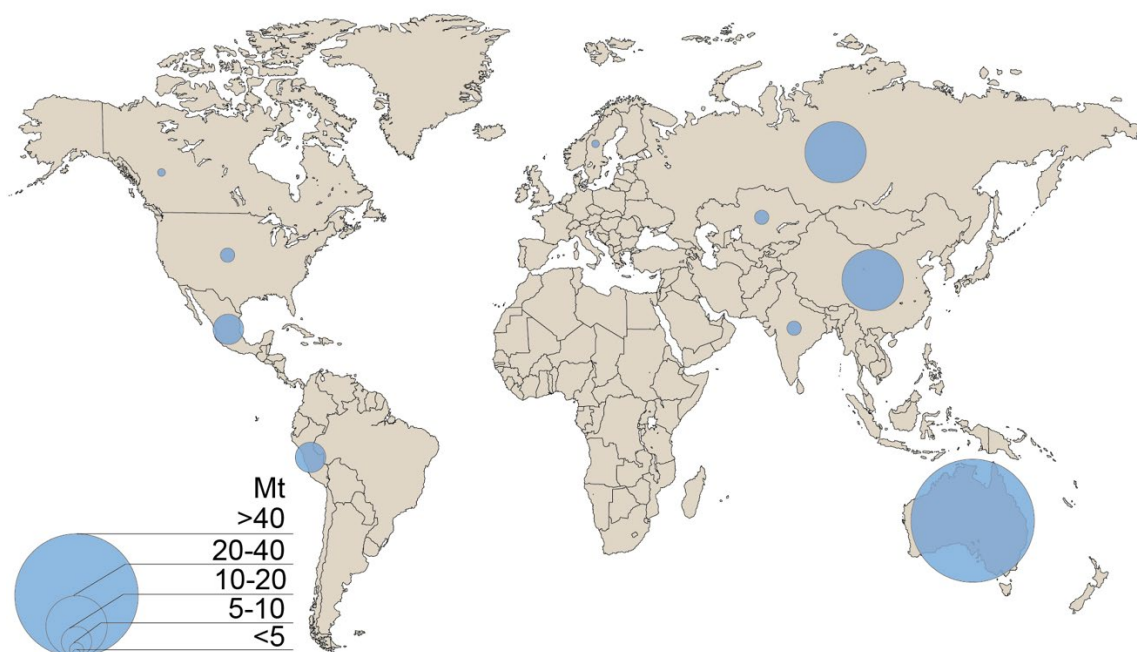
Det vigtigste zinkmineral er sphalerit (zinkblende, ZnS). Alle typer zinkforekomster kan indeholde biprodukter af bly og kobber og kan desuden indeholde et eller flere af følgende kompanionmetaller: bismut, bor, germanium, indium, kadmium, kviksølv, sølv, tin, og wolfram, som ikke danner egne mineraler i zinkforekomster, og derfor først udvindes som led i de metallurgiske processer.

8.4.2 Globale zinkreserver

Omkring 45 % af verdens zinkreserver er knyttet til SEDEX-typen; de mest kendte er Century og Mount Isa (Australien), Red Dog (USA) og Changba (Kina), som hver især har reserver på over 100 Mt malm med en typisk lødighed på 10-15 % Zn og 2-5 % bly. Zinkforekomster findes i hele verden, men særligt i Kina og Australien og til dels i Peru og Mexico, hvor man har de største opmålte reserver (Tabel 8-1 og Figur 8-2). I Grønland findes der flere betydelige zinkforekomster med Den Sorte Engel, der var en aktiv zink-bly-mine, og hvor det er vurderet, at de tilbageværende reserver udgør 4,4 Mt malm med et zinkindhold på 8,6 % (Thaarup 2020), og Citronen Fjord-forekomsten omtalt nedenstående, som de vigtigste. For yderligere information om zinkpotentialet i Grønland henvises til Sørensen *et al.* (2014, 2018).

De globale zinkreserver udgjorde i 2022 251 Mt, hvilket har været niveauet siden 2000; reserverne er siden 2000 øget i Australien og Rusland, men faldet i bl.a. Canada og Kasakhstan. I EU

findes de største reserver i Portugal (16,5 Mt med et indhold på 5,9 % zink), Irland (14 Mt med et indhold på 7,4 %) og Sverige (29 Mt med et indhold på 5,5 %) (EU 2020a). Levetiden for zinkreserverne har været nogenlunde konstant siden 2000, dog med vækst frem mod 2010 og fald siden 2015, og var i 2022 ca. 16 år (USGS 2023). Opgørelserne angiver ikke, hvilke reserver der er relateret til eksisterende zinkminer, og hvilke der er relateret til nye projekter, og dermed kan det ikke afgøres, hvornår reserverne evt. ville kunne komme i produktion. Fitch Solution (2022) fremlægger 20 zinkefterforskningsprojekter, som evt. kan bidrage til fremtidens zinkforsyninger, hvoraf hovedparten ligger i Canada, Mexico, Peru og USA. Derudover indgår den grønlandske forekomst Citronen Fjord på listen over mulige fremtidige miner (Tabel 8-4), som angiveligt har potentiale til at øge zinkreserverne med 420 Mt. Det bør bemærkes, at forventninger normalt er betydeligt højere, end de reserver, der vil indgå i de faktiske brydningsplaner.



