Minik Rosing, Professor,
Geologisk Museum,
Statens Naturhistoriske Museum,
Københavns Universitet,
minik@snm.ku.dk

Den geologiske baggrund for Grønlands naturressourcer

Baggrundspapir fra Udvalget for samfundsgavnlig udnyttelse af Grønlands naturressourcer

Med bidrag fra:
Statsgeolog, Karen Hanghøj, GEUS
Chefkonsulent, Per Kalvig, GEUS

København, januar, 2014

Indholdsfortegnelse

Den geologiske baggrund for Grønlands naturressourcer **3**
Indledning 3
Grønlands generelle geologi 4
Grundfjeldet *5*
Bassindannelse *7*
Grønland i en regional kontekst *7*
Geologiske regioner 11
Sydgrønland *11*
Midt- og Nordgrønland. *12*
Nord og Nordøstgrønland *15*
Havet omkring Grønland 15
Hvordan defineres økonomiske forekomster? 19

Kritiske mineraler **22**
Strategiske mineraler 22
Potentialet for kritiske mineraler i Grønland 23
Mineralforekomster og minedrift i Grønland 24
Grønland lige nu 25
Historisk minedrift i Grønland 27

Det globale marked for råstoffer **29**
Råstoffer og deres værdikæde 29
Råstofmarkedet generelt 29
Substitution af materialer og teknologier 30
Klimaændringernes betydning for fremtidens råstoffer 30
Eksempler på vigtige råstoffer og deres globale forekomster 31
Kobber 34
Zink 37
Sjældne jordarters metaller (REE) 39

Konklusion **45**

Referencer **49**

Den geologiske baggrund for Grønlands naturressourcer

Af: Minik Rosing

Indledning

Nedenstående oversigt over Grønlands geologi er baseret på det geologiske kort over Grønland publiceret af De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og de dertil hørende kortbladsbeskrivelser og andre publikationer. Kortbladene og det samlede syntesekort i 1:500.000 er baseret på viden tilvejebragt gennem GEUS, og tidligere Grønlands Geologiske Undersøgelsers egne feltstudier, samt på information publiceret af universiteter og kommercielle efterforskningsselskaber. Den overordnede kilde er således det geologiske kort (http://data.geus.dk/map2/geogreen/#Z=1&N=8148070&E=404120) og de bagvedliggende referencer Escher & Watt, 1976, Henriksen et al., 2000, Petersen et al., 2013). Herefter vil kun kvantitative data der relaterer sig til specifikke geologiske forekomster vil blive refereret til primærkilder.

Vurderinger af lødigheder og resursestørrelse for konkrete mineralforekomster bygger på oplysninger fra nuværende og tidligere licenshavende efterforskningsselskaber. Disse data er som hovedregel rapporteret i henhold til accepterede standarder, typisk den Australske JORC code ("Joint Ore Reserve Committee") for offentlig rapportering af efterforskningsresultater, mineralresurser og malmreserver (http://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf) eller den canadiske NI 43-101 (http://www.ccpg.ca/profprac/en/Documents/ni_20110624_43-101_mineral-projects.pdf). Resursevurderinger dækker i reglen den bedst kendte del af en mineralisering og justeres løbende når yderligere data er tilgængelige. Selvom de er behæftet med en vis usikkerhed (måske i tocifrede procenters usikkerhed), antages de at være så korrekte som det var muligt på tidspunktet for fremlæggelsen af den enkelte resursevurdering. De anførte ressourcestørrelser er på ingen måde udtryk for hvad der sammenlagt findes af geologiske ressourcer i Grønland.

De økonomiske overslag der er baseret på de dokumenterede og skønnede mængder og lødigheder af malm er derimod behæftet med langt større og flere usikkerheder, idet råvarepriser, prisen på energi til udvinding og transport samt prisen på opbygning af infrastruktur til brydning, bearbejdelse og udskibning af malm eller raffinerede produkter er vanskellige at forudsige. Det skal bemærkes, at der i de fleste tilgængelige beskrivelser af økonomiske modeller for udnyttelsen af mineralforekomster ikke findes beskrivelser af risikofaktorer og deres betydning for den skitserede økonomi eller identifikation af særlige logistiske, tekniske eller klimatiske problemer som kunne gøre udvinding væsentligt dyrere eller helt umulig, selv om det må antages at sådanne faktorer eksisterer og i væsentlig grad kan påvirke et projekts mulighed for succes. Følsomhedsanalyser indgår i de endelige vurderinger af projekter i forbindelse med ansøgning om udvindingstilladelse. Vi har ikke kunnet belyse de mulige konsekvenser af dette problem for de konkrete projekter, og det må derfor erindres, at refererede data stammer fra materiale udarbejdet af licenshavere, bl.a. med henblik på tilvejebringelse af ekstern finansiering til gennemførelse af de enkelte projekter.

Figur 1: Geologisk kort over Grønland, med kendte mineralforekomster og offshore olie-gas efterforskningslicensområder angivet. (Kilde: GEUS http://data.geus.dk/map2/geogreen/#Z=1&N=8148070&E=404120)

Grønlands generelle geologi

Grønlands overflade er domineret af indlandsisen og de aflejringer den har afsat under sin tilbagetrækning siden sidste istid. Omkring 80 % af Grønlands areal er dækket af indlandsis, og landet er kun blottet i en smal bræmme langs kysterne som typisk er nogle få hundrede kilometer bred. Det isfri areal er i dag 410.000 km^2 hvilket svarer til 10 gange Danmarks areal, og er nogenlunde svarende til lande som Norge eller Sverige. På trods af en øget afsmeltning af indlandsisen og tilbagetrækning af gletsjere langs isranden, er der til nu kun sket en yderst begrænset forøgelse af det isfri areal. Det

forventes at blotning af nye mineralforekomster i meget begrænset omfang og ændrede betingelser for logistik vil være konsekvenser af et varmere klima. Der forventes ikke en væsentlig forøgelse af isfrit landareal i dette århundrede. (AMAP, 2011)(D. Dahl-Jensen, Pers. medd. 2013).

Grundfjeldet

Det dybe grundfjeld under hele Grønland består af Prækambriske bjergarter, som også dominerer den blottede overflade i det meste af landet (Kalsbeek, 1981; Kalsbeek et al. 1993). Grundfjeldet har en central kerne af meget gamle gnejser (Se Fig. 1), som typisk er mere end 2800 millioner år gamle, og som ikke har været involveret i større geologiske begivenheder i de seneste 2500 millioner år (Nutman et al., 1993; Windley and Garde, 2009). Denne centrale kerne grænser op mod yngre gnejsterræner mod både syd og nord. Her er bjergarterne typiske dannet for ca. 2800 millioner år siden, men med nyere bidrag dannet i tidspandet ca. 1900 – 1600 millioner år siden, hvorunder komplekset også er modificeret og deformeret ved pladetektoniske processer (Bridgwater et al., 1990; Kalsbeek and Nutman, 1996; van Gool et al., 2002). Sydgrønland fra Arsuk og sydover består udelukkende af yngre bjergarter som er dannet under og efter en pladekollision for ca. 1800 millioner år siden (Chadwick and Garde, 1996; Garde et al., 2002a, 2002b).

Grønlands nuværende omrids er stor set formet under opbrydningen af superkontinentet Pangea. Jordens kontinenter har oplevet adskillige episoder af sammensvejsning af kontinenter til samlede superkontinenter, efterfulgt af opsplitning af disse i mindre kontinenter adskilt af nye oceaner. Det seneste superkontinent Pangea opstod da jordens kontinenter samlede sig for ca. 300 millioner år siden. I Juratiden for ca. 175 millioner år siden begyndte superkontinentet at krakelere og en kile af nydannet ocean begyndte at splitte kontinentet i to. I Kridttiden for ca. 90 millioner år siden begyndte adskillelsen af Grønland fra Canada i det der i dag er Labradorhavet.

Inden Grønland, Nordamerika og Nordeuropa endnu var helt adskilt passerede det samlede kontinent hen over en strøm af varmt materiale – en såkaldt hot-spot eller kappediapir - der steg op fra de dybere dele af jordens kappe. De varme opstigende materiale forårsagede en opbulning af kappen under kontinentet. Opbulningen førte til yderligere opbrydning mellem Baffin Island og Grønland og en omfattende smeltning af kappen. Smelte strømmede gennem den opsprækkede skorpe og forårsagede en intens vulkanisme med dannelse af kilometertykke lag af basalt på begge sider af Baffinbugten. Vulkanske lag fra denne periode udgør de karakteristiske basaltfjelde på Disko, Nuussuaq, Ubekendt Ejland og Svartenhug i Grønland, og på det østlige Baffin Island i Canada.

Efter omkring en million års intens magmatisk aktivitet i det der nu er Vestgrønland, gled det grønlandske kontinent over hot-spotten, som smuttede om til en svaghedszone langs den nuværende østkyst. Her fortsatte historien, med opbulning, opsprækning og dannelse af store mængder af basalt-magma. Produkterne fra den intense vulkanisme kan ses i de basaltlag der i dag udgør den utilnærmelige Blossevillekyst syd for Scoresby Sund og mindre områder ved Hold With Hope og Shannon Ø i Nordøstgrønland. Opsprækningen og dannelsen af ny oceanbund mellem

Grønland og Europa er stadig aktiv i dag, ligesom den hot-spot der startede processes nu ligger midt i Nordatlanten og er ansvarlig for den omfattende vulkanisme på Island.

Under og efter dannelsen af de tykke basaltlag langs Grønlands østkyst, opstod en lang række magmakamre på grænsen mellem det gamle grundfjeld og de yngre basaltlag. Mange af disse magmakamre er nu blottet som intrusioner af gabbro, syenit og granit langs kysten fra Hold With Hope til Tugtilik lige nord for Tasiilaq. De fødekanaler der bragte magma fra de dybe magmakamre til vulkanerne på overfladen findes som en meget tæt sværm af diabasgange parallelt med kysten. Færøernes basaltfjelde var oprindelig sammenhængende med Blossevillekysten, men som følge af den fortsatte opsprækning og åbning af Nordatlanten blev de adskilt fra Grønland.

Den svaghedszone som fokuserede adskillelsen mellem Nordamerika og Europa for ca. 55 millioner år siden blev grundlagt under opbrydningen af et tidligere superkontinent – Rodinia som begyndte for ca. 750 millioner år siden. For ca. 600 millioner år siden blev den kontinentmasse der nu udgøres af det baltiske område adskilt fra Grønland-Nordamerika af et ocean kaldet Iapetus oceanet. Det havde næste samme position mellem de to landmasser som Nordatlanten har nu, men regionen befandt sig dengang tæt på Ækvator.

Langs kontinentranden dannedes er række sedimentære bassiner, som blev fyldt op med sedimenter fra de nyopbrudte kontinentrande som hastigt blev nedbrudt af vind og vejr. For ca. 400 millioner år siden lukkedes Iapetus-oceanet igen under den såkaldte Kaledoniske bjergkædefoldning. De sedimentære bjergarter, som gennem 200 millioner år var aflejret mellem de to kontinentfragmenter, blev skudt ind over kontinentrandene efterhånden som oceanet lukkedes og de to kontinentblokke kolliderede. Ved kollisionen opstod en bjergkæde vi i dag ser repræsenteret i Skotland, Norge og Nordøstgrønland, hvor tykke pakker af de gamle Iapetus sedimenter ligger indlejret i grundfjeldet.

Sammensvejsningen mellem det Nordeuropæiske og Nordamerikanske kontinent var ikke super vellykket og hele den Kaledoniske foldekæde forblev en svaghedszone. Under opbrydningen af det senere Pangea, sprang svejsningen op igen, og derfor ligger den ene halvdel af de Kaledoniske bjerge i Nordøstgrønland nord for Scoresbysund og den anden halvdel udgør stort set Norge.

Tilsvarende er Grønlands nordkyst ud mod Polhavet bygget op ved gentagne åbninger og lukninger af oceaner med dertil hørende magmatisk aktivitet, og dannelse af store sedimentære bassiner, som nu ligger bevaret som mere eller mindre deformerede lag af sedimenter oven på det gamle grundfjeld.

Bassindannelse

Når et kontinent udsættes for tektoniske kræfter kan det opbrydes i mindre dele. Imidlertid er der sjældent tale om et rent brud, men snarere om en langvarig proces hvor kontinentskorpen gradvis bliver tyndere og stedvis synker ind og danner bassiner. Disse vil ofte blive invaderet af havet, og bliver løbende fyldt op med sedimenter udfældet fra havvandet eller fra de tilstødende kontinenter. Denne basindannelse og indfyldning er en dynamisk proces som kan foregå gennem millioner af år, og føre til kilometertykke aflejringer af sediment.

Under Grønlands lange historie som brik i det globale superkontinent-puslespil, er der dannet en lang række velbevarede sedimentbassiner langs Grønlands periferi fra de seneste episoder af opbrud og stærkt deformerede og omdannede bassiner fra tidligere episoder, som nu indgår som mere eller mindre uregelmæssigt foldede lag i grundfjeldet.

Sedimentære bassiner har en meget stor betydning i dannelsen af en lang række geologiske resurser (Stemmerik et al, 1996; Chalmers et al., 1993; Chalmers and Pulvertaft, 2001; Golonka et al., 2003; Kragh et al., 1997). Alle olie- og gas-forekomster har deres rødder i sedimentære bassiner, og langt de fleste og største forekomster findes stadig i de bassiner hvor det organiske stof oprindelig blev aflejret og med tiden omdannet til olie og gas.
Sedimentære bassiner rummer også nogle af de største forekomster af kobber, bly, zink og en række andre metaller der udnyttes rundt om i verden. Det skyldes, at der dannes varmt salt- og svovlholdigt grundvand i de dybe dele af bassinerne: Det varme korrosive vand er i stand til at opløse metaller fra store voluminer af porøse sedimenter, og siden udfælde metallerne lokalt hvor ændringer i det fysiske eller kemiske miljø mindsker vandets evne til at holde metallerne opløst. Nogle typer af malme dannes i bassinernes sedimentpakker sent i bassinets historie, mens en særlig type metalforekomster dannes direkte på havbunden mens bassinet stadig er under opfyldning. I disse forekomster dannes mineralerne hvor varmt svovlholdigt vand strømmer ud fra sprækkesystemer i havbunden og de opløste malmmineraler udfældes i mødet med det kolde havvand. Denne type aflejringer udgør nogle af de vigtigste bly-, zink- og kobbermalmforekomster i verden.

Grønland i en regional kontekst

Forståelsen af Grønlands geologiske historie og hvordan Grønland har været forbundet med andre kontinenter tidligere i Jordens historie er vigtig for vurderingen af det økonomiske potentiale.

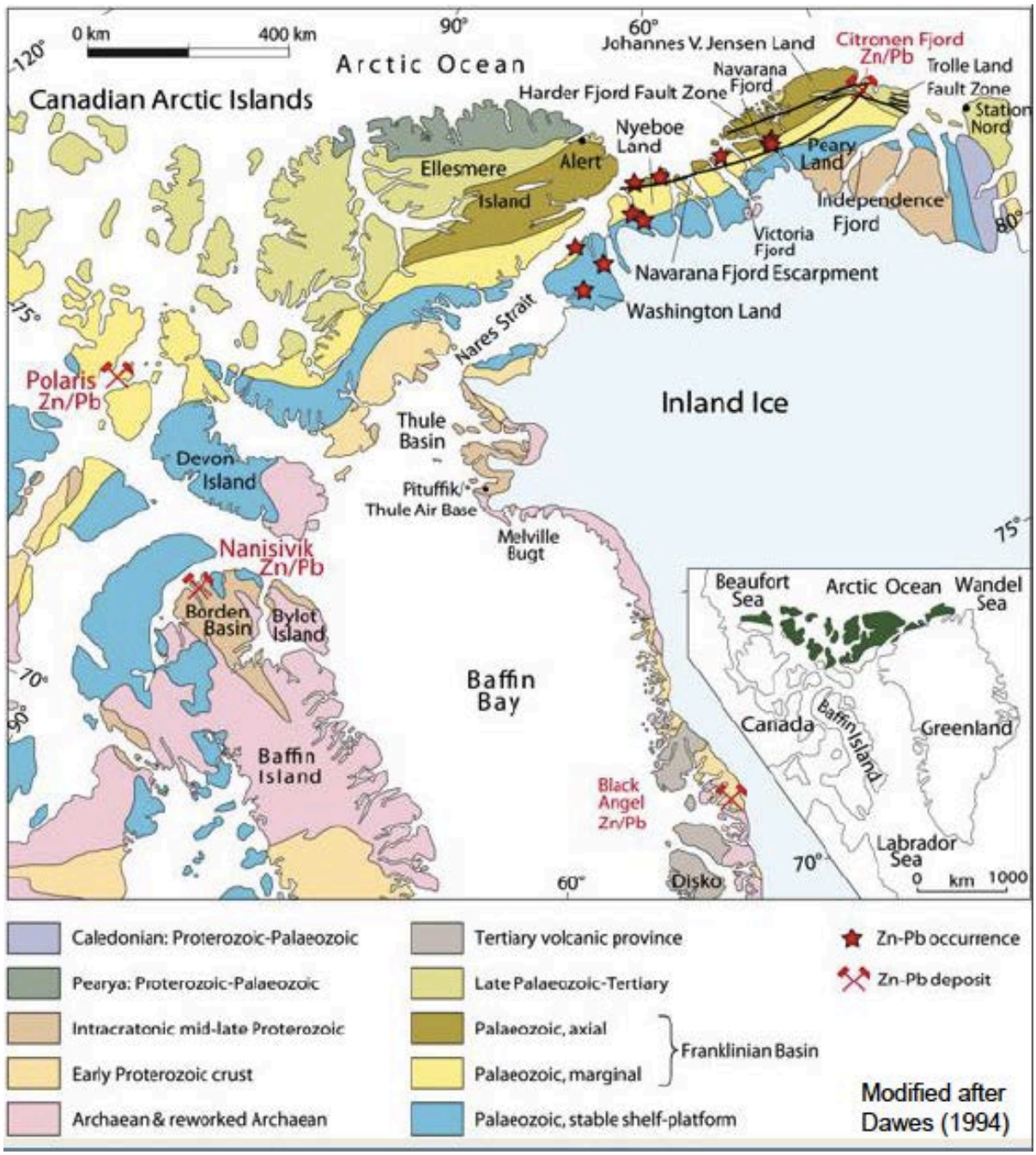
Bestemte typer af geologiske resurser dannes og bevares i bestemte geologiske miljøer. Som nævnt er sedimentære bassiner vigtige for dannelsen af olie og gas, og en lang række metalforekomster. Den magmatiske historie i en given region har betydning for temperaturen i jordskorpen. Temperaturudviklingen er afgørende for modning af olie og gasresurser, eller evt. for destruktion af

olie og gas hvis temperaturen bliver for høj. Ligeledes kan magmatisk aktivitet påvirke cirkulationen af varmt grundvand, og dermed dannelsen af malmforekomster.

