



GEUS

MINERALSKE RÅSTOFFER, BÆREDYGTIGHED OG INNOVATION

TROELS KULLBERG, PER KALVIG & MATILDE RINK JØRGENSEN

UNDERVISNINGSMATERIALE TIL GYMNASIESKOLEN I NATURGEOGRAFI, GEOVIDENSKAB OG GEOGRAFI PÅ HF



VIDENCENTER FOR MINERALSKE RÅSTOFFER OG MATERIALER – MiMa

GEOCENTER
DANMARK

KOLOFON

Forfattere: Troels Kullberg, Per Kalvig & Matilde Rink Jørgensen

Redaktion: Troels Kullberg & Per Kalvig

Konsulent: Bodil Wesenberg Lauridsen

Layout og opsætning: Troels Kullberg

Illustrationer: Jette Halskov

Korrektur: Mariannne Vestergaard & Kisser Thorsøe

Udgiver:

Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa)

De Nationale Geologiske Undersøgelser
for Danmark og Grønland (GEUS)
Øster Voldgade 10, 1350 København K

1. udgave februar 2020 (kun digital)

Frit tilgængelig på <http://mima.geus.dk/>

ISBN: 978-87-7871-524-1

FORORD

Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa) har udarbejdet undervisningsmateriale rettet mod gymnasieskolens undervisning i naturgeografi og geovidenskab og geografi på HF efter 2017-reformen. Under hovedoverskrifterne mineralske råstoffer, bæredygtighed og innovation præsenteres i 28 kapitler de mineralske råstoffers samfundsmæssige betydning, deres lange og dynamiske forsyningskæder fra mineralefterforskning til minedrift og forarbejdningstrinene videre til de når forbrugerne – og efterfølgende, de nye værdikæder som opstår, når varen er kasseret og råstofferne skal indgå i genbrugskredsløbet og den cirkulære økonomi.

Det er vores erfaring, at der er et generelt behov for mere viden om betydningen af de mineralske råstoffers værdikæder og de udfordringer, vi som samfund står overfor med på den ene side stigende befolkningstal, og dermed stigende forbrug af mineralske råstoffer, og på den anden side politiske målsætninger om bæredygtigt ressourceforbrug og omstilling til vedvarende energiteknologi. Løsningerne på disse udfordringer kræver, at der inden for alle aspekter af værdikæderne er naturvidenskabelig og ingeniørmæssig viden. Viden om disse 'vugge til vugge'-forsyningskæder er forudsætningen for, at vi som samfund og individer kan træffe bæredygtige beslutninger, og dermed forudsætningen for, at vi kan bidrage til at opfylde FN's verdensmål.

Det er vores håb, at vi med denne gennemgang af nogle af emnerne kan bidrage til at øge interessen blandt gymnasieskolens elever for geovidenskab generelt, og at dette, sammen med gymnasieskolens mange andre tiltag på området, på sigt kan bidrage til, at flere unge søger ind på universiteternes geofaglige uddannelser.

Materialet omfatter en række tematiske kapitler med tilhørende opgaver, øvelser og videoer, der frit kan hentes fra MiMa's hjemmeside (<http://mima.geus.dk/>).

Projektet er finansieret af GeoCenter Danmark og De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS).

INDHOLDSFORTEGNELSE

KAPITEL 1	8		
DE FIRE INDUSTRIELLE REVOLUTIONER	9		
Fra landbrugssamfund til industrisamfund	9		
Den første industrielle revolution	9		
Den anden industrielle revolution	11		
Den tredje industrielle revolution	11		
Den fjerde industrielle revolution	11		
Konsekvenser af den fjerde industrielle revolution	13		
Råstoffernes betydning i de industrielle revolutioner	14		
KAPITEL 2	16		
MEGATRENDER – GLOBALE VÆKSTDRIVERE	17		
Megatrender	17		
Demografisk udvikling	17		
Urbanisering	19		
Globalisering og skifte i økonomisk magt	22		
Konsekvenserne	23		
Klimaændringer	23		
KAPITEL 3	28		
BÆREDYGTIGHED OG BÆREDYGTIG UDVIKLING	29		
Naturgrundlaget	29		
Bæredygtighed og bæredygtig udvikling	29		
Naturkapital	30		
Grader af bæredygtighed	33		
		Typen af bæredygtighed	34
		Geografiske niveauer af bæredygtighed	35
		Beregning af bæredygtig udvikling	35
		Det økologiske fodaftryk	38
		KAPITEL 4	42
		FÆLLESSKABETS TRAGEDIE	43
		Teorien om fællesskabets tragedie	43
		Teorien genopdages	44
		Kritik af teorien	45
		KAPITEL 5	46
		MINERALSKES RESSOURCER OG RESERVER	47
		Mineralressourcer – en del af naturressourcerne	47
		Definitioner på mineralressourcer og -reserver	47
		Råstoffer til de fremtidige generationer	49
		Hvor meget er der tilbage?	50
		Bæredygtighed og minedrift – modstridende størrelser	50
		KAPITEL 6	52
		FN'S VERDENSMÅL FOR BÆREDYGTIG UDVIKLING	53
		FN's verdensmål for bæredygtig udvikling	53
		Verdensmål 6: Rent vand og sanitet	54
		Verdensmål 7: Bæredygtig energi	57
		Verdensmål 9: Industri, innovation og infrastruktur	59
		Verdensmål 11: Bæredygtige byer og lokalsamfund	62

Verdensmål 12: Ansvarligt forbrug og produktion	65	Kreativ destruktion og disruptiv økonomi	97
Verdensmål 13: Klimaindsats	67	Disruptionsrådet	98
		Måling af innovation i praksis	100
KAPITEL 7	72	KAPITEL 11	102
DEN GRØNNE ØKONOMI	73	DANSKE INNOVATIONER MED MINERALSKE RÅSTOFFER	103
Den grønne økonomi	73	Danmarks mineralske råstoffer er væsentlige i den industrielle innovation	103
FN's verdensmål og energiteknologi	75	Innovativ anvendelse af sand og sten nedbringer energiforbruget i bygninger	108
Verdens energiforsyning – en vifte af teknologier	76	Stenuld	109
		Glasuld	110
		Innovation med sjældne jordartsmetaller har gjort Danmark til førende vindmølleland	110
KAPITEL 8	80	KAPITEL 12	112
CIRKULÆR ØKONOMI	81	INNOVATION I TRANSPORTSEKTOREN	113
Økonomisk vækst	81	Containertransport	113
Lineær økonomisk tankegang	83	Containerens historie	113
Cirkulær økonomisk tankegang	83	Containerne og råstofforbruget	116
Behov for bedre produktdesign	86		
Omstilling fra eje til leje	86	KAPITEL 13	118
		BATTERIER OG DEN GRØNNE OMSTILLING	119
KAPITEL 9	88	Hvorfor er batterier så vigtige?	119
AFFALD SOM RESSOURCE	89	Batteriets funktioner og opbygning	120
Husholdnings- og industriaffald er ressourcer	89	Lithium-ion-batterier	122
Urban exploration og urban mining	91		
Indsamling er også en udfordring	93		
KAPITEL 10	96		
INNOVATION – BEGREBER OG EKSEMPLER	97		
Innovationsbegreber	97		

Nøgleråstofferne til lithium-ion-batterier	122		
Lithium	123		
Grafit	125		
Forsyningskæderne til batterier er udfordret	126		
KAPITEL 14	130		
BATTERIERNES RÅSTOFGEOLOGI	131		
Batteriernes råstofgeologi	131		
Grafit	131		
Kobolt	132		
Nikkel	133		
Lithium	135		
KAPITEL 15	138		
SOLCELLER – EN GRØN ENERGITEKNOLOGI	139		
Solceller – en grøn energiteknologi	139		
Den globale udbygning af solcelleanlæg	141		
Hvordan virker solceller?	144		
Råstoffer til solceller	145		
KAPITEL 16	148		
VINDMØLLER – EN DANSK SUCCESHHISTORIE	149		
Udbygningen af vindmøllesektoren kræver råstoffer	149		
Hvordan fungerer en vindmølle?	152		
Råstoffer til vindmøller	152		
Kan møllerne genanvendes, når de er slidt ned?	153		
KAPITEL 17		156	
LED – BIDRAGER TIL MINDRE ENERGIFORBRUG		157	
LED-belysning – en del af den grønne energirevolution		157	
LED er ikke en ny teknologi		157	
Innovation i belysningsteknologien		158	
Råstofferne til LED-lamper		158	
Teknologien bestemmer råstofferne – og det skifter hurtigt		160	
KAPITEL 18		162	
MINERALSKE RÅSTOFFER		163	
Forskellige typer af mineralske råstoffer		163	
Potentielle råstoffer		164	
Bjergarter som råstof		164	
Mineraler som råstof		166	
Grundstoffer som råstof		166	
Grundstoffer		167	
Mineralgrupper		167	
Mineralers kemiske sammensætning		168	
Mineralers hårdhed		168	
Magnetiske mineraler		169	
Densitet		169	
Farver og glans		169	
Stregfarve		170	
Krystalform		170	
Spaltelighed		171	

KAPITEL 19	172	Naturhistorisk metode	206
DET GEOLOGISKE KREDSLØB OG ISOSTASI	173	Strukturer på det geologiske kort	210
Det geologiske kredsløb	173		
De exogene processer – forvitring og erosion	173		
De exogene processer – sedimentation og hærdning	175		
Fra exogene til endogene processer – metamorfose	176		
Endogene processer – magmatiske bjergarter	178		
Smeltning af kappens bjergarter	179		
Hævning af terræn – isostasi	184		
KAPITEL 20	188		
RÅSTOFFERNE I DET GEOLOGISKE KREDSLØB	189		
Dannelse af de mineralske råstoffer	189		
Magmatiske forekomster	192		
Hydrotermale forekomster	192		
Sedimentære forekomster	193		
Tungsandsforekomster	196		
Residualforekomster	197		
Råstoffernes geografiske fordeling	197		
KAPITEL 21	200		
DET GEOLOGISKE KORT	201		
Det geologiske kort	201		
Bjergartsbeskrivelse	202		
Aldersbestemmelse	202		
		Naturhistorisk metode	206
		Strukturer på det geologiske kort	210
		KAPITEL 22	212
		MINERALEFTERFORSKNING	213
		Mineralefterforskning	213
		Geokemiske efterforskningsmetoder	217
		Geofysiske metoder	218
		Magnetiske undersøgelser	218
		Geoelektriske undersøgelser	218
		Gravimetrisk undersøgelse	220
		Seismiske undersøgelser	221
		Remote sensing-undersøgelser	221
		Boringer ned i undergrunden	222
		KAPITEL 23	224
		HVAD SKER DER I EN MINE?	225
		Minedrift – første led i værdikæderne for mineralske råstoffer	225
		Åbne- og underjordiske miner	225
		In-situ miner	227
		Brydning af malmen	227
		Gråbjerg	229
		Tailings	229
		Mange forskellige specialister i en mine	231
		KAPITEL 24	234

RÅSTOFKNAPHED	235	Transport af jernmalm og stålråstoffer	264
Råstofknaphed har mange årsager – men ingen er geologiske	235	Fremstilling af stål bidrager til CO ₂ -belastningen	266
Der er forskellige årsager til råstofknaphed	235		
Absolut råstofknaphed	235	KAPITEL 27	268
Midlertidig råstofknaphed	236	FRA SAND, STEN OG KALK TIL BETON	269
Kritiske råstoffer	239	Fra sand, sten og kalk til beton	269
Midlertidig råstofknaphed kan afværges	241	Råstoffer til beton	269
		Tilslagsmaterialerne	269
KAPITEL 25	244	Cement	272
FORSYNINGSKÆDER OG VÆRDIKÆDER	245	Fra råstoffer til beton	273
Forbruget af mineralske råstoffer er dynamisk	245	Beton og CO ₂ -belastningen	273
Værdikæderne for mineralske råstoffer	247		
Begrebet forsyningskæde	251	KAPITEL 28	276
Kritiske råstoffer	252	SJÆLDNE JORDARTSMETALLER	277
Referencer	253	Hvorfor hedder det sjældne jordartsmetaller?	277
KAPITEL 26	254	Sjældne jordartsmetaller er vigtige til den grønne omstilling	278
JERNMALM TIL STÅL	255	Forsyningskæden fra mine til mobil	279
Jernmalm – et af de vigtigste råstoffer	255	Hvad med miljøet?	280
Dannelse af jernmalm fortæller om Jordens udvikling	255	Geologiske miljøer med forekomster af sjældne jordartsmetaller	281
BIF-forekomster i Grønland	258	Mineraler som indeholder sjældne jordartsmetaller	283
Isua-jernmalmen Grønland – en af verdens ældste bjergarter	259	Den geografiske fordeling af miner med sjældne jordartsmetaller	283
Planer for en jernmalmmine ved Isua	260	Ingen geologisk mangel på sjældne jordartsmetaller	283
Miljøudfordringer for Isua-minen	260	Grønlands sjældne jordartsmetaller	284
Fra jernmalm til stål	263	Projekt Kvanefjeld	287
Legeringsmetallerne	264	Minearbejde kræver specialister	290
		Miljøudfordringerne	290

KAPITEL 1



FIGUR 1. Godstog med kul til jern- og stålfabrik i Kardemir Karabuk, Tyrkiet, 2018. Produktionen af jern og stål med energi fra afbrænding af kul har været helt essentiel for især den første og anden industrielle revolution. Shutterstock.

DE FIRE INDUSTRIELLE REVOLUTIONER

FRA LANDBRUGSSAMFUND TIL INDUSTRISAMFUND

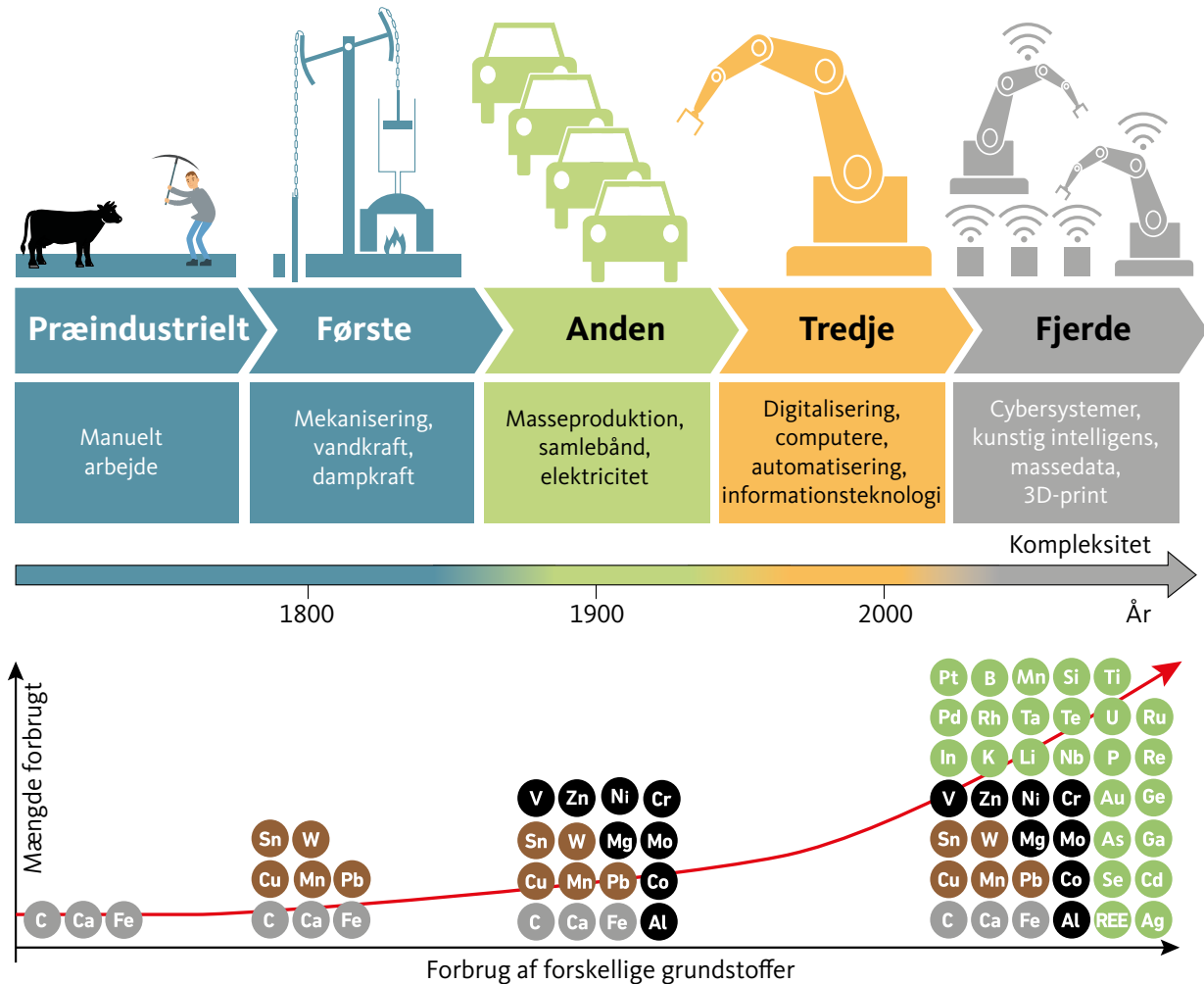
Omkring 1760 ændrede samfundene i den vestlige verden sig fundamentalt fra bonde-samfund, hvor arbejdskraften primært var bundet til landbrug, til stadig mere avanceret brug af maskiner til produktion og heraf følgende byudvikling med fabrikker og arbejdere.

Det er på grund af de industrielle revolutioner, at vi i den udviklede del af verden har så høj en levestandard og dermed så stort et ressourceforbrug.

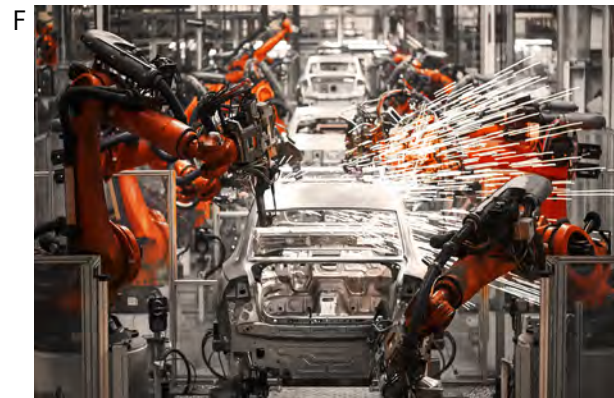
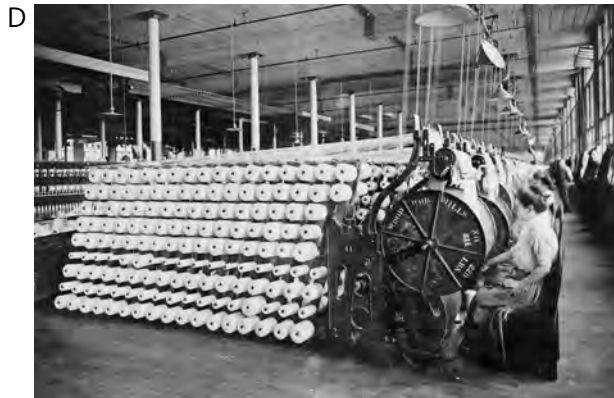
DEN FØRSTE INDUSTRIELLE REVOLUTION

Det første trin i denne udvikling kaldes for den første industrielle revolution og begyndte omkring 1760 med opfindelsen af dampmaskinen i England og varede frem til ca. 1840. Den første industrielle revolution ledte til store samfundsmæssige ændringer, især inden for landbrug, masseproduktion, minedrift og transport (figur 2).

Udnyttelsen af dampmaskinen gjorde det muligt at udvikle maskiner, der kunne overtage en del af det manuelle arbejde, der



FIGUR 2. De industrielle revolutioners kendetegn og forbrug af grundstoffer. Bemærk at kompleksiteten stiger. Efter Reuter & van Schaik (2013).



FIGUR 3. De industrielle revolutioner i billeder.

A. Gammel rusten dampmaskine fra slutningen af 1800-tallet. Opfindelsen og udbredelsen af dampmaskinen i 1700-tallet var grundlaget for den første industrielle revolution, fordi man kunne gå fra manuelt arbejde udført af mennesker og dyr til maskiner og dermed fra håndværk og hjemmeproduktion til masseproduktion.

B. Blik ind i en gammel forladt kulmine. Op gennem det 20. århundrede blev en stor del af kulminerne urentable og blev derfor lukket.

C. Forladt gammel kulmine i Tower Colliery, Wales. Adgangen til kul og dermed billig energi var en vigtig forudsætning i at drive den anden industrielle revolution frem.

D. Kvinder der arbejder på tekstilmaskiner med spinning af garn hos American Woolen Company, Boston, USA, ca. 1910.

E. Opfindelsen og udbredelsen af dampdrevne lokomotiver og udbredelsen af jernbaner fra starten af 1800-tallet var en vigtig del af den første industrielle revolution og kom snart til at erstatte okser og heste som den bedste og mest økonomiske måde at flytte mennesker og varer over store afstande.

F. Samlebåndet blev en vigtig del af den anden og siden den tredje industrielle revolution. Her er de tidligere arbejdere erstattet af robotter. Fotos fra Shutterstock.

hittil havde karakteriseret produktionen i bondesamfundet (figur 3. a, b, c, d).

Den første industrielle revolution fik afgørende betydning for de socioøkonomiske og kulturelle forhold, som de berørte befolkninger levede under. Eksempelvis opstod der en helt ny arbejderklasse, fabriksarbejderen, og folk begyndte i stor stil at migrere fra landområderne til byerne for at søge arbejde i de nye industrier.

Den industrielle revolution spredte sig med tiden fra England til resten af Europa, Nordamerika og senere til andre dele af verden.

DEN ANDEN INDUSTRIELLE REVOLUTION

Den anden industrielle revolution startede i slutningen af det 19. århundrede og varede til omkring 2. verdenskrig. Perioden var præget af hurtig industriel vækst, primært i Storbritannien, Tyskland og USA, men også i Frankrig, Italien, Nederlandene og Japan.

Den anden industrielle revolution var karakteriseret ved en kraftig udbygning af jernbanenettet, jern- og stålproduktion, udbredt anvendelse af industrielle maskiner, dampkraft, anvendelse af telegraphen, brug af

råolie, begyndende elektrificering og udbygning af den kemiske industri. Disse ting muliggjorde opfindelsen og udbredelsen af samlebåndet og dermed af masseproduktion (figur 3. e, f).

Den øgede indsigt i de kemiske processer gjorde det muligt at fremstille syntetiske farvestoffer og anvende råolie, ikke blot som brændstof, men også som vigtig ingrediens i en lang række produkter, herunder især alle former for plastik.

DEN TREDJE INDUSTRIELLE REVOLUTION

Den digitale revolution, eller den tredje industrielle revolution, er karakteriseret ved, at der sker et skifte fra simpel elektronisk teknologi til avanceret digital teknologi. Perioden starter i slutningen af 1950'erne og tager for alvor fart i slutningen af 1970'erne med udviklingen og spredningen af digitale computere og den begyndende digitale registrering af borgerdata.

Den digitale revolution dækker også over de samfundsmæssige ændringer, der er konsekvensen af den nye informationsteknologi og udbredelsen af internettet i sidste halvdel af det 20. århundrede. Opfindelsen af world-

wide-web (www) i 1991 bragte os for alvor ind i informationsalderen.

DEN FJERDE INDUSTRIELLE REVOLUTION

Vi er lige nu i starten af endnu en teknologisk revolution; den fjerde industrielle revolution, der formentligt endnu en gang vil fundamentalt ændre den måde, vi som mennesker lever, arbejder og forholder os til hinanden på. Der er eksperter, der mener, at den samfundstransformation, som den fjerde industrielle revolution vil medføre, både i skala og kompleksitet, vil være større og mere gennemgribende, end noget andet menneskeheden hittil har oplevet.

Den fjerde industrielle revolution er karakteriseret ved en ny æra af teknologier, der kombinerer hardware, software og biologi (cyber-fysiske systemer). Gennembrud inden for teknologier som energilagring, materialevidenskab, robotik, kunstig intelligens, nanoteknologi, kvantecomputere, bioteknologi, tingenes internet, 5G trådløse teknologier, 3D-printning og fuldt autonome køretøjer bliver hverdag (figur 4. a, b, c, d).

Det giver kolossale muligheder for udvikling og innovation, når milliarder af mennesker



FIGUR 4. De to sidste industrielle revolutioner i billeder.

A. Arbejde og produktion med 3D-printere spås at blive en af de helt store paradigmeskifte i den måde vi i fremtiden får adgang til de produkter vi har behov for. Det spås, at forbrugere inden længe selv printer deres nye sko, briller, tøj og mange andre ting, der indgår i den moderne husholdning.

B. Indførelsen af robotter i landbruget kommer til at vende op og ned på vores fødevarerproduktion, og ikke mindst behovet for arbejdspladser i sektoren.

C. IBM viser en model af en kvantecomputer i deres pavillon på CeBIT 2018 i Hannover, Tyskland, juni 2018.

D. Selvkørende eldrevne biler bliver formentlig en stor del af fremtidens transport. Det giver private forbrugere mulighed for at foretage sig andre ting under transporten, men giver også mulighed for at skære ned på behovet for menneskelig arbejdskraft i transportsektoren med førerløse lastbiler, busser osv.

E. I tingenes internet bliver alle vores elektroniske dimser koblet op på internettet og kan kommunikere med hinanden og omverdenen.

F. Private uberchauffører får med de nye teknologiplatforme mulighed for at deltage i deleøkonomien.

Fotos fra Shutterstock.

er forbundet af mobile enheder udstyret med hidtil uset processorkraft, lagerkapacitet og adgang til viden på internettet. Allerede i dag er mere end 30 % af verdens befolkning koblet på de sociale platforme og danner faglige og sociale netværk, uddanner sig og deler information. Det kan øge tværkulturel forståelse og samhørighed, men det kan også skabe urealistiske forventninger og ekkokamre, der spreder ekstreme idéer og ideologier.

Et andet aspekt af de nye teknologiske muligheder er adgangen til produkter og tjenester, der øger effektiviteten og fornøjelsen for den enkelte. Har man adgang til internettet, kan man så let som ingenting bestille feriehus, booke rejser, købe og betale varer, få adgang til musik, film og spil, publicere hvad man vil og finde sammen i et utal af sociale netværk og meget mere.

Men det er ikke kun os mennesker, der skal kobles på internettet. Både offentlige og private aktører arbejder ihærdigt på, at stadig flere af vores elektroniske hjælpemidler kobles på internettet i det såkaldte Internet of Things (IoT). Meningen er, at de ved hjælp af indbyggede sensorer og trådløs netadgang

skal indsamle og dele data, så de i højere grad kan agere selvstændigt. Fremtidens køleskab skal selv finde ud af om der mangler mælk og kan selv bestille mere mælk, der efterfølgende leveres af droner. Eller dit ur, der konstant måler dine biofysiske data, kan selvstændigt bestille tid hos lægen, hvis dit blodtryk er for højt (figur 4. e).

KONSEKVENSER AF DEN FJERDE INDUSTRIELLE REVOLUTION

Nye teknologier skaber helt nye måder at betjene eksisterende behov på. Innovative virksomheder kan med globale, digitale platforme til forskning, udvikling, markedsføring, salg og distribution introducere varer og serviceydelser, der er bedre, billigere og mere fleksible end de hidtidige løsninger.

Forbrugernes øgede adgang til mobilnet og data giver mulighed for at sammenligne priser, kvaliteter og leveringshastigheder og kan tvinge virksomheder til at tilpasse deres produkter og tjenesteydelser, så de i design, markedsføring og levering forbliver attraktive og konkurrencedygtige. Udviklingen af nye teknologiplatforme, der kombinerer efterspørgsel og udbud, har allerede vist sig

at være helt grundlæggende for en række nye disruptive forretningsmodeller inden for deleøkonomien (Uber, Airbnb, Trendsales osv.) (figur 4. f).

I en tid hvor de fysiske, digitale og biologiske verdener synes at smelte sammen, vil nye teknologier og platforme i stigende grad gøre det muligt for borgerne at interagere med magthaverne, udtrykke deres meninger, koordinere deres indsats for og imod førte politikker, som det allerede nu er tilfældet i mange demokratiske stater. Samtidig vil magthaverne få nye teknologiske muligheder for at øge kontrollen over befolkningen med avancerede overvågningssystemer og evnen til at styre den digitale infrastruktur, som det fx er tilfældet i Kina, Saudi Arabien og andre autoritære regimer (figur 5. a, b).

Den fjerde industrielle revolution vil i sidste ende ikke kun ændre, hvad vi gør, men også hvem vi er. Det vil påvirke vores identitet og alle de udfordringer, der er forbundet med det. Vores følelse af privatliv, ejerskabsforhold, forbrugsmønstre, den tid vi bruger til arbejde og fritid, og hvordan vi udvikler vores karriere, dyrker vores evner, møder mennesker og plejer forhold er under forandring.



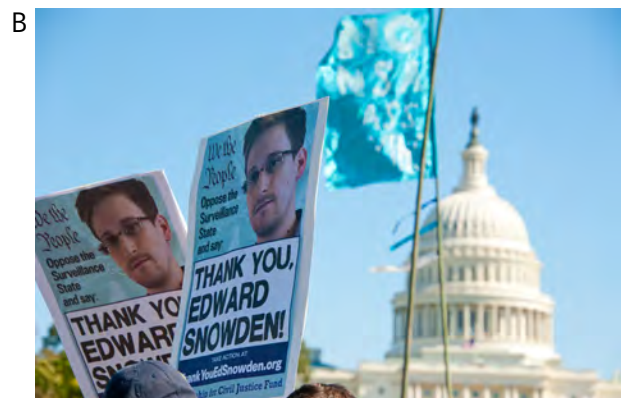
FIGUR 5. Konsekvenser af den fjerde industrielle revolution.

A. Masseovervågning er efterhånden hverdag i mange samfund, mest systematiseret i autoritære regimer som Kina.

B. Edward Snowden er en af de mest betydningsfulde whistleblowere. Snowden afslørede at den amerikanske efterretningstjeneste har systemer, der overvåger og lagrer al elektronisk data.

C. Deleøkonomien spås en gylden fremtid. Her er det cykeldeling i Kina.

Fotos fra Shutterstock.



En af de største individuelle udfordringer i forbindelse med ny informationsteknologi er privatlivets fred.

Ligesom de foregående revolutioner har den fjerde revolution potentialet til at øge de globale indkomstniveauer og forbedre livskvaliteten for hele verdens befolkning. En af de store udfordringer bliver den øgede ulighed på arbejdsmarkedet, fordi en stigende automatisering i produktionen erstatter den manuelle arbejdskraft, mennesker ellers traditionelt har udgjort. Udfordringen bliver størst for mennesker med ingen eller korte uddannelser, mens der vil være stigende efterspørgsel på veluddannede, innovative medarbejdere.

RÅSTOFFERNES BETYDNING I DE INDUSTRIELLE REVOLUTIONER

De industrielle revolutioner har ikke alene haft betydning for den måde produktionen af varer, og dermed samfundet, har udviklet sig på, den har også haft stor betydning for, hvilke mineralske råstoffer der bliver efterspurgt til fremstilling af varer og for produktionen af energiråstoffer.

En vigtig forudsætning for de tidligere in-

dustrielle revolutioner har været den uhin-drede adgang til mineralske råstoffer. I de første revolutioner var det især de velkendte metaller som jern, kobber, nikkel, zink, bly og kulstof i form af fossile brændsler, der var de vigtige i produktionen (figur 2). Med den tredje og fjerde revolution er der skabt behov for en lang række nye mineralske råstoffer, som indeholder grundstoffer, der ikke tidligere blev efterspurgt. Det er fx grundstoffer som tantal, niobium, hafnium, iridium, gallium, germanium og gruppen af sjældne jordartsmetaller. Disse råstoffer bruges især til at forsyne informationsteknologierne og teknologi knyttet til vedvarende energi med metaller med særlige egenskaber, der er nødvendige for at fremstille nye typer af materialer.

NØGLEBEGREBER

- Industrielle revolutioner
- Informationsteknologi
- De industrielle revolutioner
- Internet of Things (IoT)
- Deleøkonomi
- Automatisering
- Teknologiplatforme

REFERENCER

Reuter, M. A., & van Schaik, A. (2013). Resource efficient metal and material recycling. I A. Kvithyld, C. Meskers, R. Kirchain, G. Krundick, B. Mishra, M. Reuter, ... J. Spangenberg (Red.), *REWAS 2013* (s. 332–340). Hentet fra https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48763-2_35

KAPITEL 2



FIGUR 6. Luftfoto af tre af verdens nuværende megabyer; Los Angeles (USA), Mexico City (Mexico) og Lagos (Nigeria). Lagos spås at være verdens befolkningsmæssigt største by i 2100. Shutterstock.

MEGATRENDER – GLOBALE VÆKSTDRIVERE

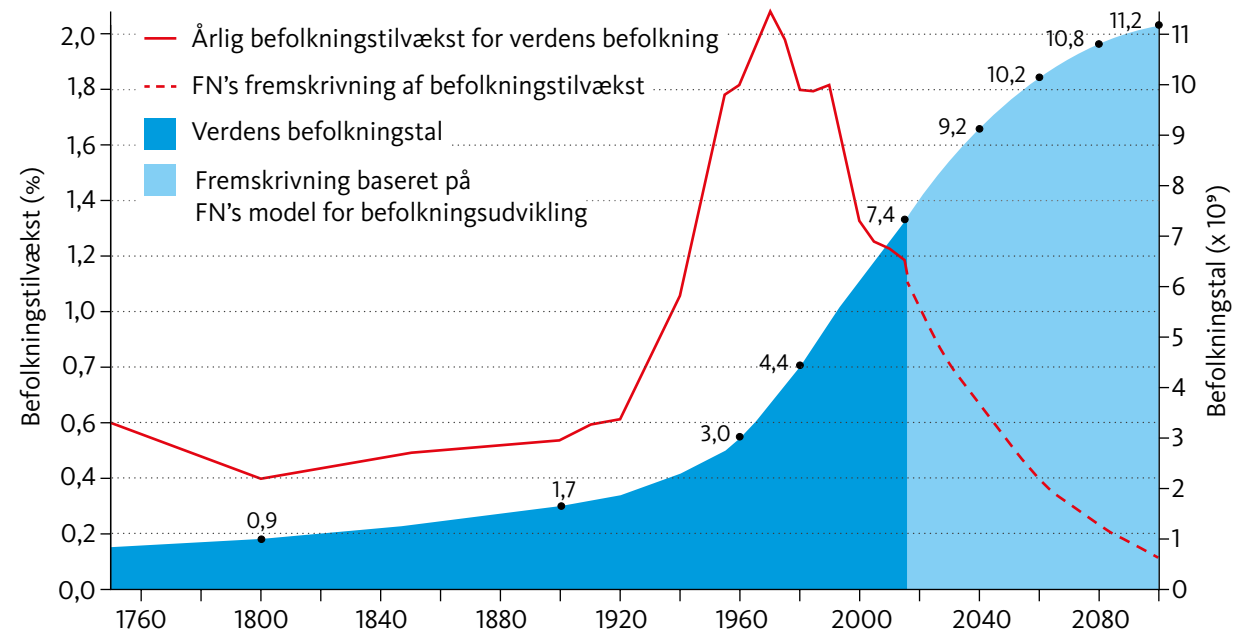
MEGATRENDER

Megatrender handler om de drivkræfter, der definerer verden i dag og den i morgen. Megatrender er derfor karakteriseret ved at være vidtrækkende globale mønstre relateret til adfærd, mobilitet og miljø. Disse strømninger er ikke altid tydelige at se i vores hverdag, men de skaber alligevel store samfundsændringer, så det er vigtigt at identificere dem og forstå de muligheder og konsekvenser, de skaber.

Forbruget af råstoffer, herunder de mineraliske råstoffer, påvirkes af globale tendenser såsom demografisk udvikling, urbanisering, teknologisk og økonomisk udvikling. Megatrender er et udtryk for de globale vækstdrivere, som er bestemmende faktorer for ressourceforbruget.

DEMOGRAFISK UDVIKLING

De Forenede Nationers (FN) prognoser estimerer, at det globale befolkningstal i 2030 vil være ca. 8,3 mia. eller omkring en femtedel mere end i dag, og det forventes, at det vil stige til langt over 9 mia. i 2050 (figur 7). Den demografiske udvikling varierer dog meget fra region til region og fra de industrialisere-



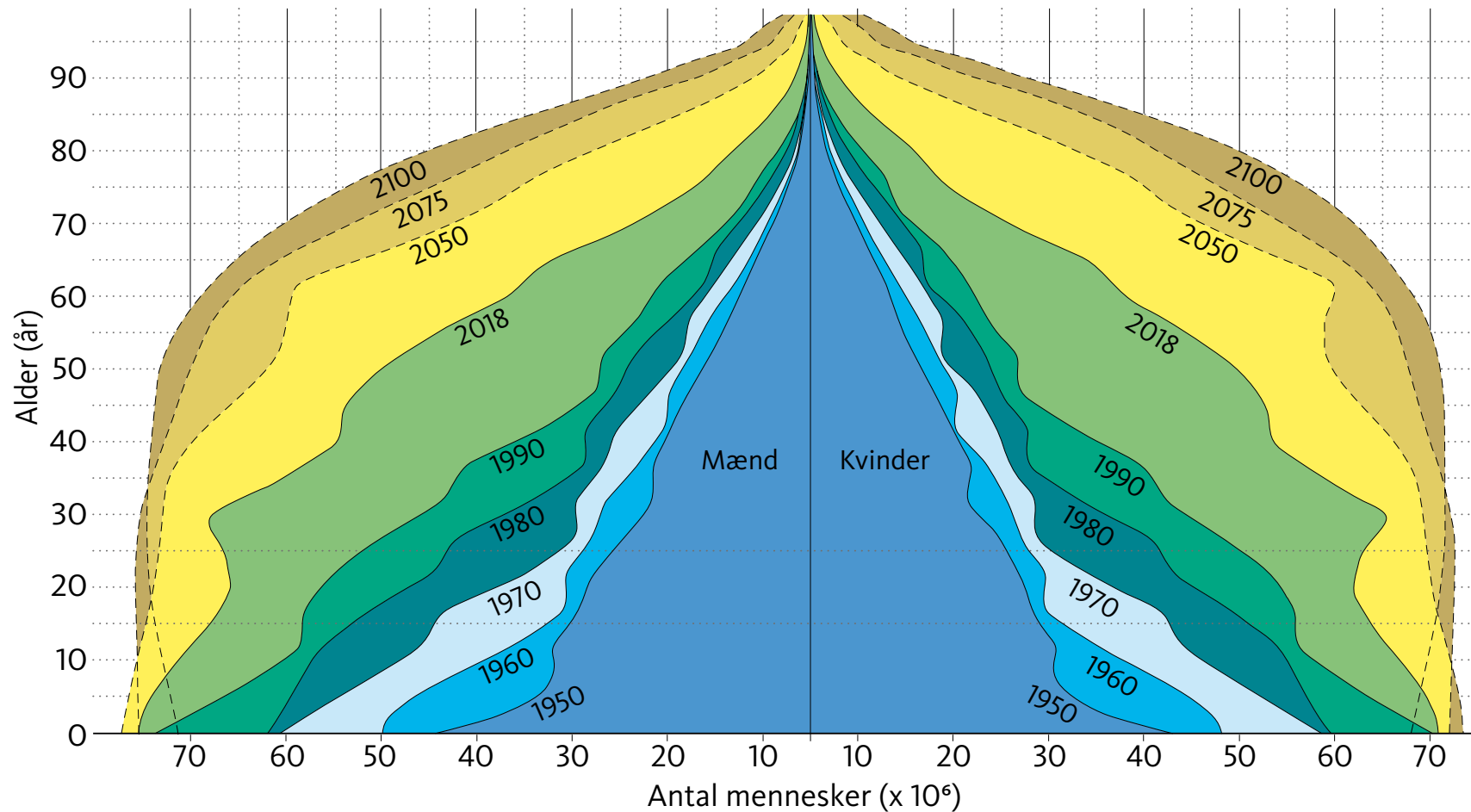
de lande til udviklingslandene i det Globale Syd (figur 8).

Mens Europas befolkningstal sandsynligvis vil falde med omkring 19 mio. frem mod 2050, vil Afrikas befolkningstal formentlig fordobles i samme periode til ca. 2,2 mia. og dermed udgøre ca. en fjerdedel af verdens befolkning. Asiens befolkning forventes at stige med ca. 1 mia. mennesker op til 5,1 mia. frem til 2050, mens befolkningen i Nordame-

FIGUR 7. Udviklingen i verdens befolkningstal fra 1750 til 2100 og i den årlige befolkningstilvækst. Fremskrivningen fra perioden 2015 til 2100 er baseret på FN's prognoser for befolkningsudvikling. Efter Roser, Ritchie & Ortiz-Ospina (2019).

	Verden	%	Afrika	%	Asien	%	Europa	%	Nordamerika	%
2010	6.895.889.000	100	1.022.234.000	14,8	4.164.252.000	60,4	738.199.000	10,7	344.529.000	5,0
2030	8.321.380.000	100	1.562.047.000	18,8	4.867.741.000	58,5	741.233.000	8,9	401.657.000	4,8
2050	9.306.128.000	100	2.191.599.000	23,6	5.142.220.000	53,3	719.257.000	7,7	446.862.000	4,8

FIGUR 8. Befolkningstilvæksten i hele verden og fordelt på regioner fra 2010 til 2050. Data fra Büchele, Henzelmann, Seidemann, & Wiedemann (2012).



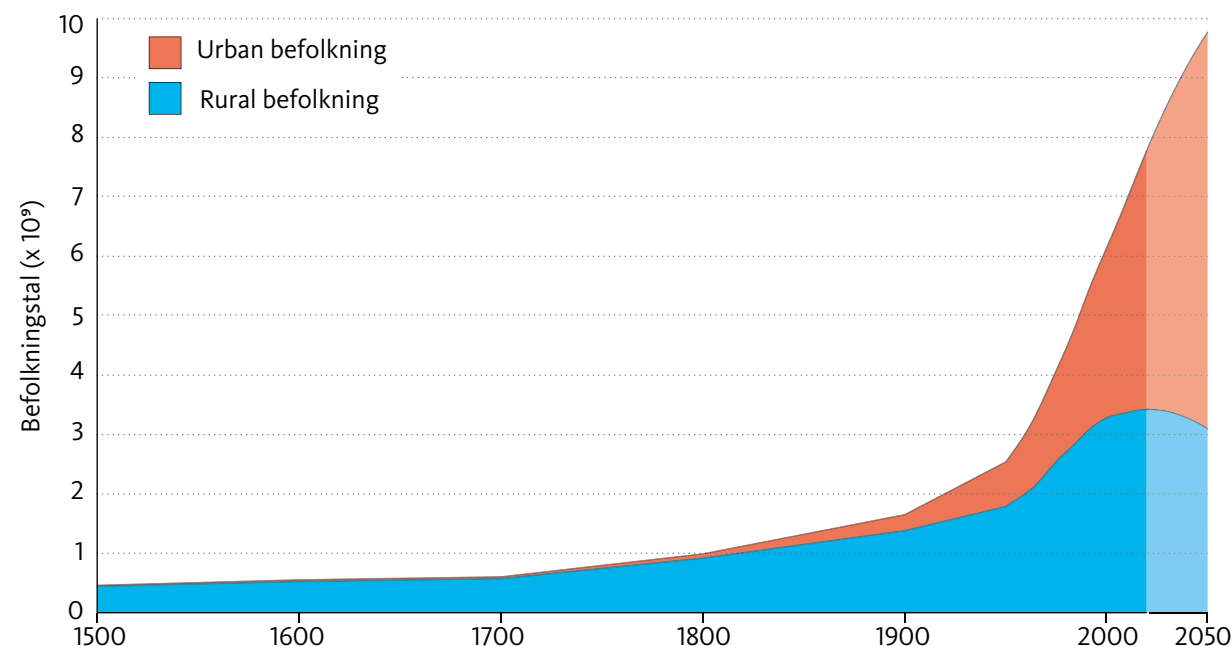
FIGUR 9. Udviklingen i den demografiske fordeling for verdens befolkning i perioden 1950-2100. Efter 2018 er udviklingen baseret på FN's prognoser for befolkningsudvikling. Efter Roser, Ritchie & Ortiz-Ospina (2019).

rika vil stige med ca. 100 mio.

Verdens befolkningstal ændres ikke kun kvantitativt. Aldersfordelingen ændrer sig også markant, da gennemsnitsalderen stiger som følge af, at den forventede levetid bliver længere (figur 9 og figur 16). I 2030 vil halvdelen af den globale befolkning være over 34 år mod det nuværende aldersgennemsnit på 29 år. Men også her er der store forskelle fra region til region, og især i de industrialiserede lande udgør ældre en stadig større andel af den samlede befolkning.

URBANISERING

I 2010 boede der, for første gang i verdenshistorien, flere mennesker i byerne (urbant) end i landdistrikterne (ruralt), fordi mennesker overalt flytter til byerne for at søge arbejde (figur 10). I 2030 forventes det, at to tredjedele af verdens befolkning vil bo i urbane områder, og i 2050 forventes det at mere end 6 mia. mennesker, eller omkring 70 % af verdens befolkning, vil være urbaniseret. Hvor urbaniseringen i forrige århundrede hovedsageligt foregik i de industrialiserede lande, vil urbaniseringen fremover hovedsageligt ske i udviklingslandene i Asien



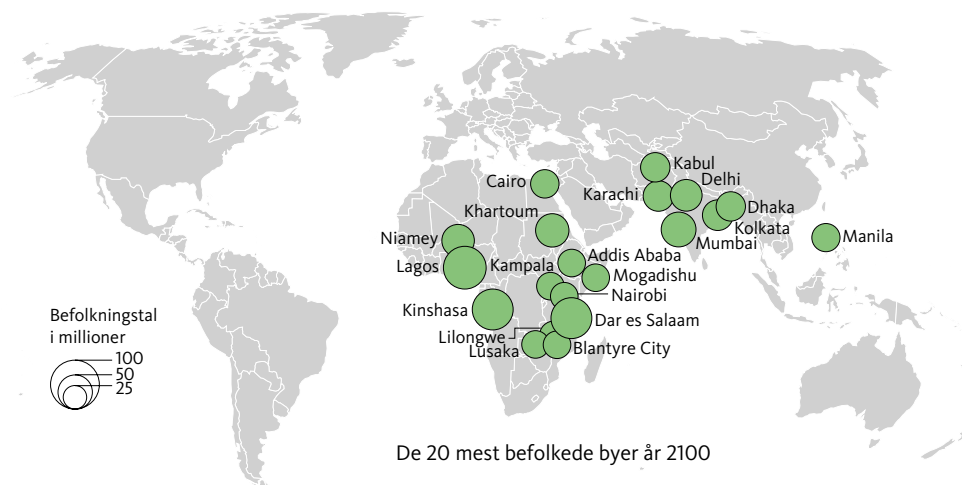
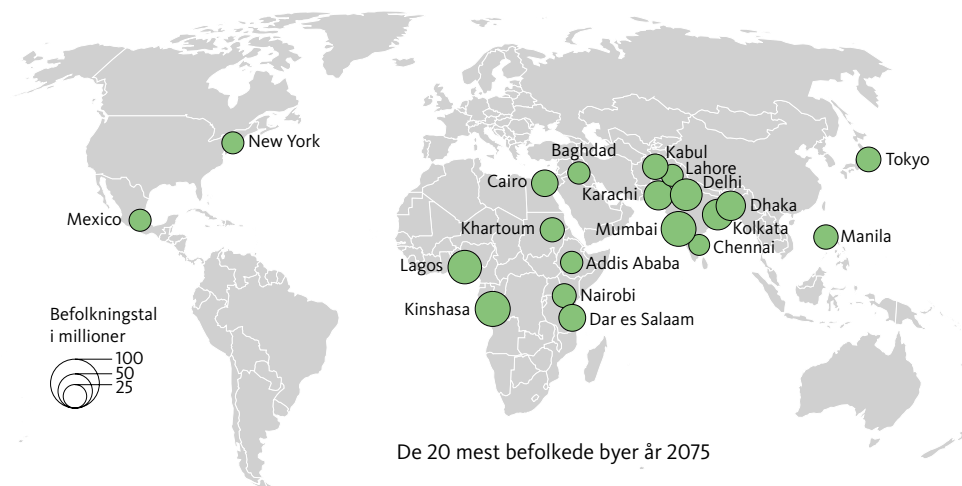
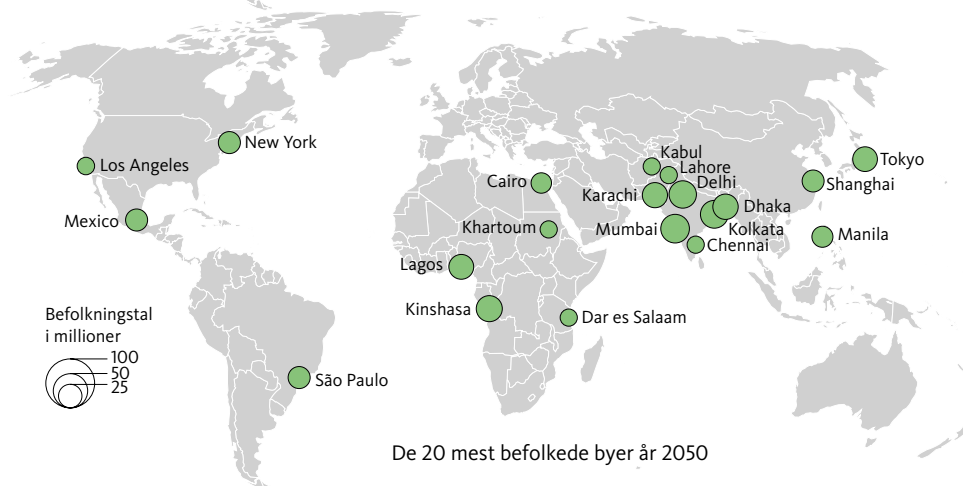
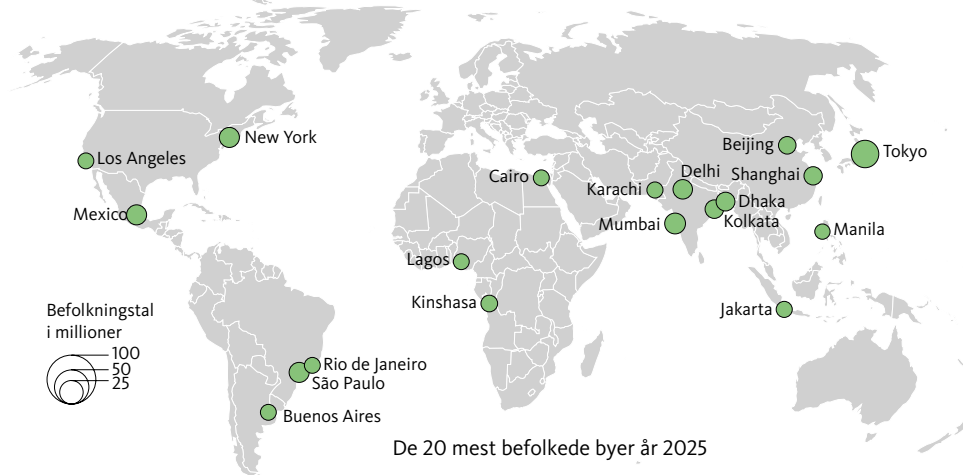
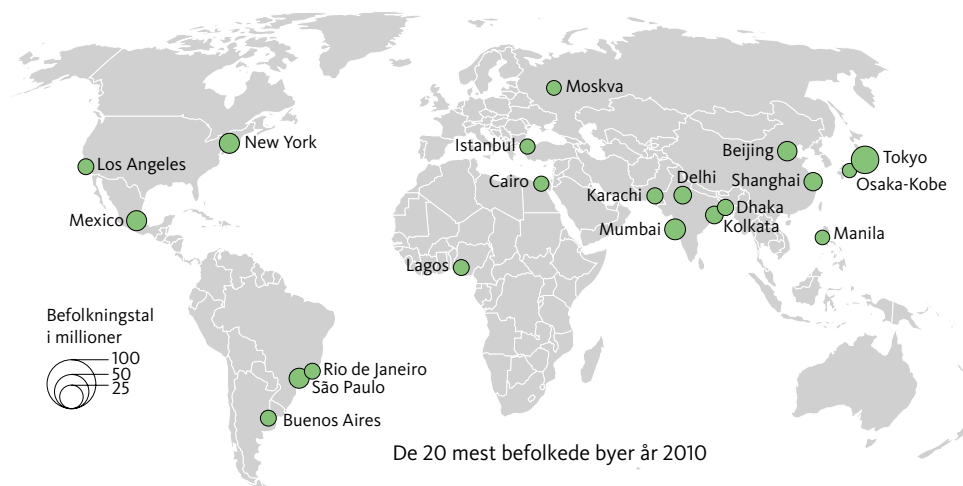
og Afrika.

I kølvandet på urbaniseringen er der kommet flere megabyer, dvs. byer med mere end 10 mio. indbyggere (figur 11). I 1950 var der kun to megabyer i verden. Det tal er steget markant siden, men næsten udelukkende i udviklingslandene og Kina. FN vurderer, at der i 2025 vil være 20 megabyer, hvoraf de 16 vil ligge i et udviklingsland.

Byer spiller en ambivalent rolle i samfunds-

FIGUR 10. Udviklingen i den rurale (land) og urbane (by) befolkning fra 1500 til 2050. Fra 2018 er udviklingen baseret på FN's prognoser for befolkningsudvikling. Efter Ritchie & Roser (2019).

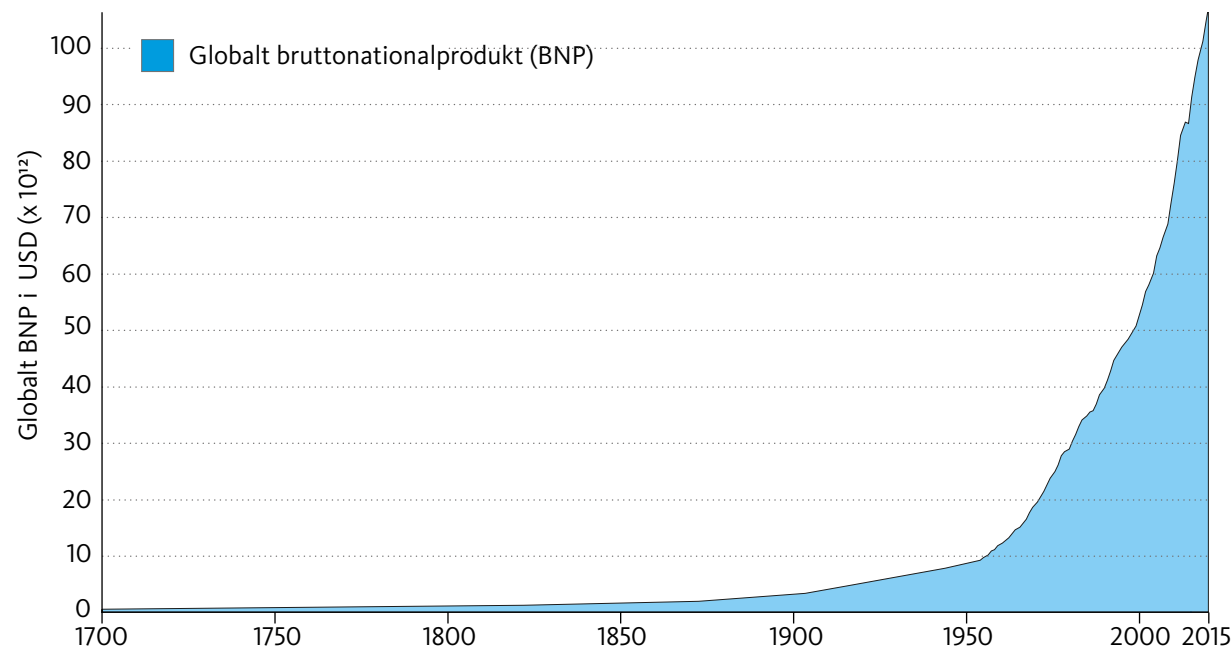
FIGUR 11. Kort med verdens 20 største byer i år 2010 og de forventede i år 2025, 2050, 2075 og 2100. Bemærk hvordan udviklingen går mod at verdens største byer koncentreres i Afrika og Indien/Pakistan. Efter Desjardins (2017).



udviklingen, fordi de på den ene side er økonomiske kraftcentre og på den anden side ofte er økologiske katastrofer. Der er dog stor forskel på de udfordringer, byerne i lande med avancerede økonomier oplever i forhold til de udfordringer, som byerne i de nye fremadstormende økonomier og i udviklingslandene skal forholde sig til. I udviklingslandene er det mest presserende behov for byerne ofte at få bygget en robust infrastruktur, der kan facilitere de mange nye tilflyttere, så fattigdom og slum kan reduceres (jf. Verdensmål 11). I de industrialiserede lande er den primære udfordring at ombygge eksisterende infrastrukturer i takt med, at behovet for bæredygtighed og klimabeskyttelse opstår, samtidig med at livskvaliteten forbedres.

Men uanset hvor urbaniseringen finder sted, følger et øget behov for ny- og ombygning af infrastruktur og bygninger. Det medfører et stigende behov for mineralske råstoffer til bl.a. beton og stål. Denne problematik er kernen i FN's Verdensmål 12.

Byernes behov for energi til transport og produktion betyder, at byerne står for en stor del af kulstofemissionerne. Byerne er



derfor et vigtigt fokusområde, hvis der skal gøres noget ved klimaforandringerne (jf. Verdensmål 13). Udover energibehov har byerne også brug for tilførsel af store mængder af andre naturressourcer (træ, mad, mineralske råstoffer etc.) for at kunne opfylde behovene til produktion og forbrug, og ikke mindst har byerne behov for at kunne komme af med affaldet på en forsvarlig måde (jf. Verdensmål 12). Samtidig med at byerne forbruger store mængder naturressourcer, er de typisk også

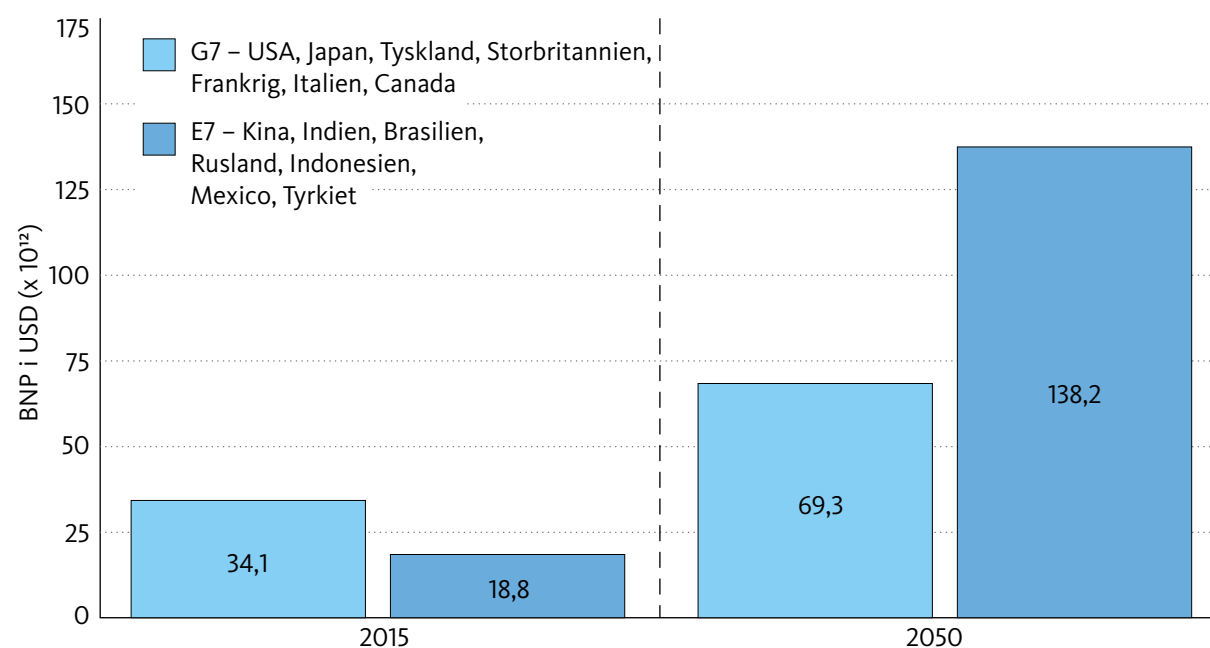
FIGUR 12. Udviklingen i verdens samlede BNP fra 1700 til 2015. Efter Roser (2019).

centre for økonomisk udvikling og innovation og derfor helt nødvendige for at forbedre befolkningernes levevilkår på længere sigt.

Fremtidens smarte byer, hvor informations- og kommunikationsteknologi spiller en central rolle, åbner måske muligheden for en mere bæredygtig fremtid for byområderne. Det, der karakteriserer smarte byer, er, at der er opbygget et netværk mellem byens mange forskellige delsystemer som trafik, energiforsyning, bygninger, produktionsfaciliteter, sundhedspleje etc., som gør det muligt at administrere ressourcer og infrastruktur mere effektivt og uden så stort spild af ressourcer og energi (jf. Verdensmål 9 og 11).

GLOBALISERING OG SKIFTE I ØKONOMISK MAGT

I de seneste årtier har globaliseringen for alvor taget fat og har ført til, at verdens kapitalmarkeder er blevet mere integrerede. Det har tilsyneladende været godt for den samlede økonomi, for fra 1990 til 2008 voksede det globale bruttonationalprodukt (BNP) i gennemsnit med 3,5 % om året (figur 12). I samme periode steg den samlede eksport i verden med gennemsnitligt 8,7 % om året,



mens udenlandske investeringer i gennemsnit steg med 12,4 % om året.

Der er en række forskellige faktorer, som har været med til at øge globaliseringen. Det gælder bl.a. forhold som Sovjetunionens kollaps i 1989, moderniseringen af den kinesiske økonomi og liberaliseringen af de finansielle markeder, som alle har spillet en stor rolle i forhold til at drive globaliseringen fremad.

Udover den øgede velstand i især de indu-

FIGUR 13. Den forventede udvikling i verdensøkonomien fra 2015 til 2050. Bemærk hvordan E7-landene overhaler G7-landene. I 2050 forventes E7 at have dobbelt så stort samlet bruttonationalprodukt som G7. Efter Statista Research Department (2016).

strialiserede lande har globaliseringen også ført til, at balancen i den globale økonomi er skiftet, så lande som Kina, Brasilien og Indien har fået en større andel af verdensmarkedet (figur 13).

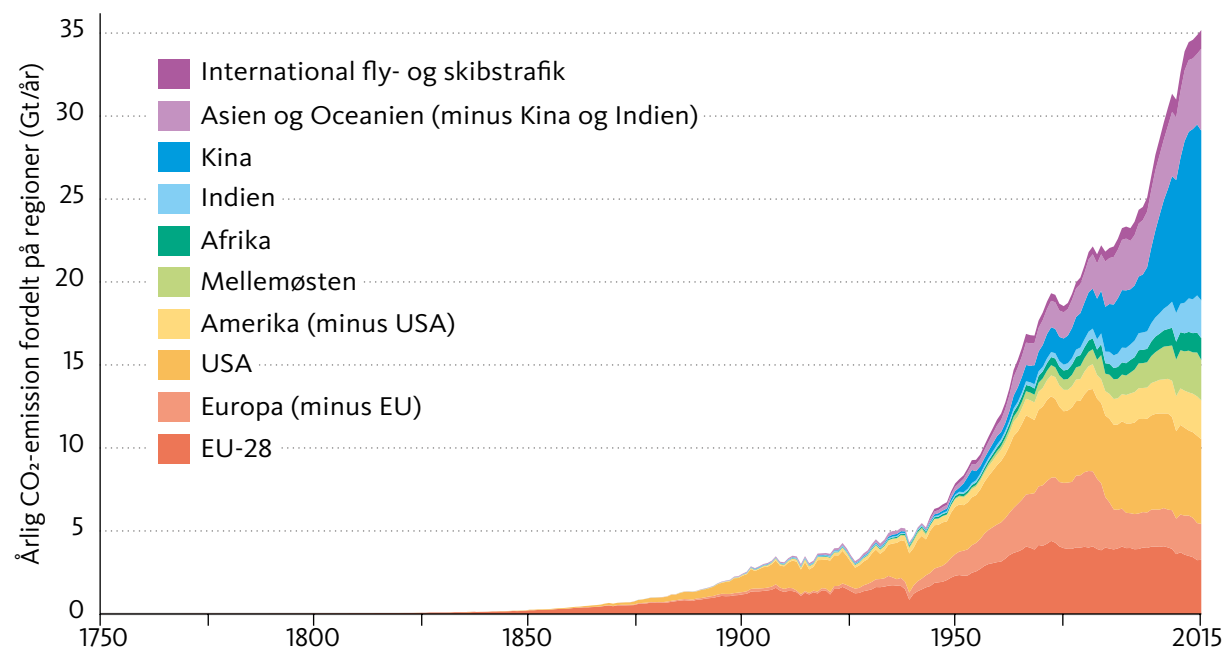
KONSEKVENSERNE

Kombinationen af befolkningstilvækst, herunder en voksende middelklasse, urbanisering og voksende industrialisering, især i vækstlande, øger efterspørgslen på energiråstoffer (fossile brændstoffer og uran) og råstoffer til produktionen (sand og grus til beton, metaller, gødningsråstoffer, cement, biologiske materialer etc.).

Allerede i 2019 forbruges der hvert år over 60 mia. ton råvarer verden over, hvilket svarer til 50 % mere end for tre årtier siden. Der ligger en stor udfordring for verdenssamfundet i at skaffe og forarbejde disse råstoffer i tilstrækkelige mængder og på bæredygtige måder.

KLIMAÆNDRINGER

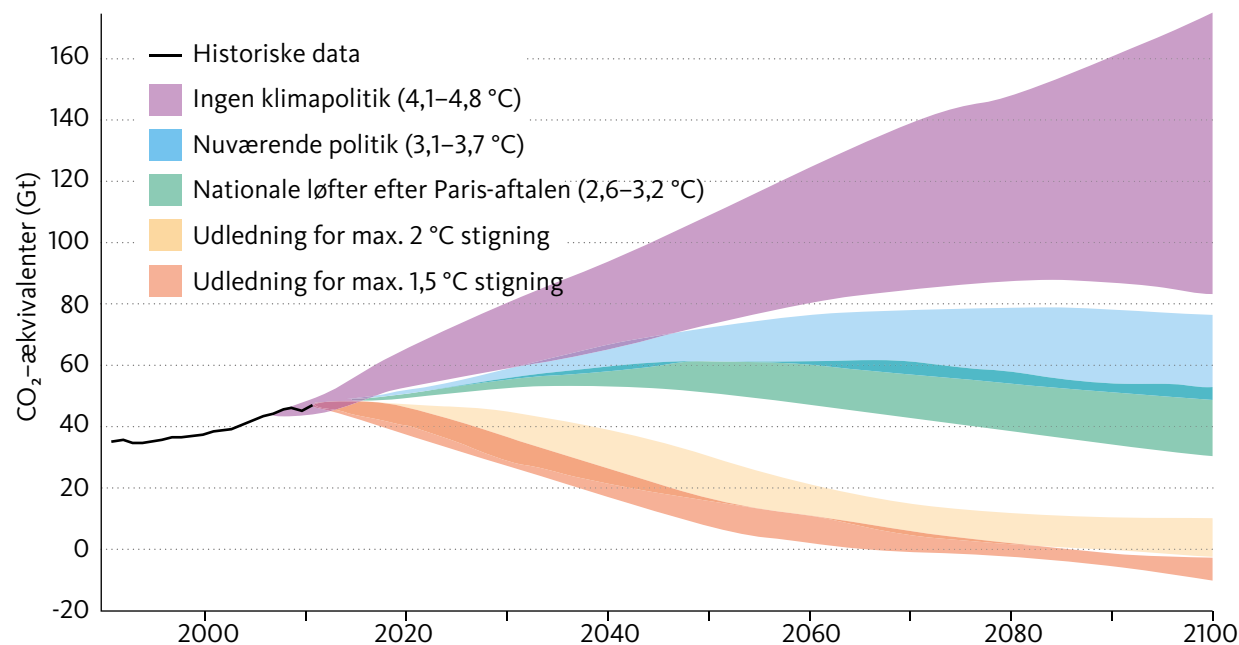
I 2010 satte udledningen af kuldioxid (CO₂) fra afbrændingen af fossile brændstoffer en ny rekord på 30,6 gigaton (figur 14). Hvis



emissionerne af drivhusgasser ikke bringes under kontrol og reduceres, er der blandt klimaforskerne konsensus om, at den globale temperatur kan stige med så meget som 3 til 7 °C i forhold til det førindustrielle niveau, hvilket uden tvivl vil medføre dramatiske ændringer i vores nuværende levevis (figur 15).

En nylig rapport fra FN's klimaråd viser, at en stigning på mere end 2 °C vil udgøre en

FIGUR 14. Udviklingen fra 1750 til 2015 i årlig CO₂-emission fordelt på regioner og international trafik. Efter Ritchie & Roser (2017).



FIGUR 15. Scenarier for den globale temperaturudvikling ved forskellige drivhusgasemissioner frem til 2100.

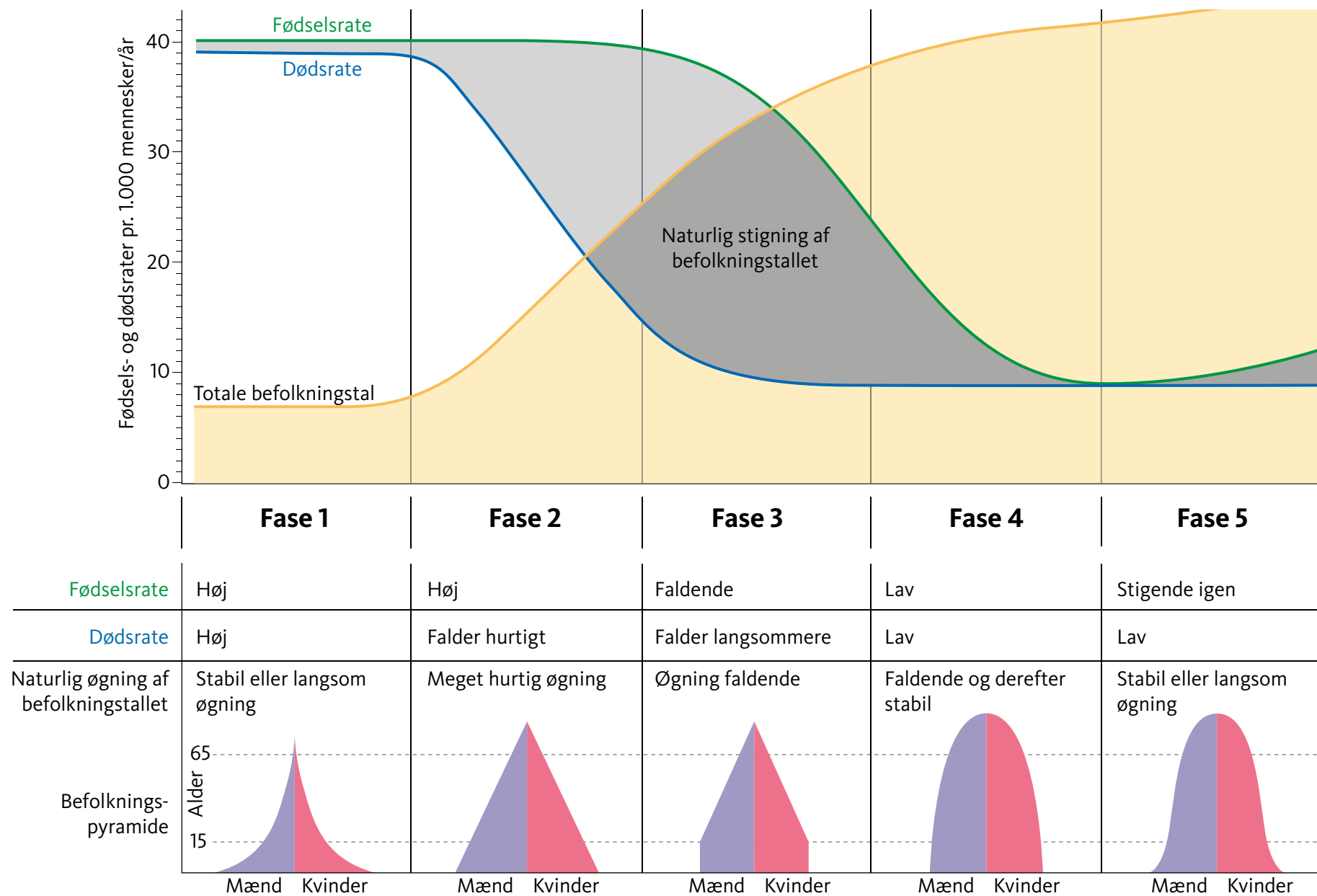
Hvis der ikke skal ske meget drastiske forandringer i vores nuværende levevis, anbefaler FN's seneste klimarapporter, at vi skal sigte mod at nedbringe udledningen af drivhusgasser så vi kommer ned under 2 °C stigning.

Efter Ritchie & Roser (2017).

alvorlig og i nogle tilfælde uforudsigelig trussel mod Jordens økosystemer og dermed menneskets fortsatte eksistens med de livsvilkår, vi er blevet vant til at tage for givet. Havniveauet vil stige og ekstreme vejrforhold som tørke, kraftig regn og nedbør vil blive hyppigere og kraftigere (jf. Verdensmål 13).

For at begrænse stigningen i den gennemsnitlige globale temperatur til 2 °C skal de

globale drivhusgasemissioner reduceres med 50-80 % målt i forhold til gassernes indhold i atmosfæren i 1990. Det kan kun gøres, hvis vi flytter en langt større del af vores energiforbrug over til vedvarende energikilder, hvilket kræver investeringer og innovation i den grønne sektor.

FIGUR 16. Transitionspyramide. Efter Roser (2017).

NØGLEBEGREBER

- Megatrender
- Globale vækstdrivere
- Demografisk udvikling
- Befolkningstal og fremskrivning
- Urbanisering
- Megabyer
- Globalisering
- Økonomisk udvikling
- Klimaændringer

REFERENCER

Büchele, R., Henzelmann, T., Seidemann, S., & Wiedemann, A. (2012). *GreenTech made in Germany 3.0: Environmental Technology Atlas for Germany*. Hentet fra https://www.qual-energia.it/sites/default/files/articolo-doc/greentech_3_0_en_bf.pdf

Desjardins, J. (2017). Animated Map: The 20 Most Populous Cities in the World by 2100. Hentet fra <https://www.visualcapitalist.com/animated-map-worlds-populous-cities-2100/>

Ritchie, H., & Roser, M. (2017). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Hentet fra <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#future-emission-scenarios>

Ritchie, H., & Roser, M. (2019). Urbanization. Hentet fra <https://ourworldindata.org/urbanization>

Roser, M. (2019). Economic Growth. Hentet fra <https://ourworldindata.org/economic-growth>

Roser, M., Ritchie, H., & Ortiz-Ospina, E. (2019). World Population Growth. Hentet fra <https://ourworldindata.org/world-population-growth>

[on-growth](#)

Statista Research Department. (2016, november 30). Aggregate gross domestic product totals for G7 and E7 countries in 2015, and projections for 2050 (in trillion U.S. dollars). Hentet fra <https://www.statista.com/statistics/678707/gdp-of-g7-and-e7-in-2015-and-2050/>



KAPITEL 3

SUSTAINABLE DEVELOPMENT

FIGUR 17. Det får stor betydning for de yngre generationer, at vi forvalter vores naturressourcer på en bæredygtig måde. Her byder en gruppe studerende ind med idéer til bæredygtig udvikling af vores fælles vandressourcer. Fra Shutterstock.

Save Water

BÆREDYGTIGHED OG BÆREDYGTIG UDVIKLING

NATURGRUNDLAGET

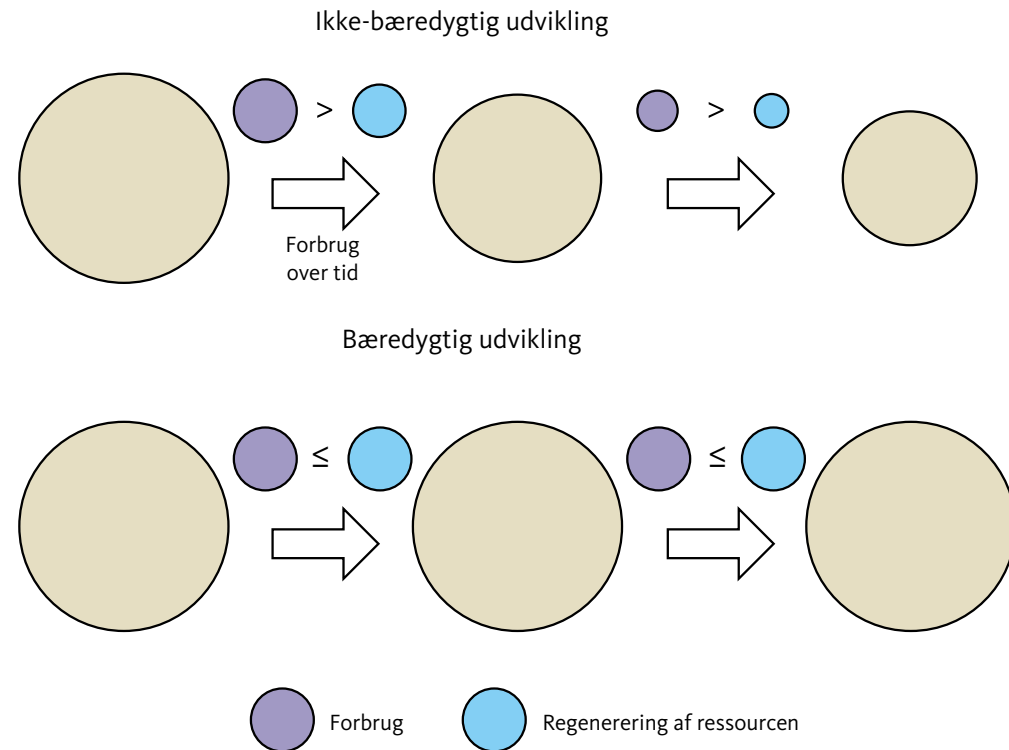
Det moderne menneske lever og eksisterer kun fordi, det forstår at udnytte naturens righoldige ressourcer. Dette naturgrundlag skaber de ydre rammer for al menneskelig aktivitet.

Samspillet mellem mennesker og naturgrundlaget er komplekst, men styres af hvad teknologien formår, hvor stor økonomi der er til rådighed, og hvordan mennesker forstår at forvalte naturressourcen. Ved at forstå dette samspil kan man sikre et fortsat naturgrundlag for fremtidige generationer.

BÆREDYGTIGHED OG BÆREDYGTIG UDVIKLING

Begrebet bæredygtighed opstod i 1960'erne som et udslag af en stigende bekymring for og tiltagende opmærksomhed på verdens stærkt øgede forbrug af naturressourcer og deraf følgende miljøproblemer. I starten var opmærksomheden primært rettet mod den industrialiserede del af verden, men siden blev også udviklingslandenes miljøproblemer synlige i debatten. Det stærkt øgede ressourceforbrug var en følge af den kraftige stigning i økonomisk og teknologisk formåen, især i den industrialiserede del af verden.

Begrebet bæredygtig udvikling, som politisk redskab, slog for alvor igennem i slutningen af 1980'erne med FN's udgivelse af Brundtland-rapporten i 1978. Rapporten, med titlen *Vores Fælles Fremtid*, belyser de udfordringer, som verdenssamfundet stod overfor som følge af den øgede udnyttelse af Jordens naturressourcer og den stigende socioøkonomiske



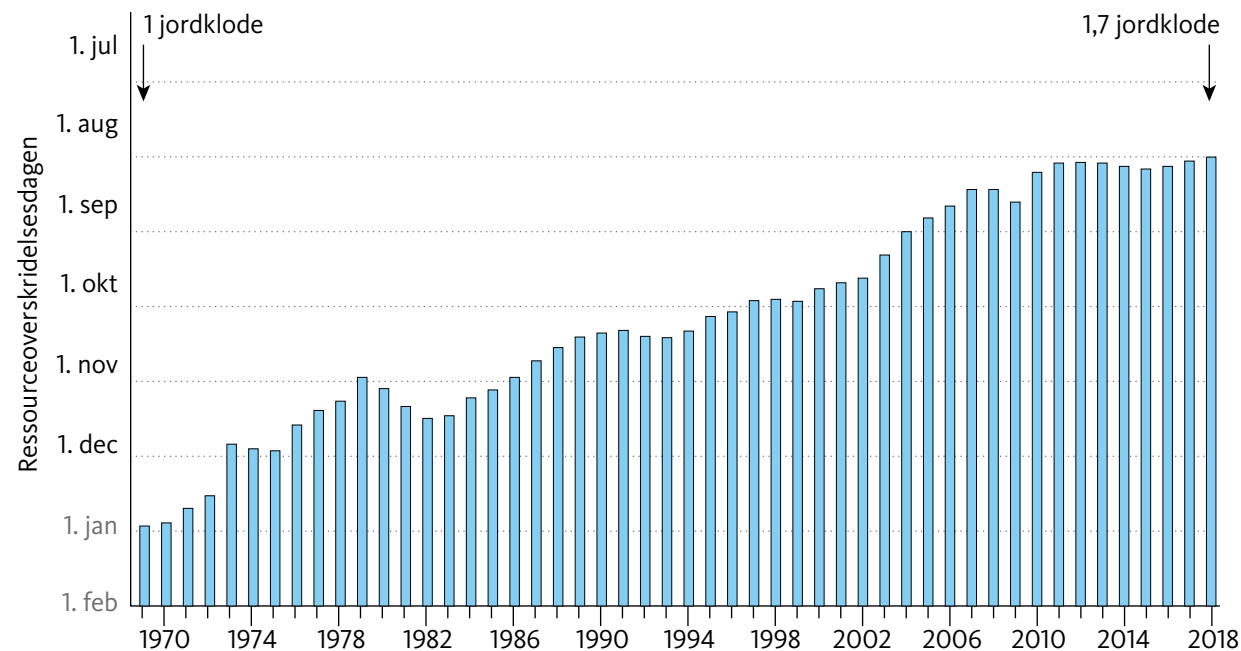
FIGUR 18. Skematisk fremstilling af bæredygtig og ikke-bæredygtig udvikling. Bæredygtighed for mineralske råstoffer er en særlig udfordring. Af MiMa (2019).

forskel mellem de rige vestlige industrinationer og de fattige udviklingslande. Rapporten definerer bæredygtig udvikling som en udvikling, hvor opfyldelsen af nutlevende generationers behov ikke sker på bekostning af fremtidige generationers muligheder for at opfylde deres behov (figur 18).

Bæredygtig udvikling er derfor, når der er en langsigtet balance mellem udnyttelsen og beskyttelsen af vores fælles naturressourcer, så det fælles fremtidige livsgrundlag ikke forringes eller helt ødelægges over tid. Men trods stigende fokus på bæredygtig udvikling siden starten af 1970'erne kræver menneskelig aktivitet alligevel en større del af naturressourcerne, end der bliver gendannet (figur 19).

NATURKAPITAL

Naturkapital er et centralt begreb, der betegner alle de bidrag, som naturen stiller til rådighed for det økonomiske system. Naturkapital kan være begrænsede ressourcer som mineralske råstoffer, fossile brændstoffer, rekreative kyststrækninger eller egnede dyrkningsarealer. Eller det kan være fornybare ressourcer som dyr, planter eller sol-,



vind- og vandenergi. Naturkapital dækker over de ressourcer, som kan bruges direkte i produktionen, og de ressourcer, der først skal forarbejdes, før de er brugbare.

Naturkapital kan groft sagt inddeles i fire grupper: den direkte, den indirekte, den rekreative og den livsunderstøttende naturkapital, alt efter hvordan den indgår i de økonomiske beregninger.

FIGUR 19. En måde at vise udviklingen i verdens samlede forbrug er ved at beregne ressourceoverskridelsesdagen. Det fremgår, at menneskelig aktivitet i 1969 lige akkurat indebar et bæredygtigt forbrug, dvs. at vi kun brugte den mængde ressourcer, som naturligt blev gendannet. Hidtil er udviklingen kun gået i retning af øget ressourceforbrug. I 2018 svarede verdens forbrug til 1,7 jordkloders ressourcer; vores forbrug er altså langt fra bæredygtigt. Efter Earth Overshoot Day (2019).

Direkte naturkapital

Den direkte naturkapital er betegnelsen for de naturressourcer, der umiddelbart kan indgå i produktionen af varer (figur 20. a). Den direkte naturkapital omfatter derfor mineralske råstoffer til industrien, landbrugsjord og fiskebestande til fødevarer, ferskvandsmagasiner til indvinding af vand etc. Det er typisk ressourcer, der er relativt lette at kvantificere økonomisk, fordi de følger markedspriserne og derfor kan omsættes direkte til økonomisk kapital. Af den grund er den direkte naturkapital den type, der traditionelt har haft størst fokus i de økonomiske beregningsmodeller.

Indirekte naturkapital

Den indirekte naturkapital omfatter alle de naturlige processer, der renser og nedbryder restprodukter og affald, som produktionen og forbruget medfører (figur 20. b). Det kan være vådområders evne til at rense spildevand fra byer og landbrugsproduktion, oceanernes evne til at optage en del af de drivhusgasser, som menneskelig aktivitet udleder til atmosfæren, eller jordens evne til at fjerne skadelige stoffer på vej til grundvandet.

FIGUR 20. Forskellige typer af naturkapital.

A. Sandindvinding er en stor forretning og et godt eksempel på direkte naturkapital. Her ved Okinawa, Japan, hvor en flydende platform henter fint kvartssand op fra Stillehavet.

B. Vådområder spiller en stor rolle ved at optage overskydende næringsstoffer fra landbruget og er dermed en vigtig indirekte naturkapital.

C. Amager Strand i København er et storstilet projekt, der har skabt stor rekreativ naturkapital for rigtig mange mennesker.

Fotos fra Shutterstock.



Selvom den indirekte naturkapital er helt essentiel, for at samfundet ikke drukner i sit eget affald, har der traditionelt været mindre fokus på denne kapitaltype i de økonomiske beregninger. Det skyldes, at den indirekte naturkapitals værdiskabelse ofte først ligger efter den egentlige værdiskabende kapital i værdikæden. Der er dog ved at ske et skifte i fokus, så den indirekte naturkapital kommer til at spille en langt større rolle i de økonomiske beregningsmodeller.

Rekreative naturkapital

Den rekreative naturkapital er forbundet med de herlighedsværdier, som naturen giver mennesker i form af øget livskvalitet, levevilkår og sundhed (figur 20. c). De fleste mennesker har stor glæde ved at gå ture i skoven, langs kysten eller andre naturområder, ved at opleve dyr i uspoleret natur eller ved blot at vide, at der stadig findes pandaer og løver i vilde omgivelser, og at regnskoven ikke er fældet helt. Den rekreative naturkapital spiller en afgørende økonomisk rolle for de industrier og forretningsmodeller, der centrerer sig omkring alle former for naturturisme (dykning, safari, vandring etc.). Men den rekreative naturkapital spiller også en

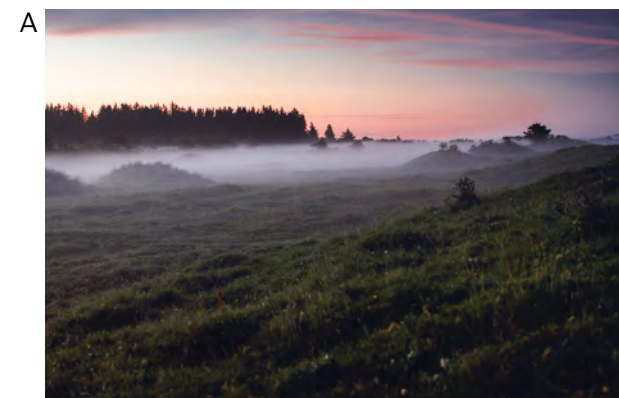
FIGUR 21. Naturkapital og forvaltningen af den.

A. Livsunderstøttende naturkapital. Her som skov og marker.

B. For at gøre plads til palmeolieplantager er der mange steder i Sydøstasien sket en afskovning af regnskoven, hvilket er en forringelse af naturkapitalen, som det vil tage mange hundrede år at rette op på.

C. Skovrejsning er en måde hvor ny naturkapital skabes. Her er der plantet nåletræer i en nedlagt sandmine.

Fotos fra Shutterstock.



rolle på mange andre områder. Huspriserne stiger markant, når ejendommen har havkig eller adgang til skov, boligområder bliver mere attraktive, når de beplantes og naturen flytter ind. Et land er mere attraktivt som feriemål, hvis det har gode naturoplevelser.

Selvom det derfor kan virke indlysende, at der ligger store værdier gemt i form af rekreativ naturkapital, har den, i lighed med den indirekte naturkapital, ofte været udeladt i den traditionelle økonomiske tankegang, fordi den er mere diffus og svær at prissætte og dermed indregne i de økonomiske modeller.

Livsunderstøttende naturkapital

Den livsunderstøttende naturkapital er relateret til de økosystemer, der er helt nødvendige for, at vi som art fortsat har et livsgrundlag (figur 21. a). Det er store og komplekse systemer, hvis fortsatte stabilitet og evne til at vende tilbage til ligevægt har stor betydning, hvis vi mennesker (og mange andre organismer) også i fremtiden skal have en plads på Jorden.

Klimaet er et godt eksempel på en underliggende naturkapital, der gør mennesker i stand til at dyrke jorden, forny ferskvands-

ressourcerne og meget andet, så længe det er stabilt. Den livsunderstøttende naturkapital er om muligt endnu mere diffus end de to forrige, og det har derfor været særdeles vanskeligt at få den inkorporeret i den økonomiske tankegang.

Forringelse og forøgelse af naturkapital

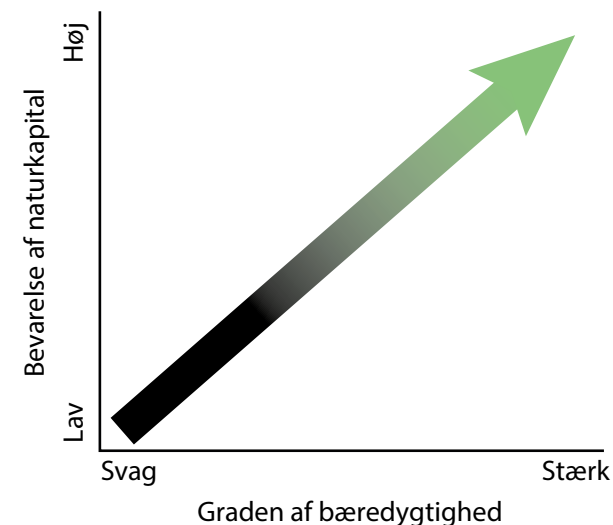
Naturkapital kan forringes eller forøges, alt efter hvordan den forvaltes.

Det er en forringelse, når reserveerne af fossile brændstoffer bruges op, når arter uddør og biodiversiteten falder, når luftforureningen øges i byerne, eller når regnskoven ryddes i troperne (figur 21. b).

Omvendt vil investeringer i skovrejsning, omlægning af landbrugsarealer til natur, genopbygning af fiskebestande ved fredning eller kvoter på drivhusgasudledningen i produktionen øge naturkapitalen (figur 21. c).

At omtale naturen som økonomisk kapital kan for ikke-økonomer måske virke stødende. Men det er helt nødvendigt, at de ydelser, som naturen stiller til rådighed, bliver analyseret og kvantificeret, så de kan indgå i de økonomiske beregninger på lige fod med anden kapital.

FIGUR 22. Graden af bæredygtighed. Af MiMa (2019).



GRADER AF BÆREDYGTIGHED

Bæredygtig udvikling kan gradueres fra svag til stærk bæredygtighed, alt efter hvor meget økonomisk vækst vægtes over for den fortsatte bevarelse af naturkapital (figur 22).

Ved svag bæredygtighed prioriteres, at naturkapital omformes til menneskeskabt kapital. Tankegangen er ikke nødvendigvis et problem, hvis en given naturressource tømmes og et givent økosystem ødelægges, når blot den økonomiske vækst og teknologiske udvikling understøttes i en sådan grad, at fremtidige generationer ikke stilles ringere.

Et eksempel er udnyttelsen af mineralske råstoffer fra store miner. Det er ikke smukt i landskabet, men en sådan brydning anses for svagt bæredygtig, så længe den økonomiske kapital, der opnås ved udvindingen af råstofferne, er lige så værdifuld, som den ødelagte naturkapital. Det betyder derfor, at så længe prisen stiger på det givne råstof, vil brydningen anses for bæredygtig. En risiko ved svag bæredygtighed er derfor, at naturressourcer opbruges helt, fordi det ikke i tide erkendes, at ressourcen ikke erstattes i samme tempo, som den udnyttes.

Ved stærk bæredygtighed må den menneskelige udvikling ikke føre til uoprettelige tab af naturressourcer og dermed forringe naturkapitalen. Der er derfor grænser for, hvor stor nedbrydning af økosystemerne og tab af biodiversitet den økonomiske vækst må medføre. Heraf følger, at regnskabet for økonomisk kapital må holdes adskilt fra naturskabs kapital, fordi de to kapitaltyper ikke kan erstatte hinanden. En naturressource må således ikke udnyttes økonomisk, hvis den ikke umiddelbart er fornybar, enten ved egen kraft eller ved menneskelige tiltag. Med en stærk bæredygtighed kan de mineralske råstoffer, med få undtagelser, ikke udnyttes, da

de netop er karakteriseret ved ikke at være fornybare ressourcer.

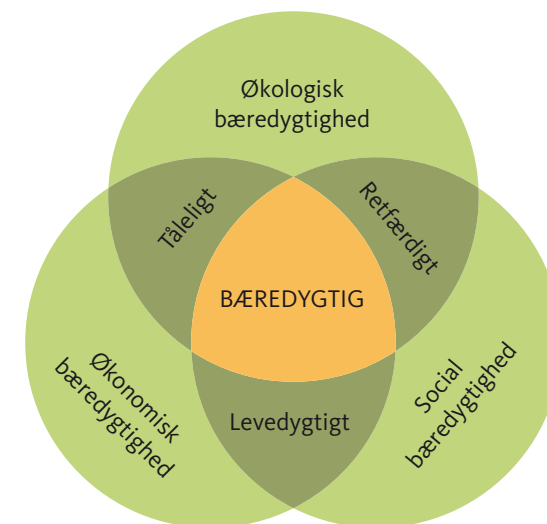
Ved den stærke tilgang til bæredygtig udvikling kan konsekvensen være, at der spændes ben for en ønskværdig samfundsmæssig og økonomisk udvikling, der kan give befolkninger bedre levevilkår og dermed bedre liv. Til gengæld kan man i højere grad være sikker på, at de fremtidige generationer også har adgang til vigtige naturressourcer.

I virkelighedens verden har udviklingen gennem forrige århundrede i overvejende grad lænet sig op ad den svage fortolkning for bæredygtig udvikling, hvis der overhovedet har været tænkt i bæredygtig udvikling. Noget tyder dog på, at en stigende bekymring for fremtiden hos befolkningerne, i lyset af ikke mindst klimaforandringer og miljøforurening, fører til et øget pres for i højere grad at forvalte naturressourcerne ud fra en stærkere tilgang til bæredygtig udvikling end hidtil.

TYPER AF BÆREDYGTIGHED

Bæredygtighedsprincippet kan også anvendes, så fokus ligger på typen frem for graden af bæredygtighed. En hyppigt an-

FIGUR 23. Typer af bæredygtighed. Af MiMa (2019).



vendt model er at inddele ressourcerne i tre typer af bæredygtighed: den økologiske, den økonomiske og den sociale bæredygtighed. De tre typer er adskilte, men hænger alligevel sammen og påvirker hinanden indbyrdes (figur 23).

Økologisk bæredygtighed er, når man ved udviklingen af samfundet tager hensyn til naturgrundlaget, for kun på den måde sikres de nødvendige naturressourcer til samfundets fremtidige produktion.

Økonomisk bæredygtighed har fokus på, at den økonomiske udvikling skal være til

gavn for alle i samfundet, ikke mindst dets fremtidige borgere. Fordeles ressourcerne ikke ligeligt, og kommer der for stor ulighed i samfundet, kan udviklingen ikke opfattes som økonomisk bæredygtig.

Social bæredygtighed sikrer, at den økonomiske udvikling ikke har en social slagside, således at ingen i befolkningen får ringere kår. Det er derfor indlysende, at økonomisk og social bæredygtighed hænger tæt sammen.

Det står klart, at den økologiske bæredygtighed er overordnet de to andre, da det meste af den menneskelige aktivitet er afhængig af et bæredygtigt naturgrundlag for at kunne udvikles. Er der ikke en økologisk bæredygtighed, vil både den økonomiske og dermed den sociale bæredygtighed på et eller andet tidspunkt blive udfordret i takt med, at de tilgængelige ressourcer svinder ind som følge af overforbrug.

GEOGRAFISKE NIVEAUER AF BÆREDYGTIGHED

Både graden og typen af bæredygtighed kan anskues på forskellige geografiske niveauer, fra det lokale over det regionale til det globale, alt efter det fokus og de udfordringer

man har.

Det geografiske niveau er, når udviklingen af en given ressource kan have vidt forskellige udtryk, alt efter hvilket niveau den optræder på. En ressource kan sagtens, på globalt plan, være bæredygtigt udnyttet, simpelt hen fordi den samlede ressource er så stor (fx jern, sand og grus), at den i praksis er udtømmelig. Samtidig kan der regionalt være knaphed på den samme ressource, og den kan derfor ikke udnyttes bæredygtigt. Ligeledes kan en ressource, der lokalt findes i så store mængder, at den er udtømmelig eller fornybar, fx vind i Danmark eller sollys i Sahara, ikke kunne udnyttes bæredygtigt i andre dele af verden og derfor være en mangelvare.

Geografisk bæredygtighed hænger derfor snævert sammen med forsyningskæder, forsyningsikkerhed, ressourceforvaltning og genanvendelse, altså hvordan ressourcer flyttes fra et sted til et andet.

BEREGNING AF BÆREDYGTIG UDVIKLING

Selv med konkrete beskrivelser af begrebet bæredygtig udvikling kan det være svært at vise, om en udvikling er bæredygtig, fordi

den ofte indgår i store uoverskuelige systemer. Det kan derfor også være svært for almindelige mennesker, meningsdannere og lovgivere at forstå, i hvilken retning udviklingen går. For at løse denne problematik er der udviklet forskellige modeller, der gennemskueligt, konkret og kvantificerbart beregner bæredygtig udvikling.