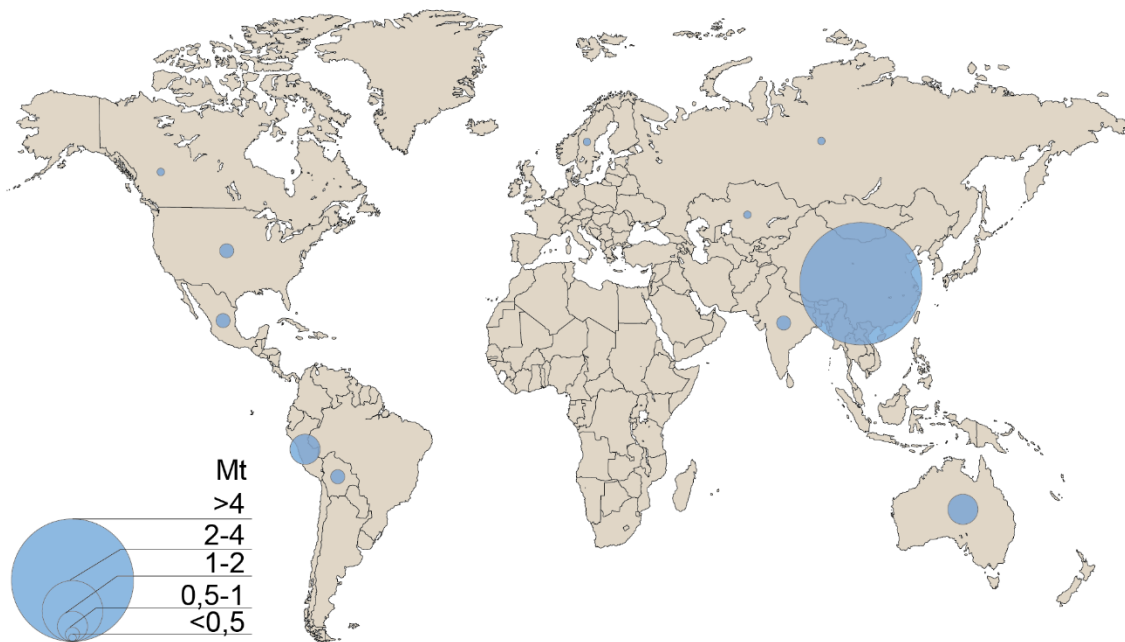
Figur 8-2 Oversigt over de lande, der har de største reserver af zinkmalm. Kilde: USGS (2023). Se også Tabel 8-1.

Tabel 8-1 Verdens zinkreserver opgjort for de 10 lande med største reserver og kategorien 'øvrige'. Kilde: USGS (2023).

| Zinkreserver | Mio. ton |
|--------------|----------|
| Bolivia | n.a. |
| Australien | 66.000 |
| Kina | 31.000 |
| Rusland | 22.000 |
| Peru | 17.000 |
| Mexico | 12.000 |
| Indien | 9.000 |
| Kasakhstan | 7.400 |
| USA | 7.300 |
| Sverige | 400 |
| Øvrige | 30.000 |

8.4.3 Global zinkproduktion

Produktionen af zink fra ca. 30 lande voksede i perioden 2000-2022 fra ca. 8 Mt/år til 13 Mt/år, hvilket primært skyldtes produktionsvækst i Kina; efterfølgende er produktionen stagneret omkring 12-13 Mt/år (Figur 8-3). Af denne produktion stammede omkring 33 % fra Kina, efterfulgt af Peru og Australien med hver ca. 10 %, og Indien, USA og Mexico med hver ca. 6 % (Tabel 8-2, og Figur 8-3). EU-27-landenes produktion i 2020 er ikke opgjort, men udgjorde 0,726 Mt i 2018 (EC 2020a, b), hvoraf Sverige (Garpenberg, Zinkgruvan og Boliden-area) og Irland (Lisheen, Tara) producerede hovedparten; små produktioner kom desuden fra Finland, Polen, Portugal og Spanien; produktionerne i Irland er efterfølgende ophørt. Samlet er det næsten en fordobling af EU's produktion siden 2004 (0,45 Mt) (European Minerals Yearbook for Zinc 2018). I Figur 8-4 ses en historisk oversigt over zinkproduktionen siden 2000.



Figur 8-3 Oversigt over nogle af verdens største zinkproducerende land. Baseret på data fra USGS (2023).

Table 8-2 *Produktionen af zink (ton) fordelt på de største producentlande. Kilde: USGS (2023) og WMD (2022).*

| Produktionsland | 2022 (USGS) | WMD (2020) |
|-----------------|-------------|------------|
| Kina | 4.200.000 | 4.100.000 |
| Peru | 1.400.000 | 1.300.000 |
| Australien | 1.300.000 | 1.300.000 |
| Indien | 830.000 | 750.000 |
| USA | 770.000 | 700.000 |
| Mexico | 740.000 | 1.000.000 |
| Bolivia | 520.000 | 360.000 |
| Rusland | 280.000 | 260.000 |
| Canada | 250.000 | 210.000 |
| Sverige | 240.000 | 235.000 |
| Kasakhstan | 200.000 | 310.000 |
| Iran | | 215.000 |
| Portugal | | 180.000 |
| Brasilien | | 175.000 |
| Sydafrika | | 160.000 |
| Tyrkiet | | 135.000 |
| Irland | | 130.000 |
| Eritrea | | 120.000 |
| Spanien | | 90.000 |
| Burkina Faso | | 80.000 |
| Andre | 2.000.000 | |
| Total | 13.000.000 | 12.600.000 |

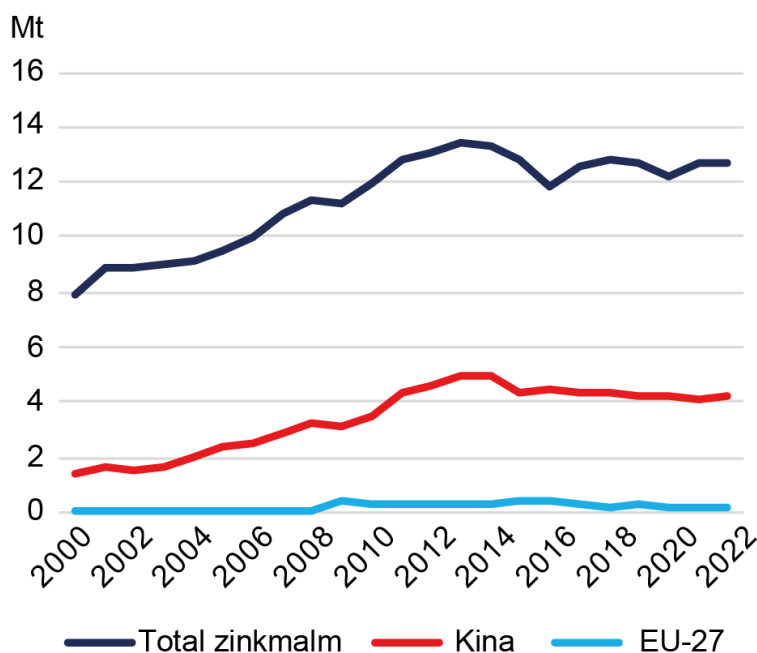


Figure 8-4 *Oversigt over historisk zinkproduktion fra miner i perioden 2000-2022. Kilde: USGS (2000-2023).*