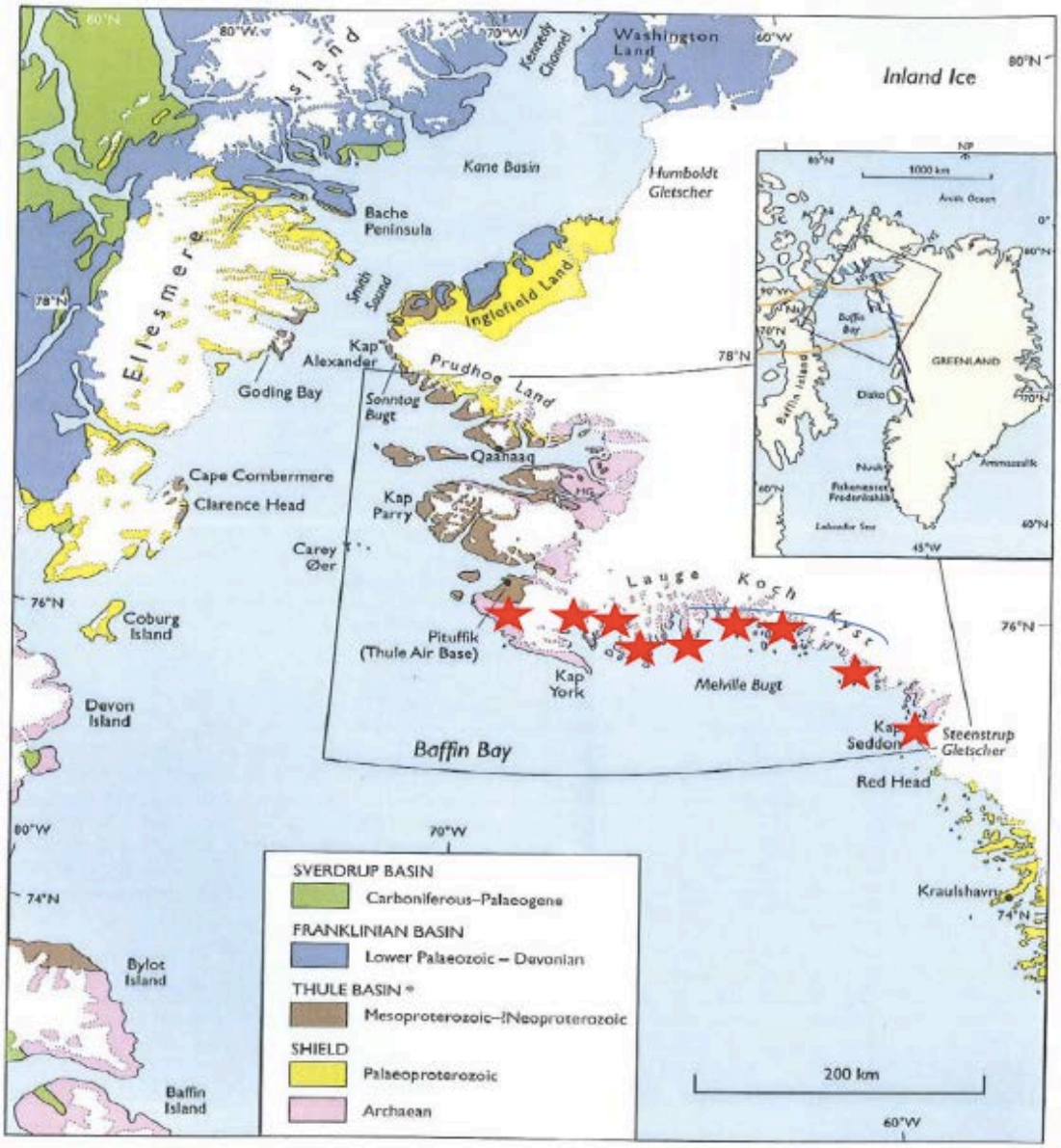
Endelig kan der udfældes malmmineraler i magmaer når disse afkøles. Platinmineraler og væsentlige nikkel, krom, vanadium og titanium malme findes typisk i magmatiske intrusioner. Diamanter, sjældne jordarters metaller (REE), fosfor og en lang række andre sjældne metaller er associeret med en gruppe af usædvanlige – såkaldte alkaline - magmatiske intrusioner som findes usædvanligt rigt repræsenteret i Syd- og Østgrønland.

Kendskabet til Grønlands placering i det pladetektoniske puslespil gennem Jordens historie giver også mulighed for at overføre erfaringer fra kontinenter som tidlige har været sammenhængende med Grønland. Opdagelsen af en kæmpe forekomst af nikkelmalm i 1993 i Voisey's Bay i Labrador var det største mineralfund i Canada i et halvt århundrede. Erkendelsen af, at Sydvestgrønland var sammenhængende med Labrador indtil opsplitningen af Pangea, forårsagede en stor interesse for eftersøgning af nikkelmalm i Grønland, ligesom viden om delingen af de sedimentære bassiner der dannedes mellem det nuværende Norge og Østgrønland frem til åbningen af Nordatlanten for 55 millioner år siden er en del af baggrunden for den store interesse for olie-gas efterforskning ud for Østgrønland.

To bly-zink miner, Nanisivik og Polaris i Arktisk Canada, indgår i en geologisk struktur- det såkaldte Frankliniske Bassin som fortsætter gennem Nordgrønland (Se fig. 4). En meget rig jernforekomst Mary River Iron Deposit på Baffin Island i Nunavut er netop godkendt til start i 2013, og er en del af ens struktur der fortsætter gennem Melvillebugten på den Grønlandske side (Fig. 5.), og denne viden indgår i efterforskningsselskabernes vurderinger af hvilke områder der er prospektive.



Figur 2: Bly-zink forekomster i det Frankliniske Bassin in Arktisk Canada og Nordgrønland (Kilde: GEUS)



Figur 3: Jernmineraliseringer i Melvillebugten. Nordvestgrønland (Kilde: GEUS)

På baggrund af den eksisterende viden om Grønlands geologiske opbygning og historie er det således muligt at danne sig et generelt billede af potentialet for tilstedeværelsen af diverse mineralske forekomster.

Geologiske regioner

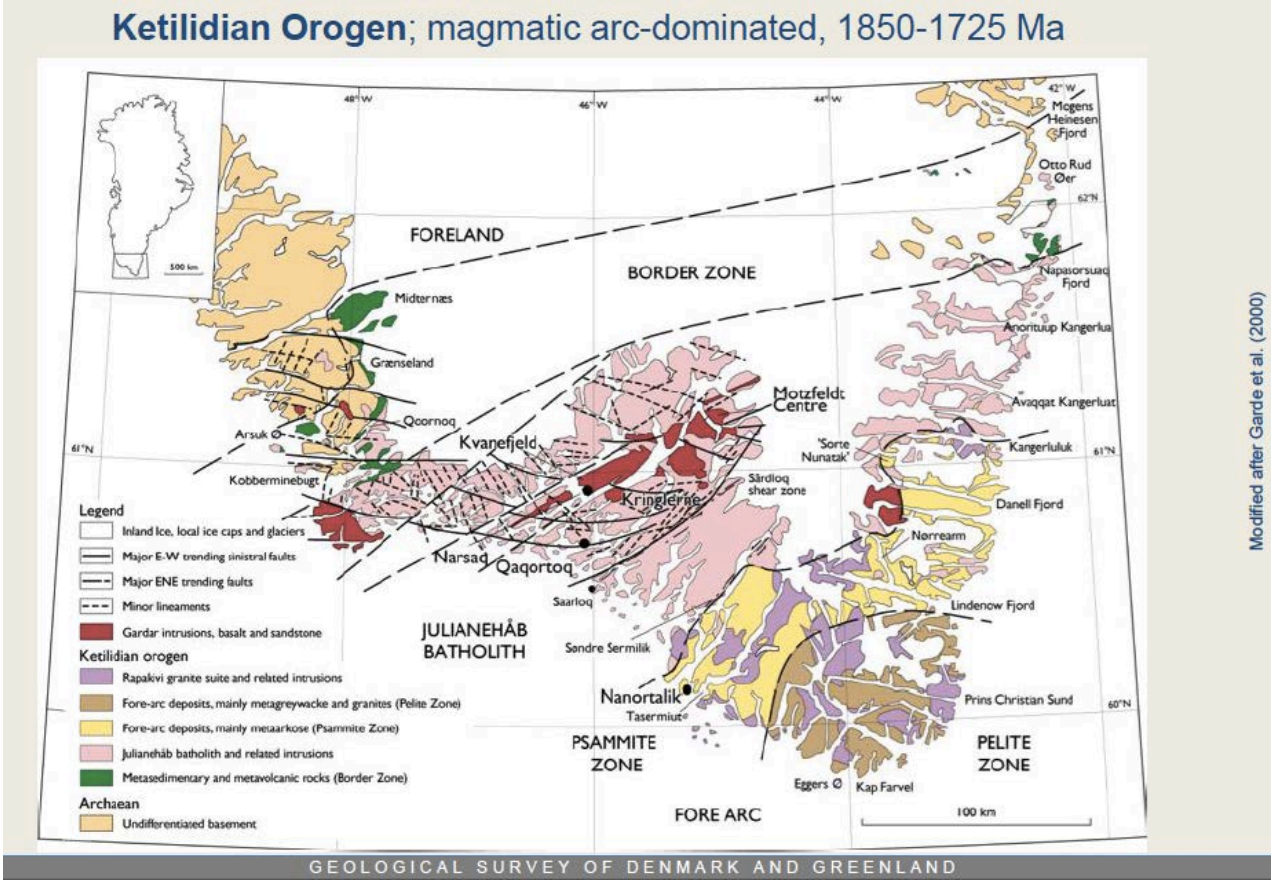
Grønland kan deles op i regioner baseret på alder, dannelsesmiljø og struktur af de bjergarter der forekommer.

Sydgrønland

Fra Kap Farvel og til Arsuk på vestkysten og Puisortoq på østkysten består Grønland af et kompleks af bjergarter dannet i et geologisk miljø, hvor oceanbund er skudt ind under det ældre Grønlandske kontinent for ca. 1800 millioner år siden (Kalsbeek and Bondam, 1990; Garde et al., 2002a, Windley and Garde, 2009. Denne type miljøer er i dag repræsenteret ved f.eks. den bjergkæde der definerer Sydamerikas vestkyst. Verdens mest produktive guldminer udnytter forekomster dannet i tilsvarende geologiske miljøer og Sydgrønland må antages at have et stort potentiale for guld, med muligheden for forekomster i verdensklasse (Stendal and Swager,1995; Steenfelt et al., 2000; Schjøth et al., 2000; Steendal and Secher, 2002). Nalunaq guldminen, som har produceret siden 2004 og er under lukning, ligger i dette kompleks.

Gardar

For ca. 1300 millioner år siden skiftede det pladetektoniske miljø i Sydgrønland, og der dannedes en række forkastningsdefinerede bassiner langs grænsen mellem det gamle kontinent mod nord, og den nydannede terræn mod syd. Opsprækningen var ledsaget af vulkanisme og de aflange bassiner blev fyldt op med lava og sedimenter, som ses i området omkring Narsaq, Qasiarsuq og Igaliku. Dette geologiske miljø kan sammenlignes med Østafrika i dag, med sprækkedale og omfattende magmatisk aktivitet, og med en karakteristisk serie af magmatyper, som er karakteriseret ved unormalt højt indhold af bl.a. uran, litium, beryllium, zirkonium, REE, niobium og tantal. Den mest kendte forekomst fra Gardar provinsen er Ivittut kryolit forekomsten, som var en aktiv mine fra 1854 og helt frem til 1962. Ved minens ophør var der stadig kryolit lagre i Ivittut og den sidste malm udskibedes i 1987. Også Ilimaussaq intrusion (Bailey et al., 1981; Sørensen, 2001) er velkendt og studeret siden begyndelsen af det 19. århundrede på grund af sine sjældne mineraler, og Motzfeldt komplekset samt flere andre intrusioner i området har et stort potentiale for økonomiske forekomster af disse grundstoffer. Kvanefjeld og Kringlerne er begge er dele af Ilimaussaq Intrusionen og hjemsted for to igangværende projekter med hhv. REE, uran og zink og REE, zirkonium og niobium som hovedfokus (Sørensen and Kalvig, 2012).



Figur 4: Gardarprovinsen i Sydgrønland. De mørkerøde partier er alkaline intrusioner, som er årsagen til regionens store potentiale for REE, U, Zn, Zr, F, Ta, Nb. Den sydgrønlandske guldprovins strækker sig i en bånd fra Nanortalik til Danell Fjord på østkysten. (Kilde: GEUS)

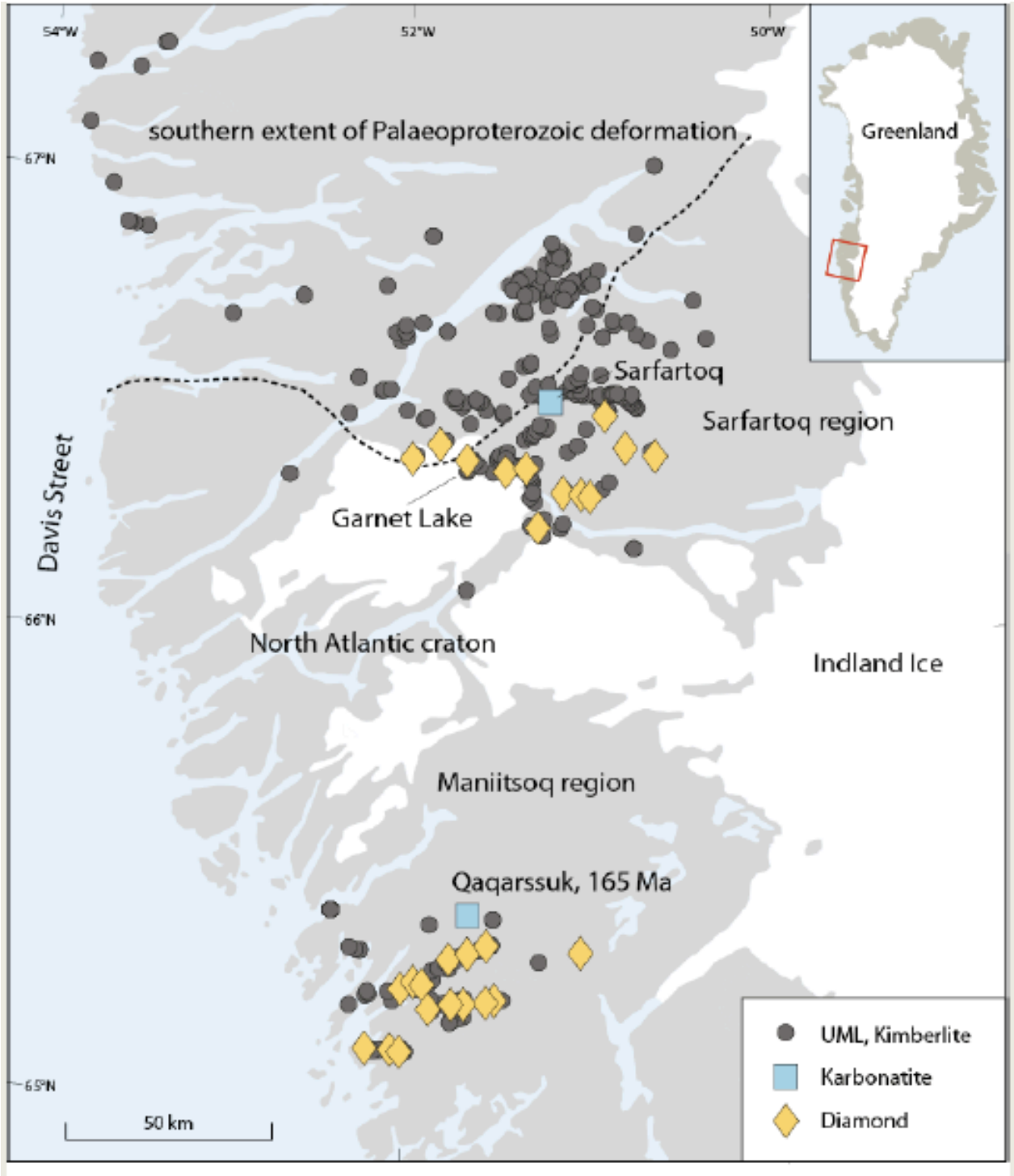
Midt- og Nordgrønland.

Området fra Arsuk op til Kangerlussuaq i Vestgrønland og fra Puisortoq til Ammassalik i Østgrønland er helt overvejende domineret af gnejser dannet for mere end 2800 millioner år siden, og har ikke været påvirket af gennemgribende geologiske processer i de seneste 2.5 milliarder år. Bjergarterne fra Kangerlussuaq til og med Inglefield Land i Vestgrønland og fra Ammassalik til Nansen Fjord på Blossevillekysten i Østgrønland er også overvejende dannet for mere end 2800 millioner år siden, men dog med yngre sekvenser. I denne del af regionen er der sket gennemgribende deformation, metamorfose of opsmeltning af grundfjeldet i perioden for 1800-1600 millioner år siden.

Fælles for hele regionen er at bjergarterne primært er dannet i den dybe skorpe, men at der er talrige stærkt deformerede og metamorfoserede lag af sediment og lava som oprindeligt er aflejret i havet. Endvidere findes sporadisk forekommende magmatiske intrusioner fra senere geologiske perioder. I denne region er der potentiale for at finde alle typer af "hårde mineraler", altså malme til metaller, fordi bjergarter dannet i en lang række forskellige geologiske miljøer er integreret gennem senere tektoniske processer (Steenfelt et al., 1998; Sørensen and Steensgaard, 2011; Sørensen et al., 2012). Disse vil ofte være i irregulære malmlegemer (Pedersen, 1981), og er derfor sværere at dokumentere og bryde end malme i ikke deformerede egne.

Diamanter

Diamanter dannes i kappen under gamle (tykke) stabile grundfjeldsregioner, og der er derfor et særligt potentiale for diamanter i de gamle grundfjeldsområder. Erfaringer fra diamantudvinding i andre lande med gamle grundfjeldsregioner, viser at potentialet er særligt højt lang grænserne mellem forskellige gamle kontinentblokke, hvor kimberlit og andre magmatyper kan transportere diamanter fra dannelsesområderne i mere end 100 km dybde til overfladen (Sand et al., 2009). I Vestgrønland forekommer diamantbærende kimberlitter især langs nordgrænsen for den gamle grundfjeldskerne lige syd for Kangerlussuaq, men kan findes ved andre gamle pladerande som f.eks. i den nordlige Diskobugt (Larsen et al., 1983; Secher et al., 2009; Hutchison, 2005; Sand et al., 2009; Secher and Nielsen, 2005). Fælles for de kendte grønlandske forekomster er, at de typisk forekommer som gange og sills og har relativt små voluminer af malm og lav lødighed.



Figur 5: Kimberlitforekomster i midt-Vestgrønland. (Kilde: GEUS)

<u>De Neogene (55-45 millioner år) mangmaprovinser i Øst- og Vestgrønland</u>.

I forbindelse med dannelsen af Labradorhavet og Atlanterhavet var der som før nævnt intens magmatisk aktivitet langs Grønlands kyster. Laverne og i særdeleshed de magmatiske intrusioner fra denne periode har et stort mineralpotentiale, primært for nikkel, guld og platinmetaller, men også i nogen grad for molybdæn og andre metaller. Skærgårdsintrusionen i mundingen af Kangerlussuaq i Østgrønland er en meget stor forekomst af guld, og palladium -forekomst, som har været undersøgt

siden 1980-erne, men som på grundlag af de kendte forekomster og prisforhold p.t. ikke er økonomisk (Andersen et al., 1998; Bird et al., 1991; Nielsen and Schønwandt, 1990). Malmbjerget, ligeledes i Østgrønland, er vært for en stor molybdæn forekomst, der har været kendt og efterforsket siden 1950'erne. Malmen af en sålkaldt porfyr type, hvor sene vandige opløsninger i magmaet ved øget tryk sprænger et netværk af årer rundt om magmakammeret hvor metaller afsættes. Malmbjerget er velundersøgt og har opnået licens til udvinding, men ugunstige verdensmarkedspriser (molybdæn udvindes overvejende som et biprodukt ved kobber produktion) har dog gjort at brydning ikke er igangsat. Molybdænpriserne har været faldende gennem de seneste år, og selskabet, som har alle tilladelser på plads for at kunne foretage en produktion, afventer forbedringer i priserne for at gå videre med projektet.

Der er beskrevet tæt på 66 intrusioner relateret til den opbrydningsrelaterede vulkanisme i Østgrønland, og de er generelt ikke velundersøgte pga. vanskeligt terræn og adgangsforhold.
Der er en marginal chance for at basalter i denne provins kan være reservoirbjergarter for olie, idet der er fundet olie i mindre omfang i basalter i Diskobugten.

Nord og Nordøstgrønland

Nord og Nordøstgrønland indgår i den Grønlandske nationalpark, som err verdens største nationalpark. Ikke desto mindre er mineralprospektering tilladt inden for nationalparken.

I denne region er det tilstedeværelsen af store sedimentære bassiner som betinger et stort potentiale for bly, zink og kobber forekomster. Ved Citronenfjord i Nordgrønland findes en verdensklasse zink-forekomst (Krag et al., 1997; Van der Stijl et al., 1998; Thrane et al., 2011), og der er løbende prospektering efter yderligere forekomster, ligesom det undersøges om hyppige kobbermineraliseringer er dele af større og potentielt meget store forekomster (Bernstein 2012a, b). De sedimentære bassiner har været genstand for nogen eftersøgning efter olie/gas, og har et vist potentiale for onshore olie-gas forekomster.