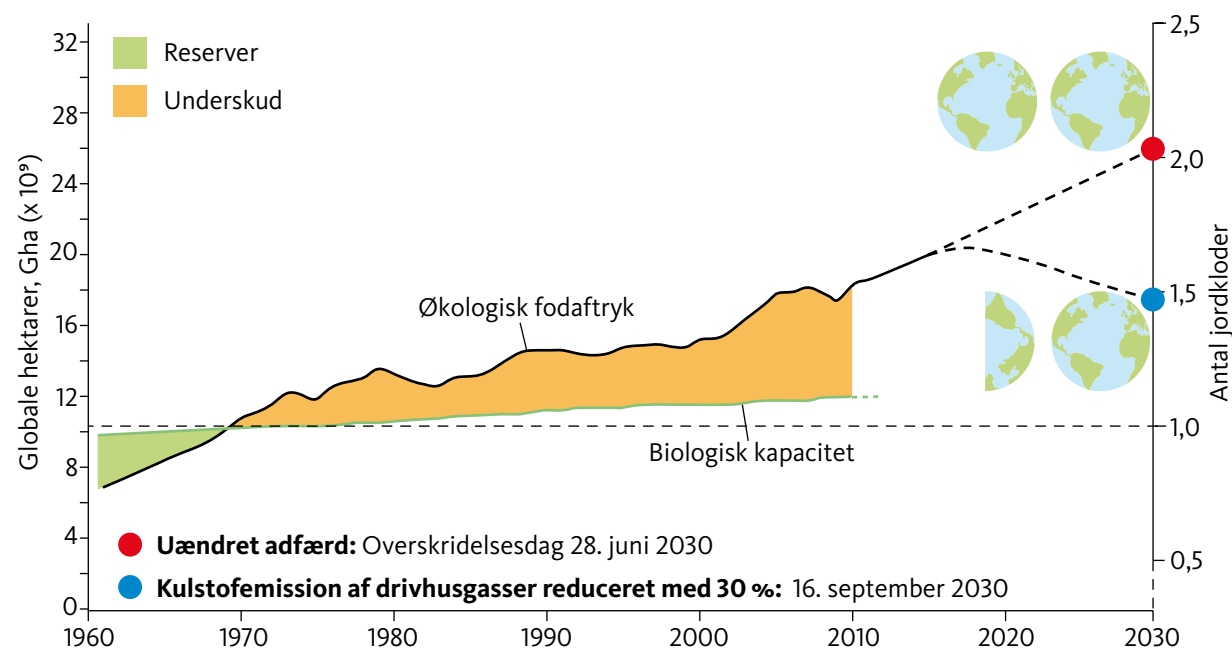
NGO'en Global Footprint Network har specialiseret sig i en model, der beregner den såkaldte ressourceoverskridelsesdag for såvel verden, nationer, virksomheder som enkeltpersoner. Ressourceoverskridelsesdagen viser, på baggrund af det økologiske fodaftryk, i al sin enkelhed, hvornår på året hele årets ressourcemængde er brugt.

Ud fra den model har Global Footprint Network beregnet, at den samlede menneskelige aktivitet i 2018 brugte naturressourcer svarende til 1,7 jordkloder (figur 19) med en forventet stigning i 2030 på over to jordkloder, hvis vores adfærd forbliver uændret (figur 24). Med andre ord viser beregningerne, at menneskehedens nuværende ressourceforbrug ikke er inde i en bæredygtig udvikling.

I 1970'erne lå overskridelsesdagen for ver-

dens samlede ressourceforbrug i slutningen af året, og forbruget var derfor lige akkurat bæredygtigt, mens den i 2018 lå i starten af august samme år (figur 19). Vi bruger altså af den opsparede naturkapital, som vores børn og fremtidige generationer derfor ikke kommer til at have til deres rådighed.

Global Footprint Networks beregning af ressourceoverskridelsesdagen for verdens lande viser en meget stor forskel på landenes naturressourceforbrug (figur 25). Ikke så overraskende ligger de udviklede økonomier højt på listen med Danmark helt i top som nummer seks i 2018 og dermed blandt de mindst bæredygtige lande i verden. Hvis Danmarks ressourceforbrug skulle være bæredygtigt, ville det betyde, at vi som land ikke skulle bruge flere ressourcer fra slutningen af marts måned, eller at vi skulle have ca. fire gange så meget areal til rådighed, end vi faktisk har. I den modsatte ende af listen ligger typisk landene i det Globale Syd, hvis forbrug af naturressourcer stadig er bæredygtigt, og som derfor endnu ikke har en ressourceoverskridelsesdag.



FIGUR 24. På venstre akse ses Jordens samlede biologiske kapacitet (grøn kurve) og det samlede økologiske fodaftryk, som menneskeheden udøver på Jordens samlede ressourcer målt i enheden globale hektarer (gha). Hvor den biologiske kapacitet overstiger det økologiske fodaftryk, er der en reserve at tage af, mens der i den omvendte situation er et underskud. Som det fremgår har der siden slutningen af 1960'erne været underskud, hvilket betyder at menneskeheden samlede ressourceforbrug overstiger, hvad naturen regenererer, hvilket medfører at naturressourcerne reduceres fra år til år.

De stiplede kurver viser den forventede udvikling i det økologiske fodaftryk ved hhv. uændret adfærd (øverst) og ved en reduktion i kulstofemissionen på 30 %.

Højre akse viser hvor mange jordkloders ressourcer menneskeheden samlede ressourceforbrug svarer til. I slutningen af 1960'erne svarede det til 1,0 jordkloder, mens det i 2018 svarede til 1,7 jordkloder. Efter Global Footprint Network (2019) og Lazarus et al. (2015).

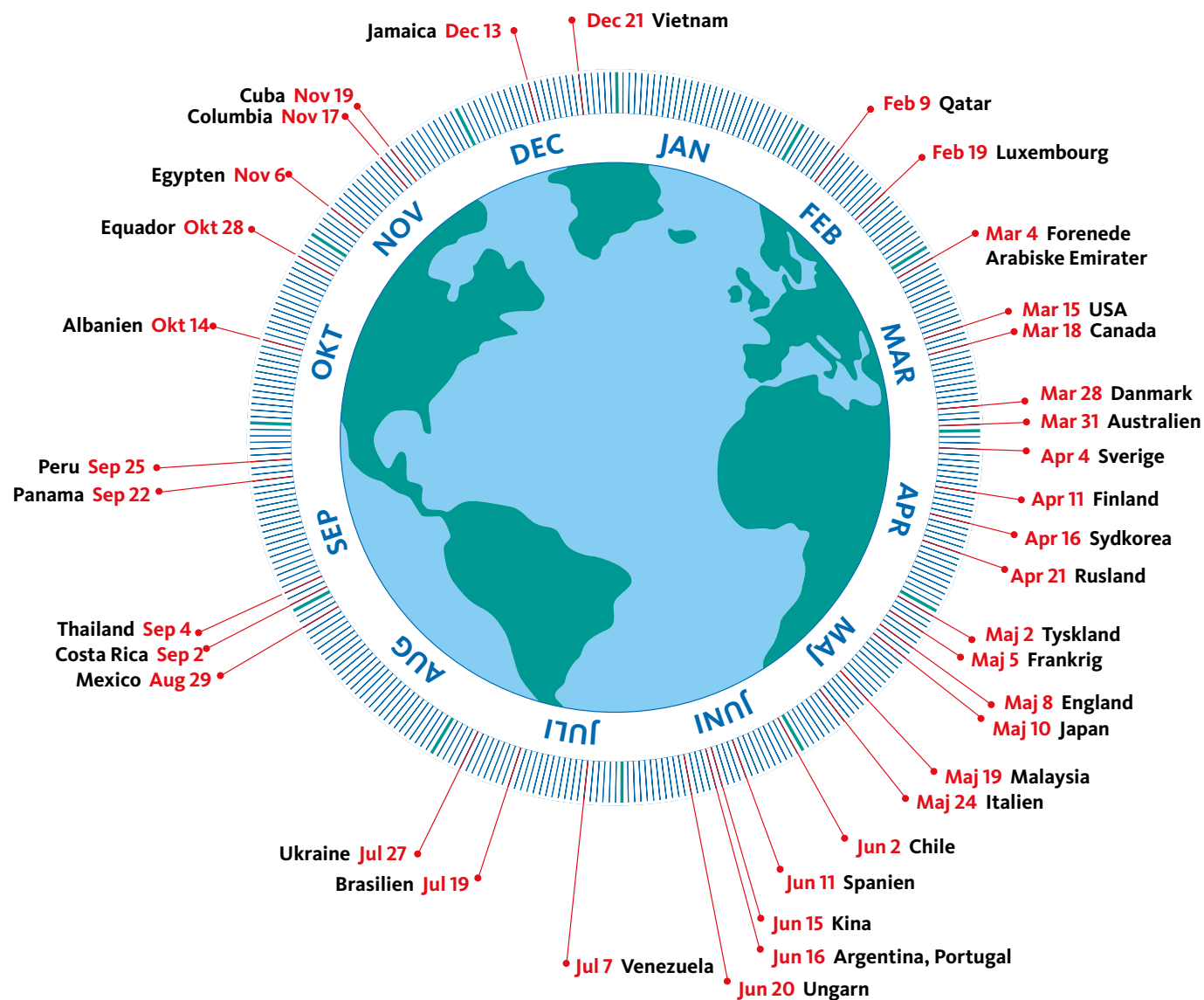
FIGUR 25. Et lands ressourceoverskridelsesdag er den dato, hvor verdens ressourceoverskridelsesdag ville falde, hvis alle i verden konsumerede ressourcer i et omfang, som det pågældende lands gennemsnitsindbygger.

Et land vil kun have en ressourceoverskridelsesdag, hvis det økologiske fodaftryk er større end den globale biokapacitet, og de derfor ikke har en bæredygtig udnyttelse af ressourcerne.

På figuren ses et udvalg af verdens lande, som har en ressourceoverskridelsesdag. Lande der ikke overskrider, optræder selvfølgelig ikke i figuren.

Bemærk, at Danmarks ressourceoverskridelsesdag i 2019 var den 28. marts og dermed helt i toppen af de mest forbrugende land i verden målt pr. indbygger.

Efter Earth Overshoot Day (2019).

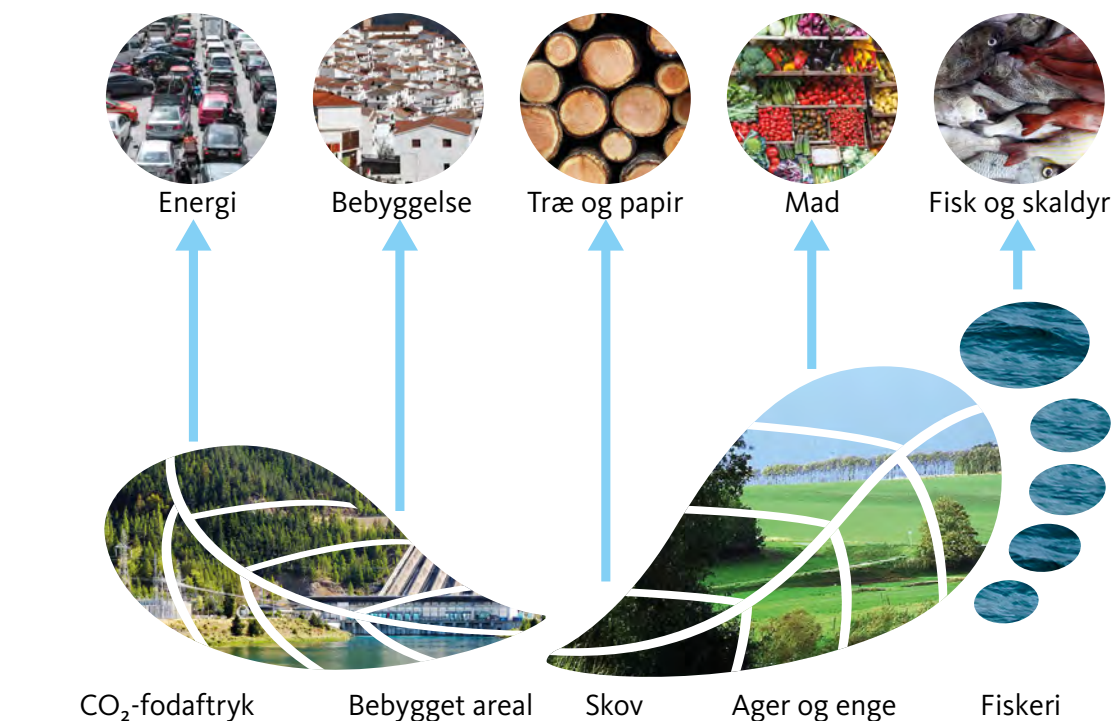


DET ØKOLOGISKE FODAFTRYK

Økologisk fodaftryk er en beregningsmetode, hvor man sammenligner forbruget af naturens fornybare ressourcer med naturens evne til at genskabe selv samme ressourcer (figur 26). Der måles med andre ord på efterspørgslen i forhold til udbuddet af en naturressource. Formålet med at beregne det økologiske fodaftryk er at undersøge, om der er balance i regnskabet, eller om ressourcerne bliver forbrugt hurtigere end de bliver gendannet, altså om forbruget er bæredygtigt.

Forbruget af naturressourcer i produktionen kan kun ske ved, at der lægges beslag på en del af Jordens produktive areal. Det økologiske fodaftryk beregner, hvor stort et areal der kræves for at producere alle de naturressourcer, vi forbruger, og som er nødvendige for at absorbere det affald, som vores forbrug genererer.

Det økologiske fodaftryk for et givent område (fx et land eller en by) angiver derfor størrelsen på det areal, som de mennesker, der lever i området, lægger beslag på i kraft af deres ressourceforbrug, og angives i enheden globale hektarer (gha). Metoden tager



højde for, at de naturressourcer, vi bruger, ikke kun er af lokal oprindelse, men er fordelt ud over hele kloden. Det betyder i praksis, at der i beregningen af det økologiske fodaftryk indgår en hel række mindre arealer spredt over hele jordkloden. Det kan hurtigt blive ganske uoverskueligt at skulle beregne på alle de små områder, men ved hjælp af statistik kan de overordnede ressource- og

FIGUR 26. Oversigt over de enkeltdele der indgår i beregningen af det økologiske fodaftryk. Fodaftrykket er en beregning af, hvor hurtigt vi forbruger ressourcer og genererer affald. Efter Global Footprint Network (2019).

affaldsstrømme spores og det økologiske fodaftryk bestemmes.

Indtil videre har vi kun set på forbruget af ressourcerne. For at kunne se på det samlede regnskab er det nødvendigt at kende naturens egen produktion af fornybare naturressourcer, nemlig biokapaciteten. Biokapaciteten, der ligeledes måles i enheden globale hektarer (gha), afhænger af arealet af biologisk produktive områder, dvs. landbrugsarealer, skove, græsningsarealer og fiskeriområder, men ikke af områder som ørkener, gletsjere og det åbne hav. Det samlede antal globale hektarer var i 2010 ca. 11 mia. gha (figur 24).

Så længe biokapaciteten overstiger det økologiske fodaftryk, er resourceudnyttelsen bæredygtig, mens den ikke er bæredygtig, hvis det modsatte er tilfældet (figur 24). Siden slutningen af 1960'erne har det økologiske fodaftryk oversteget den biologiske kapacitet.

Det økologiske fodaftryk er blevet en af de mest udbredte og anerkendte metoder til at beregne resourceforbrug og bæredygtighed på, og ved at bruge en standardiseret metode bliver data og resultater globalt sam-

menlignelige. Samtidig bliver det nemmere og mere gennemskueligt at opstille fælles mål for udvikling, som eksempelvis FN's verdensmål. Der findes desuden en række hjemmesider, hvor man kan beregne sit personlige økologiske fodaftryk.

NØGLEBEGREBER

- Naturressource
- Ressourceforbrug
- Bæredygtighed
- Bæredygtig udvikling
- Naturressourcer
- Svag og stærk bæredygtighed
- Økologisk, økonomisk og social bæredygtighed
- Økonomisk vækst
- Naturkapital
- Teknologisk udvikling
- Mineralske råstoffer
- Ressourceforvaltning
- Ressourceoverskridelsesdag
- Det økologiske fodaftryk

- Bæredygtigt forbrug
- Globale hektarer
- Biokapacitet

REFERENCER

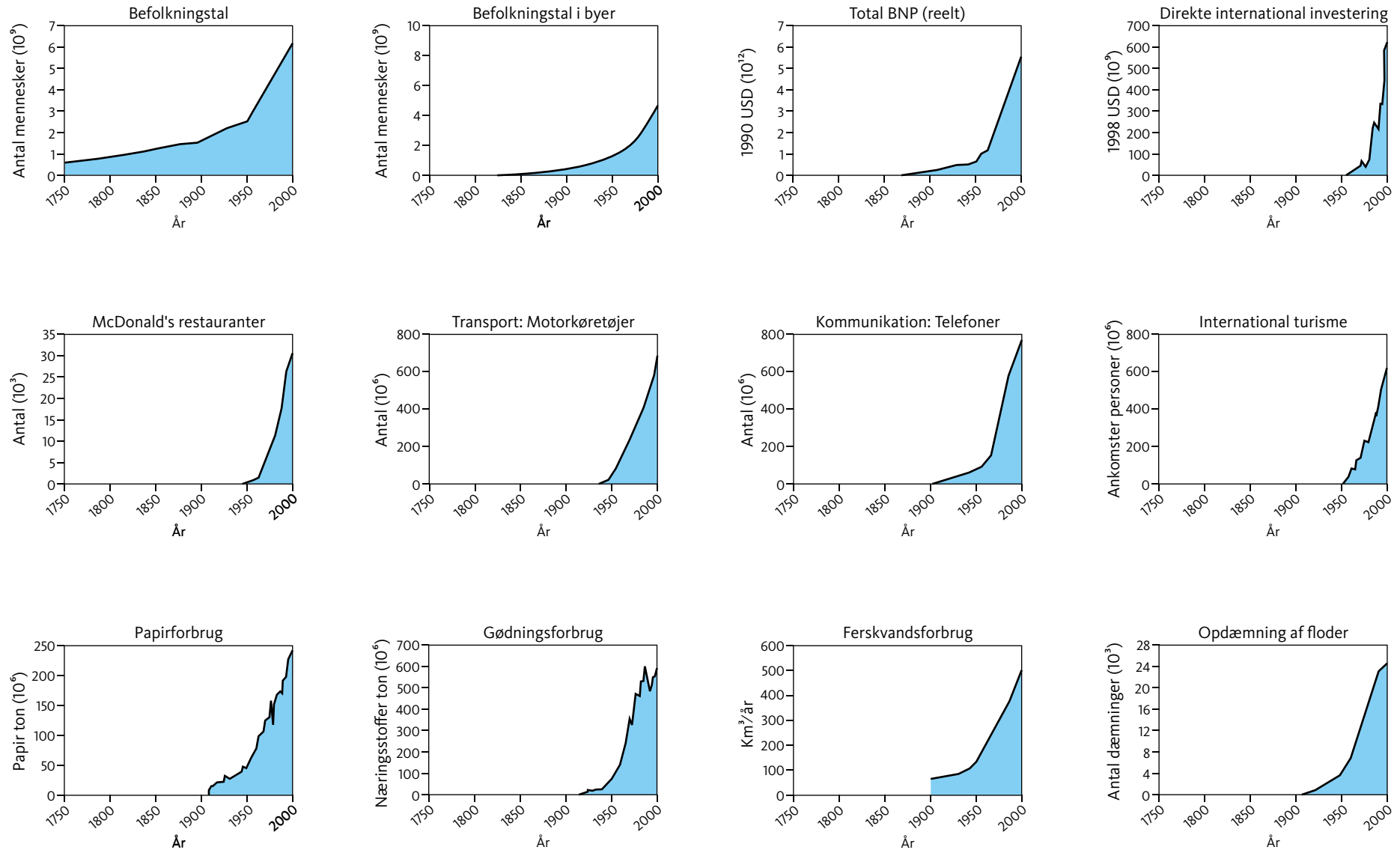
Earth Overshoot Day. (2019). Infographics. Hentet fra <https://www.overshootday.org/newsroom/infographics/>

Global Footprint Network. (2019). Ecological Footprint. Hentet fra <https://www.footprint-network.org/our-work/ecological-footprint/>

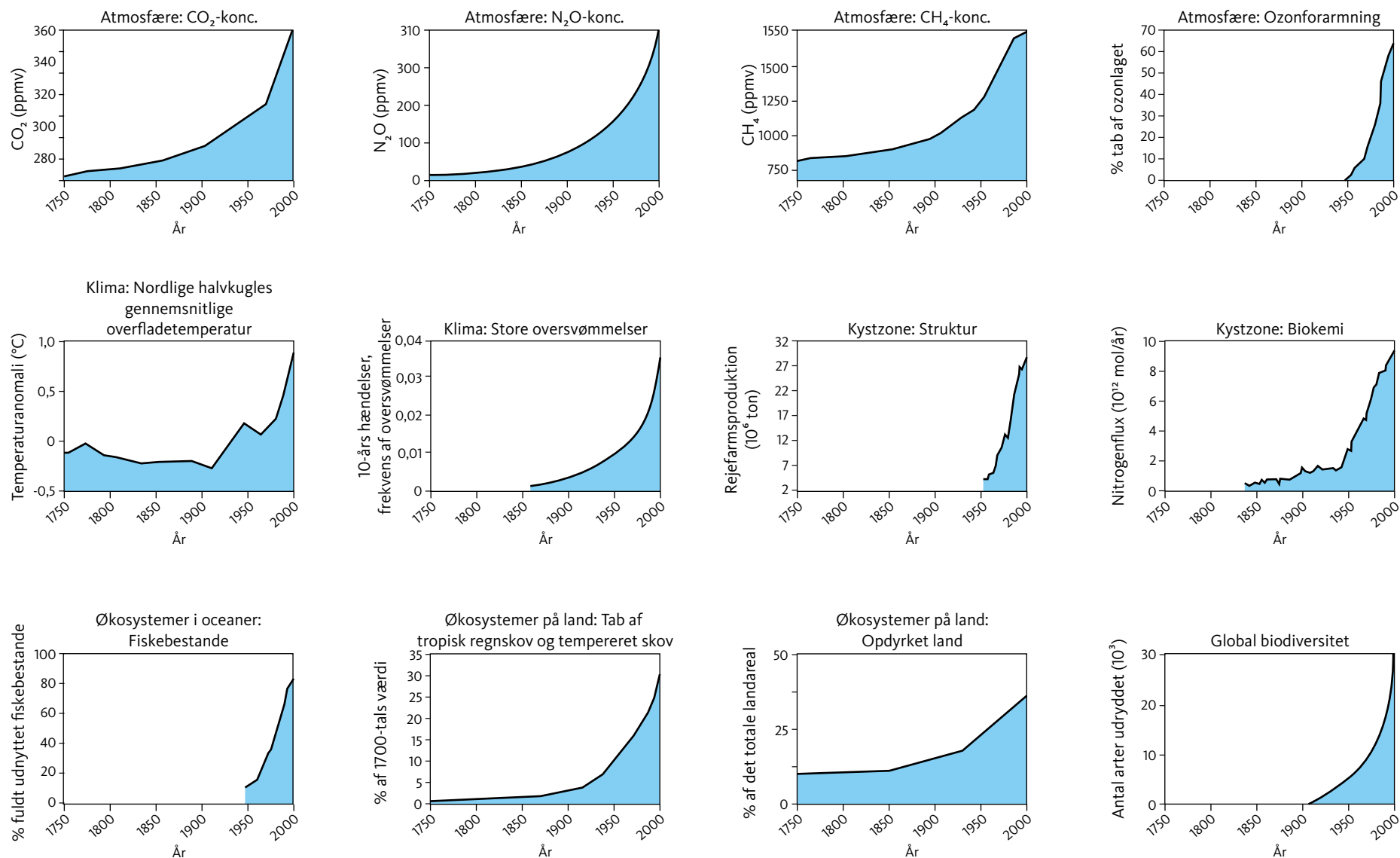
Lazarus, E., Lin, D., Martindill, J., Hardiman, J., Pitney, L., & Galli, A. (2015). Biodiversity Loss and the Ecological Footprint of Trade. *Diversity*, 7(2), 170–191.

Steffen, W., Persson, A., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., ... Svedin, U. (2011). The anthropocene: from global change to planetary stewardship. *Ambio*, 40(7), 739–761.

FIGUR 27. Den stigende rate i menneskelig aktivitet fra starten af den industrielle revolution til årtusindskiftet. Bemærk den signifikante ændring i raten efter 1950 der illustrerer, hvordan udviklingen i perioden 1950-2000 har været dramatisk og ikke før set i menneskets historie. Modificeret efter Steffen et al. (2011).



FIGUR 28. Ændringer på global skala i jordsystemet fra 1750 til 2000, som konsekvens af den dramatiske ændring i menneskelig aktivitet i perioden. Bemærk især de store ændringer der har fundet sted siden 1950. Modificeret efter Steffen et al. (2011).



KAPITEL 4



FIGUR 29. Teorien om fællesskabets tragedie kan ses i praksis på de balinesiske strande, hvor verdens uregulerede forbrug af især plastik skyller op. Shutterstock.

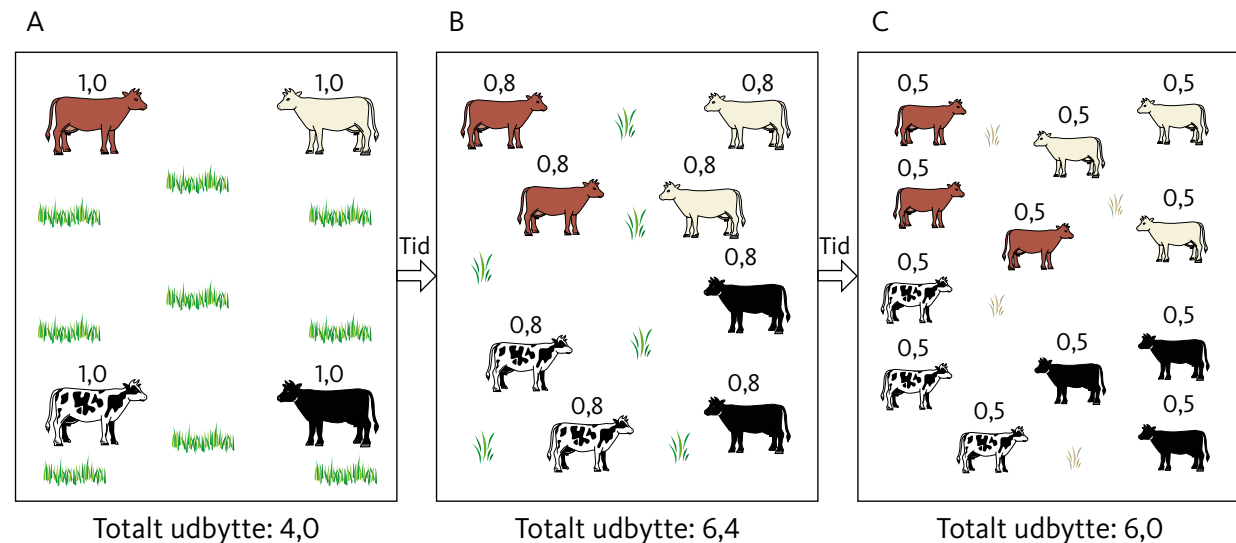
FÆLLESSKABETS TRAGEDIE

TEORIEN OM FÆLLESSKABETS TRAGEDIE

Begrebet fællesskabets tragedie stammer oprindeligt fra samfundsvidenskaben og beskriver, hvordan en given ressource uundgåeligt vil blive overudnyttet, hvis uafhængige parter har lige adgang til ressourcen, uden at det er aftalt, hvordan den kan forvaltes.

Fænomenet blev første gang beskrevet i 1833 af William Forster Lloyd, som forklaring på de observationer han gjorde af kvæggræsning på de fælles græsningsarealer. I de engelske landsbysamfund var det på Lloyds tid normalt, at en landsbys kvæghyrder delte et fælles græsningsområde, hvor alle havde ret til at lade deres kreaturer græsse. Lloyds observationer var, at kvæg, der voksede op på fællesarealerne, generelt var mindre velnærede og sunde end tilsvarende kvæg, der afgræssede private lodder (figur 30).

Lloyds forklaring på dette fænomen var, at det på de fælles græsningsarealer var naturligt for den enkelte hyrde at forsøge at optimere eget udbytte af græsningsarealets ressourcer. Den mest rationelle måde for hyrden at øge udbyttet på er ved at tilføje et ekstra kreatur til fællesarealet, for på den



FIGUR 30. Fællesskabets tragedie illustreret med kvæg på et fælles græsningsareal over tid. I eksemplet er der fire hyrder med hver deres farve kvæg. Forklares fra venstre mod højre.

A. En situation hvor fællesarealet udnyttes bæredygtigt, og alle aktørerne får det maksimale udbytte pr. kreatur (1,0), hvilket giver et samlet udbytte for arealet på 4,0.

B. En situation hvor hyrderne hver især begynder at optimere deres eget udbytte ved, at de hver især har introduceret et ekstra kreatur. Det medfører, at den fælles ressource sættes under pres, hvilket giver et mindre udbytte pr. kreatur (0,8). Hver hyrdes samlede udbytte er steget til 1,6, mens det samlede udbytte er steget til 6,4. Spørgsmålet er, om det er en bæredygtig udvikling?

C. En situation hvor der sker en yderligere profitoptimering ved, at aktørerne har tilføjet yderligere et kreatur hver. Ressourcen er nu for alvor sat under pres, og hvert kreatur giver kun et udbytte på det halve af det optimale (0,5). Hver hyrdes samlede udbytte er faldet til 1,5, mens det samlede udbytte er faldet (6,0) i forhold til forrige situation. Fællesarealet er tydeligvis ikke inde i en bæredygtig udvikling og vil på sigt måske blive helt udtømt og ikke til at udnytte. Desværre viser regnskabet også, at hver enkelt hyrde ikke vil få noget ud af at reducere sin bestand, medmindre de andre hyrder gør det samme. Det er fællesskabets tragedie.

Efter Hanson (2008).

måde at opnå den økonomiske fordel et ekstra kreatur medfører (mere mælk, kød etc.). Da de negative effekter af et ekstra kreatur på fællesskabets arealer (mindre mælk og kød pr. kreatur) deles ligeligt mellem alle kreaturerne og dermed alle hyrderne, bliver ulempen for hyrden, der tilføjer endnu et kreatur, mindre end fordelene. Med andre ord bliver tabet for den enkelte hyrde samlet set mindre end udbyttet ved at tilføje et ekstra kreatur til fællesskabets mark.

For den rationelle hyrde vil det eneste fornuftige derfor være at sætte et ekstra kreatur ud på fællesskabets græsningsareal, og endnu et og endnu et, hvilket selvfølgelig også gælder for de andre hyrder, der har adgang til det fælles græsningsareal.

Heri ligger fællesskabets tragedie gemt. Alle hyrderne agerer i et system, der tvinger dem til grænseløst at øge antallet af kreaturer i en virkelighed, hvor ressourcerne tydeligvis er begrænsede. Konsekvensen af dette system er, at der uundgåeligt opstår en situation på fællesarealerne, hvor ressourcerne udtømmes, og udnyttelsen ikke bliver bæredygtig.

I modsætning hertil vil der på privatejede

jorde være incitament til ikke at overudnytte græsningsarealet, netop fordi ejeren har en personlig fordel ved ikke at øge græsningsstrykket ud over det bæredygtige, så han også på længere sigt har mulighed for at benytte arealerne til græsning.

TEORIEN GENOPDAGES

På Lloyds tid medførte den naturlige reduktion af hyrder og kreaturer som følge af krige, naturkatastrofer, sygdomme, høj dødelighed, lave befolkningstal etc., at systemet samlet set fungerede relativt fornuftigt, eller bæredygtigt om man vil. Men hvad sker der, når de gode levevilkår, tilgængeligheden af medicin og social stabilitet reducerer det naturlige frafald?

Teorien om fællesskabets tragedie levede et relativt stille liv indtil økolog og filosof Garrett Hardin i 1968 diskuterede og eksemplificerede teorien i artiklen *The tragedy of the commons*, bl.a. med Lloyds eksempel på fælles græsningsarealer. Hardin fokuserede i sit forfatterskab især på overbefolkning som den store udfordring i forhold til bæredygtig udnyttelse af de fælles naturressourcer og på, at den moderne velfærdsstat tillader, at

fællesskabets ressourcer overudnyttes.

Siden er teorien brugt til at beskrive en lang række katastrofale eksempler på, når fællesskabets ressourcer ikke har været underlagt bæredygtig regulering og forvaltning. Det gælder ikke mindst de følgende udfordringer, som hører til blandt vores største udfordringer nu og i den kommende tid.

Emissionen af drivhusgasser til vores fælles atmosfære er kommet på dagsordenen med den stigende bevidsthed om accelererende klimaforandringer og den betydning, det kommer til at have på vores samfund og livskvalitet. Der er forsøgt at lave fælles internationale reguleringer, men indtil nu med begrænset held.

Erkendelsen af at den massive udnyttelse af havenes fiskebestande har ført til kollaps af fiskeriet mange steder i verden, også i Danmark. Det har været svært at få implementeret og opretholdt lovgivning, der skulle sikre en bæredygtig udnyttelse af fiskebestandene, fordi alle lande beskytter deres eget fiskerierhverv.

Den massive fældning og afbrænding af verdens skove til produktion af tømmer,

brændsel og frigørelse af græsningsarealer til fx kvægdrift har ført til udledning af drivhusgasser, forringelse af biodiversitet og forarmning af jorden.

Pesticider og kunstgødning har ført til forurening af de fælles grundvandsressourcer, ødelæggelse af vandløb, søer og havmiljøer, ofte i en sådan grad at det har ført til uoprettelig skade på ressourcen, på det omgivende miljø og dermed umuliggjort fortsat menneskelig udnyttelse af ressourcen.

KRITIK AF TEORIEN

Trods de mange eksempler på teoriens styrke til at beskrive virkeligheden har den haft en del kritikere gennem årene.

Elinor Ostrom har gennem empiriske studier påvist, at teorien ikke er så universel, som Hardin opfattede den. Ostroms empiri fra mindre grupper af mennesker har vist, at der ofte opstår en fælles forståelse i gruppen for, at en given fælles ressource udnyttes bæredygtigt. Det vil sige, at ved fælles normer og regelsæt mod overudnyttelse kan det pågældende samfund bestå. Der er eksempler på fiskere, der indbyrdes aftaler kun at fiske en bestemt andel af bestanden (svarende

til kvoter), så den kan udnyttes bæredygtigt gennem mange generationer. Ligeledes er der eksempler på bønder i regnskoven, der ved hjælp af aftaler om braklægning af områder, sørger for at skoven regenererer tilstrækkeligt, til at bæredygtigt landbrug kan fungere.

Forudsætningen for bæredygtig udnyttelse og dermed afværgelse af fællesskabets tragedie er, at der er enighed om forvaltningen af ressourcen koblet med effektive sanktioner, hvis enkeltindivider ikke følger de vedtagne regler. I praksis kræver det derfor, at der er tale om relativt få mennesker, der udnytter ressourcen, dvs. at alle kender alle, og alle tager et ansvar. Alternativt skal der være en stærk centralmagt, der kontrollerer ressourcen og har mulighed for at gennemtrumfe en bæredygtig forvaltning.

NØGLEBEGREBER

- Fællesskabets tragedie
- Bæredygtig forvaltning
- Økonomisk optimering
- Rationel adfærd
- Positiv effekt
- Negativ effekt
- Udbyttegevinst
- Udbyttetab
- Ressourceudtømning
- Regulering
- Egennyttig udnyttelse
- Fælles bæredygtig forvaltning

REFERENCER

Hanson, N. (2008). Does fish health matter? The utility of biomarkers in fish for environmental assessment. *Göteborgs Universitet. Naturvetenskapliga Fakulteten.*

KAPITEL 5



FIGUR 31. Åben minedrift. Her en jernmine med maskiner som bryder malmen, og lastbiler som kører malmen op til knuseværket. Shutterstock.

MINERALSKE RESSOURCER OG RESERVER

MINERALRESSOURCER – EN DEL AF NATURRESSOURCERNE

Naturressourcerne består af både de biologiske ressourcer som planter, dyr, luft og jord og af de mineralske råstoffer, som omfatter mineraler, bjergarter, olie, gas og vand. I det følgende beskæftiger vi os kun med de mineralske råstoffer og endda kun den del, som består af mineraler og bjergarter. Denne gruppe adskiller sig fra de biologiske ressourcegrupper ved, at de ikke kan fornyes inden for overskuelig tid, da det tager millioner af år at skabe dem. Ressourcerne er skabt i det geologiske kredsløb, hvor de har indgået i store tektoniske omplaceringer, er smeltet eller forvitret, måske har de dannet nye bjergarter, som millioner af år senere også er forvitret eller opsmeltet på vej ned i subduktionszonerne for herefter at indgå i nye kredsløb. Der findes enkelte undtagelser fra disse langsomme forløb; det er udfældning af mineraler i form af salte fra havvand, der kan ske i løbet af ganske få uger.

DEFINITIONER PÅ MINERALRESSOURCER OG -RESERVER

Begrebet mineralressource kan bruges helt

generelt som betegnelse for fx en granit, sandsten eller skifer, som måske kan bruges til et eller andet ikke nærmere angivet. Men geologer bruger begrebet (mineral)ressource om den mængde af et givent råstof, som de estimerer findes nede i jorden, i nogle tilfælde flere kilometer nede. Begrebet reserve skal opfylde to hovedkrav:

- Geologerne har undersøgt forekomsten så godt, at de med stor sikkerhed kender mængden og kvaliteten; dette er typisk informationer fra geofysiske undersøgelser i området og huller boret i fjeldet, som giver dem vished for forekomstens rumlige udstrækning og metalindhold.
- Det er også et krav, at mineingeniørerne har fundet tekniske metoder til at bryde malmen på en måde, så det er rentabelt. Med andre ord er reserver den del af ressourcen, der kan danne grundlag for minedrift.

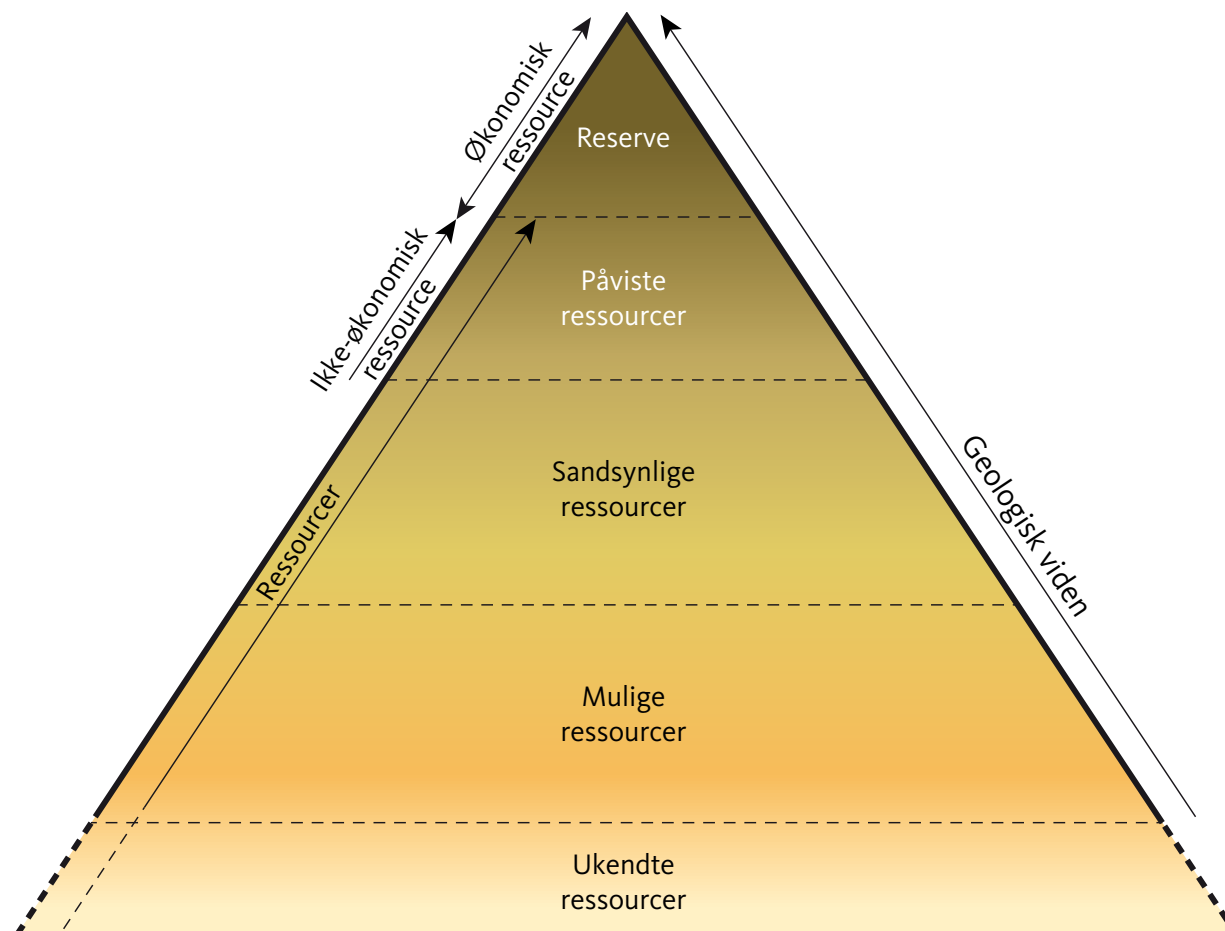
Reserven er altså en delmængde af ressourcerne, men det er ikke alle ressourcer der også har en reserve. Reserver og ressourcer kan vises i et trekantsdiagram, hvor de sikkert bestemte reserver er en lille del i toppen af figuren (figur 32). Ressourcerne

opdeles i forskellige typer i forhold til den viden man har om dem; dem der er mindst viden om er den store gruppe i den nederste del af diagrammet. Ingen ved, hvor bunden i diagrammet skal sættes, fordi mængden af ressourcer er ukendt. De mulige ressourcer er den gruppe, som geologerne antager findes, fordi de kender de geologiske miljøer og har erfaringer med, hvilke råstoffer der ofte er knyttet til de forskellige miljøer.

Et eksempel på mulige ressourcer kunne være viden om, at bestemte bjergarter i Andesbjergene indeholder kobbermineraler. Geologer vil så antage, at hvis et andet område har et tilsvarende geologisk miljø og har de samme bjergarter, så indeholder dette område muligvis også kobbermineraliseringer. Hvis geologiske prøver bekræfter, at der er mere end en vis mængde kobber i bjergarterne, så vil man benævne forekomsten som en sandsynlig ressource.

Hvis geologer vælger at undersøge en sandsynlig ressource yderligere, vil de ofte starte med at bore huller i undergrunden og tage prøver af de bjergarter og mineraler, der gemmer sig under overfladen. Hvis de finder det efterforskede mineral i mange af bore-

FIGUR 32. Mineralske ressourcer opdeles på grundlag af, hvor dybtgående kendskab man har til dem, fx gennem geologisk kortlægning og/eller mineselskabers efterforskning. Reserve, der er den type ressource, som allerede bliver udnyttet i en mine eller en grusgrav, udgør kun en forsvindende del af de samlede ressourcer. Reserven er dynamisk og kan øges på basis af efterforskning, teknologisk udvikling og/eller stigning i pris på grund af øget efterspørgsel. For gruppen af påviste ressourcer har man kendskab til mængder og kvaliteter, og man har beregnet, at det ikke på et givent tidspunkt vil være økonomisk rentabelt eller teknisk muligt at udvinde råstoffet. Af MiMa (2019).



prøverne, vil man benævne ressourcen som påvist. Nu ved det mineselskab, som geologerne arbejder for, at der er interessante ressourcer i området, som måske en dag kan

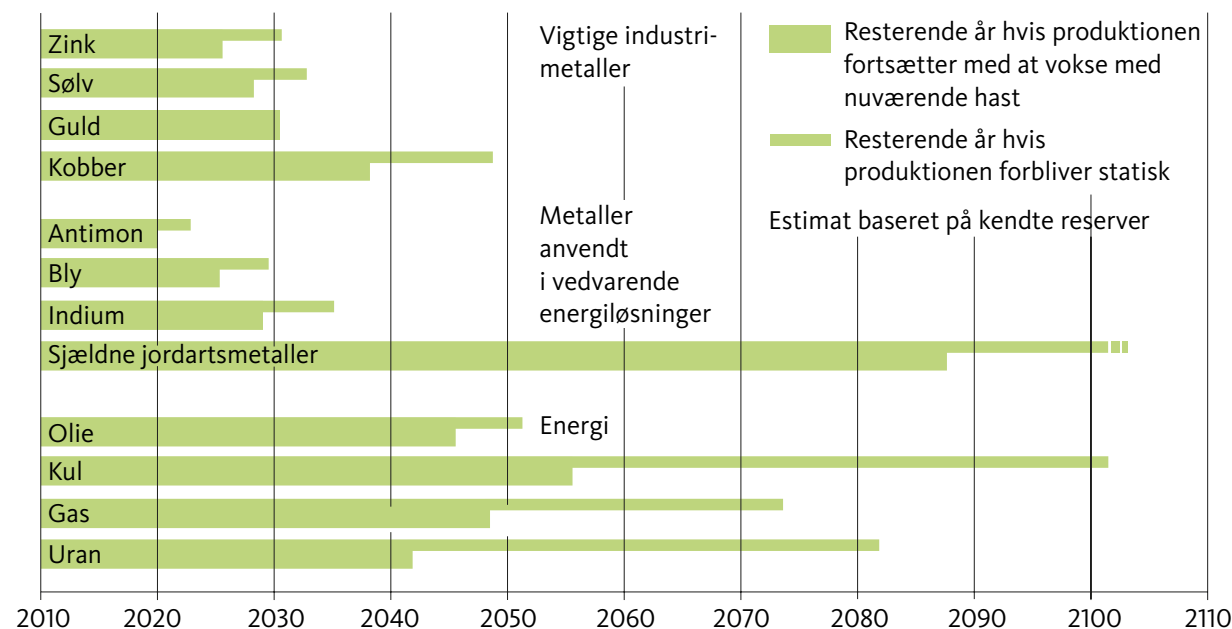
blive til en mine. Men der er lang vej endnu i forhold til, om en påvist ressource er af tilstrækkelig kvalitet til, at den kan flyttes til klassen af reserver, som der er langt større

sandsynlighed for en dag bliver til en mine. Da definitionen for en reserve ikke kun er baseret på geologisk viden, men også på at

det skal være økonomisk rentabelt at udnytte mineralet til minedrift, påvirker råstoffets markedspriser hvilke dele af en mineralforekomst, der kan indgå i reserven. Hvis priserne stiger, kan det måske betale sig at bryde de påviste ressourcer, som dermed flytter fra klassen af påvist ressource til reserve. Omvendt kan det ske, at priserne falder, og reserven må omklassificeres til påviste ressourcer. Men det er ikke kun priserne for råstoffer, der kan påvirke rentabiliteten. Ny teknologi kan også medvirke til, at en påvist ressource bliver til reserver, hvis teknologien gør det muligt at bryde og behandle malmen billigere.

RÅSTOFFER TIL DE FREMTIDIGE GENERATIONER

I lande, der har minedrift, laves der hvert år nationale opgørelser over landets reserver og påviste ressourcer for hvert enkelt råstof. Disse globale statistikker bliver brugt til at vurdere de globale ændringer af reserverne. Opgørelserne kan fx findes i *USGS Mineral Commodity Summaries*. Det er af gode grunde ikke muligt at lave vurderinger af, hvor store de to klasser mulige og kendte ressourcer er.



Det viser sig, at for mange råstoffer er de globale reserver nogenlunde de samme over tid, trods det faktum at der bliver udvundet mere og mere. Der er flere forklaringer på dette fænomen, men vigtigst er, at mineselskaberne hele tiden leder efter ny malm, som erstatning for den de har taget ud. Hvis ikke de gør det, vil deres forretningsgrundlag forsvinde. Omvendt afpasser mineselskaberne deres efterforskning, så de ikke bruger penge på at finde malm, som de først kan

FIGUR 33. Hvor mange mineralske ressourcer er der tilbage? Dette spørgsmål er der ikke geologisk grundlag for at besvare. Nogle forsøger sig alligevel. I det viste eksempel er kun reserverne vurderet, og der er set bort fra, at mineselskabernes undersøgelser kan flytte ressourcer op til reserver. Generelt skal man være forsigtig med at tolke på fremstillinger som denne, fordi mange vigtige forhold ikke er medtaget, og de bliver derfor mere gætværk end reelle prognoser. Efter Desjardins (2014).

indvinde i en fjern fremtid, og som de måske ikke selv kan være sikre på at få glæde af. Derfor er det kun en meget lille del af Jordens overflade, der er efterforsket. Mængden af ukendte ressourcer, som skal danne grundlaget for fremtidige generationers råstoffer, er altså enorme, og der findes ingen, der med sikkerhed kender Jordens samlede ressourcer af kobber, jern, zink osv. Da der heller ikke er viden om, hvor meget der skal bruges af forskellige mineraler i fremtiden, er det alene af den grund ikke muligt med sikkerhed at beregne, hvor mange år ressourcerne vil række.

Især to forhold peger i retning af, at de næste mange generationer ikke vil opleve råstofmangel:

- Der er store områder, som ikke er undersøgt, og som med stor sandsynlighed indeholder mineralske ressourcer.
- Den stigende forståelse for nødvendigheden af at udvikle den cirkulære økonomi på bekostning af den lineære, bevirker at mængden af råstoffer, der skal graves op af jorden, formentlig vil blive reduceret.

Trods dette vil der fra tid til anden opstå mangel på visse mineralske råstoffer, fx fordi

forsyningsvejene af forskellige årsager svigter. Hvis det er mineralske råstoffer, som har stor økonomisk betydning, som er truet af forsyningssvigt, kaldes de for kritiske råstoffer. Men årsagen til at de er kritiske, skyldes ikke geologisk mangel.

HVOR MEGET ER DER TILBAGE?

Det rejser spørgsmålet om, hvor stor en del af Jordens samlede mineralressourcer, vi er i gang med at udnytte. Eller sagt på en anden måde, hvor tæt vi er på at have opbrugt de mineralske ressourcer. Ingen kan give det endelige svar på dette, selvom der er mange, der forsøger at gætte (figur 33).

Der findes simpelthen ikke geologiske modeller, som kan sige noget sikkert om mængderne af Jordens mineralske ressourcer. Derfor er det ikke muligt at forudsige præcis, hvor lang tid ressourcerne vil række, og denne type forudsigelser bør altid vurderes med stor skepsis.

Men der findes modeller for mængderne af de ressourcer, som mineselskaber på nuværende tidspunkt har kendskab til, og som de har planer om eventuelt at bryde senere. Disse modeller siger altså noget om de kend-

te mineralske ressourcer, som kun udgør en meget lille del af Jordens øvre dele. For at de geologiske forekomster kan blive udnyttet som råstoffer, er der yderligere tre forhold som er afgørende:

- Det skal være teknisk muligt.
- Det skal være økonomisk muligt.
- Det skal være socialt og miljømæssigt forsvarligt.

Netop disse to forhold ændrer sig hele tiden. I dag har man teknologi til at bryde forekomster, som ikke kunne brydes teknisk eller økonomisk forsvarligt for bare 10 år siden. Om yderligere 10 år vil vi sikkert se tilbage på den samme udvikling. Af disse mange grunde er der ikke grundlag for at estimere, hvor store ressourcer 'der er tilbage' på et givent tidspunkt.

BÆREDYGTIGHED OG MINEDRIFT – MODSTRIDENDE STØRRELSER

Det forhold, at de mineralske ressourcer ikke gendannes, er helt centralt, når man diskuterer bæredygtighed. Lidt forenklet kan man sige, at de biologiske ressourcer udnyttes bæredygtigt, hvis forbrug og produktion er

i balance. Men da de mineralske ressourcer ikke er fornybare, kan der ikke etableres en balance mellem de ressourcer, vi producerer, og dem vi bruger.

Minedrift kan derfor ikke betragtes som bæredygtig i den almindelige betydning af begrebet. Af samme grund bruger geologer og de myndigheder, der forvalter de mineralske ressourcer, bæredygtighedsbegrebet for de mineralske råstoffer på en anden måde. Her handler bæredygtighed om, hvordan vi bruger de råstoffer, som mineselskaberne graver op, og om hvordan spild kan minimeres og genanvendelse optimeres. Dette er i god overensstemmelse med FN's Verdensmål 12 om ansvarligt forbrug og produktion, som skal sikre, at denne gruppe råstoffer også er til rådighed for vores efterkommere.

NØGLEBEGREBER

- Kritiske råstoffer
- Mineralressource
- Mineralefterforskning
- Reserver
- Mulige ressourcer
- Påviste ressourcer
- Sandsynlige ressourcer
- Råstofknaphed
- Råstofkrise
- Ukendte ressourcer
- Værdikæde
- Bæredygtighed for mineralske råstoffer

REFERENCER

Desjardins, J. (2014). A Forecast of When We'll Run Out of Each Metal. Hentet fra <https://www.visualcapitalist.com/forecast-when-we'll-run-out-of-each-metal/>

KAPITEL 6



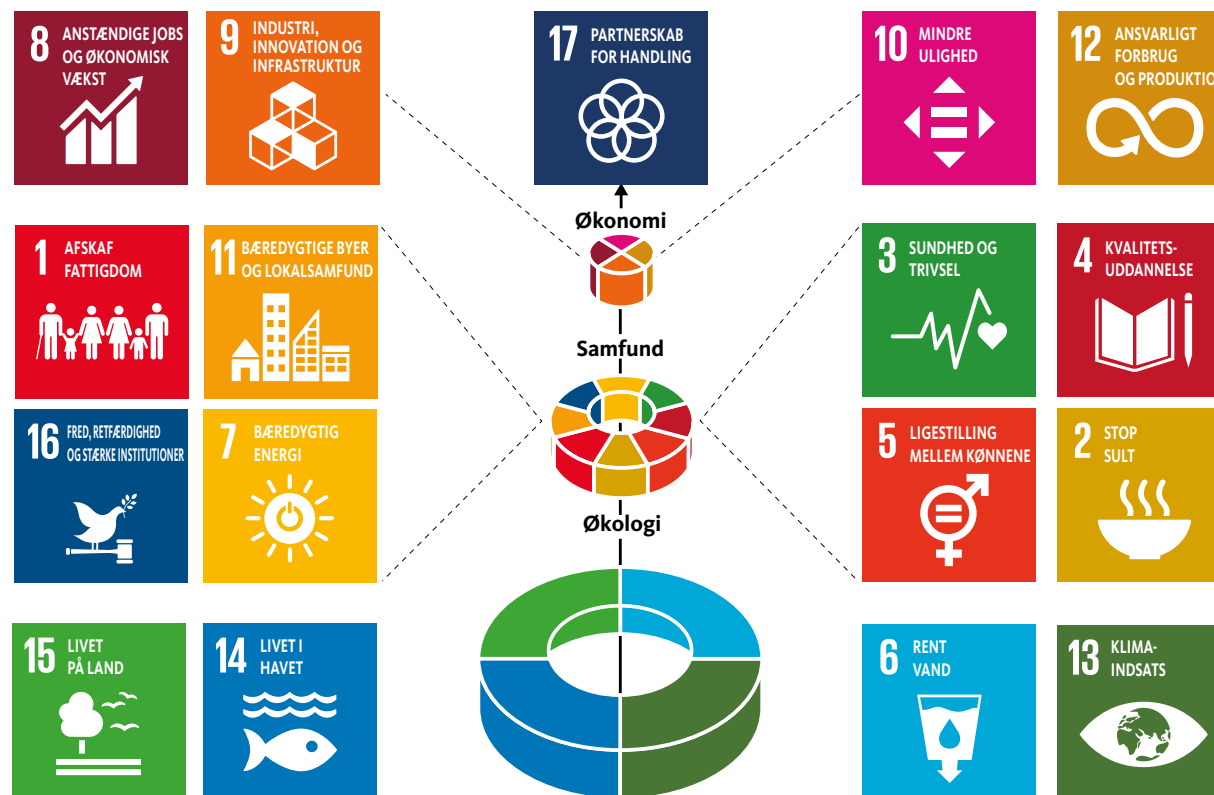
FIGUR 34. Infrastrukturelle udfordringer i det Globale Syd. Her fra slummen i Patna Bihar, Indien. Shutterstock.

FN'S VERDENSMÅL FOR BÆREDYGTIG UDVIKLING

FN'S VERDENSMÅL FOR BÆREDYGTIG UDVIKLING

Stats- og regeringsledere fra hele verden vedtog på FN's topmøde i New York den 25. september 2015 en ambitiøs og transformativ udviklingsdagsorden udmøntet i 17 konkrete verdensmål med i alt 169 delmål (figur 35). Verdensmålene afløser FN's otte 2015-mål og skal danne rammen for den globale udviklingsindsats over de efterfølgende 15 år, altså frem til 2030. Verdensmålene gælder for alle lande og er derfor vigtige for politikere og myndigheder både med nationale og internationale dagsordener. Målene trådte i kraft den 1. januar 2016 og skal sikre, at kursen går mod en mere bæredygtig udvikling for både mennesker og for den planet, vi bor på, og som vi er så dybt afhængige af kan forsyne os med den naturkapital, vi har brug for.

De samfundsmæssige og økonomiske mål skal sikre afskaffelsen af sult og fattigdom, reducere uligheden, give bedre uddannelsesmuligheder og sundhed samt skabe anstændige jobs i en bæredygtig økonomi, mens de økologiske mål skal være med til at sikre netop dette. Verdensmål 6, 7, 9, 11, 12 og



13 tager direkte afsæt i, hvordan vi udnytter naturressourcer, herunder især de mineral-ske råstoffer, som er til rådighed for menneskelig aktivitet. Verdensmålene er indbyrdes afhængige og balancerer de tre dimensioner af bæredygtighed; økologisk, økonomisk og social bæredygtighed.

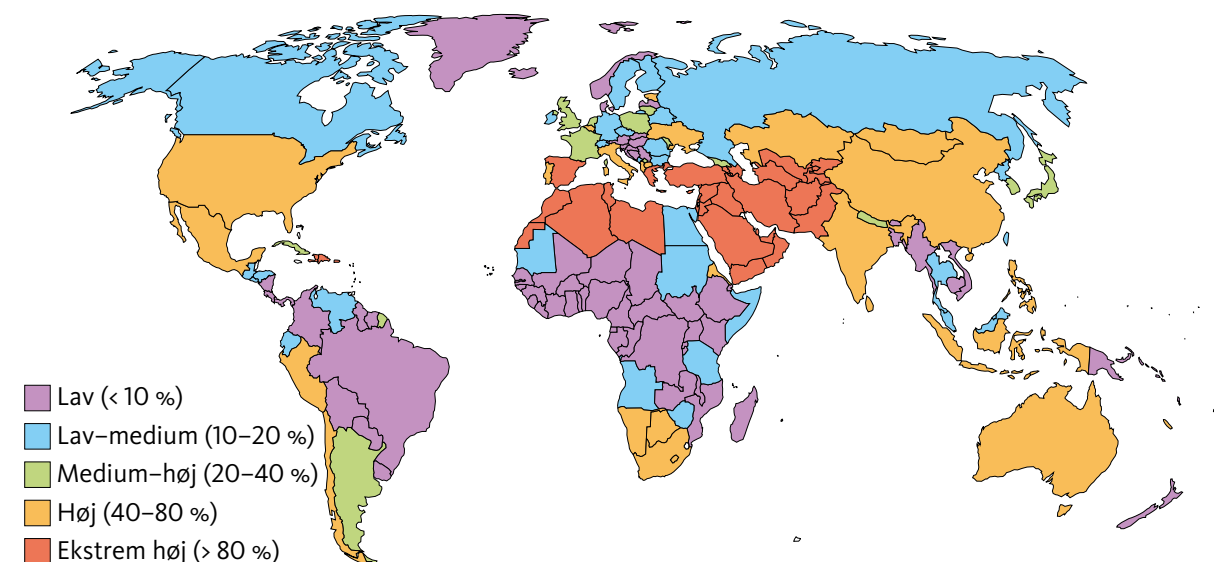
FIGUR 35. FN's 17 verdensmål for bæredygtig udvikling. Efter UNDP (2017).

VERDENSMÅL 6: RENT VAND OG SANITET

En forudsætning for stort set al menneskelig aktivitet er adgang til ferskvand, både til drikkevand og madlavning og til brug i landbrug og industri. I dag lever ca. 40 % af verdens befolkning med vandmangel i dagligdagen, en andel der formentlig stiger i takt med befolkningstilvæksten i udviklingslandene og som konsekvens af, at klimaforandringerne ændrer det hydrologiske kredsløb.

En række lande, regioner og byer oplever i stigende grad vandstress, altså den situation hvor rent ferskvand bliver en mangelvare. Eksempelvis oplevede 41 lande i 2011 vandstress, hvoraf ti af landene var tæt på helt at udtømme deres ferskvandsreserver, og i 2018 skabte det overskrifter, da Cape Town i Sydafrika i bogstaveligste stand var ved at løbe helt tør for vand (figur 38. b).

Årsagerne til vandstress kan være mange, men kan ofte findes i kombinationen af klimatisk relaterede ændringer i det hydrologiske kredsløb og en ineffektiv distribution og anvendelse af reserverne. Der er næppe nogen tvivl om at den forventede ørkenspredning, der følger af klimaforan-



dringerne, formentlig vil øge denne tendens. I 2050 forventes det, at hvert fjerde land vil være påvirket af tilbagevendende udfordringer med deres ferskvandsressourcer (figur 36).

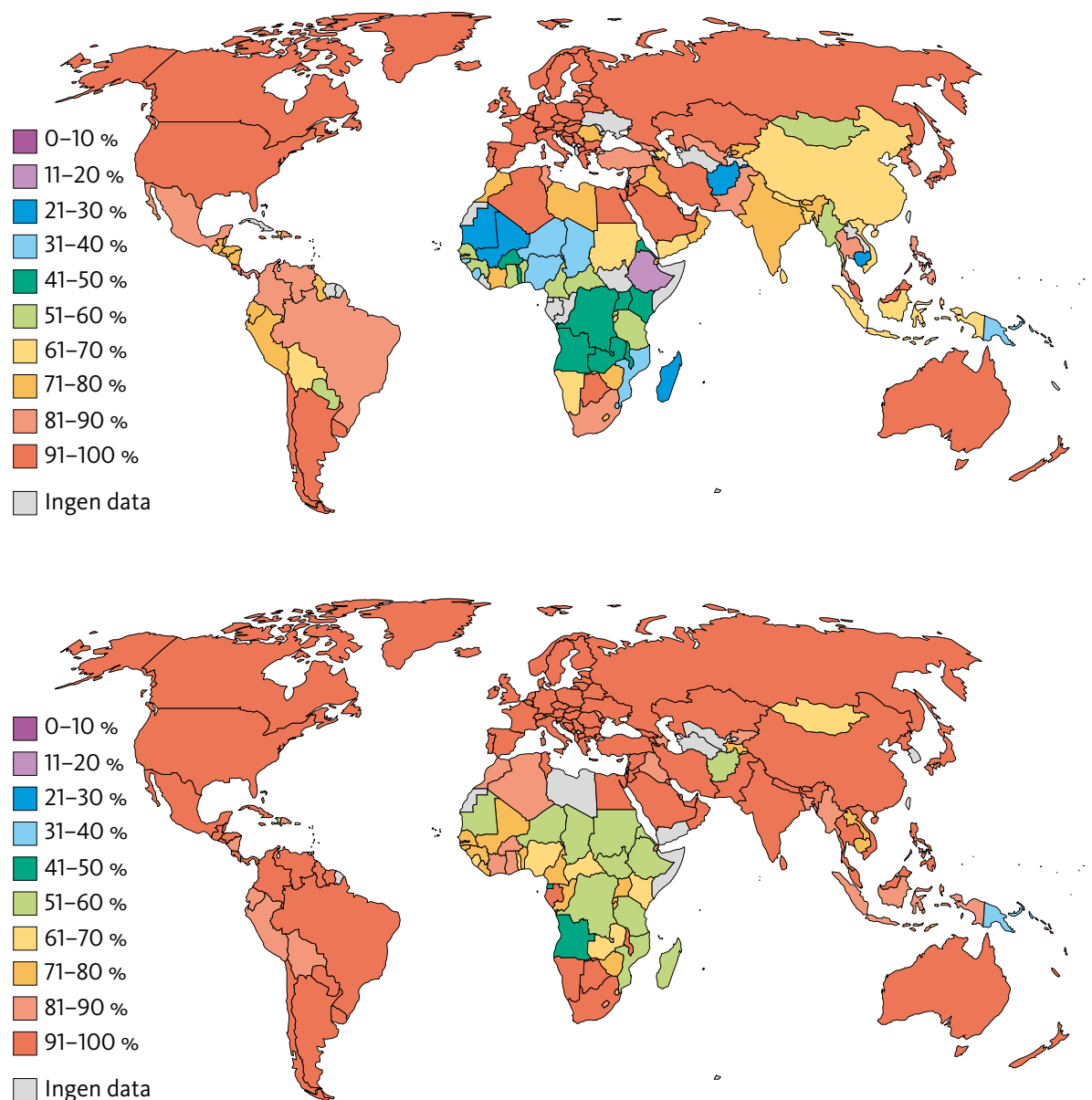
Ikke desto mindre er andelen af mennesker med adgang til rent vand steget markant fra 1990 til 2015 (figur 37), men hvis alle skal have adgang til rent drikkevand inden 2030 og til en pris, der kan betales, skal der investeres massivt i vandførende infrastruktur og sanitære faciliteter. Det kan fx være nye

FIGUR 36. Fremskrivning af trækket på ferskvandsressourcerne i 2040 med angivelse af, hvor stor en del af den tilgængelige fornybar vandmængde, der årligt indvindes. Bemærk at flere af de mest folkerige stater ligger i kategorien høj til ekstrem høj og derfor er i overhængende fare for at løbe tør for ferskvand. Efter World Resource Institute (2015).

effektive pumpesystemer, tætte rørledninger, vandindvindings teknologi til ikke-konventionelle vandressourcer, som eksempelvis afsaltning af havvand, indsamling af dug, sikre vandbehandlingsteknologier og sikkert en hel del teknologi, der endnu ikke er opfundet (figur 38. a, e, f).

Det er helt afgørende at beskytte og genoprette vandrelaterede økosystemer som bjerge, skove, vådområder og floder, hvis vandmanglen skal afbødes (figur 38. d). Dette skal tænkes ind i udvindingsprocessen af mineralske råstoffer, da miner traditionelt har været betydelige kilder til forurening af ferskvandsressourcerne, både søer, floder og grundvand (figur 38. c).

FIGUR 37. Andel af befolkningen med adgang til rent vand i 1990 (øverst) og 2015 (nederst). Bemærk at der var store dele af det Globale Syd, hvor adgangen til rent vand stadig i 2015 var under 60 %. Efter Ritchie & Roser (2019c).





FIGUR 38. Verdensmål 6 i billeder.

A. En dugfanger i Alto Patache, Atacamaørkenen, Chile, der indfanger dug og kondenserer duggen til vand, der opsamles. Dugfangere kan bringe drikkevand til tørre områder og dermed øge livskvaliteten for en lang række mennesker i fremtiden. Af Pontificia Universidad Católica de Chile (2013).

B. I 2018 løb storbyen Cape Town, Sydafrika næsten tør for drikkevand. Det medførte, at folk måtte stå i lange køer for at få vand til husholdningen. Her ses indbyggere der får vand fra en naturlig kilde.

C. Forurenet spildevand fra kobbermine ledte direkte ud i vandløb. Her i Geamanasøen i Rumænien.

D. Overgræsning kan føre til jorderosion og senere ørkenspredning.

E. Vandpumpe drevet af solpaneler og en lille vindmølle giver indbyggerne i landsbyen Schmidts frift adgang til drikkevand i et ellers meget tørt område i Sydafrikas nordlige Kap-provins.

F. Udvidelse og vedligehold af infrastrukturen til vandforsyning er et vigtigt element i at bringe rent vand og sanitet til mennesker.

Fotos B-F fra Shutterstock.

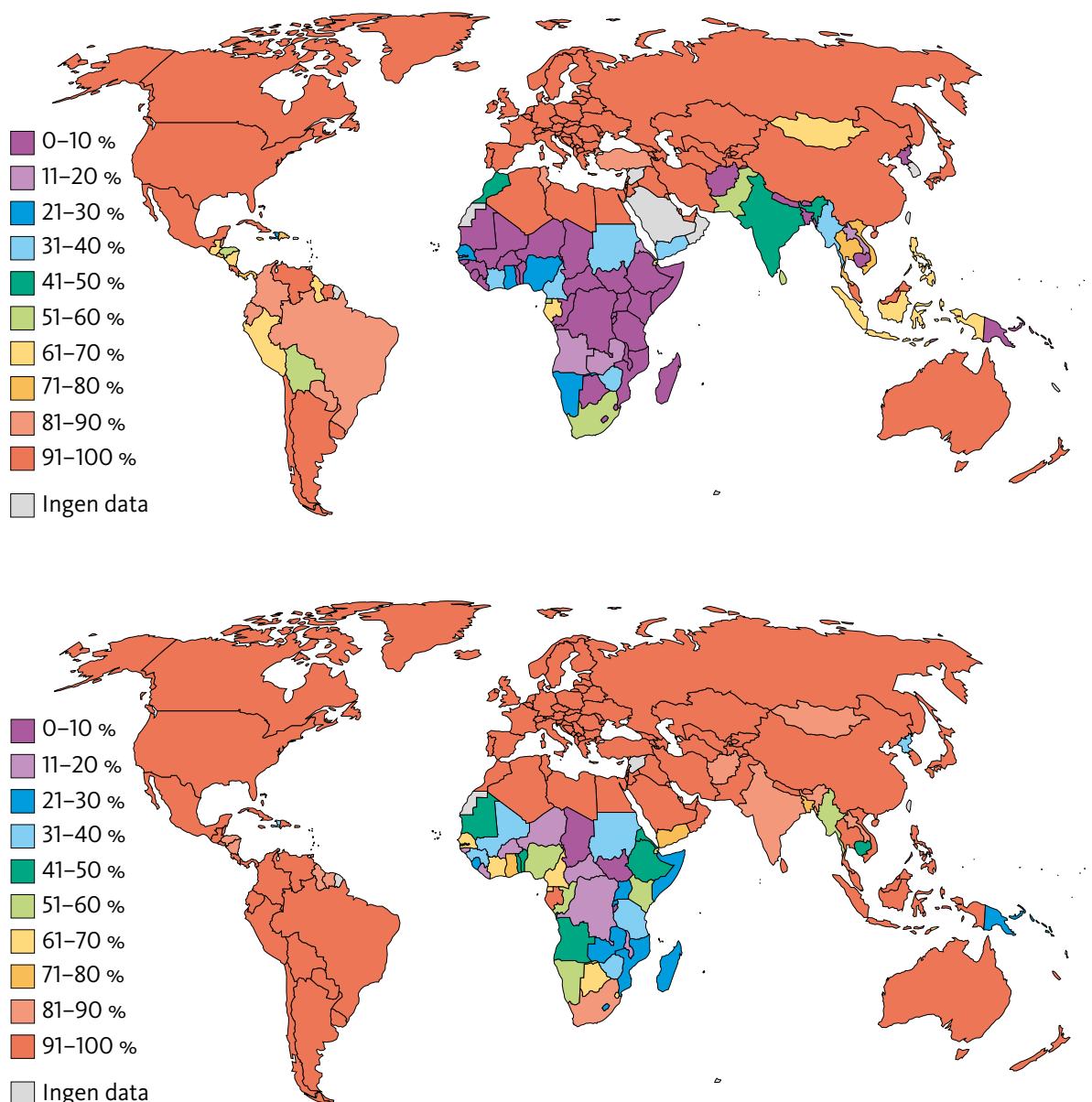
VERDENSMÅL 7: BÆREDYGTIG ENERGI

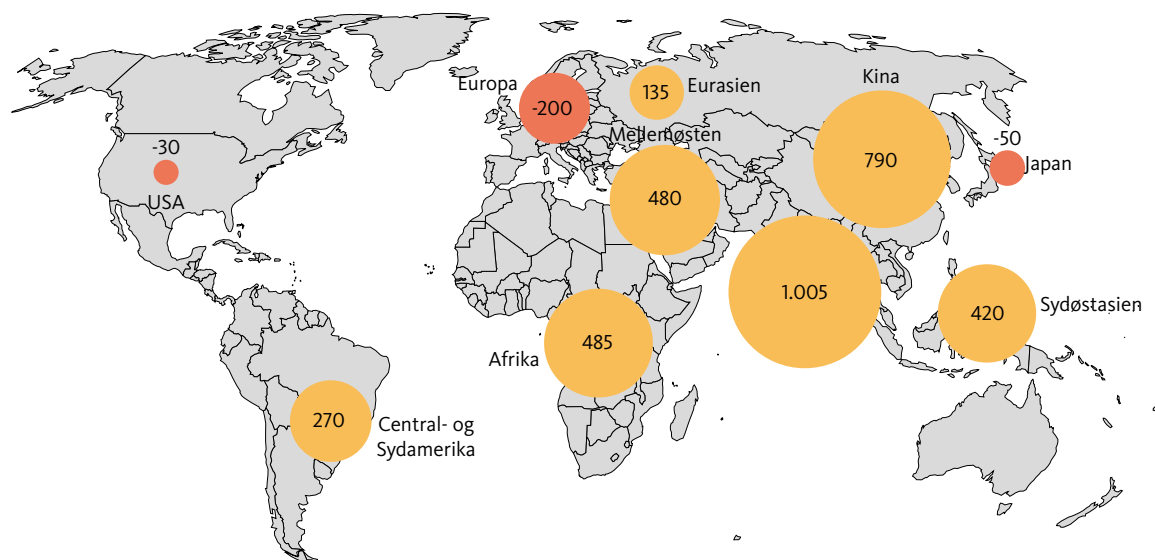
Antallet af mennesker med adgang til elektricitet er fra 1990 til 2010 steget med 1,7 mia. Alligevel manglede 20 % af verdens befolkning i 2015 stadig adgang til elektricitet (figur 39). Langt den største andel af mennesker uden elektricitet lever fortsat i Afrika og Sydasien, og der er næppe tvivl om, at den forventede øgede befolkningstilvækst frem mod år 2100 vil medføre en stærkt stigende efterspørgsel på billig energi i store dele af verden (figur 41).

Den massive udnyttelse af fossile brændstoffer til produktion af energi, siden industrialiseringen tog fart, er ikke bæredygtig og har ført til markante stigninger i atmosfærens drivhusgasser. Det massive fokus på klimaforandringerne de seneste år har været med til at drive forskning og innovation af alternative vedvarende energikilder (figur 40. a, b, c).

Forventningen er, at behovet for vedvarende energi kun vil stige i fremtiden og dermed også behovet for investeringer, innovation og udvikling af vedvarende teknologiformer. En af de udfordringer, der skal håndteres i den forbindelse, er, at de vedvarende høj-

FIGUR 39. Andel af befolkningen med adgang til elektricitet i 1990 (øverst) og 2015 (nederst). Bemærk at der var store dele af det Globale Syd, hvor adgangen til elektricitet stadig i 2015 var under 40 %. Efter Ritchie & Roser (2019a).





FIGUR 40. Verdensmål 7 i billeder.

A. Nomadefamilie fra Mongoliet står foran deres hjem, det traditionelle telt gher. Solpanelet giver elektricitet til opvarmning og elektriske apparater.

B. Landsbygade med turistbutikker og en vindmølle til at give elektricitet i Clarens, Sydafrika.

C. Innovative samfundsmedlemmer ved Bao Beach, en fjerntliggende fiskerlandsby ved bredden af Victoriasøen i Kenya, har udviklet en ramme til støtte for enkle solcellepaneler til produktion af elektricitet.

Fotos fra Shutterstock.

FIGUR 41. Fremskrivning af efterspørgslen på energi i udvalgte lande og regioner. Angivet som ændringen fra 2016 til 2040. Efter OECD (2018).

teknologiske energikilder, som solfangere, vindmøller og varmepumper, er afhængige af bestemte mineralske råstoffer, der ikke nødvendigvis er tilstrækkelig adgang til.

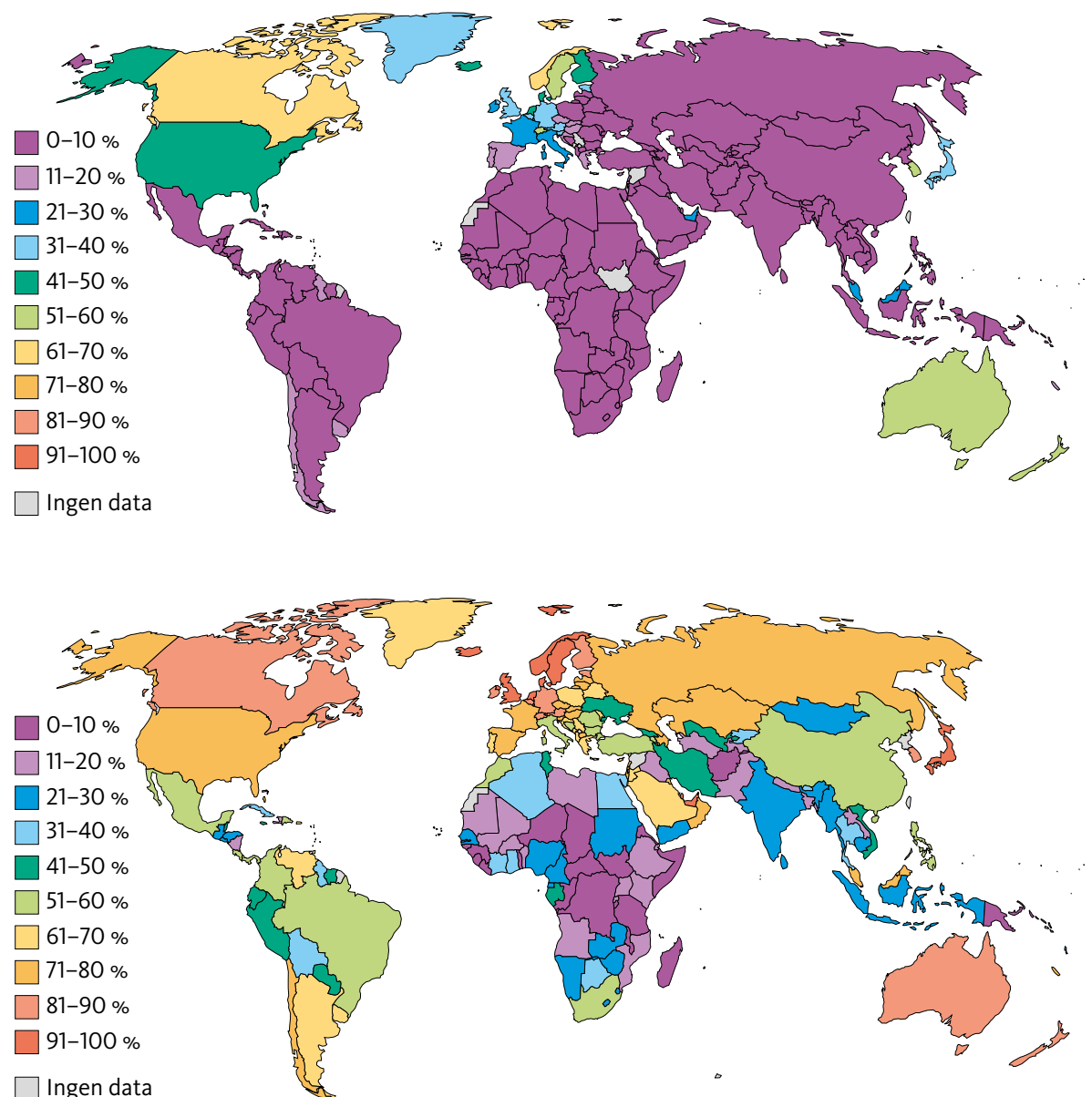
VERDENSMÅL 9: INDUSTRI, INNOVATION OG INFRASTRUKTUR

For den økonomiske vækst og udvikling er det helt afgørende, at der investeres i infrastruktur og innovation. Det bliver ikke mindre afgørende i fremtiden, hvor industrien formentlig i endnu højere grad end nu, bliver afhængig af teknologisk innovation, især hvis den skal kunne producere inden for rammerne af en bæredygtig udvikling.

Et af de områder, der er helt essentielt, er investeringer i bæredygtige energi- og vandindvindingsteknologier, så elektricitet og rent vand kan udbredes til stadig flere mennesker på en bæredygtig måde. Ligeledes kræves store investeringer i udvikling af teknologi, der kan hjælpe med at rydde op i fortidens miljøsynder og forhindre nye miljøkatastrofer i at opstå (figur 43. d).

Infrastrukturen skal i de fleste dele af verden udbygges til at kunne håndtere et stadigt større antal mennesker, der lever i byerne, og deres transport- og boligbehov. Denne udbygning af infrastruktur kræver indvinding, raffinering og forbrug af store mængder mineralske råstoffer, som sand og grus til produktion af glas og beton, jernmalm til

FIGUR 42. Andel af befolkningen der brugte internettet i løbet af de sidste tre måneder i 1990 (øverst) og 2015 (nederst). Efter Ritchie & Roser (2019).





FIGUR 43. Verdensmål 9 i billeder.

A. Konstruktionen af nye elementer til højhastighedstog, der kan være med til at løse transportudfordringerne i de stadigt voksende byer.

B. Trafikken i Mumbai, Indiens største by glider ikke altid let.

C. Der bruges store mængder råstoffer til bygninger og infrastruktur i de store byer, her i Hong Kong, Kina.

D. Åben losseplads i New South Wales, Australien. Åbne lossepladser er et stort problem over hele verden og bidrager til jordbundsforurening, miljøkatastrofer osv.

E. Skærm der viser information om netværkstrafik og status for enheden i et serverrums-datacenter.

F. Masai i rød toga taler i mobiltelefon fra savannen i Lewa Wildlife Conservancy i det nordlige Kenya i Afrika. I store dele af Afrika er det kabelbaserede telefonnet sprunget over, og man er gået direkte på de mobile netværk. Fotos fra Shutterstock.

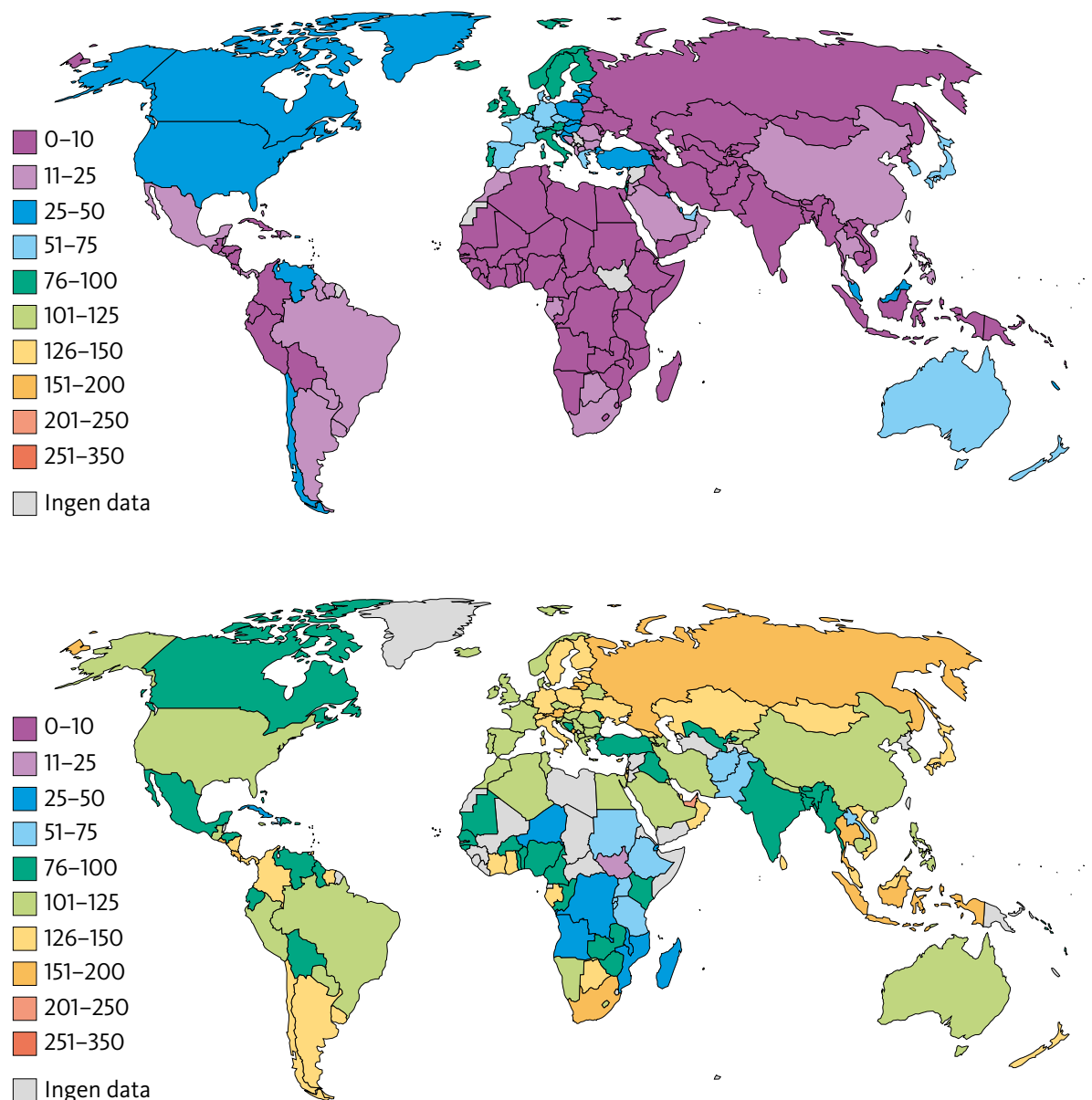
bygningkonstruktioner af stål etc. (figur 43. c).

Udbygningen af verdens informationsteknologi-infrastrukturer (IT-infrastruktur) er et vigtigt omdrejningspunkt (figur 43. e), hvis den økonomiske vækst også skal udbredes til de dele af verden, der i dag ikke er koblet på internettet. Det anslås, at der i dag er ca. 4 mia. mennesker, der ikke har adgang til internettet, og som derfor er hæmmet i deres adgang til økonomisk vækst, både lokalt og på verdensmarkedet (figur 42).

I en del lande i det Globale Syd har der været stort fokus på at udbygge mobilnettet og springe ledet med fastnet over (figur 43. f), hvilket afspejles i udviklingen i mobilabonnementer de sidste par årtier (figur 44).

Da der i størstedelen af moderne IT indgår komponenter, som kun kan produceres ved udnyttelsen af bestemte mineralske råstoffer (fx de sjældne jordartsmetaller), kan det blive en udfordring at opretholde lige adgang til disse råstoffer.

FIGUR 44. Udviklingen i antal mobilabonnementer pr. 100 indbyggere fra 2001 (øverst) til 2017 (nederst). Bemærk hvor stor fremgangen har været i det Globale Syd. Efter Murphy & Roser (2019).



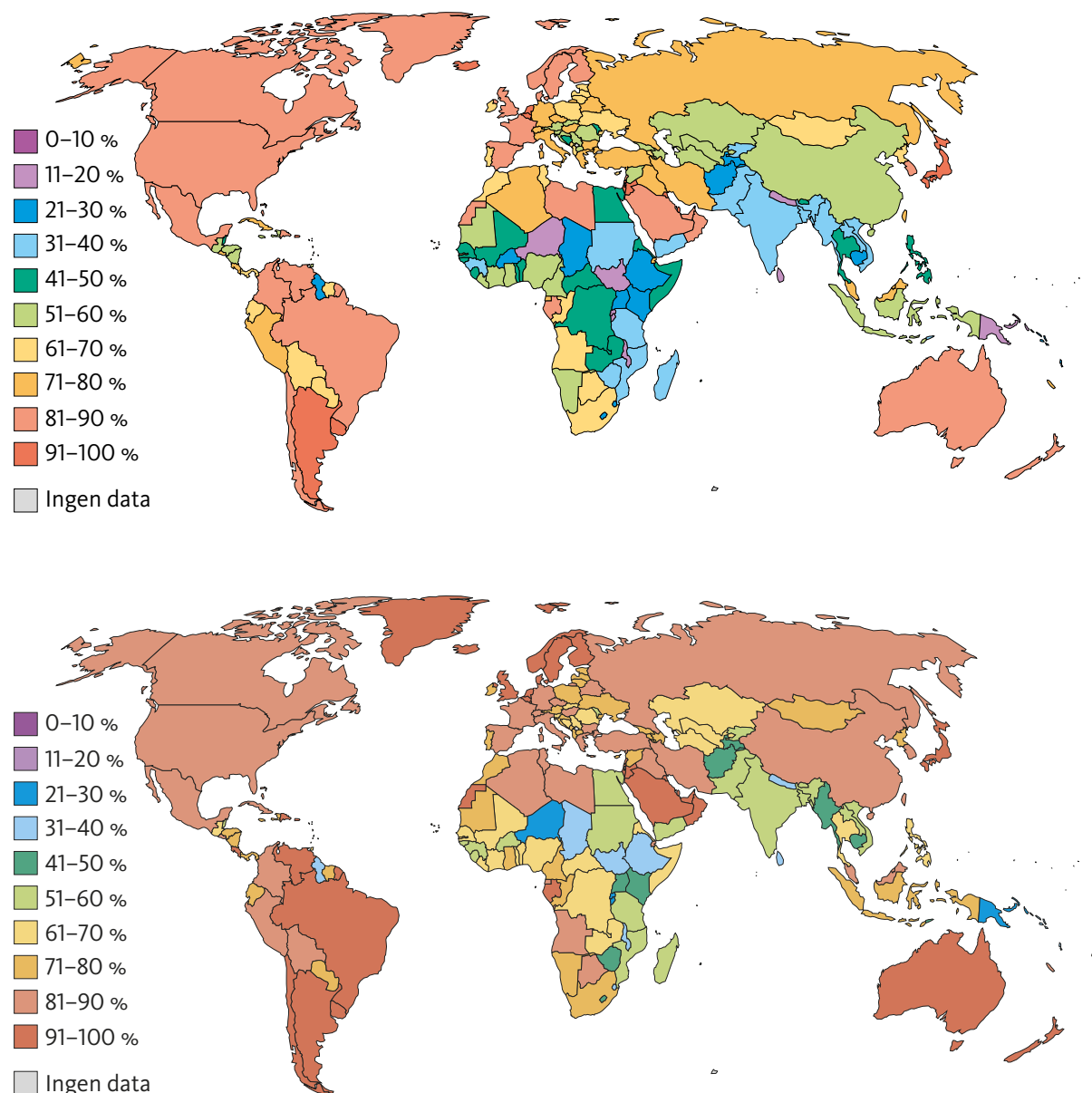
VERDENSMÅL 11: BÆREDYGTIGE BYER OG LOKALSAMFUND

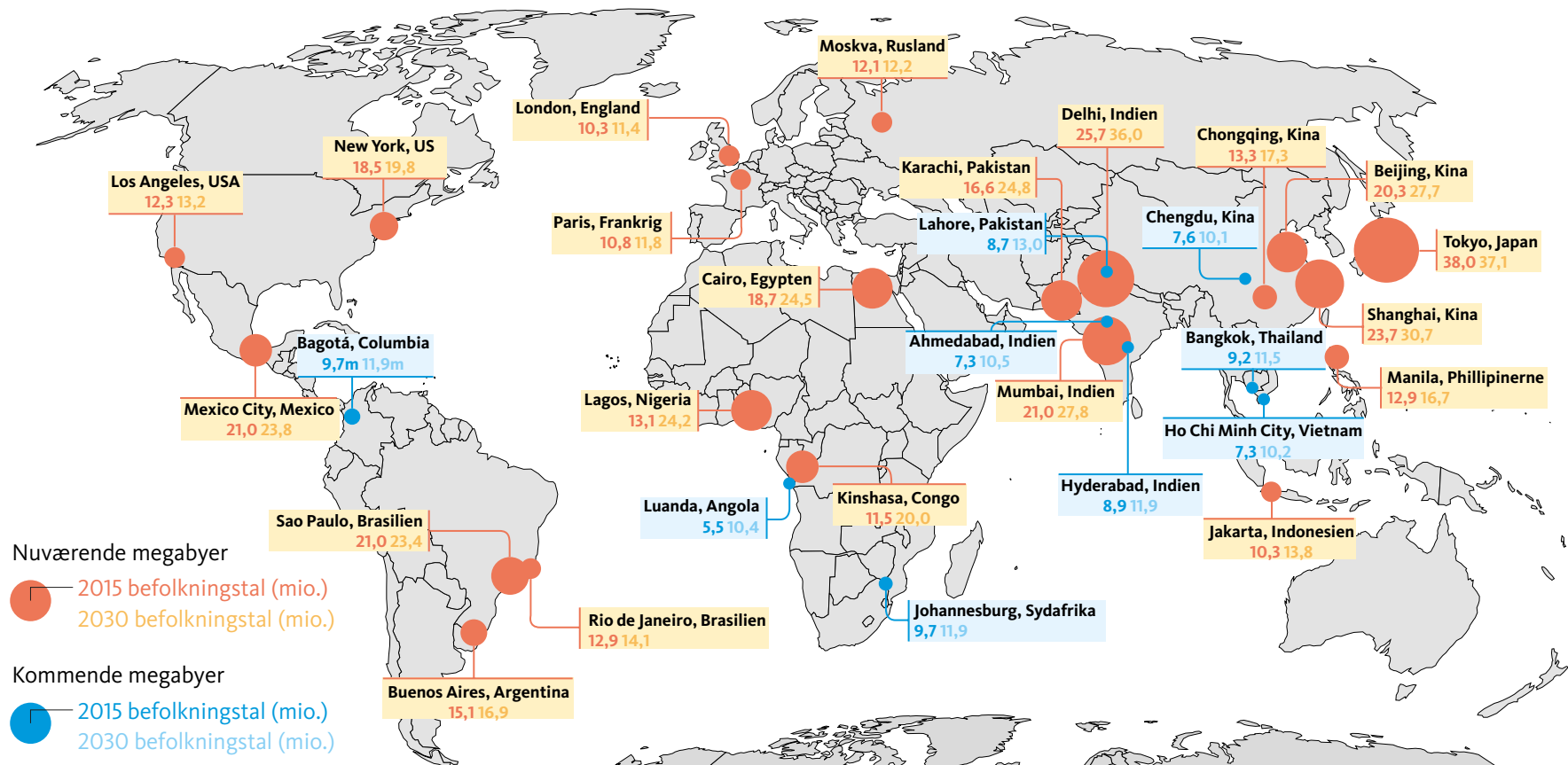
I tæt samspil med de forrige mål er målet om bæredygtige byer og lokalsamfund. Mere end halvdelen af verdens befolkning bor nu i byområder og i 2050 forventes det, at omkring 70 % vil bo i urbane områder (figur 45). En stor del af den tilvækst vil ske i ikke-industrialiserede lande, hvor der derfor er behov for, at der bliver tænkt nyt i forhold til at opbygge bæredygtige byrum.

Den hurtige byvækst i udviklingslandene, kombineret med stigende migration fra land til by, har ført til et boom af de såkaldte megabyer i det Globale Syd. I 1990 var der på verdensplan ti megabyer med mere end 10 mio. indbyggere. I 2014 var der 28 megabyer, som huser i alt 453 mio. mennesker, en tilvækst i antal der alene sker i ikke-vestlige lande (figur 46).

En stor del af de nye byboere bosætter sig i kaotiske slumområder uden egentlig infrastruktur, hvor byrummet hverken er bæredygtigt eller understøtter menneskelig udvikling (figur 47). Her er ekstrem fattigdom koncentreret, hvilket fører til høj kriminalitet

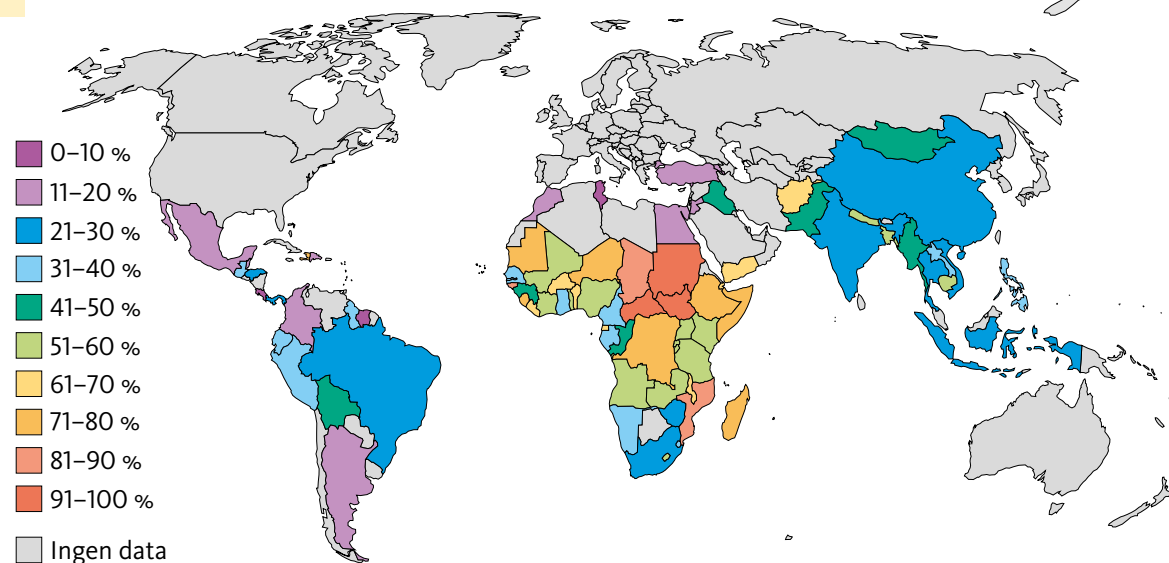
FIGUR 45. Udviklingen i andelen af befolkningen der bor i urbane områder i 2018 (øverst) og fremskrevet til 2050 (nederst). Efter Ritchie & Roser (2019).





FIGUR 46. Udviklingen i megabyer fra 2015 til 2030. Efter DESA (2015).

FIGUR 47. Andelen af den urbane befolkning der i 2014 boede i slum. Efter Ritchie & Roser (2019).





FIGUR 48. Verdensmål 11 i billeder.

A. I fremtidens byer bliver energiproduktionen måske en integreret del af bymiljøet for at gøre byen mere bæredygtig.

B. En moderne megaby med et tæt befolket bygningsmiljø set fra oven. Jing'an-distriktet i forgrunden er et af de centrale distrikter i Shanghai, Kina.

C. Bybilledet fra Mumbai, hvor den store kontrast mellem fattigdom og rigdom er tydelig. Maharashtra, Indien.

Fotos fra Shutterstock.

og ringe muligheder for de mennesker, der lever der.

Hvis infrastrukturen i de mange nye urbane områder skal kunne udvikle sig, så mennesker kan bo, arbejde og leve, kommer det til at lægge beslag på meget store råstofmængder. Det kommer også til at kræve innovative løsninger til håndtering af affald, luftforurening, kollektiv transport etc., hvis ikke byerne skal synke ned i ineffektivitet og kaos.