8.4.3.1 Selskaber involveret i produktion og forarbejdning af zink

Zinkproduktionen udenfor Kina domineres af få store mineselskaber, hvoraf de største er Vedanta, Glencore og Tech Resources, som i 2022, fra syv miner, producerede henholdsvis 860.000 ton, 650.000 ton og 550.000 ton. De største zinkproducenter i Kina var i 2021 Shenzhen Zhongjin Lingnan Nonfemet Co.Lt, Zijin Mining Group Co. Ltd, Western Mining Group Co Lt. og Griffing Mining Group, som samlet producerede ca. 450.000 ton. En oversigt over de betydeligste zinkminer (2020) er vist i Tabel 8-3.

Tabel 8-3 Oversigt over nogle af største zinkminer (2020). Baseret på bl.a. Mining Technology (2020)

| Mine | Land | Ejer | Produktion (ton) 2021 | Forventet ophør |
|--------------------------------------|------------|------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Ghazaouet | Algeriet | ENM&TMF | 875.000 | |
| Red Dog | USA | Teck Resources | 500.000 | 2032 |
| Antamina | Peru | Glencore Plc | 430.000 | 2028 |
| Rampura Agucha; | Indien | Hindustan Zinc Limited (including Vedanta Resources) | 395.000 | |
| Rampura Aguca | Indien | Vedanta Resources | 370.000 | 2027 |
| Mt. Isa/Hilton | Australien | Glencore Plc | 330.000 | 2029 |
| McArthur River | Australien | Glencore Plc | 280.000 | 2038 |
| Bashkirskaia Med | Rusland | Ural Mining & Metallurgical | 250.000 | |
| Pentasquito | Mexico | Newmont Corp | 214.000 | |
| San Cristobal | Bolivia | Minera San Cristobal | 195.000 | |
| Golden Grove | Australien | EMR Capital Group | 192.000 | 2031 |
| Fankou | Kina | Shenzhen Zhongjin Lingnan Nonfemet | 190.000 | 2033 |
| San Cristobal | Bolivia | Sumitomo | 185.000 | 2024 |
| Fankou Mine, Gu-angong | Kina | Ahenzhen Ahongjin Lingnan Nonfemet Co. Ltd | 183.000 | 2033 |
| Wulagen Pb-Zn Minw, FuNFSONF | Kina | Zijin Mining Group | 100.000 | 2044 |
| Sanguikou Zn-Pb Mine, Inner Mongolia | Kina | Zijin Mining Group | 75.000 | 242 |
| Xitieshan Pb-Zn Mine, Qinghai | Kina | Western Mining Group Co. | 60.000 | 2030 |
| Caijiaying, Hebei | Kina | Griffin Mining Ltd. | 40.000 | 2062 |

De betydeligste efterforsknings- og produktionsprojekter udenfor Kina, som potentielt er nye zinkproducenter, kan opgjort på landebasis bidrage med: USA (370.000 ton/år), Canada (350.000 ton/år), Peru (270.000 ton/år) og DR Congo (240.000 ton/år) (Tabel 8-4). Det grønlandske zinkprojekt, Citronen Fjord, forventer en årlig produktion på 200.000 ton/år og vil i givet fald blive en betydelig producent.

8.4.4 Fremstilling af zinkprodukter

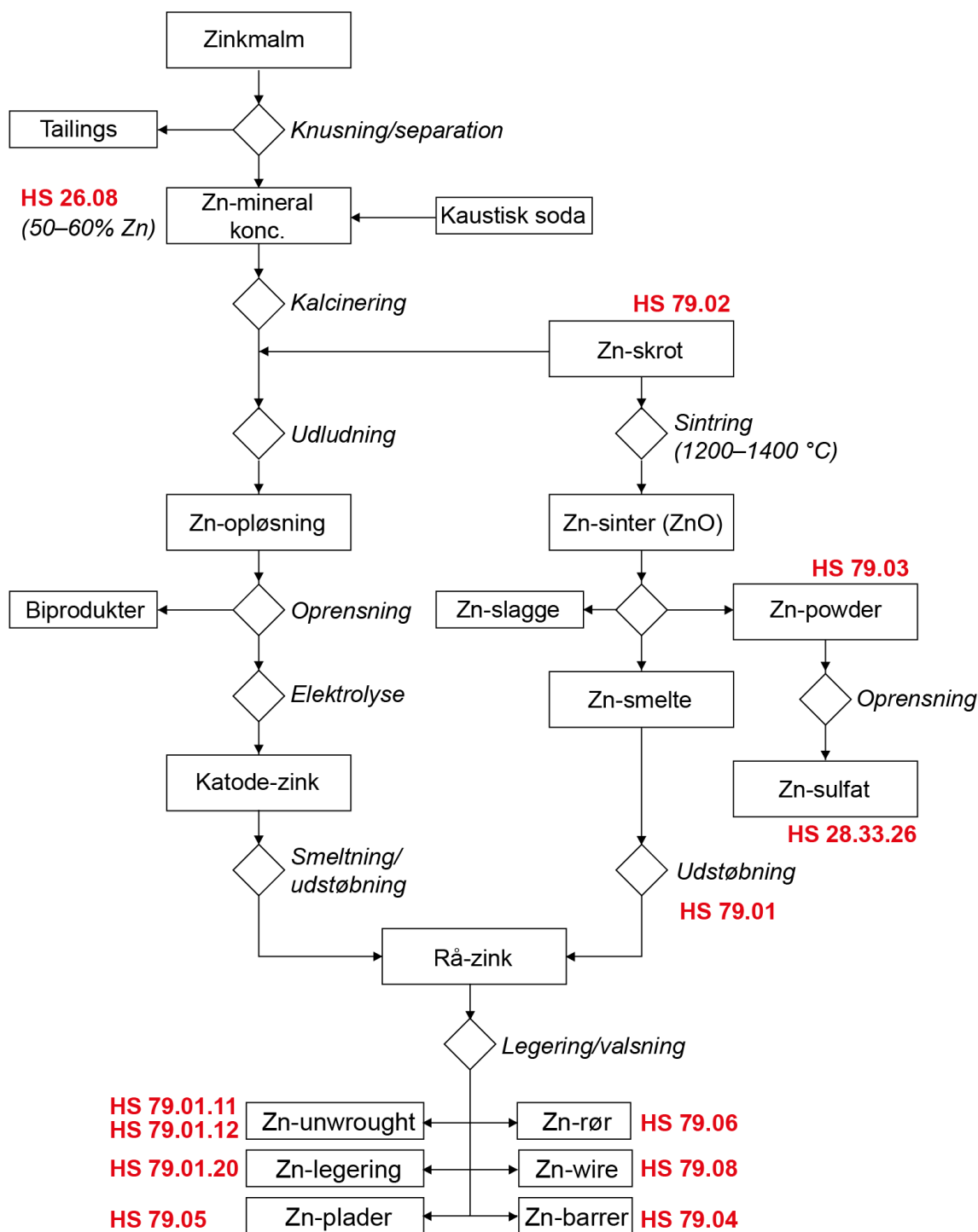
Forsyningskæderne for primær zink omfatter typisk følgende trin: (i) brydning af malmen; (ii) koncentration af malmineralerne; (iii) smeltning- og raffineringprocesser; (iv) fremstilling af legeringer, kemikalier (oxider, sulfater m.m.), plader, barrer, stænger o.l. De typiske handelsvarer i forsyningskæderne er angivet i Figur 8-5.