Havet omkring Grønland

Resursepotentialet i havområderne inden for Grønlands eksklusive økonomiske zone er primært inden for olie og gas. Der har siden 1960-erne været en forventning om, at der kunne være olie- og gasfelter i undergrunden ud for Grønland. Det førte til seismiske undersøgelser af soklen ud for Vestgrønland i begyndelsen af 1970-erne. De første fem prøveboringer blev gennemført i 1976 og 1977 ud for midt Vestgrønland. De tidligste seismiske undersøgelser og de gennemførte boringer viste ingen egentlige forekomster, men dokumenterede dog et vist potentiale for olie og gasforekomster ud for Vestgrønland. Fra 1990-1996 gennemførte et konsortium af seks internationale olieselskaber og Nunaoil med GEUS som konsulent og i samarbejde med søværnet omfattende fornyede seismiske undersøgelser (Kalaallit Nunaat Marine Seismic, KANUMAS) ud for både Nordøstgrønland og Nordvestgrønland. Samtidig gennemførte GEUS nyfortolkning af tidligere data fra Vestgrønland, hvilket førte til en væsentlig øgning af potentialet ud for Vestgrønland. Store

områder der tidligere var vurderet som magmatisk oceanbund uden potentiale for olie og gas, viste sig at indeholde sedimentære bassiner med betydelige potentialer for kulbrinter.

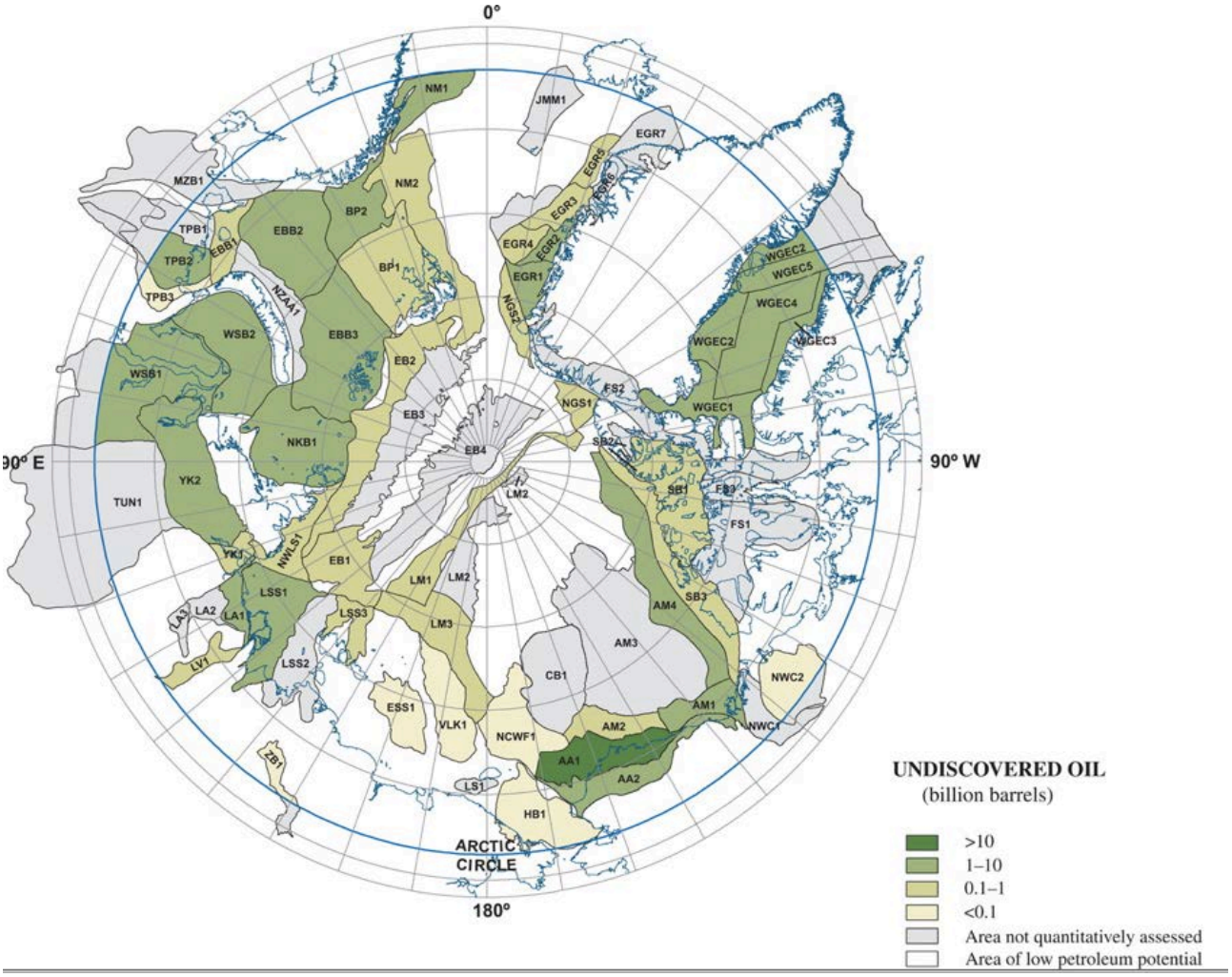
Seismiske undersøgelse i Østgrønland startede på land i Jameson Land i 1984, mens offshore undersøgelser i første omgang startede med airborne magnetik. På grund af isforholdene gik det langsomt med at få indsamlet seismiske data. Undersøgelserne har dokumenteret store områder, der vurderes at have et betydeligt potentiale for olie og gas. En rapport fra USGS, USA's geologiske Undersøgelse i 2007 skabte en stærkt øget opmærksomhed på den arktiske region som kilde til olie og gas i fremtiden. USGS har identificeret 25 geologiske provinser, som opfyldte et krav om mindst 3 km sedimenttykkelse, mindre end 500 m vanddybde og større en 10 % sandsynlighed for forekomster på mere en 50 millioner tønder olie eller gas (omregnet som olieækvivalent). Rapporten anførte, at den arktiske region som helhed vurderedes at rumme 22 % af verdens endnu ikke opdagede olie- og gasforekomster, fordelt på 13 % olie, 30 % naturgas og 20 % NLG (flydende naturgas). Tre af de identificerede provinser omfatter områder inden for Grønlands økonomiske zone.

En mere detaljeret analyse har underopdelt de identificerede provinser i enheder (assessment units) baseret på de deres geologiske forhold og efterforskningsmuligheder (især kildebjergarter og typer af strukturer). Ved at sammenligne med tilsvarende geologiske betingelser i 246 områder med kendte olie og gasforekomster fra hele verden, har man på et rent statistisk grundlag beregnet, hvor stort olie og gaspotentialet er inden for hver enhed (Gautier et al., 2009). I områderne ved Grønland er der identificeret 8 enheder, der hver for sig anslås at have potentiale for mellem 1 og10 milliarder tønder olie og med mellem 50 % og 72 % chance for succes. Tilsvarende er identificeret 4 enheder, der hver for sig anslås at have potentiale for mellem 0,1 og 1 milliard tønder olie og med mindre chance for succes (25-50 %). Nogle af disse enheder omfatter både Grønlandsk og canadisk territorium. Tilsvarende er der opgjort potentialet for gas, som kan omregnes til olieækvivalent. Der er generelt højere gaspotentiale end oliepotentiale i både Vestgrønland og Østgrønland.

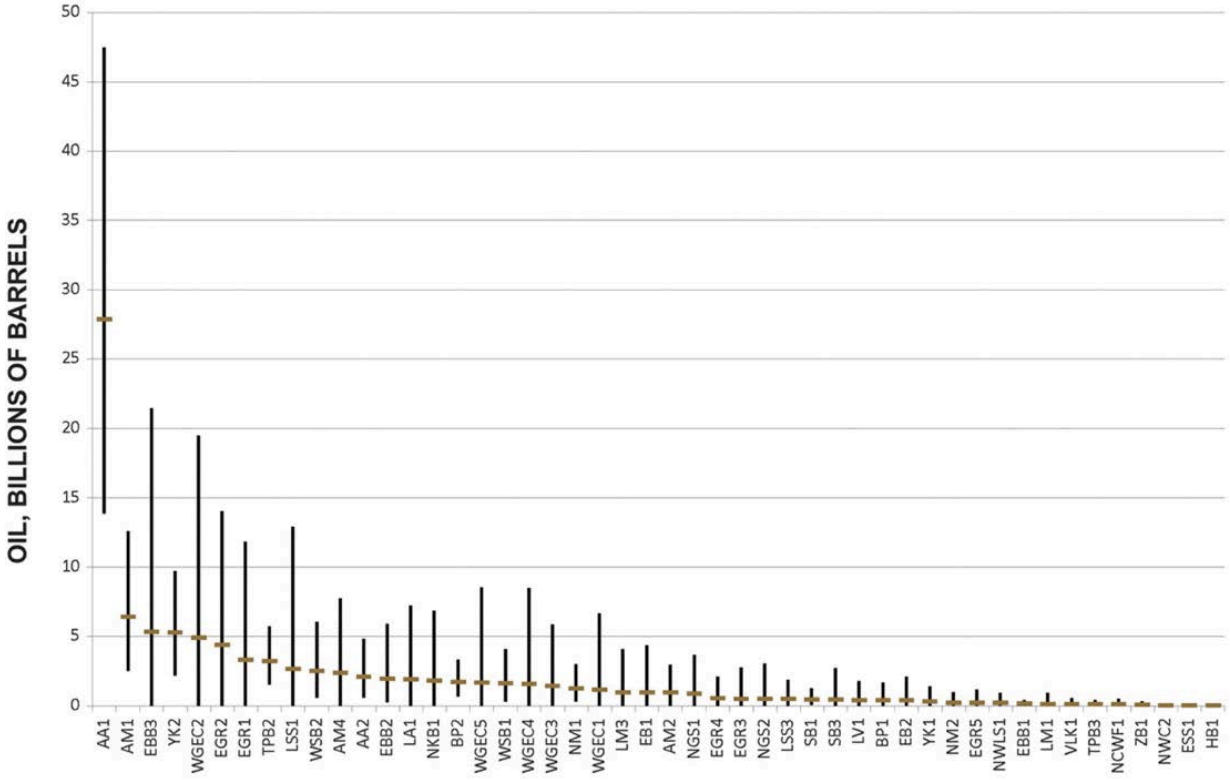
I figur 6 og 7 ses denne seneste vurdering hvor potentialet for enheder inden for Grønlands økonomiske zone er markeret med pile i Fig. y. Gautier et al. 2009 har anført et ”mean estimated volume” for hver enhed. Hvis man lægger disse tal sammen når man frem til ca. 16 milliarder tønder olie sammenlagt for de enheder der grænser op til Grønland, og som i nogle tilfælde ligger på både Canadisk og Grønlandsk territorium. Dette er også opsummeret af USGS Schenk et al., 2010 (http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3014/) og Gautier, 2007 (http://pubs.usgs.gov/fs/2007/3077/) der angiver potentialet for Vestgrønland og tilstødende Canada til 7.3 mia. tønder olie og Østgrønland til 8,9 mia. tønder olie. Det er vigtigt at bemærke, at der for alle de grønlandske enheder er en sandsynlighed for, at der ikke forekommer olie som kan udvindes. Sandsynligheden for, at der ikke er olie i nogen af de grønlandske enheder er lige så stor som sandsynligheden for, at der findes 50 milliarder tønder olie.

En vurdering foretaget af råstofdirektoratet konkluderer at potentialet er 50 milliarder tønder olie og gasækvivalenter, samt at udvinding fra et felt med 1 milliard tønder olie vil give et afkast til staten på

121,5 milliarder kr. over tredive år (Fakta om Olieboringer i Grønland). Et estimat af rentabiliteten af eventuelle Grønlandske oliefelter, må dog siges at være behæftet med så store usikkerheder, at det i realiteten ikke er muligt at forudsige de økonomiske effekter for det Grønlandske samfund af eventuelle fremtidige oliefund.



Figur 6: Den arktiske region opdelt i geologiske enheder med henblik på vurdering af potentialet for olie. (Kilde U.S. Geological Survey)



Figur 7: Gautier et al. 2009. Skønnede uopdagede olieresurser i den arktiske region. De lodrette linjer viser spændvidden i estimerede resurser fra 5% til 95 % sandsynlighedsniveau. De vandrette markører er medianen skønnede olieresurser for hver enkelt enhed (WG = Vestgrønland, EGR = Østgrønland).

Det er ganske svært at vurdere chancerne for fund af, og mulighederne for udnyttelsen af grønlandske olie og gasforekomster. Lave priser på gas og høje omkostninger til etablering af infrastruktur til gaseksport betyder, at det ikke vil være rentabelt at udvinde naturgas inden for en meget lang tidshorisont. Det er derfor for den umiddelbare fremtid udelukkende relevant at vurdere potentialet for olie. Som det fremgår af analysen fra USGS er der et stort potentiale for forekomster af olie inden for Grønlands økonomiske zone. Olieudvinding kan muligvis blive rentabelt med tiden, men der eksisterer endnu ikke teknologi til udvinding af olie fra eventuelle forekomster i isdækkede områder, såsom det østgrønlandske farvand. Mulige grønlandske felter ligger udenfor den region som Statoil karakteriserer som ”The workable Arctic”. Alt i alt må produktion af olie ud for Grønland antages at have en meget lang tidshorisont og kræve meget store investeringer. Indtægter fra olieproduktion kan formodentlig ikke ventes tidligere end 20-50 år fra nu, men kan til den tid betyde væsentlige indtægter for det Grønlandske samfund. Indtil da vil selve efterforskningsaktiviteterne kun give en mere begrænset indtægt til det grønlandske samfund. I en vurdering af det samlede arktiske olie og gas potentiale skriver konsulentfirmaet Ernest & Young om olieindvinding i Arktis: ”Sådanne aktiviteter er ved ydergrænsen for både sikkerhed og kommerciel bæredygtighed for industrien og et udslip eller en ulykke ville være katastrofale.”

Hvordan defineres økonomiske forekomster?

Det er vigtigt at skelne mellem den geologiske tilstedeværelse af bestemte bjergarter eller mineraler og økonomiske forekomster. En forekomst vil ofte geologisk set kunne beskrives ud fra en række faktorer hvoraf de vigtigste er:

Geologiske faktorer:

- Lødighed – ofte målt i gram (parts per million" – ppm) eller procent af det ønskede stof per ton malm.
- Størrelse af forekomsten – ofte målt i millioner ton malm – Mt. – det vil sige mængden af den bjergart der indeholder det økonomiske mineral.
- Malmlegemets form, orientering og dybde i forhold til overfladen. Det er væsentligt nemmere at evaluere og bryde regelmæssige lag end stærkt foldede og uregelmæssige lag.
- Malmens beskaffenhed m.h.t. kornstørrelse, mineralogi, tilstedeværelsen eller fraværet af ikke ønskede eller miljømæssigt problematiske stoffer i malmen eller i de bjergarter som af tekniske grunde skal brydes sammen med malmen, har t stor betydning for de tekniske- og økonomiske muligheder for at oparbejde af malmen.

Geografiske og politiske faktorer:

- Beliggenhed i forhold til eksisterende infrastruktur, så som veje, jernbaner og havne.
- Beliggenhed i forhold til det globale marked.
- Lovgivning om beskatning, miljøkrav og arbejdsmarkedsforhold i det land forekomsten findes.
- Graden af politisk stabilitet og forudsigelighed af rammevilkår for minedrift i det land hvor forekomsten finder sted.

Geologisk set identiske forekomster to forskellige steder, vil således have helt forskellige økonomiske potentialer, bestemt af de ovennævnte faktorer. De ikke-geologiske faktorer bestemmer ikke kun det mulige økonomiske afkast ved en eventuel mine men også forekomstens brydeværdige størrelse. Et malmlegeme vil ofte have variationer i lødighed, således at der findes en mindre mængde højlødig malm og en stor mængde malm med mindre lødighed. I evalueringen af en forekomsts økonomiske potentiale opererer man med en såkaldt "cut-off grade", som er den mindste lødighed det kan betale sig at udvinde. Denne lødighed varierer selvsagt med prisen på det råstof man ønsker at udvinde og med de omkostninger der er forbundet med brydning.

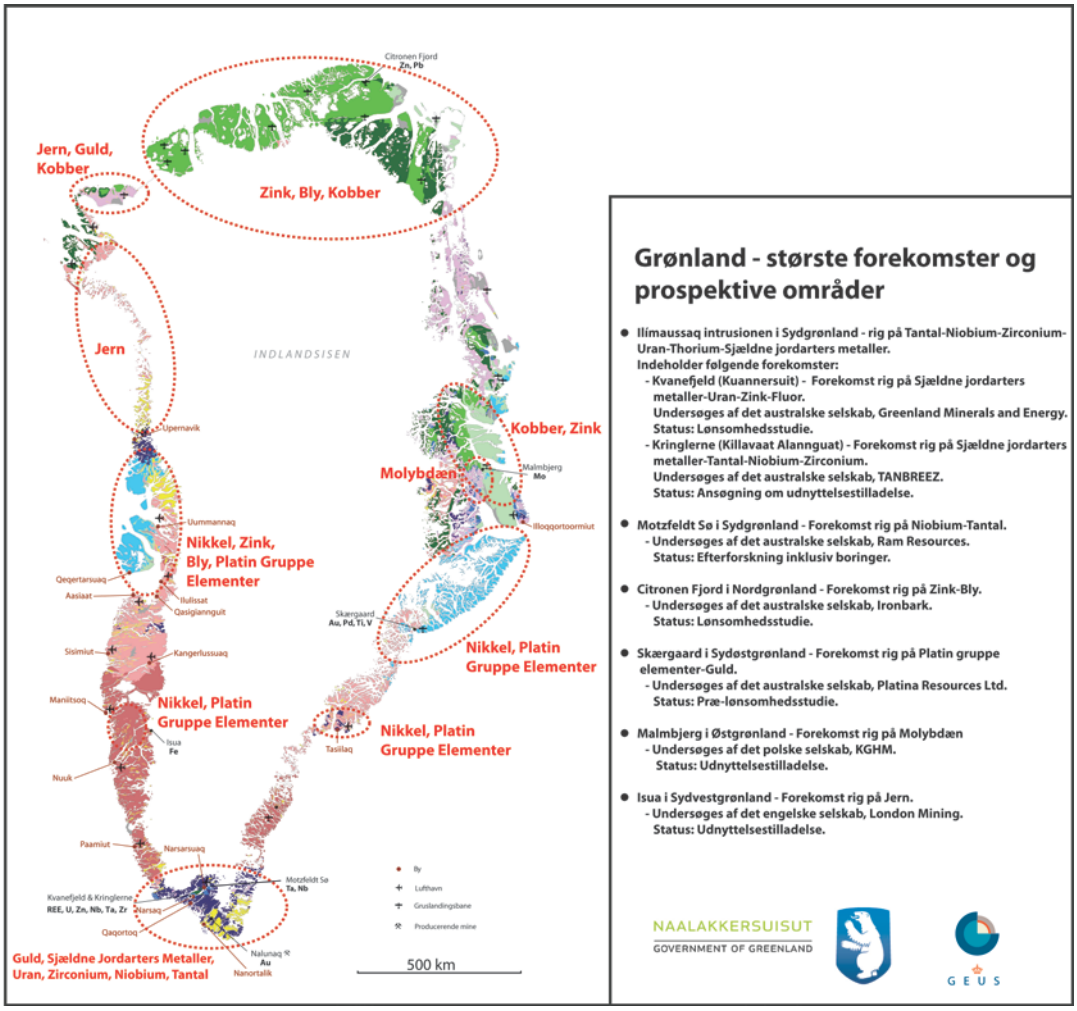
I forhold til Grønland er den manglende eller svage infrastruktur sammen med høje arbejdslønninger og strenge miljøkrav negative faktorer i en forekomsts potentielle rentabilitet,, og som skal kompenseres ved højere malmlødighed. Beliggenhed i forhold til aftagere er for tiden også negative faktorer for det meste af Grønland, men er måske den eneste faktor som potentielt ændres på grund af klimaforandringer.

Sammenhængen mellem cut-off grade (den lødighed der vil give break-even, og dermed den mindste lødighed der indgår i reserverne), råvarepriser og anlægsomkostninger betyder at det ikke er muligt entydigt at angive størrelsen af en forekomst ud fra geologiske faktorer alene. Der er sammenhæng mellem størrelsen af den totale resurse og økonomien i et mineprojekt, således at selv små

forekomster kan dække anlægs og driftsudgifter og give et økonomisk afkast hvis lødigheden er meget høj, mens malme med lav lødighed kun kan udnyttes hvis den totale forekomst er meget stor, og der kan etableres et koncept hvor rationalisering gør det muligt at producere til lavere omkostning. En meget stor forekomst med lav lødighed vil ofte af praktiske årsager tage lang tid at bryde og oparbejde, hvilket giver en lang levetid for minen. Dette betyder også at selv meget store forekomster kan have relativt lave produktionsrater per år.