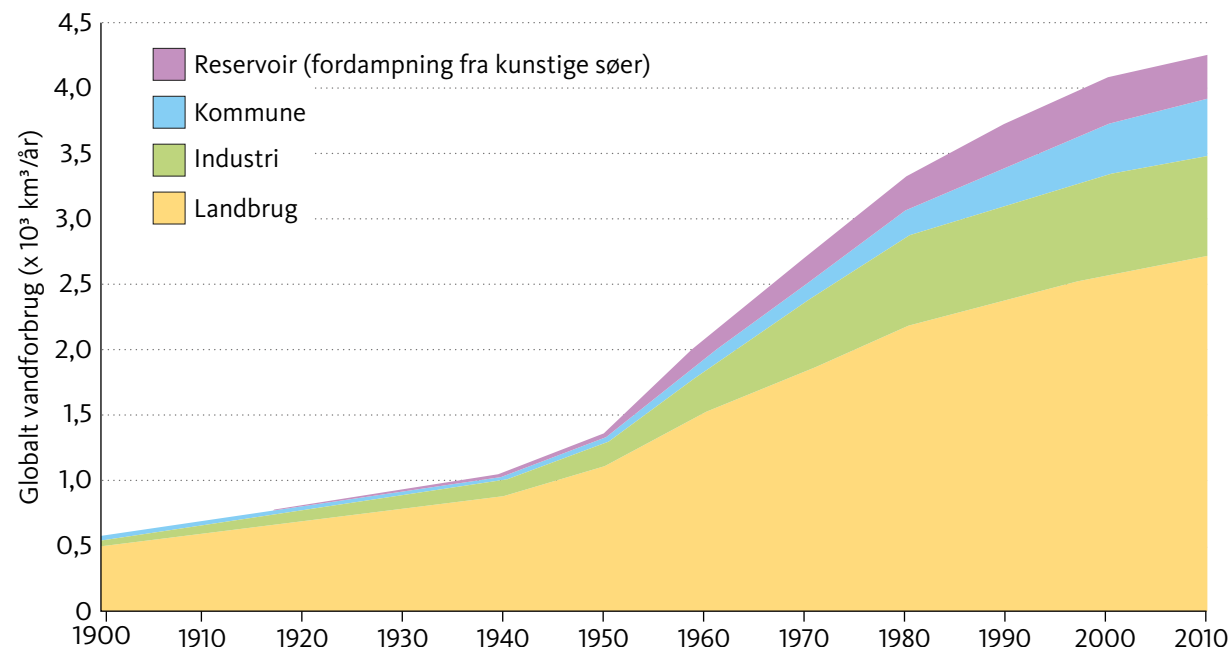
VERDENSMÅL 12: ANSVARLIGT FORBRUG OG PRODUKTION

Den måde, vi forvalter vores fælles naturressourcer på, lægger allerede nu et så stort pres på naturen, at det ikke er en bæredygtig udvikling. Det er derfor tvingende nødvendigt, at vi reducerer vores økologiske fodaftryk ved at producere og forbruge på en mere bæredygtig måde.

Et vigtigt område er vores fødevarerproduktion og forbrug, hvor der bruges og spildes alt for mange ressourcer. Landbrugets kunstvanding står nu for 70 % af alt forbrug af ferskvand, ofte i områder hvor der i forvejen er mangel på denne ressource (figur 49).

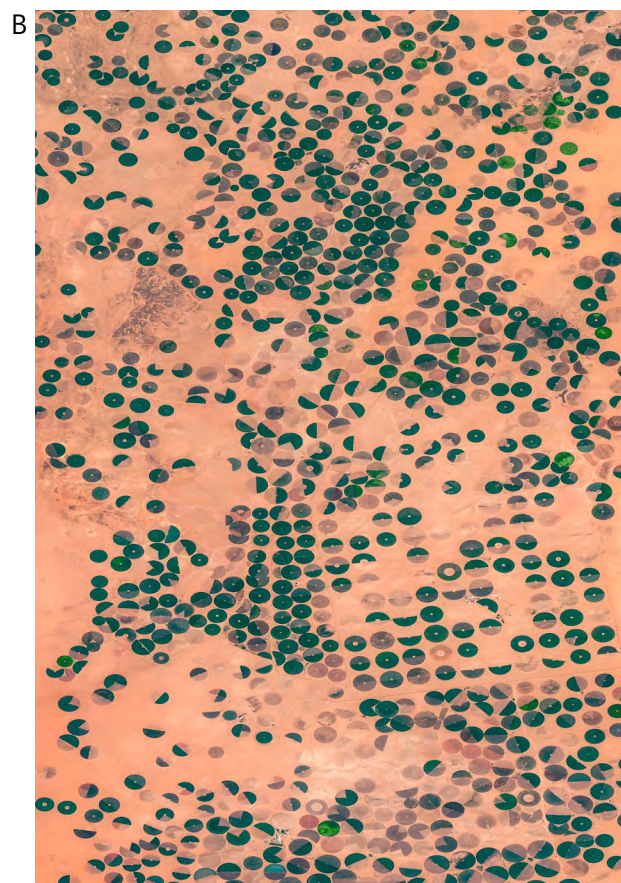
I kæden fra producent til forbruger er der et alt for stort fødevarespild, og FN's fødevarer- og landbrugsorganisation (FAO) har beregnet, at omkring en tredjedel af al fødevarerproduktion går tabt (figur 51). Der må derfor investeres i forskning og innovative løsninger, der kan skabe mere effektive produktionsmetoder og bedre forsyningskæder.

De mineralske råstoffer er ikke fornybare, og derfor er bæredygtig udnyttelse af de mineralske råstoffer en særlig udfordring.



FIGUR 49. Udviklingen i det globale vandforbrug fra 1950 til 2010 fordelt på sektorer. Efter FAO-STAT (2010).

Når de på et tidspunkt er gravet op af jorden og forarbejdet til huse, biler, smartphones, gryder, tandpasta, maling og alt det andet, som danner grundlag for vores liv, så er de i princippet brugt. Hvis de ikke indsamles, og vi ikke finder måder at genanvende råstofferne på, skal de erstattes af andre mineralske råstoffer, som skal graves op af jorden og forarbejdes. Bæredygtighed for de mineralske råstoffer handler derfor primært om at forlænge levetiden på forbrugsgoderne og

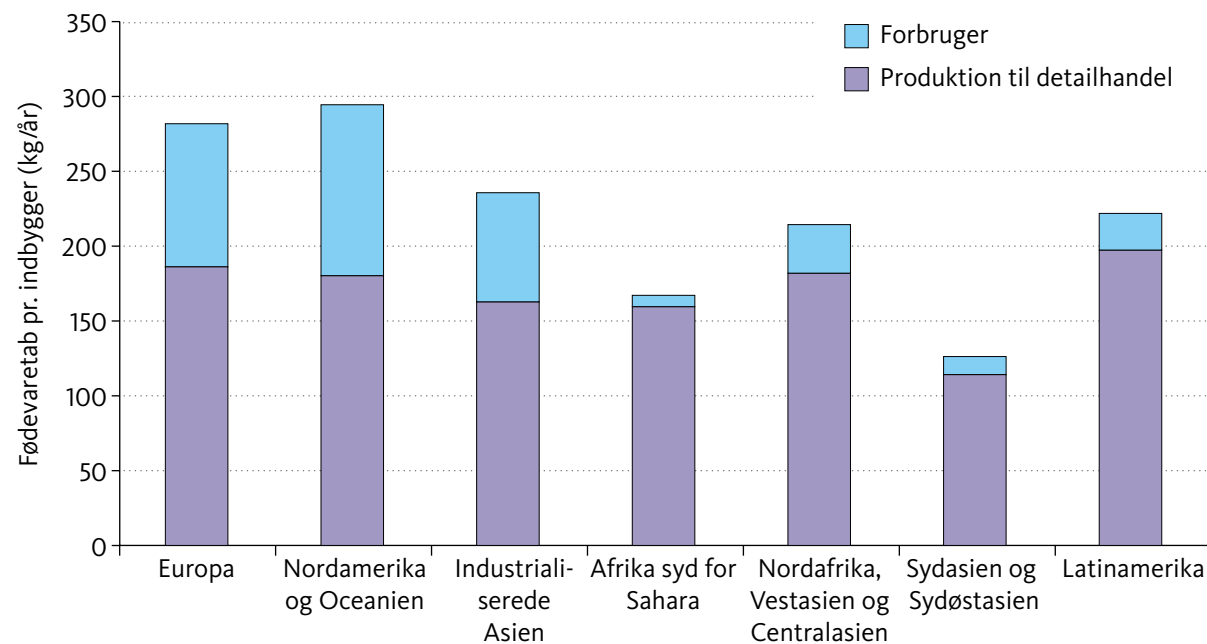


FIGUR 50. Verdensmål 12 i billeder.

A. En bunke grøntsager smides væk som skrald på markedet for friske fødevarer i Bangkok, Thailand.

B. Højopløst satellitbillede af kunstvandede marker i Wadi ad-Dawasir, Saudi Arabien. Fotos fra Shutterstock.

FIGUR 51. Tab i fødevareproduktionen i 2015 fordelt på regioner i 2011. Efter FAO (2011).



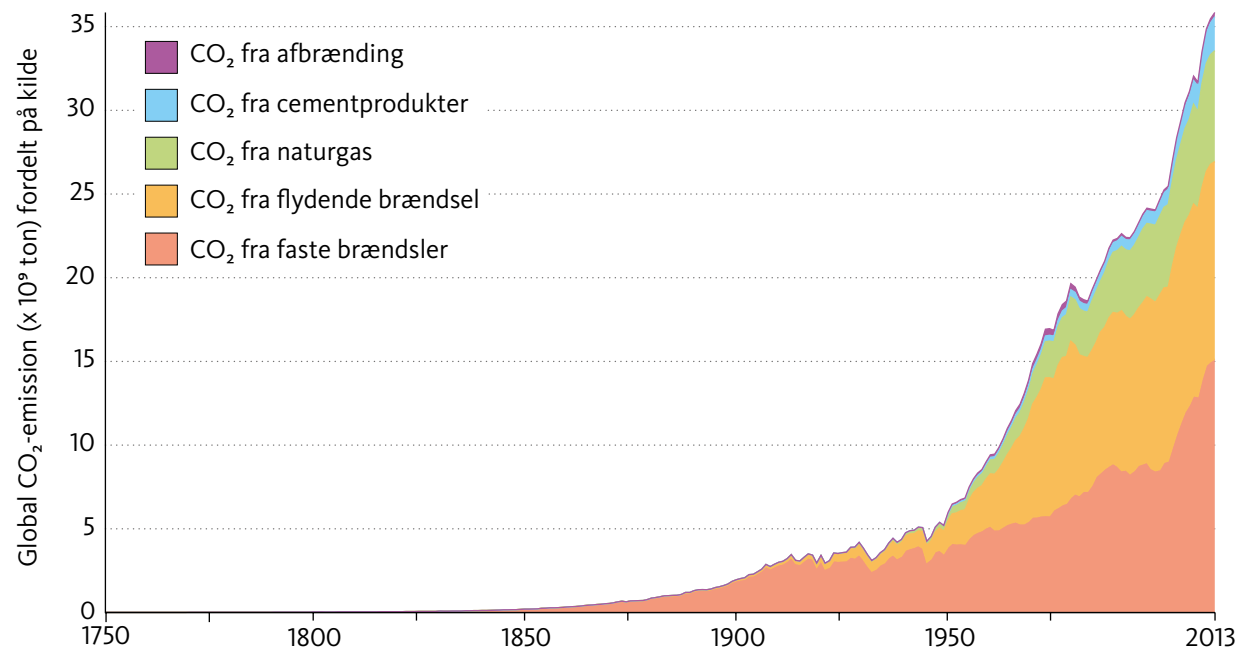
have effektiv genanvendelse.

Et vigtigt område er den måde, hvorpå vi håndterer vores affald. Her må der også investeres i innovative løsninger, så vi enten kan recirkulere brugte produkter, bortskaffe dem på en miljømæssig forsvarlig måde eller reducere forbruget. Vores økonomiske tankegang skal overgå fra lineær til cirkulær for en langt større del af vores produkter.

VERDENSMÅL 13: KLIMAINDSATS

Klimaforandringernes effekt på vores hverdag er ikke længere bare en teoretisk mulighed men i allerhøjeste grad hverdagskost for mange mennesker. Derfor er problematikken hos store dele af verdens befolkning rykket frem i folks bevidsthed. Fattige bønder i Sahel får endnu sværere ved at dyrke deres sparsomme afgrøder, befolkningerne i Bangladesh og på en række af Stillehavets øgrupper oplever flere og flere oversvømmelser. Staten Florida i USA investerer milliarder af dollars i at dæmme op for det stigende havniveau, danske bønder oplever ekstrem tørke eller det modsatte. Tropiske orkaner bliver kraftigere, koralrevene afbleges og mange flere fænomener påvirkes rundt omkring i verden (figur 53. a, b, c).

På lokalt, regionalt og globalt plan tænkes der i klimamål, og den brede offentlighed har et stigende ønske om, at der politisk handles for at stoppe klimaforandringerne. Især er den unge del af befolkningen optaget af denne dagsorden, da de jo naturligt nok kommer til at leve med tidligere generationers manglende indsats på området (figur 53. e). I 2018 blev den svenske skoleelev Greta Thunbergs



klimastrejke symbolet på denne nye bevidsthed og klimastrejkerne har givet genlyd på sociale medier og ført til verdensomspændende aktioner fra helt unge mennesker (figur 53. d).

Den videnskabelige baggrund for klimaforandringerne skyldes den øgede emission af drivhusgasser fra menneskelig aktivitet. Niveaulet af drivhusgasser i atmosfæren er i 2019 fordoblet i forhold til i 1990 (figur 52).

FIGUR 52. Udviklingen i verdens samlede CO₂-emission fordelt på forskellige kilder. Efter Ritchie & Roser (2017).



FIGUR 53. Verdensmål 13 i billeder.

A. Den globale opvarmning har ført til tørke i store dele af verdenen. I Mae Moh, Lampang, Thailand har manglende nedbør og menneskers forbrug har udtørret et tidligere ferskvandsreservoir.

B. Oversvømmelse efter orkanen Sandy den 28. oktober 2012, Lenox Avenue i Miami South Beach, USA.

C. Døde afblegede koralrev ses over hele verden som følge af stigende havtemperaturer og global opvarmning.

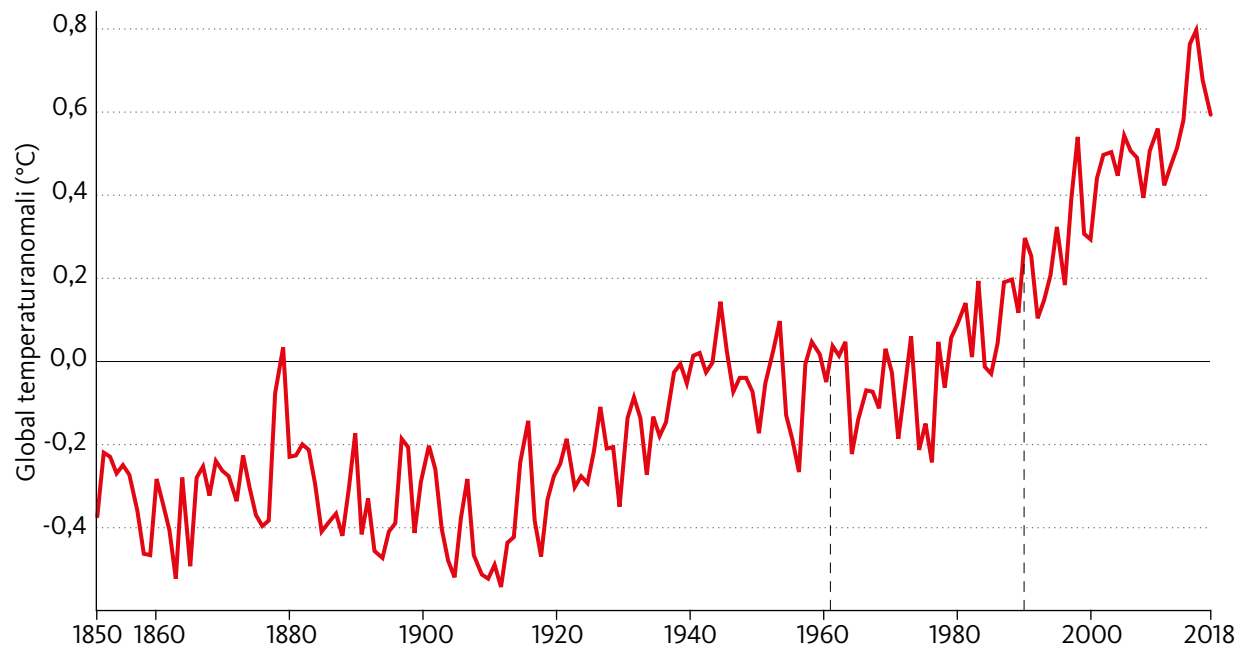
D. Den unge svenske klimaaktivist Greta Thunberg deltager i *Fridays For Future* (*Skolstjerk för Klimatet*). Her protesterer hun foran et stort publikum nær Colosseum i Rom, Italien, den 19. april 2019.

E. Det er i høj grad den yngre del af befolkningen, der er bekymrede for deres fremtid, som følge af klimaforandringerne. Her ses protester med bannere ved en ungdomsklimamarch i det centrale London, England, den 15. februar 2019.

F. Jordens gletsjere smelter hurtigere jo mere klimaforandringerne med højere temperaturer til følge slår igennem.

Fotos fra Shutterstock.





FIGUR 54. Udviklingen i verdens temperatur-anomali. Efter Ritchie & Roser (2017).

Det er helt afgørende, at udledningen bringes ned, og at det sker ved verdensomspændende konsensus, så stigningen i den globale gennemsnitstemperatur ikke kommer over 2 °C i forhold til det før-industrielle niveau (figur 54).

Da udviklingslandene ofte bliver ekstra hårdt ramt af effekterne af klimaforandringer, og ikke har de økonomiske midler til at gøre noget ved det, er det FN's mål, at der fra

2020 mobiliseres ca. 680 mia. danske kroner om året for at imødekomme udviklingslandenes behov og til at bidrage til afbødning af klimarelaterede katastrofer.

NØGLEBEGREBER

- FN's verdensmål
- Bæredygtig udvikling
- Vandmangel og vandstress
- Bæredygtig energi
- Innovation, industri og infrastruktur
- Bæredygtige byer

REFERENCER

- Desa. (2015). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision* (Nr. (ST/ESA/SER.A/366). Hentet fra <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2014-Report.pdf>
- FAO. (2011). *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. Hentet fra <http://www.fao.org/3/mbo6oe/mbo6oe.pdf>
- Murphy, J., & Roser, M. (2019). Internet. Hentet fra <https://ourworldindata.org/internet>
- OECD. (2018). *World Energy Outlook 2017*. Organisation for Economic Co-Operation and Development.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2017). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Hentet fra <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#future-emission-scenarios>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2019a). Energy. Hentet fra <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2019b). Urbanization. Hentet fra <https://ourworldindata.org/urbanization>

Ritchie, H., & Roser, M. (2019c). Water Use and Sanitation. Hentet fra <https://ourworldindata.org/water-use-sanitation>

UNDP. (2017). FN's verdensmål for bæredygtig udvikling. Hentet fra <https://www.verdensmaalene.dk/>

World Resource Institute. (2015). Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings. Hentet fra <https://www.wri.org/resources/data-sets/aqueduct-projected-water-stress-country-rankings>

KAPITEL 7



FIGUR 55. Havvindmølleparker i Danmark er en del af den grønne sektor. Shutterstock.

DEN GRØNNE ØKONOMI

DEN GRØNNE ØKONOMI

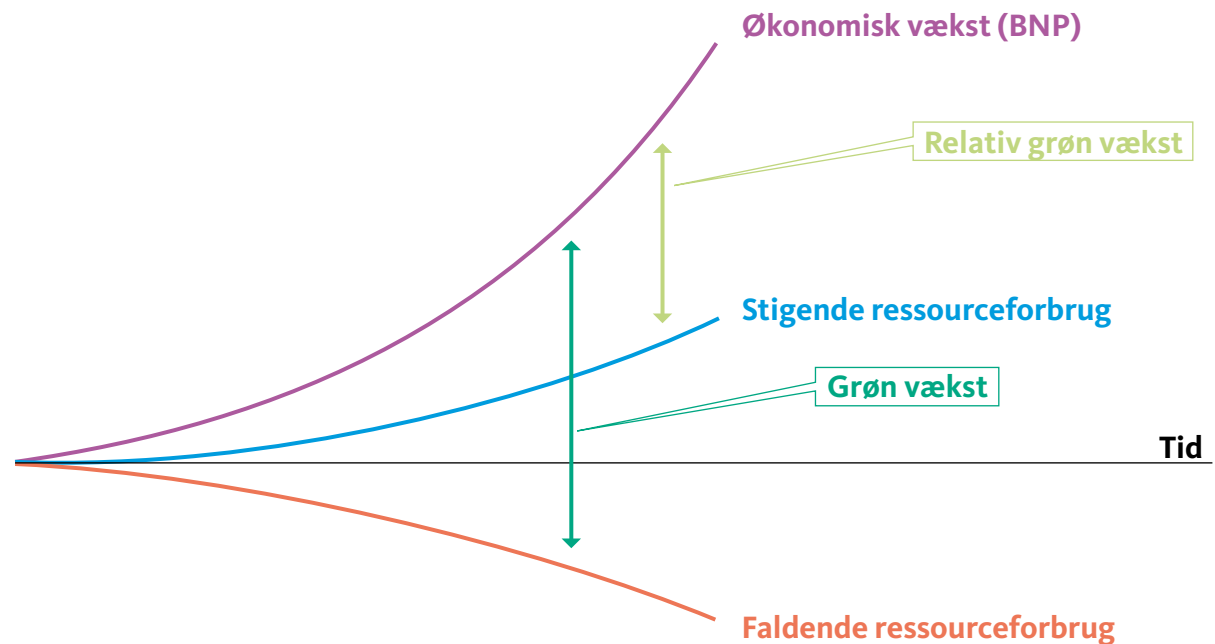
Klimaforskernes beregninger de seneste 20 år viser, at der med stor sandsynlighed er sammenhæng mellem de observerede klimaændringer og det stærkt stigende menneskeskabte CO₂-udslip. I takt med den voksende, brede folkelige og politiske forståelse af denne årsagssammenhæng og fokus på FN's verdensmål, er verdenssamfundet i gang med at omlægge energiproduktionen til bæredygtige teknologier. De grønne energiteknologier dækker over en bred vifte af tiltag, som simplificeret kan opdeles i følgende hovedsektorer (figur 57):

- Miljøvenlig energi og energilagring
- Cirkulær økonomi
- Bæredygtig vandressourceforvaltning
- Bæredygtig transport
- Ressource- og materialeeffektivisering
- Energieffektivitet

Grøn omstilling, grønne teknologier og den grønne sektor trækker dagligt overskrifter i medierne, politikere debatterer det, og virksomheder brander sig på at være grønne. Betegnelsen 'grøn' tilføjes ofte til begreber

som fx økonomi, teknologi og virksomheder som en samlebetegnelse, der skal udtrykke bæredygtighed og altså være en aktivitet, som ikke påvirker vores omgivelser, miljø og ressourcer negativt.

Den grønne økonomi er defineret som en økonomi, der på både samfunds- og virksomhedsniveau skal sikre, at udviklingen er bæredygtig. FN's Miljøprogram (UNEP) definerede allerede i 2011, at en grøn økonomi



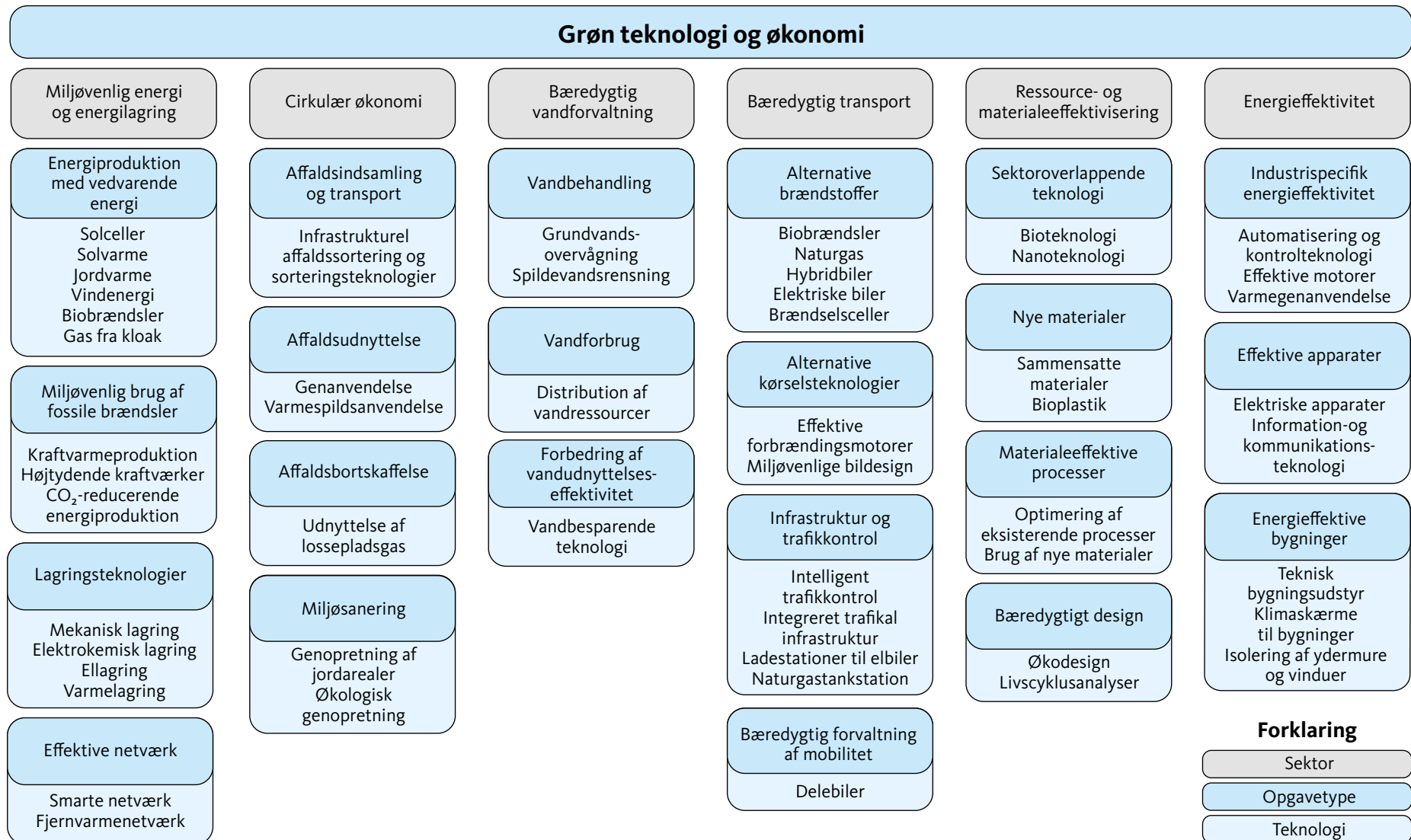
FIGUR 56. I den grønne økonomi er den økonomiske udvikling afkoblet fra ressourceforbruget og den fossile energi, men er baseret på bæredygtige teknologier.

Kun når der sker fald i ressourceforbruget, er der tale om grøn vækst.

Ved relativ grøn vækst er ressourceforbruget ikke helt afkoblet fra den økonomiske vækst.

Efter Fischer-Kowalski et al. (2011).

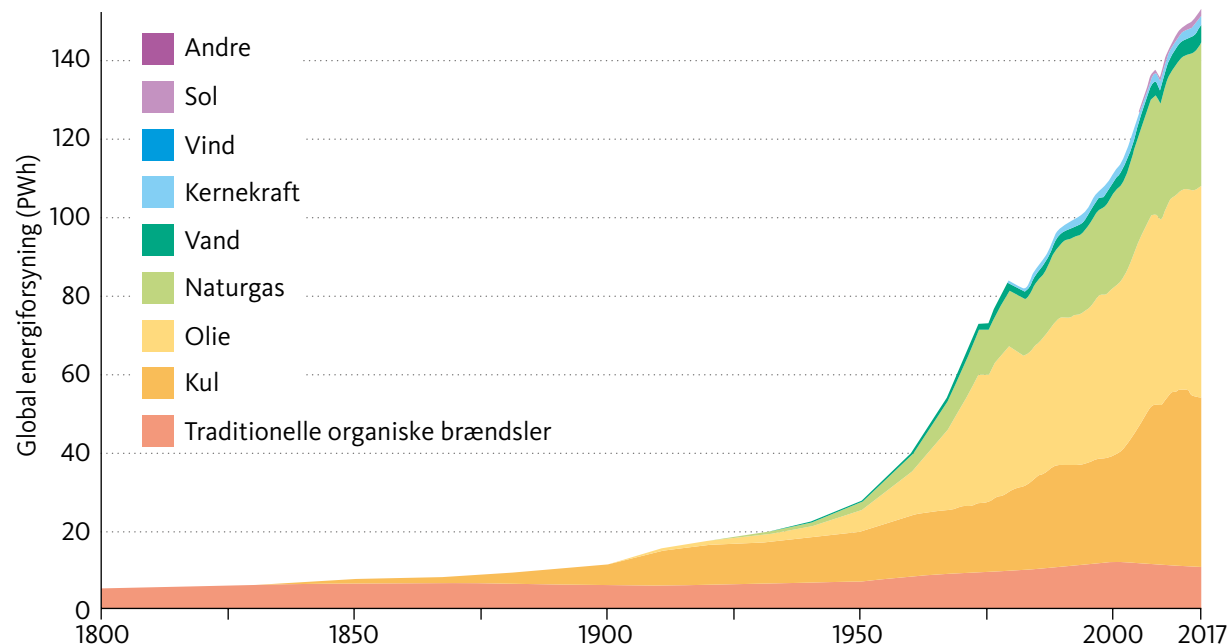
FIGUR 57. Sektoropdeling af de 'grønne' industrier. Efter Rentmeister et al. (2013).



ikke kun skal være effektiv, men også sikre en retfærdig overgang til en ressourceeffektiv økonomi. I den grønne økonomi afkobles samfundets vækst fra ressourceforbruget, således at energiforbruget, baseret på kul, olie og gas, som skal bruges for at omdanne råstoffer til varer, til stadighed reduceres. Hvis denne afkobling af brugen af fossile energikilder skal lykkes, er det nødvendigt:

- at udskifte energiråstofferne med vedvarende energikilder, og
- at genanvende de øvrige råstoffer uden tab.

De fleste økonomer definerer en økonomisk vækst som grøn, når dette sker uden et stigende forbrug af ressourcer og miljøbelastning (figur 56). Hvis belastningskurven stiger langsommere end stigningen i BNP, kaldes det for en relativ afkobling, som ikke er rigtig grøn vækst i modsætning til en rigtig grøn vækst, hvor belastningskurven falder, selv når BNP stiger. Som målestok for hvor grøn en økonomi er, bruger økonomerne begrebet ressourceproduktivitet, som udtrykker hvor meget værdi, der skabes pr. ton CO₂, vand eller mineralske råstoffer.



FN'S VERDENSMÅL OG ENERGITEKNOLOGI

To af FN's 17 verdensmål er knyttet til energiforsyningen: Verdensmål 7 skal sikre, at energien produceres uden at være til skade for miljøet og til en pris, som gør det muligt for alle mennesker at have adgang til elektricitet. Verdensmål 13 skal sikre, at energiproduktionen ikke belaster klimaet. Opfyldelsen af dette mål er vigtigt, fordi det er en forudsætning for mange af de øvrige mål. For at opfylde Verdensmål 13 skal energi-

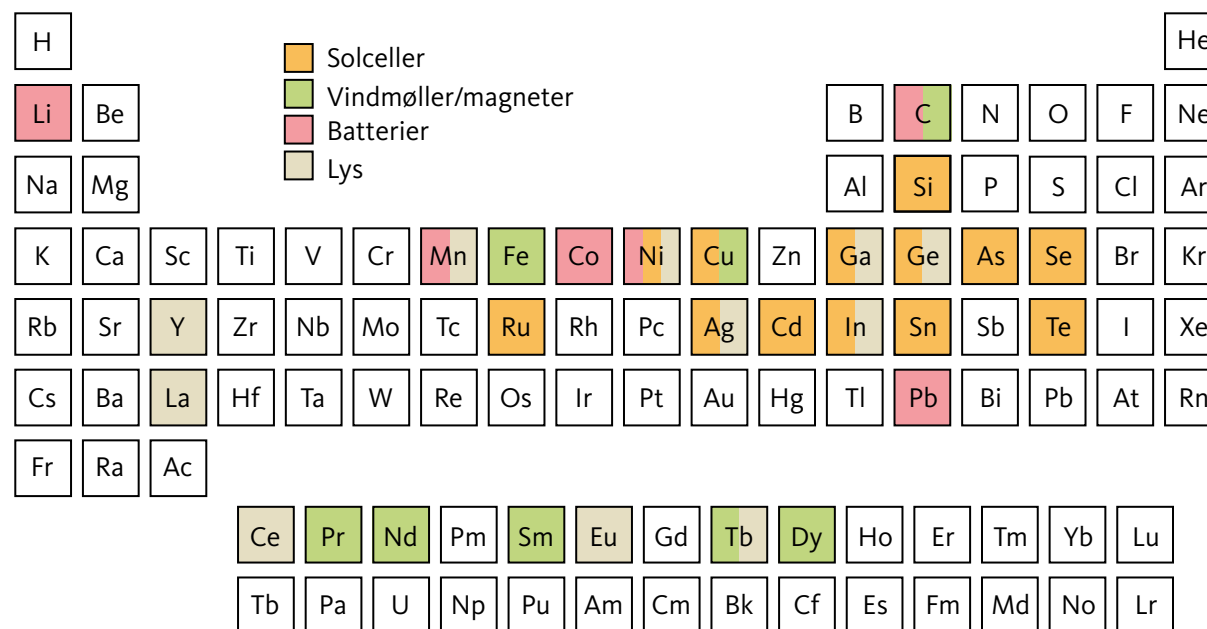
FIGUR 58. Udviklingen i den globale energiforsyning fordelt på teknologier fra 1800 til 2017 opgjort i petawatttimer (PWh). Olie og gas er stadig de to helt dominerende teknologier. I 2016 udgjorde de vedvarende energiformer kun omkring 10 %. Efter Ritchie & Roser (2019).

produktionen baseres på metoder, som ikke frigør CO₂, hvilket kræver, at der foretages en hurtig omlægning af energiformerne. De teknologiske indsatser på disse områder omfatter både udvikling af metoder til CO₂-fri energifremstilling og udvikling af metoder, der reducerer energiforbruget.

Omstillingen fra fossil energi til vedvarende energiformer kan kun lade sig gøre, hvis man i stedet for kul, olie og gas udnytter en række andre råstoffer; de råstoffer som skal bruges til vindmøller, solceller, batterier osv., og som med rette kaldes de 'nye energiråstoffer'. Der er sket en meget hurtig vækst af disse nye energiråstoffer, og det er derfor relevant at vurdere, om energiomstillingen opfylder Verdensmål 12, som skal sikre en forsvarlig produktion og et forsvarligt forbrug.

VERDENS ENERGIFORSYNING – EN VIFTE AF TEKNOLOGIER

Når man ser på verdens energiforsyning, er det tydeligt, at den første industrielle revolution medførte et stigende forbrug af kul, som under den anden industrielle revolution blev suppleret med energi fra olie og senere



også fra naturgas (figur 58). Siden 1950'erne er en lille del af denne energimængde produceret med solceller, kerne-, vand- og vindkraft. Omkring 2015 toppede forbruget af kul og olie, og en lille del blev erstattet af naturgas og vedvarende energiformer. I dag udgør den energimængde, der leveres af de grønne teknologier, mindre end 10 %, så udfasning af de fossile brændstoffer med grønne teknologier er ikke lige om hjørnet.

FIGUR 59. Nøgleråstofferne til de vedvarende energiteknologier og batterier.

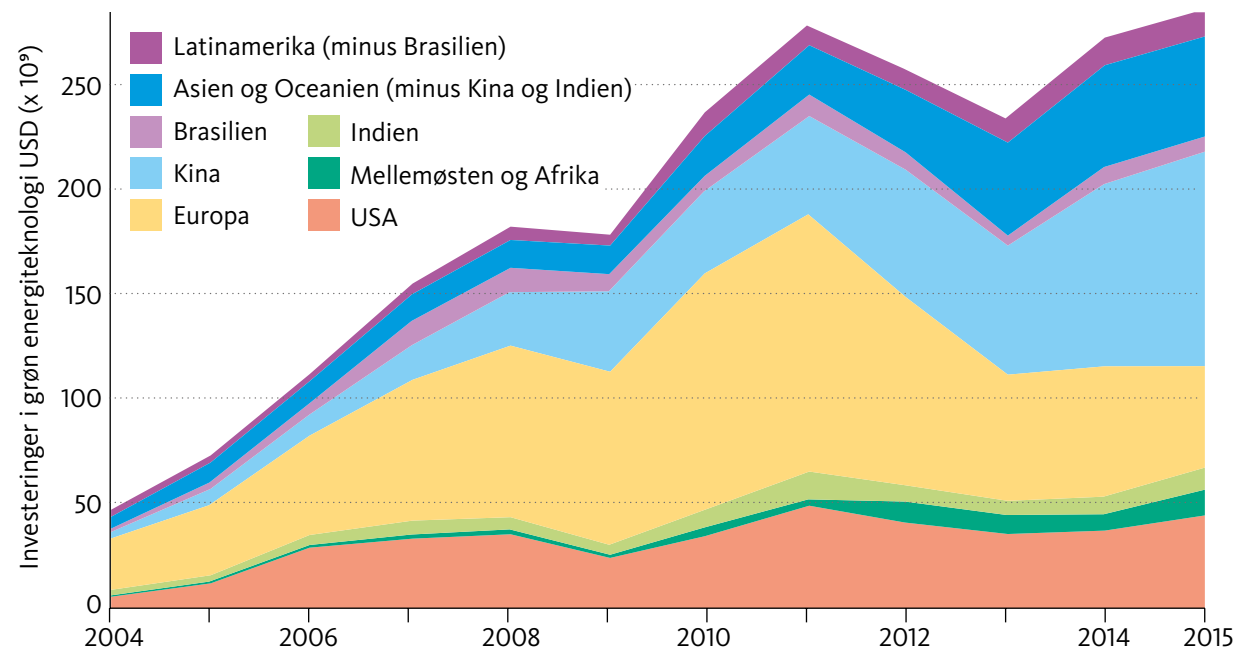
Blandt disse råstoffer udvindes bl.a. bly, kobolt, germanium og gallium som biprodukter, hvorfor produktionen af disse er afhængige af, at andre råstoffer, der bruges til andre ting, bliver brudt.

Af MiMa (2019).

Skiftet til nye vedvarende energiteknologier betyder ikke, at afhængigheden af mineral-ske råstoffer forsvinder; det bliver blot nogle andre råstoffer energiforsyningen bliver afhængig af. Kul, olie og gas udskiftes med de råstoffer, der skal bruges i produktionen af solceller, vindmøller, batterier etc., som fx sjældne jordartsmetaller, kobolt, nikkel, lithium, grafit, germanium, gallium og mange andre (figur 59).

På globalt plan blev der i perioden fra 2004 til 2016 investeret massivt i grønne energianlæg, hvoraf langt de fleste var i omlægning til vind- og solenergianlæg. Disse teknologier kan, i modsætning til bølgeenergi, geotermi og vandkraft, indpasses i mange lande.

Omstillingen til grøn energi afhænger ikke alene af, hvad der politisk besluttet, selvom om det har stor betydning. Da der kræves store økonomiske investeringer for at få produktionsanlæg, infrastruktur og lagring af energi op at køre, er det også nødvendigt, at der er investeringsvillig kapital til stede. Kombinationen af politiske ambitioner og økonomiske realiteter gør, at der er store forskelle på, hvor meget der investeres i forskellige dele af verden (figur 60). De samlede



investeringer i Asien er størst, mens investeringerne i Europa falder.

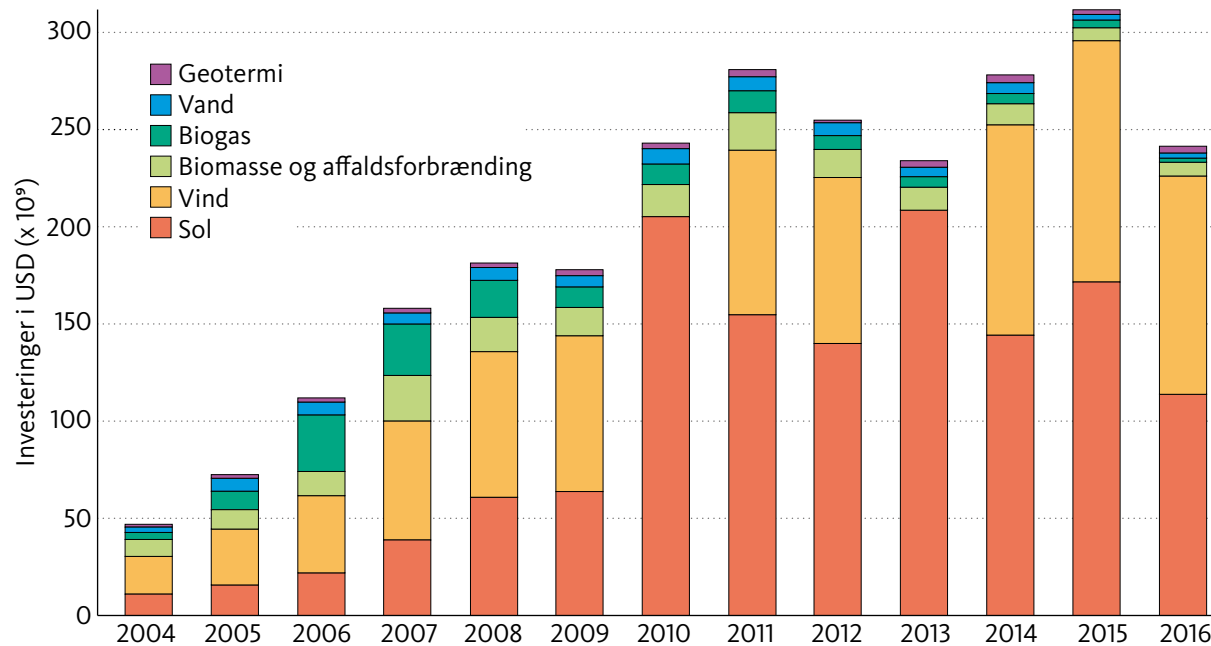
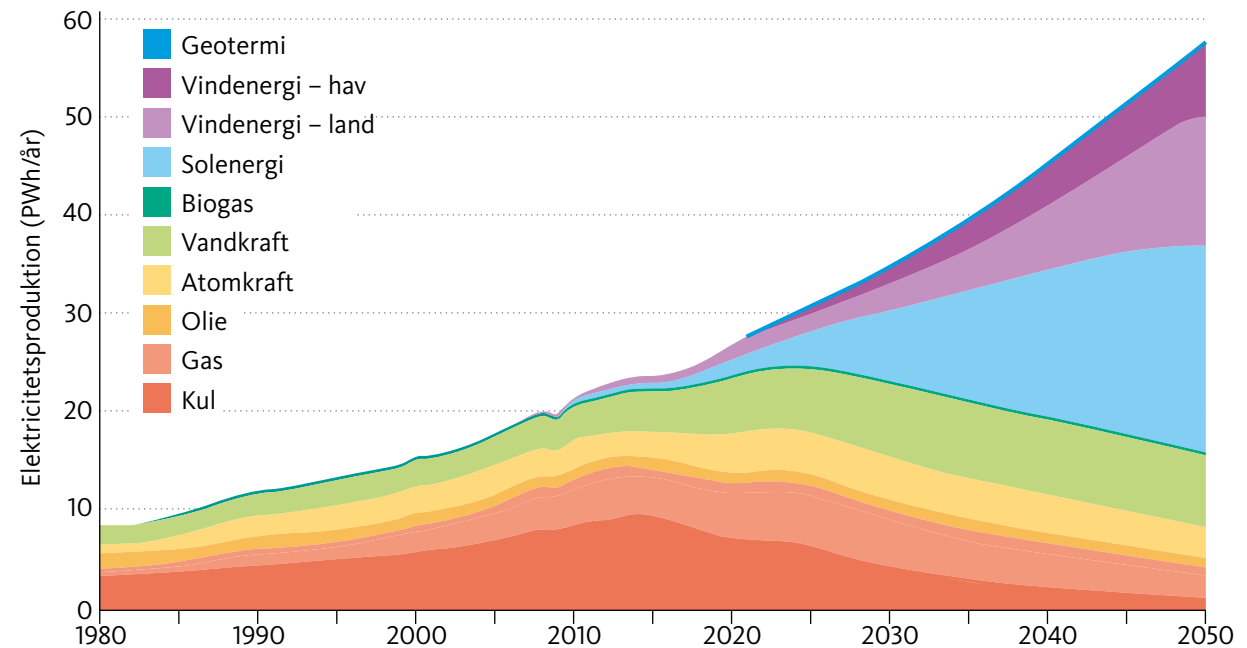
Når industrien fremstiller nye modeller af en vare, betyder det næsten altid, at der er ændret i sammensætningen af de grundstoffer, der indgår i de materialer, der anvendes. Det betyder, at nye grundstoffer kommer i spil, mens andre måske udfases. Sådanne ændringer ses meget tydeligt i forbindelse med den grønne teknologi inden for både

FIGUR 60. Udviklingen i investeringerne i grønne energiteknologier fordelt på regioner. Det fremgår at den europæiske investering i udbygning af vedvarende energianlæg er reduceret i modsætning til Kina, som fortsat investerer kraftigt. Hvordan vil kurverne se ud, hvis investeringerne blev opgjort pr. indbygger? Efter Ritchie & Roser (2019).

FIGUR 61. Historisk og forventet udvikling i den globale elektricitetsforsyning fordelt på teknologier fra 1980 frem til 2050.

Som det ses vil sol- og vindenergi være de dominerende energiteknologier.

Efter Energy Transition Outlook (2018).



FIGUR 62. Udviklingen globalt i investeringerne i de vedvarende energikilder fordelt på forskellige teknologier.

Trods stigende fokus på og forståelse af nødvendigheden af at udfase olie og gas hurtigt, har væksten i investeringer siden 2010 stoppet og ligger på et stabilt niveau.

Det ses også, at vind- og solenergi er de teknologier, som der investeres langt mest i.

Efter Ritchie & Roser (2019).

solceller, vindmøller, batterier og belysning, hvor der pludselig er stor efterspørgsel efter grundstoffer, som ikke tidligere blev brugt særligt meget. Eksempler på dette er bl.a. selen, ruthenium og tellurium, som nu bruges i stigende mængder til solceller.

Så spørgsmålet er nu, om FN's Verdensmål 7 og 13 bliver opfyldt? Det har den private organisation DNV-GL forsøgt at vurdere, bl.a. ved at lave nogle modeller for elektricitetsforsyningen frem til 2050. Modellerne sandsynliggør, at de traditionelle kul-olie-gas-baserede kraftværker er udfaset i 2050, og at den energimængde, som dermed kommer til at mangle, vil blive erstattet af energi leveret af solceller og vindmøller. Disse to teknologier forventes endda også at kunne forsyne verden med den ekstra energi, som er en nødvendig følge af den globale befolkningstilvækst og større købekraft (figur 61). Fordelingen i investeringerne i de forskellige teknologier vil få indflydelse på den fremtidige energiforsyning og på hvilke teknologier, der vil være dominerende (figur 62).

NØGLEBEGREBER

- Grøn vækst
- Relativ grøn vækst
- Grønne energiteknologier

REFERENCER

- Energy Transition Outlook. (2018). Energy Transition Outlook 2018. Hentet fra <https://eto.dnvgl.com/2018/download>
- Fischer-Kowalski, M., Swilling, M., von Weizsäcker, E. U., Ren, Y., Moriguchi, Y., Crane, W., ... Sewerin, S. (2011). *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. Hentet fra <https://www.resourcepanel.org/reports/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth>
- Rentmeister, H., Übelacker, S., Kleinschmidt, L., Schmickler, P., Ammon, M., & Olbrecht, T. (2013). *Cleantech-Standortgutachten 2013: Chancen und Perspektiven für Ostdeutschland*. Hentet fra http://www.dcti.de/fileadmin/pdfs/dcti/DCTI_Studien/Cleantech_Standortgutachten_2013_barrierefrei_sec.pdf
- Ritchie, H., & Roser, M. (2019). Energy. Hentet fra <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>

KAPITEL 8



FIGUR 63. Materialer fra gamle bygninger kan genbruges til renovering og udskiftning af andre bygninger. Shutterstock.

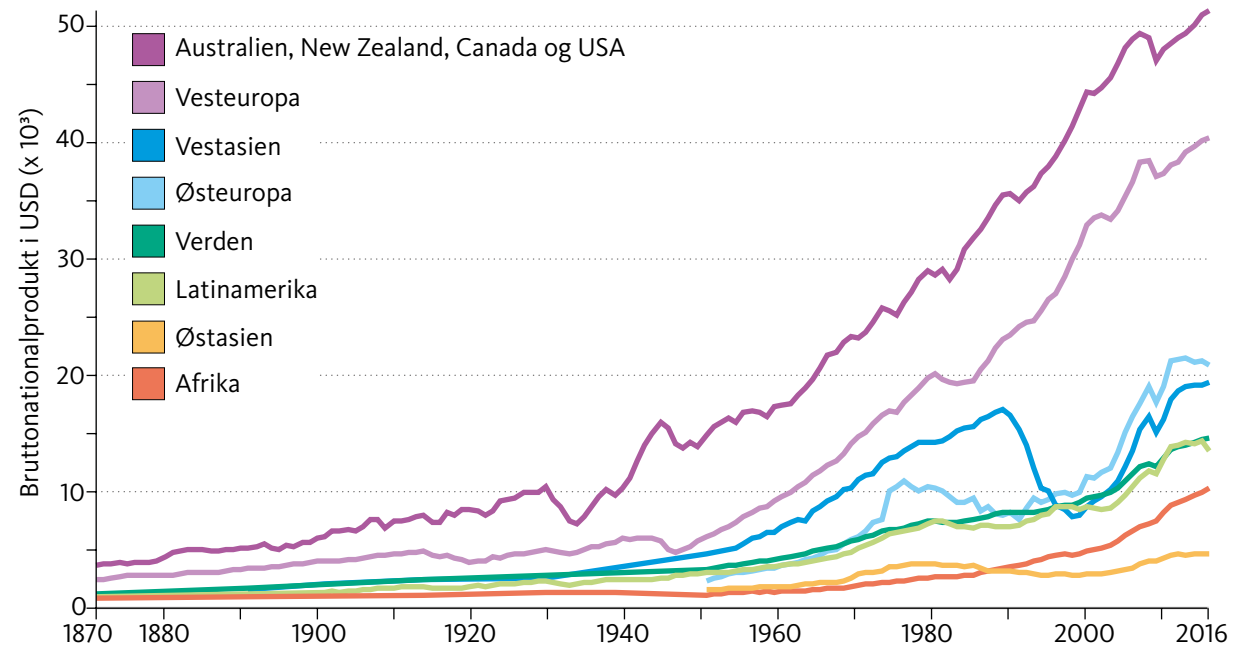
CIRKULÆR ØKONOMI

ØKONOMISK VÆKST

Siden den første industrielle revolution har den økonomiske vækst overordnet set været stigende, dels fordi arbejdsstyrken generelt er øget, dels fordi produktiviteten er øget. Selvom store dele af verden i dag oplever økonomisk vækst, blev udviklingen i første omgang drevet af de kapitalistiske, liberale vestlige økonomier i Europa og Nordamerika. Udviklingen har ført til, at verdens samlede bruttonationalprodukt (BNP) fra 1900 til 2010 steg med 2.500 %, men væksten er meget ulige fordelt på de forskellige regioner (figur 64).

En konsekvens af denne økonomiske udvikling er, at flere og flere forbrugere har fået råd til og mulighed for at købe stadig flere produkter, hvilket har ført til en støt stigende produktion af forbrugsgoder. Den øgede produktion har resulteret i en øget udnyttelse af naturressourcerne for at skaffe de nødvendige råstoffer til produktionen, og den globale ressourceudvinding er fordoblet siden starten af forrige århundrede (figur 65).

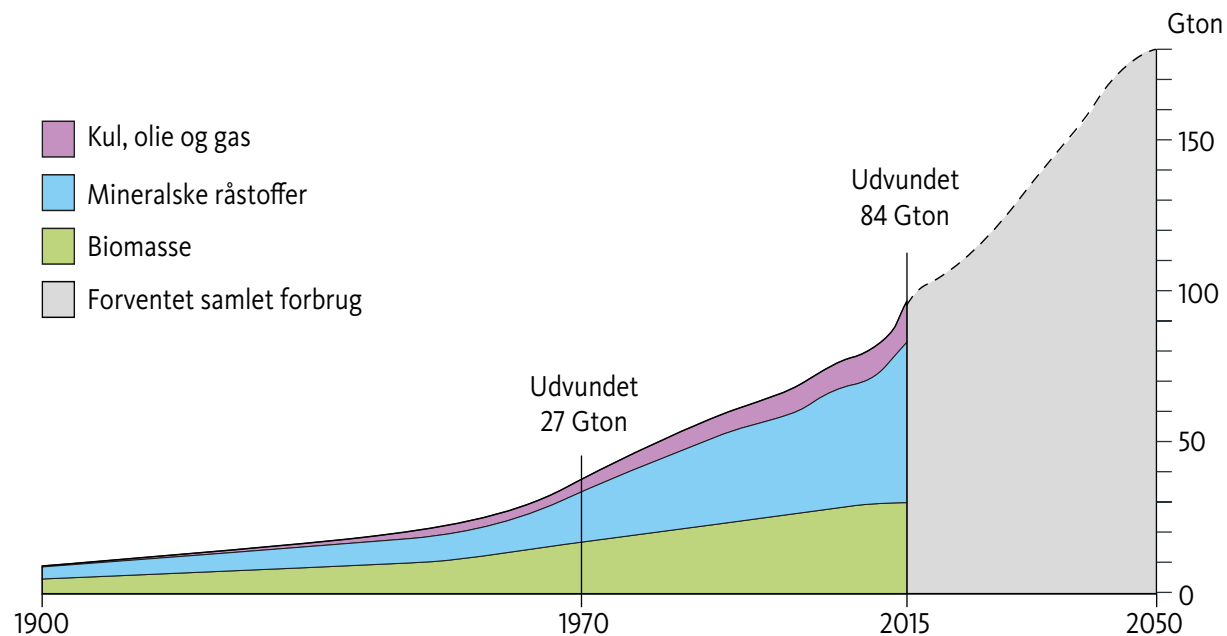
Disse tendenser vil sandsynligvis fortsætte de kommende årtier i takt med at voksende befolkninger i især Asien, men også andre



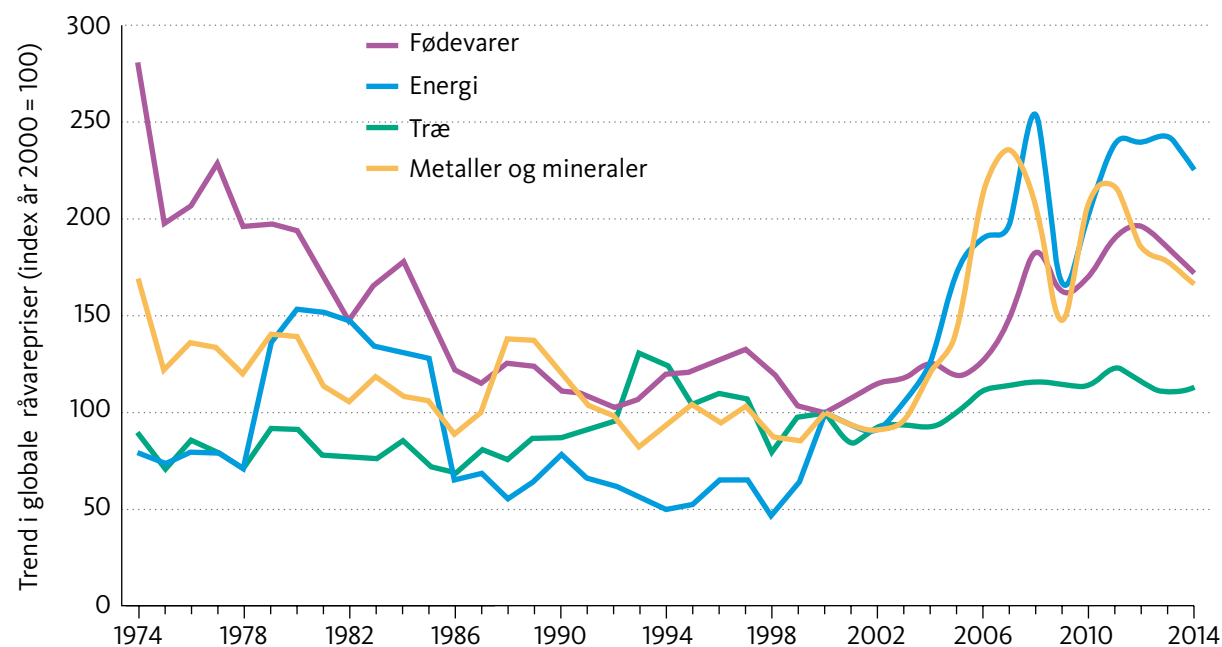
FIGUR 64. Udviklingen i økonomisk vækst fordelt på regioner i perioden 1870 til 2016, målt i bruttonationalprodukt pr. indbygger. Efter Roser (2019).

steder, i stigende grad overtager vestlige forbrugsmønstre. På baggrund af dette forventes den globale økonomiske produktion at tredobles fra 2010 til 2050, mens ressourceforbruget forventes fordoblet inden 2030. Vækstøkonomier afhænger af en uafbrudt tilstrømning af naturressourcer og materialer, fx vand, afgrøder, tømmer, metaller, mineraler og energi. Da de færreste lande selv råder over alle de nødvendige ressourcer, vil tilgængeligheden af ressourcer i stigende

FIGUR 65. Udviklingen i det globale forbrug af råstoffer frem til 2015 og derefter den forventede udvikling frem til 2050. Efter de Wit et al. (2018).



FIGUR 66. Udviklingen i globale råstofpriser for energi, fødevarer, træ samt metaller og mineraler. Efter de Groot et al. (2012) & Schandl et al. (2016).



grad være en kilde til økonomisk sårbarhed. Den voksende globale konkurrence om naturressourcer har siden årtusindskiftet ført til en stigende trend i råvarepriserne på globalt niveau (figur 66). En given ressource er måske ikke i absolutte tal kritisk, men da mange naturressourcer er ujævnt fordelt globalt, kan adgang og priser på ressourcerne udgøre en risiko for konflikter.

Udvinding og udnyttelse af naturressourcer har haft en bred række af negative miljøpåvirkninger. Luft-, vand- og jordforurening, forsurening af økosystemer, tab af biodiversitet, klimaændringer og affaldsproduktion risikerer at sætte økonomisk udvikling og social velfærd under pres.

LINEÆR ØKONOMISK TANKEGANG

Den dominerende økonomiske tankegang i den industrielle verden er lineær. Fokus ligger på at opnå øget velstand baseret på lineære forbrugsmønstre. Det giver en proces, hvor ressourcer bliver udvundet og brugt i produktionen af varer, der bliver solgt til forbrugerne, hvor de forbruges og til sidst ender som affald uden nogen nytte eller værdi (figur 67 og figur 69).

Den lineære model er baseret på den grundantagelse, at der ikke er grænser for vækst, og at de nødvendige naturressourcer til hver en tid er tilgængelige, rigelige, lette at finde og billige at afhænde. Men det er ikke bæredygtigt i en verden, der bevæger sig hen imod og som i mange tilfælde overstiger planetens grænser for ressourceudnyttelse.

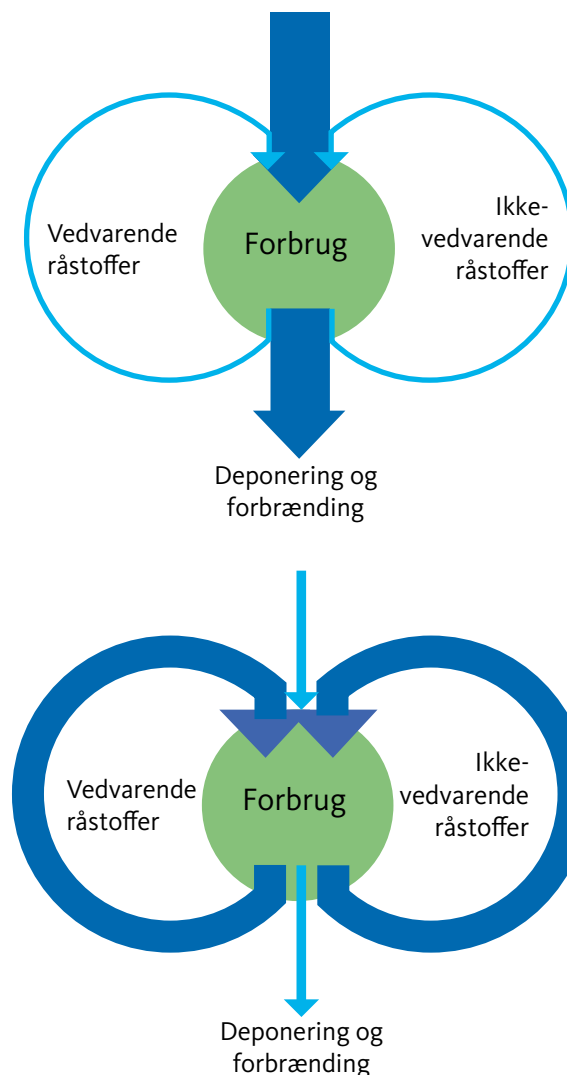
I takt med befolkningstilvæksten og den stigende ressourceudnyttelse er det blevet stadig mere tydeligt, at det lineære system ikke understøtter en bæredygtig udvikling og dermed kan skabe udfordringer for fremtidens forsyningssikkerhed. Ligeledes har det stigende fokus på klimaforandringer og forsyningssvigt af mineralske råstoffer til den teknologiske udvikling ført til en stigende bevidsthed i befolkningerne om, at den lineære økonomiske tankegang til fortsat økonomisk vækst ikke bringer svar på de udfordringer, der opleves. Der er derfor efterspørgsel på en anderledes økonomisk model, hvor fokus er rettet mod ressourceeffektivitet og mindre tab af ressourcer.

CIRKULÆR ØKONOMISK TANKEGANG

En mere cirkulær økonomisk tankegang kan

FIGUR 67. Ved lineær økonomi er der et højt input af nye råstoffer og et højt output til deponering og forbrænding. Af MiMa (2019).

FIGUR 68. Ved cirkulær økonomi er der et lavt input af råstoffer og lavt output til deponering og forbrænding. Af MiMa (2019).



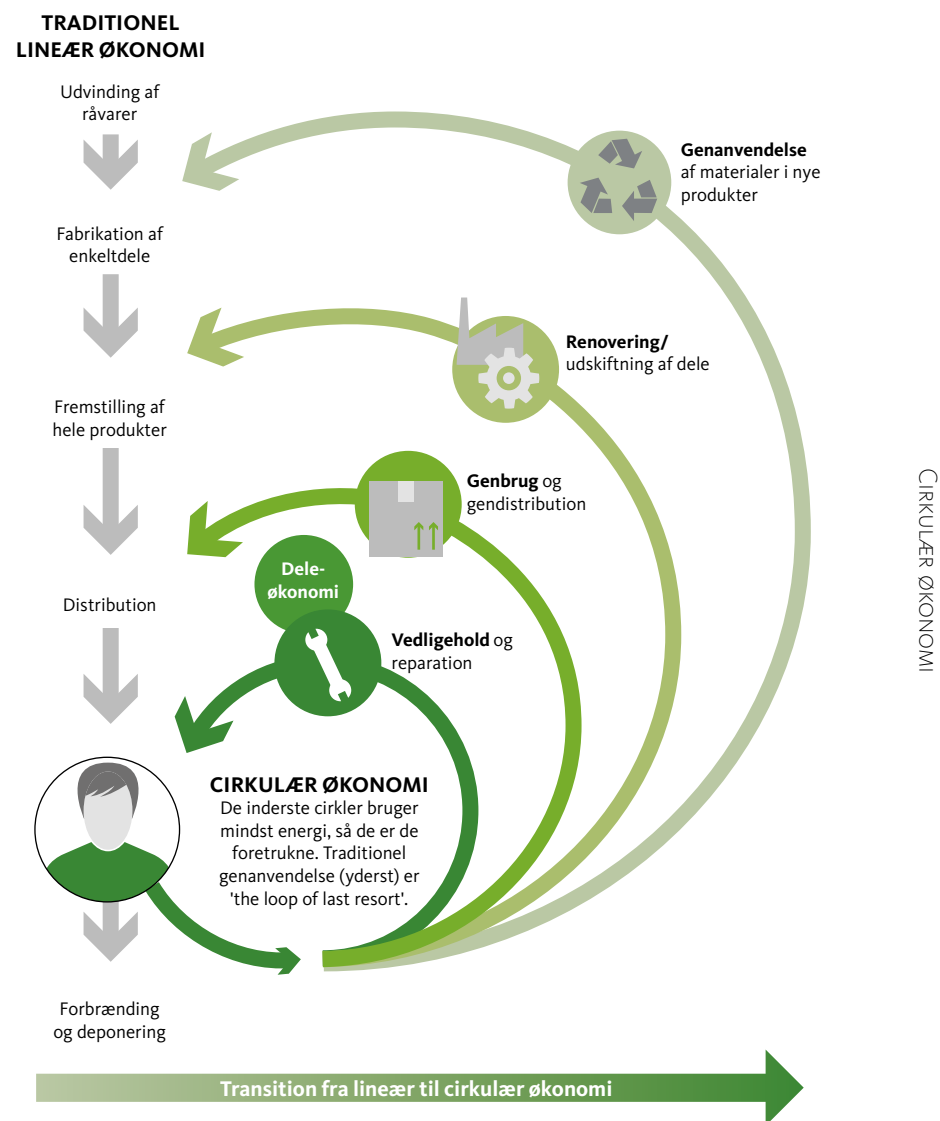
være svaret på en del af de udfordringer, som den lineære økonomi skaber for vores ressourceforbrug, klima, miljø og samfund. Principperne i en cirkulær økonomi indebærer, at materialer og produkter recirkuleres, og at spildet dermed minimeres (figur 68 og figur 69).

Den cirkulære økonomi sigter mod at opretholde brugen af produkter, komponenter og materialer, så de vidt muligt bevarer deres værdi. Det betyder, at behovet for nye tilgange af materialer og energi minimeres, samtidig med at miljøbelastningen i forbindelse med ressourceudvinding, emission og affald reduceres.

En vigtig pointe i den cirkulære økonomi er, at forbruget af råstoffer skal afkobles fra den økonomiske vækst. I den cirkulære økonomi afkobler virkshederne derfor kravet om øget vækst fra kravet om øget materialeforbrug. Det sker ved at genanvende råstoffer og materialer, så man får mere værdiskabelse ud af mindre ressourceforbrug.

En omstilling til cirkulær økonomi er vigtig og nødvendig for at yde et ambitiøst bidrag til realiseringen af FN's 17 verdensmål, hvor især verdensmål 12 peger på nødvendige-

FIGUR 69. I en lineær økonomi er genanvendelse ikke tænkt ind og de råstoffer, som produkterne består af, ender med at blive brændt eller deponeret, når de er udtjent. Formålet med cirkulær økonomi er at sikre, at ressourcerne bliver inde i et kredsløb og til stadighed kan genanvendes. For de mineralske råstoffer begrænser fysiske og økonomiske forhold omfanget af genanvendelse. Efter Wittrup (2016).



FIGUR 70. Cirkulær økonomi i billeder.

A. Mange hårde hvidevarer kasseres, når de enten går i stykker eller ikke opfylder familiens krav. Kun sjældent bliver de repareret, fordi det er for dyrt, og de bruges heller ikke til at lave fx en ny vaskemaskine. I den cirkulære økonomi tænkes genbrug og genanvendelse ind i designfasen.

B. Mange bilejere bruger kun deres bil meget lidt. For dem kan delebiler være et attraktivt alternativ. I København blev delebil-konceptet sat i system i 2018 af flere private aktører.

C. Elektriske dele-bycykler giver mennesker mulighed for at komme klima- og miljøvenligt rundt i byen.

D. Vi genbruger mere og mere. Her en kvinde som køber genbrugstøj.

E. Vi sorterer mere og mere – og kan derfor genanvende mere og mere. Her ses affaldscontainere til forskellige materialer, så genanvendelsen bliver nemmere.

F. Rensede mursten klar til at blive brugt i nyt byggeri.

Fotos fra Shutterstock.



den af en ansvarlig produktion og forbrug.

BEHOV FOR BEDRE PRODUKTDESIGN

En af grundpillerne i cirkulær økonomi er, at der allerede i designet af et produkt indgår forestillinger om, hvordan produktet i hele sin livscyklus kan blive genbrugt, repareret og til sidst genanvendt i nye produkter frem for at blive smidt ud, det såkaldte vugge til vugge princip.

En del af udfordringen i genanvendelsen af de produkter, der produceres i dag, er, at de består af komplekse blandinger af forskellige råstoffer, som gør det særdeles vanskeligt og teknisk udfordrende at skille dem ad med henblik på genanvendelse. Derfor er det helt grundlæggende, at der allerede i designet af fremtidens produkter tages højde for, at de råstoffer, der indgår i et produkt, kan skilles ad og genanvendes.

Hvis produktdesignet lever op til kravene om fremtidig genanvendelse, er der langt større sandsynlighed for, at de naturressourcer og råstoffer, der går til produktionen af varen, kan blive brugt på en måde, så de recirkuleres og kan indgå i nye produkter og ikke ender på lossepladsen (figur 70. a).

Ressourcerne forvaltes dermed effektivt og bæredygtigt i hele deres livscyklus, og den nødvendige tilgang af nye naturressourcer til produktionen reduceres betragteligt, samtidig med at den økonomiske vækst og udvikling opretholdes.

En cirkulær økonomi giver således muligheder for at skabe velfærd, vækst og beskæftigelse, samtidig med at presset på miljøet reduceres. Konceptet kan i princippet anvendes på alle former for naturressourcer, både de biologiske og de abiotiske materialer såvel som vand og jord. Men fysiske love og højt energiforbrug begrænser mulighederne for genbrug og genanvendelse af mineralske råstoffer.

OMSTILLING FRA EJE TIL LEJE

Et andet bærende princip i den cirkulære økonomi er at få forbrugerne til at overgå fra et ønske om at eje ting til et ønske om at have adgang til services.

I den lineære økonomi er virksomheders forretningsmodel, at få forbrugerne til at købe så mange varer som muligt og dermed overdrage ejerskabet af produktet til forbrugeren. I den cirkulære økonomi vil virksom-

hederne i stigende grad blive ved med at eje produktet og i stedet leje de services, der er forbundet med produktet, til forbrugeren. Produktet kan leveres tilbage til producenten, der kan reparere, videresælge eller genanvende dele af produktet og således skabe værdi igen og igen.

NØGLEBEGREBER

- Lineær økonomi
- Cirkulær økonomi
- Vugge til vugge-princip
- Eje til leje

REFERENCER

[serethink-188158](#)

de Groot, H. L. F., Rademaekers, K., Smith, M., Katarina Svatikova, O. W., Obersteiner, M., Marcarini, A., ... Lise, W. (2012). *Mapping resource prices: the past and the future - Final report* (Nr. ENV.G.1/FRA/20410/0044). European Commission - DG Environment.

De Wit, M., Hoogzaad, J., Ramkumar, S., Friedl, H., & Douma, A. (2018). The Circularity Gap Report: An analysis of the circular state of the global economy. Circle Economy: Amsterdam, The Netherlands. Hentet fra <https://www.legacy.circularity-gap.world/2018-report>

Roser, M. (2019). Economic Growth. Hentet fra <https://ourworldindata.org/economic-growth>

Schandl, H., Fischer-Kowalski, M., West, J., Giljum, S., Dittrich, M., Eisenmenger, N., ... Fishman, T. (2016). *Global material flows and resource productivity - Assessment Report for the UNEP International Resource Panel*. UNEP.

Wittrup, S. (2016). Virksomheder lytter nu til affaldsnørderne: Reduce, reuse....rethink. Hentet fra <https://ing.dk/artikel/virksomheder-lytter-nu-affaldsnoerderne-reduce-reu->

KAPITEL 9



FIGUR 71. Affaldssortering øger muligheden for genbrug og genanvendelse af materialer fra udtjente produkter. Shutterstock.

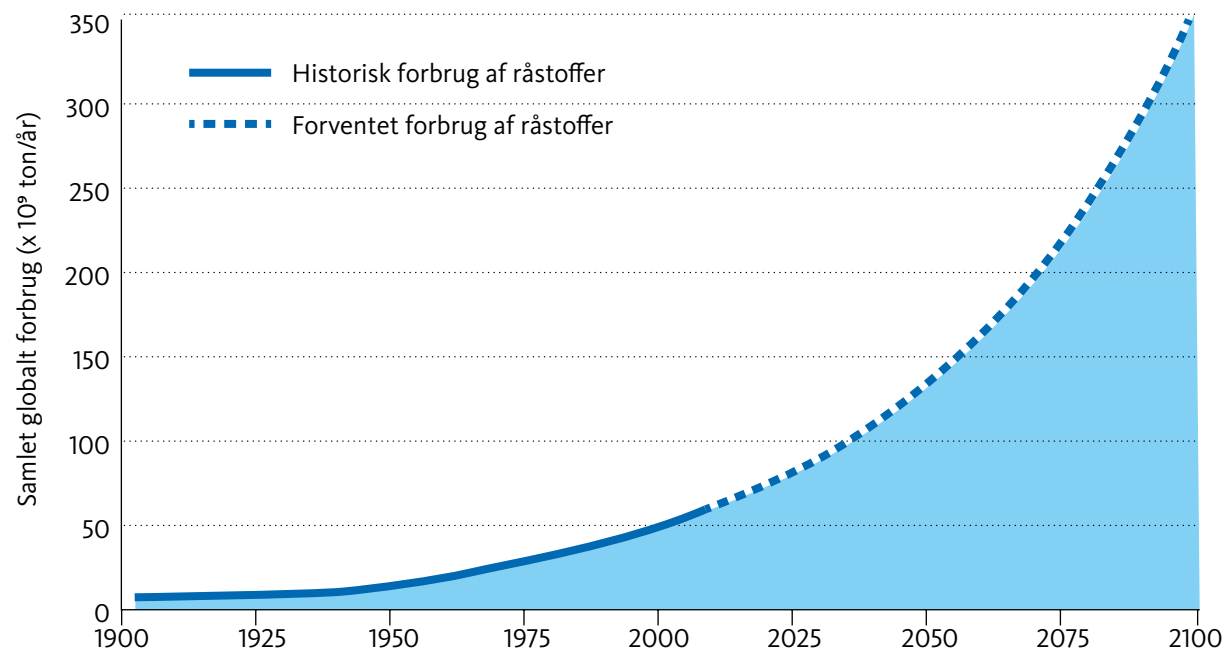
AFFALD SOM RESSOURCE

HUSHOLDNINGS- OG INDUSTRIAFFALD ER RESSOURCER

Metaller og andre mineralske råstoffer kan ikke dyrkes, og derfor har vi som samfund kun de mineralske råstoffer til rådighed, som kan udvindes fra undergrunden. Med verdens stigende befolkningstal, voksende økonomier, øget urbanisering og nye teknologier har der igennem de seneste 100 år været et eksponentielt voksende forbrug af mineralske råstoffer og dermed behov for at grave stadig større mængder råstoffer op af jorden.

Geologer og mineselskaber skal hele tiden finde nye mineralforekomster og bryde stadig større mængder af disse primære ressourcer. Det er derfor nødvendigt at implementere bæredygtige principper i alle mineralindustriens led, fra minedrift, smeltning, raffinering til forarbejdning og genanvendelse. Det indebærer også, at vi skal betragte vores husholdnings- og industriaffald som vigtige kilder til mineraler og metaller. De ressourcer, der ligger gemt i affaldet, kaldes for de sekundære råstoffer.

Husholdningsaffald er det affald, som familier og enkeltpersoner hver dag kasserer og



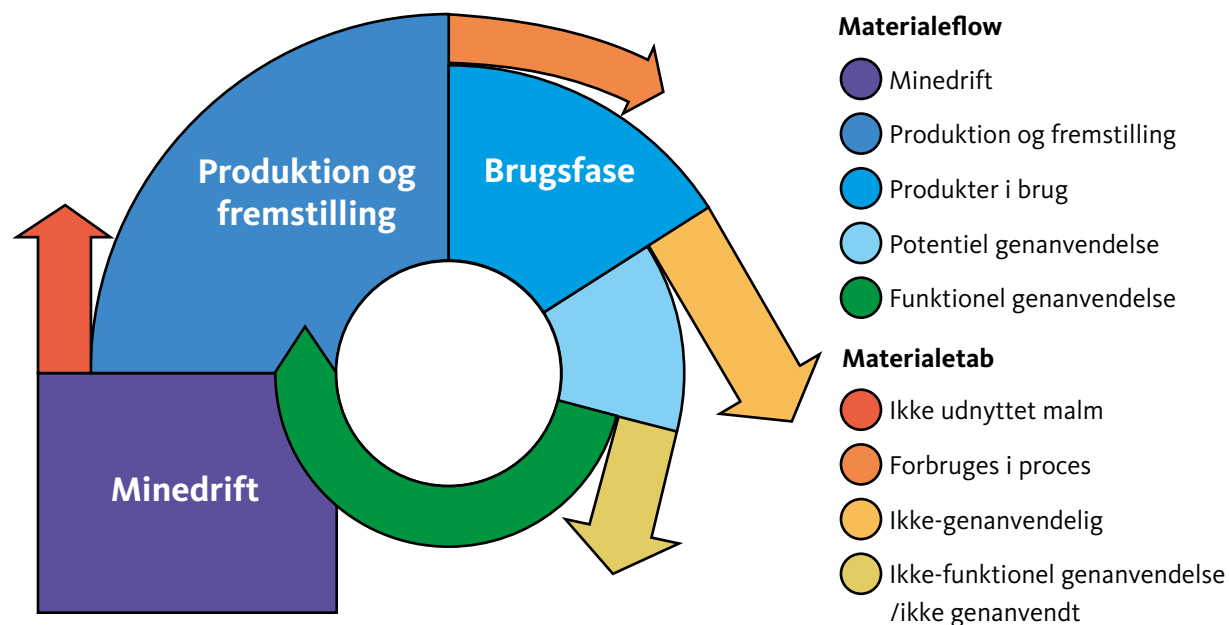
omfatter køkkenaffald, brugt tøj, møbler, hårde hvidevarer, elektronik m.m. Husholdningsaffaldet indeholder også store mængder organisk materiale, som kan nyttiggøres, men dette kapitel handler kun om de mineralske råstoffer, vi smider ud, og som eventuelt kan genbruges eller genanvendes. Industriaffald er det affald, der opstår i forbindelse med produktionen af varer. Det kan være jernstumper fra smeden, træ fra tømmeren og gamle madvarer fra supermarkedet.

FIGUR 72. Udviklingen i det samlede globale forbrug af råstoffer som metaller, træ og bomuld m.m. målt i mia. ton pr. år. Bemærk at fremskrivingerne viser en nærmest eksponentiel stigning frem mod 2100. Efter Qualman (2019).

For ikke så mange år siden blev alt affald kørt på lossepladsen. I dag betragter vi affald som en ressource, fordi genanvendelse af affaldet gavner miljøet, reducerer behovet for nyproducerede råstoffer og giver økonomiske gevinster for samfundet.

I Danmark sorterer alle i stigende omfang affald, både i vores egne skraldespande og på genbrugspladserne. Navnet er dog lidt misvisende, fordi det meste af affaldet ikke bliver genbrugt, men snarere genanvendt, brændt eller deponeret. Genanvendelse bruges om materialer, der kan forarbejdes til nye produkter, fx glas der smeltes om til nye glasprodukter, mens genbrug er de produkter, som den ene forbruger kasserer, og som bruges af en anden forbruger til samme formål. Det skal dog bemærkes, at genanvendelse har fået en stor plads i danskernes forbrugsmønstre i form af salg på internettet, loppemarkeder, genbrugsbutikker og andre steder, hvor brugte ting skifter hænder. På et tidspunkt skal disse varer genanvendes.

Men der er store tab, når vi genanvender. Ikke mindst for metallerne er der meget store råstofftab i det cirkulære materialekredsløb, også selvom vi bliver bedre til at



sortere (figur 73). Det skyldes både, at der mangler viden om metallerne i de varer, vi kasserer, men også fordi nogle af metallerne simpelthen ikke kan udskilles hverken af forbrugeren eller af de virksomheder, der forarbejder affald til nye råstoffer. Dette er bl.a. fordi, metallerne ofte udgøres af legeringer, dvs. blandinger af metaller. Når vi fx kasserer en stegepande, som er lavet af stål, så er stål en fællesbetegnelse for en blanding af jern tilsat nogle metaller, som i dette

FIGUR 73. Principperne for hvor der for de enkelte råstoffer sker materialetab. For eksempel tabes der allerede noget kobber i minen og ved oparbejdningen; der tabes igen noget i de fabrikker, som forarbejder kobberet til fx el-kabler; under brug går nogle af kablerne i stykker, og ikke alle indsamles efter endt brug. Endelig sker der tab, når man smelter kobberledningerne om. Disse tab bevirker, at kun en lille del af det kobber, der blev udvundet fra minen, kan genanvendes. Baseret på Ciacchi et al. (2015).

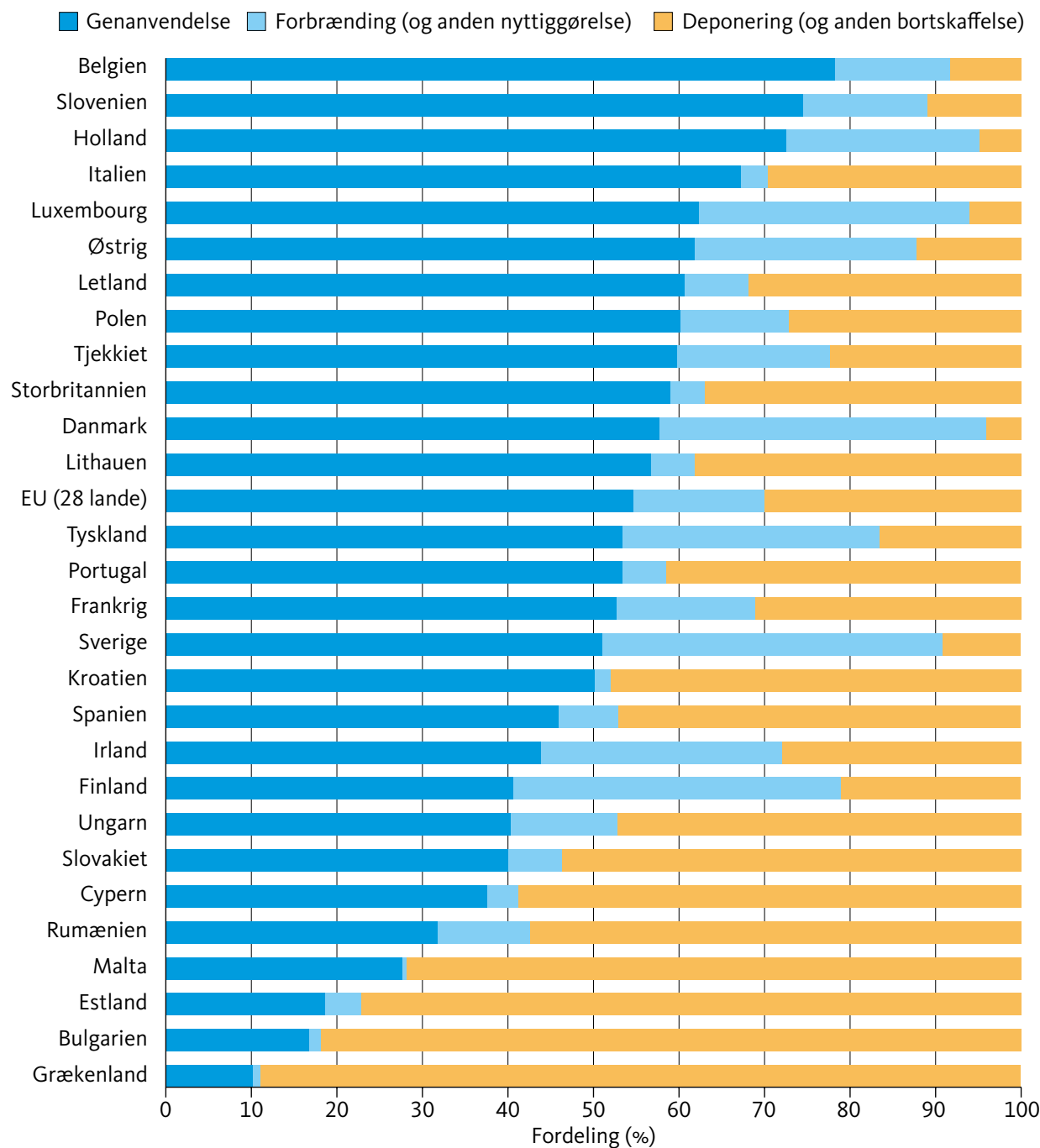
FIGUR 74. Oversigt over EU28-landenes håndtering af affald. Data fra Eurostat (2019).

tilfælde gør panden varmeledende og rustfri. Når stegepanden kasseres, smider man ikke kun jern ud, men også de andre metaller, der er i legeringen. Når panden er havnet i 'småt metal'-containeren og sendes til omsmelting, forbliver mange af disse legeringsmetaller i jernsmelten og bliver dermed ikke genanvendt. Der sker altså et materialetab under genanvendelsen, som skal erstattes af nye metaller, der er udvundet fra en mine.

Overordnet kan man sige, at der er tre måder affald kan håndteres på, nemlig genanvendelse, forbrænding eller deponering. Fordelingen af disse tre måder varierer meget fra land til land, men for Danmark gælder, at den del der går til genanvendelse øges hvert år, mens den del der skal deponeres reduceres (figur 74).

URBAN EXPLORATION OG URBAN MINING

Udvinding af råstoffer fra samfundets affald omtales ofte som urban mining. Det er fx urban mining, hvis kommunen eller virksomheder udgraver gamle lossepladser og sorterer indholdet i metaller, træ, byggematerialer og jord. Urban mining udføres endnu kun på forsøgsbasis i Danmark.



Der er mange lighedspunkter mellem urban mining og minedrift, herunder at kun en del af det materiale, der graves op, har værdi, mens den øvrige del er værdiløs. Derfor må man ligesom ved almindelig minedrift først finde ud af, hvad lossepladsen indeholder og derefter beregne, hvor meget der kan genanvendes og til hvilken pris, og hvor meget der ikke kan bruges, og om dette skal gendeposeres.

Ingen ved med sikkerhed, hvad der findes i de gamle lossepladser i Danmark, og derfor er det nødvendigt først at finde ud af, hvordan de forskellige værdifulde dele af indholdet kan separeres ud på en økonomisk rentabel måde. Denne fase svarer til de forundersøgelser, mineselskaberne foretager, inden en mine kan etableres; sådanne undersøgelser kalder mineindustrien for mineralefterforskning. Når de tilsvarende undersøgelser udføres på lossepladser, hvor man ønsker at lave urban mining, taler man om 'urban exploration'.

Ved urban mining-aktiviteter sorteres de store materialegrupper med maskiner, men der er stadig behov for betydelig manuel sortering af komponenter, maskiner og materia-

FIGUR 75. Der ligger værdier gemt i udtjent IT-udstyr.

A. Assorterede brugte elektriske husholdningsapparater og computere indsamlet til genanvendelse og urban mining.

B. Gamle udtjente mobiltelefoner til salg i genbrugsbutik i Athen, Grækenland.

C. Chippen i Dankort indeholder guld og andre metaller. Som regel klipper vi dem i stykker og smider dem ud. Dermed smider vi også vigtige råstoffer ud.

Fotos fra Shutterstock.



ler (figur 75. a, b).

Næsten alle grundstofferne i det periodiske system findes på enhver genbrugsstation i Danmark. Men hovedparten sidder i kunstprodukter som plastik og i metallegeringer som komponenter eller materialer i de tusindvis af forskellige produkter, vi omgiver os med. Dette er i modsætning til, hvad der sker ved traditionel minedrift, hvor kobber fx udvindes fra 2-3 mineraler, som måske også indeholder andre metaller, fx sølv, guld, nikkel og zink. Antallet af metaller er få, og processen er relativ simpel sammenlignet med de yderst komplekse og varierede sammensætninger af metaller, som skal udvindes fra lossepladser ved urban mining. Herudover indeholder lossepladsen også alle de ting, vi ikke længere kan eller vil genbruge eller genanvende. Derfor vil de mange forskellige affaldsprodukter, man får ved at udgrave en losseplads, medføre at materialerne skal behandles forskelligt for at få metallerne ud, så de efterfølgende kan genanvendes.

Effektiv urban mining er derfor en stor udfordring på grund af materialernes heterogenitet og komplekse sammensætning. Foreløbig er det slet ikke muligt at udnytte

det hele. Hvis det skal være bæredygtigt, skal hovedparten af det, der er deponeret på lossepladsen, genanvendes. Hensynet til fremtidige generationer gør det nødvendigt at finde nye teknologiske løsninger, som sikrer bæredygtig råstofudnyttelse, også fra vores lossepladser. På sigt er cirkulær økonomi, herunder urban mining, en af disse løsninger. Dette princip, hvor affaldet og kasserede produkter hele tiden tænkes ind som råstoffer til andre produkter, omtales ofte som vugge til vugge-princippet. Man kan sige det er modsætningen til princippet for det lineære råstofforbrug, som omfatter fra vugge til grav.

INDSAMLING ER OGSÅ EN UDFORDRING

Bæredygtig ressourceudnyttelse er ikke kun udfordret af de tekniske vanskeligheder ved at adskille legeringsmetaller fra hinanden. Udfordringerne er også knyttet til, at vi ikke er gode nok til at indsamle og sortere affaldet. Dette er især et problem for de små genstande. Tag fx dit Dankort. Hvad gør du med det, når det skal udskiftes? Du gør sikkert, som banken anbefaler, klipper det i stykker og smider det i skraldespanden (figur 75. c). Da der er guld i chippen, smider

du med denne handling 0,002 g guld væk. Problemet er bare, at i 2014 blev der udstedt 2,6 mio. betalingskort i Danmark. Det vil sige, at hvis vi alle smider vores kreditkort ud efter endt brug, bliver der alene i Danmark tabt ca. 5,2 ton guld om året. Samme problemstilling gælder for de forskellige gadgets som smartphones, høre telefoner og minihøjtalere, som vi gemmer et par år, inden vi en dag rydder op og smider dem i skraldespanden. Selvom vi bliver bedre til at aflevere elektronik til genbrug, så er der store tekniske udfordringer i at splitte små elektroniske komponenter ad og få delene sorteret ud, så det kan genanvendes på en bæredygtig måde.

NØGLEBEGREBER

- Genanvendelse
- Genbrug
- Urban exploration
- Urban mining
- Husholdningsaffald
- Industriaffald
- Legeringer
- Materialetab
- Bæredygtighed
- Vugge til grav

REFERENCER

Ciacci, L., Reck, B. K., Nassar, N. T., & Graedel, T. E. (2015). Lost by Design. *Environmental Science & Technology*, 49(16), 9443–9451.

Eurostat. (2019). Municipal waste by waste management operations. Hentet fra https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasmun&lang=en

Golev, A., & Corder, G. D. (2014). Global systems for industrial ecology and recycling of metals in Australia: Research report. *Prepared for Wealth from Waste Cluster, by the Centre for Social Responsibility in Mining, Sustainable Minerals Institute, The University of Queensland. Brisbane, Australia*. Hentet fra <http://wealthfromwaste.net/wp-content/uploads/2014/11/Global-Systems-for-Industrial-Ecology-and-Recycling-of-Metals-in-Australia-2014.pdf>

Qualman, D. (2019). Another trillion tonnes: 250 years of global material use data. Hentet fra <https://www.darrinqualman.com/global-material-use>

KAPITEL 10



FIGUR 76. Innovation starter ofte som et samarbejde mellem mennesker. Shutterstock.

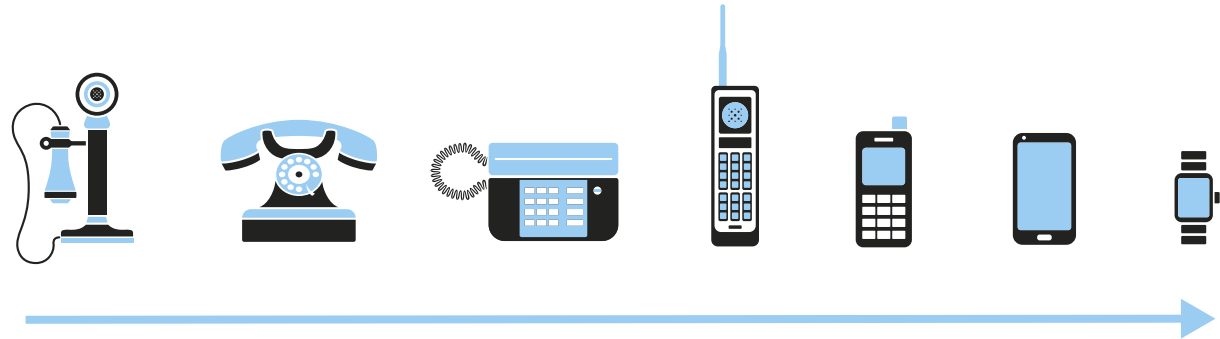
INNOVATION – BEGREBER OG EKSEMPLER

INNOVATIONSBEGREBER

Innovation betyder at skabe noget, der ændrer den etablerede opfattelse eller metodiske tilgang til at løse en given opgave. Innovation er derfor det at kunne kombinere allerede kendte ressourcer og viden på en ny måde og ikke mindst at få innovationen til at fungere i den virkelige verden. Det betyder, at innovation ikke kun er at opfinde helt nye tilgange til en problemstilling, men i lige så høj grad at forbedre og nytænke allerede kendte og anvendte metoder til løsning af problemstillingen.

Helt nye innovationer, som fx den første vindmølle til energiproduktion, betegnes radikale innovationer og medfører, at vi fremover gør tingene på en helt anderledes måde end før innovationen. En innovation, der forbedrer et allerede eksisterende produkt, som fx en specialiseret havvindmølle, betegnes en inkrementel innovation.

En succesfuld radikal innovation vil ofte efterfølges af en sværm af inkrementelle innovationer. Eksempelvis blev den første smartphone efterfulgt af en lang række forbedrede modeller på markedet, der med små inkrementelle innovationer, som forbedret



skærmteknologi og kunstig intelligens, gør dem bedre og mere attraktive for forbrugeren end forgængeren.

KREATIV DESTRUKTION OG DISRUPTIV ØKONOMI

I den post-industrielle, IT-baserede verden sker forandringerne inden for en række forretningsområder meget hurtigere end tidligere. Velestimerede og økonomisk lukrative forretningsmodeller kan med en enkelt innovativ app til smartphonen fra konkurrenten risikere at blive udkonkurreret.

Kreativ destruktion ligger i forlængelse af innovationsbegrebet og beskriver den påvirkning, som radikal innovation kan have på allerede eksisterende måder at gøre tingene

FIGUR 77. Udviklingen inden for telefonen er et godt eksempel på innovation. Den første telefon var en radikal innovation, der siden hen har undergået et utal af inkrementelle innovationer og også et par mindre radikale innovationer. Man kunne ligeledes hævde at opfindelsen af mobiltelefonen var en radikal innovation, fordi den som produkt stort set har erstattet den oprindelige stationære telefon. Shutterstock.



FIGUR 78. Innovation i billeder.

A. Blockbuster var engang en førende butik for udlejning af film; det var inden online streamingtjenester fik tag i forbrugerne.

B. I 2019 har streamingtjenester stort set erstattet de fysiske filmudlejningsbutikker. Her i skikkelse af Netflix.

C. Udvikling af moderne batterier har ændret vores adfærd. Nu kan vi arbejde, kommunikere, indsamle data hvor som helst og når som helst. Fotos fra Shutterstock.



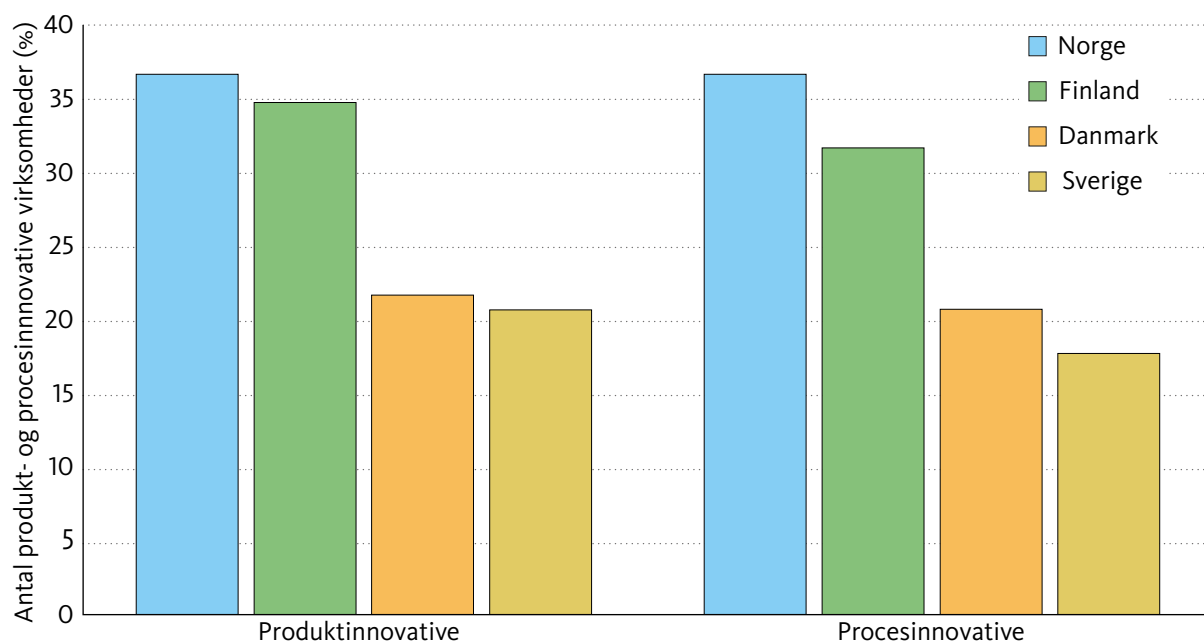
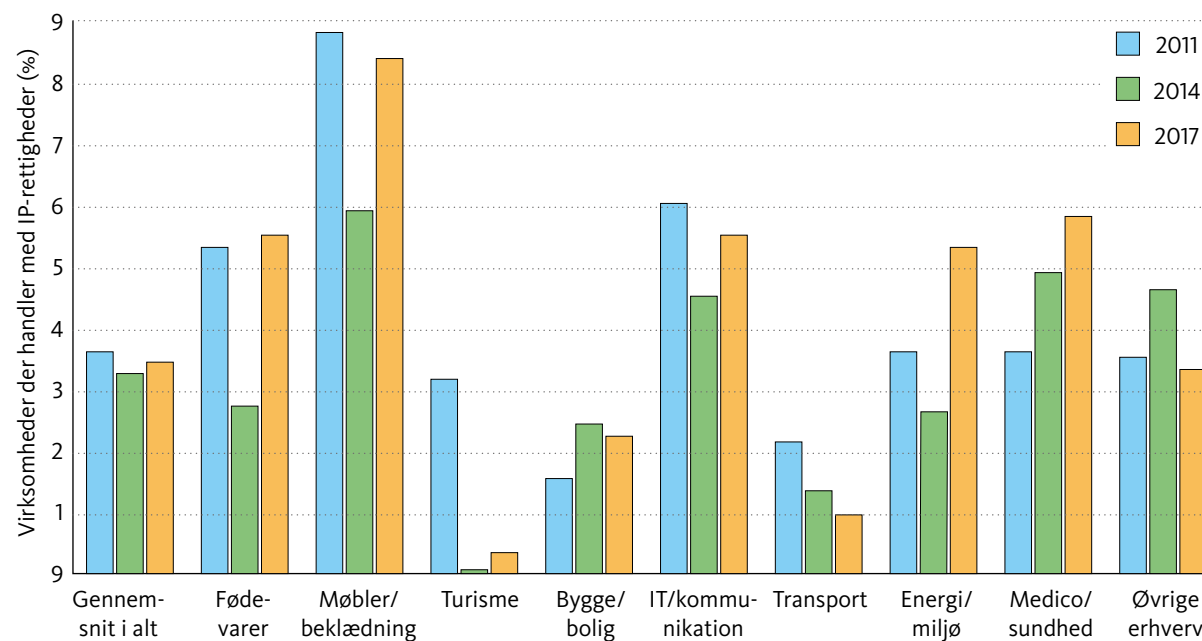
på (figur 78. a, b). Eksempelvis ødelagde opfindelsen og udbredelsen af mobiltelefonen på relativt kort tid næsten totalt markedet for fastnettelefoner. Ligeledes har e-mail stort set undergravet markedet for håndskrevne breve og dermed en stor del af postvæsenets forretningsgrundlag og økonomi. Begge er eksempler på kreativ destruktion, dvs. at økonomisk vækst ikke kun betyder tilvækst af nye job, da en række eksisterende job bliver overflødiggjorte eller forsvinder.