Tabel 8-4 Oversigt over efterforsknings- og produktionsprojekter. Kilde: Fitch Solutions (2022)

| Land | Mine/prospekt | Ejer | Forv. investeringsbehov (mio. USD) | Ressource (Mt) | Ressourceklasse | Forventet produktion (ton/år) |
|-----------|----------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|
| Algeriet | Tala Hamza | Terramin Australia | 486 | 7 | Sandsynlig | |
| Brasilien | Aripuana | Nexa Resources | 591 | 10 | Påvist | 70.000 |
| Canada | Pine Point | Osisko Metals | 746 | 13 | Usikker | 143.000 |
| Canada | Macmillan Pass | Fireweed Zinc | 824 | 11 | Usikker | 85.000 |
| Canada | Akie | ZincX Resources Corp | 466 | 23 | Usikker | 81.000 |
| Canada | Mcllvenna Bay | Foran Mining Corporation | 437 | 11 | Påvist | 41.000 |
| Canada | Kutcho | Kutcho Copper Corp | 473 | 7 | Påvist | |
| DR Congo | Kipushi | Ivanhoe Mines | 540 | 3 | Påvist | 240.000 |
| Eritrea | Asmara | Sichuan Road & Bridge Mining Investment Development Corp | 666 | 5 | Påvist | |
| Grønland | Citronen | Ironbark Zinc | 514 | 8 | Påvist | 200.000 |
| Mexico | Pitarrilla | SSR Mining | 1.221 | 12 | Sandsynlig | 46.000 |
| Mexico | Cordero | Discovery Silver Corp | 704 | 151 | Sandsynlig | |
| Peru | Ayawilca | Tinka Resources | 466 | 19 | Sandsynlig | 155.000 |
| Peru | Hilarion | Nexa Resources | 750 | 25 | Sandsynlig | 115.000 |
| Peru | Corani | Bear Creek Mining | 579 | 20 | Påvist | |
| Peru | Accha | Zincore Metals | 346 | 11 | Påvist | |
| USA | Hermosa | South32 | 1.244 | 29 | Sandsynlig | 221.000 |
| USA | Arctic | Trilogy Metals | 1.225 | 43 | Usikker | 87.000 |
| USA | Palmer | Constantine Metal Resources | 418 | 5 | Usikker | 39.000 |
| USA | Back Forty | Aquila Resources Inc | 540 | 8 | Sandsynlig | 30.000 |

Nedenfor beskrives de fire procestrin nærmere:

- i. Brydning: Zink brydes ofte i miner sammen med kobber og/eller bly fra zinkmineralet sphalerit (ZnS). Malmens indhold af zink varierer (typisk 3-10 %) i malm, hvor zink er hovedprodukt.
- ii. Malmforarbejdning: Her knuses, formales og separeres zinkmineralet (ofte anvendes flotationsprocesser), og der fremstilles et mineralkoncentrat, som er en kommerciel råvare (HS 26.08.00).
- iii. Smeltning og raffinering: Der findes to metoder: A) Elektrometallurgisk smeltning: zinkkoncentratet ristes, udludes og oprenses; den resulterende zink-sulfatopløsning behandles ved elektrolyse, hvorved der dannes katodezink, som evt. smeltes for at få højlydige zinkprodukter; B) Pyrometallurgisk smeltning: Zinkmineralet sintres, og de dannede sinterslagger udludes og zink raffineres efterfølgende (Gendersen *et al.* 2016).
- iv. Fremstilling af legeringer: Anvendelser: Zink anvendes til mere end 20 meget efterspurgte legeringer, som fx messing (kobber+zink), galfan (jern+zink), zamak (aluminium, magnesium, kobber, zink), silicontomba (kobber+zink+silikon), hvidbronze (kobber+tin+zink) samt til fremstilling af kemikalier og valsede produkter som stænger, plader m.m.



Figur 8-5 Generisk procesdiagram for produktion af zinkprodukter, med angivelse af nogle vigtige handelsvarekoder (HS-koder).