Dette forhold giver anledning til en del forvirring i den offentlige debat om mineralforekomster som f.eks. Kvanefjeld REE og uran forekomsten. Denne forekomst er blandt de 10 største kendte uranforekomster i verden, men da størrelsen af uran produktion per år i det foreliggende projekt, helt er bestemt af den mængde REE der kan afsættes, svarer produktionen til mindre end 1 % af verdens uranproduktion. Det er derfor på samme tid korrekt, at Grønland efter de foreliggende projekter vil være en absolut småskala producent af uran, samtidig med at Grønland har en af verdens største forekomster.

Konkrete identificerede forekomster



Figur 8: Konkrete mineralforekomster med stort potentiale for udvikling af minedrift.

Kritiske mineraler

Af: Karen Hanghøj & Per Kalvig, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS

Mineraler betragtes som kritiske, når de er vigtige for samfundet og der desuden eksisterer en forsyningsrisiko. Forsyningsrisici er især knyttet til politiske og økonomiske forhold samt til hurtige teknologiske ændringer med nye behov, som mineralproducenterne ikke kan nå at besvare. Forsyningsrisici kan også være knyttet til geologisk tilgængelighed, der dog sjældent ses i praksis (med kryolit, som kan bruges i aluminiums produktion som den bedste kendte undtagelse, og her har man nu substitueret med et syntetisk produkt). Begrebet sårbarhed anvendes i forbindelse med forsyningsrisici for mineraler og sårbarhedsanalyse er et af instrumenterne til at vurdere, hvor kritisk et givent mineral er for samfundet. Sårbarhed kan bero på importafhængighed, geopolitiske forhold, forsyningsusikkerhed (meget få producenter og/eller usikre produktionsforhold), samt begrænsede muligheder for substitution og genbrug.

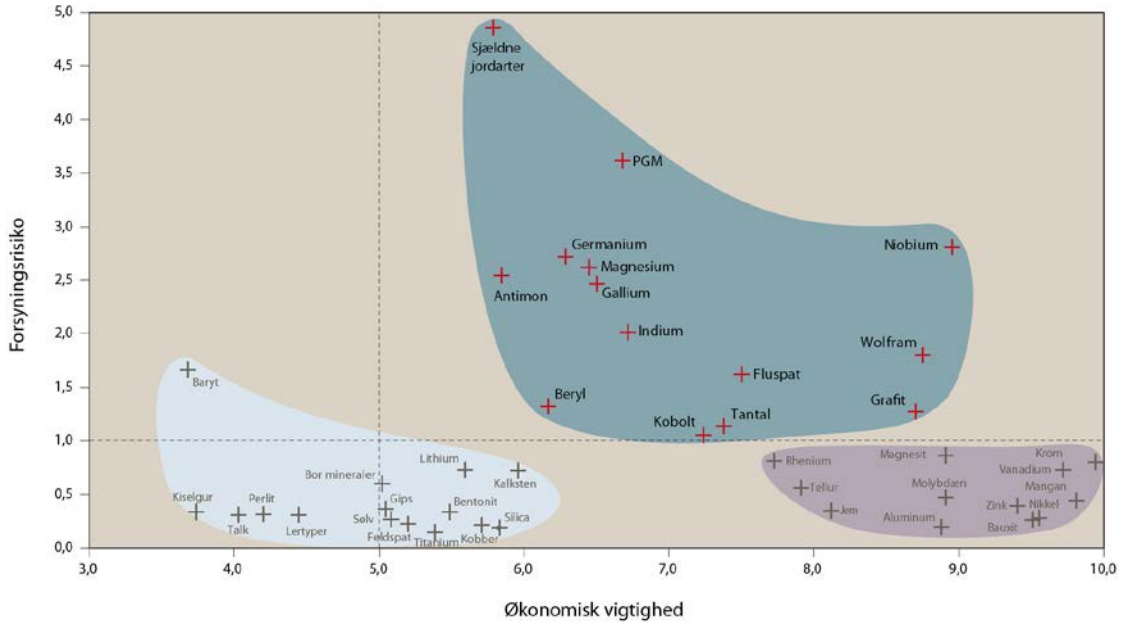
Udfaldet af nationale vurderinger for kritiske mineraler varierer, fordi industristrukturen og industriens behov er forskellige fra land til land, og fordi det geologiske grundlag for at bryde mineraler er forskelligt. Dette er årsagen til, at der er forskel på hvad der er kritisk i for eksempel Kina, Japan, USA og Europa. Vurderinger af kritiske mineraler er derudover dynamiske i relation til teknologiske udviklinger, muligheder for substitution, global efterspørgsel, markedets tilpasningsevne og geopolitiske forhold. Lister over kritiske mineraler udarbejdes både globalt (UN), regionalt (EU) og nationalt (USA, UK, Korea, etc.), men kan også udarbejdes for bestemte brancher (f.eks. bilbranchen i Tyskland, elforsyningen i USA, etc.). For Danmark og for dansk industri er der ikke udarbejdet en specifik oversigt over kritiske mineraler, men Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) er netop gået i gang med en sårbarhedsanalyse af det danske råstofforbrug.

EU-kommissionen har i 2010 opgjort, at ud af 41 undersøgte mineralske råstoffer er 14 forskellige råstofgrupper er kritiske for Europas industri (http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf), se Figur 9. I dette studie anses råstofferne som kritiske, hvis der er forsyningsusikkerhed, og hvis mangel på mineralet vil have betydning for EU's økonomi.

Strategiske mineraler

Nogle lande og organisationer anvender begrebet strategiske mineraler. For eksempel bruger USA bl.a. følgende kombinerede definition for kritiske og strategiske metaller og mineraler: "Materialer som er nødvendige til brug for forsvar og national sikkerhed" og "de materialer, som USA er særligt importafhængig af, for hvilke der ikke er brugbare økonomiske substitutionsmuligheder, og for hvilke der er bekymring om mulighederne for at bryde mineralet (af geopolitiske grunde) eller bekymring for forsyningerne (markedsforhold)". Nogenlunde denne definitionen anvendes også af United States National Research Council. Definitionen indebærer, at et strategisk mineral altid er kritisk, men at et kritisk mineral ikke nødvendigvis er strategisk. I analysen "Critical raw materials for the

EU” (July 2010) har EU-kommissionen ikke foretaget en opdeling mellem kritiske og strategiske mineraler. GEUS tilslutter sig det synspunkt, at der ikke er behov, endsige mulighed for, at foretage disse sondringer.



Figur 9: Diagram som viser EU’s vurdering af mineralers kritikalitet. De 14 mineraler og mineralgrupper markeret med røde symboler betragtes som kritiske. Fra: Critical raw materials for the EU: July 2010. European Commission, Enterprise and Industry.

Potentialet for kritiske mineraler i Grønland

Grønland har en varieret og lang geologisk historie og har potentiale for en lang række råstoffer, både de traditionelle som for eksempel jern, kobber, zink og guld, men også for flere af de kritiske mineraler. Figur 10 nedenfor viser GEUS' vurdering af potentialet for kritiske mineraler i Grønland.

Det skal bemærkes, at:

- i lighed med Grønland råder en lang række lande over nogle af de kritiske ressourcer, og at der mange steder pågår der en vis efterforskning efter disse mineraler.
- nogle af biprodukt-mineralerne kan blive kritiske, hvis produktionen af hovedmineralet mindskes; det kan eksempelvis blive tilfældet for sammenkædning mellem kobberproduktion og produktion af rhenium, tellurium og selenium.
- kritikalitet er dynamisk og variabelt, og at basale råstoffer som jern og kobber også kan blive kritiske, hvis vitale dele af værdikæden koncentreres i et enkelt land. Derfor gennemgås flere relevante mineraliseringer og råstoffer i det følgende, og ikke kun dem på EU's liste over kritiske råstoffer

Critical element	EU-RMG	US-CCM	UNEP	Greenland potential
Niobium	X	X		High
PGM	X	X	X	Moderate-high
REE	X	X	X	High
Tantalum	X	+	X	High
Fluor	X			High
Graphite	X			High
Vanadium	+	+		High
Chromium	+			High
Copper		+		High
Iron	+			High
Titanium		+		High
Zinc	+			High
Antimony	X			Moderate
Gallium	X	+	X	Moderate
Nickel	+			Moderate
Tungsten	X			Moderate
Cobalt	X		+	Low-moderate
Lithium		+		Low-moderate
Beryllium	X			Low
Germanium	X		+	Low
Indium	X	X	X	Low
Magnesium	X			Low
Manganese	+	X		Low

Figur 10: GEUS' vurdering af råstofpotentialet i Grønland i forhold til tre forskellige lister over kritiske mineraler (EU-RMG = Critical raw materials for the EU, 2010; US-CCM = US NRC and Department of Energy, Critical Materials Strategy, 2008 og 2011; UNEP = Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential, 2009). X betyder at mineralet vurderes som særligt kritisk,+ angiver noget lavere kritikalitet eller eventuel fremtidig kritikalitet.

Mineralforekomster og minedrift i Grønland

Mineralindustrien er i sin natur international. Den globale udvikling med en fortsat høj økonomisk vækst i nye regioner betyder, at behovet for råstoffer er hastigt stigende. Dette har også skabt øget interesse for råstofforekomster i det arktiske område; der er især stor opmærksomhed på forsyningssikkerheden for en række økonomisk og samfundsmæssigt vigtige mineraler.

Grønland har ligesom resten af verden mærket denne stigende interesse, og med flere muligheder for mineprojekter inden for dette årti, er der nu betydelig fokus på Grønlands muligheder for at etablere en bæredygtig mineralindustri.

Grønlands Selvstyre (Naalakkersuisut) besluttede i 2009 at hjemtage råstofområdet fra Rigsfællesskabet. Råstofloven og dens administration af licenser er ikke blevet ændret væsentligt i forhold til vilkårene under det tidligere Hjemmestyre. Licenstildelinger bygger fortsat på et system, hvor selskaberne i første omgang kan få ret til at lede efter mineraler, med eller uden eneret (eksklusivitet), i et nærmere defineret område. Efterforskningslicenser tildeles med krav om, at der skal afholdes udgifter til efterforskningen og at alle indsamlede data og regnskaber for aktiviteter afrapporteres til Naalakkersuisut.

Efterfølgende kan selskabet søge tilladelse til at udnytte påviste mineralforekomster – en udnyttelsestilladelse. Dette forudsætter at der er gennemført grundige undersøgelser af forekomstens rentabilitet, samt af minedriftens estimerede miljømæssige og samfundsmæssige konsekvenser, såkaldte lønsomhedsstudier.

Mineralefterforskning i Grønland forløber typisk som i resten af den vestlige verden, ved at junior-selskaber udfører de indledende efterforskningsaktiviteter. Efter at projekterne er modnet, sælges projekterne til andre selskaber med større finansiel styrke og teknisk kapacitet til at bringe projektet frem til et lønsomhedsstudie. For de "traditionelle" mineraler vil projekterne derefter typisk blive solgt til mineselskaber, som har den tekniske viden og finansielle styrke til at implementere projekterne til egentlige miner og tilhørende oparbejdningsanlæg. For "specialmineraler" (f. eks sjældne jordarters metaller) vil der være relativt få selskaber, som kan/vil gå ind i slutfasen, fordi forekomsterne hver især er teknologisk og kommercielt komplicerede. Desuden sker afsætningen meget ofte til industrielle aftagere og ikke på en metal-børs.

Mineralprojekter har altid relativt lange modningsperioder; der går typisk minimum 10 -15 år fra opdagelse af en mineralforekomst til den eventuelt er i brydningsfasen. Sådanne lange forløb i mineralindustrien er i stærk kontrast til markedet for råstoffer, der fluktuerer på en langt kortere tidsskala. Ydermere skal det bemærkes, at mindre en 1 % af alle "opdagede" mineralforekomster, er lødige og store nok til at komme til brydningsfasen. Mange opgives undervejs; nogle af disse bliver måske senere undersøgt igen som respons på nye markedsvilkår og/eller ny teknologi. Dette gælder også i Grønland, hvor flere aktuelle projekter er forekomster fundet for mange årtier siden, f.eks. blev Malmbjerget (Mo) fundet i 1950'erne, Isua (Fe) i 1960'erne, Skærgården (Au og PGE) i 1980'erne og Citronen Fjord (Zn) i 1990'erne.

Grønland har oplevet en udvikling i antallet af eksklusive efterforskningstilladelser med et fald fra mere end 50 i 1997 til 17 i 2002 og en efterfølgende stigning til omkring 70 i starten af 2014 (med yderligere otte ansøgninger under behandling). Tilsvarende har udgifterne i forbindelse med mineralefterforskning udviklet sig fra 100 mio. DKK i 1997 til 21 mio. DKK i 2002 og 711 mio. DKK i 2011 og 529 mio. DKK i 2012. Det skal bemærkes, at de store efterforskningsomkostninger er knyttet til cirka 10 fremskredne projekter, hvor store boreprogrammer dominerer.

Yderligere information om retningslinjer for licens-vilkår findes
på http://www.bmp.gl/minerals/terms-rules-laws-guidelines

Grønland lige nu

I september 2013 var der 38 forskellige efterforsknings- eller mineselskaber med eksklusive licenser i Grønland, svarende til et totalt areal på 46 000 km^2. Det er dog en gruppe på cirka 10 selskaber (med søster- og datterselskaber), der står for hovedparten af licenserne. Efterforskningsselskaberne kommer fra mere end 10 forskellige lande, men mere end halvdelen af licenserne ejes af canadiske og australske juniorselskaber, og mindre end 15 % af selskaber er fra EU-lande. Der er på nuværende tidspunkt kun et enkelt kinesisk selskab (China-Nordic Mining Company Ltd) med efterforskningslicens i Grønland. De fleste efterforskningsselskaber er noteret på forskellige børser, men der er også aktive privatejede selskaber.

Der findes ikke en samlet oversigt over, hvordan disse selskaber finansierer deres aktiviteter. Grønlands Selvstyre udfører ikke efterforskning i eget regi, men har en aktieandel i NunaMinerals (et grønlandsk baseret efterforskningsselskab med flere licenser). Råstofloven giver mulighed for, at Grønlands Selvstyre kan indgå som partner i egentlige minevirksomheder.

Oversigt over samtlige licenser og licenshavere kan ses på:

http://www.bmp.gl/images/stories/minerals/list_of_licences/list_of_licences.pdf

Ved udgangen af 2013 er der fem udnyttelsestilladelser i Grønland, hvoraf kun én mine er aktiv, men under nedlukning. Kun grønlandske selskaber kan opnå en udnyttelsestilladelse og almindeligvis etablerer selskaberne sig i Grønland inden ansøgningsfasen, som typisk varer flere måneder og foregår i tæt dialog med Naalakkersuisut.

Af de cirka 70 aktive eksklusive efterforskningslicenser i Grønland i starten af 2014 er der meget stor spredning på, hvor fremskredne projekterne er.

Tabel 1 viser projekter med gældende udnyttelsestilladelser og de projekter, der skønnes at være mest fremskredne, og hvoraf nogle muligvis kan komme i produktion inden for de næste 5-10 år. Nogle af disse har allerede søgt udnyttelsestilladelse, mens andre er i færd med at foretage lønsomhedsstudier, der kan indgå i en eventuel ansøgning om udnyttelsestilladelse.

Efterforskningen i Grønland har fokus på mange forskellige produkter, som dækker både basismetaller (jern, zink, bly), særlige metaller (sjældne jordarters metaller, niobium, tantal) samt ædelmetaller (guld, platin) og smykkesten (rubin). Dette afspejler, at Grønland, via sin lange og komplekse geologiske historie, har mange forskellige mineralforekomster, hvoraf nogle af forekomsterne er store ressourcer. Udover de i tabellen nævnte ressourcer kan f.eks. kobber, nikkel, wolfram og grafit blive aktuelle i de kommende år.

Selskab	**Lokalitet**	**Aktivitet/Licens**	**Produkt**	**Bemærkninger**
Angel Mining A/S	Nalunaq, Vestgrønland	Aktiv mine Udnyttelsestil-ladelse	Guld	Under afvikling, forventes at lukke inden udgangen af 2013 eller tidligt i 2014.
Angel Mining A/S	Maarmorilik/ Sorte Engel	Ikke aktiv mine Udnyttelsestil-ladelse	Zink og bly (sølv)	Under etablering.
KGHM	Malmbjerg	Ikke aktiv Udnyttelsestil-ladelse	Molybdæn	Projektet har ligget stille nogle år pga. lave molybdæn-priser. KGHM er ny ejer.
Sibelco Nordic A/S	Seqi, Vestgrønland	Lukket Udnyttelsestil-ladelse	Olivin	Under afvikling.
London Mining A/S	Isua	Udnyttelsestil-ladelse 2013	Jern	Afventer finansiering. Storskalaprojekt.
True North Gems Inc.	Fiskenæsset	Ansøgt om udnyttelsestil-ladelse 2013	Rubin/safir	Relativt lille mine og lille produktmængde
Tanbreez	Kringlerne	Ansøgt om udnyttelsestil-ladelse 2013	Sjældne jordarters metaller, niobium, tantal, zirkon	Metallurgiske udfordringer.
Greenland Minerals & Energy Ltd.	Kvanefjeld	Lønsomheds-studie komplet. Efterforskningstil-ladelse	Sjældne jordarters metaller, uran, zink	Social impact assessment og optimeringsstudier pågår. Ansøgning om udnyttelses-tilladelse forventes i 2014.
Ironbark Zink Ltd.	Citronen Fjord	Lønsomheds-studie komplet.	Zink og bly	Tekniske udfordringer som følge af

		Efterforskningstil-ladelse		beliggenhed
Hudson Resources	Sarfartoq	Efterforskningstil-ladelse	Sjældne jordarters metaller	Thorium-bærende (biprodukt). Lønsomheds-studie pågår.
Hunter Min. Pty Ltd.	Isortoq	Efterforknings-tilladelse	Jern (vanadium) titan)	Ret få oplysninger om projektet
Platina Resources	Skærgaard	Efterforknings-tilladelse	PGE og guld	Lav lødighed, teknisk og logistisk vanskeligt. Lønsomheds-studie pågår.

Tabel 1: Oversigt over miner med gældende udnyttelsestilladelse og de projekter der anses for at være mest fremskredne

Historisk minedrift i Grønland

Selvom Grønland i dag ikke kan betragtes som en minenation i egentlig forstand, har landet en lang historie med flere aktive miner, hvoraf de mest kendte er kryolitminen i Ivittuut i Sydgrønland, zinkminen i Maarmorilik i Vestgrønland, bly-zinkminen ved Mestersvig i Østgrønland og kulminen i Qullissat i Vestgrønland. En række af de øvrige miner, for bl.a. grafit og kobber, var små og havde ingen nævneværdig betydning.

Informationer om den historiske minedrift er opsummeret i tabel 2.

Selskab	Lokalitet	Periode	Produkt	Bemærkninger
Kryolitselskabet Øresund A/S	Ivittuut, Sydgrønland	1854-1987	Kryolit	En meget vigtig mine, der gav store indtægter til den danske stat. Udtømt
Greenex A/S (Cominco, Boliden)	Maarmorilik, Vestgrønland	1973-1990	Zink og bly (sølv)	Stadig mulighed for genåbning.
Nordisk Mineselskab	Blyklippen, Østgrønland	1952-1963	Bly	Udtømt.
Staten/GTO	Qullissat, Disko, Vestgrønland	1924-1972	Kul	Stort grønlandsk samfund, som blev lukket sammen med minen.
Staten/KGH	Qaarsuarsuk, Nuussuaq, Vestgrønland	1905-1924	Kul	Meget lille mine; kun ét mineniveau under jord.
Grønlands Minedrifts A/S	Josva mine, Sydgrønland	1852-54, 1905-1914	Kobber	Lille underjordisk mine.
Staten/Grønlandsadministrationen	Frederik VII mine, Sydgrønland	1852, 1905, 1912	Kobber	Meget lille primitiv mine.
Grønlands Minedrifts A/S	Amitsoq mine, Sydgrønland	1916-1924	Grafit	Lille mine, både underjordisk og åben
Staten/ Grønlandsadministration en	Maarmorilik, Appat, Vestgrønland	1933-1940, 1966-1971	Marmor	Åbent brud af marmor til bygninger.
LKAB (Crew)	Seqi, Vestgrønland	2005-2010	Olivin	Har stadig udnyttelsestilladelse.