I praksis vil succesfulde radikale innovationer uundgåeligt føre til ændrede produktions- og handelsmønstre og dermed til ændrede arbejdsmarkedsforhold, et fænomen der betegnes som disruptiv økonomi. Disruptiv økonomi kan have store konsekvenser for de påvirkede brancher, der som respons må forsøge at tilpasse sig den nye virkelighed eller se sig udkonkurreret. Eksempler på disruptiv økonomi er web-platformer som Uber, Airbnb og lignende, der på rekordtid har taget store markedsandele fra de etablerede taxi- og hotelvirksomheder (figur 78. c).

DISRUPTIONSRÅDET

I Danmark er der meget der tyder på, at den

FIGUR 80. Andel af virksomheder der handler med IP-rettigheder. Udvikling i handel med IP-rettigheder fordelt på brancher for 2011, 2014 og 2017. Efter Danmarks Statistik (2018).



FIGUR 79. Sammenligning af henholdsvis produktinnovative og procesinnovative virksomheder i 2016 for Norge, Finland, Danmark og Sverige. Efter Danmarks Statistik (2018).

disruptive økonomi allerede er en realitet, og at den i stigende grad påvirker produktionen, forbruget og arbejdsmarkedet. Derfor nedsatte regeringen i foråret 2017 Disruptionsrådet, der skal finde løsninger på, hvordan de nye muligheder gribes, og hvordan udfordringerne tackles på en bæredygtig måde i en verden under stadig forandring, uden at den sociale sammenhængskraft i det danske samfund skævvrides.

MÅLING AF INNOVATION I PRAKSIS

Vi kender alle til, at noget vi er vant til at gøre på én måde, pludseligt kan gøres på en anden måde. Men hvornår er noget en innovation? Det findes der ikke en klar definition på. Ifølge Danmarks Statistik er der tale om innovation, hvis der kan skabes nye eller bedre produktionsprocesser, eller hvis produkter kan markedsføres på en ny måde. Nogle af disse innovationer bliver registreret som patenter, brugsmodeller, varemærker og design. Når produktet er registreret på en af disse måder, får den der har registreret produktet en ret til produktet. Under et kaldes det for en IP-rettilighed (Intellectual Property, på dansk: intellektuel ejendomsret). IP-rettiligheder giver ejeren en værdi,

som kan handles. Derfor bruger man antallet af solgte og købte IP-rettiligheder som mål for, hvor innovative produktionsvirksomheder er. For mange af de store medicinal- og elektronikvirksomheder og virksomheder inden for den grønne energisektor er det vigtigt, at de kan købe sig til den viden, som en IP-rettilighed giver dem ret til at bruge. Danmarks Statistik har opgjort fordelingen af IP-rettiligheder på ni forskellige brancher i Danmark (figur 80). Der vil dog ofte være store variationer mellem de enkelte år, som det også ses på figuren.

Nationaløkonomerne bruger også IP-statistik til at sammenligne hvilke lande, der er mest innovative. En sammenligning mellem Norge, Finland, Sverige og Danmark fra 2016 viser, at Norge og Finland har flest innovative virksomheder, mens Sverige og Danmark ligger en del efter (figur 79). Nationaløkonomerne skelner mellem procesinnovation og produktinnovation. Et eksempel på en procesinnovation kan være, at Novo Nordisk udvikler en ny metode til fremstilling af insulin, mens et eksempel på produktinnovation kan være, at Grundfos, som fremstiller pumper, udvikler en ny teknik, så pumperne bliver mere effektive.

NØGLEBEGREBER

- Innovation
- Radikal innovation
- Inkrementel innovation
- Kreativ destruktion
- Disruptiv økonomi
- Disruptionsrådet
- Innovation
- Intellectual Property (IP), IP-rettilighed
- Patent
- Produktinnovativ virksomhed
- Procesinnovativ virksomhed
- Varemærke

REFERENCER

Danmarks Statistik. (2018a). Danmark halter bagud med hensyn til innovation. *Nyt fra Danmarks Statistik*, (102), 1–2.

Danmarks Statistik. (2018b). Øget handel med IP-rettiligheder i energi og medicin. *Nyt fra Danmarks Statistik*, (403), 1–2.

KAPITEL 11



FIGUR 81. Tagetage isoleret med mineraluld giver et væsentligt lavere energiforbrug. Shutterstock.

DANSKE INNOVATIONER MED MINERALSKE RÅSTOFFER

DANMARKS MINERALSKE RÅSTOFFER ER VÆSENTLIGE I DEN INDUSTRIELLE INNOVATION

Danmark opfattes ofte, som et land uden mineralske råstoffer. Men det bygger på to udbredte misforståelser: dels at mineralske råstoffer er metaller, som kun udvindes fra miner, der ligger i store bjergområder, og dels at verdens betydeligste råstofgruppe, efter vand, målt i både tonnage og penge, nemlig sand og grus, ofte ikke opfattes som mineralske råstoffer.

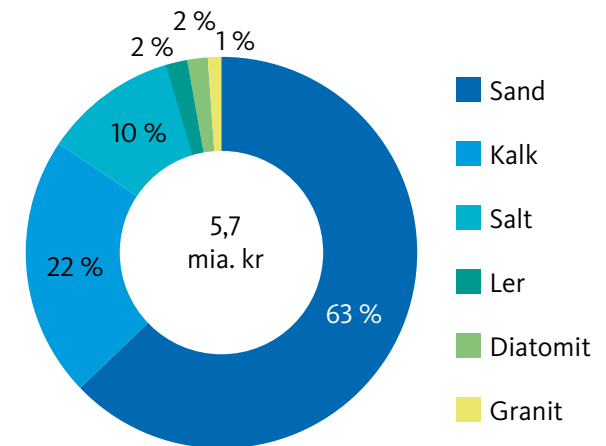
Danmark producerer mange mineralske råstoffer (figur 82, figur 83, figur 84, figur 85, figur 86 og figur 87). Geologisk set domineres de øverste lag i Danmark af sand, grus og sten, som er aflejret under de forskellige istider. Men herudover findes der også store forekomster af kridt, kalksten, salt, ler, moler og granit i den danske undergrund. Disse meget forskellige råstoffer bliver brugt til fremstilling af mange forskellige produkter og danner grundlag for mange arbejdspladser, ligesom eksport af råvarerne bidrager betydeligt til den danske økonomi.

Fælles for alle disse mineralske råstoffer er, at de kun bruges, fordi der er nogen, der har fundet på en metode til at forarbejde dem

til et efterspurgt produkt. På den måde kan produkterne sælges til en højere pris end de omkostninger, der er forbundet med at få dem op af jorden og forarbejdet.

For eksempel bruges sand, grus og sten til beton, glas og isoleringsmaterialerne stenuld og glasuld. Kridt og kalksten bruges til fremstilling af cement, til jordbrugskalk og som fyldstof i maling og papir. Ler bruges til fremstilling af mur- og teglsten. Salt anvendes både i husholdninger, fødevareindustrien og i den kemiske industri. Granit, som brydes på Bornholm, bruges til bl.a. brosten og fliser. Herudover har Danmark store forekomster af energiråstofferne olie og gas, der begge har haft og har stor betydning for Danmarks økonomiske udvikling.

Når råstofferne kan bruges, er det også et resultat af forskellige typer af innovation. I mange tilfælde er den måde råstofferne bruges på udviklet over lang tid og uden, at der kan peges på bestemte personer eller virksomheder, der har haft afgørende betydning; det gælder fx brug af salt, anvendelse af ler til teglprodukter, kalk til landbrugsjord, fremstilling af cement m.m. Det skal dog understreges, at innovation hele tiden påvirker,



FIGUR 82. Produktionen af danske råstoffer på land og på havbunden har stor økonomisk betydning for Danmark, ligesom det har stor betydning for udbygningen af infrastruktur. Efter Kallesøe et al. (2016).

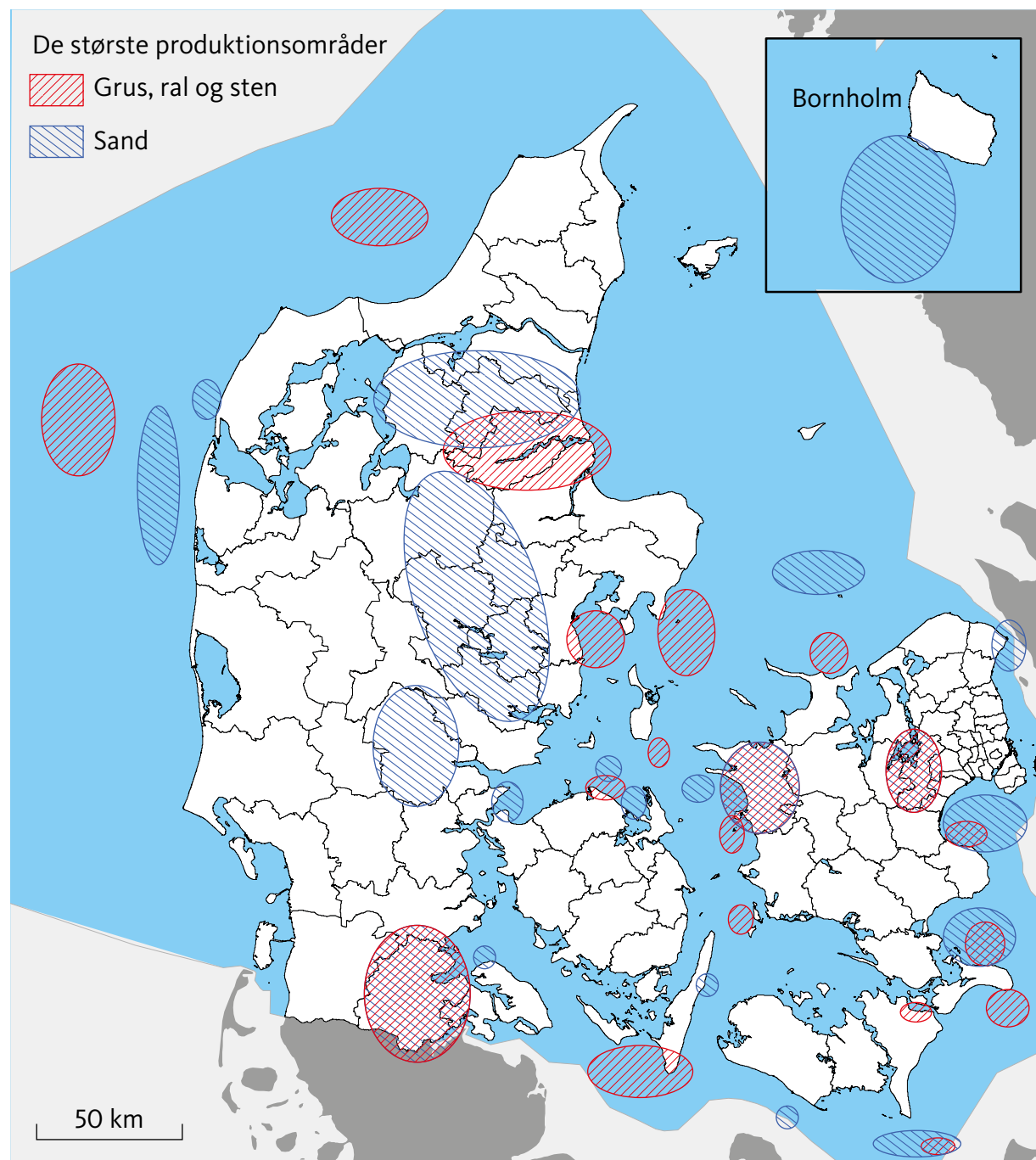
FIGUR 83. Produktionen af sand, grus, ral og sten som den er geografisk fordelt i Danmark. Efter Kallesøe et al. (2016).

hvordan produkterne fremstilles og forbedres (inkrementel innovation).

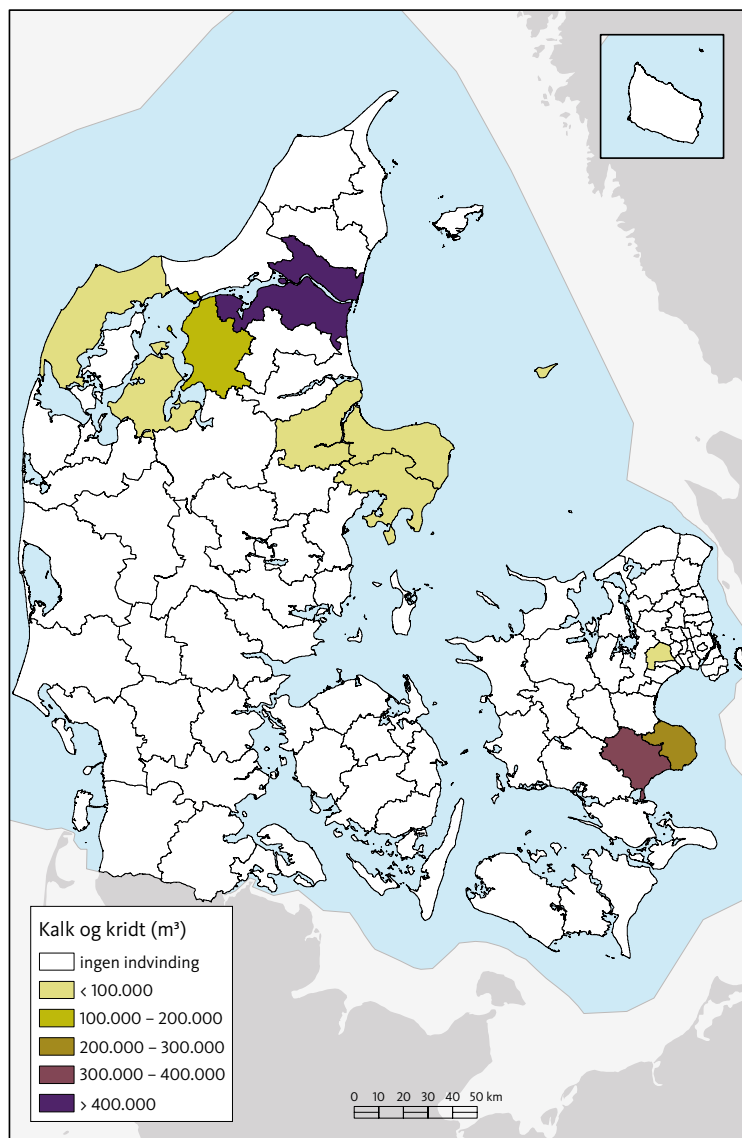
I andre tilfælde er der tale om radikale innovationer, som kobler en idé med brug af danske råstoffer; det gælder fx for isoleringsmaterialer, som kan reducere energiforbruget til opvarmning og afkøling af boliger og andre bygninger.

I 1930'erne udviklede to danske virksomheder, som i dag kendes under navnene Rockwool og Isover, nye isoleringsmaterialer baseret på danske råstoffer. Den ene virksomhed, Rockwool, opfandt en metode til at smelte bjergarter og få smelten til at danne lange tråde, som kunne pakkes sammen til det, vi i dag kender som stenuld.

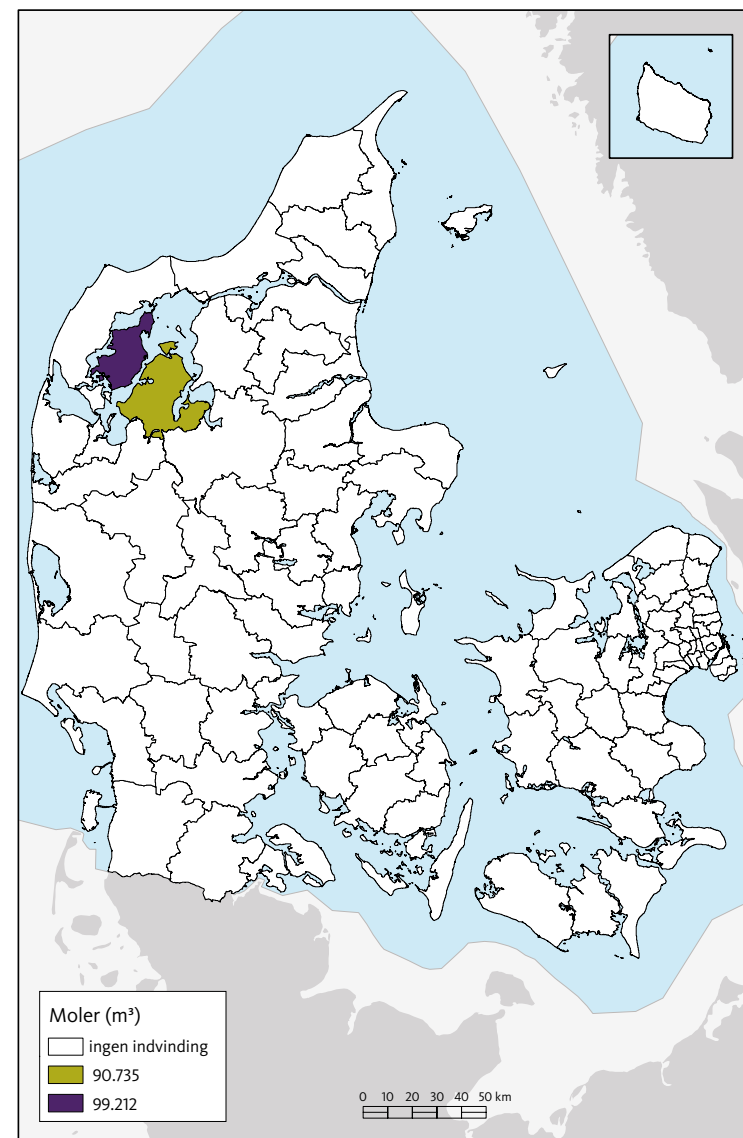
Den anden virksomhed, Isover, lavede et lignende produkt, men her er råstoffet en glasmasse, hvor der bruges kvartssand til produktet glasuld. Innovationerne i disse to virksomheder har ført til væsentlig reduktion af Danmarks CO₂-udledning, fordi der skal bruges mindre energi til opvarmning. Desuden har virksomhederne skabt mange arbejdspladser og eksportindtægter til Danmark.



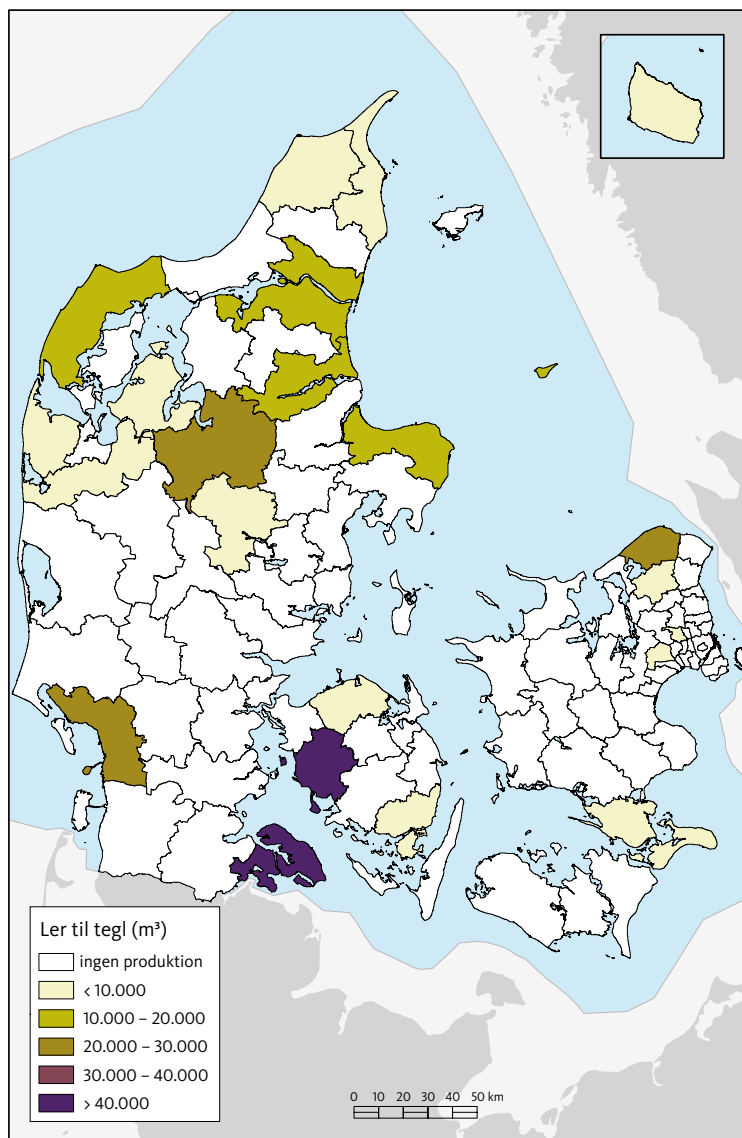
FIGUR 84. Produktion af kalk og kridt i 2015 fordelt på kommunerne. Efter Kallesøe et al. (2016).



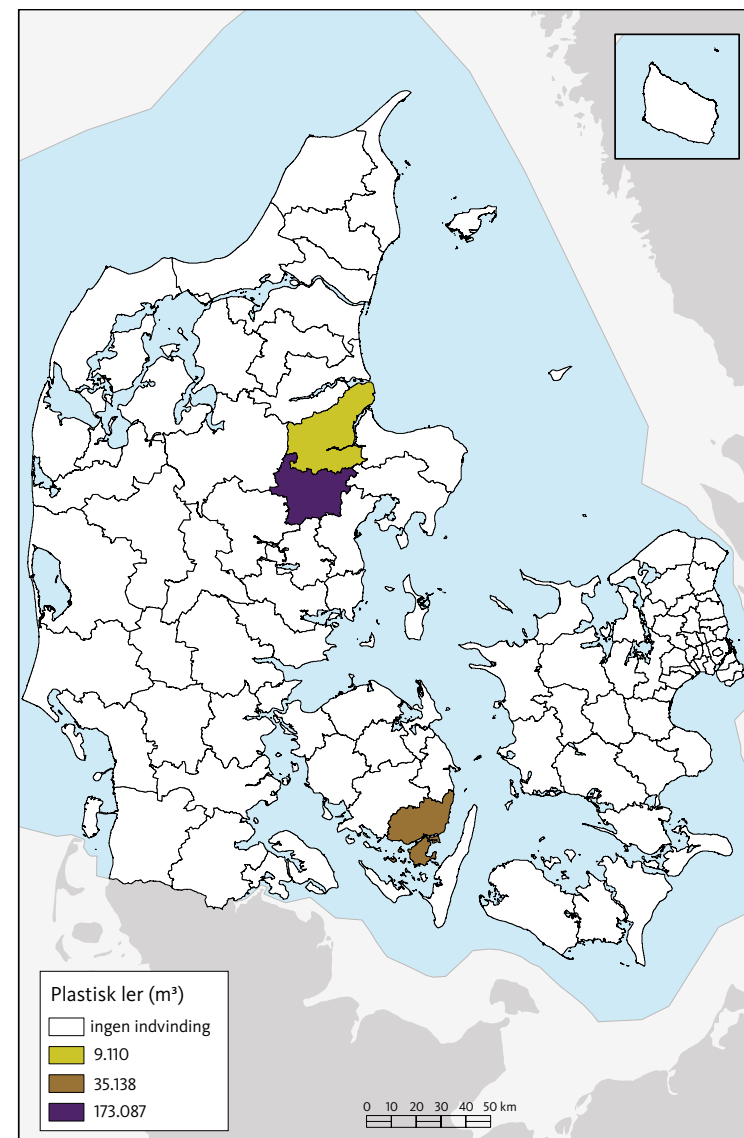
FIGUR 85. Produktion af moler i 2015 fordelt på kommunerne. Efter Kallesøe et al. (2016).



FIGUR 86. Produktion af ler til tegl i 2015 fordelt på kommunerne. Efter Kallesøe et al. (2016).



FIGUR 87. Produktion af plastisk ler i 2015 fordelt på kommunerne. Efter Kallesøe et al. (2016).



FIGUR 88. Danske innovationer med mineralske råstoffer i billeder.

A. Vestas vindmøllefabrik er en af de danske virksomheder, som er vokset til en af verdens førende fabrikker inden for vindmøller. Udviklingen er primært sket ved inkrementelle innovationer og brug af udenlandske råstoffer.

B. Produktion af sand og grus fra Nymølle Stenindustri. Foto Nymølle Stenindustri.

C. Sandsugning fra havet producerer sand og grus til beton.

D. Produktion af mursten hos Petersen Tegl A/S. Foto Petersen Tegl A/S.

E. Virksomheden Zurface A/S bryder granit i Klippeløkken Granitbrud til bl.a. fliser, facader og bordplader. Foto Jens-Erik Larsen, Bornholms Tidende, 2015.

F. Olieboreplatform Nordsøen.
Foto A, C og F fra Shutterstock.

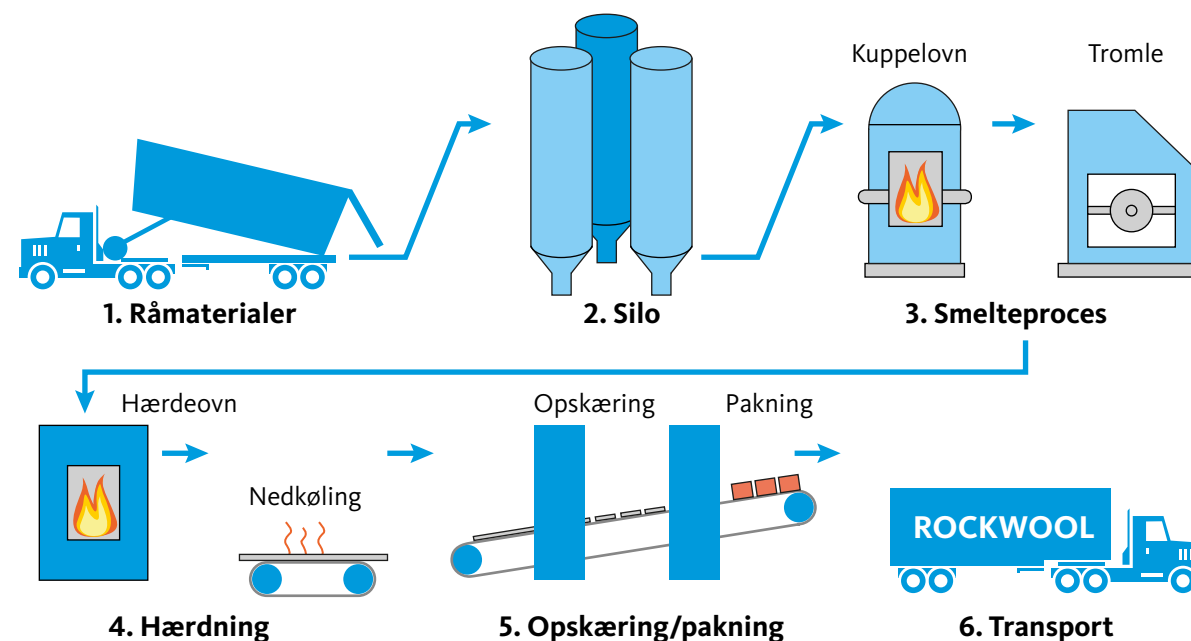


INNOVATIV ANVENDELSE AF SAND OG STEN NEDBRINGER ENERGIFORBRUGET I BYGNINGER

Et effektivt isoleringsmateriale er et materiale, som leder varmen dårligt, fordi luften ikke kan cirkulere. Man siger, at materialet har lav varmeledningsevne. I huse skal isoleringen skabe en barriere mellem temperaturen udenfor og indenfor. Med en god isolering afkøles rummet langsommere, og der skal bruges mindre varme og dermed mindre energi til at opretholde en behagelig rumtemperatur.

Isoleringsmaterialers varmemodstand, R-værdien, er en vigtig parameter, når man sammenligner isoleringsmaterialer til bygninger. Jo højere R-værdi, jo større er varmemodstanden og desto bedre isoleringsevne (figur 90. d).

I Danmark har isolering af de bygninger, vi opholder os mest i, haft til formål at holde varmen inde og varmeudgifterne nede, og vi kunne bare fyre mere op, hvis der blev for koldt. Men det har vist sig, at den energimængde, vi bruger til opvarmning af boliger og andre opvarmede bygninger, er en af de største kilder til CO₂-udledning i Danmark. Hertil kommer, at der bliver brugt



en stigende mængde energi til at nedkøle opholdsrum under varme sommerperioder. Derfor er bygningsisolering blevet et særligt vigtigt område, når det gælder om at minimere varmetabet til omgivelserne. Med et mindre varmetab skal der bruges en mindre energimængde til opvarmning og nedkøling, og mindre energi giver et mindre CO₂-aftryk. Danmark har tiltrådt FN's verdensmål, og er derfor forpligtet til at arbejde aktivt for at nå

FIGUR 89. Principperne for hvordan Rockwools stenuldsprodukter fremstilles. Efter Rockwool (u.å.).

klimamålene, som Verdensmål 13 om Klima-indsats beskriver.

I Danmark er de mest almindelige isoleringsmaterialer stenuld og glasuld, som begge fremstilles i Danmark på basis af både danske og importerede mineralske råstoffer.

STENULD

Geologer har i mange år vidst, at smeltede lavaer i forbindelse med vulkanudbrud kan danne trådede strukturer, når det blæser kraftigt. Men det var først omkring 1930, at innovative ingeniører fik omsat og nyttiggjort denne viden til en industriel fremstilling af isoleringsmateriale. I Danmark startede virksomheden Rockwool sin produktion af stenuld i 1937, og Rockwool er i dag en af de største producenter af stenuld. Rockwool producerer isoleringsmaterialer til næsten hele verden, både i Danmark og på fabrikker i udlandet.

Råstofferne til stenuld består af vulkanske basalter, koks og slaggematerialer fra jern- og stålindustrien (figur 89). Koksen er sammen med varm luft og ilt brændstoffet i smelteprocessen. Blandingen af basalter og slaggematerialerne smelter ved ca. 1.500 °C.

FIGUR 90. Danske råstofinnovationer i billeder.

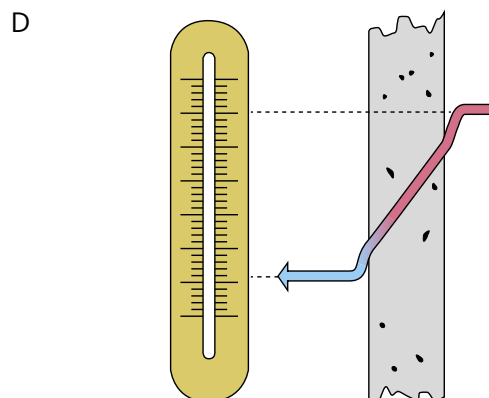
A. Rulle med stenuld til husisolering.

B. Nærbillede af glasuld, hvor de enkelte tråde ses.

C. Vestas vindmølle er fremstillet af råstoffer, som brydes i hele verden.

D. Isoleringen nedsætter varmeledningen mellem fx to rum og i husmure så indetemperaturen påvirkes minimalt af udetemperaturen. Efter Efteruddannelsesudvalget (2011).

Fotos A-C fra Shutterstock.



Der er mulighed for at bruge andre råstoffer, så længe den samlede kemiske sammensætning svarer til basalternes kemiske sammensætning. Det betyder, at kun omkring 20 % af den mængde, der i dag bruges til fremstilling af stenuld, er nye råstoffer; resten er genanvendte materialer, fx suppleres der med knuste toiletter, håndvaske og slagger fra stålværker. Med andre ord anvender man i dag råstoffer, som ikke tidligere blev nyttiggjort. Slaggerne tilsættes for at give et lavere smeltepunkt, samtidig med at flydeevnen bliver bedre.

Når råstofferne er smeltet, udsættes smelten for kraftige luftstrømme, hvorved de lange fibre, som er selve isoleringsulden, dannes. Derefter hærdes ulden ved ca. 300 °C i 10-30 minutter, hvorefter den nedkøles til rumtemperatur og bliver skåret til i batts og pakket, så det kan køres til tømmerhandler og byggepladser. I Danmark er Rockwool den eneste producent af stenuld med hovedkvarter i Hedehusene og fabrikker i 14 lande.

GLASULD

Isoleringsmaterialet glasuld blev opfundet ved et tilfælde omkring 1930, hvor en glas-

smelte blev udsat for en kraftig luftstrøm, hvorved der blev dannet fine glastråde (figur 90. b), som man ret hurtigt fandt ud af at udnytte til at fremstille et isoleringsmateriale. I Danmark kom den første glasuldsfabrik allerede i 1935, og i dag bliver der stadig produceret glasuld i Danmark af virksomheden Isover.

Basisråstofferne til glasuld er kvartssand, kalk og natriumkarbonat (soda), hvor natriumkarbonat tilsættes for at nedsætte smeltepunktet. En del af kvartssandet kan erstattes af genbrugsglas, som i den danske produktion af glasuld udgør op til 80 %, hvoraf det meste er glassaffald fra vinduesproducenter. Vinduesglas indeholder ikke mange urenheder. Blandingen af disse råstoffer varmes op i en ovn til 1.372 °C, hvor det smelter og derefter sendes ind i en hurtigt roterende, perforeret cylinder, hvorfra smelten slynges ud og møder en kraftig luftstrøm. Når glassmelten møder luftstrømmen, dannes der lange glastråde, som samles til de kendte bløde plader af glasuld. Glasuld kan i modsætning til mineraluld kompakteres inden transport, dermed kan der være mere på lastbilerne, og omkostningerne kan nedbringes.

INNOVATION MED SJÆLDNE JORDARTSMETALLER HAR GJORT DANMARK TIL FØRENDE VINDMØLLELAND

Som led i omstillingen til vedvarende energiforsyninger har både radikal innovation og inkrementel innovation resulteret i mange nye arbejdspladser og eksportindtægter til Danmark. Det gælder eksempelvis vindmølleproducenterne, som har gjort Danmark til et foregangsland inden for fremstilling af energieffektive møller. Først udvikledes møller, som kunne opsættes på land, og som en inkrementel innovation har man nu især fokus på møller, som opstilles på store fundamenter på havbunden. Den radikale innovation handlede om at få omsat vindens energi til elektricitet. Man kendte de gamle møller, hvor vindens kraft blev omsat til arbejde i form af fx formaling af korn. Nu ønskede man at konstruere en mølle, hvor vindens kraft kunne drive en generator, som producerer elektricitet. Efter at denne første udfordring var løst i starten af 1890'erne, har et utal af inkrementelle innovationer udviklet vindmølleteknologien fra at være et kuriosum til effektive leverandører af elektricitet (figur 90. c).

En af de inkrementelle innovationer, som gjorde møllerne mere effektive, var, da man fandt på at tilsætte sjældne jordartsmetaller til dynamoens magneter, som gjorde magneterne meget stærkere og dermed mere effektive. Design og fremstilling af møllevinger blev et selvstændigt forretningsområde, og nye virksomheder blev oprettet. Vindmølleindustriens succes har resulteret i, at hovedparten af verdens produktion af de to sjældne jordartsmetaller neodymium og praseodymium nu bruges i magneter til generatorer. Da Kina er nøglespiller inden for sjældne jordartsmetaller, betyder det også, at Kina har indflydelse på udviklingen af den danske vindmølleindustri.

De to største vindmølleproducenter i Danmark er Vestas og Siemens Gamesa, der begge har fundet måder til sikring af råstof-forsyningerne til produktion af magneterne, for at undgå en situation, hvor de ikke kan producere nok til at dække efterspørgslen på nye møller.

NØGLEBEGREBER

- Danske råstoffer
- Beton
- Stenuld
- Glasuld
- Varmeledning
- Isolering
- Sjældne jordartsmetaller
- Vindmøller

REFERENCER

Efteruddannelsesudvalget. (2011). *Efterisolering af bygninger: Teori og praksis – fugt og varme*. Hentet fra https://materialeplatform.emu.dk/materialer/public_downloadfile.do?mat=86881276&id=86881273

Kallesøe, A. J., Clausen, R. J., Skar, S., von Platten-Hallermund, F., Ditlefsen, C. B., & Kalvig, P. (2016). *Indvinding af danske mineralske råstoffer – en geografisk sammenstilling* (Nr. 2016/1). Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa).

KAPITEL 12



FIGUR 91. Den moderne containertrafik har meget stor betydning for verdenshandlen. Shutterstock.

INNOVATION I TRANSPORTSEKTOREN

CONTAINERTRANSPORT

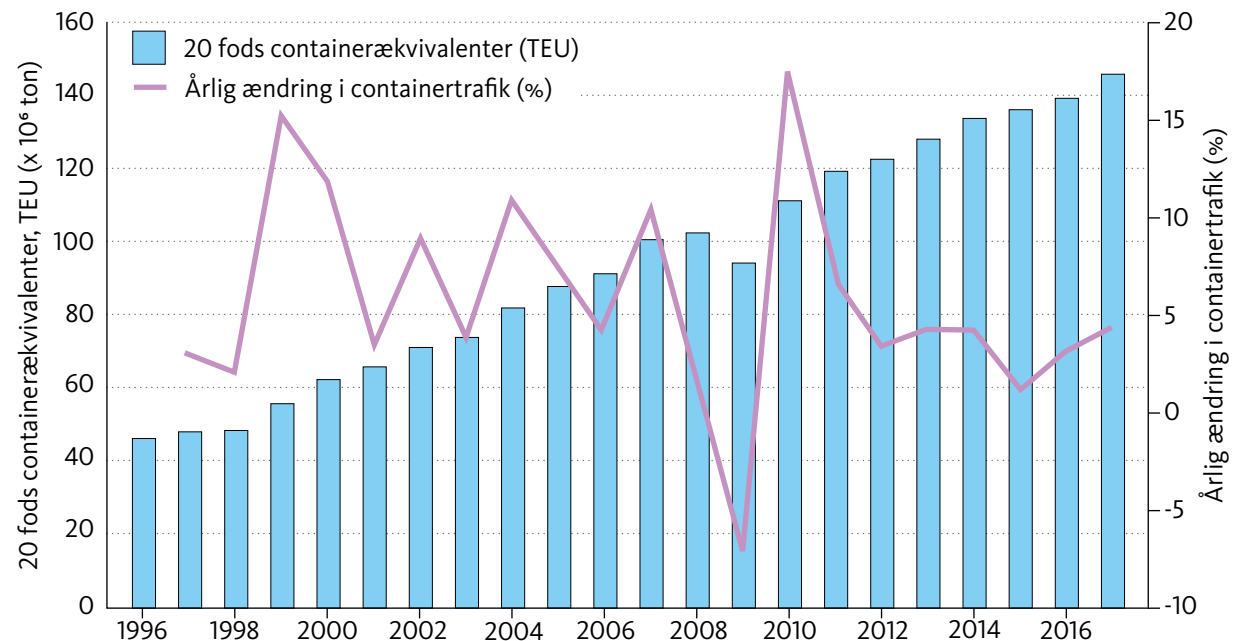
I dag transporteres næsten al fast gods og en del flydende gods i containere. Væksten i verdenshandlen steg i perioden 1995 til 2015 med mellem 1,5 og 2,5 mio. TEU om året (figur 92).

Nu om dage findes standardcontainere i to størrelser: 20 fod og 40 fod, hvoraf de store udgør ca. 60 % af den mængde, der transporteres. Når man angiver, hvor mange containere der fx er ombord på et skib eller i en havneterminal, bruger man betegnelsen TEU (Twenty-foot Equivalent Unit): én 20 fod container svarer til en TEU, én 40 fod container svarer til to TEU (figur 93).

Transporterne følger nogle store handelsruter på tværs af verdensdelene og omlastes i store containerhavne til mindre skibe, som distribuerer varerne til mindre havne, hvorfra de kan distribueres videre med tog eller lastbil (figur 94).

CONTAINERENS HISTORIE

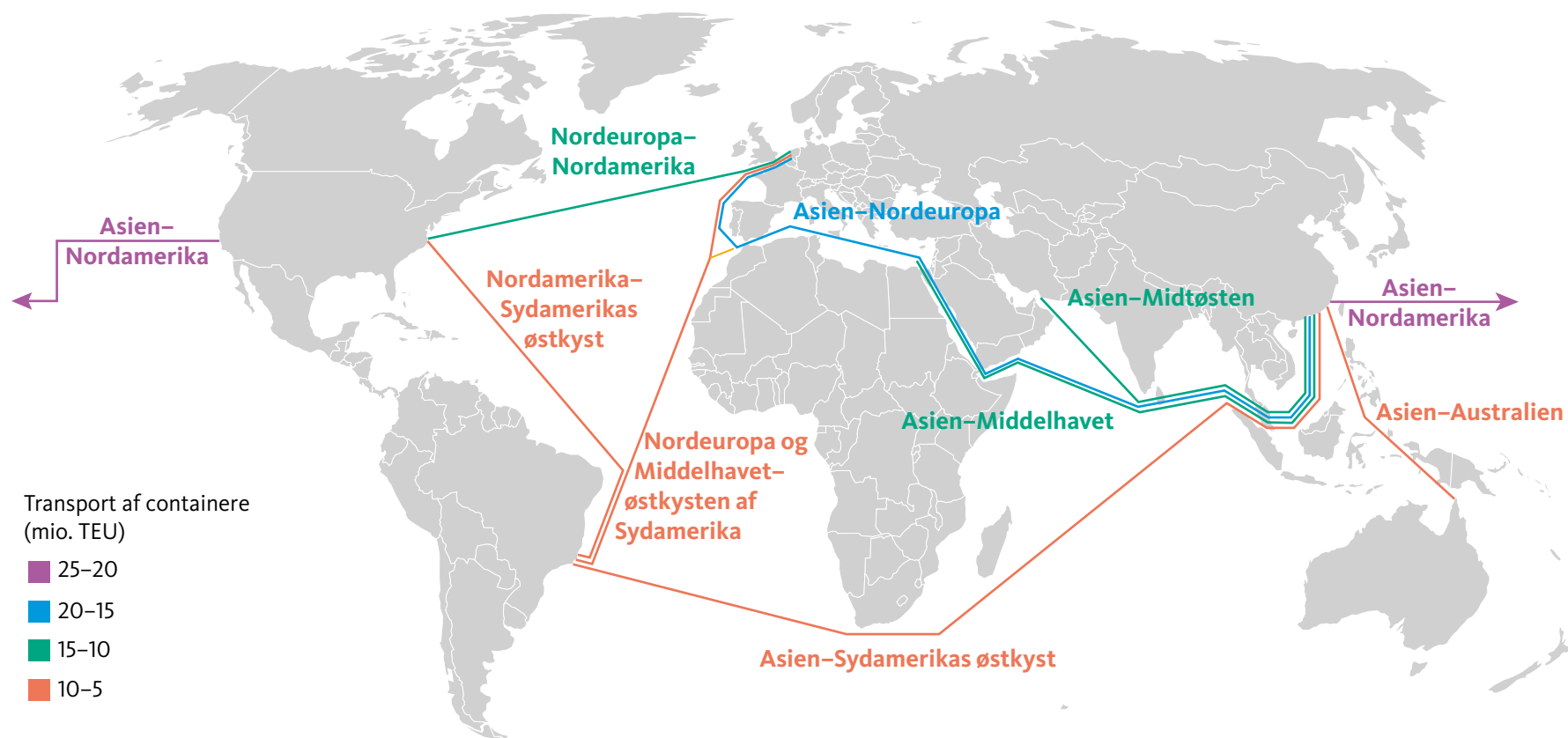
De containere som ses overalt på tog, lastbiler og stablet højt op på skibe er rygraden i international handel (figur 95. b). Container-



FIGUR 92. Udviklingen i containertrafikken i perioden 1996-2017 viser en stabil stigning, som dog var påvirket af verdensøkonomien. Efter UNCTAD (2017).

TEU	1	2
Længde	20 fod	40 fod
Vægt (tara) (ton)	2,3	4
Volumen (m ³)	39	67
Maksimum-last (ton)	21,5	26,5

FIGUR 93. Dimensioner for standardcontainere (TEU: Twenty-foot Equivalent Unit). Af MiMa (2019).



FIGUR 94. De vigtigste containerruter målt i TEU pr. år. Efter Geopolitical Futures (2016).

ne gør det muligt at sende også forholdsvis små varepartier rundt i verden. Containere danner fx basis for moderne tiders nethandel. De utallige containere, som ender i alle mulige afkroge af verden, har man efterhånden fundet på alverdens anvendelser for: værksteder, lagre, butikker og endda boliger bliver i dag lavet af udrangerede containere (figur 95. c). Men efterhånden anvendes også splinternye containere til disse formål, da de har vist sig populære på grund af deres midlertidige karakter; de er nemme at sætte op, og de er konkurrencedygtige på prisen.

Containertrafik har kun eksisteret i omkring 50 år, men har revolutioneret den internationale handel, så varerne kommer hurtigere, sikrere og billigere frem. Før det var hverken containere eller paller en del af logistiksystemet. Dengang blev varer pakket ind eller kom i sække, som med håndkraft eller simple kraner blev fragtet op og ned på lastbiler, tog og skibe. Med mange omlastninger var godstransport meget intensiv på arbejdskraft, langsom, usikker og dyr. Høje fragtpriser betød, at mange varer ikke kunne konkurrere på eksportmarkederne.

For at komme ud af nogle af disse problemer

FIGUR 95. Containere i billeder.

A. Det første containerskib stod færdigt i 1956. Ideal X kunne laste 58 stk. 33 fods containere. Af Karsten Kunibert.

B. Containere har en helt central rolle for global og lokal varetransport.

C. Container brugt til andre formål end transport.

D. I 2015 var Madrid Mærsk med sine 399 x 59 m og 20.568 TEU's verdens næststørste containerskib.

Fotos B-D fra Shutterstock.

A



B



C



D



opfandt og patenterede Malcom McLean, der var ejer af en amerikansk transportvirksomhed i 1950'erne, den første type stålcontainer. Den kunne stå på en lastbil, løftes af og på med en kran, og de kunne holde til at flere containere blev stablet ovenpå hinanden. Han troede så meget på potentialet i denne løsning, at han lånte 43 mio. USD (svarende til omkring 400 mio. USD i dag) og købte rederiet Pan-Atlantic Steamship Company. Han ombyggede skibene, så de kunne sejle med de nye containere, som han også producerede og ejede (figur 95. a). McLeans innovative idéer på fragtområdet viste sig at være succesrige. Rederiet voksede hurtigt og blev i 1960 omdøbt til SeaLand, der transporterede containere på både vand og land.

I forhold til containerdelen var det Pan-Atlantic Steamship Company og SeaLand, som foretog den egentlige innovation, mens Mærsk, som købte SeaLand i 1999, lavede inkrementelle innovationer på en række nøgleområder med faldende fragtpreiser og stigende eksport til følge.

Løsningen med at bruge containere blev meget hurtigt accepteret af industrien. I

starten blev der brugt forskellige størrelser af containere, hvilket var u hensigtsmæssigt, specielt når skibene skulle pakkes. Det næste skridt var derfor at standardisere containerstørrelsen. I første omgang stod McLeans patent i vejen for en standardisering. Først da han i 1961 frigav patentet, kunne der laves en ISO-standardisering, hvilket blev nøglen til den internationale succes på containerområdet.

Den danske virksomhed Mærsk spillede en betydelig rolle i udviklingen af den containertrafik, man kender i dag. Mærsk kom dog ret sent ind i udviklingen og fik deres første containerskibe så sent som i 1975. Mærsk byggede selv containerskibe på deres skibsværft Lindøværket i Odense frem til 2006, hvor værftet lukkede. Fokus på containertrafik blev begyndelsen til nye forretningsområder, som udover transporten til søs også omfatter håndtering af containere i havnebyer, logistik på land og opkøb af konkurrerende containerrederier. I 1991 begyndte virksomheden *Mærsk Container Industry* at fremstille containere med køleenheder, så fødevarer kunne transporteres over store afstande og i 1993 blev Mærsk verdens største containerrederi. Produktionen af containere med

køleenheder startede i Tinglev i Danmark og blev i 1998 og 2004 udvidet med fabrikker i Kina, mens produktionen i Danmark stoppede helt i 2006.

En betydelig del af Mærsk's virksomheder er stadig relateret til forretningsmodeller baseret på containernes muligheder for at transportere varer fra kunde til kunde i hver sin verdensdel. Man kan sige, at Mærsk har bidraget med inkrementel innovation til containerne, som i særlig grad har været rettet mod at rationalisere løsninger til containerlogistik. Udviklingen af containerteknologien og tilhørende logistik har haft afgørende betydning både for virksomheder som Mærsk, men også for det danske samfund.

CONTAINERNE OG RÅSTOFFORBRUGET

Den hurtige vækst i containertransporten følges af et betydeligt råstofforbrug. Ingen ved, hvor mange containere der er i verden, fordi der ikke er internationale myndigheder, som registrerer containere, og de virksomheder, som ejer containerne, ikke er interesseret i at oplyse tallene.

Alligevel er det estimeret, at der i 2015 var 38,5 mio. TEU i brug, 23,3 mio. TEU som ikke

FIGUR 96. Beregning af råstofforbruget til ISO-containere fremstillet af cortenstål. Det antages, at der skal bruges 2,3 ton cortenstål til en TEU. Af MiMa (2019).

Råstof	% indhold	ton/TEU	ton/10 mio. TEU
Mangan	0,4	0,01	9.200
Krom	1,0	0,02	23.000
Nikkel	0,7	0,02	16.100
Kobber	0,5	0,01	11.500
Jern	97,4	2,24	2.240.200

umiddelbart var i brug, og at der blev produceret 10 mio. TEU nye containere. Da en container normalt holder til ca. 6 års drift, inden den er slidt op, betyder det, at der i 2016 skulle produceres ca. 7 mio. TEU for at dække det antal, der udgår. Derudover skulle der produceres yderligere nye containere for at dække et voksende marked, hvorfor 10 mio. TEU nye containere er et sandsynligt bud. Et godt bud er, at der i 2019 er ca. 72 mio. TEU i verden.

En typisk ISO-container fremstilles af en ståltype kaldet cortenstål, som har den egenskab, at hvis malingen bliver slået af, er det kun overfladen af stålet, der rustet. Denne egenskab skyldes stålets indhold af legeringsmetallerne krom, nikkel og kobber. Når man skal beregne råstofforbruget til en TEU, er det derfor ikke nok, kun at se på forbruget af jern (figur 96), det er også nødvendigt at vurdere indholdet af legeringsmetaller.

NØGLEBEGREBER

- TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) Containerlogistik
- ISO-standardisering

REFERENCER

Geopolitical Futures. (2016). Top Container Ship Trade Routes. Hentet fra <https://geopoliticalfutures.com/top-container-ship-trade-routes/>

UNCTAD. (2017). *Review of Maritime Transport 2017*. <https://doi.org/10.18356/a9b345e7-en>

KAPITEL 13



FIGUR 97. Ladestation til elektriske biler bliver en vigtig del af den nye infrastruktur, der skal fremme den grønne omstilling. Shutterstock.

BATTERIER OG DEN GRØNNE OMSTILLING

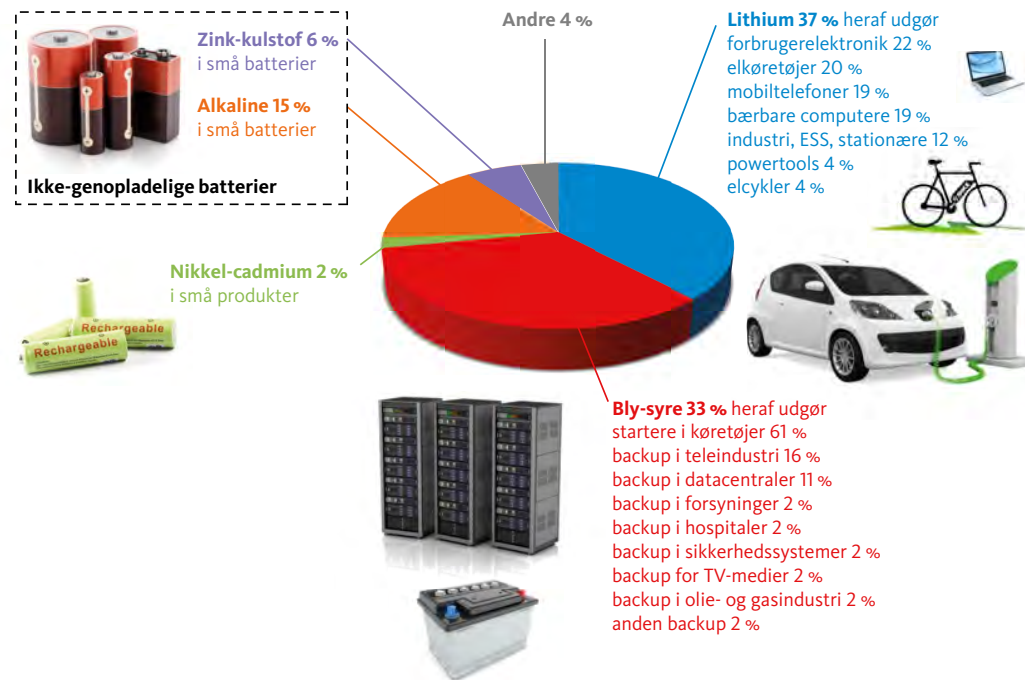
HVORFOR ER BATTERIER SÅ VIGTIGE?

Mange af de grønne energiteknologier er afhængige af sol, vind eller vand og kan derfor ikke med sikkerhed producere energi hele døgnet, alle årets dage. Derfor er det helt afgørende, at der udvikles metoder til at lagre elektricitet og metoder til at gøre energien mobil. Uden sådanne metoder bliver det svært at omstille fra fossile til vedvarende energiformer. Batterier er en af løsningerne på denne udfordring.

I dag leverer batterier energi til et utal af elektriske apparater og systemer; fra små høreapparater og mobiltelefoner til store elektriske apparater som startbatterier i biler og backup-systemer på hospitaler og datacentre. Der findes et utal af forskellige typer af batterier, fra de ikke-genopladelige zink-kulstof-batterier og alkaline batterier til de genopladelige bly-syre-batterier, nikkel-cadmium- og lithium-ion-batterier (figur 98).

Det hurtigt voksende forbrug af batterier øger efterspørgslen af de råstoffer, som skal bruges til fremstilling af batterierne og gør det nødvendigt at åbne nye miner og øge genanvendelsen af de råstoffer, som

bruges i batterier. Men efterspørgslen på lithium-ion-batterier vokser så hurtigt, at det er vanskeligt for råstofproducenterne at følge med efterspørgslen. Det bevirker, at forsyningerne af de vigtigste råstoffer nikkel, kobolt, lithium og grafit til denne batteritype er meget usikre, fordi nye miner ikke åbnes hurtigt nok. Dette kan forsinke omstillingen til eldrevne transportmidler, som benytter de omtalte batterier.



FIGUR 98. Batterimarkedet i 2015 angivet som andele i forhold til omsætningsværdi. For hver type er angivet, hvor produktet bruges og med hvor stor en andel. Af MiMa (2017).

BATTERIETS FUNKTIONER OG OPBYGNING

Batteriernes funktion er den samme, som da de blev opfundet for 150 år siden, nemlig at opbevare energi. Men råstofferne til fremstilling af batterier har ændret sig i takt med udviklingen af nye batterityper.

Batterier bruges til mange forskellige formål, som stiller forskellige krav til batteriets egenskaber. Det kan fx være krav til energitæthed, effekt, at det skal kunne holde strøm længe, når det ikke bruges, at det skal have høj strømstyrke indtil batteriet er helt afladet, at det skal have kort ladetid, eller at prisen skal være lav i forhold til ydelse, størrelse og batteriets sikkerhed. Derfor fremstilles der mange forskellige batterityper. De tre vigtigste typer fremstilles af forskellige råstoffer og har derfor forskellige fysiske og kemiske egenskaber.

Alkali-batterier og de øvrige ikke-genopladelige batterier (kendt som nikkel-cadmium- eller NiCd-batterier) kombinerer høj effekt med lille størrelse og lav pris. NiCd-batterier bruges derfor især til elværktøj, husholdningsapparater, ure, digitalkameraer, radioer, legetøj, brandalarmer, høreapparater o.l.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Tb	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Grundstoffer som anvendes i batterier

Bly-batterier har lav energitæthed og høj effekt (W/kg), og så er de billige. De bruges mest som startbatteri til biler og som backup-strømforsyning til hospitaler og andre vigtige anlæg, fordi vægt og størrelse ikke er afgørende til disse funktionsområder.

Lithium-ion-batterier (Li-ion-batterier) har en høj energitæthed, kort ladetid og kan holde til mange genopladninger. Derfor anvendes de især i mindre elektroniske ap-

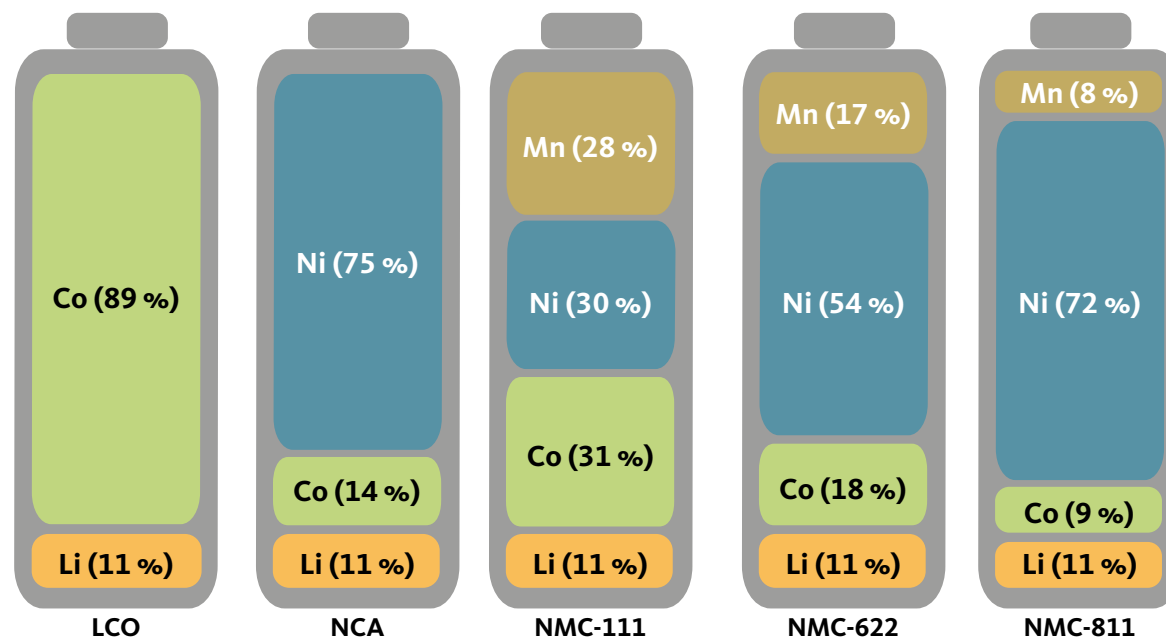
FIGUR 99. Nøgleråstofferne bly, grafit, kobolt, lithium, mangan og nikkel til batteriproduktion vist i det periodiske system. Af MiMa (2019).

parater som fx bærbare computere, tablets, smartphones, kameraer, elværktøj etc. Lithium-ion-batterierne har i stigende omfang vundet indpas i elbiler, og netop denne anvendelse forventes snart at blive det største markedsområde for denne batteritype.

De forskellige batterityper bruger forskellige råstoffer. De seks vigtigste grundstoffer, som anvendes til fremstilling af batterier er: kobolt (Co), lithium (Li), grafit (C), nikkel (Ni), mangan (Mn) og bly (Pb) (figur 99). For kobolt, lithium og grafit gælder, at de eksisterende miner har vanskeligt ved at skaffe tilstrækkeligt materiale til at dække den voksende efterspørgsel.

De viste fordelinger mellem råstofferne til batterier (figur 100) ændrer sig i takt med, at der kommer nye batterityper, som bruger forskellige sammensætninger af råstoffer, mens andre batterier udfases eller bruges mindre.

Elbilmarkedet er et godt eksempel på et hurtigt voksende marked for kobolt, lithium, nikkel og grafit, hvor der skal produceres mange ton råstoffer for at have nok til fremtidens forventede produktion (figur 101). På sigt er det tænkeligt at Li-ion-batte-



rier også skal være energi-backup i boliger, hvilket giver yderligere efterspørgsel på de fire nøgleråstoffer (figur 102). Det er vigtigt at huske, at kobolt, lithium, nikkel og grafit også bruges til mange andre formål, så den samlede udvinding af disse råstoffer skal vokse meget hurtigt for at kunne følge med efterspørgslen. Der er forventninger om, at ca. 75 % af den mængde lithium, der udvindes i 2025, skal bruges til batterier; for kobolt vil det være omkring 50 %.

FIGUR 100. Fordelingen af nøgleråstofferne til katoder i fem forskellige typer af lithium-ion-batterier.

Det ses, at indholdet af lithium kun udgør omkring 11 % i lithium-ion-batterier. Grafit er ikke vist, fordi grafit i batterier kun bruges til anoden.

Efter Olivetti et al. (2017).

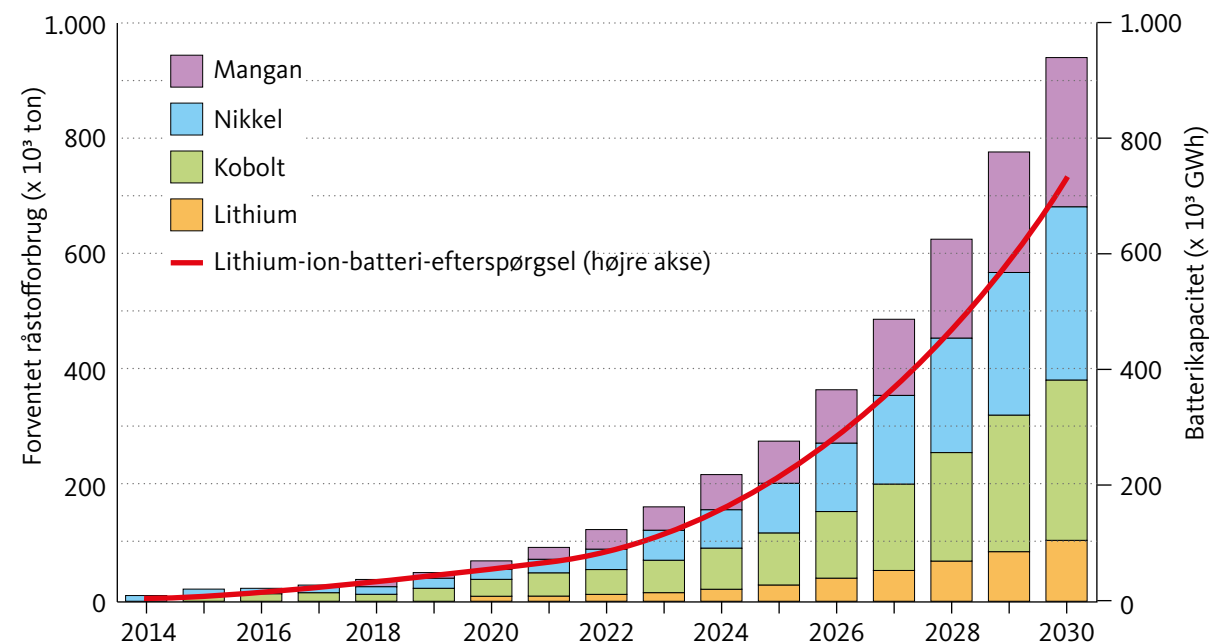
LITHIUM-ION-BATTERIER

Lithium-ion-batterier anvendes til mange formål. Som nævnt kan de holde energien i lang tid, lades hurtigt op og genoplades mange gange. Batterierne bliver brugt til flere og flere formål. For eksempel vil mange husstande i fremtiden sikkert have deres eget batteri til lagring af overskudsenergi fra solceller og lokale vindmøller.

Omstillingen til det batteridrevne samfund, baseret på grøn elektricitet forudsætter derfor, at batteriproducenterne kan fremskaffe de nødvendige råstoffer i de rigtige mængder, kvaliteter og til de rigtige priser.

NØGLERÅSTOFFERNE TIL LITHIUM-ION-BATTERIER

Ti lande dominerer produktionen af lithium, kobolt og grafit, der er nøgleråstofferne til Li-ion-batterierne. Disse råstoffer er geologisk set meget forskellige og kommer derfor fra hver sin mine. DR Congo er dominerende på kobolt, Chile dominerer lithiumproduktionen, mens Kina dominerer produktionen af grafit (figur 103).



KOBOLT

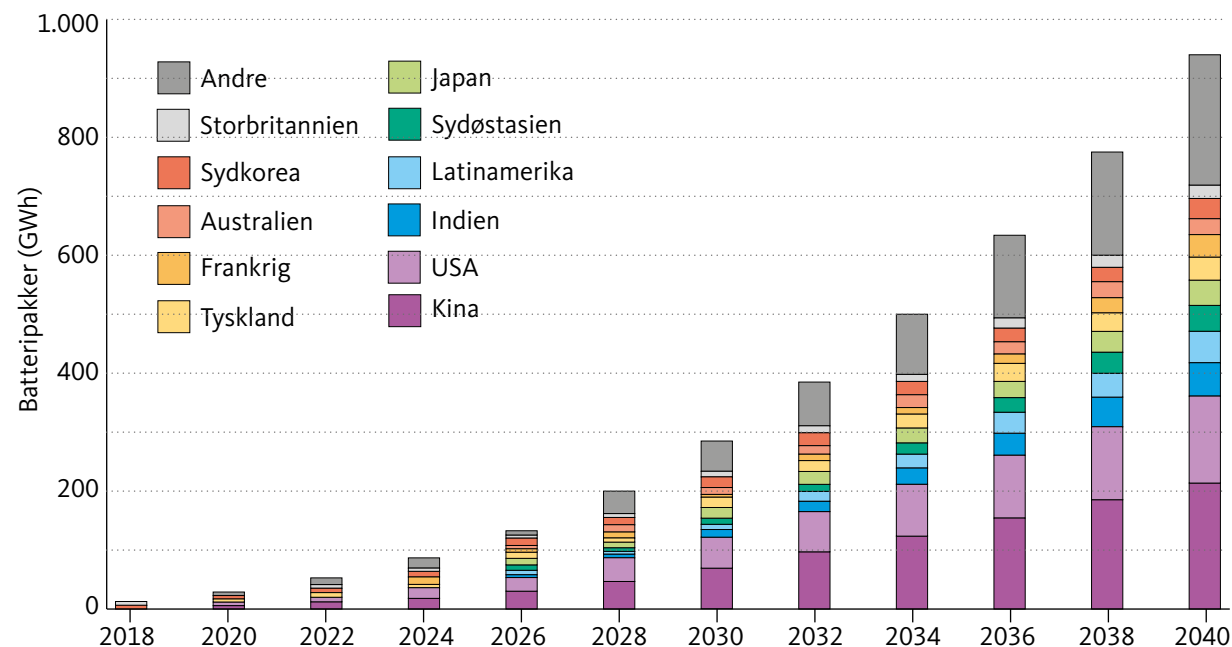
Kobolt er et biprodukt i miner, der bryder kobber eller nikkel; kobolt brydes i mange lande. DR Congo er den helt dominerende producent (34 %) af kobolt og afsætter næsten al deres kobolt på det kinesiske marked. Man kan ikke tale om et egentligt monopol, men Kina har med aftalerne fået kontrol over en meget betydelig del af koboltmarkedet. Omkring halvdelen af den mængde kobolt,

FIGUR 101. Prognose for det forventede salg af lithium-ion-batterier til elbiler frem til 2030 udtrykt som den samlede kapacitet (rød kurve). Søjlediagrammet viser, hvor mange ton mangan, nikkel, kobolt og lithium, der skal bruges for at fremstille disse batterier. Beregningerne er fra 2014 og vi må formode, at behovet for disse råstoffer ville være højere, hvis man foretog beregningerne i dag. Efter Meshram (2018).

der produceres, bliver brugt til fremstilling af batterier (figur 101). Resten af produktionen bruges især som legeringsmetal til hårdmetal som stål og til magneter. På grund af den store efterspørgsel på kobolt i disse år efterforsker mineselskaberne mange steder mulighederne for at finde nye koboltforekomster. I Grønland kan kobolt findes sammen med nikkel, men der vil gå en del år inden mineselskaberne er færdige med de igangværende undersøgelser af, om nikkelforekomsterne er gode nok til at starte en mine.

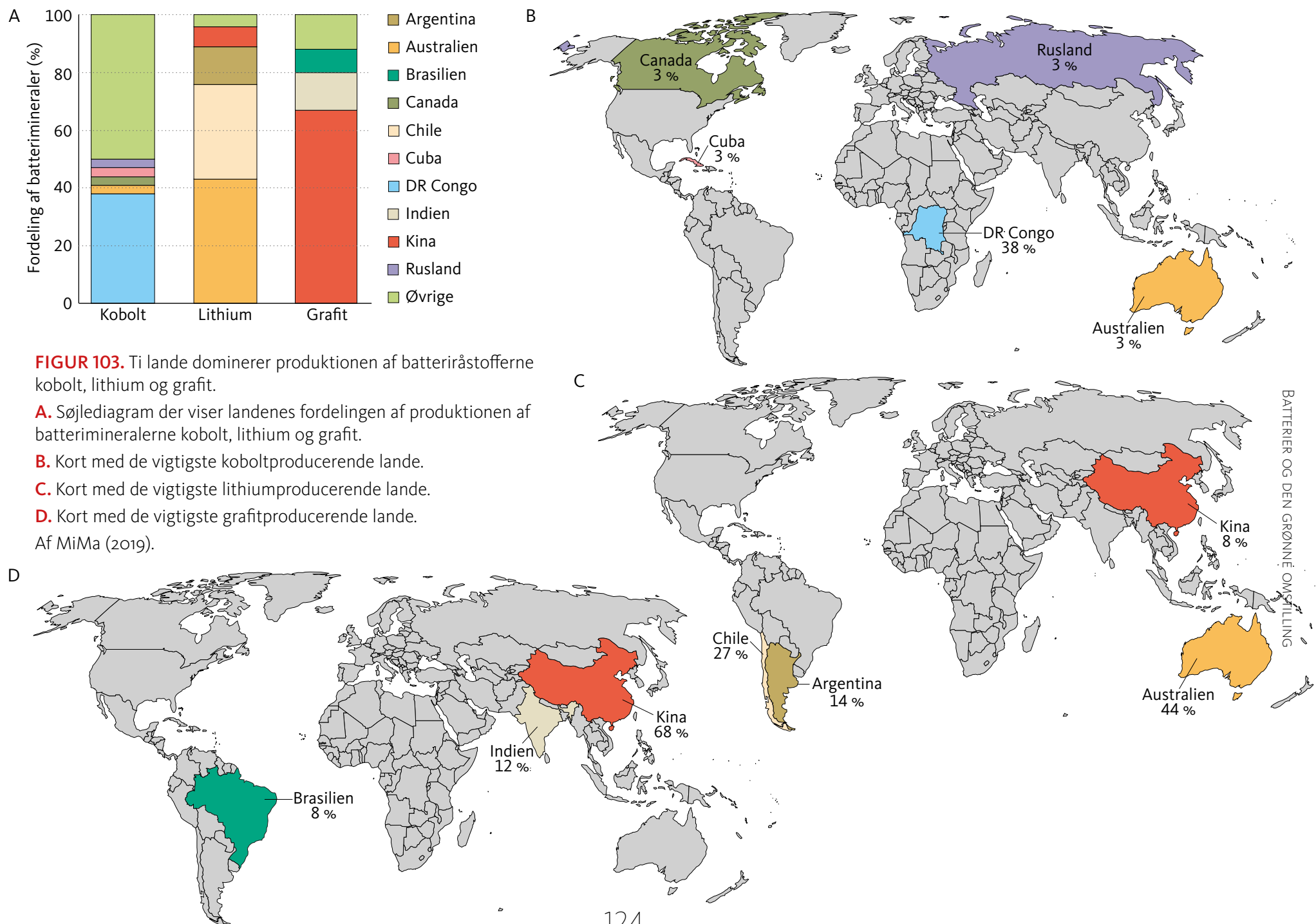
LITHIUM

Lithium produceres fra to helt forskellige geologiske forekomster. I Sydamerika, især Chile og Argentina, indvindes lithium ved at underjordiske forekomster af saltvand med højt indhold af lithium pumpes op i store laguner, hvor det inddampes i meget store bassiner. I Australien produceres lithium fra magmatiske bjergarter rige på Li-mineraler; denne metode er den hurtigste, men også den dyreste at producere lithium på. Australien står for ca. 43 % af verdensproduktionen mod Chiles 33 %, mens Kina kun har en meget lille produktion, som er helt



utilstrækkelig til at forsyne Kinas industrier (figur 103). Samlet set bruges omkring 40 % af verdensproduktionen af lithium til batterier (figur 101). Resten bruges i keramik- og glasindustrien, til smøremidler, medicinalindustrien og mange andre ting. Den meget store efterspørgsel på lithium har resulteret i, at produktionen i de seneste 10 år er steget, og at mange forekomster er ved at blive udviklet til nye miner. Reserverne i specielt

FIGUR 102. Forventet stigning i batteripakker til boliger og virksomheder. Efter Henze (2018).



Sydamerika er meget store. Der er ikke kendte forekomster med lithiumminer i Grønland.

GRAFIT

Grafit udvindes fra mineralet grafit, som kun består af grundstoffet kulstof. Grafitmineralet består af meget tynde grafitflager, som adskilles ved let berøring, og da det er meget blødt, afsætter det sort farve. Grafit brydes mange steder i verden og oftest fra relativt små miner. Kina er langt den største producent efterfulgt af Indien og Brasilien (figur 103). Omkring halvdelen af det grafit der brydes bruges til forskellige formål i støberi-industrien og kun omkring 20 % bruges til batterier (figur 105).

På grund af den grønne omstilling forventes en stigende efterspørgsel på grafit, og derfor efterforsker mineselskaberne mange nye grafitforekomster for at finde ud af, om de er gode og store nok til at starte en ny mine. I Grønland undersøger to mineselskaber i 2019 grafitindholdet i bjergarter i et område ved Amîtsoq i Sydgrønland og Akuliaruseq i Vestgrønland. Men der vil gå flere år, inden mineselskaberne har fået tilstrækkelig

FIGUR 104. Minedrift efter batteriråstoffer i billeder.

A. Koboltmine i lille skala i DR Congo. Ca. 20 % af koboltproduktionen kommer fra små miner, som ikke har licens, og hvor landbefolkningen forsøger at tjene en dagsløn. Foto Enough Project / Lezhnev (2010).

B. Salar de Atacama i Chile. Bunker af lithium udvundet ved inddampning af lithiumrige opløsninger i saltsøer i Atacamaørkenen.

C. Brydning af grafit i Uralbjergene, Rusland. Fotos B og C fra Shutterstock.

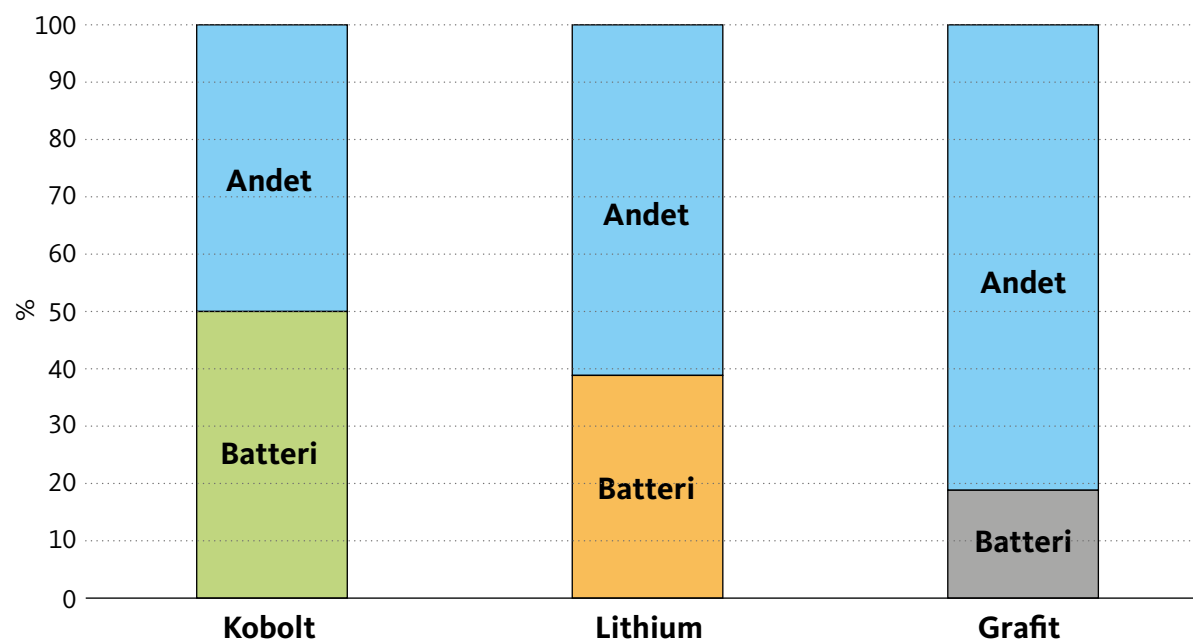


geologisk viden til at beslutte, om der kan startes en grafitmine disse steder.

FORSYNINGSKÆDERNE TIL BATTERIER ER UDFORDRET

Det stigende forbrug af batterier til elbiler, elcykler og backup-systemer i huse og virksomheder øger efterspørgslen på råstoffer til batterier med stor hast (figur 102). Derfor skal der findes og bygges nye miner for disse råstoffer. Men det tager ofte mere end 10 år at finde nye forekomster og bygge en mine. Dette misforhold mellem hurtig efterspørgsel og langsom levering er en udfordring for forsyningskæderne til batterier. Kommer der tilstrækkeligt med kobolt, lithium, nikkel og grafit på markedet om 10 år? Og kan reserverne følge med? Kan råstofferne i batterierne genanvendes? Eller sætter manglen gang i innovation, så der bliver udviklet helt nye typer af batterier? Der findes ingen sikre svar på disse spørgsmål.

Historisk har mineindustrien vist sig at være ret robust overfor nye tendenser, og der er da heller ikke faldende reserver af batteriråstofferne. Faktisk er reserverne ikke blevet mindre trods minernes stigende produktion



af kobolt, nikkel, lithium og grafit, tværtimod er de vokset en smule. Dette skyldes, at mineselskaberne hele tiden leder efter ny malm i områderne omkring allerede eksisterende miner, og at mineselskaberne investerer meget store beløb i mineralefterforskning i andre områder for at sikre sig, at de har råstoffer, de kan sælge og dermed tjene penge. Hvis man finder malm i nærheden af aktive miner, kan en produktion starte hurtigt, mens der skal bl.a. etableres tids-

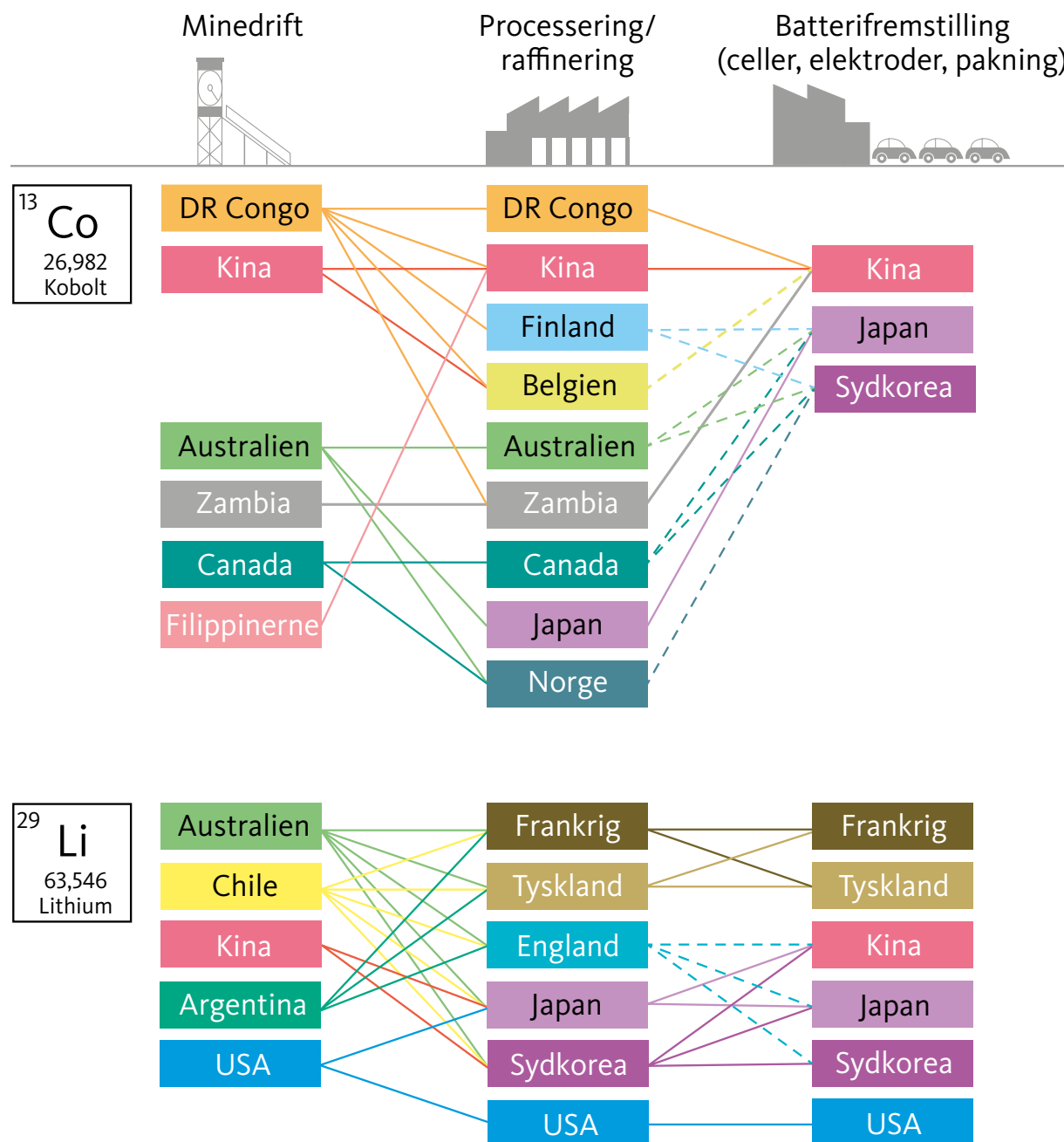
FIGUR 105. Mange af de vigtige råstoffer til batterier bruges også til andre formål. Batteriindustrien er derfor i konkurrence med andre industrier om råstofferne. Efter Olivetti et al. (2017).

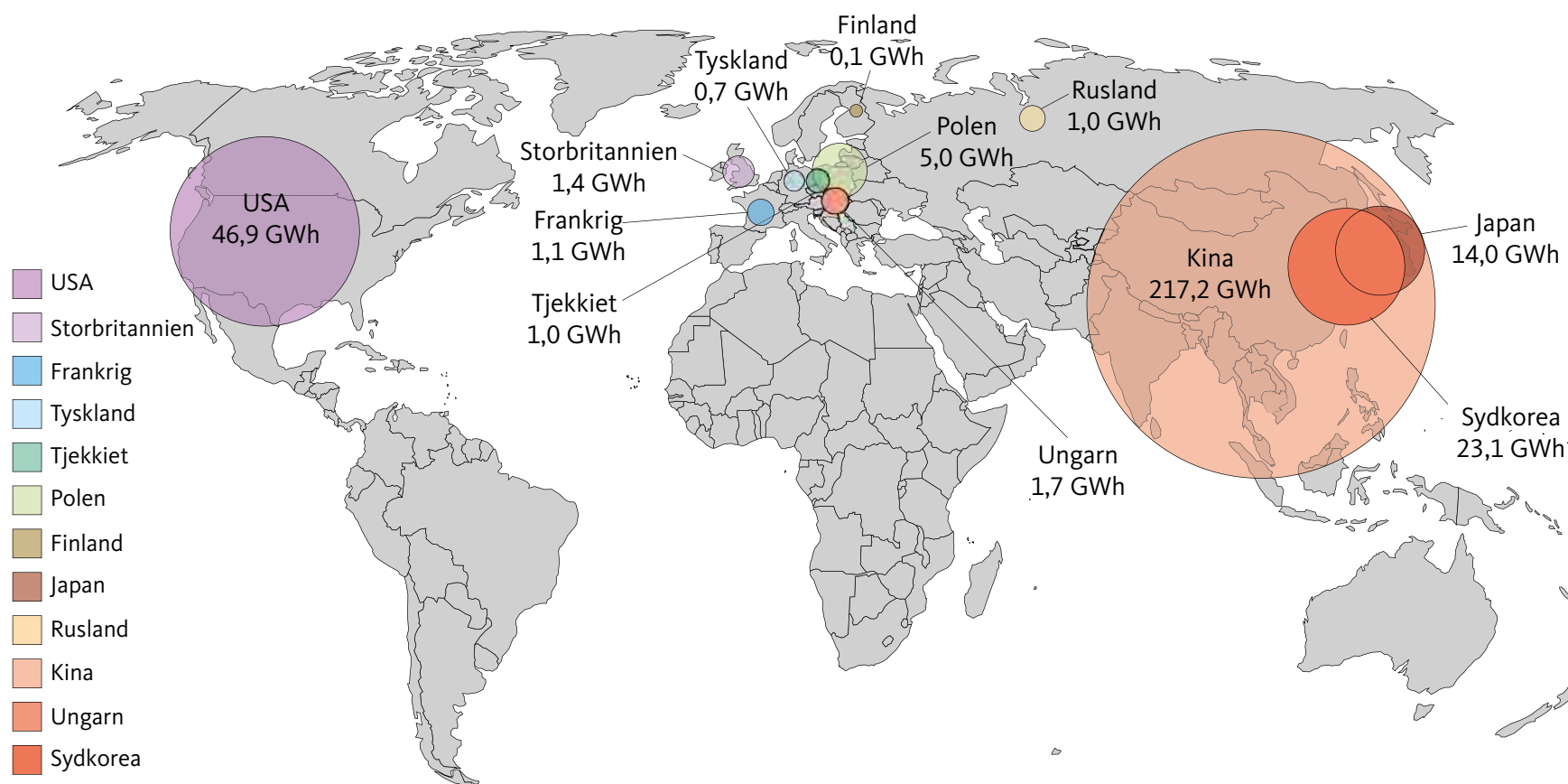
FIGUR 106. Forsyningskæderne for kobolt og lithium. MiMa (2017).

krævende og dyr infrastruktur til minedrift på nye lokaliteter.

Udvinding af mineraler, som indeholder kobolt, nikkel, lithium og grafit, er kun én side af forsyningsproblemet. Det kræver en betydelig ekspertise at forarbejde råstoffer til de kemikalier og metaller, som skal bruges i fremstillingen af katoder og battericeller. Denne viden er i høj grad koncentreret i Kina, Sydkorea og Japan (figur 106). Figuren viser, at hovedparten af koboltholdige mineraler brydes i seks lande, at udvindingen af kobolt fra mineralerne foretages i ni lande, mens fremstillingen af komponenter til batterier som celler og elektroder hovedsageligt foregår i tre lande. Figuren viser også, at Kina dominerer hele forsyningskæden, og at Australien, Zambia og Canada sælger deres produkter i Asien. Forsyningskæderne for lithiummineraler domineres af lande i Sydamerika og Australien, mens fremstillingen er koncentreret i Asien.

Kina arbejder efter en strategi, hvor landets transportsektor skal være elbaseret i 2030, og de har derfor brug for at kunne kontrollere hele forsyningskæden fra minerne til de færdige batterier. I det omfang Kina ikke selv





FIGUR 107. Mange lande med egen bilproduktion planlægger at etablere batterifabrikker til især elbiler. Figuren viser den forventede produktion af batterier i 2025.

Kina og til dels USA dominerer markedet for lithium-ion-batterier og har derfor behov for at sikre råstofforsyninger til disse fabrikker. En betydelig del skal importeres, fordi Kina ikke selv har tilstrækkeligt med de relevante råstoffer.

Efter Ma et al. (2018).

har råstofferne, fx kobolt og lithium, sikres forsyningerne ved, at kinesiske mineselskaber producerer disse råstoffer i udlandet, eller ved at Kina indgår langtidskontrakter om forsyninger. Store kinesisk ejede batterifabrikker er under opbygning uden for Asien (figur 107). Derfor vil Kina i mange år have langt den største batteriproduktion og interesse i at kunne kontrollere forsyningskæden til fremstilling. Det gælder særligt for de råstoffer, som Kina ikke selv har store forekomster af, fx kobolt. Som modvægt til karteldannelsen for batterier i Asien har store bilfabrikker som VW og BMW ligeledes lavet aftaler med mineselskaberne om leveringer af råstoffer.

NØGLEBEGREBER

- Batterifunktion
- Batteriopbygning
- Batteriråstoffer

REFERENCER

Henze, V. (2018, november 6). Energy Storage is a \$620 Billion Investment Opportunity to 2040. Hentet fra <https://about.bnef.com/blog/energy-storage-620-billion-investment-opportunity-2040/>

Katusa, M. (2017). How to Make a Fortune in the Electric Vehicle Boom Without Selling a Single Car. Hentet fra <https://katusaresearch.com/make-fortune-electric-vehicle-boom-without-selling-single-car/>

Lezhnev, S. (2010). Conflict minerals 2010. Hentet fra <https://www.flickr.com/photos/enoughproject/albums/72157624398444223>

Ma, J., Stringer, D., Zhang, Y., & Kim, S. (2018, februar 1). The Breakneck Rise of China's Colossus of Electric-Car Batteries. Hentet fra <https://about.bnef.com/blog/breakneck-rise-chinas-colossus-electric-car-batteries/>

Meshram, H. P., Lenina, S. V. B., & Jadhav, T.

(2018). Lithium Ion Battery Control System for Hybrid- Electric-Vehicle. *Proceedings of ISSRD International Conference*, 1–5.

MiMa. (2017). Råstoffer til batterier. *Fakta om Råstoffer*, (13), 1–4.

Olivetti, E. A., Ceder, G., Gaustad, G. G., & Fu, X. (2017). Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. *Joule*, 1(2), 229–243.

KAPITEL 14



FIGUR 108. Salar de Atacama i Chile. Bunker af lithium udvundet ved inddampning af lithium-rige opløsninger i saltsøer i Atacamaørkenen. Shutterstock.

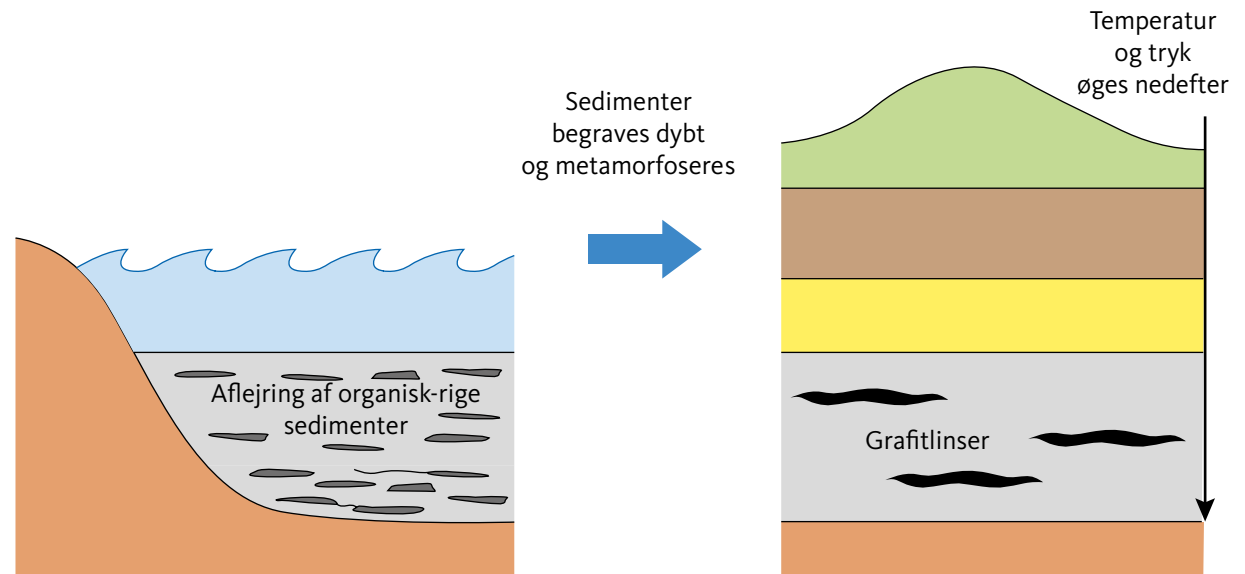
BATTERIERNES RÅSTOFGEOLOGI

BATTERIERNES RÅSTOFGEOLOGI

Alle råstoffer, der indgår i batterier, kommer fra miner fordelt over hele verden. Råstofferne er dannet i vidt forskellige geologiske processer og på forskellige tider igennem den geologiske historie.

GRAFIT

Mineralet grafit består af rent kulstof. Kilden til kulstof er fossilt organisk materiale, hvor kulstofrigt organisk materiale har været aflejret i sedimentære lag, der under tektoniske pladebevægelser senere er blevet trykket ned i Jordens skorpe. Hvis disse sedimenter på et senere tidspunkt i den geologiske udvikling udsættes for metamorfose (omdannelse under tryk og høj temperatur), kan det organiske kulstof blive omdannet til grafit. Metamorfosen sker fx som led i en bjergkædefoldning, hvor bjergarterne føres ned på dybder, hvor temperatur og tryk er høje nok til at danne grafit (figur 109). Grafit, der er dannet på denne måde, vil ofte have lidt andre grundstoffer indlejret i krystalstrukturen. Ved varmepåvirkning kan kulstof blive mobiliseret i en egentlig smelte eller fluid, som senere kan udfælde og danne årer



af grafit i en bjergart, hvor smelten størkner i sprækker. Her vil grafitten ikke have urenheder fanget i krystallerne.

De bjergarter, man udvinder grafit fra, har været igennem mange led i det geologiske kredsløb, fra sedimentation til højtemperaturmetamorfose og senere landhævning, hvor de overliggende bjerge er eroderet væk. Sådanne store ændringer i den geologiske cyklus tager mange millioner år. Når geologerne skal lede efter nye grafitforekomster, leder de særligt i områder, som er dannet

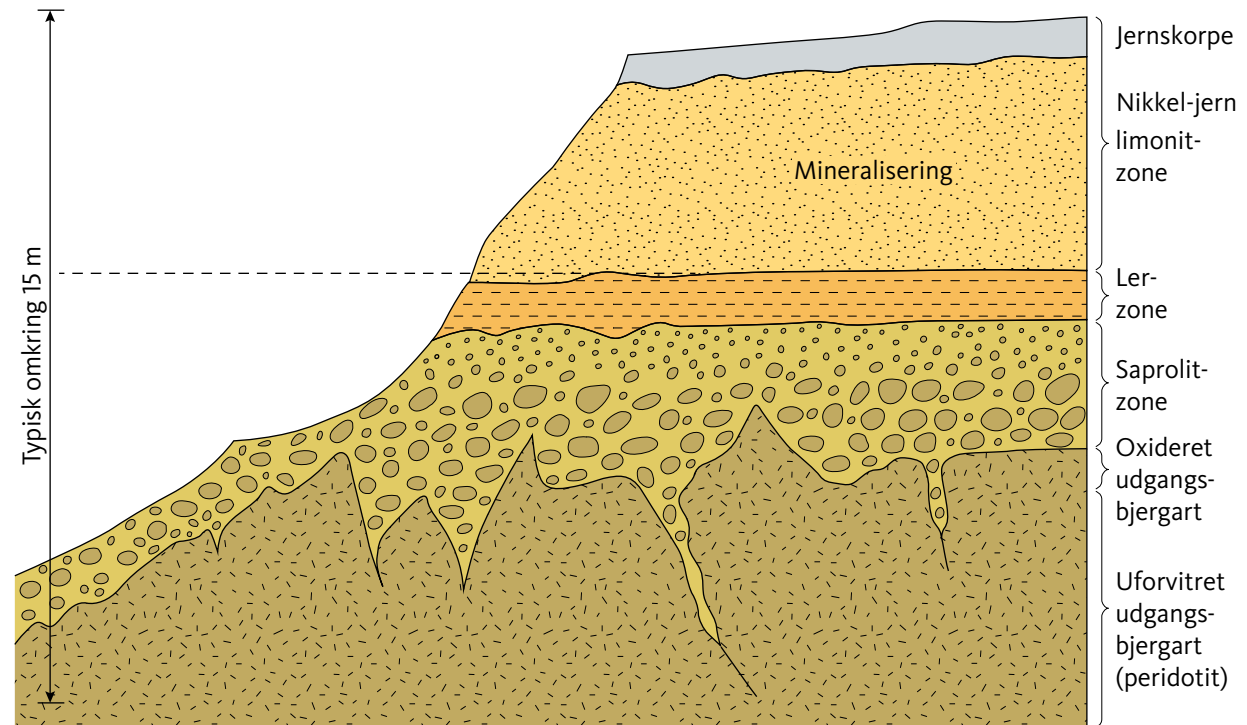
FIGUR 109. Hvis sedimenter med højt indhold af organisk materiale udsættes for højt tryk og temperatur metamorfoseres mineralerne, og herved omdannes det organiske materiale til grafit. Af MiMa (2019).

i den geologiske periode Proterozoikum (2.500-600 mio. år), fordi erfaringer viser, at der i denne periode blev dannet særligt mange grafitforekomster.

Grafit brydes både i underjordiske og i åbne miner. De fleste af dem bryder mindre end 20.000 ton om året, hvilket er ret små miner. Det skyldes, at grafit findes mange steder i verden og derfor brydes mange steder, og at grafit typisk findes i tynde årer og derfor ikke er egnet til meget store maskiner. Selv om der er stigende efterspørgsel på grafit på verdensmarkedet, kan det ikke afsættes i ubegrænsede mængder.