8.4.5 Klima- og miljøpåvirkning

Van Gendersen *et al.* (2016) rapporterer, at CO₂-udledning i forbindelse med zinkproduktion i 2012 var ca. 2,6 ton CO₂e/ton zink, og at energiforbruget udgjorde 37.500 MJ/ton (Tabel 8-5). Omkring 30 % af energiforbruget anvendes til forarbejdning af malm/mineral; smelteprocesserne anvender >50 %, hvorimod transporten er omkring 5 %.

Tabel 8-5 Input og CO₂-udledning ved fremstilling af 1 ton raffineret zinkprodukt (Special High Grade). Kilde: Calvo et al. (2016); Gendersen et al. (2016).

| Input | Enhed | Forbrug | Produkt (1 ton) |
|----------------------------|-----------------------|---------|------------------------------|
| Sphalerit | ton | 1,6 | Zink (Special High Grade) |
| El | GJ/ton | 24-48 | |
| Vand | M ³ | 8.000 | |
| CO ₂ -udledning | CO ₂ e/ton | 2,6 ton | |

8.5 Handel

Bilindustrien er den vigtigste sektor for zink, og hvor det især bruges til galvaniseringer, til fremstilling af katoder til batterier samt til fremstilling af messing, bronze og zinkkobber m.m.

Handlen med zinkmalm og udvalgte zinkprodukter i 2020 er vist i Tabel 8-6; faldende zinkpriser i 2020 har bevirket, at den globale handel med disse produkter er markant lavere i 2020 end de tre foregående år.

Tabel 8-6 Oversigt over varekoder for en række større handelsvarer i forsyningskæderne for zink, med angivelse af værdi (mio. USD) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

| HS4 | Varer | Værdi (mio. USD) | HS6 | Varekodebeskrivelse | Værdi (mio. USD) |
|-------|----------|------------------|----------|------------------------------------|------------------|
| 26.08 | Zinc ore | 8.253 | | | |
| 79.01 | Raw zinc | 15.762 | | | |
| | | | 79.01.11 | Zinc, not alloyed, unwrought >99% | 8.490 |
| | | | 79.01.12 | Zinc, not alloyed, unwrought; <99% | 2.560 |
| | | | 79.01.20 | Zinc alloys unwrought | 1.610 |
| 79.02 | Scrap | 695 | | | |
| 79.03 | Powder | 589 | | | |
| | | | 79.03.90 | Powder and flakes | 225 |
| 79.04 | Barer | 217 | | | |
| 79.05 | Sheet | 575 | | | |
| 79.07 | Other | 1.300 | 79.07.90 | Articles of zinc | 1.300 |

Som det ses af Tabel 8-2 har Kina den største produktion af zink. Af nedenstående handelsoversigter (Tabel 8-7 til Tabel 8-9 samt Figur 8-6 til Figur 8-8) fremgår, at Kina ikke eksporterer landets egne betydelige produktion af zinkmalm (HS 26.08.00), men faktisk er et betydeligt importland af zinkråstoffer til forarbejdning i Kina. Hovedparten af zinkmalmseksporten er fra Australien, Peru, USA, Mexico og Bolivia og eksporteres primært til Kina (27 %), Sydkorea (14 %) samt Belgien og Spanien (tilsammen ca. 14 %).

Den internationale handel med zinkmalm er betydelig og udgjorde i 2020 ca. 8.250 mio. USD. På grundlag af omtrentlige gennemsnitspriser for zinkmalm og -koncentrater fra Trading Economics (2023) kan det estimeres, at de handlede tonnager i perioden 2010-2020 ret stabilt var ca. 5,5 Mt, med en undtagelse af 2011, hvor den estimerede mængde var ca. 4,5 Mt. Det skal bemærkes, at disse estimater for de handlede volumener er væsentligt mindre end Vestens samlede produktion, og i 2020 var ca. 3 Mt mindre end opgjorte produktionstal. Årsagen hertil kan måske skyldes at store tonnager er handlet i perioder med lave priser, eller at nogle vestlige produktioner ikke registreres, som følge af eget forbrug. Eksporten af zinkmalm domineres af de store zinkproducerende lande som Australien, Peru, USA og Bolivia. Men Kina, som er den største producent af zinkmalm, forbruger selv hele deres egen produktion, og importerer derudover zinkmalm fra

Australien (næsten 90 % af Australiens handel med zinkmalm), Peru og Bolivia. Importlande i Europa er Spanien, Tyskland og Belgien (Tabel 8-7 og Figur 8-6).

Handel med råzink (HS 79.01.00) omfatter raffinerede zinkprodukter med en samlet handelsværdi i 2020 på 15,8 mia. USD med Sydkorea, Canada, Spanien og Australien som de største eksportlande. Importen er overvejende domineret af mindre lande med mange lande, dog undtaget USA som står for næsten 10 % af den samlede handel (Tabel 8-8 og Figur 8-7).

Den internationale handel med zinkskrot (HS 79.02) udgjorde i 2020 695 mio. USD, hvoraf Frankrig, Tyskland og Holland stod for ca. 40 %. Zinkskrot blev importeret af mange lande med Italien, Indien, Belgien og Holland som de største. Denne varegruppe er karakteriseret ved, at flere lande optræder både som eksport- og importlande; dette forhold, samt den stærkt forgrenede markedsstruktur, som fremgår af Sankey-diagrammerne (Figur 8-6, Figur 8-7 og Figur 8-8), er udtryk for at markederne for zinkråvarer ikke domineres af enkeltlande, bl.a. som følge af Kinas store egenproduktion.

Tabel 8-7 De vigtigste eksport- og importlande for zinkmalm (HS 26.08) i 2020. Den globale handelsværdi udtrykker den samlede eksportværdi. Kilde: OEC World (2023).