Tabel 2: Historiske miner i Grønland.

Det globale marked for råstoffer

Af Per Kalvig & Karen Hanghøj, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS

Råstoffer og deres værdikæde

De senere årtiers stærke økonomiske vækst i folkerige regioner giver øget efterspørgsel på traditionelle råstoffer som jern, kobber, bly m.fl. til opbygning af infrastruktur i form af veje, huse, metroer og så videre. Yderligere har nye teknologier til eksempelvis mobiltelefoner, computerteknologi, energilagring og grøn energi øget den globale efterspørgsel på en lang række grundstoffer, som ikke tidligere har haft stor kommerciel interesse. Det gælder for eksempel de sjældne jordarters metaller (REE), niobium, tantal, gallium, germanium m.fl.
For de enkelte materialer gælder det, at der er lang vej fra efterforskning og beskrivelse af en given malmforekomst, over ekstraktion og forarbejdning, til produktion af halvfabrikata og egentlige slutprodukter. Tilsammen kaldes disse led værdikæden. Værdikæden involverer flere af hinanden afhængige industrier og investorer, og det betyder, at der i reglen er langt fra producenten af slutprodukterne tilbage langs værdikæden til den minedrift, som udvinder råstofferne.

Råstofmarkedet generelt

Når man ser på mineralske råstoffer fra et økonomisk perspektiv, er langt de vigtigste jern, kobber, zink og guld, som tilsammen udgør over 75 % af den globale omsætning, det vil sige værdien af både det som brydes (produceres), og det som investeres i at finde nye forekomster.
Værdien af den globale produktion af mineralske råstoffer beløb sig i 2011 til cirka 618 milliarder USD fordelt på følgende *commodities* (handlede råstoffer): Jernmalm 37 %, kobber 20 %, guld 17 %, nikkel 5 %, zink 5 %, platingruppemetaller (PGM) 2 %, mangan 2 %, bly 1 %, bauxit (aluminium-malm) 1 %, krom 1 %, sjældne jordarters metaller (REE) 0,15 % og andet 9 % (Kilde: Raw Materials Group Stockholm, 2012).
Alene til efterforskning efter mineraler blev der i 2011 globalt brugt cirka 11 milliarder USD fordelt på følgende råstofgrupper: Guld 51 %, zink, kobber og bly (forekommer ofte sammen og går samlet under betegnelsen basemetaller) 33 %, diamanter 3 %, platingruppemetaller 2 % og andre 11 % (Kilde: Metals Economics Group, 2011).
Prisen på mineralske råstoffer bestemmes overordnet af tre forhold: 1) råstoffets tilgængelighed, 2) omkostninger forbundet med at udvinde og forarbejde mineralet og 3) transportomkostninger. Eksempelvis findes sand, grus og sten næsten alle steder, og det er billigt at udvinde. Da disse råstoffer produceres og sælges i nærområderne, er transportomkostningerne som regel lave, hvilket giver relativt lave priser. Omvendt er det dyrt at bryde metaller som kobber, zink, bly og nikkel m.fl., ligesom processerne til at oparbejde mineralerne til koncentrater er dyre, og da de ofte skal transporteres over store afstande, bliver priserne på disse produkter relativt høje. For de sjældne råstoffer som guld, platin og diamanter, som kun findes i meget små mængder, er priserne typisk meget høje, hvilket først og fremmest skyldes disse mineralers sjældenhed. For at udvinde og bearbejde de forholdsvis almindelige og tilgængelige råstoffer som aluminium, magnesium og titan

til kommercielle produkter kræves et meget stort energiforbrug. Det øger priserne, selvom der er tale om ret almindelige grundstoffer i Jordens skorpe.
De fleste metaller og mineraler handles på såkaldte metalbørser, f.eks. London Metal Exchange, og priserne fluktuerer med markedet generelt, men også i respons til teknologispring og globale ændringer i udbud. For enkelte produkter er markedsforholdene dog langt mere komplicerede end blot udbud, efterspørgsel og omkostninger. Der kan være forskellige forhold der gør sig gældende, f.eks. geopolitiske strategier, ønsket om at kunne have langsigtede aftaler på strategiske metaller, eller komplekse forhold i relation til for eksempel udvinding og afsætning af mineraltyper, der udvindes sammen, men ikke har lige stor efterspørgsel o.l. For disse produkter handles der typisk direkte mellem producent og aftager, og markedet er derved lidt sværere at gennemskue og monitere.
For de sjældne jordarters metaller (REE) gælder det for eksempel, at de handles på flere stadier under deres processering og forarbejdning. Det skyldes forskellige krav og behov fra de forbrugende industrier. Renheden og blandingsforhold varierer i de forskellige REE-produkter. For at sikre stabil forsyning og ensartethed i kvalitet, er det almindeligt, at en aftager af REE-total-koncentrat kun aftager produkter afledt fra én bestemt producent. Hvor ædelmetaller forhandles på et åbent marked med tilgængelig og detaljeret prisinformation, handles REE på private/lukkede markeder efter komplekse aftaler, hvor produktets specifikationer angives, og hvor flere led i værdikæden kan være inkluderet. Af disse grunde findes der ikke en samlet opgørelse for det globale REE-marked med pålidelige prisoplysninger, og det er vanskeligt at sammenligne REE-produkter og deres afsætning. De fleste tilgængelige prisoplysninger er estimerede spotpriser for de gængse halvfabrikata og ikke priser gældende ved langtidskontrakter. Langtidskontrakter har hidtil typisk været af 3-6 måneders varighed, men efter voldsomme fluktuationer i REE-priserne i 2010-2011 (+/- 300 %) forsøger aftagerne nu at få endnu længere kontrakter.
Uran handles også primært uden for de etablerede metalbørser, og 85 % af den producerede uran handles ved langtidskontrakter, som typisk gælder i 2-5 år. Ligesom for REE handles uran på forskellige stadier i værdikæden, så aftalerne er komplekse. Der er mindre end 100 selskaber, der handler med uran i den vestlige verden, og globalt er markedet todelt, således at Nord- og Sydamerika, Europa og Australien udgør ét marked, og Commonwealth of Independent States (CIS, det tidligere Sovjetunionen) og Kina udgør et andet.

Substitution af materialer og teknologier

Teknologiudvikling og innovation foregår konstant, og nye materialer erstatter gamle, fordi de er bedre og/eller billigere. Dette er en stor udfordring for mineindustrien, for hvor teknologispring kan ske hurtigt og implementeres hurtigt, tager det i reglen lang tid at etablere nye miner.

Klimaændringernes betydning for fremtidens råstoffer

Omkostningerne forbundet med at fragte mineralkoncentrater fra en mine til et smelteværk er betydelige, og selskaberne forsøger derfor at nedbringe disse omkostninger ved at sørge for kortest mulig transport. Hvis klimaændringerne i fremtiden muliggør regelmæssig og sikker sejlads med

malmskibe i Nordøst- og Nordvestpassagen, vil meget store områder i Arktis – herunder Nordgrønland – blive yderligere interessante for mineindustrien.

Eksempler på vigtige råstoffer og deres globale forekomster

I det følgende skitseres status for en række råstoffer (Tabel 3). Råstofferne kobber og zink og REE beskrives efterfølgende mere dybdegående som eksempler på basale og kritiske mineraler. Disse mineraler er tillige relevante i forhold til grønlandske forekomster.
I vurderingen af mineralske råstoffer bruges termerne *reserver* og *ressourcer*. Disse begreber blandes ofte sammen. *Reserver* er mineralforekomster, hvor lødighed og størrelse er velbeskrevet, og for hvilke det er påvist, at en brydning er økonomisk rentabel med de gældende priser og den gældende teknologi. Derfor dækker begrebet reserver over en meget dynamisk størrelse, som i princippet kan variere fra dag til dag. Hvorvidt en velbeskrevet ressource kan kaldes en reserve, afhænger især af markedspriser og anlægs- og driftsomkostninger. Det er denne dynamik der gør, at det umuligt at foretage præcise beregninger af, hvornår de globale reserver er brugt op. *Ressourcer* er alle forekomster, der potentielt er rentable, og kan under ændrede forhold kan overgå til reservekategorien. Ressourcer underinddeles ofte i *Målt Ressource* (Measured Resource), *Indikeret Ressource* (Indicated Resource) og *Skønnet Ressource* (Inferred Resource) som udtryk, der angiver faldende kendskab og sikkerhed i forhold til størrelse, kvalitet og rentabilitet. Herudover er der ressourcer om hvilke man har så lidt viden, at det ikke er muligt at estimere størrelsen, og endelig er der ressourcer som endnu ikke er kendt. Forholdet mellem ressourcer, reserver og årlig produktion for kobber og zink er skitseret i Figur 11 og 13.

Ressourceestimater skal certificeres efter forskellige standarder og indgår i lønsomhedsstudierne, når der søges finansiering af minedrift. Standarderne betyder, at en uafhængig og certificeret part laver et mængde-lødigheds-estimat, der bygger på en vis datamængde af en vis datakvalitet. De mest almindelige er JORC-standarden (Australien) eller NI 43-101 (Canada), der i store træk er sammenlignelige.

Tabel 3. Oversigt over nogle udvalgte primære råstoffer. Handel med råstoffer er angivet i forhold til, om det skønnes at den fortrinsvis foregår direkte mellem den primære producent (minen) og aftager (bilateral handel), eller om salg foregår på det åbne marked; de fleste sælges via åbne markeder.

Råstof	Primær produktion per år (2012)	Anvendelses-område(r)	Substitution	Børs-marked	Bilateral handel
Aluminium	48 Mt aluminium Mange produktionslande, Kina størst Produktion af bauxit (2012) er 263 Mt	Lav vægt, stærkt og korrosionsbestandigt. Utallige anvendelser: transport, bygninger, konstruktioner og emballage	På en del områder	+	
Beryllium	230 t (primært USA og Kina). Få producenter	Speciallegeringer til flyindustri, elektronik, teknisk keramik, computere	Muligt, men ringere produkt		+ Stigende priser (2010 460 USD/kg)
Bly	5,2 Mt (Kina, AUS, USA)	Utallige anvendelser	På visse områder	+	
Germanium	128 t (Kina langt størst; Rusland, USA)	Halvledere, specialglas, fiberoptik og legeringer, LED-lys og solceller. Stigende anvendelse til elektronik	På visse områder kan silicium substituere; zinkforbindelser substituerer for infrarøde anvendelser og titan til katalytiske formål	Spot-marked	+
Grafit	1,1 Mt (Kina, Indien, Brasilien)	Utallige anvendelser. Li-ion batterier vigtigst pt.; graphene kan på sigt give meget stor efterspørgsel	Substitution mulig på visse områder, men ikke for Li-ion batterier og graphene		+
Guld	2,7 Mt (Kina, Australien, USA)	Mønter, smykker, glas og elektronik	Generelt kan palladium, platin og sølv substituere for guld	+	
Indium	670 t (Kina, Canada, Japan, Korea) Typisk biprodukt fra zink-, bly-, kobber- og tin-smeltning Kina dominerer på raffineringskapacitet	Solpaneler, elektriske komponenter, halvledere, glastilsætning (mod ultraviolet lys)	Ukendt		+ Varierende priser (1400 USD/kg i 1980 til 600 USD/kg i 2010
Jern	3.000 Mt (Kina, Australien, USA, Brasilien)	Utallige anvendelser		+	

Kobber	17 Mt (Chile, Kina, Peru)	Utallige anvendelser	Substitutionsmulighed på visse områder	+	+
Kobolt	110 Kt (Congo, (DRC), Kina, Canada) Mest som biprodukt fra nikkelproduktion (50 %) og fra kobberproduktion (35 %). Der er en vis overproduktion.	Ekstremt bredt marked: brændsels-celler, solceller, vindmøller, magneter, forsvarsudstyr, mobiltelefoner, bærbare computere, farvepigment (blå)	Substitution mulig, men dårligere egenskaber	+	Handles i forskellig renhed til forskellige anvendelser
Krom	24 Mt (Sydafrika, Kasakhstan, Indien)	Mange anvendelser, primært i stål og i superlegeringer	Ingen substitution til rustfrit stål eller i superlegeringer	+	
Magnesium **(fra magnesite)**	6,1 Mt (Kina, Rusland, Tyrkiet)	Utallige anvendelser på grund af lav vægt, gode forarbejdningsegenskaber, især i jern-/stålproduktion til afsvovling	Aluminium og zink kan substituere i visse produkter. Calciumkarbid kan substituere ved afsvovling	+	
Mangan	16 Mt (Sydafrika, Australien, Kina)	Anvendes primært som legeringsmetal til stål (stor styrke) og som mangan-oxid til bl.a. gummi og katalytiske processer	Der er ikke brugbare substitutionsmulighederindenfor hovedområderne	+	+
Molybdæn	250 Kt (Kina, USA, Chile).	Bruges til legeringer (tilføjer styrke og varmebestandighed) (75 %), elektronik og specielle høj-temperatur-værktøj	Krom, vanadium, niobium, wolfram m.fl. kan substituere på vise områder	+	
Nikkel	2,1 Mt (Filippinerne, Indonesien, Rusland)	Stållegeringer (korrosionsbestandig)	Krom og vanadium substituerer i visse stållegeringer	+	
Niobium	69 Kt (Brasilien, Canada)	Legering til stål, specialanvendelser i raket- og reaktorindustri	På visse områder kan molybdæn, vanadium, tantal, titan, wolfram substituere		+
Platin	179 t (Sydafrika, Rusland, Zimbabwe)	Katalytiske processer og anordninger, kemi-elektronik-, glas- og flyindustri	Platin/palladium substituerer ofte for hinanden	+	
Palladium	200 t (Rusland, Sydafrika, Canada)	Katalytiske processer og anordninger, kemi, elektronik-, glas- og	Platin/palladium substituerer ofte for hinanden	+	

		flyindustri			
REE	110 Kt REO (Kina, USA, Australien)	Magneter, fosforescerende stoffer, metallurgi, katalysatorer, teknisk keramik, glas, poleringsmidler	Kun på enkelte områder, men nye teknologier på f.eks. vindmøller kan ændre behovet for magneter	+	+
Sølv	24 Kt (Mexico, Kina, Peru)	Bruges pga. høj elektrisk ledningsevne, varmeledningsevne, og refleksion og har utallige anvendelser		+	
Tantal	765 t (Mozambique, Brasilien, Congo DRC)	Høj T elektronik, implantater og til behandling af korrosive kemikalier	En række metaller kan substituere for tantal, men med dårligere resultat		+
Tin	230 Kt (Kina, Indonesien, Peru)	Legeringer, glas og keramiske produkter, brandhæmmende materialer		+	
Uran	57Kt uranoxid (Kasakhstan, Canada, Australien)	Kernekraft	Andre energiformer, men p.t. ikke til kernekraft	+	+
Wolfram	73 Kt (Kina, Rusland, Canada). Kina største producent og forbruger. Flere projekter under udvikling udenfor Kina.	Elektriske kontakter, svejseelektroder, høj-temperatur-varmelegemer, stållegeringer, wolfram karbidmaterialer	Wolfram kan substitueres på de fleste områder		+
Zink	13 Mt (Kina, AUS, Peru)	Utallige anvendelser	Mange substitutionsmulig-heder	+	

Kobber

Sammenfatning. Kobbers høje varme- og elektriske ledningsevne, kombineret med styrke og korrosionsbestandighed, gør det anvendeligt til en lang række forskellige formål. Der er ikke umiddelbart substitutionsmuligheder på alle områder. Chile er verdens største producent af kobber, men Kina råder over langt den største kapacitet til smeltning og raffinering af malmen, og derfor ender hovedparten af verdens kobbermineralkoncentrater i Kina, hvor det forarbejdes og hovedparten bruges. Forbruget af kobber voksede fra ca. 16,7 millioner tons i 2012 til 18,6 millioner tons i 2014 med Kina som det land, der forbruger mest (ca. 40 %). Også fremover forventes en stigning i forbruget af kobber. I 2013 var udbuddet større end efterspørgslen, hvilket ligeledes forventes at fortsætte, fordi en del nye mineprojekter er under opstart, som sandsynligvis også have

indflydelse på priserne (Kilde: International Copper Study Group, ICSG). Herudover udnytter mange kobberminer ikke hele deres produktionskapacitet; tilsvarende gælder for smelteværker og raffinaderier, se mere i Figur 11 og 12. Kobber handles i øvrigt på både langtidskontrakter og på spotmarkedet, og priserne følger nogenlunde de økonomiske konjunkturer.

Mulige årsager til produktionsbegrænsninger. Selvom udbuddet af kobber pt. er større end efterspørgslen, peger International Copper Study Group på en række forhold, som på sigt kan være medvirkende til at produktionen ikke kan følge med en stigende efterspørgsel: 1. faldende lødighed for den malm der udvindes 2. manglende finansiering til både efterforskning og nye mineprojekter, 3. manglende vandforsyning til forekomster, som ligger i tørre områder, 4. manglende energi, fordi kul ofte anvendes til energifremstilling ved både miner og smelteværker og 5. mangel på faglært arbejdskraft i det meste af værdikæden.
Kobbermineraler. Kobber findes kun undtagelsesvist som egentligt (gedigent) metal; de fleste kobbermalme består af et eller flere kobberholdige mineraler, hvoraf de mest almindelige er kobber-sulfider som chalcopyrit ($CuFeS_2$), covellit (CuS), bornit (Cu_5FeS_4) og chalcosite (Cu_2S) samt tennantit ($(Cu,Ag)12As_4S_{13}$), og oxider, f.eks. cuprit (Cu_2O).

Kobbermineralkoncentrat. Efter at malmen er brudt, knust og formalet, bliver de kobberholdige mineraler koncentreret, mens de ikke-kobberholdige mineraler sorteres fra som såkaldte tailings, der deponeres i minens nærhed. Ofte anvendes flotationsproces til denne opkoncentrering. Kobberkoncentratet indeholder typisk omkring 20-40 % kobber samt varierende mængder sulfider, jern og evt. guld og lidt sølv.

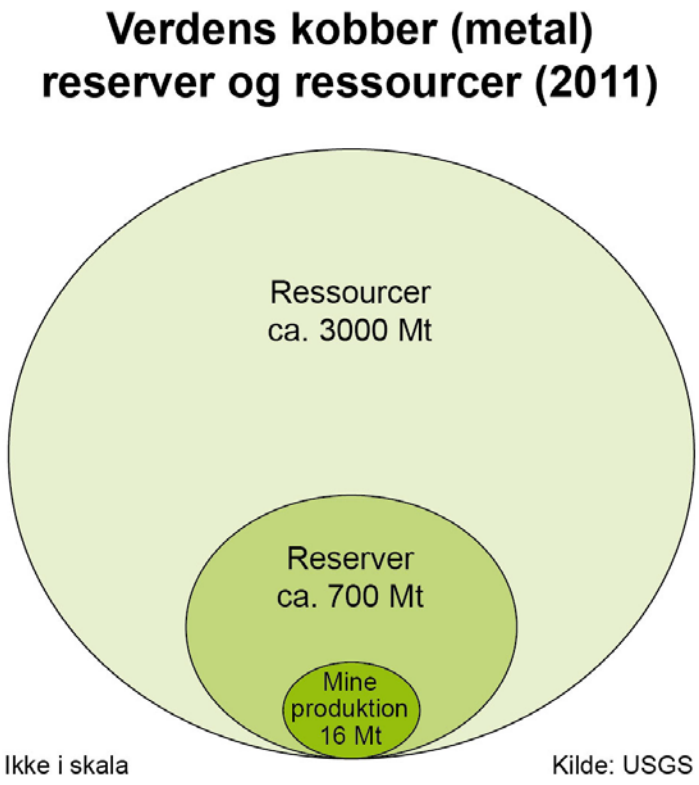
Smeltning. Kobbermineralkoncentratet fødes ind i en smelteovn sammen med silikamateriale (flux), som binder en del af jernet som efterfølgende kan udfældes som slagger. Ofte suppleres denne proces med en ristning af materialet, så der dannes ”matte”, der er en blanding af kobbersulfider og jernsulfider, der indeholder 50-70 % kobber.
Den smeltede matte sendes videre til endnu en ovn – konverteren – hvor mere flux tilsættes, og det tilbageværende jern danner slagger med fluxen. Det resulterende smeltede materiale er ’blisterkobber’, som indeholder 98,5-99,5 % kobber.
Ved en alternativ udvindingsmetode ekstraheres kobber fra lav-lødig malm ved en udludning (leaching) og efterfølgende elektrolytisk proces (SX-EW proces). SX-EW-metoden bliver mere og mere anvendt, og i 2010 foregik omkring 20 % af kobberproduktionen udvundet på denne måde.