KOBOLT

I det periodiske system er kobolt nabo til nikkel og kobber, hvilket betyder, at de tre grundstoffer har mange kemiske fællestræk (størrelse og ladning). Derfor kan kobolt indgå i samme kemiske processer og mineraler som netop de to, og mange nikkel- og kobbermineraler indeholder også lidt kobolt, hvilket er grunden til, at kobolt brydes som biprodukt til nikkel og kobber. Nikkel og kobber kan koncentreres som malm i flere forskellige geologiske miljøer.



I Zambia og DR Congo findes der mange miner, der udvinder kobber, som stammer fra udfældning i et sedimentært bassin dannet for 880-550 mio. år siden. Mens sedimenterne i bassinet endnu ikke var hærdede og derfor stadig var permeable (gennemtrængelige), strømmede såkaldte bassin-fluider igennem de sedimentære lag. En bassin-fluid er vand, der cirkulerer i sedimenterne og op-

FIGUR 110. Geologisk snit gennem en nikkel-laterithorisont i en ultramafisk bjergart.

Jernskorpen, limonitzonen, lerzonen og saprolitzonen er alle udviklet ved forvitring og udvaskning (når stoffer transporteres væk af regnvand) af den nederste udgangsbjergart. Udgangsbjergarten er peridotit som indeholder <1 % nikkel og ca. 100 ppm kobolt.

Efter Samama (1986).

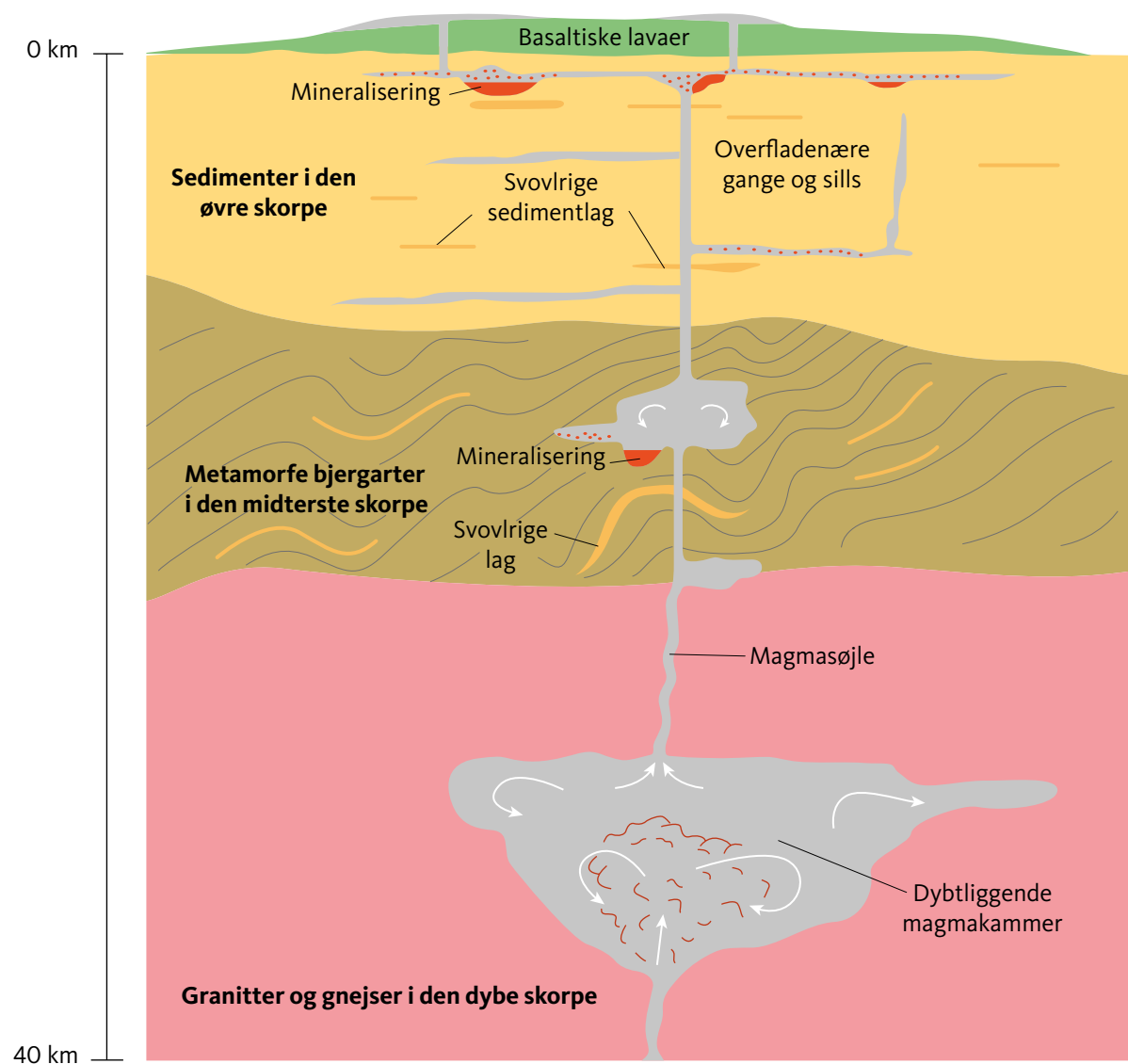
løser forskellige stoffer på sin vej. Især under kompaktion (det pres bjergarter udsættes for, når der gradvist aflejres flere kilometer af sedimenter ovenpå) frigives der mange stoffer fra sedimenterne. Væsken bevæger sig især langs forkastninger og breder sig ud i permeable lag af fx sandsten. Hvis fluiden er oxideret (kemisk tilstand, som gør stoffer mere egnede til at afgive elektroner og danne ioner), kan den indeholde sulfat og forskellige metaller, heriblandt kobber, som er opløst i væsken. Hvis væsken rammer et reduceret (det modsatte af oxideret, altså en kemisk tilstand hvor metallerne optager elektroner og danner forbindelser med fx svovl) sedimentlag, vil metalionerne udfældes. Et lag med højt organisk indhold vil have reducerede og iltfri forhold, og der vil være masser af svovl. Så når fluiden med opløste metaller rammer det organisk-rige lag, vil kobber binde sig til svovl.

Forsimpelt kan man sige, at væsken bærer opløste metalioner, indtil de møder svovlrige lag og danner malmminerale.

NIKKEL

Nikkel forekommer i to meget forskellige typer af nikkelmineraliseringer: sedimentæ-

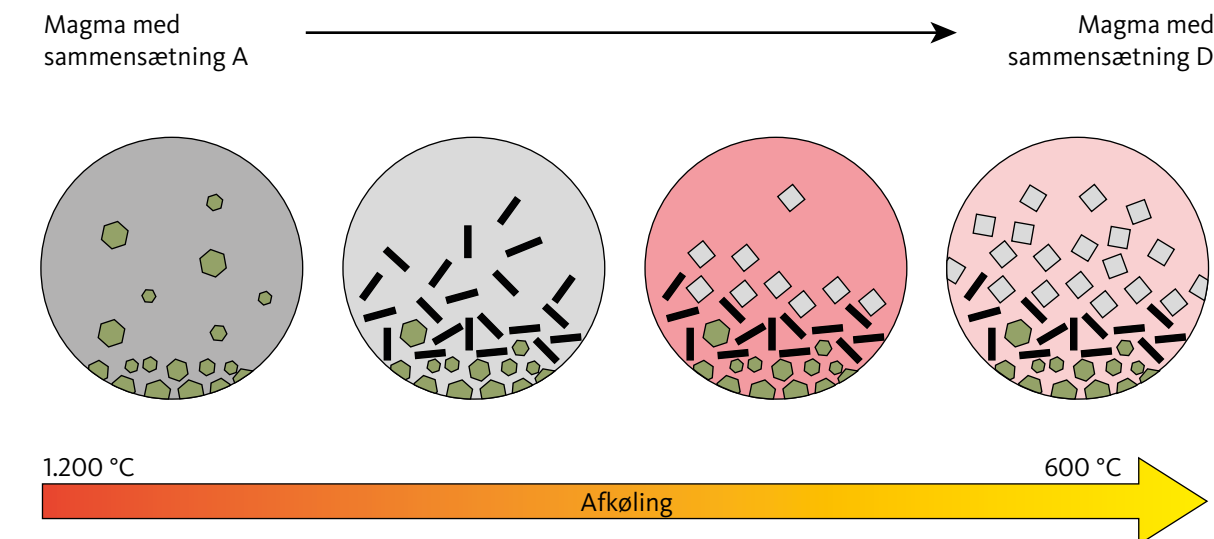
FIGUR 111. Dannelsen af nikkelforekomster i et magmatisk system. Svovl optages i magmaet, når magmaet kommer i kontakt med svovlrige sedimentlag. Svovlen 'suger' bl.a. nikkel til sig og udskiller sig fra resten af magmaet. På grund af høj densitet falder nikkelsulfiderne til bunds i magmaet og krystalliserer som en nikkelrig malm. Af MiMa (2019).



re (laterit) og magmatiske nikkelforekomster.

Nikkel-laterit-forekomster kan dannes som følge af kemisk forvitring af nikkelholdige, ultramafiske bjergarter (**figur 110**). Denne forvitring foregår over mindst 1 mio. år og kan kun foregå i tropiske klimazoner med høj luftfugtighed og nedbør. Her fører en intens kemisk forvitring af jordoverfladen til, at de mere letopløselige stoffer udvaskes og fjernes, mens de uopløselige forbliver tilbage i en laterit. Som følge af dannelsesmetoden vil lateritforekomster kun forekomme i de øverste få meter af jordoverfladen, men de kan til gengæld dække et stort areal. Lateritforekomster findes hovedsageligt på breddegrader mellem 25° N og S.

Magmatiske nikkelforekomster er, som navnet antyder, nikkelforekomster i magmatiske bjergarter. Langt det meste af Jordens nikkel befinder sig i Jordens kerne, som hovedsageligt består af jern og 5 % nikkel. Jordens kappe indeholder i gennemsnit kun 0,2 % nikkel, mens skorpens indhold i gennemsnit er så lavt som 0,01 %. Dannelsen af et magma, som er rigt på nikkel, skal ske i kappen, fx i forbindelse med en aktiv pladegrænse eller et hotspot. Hvis der her sker en delvis



opsmeltning af kappen, dannes en siliciumsmelte med indhold af SiO_2 (siliciumdioxid) og andre grundstoffer (**figur 111**). For at få nikkel og andre metaller til at koncentrere sig i en separat smelte, skal der være svovl i magmaet, da nikkel foretrækker at danne mineraler med svovl frem for silikat. Svovlet kan stamme fra fx skorpemateriale med højt organisk indhold. Når silikatsmelten møder svovlet, vil nikkel 'suges' ud af silikatsmelten og danne nikkel-sulfidmineraler i den svovlholdige smelte (**figur 111**). Svovl- og silikat-smelten er ikke umiddelbart blandbare og vil

FIGUR 112. Fraktioneret krystallisation. Når et magma afkøles, møder de forskellige mineraler deres størkningstemperatur gradvist, hvilket bevirker, at de krystalliserer og udfælder; først krystalliserer olivin (grøn), pyroxen og amfibol (sort), senere udfældes feldspat og kvarts (grå) og til allersidst vil man have et magma, der er koncentreret i kvarts og grundstoffer, der ikke passer ind i de nævnte bjergartsdannende mineraler. Det drejer sig især om grundstoffer med stor ion-radius, som fx de sjældne jordartsmetaller, lithium, niobium og zirkonium. Af MiMa (2019).

derfor størkne hver for sig. De metalholdige sulfidminerale er desuden tunge og vil ofte synke til bunds i magmaet og danne nikkel-rige lag.

LITHIUM

Lithiumforekomster kan ligeledes dannes på to måder: magmatisk og sedimentært (figur 113. b, c).

Lithiumpegmatitter

Når et magma begynder at størkne, dannes der mineraler afhængigt af magmaets kemiske sammensætning. I starten størkner de mest almindelige silikatminerale i en særlig rækkefølge (figur 112). Først krystalliserer de mørke Ca-, Fe- og Mg-rige mineraler og senere de lyse Na-, Al- og K-rige mineraler. Når alle disse almindelige mineraler er størknet, kan der forblive en restsmelte. I restsmelten findes de særlige grundstoffer, som passer dårligt ind i de almindelige mineraler på grund af deres store ion-radius. På den måde vil den resterende smelte løbende blive mere og mere koncentreret med disse særlige stoffer. Der kan være tale om grundstoffer som bly, zink, tin, lithium, de sjældne jordartsmetaller, beryllium, zirko-

FIGUR 113. Miner for batterimineraler.

A. Nkomati nikkel-lateritmine i Sydafrika bryder nikkel fra en magmatisk nikkelforekomst.

B. En af Galaxy Resources Limiteds miner som bryder lithiumholdige mineraler fra en magmatisk forekomst, Ravensthorpe, Western Australia.

C. Lithium-brine-mine. Her ses, hvordan man udvinder lithiumrige salte fra saltsøen Salinas Grandes i Jujuy, Argentina.

Fotos fra Shutterstock.

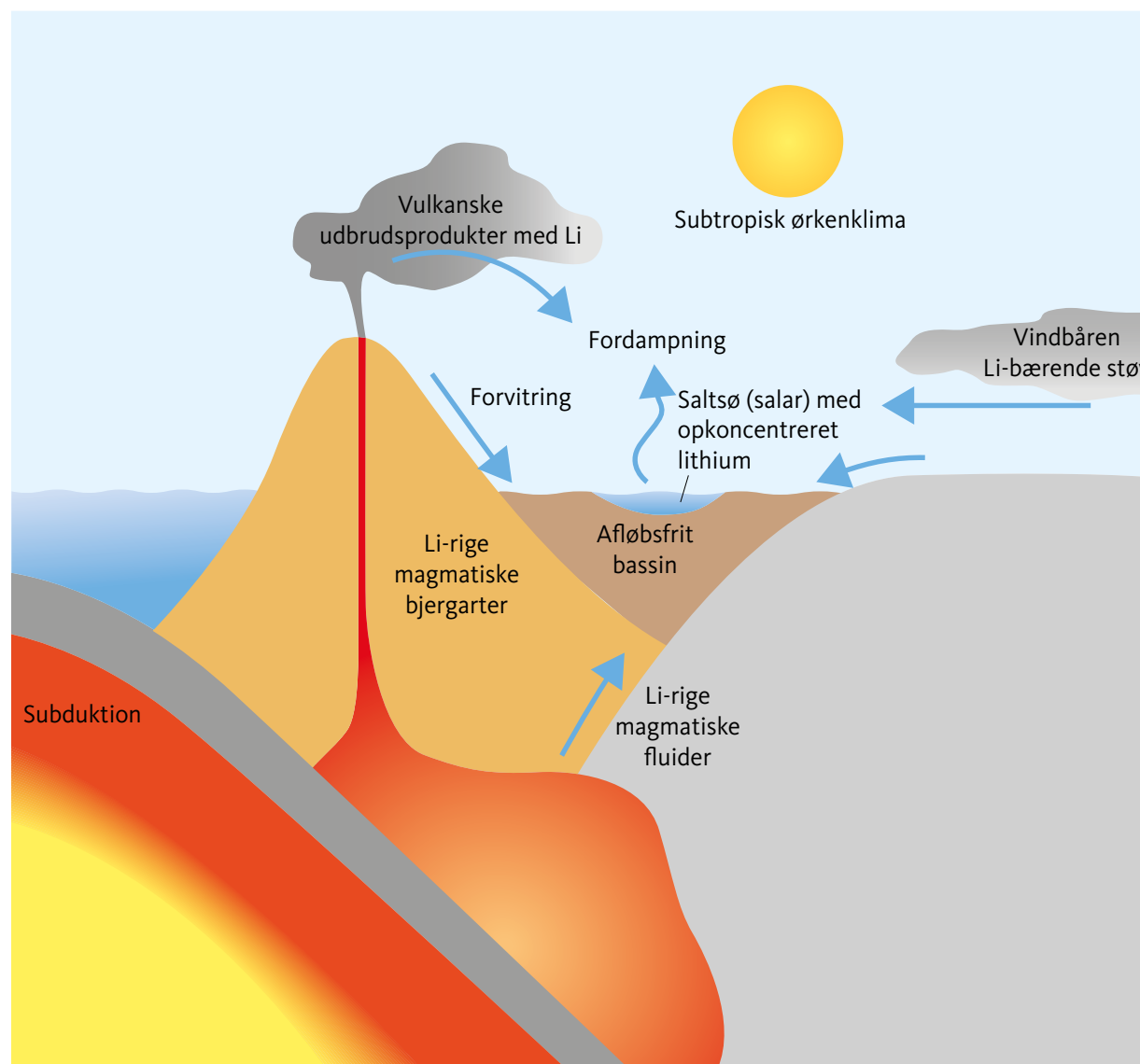


nium og niobium. Men også flygtige stoffer som vand, kuldioxid, fluor og klor findes i restsmelten. På grund af sit indhold af vand og kuldioxid vil restsmelten være meget tyndtflydende og have et lavere smeltepunkt end den resterende smelte. Mineralerne kan let vokse i det meget tyndtflydende magma og bliver derfor til meget store mineraler. Magmaet trænger typisk ind i sprækkezoner og danner gange. Sådanne bjergarter kaldes pegmatit og er grovkornede bånd og gange i en magmabjergart. Denne type lithiumforekomster findes mange steder i verden, men især i Australien er der store forekomster, stor efterforskning og en betydelig udvinning.

Lithium-brines

En anden måde lithium kan opkoncentreres til økonomisk rentable forekomster er gennem inddampning af søvand i særligt lithiumrige miljøer (figur 114). Søvandet er ikke almindeligt ferskt søvand, men saltopløsninger, som er opstået gennem mange års inddampning og kun et lille årligt tilløb af ferskt regnvand. Det forudsætter afløbsfrie søer, som kun opstår sæsonmæssigt, dvs. at de tørrer delvist ud i løbet af året. Søerne

FIGUR 114. Geologisk, landskabsmæssig og klimatisk model over saltsøer i Andesbjergenes bagbue-bassiner, altså det bassin der dannes på bagsiden af den vulkanske ryg. Aflukkede søer, der dannes i et tørt klima, vil hvert år udtørre, og de salte, der findes opløst i søvandet, vil udfældes. Hvis denne sø findes i et område med naturligt højt lithiumindhold, vil lithium kunne koncentreres til en økonomisk rentabel forekomst. Af MiMa (2019) efter Hodson (2015).



skal være i kontakt med en bjergart, som har forhøjet indhold af lithium, og som i kombination med geotermisk aktivitet (fx et område med underliggende magmakamre) kan bringe lithium op, hvor det opløses i søvandet. Når vandet fordamper, udfældes salte, bl.a. lithiumcarbonat. Hvis denne cyklus af opløsning i søvand, fordampling og udfældning af salte får lov at foregå over lang tid, vil der kunne ophobes betydelige mængder lithiumsalte.

Lithiumrige saltsøer er bedst kendt fra Andesbjergene, hvor de kaldes en 'salar'. I en salar udfældes hovedsagligt almindeligt salt (NaCl). Når det er udfældet pumper mineselskabet den resterende opløsning ind i mindre kar og lader disse udtørre.

De udfældede salte i karrene vil have en høj koncentration af lithiumcarbonat (Li_2CO_3), som man let kan opsamle. De talrige søer i Andesbjergene er særligt egnede til dannelse af denne type lithiumforekomster, fordi der er en aktiv subduktionszone med vulkanisme, som giver masser af geotermisk aktivitet. Desuden befinder bjergene sig i den tørre, subtropiske klimazone, hvor der er høj fordampling.

NØGLEBEGREBER

- Grafit
- Kobolt
- Nikkel
- Lithium
- Malmforekomst
- Geologisk proces

REFERENCER

- Hodson, H. (2015). Lithium dreams: The surreal landscapes where batteries are born. Hentet fra <https://www.newscientist.com/article/mg22830430-300-lithium-dreams-the-surreal-landscapes-where-batteries-are-born/>
- Samama, J. C. (1986). *Ore fields and continental weathering*. Van Nostrand Reinhold Company New York.

KAPITEL 15

FIGUR 115. Solpaneler på mark i Danmark.
Shutterstock.

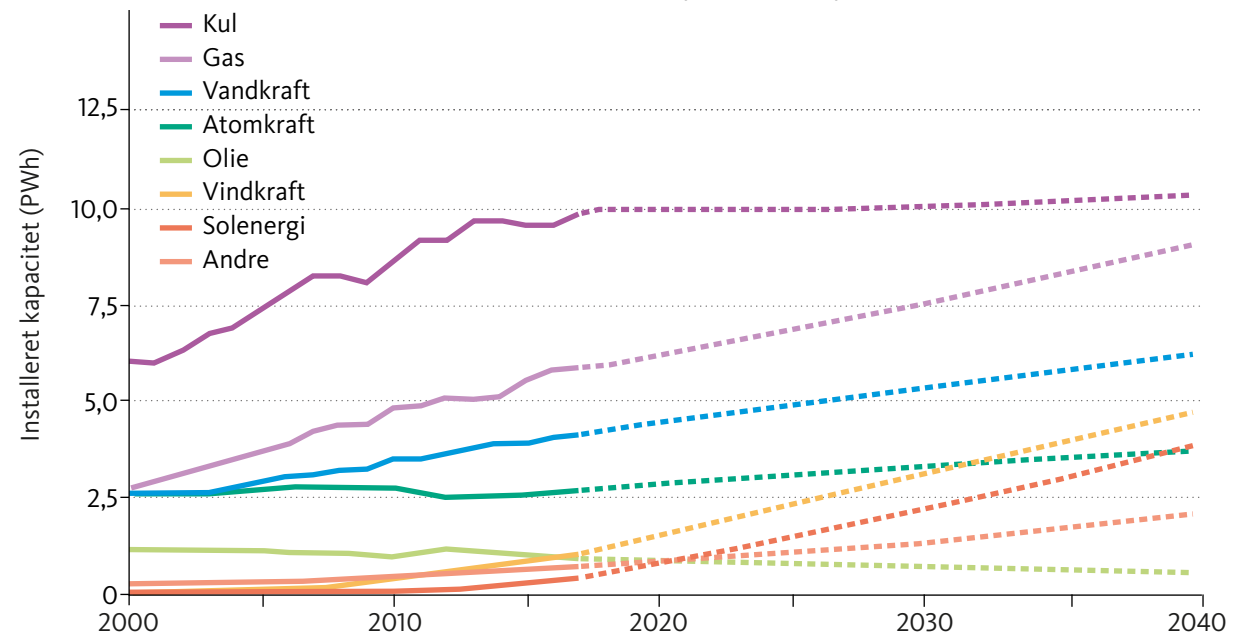
SOLCELLER – EN GRØN ENERGITEKNOLOGI

SOLCELLER – EN GRØN ENERGITEKNOLOGI

Solcelleteknologien udmærker sig ved, at den uden tilførsel af fossil energi og uden udledning af CO₂ omdanner solens stråler til elektricitet. Teorien om, at solens stråler kan omdannes til energi, beskrev Albert Einstein allerede i 1905, men der skulle gå mere end 50 år, inden amerikanske forskere fandt ud af at omsætte denne teori til praksis. Herefter gik der yderligere næsten 50 år, inden teknologien blev udviklet til det niveau, vi kender i dag, hvor det er blevet til en af de væsentlige grønne energiformer. Solcelleteknologien anses af nogle for at være en af de metoder, som i fremtiden kan producere mest elektricitet (figur 116).

Ikke alle områder i verden er lige velegnede til at udnytte solenergi (figur 117). Blandt andet har den nordlige del af Europa, herunder Danmark, og det østlige Kina relativt lidt indstråling, mens Sydeuropa, Nordafrika, Australien og det vestlige Nordamerika har relativt meget indstråling.

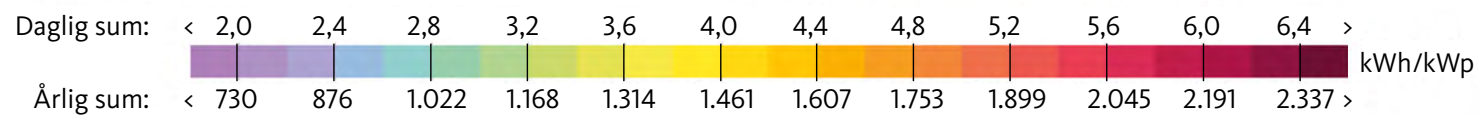
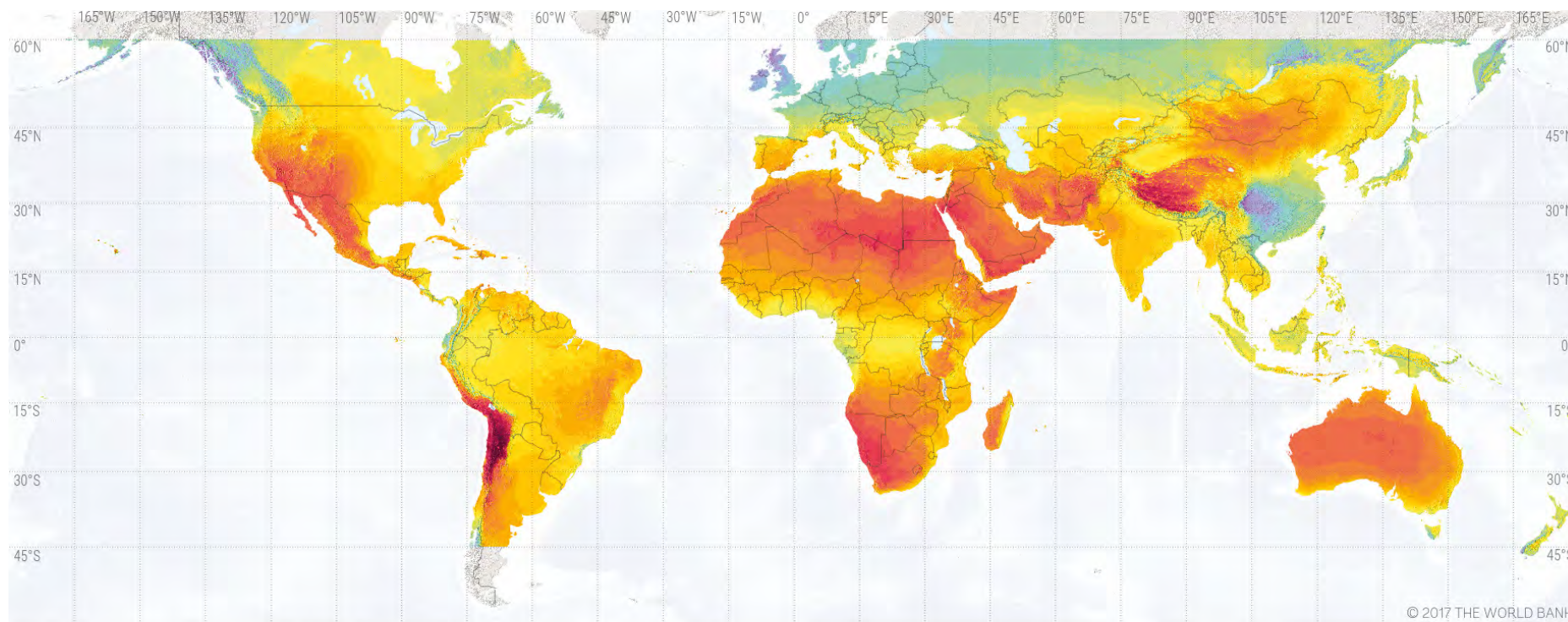
Trods disse forhold vinder solcelleenergiteknologien frem, også i Danmark. Der er et stigende antal landmænd, som vælger at installere solcelleanlæg på deres marker i ste-



det for at dyrke afgrøder i forventning om, at det på sigt vil give en bedre forrentning. Det er eksempelvis tilfældet på Lerchenborg Gods' marker ved Kalundborg, hvor 1.800 hektar landbrugsjord planlægges omlagt til solcelleanlæg.

Der er dog stadig tekniske og praktiske udfordringer, der skal løses, hvis solceller i fremtiden skal blive blandt de vigtigste energikilder i Danmark. For det første er

FIGUR 116. Det Internationale Energiagenturs forventninger til kapaciteten for otte forskellige energiteknologier frem mod 2040. Efter IEA (2018).



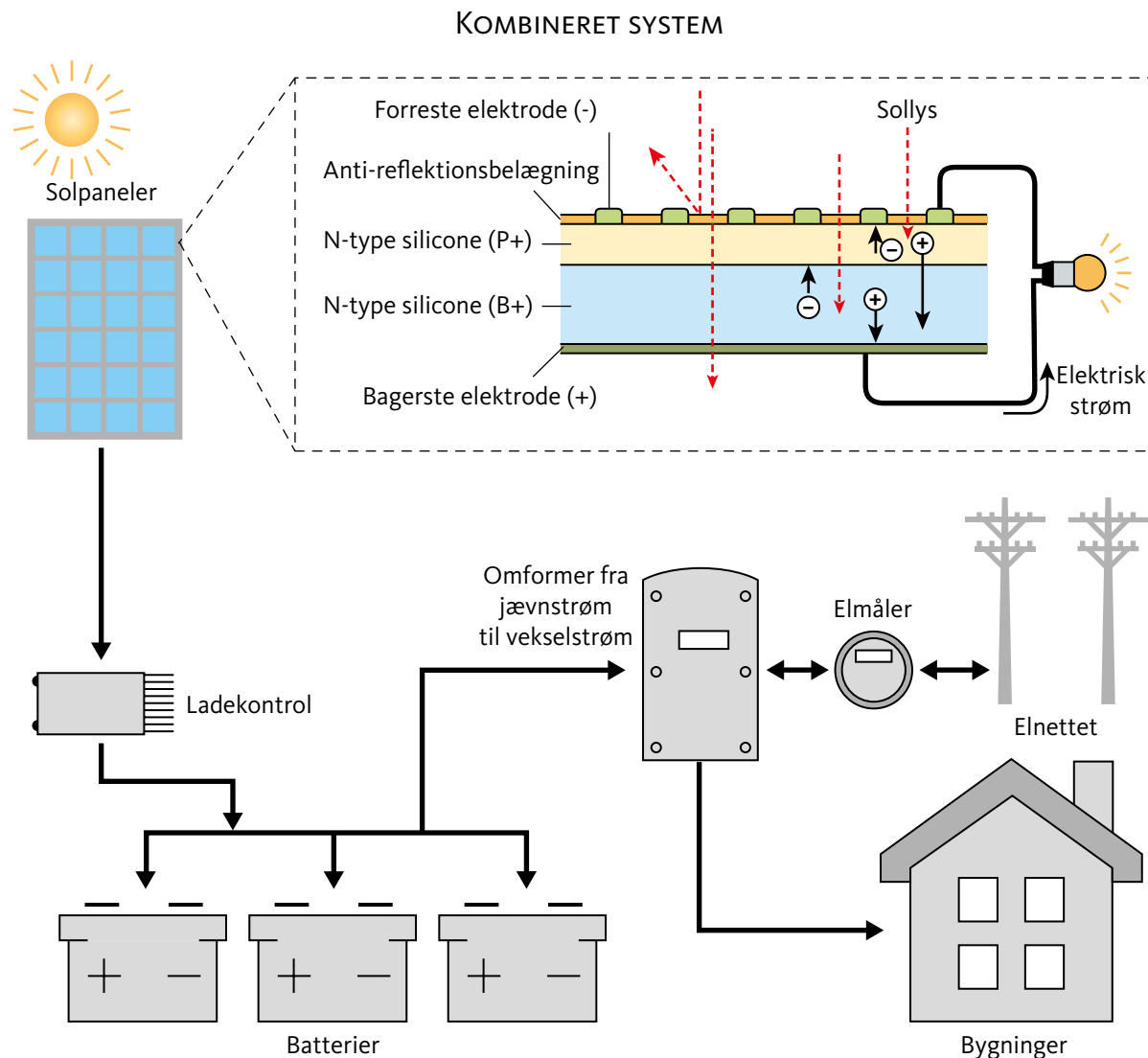
FIGUR 117. Kortlægning af de områder i verden der har de største potentialer for at producere energi fra solcelleanlæg. Kort af GSA (2017).

effektiviteten meget lav, og solcelleanlæg er derfor meget pladskrævende i forhold til at producere den samme mængde energi som fx vindmøller. Skulle hele Danmarks strømforbrug i 2017 på 32,4 mio. TWh dækkes af solceller, ville det kræve et areal svarende til næsten hele Lolland. Solcelleparkerne store pladsbehov er mange steder et praktisk problem og til tider årsag til folkelig modstand (figur 119. b). For det andet skal man være opmærksom på, at metoden kun fungerer i dagslys og bedst, når solen skinner. Der er derfor brug for at koble solceller med systemer, som kan opbevare energien, så den kan bruges, når solcellen ikke producerer energi. Dette kan fx være i form af batterier, opvarmning af store vandreservoirer eller til fremstilling af hydrogen som brændstof til biler.

DEN GLOBALE UDBYGNING AF SOLCELLEANLÆG

Den globale energikapacitet fra solcelleanlæg er hastigt stigende, og der er store muligheder for yderligere udbygning (figur 117). Selvom Kina ikke alle steder har optimale forhold for solcelleanlæg, udbygger Kina hurtigst og står for ca. 50 % af den globale

FIGUR 118. Kombineret system hvor solcellerne leverer energi til batterier, som kan bruges, når solcellen ikke leverer energi. Eventuel overskudsenergi sælges til elnettet. Princippet i solcellen ses i udsnittet. Af MiMa (2019).





FIGUR 119. Solceller i billeder.

A. Solceller på tage og på ydermure af bygninger bliver mere og mere almindelige.

B. Verdens største solcelleanlæg i Pavagada, Indien, med en forventet kapacitet på 2.000 MWh. Som en af løsningerne på arealproblemet arbejder man på, at lave solcelleparker på havet, husfacader, vejbelægninger m.m. Ud over arealproblemet kan der opstå problemer med at få tilstrækkelige forsyninger af nogle af de råstoffer, der skal bruges til at lave selve solcellerne. Foto af Bengali (2018).

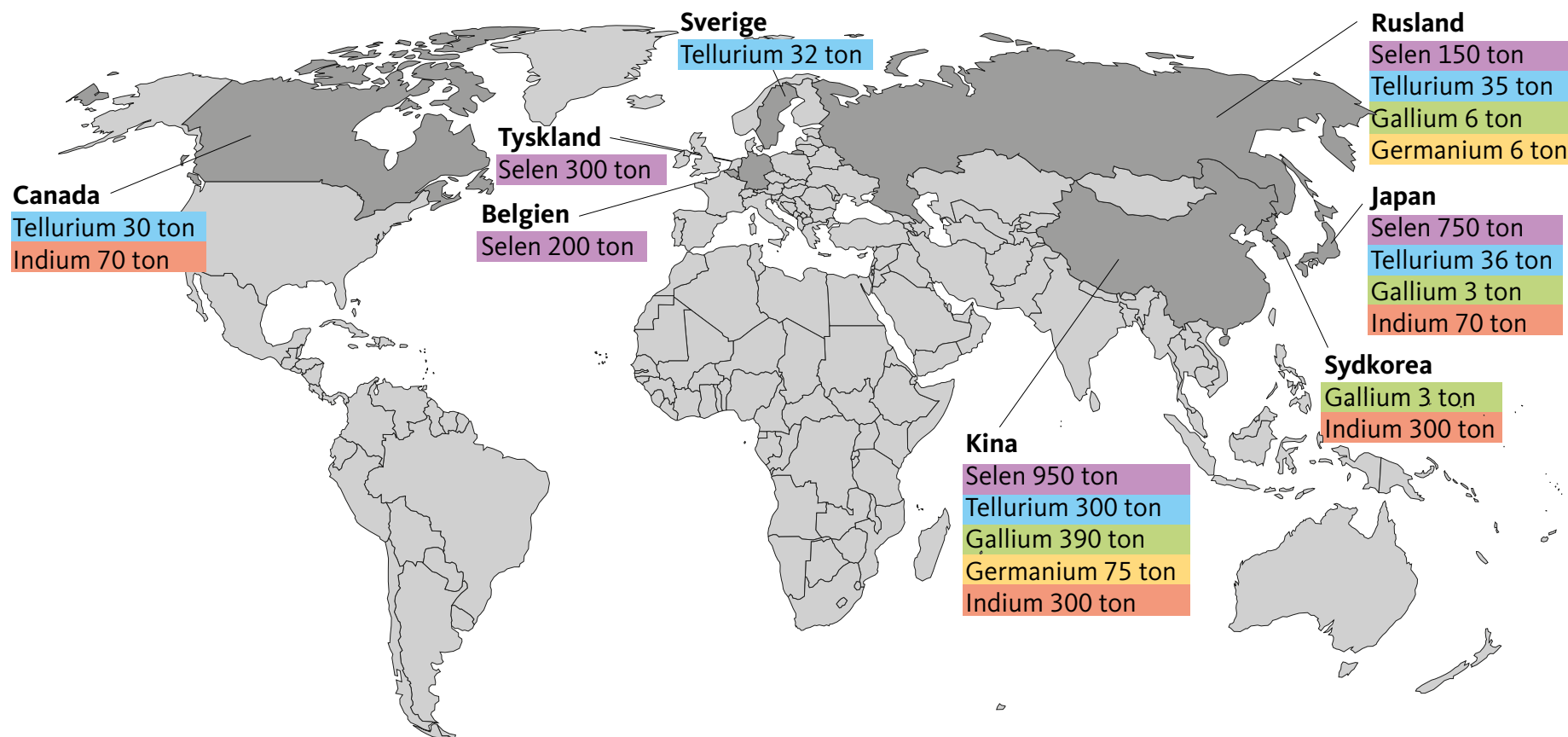
C. Solcellekraftværk.

Foto A og C fra Shutterstock.

solcellekapacitet, som var under opbygning i 2018.

Solcellernes effektivitet afhænger både af celledeteknologien, og hvor på kloden solcellen er placeret. I Sahara og Australien kan lysintensiteten være op til 2.000 kWh/m² pr. år, mens den i Nordeuropa er omkring 1.000 kWh/m² pr. år med meget lavere værdier i den mørke vintertid. Producenterne arbejder på at øge effektiviteten, som for de mest effektive anlæg er op til ca. 30 % af lysintensiteten, mens den for ældre systemer kun er få procent. Selv små teknologiske forbedringer kan derfor have stor energimæssig betydning.

Trods den hurtige udbygning af nye solcelleanlæg stod solceller i 2018 for under 2 % af verdens samlede elproduktion. I enkelte lande, som fx Honduras og Malta, produceres omkring 10 % af strømmen fra solcelleanlæg. Det Internationale Energiagentur anslår, at den samlede solcellekapacitet i 2050 vil være 4.670 GWh, hvilket er ni gange større end i dag. I takt med den stigende udbredelse er produktionsprisen for solcellematerialer faldet meget, og det, samt de store muligheder for at integrere teknologien i



FIGUR 120. Lande der producerer gallium, germanium, selen, tellurium og indium. Af USGS (2019).

bygninger og på transportområdet, bevirker, at teknologien vinder hurtigt frem.

HVORDAN VIRKER SOLCELLER?

Solcellerne omdanner sollyset til elektrisk energi ved hjælp af en fotoelektrisk proces, der sættes i gang, når solens stråler rammer overfladen af solcellen (figur 118). De enkelte solceller er opbygget som en sandwich, der består af to eller flere lag af halvledende materialer, hvor silicium er det hyppigst anvendte. Når sollysets fotoner rammer cellerne, dannes der en elektrisk ladning, fordi elektronerne får tilført energi og løsriver. Siliciumpartiklernes overflader er dækket med andre materialer, som giver hver skive af sandwichen en positiv eller negativ elektrisk ladning, som gør, at de løsrevne elektroner kun vil bevæge sig én vej, hvorved der skabes en jævnstrøm. Metalplader på siderne af cellen samler elektronerne og overfører dem til ledninger og gør det til brugbar energi. Hver enkelt celle producerer kun meget lidt energi, og derfor indeholder solpanelet millioner af celler, som er koblet sammen. Som råstoffer til solcellerne anvendes nogle af de metaller, som bliver elektrisk ledende, når de udsættes for lys eller varme.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Vigtige grundstoffer til solceller										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Tb	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

■ Vigtige grundstoffer til solceller

Disse grundstoffer omtales ofte som halvledere og omfatter bl.a. bor (B), silicium (Si), germanium (Ge), arsen (As), antimon (Sb), og tellurium (Te).

Der arbejdes i to retninger for at udvikle solcelleteknologien (inkrementel innovation):

- Forbedringer af effektiviteten af siliciumcellerne, og
- Udvikling af nye typer hvor cellerne er så tynde, at de kan monteres på overflader af

FIGUR 121. Vigtige grundstoffer der bruges i solcelleindustrien. Af MiMa (2109).

huse, biler, skibe, fly etc. Den slags celler kaldes tyndfilmssolceller eller Grätzel-celler.

Der er fordele og ulemper ved de to metoder. Siliciumcellen har betydeligt højere effektivitet end tyndfilmscellen, hvis tempe-

raturen ikke er alt for høj, mens tyndfilmscellen er lettere at indbygge, men har generelt en meget lav effektivitet.

RÅSTOFFER TIL SOLCELLER

Nogle af de vigtigste grundstoffer i solceller er vist i figur 121. De vigtigste produktionslande af disse grundstoffer er Canada, Sverige, Tyskland, Belgien, Kina, Rusland, Japan og Sydkorea (figur 120).

Siliciumcellerne udgør omkring 90 % af markedet. Ud over silicium, som er det råstof som bruges i størst mængde, bruges en række andre grundstoffer til produktionen, fx gallium, germanium og indium, som kun findes i meget små mængder i naturen. Derfor er det ikke økonomisk rentabelt at bryde disse råstoffer kun til brug i siliciumceller. Man bryder dem derfor som biprodukter til anden minedrift, fx aluminium, zink og kobber, hvilket medfører, at når produktionen af fx aluminium falder, vil produktionen af gallium også falde, selvom solcellefabrikantene faktisk mangler gallium.

En anden udfordring opstår, når den teknologiske udvikling af solceller og andre grønne energiteknologier går hurtigt og i løbet af

FIGUR 122. Forbrug, årlig produktion i 2015 og geologiske reserver for tellurium, gallium, selen, germanium og indium, der er de vigtigste materialer til produktionen af solceller. Bemærk at tallene for produktion og reserver er meget usikre, da selskaberne betragter produktion og forbrug som forretningshemmeligheder. Efter Grandell & Höök (2015) og USGS (2019).

Grundstoffer	Materialeforbrug (g/m ²)	Produktion (ton) (global) (2015)	Geologiske reserver (ton)
Tellurium	7,8	~500	24.000
Gallium	0,5	410	Ingen data
Selen	4,8	~2.000	120.000
Germanium	0,4	120	Ingen data
Indium	2,9	750	Ingen data

få år kræver stor tilførsel af bestemte mineraler og produktionen ikke kan følge med efterspørgslen. Mineindustrien og de industrier, som omdanner malm til produkter, har nemlig lang responstid i forhold til at fremskaffe råstoffer, når der opstår interesse/ efterspørgsel efter bestemte råstoffer. Dette misforhold mellem udbud og efterspørgsel kan også give forsyningsvanskeligheder for solcelleindustrien.

Forbruget af en række vigtige grundstoffer til solceller, samt den årlige mængde der brydes og hvor store reserverne er vist i figur 122.

SILICIUM (Si)

Silicium udgør sammen med oxygen mine-

ralet kvarts (SiO₂) og er et af de mest almindelige mineraler i jordskorpen. Før silicium kan bruges, skal oxygen og silicium adskilles. Dette gøres ofte i en lysbueovn, hvor SiO₂ reduceres til Si + O₂; efterfølgende gennemgår Si en række teknisk komplicerede oprensningsprocesser, inden det kan bruges som halvleder.

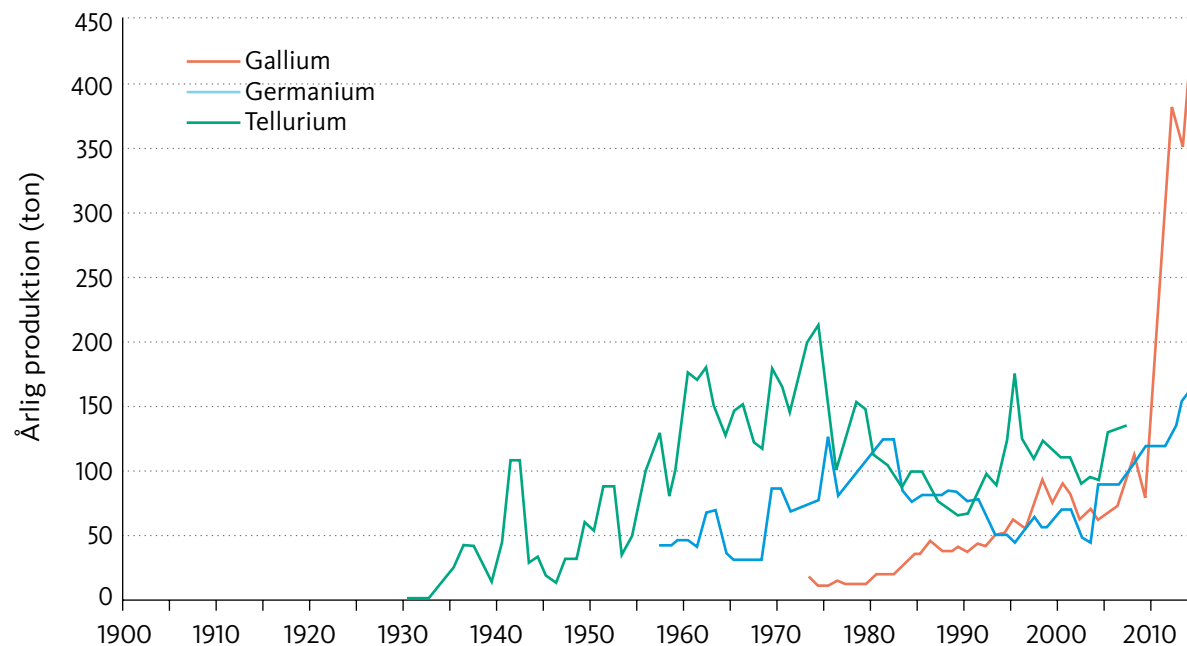
Kvarts kan komme fra både løse sandaflejringer og fra bjergarter, der indeholder meget kvarts, fx sandsten, og da kvarts er et almindeligt mineral, er der i princippet ikke vanskeligheder med at få fat i dette råstof. Men da det er energikrævende at omdanne kvarts til silicium, og der kun er få virksomheder, som kan gøre det, er silicium til solceller meget dyrt.

CADMIUM (Cd)

Cadmium er et miljøskadeligt og giftigt metal og af disse grunde bruges det i mindre omfang industrielt. Det meste cadmium udvindes fra zinkmalme, men næsten halvdelen kommer fra genanvendelse af nikkel-cadmium-batterier og fra andre produkter, der indeholder cadmium. Det er en miljøgevinst at fjerne cadmium fra vores affald og genanvende det. Kina og Sydkorea står for hovedparten af cadmiumproduktionen.

GALLIUM (Ga)

Gallium er en halvleder, som udgør omkring 17 ppm af Jordens skorpe, hvilket svarer nogenlunde til indholdet af kobber. Gallium indgår sjældent i selvstændige mineraler, men indgår som en lille del i aluminium- og zinkmineraler og kan derfor brydes som biprodukt til disse. Man har estimeret, at der er flere millioner ton gallium i verdens bauxitforekomster, så geologisk er der ikke mangel på gallium. Men hvis priserne på gallium ikke er høje nok, til at det kan betale sig for virksomhederne at få det ud af malmen, kan der opstå en mangelsituation, hvis efterspørgslen stiger. Hvis øget efterspørgsel får



priserne til at stige, så opstår problemet med mineralindustriens responstid i forhold til at omstille til stigende produktion. Hovedparten af den mængde gallium, som forarbejdes til gallium-arsenid bruges til fremstilling af halvledere. Men foreløbig er det kun få procent af gallium-arsenid-produktionen, der bruges til solceller; hovedparten bruges i laserteknologi og LED-belysninger. Mængder af indvunden gallium er vist i figur 123.

FIGUR 123. Udvikling i produktionen af gallium, germanium og tellurium. Bemærk det er alle under 1.000 ton/år. Efter Grandell & Höök (2015).

GERMANIUM (GE)

Germanium er en halvleder og udgør omkring 2 ppm af Jordens skorpe. I lighed med gallium findes der ikke forekomster af germanium, som er så rige at de kan brydes som hovedprodukt. Germanium og gallium udvindes i stedet som biprodukt fra zink- og kobberminerale. Herudover er germanium blevet udvundet fra flyveaske fra kulfyrede kraftværker; flyveasken kan indeholde op til flere procent germanium. Denne germaniumkilde vil dog forsvinde i takt med, at de kulfyrede kraftværker afvikles. Germaniumproduktionen er vist i **figur 123**.

INDIUM (IN)

Indium er en halvleder og et råstof, som ikke findes i store koncentrationer. Det gennemsnitlige indhold af indium i Jordens skorpe er 0,1 ppm, men det findes i højere koncentrationer sammen med zinkminerale. Derfor brydes det som biprodukt i nogle zinkminer. Der er generelt meget lidt tilgængelig viden om, hvor meget indium der produceres, og hvordan dette sker; men det vides med sikkerhed, at Kina står for mere end 50 % af verdensproduktionen.

SELEN (SE)

Selen er en halvleder og optræder i naturen i meget små mængder i fortrinsvis sulfidminerale. Selen bliver især brugt som pigment i glasfremstilling. Verdensproduktionen af selen var ca. 3.300 ton i 2017, hvoraf hovedparten blev produceret i Kina, Japan og Tyskland. En betydelig del udvindes som et biprodukt i kobberaffinering og fra skrottede fotokopimaskiner. De kendte geologiske reserver udgør i dag ca. 100.000 ton.

TELLURIUM (TE)

Koncentrationen af tellurium i Jordens skorpe er kun omkring 5 ppb, og tellurium er dermed et grundstof, der kun findes i meget små koncentrationer. Verdens reserver af tellurium, som især er knyttet til kobberforekomster, er i 2018 skønnet til at være omkring 120.000 ton. Af den årlige produktion på ca. 440 ton (**figur 123**) bruges ca. 40 % i solcelleindustrien, som dermed er det største enkeltmarked for tellurium.

NØGLEBEGREBER

- Solcelleråstofferne
- Halvleder

- Siliciummetal
- Siliciumceller
- Tyndfilmsceller

REFERENCER

Bengali, S. (2018). The biggest solar parks in the world are now being built in India. Hentet fra <https://www.latimes.com/world/asia/la-fg-india-solar-20180319-story.html>

Grandell, L., & Höök, M. (2015). Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability: Science Practice and Policy*, 7(9), 11818–11837.

GSA. (2017). Global Solar Atlas. Hentet fra <https://globalsolaratlas.info/>

IEA. (2018). *World Energy Outlook 2018*. Organisation for Economic Co-Operation and Development.

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

Viva Energi. (u.å.). Hvordan fungerer et hybrid solcelleanlæg med batteri? Hentet fra https://www.vivaenergi.dk/Hvordan_virker_det

KAPITEL 16



FIGUR 124. En moderne havvindmøllepark i Danmark. Shutterstock.

VINDMØLLER – EN DANSK SUCCESHHISTORIE

UDBYGNINGEN AF VINDMØLLESEKTOREN KRÆVER RÅSTOFFER

Vindens energi har været brugt i Danmark gennem århundreder, både til sejlskibe og til vindmøller. I begyndelsen blev den energi, som de roterende vinger på møllerne skabte, brugt til at dreje tunge stenvals, som kunne formale korn til mel. Men allerede i 1895 opfandt danskeren Poul la Cour en elproducerende vindmølle og i 1901 havde han bygget en vindmølle, som producerede strøm til Askov by (figur 125). I 1908 var der 32 la Cour-vindmøller opstillet i Danmark, som leverede strøm til elværkerne, og under 1. verdenskrig voksede tallet til 250 vindmøller. Herefter gik udbygningen i stå, og der kom først gang i vindmøllerne igen i 1950'erne.

I 1957 blev der opstillet en 24 m høj mølle ved Gedser, som havde en effekt på 200 kW, men først i 1970'erne, da verden oplevede en energikrise, voksede interessen for vedvarende energi. Det blev fx starten til bygningen af den 54 m høje Tvindmølle ved Ulfborg, som kom i drift i 1978 og satte fokus på diskussionerne om, hvordan man kunne frigøre elektricitetsforsyningen fra de fossile brændstoffer (figur 126). I denne



periode begyndte mange mindre virksomheder at producere vindmøller. En af disse var Vestas, der i dag er en af verdens førende producenter af vindmøller. Siden den spæde start er der sket mange inkrementelle innovationer indenfor vindmølleteknologien, og størrelserne på vindmøllerne er vokset, så

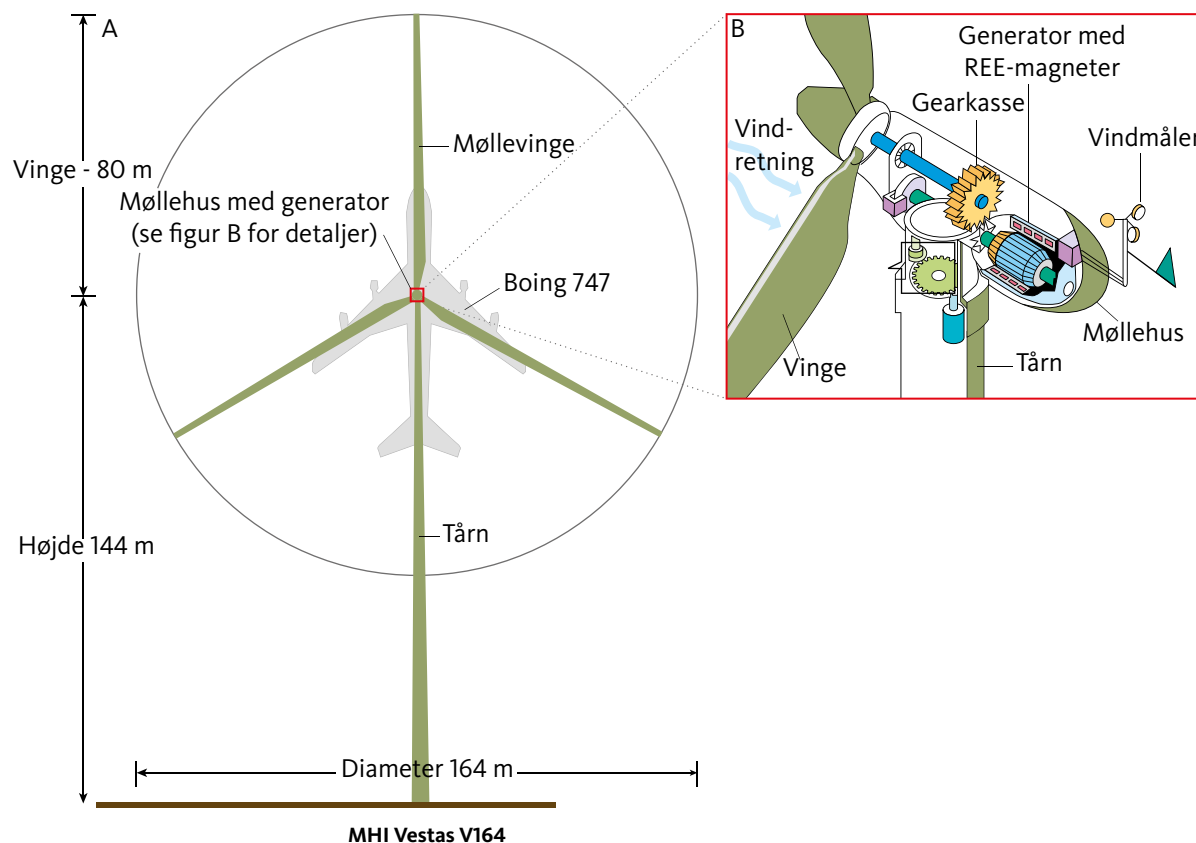
FIGUR 125. Den første elproducerende vindmølle blev udviklet i 1891 af danskeren Poul la Cour (som står på platformen). Foto af Nissen (2004).

FIGUR 126. Tvindskolernes vindmølle ved Ulfborg kom i drift i 1975 og blev starten på udviklingen af den danske vindmølleindustri. Shutterstock.



vingespidsen på nogle møller når op til 220 m over terræn, når vingen er højest oppe, og produktionen er på op til 8 MW (figur 127).

Energikrisen i 1970'erne skyldtes usikre leverancer af olie fra Mellemøsten på grund af politiske forhold og en bekymring for, at det hastigt stigende forbrug ville tømme verdens oliereserver. Israel var i krig med Egypten og Syrien, og de arabiske stater truede med at stoppe olien til de lande, der støttede Israel. I Danmark var 90 % af energiforbruget baseret på olie, og den danske olieproduktion var endnu ikke startet. Danmark var helt afhængig af import. Regeringen indførte bilfrie søndage og andre restriktioner på elforbruget. Så da udviklingen af vindmøllerne tog fart i 1970'erne, var

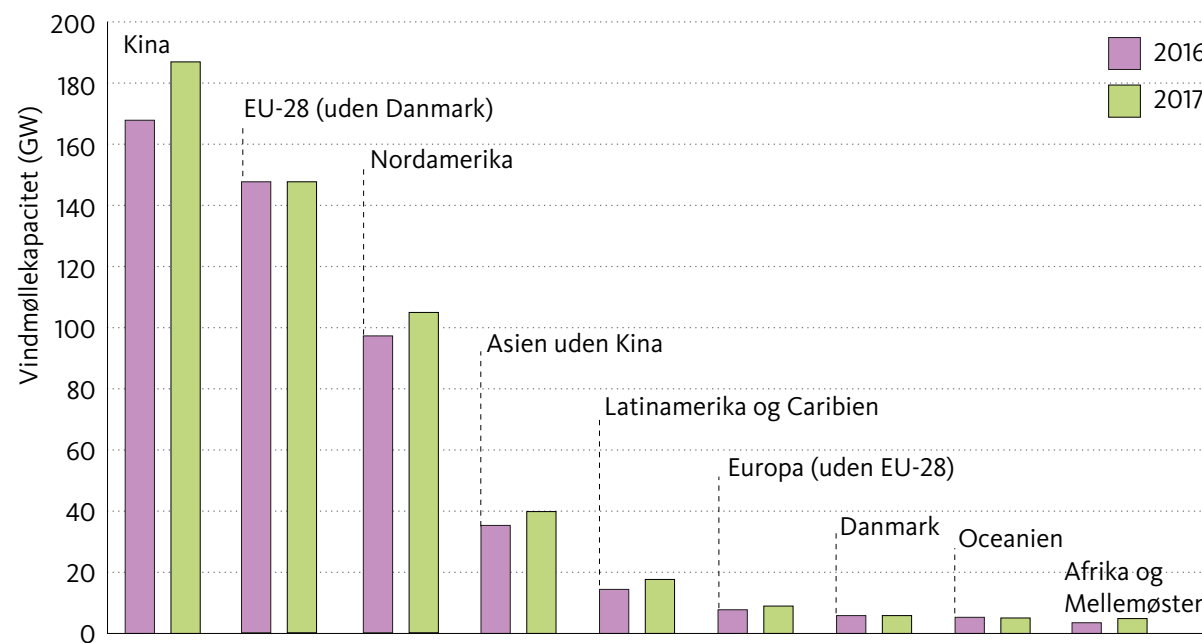


FIGUR 127. Den tekniske udvikling af vindmøller går meget hurtigt, de bliver større og mere effektive. Den nye MHI Vestas V164 har nu næsten dobbelt så store vinger som en Boeing 747 og en samlet højde på 224 meter. Effektiviteten forbedres ved nye design af bl.a. vinger og dynamo. Moderne dynamoer bruger store mængder sjældne jordartsmetaller for at gøre dynamoens magneter stærkere. REE = Rare Earth Elements eller sjældne jordartsmetaller. Efter Wilburn (2011).

klimaforandringer og CO₂-udledning endnu ikke en del af debatten; argumenterne gik alene på den manglende forsyningssikkerhed af de fossile råstoffer fra Mellemøsten. I dag er den hastige omlægning til grønne energiteknologier drevet af nødvendigheden af at nedbringe CO₂-udledningen for herved at påvirke klimaforandringerne i positiv retning.

Skal vi frigøre os fra fossile brændstoffer, kan vindmøller ikke være den eneste energikilde, da de kun producerer strøm, når der er tilstrækkeligt med vind til at drive møllerne. Omlægningen til grøn energiforsyning skal derfor kombineres med anlæg, der kan opbevare energien og med andre CO₂-frie energiteknologier, som ikke er vejr- og solafhængige.

Udbygning af vindmølleenergien er påvirket af mange forhold, bl.a. placeringen, fordi meget få mennesker vil have vindmøllerne i deres baghave. Det gælder især for vindmøller på land, hvor klagerne går på støj og skygge fra roterende møllevinger. Fælles for både havvindmøller og landvindmøller er, at de af mange betragtes som uæstetiske elementer i landskabet. Sådanne folkelige protester kan



gøre det vanskeligt at gennemføre langsigtede, regionale energipolitiske planer.

Den globale kapacitet som verdens vindmøller vil kunne producere, hvis man forestiller sig, at de alle er i gang på samme tid, er ca. 500 GW, men der er store regionale forskelle på, hvor mange vindmøller der er opstillet (figur 128).

Det Internationale Energiagentur (IEA) forventer en vækst i udbygningen af vindmøl-

FIGUR 128. Udviklingen i mængden af elektricitet vindmøller producerede i 2016 og 2017 i forskellige regioner i verden.

Det fremgår, at Kina har den største kapacitet samtidig med, at de har udbygget mest i denne toårsperiode.

Europa (EU28 samt resten af Europa) har næsten samme kapacitet, mens de øvrige regioner har betydelig mindre udbygget vindmøllekapacitet.

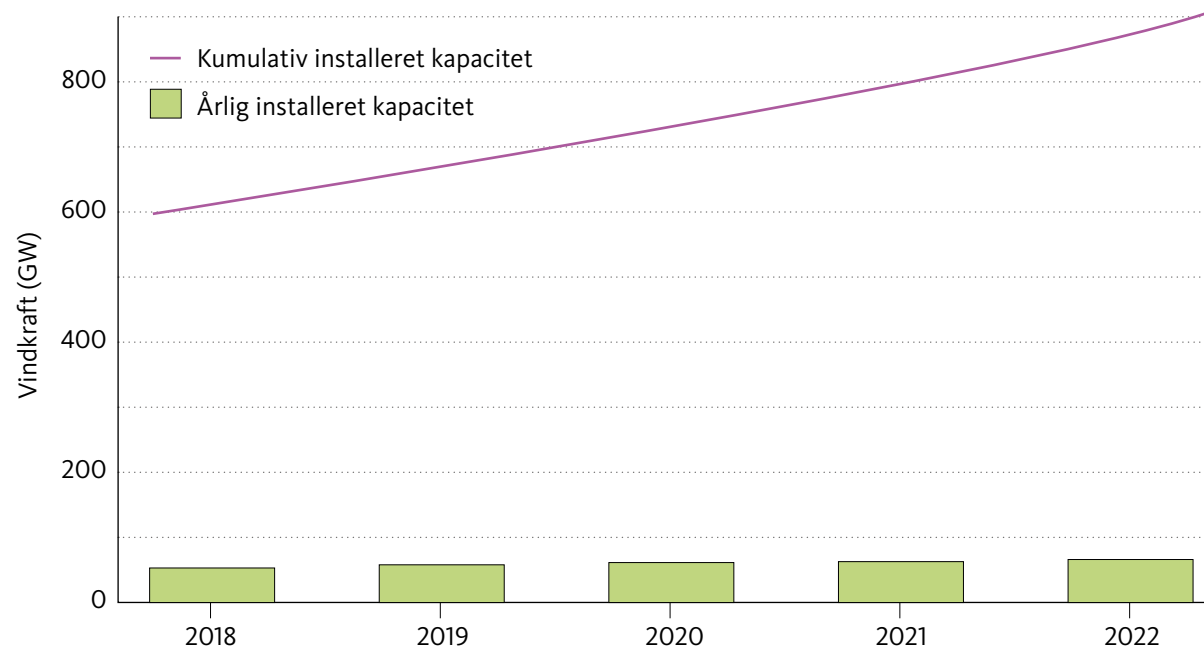
Efter Fried et al. (2018).

leparker, svarende til at alle verdens vindmøller i 2022 kan producere 841 GW energi (figur 129). I 2019 har Kina den største kapacitet efterfulgt af EU og Nordamerika. I 2017 havde de danske vindmøller en kapacitet på ca. 5 GW og dermed kun ca. 1 % af verdens samlede kapacitet, men den danske vindmøllekapacitet er højt i forhold til antallet af indbyggere.

HVORDAN FUNGERER EN VINDMØLLE?

Når vindens kraft får møllens vinger til at dreje rundt, overføres energien til møllens dynamo, som omdanner den mekaniske energi til elektrisk energi. Så med en højere vindhastighed øges produktionen af elektricitet. Tilsvarende bestemmer størrelsen af møllevingerne den mekaniske energi og dermed møllens strømproduktion.

Størrelserne på møllerne vokser år for år, hvilket øger udfordringerne, når man skal opstille møllerne, bl.a. fordi den tunge dynamo skal løftes højt op over jorden eller havet. Der udvikles imidlertid hele tiden dynamoer, som er lettere og mere effektive end de gamle, bl.a. fordi de indeholder meget stærke magneter. Magneternes



effektivitet skyldes indholdet af bestemte sjældne jordartsmetaller, som især bruges til havvindmøllerne.

RÅSTOFFER TIL VINDMØLLER

Vindmøller består af en række hovedkomponenter med hver deres funktion i møllen, og de er fremstillet af forskellige materialer. Materialerne er opbygget af grundstoffer, som sikrer, at materialerne har de ønskede egenskaber, fx at de er gode strømledere, har

FIGUR 129. Med en udbygningshastighed af verdens vindmølleparker på ca. 50-70 GW forventes der i 2021 at være en kapacitet på mere end 800 GW. Efter Fried et al. (2018).

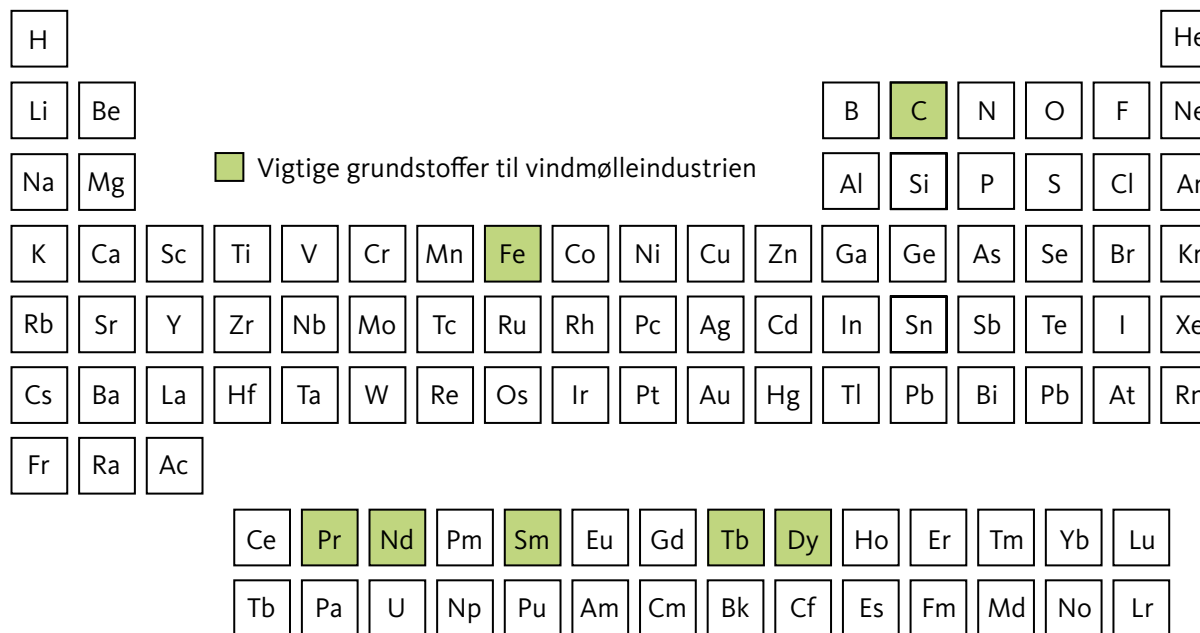
FIGUR 130. Oversigt over forbruget af udvalgte råstoffer til en vindmølle i ton (t) pr. megawatt (MW). Data fra Wilburn (2011).

	Stål ton/MW	Glasfiber ton/MW	Beton ton/MW	Aluminium ton/MW	Kobber ton/MW	REE ton/MW
Havvindmøller	100	7	400	2	3	0,25
Landvindmøller	100	7	400	2	3	0,05

høj styrke eller stærke magnetiske egenskaber (figur 131). Nogle af råstofferne, som fx beton og stål, der skal bruges i store mængder til bl.a. fundament og mølleskelet, er ikke svære at skaffe, mens andre grundstoffer, fx de sjældne jordartsmetaller, der indgår i dynamoens magneter, kun bruges i små mængder. Til gengæld kan de være svære at fremskaffe.

Vindmøller er forskellige og bruger forskellige mængder af råstoffer. Forbruget angives i ton råstoffer pr. megawatt (MW) (figur 130). Opgørelserne er dog ofte upræcise, fordi fabrikanterne af konkurrencehensyn ikke ønsker at oplyse præcise mængder. For at kunne beregne, hvor store mængder råstoffer der skal bruges til vindmøller de kommende år, skal man først kende de prognoser, der findes for udbygning af vindkraft.

I 2017 viste en prognose for den globale udbygning af vindkraften, at der vil blive bygget så mange nye vindmøller, at den globale produktion stiger fra ca. 592 GW i 2018 til 841 GW i 2022 (figur 129). De største udbygninger vil foregå i henholdsvis Kina (ca. 30 GW/år), EU (15 GW/år) og Nordamerika (10 GW/år).



Til fremstilling af en vindmølles teknisk og elektronisk komplicerede konstruktioner, bruges rigtig mange forskellige materialer og dermed mange af de grundstoffer, som findes i det periodiske system (figur 131).

KAN MØLLERNE GENANVENDES, NÅR DE ER SLIDT NED?

Vindmøller har en forventet levetid på 20 til 30 år. Dermed har en stor del af verdens mere end 350.000 vindmøller snart nået en

FIGUR 131. Vigtige grundstoffer der bruges i vindmølleindustrien. Af MiMa (2109).

alder, hvor de skal udskiftes. Møllerne indeholder store mængder mineralske råstoffer, som der er stigende interesse for at genanvende. Specielt er vindmøllens store magneter, der udgør en del af møllens dynamo, stærkt efterspurgt til genanvendelse, da de har et højt indhold af de sjældne jordartsmetaller neodymium, praseodymium, terbium og dysprosium.

Møllevingerne udgør et særligt problem. På de første møller var vingerne lavet af glasfiber, og når møllerne blev skrottet, sparede man møllevingerne op, knuste dem og brugte dem som råstof ved fremstilling af cement. Dette var en fordel for både mølle-ejeren og for cementfabrikken. I de senere år er man gået over til at lave vingerne af kulfibre, fordi dette materiale er stærkere og lettere. Desværre er der endnu ikke nogen anvendelsesmuligheder for brugte vindmøllevinger af kulfibre. Dette er et eksempel på, at genanvendelse indtil nu ikke har været en integreret del af de tekniske udviklinger af vindmøllerne.

NØGLEBEGREBER

- Dynamo
- GW
- MW
- Vindmøllekapacitet

REFERENCER

Fried, L., Qiao, L., & Sawyer, S. (2018). *Annual Global Wind Report. Annual Market Update 2017*. Hentet fra <https://gwec.net/members-area-market-intelligence/reports/>

Nissen, P.-O. (2004). *Kratostaten En opfindelse af Poul la Cour*. Poul la Cour Museets Venner.

Wilburn, D. R. (2011). *Wind energy in the United States and Materials Required for the Land-Based Wind Turbine Industry From 2010 Through 2030* (Nr. Scientific Investigations Report 2011-5036). Hentet fra <https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5036/>

KAPITEL 17



FIGUR 132. Moderne villa oplyst med energibesparende LED-lys. Shutterstock.

LED – BIDRAGER TIL MINDRE ENERGIFORBRUG

LED-BELYSNING – EN DEL AF DEN GRØNNE ENERGIREVOLUTION

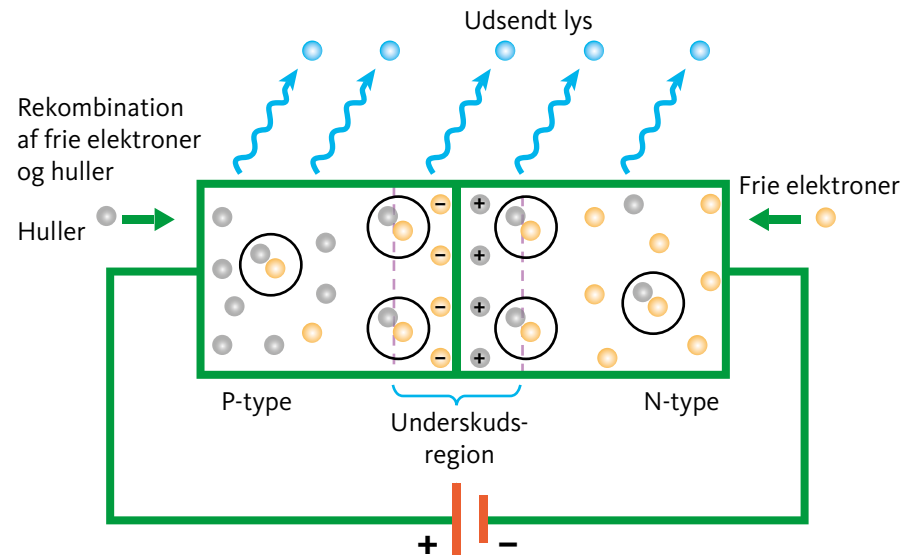
Light Emitting Diodes eller LED-lamper er blevet en almindelig del af vores belysning, både hjemme, til gadebelysning, i bygninger, til biler, cykler, i lommelygter, som baggrundsbelysning i smartphones og computerskærme og meget andet. Der er tre væsentlige årsager til LED-lampernes popularitet:

- De bruger meget lidt energi.
- Enhederne kan laves i meget små størrelser.
- De har levetid på op til flere tusinde timers brug.

Det gør dem anvendelige til mange forskellige formål, og i løbet af meget få år er LED-teknologien blevet den dominerende lyskilde og har overtaget markederne for de traditionelle glødelamper og fosforescerende lamper.

LED ER IKKE EN NY TEKNOLOGI

LED-lamper består af dioder, der udsender lys. Man kan sige, at lampen virker som en omvendt solcelle, hvor strøm sendes



gennem en diode, hvorved der dannes lys. Dioden består af plader af halvledere (typisk silicium, germanium, selen og gallium), som er konstrueret, så der er overskud af elektroner på den ene side og underskud på den anden side. Når der sættes spænding hen over halvlederen, bevæger de overskydende elektroner (p-laget) sig mod området med underskud af elektroner (n-laget) og mod den positive pol, hvorved der skabes strøm igennem halvlederen (figur 133). Det kaldes for elektroluminescensprincippet. Lysets bølglængde, og dermed farven på lyset,

FIGUR 133. Princippet i LED-belysning er, at der dannes fotoner, lys, når der tilføres en elektrisk strøm. Denne proces kaldes elektroluminescens. Fotonerne dannes, når elektroner på deres vej igennem et ledende materiale tvinges til at gå ned i energiniveau, hvorved der sker en energiudladning i form af fotoner. Lysdioden, LED-lampen, er konstrueret så den optimerer udladningen af fotoner. Efter PRE (u.å.).

bestemmes af typen af halvleder, der anvendes i dioden.

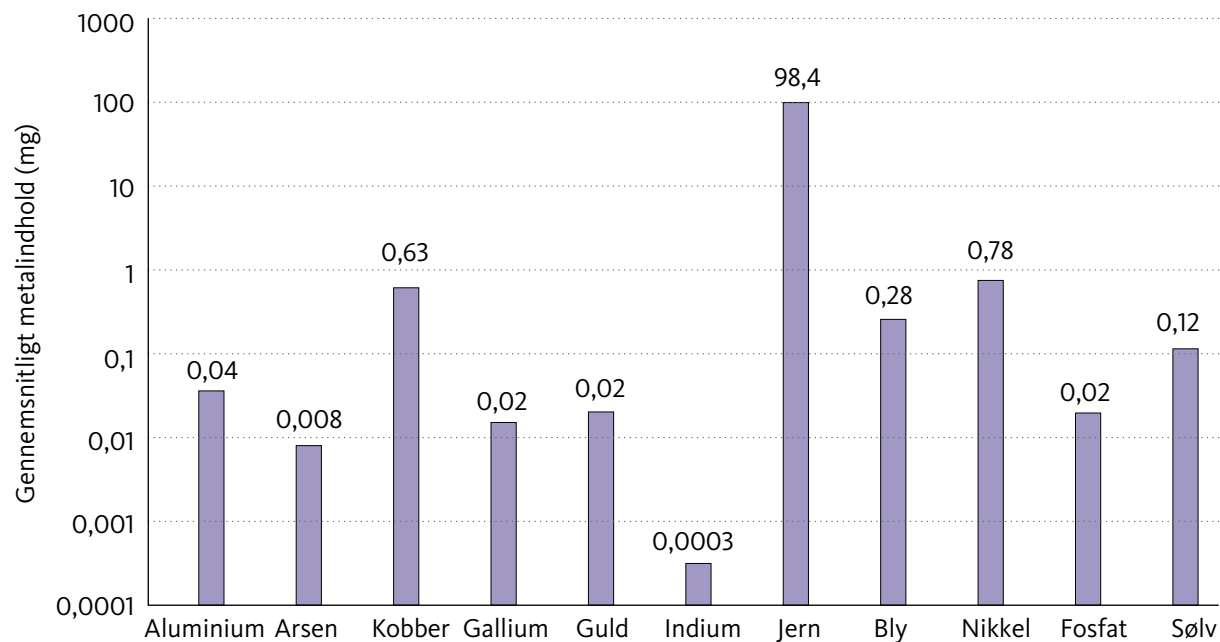
INNOVATION I BELYSNINGSTEKNOLOGIEN

Udviklingen af LED-teknologien er et eksempel på, at der kan være lang vej fra forskeres første påvisning af bestemte årsagssammenhænge til, at de kan udnyttes industrielt.

De første opdagelser, som senere har ført til LED-teknologien, blev allerede beskrevet i 1927 af den russiske fysiker Oleg Losev.

I 1960'erne begyndte amerikanske forskere at interessere sig for teknologien, men først i 1976 blev LED-teknologien brugt til telekommunikation i lysledere. Der skulle gå yderligere nogle år, inden man havde fundet metoder til at frembringe hvidt lys, og i 1990'erne begyndte forskellige industrier at se de tekniske fordele i LED.

Derefter skete udbredelsen meget hurtigt, og i de senere år er LED-lamper blevet særligt efterspurgt på grund af deres lave energiforbrug, og udskiftningen af konventionelle lamper med LED kan bl.a. bidrage til at nedbringe CO₂-udslippet.



RÅSTOFFERNE TIL LED-LAMPER

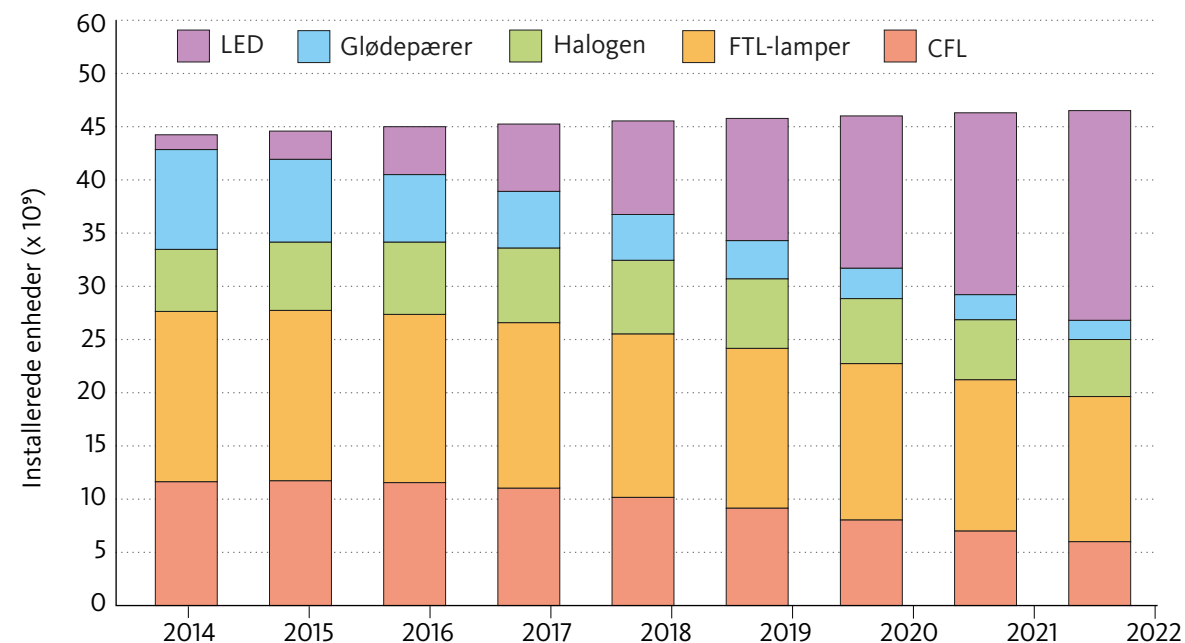
Der er mange forskellige typer af LED-lamper, og med det følger også, at der skal bruges mange forskellige råstoffer for at lave de materialer, som lamperne fremstilles af. Silicium og kobber til henholdsvis glas og strømledere er de råstoffer, der skal bruges mest af til fremstillingen af LED-lamper. Herudover er der nogle råstoffer, som ikke kan undværes, og som kan være svære at skaffe, fx de sjældne jordartsmetaller europium og

FIGUR 134. Indholdet af udvalgte metaller som bruges til LED-lamper. Tallene er fra 2011, og der kan være store forskelle i forhold til indholdet i de LED-lamper, der fremstilles i dag, men den slags informationer betragter producenterne som forretningshemmeligheder. Efter Ticleanu & Littlefair (2011).

yttrium samt gallium, germanium og indium. Disse råstoffer tilfører materialerne forskellige lysbrydende egenskaber og bestemmer farven af det lys der udsendes.

De virksomheder, der fremstiller LED-produkter, anser deres forbrug af råstoffer som forretningshemmeligheder, og derfor ved vi ikke meget om, hvor store mængder af de forskellige råstoffer der bliver brugt til produktionen af LED-lamper. Ældre data kan dog give en idé om forbruget. For eksempel blev der i 2011 brugt mindre end 1 mg af de lysgivende råstoffer til hver LED-lampe (figur 134). I dag er forbruget formentlig mindre pr. produceret enhed, men antallet af enheder er til gengæld markant større.

Allerede i 2014 blev omkring halvdelen af den samlede produktion af råstofferne europium, yttrium, gallium og indium anvendt til LED-lamper. Med den stigende LED-produktion øges denne andel formentlig, og konkurrencen om disse vigtige råstoffer bliver hårdere. Derfor arbejder LED-industrien på at finde alternative råstoffer, som er lettere at få fat på, samt på at finde metoder som kan nedsætte råstofforbruget. Dette udviklingsarbejde har allerede medført et



stort fald i forbruget af europium og yttrium. Til gengæld er forbruget af indium og især gallium vokset.

Forskerne forventer, at den næste generation af LED – benævnt 'organic LED' (OLED) kommer på markedet omkring år 2025. Det vil betyde større forbrug af indium og mindre forbrug af europium, mens yttrium måske helt udfases.

FIGUR 135. Elbelysningen i verden består af forskellige typer af lamper, fordi der kommer nye teknologier på markedet inden de 'umoderne' er faset helt ud.

Her ses den forventede udvikling fra 2014 til 2022. LED-teknologien forventes for alvor at vinde indpas frem mod 2020, samtidig med at CFL og glødepærer udfases. Efter The National Academies Press (2017).

TEKNOLOGIEN BESTEMMER RÅSTOFFERNE – OG DET SKIFTER HURTIGT

Når en virksomhed laver nye modeller af en vare, betyder det næsten altid, at der er ændret i opskrifterne på de materialer, der bruges og måske er der endda introduceret helt nye materialer. Dermed kommer nye råstoffer i spil, mens andre måske bliver udfaset.

Dette er også tilfældet for det, vi normalt omtaler som elpærer eller glødepærer. Man brugte i mange år elpærer, som lyste, når der blev sendt strøm igennem en glødetråd af wolfram; herudover blev der brugt kobber til fatningen, noget bly, molybdæn og glas til selve kobben, som holder wolframtråden i vakuum. Denne type elpærer blev i 1980'erne delvist afløst af Compact Fluorescent Lamp (CFL), ofte omtalt som 'neon-lamper' eller sparepærer. CFL-lamperne fungerer ved, at der udsendes lys, når der sendes strøm igennem en gas, som er monteret på en fatning. CFL-lamperne brugte ikke wolfram, men indeholdt bl.a. nogle sjældne jordartsmetaller. Fatningen var stadig af kobber. Skiftet fra at bruge den gammel-dags glødepære til CFL-lampen påvirkede

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	■ Vigtige grundstoffer til LED-industrien										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Tb	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

efterspørgslen på råstofferne wolfram, molybdæn og sjældne jordartsmetaller. Men selvom CFL-lamperne er mere energieffektive end de traditionelle elpærer, blev de udfaset i 2016 på grund af deres indhold af miljøskadelige kviksølvgasser. Herefter steg forbruget af halogenpærer til erstatning for CFL-lamperne; det var små, kraftigt lysende pærer, som brugte glødetrådsprincippet, hvor en glødetråd lyser, når der blev sendt strøm igennem. Halogenlamperne indehol-

FIGUR 136. Vigtige grundstoffer der bruges i LED-industrien. Af MiMa (2019).

der både wolfram og nogle sjældne jordarts-metaller. Men allerede i 2018 besluttede Europa-parlamentet at udfase halogenlamperne, fordi teknologien ikke er tilstrækkelig energieffektiv. I disse år overtager LED-lamperne derfor belysningsmarkedet (figur 135). LED-lamperne indeholder meget mindre mængder sjældne jordartsmetaller end CFL-lamperne, men til gengæld en del gallium. I figur 136 ses nogle af de vigtigste grundstoffer til CFL-lamper.

Skifte i belysningsteknologier har stor indflydelse på forbruget af specifikke råstoffer og derfor også på forbruget af de råstoffer, som anvendes til fremstillingen. Opbygningen af forsyninger af råstoffer til fx belysningsindustrien tager ofte betydelig længere tid, end den tid det tager at ændre teknologien på grund af råstofindustriens lange responstider. Hvis ikke mineindustrien tilstrækkelig hurtigt når at omstille sig til de nye tider, kan man ende i en situation, hvor det kan være svært at få råstoffer nok. Dette vilkår for adgangen til råstoffer deler belysningsindustrien med andre industrier, som anvender råstoffer, som kun udbydes i små mængder.

NØGLEBEGREBER

- LED (Light Emitting Diodes)
- Glødepærer/elpærer
- Halogen
- FTL
- CFL (Compact Phosphorescent Lamp)

REFERENCER

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2017). *Assessment of Solid-State Lighting, Phase Two*. <https://doi.org/10.17226/24619>
- PRE. (u.å.). Light Emitting Diode (LED). Hentet fra <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/lightemittingdiode-ledconstructionworking.html>
- Ticleanu, C., & Littlefair, P. (2011). *Metals Shortages and Their Impacts on the Long Term Feasibility of LED Supply*.

KAPITEL 18

FIGUR 137. Kobber udvundet og lavet til kobbertråd til verdensmarkedet er et vigtigt mineralsk råstof. Shutterstock.

MINERALSKE RÅSTOFFER

FORSKELLIGE TYPER AF MINERALSKE RÅSTOFFER

Begrebet mineralske råstoffer er fællesbetegnelsen for de bjergarter, mineraler og grundstoffer, som samfundet udnytter til alt fra smykker og sølvpapir til stål, glas og mursten. De mineralske råstoffer er karakteriseret ved, at de er dannet over millioner af år og ikke gendannes inden for overskuelig tid. I modsætning hertil er råstoffer fra planteriget, der kan dyrkes. Man kan ofte ud af sammenhængen forstå, hvilke typer råstoffer der hentydes til, og derfor bruger vi i denne bog ofte bare begrebet råstoffer om de mineralske råstoffer.

Men for at noget er et råstof, skal det have en værdi for nogen. I løbet af historien har mennesker fundet ud af at udnytte flere og flere mineraler, og dermed øges både antallet og mængden af råstoffer der anvendes, selvom nogle enkelte udgår. Industrien søger hele tiden efter nye egenskaber i materialerne, og i dette arbejde er der derfor behov for at finde mineraler, som tilfører netop disse egenskaber. Fra tid til anden bringer dette mineraler i spil, som ikke tidligere har været brugt. Trods den kendsgerning, at hoved-

Mineralklasser		
Mineralgruppe	Almindelige mineraler	Kemisk sammensætning
Silikater	Kvarts Alkalifeldspat Biotit Pyroxen Amfibol Olivin Muskovit Plagioklas	SiO_2 $(\text{K}, \text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_6$ $(\text{Na}, \text{K})\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}2(\text{OH})$ $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ $\text{KAl}_2(\text{Si}_3, \text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
Karbonater	Kalcit Dolomit	CaCO_3 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Oxider	Hæmatit Magnetit Korund	Fe_2O_3 Fe_3O_4 Al_2O_3
Sulfider	Galena Pyrit Sphalerit	PbS FeS_2 ZnS
Sulfater	Gips Anhydrite	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ CaSO_4
Halider	Stensalt Fluorit	NaCl CaF_2
Grundstoffer	Sølv Guld Graft/diamanter	Ag Au C

FIGUR 138. Klassifikation af mineraler. Af MiMa (2019).

parten af grundstofferne i det periodiske system anvendes til industrielle formål, kan langt størstedelen af verdens bjergarter ikke umiddelbart bruges med de teknologier, vi har til rådighed i dag. Disse bjergarter kan derfor opfattes som potentielle råstoffer, da de måske en dag bliver fremtidens råstoffer.

POTENTIELLE RÅSTOFFER

Som eksempel på et råstof, som måske kan få betydning i fremtiden, kan nævnes mineralet feldspat. Det er et af de mest almindelige mineraler i jordens skorpe og består af grundstofferne silicium, aluminium, natrium, kalium og oxygen. I dag er feldspat et af råstofferne til fremstilling af porcelæn. I Grønland åbnede der i 2019 en feldspatmine, hvor feldspatten skal bruges til fremstilling af glasfiber. Man håber, at man i fremtiden kan finde energivenlige metoder til at udnytte feldspats indhold af aluminium. Hvis det er tilfældet vil verden få tilført en kæmpe aluminiumsressource, som i dag ikke kan udnyttes. Tilsvarende findes der mange mineraler, som indeholder grundstoffet jern, som måske en dag vil kunne udnyttes. Med dagens teknologi er det ikke bæredygtigt at udvinde jern fra sådanne mineraler, og

derfor omtales denne gruppe mineraler ikke som jernråstoffer. Med andre ord, begreberne jernmineraler, kobbermineraler, aluminiummineraler osv. bruges kun om de mineraler, som man i dag er i stand til at udvinde disse metaller fra.

Der er også eksempler på at mineraler, som tidligere har været anvendt, ikke anvendes længere, dvs. at de er taget ud af brug. Det gælder særligt for nogle af de råstoffer, som har vist sig at være miljø- eller sundhedsskadelige. For eksempel har det vist sig, at mineralet asbest kan forårsage lungekræft, og råstoffer, som består af miljøgifte, fx kviksølv og cadmium, søger både industrien og myndighederne ligeledes at udfase.

De mineralske råstoffer kan inddeles i tre grupper, alt efter hvilke dele af bjergarten der anvendes:

- Hele bjergarten anvendes.
- Kun bestemte mineraler fra en bjergart anvendes.
- Ét eller flere af de grundstoffer som udgør et mineral anvendes.

Disse grupper beskrives i det følgende.

BJERGARTER SOM RÅSTOF

I denne råstofgruppe udgør sten og skærver, som bruges til beton, langt den største gruppe. Skærver er sten, som sprænges ud i et stenbrud og efterfølgende knuses og sorteres, så de har den til formålet rigtige størrelse. Sten og grus graves ud af grusgrave. Både sten og skærver bruges sammen med sand til beton til fremstilling af huse, broer og veje. Alene i Europa bliver der brugt omkring 3 mia. ton sand, grus og skærver om året. Målt i vægt er disse råstoffer de vigtigste. En lille del af bjergarterne bliver brugt til brosten, kantsten til fortove, stenbordplader, beklædning af bygningsfacader, sten til trappetrin, skulpturer og sokler, ofte omtalt som facadesten.

Kalk består næsten kun af et enkelt mineral og er et andet eksempel på en bjergart, som udnyttes uden at bjergartens bestanddele adskilles. En meget stor del tilsættes landbrugsjorden for at hæve jordens pH-værdi, hvilket forbedrer tilgængeligheden af planternæringsstoffer. Kalk som bjergart bruges også som råstof til cementfremstilling og som fyldstof i asfalt, plastik, maling og papir. Der er store forekomster af kalk i Danmark.

A



B



E



FIGUR 139. Mineraler i billeder.

A. Mineraliet kalifeldspat.

B. Grafit som det kan forekomme i naturen. På grund af mineralets krystalstruktur gnides de enkelte lag let fra hinanden, en egenskab der udnyttes i blyanter.

C. Ubehandlet diamant fundet i en kimberlit-bjergart. For at blive til et smykke skal den slibes i facetter. Værdien afhænger af størrelsen, gennemsigtigheden, farven og slibningen.

D. Guld nugget er betegnelsen for guld korn, som er større end ca. 1 mm. Guld nuggets findes kun i sedimentære guldforekomster. Det er meget sjældent, at der findes så store guld nuggets som her, langt hovedparten af det guld der produceres i minerne er $<0,3$ mm.

E. Mineraliet kromit er det vigtigste mineral til udvinding af krom og ses som mørke pletter i bjergarten. Kromit kan bl.a. identificeres ved at det har brun stregfarve.

F. Magnetit er, som det fremgår af navnet, et af de mest magnetiske mineraler.

G. Rosenkvarts er en af den mange varianter af kvarts. Farven skyldes sporstofferne mangan, titan og jern.

Fotos fra Shutterstock.

C



F



D



G



I 2018 blev der ifølge Danmarks Statistik udvundet 2,8 mio. ton fra danske forekomster.

MINERALER SOM RÅSTOF

Mineralerne kan opdeles i syv grupper, som underinddeles i tre grupper.

Den vigtigste gruppe er de mineraler, som har et højt indhold af eftertragtede grundstoffer, fx metaller. De omtales ofte som malmmineraler. Et eksempel fra denne gruppe er mineralet sphalerit, som består af zink (Zn) og svovl (S), der kan adskilles ved en ristningsproces så begge grundstofferne kan bruges industrielt. Et andet eksempel er mineralerne hæmatit og magnetit, som begge består af jern (Fe) og oxygen (O), hvor grundstoffet jern udnyttes.

Den anden gruppe omfatter mineraler, som har kemiske eller fysiske egenskaber, der gør mineralet interessant til bestemte formål. Det kan fx være mineralets kemiske sammensætning, vægtfylden eller hårdheden, der gør mineralet brugbart til formålet. Eksempler på dette er:

- Mineralet feldspat (figur 139. a) der på grund af sin kemiske sammensætning bru-

ges til keramiske produkter, som eksempelvis håndvaske og toiletter.

- Mineralet granat der bl.a. bruges til sandblæsning, fordi det er tungt og hårdt og ikke nemt går i stykker, når det rammer den overflade, der skal sandblæses.
- Mineralet korund der bruges som slibemiddel, fordi det er næsten lige så hårdt som diamant, men langt billigere.
- Mineralet talk der er så blødt, at det går i stykker ved blot den mindste berøring og derfor bruges til talkum, som smøremiddel og til kosmetik.
- Mineralet grafit der også er meget blødt, og som let spalter i flagede krystallag, så når grafit i en blyant gnides mod en overflade, farver det sort, fordi krystallagene overføres til overfladen (figur 139. e).

Den sidste gruppe mineraler bruges på grund af deres sjældenhed eller skønhed. Gruppen omfatter ædelsten som fx rubiner, safirer, smaragder og diamanter. Ud over at være sjældne er ædelstenene typisk karakteriseret ved, at de er gennemsigtige, har høj hårdhed, høj glans og ofte stærke farver. Én af smykkestenene, diamant, består kun af grundstoffet kul og er derfor både et mineral

og et grundstof (figur 139. c).

GRUNDSTOFFER SOM RÅSTOF

Enkelte grundstoffer optræder i naturen som 'sig selv', dvs. de ikke danner kemiske forbindelser med andre grundstoffer. Det gælder bl.a. for guld (Au), kviksølv (Hg), grafit (C) og diamant (C). Denne gruppe råstoffer bruges både til små eksklusive nichemarkeder (ædelstenene) og som råstoffer til store industriområder. Eksempelvis bruges grafit til Li-ion-batterier, i støberier og som smøremiddel; kviksølv har været meget brugt til at oprense guldalm, men bruges ikke længere fordi det er en farlig miljøgift.

De mineraler, som indeholder metaller, som udnyttes, kaldes som nævnt ofte for malmmineraler. Når de brydes i en mine, omtaler man de mineraler, som indeholder de værdifulde grundstoffer som malmen; fx kobbermalm, zinkmalm og guldalm.

Metallerne i malmmineralerne kan ikke umiddelbart udnyttes; de skal først adskilles fra mineralets øvrige grundstoffer. Det kan gøres på mange forskellige måder, og valget af metode afgøres af mineralernes kemiske sammensætning. De frigjorte metaller skal

derefter yderligere behandles; de skal oprenses/raffineres, inden man har de rene metalprodukter.

GRUNDSTOFFER

De grundstoffer som mineralerne er opbygget af, er de mineralske råstoffer industrien anvender. Kun meget få grundstoffer danner deres egne mineraler, som eksempelvis guld og diamant. Så når geologerne skal finde metallerne i naturen, leder de efter de mineraler, som de ved, at metallerne findes i. Mineralernes fysiske og kemiske egenskaber er bestemt af de grundstoffer, som opbygger mineralernes krystalstruktur, og som også fremgår af mineralets kemiske formel. Både de fysiske og kemiske egenskaber har betydning for, om de kan anvendes af industrien, og dermed om mineralet også er et mineralsk råstof.

MINERALGRUPPER

Mineraler er naturligt forekommende, faste og uorganiske stoffer med en defineret kemisk sammensætning og kystalstruktur. Nogle er meget simple og består af ét grundstof (som grafit og diamant, som begge kun

FIGUR 140. 14 almindelige mineralers egenskaber. Af MiMa (2019).