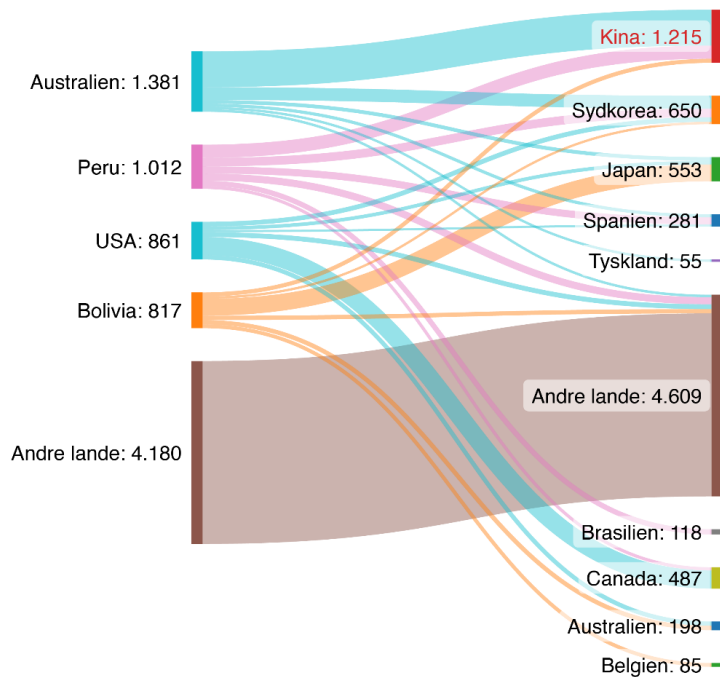
| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Australien | 1.381 | Kina | 820 |
| | | Sydkorea | 293 |
| | | Japan | 85 |
| | | Spanien | 71 |
| | | Tyskland | 55 |
| Peru | 1.013 | Kina | 302 |
| | | Sydkorea | 196 |
| | | Spanien | 162 |
| | | Brasilien | 118 |
| | | Canada | 71 |
| USA | 861 | Canada | 416 |
| | | Sydkorea | 107 |
| | | Australien | 98 |
| | | Japan | 82 |
| | | Spanien | 48 |
| Bolivia | 818 | Japan | 386 |
| | | Australien | 100 |
| | | Kina | 93 |
| | | Belgien | 85 |
| | | Sydkorea | 54 |
| Subtotal | 4.073 | | |
| Øvrige | 4.180 | | |
| Total | 8.253 | | |

Table 8-8 De vigtigste eksport- og importlande for råzink (HS 279.01) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

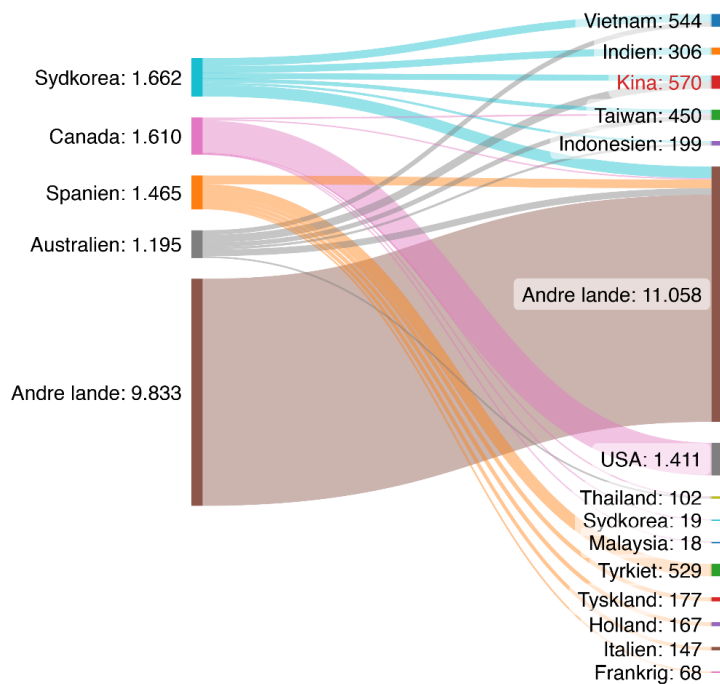
| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Sydkorea | 1.662 | Vietnam | 344 |
| | | Indien | 306 |
| | | Kina | 235 |
| | | Taiwan | 175 |
| | | Indonesien | 102 |
| Canada | 1.609 | USA | 1.411 |
| | | Taiwan | 73 |
| | | Thailand | 28 |
| | | Sydkorea | 19 |
| | | Malaysia | 18 |
| Spanien | 1.464 | Tyrkiet | 529 |
| | | Tyskland | 177 |
| | | Holland | 167 |
| | | Italien | 147 |
| | | Frankrig | 68 |
| Australien | 1.194 | Kina | 335 |
| | | Taiwan | 202 |
| | | Vietnam | 200 |
| | | Indonesien | 97 |
| | | Thailand | 74 |
| Subtotal | 5.929 | | |
| Øvrige | 9.833 | | |
| Total | 15.762 | | |

Table 8-9 De vigtigste eksport- og importlande for zinkskrot (HS 79.02) i 2020. Kilde: OEC World (2023).