Raffinering. Under raffineringen fjernes de sidste urenheder i blisterkobberet ved en smeltningsproces og en efterfølgende elektro-raffineringsproces og der opnås 99,95-99,99 % rent kobber.

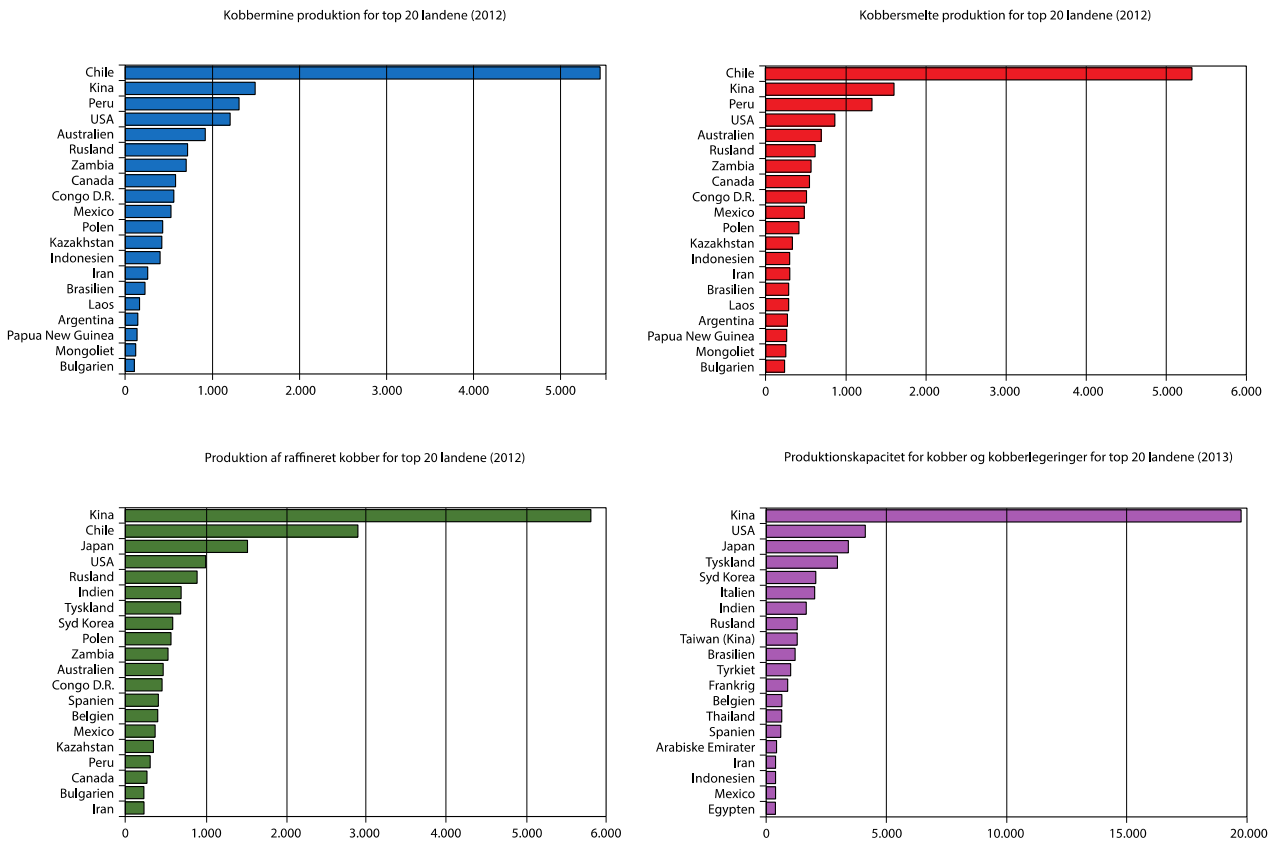
Casting. Det raffinerede kobber smeltes, og der fremstilles ”kobber-barer”, plader eller stænger, som er de produkter, der indgår i opgørelser for ”Primary copper production”.

Kobberstandarder og typer. Elektrolytisk katodekobber produceres i mange forskellige kvaliteter, men fire hovedtyper dominerer: London Metal Exchange (LME) registreret høj-kvalitet; ikke-registreret høj-kvalitet; standardkvalitet og off-grade. Registreret høj-kvalitet har en renhed på 99,999 % kobber.

Kobbermarkedet. Kobbermineralkoncentraterne fra minerne sælges til smelteværker og raffinaderier, og der modregnes for oparbejdning (treatment charges (TC)) og raffinering (refining charges (RC)). Den typiske kontrakt for et mineselskab etableres i forhold til LME-pris minus TC og RC. Prisen kan yderligere justeres, hvis der eksempelvis er et betydeligt indhold af arsen, bismut, bly og wolfram, hvilket forringer koncentratets værdi, eller sølv og guld, hvilket øger dets værdi. Kobberkoncentratet handles enten via spotkontrakter eller på langtidsaftaler. Typisk sælger smelteværket kobberet på vegne af mineselskabet til den pris, som gælder på salgsdagen. Kobber-metal handles på tre internationale markeder: London Metal Exchange, COMEX (New York Stock Exchange) og Shanghai Futures Exchange. Disse markeder fastsætter dagspriser.
Anvendelse. Kobber har høj elektrisk ledningsevne, høj varmeledningsevne og er korrosionsbestandigt. Derfor anvendes kobber især til fremstilling af elektriske kabler, elektronik, varmeveksler, rør og kedler. Hovedparten af kobber anvendes i form af forskellige legeringer (bl.a. messing, bronze), som øger styrke og hårdhed, men reducerer nogle af de øvrige egenskaber.



Figur 11. Forholdet mellem kobberressourcer og -reserver, 2011.



Figur 12. Global produktion og oparbejding af kobber. X-aksen er 1000 tons. Kilde: International Copper Study Group, ICSG.

Zink

Sammenfatning. Globalt anvendes mere end 12 Mt zink årligt, hvoraf mere end 50% anvendes til forskellige galvaniseringsformål, men zink anvendes desuden bl.a. i gummiindustrien, den keramiske industri, katalytiske processer, dyrefoder, smøremidler, maling, og uorganiske og organiske kemiske stoffer. Zinkforekomster findes mange forskellige steder i verden og minedrift findes i mere end 50 lande, hvoraf Kina, Australien, Peru, og Canada er nogle af de vigtigste. Der er ikke umiddelbart mangel på zink, men hovedparten af de industrier som fremstiller zinkmetal ud fra zinkmalm er koncentreret i Kina, som også er største forbruger af zink; dette kan på sigt øge forsyningsrisikoen for de zink-forbrugende industrier udenfor Kina.

Zinkmineraler. Mere end 95 % af den samlede produktion af zink fremstilles fra mineralet sphalerit (ZnS); ofte indeholder zinkmalm også lidt bly og små mængder kobber og sølv. Brydeværdig zinkmalm har typisk en lødighed på 4-15 %, hvis det brydes uden nævneværdige biprodukter.

Zinkmineralkoncentrat: Efter brydning, knusning og formaling separeres zinkmineralerne fra bjergartens øvrige mineraler ved en flotationsproces. Zinkmineralkoncentratet har typisk et indhold på ca. 55 % zink og indeholder desuden ofte lidt kobber, bly og jern og 25-30 % svovl.

Ristning og sintring. Først fjernes svovlindholdet fra zinkmineralkoncentratet ved anvendelse af en ristnings- eller sintringsproces (> 900 °C), hvorved sphalerit, ZnS, omdannes til zinkoxid, ZnO, og det frigjorte svovl omdannes til svovlsyre.

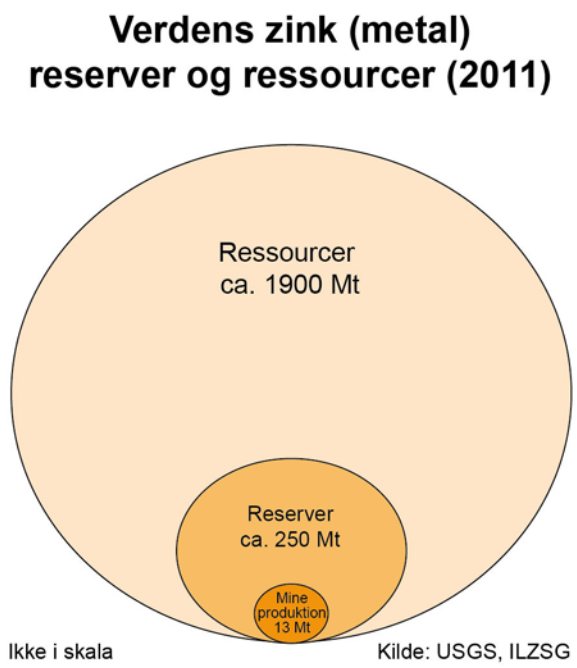
Hydrometallurgisk proces. Efter ristning/sintring udludes zinkoxiden med svovlsyre, hvorved zink opløses; evt. indhold af jern udfældes, og bly og sølv forbliver uopløste. Yderligere oprensning af zink-produktet foretages ved en elektrolytisk proces, hvorefter den meget rene zink efter tørring kan smeltes til zink-metalbarer. Kina, Indien, Japan og Polen anvender en pyrometallurgisk proces, som er mere energikrævende, hvor zink og bly i særlige ovne reduceres til metal ved tilsætning af kul. .

Zink standardtyper. Zink-barer handles i to typer: High Grade (HG) 99,95 % og Special High Grade (SHG) 99,99 %.

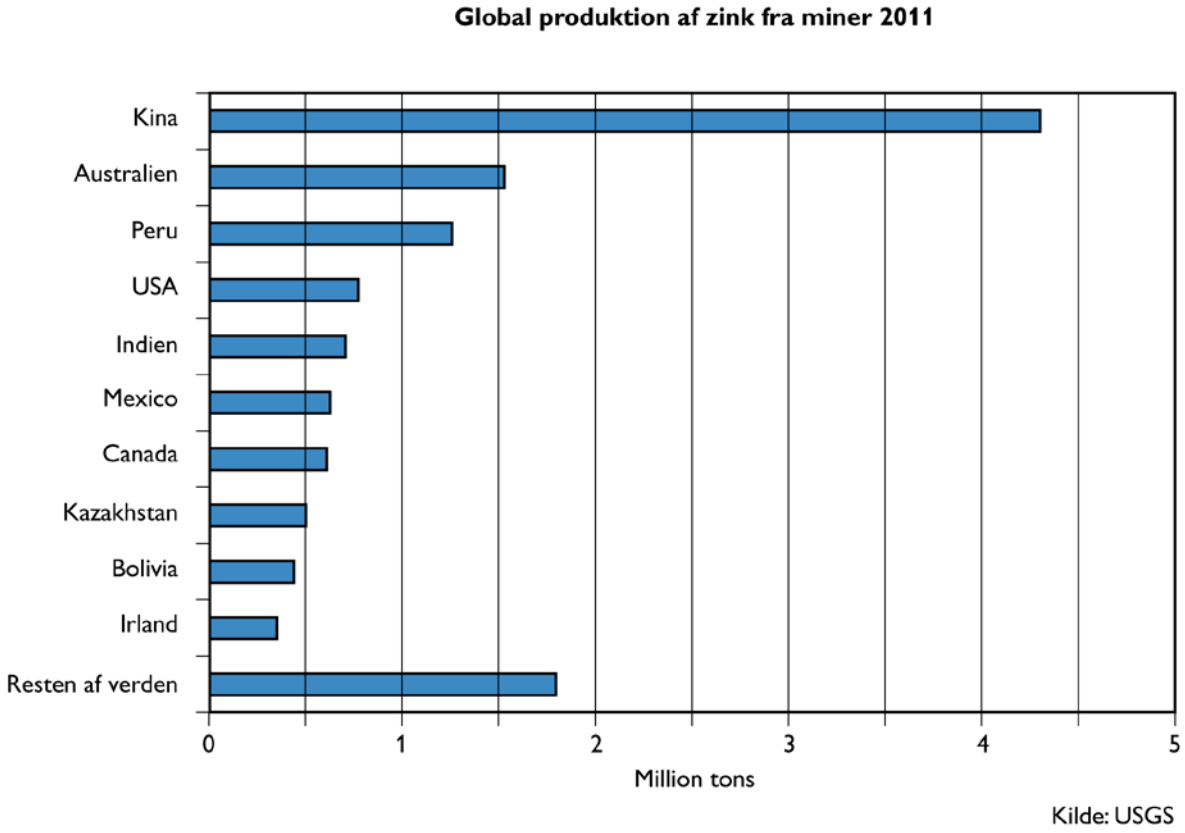
Udbud. Omkostningerne til malmbrydning og oparbejdning er øget de seneste tyve år, samtidig med at malmlødighederne generelt er faldet. Til gengæld er værdien af bi- og co-produkter øget betydeligt, og priserne for smeltning er faldet på grund af overkapacitet. Samlet set er omkostningerne derfor forblevet nogenlunde stabile.
Der er endnu ikke lavet opgørelser for den samlede primære zinkproduktion for 2013, men den forventes at være på 13,9 Mt, hvilket er en stigning på 2,3 % i forhold til 2012 (se Figur 14 for fordelingen af produktionen). Kina, der er den helt store aftager, forventes at være selvforsynende med zinkkoncentrat. Der er åbnet to nye zink-miner i Burkina Faso samt to i henholdsvis Indien og Mexico, mens den canadiske produktion er stærkt reduceret som følge af minelukninger.
Den samlede zinkproduktion forventes at stige med cirka 5 % i løbet af de næste par år, hvilket især skyldes stor kinesisk efterspørgsel. Mineproduktionen i Australien, Brasilien, Indien, Japan, Sydkorea og Peru forventes at stige; og et raffinaderi er under genåbning i Italien. Samlet set forventes det, når tallene bliver gjort op, at der i 2013 blev en overskudsproduktion på 273 Kt i 2013.

Forbrug. De største forbrugsstigninger finder sted i Kina, hvor zink bruges til opbygning af infrastruktur i de centrale og vestlige provinser, samt til fremstilling af biler og maskindele. Der ses også stigende forbrug af zink i Indien, Indonesien, Taiwan, Thailand og Tyrkiet. Der forventes en svag stigning i forbruget af zink i Europa (1,7 %) og USA (omkring 2,8 %).

Anvendelse. 50 % af zink anvendes til galvaniseringsformål for at forhindre stål i at ruste, 17 % går til zink-legeringer (mest til støbningsprocesser - die casting), 17 % til messing- og bronzelegeringer, 8 % til zinkplader, 6 % til kemikalier og 4 % til andre ikke-specificerede formål.



Figur 13. Forholdet mellem zinkressourcer og -reserver, 2011.



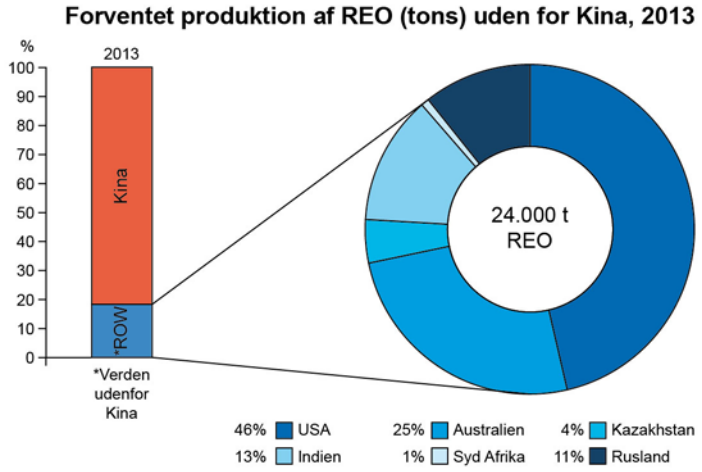
Figur 14. Global zinkproduktion.

Sjældne jordarters metaller (REE)

Sammenfatning. Sjældne jordarters metaller (REE) er en gruppe af 17 grundstoffer, som omfatter lanthaniderne samt yttrium og scandium, og som har meget ensartede fysiske og kemiske

egenskaber og derfor forekommer sammen i enkelte mineraler, dog i meget forskellige mængder. De sjældne jordarters metaller anvendes i højteknologiske produkter, især i energibesparende og energieffektiv teknologi og i "grøn" energiteknologi, f.eks. vindmøller og elbiler. Kina har store REE-ressourcer og meget højt udviklet ekspertise i alle trin i fremstillingen, samt en betydelig REE-forbrugende industri. Kina dominerer således hele værdikæden, men REE-industrier uden for Kina er under opbygning.
Sjældne jordarters metaller betragtes som kritiske i de fleste lande, også i EU, idet de har stor samfundsmæssig betydning og usikker forsyning, primært som følge af Kinas dominans. Ikke alle REE er lige kritiske; på nuværende tidspunkt betragtes neodymium, europium, terbium, dysprosium og yttrium- som særligt kritiske.
Indholdet af REE i de hidtil velbeskrevne forekomster svarer til ca. 800 års forbrug (2011-niveau). Der er således ikke belæg for at tale om geologisk knaphed, og når produktion og forarbejdning uden for Kina er etableret, ventes forsyningssikkerheden for REE også at være etableret.

Produktion. I 2013 forventes den samlede produktion af sjældne jordarters oxider (REO), som er det mindst forarbejdede REE-produkt der forhandles) at blive ca. 120 Mt, hvoraf Kina producerer ca. 80 %, USA 9,6 %, Australien 5 % og Indien 2,6 %, mens resten bliver produceret i Rusland, Kasakhstan og Sydafrika (se Figur 15 og Tabel 4). I øjeblikket foregår næsten al metallurgi og oparbejdning af REO ligeledes i Kina, og langt den største del af eksporten til f.eks. Europa er som halvfabrikata eller færdige komponenter (f.eks. magneter til industrielle formål).



Figur 15. Estimeret REO-produktion; produktion i Kina forventes at blive på 96.000 tons REO, og i verden udenfor Kina på 24.000 tons REO i 2013 (Modificeret efter Roskill, 2013).

Efterforskning. På verdensplan er der ca. 200 efterforskningsprojekter, som leder efter nye forekomster af sjældne jordarters metaller. De fleste af disse projekter er i Canada, USA, Australien og Afrika.
REE-markedet er relativt begrænset. Estimater peger på, at der i 2016 er brug for ca. 150.000 tons. Uden for Kina skønnes der derfor kun at være marked til omkring 5-10 nye REE-miner med årlige produktioner på

Land	Produktion 2011 (tons REO)	Produktion 2012 (tons
USA	-	7.000
Australien	2.200	4.000
Brasilien	250	300
Kina	105.000	95.000
Indien	2.800	2.800
Malaysia	280	350
Andre	NA	NA
Total	111.000	110.000

Tabel 4. Oversigt over den globale produktion af REE (USGS, 2013).

5.000-10.000 tons TREO (total sjældne jordarters oxider), og det vil med stor sandsynlighed være de forekomster som er rige på de pt. mest kritiske REE. Det er således i nogen grad et spørgsmål om, hvilke af de mange projekter der kommer "først". En eventuel produktion af sjældne jordarters metaller fra grønlandske forekomster vil være underlagt sådanne markedsforhold.