Plagioklas Hvid, grå To spalteretninger næsten vinkelret på hinanden Hårdhed 6-6,5 $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$	Muskovit Farveløs Spalter i tynde, bøjelige blade Hårdhed 2,5-3 $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	Hæmatit Sort, mørk Rødbrun stregfarve Hårdhed 6 Fe_2O_3
Kvarts Farveløs, hvidlig Glasglans og muslet (ujævn) brudflade Hårdhed 7 SiO_2	Biotit Sort Spalter i tynde, bøjelige blade Hårdhed 2,5-3 $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	Gips Hvid, grå eller brunlig Hvid stregfarve To spalteretninger (66° og 114°) Hårdhed 2 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Alkalifeldspat Rødlig To spalteretninger næsten vinkelret på hinanden Hårdhed 6 $(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	Olivin Grøn, glasglans Svag spaltelighed Hårdhed 6,5-7 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	Stensalt (halit) Farveløs Tre spalteretninger Saltsmag Hårdhed 2,5 NaCl
Amfibol Mørk, sort To spalteretninger 60° og 120° på hinanden Hårdhed 5-6 $(\text{Na,K})\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})$	Calcit Farveløs, hvid. Reagerer med syre Tre spalteretninger Hårdhed 3 CaCO_3	Galena Blygrå med metalglans blygrå stregfarve Spalter i terningform Hårdhed 2,5 Høj massefylde: $7,6 \text{ g/cm}^3$ PbS
Pyroxen Sort eller grøn To spalteretninger vinkelret på hinanden Hårdhed 5-6 $(\text{Na,Ca})(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Al,Si})_2\text{O}_6$	Magnetit Sort Sort stregfarve Magnetisk Hårdhed 6 Fe_3O_4	

består af grundstoffet C) eller få grundstoffer (som fx almindeligt salt, NaCl); andre er meget komplekse, også selvom mineralerne er meget almindelige. Det gælder fx hornblende, som har formlen $(K,Na)_{0-1}(Ca,Na,-Fe,Mg)_2(Mg,Fe,Al)_5(Al,Si)_8O_{22}(OH)_2$ og feldspat $((Na,K,Ca,Ba)(Al,Si)_4O_8)$, som begge er meget almindelige mineraler. Stofferne i parentes betyder, at disse stoffer kan indgå i varierende mængder i mineralerne, hvilket betyder, at der kan være små variationer i hornblende og feldspats egenskaber.

Der er registreret mere end 5.000 forskellige mineraler, som opdeles i forskellige hovedgrupper: silikater, oxider, karbonater, sulfider og halider baseret på deres anion. Hvert af disse mineraler har nogle veldefinerede egenskaber, fx hårdhed, magnetiske egenskaber, vægt, farve og glans (figur 140).

MINERALERS KEMISKE SAMMENSÆTNING

Fra et råstofsynspunkt er mineralernes kemi særligt interessant, eftersom det er kemien der bestemmer, hvilke grundstoffer der eventuelt kan adskilles fra mineralet og bruges. Ofte kan mineralernes grundstoffer dog ikke frigøres på en økonomisk rentabel

måde. Derfor leder geologerne efter de mineraler, som kemisk set er simple. For at få grundstofferne i mineraler ud, må de løsrives fra de mineraler, de er bygget ind i. Enkelte mineraler er vandopløselige, og mineralets grundstoffer kommer på ionform, hvis mineralet kommer i vand. Dette kender vi fra køkkesalt, NaCl, som består af natrium og klor. Andre kan opløses i syrer eller baser, men de fleste mineraler skal behandles under høje temperaturer for at nedbryde mineralet og frigøre grundstofferne. Når et mineral opløses, indeholder koncentratet også små mængder af andre grundstoffer, og derfor skal koncentratet oftest oprenses/raffineres efterfølgende. Raffineringen kan fx foretages ved hjælp af elektrolyse, hvor grundstofferne separeres på baggrund af deres ionladning. Det er en energikrævende proces at frigøre råstoffer og raffinere dem til rene råstoffer, der kan bruges i industrien.

MINERALERS HÅRDHED

Hvert mineral har en given hårdhed, som er et af de kendetegn geologer bruger, når de skal bestemme et mineral. Hårdheden defineres på Mohs hårdhedsskala (figur 141), som viser, hvordan man kan vurdere hård-

FIGUR 141. Mohs hårdhedsskala. Ti forskellige mineraler definerer hårdhedstrin fra 1-10. Efter Johnsen (2000).

Mineral	Hårdhed på skala	
Diamant	10	
Korund	9	
Topas	8	← Murbor
Kvarts	7	
Feldspat	6	← Stålsøm
Apatit	5	← Knivblad eller glasplade
Fluorit	4	
Kalcit	3	← Kobbermønt
Gips	2	← Fingernegl
Talk	1	

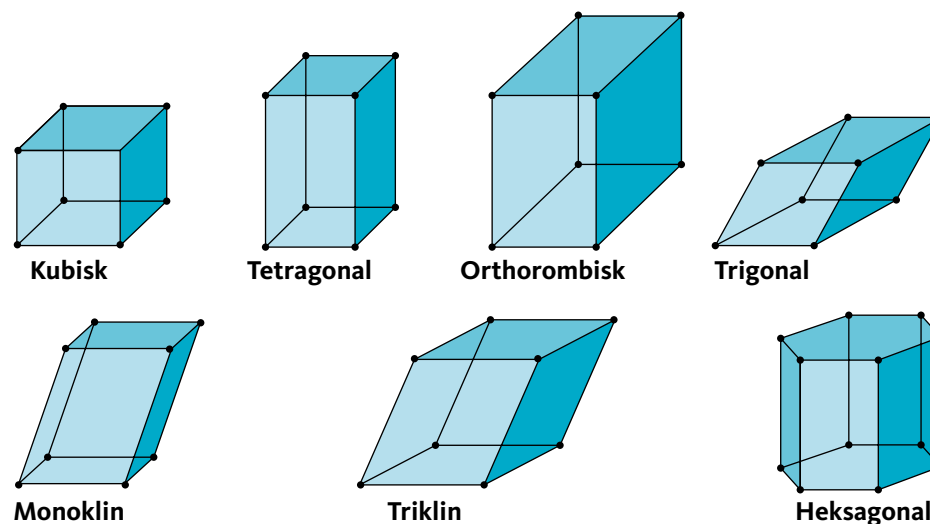
heden. Princippet er, at et mineral kan ridse de mineraler, der er blødere, end dem selv. På denne måde er ti mineraler fastlagt til at have hårdhed 1-10. Diamant er med hårdhed ti det hårdeste mineral. Diamant består af grundstoffet karbon (C) og dannes under høje tryk og temperaturforhold. Diamanter kan næsten ikke ridses, men kan derimod selv bruges som skæreværktøj og som slibemiddel, når man fx skal slibe i andre mine-

raler. I den bløde ende af hårdhedsskalaen findes mineralerne talk og grafit med hårdheden 1. Grafit er opbygget af tynde kulstoflag, som har meget lille sammenhængskraft. Ved let berøring går de enkelte krystallag fra hinanden.

Interessant nok består både det hårdeste og et af de blødeste mineraler kemisk alene af grundstoffet kulstof, nemlig diamant og grafit, men de har til gengæld helt forskellige krystalstrukturer.

MAGNETISKE MINERALER

Nogle mineraler er så magnetiske, at de tiltrækkes af en magnet. Denne egenskab gælder for visse af de jernholdige mineraler, men langt fra for dem alle. Mineralen magnetit er et af de mest magnetiske mineraler og bruges til fremstilling af jern. Men også jern-nikkelmineraler og jern-titanmineraler er ofte svagt magnetiske. Mineralernes magnetiske egenskaber udnyttes bl.a., når man skal adskille en bjergarts forskellige mineraler, fx magnetit- og siliciummineraler fra en jernmine. Du kan selv afprøve med en magnet på stranden, hvor man kan sortere de mørke magnetitkorn fra de lyse kvartskorn.



FIGUR 142. Oversigt over de syv krystalformer. Efter Johnsen (2000).

Mineralernes magnetiske egenskaber bruges også til mineralefterforskning, når man skal finde en ny jern- eller nikkelmine. Her kan man ved geofysiske metoder fra fly måle, hvor der er områder med forhøjede magnetiske egenskaber, hvilket kan være tegn på en jern- eller nikkelforekomst.

DENSITET

Hvor tunge mineralerne er, bestemmes især af hvilke grundstoffer, der indgår i mineralet; tunge grundstoffer giver tunge mineraler. Et meget almindeligt tungt mineral er minera-

let galena, som består af grundstofferne bly og svovl. Galena er et af de vigtigste blymineraler. Også wolfram, som på engelsk hedder tungsten, er et mineral med meget høj vægtylde. Et andet mineral, baryt (BaSO_4), kaldes tungspat på grund af dets høje densitet.

FARVER OG GLANS

Mineralers farve og glans kan også bruges til at identificere et mineral. Det er mineralernes kemiske sammensætning, der bestemmer deres farve. Farven på mine-

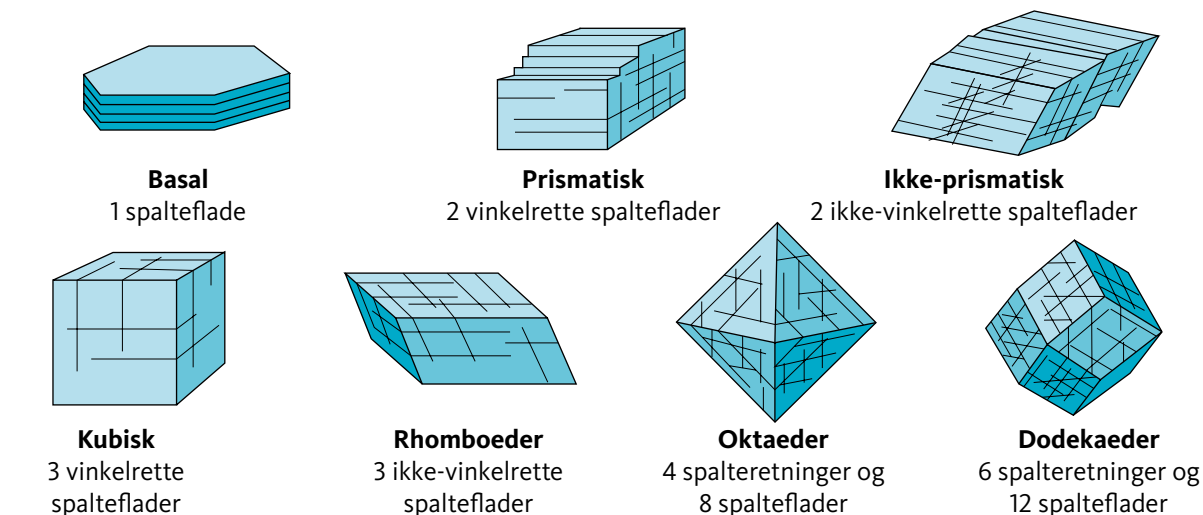
raler afhænger af, hvilke grundstoffer der findes i dem. Selv meget små mængder af et grundstof kan ændre farven på et mineral. Kvarts findes fx i en klar udgave, som lyserød rosakvarts (figur 139. g), som den violette ametyst og i form af en grålig røgvarts. De enkelte grundstoffer kan også give forskellige mineraler forskellig farve alt efter oxidationstrin. Jern kan oxideres til både Fe^{2+} og Fe^{3+} , som giver henholdsvis grønne og røde farver. Nu om dage produceres farvepigment til maling og lignende ofte syntetisk, men pigmenterne findes som mineraler i naturen.

Den måde, et minerals overflade reflekterer lys, giver mineralet en særlig glans. Glansen opdeles i forskellige beskrivende grupper: glasglans, perlemorsglans, fedtglans, silkeglans og diamantglans. De uigennemsigtige mineraler kan have metalglans, som så kan have forskellige farvetoner.

STREGFARVE

Man taler også om et minerals stregfarve. Man finder stregfarven ved at tegne med mineralet på en uglaseret, hvid keramisk plade.

Hvis mineralet afsætter en stregfarve, er det mineralets farve i pulveriseret form, man ser.



For nogle mineraler kan denne afvige betydeligt fra mineralets egen farve. Mange af sulfiderne og oxiderne har en karakteristisk stregfarve. Stregfarvemethoden kan kun lade sig gøre med mineraler, der er blødere end porcelæn. Porcelæn har hårdhed 7, så de fleste (hårde) silikatmineraler har derfor ingen stregfarve.

KRYSTALFORM

Grundstofferne i mineralerne arrangerer sig i et krystalgitter, som giver mineralet sin krystalform. Krystallografi er en hel videnskab

FIGUR 143. Mineralers spaltelighed. Mineralerne har en tendens til at brydes langs særlige spalteflader. Det er derfor et af kendetegnene man kan bruge til bestemmelse af mineralet. Efter Johnsen (2000).

for sig, som beskriver de symmetrielementer, som mineralet er opbygget af (figur 142). Der er syv krystalklasser og 32 former inden for disse. Der er krystaller der gror i tynde flager, der er mineraler der gror i aflange 8-kanter og nogle, der danner kuber. Ofte kan mineralerne ikke udvikle deres perfekte krystalform i en bjergart, fordi de ikke har plads og tid til at udvikle krystalformerne før de størkner. Krystalformen er årsagen til, at diamanter og grafit er så forskellige, selvom de jo begge kun består af kulstof (C).

SPALTELIGHED

Krystalgitteret gør også, at mineraler har nogle flader, de især vil dele sig/bryde efter; det er krystallets spalteflader (figur 143). Det betyder, at hvis et mineral slås i stykker, vil det gå i stykker langs disse flader. Vinklerne mellem spalteflader er vigtige indikatorer, der kan hjælpe med at bestemme mineralerne. For eksempel kan mineralerne amfibol og pyroxen, som i nogle udgaver kan være meget ens mht. farve og glans, adskilles ved, at pyroxen har to på hinanden vinkelrette spalteflader, mens amfibol har 120° og 60° mellem spaltefladerne.

NØGLEBEGREBER

- Mineralgrupper
- Mohs hårdhedsskala
- Magnetisme
- Krystalform
- Densitet
- Glans
- Farve
- Stregfarve
- Spaltelighed og spalteflader
- Mineralsymmetri

REFERENCER

Johnsen, O. (2000). *Mineralernes verden*. Gyldendal A/S.

KAPITEL 19



FIGUR 144. Den konstruktive pladegrænse mellem den eurasiske plade og den nordamerikanske plade ved Thingvellir Nationalpark, Island. Shutterstock.

DET GEOLOGISKE KREDSLØB OG ISOSTASI

DET GEOLOGISKE KREDSLØB

Det geologiske kredsløb (figur 145) beskriver, hvordan bjergarterne i jordskorpen indgår i en cyklus, hvor de nedbrydes og gendannes. Alle de geologiske processer indgår i denne cyklus og kan opdeles i de ydre processer, også kaldet de, exogene processer, som drives af energi fra solen (temperatur, vind, vand og is) og tyngdekraften, og de indre processer, også kaldet de endogene processer, der drives af energi fra Jordens indre, hvor radioaktive kerner henfalder og udleder varmeenergi. Simplificeret kan det opdeles sådan, at det er Jordens indre kræfter, som opbygger skorpen ved at danne magma-bjergarter og skubbe jordskorpen op i bjergkædefoldninger og vulkaner, mens det er de ydre kræfter som gravitation, vind, vand og vekslende temperaturer, som nedbryder skorpen og over millioner af år omdanner bjerglandskaber til flade, bakkede landskaber, en proces der kaldes peneplanisering (figur 146).

DE EXOGENE PROCESSER – FORVITRING OG EROSION

De magmatiske og metamorfe bjergarter

er dannet under højere tryk og temperaturforhold, end der er ved Jordens overflade i dag. Derfor eksisterer de i princippet under ustabile forhold, når de eksponeres for vind nedbrydning begynder. Bjergarterne nedbrydes ved kemisk forvitring og fysisk erosion. Den kemiske forvitring er fx mineralers reaktion med ilt eller med svag syre, som kan dannes, når CO_2 opløses i vand. Den fysiske erosion er fx frost-tø-processer, hvor vand trænger ind i bjergarternes hulrum og sprækker, og når vandet fryser til is, udvides det og sprænger klippen fra hinanden.

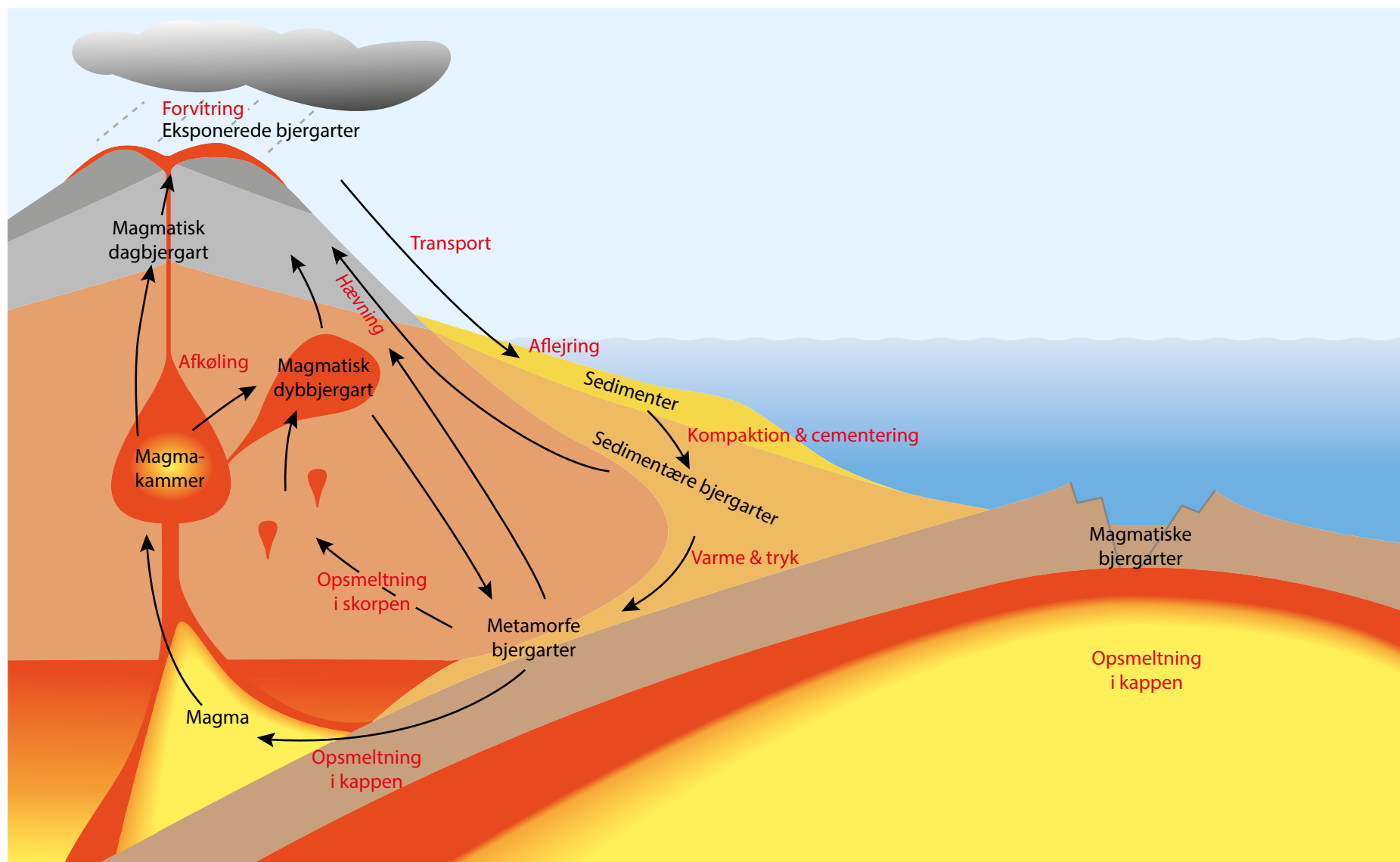
Forvittringsmaterialerne bliver transporteret væk af vind eller vand. Floderne, der afvander de store bjergkæder, transporterer milliarder af ton forvittringsmateriale ud i havet hvert eneste år, materialer som typisk har været tusinder, måske millioner af år undervejs fra kildeområdet i bjergene til aflejringsstedet (figur 145). Et illustrativt eksempel på hvordan vand kan erodere er Grand Canyon i USA, hvor Colorado River har skåret sig op til 1,5 km ned i landskabet og dannet en dyb kløft. Efter mange millioner år vil forvitring og erosion føre til, at bjergkæder nedbrydes til flade sletteområder.

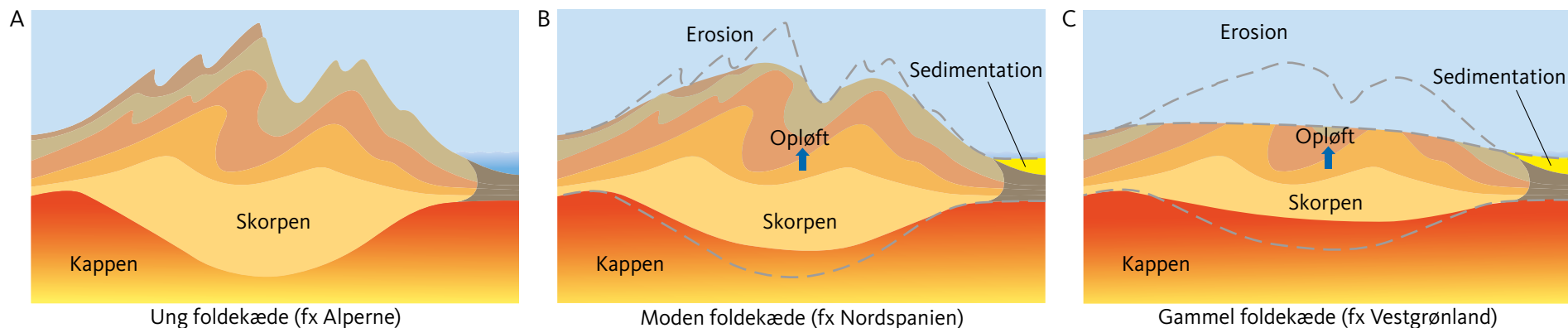
FIGUR 145. (næste side) Det geologiske kredsløb beskriver, hvordan jordens materialer indgår i en cyklus, hvor de exogene processer nedbryder faste bjergarter til løse sedimenter, som kan transporteres og aflejres, når de ikke længere udsættes for de kræfter, der kan transportere dem. Den største mængde sedimenter aflejres på den kontinentale shelf, altså den havdækkede del af kontinentet. Når sedimenterne ligger i de tykke sedimentlag, bliver de udsat for kompaktion og cementering og bliver til faste, sedimentære bjergarter.

Nede i Jordens skorpe og i kappen er det de endogene processer, der påvirker bjergarterne. Trykket og temperaturen øges nedefter i jordskorpen og fører til metamorfose af bjergarterne, dvs. at de omdannes til andre bjergarter med et andet mineralindhold.

I nogle tilfælde vil bjergarterne møde deres smeltepunkt og magma dannes. Når magmaet stiger opad afkøles det og størkner som magmatiske bjergarter, enten som dybbjergarter nede i skorpen eller som dagbjergarter eller som vulkanske bjergarter, hvis de kommer i kontakt med det exogene miljø inden de størkner. Når bjergarterne kommer i kontakt med atmosfæren, enten ved udbrud eller ved hævnning af jordskorpen ved isostatisk landhævning vil forvitring og erosion begynde at nedbryde bjergarterne, så kredsløbet fuldendes.

Af MiMa (2019).





DE EXOGENE PROCESSER – SEDIMENTATION OG HÆRDNING

De fleste af de sedimenter, der dannes ved erosion af de eksponerede bjergarter, bliver først aflejret mere stabilt, når de ender på havbunden uden for bølgenes påvirkning, og der ikke længere er processer, som kan erodere og transportere dem videre (figur 147). På havbunden vil der konstant være tilførsel af nedbrudte sedimenter fra kontinenterne, og der vil opstå tykke lag af sediment (figur 148). De sedimenter der ligger nederst vil udsættes for en betydelig sammentrykning (kompaktering), og det havvand, der cirkulerer i sedimenterne, vil langsomt afsætte små mængder kalcit eller andre mineraler imellem de enkelte sedimentkorn (cementerering). Disse udfældninger virker som en slags cement, der binder de enkelte korn sammen til en fast bjergart. Man siger, at de løse sedimenter bliver kompakteret og cementeret, så de nu udgør en fast sedimentær bjergart.

FIGUR 146. Princippet i peneplanisering.

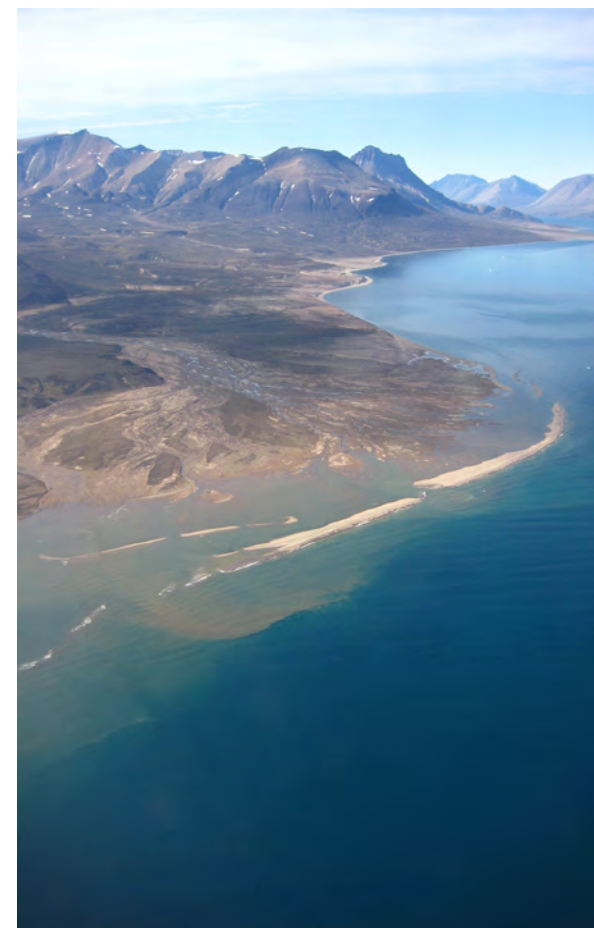
A. Peneplanisering sker, når en bjergkæde ved erosion nedbrydes over mange millioner år. Materialet som eroderes af bjergene transporteres og aflejres på den kontinentale shelf.

B. Efterhånden som der fjernes vægt fra bjergene vil kontinentet opløftes og lægge sig højere i kappen.

C. Til sidst opstår et fladt område kaldet et peneplan. De dybeste dele af bjergkæden er nu eksponeret i jordoverfladen.

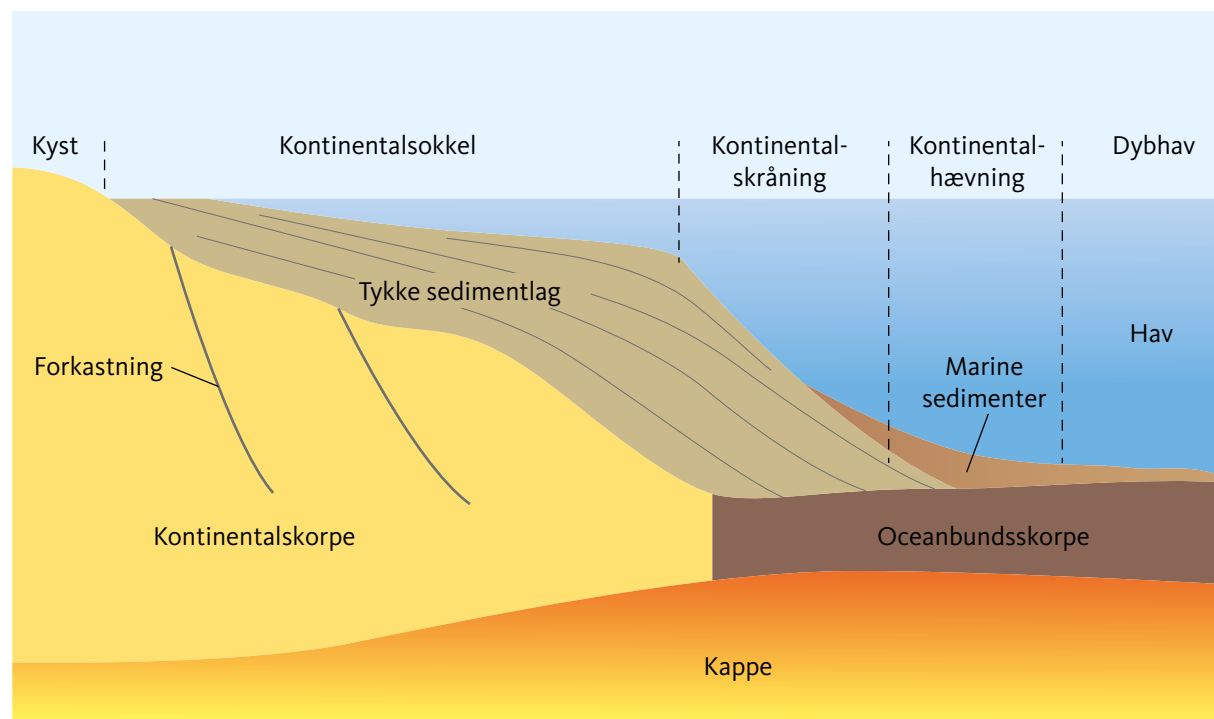
Af MiMa (2019).

FIGUR 147. I baggrunden bjerge som eroderes af vind og vejr. Det eroderede materiale transporteres ned af bjerget mod kysten. Det groveste materiale (blokke og grus) er aflejret i flodsengen, mens det finere materiale (sand) aflejres i floddeltaet i forgrunden af billedet. De fineste partikler (silt og ler) kan man se i suspension i havvandet, de vil efterhånden aflejres på havbunden. Østgrønland. Foto af Matilde Rink Jørgensen.



FRA EXOGENE TIL ENDOGENE PROCESSER – METAMORFOSE

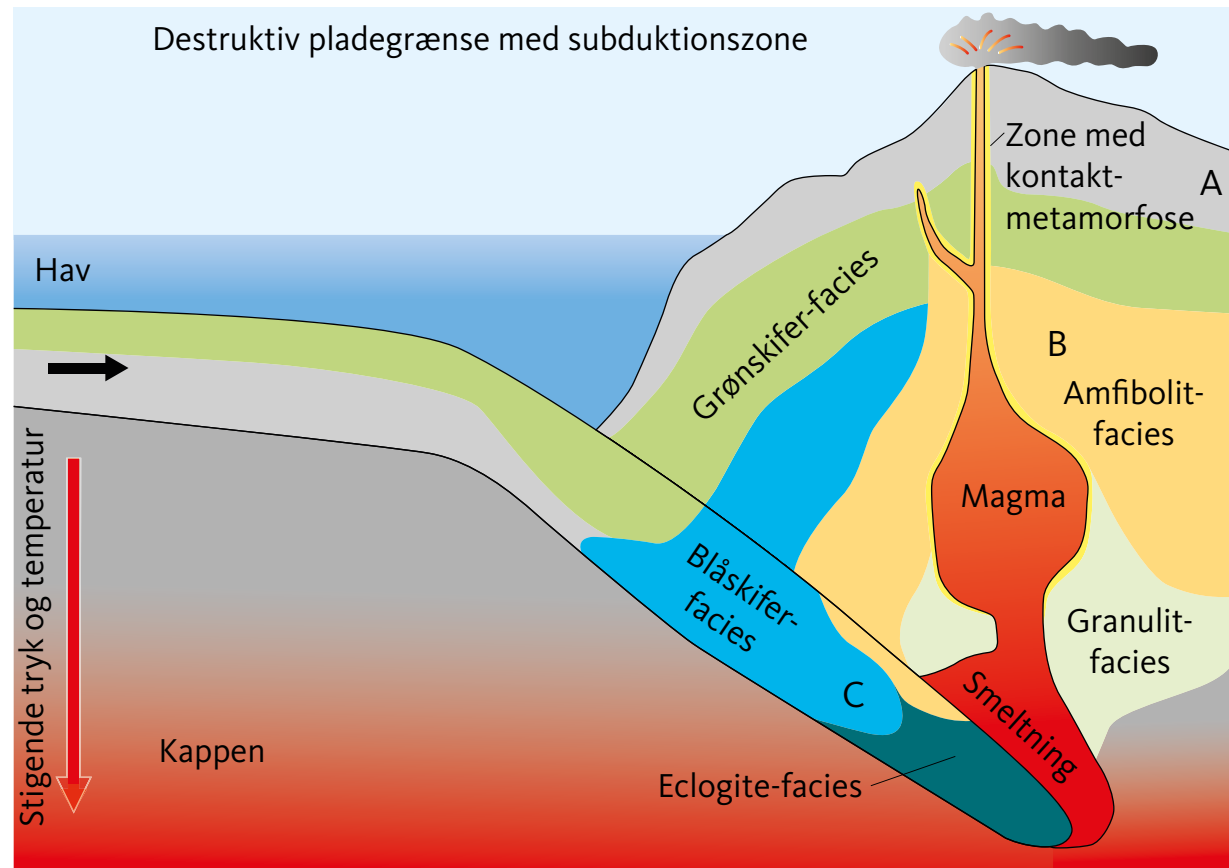
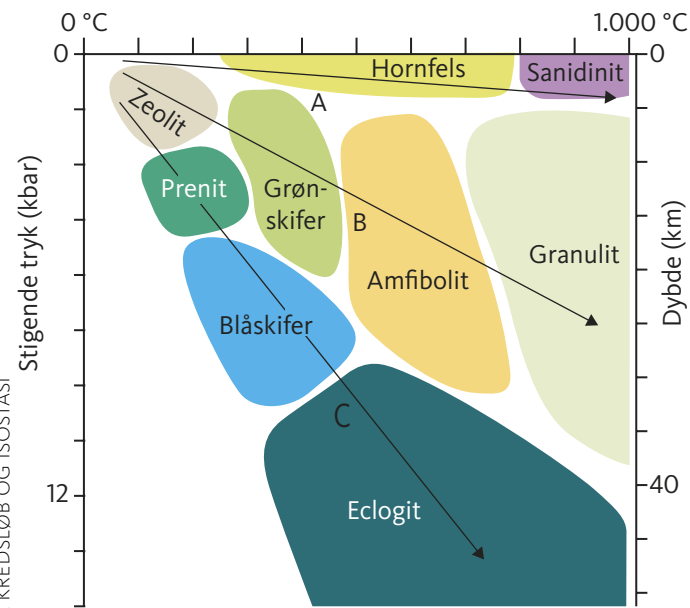
De pladetektoniske bevægelser bevirker, at bjergarterne over lange tidsperioder skifter beliggenhed. Når dette sker, ændres også de fysiske forhold som temperatur og tryk, og nogle mineraler er ustabile under de nye forhold. Derfor ændres mineralerne meget langsomt (og uden at de er smeltet), og bliver stabile under de nye betingelser; geologerne kalder det, at bjergarten metamorfoserer (figur 149). Ændringen af mineralerne under metamorfosen gør at bjergartens mineraler omdannes til nye, og som nævnt stabile, mineraler. Metamorfosen kan opstå, hvis bjergarterne fx indgår i en kollisionssone (figur 150) mellem to tektoniske plader eller kommer i kontakt med en optrængende magmatisk smelte (figur 149). Både sedimentære og magmatiske bjergarter kan udsættes for metamorfose (figur 149). Der kan være forskellige grader af metamorfose, alt efter hvor meget tryk og hvor høj temperatur bjergarterne udsættes for. Under metamorfosen ændres bjergartens samlede kemiske sammensætning sig ikke, men der dannes nye mineraler ud af de grundstoffer, der er til rådighed, eller mineralerne arran-



ger sig i lag eller folder. Det kan man fx se på en gnejs eller skiferbjergart.

Mineralsammensætningen i en given bjergart afspejler derfor de processer, som bjergarten har gennemgået. Alle mineraler har nogle forhold under hvilke, de er stabile. Denne viden gør, at man kan bruge en række mineraler til at sige noget om de temperatur- og trykforhold, bjergarten er dannet

FIGUR 148. Tværsnit af kysten hvor den tykke kontinentalskorpe bliver til tynd oceanbundsskorpe og tykke lag af sedimenter aflejres på overgangen fra kontinent til ocean. Overgangen fra kyst til dybhav er inddelt i fem zoner. Af MiMa (2019).



FIGUR 149. Metamorfe facies. Facies betyder en sammensætning af mineraler, som er typisk for en given bjergart. Til venstre viser diagrammet hvilke metamorfe bjergarter, der er stabile ved hvilke tryk- og temperaturforhold. Til højre kan de samme bjergarter findes i de geologiske miljøer, hvori de dannes. På fasediagrammet er der tre pile, som viser stigende grad af metamorfose i tre forskellige miljøer.

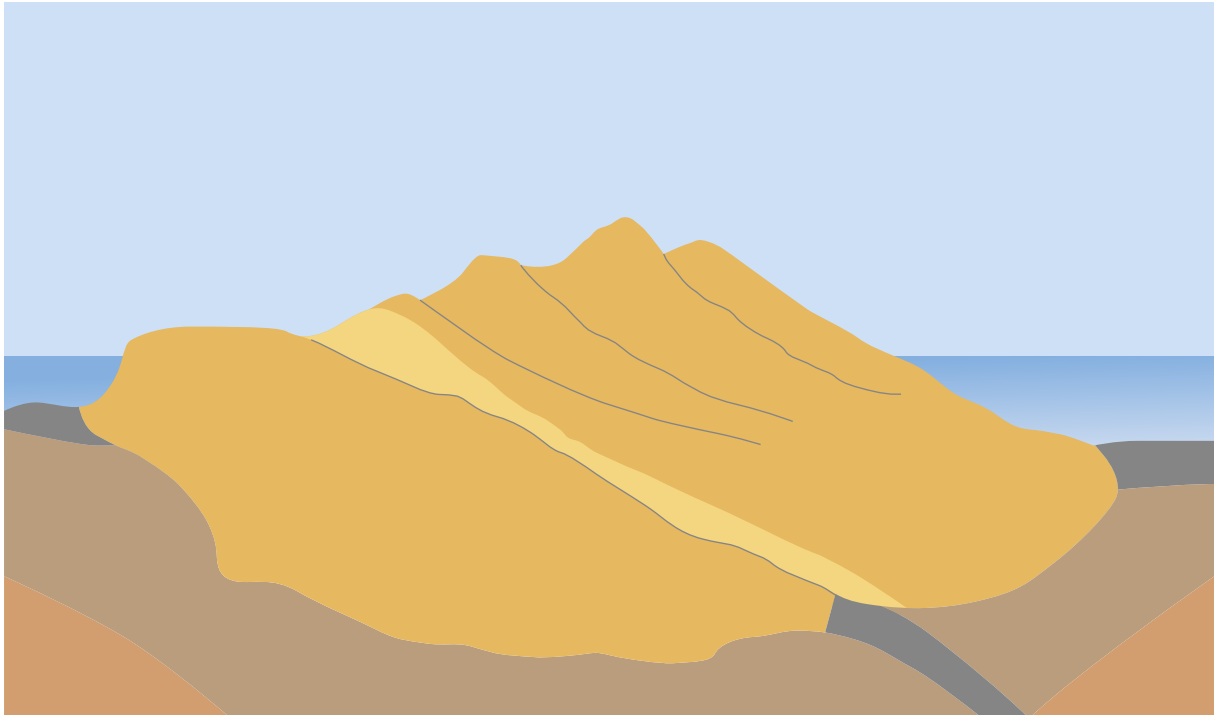
A. Viser hvilke mineralsammensætninger der dannes ved kontaktmetamorfose ved forskellige temperaturer. Kontaktmetamorfose forekommer i bjergarterne omkring et magmalegeme, hvor temperaturpåvirkningen bager de omkringliggende bjergarter. Her er trykket ikke særligt forhøjet.

B. Viser hvilke mineralsammensætninger der er stabile ved de tryk- og temperaturforhold, man kan finde i såkaldt regional metamorfose. Her følger temperatur- og trykforholdene den almindelige gradient for Jordens skorpe. Denne type metamorfose vil typisk ses i bjergkædefoldninger.

C. Viser mineralsammensætninger der er stabile ved de tryk- og temperaturforhold, man ser i en subduktionszone. Her vil trykket stige hurtigere end temperaturen. Når den kolde oceanbund subduceres ned i kappen, vil det tage lang tid for bjergarterne i oceanbunden at komme i temperaturmæssig ligevægt med den omgivende kappe. Af samme grund kan bjergarterne nå ganske store dybder med meget højt tryk inden de smelter. Derfor følger denne pil en udvikling med lavere temperatur og højere tryk end regional metamorfose.

Af MiMa (2019) efter Marshak (2011).

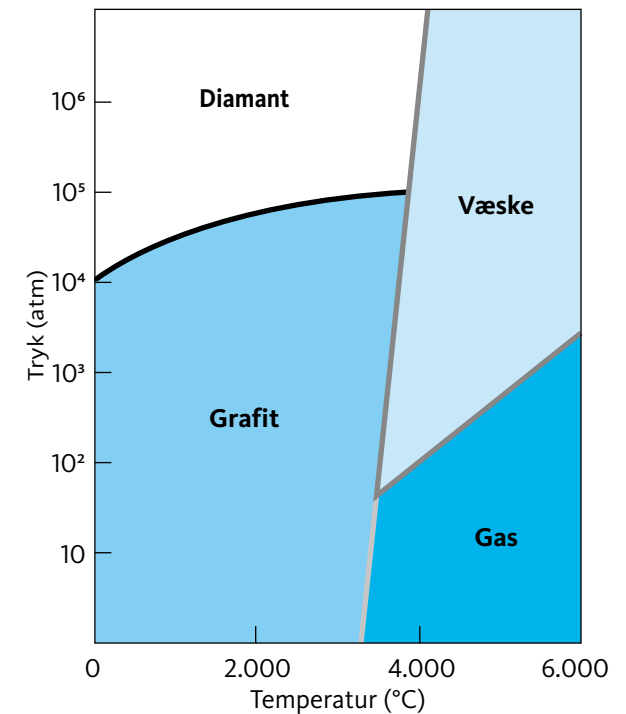
FIGUR 150. Kollisionszone. To kontinenter er stødt sammen, skudt ind over hinanden og foldet. Som man kan ane nederst til højre er processen startet som en subduktionszone, og da hele oceanet er subduceret, støder de to kontinenter ind i hinanden. Himalaya er et eksempel på denne hændelse. Af MiMa (2019).



under. Den geologiske historie, bjergarten har undergået, etableres ved hjælp af fase-diagrammer (figur 151). Et fase-diagram viser, hvilke mineraler, der er stabile udtrykt i forhold til temperatur og tryk. En bjergart, der har indgået i subduktion (at en tungere oceanbundsplade skyder sig ned under en anden plade) vil have en mineralsammensætning, der er stabil under højt tryk og rela-

tiv lav temperatur. Omvendt vil en bjergart, der, som resultat af et indtrængende magma, er metamorfoaseret, bestå af mineraler som er stabile under forhold med høj varme og relativt lavt tryk. Man taler om, at sådanne bjergarter er blevet kontakt-metamorfoaseret (figur 149).

FIGUR 151. Fasediagram for kulstof. Man kan se hvilken tilstandsform eller hvilket mineral kulstof befinder sig i ved forskellige temperaturer. Efter Bundy (1989).



ENDOGENE PROCESSER – MAGMATISKE BJERGARTER

Når en bjergart begynder at smelte, er der ikke længere tale om metamorfose, men om dannelse af en ny smelte, et magma. Langt de fleste magmaer dannes i kappen, men også den dybeste skorpe kan opsmeltes. Da kappen hele tiden tilføres materialer fra skorpen i subduktionszonerne, smelter

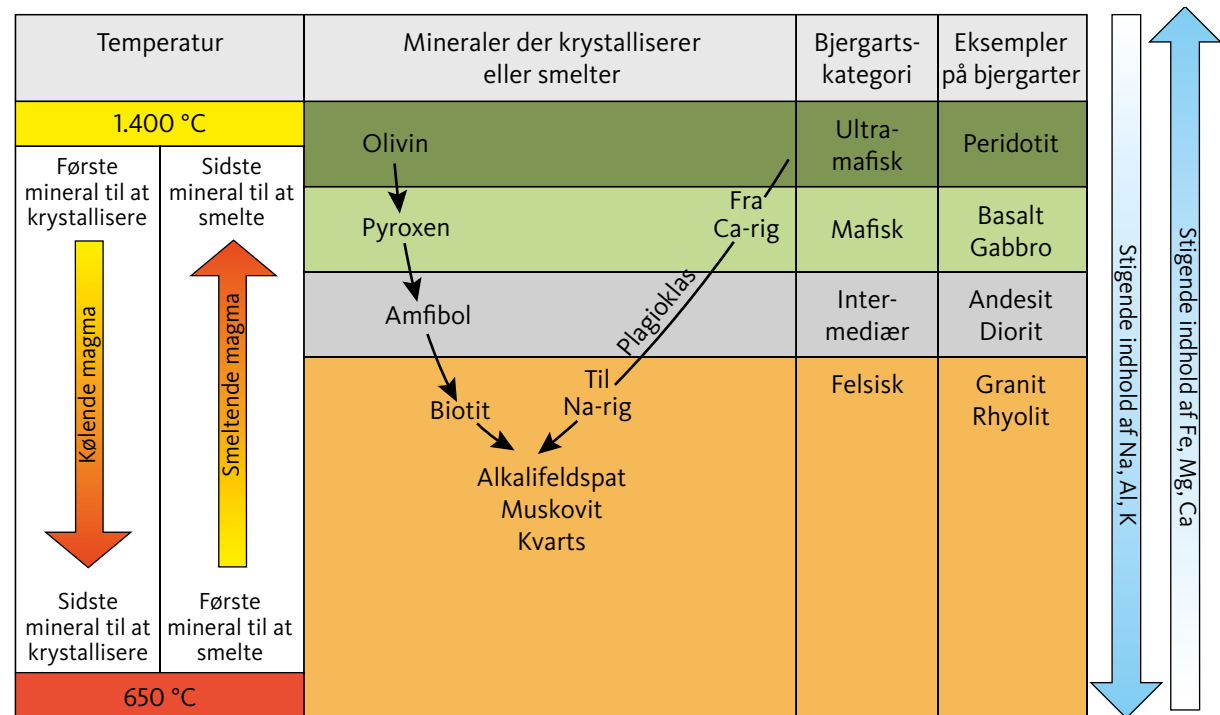
også disse tilførte bjergarter og indgår i nye magmaer. Et magmas kemiske sammensætning er bestemt af de opsmeltede bjergarters kemiske sammensætning. Når kappen begynder at smelte, smelter først de mineraler med det laveste smeltepunkt (figur 152), nogle mineraler med højt smeltepunkt når ikke altid at smelte. Smeltens sammensætning bestemmes kun af de mineraler, som når at smelte, og magmaet kemiske sammensætning bliver forskelligt fra kappens og skorpens kemiske sammensætning.

SMELTNING AF KAPPENS BJERGARTER

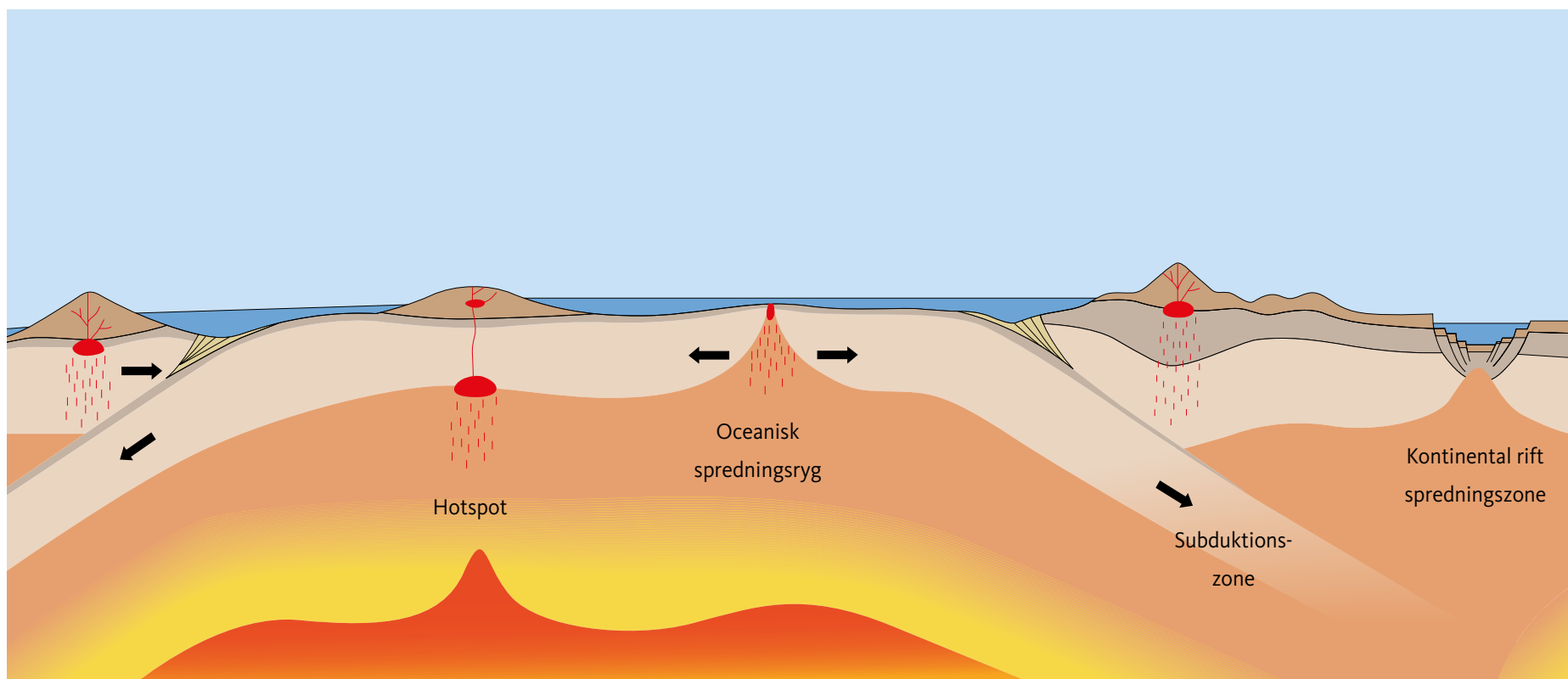
Der er principielt tre forskellige forhold som kan få kappens bjergarter til at smelte (figur 153 og figur 154).

- Ved temperaturstigning.
- Ved trykfald.
- Ved ændring af kappens sammensætning.

Ved temperaturstigning. I hotspots findes områder i kappen, som er ekstra varme; på denne måde opstår en kappediapir. En kappediapir er en rørformet strøm af ekstra varm kappe, som strækker sig helt inde fra



FIGUR 152. Bowens reaktionsserie. Figuren viser sammenhængen mellem temperaturen og mineralernes smeltepunkt. Når et magma nedkøles vil mineralerne begynde at krystallisere i en særlig rækkefølge, som angivet i midten af skemaet. På den måde kan de magmatiske bjergarter inddeles i grupper af bjergarter, hvor de første der størkner er de ultramafiske, dernæst mafiske, intermediære og til sidst de felsiske. Dog skal magmaet være dannet ved meget høj temperatur for, at der overhovedet kan dannes ultramafiske bjergarter. Man kan også læse diagrammet baglæns og altså afgøre, hvilke mineraler der smelter først, når et magma begynder at dannes. Efter Bowen (1956).



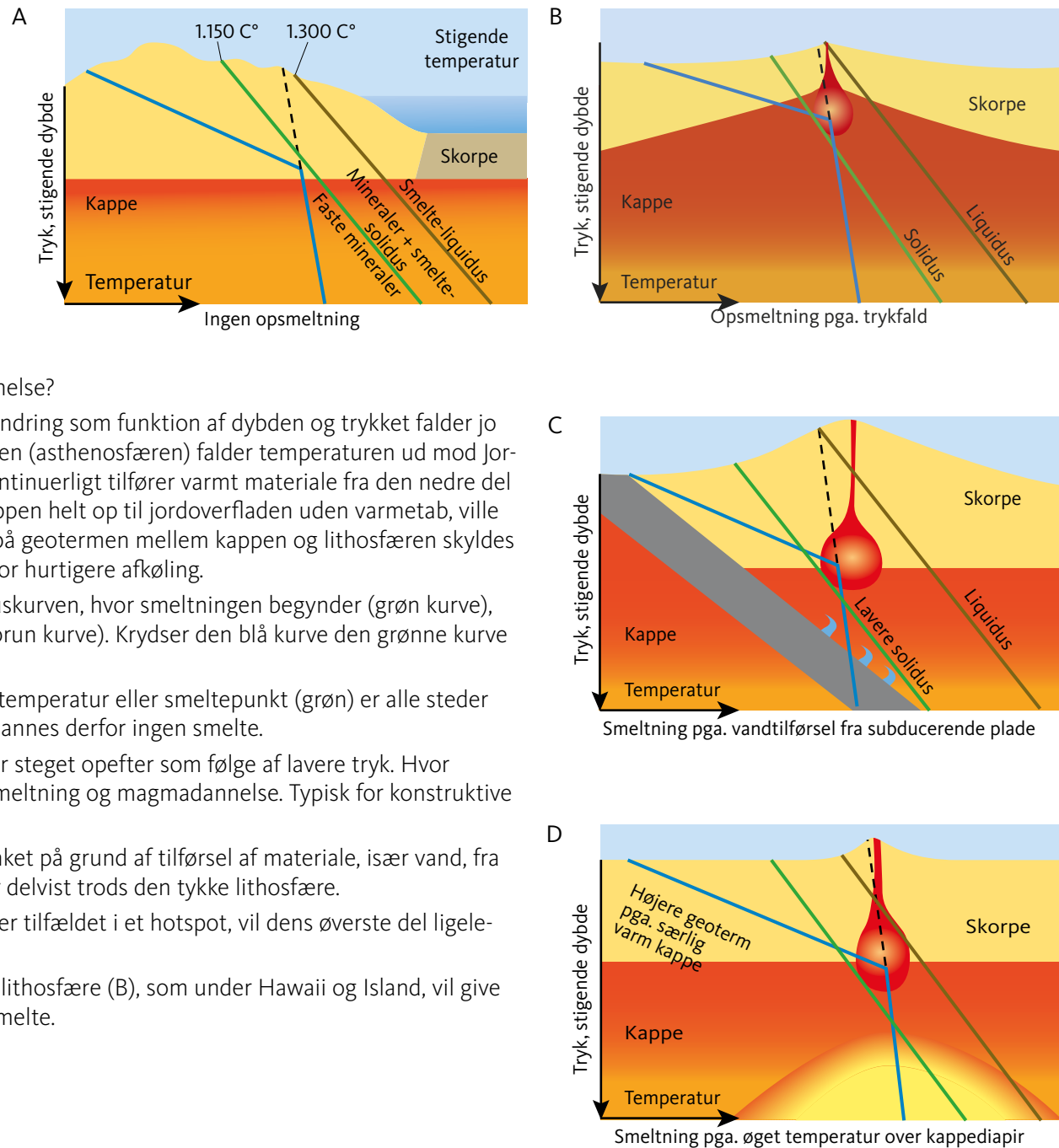
Jordens kerne og får store mængder kappe til at smelte (figur 156).

Ved trykfald. Hvis trykket falder, falder smeltetemperaturen også. Det hænger sammen med, at masser udvider sig når de smelter, og det er nemmere for en masse at udvide sig, når trykket er lavere. Trykfald sker i

konstruktive pladegrænser, hvor skorpen rives fra hinanden, bliver tyndere og dermed letter trykket på kappen (figur 155).

Ved ændring af kappens sammensætning. Smeltepunktet sænkes, hvis der er vand til stede i kappen. Det sker fx når oceanbund subduceres i destruktive pladegrænser, hvor-

FIGUR 153. Oversigt over de magmatiske miljøer. Efter Marshak (2011).



FIGUR 154. Hvor er der mulighed for magmadannelse?

Geotermen (blå kurve), dvs. Jordens temperaturændring som funktion af dybden og trykket falder jo tættere på jordens overflade man kommer. I kappen (asthenosfæren) falder temperaturen ud mod Jordens overflade kun langsomt, fordi konvektion kontinuerligt tilfører varmt materiale fra den nedre del af kappen til den øvre del af kappen. Fortsatte kappen helt op til jordoverfladen uden varmetab, ville temperaturen følge den stiplede kurve. Knækket på geotermen mellem kappen og lithosfæren skyldes lithosfærens varmetab til verdensrummet og derfor hurtigere afkøling.

Kappens smelteinterval er området mellem soliduskurven, hvor smeltningen begynder (grøn kurve), og liquiduskurven hvor smeltningen er komplet (brun kurve). Krydser den blå kurve den grønne kurve kan der ske magmadannelse.

A. Normaltilstanden. Skorpen og kappens solidustemperatur eller smeltepunkt (grøn) er alle steder højere end den faktiske temperatur (blå), og der dannes derfor ingen smelte.

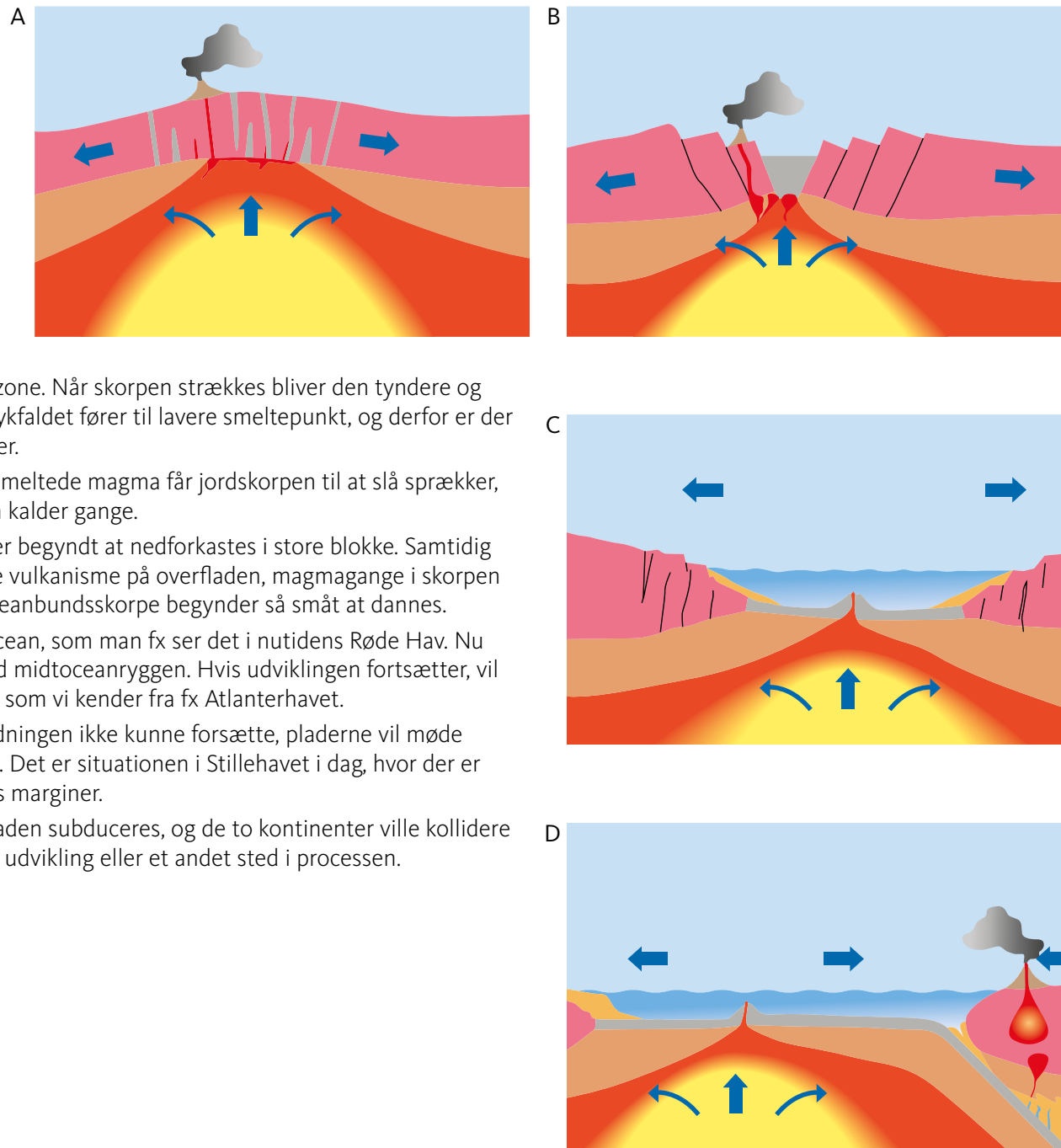
B. Lithosfæren er udtyndet og den varme kappe er steget opefter som følge af lavere tryk. Hvor geotermen er højere end solidus, sker der en opsmeltning og magmadannelse. Typisk for konstruktive pladegrænser.

C. Solidus i kappen over subduktionszoner er sænket på grund af tilførsel af materiale, især vand, fra den subducerede plade, og kappen smelter derfor delvist trods den tykke lithosfære.

D. Hvis kappen er varmere end normalt, som det er tilfældet i et hotspot, vil dens øverste del ligeledes smelte trods den tykke lithosfære.

En kombination af særlig varm kappe (D) og tynd lithosfære (B), som under Hawaii og Island, vil give anledning til dannelse af meget store mængder smelte.

Af MiMa efter Holm & Larsen (2013).



FIGUR 155. Tegneserie med udviklingen af en riftzone. Når skorpen strækkes bliver den tyndere og kappen stiger op og kommer under lavere tryk. Trykfaldet fører til lavere smeltepunkt, og derfor er der magmatisk aktivitet i de konstruktive pladegrænser.

A. Strækningen af skorpen og den opadstigende smeltede magma får jordskorpen til at slå sprækker, og magma trænger op i sprækkerne, som det man kalder gange.

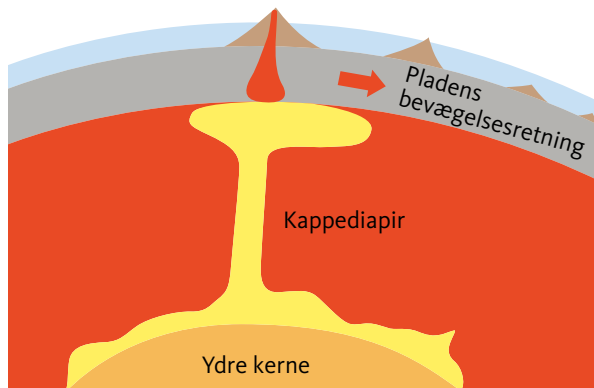
B. Strækningen er fortsat og kontinentalskorpen er begyndt at nedforkastes i store blokke. Samtidig tilføres stadig mere magma, og der kan være både vulkanisme på overfladen, magmagange i skorpen og magmakamre i den dybe skorpe. Den første oceanbundsskorpe begynder så småt at dannes.

C. Strækningen fortsætter, og der er nu et ungt ocean, som man fx ser det i nutidens Røde Hav. Nu foregår den magmatiske aktivitet hovedsagligt ved midtoceanryggen. Hvis udviklingen fortsætter, vil der i løbet af mange millioner år dannes et ocean, som vi kender fra fx Atlanterhavet.

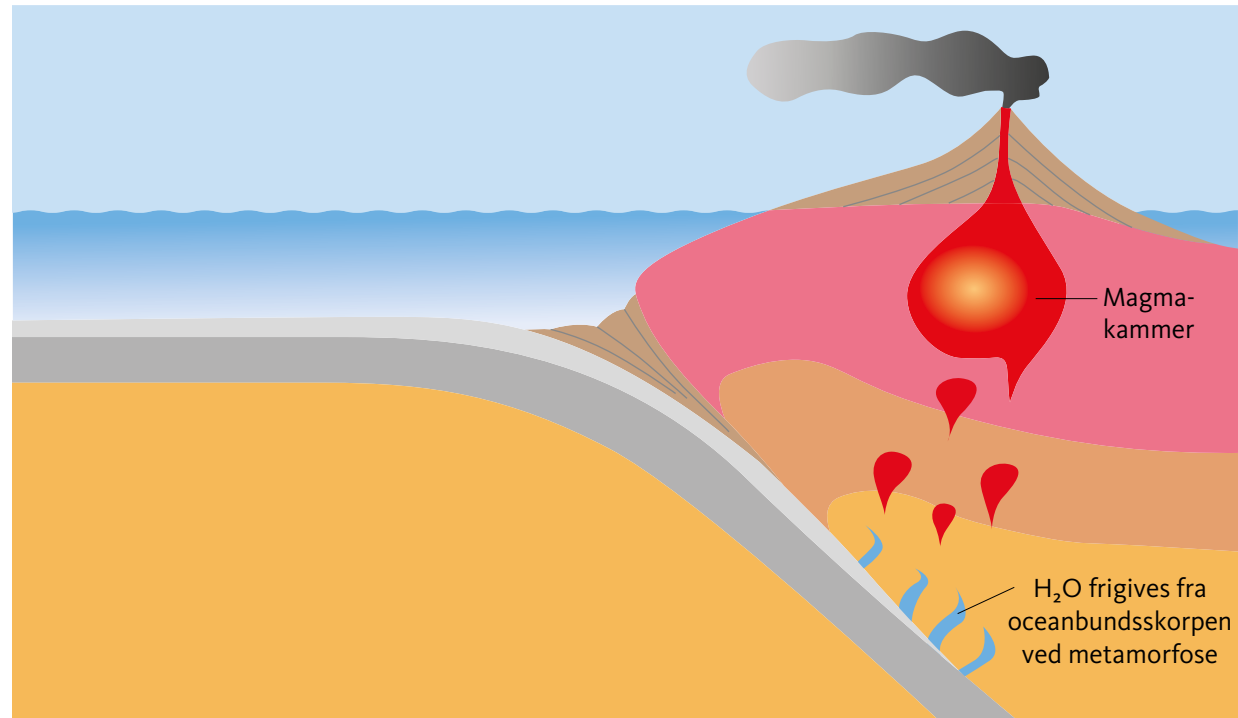
D. Hvis udviklingen fortsætter yderligere, vil spredningen ikke kunne fortsætte, pladerne vil møde modstand og destruktive pladegrænser kan opstå. Det er situationen i Stillehavet i dag, hvor der er subduktionszoner hele vejen rundt langs oceanets marginer.

Hvis man fortsatte tegneserien ville hele oceanpladen subduceres, og de to kontinenter ville kollider og blive et igen. En rift kan også stoppe tidlig i sin udvikling eller et andet sted i processen.

Af MiMa (2019).



FIGUR 156. Hotspot. En kappediapir af ekstra varmt kappemateriale (gul) bevæger sig op og får kappen til at smelte og danne vulkaner. Hvis det er på havbunden kan øer dannes af det vulkanske materiale. Når pladen samtidig bevæger sig hen over det faststående hotspot vil der dannes en hel række af øer, hvor de ældste langsomt synker i havet efterhånden som de afkøles og dermed trækker sig sammen. Af MiMa (2019).



ved der frigives store mængder vand til den overliggende kappe (figur 157).

Et varmt magma vil, som det gælder for alle varme masser, søge opad i jordskorpen. Men møder magmaet modstand i den solide skorpe vil magmaet i løbet af millioner af år størkne dybt nede i jordskorpen, hvilket giver krystallerne mulighed for at vokse til store mineralkorn, som kan ses med det blotte

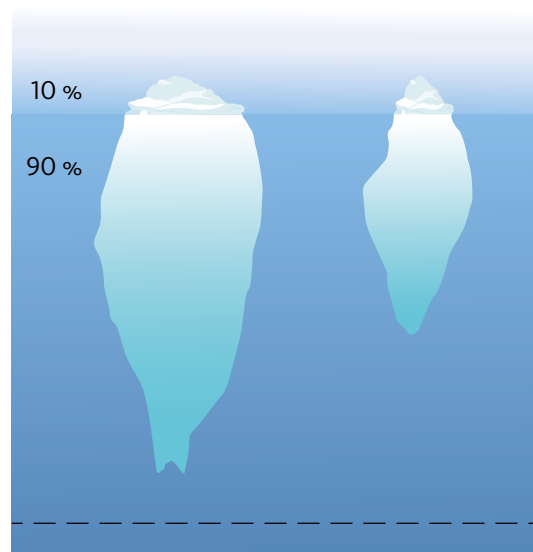
FIGUR 157. Subduktionszone. Når en oceanbund møder et kontinent eller en anden oceanbund, vil en oceanbund begynde at synke ned i kappen. Dette sker, fordi den har en højere densitet end det kontinent eller den oceanbund den møder. Under metamorfosen frigives vand fra oceanbundsskorpen. Når vand tilsættes kappen sænkes smeltepunktet og magma dannes. Af MiMa (2019).

øje. Disse bjergarter kalder vi magmatiske dybbjergarter. Det gælder fx bjergarten granit, som har mineraler som kvarts, feldspat, amfibol og glimmer eller bjergarten gabbro med mineraler som pyroxen og feldspat.

Under andre forhold kan en del af magmaet nå helt op til jordoverfladen eller havbunden og blive ekstruderet i en vulkan. Hermed dannes dagbjergarter eller lavabjergarter (ekstrusiv). Størkningstiden for denne gruppe er meget kort, og derfor er dagbjergarten, i modsætning til dybbjergarten, ofte så finkornet, at de enkelte krystaller ikke kan ses med det blotte øje. Lavaen kan dog have revet større krystaller, som havde nået at størkne nede i magmakammeret, med op. Derved dannes der porfyrbjergarter, som kendes fra flere ledeblokke, fx rhombeporfyren fra Osloegnen.

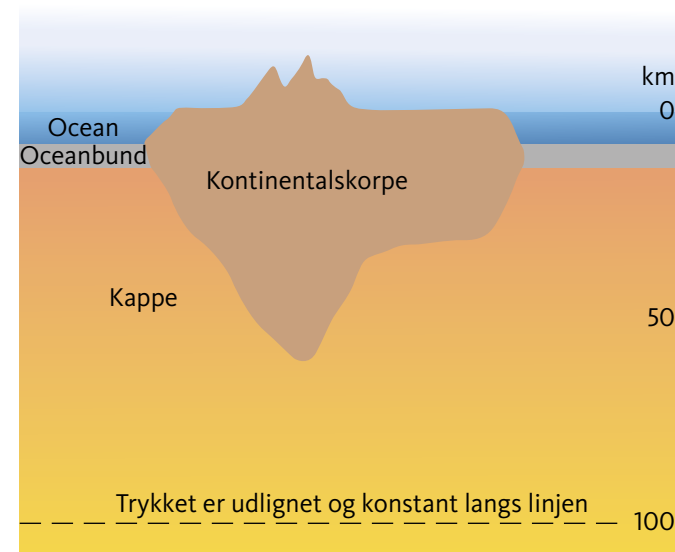
HÆVNING AF TERRÆN – ISOSTASI

I alle trin af det geologiske kredsløb kan der ske hævnning af terrænet, eller opløft, som følge af pladetektonik eller isostasi, som resulterer i, at bjergarterne bliver eksponeret på jordoverfladen, og sol, vind og vejret starter nedbrydningen af dem; de exogene



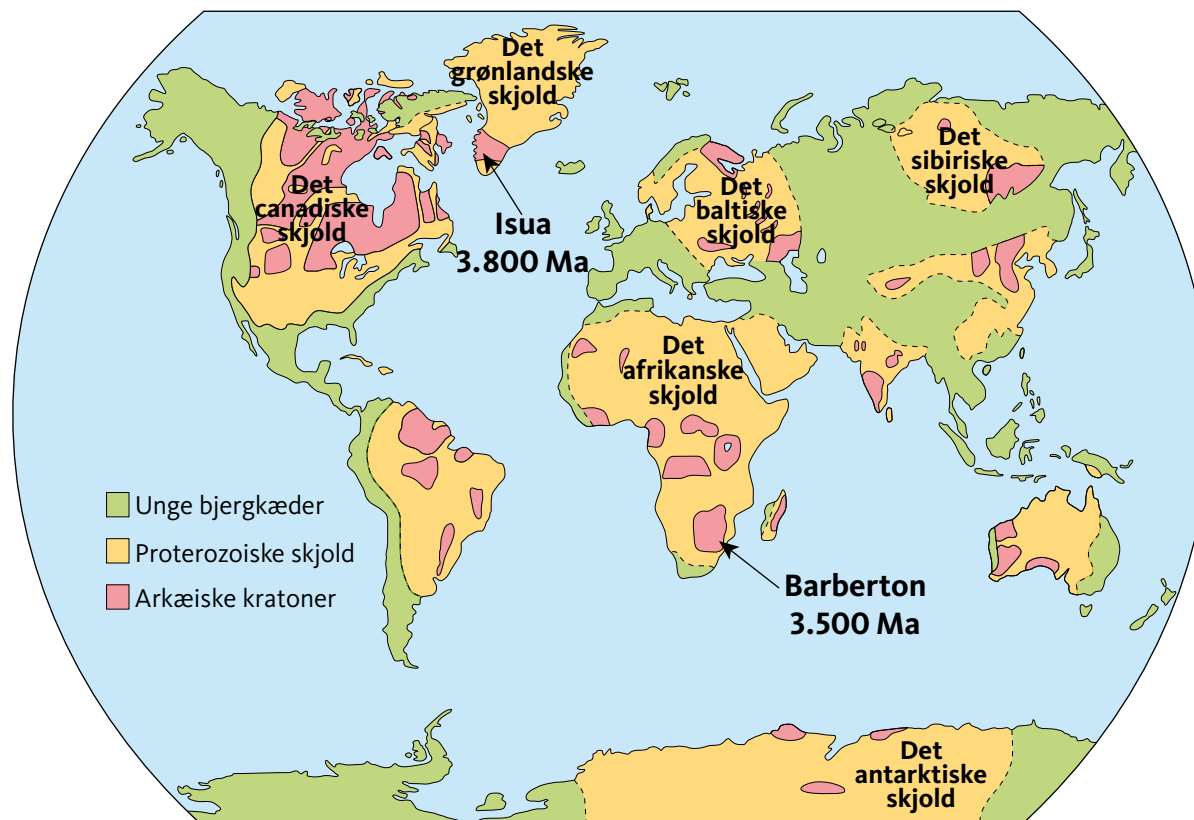
processer tager fat.

Som følge af den konstante nedbrydning af jordskorpen bliver de dybe dele af bjergkæderne eksponeret, og dermed også malmforekomster der er dannet dybt i jordskorpen. Jordskorpen og kappen er altid i isostatisk ligevægt, hvilket betyder, at opdriften i kappen og tyngdekraften fra jordskorpen finder en balance i forhold til skorpematerialets densitet. Dette betyder, at kontinentalskorpen, som følge af bjergkædefoldning, vil bøje ned i kappen, når den



FIGUR 158. Lithosfærepladernes isostatiske ligevægt med kappen kan sammenlignes med isbjerge i havet. Lige meget hvor stort et isbjerg er, vil ca. 10 % stikke op over overfladen. På samme måde vil et kontinent, der fortykkes i en bjergkædefoldning, gemme det meste af sin masse nede i kappen, og når bjergene bortroderes vil kontinentet stige længere op. Af MiMa (2019).

FIGUR 159. Kontinenternes inddeling i forhold til alder. Efter Marshak (2011).



På grund af det geologiske kredsløb bliver jordskorpen konstant fornyet og recirkuleret. Ikke desto mindre er store dele af kontinenterne såkaldte stabile kratoner (figur 159), som stort set har eksisteret, siden der begyndte at være kontinenter på Jorden. Kratoner er områder, som ligger uforstyrret af de aktive pladegrænser, og de har derfor bevaret materiale, hvormed man kan studere den tidlige udvikling af Jorden. Kratoner er ofte peneplaniserede, altså nederoderede, flade områder på kontinenterne, som kan være dækket af yngre sedimenter.

fortykket. Så selvom vi har områder med høje bjerge på Jorden, gemmer det meste af kontinenterne sig nede i kappen. De tykkeste kontinenter er ca. 70 km tykke, men det højeste bjerg, Mount Everest når kun 8.848 m over havet. Når bjergkæderne eroderes,

hæves jordskorpen, fordi massen bliver mindre. På samme måde som et isbjerg i havet kun stikker ca. 10 % af sin masse op over havoverfladen, vil det stadig stikke 10 % op, når toppen smeltes af, fordi isbjerget hæver sig i vandet (figur 158).

NØGLEBEGREBER

- Exogen/endogen
- Peneplanisering
- Forvitring
- Erosion
- Sedimentation
- Kompaktering
- Cementering
- Metamorfose
- Fasediagram
- Smeltedannelse
- Intrusiv/ekstrusiv
- Isostasi
- Kratoner

REFERENCER

Bowen, N. L. (1956). *The evolution of the igneous rocks*. Dover Publications.

Bundy, F. P. (1989). Pressure-temperature phase diagram of elemental carbon. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 156(1), 169–178.

Holm, P. M., & Larsen, L. M. (2013). Vulkaner-hvorfor smelter Jorden? I *Geoscience - En Inspirationsbog til tagene Geovidenskab og Naturgeografi i Gymnasiet* (s. 16–25). Museum Tusculanum.

Marshak, S. (2011). *Earth: Portrait of a Planet: Fourth International Student Edition*. Norton.

KAPITEL 20



FIGUR 160. Mange mennesker har forsøgt at ernære sig ved at finde guld i residualforekomster med vaskepande. Her er det under guldfeberen i Californien, USA omkring 1850, men det foregår stadig i mindre omfang i Californien, og i større omfang i områder i det Globale Syd. Shutterstock.

RÅSTOFFERNE I DET GEOLOGISKE KREDSLØB

DANNELSE AF DE MINERALSKE RÅSTOFFER

Man bruger begrebet en mineralforekomst, hvis mineralerne findes i så stor mængde og i så god kvalitet, at de eventuelt kan danne grundlag for udnyttelse. For at en mineralforekomst kan dannes, skal der ved geologiske processer ske en opkoncentration fra de almindelige bjergarters sammensætning til en malmbjergart, som har forhøjede (som regel stærkt) koncentrationer af de bestemte grundstoffer (figur 162).

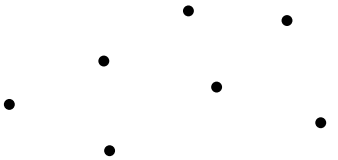
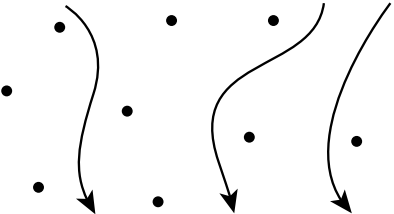
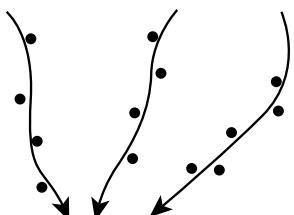

De malmdannende processer kan opstå i fem principielt forskellige geologiske miljøer (figur 161)

- Magmatiske forekomster
- Hydrotermale forekomster
- Sedimentære forekomster
- Tungsandsforekomster
- Residualforekomster

Disse processer er knyttet til de regionale geologiske stormiljøer (figur 163).

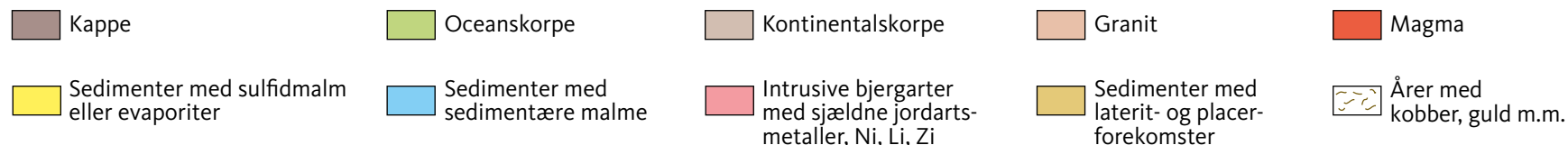
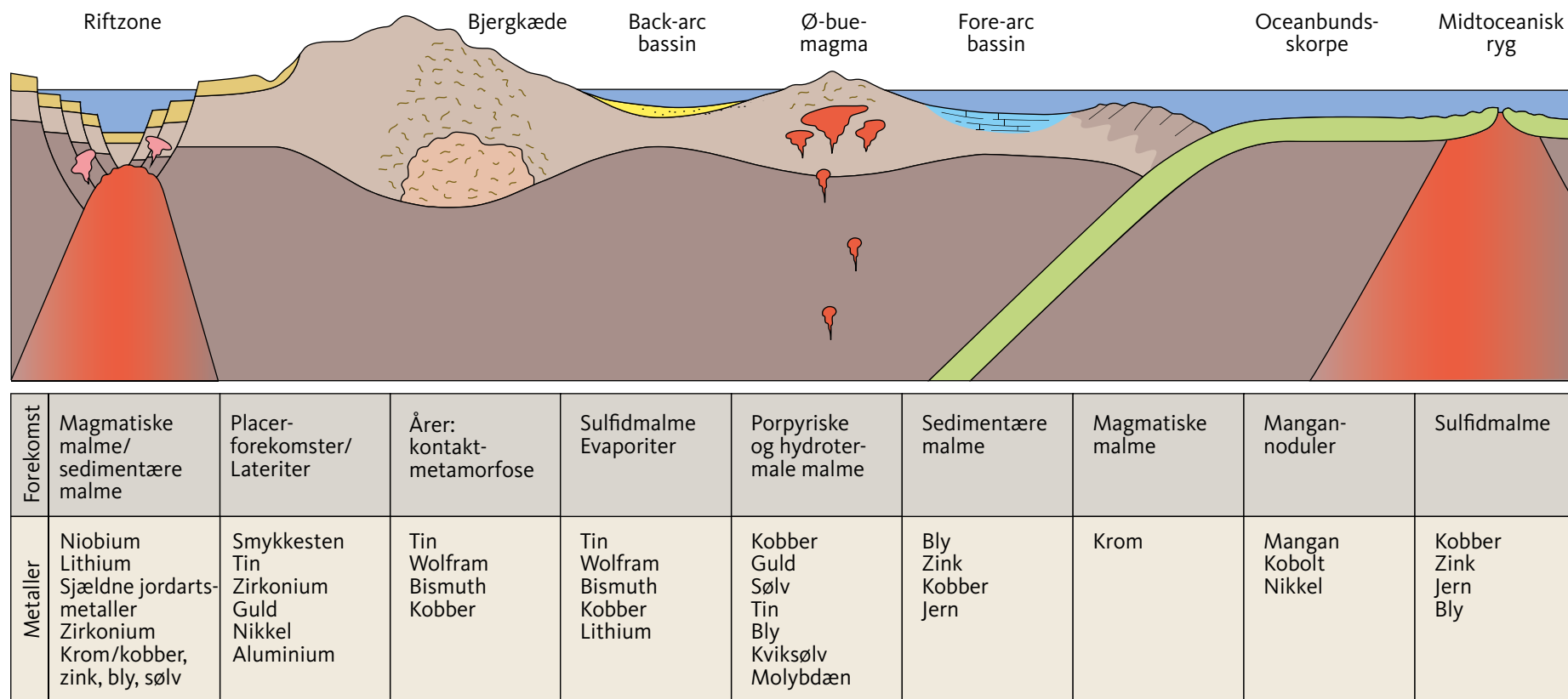
Forekomsttype	Kilde	Mobilisering/transport	Fælde
Magmatiske malme	Kappen	Opsmeltning af kappe	Krystallisation og bundfældning
Hydrotermale malme	Magma	Varm væske med opløste stoffer fra magmaet gennemstrømmer bjergarter omkring magmalegemet.	Stofferne i den varme væske udfældes som regel i sprækker, når væsken afkøles, eller de reagerer kemisk med omgivelserne.
Sedimentære malme	Store sedimentære områder i havet	Opløsning i havvand	Områder i sedimentpakkerne med frit svovl.
Båndet jernmalm (hører også til de sedimentære)	Vulkanisme	De tidlige oceaner i Jordens historie havde store mængder jern i opløsning.	Da fotosyntetiserende liv begyndte at danne ilt i havene, dannedes jernoxider, som sank til bunds på havbunden.
Tungsands-/placerforekomst	Bjergarter som indeholder det pågældende mineral i større eller mindre mængder	Erosion og forvitring af kildeområdet samt transport i vandløb.	Udfældelse ved sortering i strømmende vand (eller bølger). De tunge mineraler vil aflejres i floden i områder med mindre vandenergi.
Residualmalme 1. Grus-, sand- og lerforekomster 2. Lateritforekomster	1. Almindelige bjergarter i Jordens overflade 2. Fx aluminiumsholdige bjergarter	1. Almindelig erosion og transport af bjergartsfragmenter. 2. Intens kemisk forvitring og bortvaskning af de stoffer vi ikke er interesserede i.	1. Aflejring af fx grus, sand og ler i forskellige geologiske miljøer. 2. Tilbageblivelse af fx aluminiumsmineralet bauxit, når alt andet er vasket væk.

FIGUR 161. Oversigt over udvalgte forekomsttyper. Af MiMa (2019).

Kilde	Område som leverer de grundstoffer, som udgør råstoffet; det kan være et stort bjergartslegeme med lave koncentrationer af det pågældende grundstof.	Lav koncentration 
Mobilisering	Råstoffet skal mobiliseres fra kilden og kræver en proces, der frigør det pågældende grundstof; fx forvitring, erosion, opsmeltning, opløsning i hydrotermale væsker eller saltopløsninger.	
Transport	Der skal have været en transportmekanisme til at føre de mobiliserede elementer videre. Transportmediet kan være magma, forskellige opløsninger eller vand i en flod.	
Fælde	Endelig skal der være en årsag, også kaldet en fælde, til at grundstofferne udfælder som mineraler i en mere koncentreret form end i det oprindelige kildeområde.	Høj koncentration 

FIGUR 162. Skematisk fremstilling af de fire trin i den malmdannende proces. Af MiMa (2019) efter Sørensen (1989).

FIGUR 163. De metalliske råstoffers fordeling i de geologiske stormiljøer. Dannelsen af forskellige forekomster er tæt knyttet til den geologiske udvikling af et område. De store pladetektoniske miljøer afgør ofte, hvilke geologiske processer der kan forekomme på en given lokalitet og dermed, hvor man kan forvente at finde forekomster af de forskellige mineralske råstoffer. Af MiMa (2019) efter Skinner & Porter (1987).



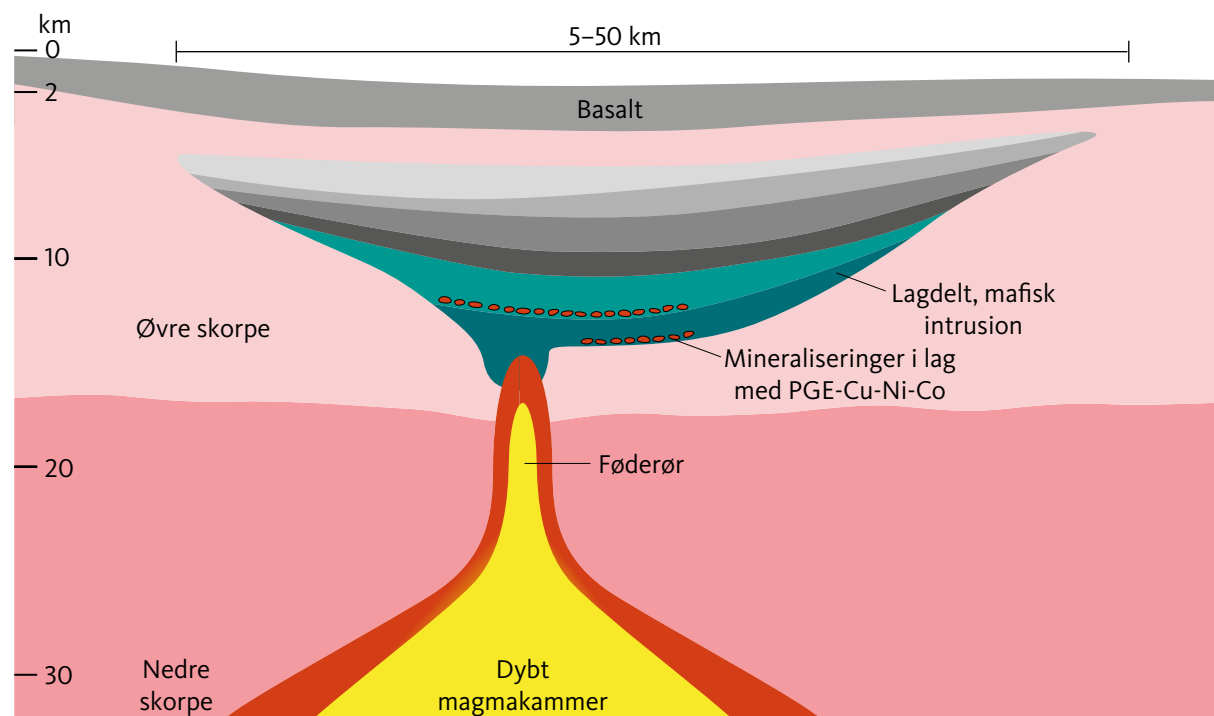
MAGMATISKE FOREKOMSTER

Visse grundstoffer kan opkoncentreres i jordskorpen, fordi de danner tunge mineraler, som, når de størkner i magmaet, kan synke ned i bunden af magmaet. Det gælder for bl.a. platin og nikkel (figur 164).

Andre mineraler kan opkoncentreres i den sidste lille del af magmaet og størkne til sidst som såkaldte pegmatitter. I denne sidste rest af magmaet kan de grundstoffer, som ikke passer ind i de mest almindelige mineraler, opkoncentreres. Det kan fx være udkrystallisering af sjældne jordartsmetaller, zirkonium, niobium, platingruppemetallerne m.fl.

HYDROTHERMALE FOREKOMSTER

Hydrotermale forekomster dannes, når vand, der befinder sig under tryk langt nede i jorden, varmes op af et indtrængende magma (figur 165). Det varme vand opløser store mængder mineraler fra selve magmaet eller fra de omkringliggende bjergarter. Man taler om en fluid, altså at grundstofferne er blevet opløst i en væske. På grund af trykket trænger væsken, som nu indeholder mange grundstoffer i opløsning, ud i sprækker i de

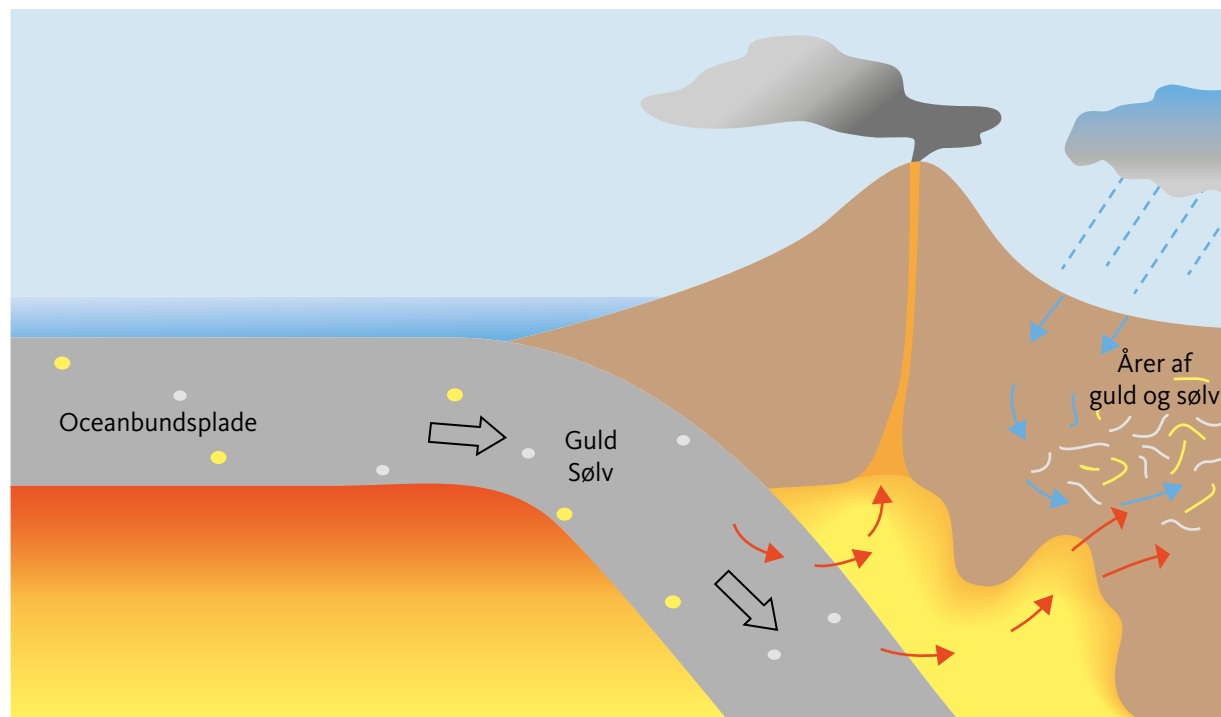


FIGUR 164. Magmatiske forekomster i lagdelt mafisk intrusion. I områder under kontinenter med meget store smeltedannelser, fx et hotspot eller en riftzone, kan der dannes mafiske intrusioner, hvori mineralerne, efterhånden som de størkner, falder til bunds og på den måde sorteres efter massefylde. Mafisk betyder, at det er et magma, der danner mange mørke mineraler og ingen kvarts. I de lagdelte intrusioner vil der, hvis smeltesammensætningen tillader det, kunne dannes lag af platingruppemetaller (PGE), kobber (Cu), nikkel (Ni) og kobolt (Co) i forskellige forbindelser. Disse mineraler har høj massefylde og vil samles som bundfald i de nederste lag af intrusionen. Af MiMa (2019).

omgivende bjergarter. Når tryk- og temperaturforholdene bliver lavere, udfældes nogle af de opløste grundstoffer i såkaldte årer, dvs. at sprækker udfyldes med mineraler. Hydrotermale forekomster kan b.l.a. indeholde guld, sølv og kobber.

SEDIMENTÆRE FOREKOMSTER

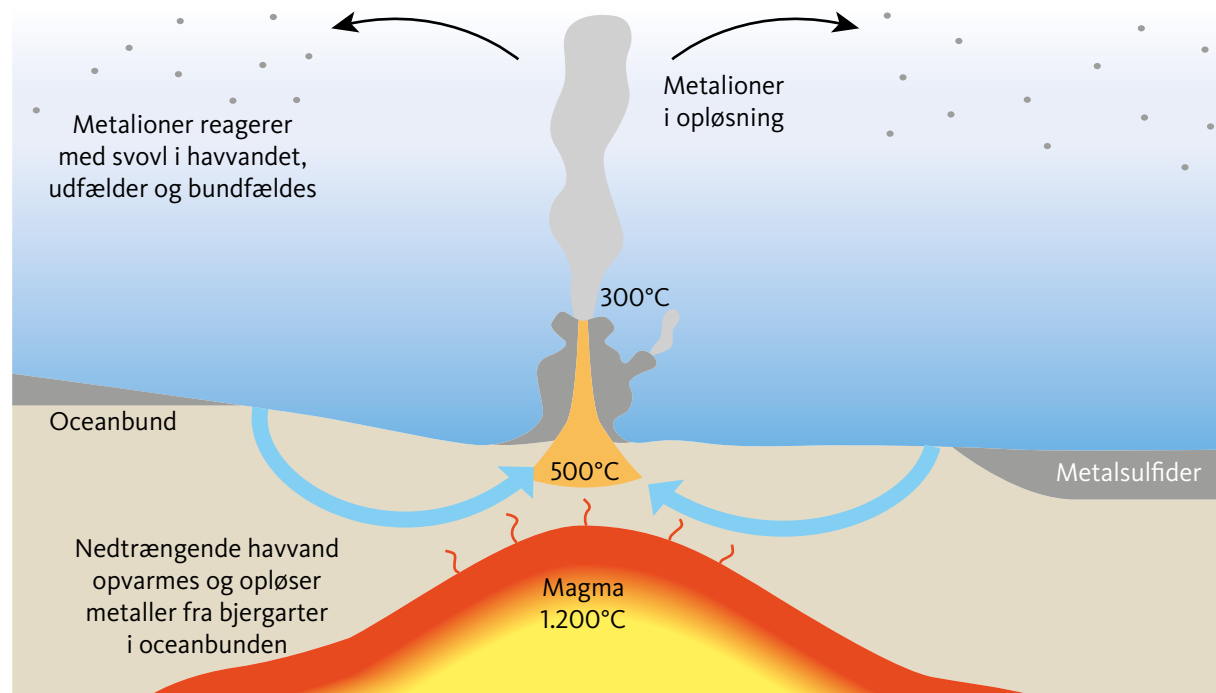
I de store sedimentære bassiner i havet er der meget saltholdige væsker (fluider/bri-nes), som indeholder opløsninger af forskellige grundstoffer. Det kan enten være grundstoffer, der opløses fra sedimentlagene, eller det kan være et tilskud af grundstoffer fra magmatisk aktivitet, fx fra vulkansk aktivitet ved midtoceanryggene. Metaller vil udfældes fra saltopløsningen, hvis det møder en kemisk fælde, fx lag som indeholder meget organisk materiale eller svovl. Den meget saltholdige fluid kan også koncentreres i lavpunkter på havbunden fordi den har højere massefylde end havvandet og derfor udfældes som store massive metalsulfidlag (figur 166). Selvom der fx kun findes meget lidt zink eller kobber i almindelige sedimenter, kan det ved disse processer blive til enorme mængder, når kildeområdet er stort nok. Store zink- og kobberforekomster er ofte af sedimentær type.



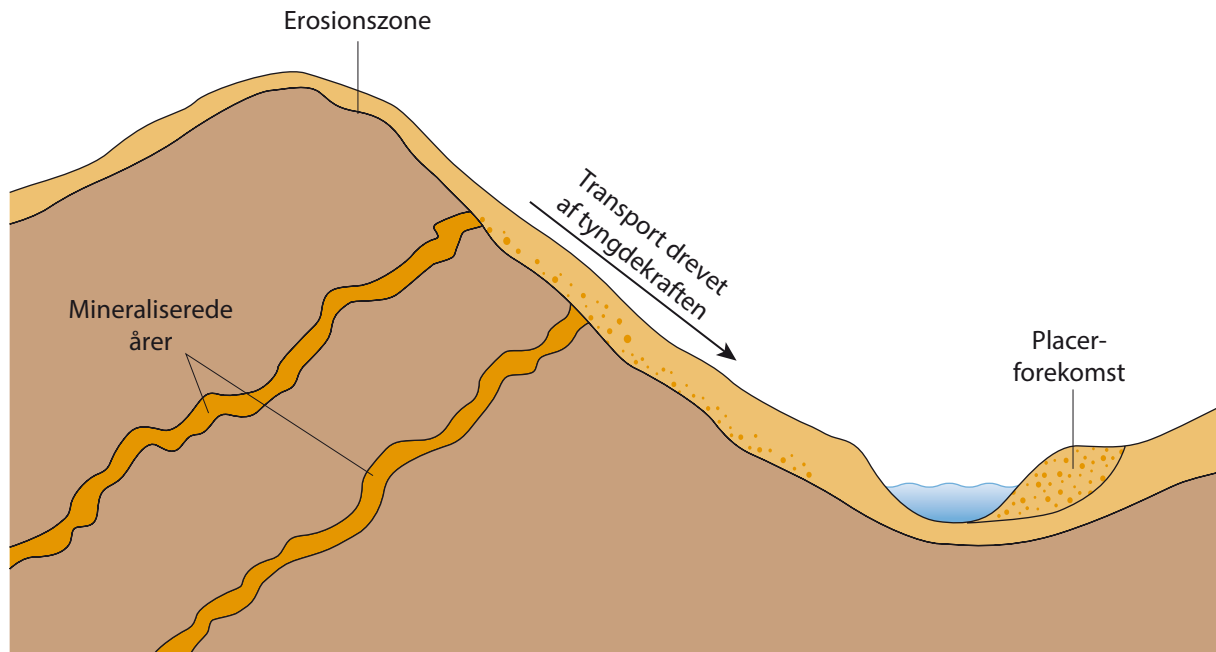
FIGUR 165. Hydrotermale forekomster. Tværsnit af subduktionszone med magmadannelse. Varmen fra den opadstigende magma driver konvektion (varme opløsninger stiger opad; når de har afgivet deres varme, vil de begynde at synke ned igen indtil de varmes op og søger op igen osv.) af vandige opløsninger, som kan bære på metaller som kobber, molybdæn og guld. Af MiMa (2019).