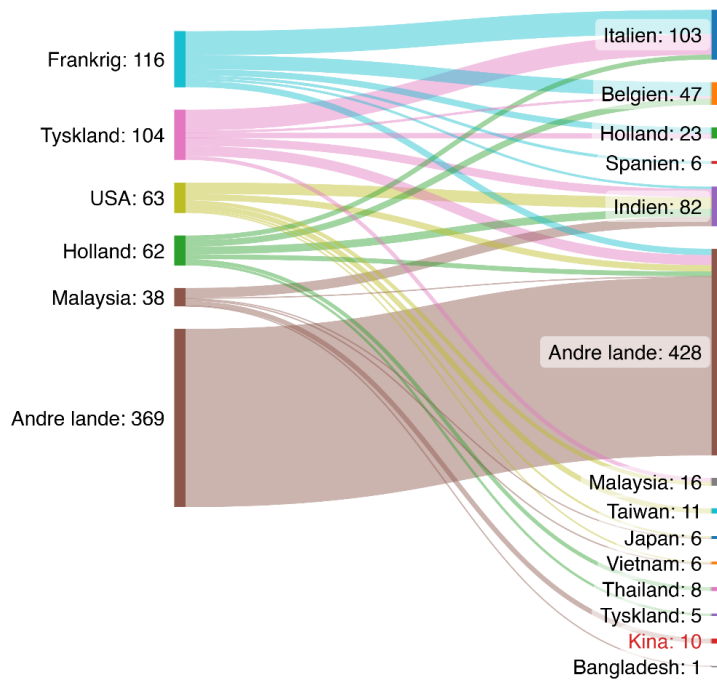
| Eksportland | Handelsværdi (mio. USD) | Importland | Handelsværdi (mio. USD) |
|-------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Frankrig | 116 | Italien | 50 |
| | | Belgien | 29 |
| | | Holland | 13 |
| | | Spanien | 6 |
| | | Indien | 5 |
| Tyskland | 105 | Italien | 43 |
| | | Indien | 17 |
| | | Holland | 10 |
| | | Malaysia | 8 |
| | | Belgien | 5 |
| USA | 64 | Indien | 24 |
| | | Taiwan | 11 |
| | | Malaysia | 8 |
| | | Japan | 4 |
| | | Vietnam | 3 |
| Holland | 61 | Indien | 16 |
| | | Belgien | 13 |
| | | Italien | 10 |
| | | Thailand | 8 |
| | | Tyskland | 5 |
| Malaysia | 39 | Indien | 20 |
| | | Kina | 10 |
| | | Vietnam | 3 |
| | | Japan | 2 |
| | | Bangladesh | 1 |
| Subtotal | 384 | | |
| Øvrige | 369 | | |
| Total | 753 | | |



Figur 8-6 Sankey-diagram for handel med zinkmalm (HS 26.08) i 2020. Alle værdier i mio. USD, baseret på Tabel 8-7.



Figur 8-7 Sankey-diagram for handel med råzink (HS 79.01) i 2020. Alle tal i mio. USD, baseret på Tabel 8-8.



Figur 8-8 Sankey-diagram for handel med zinkskrot (HS 79.02) i 2020. Alle tal i mio. USD, baseret på Tabel 8-9.

8.5.1 Priser

En betydelig del af verdenshandlen med zink foregår via metalbørser, herunder især London Metals Exchange (LME), som foretager løbende overvågning af zinkproduktion og -lagre med henblik på prisfastlæggelser. Desuden handles zink også som futures på fx Shanghai Futures Exchange (SHFE). Udviklingen i zinkpriserne afspejler især den kinesiske efterspørgsel, som i sig selv er påvirket af størrelsen af den kinesiske egenforsyning, som er under internt pres på grund af stigende miljøkrav fra Kinas egne myndigheder, og som kan føre til lukninger af flere kinesiske miner. Disse forhold, i kombination med stålindustriens generelt voksende behov for galvaniserede produkter, forventes at påvirke priserne i opadgående retning.

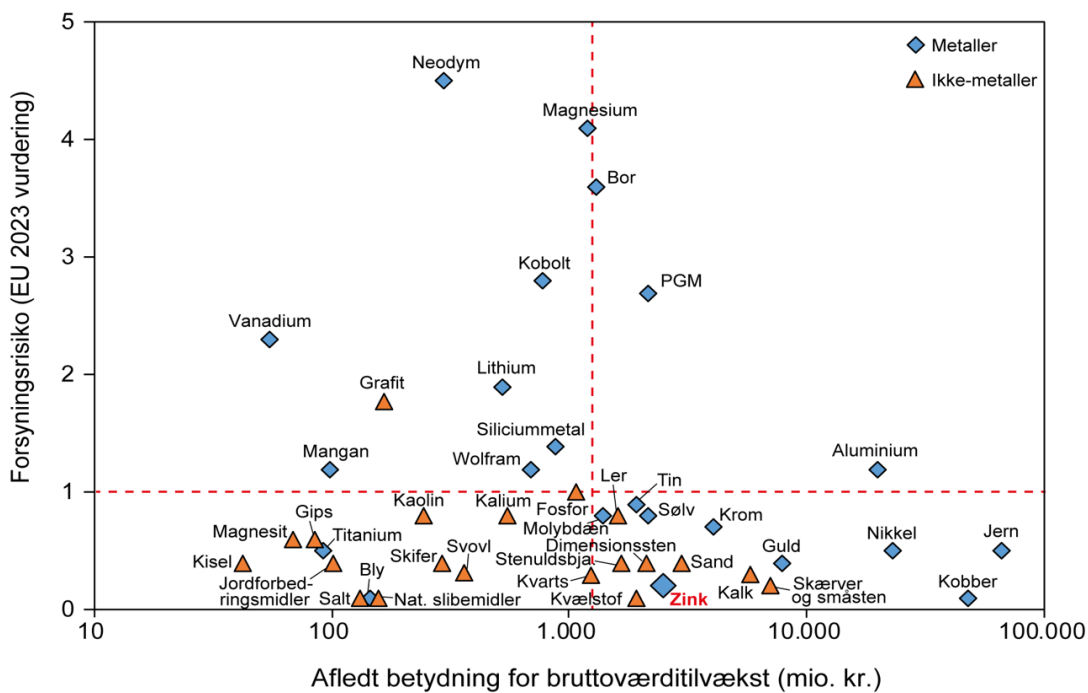
Figur 8-9 viser prisudviklingen for zink igennem de seneste 22 år. Det fremgår af figuren, at der har været en generelt stigende tendens, og at den generelle trend har været afbrudt af tre betydelige prisforhøjelser som kulminerede i 2006, 2018 og foreløbigt 2022.

8.6 Det danske forbrug

Zink er et vigtigt råstof i dansk kontekst (Figur 8-10) og har den 10. største økonomiske betydning for mineralske råstoffer til den danske industri (Clausen *et al.* 2023). Varekøb for zink udgjorde i 2019 2,6 mia. kr., og zink var relateret til eksport fra Danmark for en værdi af 2 mia. kr. (Clausen *et al.* 2023). Zinkforbruget i Danmark relaterer sig primært til galvanisering af stål og til brug i messing, der fortrinsvis bruges i industri (68 %) og i bygge- og anlægsbranchen (25 %).