De geologiske REE-typer og de globale ressourcer. Økonomisk interessante forekomster af REE er især knyttet til:

(i) Alkaline intrusioner (lav lødighed – men indholdet af de pt. mest kritiske REE er relativt forhøjet; uran kan være højt)

(ii) Karbonatitter (høj lødighed – men indhold af de mest kritiske REE er relativt lavt; uran kan være højt)

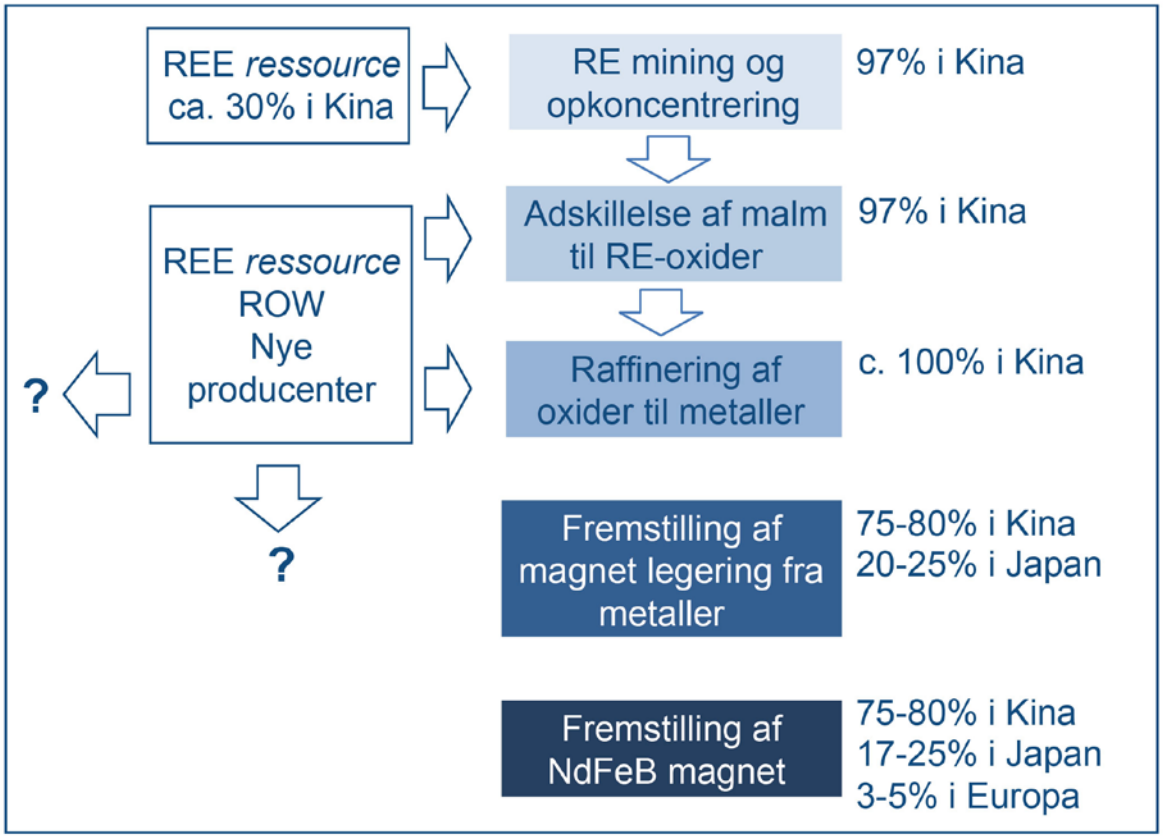
(iii) Sedimentære forekomster (tungsand) (varierende lødighed; lavt indhold af de mest kritiske REE; uran kan være højt)

(iv) Lerbjergarter hvor REE er adsorberet til lerpartikler (lav lødighed; højt indhold af de mest kritiske REE)

REE-mineraler. Der kendes mere end 300 mineraler som indeholder REE. Mineralerne har forskellige koncentrationer af REE, og kommercielt er de derfor ikke alle sammen lige interessante. Desuden kræves forskellige teknikker for at udtrække REE fra forskellige mineraler, og nogle af disse processer er komplicerede med mange dyre procestrin. Derudover indeholder mange REE-forekomster uran og/eller thorium, der skal håndteres på særlige måder, da de er radioaktive.

Fra REE-mineral til produkt. Efter brydningen skal malmen knuses og formales, således at der kan foretages en fysisk separation af REE-mineraler fra de ikke-REE-holdige mineraler. REE-mineralkoncentratet skal herefter opløses, så REE kan adskilles fra de øvrige af mineralets grundstoffer og efterfølgende udfældes som eksempelvis REE-sulfater eller -karbonater. Disse

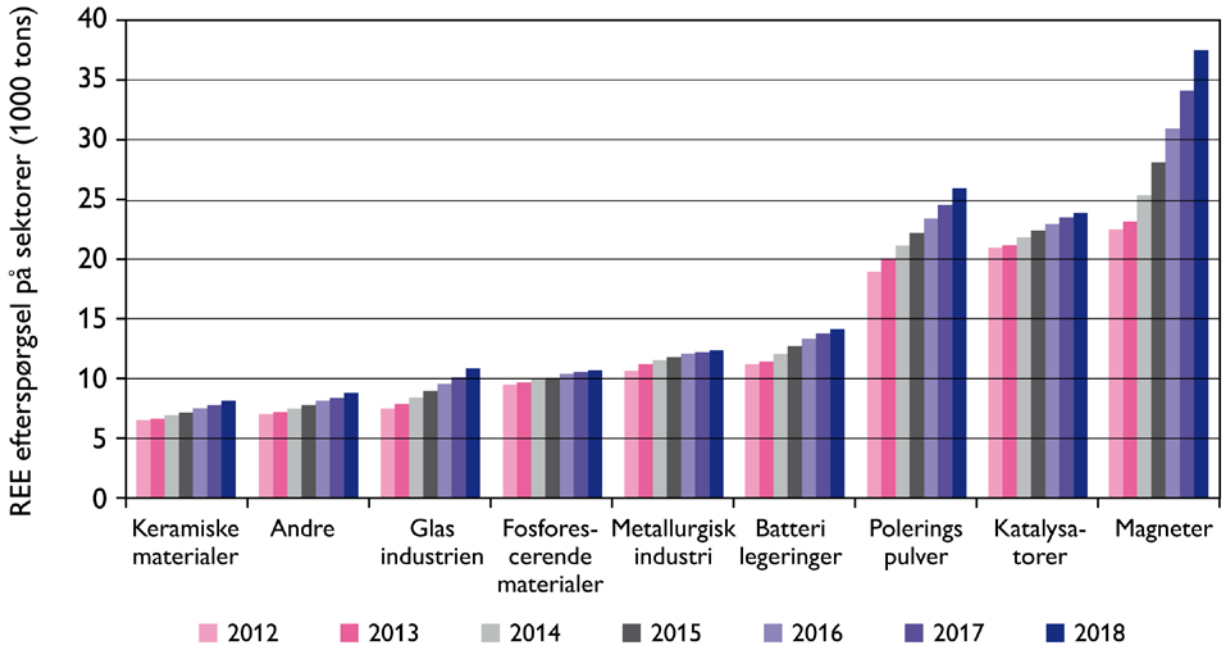
produkter indeholder alle de sjældne jordarters metaller, som var til stede i mineralet, og skal efterfølgende adskilles fra hinanden ved en separationsproces (enten som solvent ekstraktion eller ved en ion-absorptionsproces). Herved kan man fremstille produkter af de enkelte sjældne jordarters metaller. Både REE-oxider, -karbonater og -metaller er handelsvarer med forskellige renhedsspecifikationer.
Kina producerer ca. 80 % af de REE-holdige mineraler og er også dominerende med hensyn til oparbejdningen af REE-oxiderne til de enkelte metaller (Kina har cirka 75 % af denne produktion og Japan 25 %). REE-metaller anvendes blandt andet til fremstilling af REE-legeringer, som er det primære råstof i eksempelvis magneter. Selve fremstillingen af magneter (eksempelvis NdFeB-magneter) domineres ligeledes af Kina og Japan, men med en lille andel i Europa (ca. 5 %). Se Figur 16 for estimerede andele af produktionen forskellige steder i værdikæden.



Figur 16. De forskellige produktionsled for REE og Kinas anpart i værdikæden 2012 (udarbejdet af GEUS baseret på diverse kilder)

Marked for REE. De 10 vigtigste kommercielle REE (Ce, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Tb og Y), fremstilles hver især som forskellige handelsvarer (med forskellig renhed, kemisk sammensætning m.m.). For alle råstoffer gælder, at hvis den årlige produktion bliver meget høj, så falder priserne. For sjældne jordarters metallers forekomster er dette yderligere kompliceret ved, at de lette sjældne jordarter (LREE) altid udgør den største andel i de enkelte forekomster, og markedet derfor mættes med disse, inden der er fremstillet tilstrækkeligt af de tunge sjældne jordarter (HREE). Der er ikke en metalbørs for REE, handelen foregår derfor primært direkte mellem producenten og aftageren, som kan være en virksomhed, der fremstiller REE-metaller, og som sælger det videre eller anvender det til fremstilling i egne komponenter. Figur 17 viser fordelingen af REE mellem de otte vigtigste

industrisektorer; hver sektor domineres af en gruppe REE, og der kan kun i meget begrænset omfang substitueres i forbruget mellem de forskellige sektorer.

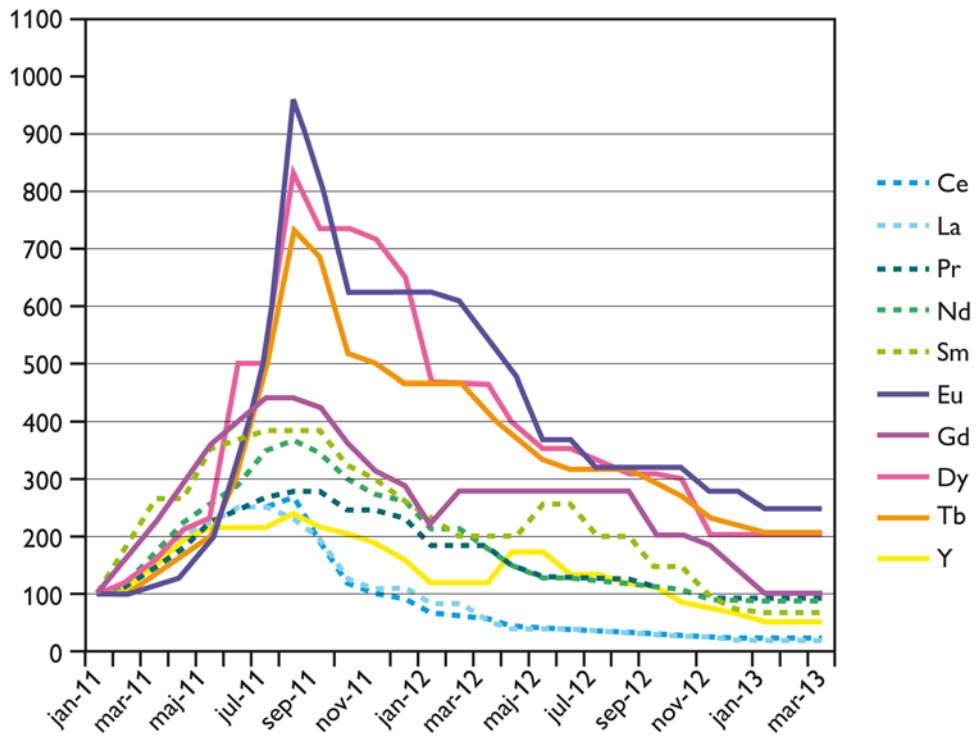


Figur 17. Forbrug og forventet forbrug af REE fordelt på de vigtigste sektorer (Kilde: Deutsche Bank AG, 2013)

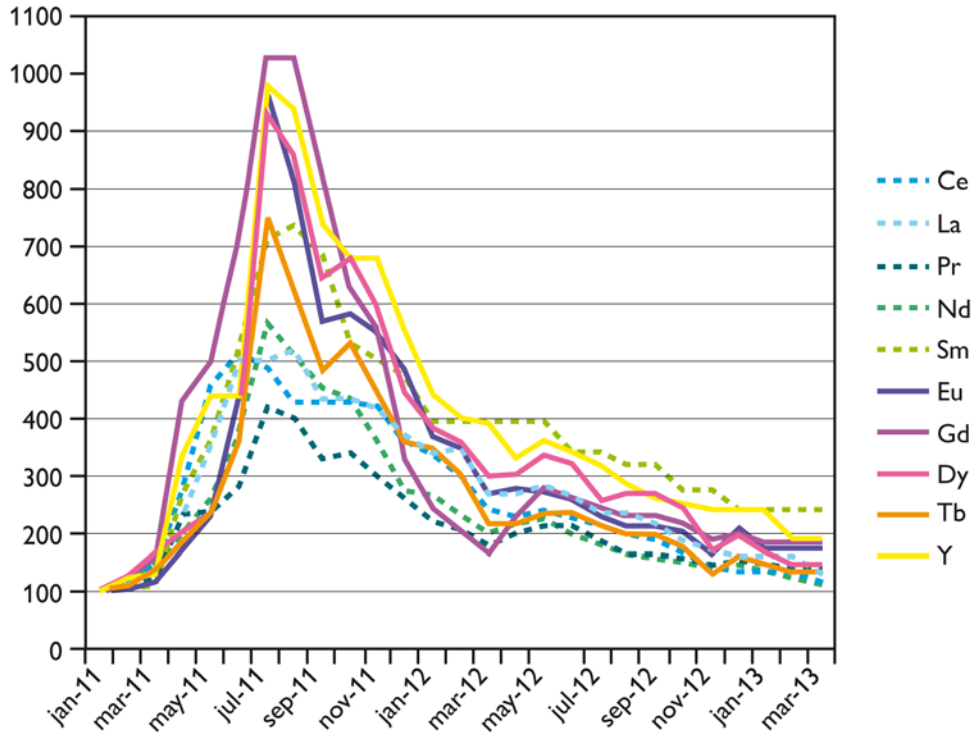
REE-priser. De 10 vigtigste kommercielle REE, som indgår i forskellige handelsvarer, har meget store prisforskelle, ligesom der er prisforskelle mellem produkter med forskellig oparbejdet værditilvækst. Desuden handles hovedparten af produkterne direkte mellem producent og aftager, og nøjagtige specifikationer for produkterne opgives ikke. Det er derfor vanskeligt at vurdere de offentliggjorte priser, som kun kan betragtes som retningsgivende. Billedet af prisniveauet kompliceres yderligere af det faktum, at Kina opererer med ét prisniveau for interne kinesiske handler og et andet – højere – prisniveau for eksportprodukter. Meget tyder desuden på, at Kinas eksportpriser varierer betydeligt. I Figur 18a ses prisniveauet for eksport af 10 kommercielle REE fra Kina fra januar 2011 til marts 2013, mens prisniveauet for interne priser i Kina for de samme REE ses i Figur 18b.
Generelt er priserne for REE-produkter steget gennem de seneste 15 år, og i slutningen af 2010, da verdensmarkedet opdagede at Kina havde en de facto monopolsituation, begyndte priserne at stige flere hundrede procent. Efterfølgende har priserne fundet tilbage til det oprindelige niveau (Figur 18).
Deutsche Bank (2013) har følgende forventninger til REE-markedet:

- Neodymium og praseodymium – som helt overvejende anvendes til magneter, forventes at holde høje priser de næste fem år.
- Yttrium – som anvendes til fosforescerende materialer, glas og keramiske produkter, forventes at stige i pris.
- Lanthan og cerium – som anvendes til katalysatorer, der forventes en overproduktion af disse to grundstoffer og dermed faldende priser.
- Dysprosium – som næsten udelukkende anvendes i magneter. Der arbejdes på at substituere dysprosium, hvorfor det forventes at priserne vil holde det eksisterende niveau.

REE-forekomster er multielementsforekomster, hvor der typisk er mere end 10 ”produkter”, der skal sælges med hver deres aftagersegment og prisdynamik. Derfor sammenlignes projekter oftest på deres ”basket value”, som er den værdi som 1 kilo af materialesammensætningen vil have.



Figur 18a. Udvikling i prisniveauet (indekseret) for eksport af 10 af de kommercielle sjældne jordarters metaller (REE) fra Kina i perioden fra januar 2011 til marts 2013. Kilden oplyser ikke hvilke produkttyper dette er baseret på. (Kilde: Strategi Metals Bulletin 70, March 2013).



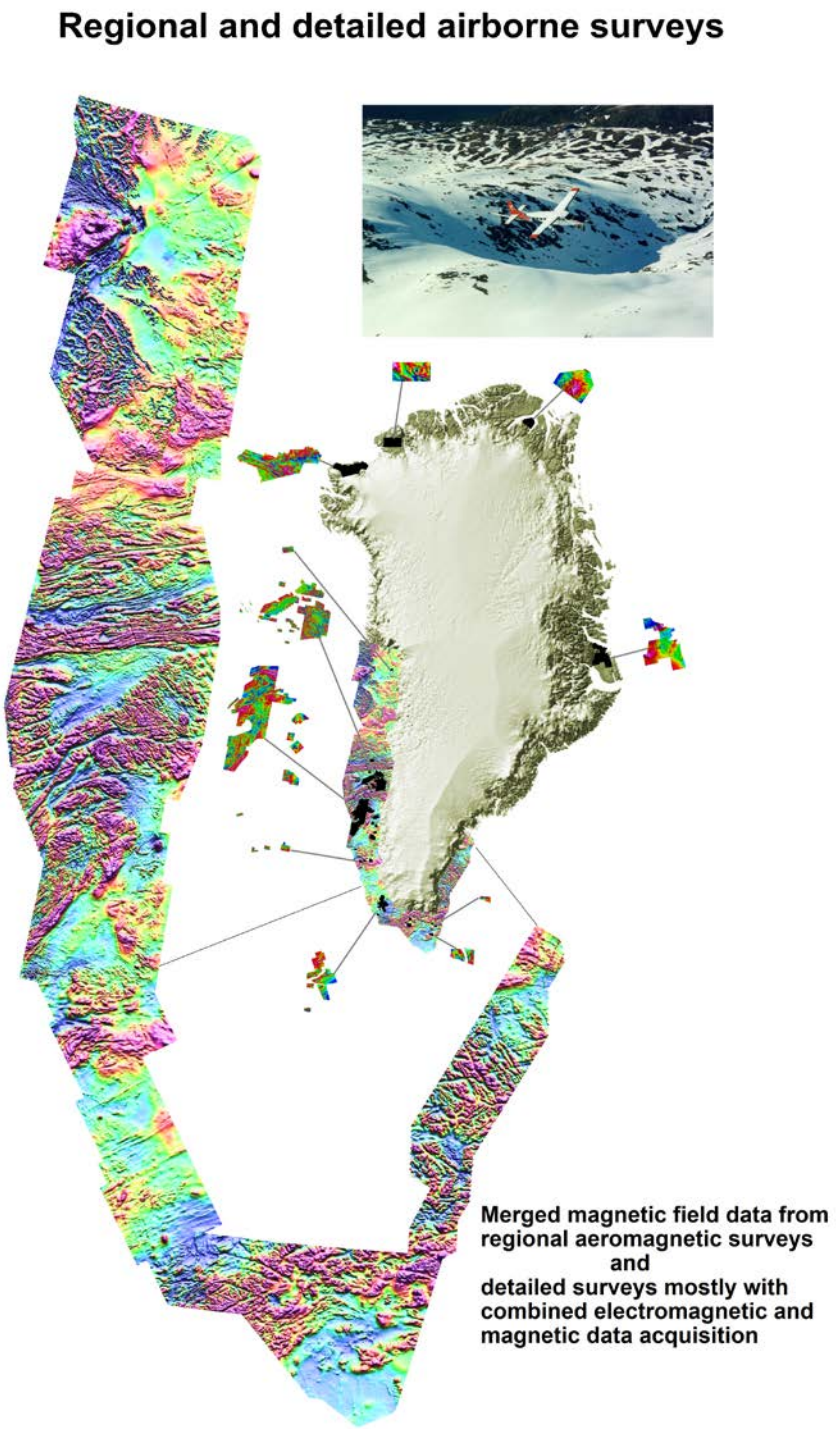
Figur 18b. Udvikling i prisniveauet (indekseret) for priser af 10 af de sjældne jordarters metaller (REE) som gælder internt i Kina for perioden januar 2011 til marts 2013. Kilden oplyser ikke hvilke produkttyper dette er baseret på. (Kilde: Strategi Metals Bulletin 70, March 2013).