Denne type omfatter også jernforekomster af typen bandede jernformationer (BIF – Banded Iron Formation).

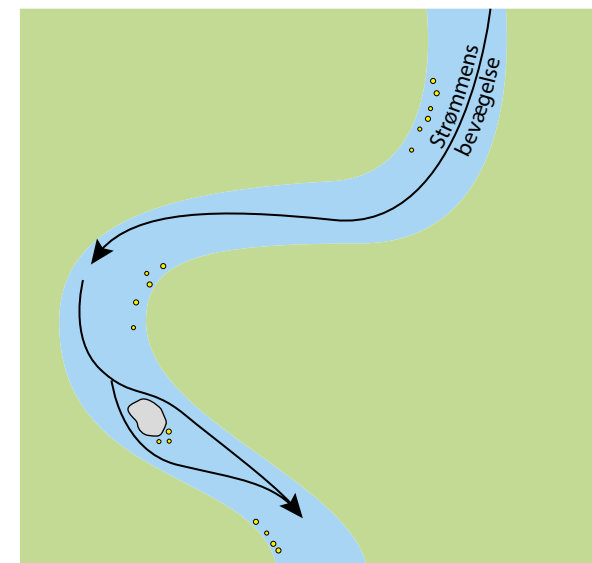
Inddampningsminerale dannet i saltsøer er kemiske sedimente og tilhører også gruppen af sedimentære forekomster. Denne type er bl.a. kendt fra bagsiden af den vulkanske ryg i Atacamørkenen i Andesbjergene, Sydamerika. Her dannes afløbsfrie søer, hvori lithium ophobes, når det forvitrer fra de vulkanske bjergarter og transporteres til søen ved hjælp af regnvand og vind, ligesom det også bliver tilført ved hjælp af opløsninger fra såkaldte hot-springs. Hot-springs er almindelige i vulkansk aktive områder og er grundvand, der opvarmes af de underliggende magmakamre og tilføres mineraler fra magma og de bjergarter, opløsningen gennemløber. Inddampningssøer findes kun i ørkenklima, hvor regn er sjælden. Søens vand fordamper i takt med, at det tilføres og mineralindholdet udfældes inden, der igen kommer regn og inddampningen kan fortsætte. Der findes derfor kun lithiumforekomster i saltsøer i de subtropiske egne omkring den 25. breddegrad.



FIGUR 166. Hydrotermale og sedimentære forekomster. Snit af oceanbund med en black smoker og dannelsen af massive metalsulfider. Black smokers er strukturer på havbunden, som dannes ved at varme opløsninger med forskellige metaller strømmer ud i havet på en måde, så opløsningen ligner en røgsky. Efterhånden opbygges en skorstenslignende struktur af udfældede metaller. Af MiMa (2019).



FIGUR 168. Tungsandsforekomst. En bjergart med mineralisering eroderes. Erosionsmaterialerne skylles ned i en flod, hvor sedimenterne sorteres i forhold til massefylde. Tunge mineraler koncentrerer i områder med lav energi i floden. Herfra kan mineralerne udvindes. Tungsandsforekomster udnyttes ofte til småskala-minedrift. Af MiMa (2019) efter Encyclopædia Britannica (1999).

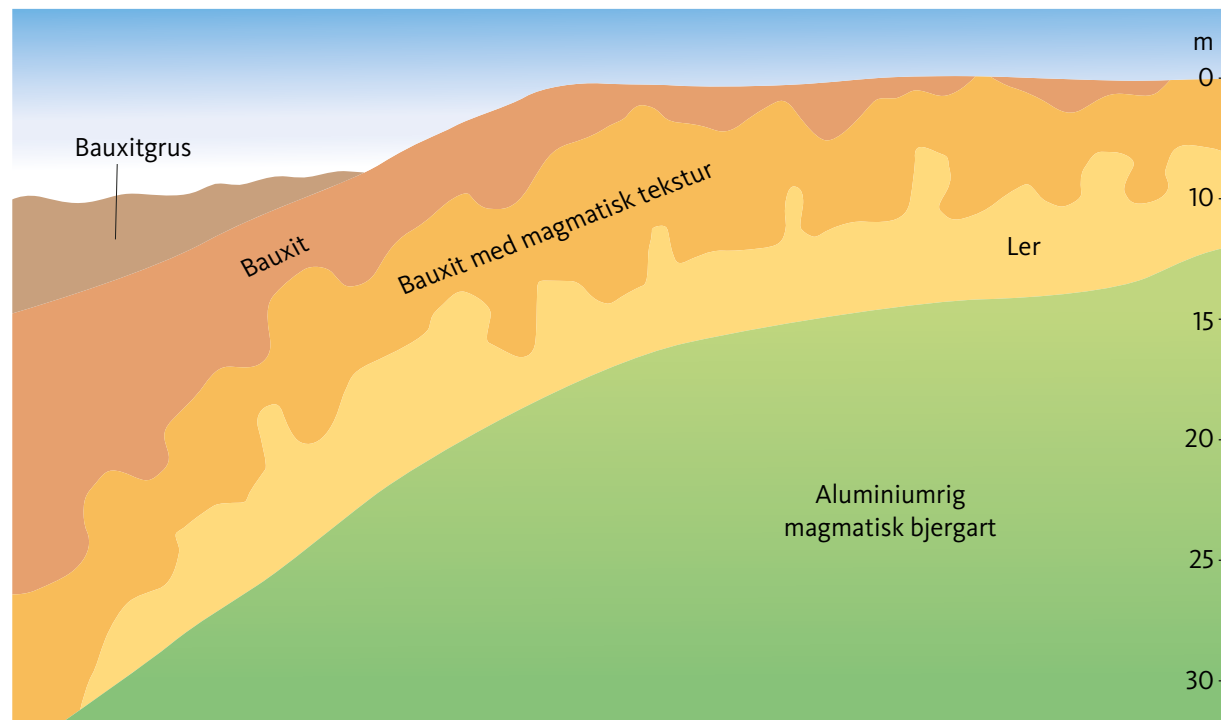


FIGUR 167. Tungsandsforekomster. Strømmen i en flod fordeler sig ikke jævnt i vandet, men vil variere hen over flodens tværsnit. Vandets hastighed øges i ydersiden af meanderbuen (det sving der dannes i en naturligt løbende flod), hvilket medfører erosion i ydersiden af meanderbuen og aflejring i indersiden af meanderbuen, hvor man derfor kan finde opkoncentrerede mineralske forekomster. Det samme kan ske på læsiden af en sten i floden. Af MiMa (2019).

TUNGSANDSFOREKOMSTER

Bjergarter eroderes, og mineralkornene transporteres derefter mod havniveau i vandløb og floder. I denne proces sorteres mineralkornene af det strømmende vand, da de falder til bunds, hvor strømmen er lav i forhold til deres vægtfylde (densitet). Når floden mister energi vil mineralkorn med størst vægtfylde falde til bunds tidligere end korn med lav vægtfylde. Der sker derfor en opkoncentrering af mineralkornene (figur 167 og figur 168), og der dannes en placerforekomst.

Denne type er særligt kendt for forekomster af guld, tin og titan, som kan udvindes med simple sorteringsmetoder baseret på densitetsforskelle. Bedst kendt er vaskepanden, som bruges mange steder til udvinding af guld. Men også mange ædelsten, som fx rubin, diamanter og turmalin, findes i denne type forekomst, som også kendes under navnet tungsandsforekomst eller placerforekomst. Det kræver selvfølgelig, at disse mineraler og guld allerede findes i de bjergarter, som er blevet eroderet i flodens opland. Tungsandsforekomster kan også forekomme i strandmiljøer, hvor bølger sorterer mine-



FIGUR 169. Residualforekomster. Dannelsen af bauxitmalm sker ved, at en aluminiumsrig magmatisk bjergart forvitres i et fugtigt, varmt klima. Forvitringen medfører, at mange af grundstofferne i den oprindelige bjergart udvaskes, men aluminium bliver tilbage og bindes i mineralet bauxit. Som figuren viser, er der flere zoner af omdannelse, hvor den oprindelige bjergarts tekstur forsvinder mere og mere op efter. Af MiMa (2019).

ralerne. De fleste har måske bemærket, at der på de danske strande ofte er tynde lag af sorte mineraler, hvilket skyldes et højt indhold af magnetit og granat.

RESIDUALFOREKOMSTER

Residualforekomster består af forvittringsprodukter, der er dannet som følge af fysiske og kemiske processer, der nedbryder bjergarter. Gruppen omfatter både råstofferne sand, grus og sten, som er resultatet af fysiske processer, samt gruppen af råstoffer, der er dannet ved kemiske processer nær jordens overflade, fx laterit (nikkelmalm) og bauxit (aluminiummalm) (figur 169). Ved forvittring sker der en kraftig opløsning af feldspat i overfladebjergarterne. De opløste grundstoffer (Si og K) vaskes ud af bjergarten, mens aluminium eller nikkel bindes i uopløselige mineraler og opkoncentreres i bjergarten. Den intense forvittring kræver tropisk klima og god dræning, for at de opløste stoffer kan vaskes væk.

Der er altså mange forskellige geologiske processer, som kan føre til dannelsen af en mineralforekomst. Mange af dem er knyttet til miljøer omkring pladegrænser, det

gælder særligt de processer, der kræver en varmekilde, mens også faktorer som klima og trykforhold spiller en rolle i dannelsen af nogle typer forekomster.

RÅSTOFFERNES GEOGRAFISKE FORDELING

Råstoffernes geografiske fordeling er resultat af processer i det geologiske kredsløb, som har foregået kontinuerligt gennem Jordens historie (figur 145 og figur 163). Da landenes geologiske historie er forskellige, er fordelingen af mineralske råstoffer også forskellig fra land til land. Det er oplagt, at store lande har større sandsynlighed for at have mineralforekomster som kan udnyttes, fordi et større areal kan repræsentere mange geologiske udviklingsforløb. Derfor er det også store lande, der dominerer i produktionen af mineraler.

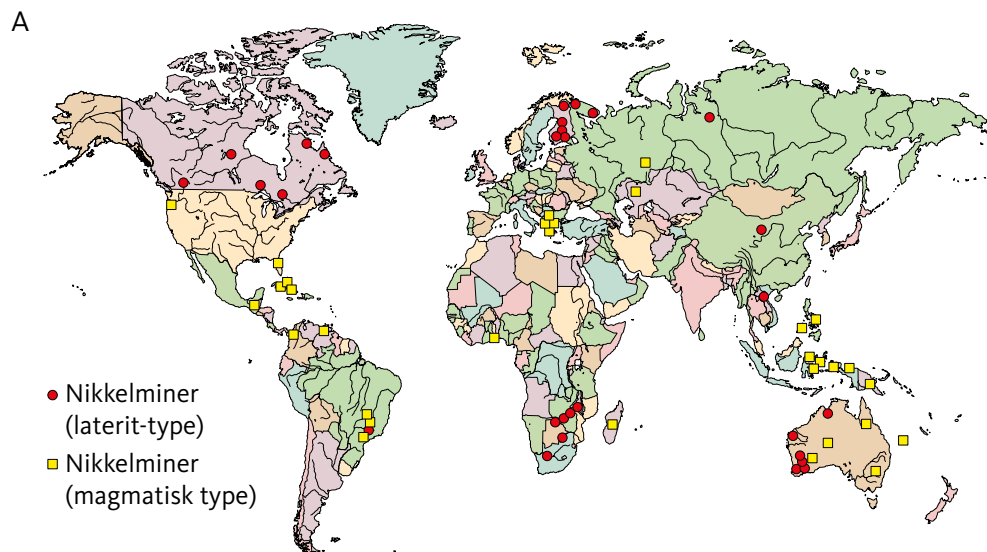
I princippet kan alle lande have vigtige råstoffer i undergrunden. Men hvor er de? Det er geologernes opgave at forstå, hvilke geologiske miljøer der har domineret hvor og hvornår, så man kan finde råstofferne. Nøglen til denne forståelse er bl.a. geologiske kort. Mens nogle råstoffer findes i flere forskellige geologiske miljøer, vil nogle

være begrænset til nogle særlige geologiske miljøer.

En betydelig del af verdens kobberproduktion kommer fra miner i det vestlige Syd- og Nordamerika, hvor forekomsterne er dannet som følge af konvergerende (destruktive) pladegrænser, der har været aktive i millioner af år (figur 170. c). Af samme grund er Chile og Peru blandt de største producenter i verden af kobbermalm. Men da kobber også kan dannes i store sedimentære bassiner og i magmatiske forekomster, udvindes der også kobber i mange andre dele af verden, fx Canada, Australien, Europa og Rusland.

Aluminium og nikkel brydes mest fra bauxit- og lateritforekomster, som dannes i områder domineret af tropisk klima igennem en lang periode (figur 170. a). De fleste lateritforekomster er dannet i nutiden (geologisk set måske indenfor den sidste million år) og findes i lande i Sydøstasien og Caribien, hvor de rette klimatiske betingelser for intens forvittring er til stede.

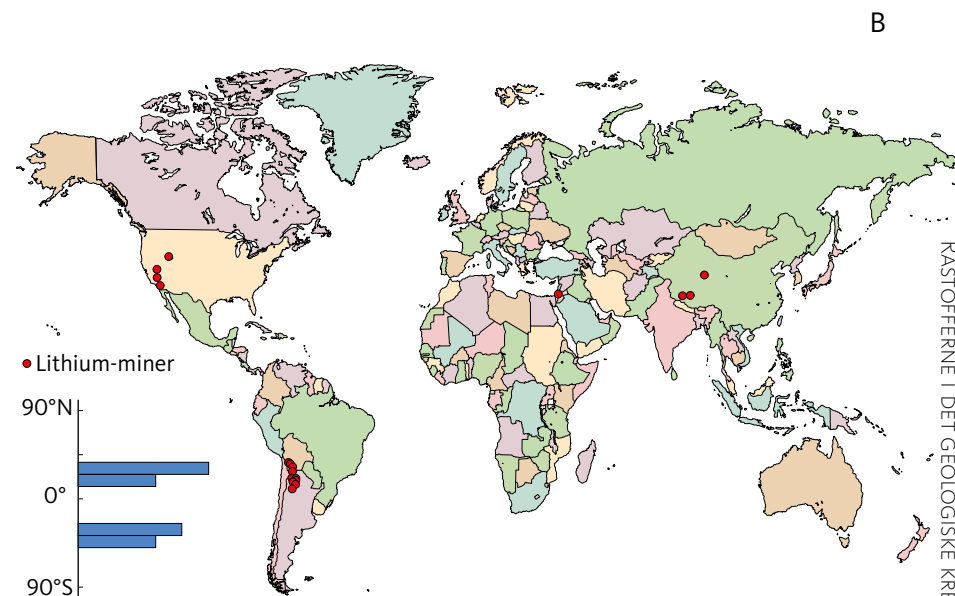
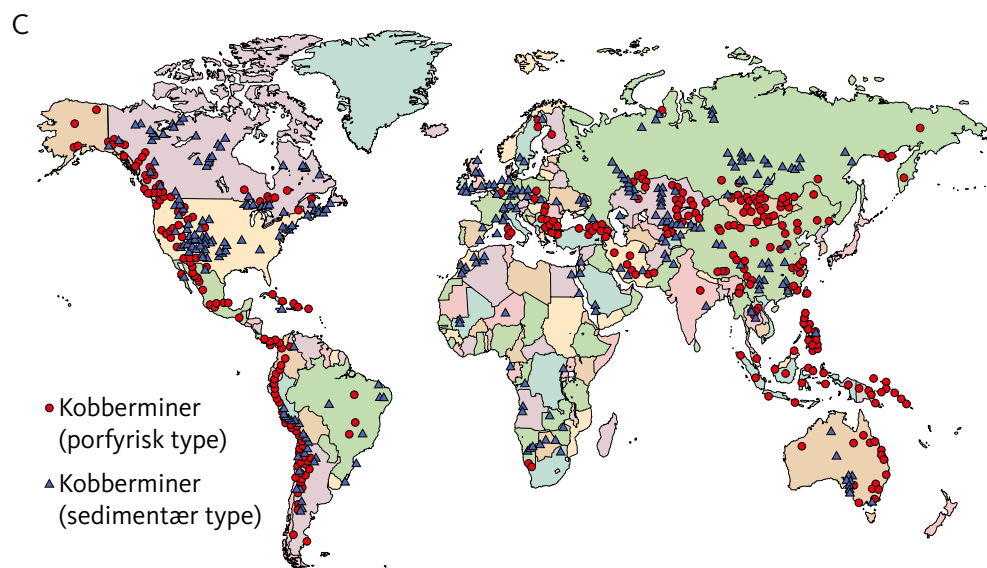
Lithium brydes både fra magmatiske forekomster, hvor det er pladetektoniske processer, der har bestemt placeringen, og fra inddampningssøer, hvor den rette lithiumri-



B. Forekomster af lithium fra ind-dampningssøer med søjlediagram der viser fordelingen i forhold til breddegrad. Efter Bradley et al. (2013).

FIGUR 170. Udvalgte grundstofforekomster.

A. Nikkel-lateritforekomster (gul) og magmatiske nikkelforekomster (rød). Efter Elias (2002).



C. Kobberforekomster i verden. De røde er porfyrforkomster, som dannes i forbindelse med subduktionszoner. Nogle af subduktionszonerne er aktive i dag, fx hele vestkysten af de amerikanske kontinenter. De porfyrforkomster, som findes hele vejen over Europa, Mellemøsten og Asien, skyldes en subduktionszone, som ikke længere er aktiv. Her lå engang Tethys-oceanet, som lukkedes for ca. 30 mio. år siden ved at subduktionszonen til sidst førte kontinenterne sammen i en kollision. ½Det er denne kollision som er skyld i den alpine bjergkædefoldning (inkluderer bl.a. Alperne og Himalaya). Efter USGS (2005).

ge geologi skal findes i et gunstigt klimatisk og landskabsmæssigt miljø (figur 170. b).

De fleste af de store forekomster af jern er dannet meget tidligt i Jordens historie, som kemiske sedimenter udfældet fra havvand i store kontinentale bassiner. Jernminer af denne type, de båndede jernformationer eller BIF, findes, hvor disse bjergarter fra Jordens tidligste historie er bevaret, som eksempelvis i Australien, Brasilien, Canada, Sverige og Grønland.

NØGLEBEGREBER

- Mineralforekomst
- Malmbjergart
- Magmatiske forekomster
- Hydrotermale forekomster
- Sedimentære forekomster
- Tungsandsforekomster
- Residualforekomster
- Kobbermalm
- Laterit
- Bauxit
- Inddampningssøer
- Jernmalm
- Geologisk miljø

REFERENCER

Bradley, D., Munk, L., Jochens, H., Hynek, S., & Labay, K. (2013). *A Preliminary Deposit Model for Lithium rines* (Nr. Open-File Report 2013–1006). Hentet fra <https://oneworldlithium.com/wp-content/uploads/2017/12/OF13-1006-USGS-lithium-model.pdf>

Elias, M. (2002). Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation. *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration*. CODES Special Publication, 4, 205–220.

Encyclopædia Britannica. (1999). Placer deposit. Hentet fra <https://www.britannica.com/science/placer-deposit>

Skinner, B. J., & Porter, S. C. (1987). *Physical Geology*. John Wiley & Sons.

Sørensen, H. (1989). *Råstoffer: Forekomst, forarbejdning, forbrug, forsyning i fremtiden*. Geografforlaget.

USGS. (2005). Major mineral deposits. Hentet fra <https://mrdata.usgs.gov/major-deposits/map-us.html>

KAPITEL 21



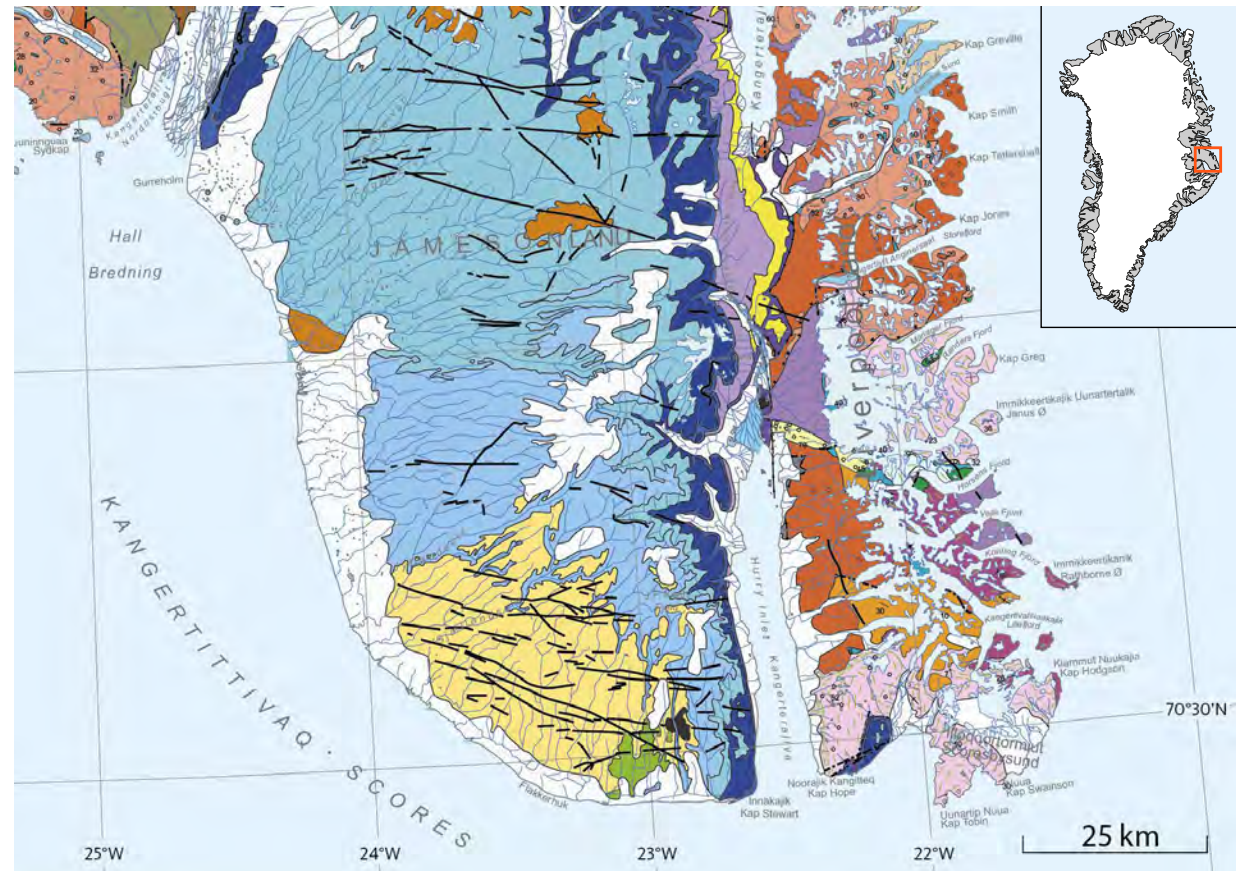
FIGUR 171. Geologisk kort fra 1920'erne.
Kompasset ligger henover et walisisk kulfelt.
Shutterstock.

DET GEOLOGISKE KORT

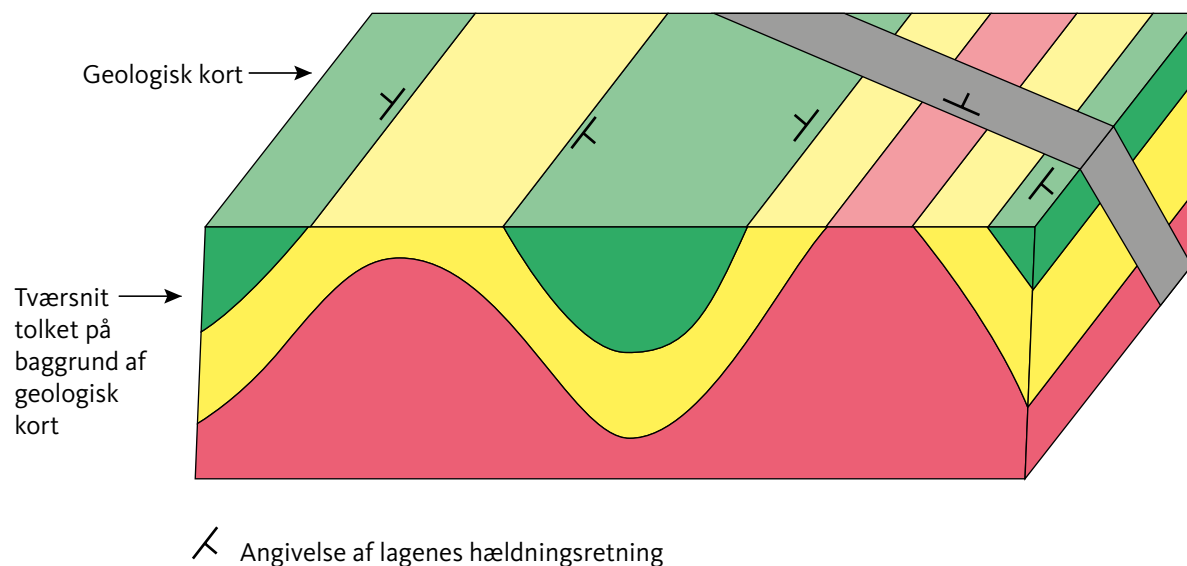
DET GEOLOGISKE KORT

Det geologiske kort er geologernes vigtigste værktøj og viser de bjergarter, som kan findes på den synlige del af jordoverfladen; hver bjergartsenhed er på kortet angivet med en farvekode (figur 172). Herudover har kortet signaturer, der viser, hvordan bjergarternes lag hælder, og hvor bjergarterne er blevet foldet eller forkastet under de tektoniske bevægelser. På den måde kan oplysningerne bruges til at tolke, hvordan bjergarterne sandsynligvis fortsætter under jordoverfladen.

Det geologiske kort er altså en todimensionel beskrivelse, men ved at læse kortet kan man få en idé om, hvordan bjergarterne opfører sig tredimensionelt. For at hjælpe forståelsen af det tredimensionelle på vej, kan man konstruere tværsnit gennem de dele af kortet, som har særlig interesse. Et tværsnit er et kig ned i jordskorpen, ligesom hvis man skar en skive ned igennem den (figur 173). Når et område kortlægges, laver geologerne en bjergartsbeskrivelse og en aldersbestemmelse ligesom de vigtigste strukturer beskrives.



FIGUR 172. Geologisk kort over Jameson Land og Liverpool Land i det centrale Østgrønland. På Liverpool Land (højre del af kortet) ses en kompleks geologi med ældre magmatiske og metamorfe bjergarter, der er foldet, forkastet og som i det hele taget er strukturelt komplekse. På Jameson Land (den overvejende blå del af kortet) er der derimod yngre sedimenter, som ligger pænt i horisontale lag. Man kan også se at sedimenterne er gennemskåret af yngre intrusioner i form af gangbjergarter (sorte streger på kort). Af Pedersen et al. (2013).



FIGUR 173. Model af geologisk kort med tilhørende tværsnit. Af MiMa (2019).

BJERGARTSBESKRIVELSE

Ved en bjergartsbeskrivelse beskrives de mineraler, bjergarten består af, og hvordan de er fordelt (figur 174). Mineralsammensætningen fortæller, om bjergarten er sedimentær, magmatisk eller metamorf; den kan også fortælle, om bjergarten indeholder mineraliseringer af fx et metal.

ALDERSBESTEMMELSE

Der er overordnet to metoder til at lave aldersbestemmelser i geologien, den absolutte

og den relative.

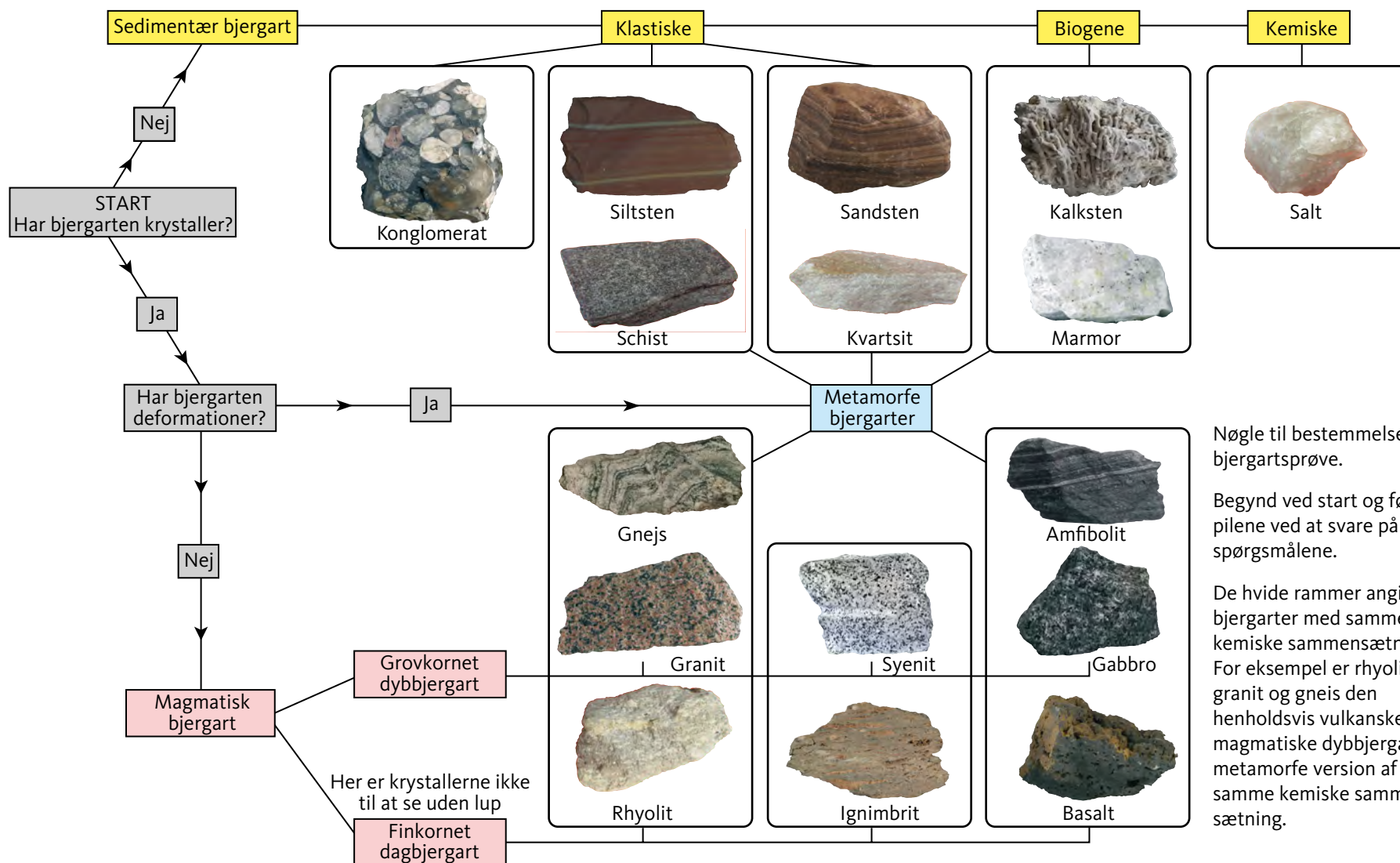
Absolut aldersbestemmelse

En absolut alder kan bestemmes ved hjælp af radiometrisk datering. Ved radiometrisk datering måler man et minerals indhold af et radioaktivt grundstof (moderisotop) og mængden af dets henfaldsprodukt (datterisotop) (figur 176). Ud fra forholdet mellem de to størrelser og kendskabet til grundstoffets henfaldstid kan man afgøre, hvor lang tid siden det er, at mineralet dannedes ved en afkøling af en smeltet bjergartsmasse. Absolut aldersdatering anvendes typisk på magmatiske og metamorfe bjergarter. Når man bruger absolut datering på sedimentære bjergarter giver det alderen på de bjergarter, der er forvitret, eroderet, transporteret og til sidst aflejret som sedimenter.

Relativ aldersbestemmelse

Den relative aldersbestemmelse giver ikke en egentlig alder, men angiver om en bjergart er yngre eller ældre end en anden bjergart. Relativ aldersdatering forekommer altså, når man studerer de geologiske lags indbyrdes fordeling. Hertil bruges en række principper.

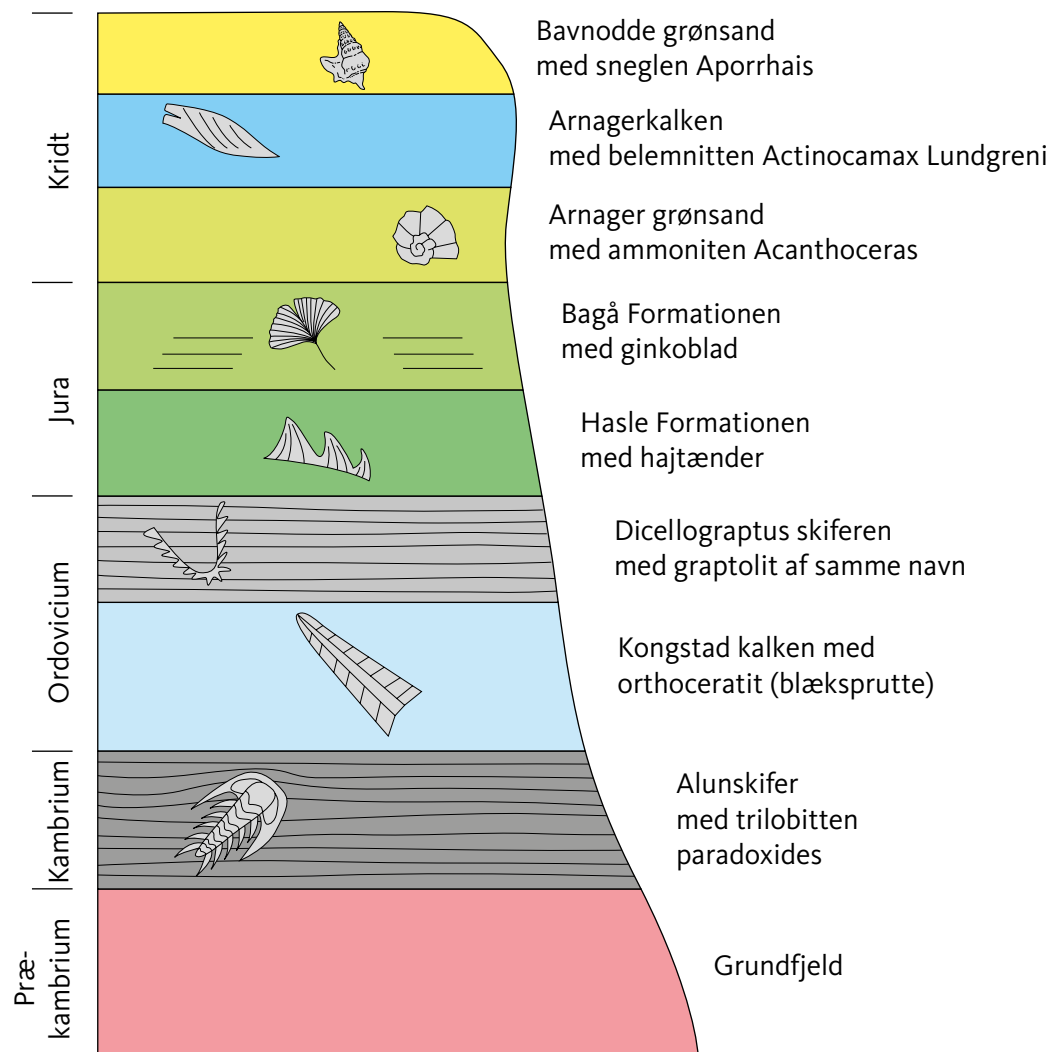
FIGUR 174. Nøgle til bjergartsbestemmelse. Eksempler på sedimentære, metamorfe og magmatiske bjergarter. Bjergarterne er inddelt i grupper med samme kemiske sammensætning. For eksempel er rhyolitten dagbjergarten, der svarer til dybbjergarten granit, som igen bliver en gnejs, hvis den undergår metamorfose; alle tre bjergarter har samme kemiske sammensætning, men forskellig dannelse og dermed udseende. På samme måde er den sedimentære kalksten grupperet med sin metamorfe udgave, marmoren. Af MiMa (2019).



Nøgle til bestemmelse af en bjergartsprøve.

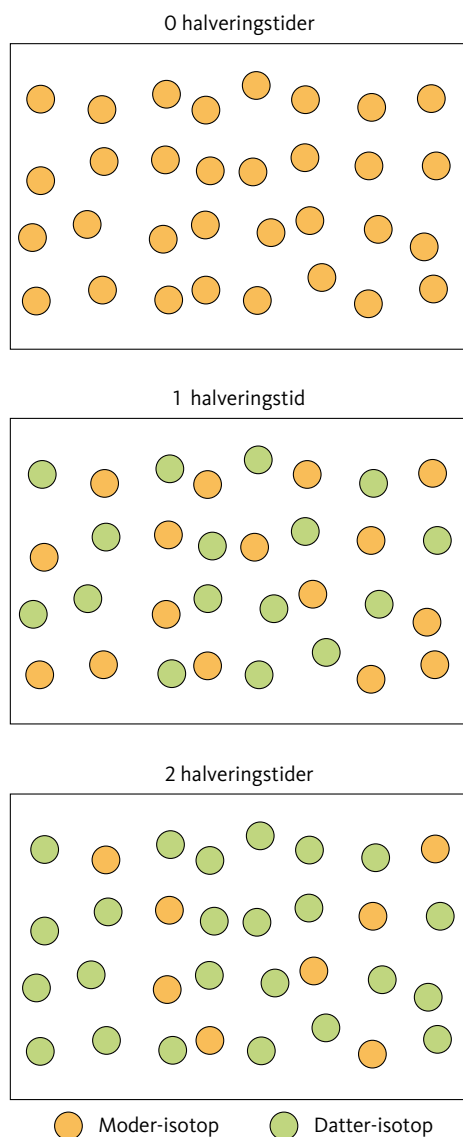
Begynd ved start og følg pilene ved at svare på spørgsmålene.

De hvide rammer angiver bjergarter med samme kemiske sammensætning. For eksempel er rhyolit, granit og gnejs den henholdsvis vulkanske, magmatiske dybbjergart og metamorfe version af samme kemiske sammensætning.



FIGUR 175. Udpluk af den bornholmske geologi sat sammen i en kronologisk korrekt, men ufuldstændig lagfølge, er et eksempel på, hvordan fossiler kan bruges til relativ datering, så en geologisk lagfølge kan sammenstilles. For eksempel kan det bestemmes, om man har fundet en blotning med alunskifer eller dicellograptusskifer ved at undersøge fossilindholdet. Efter Berthelsen et al. (1988).

FIGUR 176. Ved at måle indholdet af moder- og datterisotoper i et mineral, kan man ved hjælp af viden om isotopens halveringstid udregne mineralet og bjergartens alder. Af MiMa (2019).



Man kan fx bruge sedimenters fossilindhold til relativ aldersbestemmelse. Forskellige fossiler kendetegner bestemte tidsperioder og bestemte geologiske miljøer, og ved at beskrive fordelingen af dem i forhold til hinanden kan man bestemme, at den ene sedimentære bjergart er relativt ældre end den anden, men man kender ikke deres absolutte alder (figur 175).

Superpositionsprincippet

Et andet vigtigt princip i relativ aldersbestemmelse er superpositionsprincippet, som lyder:

Sedimentære lag vil være kronologisk ordnede, så de ældste ligger nederst og de yngste øverst, hvis der ikke senere er sket forstyrrelser.

Princippet kan sammenlignes med en lagkage, hvor man først lægger det nederste lag.

Skærende relationer

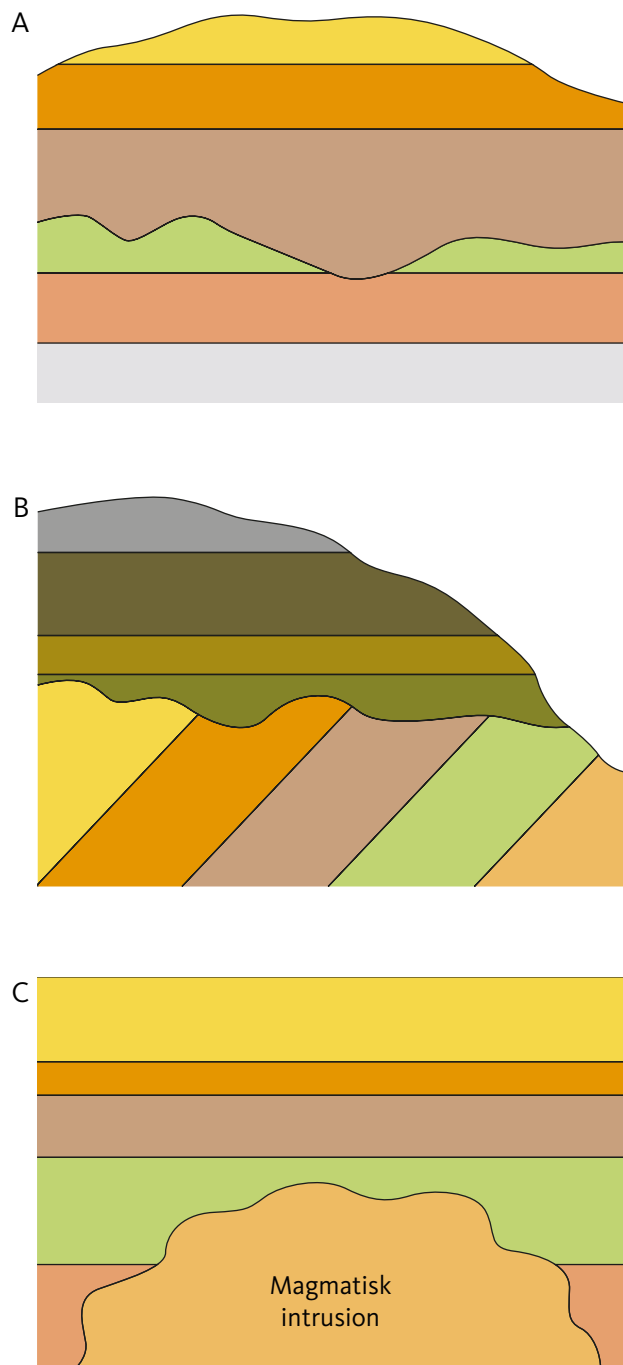
Skærende relationer angiver også en relativ alder. Man kan antage, at geologiske begivenheder, der skærer andre lag, må være yngre end disse.

For eksempel vil en vulkansk gang, der nedefra skærer sig op igennem jordskorpens lag,

være yngre end de lag, den skærer igennem. På samme måde vil de sedimenter, der aflejres på flodsengen i forbindelse med en flods løb være yngre end de bjergarter, som floden skærer igennem i en inkonformitet (figur 177. a). Som billede kan man igen bruge en lagkage; når nogen skærer et stykke af lagkagen ned gennem alle lagene, er skæringen sket til allersidst. I geologien ville sådan et snit være en forkastning, hvor hele lagpakken forskydes langs et plan.

Sedimentære lag aflejres med få undtagelser horisontalt, så lag, der hælder, må have været udsat for bevægelser i jordskorpens. Hvis der senere aflejres horisontale lag igen, kan man få en relativ alder af den begivenhed, der vippede de ældste lag, en vinkeldiskordans (figur 177. b).

Man kan også finde 'huller' i lagfølgen, hvor man kan se, at toppen af et lag er eroderet bort, hvorefter der igen er aflejringer ovenpå. Dette er tydeligst, hvis fx toppen af en struktur som en fold mangler. Dette kaldes en inkonformitet og er udtryk for, at der er manglet noget i lagfølgen. Men om det er et døgn eller 100 mio. år, må man afgøre ved hjælp af fossilindhold eller absolut aldersda-



FIGUR 177. Forskellige typer af skærende relationer.

A. Model af inkonformitet. På et tidspunkt, efter aflejring af det grønne lag, er der sket erosion og en ukendt mængde lag er borteroderet, hvorefter nye lag er aflejret oven på inkonformiteten, som altså er erosionsoverfladen.

B. Model af vinkeldiskordans. Her er fem lag aflejret (horisontalt), derefter har tektonisk aktivitet tiltet/vippet lagene, så de nu hældes. Herefter er overfladen eroderet, og der er sket ny aflejring, som ligger horisontalt. Vi kan ikke vide, hvor lang tid der er gået mellem aflejringen af de tiltede lag og aflejringen af de horisontale lag, men vi ved, der er foregået en større tektonisk begivenhed.

C. Model af nonkonformitet. Magmatiske bjergarter følger ikke superpositionsprincippet, og her har man fx en magmatisk intrusion, som man ved hjælp af skærende relationer kan afgøre, må være yngre end det grønne lag. Fordi intrusionen skærer det grønne lag, er det muligt den også er yngre end det gule lag, men det kan vi ikke vide.

Af MiMa (2019).

tering.

Alle disse principper gælder mest for sedimentære bjergarter, mens magmatiske bjergarter har en ganske anden natur, idet de kommer nedefra. Hvis en stor magmatisk intrusion bryder lagene, kaldes det en nonkonformitet (figur 177. c).

NATURHISTORISK METODE

Det aktualistiske princip er et andet grundlæggende princip i geologien, som går ud på, at de geologiske dannelser, der er sket i fortiden, er dannet af de samme processer, vi kan iagttage i dag. Det sker altså under antagelse af, at naturlovene er konstante og entydige. De landskabsformer, man kan se i forbindelse med de aktive gletsjere i dag, kan man antage blev skabt på tilsvarende måde i forbindelse med gletsjere i fortiden. Eller hvis du finder en 1 mia. år gammel sandsten med bølgeribber (den typiske form du ser i sandet på lavt vand, når du bader ved en strand), kan man antage, at der på aflejringstidspunktet var lavt vand med bølgeaktivitet (figur 178. c).

Man bruger altså de former, man kan genkende til at tolke de processer, som må have

FIGUR 178. Elementer til det geologiske kort.

A. Vinkeldiskordans i naturen. Hammeren er placeret lige over grænsen mellem lag, der hælder ned mod højre (nederst), og lag der hælder svagt mod venstre (øverst).

B. Horisontale lag af sandsten, som skæres på tværs af lagdelingen af et konglomerat. Et konglomerat er en sedimentær bjergart med blokke (de afrundede sten der ses på billedet) med mere finkornede sedimenter i mellem blokkene, altså en blanding af flere kornstørrelser. Konglomeratet er typisk aflejret i en flod, da det kræver stor energi at flytte de store blokke. Så her ser man altså aflejringerne af en flod, der har skåret sig ned i lag af sandsten, og i floden er der aflejret et konglomerat.

C. Proterozoiske sandsten i Diskobugten, Vestgrønland. I midten af billedet ses to flader med bølgeribber, som er dannet i kystzonen for omtrent 2 mia. år siden. Dette fortæller noget om, hvilket miljø der var på dette sted i fortiden.

D. Overførsel af dagens kortlægning til feltkortet. Her er kortlægningen udført på satellitbilleder, mens det overføres til et topografisk kort.

Fotos af Matilde Rink Jørgensen.

A



B



C



D



dannet disse former. Nogle undtagelser til det aktualistiske princip er, at det var markant varmere i Jordens tidlige liv, hvilket bevirkede, at vulkanismen var anderledes. En anden undtagelse er, at der ikke fandtes ilt, før planterne dannedes og lavede fotosyntese, og derfor var mange geologiske og biologiske processer anderledes i den geologiske periode, vi kalder prækambrium (fra Jordens dannelse for 4,6 mia. år siden til 542 mio. før nu). Vi bruger det aktualistiske princip sammen med superpositionsprincippet og kriterierne for relativ datering til at skrive naturhistorien, altså Jordens historie. Hvilke miljøer herskede i fortiden, hvilke dyr levede, og hvilket klima var der, er alt sammen information, som må hentes i de geologiske lag i jordskorpen. Gennem utallige studier har man sammensat den geologiske tidsskala, arternes udviklingshistorie og palæotektoniske kort.

Man kan altså på basis af bjergarternes indbyrdes relationer genskabe et hændelsesforløb og afgøre, om noget mangler i hændelsesforløbet. På basis af former og strukturer i bjergarterne kan man ved hjælp af det aktualistiske princip redegøre for bjergarternes dannelsesmiljø. Alt dette beskrev

den danske videnskabsmand Niels Steensen (eller på latin Steno) i 1600-tallet, som en af de første.

Strukturer og geologisk miljø.

Alle bjergarter har en geologisk historie at fortælle. Ved at studere de enkelte bjergarter i detaljen og sammenholde deres indbyrdes relationer, kan man på baggrund af bjergartens mineraler, fossiler og strukturer rekonstruere denne historie. For de sedimentære bjergarter vil indholdet af fossiler og sediment i forskellige kornstørrelser fortælle om, hvorvidt bjergarten engang var havbund i dybhavet, lå på bunden af en hurtigt strømmende flod eller måske var en del af et frodigt koralrev. De magmatiske og metamorfe bjergarter kan fortælle, om de er dannet som sure eller basiske bjergartssmelter, om der er sket en gradvis eller hurtig afkøling af disse, om der har været bjergkædefoldninger eller voldsomme jordskælv. På det geologiske kort vil alle disse observationer fremgå med forskellige farver og signaturer, så den der læser kortet selv kan være med til at rekonstruere den geologiske historie uden nødvendigvis at besøge lokaliteterne.

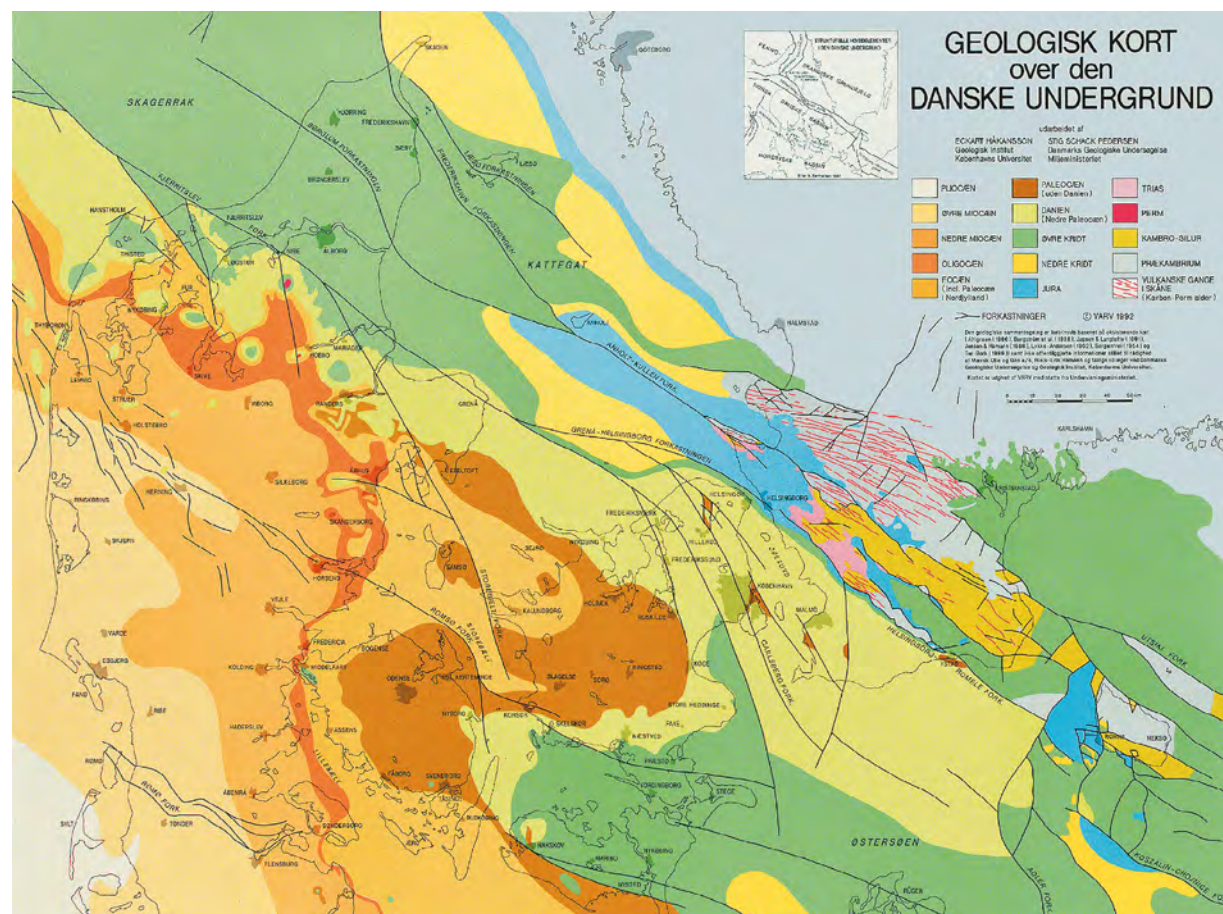
Historisk set var geologisk kortlægning en

fagdisciplin, hvor geologerne måtte betræde al den jord, der skulle kortlægges. Den teknologiske udvikling har betydet, at der er kommet mange hjælpemidler til. Specielt bruges nu luftfotos (figur 178. d) som led i kortlægningen, hvorved større områder hurtigere kan dækkes. Også geofysiske metoder og satellitdata er vigtige redskaber i kortlægningen. Disse hjælpemidler bruges i vekselvirkning med observationer på jorden. Inden geologerne tager i felten, tegner de grænsen mellem to bjergarter ved hjælp af deres udseende på satellitfoto. Når geologerne besøger lokaliteten, tjekker de, om deres observationer på satellitbilleder stemmer med, hvad de kan se i felten. Hvis det ikke stemmer, må de justere kortet.

Et andet redskab er geofysiske undersøgelser, hvoraf der findes mange varianter, men grundlæggende handler det om at måle nogle fysiske egenskaber ved bjergarterne, fx om bjergarterne er magnetiske, om de har elektrisk ledningsevne, deres densitet eller hvilke bølgelængder af lys, mineralerne udsender/reflekterer. Nogle bjergarter indeholder magnetiske mineraler, som kan måles fra fly i en såkaldt aeromagnetisk undersøgelse. En anden metode er satellitbilleder, hvor man

optager andre bølgelængder end de synlige og kan lave såkaldte false-colour images, fordi forskellige mineraler udsender forskellige bølger, som kan registreres af særlige kameraer. På disse optagelser er det altså ikke synligt lys der optages, men bølgelængder det menneskelige øje ikke kan se. Når vi skal se på false-color images vælger geofysikeren at indsætte en farve for den optagne bølgelængde, der altså er en falsk farve. De forskellige geofysiske metoder kan være til stor hjælp ved geologisk kortlægning.

Der er meget stor forskel på, hvor vanskeligt det er at lave geologisk kortlægning, alt efter hvor i verden man arbejder. Mange steder dækker vegetation og jordlag for de geologiske lag. I Danmark har istiderne lagt en stor dyne af meget unge sedimenter (sand, grus og sten) over den ældre geologi, så de faste bjergarter, der ligger nedenunder, ikke kan ses. I sådanne regioner bliver geofysiske data, geologiske tolkninger og måske endda borerer meget vigtige. I Danmark har man sørget for, at alle, der laver en boring til fx vandindvinding, skal indberette, hvilke bjergarter de finder i boringen. Derfor har vi i Danmark et enestående arkiv over Danmarks undergrund, som gør det muligt at



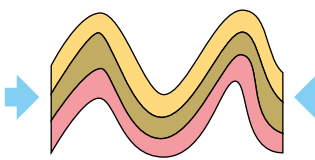
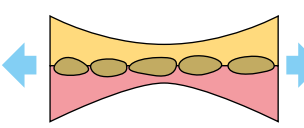
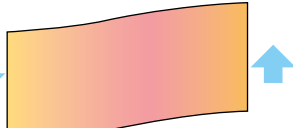
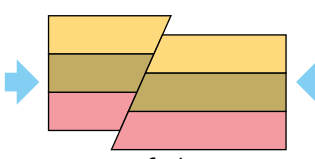
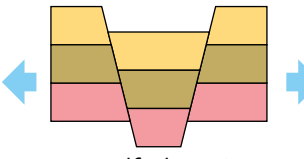
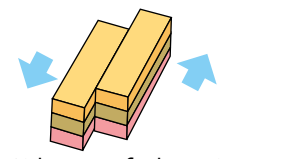
FIGUR 179. Geologisk kort over Danmarks undergrund eller det, man kalder den prækvartære overflade. Det er altså sådan overfladen ville være sammensat, hvis man kunne skrælle alle istidssedimenterne af. Af Pedersen (1992).

lave et præcist kort over Danmarks prækvartære geologi (figur 179), dvs. et kort over, hvordan Danmark så ud før kvartærtiden. Det er muligt at gå på opdagelse på GEUS' hjemmeside og se flere detaljer over både jordarterne i overfladen og bjergarterne i dybden. I Grønland, hvor vegetationen er sparsom, kan bjergarterne følges over meget store områder. Det gør det betydeligt lettere at lave geologiske kort.

STRUKTURER PÅ DET GEOLOGISKE KORT

Som tidligere nævnt kan man angive bjergarternes tredimensionelle strukturer på et geologisk kort. En af disse strukturer er forkastninger (figur 180).

En forkastning er en brudzone i jordskorpen, hvor to eller flere blokke forskydes i forhold til hinanden. Forkastningerne opstår på grund af pladetektoniske bevægelser. Ved forkastningen sker der et brud på bjergarterne i den sprøde, øverste del af jordskorpen, hvilket vil fremgå på et geologisk kort. Nogle gange ses det som en særlig signatur, andre gange vil det fremgå på kortet, fordi to forskellige bjergarter, der måske har to helt forskellige aldre eller mineralsammensætninger, forekommer ved siden af hinanden

	Sammenpresning/ kompression (set fra siden)	Strækning/ ekstension (set fra siden)	Sideværts bevægelse/ transform deformation (set ovenfra og 3D)
Plastisk deformation	 Folder	 Udtynding m. boudinering	 Shear
Sprød deformation	 Revers forkastning	 Normalforkastning	 Sideværts forkastning

langs en linje. Så ved geologen, at her har forskydninger i jordskorpen ført til forkastningen af bjergarterne.

Normalforkastninger forekommer i ekstensionelle miljøer, dvs. et sted hvor jordskorpen udtyndes og rives fra hinanden. Normalforkastninger ses oftest ved en konstruktiv pladegrænse eller en riftzone, hvor en plade slår sprækker, når den strækkes midt over.

Reverse forkastninger eller overskydninger forekommer i kompressionelle miljøer, dvs. steder hvor jordskorpen sammenpresses, og der sker en fortykkelse af skorpen. Det vil

FIGUR 180. Oversigt over deformationer i henholdsvis den dybe skorpe, hvor varmen gør, at bjergarter er plastiske og i den øvre skorpe, hvor bjergarterne er sprøde. Deformationens retning afgør sammen med sprødheden/plasticiteten af bjergarten, hvilken struktur der dannes. Af MiMa (2019) efter Press et al. (2004).

typisk være ved en destruktiv pladegrænse, dvs. hvor to plader kolliderer.

Sideværtsforkastninger forekommer typisk i bevarende pladegrænser, hvor to plader bevæger sig langs hinanden, og forrykkelsen sker i det horisontale plan.

NØGLEBEGREBER

- Bjergartsbeskrivelse
- Relativ alder
- Absolut alder
- Naturhistoriske metoder
- Superpositionsprincippet
- Det aktualistiske princip
- Fossiler
- Geologisk miljø
- Strukturgeologi
- Deformation
- Forkastning
- Geofysik

REFERENCER

- Berthelsen, A., Sjørring, S., Nielsen, A. T., & Hamann, N. E. (1988). Bornholms geologi I. *Varv*, (II), 34–80.
- Henriksen, N. (2005). *Grønlands geologiske udvikling - fra urtid til nutid*. GEUS.
- Pedersen, M., Weng, W. L., Keulen, N., & Kokfelt, T. F. (2013). A new seamless digital 1: 500 000 scale geological map of Greenland. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, (28), 65–68.
- Pedersen, S. S. (1992). Et nyt undergrunds-kort. *Varv*, (II), 60–63.
- Press, F., Siever, R., Grotzinger, J., & Jordan, T. H. (2004). *Understanding earth*. Macmillan.

KAPITEL 22



FIGUR 181. Detaljeret prøvetagning af mineraliseret zone. Zonen har tydeligvis jernsulfider, som i overfladen er omdannet til rustmineraller og svovl (lysegul farve), men måske også andre metaller? Foto af Guy Della Valle.

MINERALEFTERFORSKNING

MINERALEFTERFORSKNING

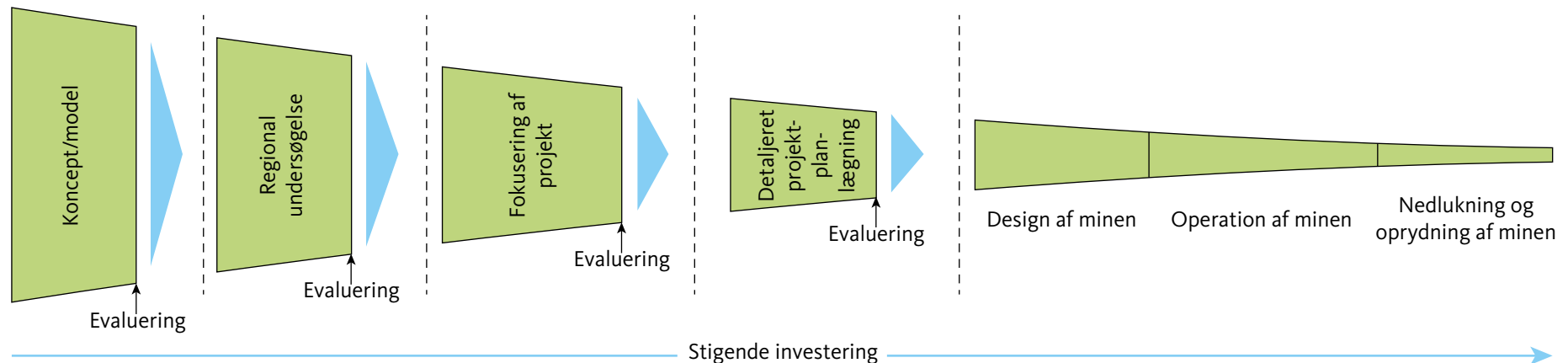
Mineralefterforskning er geologiske undersøgelser, som har til formål at lokalisere mineralske råstoffer, som findes i tilstrækkelige mængder til, at det vil være økonomisk rentabelt at udvinde dem i en mine. Tidligere miner har ofte udvundet de forekomster, som var lette at finde og bryde, fordi de lå tæt på eller i overfladen. Efterhånden som disse let tilgængelige forekomster er ved at være brugt op, er det nødvendigt at finde forekomster, som er sværere tilgængelige, fx i Arktis eller forekomster som befinder sig dybt under jordoverfladen. Derfor er de fore-

komster, der skal blive til nye miner, sværere at finde og kræver nye innovative efterforskningsmetoder.

Mineralefterforskning er en proces, som foregår trinvist, og hvor hvert trin kræver større og større investeringer. Derfor evalueres der efter hvert trin, om der er tilstrækkeligt med positive indikationer på en økonomisk interessant forekomst, inden mineselskabet beslutter at fortsætte eller stoppe (figur 182). Som led i sådanne vurderinger forsøger mineselskaberne at beregne, hvor store mængder der er af de mineraler, de leder efter, det opgøres både i volumen

og masse, og kvaliteten omtales som lødighed. Lødigheden er et mål for, hvor mange procent af råstoffet/metallet, der er i 1 ton af bjergarten.

Et efterforskningsprojekt starter med, at en geolog, almindeligvis fra et mineselskab eller et af de selskaber der er specialiseret i den tidlige mineralefterforskning, får en idé om, at et bestemt mineral kunne være opkoncentreret i et givent område. Denne idé kan være kommet på grund af geologens viden om, hvilke råstoffer der er knyttet til bestemte geologiske miljøer, eller måske har man geofysiske eller geokemiske data, som peger



FIGUR 182. Fra idé til mine. Der ligger en lang række trin før en mine kan åbne. Hvert trin er mere og mere kostbart, og der er mange steder projektet kan lukkes ned undervejs. Af MiMa (2019).

FIGUR 184. Efterforskning i billeder.

A. Nogle gange får man brug for at tage store prøver. Så må man få det nødvendige udstyr fragtet ud; her til en lille ø i Diskobugten i Vestgrønland.

B. Prøvetagning af bæksediment.

C. Jordprøvetagning.

D. Tydelige tegn på kobbermineralisering. Mineralerne azurit (blå) og malakit (grøn) dannes, når kobber udsættes for vejr og vind. Geologen skal nu finde ud af, hvor kilden til bjergarterne i bækken er.

E. Undersøgelser med transportabel XRF, som ved hjælp af røntgenstråling kan måle, hvilke grundstoffer en bjergart indeholder. Kobberef-terforskning i Nordøstgrønland.

F. Geoelektrisk undersøgelse fra helikopter.

Fotos A, C, D og E af Matilde Rink Jørgensen, B af Tim Rödel og F af SkyTEM (u.å.).



geologer ofte være til stede i det interessante område for at indsamle data, prøvetage og vurdere bjergarterne. Måske arbejder de videre på de eksisterende geologiske kort og tilføjer nye detaljer (figur 183). Nu kan selskabet igen vurdere, om projektet stadig ser lovende ud. Det næste trin kan være, at selskabet vælger at foretage borer, så de kan tjekke, om deres modeller over undergrunden er rigtige. De kan få prøver af mineralerne til undersøgelse, og borerne kan også bruges til at give geologerne en idé om, hvor stort et mineraliseret legeme (tredimensionelt område), der er tale om. Hvis resultaterne stadig er positive, vil der skulle laves et endnu tættere netværk af borehuller, så man kan lave en egentlig tredimensionel model af det mineraliserede legeme. Det gælder om at tage tilstrækkeligt mange og store prøver til at få et præcist billede af, hvor høj lødigheden i malmen er, dvs. hvor meget metal, der findes pr. ton malm (figur 184. a).

Hvis geologerne har været heldige og er nået frem til, at der er en stor mineralforekomst med en høj lødighed, træder mineingeniørerne til. De beregner, hvordan man bedst bryder malmen: Skal det være i en åben eller en underjordisk mine? Hvordan

skal mineralerne komme ud af bjergarten, og hvordan trækkes grundstofferne ud af disse mineraler? Hvor mange år vil det tage at bryde malmen? Når disse forhold er afklaret, beregner økonomer, om det kan betale sig at etablere minen. Hvis mineselskabets beregninger viser, at det vil være økonomisk rentabelt at etablere en mine, vil ressourcen tilhøre gruppen af påviste og økonomiske ressourcer, også kaldet reserven. Hvis beregninger viser, at det ikke vil være muligt at drive minen med økonomisk overskud, vil ressourcen tilhøre kategorien påvist ressource, som er ikke-økonomisk. Denne type projekter vil ofte genoptages senere, hvis prisen på råstoffet stiger, eller man har fået nye idéer til, hvordan man kan videreudvikle projektet.

Hvert trin i processen kræver stadig større investeringer, og efterforskningsselskabet vil som regel skulle bruge meget energi på at overbevise investorer om værdien af deres projekt, før man går videre til næste trin i projektet. Langt de fleste projekter må lukkes ned et sted mellem idé og mine, da det ofte viser sig, at forudsætningerne for at åbne en mine ikke er til stede. For at en produktion går i gang, skal følgende være

opfyldt:

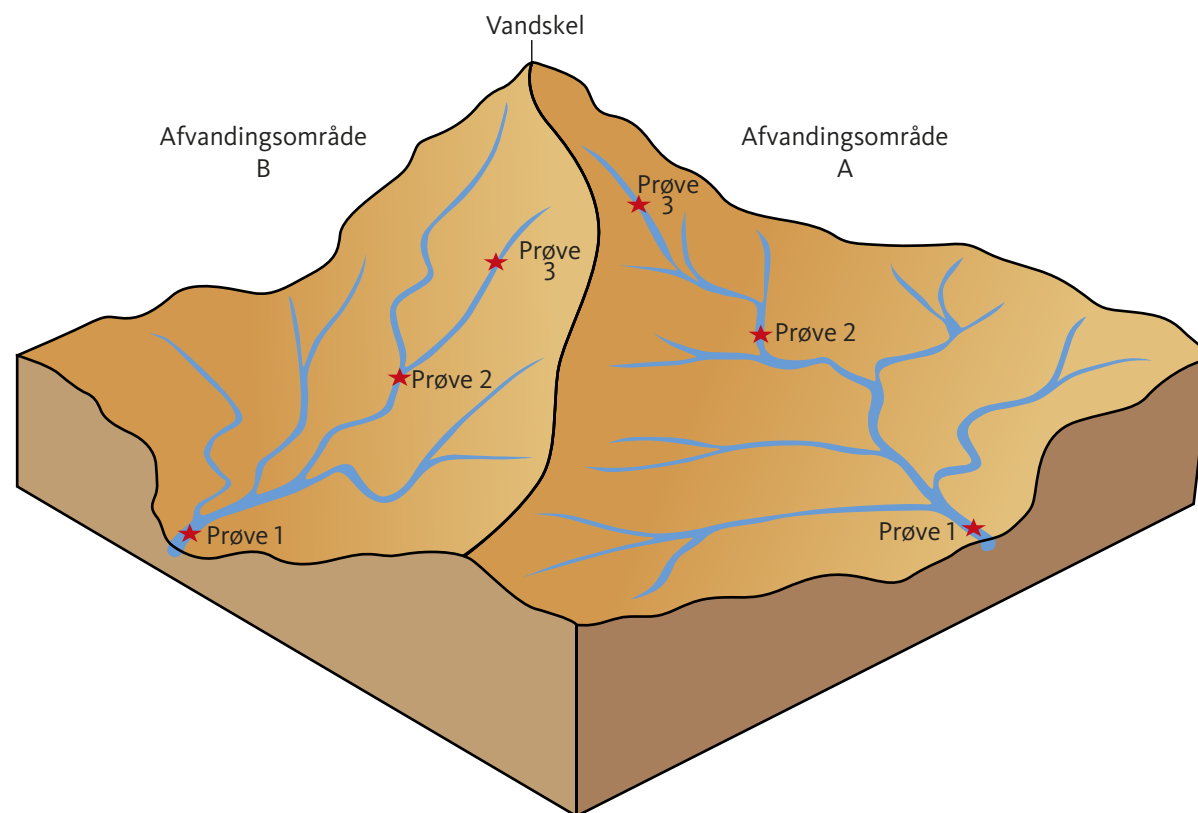
1. Malmreserven skal være tilstrækkelig stor, til at mineselskabet vil kunne tjene nok penge til at dække omkostningerne til at anlægge minen og til at give investorerne forrentning af deres investering.
2. Det skal være teknologisk muligt og økonomisk rentabelt at bryde og opkoncentrere det ønskede mineral.
3. Offentlige myndigheder skal have godkendt mineselskabets produktionsplaner, udstedt tilladelse til at bryde malmen (minelicens), givet miljøgodkendelser, godkendt nedlukningsplan mv.
4. Der skal være investorer, som vil finansiere opbygningen af minen og infrastrukturen (ofte milliardinvesteringer).
5. Mineselskabet skal have vished for, at der er aftagere til deres mineralkoncentrater.
6. Licenser med aftaler mellem myndigheder og mineselskaber om udnyttelse af mineralressourcer.

Efterforskningsselskaber eller mineselskaber må kun foretage deres undersøgelser i felten med myndighedernes tilladelse. Sådanne til-

ladelser, eller licenser, regulerer både rettigheder og selskabets forpligtelser. Licenserne er en slags gensidig overenskomst mellem ejeren af jorden, ofte staten, på den ene side, og investoren, selskabet, på den anden side. Overenskomsten vil altid indeholde formuleringer om, at selskabet har eneret til området, og at ejeren får del i overskuddet, hvis der bliver etableret en mine. Herudover indgår krav i forhold til miljø og til relationer med det omgivende samfund. Der kan fx være krav om, at minen skal bruge lokal arbejdskraft. Inden et selskab får endelig godkendelse til at etablere en mine, gennemgår myndighederne dets planer for, hvordan minen skal udformes, hvordan tailings (restprodukter) skal håndteres, hvordan malmen skal udskibes m.m. Lovgivningen på området varierer fra land til land.

GEOKEMISKE EFTERFORSKNINGSMETODER

En klassisk metode til at finde områder af særlig interesse for efterforskning er systematisk prøvetagning af sedimenter i vandløb, der afvander et stort område, og derefter lave en geokemisk analyse af indholdet af forskellige grundstoffer. Princippet er, at ethvert vandløb afvander et såkaldt



FIGUR 185. Bæksedimenter samles langs vandløb, jo længere opstrøms man finder en anomali af et mineral, jo tættere er man på kilden til mineralet. Af MiMa (2019).

afvandingsområde, som er afgrænset af et vandskel (figur 185). Alt det overfladeafløb, som sker i et givent vandskel vil ende i et vandløb. Vandet fører de mineraler, der er eroderet fri af bjergarterne i området, med sig, og dermed kan mineraler fra eventuelle mineraliseringer findes i et vandløb.

Geologerne vil gå efter mineraler med høj densitet, fx guld, som vil have en tendens til at ophobe sig i områder med lavere energi i vandløbet.

Efterhånden som de instrumenter, der bruges til kemiske analyser af geologiske prøver,

bliver bedre og bedre, kan selv meget små koncentrationer af et grundstof registreres. Det har ført til, at geologer ikke kun ser på geologisk materiale, men også på fx plante-materiale i et område. Planterne vil have optaget små mængder af ioner fra eventuelle mineralforekomster, og analyser af planterne vil så kunne udpege anomalier. Anomalier er områder, der er udenfor det normale og vil i dette tilfælde bruges om områder med forhøjet indhold af det metal, som der ledes efter. I Canada har efterforskningsselskabers geologer fx fløjet rundt i helikopter og taget prøver af toppen af høje grantræer og målt guldindholdet i disse. Andre metoder kan måle meget små koncentrationer af metalioner fra malmforekomster, der ligger flere kilometer nede i jorden. Denne metode bygger på, at metaller danner ioner, som på grund af deres elektriske ladninger langsomt vandrer gennem jordlagene, der er meget svagt bundet til mineralkornene i overfladen. Hvis prøver taget i overfladen vaskes med en svag syre, kan indholdet af disse metalioner måles med fintfølende instrumenter og eventuelt indikere, om der kan være dybtliggende mineralforekomster (figur 184. e).

GEOFYSISKE METODER

Geofysiske metoder bruges til at se ned i undergrunden med instrumenter, som kan måle fysiske egenskaber ved bjergarter. Metoderne magnetik, elektrisk ledningsevne, densitet, seismik og remote sensing er nogle af metoderne.

Mange geofysiske undersøgelser kan laves regionalt fra fly eller helikopter (figur 184. f). På denne måde kan man få et overblik og se nogle trends (figur 187). Skal undersøgelserne være mere detaljerede, er det nødvendigt at lave de geofysiske undersøgelser fra land-jorden (figur 186. a).

Geofysiske resultater afbildes som regel på kort, så informationer kan sammenholdes med topografi, geologi og tilstedeværelsen af fx bygninger eller andre menneskeskabte konstruktioner, som kan påvirke resultaterne. Ud fra geofysiske kort kan dygtige geofysikere fx aflæse, om der findes forkastninger eller lag i undergrunden (figur 187).

MAGNETISKE UNDERSØGELSER

Der findes en række almindelige mineraler (de fleste er jernholdige, fx magnetit), som

er magnetiske, hvilket man med særlige instrumenter kan måle i ned til 10 km's dybde. Ved en magnetisk kortlægning måles variationer i bjergarternes magnetik. Til større regionale undersøgelser monteres instrumentet på et fly eller en helikopter, som overflyver et område i tætte linjer, hvorefter data kan sammenstilles til et kort, der viser anomalier i magnetisk intensitet. Et magnetisk kort kan afsløre tilstedeværelsen af jernmineraler (figur 187) og nikkel, samt nogle af de bjergarter der kan indeholde diamanter. Magnetiske data kan også vise, om der er en forkastning, som adskiller to bjergarter med forskellig magnetik fra hinanden langs en skarp linje.

GEOELEKTRISKE UNDERSØGELSER

Ved en geoelektrisk undersøgelse måles bjergarternes elektriske modstand. Forskellige mineraler har forskellig evne til at lede elektricitet, men der er også stor variation i ledningsevnen afhængigt af krystalstrukturen, om bjergarten er meget porøs, eller om den er opbrudt. Men generelt kan man sige, at en bjergart med et højt indhold af metal-liske mineraler vil have mindre modstand end de fleste andre bjergarter. En af egenskaberne ved metaller er, at de er elektrisk

FIGUR 186. Boring i billeder.

A. Geofysiker laver magnetiske undersøgelser over et område som skal bores. Personen går med instrumentet hen over det interessante område. Denne viden bruges til at bestemme, hvor der skal bores.

B. Borekerne af diamantholdig lamprofyr tages ud af borerøret. Undersøgelse af en diamantforekomst på øen Qeqertaa i Diskobugten, Vestgrønland.

C. Boremaskine, som borer kerner ud af undergrunden, er ved at gøre klar til at hejse borerøret ned i hullet.

D. Borekerner er lagt op og er klar til at geologerne kan beskrive dem og udtage prøver til kemiske analyser.

E. Kerner, der skal analyseres, skæres over på langs i en stensav. Den ene del sendes til laboratoriet, hvor den analyseres, mens den anden del bevares, så geologerne altid kan tjekke borekernen.

Fotos A af Guy Della Valle, B-E af Matilde Rink Jørgensen.



ledende, men når de indgår i mineraler med andre stoffer, vil de ikke altid bevare denne egenskab.

Geoelektriske undersøgelser er også hyppigt brugt til at finde grundvand, da en bjergart med porerum fulde af vand vil lede elektricitet bedre, end når der er luft i porerummene.

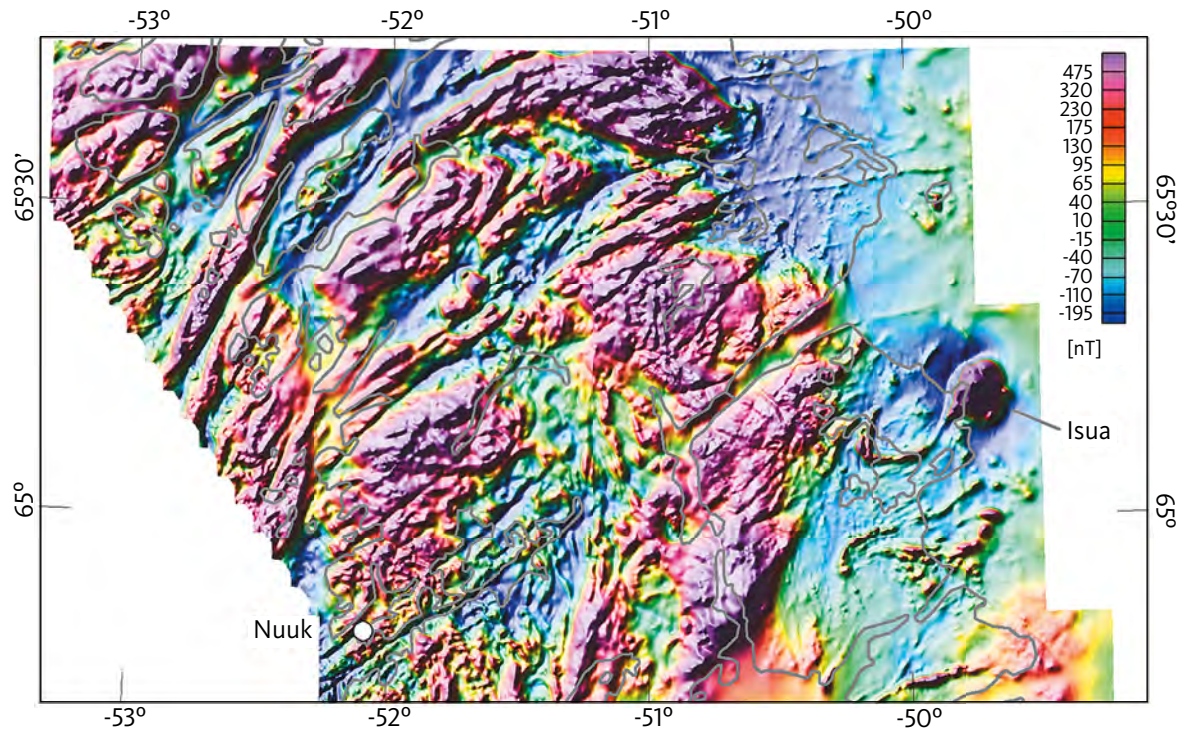
GRAVIMETRISKE UNDERSØGELSER

Alle masser har en tiltrækningskraft på andre masser, det vi kalder gravitation. Jo større masse, desto større gravitation. Det betyder, at bjergartslegemer med en høj densitet vil have en smule større gravitation end bjergarter med en lav densitet. Metal-liske malmbjergarter har ofte en ganske høj densitet, og man kan derfor måle deres tilstedeværelse ved hjælp af gravitation, også selvom de ligger ganske dybt i jordskorpen.

Når man foretager gravimetrisk undersøgelse, måles den relative gravitation i et område. Det gøres ved at måle, hvor meget gravitationen hvier i et lod på en lille fjeder. Gravitationen eller det, der i fysik kaldes tyngdeaccelerationen, er ved Danmarks overflade $9,82 \text{ m/s}^2$, og det, man kan måle i en gravimetrisk undersøgelse, er som oftest

variationer på sjette decimal.

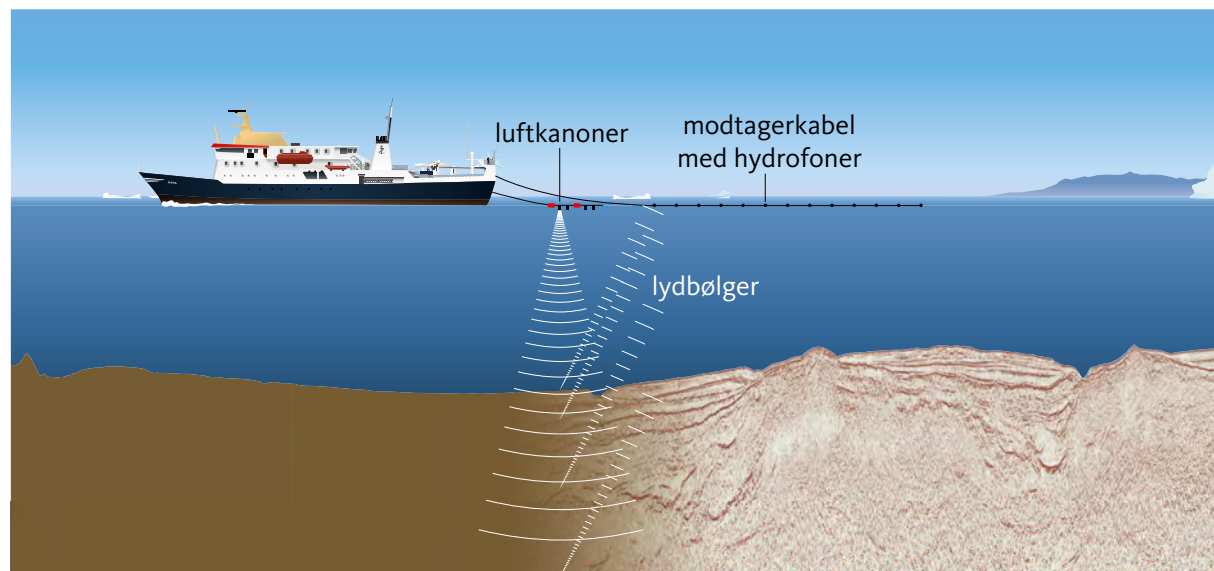
I Nordjylland findes der i undergrunden store legemer af salt, såkaldte saltdiapirer. Salt har en væsentlig lavere densitet end den gennemsnitlige densitet af jordskorpen, og gravitationen er derfor mindre over disse ca. 15 saltdiapirer.



FIGUR 187. Magnetisk kort. Data er indsamlet fra fly over Nuuk-området i Vestgrønland. Den bandede jernformation ved Isua står klart frem som en kraftig anomalie. Af Rasmussen (2013).

SEISMISKE UNDERSØGELSER

Seismik er et andet vigtigt værktøj til at kortlægge, hvad undergrunden består af. Metoden er meget udbredt i olieefterforskning, hvor olieselskaberne ønsker at kortlægge sedimentære lag, der ligger dybt i undergrunden. Men seismik er også hyppigt brugt i mineralefterforskning. Metoden går ud på, at man sender chokbølger, fx fra sprængladninger, ned i jorden, og jo større chok, desto dybere kan bølgerne rejse. Når bølgerne møder en grænse mellem lag af forskellig hårdhed, vil en fraktion af dem refrakteres (ændre retning), og med seismofoner vil man på overfladen kunne måle de refrakterede bølger (**figur 188**). Ved at måle tiden fra affyringen af chokbølgen til bølgens ankomst til overfladen, vil man kunne udregne dybden til de forskellige laggrænser. Jo mere viden, der er om de bjergarter bølgerne har rejst igennem, jo bedre kan dybden beregnes. Det er også ved hjælp af seismik, at Jordens indre er kortlagt. Undersøgelser af jordskælvsbølger, og hvordan de afbøjes og reflekteres, har vist, at Jorden er opdelt i en indre fast kerne, en ydre flydende kerne, en plastisk kappe og den faste skorpe.



REMOTE SENSING-UNDERSØGELSER

Remote sensing er et udtryk, som bliver brugt om alle mulige former for dataoptagelse, hvor man fra fly eller satellit kan måle reflekteret og udsendt stråling. Modsat de andre geofysiske metoder måler denne metode ikke ned i undergrunden men på jordoverfladen. I mineralefterforskning laves optagelser af jordoverfladen typisk fra enten fly eller satellit. De kameraer, som man anvender, kan optage andre bølgelængder end de synlige, og dermed kan man lokalisere ting, som ikke kan ses med det blotte øje. For

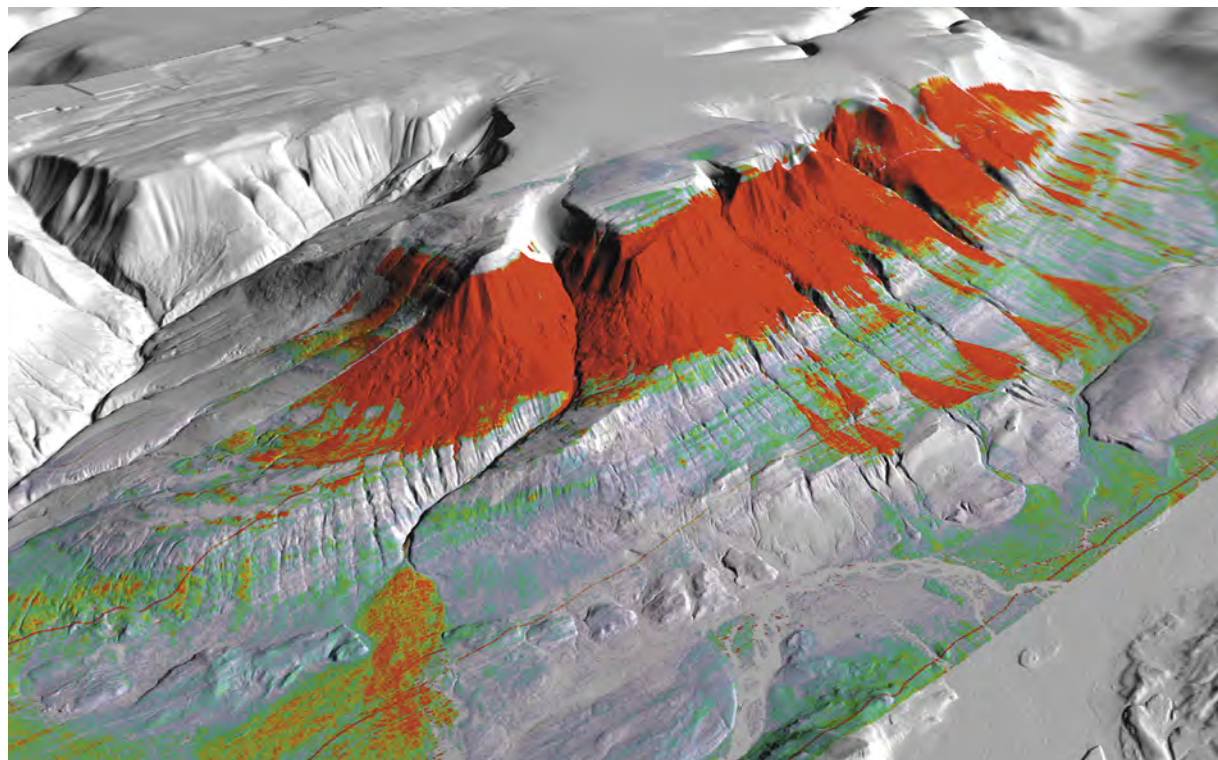
FIGUR 188. Seismisk undersøgelse til havs. Til højre i billedet ses udformningen af de lag, som man ved lydbølgerne har optegnet. Af Henriksen (2005).

eksempel reflekterer og udsender forskellige mineraler karakteristiske bølglængder, og på den måde kan man lokalisere områder, hvor særlige mineraler findes, eller hvor mineralerne fx er omdannet. Omdannelse er et almindeligt fænomen, når en hydrotermal væske påvirker en bjergart. Hvis en bjergart, som indeholder feldspat, gennemstrømmes af en væske med lav pH, vil feldspatten omdannes til kaolin. Kaolin ser ikke ud af meget med det blotte øje, men med et kamera, der kan optage alle bølglængder, kan man optage en anomali fra kaolin (figur 189). Det der er interessant ved en omdannelseszone er, at den væske, der har omdannet bjergarten, også vil kunne bære metalioner, som muligvis kan være udfældet på et gunstigt sted i samme region.

I dag laves meget præcise højdemodeller ved hjælp af remote sensing, så landmålere ikke længere behøver gå rundt i terrænet og opmåle topografien.

BORINGER NED I UNDERGRUNDEN

Når efterforskningsselskaberne ikke kan tilføje mere viden til deres efterforskningsprojekt ved at tage bjergartsprøver i overfla-



den eller ved at bruge geokemiske og geofysiske metoder, og stadig ønsker mere viden, må de bore i undergrunden for at se, hvad der gemmer sig. Det er meget dyrt at lave boreprogrammer, og hvis det er i ødemarken langt fra almindelig infrastruktur, er det ekstremt dyrt. Her skal en borerig ofte skilles ad og enkeltdele flyttes med helikopter

FIGUR 189. Kortlægning af mineralet kaolin (angivet med rødt) med remote sensing, her draperet ovenpå en satellitbaseret højdemodel af området. Klitdal, Østgrønland. Af Riisager & Sørensen (2014).

mellem hvert borehul. Derfor skal selskabet have en velovervejet plan for, hvor der skal bores. Hvis de første borerer giver positive resultater, er det almindeligt, at selskaberne laver et større netværk af borerer, så de kan udarbejde en detaljeret model af ressourcen (legemet) og finde ud af, hvilke lødigheder man finder hvor. Selve boreringen foregår med et hult borehoved, som er monteret på et rør. Når røret trækkes op, ligger der en borekerne af den bjergart, der er boret igennem, inde i borerøret (figur 186. e). Borehovedet er besat med diamanter, som skærer sig ned igennem eventuelle hårde bjergarter. Borekernen bliver kontinuerligt løftet op til overfladen i mindre stykker, så geologen, der har ansvaret for boreringen, hele tiden kan følge med i, hvor dybt borehovedet befinder sig. Der føres nøje log over, hvilke geologiske lag der gennembøres (figur 186. d). Geologen beskriver kernen, og der tages prøver af kernen, som kan analyseres for dens indhold af mineraler. Man kan også foretage løbende geofysiske målinger nede i borehullet.

NØGLEBEGREBER

- Lødighed
- Malm
- Licens
- Geokemiske undersøgelser
- Geofysiske undersøgelser
- Magnetiske undersøgelser
- Geoelektriske undersøgelser
- Gravimetriske undersøgelser
- Seismiske undersøgelser
- Remote sensing
- Boring

REFERENCER

Henriksen, N. (2005). *Grønlands geologiske udvikling - fra urtid til nutid*. GEUS.

Rasmussen, T. M. (2013). Airborne geophysical surveys in Greenland. *Exploration and mining in Greenland*, (27), 1–2.

Riisager, P., & Sørensen, L. L. (2014). New airborne geophysical and remote sensing data from central East- and South-East Greenland. *Exploration and mining in Greenland*, (31), 1–2.

SkyTEM. (u.å.). TEM survey for minerals in Greenland. Hentet fra <https://skytem.com/photos/>

KAPITEL 23



FIGUR 190. Borerig i underjordisk mine. Shutterstock.

HVAD SKER DER I EN MINE?

MINEDRIFT – FØRSTE LED I VÆRDIKÆDERNE FOR MINERALSKE RÅSTOFFER

Miner udvinder mineraler (mineralske råstoffer) og er dermed første led i de lange forsyningskæder, som forsyner samfundet med alle de råstoffer, som ikke kan dyrkes (fx træ, bomuld og fødevarer). Uden mineralske råstoffer kan samfundet ikke opretholdes i sin nuværende form.

ÅBNE- OG UNDERJORDISKE MINER

Minerne bryder og forarbejder de bjergarter, der indeholder de efterspurgte mineraler. De to mest almindelige typer af miner er:

- Åbne miner hvor bjergarterne brydes fra overfladen (figur 191. a).
- Underjordisk minedrift hvor hele produktionen foregår nede i jorden, og der udsprænges gange og rum (figur 191. b).

Forskellige forhold bestemmer, om brydning skal ske fra en åben eller en underjordisk mine. Mest afgørende for dette valg er malmens rumlige form, og hvor dybt under overfladen den ligger. Er malmen fx cigarformet, men ligger nogenlunde horisontalt og tæt på overfladen, kan den måske brydes i en

åben mine; men er den cigarformet og ligger dybt, eller står den næsten vertikalt, vil det ofte være nødvendigt at bryde malmen i en underjordisk mine.

Da det er billigere at bryde malm i åbne miner, vil selskaberne altid vælge denne type, hvis det er muligt. Det koster mere at bryde i underjordiske miner, fordi det involverer et omfattende anlægsarbejde; der skal bygges skakter med elevatorer til at transportere malmen op, samt til at få udstyr og minearbejdere op og ned. I mange tilfælde skal der laves særlige konstruktioner for at sikre, at minegangene ikke styrter sammen. Mange underjordiske miner er så store, at der er etableret veje til biler og store arbejdsmaskiner, og der kan være flere kilometer fra det sted, hvor malmen brydes og hen til skakten, hvor malmen bliver hejst op. Nede i minen er der også installeret strøm, vand og udluftning, samt værksteder og frokosturum. I moderne miner er risikoen for ulykker ikke meget større end på en almindelig byggeplads. Men der findes i tusindvis af småskalaminer rundt omkring i verden, hvor folk uden teknisk viden arbejder under livsfarlige forhold og med mange dødsulykker hvert år.



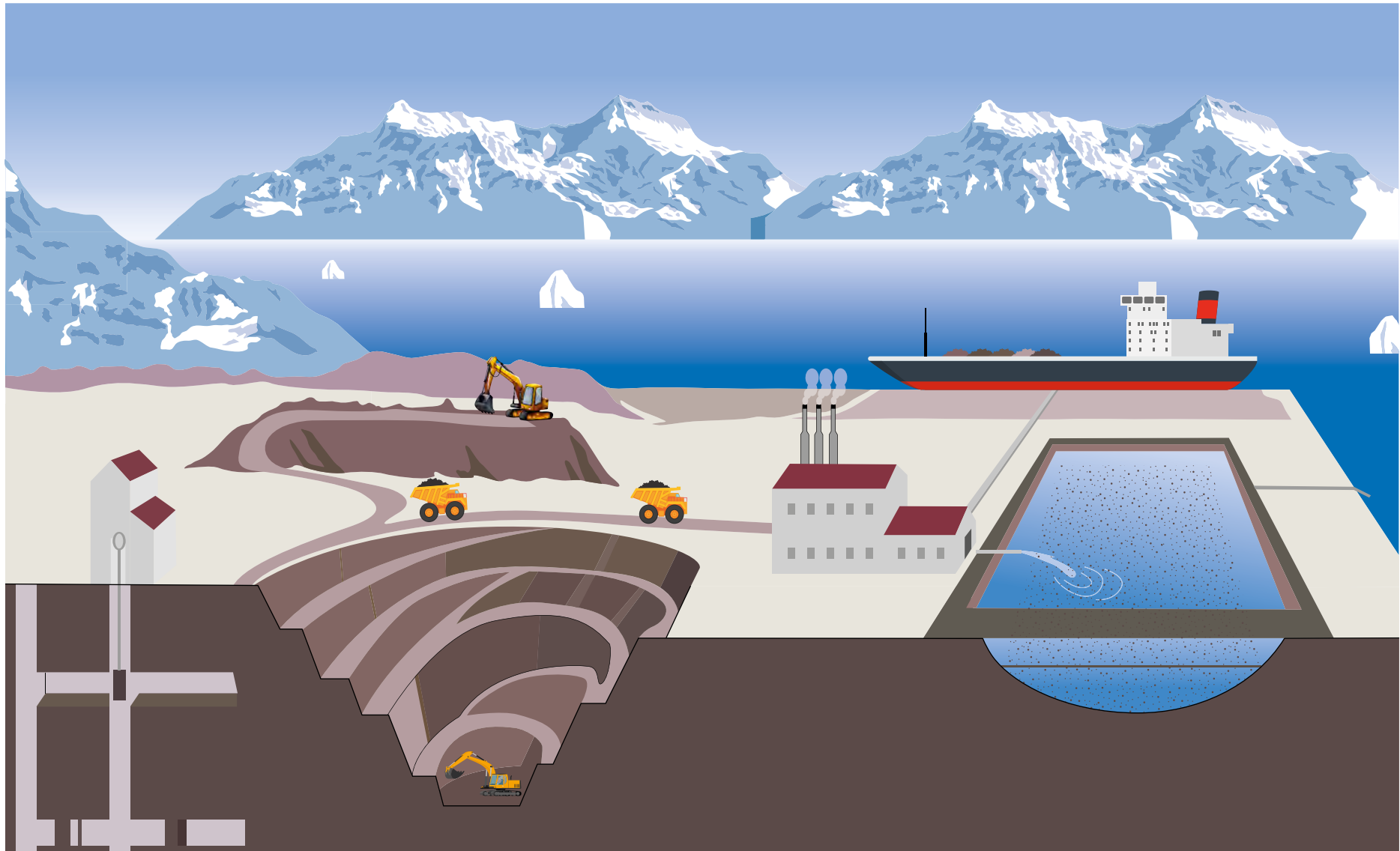
FIGUR 191. Typer af miner.