Figur 8-9 Prisudvikling for zink i perioden 2000-2020. Kilde: Trading Economic (2023).



Figur 8-10 Zink og andre råstoffers afløede betydning for bruttoværditilvækst som funktion af forsyningsrisikoen i Danmark. Figur modificeret efter Clausen et al. (2023).

8.7 Perspektiver

EU Kommissionen vurderer zink som et råstof med stor økonomisk betydning (EI: 4,8), men vurderer samtidig at forsyningssikkerheden er god (SRE: 0,2 og SRP: 0,1) for både ekstraktion og processering (EC 2023). Dette er i overensstemmelse med de fleste andre landes vurderinger, dog vurderer både Canada og USA, zink som et kritisk råstof.

Kina er den markant største producent af zinkmalm med ca. 1/3 af den globale produktion, efterfulgt af Peru og Australien. Få, relativt store, mineselskaber dominerer den globale produktion, heriblandt Glencore, ENM & TMF, Tech Resources og Hindustan Zinc Ltd., som tilsammen producerede mere end 20 % i 2022. Mineralefterforskningen efter nye zinkforekomster har været utilstrækkelig med faldende levetid til følge, og en række af de store zinkminer forventes brugt op i løbet af de næste 10 år (Tabel 1-6, Tabel 8-4) og omfanget af nye miner, der kan igangsættes, er uafklaret (Tabel 8-4).

Zinkmalm bliver forarbejdet i mange lande, hvoraf Kina dog dominerer forsyningskæderne fra mine til færdige råvarer.

I forbindelse med den grønne omstilling er zink især efterspurgt til galvaniseringer, herunder til elbiler og solpaneler; desuden forventes forbruget af zink til zinkbatterier at vokse væsentlig. Som helhed forventes disse markeder dog ikke at få væsentlig betydning for zinkefterspørgslen, bl.a. fordi der samtidigt med den stigende elbilproduktion er et fald i produktion af konventionelle biler. Gregoir *et al.* (2020) forventer en årlig vækst i zinkforbruget på 1,2 %, svarende til ca. 20 Mt i 2030 og 25-27 Mt i 2050, hvilket er i overensstemmelse med vurderinger fra EC (2020b), Svemin (2021) og Rostek *et al.* (2023); sidstnævnte forventer at genanvendt zink i 2050 vil udgøre op til 14 Mt (mod 9 Mt i 2019).

8.8 Referencer

- Calvo, G., Mudd, G., Valero, A. & Valero, A. 2016: Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality. *Resources* 5 (4) (36), Nov. 2016
- Clausen, R. J., Kalvig, P., Keiding, J.K., Fold, N. & Vind, I. (2023): Dansk industris brug af mineralske råstoffer – økonomisk betydning og forsyningsudfordringer MiMa rapport 2023/2, pp. 181. <https://doi.org/10.22008/gpub/32051>
- European Commission (EC) 2020a: Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020), Factsheets on Non-critical Raw Materials https://www.researchgate.net/publication/344124852_Study_on_the_EU's_list_of_Critical_Raw_Materials_2020_Final_Report
- European Commission (EC) 2020b: Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf
- European Commission (EC) 2023: Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- European Minerals Yearbook data for Zinc 2018: <http://minerals4eu.brgm-rec.fr/m4eu-year-book/pages/bycommodity.jsp?commodity=Zinc>
- Fitch Solution 2022: Global Zinc Mining Outlook; 19. September 2022. Global Zinc Mining Outlook ([fitchsolutions.com](https://www.fitchsolutions.com))

- Gendersen, E. van, Wildnauer, M., Santero, N. & Sidi, N. 2016: A global life cycle assessment for primary zinc production. *The international Journal of Life Cycle Assessment* 21, 1580-1593
- Gregoir, L., Acker, K. van, Beretta, S. & Heron, C. 2022: KU Leuven and Eurometaux Report, 117 pp. <https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf>
- Griggs Steel Company: High Speed Steel (website: <https://www.griggssteel.com/high-speed-steel/>; besøgt 12.12.23
- Mining Technology 2020: <https://www.mining-technology.com/marketdata/ten-largest-zincs-mines-2020/>
- Observatory of Economic Complexity World (EOC World) 2023: Database <https://oec.world/>
- Rostek, L., Pirard, E. & Loibl, A. 2023: The future availability of zinc: Potential contributions from recycling and necessary ones from mining. *Resources, Conservation & Recycling Advances.*, Vol 19, 200166
- Screen2 Zinc factsheet 2023: Screen2 Factsheet updates based on the EU Factsheets 2020 Zinc https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/06/SCRREEN2-factsheets_ZINC.pdf
- Statista 2023: Distribution of zinc consumption worldwide in 2021, by end use. <https://www.statista.com/statistics/240626/share-of-zinc-consumption-by-category/>
- Svemin 2020: Climate ambitions and metal needs – opportunities for Sweden and the Swedish mining industry. Report 28 pp.
- Sørensen, L.L., Kalvig, P., Thrane, K. & Rosa, D. 2018: The zinc potential in Greenland. *Geology and Ore* 30 12 pp.
- Sørensen, L.L., Stensgaard, B.M., Thrane, K., Rosa, D. & Kalvig, P. 2014: Sediment-hosted zinc potential in Greenland – Reporting the mineral resource assessment workshop 29 November – 1 December 2011. *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport* 2013/56, 184 pp.
- Thaarup S.M. 2021: Zink. Fakta om råstoffer 14. 4 pp. <https://doi.org/10.22008/gpub/38043>
- Trading Economic 2023: <https://tradingeconomics.com/commodity/zinc>
- USGS 2000-2023: Mineral commodity summaries 2000-2023: U.S. Geological Survey <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>
- World Mining Data (WMD) 2022: Vol 37, 28 April 2022 <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>



Geocenter Danmark er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning (IGN) ved Københavns Universitet og Geologisk Museum under Statens Naturhistoriske Museum.

Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) er et rådgivende center under De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). MiMa formidler viden om mineralske ressourcers værdikæde fra efterforskning og udvinding til forbrug, genanvendelse og udviklingen af nye teknologier.