Konklusion

Grønland er geologisk set velbeskrevet og hele Grønland er geologisk kortlagt i 1:500.000 og for en stor del også i højere opløsning (se kort figur 19)

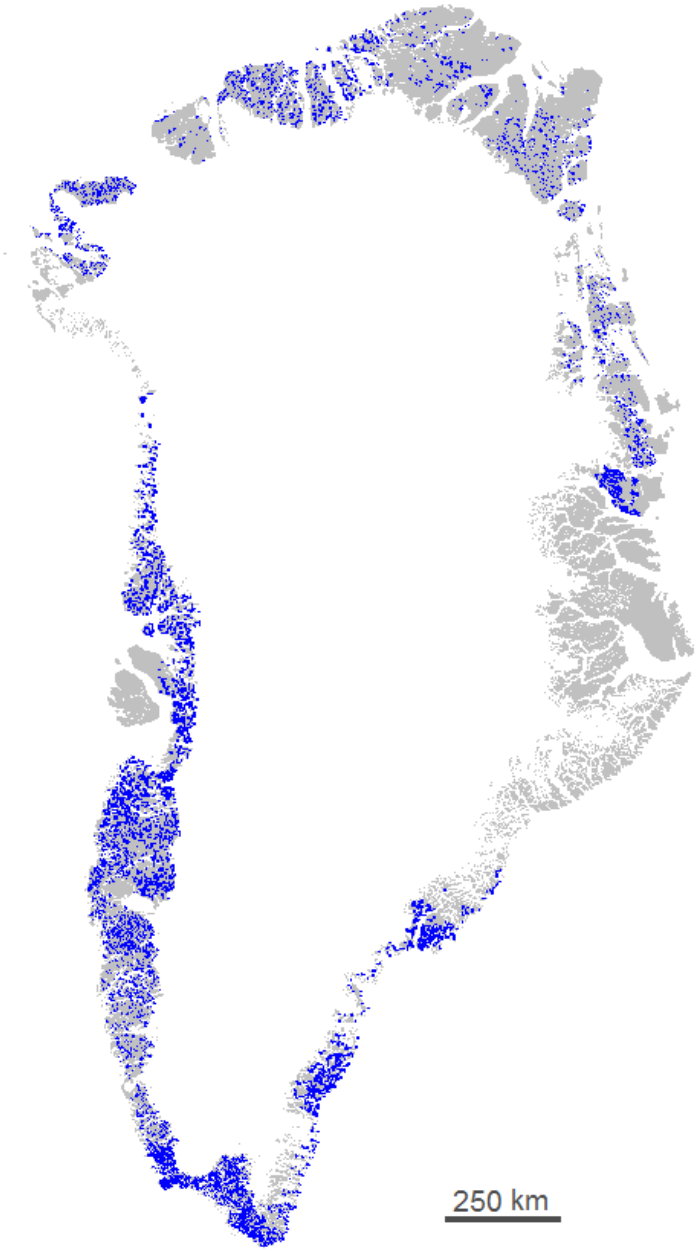
Figur 19: Sømløst geologisk kort over Grønland i skala 1:500 000. Kortet er baseret på 14 kort i skala 1:500 000 publiceret af GGU (Grønlands Geologiske Undersøgelser) og GEUS i perioden 1971-2004. Kortet integrerer geologien i én samlet harmoniseret legende omfattende i alt 443 bjergartsenheder. Web-kortet (link: http://data.geus.dk/map2/geogreen) repræsenterer en platform for forskellige typer af feltdata (bl.a. skråbilleder, skannede feltkort, publicerede kort og profiler) og integrerer information fra GEUS' databaser. Copyright GEUS.

Der eksisterer geofysiske baggrundsdata så som aeromagnetiske kort for størstedelen af det isfri land (se kort, figur 20), og der er gennemført geokemisk kortlægning baseret på sedimentgeokemi og luftbåren gammaspektroskopi for store dele af det isfri land (se kort figur 21).



Figur 20: Kort over Grønland der viser de aeromagnetiske (Aeromag) og elektromagnetiske (AEM Greenland) opmålinger gennemført i Grønland 1992 – 2012. Aeromagnetiske (eller flymagnetiske) målinger er en af de mest almindeligt benyttede geofysiske metoder til at opnå information om de geologiske strukturers udbredelse under overfladen og deres forløb under vand eller isdækkede regioner. Her udnyttes det, at tilstedeværelsen af magnetiske mineraler, hovedsagelig magnetit, i bjergarter under flyet påvirker Jordens naturlige magnetfelt. Magnetfeltet måles af et instrument placeret enten på flyet eller ophængt under flyet, og målingerne korrigeres for påvirkninger fra flyet og for naturligt forekommende tidslige variationer i Jordens magnetfelt. De flybårne geofysiske målinger er

derfor et vigtigt supplement til den geologiske kortlægning, der oftest er begrænset til observationer af bjergarter tilgængelige på overfladen. Copyright GEUS.



Figur 21: Kort over sedimentprøve lokaliteter i Grønland hvor der er indsamlet prøver til brug for den geokemiske kortlægning. Der er i alt indsamlet ca. 13000 sedimentprøver (Kilde: GEUS)

Selv med det gode geologiske datagrundlag er Grønland dog ikke velbeskrevet i forholdt til at vurdere hvilke økonomiske forekomster der findes, men dog godt nok til at fokusere en egentlig mineralefterforskning til relevante områder. De havområder, der grænser op til Grønland, er opmålt, dog således at indenskærs og fjordområder ikke kan forventes at være opmålt i detalje, men således at dybdeforholdene inden for Grønlands økonomiske zone er velkendte selv i de vanskelligt tilgængelige Polhavet og Grønlandshavet. Der er gennemført geofysiske baggrundsundersøgelser med høj nok opløsning til at områder med potentiale for olie og gas er identificeret, og danner

baggrund for licensudbud med henblik på egentlig målrettet olie-gas efterforskning. De stratigrafiske forhold i de marine bassiner er delvis dokumenteret gennem boringer.

Grønland rummer et stort antal identificerede mineralforekomster, hvoraf 9 tidligere har været brudt og hvoraf 5 forekomster har dokumenteret malmmængde og lødighed, samt gennemført analyser af miljø og samfundsmæssige konsekvenser af eventuel brydning i tilstrækkelig detalje til at der har kunnet tildeles brydningstilladelse, og som derfor kan starte brydning såfremt den nødvendige kapital til projekterne kan tilvejebringes. Ingen af disse forekomster har pt. aktiv malmudvinding. Herudover findes en del forekomster som endnu ikke er undersøgt i tilstrækkeligt omfang til at vurdere rentabiliteten af udvinding og miljø og samfundsmæssige konsekvenser, eller hvor der efter omfattende undersøgelser skønnes at brydning ikke er økonomisk retable med de nuværende råvarepriser. Det sidste gælder for eksempel guld-palladiumforekomsten ved Kangerlussuaq og Malmbjerget i Østgrønland. De forekomster som er langt fremme processen mod opnåelse af brydningstilladelse er Kvanefjeld uran – REE – zink forekomsten, Kringlerne REE forekomsten, Citronen Fjord zink – bly forekomsten. Endelig er der store arealer hvor de geologiske faktorer understøtter et stort potentiale for endnu ikke identificerede forekomster hvoraf Nord og Nordøstgrønland i særdeleshed har et stort endnu ikke efterforsket potentiale (Stensgaard, B.M., Kalvig, P. & Stendal, H. 2011; Sørensen, L.L., Stensgaard, B.M., Thrane, K., Rosa, D., & Kalvig, P. 2013; Rosa, D., Stensgaard, B.M. & Sørensen, L.L. 2013). Både de allerede kendte forekomster og potentialerne omfatter helt basale råstoffer som jern, bly, zink og kobber, men også såkaldte kritiske mineraler. Som f.eks. sjældne jordarters metaller, niobium, tantal og grafit.

Grønland har et stort potentiale for kulbrinter hvoraf olie skønnes at kunne udnyttes i fremtiden hvis der findes store forekomster. På baggrund af analogistudier vurderes det at Grønland har et potentiale for olieudvinding i fremtiden, og at dette kan være i samme skala som f.eks. den danske olieudvinding i Nordsøen,

Det kan konkluderes at Grønland har en relativt velkendt geologi som understøtter et stort mineralsk råstofpotentiale. Dette råstofpotentiale må imidlertid ikke forstås som en egentlig tilgængelig kapital, men snarere som et grundlag for en langsigtet opbygning af en mineindustri i Grønland. Udvinding af hårde mineraler vurderes at kunne bidrage positivt til diversifikation af den grønlandske økonomi, men at der kun er en ringe sandsynlighed for at mineraler vil kunne understøtte en selvbærende grønlandsk økonomi på det nuværende niveau.

Referencer

AMAP, 2011. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. Xii + 538 pp.

Andersen, Jens CO, et al. "The Triple Group and the Platinova gold and palladium reefs in the Skaergaard Intrusion; stratigraphic and petrographic relations." *Economic Geology* 93.4 (1998): 488-509.

Bailey, J.C., Larsen, L.M. & Sørensen, H. (eds) 1981: The Ilímaussaq intrusion, South Greenland. A progress report on geology, mineralogy, geochemistry and economic geology. Rapport Grønlands Geologiske Undersøgelse 103, 130 pp, 15 articles.

Bernstein, S. 2012. Sediment hosted copper mineralizations in Eleonore Bay Supergroup, Central East Greenland. Avannaa Resources. http://www.avannaa.com/images/uploads/EBG_flyer-2012-03.pdf

Bernstein, S., 2012. Widespread Copper Mineralisation in Upper Permian and Triassic sediments, Central East Greenland. Avannaa Resources**.** http://www.avannaa.com/images/uploads/Permo-Triassic_flyer-2012-03.pdf

Bird, Dennis K., et al. "A gold-bearing horizon in the Skaergaard intrusion." *Economic Geology* 86.5 (1991): 1083-1092.

Bridgwater, D., et al. "The Proterozoic Nagssugtoqidian mobile belt of southeast Greenland: A link between the eastern Canadian and Baltic shields." *Geoscience Canada* 17.4 (1990).

Chadwick, B., and A. A. Garde. "Palaeoproterozoic oblique plate convergence in South Greenland: a reappraisal of the Ketilidian Orogen." *Geological Society, London, Special Publications* 112.1 (1996): 179-196.

Chalmers, J. A., et al. "The southern West Greenland continental margin: rifting history, basin development, and petroleum potential." *Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series*. Vol. 4. Geological Society of London, 1993.

Chalmers, James A., and T. C. R. Pulvertaft. "Development of the continental margins of the Labrador Sea: a review." *Geological Society, London, Special Publications* 187.1 (2001): 77-105.

Christiansen, F. G. "Greenland petroleum exploration: history, breakthroughs in understanding and future challenges." *Geological Society, London, Memoirs* 35.1 (2011): 647-661.*Greenland Bulletin* 15 (2008): 65-68.

Critical raw materials for the EU; Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. 30 July 2010. European Commission, Enterprise and Industry. //ex.europa.eu/enterprise/policies/rawmaterials/documents/index_en.htm)

Deutsche Bank 2013: Terry, C., Hocking, M. McKay, B. 2013: Pulling apart the rare earth market. 15. July 2013. International Copper Study Group: The World Copper Factbook, 2012; International Copper Study Group (ICSG); www.icsg.org

Escher, Arthur, and W. Stuart Watt. *Geology of Greenland*. Geological Survey of Greenland, 1976.

Fakta om Olieboringer i Grønland, Råstofdirektoratet 2012: http://naalakkersuisut.gl/~/media/Nanoq/Files/Publications/Raastof/DK/Fakta%20om%20olieboringer%20i%20Grønland.pdf

Garde, A. A., et al. "The Ketilidian orogen of South Greenland: geochronology, tectonics, magmatism, and fore-arc accretion during Palaeoproterozoic oblique convergence." *Canadian Journal of Earth Sciences* 39.5 (2002): 765-793.

Garde, A.A., Chadwick, B., Grocott, J., Hamilton, M.A. McCaffrey, K.J.W. & Swager, C.P. 2002a: Mid-crustal partitioning and attachment during oblique convergence in an arc system, Palaeoproterozoic Ketilidian orogen, southern Greenland. Journal of the Geological Society (London) 159, 247-261.

Garde, A.A., Hamilton, M.A., Chadwick, B., Grocott, J. & McCaffrey, K.J.W. 2002b: The Ketilidian orogen of South Greenland: geochronology, tectonics, magmatism, and forearc accretion during Palaeoproterozoic oblique convergence. Canadian Journal of Earth Science 39, 765-793.

Gautier, D.L., 2007, Assessment of undiscovered oil and gas resources of the East Greenland Rift Basins Province: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2007-3077, 4 p.

Gautier, Donald L., et al. 2009. "Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic." *Science* 324, 1175-1179.

Geologisk kort over Grønland I 1:500.000_ http://data.geus.dk/map2/geogreen/#Z=1&N=8148070&E=404120

Golonka, Jan, et al. "Paleogeographic reconstructions and basins development of the Arctic." *Marine and Petroleum Geology* 20.3 (2003): 211-248.

Henriksen, Niels, et al. "Greenland from Archaean to Quaternary." *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 18 (2009): 1-13.

Higgins, A. K., Feiko Kalsbeek, and T. Christopher R. Pulvertaft. *Greenland from Archaean to Quaternary*. Ed. Niels Henriksen. Geological Survey of Denmark and Greenland, 2000.

Hutchison, Mark T. "Diamondiferous kimberlites from the Garnet Lake area, west Greenland: exploration methodologies and petrochemistry." *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport* 68.2005 (2005): 33-42.

Kalsbeek, F., Larsen, L.M. & Bondam, J. 1990: Geological map of Greenland 1:500 000, Sheet 1, Sydgrønland. Descriptive text. Copenhagen: The Geological Survey of Greenland, 36 pp.

Kalsbeek, Feiko, and Allen P. Nutman. "Anatomy of the Early Proterozoic Nagssugtoqidian orogen, West Greenland, explored by reconnaissance SHRIMP U-Pb zircon dating." *Geology* 24.6 (1996): 515-518.

Kragh, Karsten, Sven Monrad Jensen, and Henrik Fougt. "Ore geological studies of the Citronen Fjord zinc deposit, North Greenland: project 'Resources of the sedimentary basins of North and East Greenland'." *Geology of Greenland Survey Bulletin* 176 (1997): 44-49.

Larsen, Lotte Melchior, David C. Rex, and Karsten Secher. "The age of carbonatites, kimberlites and lamprophyres from southern West Greenland: recurrent alkaline magmatism during 2500 million years." *Lithos* 16.3 (1983): 215-221.

McGroarty, D. & Wirtz, S. (2012): *Critical metals & National Security*. American Resources Policy Network Report.

Nielsen, T. F. D., and H. K. Schønwandt. "Gold and platinum group metal mineralisation in the Skaergaard intrusion, southern east Greenland." *Grùnlands Geologiske Undersùgelse Rapport* 148 (1990).

Nutman, Allen P., et al. "Anatomy of an Early Archean gneiss complex: 3900 to 3600 Ma crustal evolution in southern West Greenland." *Geology* 21.5 (1993): 415-418.

Pedersen, F. D. "Polyphase deformation of the massive sulphide ore of the Black Angel mine, central West Greenland." *Mineralium Deposita* 16.1 (1981): 157-176.

Raw Materials Group 2012: Data published in Trends in the mining and metals industry. Mining's contribution to sustainable development, October 2012; International Council on Mining & Mineral, 16 pp.

Rosa, D., Stensgaard, B.M. & Sørensen, L.L. 2013: Magmatic nickel potential in Greenland. Reporting the mineral resource assessment workshop 27-29 November 2012. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2013/57, 134 pp. + 1 CD-ROM.

Sand, Karina K., et al. "The lithospheric mantle below southern West Greenland: A geothermobarometric approach to diamond potential and mantle stratigraphy." *Lithos* 112 (2009): 1155-1166.

Schjøth, F., Garde, A.A., Jørgensen, M.S., Lind, M., Moberg, E., Nielsen, T.F.D., Rasmussen, T.M., Secher, K., Steenfelt, A., Stendal, H., Thorning, L. & Tukiainen, T. 2000: Mineral resource potential of South Greenland: the CD-ROM. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2000/57, 36 pp.

Schenk, C.J., 2010, Geologic assessment of undiscovered oil and gas resources of the West Greenland–East Canada Province: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1012, 1 sheet.

Schenk, Christopher J. "Geology and petroleum potential of the West Greenland–East Canada Province." *Geological Society, London, Memoirs* 35.1 (2011): 627-645.

Secher, K and Nielsen, M. (Eds.), 2005. Workshop on Greenland's diamond potential, 7-9 November 2005, in Copenhagen. *Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport* 2005/68, 123 pp

Secher, K., et al. "Timing of kimberlite, carbonatite, and ultramafic lamprophyre emplacement in the alkaline province located 64–67 N in southern West Greenland." *Lithos* 112 (2009): 400-406.

Stemmerik, L., et al. "Depositional history and petroleum geology of the Carboniferous to Cretaceous sediments in the northern part of East Greenland." *Vorren, TO et al* (1993): 67-87.

Stemmerik, Lars, et al. "Resources of the sedimentary basins of North and East Greenland. An integrated petroleum and ore geological research project." *Groenlands Geologiske Undersoegelse, Bulletin* 172.6/8 (1996): 32-36.

Steenfelt, Agnete, et al. "Karrat 97: reconnaissance mineral exploration in central West Greenland." *Geology of Greenland Survey Bulletin* 180 (1998): 73-80.

Steenfelt, A., Nielsen, T.F.D. & Stendal, H. 2000: Mineral resource potential of South Greenland: review of new digital data sets. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2000/50, 47 pp.

Stendal, Henrik, and C. Swager. "Gold in the Early Proterozoic Ketilidian Orogen, South Greenland: setting of mineralization and geotectonic models." *Gold mineralization in the Nordic countries*

and Greenland. Extended abstracts and field trip guide. Open File Series Grønlands Geologiske Undersøgelse 95.10 (1995): 110-113.

Stendal, H. And Secher, K, 2002. Gold mineralisationand gold potential in South Greenland. Exploration and Miningin Greenland. Fact Sheet #1, GEUS, Copenhagen, Denmark. http://www.geus.dk/minex/go_fs01.pdf

Steensgaard, B.M., Kalvig, P. & Stendal, H., 2011. Quantitative mineral resource assessment: Sediment-hosted copper in Greenland. GEUS report 2011/104.

Sørensen, H. (ed.) 2001: The Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland: status of mineralogical research with new results. Geology of Greenland Survey Bulletin 190, 167 pp, (18 articles).

Sørensen, L.L. and Kalvig, P., 2011. The Rare Earth Element Potential in Greenland. Geology and ore. 20. GEUS, Copenhagen, Denmark.

Sørensen, L.L., Kalvig, P. and Thrane, K., 2012.The zinc potential of Greenland. Geology and ore. 21. GEUS, Copenhagen, Denmark.

Stensgaard, B.M., Kalvig, P. & Stendal, H. 2011: Quantitative mineral resource assessment: Sedimentary-hosted copper in Greenland. Reporting the copper assessment workshop, GEUS, Copenhagen, March 2009. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/104, 170 pp. + 1 CD-ROM.

Sørensen, L.L., Stensgaard, B.M., Thrane, K., Rosa, D., & Kalvig, P. 2013: 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. + 1 CD-ROM.

Sørensen, L.L. and Steensgaard, B.M., 2011. Zinc potential in Greenland. Exploration and Miningin Greenland. Fact Sheet #25, GEUS, Copenhagen, Denmark. http://www.geus.dk/minex/go_fs25.pdf

Thrane, K., Steenfelt, A. & Kalvig, P. 2011: Zinc potential in North Greenland. Danmark og Grønland Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/143 , 64pp.

U.S. Department of Energy – Critical Materials Strategy, 2011: http://www.google.dk/search?sourceid=navclient&hl=da&ie=UTF-8&rlz=1T4ADRA_daDK457DK457&q=us+critical+minerals

USGS (fig. 1 and 3): Data in: Don Smale: Review and outlook for Copper, Nickel, Lead and Zinc. UUNCTAD Multi-year Expert Meeting on Commoditiees and Development. March 2013

USGS 2013 (table 2): Rare Earths Statistics and Information. Minerals Commodity Summaries 2013, USGS.

U.S. Geological Survey Fact Sheet 2008. Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle. By (in alphabetical order) Kenneth J. Bird, Ronald R. Charpentier, Donald L. Gautier (CARA Project Chief), David W. Houseknecht, Timothy R. Klett, Janet K. Pitman, Thomas E. Moore, Christopher J. Schenk, Marilyn E. Tennyson, and Craig J. Wandrey

Van der Stijl, Frank W., and Greg Z. Mosher. *The Citronen Fjord Massive Sulphide Deposit, Peary Land, North Greenland: Discovery, Stratigraphy, Mineralization, and Structural Setting*. Geological Survey of Denmark and Greenland, Ministry of Environment and Energy, 1998.

van Gool, Jeroen AM, et al. "The Nagssugtoqidian Orogen of West Greenland: tectonic evolution and regional correlations from a West Greenland perspective." *Canadian Journal of Earth Sciences* 39.5 (2002): 665-686.

Windley, Brian F., and Adam A. Garde. "Arc-generated blocks with crustal sections in the North Atlantic craton of West Greenland: crustal growth in the Archean with modern analogues." *Earth-Science Reviews* 93.1 (2009): 1-30.