A. Åben mine.

B. Underjordisk mine.

Fotos fra Shutterstock.

FIGUR 192. Principperne for processerne i en mine. Først brydes malmen i minen, som kan være en åben mine, svarende til en grusgrav, eller en underjordisk mine. Den udsprængte malm transporteres fra minen op til fabrikken, hvor de ønskede mineraler sorteres fra de andre. De udsorterede mineraler udskibes og sendes til en anden fabrik, som kan omdanne mineralerne til råstoffer. De to restprodukter, gråbjerg og tailings, bør deponeres forsvarligt ved minen. Af GEUS (2019).



Almindeligvis er åbne miner ikke dybere end et par hundrede meter, men der er adskillige undtagelser.

Den dybeste åbne mine er Bingham Canyon-kobberminen i USA, som er 1,2 km dyb og ca. 4 km bred. De underjordiske miner ligger sjældent dybere end 1-2 km. De dybeste miner er nogle guldminer i Sydafrika, hvor den dybeste er Mponeng-minen, som når ned i 3,8 km's dybde. Det er teknisk vanskeligt at lave minerne dybere på grund af stigende temperaturer i minegangene og meget højt tryk på bjergarterne, som gør brydningen dyr, langsom og usikker.

Etablering af nye åbne miner møder ofte en del folkelig modstand, da åbne miner efterlader store, åbne huller i landskabet, og begge typer miner efterlader store mængder af gråbjerg, der er det materiale, som ikke kan brydes. Nogle miner har opereret ved at sprænge hele bjergtoppe væk, noget som altid sætter et vist præg på landskabet. Modstanden kan også skyldes befolkningens bekymring for støv-, støj- og miljøpåvirkninger.

De danske grusgrave er en variant af åbne miner. Her skal råstofferne ikke sprænges

ud, de består af sand og grus og kan derfor 'brydes' med gravemaskiner. Det er ikke kun sand og grus, som kan graves ud, samme metode bruges mange steder til brydning af fx guld, tin, diamanter og smykkesten, som ofte findes i sedimenter.

IN-SITU MINER

I enkelte tilfælde kan minedrift benytte en tredje metode, in-situ-metoden (in-situ betyder 'på stedet'). Ved denne minetype pumper mineselskabet væsker ned i undergrunden, som kan opløse malmminerale. Efterfølgende kan opløsningerne suges op og behandles, så de opløste mineraler udfældes. Metoden kan kun anvendes, hvis malmen ligger imellem uigennemtrængelige (impermeable) lag, som ikke tillader væsken at sive væk, og hvis mineralerne kan opløses af den væske, der pumpes ned. Metoden er især kendt fra uranforekomster i Rusland og Kasakhstan. Men i princippet er det samme metode, der bruges til at producere salt fra de danske salt diapirer.

BRYDNING AF MALMEN

I princippet er der ikke de store forskelle på

de arbejdsstrin, der udføres i åbne og underjordiske miner. I begge tilfælde er der fem arbejdsstrin.

Første trin – udsprængning

Malmen skal sprænges ud. Derfor bores der sprænghuller, som lades med sprængmidler. Når der sprænges bliver malmen frigjort fra fjeldet i store stykker. I åbne miner kan det være flere tusinde ton bjerg, der sprænges; de udsprængte stykker malm kan veje flere hundrede kilo (figur 193. a).

Andet trin – transport

Transport af den udsprængte malm til knuseværket. I de underjordiske miner køres den udsprængte malm til en skakt, hvorfra den bliver hejst op til overfladen, hvor knuseværket står. I de åbne miner skal sprængstykkerne typisk køres op ad en lang spiralsnoet vej, som går langs minens sider, til et knuseværk på overfladen; for store åbne miner er transportvejen ofte mange kilometer. Under brydningen bliver der også udsprængt en del bjergarter, som indeholder for lidt af de ønskede mineraler; denne mængde omtales ofte som 'gråbjerg' og skal også transporteres væk fra minen (figur 193. b), hvor det deponeres i særlige områder.



FIGUR 193. Minedrift i billeder.

A. Boring af sprænghuller i en underjordisk mine. Geologerne har markeret, hvor der skal bores.

B. Udlastning af sprængt malm med speciel lav gummiged i en underjordisk guldmine.

C. Knuser til behandling af udsprængt malm. Malmen kommer ind i åbningen øverst og føres ned gennem en stor knuser. Den knuste malm kommer ud i bunden og føres til et anlæg, som sorterer malmmineralerne fra de øvrige mineraler.

D. Efter malmen er knust bliver malmmineralerne sorteret fra de øvrige mineraler i store anlæg, som kan behandle tusinder ton i døgnet, og som kører året rundt.

E. Transport af jernmalmkoncentrat fra en jernmine i Australien til en havn og derfra videre til et stålværk.

Fotos fra Shutterstock.

Tredje trin – knusning

For at kunne bruge malmminerallerne, skal malmen (bjergarten) knuses til kornstørrelser svarende til finkornet sand, så de enkelte malmmineralkorn er ikke helt 'rene' selvstændige mineralkorn, men sidder sammen med andre mineraler. Kun hvis malmen er knust, vil separationen i trin 4 (separation) fungere (figur 193. c).

Fjerde trin – separation

Malmminerallerne skal separeres fra de andre mineraler i bjergarten, som ikke har økonomisk værdi. Der bruges mange forskellige metoder til dette formål, men de fleste metoder er baseret på forskelle i mineralernes densitet, magnetiske eller kemiske egenskaber. Det produkt, der fremstilles ved separationen, betegnes mineralkoncentrat, og er det produkt som ejerne af minerne sælger. Den del af den knuste malm, og som ikke har værdi, benævnt tailings, bliver deponeret enten nede i minen eller i store bassiner i nærheden af minen (figur 193. d).

Femte trin – transport af mineralkoncentratet

I langt de fleste tilfælde skal mineralkoncentratet transporteres fra minen til en fabrik,

som skal få de ønskede grundstoffer ud af malmminerallerne. De miner som producerer fx jern skal transportere millioner af ton mineralkoncentrat hvert år (mineralkoncentratet af jern omtales jernmalm, også selvom det faktisk allerede er knust). Store mængder mineralkoncentrat transporteres, hvor det er muligt, typisk med jernbane eller skib, da det er billigst. Guld- og diamantminer har kun meget små produktioner, som næsten ikke skal forarbejdes yderligere, og derfor foregår transporten primært med bil eller fly/helikopter, idet sikring mod tyveri under transporten er deres største udfordring.

Det er geologerne som finder malmen og beregner, hvor meget der er, mens det er mineingeniørerne udarbejder planer for, hvordan malmen skal brydes, og hvilke metoder der skal bruges for at fremstille mineralkoncentratet. Der arbejdes efter flerårige planer for udviklingen af minen, som skal omfatte både hensyn til sikkerhed, at malmen indeholder den forventede mængde metaller, samtidig med, at der skal tages hensyn til, at så meget som muligt af malmen kan blive brudt.

GRÅBJERG

Gråbjerget, som ikke indeholder tilstrækkeligt med malmmineraller, men som ligger i vejen for at mineselskabet kan komme frem til malmen, skal transporteres til særlige områder, hvor det deponeres i nærheden af minen. Disse gråbjergspladser skal være sikre i forhold til både mennesker og miljø, da gråbjerg kan indeholde sulfidmineraller, som kan opløses af nedbør og føre til udvaskning af surt vand.

TAILINGS

Under fremstillingen af mineralkoncentratet fremkommer en stor restfraktion bestående af alle de uønskede mineraler. Denne del er uden værdi for mineselskabet og kaldes tailings (der findes ikke et dansk ord). Tailings deponeres typisk i bassiner så tæt på minen som muligt. I nogle miner, fx guldminer, udgør mineralkoncentratet kun en forsvindende lille del af den brudte mængde, og volumen af tailings er derfor næsten lige så stor som den mængde bjergart, der er udsprængt eller gravet op af jorden. I andre tilfælde, fx for jernmalm, udgør tailings som regel 'kun' omkring 70 % af den udsprængte



FIGUR 194. Minedrift i billeder.

A. Skib lastes med jernmalm i Narvik, Norge. Malmen er kommet med tog fra Kiruna, Sverige.



B. Ashcroft-kobberminen i British Colombia, Canada. Udpumpning af tailingsmudder til et tailingsbassin, som langsomt afvandes. Tailings bliver deponeret her, og derfor er det vigtigt, at det både fysisk og kemisk er et stabilt miljø, så stoffer fra muddret ikke forurener floder, grundvand og natur i området.

C. Den underjordiske jernmine i det nordlige Sverige ligger nu inde under byen Kiruna. Der er fortsat malm til mange års produktion, og da minen på mange måder er en forudsætning for byens eksistens, har man valgt at flytte byen. Fotos fra Shutterstock.



mængde. Uanset mængden af tailings udgør deponering af tailings en miljørisiko. I Brasilien døde flere hundrede mennesker i januar 2019, fordi dæmningen til et tailingsbassin brød sammen, og den vandmættede tailing skyllede ind over beboelse og infrastruktur i et område på flere kilometer. I nogle tilfælde kan tailings indeholde rester af de kemikalier, som er brugt til at processere malmen. Når en mine ophører, og der ryddes op efter minedriften, er det almindeligt at tilplante toppen af tailingsbassinet. I andre tilfælde kan tailings og gråbjerg transporteres tilbage i minen, og kan, hvis det er en åben mine, bidrage til at restaurere landskabet. En mines levetid er altid begrænset.

I modsætning til normale fabrikker og virksomheder er et af grundvilkårene ved minedrift, at malmen en dag er brudt, og minen må lukke. Men når man laver en ny mine, er det ikke kun en mine, der bliver etableret. Der bliver ofte også bygget en fabrik, som kan omdanne minens malm til mineralkoncentrat, minens produkt. Der bliver typisk også lavet infrastruktur i form af kraftværker, vandforsyning, veje, havne, landingsbaner og måske endda boliger, skoler og hospitaler til de ansatte og omegnens befolkning.

Derfor interesserer både myndigheder og mineselskaber sig meget for, hvor mange år produktionen kan forventes at vare.

Mineindustrien bruger begrebet 'minens levetid', som er bestemt af forholdet mellem reservens størrelse og den mængde malm, der brydes hvert år. Hvis reserven er 1 mio. ton, og der brydes 50.000 ton om året, er levetiden 20 år. Da både reservens størrelse og den årlige produktion kan ændre sig, er levetiden dynamisk. Typisk bliver levetiden betydeligt længere end først antaget, fordi mineselskaberne i første omgang måske er meget konservative i deres estimat af, hvad minen vil kunne producere, men også fordi mineselskaberne løbende foretager yderligere mineralefterforskning omkring minen for at finde mere malm. Hvis det lykkes, forlænges minens levetid. Mere malm og lange levetider giver mineselskabet den største økonomiske gevinst. Som regel støttes målsætningen om at forlænge miners levetid aktivt af myndighederne, fordi de ønsker at bevare arbejdspladser i minebyerne. Når en mine lukker, betyder det ofte, at hele samfund lukker ned.

Der er eksempler på miner med mere end

100 års produktion, som stadig bryder malm. Det gælder 'Grand Canyon of the North'-jernminen i Minnesota, USA, som startede i 1895, og som har produceret mere end 800 mio. ton jernmalmkoncentrat. Et andet eksempel er den underjordiske jernmine i Kiruna i Nordsverige, som åbnede i 1898 og stadig er i produktion. Minen ligger nu under byen Kiruna. Flere gange har man valgt at flytte hele byen, for at minen kunne få mulighed for at fortsætte med at bryde. Da de omtalte miner startede, ville ingen have gættet på en levetid på mere end 125 år (figur 194. c). Et tredje eksempel er kryolitminen ved Ivittuut i Vestgrønland, som bl.a. producerede 3,7 mio. ton kryolit fra 1854 til 1987. Da denne mine startede, var der nok ingen, der overhovedet tænkte på at beregne en forventet levetid for minen.

Der er også mange eksempler på, at miner må lukke, inden de har nået deres beregnede levetid, fordi de ikke længere vurderes økonomiske. Dette gælder fx for de to grønlandske, nu lukkede miner, Marmorilik eller Den Sorte Engel i Vestgrønland og Blyklippen i Østgrønland. Begge har givet anledning til diskussioner om, i hvilket omfang de stadig påvirker miljøet. Tilsvarende lukkede mange

af de engelske kulminer i 1980'erne, da olie og gas var billigere alternativer. Surt vand fra disse miner påvirker stadig grundvandet mange steder. På verdensplan er der i tusindvis af forladte, lukkede miner, hvoraf måske de fleste er lukket hurtigt og uden at der er foretaget miljø- og sikkerhedsmæssige foranstaltninger, ofte med store miljødelæggelser til følge. I den vestlige verden skal mineselskaber i dag, inden de åbner, give bankgarantier, som skal sikre, at myndighederne kan lukke minen forsvarligt ned, hvis mineselskabet ikke er i stand til at gøre det selv.

MANGE FORSKELLIGE SPECIALISTER I EN MINE

Minedrift kan ligesom andre store virksomheder kun fungere, hvis de har de rette folk, typisk specialister, ansat. Minearbejderne, som er den største gruppe, har uddannelse i at betjene minens maskiner. Som regel har miner også ansat mineingeniører, som er specialiseret i brydningsmetoder, eller i hvordan malmen skal behandles, så malmmineralerne kan adskilles fra de ikke-økonomiske mineraler. Der er ofte også ansat laboranter og biologer til at monitorere minens påvirkning på miljøet. Geologer spiller en

vigtig rolle i en mine; dels skal de kunne lave 3D-modeller af malmen, så brydningen kan gå i den rigtige retning, dels skal de beregne, hvor meget malm der er tilbage i minen og bestemme lødigheder. Herudover er det geologernes arbejde at lave mineralefterforskning i området, hvilket kan være med til at forlænge minens levetid.

Mange af funktionerne i minen har i lighed med andre store industrivirksomheder brug for håndværkere som elektrikere, mekanikere, VVS-installatører, datateknikere o.lign. Herudover er der ansat servicemedarbejdere, som arbejder i kantiner, indkvarteringer og i nogle tilfælde på landingsbaner, ved jernbaner og havneanlæg.

Behandling af mineralkoncentrater

Mineralkoncentrater skal i de fleste tilfælde forarbejdes yderligere for at udtrække fx kobber fra kobberminerale, jern fra jernminerale osv., inden metallerne kan bruges industrielt. Dette foregår i smelteværker, som er specialiseret i at behandle mineralkoncentrater af kobber, jern, zink osv. Disse fabrikker ligger ofte i andre verdensdele end hvor de er brudt, og derfor er skibstransport af mineralkoncentrater (malme) og efter-

følgende halvfabrikata et vigtigt element i værdikæden for mineralske råvarer, inden næste led frem mod de produkter vi som forbrugere efterspørger i vores dagligdag.

NØGLEBEGREBER

- De tre minetyper: Underjordisk mine, åben mine og in-situ mine
- Brydning af malm, de fem arbejdsstrin
- Malm
- Mineralkoncentrat
- Tailings
- Gråbjerg
- Miners levetid

KAPITEL 24



FIGUR 195. Hans Mules Gade i Odense fotograferet mod Østre Stationsvej på en bilfri søndag i nov. 1973. Foto af Astrid Blumensaadt (1973).

RÅSTOFKNAPHED

RÅSTOFKNAPHED HAR MANGE ÅRSAGER – MEN INGEN ER GEOLOGISKE

Fra tid til anden er der store overskrifter i medierne om, at verden er ved at løbe tør for et eller flere råstoffer. Inden for de seneste fem år har sådanne overskrifter især handlet om forventet mangel på lithium og kobolt til batterier, sjældne jordartsmetaller til vindmøller, fosfor til gødningsstoffer, samt sand og grus til byggeriet. Tilbage i de tidlige 1970'ere handlede overskrifterne om oliemangel, hvilket fik danske politikerne til at indføre forbud mod at køre i bil om søndagen, og gadebelysningen blev slukket for at spare på olien (figur 195). Manglen på olie i Europa blev udlagt som et resultat af, at verdens olieressourcer var ved at slippe op. Tilsvarende tilskrives de manglende leverancer af lithium, kobolt, sjældne jordartsmetaller og sand og grus ofte som en geologisk mangelsituation.

Dommedagsoverskrifterne om at verdens forekomster af mineralske råstoffer er ved at være opbrugt, skyldes utilstrækkelig viden om to væsentlige forhold:

- Hvordan opgøres de geologiske ressourcer, og hvad ligger der bag tallene.

- De mange forarbejdningstrin, ofte omtalt som værdikæderne, som råstofferne skal igennem fra de forlader minen til de er forarbejdet til et materiale, der kan bruges til biler, smartphones, køkkenvaske, kunstgødning osv.

Når der fra tid til anden opstår flaskehalsproblemer i værdikæderne, opfattes dette af mange som udtryk for en geologisk mangelsituation, som så underbygges ved brug af opgørelser om reservernes størrelser, som imidlertid ikke udtrykker noget om størrelsen på verdens samlede ressourcer. Dette fører til konklusioner som der ikke er belæg for.

Men det er samtidig vigtigt, at være bevidst om, at de mineralske ressourcer ikke er uendelige, og at det derfor er nødvendigt at efterleve bl.a. FN's Verdensmål 12 om, at ressourcerne skal udnyttes ansvarligt, så der også er ressourcer til vores efterkommere. Derfor vil vi se nærmere på forskellige typer af råstofkriser, deres årsager og virkninger, så det bliver lettere at forholde sig kritisk til de overskrifter om råstoffer, som medierne fra tid til anden fremkommer med.

DER ER FORSKELLIGE ÅRSAGER TIL RÅSTOFKNAPHED

Der kan være forskellige årsager til, at der opstår knaphed på mineralske råstoffer, og råstofknaphed opdeles derfor i forskellige typer: absolut råstofknaphed og midlertidig råstofknaphed, hvor strukturelt betinget råstofknaphed indgår.

ABSOLUT RÅSTOFKNAPHED

Begrebet absolut råstofknaphed bruges, hvis alle geologiske reserver af et givent mineralsk råstof er brugt op, og det er umuligt at fremskaffe mere. Der kendes kun ét eksempel på, at et mineralsk råstof blev brugt op. Det er mineralet kryolit. Kryolit, et natrium-fluor-mineral, blev brudt fra minen i Ivittuut i Sydgrønland fra 1854 til 1987, hvor minen bogstavelig talt blev tømt for kryolit (figur 196). I starten brugte man kryolit til at fremstille soda; senere blev det brugt som hjælpestof til smeltning af aluminium. Kryolitminen ved Ivittuut var den eneste af sin art i verden. Da minen var tømt, fandt man ud af at fremstille kryolit syntetisk, og dermed blev det ikke et alvorligt tab for aluminiumsindustrien, at forekomsten blev

brugt op.

Til trods for at der gennem årtusinder har været et stigende pres på verdens råstoffer, og der bruges større og større mængder, har menneskene gennem tiderne udviklet teknologier til at finde og udnytte flere og flere mineralske ressourcer. Man kan derfor sige, at verden ikke har oplevet en situation med absolut råstofknaphed siden kryolitminen lukkede i 1987. Hverken stenalderen, bronzealderen eller jernalderen sluttede, fordi disse civilisationer løb tør for flint, bronze eller jern. 'Oliealderen' vil heller ikke slutte, fordi der ikke er mere olie. Årsagerne til at disse perioder slutter, skyldes især kulturelle og teknologiske ændringer, og altså ikke geologiske forhold.

MIDLERTIDIG RÅSTOFKNAPHED

Der kan være flere grunde til, at der opstår midlertidig knaphed efter visse mineralske råstoffer, hvilket ses i en række eksempler nedenfor.

Første eksempel

Hvis mineindustrien i en periode ikke kan følge med efterspørgslen på et givent rå-

FIGUR 196. Råstofknaphed i billeder.

A. Minen i Ivittuut i Grønland, der løb tør for mineralet kryolit, er det eneste hidtidige eksempel på absolut råstofknaphed. Foto fra kajen (rheden) i Ivittuut, 1898, med et antal amerikanske fragtskibe parat til at modtage en last kryolit. Skibet i forgrunden (i inderhavnen) er Kryolitselskabets eget skib S/S Fox – kaldet Gamle Fox.

B. Kryolitminen lukkede i 1987. Nogle af bygninger står stadig tilbage og vidner om de mange års brydning af kryolit. På den lille kirkegård er der stadig gravsten for minearbejdere, som døde i Ivittuut.

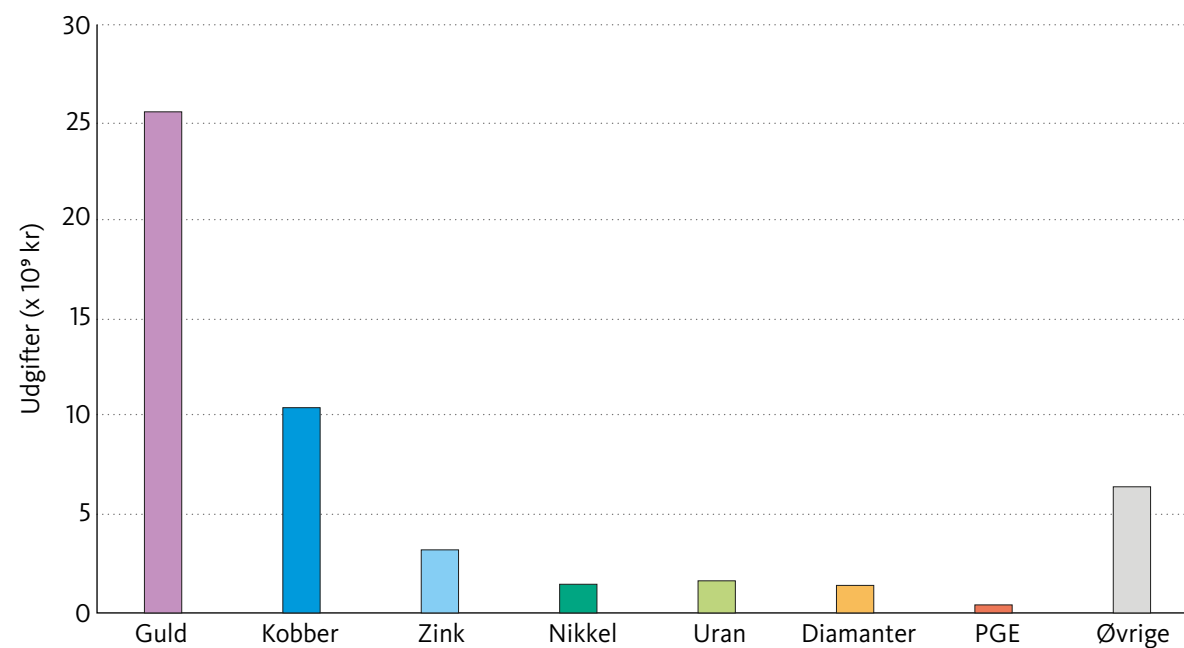
C. Store krystaller af jernspat (brunt) og kryolit (lyst). Som det ses af skalaen er mange af krystallerne mere end 10 cm store.

Foto A fra Ivittuut Museums arkiv, fotos B og C af Per Kalvig.



stof, vil det medføre en midlertidig råstofknaphed. Det kan for eksempel forekomme, når nye teknologier, der har brug for helt specielle råstoffer, udbredes meget hurtigt. Denne situation kendes fra udviklingen af vindkraft, som efterspørger store mængder af sjældne jordartsmetaller, og fra batterier til elbiler, som skal bruge store mængder lithium, kobolt og grafit. Hvis den midlertidige råstofknaphed bevirker, at råstofpriserne stiger, kan det medføre, at nye miner vil blive åbnet og kan afbøde den midlertidige råstofknaphed. Det skal dog bemærkes, at det tager mange år at åbne nye miner, ofte mere end 10 år, og derfor kan den midlertidige råstofknaphed vare ved i årevis.

Forudsætningen for at der kan åbnes nye miner er, at der foretages mineralefterforskning, som er den måde nye forekomster findes. Der er meget stor forskel på, hvor mange penge der bruges på efterforskning af de forskellige typer af råstoffer (figur 197). Næsten halvdelen af alle de penge der bruges på mineralefterforskning, bruges på guld, og kun en helt forsvindende del på de råstoffer som er kritiske.



Andet eksempel

Hvis der er efterspørgsel på et råstof, som almindeligvis kun udvindes som biprodukt ved en mine, kan der opstå knaphed, hvis der ikke samtidig er efterspørgsel på hovedproduktet. Det kunne for eksempel være udnyttelse af germanium fra zinkmalm eller gallium fra aluminiummalm. Fordi germanium og gallium begge kun findes i meget små koncentrationer, findes der ikke miner, som bryder dem som hovedprodukt, da det

FIGUR 197. De globale udgifter til mineral- efterforskning var i 2017 ca. 50 mia. kroner. I 2017 var metalpriserne lave, og derfor var mineralefterforskningen mindre end andre år. Opgørelsen er for gruppen af de såkaldte ikke-jernholdige metaller, og omfatter derfor ikke metallerne jern, titanium, krom og vanadium. Data fra S&P (2017).

ikke vil være økonomisk rentabelt. Mængden af germanium og gallium, som brydes, er altså helt afhængigt af, hvor meget zink og aluminium der brydes. Hvis produktionen af zink og aluminium bliver mindre, vil produktionen af germanium og gallium også blive mindre. Dette er eksempler på strukturelt betinget råstofknaphed, som det kan være svært at afhjælpe eller gribe ind over for. Men i en vis udstrækning kan denne type knaphed afhjælpes ved at bruge andre råstoffer, som har næsten de samme egenskaber, men som er lettere at fremskaffe; det kaldes for substitution.

Tredje eksempel

Det er ikke alle efterforskningsprojekter som får myndighedernes tilladelse til at blive udnyttet. Det kan fx skyldes, at de ligger i områder, hvor der er andre aktiviteter, miljømæssige forhold, eller fordi myndighederne ønsker at beskytte området på grund af rekreative kvaliteter. Man kan sige, at mineraludvinding er i naturlig konkurrence med andre interesser, hvilket reelt kan betyde, at vi kan komme til at opleve midlertidig råstofknaphed. I Danmark kunne man forestille sig den situation, at ingen ønsker at være nabo

til en grusgrav, og hvis myndighederne støtter denne holdning, vil produktionen af sand og sten derfor på et tidspunkt stoppe, og der vil opstå knaphed. Knapheden vil ophøre, hvis vilkårene ændres, eller hvis råstofferne i stedet bliver importeret, eller kan substitueres med andre ting. Substitution for sand og grus til beton, er fx beton fra bygninger som er revet ned. I dette tilfælde kan man sige, at knapheden kan føre til en mere bæredygtig løsning, men knust genbrugsbeton vil kun kunne udgøre en meget lille andel.

Fjerde eksempel

Knaphed på mineralske råstoffer kan opstå, hvis et land eller en virksomhed har monopoliseret minesektoren eller nogle led i værdikæden for råstofferne. Det er fx tilfældet for de sjældne jordartsmetaller, hvor Kina har kontrol over både udvinding og en betydelig del af forsyningskæderne for disse råstoffer. Med denne monopollignende situation kan Kina bestemme, hvor meget de vil sælge til hvem og til hvilke priser. En tilsvarende situation er opstået for forsyningen af kobolt, hvor langt hovedparten af de koboltholdige mineraler brydes i DR Congo men forarbejdes i Kina. Kina har især kontrol

over den del af kobolt-værdikæderne som er rettet mod fremstilling af Li-ion-batterier, og dermed har Kina en nøglerolle i verdens grønne energiomstilling. For at komme ud af den opståede forsyningsknaphed arbejder forskere udenfor Kina på at udvikle nye batterityper, som ikke skal bruge kobolt.

Femte eksempel

De mineralske råstoffer produceres fra de mineraler, som er lettest og billigst at bearbejde, men der er i mange tilfælde også andre mineraler som ville kunne bringes i produktion. Eksempelvis brydes kobber hovedsageligt fra ca. ti forskellige mineraler, men kobber findes også i små mængder i mange andre mineraler. Det samme gælder for aluminium, som helt overvejende brydes fra to-tre forskellige mineraler, selvom aluminium findes i mange andre mineraler. Alle de mineraler, der udvindes og forarbejdes, er valgt ud fra, hvad der er teknisk muligt og samtidig billigst. En af de store omkostninger er den energi, der skal bruges for at omdanne et mineral til et brugbart råstof. Man kan derfor forestille sig, at såfremt fremtidens grønne energikilder er rigelige og billige, så øges mulighederne for at udnytte

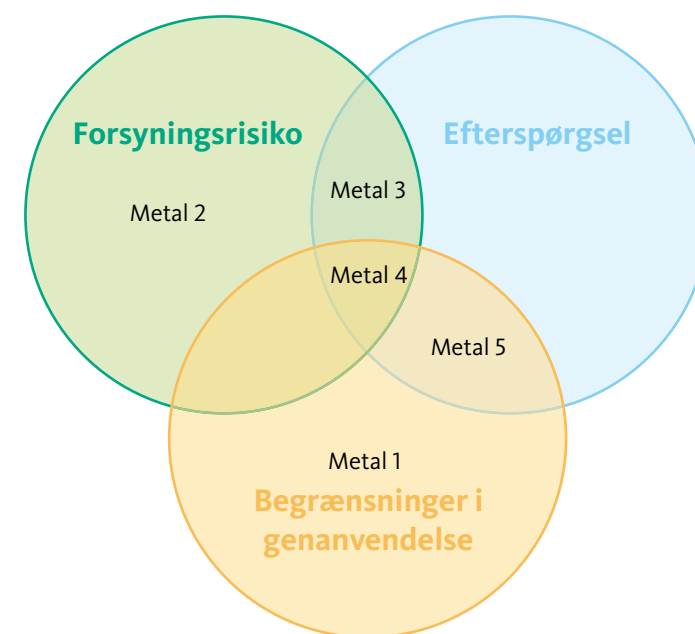
nogle af de helt almindelige mineraler, som ikke bruges i dag, fx feldspat, kvarts, amfibol og mange mange andre.

KRITISKE RÅSTOFFER

Nogle råstoffer omtales som kritiske råstoffer; det er råstoffer, som er meget nødvendige for store og samfundsvigtige industrier, og som samtidig er vanskelige at skaffe. Hvad der er kritisk i det ene land, behøver ikke at være kritisk i et andet. Om et råstof bliver kritisk afhænger bl.a. af, hvilke industrier der dominerer i et givent land og af, hvor mangfoldige forsyningskanalerne er for råstofferne. Da både forsyningssituationen og teknologierne er dynamiske, er der altså tale om en midlertidig råstofknaphed. Men selv midlertidig råstofknaphed er alvorlig, og derfor foretager mange lande løbende vurderinger af, hvilke råstoffer de anser som kritiske råstoffer for netop deres land. Denne viden bruges til at varsle industrierne om, hvilke råstoffer der kan blive problemer med at fremskaffe (figur 198). Kritikalitet kan illustreres grafisk i forhold til råstoffets økonomiske betydning (x-akse) og den forsyningsrisiko, der er for råstoffet (y-akse) (figur 199).

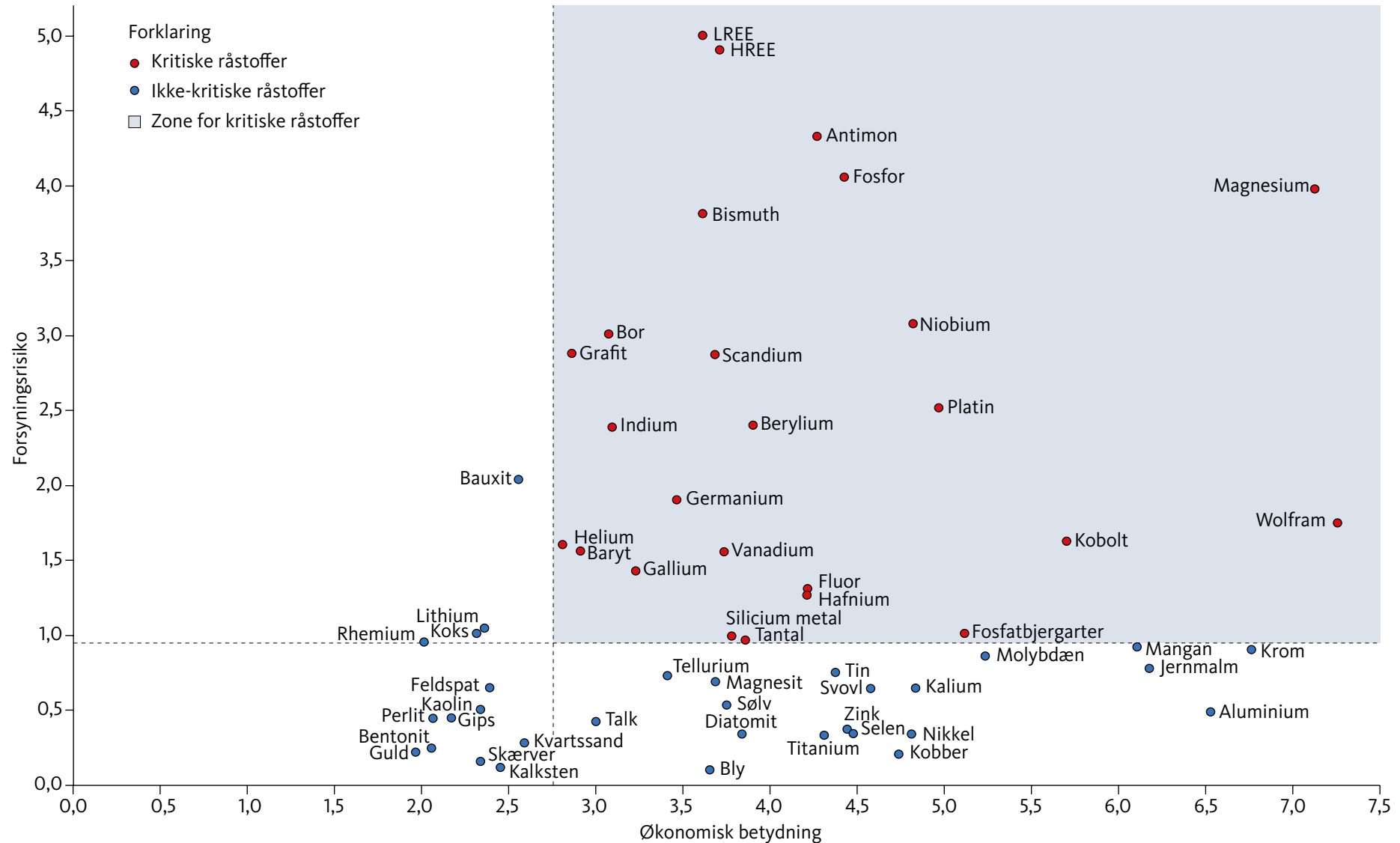
EU har kun en meget lille produktion af kritiske råstoffer (figur 200). Blandt andet derfor har EU-Kommissionen siden 2010 vurderet, hvilke råstoffer der er kritiske for den europæiske økonomi. I deres seneste rapport fra 2017 er 26 mineralske råstoffer vurderet som kritiske (figur 199). Ved disse vurderinger af forsyningssikkerheden bliver der lagt særlig vægt på de politiske og økonomiske forhold i de lande, som bryder råstofferne i minerne. Desuden vurderes i hvilket omfang lande eller virksomheder har monopolstatus på nogle råstoffer. Endelig vurderes mulighederne for at erstatte kritiske råstoffer med ikke-kritiske, samt om det kunne være muligt at genanvende kasserede produkter og derigennem supplere med genanvendte råstoffer. Den sidste løsning undersøges især for de sjældne jordartsmetaller, hvor forskere undersøger om magneter fra nedlagte vindmøller og skrottede biler kan genanvendes.

Mange af de 26 råstoffer på EU's liste omfatter råstoffer, som Kina er den dominerende producent af, og som desuden er vigtige i produktionen af grønne energiteknologier, computere, smartphones, batterier, biler og mange andre ting, som vi er afhængige af (fi-



FIGUR 198. Eksempler på kritiske råstoffer er metal 3 og 4. Der er både efterspørgsel og forsyningsrisiko, hvilket betyder, at industrien kan komme til at mangle vigtige råstoffer. Metal 2 kan fx være grundstoffet lithium, som der endnu er nok af, men på et tidspunkt, kan efterspørgslen øges, så det også er kritisk. Metal 1 kan fx være molybdæn og wolfram i stållegeringer, der sker store tab. Efter Buchert et al. (2009).

FIGUR 199. EU-Kommissionen undersøgte i 2017, hvilke råstoffer der var vigtige for den europæiske industri, og som samtidig kunne blive en mangelvare for virksomhederne og dermed var kritiske. Undersøgelsen viste, at 25 råstoffer i forskelligt omfang og af forskellige grunde var kritiske for EU. For en dels vedkommende skyldes det, at Kina har monopoliseret forsyningskæden af råstofferne. Efter Europa-Kommissionen (2017).



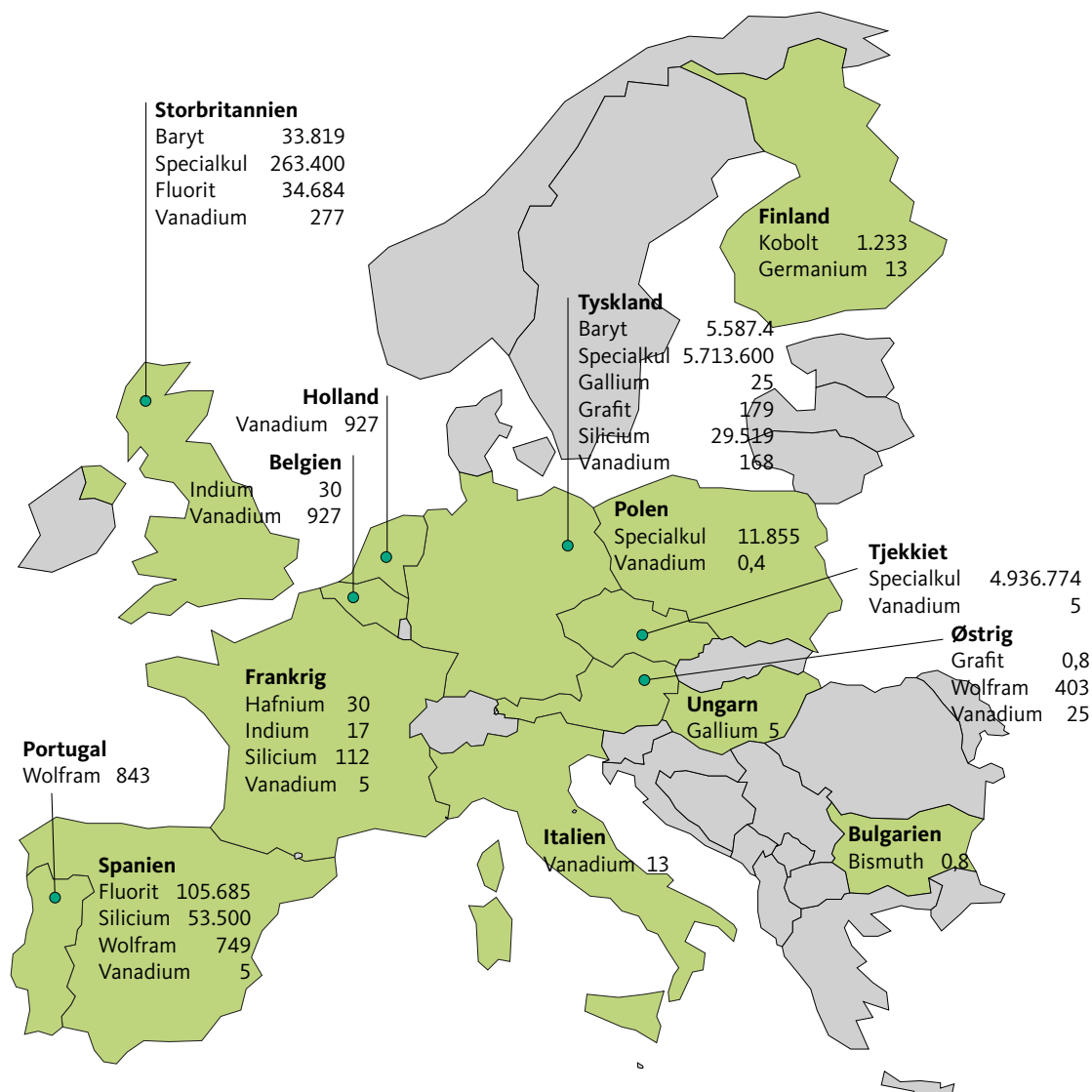
gur 199). Kinas monopollignende dominans (figur 201) på de mineralske råstoffer skyldes, at Kinas voksende økonomi og voksende middelklasse giver øget behov for råstoffer til udbygning af lokal infrastruktur og forbrugsgoder. Det skyldes også, at mange industrivirksomheder i den vestlige verden har flyttet deres produktion til Kina for at reducere deres egne omkostninger. Samlet set fører det til, at Kina skal bruge flere og flere råstoffer og desuden samtidig opnår bedre kontrol med værdikæderne.

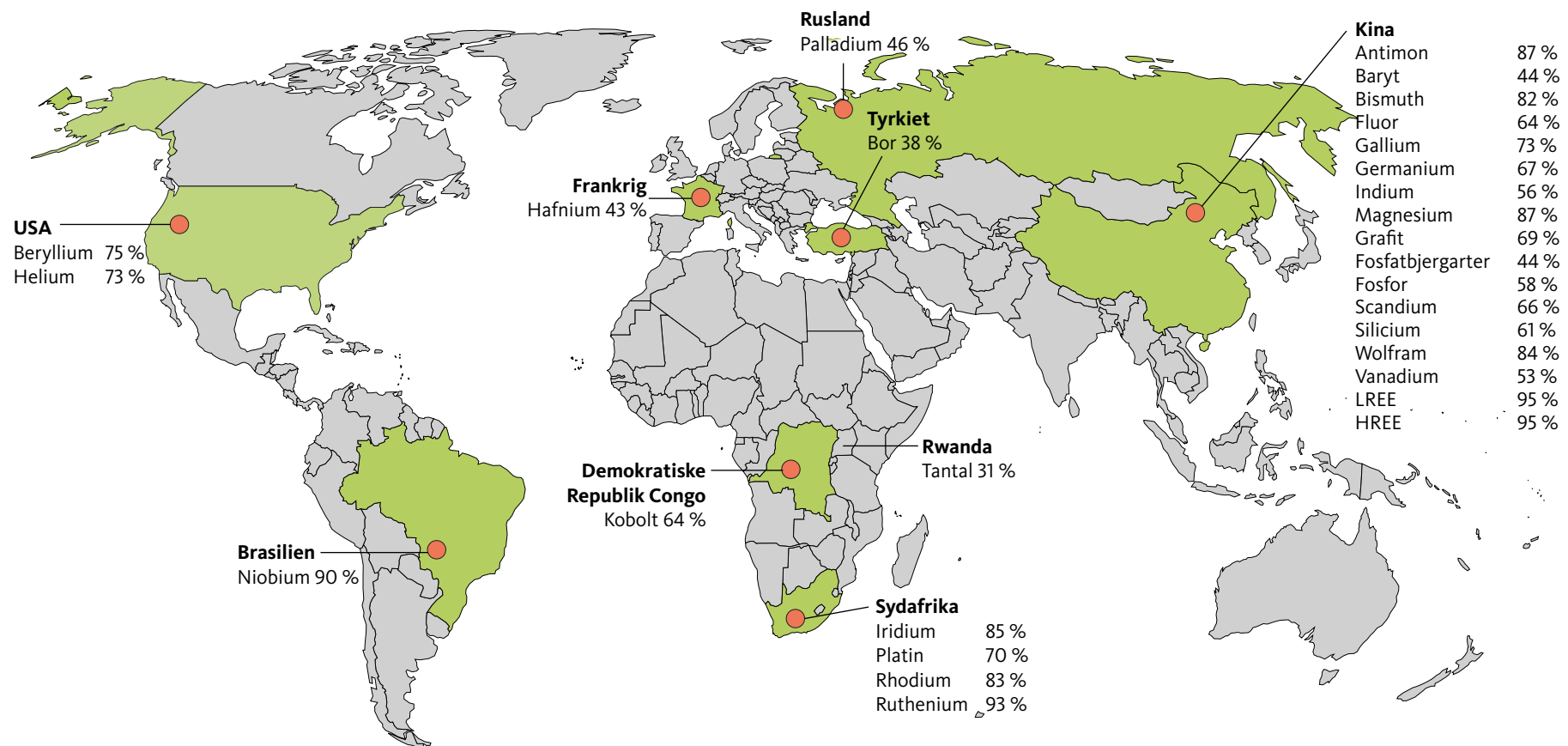
MIDLERTIDIG RÅSTOFKNAPHED KAN AFVÆRGES

Råstofknaphed, eller råstofkriser som pressen ynder at kalde det, er altså ikke naturgivne og kan til en hvis grad afværges. Men hvis de skal undgås, er det også vigtigt, at mineselskaberne sætter flere penge af til mineralefterforskning, så fremtidens miner kan findes i god tid.

Der afsættes mange midler til mineralefterforskning, men pengene er ulige fordelt på de forskellige metaller (figur 197), fx blev der i 2017 brugt i alt ca. 50 mia. kr. til efterforskning af mineralske råstoffer (minus ikke-jernholdige metaller). Halvdelen af disse penge

FIGUR 200. Kort over kritiske råstoffer produceret i EU i ton. En del af råstofferne produceres som biprodukter i smelteværker; det gælder især produktionerne i Holland, Belgien og Frankrig. Efter EU-Kommissionen (2018).





blev dog brugt til at lede efter guld, et metal der ikke er stor industriel efterspørgsel på.

For at undgå råstofknaphed er det også vigtigt, at der forskes i udvikling af efterforskningsmetoder, som kan finde nye

mineralforekomster og udvikle nye effektive produktionsmetoder, som kan få metallerne ud af bjergarterne. Men der er især brug for mange forbedringer i den cirkulære økonomi i forhold til at genanvende de mineralske

FIGUR 201. Verdenskort over producenter af kritiske råstoffer i årene 2010-2014. Modificeret efter EU-Kommissionen (2018).

råstoffer, så de store materialetab, der er i dag, bliver mindre, og nogle af de kritiske råstoffer kan genanvendes. Hvis vi bliver bedre til at genanvende fx små elektroniske produkter, vil det kunne formindske nogle af de forsyningsproblemer, som skyldes strukturel knaphed.

Der er altså brug for, at beslutningstagere og virksomheder er opmærksomme på, hvordan nye teknologier og produkter skaber behov for adgang til flere og/eller andre råstoffer, og laver strategier for, hvordan disse behov kan opfyldes, så der ikke opstår råstofknaphed.

Jordens geologiske ressourcer er med andre ord ikke ved at slippe op. Men fra tid til anden opstår der knaphed på visse råstoffer, som hænger sammen med den måde, vores civilisation fungerer på. Uanset det faktum, at de geologiske ressourcer ikke er ved at slippe op, så er det stadig vigtigt, at vi passer godt på dem og bruger ressourcerne bæredygtigt i overensstemmelse med Verdensmål 12. De mineralske råstoffer gendannes ikke, og vi har ansvaret for, at der også er nok til fremtidens generationer.

NØGLEBEGREBER

- Geologisk råstofmangel
- Absolut råstofknaphed
- Midlertidig råstofknaphed
- Strukturelt betinget råstofknaphed
- Kritiske råstoffer
- Substitution

REFERENCER

Buchert, M., Schüller, D., & Bleher, D. (2009). *Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential*. Öko-Institut e.V., United Nations Environment Programme & United Nations University.

EU-Kommissionen. (2017). *Study on the review of the list of Critical Raw Materials Criticality Assessments*. Hentet fra https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en

EU-Kommissionen. (2018). *Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy - Commission Staff Working Document*. Hentet fra <http://ec.europa.eu/docsroom/documents/27348>

S&P. (2017). *Essential intelligence shapes a world of opportunity. Annual Report 2017*. Hentet fra <https://www.spglobal.com/en/annual-reports/2017/documents/spgi-ar2017.pdf>

KAPITEL 25



FIGUR 202. Tungt maskineri arbejder i en åben jernmine. Shutterstock.

FORSYNINGSKÆDER OG VÆRDIKÆDER

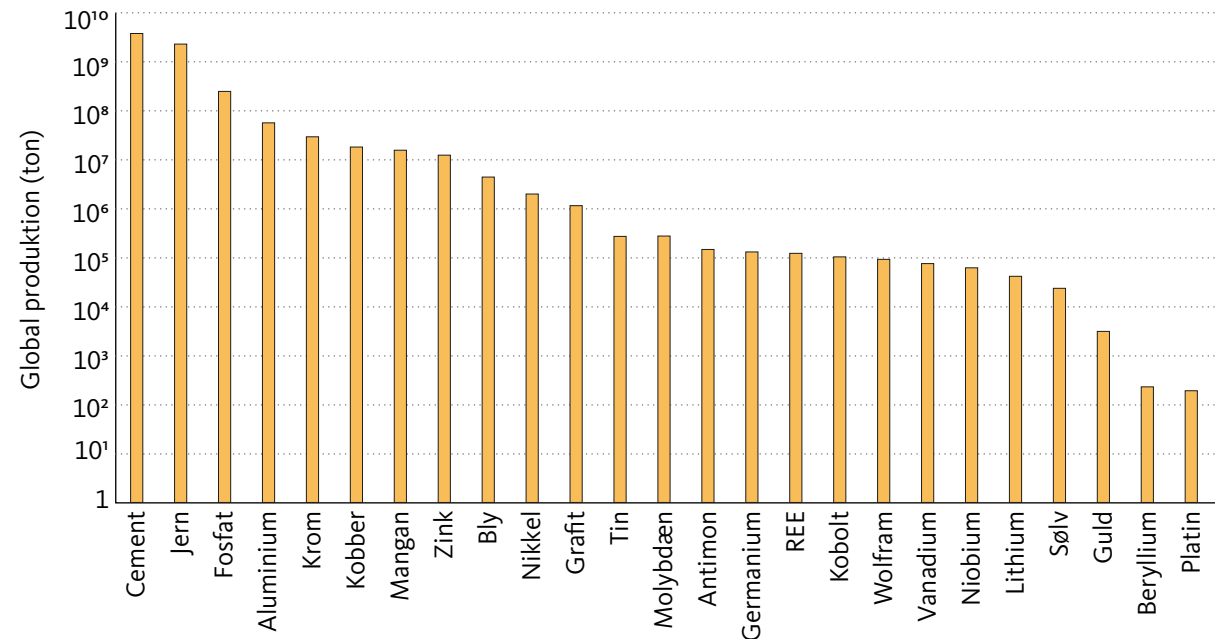
FORBRUGET AF MINERALSKE RÅSTOFFER ER DYNAMISK

Udviklingen i et samfund har til alle tider været betinget af adgangen til mineralske råstoffer. I figur 205 ses eksempler på, hvad de mineralske råstoffer bruges til i et moderne samfund. Men hvilke råstoffer, der efterspørges, er under stadig forandring, fra stenalderssamfundets brug af flint til redskaber (figur 204. a) og vikingetidens stål til våben (figur 204. b) til vore dages forbrug af en lang række råstoffer til infrastruktur og teknologi (figur 204. c, d). Der er dog to klare tendenser i udviklingen:

- Forbruget af mineralske råstoffer vokser.
- Vores højteknologiske samfund bruger flere og flere forskellige grundstoffer.

Konsekvensen af denne udvikling er, at der til stadighed skal findes flere nye mineralforekomster for at sikre forsyninger af råstoffer til industrien.

Det voksende råstofforbrug er overordnet styret af den globale befolkningstilvækst, herunder en voksende, købekraftig middelklasse. Den stærke økonomiske vækst i lande som Brasilien, Rusland, Indien og Kina



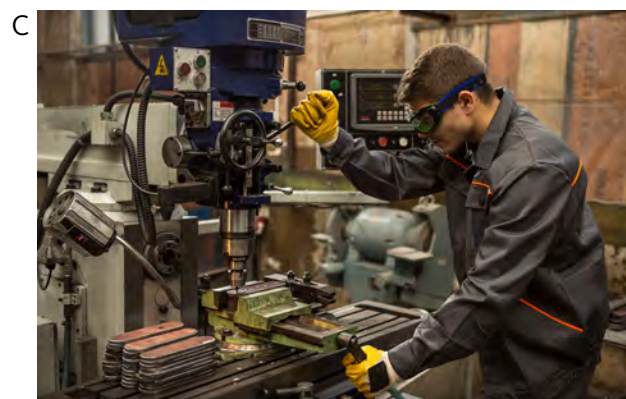
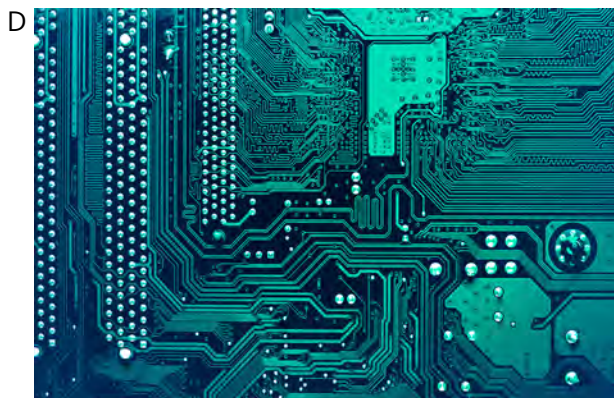
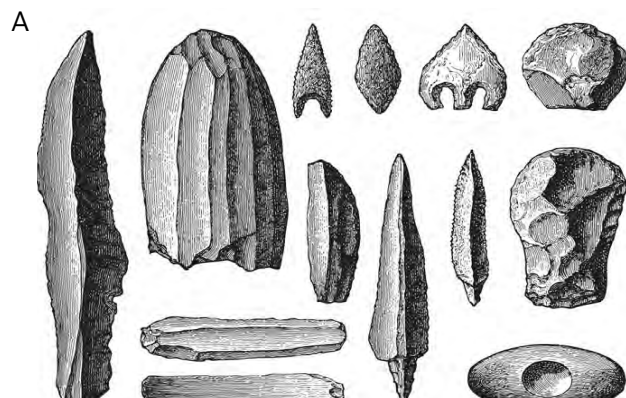
(de såkaldte BRIK-lande) har siden 1990'erne øget den globale efterspørgsel på traditionelle råstoffer som jern, kobber, bly m.fl., som bruges til bygning af huse, veje, broer og ledningsnet (figur 203).

Samtidig har innovation skabt nye teknologier inden for især kommunikation, dataformidling, energilagring og grøn energi, hvilket har øget efterspørgslen på grundstoffer, som ikke tidligere har haft stor kommerciel interesse. Det gælder fx de sjældne jordartsme-

FIGUR 203. Verdens samlede produktion af udvalgte råstoffer i 2017. Bemærk at y-aksen er logaritmisk.

Den største gruppe af råstoffer, sand og grus til beton, er ikke vist her, men man skønner, at der produceres ca. 80 mia. ton pr. år af denne gruppe.

Data fra USGS (2019).



FIGUR 204. Forsyningskæder i billeder.

A. Stenalderens værktøj som pilespidser, økser og knive var især lavet af flintesten.

B. Vikingernes værktøj og våben var lavet af metallegeringer, som gjorde dem stærke. Skibene var dog stadig lavet af træ.

C. I dag er værktøj helt specialiseret til bestemte opgaver. Derfor bruges der blandinger af mange forskellige metaller, så værktøjet kan opnå de rigtige egenskaber.

D. Der er sket flere tekniske revolutioner inden for mulighederne for at kommunikere, som alle har haft stor betydning for de råstoffer, som geologerne skal finde og minerne bryde, for at de til sidst kan ende i fx kredsløb i computere.

E. Cement fremstilles af brændt kalk på meget store fabrikker.

F. Beton bruges fx til byggelementer; fabrikken har købt sand, grus og cement, som er fremstillet andetsteds. Elementerne transporteres fra betonfabrikken til de byggepladser, hvor bygningerne skal opføres.

Fotos fra Shutterstock.

taller, niobium, tantal, gallium, germanium og lithium.

Når en virksomhed vælger at bruge et mineralsk råstof til et givent formål, vurderer virksomheden bl.a., om råstoffet har de fysiske og kemiske egenskaber, som der er brug for. Sådan har det altid været. I stenalderen kunne flintesten med simple midler formes til skarpe økser og pilespidser, fordi flint er amorft og danner skarpe kanter, når det bearbejdes. Stenalderen sluttede ikke, fordi man løb tør for flint, og tilsvarende var det heller ikke mangel på råstoffer, som gjorde en ende på bronzealderen og jernalderen. Man fik bare andre behov eller opdagede, at man kunne kombinere nogle grundstoffer, så materialerne blev mere velegnede til de varer, man skulle fremstille. Sådan er det også i dag. Virksomhederne søger hele tiden efter specifikke materialeegenskaber og vælger de mineralske råstoffer, som passer bedst til deres produktion, uanset om de fremstiller glas, plastik, piller, maling eller stål.

Der sker også løbende ændringer i produktionen af velkendte varer, og mange af disse ændringer kan føre til efterspørgsel på nye råstoffer.

Produktion af biler er et godt eksempel på dette. Der er blevet produceret biler i mere end 100 år, men kravene til hvad biler skal kunne udvikles hele tiden. De første biler skulle være flotte og så holdbare som muligt. Derfor blev der især brugt råstoffer som jern, krom, træ og læder. Kravene til moderne biler er, at de skal bruge minimal energi, måske skal de være elektriske, og de skal være lette, hurtige, sikre, rustfri og billige. Disse krav dominerer i valget af råstoffer, og derfor er råstofforbruget til nutidens biler primært lette metaller (aluminium og magnesium), rustfrit stål, zink, en lang række specialmetaller til udstødningssystemer (titan, platin og palladium) og til elektriske komponenter (sjældne jordartsmetaller) og vinduesglas. Der bruges også forskellige typer af kompositmaterialer, såsom glasfiber, kulfibre og plastik; i denne gruppe bruges forskellige mineralske råstoffer som fyldstoffer.

VÆRDIKÆDERNE FOR MINERALSKE RÅSTOFFER

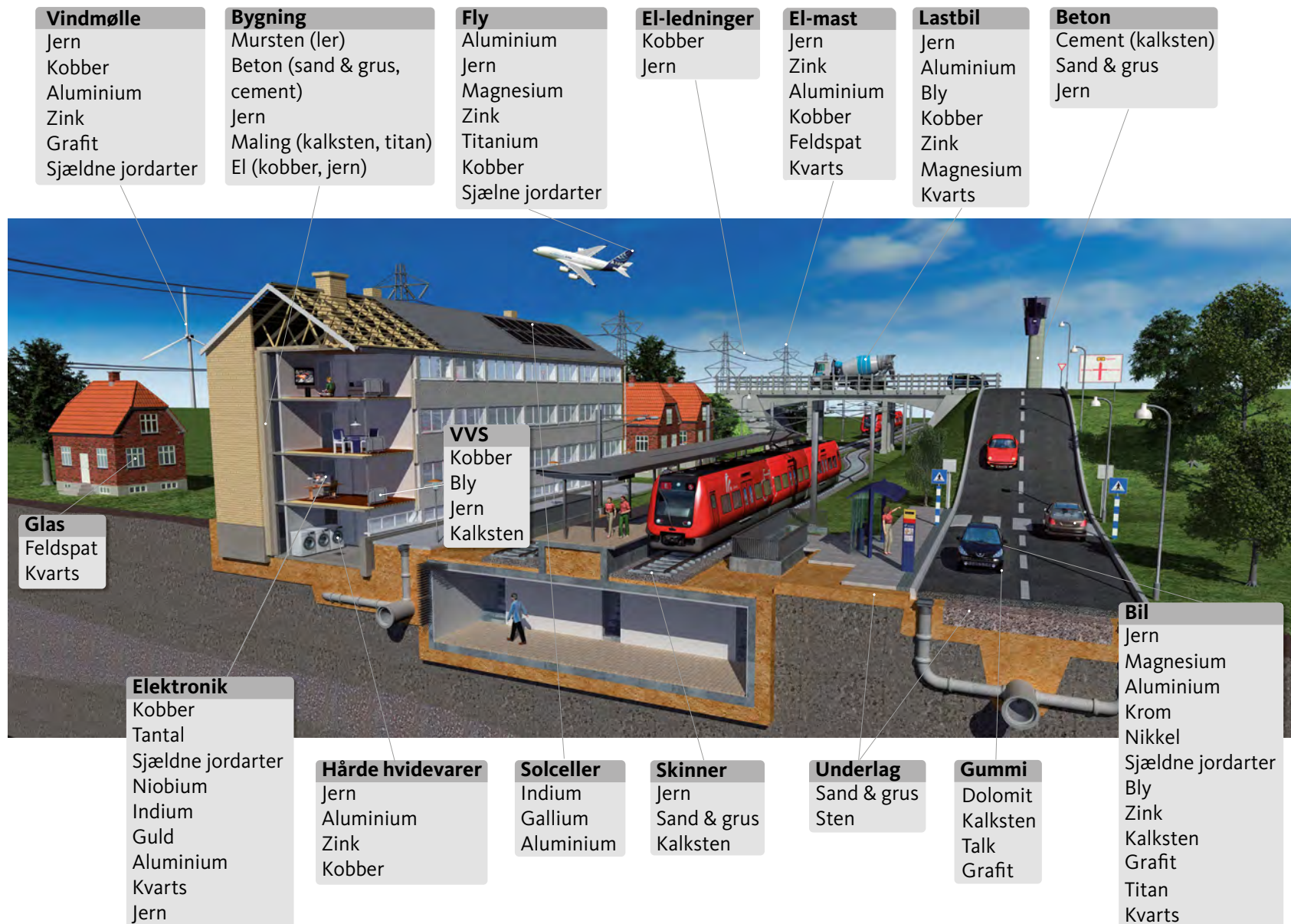
Det korn, der vokser på marken, er råstoffet til brød. Men inden det kan blive til brød, skal råstoffet korn først males til mel, som er en råvare til brødet. Brødet består også af andre råvarer, som gær, salt og sukker, der er

fremstillet fra andre råstoffer som gærceller, urent salt og sukkerroer eller sukkerrør. Når råvarerne er blevet blandet sammen til en dej, som bliver processeret i to trin, hævning og bagning, er der fremstillet et brød, som er blevet til et produkt.

Både råstoffer, råvarer og produkter er varer, som har en pris og kan handles. I praksis skelnes der sjældent skarpt mellem begreberne råstoffer og råvarer, da virksomhederne, der køber råvarerne, vil betragte de råvarer, de køber, som råstoffer til produktionen. Men det er vigtigt at forstå, at der i hvert forarbejdningsstrin sker en ændring af råstoffet/råvaren frem mod et givent produkt. De mineralske råstoffer indgår på helt samme måde i forskellige råvarer og varer i forsyningskæder, som leder frem mod de produkter, vi køber som forbrugere.

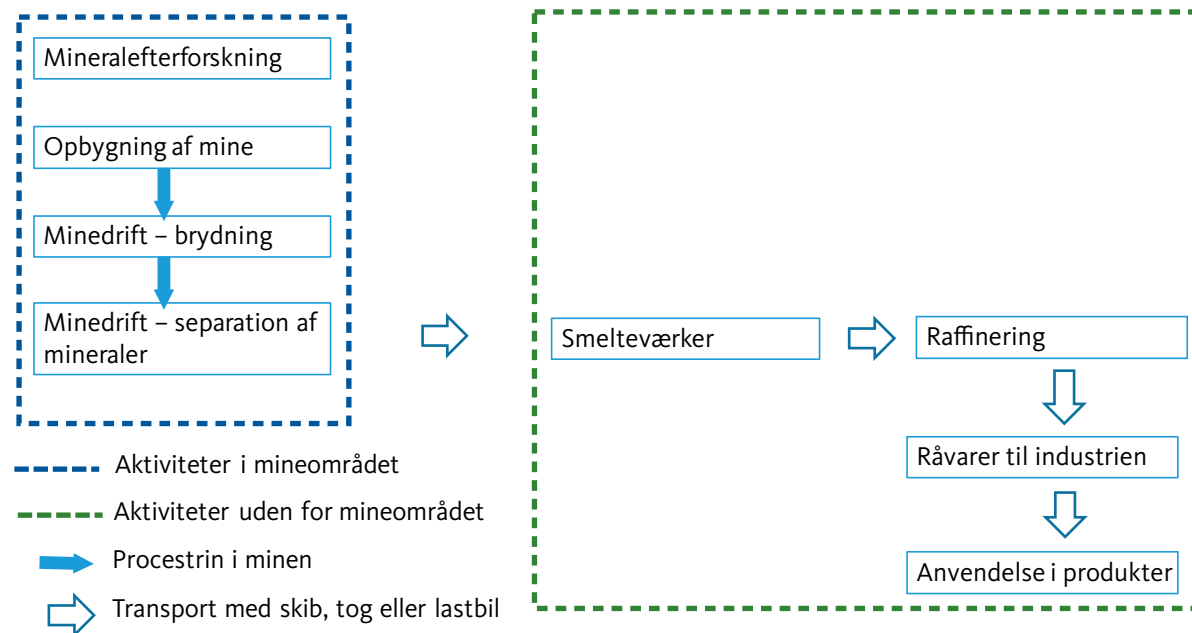
Et eksempel på en vigtig og meget simpel forsyningskæde, hvor der anvendes mineralske råstoffer, er fremstillingen af beton. I Danmark udvinder grusgravene råstofferne sand, grus og sten, som sorteres i forskellige kornstørrelser. Ved denne forarbejdning omdannes råstofferne sand og sten til nogle af de råvarer, som bruges i beton (figur 204. f).

FIGUR 205. Alle samfund har brug for mineralske råstoffer til opbygning af bl.a. boliger, infrastruktur og energiforsyning. Af MiMa (2019) efter Neeb (2005).



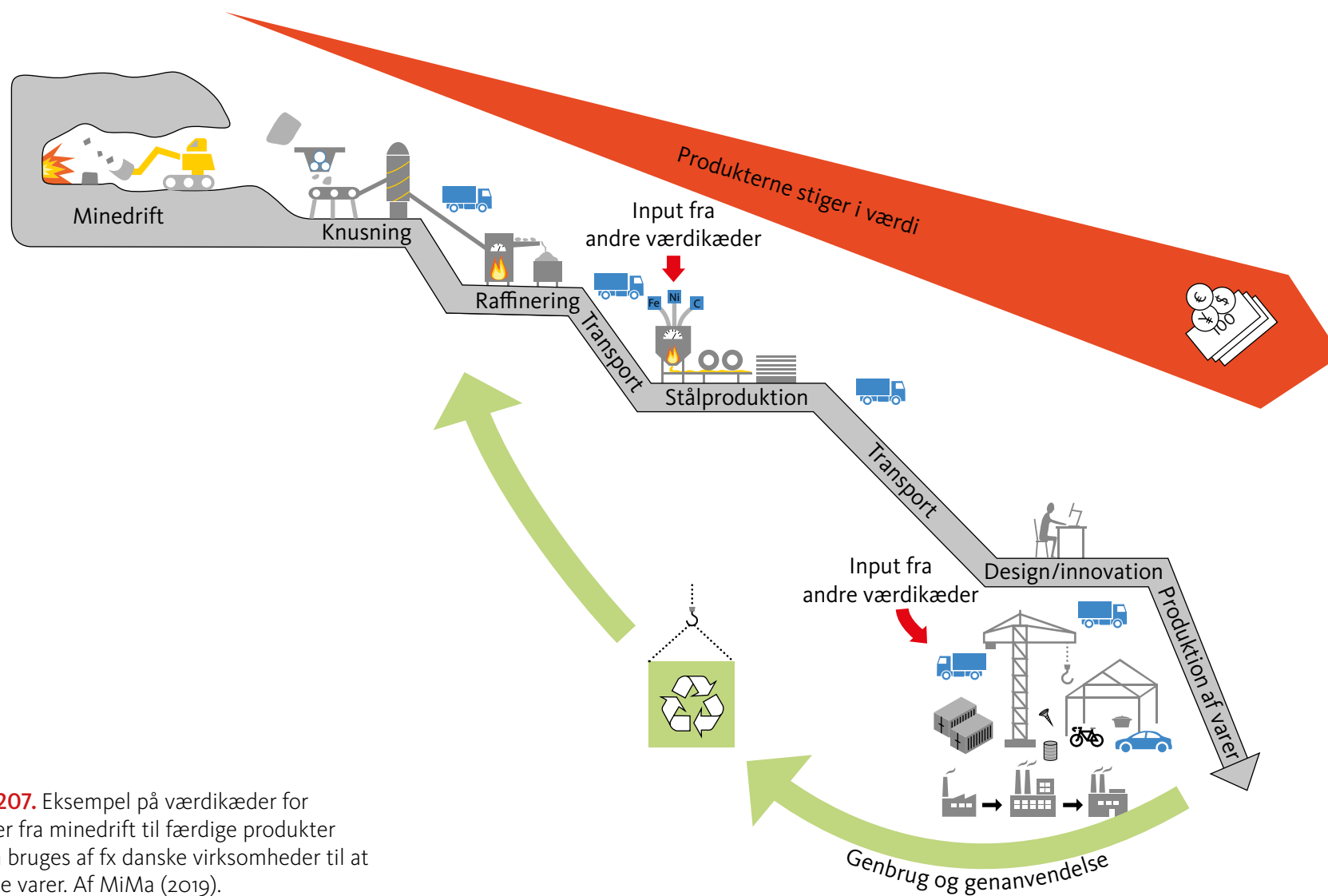
Betonindustrien udgøres af specialiserede virksomheder, som fremstiller forskellige produkter af beton på basis af råvarerne sand, grus og cement. Det kan være i form af flydende beton, som køres ud til byggepladserne, hvor det bruges til støbning, eller færdige betonvarer, som fx byggelementer til huse, rør og fliser. Cement er en anden råvare, som er fremstillet i en forsyningskæde, hvor kridt er det væsentligste mineralske råstof (figur 204. e).

Et andet eksempel er fremstillingen af stål, som er et af samfundets meget vigtige materialer. I dette tilfælde brydes råstoffet jernmalm som første led i forsyningskæden; det er i minen, at jernmalmen processeres til en råvare, som består af et koncentrat af jernholdige mineraler (som lidt forvirrende også kaldes jernmalm eller jernmalmkoncentrat). Det er denne råvare, jernmalmkoncentrat, som stålværkerne køber for at kunne fremstille stål. Men for at fremstille stål skal der også tilsættes andre råvarer, bl.a. metallerne nikkel, krom, vanadium og molybdæn, som kan give stålet særlige egenskaber som fx styrke, eller at det ikke rustet. Alle disse metaller er råvarer, i form af mineralkoncentrater, som er blevet brudt og processeret i



andre miner, inden det bruges i stålværket. En præcis blanding af mineralkoncentrater og jernmalmkoncentrat smeltes ved høje temperaturer, og når stålsmelten har opnået den ønskede kemiske sammensætning, bliver smelten afkølet i plader. Disse plader af råstål udgør nu en ny råvare, som typisk købes af stålvalseværker, som forarbejder råstålet til plader eller rør. Disse produkter skal ikke processeres yderligere men sælges til virksomheder, som bruger stålet i deres

FIGUR 206. Værdikæderne for de mineralske råstoffer starter i minerne, hvor malmen brydes, og mineralkoncentraterne fremstilles. Koncentratet sendes, hvis det er metaller, til smelteværker og efterfølgende til raffinering. De raffinerede produkter blandes måske med andre metaller til legeringer, der eventuelt bliver valset til plader, der måske kan ende som mølletårnet til en vindmølle, som bliver produceret i Danmark og eksporteret til en vindmøllepark i England. Af MiMa (2019).



FIGUR 207. Eksempel på værdikæder for mineraler fra minedrift til færdige produkter som kan bruges af fx danske virksomheder til at fremstille varer. Af MiMa (2019).

produktion, hvad enten det er til køkkenvask, vindmøller eller jernbaneskiner, eller til et af de tusindvis af andre produkter, hvori stål indgår. Fremstillingen af disse ret simple produkter kan kun lade sig gøre, hvis alle de forsyningskæder, som leverer råvarer til stålindustrien, fungerer.

BEGREBET FORSYNINGSKÆDE

Begreberne forsyningskæde og værdikæde bruges ofte synonymt. Men begrebet forsyningskæde udtrykker, hvilke råstoffer der indgår i fremstillingen af et bestemt produkt, og hvorfra de kommer, hvorimod begrebet værdikæde illustrerer, at der for hvert forarbejdningsstrin sker en værditilvækst. Dette er velkendt fra landbruget, hvor kornet på marken, råstoffet, har en lav pris, men når det er høstet og i hus, er prisen steget. Prisen stiger yderligere, hvis kornet formales til mel, og det vil stige yderligere, når melet er brugt til at bage brød.

De første trin i en værdikæde (figur 207) omtales ofte som den øverste del, mens de processer, der sker efterfølgende, er den nedre del i værdikæden. Værdikæder kan også forklare de betingelser en forsynings-

kæde arbejder under, og kan forklare hvor der kan opstå flaskehalse eller mangel på råstoffer og råvarer. Her kan vi forestille os, at alle landmænd fik tilskud til at dyrke hvede til brød, så produktionen af hvede ville stige, og at der kun var få virksomheder, der kunne formale kornet til mel, og samtidig er disse virksomheder måske endda ejet af samme person. Dermed kan virksomheder nede i kæden have stor indflydelse på både priser og produktionshastighed, hvilket kan resultere i forsyningssvigt, selvom der er råstoffer nok. Det kunne også være, at landmændenes tilskud faldt væk, og at de derfor valgte ikke at dyrke hvede, i dette tilfælde er det forhold i den øvre del af kæden, som er begrænsende.

I mineralindustrien er minen eller grusgraven den øverste del af værdikæden, mens de efterfølgende forarbejdningsstrin med fremstillingen af varer og produkter er de nedre dele; i hvert forarbejdningsstrin tilføres en værditilvækst. I eksemplerne med beton og stål tilføjes der flere andre råvarer for at kunne lave de endelige produkter, og disse er derfor involveret i flere forskellige værdikæder. Men der er et indbyrdes afhængighedsforhold mellem alle led i et minerals

'rejse' fra brydning i minen til slutproduktets anvendelse, som kun får denne kæde til at fungere, hvis hvert trin tilfører en værdi til varen.

For de mineralske råstoffers værdikæder sker forarbejdningen fra råstof til råvarer og til sidst til produkter almindeligvis i forskellige virksomheder, som hver især har specialiseret sig i et bestemt forarbejdningsstrin. Ofte findes der flere værdikæder, som omfatter de samme trin; det kan være geografisk adskilt fordi der er behov for at lave de samme produkter flere forskellige steder.

Det gælder fx for beton, glas, rockwool og lignende produkter. Der er simpelthen brug for alle produkterne, og derfor kan der være flere producenter af det samme produkt tæt på hinanden. Til den danske betonproduktion leverer grusgravene typisk råvarerne sand og sten til lokale betonfabrikker. Den flydende beton bruges lokalt, hvorimod byggelementerne transporteres over længere afstande. For at kunne dække behovet i hele Danmark, er der altså flere parallelle betonværdikæder, hvor alle råvarerne kommer fra Danmark. For værdikæderne for stål er sammensætningen af råvarer mere kompleks,

og de har typisk deres oprindelse i mange forskellige lande, inden de som råvarer transporteres til stålværker i fx Europa, for måske at blive anvendt til produktion af biler i Kina, som måske sælges i Sydkorea.

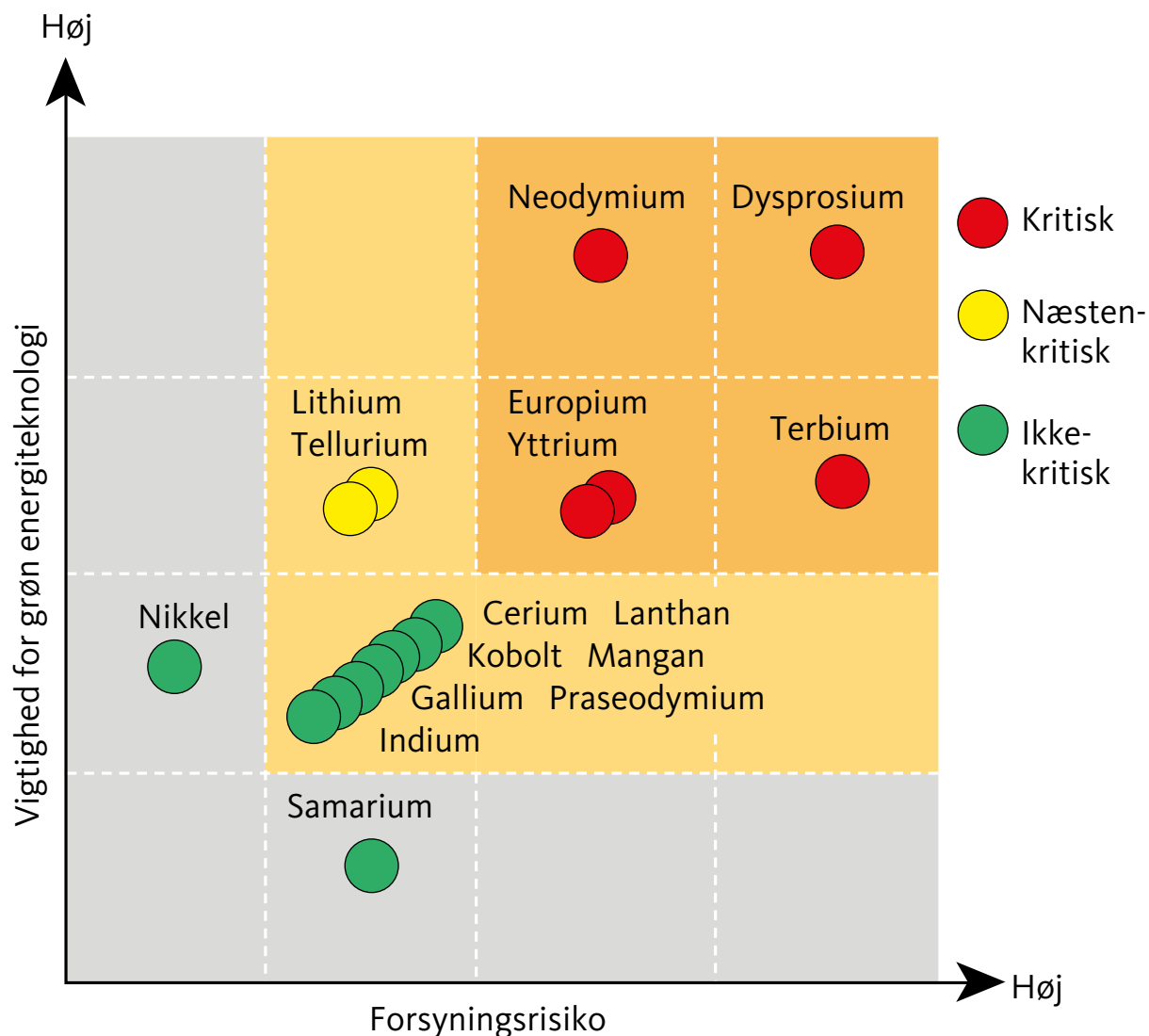
KRITISKE RÅSTOFFER

Flere forhold kan skabe ubalance i værdikæderne for mineralske råstoffer og dermed forårsage forsyningssvigt af vigtige råstoffer. I yderste konsekvens kan det betyde, at vi som forbrugere vil kunne opleve en mangel på varer. Nogle af de vigtigste trusler mod forsyningskædernes balance er knyttet til:

- Lave priser, som kan betyde, at nogle forarbejdningstrin må lukke, fordi de ikke længere er rentable.
- Monopoliseringer af brancher og råstoffer, som ses med Kinas kontrol over værdikæderne for sjældne jordartsmetaller.
- Hurtige teknologiskift som resulterer i en pludselig og stor efterspørgsel af et givent råstof, som mineindustrien ikke kan skaffe med samme hast.

Nogle af de mineralske råstoffers værdikæder er særligt sårbare, hvis der opstår et

FIGUR 208. Nogle af de råstoffer, som er vigtige for den grønne energiomstilling, betragtes som kritiske. Kritiske råstoffer er meget vigtige for industrien, samtidig med at forsyningerne af dem kan være usikre. Det gælder eksempelvis de fire sjældne jordartsmetaller dysprosium, neodmium, europium og terbium. Det gælder ikke samarium, cerium, lanthan og praseodymium, som også tilhører de sjældne jordartsmetaller. Efter Center for Sustainable Systems (2018).



forsyningssvigt, fordi det kan ende med at lukke produktionen af varer, som har stor samfundsøkonomisk betydning. Denne gruppe råstoffer kaldes de kritiske råstoffer, altså råstoffer som både er vigtige for funktioner i samfundet, og som er forbundet med en forsyningsrisiko (figur 208). Danmark kan blive ramt, hvis eksempelvis Vestas ikke kan skaffe sjældne jordartsmetaller til deres produktion af vindmøller, fordi Kina har monopoliseret markedet. Danmark vil også kunne mærke følgevirkningerne, hvis manglende forsyninger af lithium og kobolt førte til, at der ikke kan skaffes batterier til elbiler, elcykler o.l. På grund af de store økonomiske implikationer, som forsyningssvigt af kritiske råstoffer kan have, registrerer EU løbende udviklingen på dette område.

NØGLEBEGREBER

- Forsyningskæde
- Værdikæde
- Råstof
- Råvare
- Vare
- Produkt
- Forarbejdningstrin
- Kritiske råstoffer

REFERENCER

- Center for Sustainable Systems. (2018). *Critical Materials Factsheet* (No. CSS14-15). Center for Sustainable Systems, University of Michigan.
- Neeb, P.-R. (2005). *Mineralressurser i Norge Bergindustrien i 2004* (No. 2005.041). Norges Geologiske Undersøkelse (NGU).
- Rosholm, L. S., Kalvig, P., & Fold, N. (2016). *Råstofforsyning: Fra sand og sten til betonbyg-geri* (No. 2016/2). Videncenter for Mineralske Råstoffer og Materialer (MiMa).
- USGS. (2019). *Mineral Commodity Summaries 2019*. U.S. Geological Survey.

KAPITEL 26



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

JERNMALM TIL STÅL

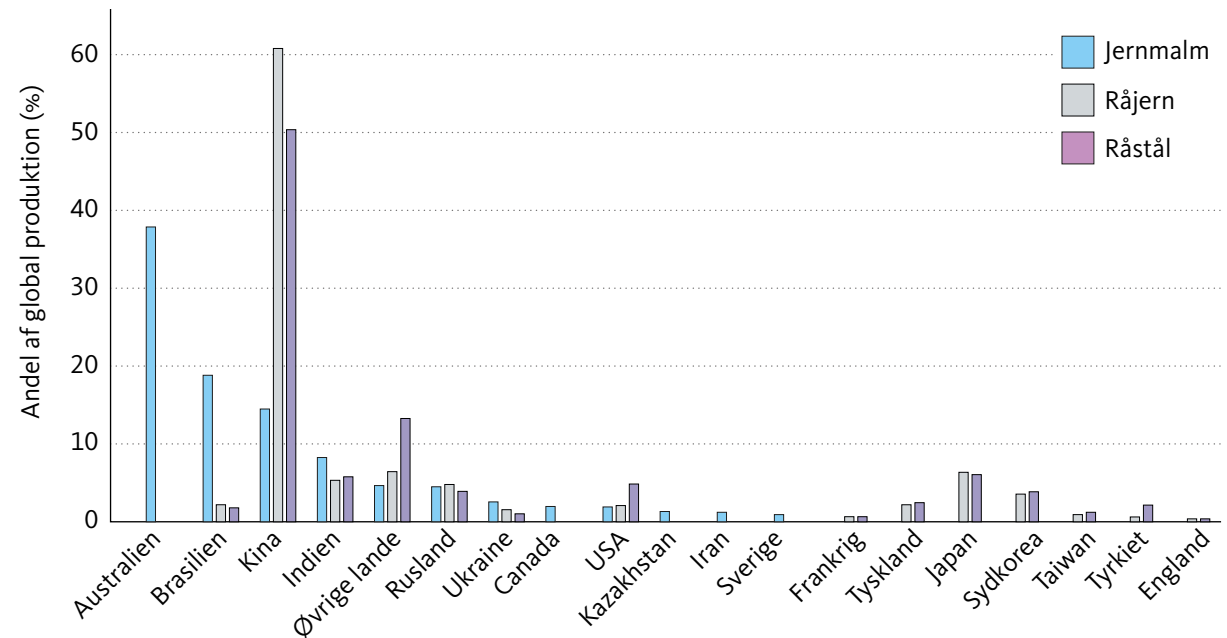
JERNMALM – ET AF DE VIGTIGSTE RÅSTOFFER

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

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

DANNELSE AF JERNMALM FORTÆLLER OM JORDENS UDVIKLING

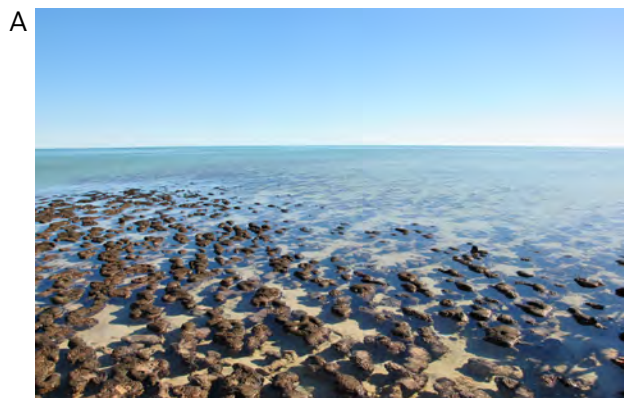
Der findes forskellige typer af jernmalme,



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

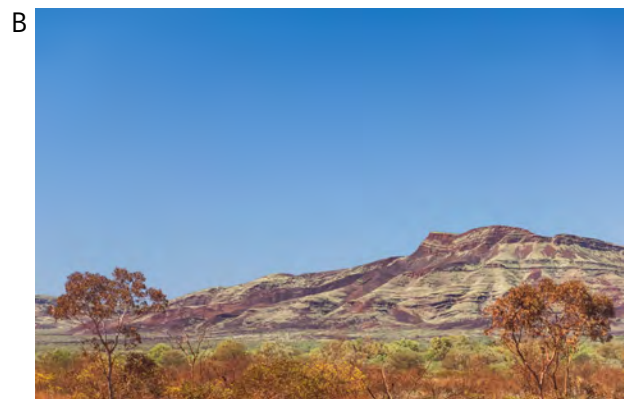
Båndet jernmalm/jernformation eller forkortet til BIF (Banded Iron Formation) er sedimentære bjergarter, som består af jernoxidmineraler (hæmatit, magnetit, goethit) og siliciumrige mineraler. De er udfældet kemisk og danner millimetertynde lag, som ligger ovenpå hinanden og danner tykke sekvenser, der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

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



FIGUR 211. Stromatolitter og BIF i billeder.

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



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

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

Fotos fra Shutterstock.

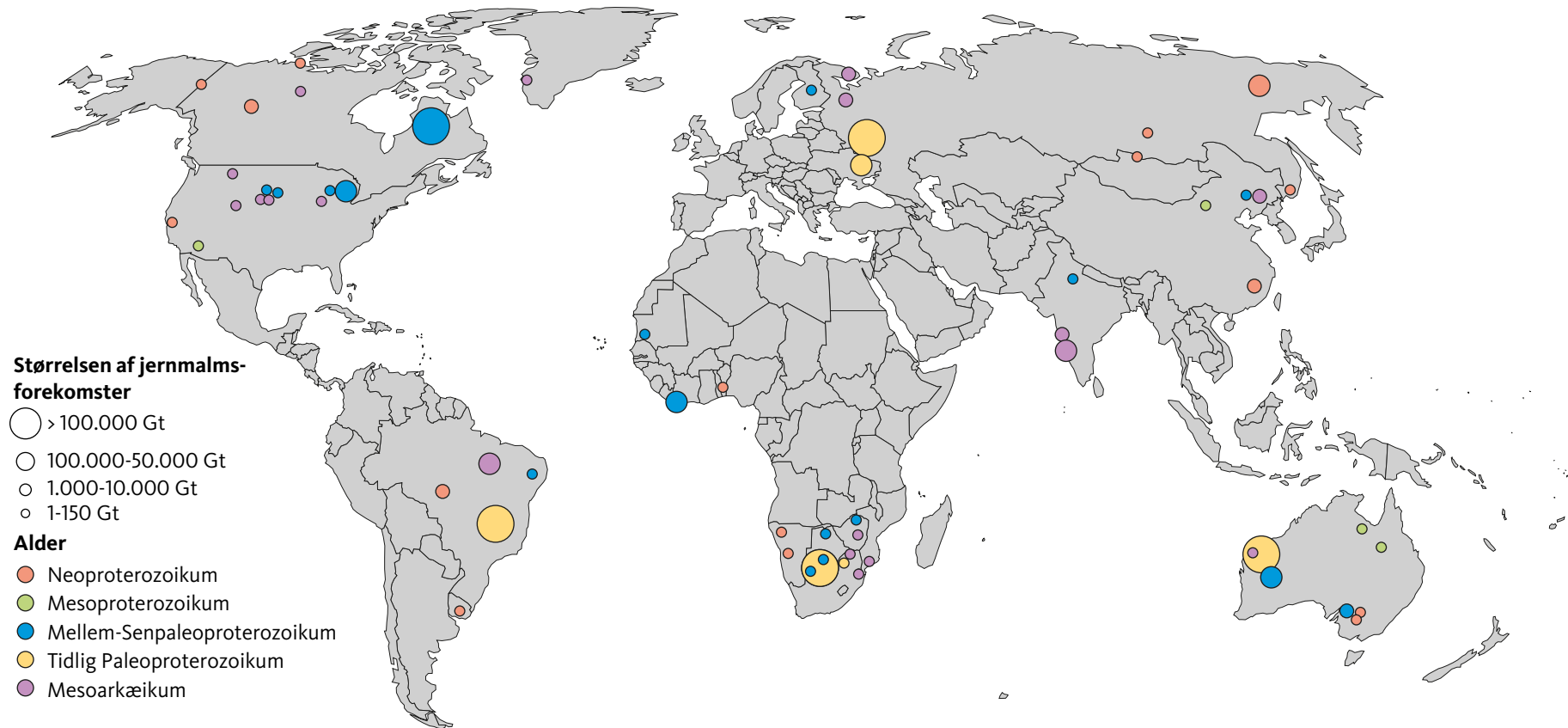


som røde, gule og sorte bånd (figur 211. b, c). BIF indeholder ofte 20-30 % jern, og nogle af dem indeholder også lidt guld.

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

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

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



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

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

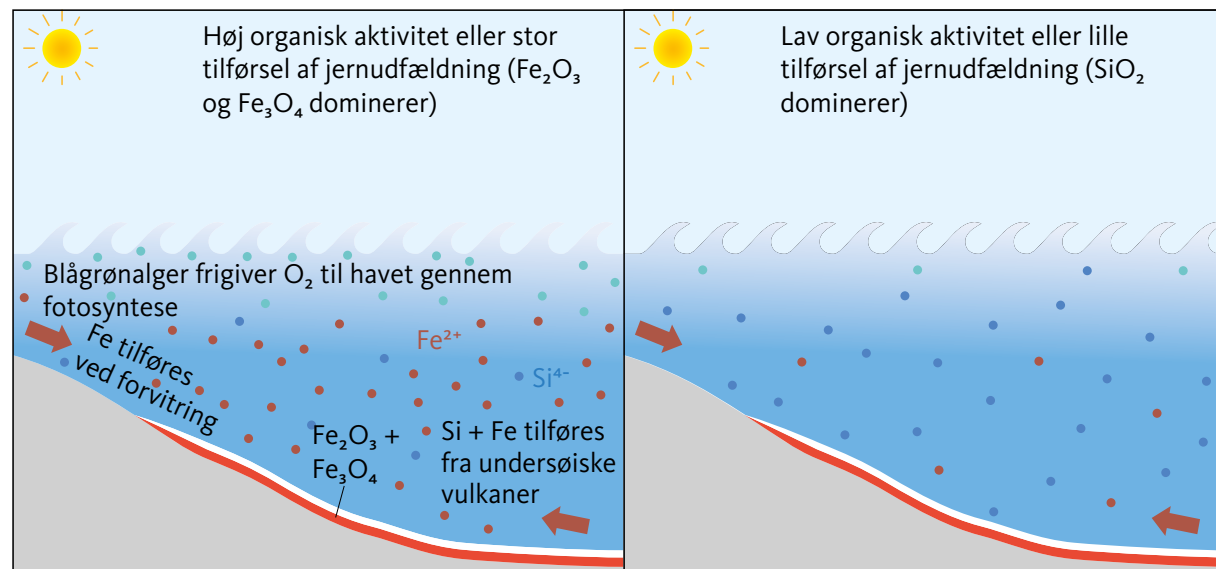
Australien og Brasilien har længe været de to største producenter af jernmalm fra BIF-forekomster, men også Kina, USA og Canada har store produktioner (figur 210).

BIF-FOREKOMSTER I GRØNLAND

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

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

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



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

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

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

ISUA-JERNMALMEN GRØNLAND – EN AF VERDENS ÆLDSTE BJERGARTER

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

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



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

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

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

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

PLANER FOR EN JERNMALMMINE VED ISUA

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

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

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

renses inden det kan udledes.

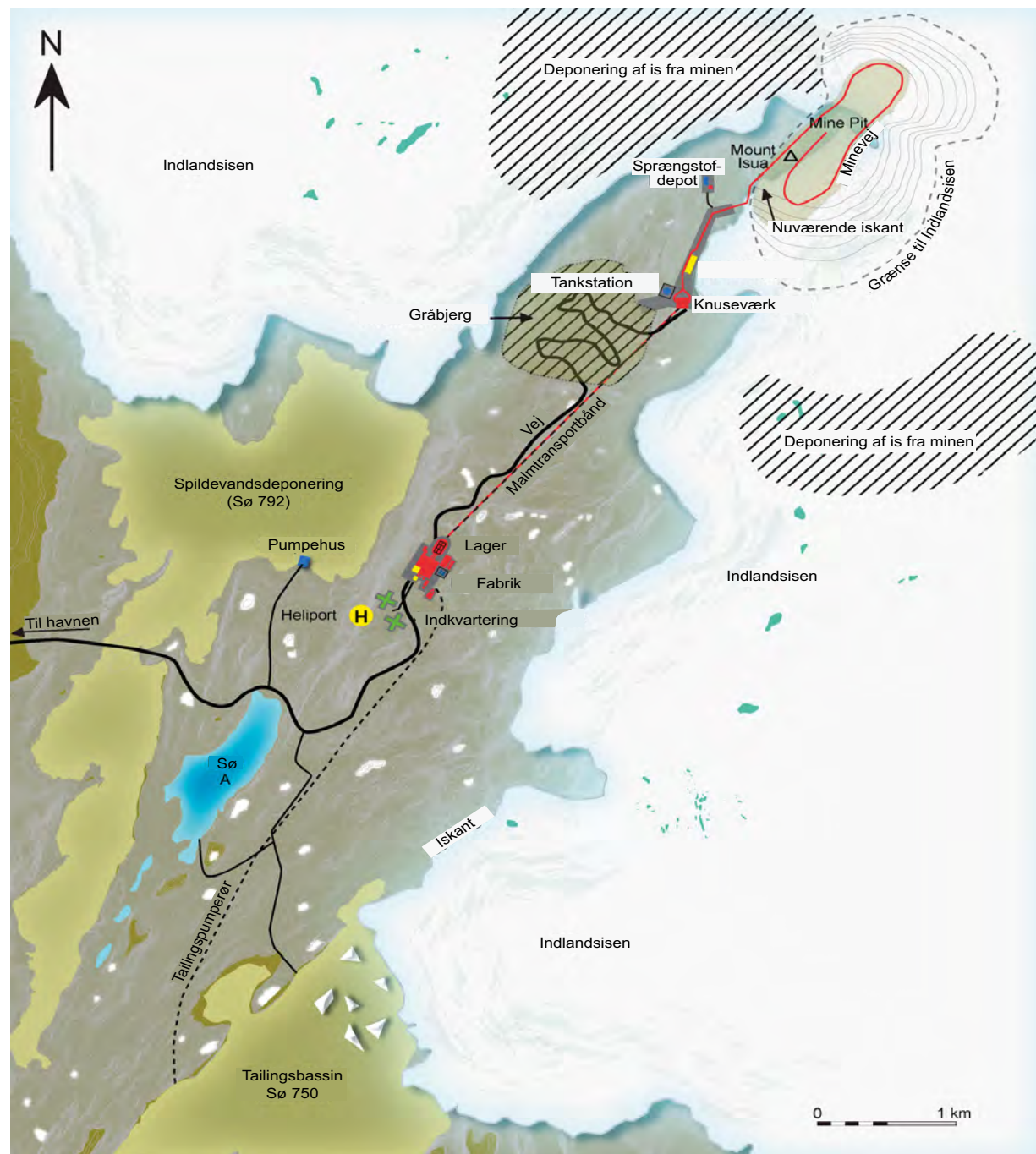
Beregninger foretaget på baggrund af de geofysiske målinger, boringer og analyser af materialet viser, at Isua-forekomstens reserve er 114 mio. ton malm med et gennemsnitligt jernindhold på 37 %. Herudover har selskabets geologer anslået ressourcen til 837 mio. ton jernmalm. Mineselskabet beregnede i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

MILJØUDFORDRINGER FOR ISUA-MINEN

Alle miner har mindst to store miljømæssige udfordringer:

- Udledning af forurenende stoffer til

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



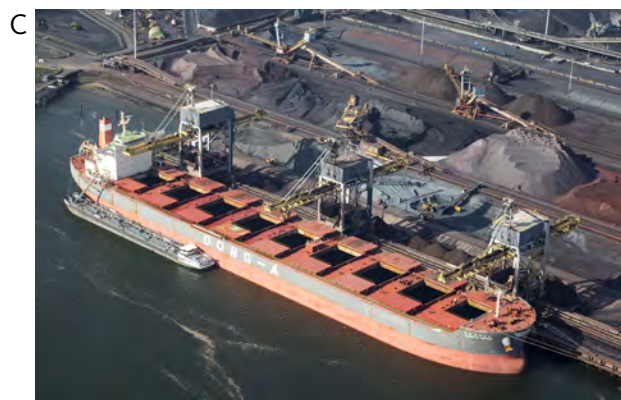
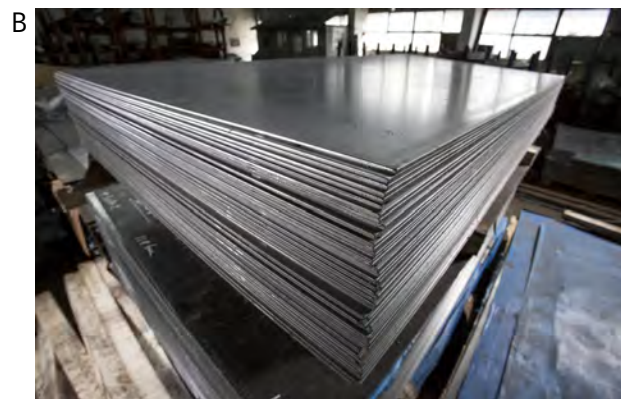


FIGUR 216. Stålproduktion i billeder.

A. Stålproduktion i elektrisk drevne smelteovne.

B. Færdigproducerede stålplader klar til brug i industrien.

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



vandmiljøet og atmosfæren.

- Deponering af tailings.

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

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

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

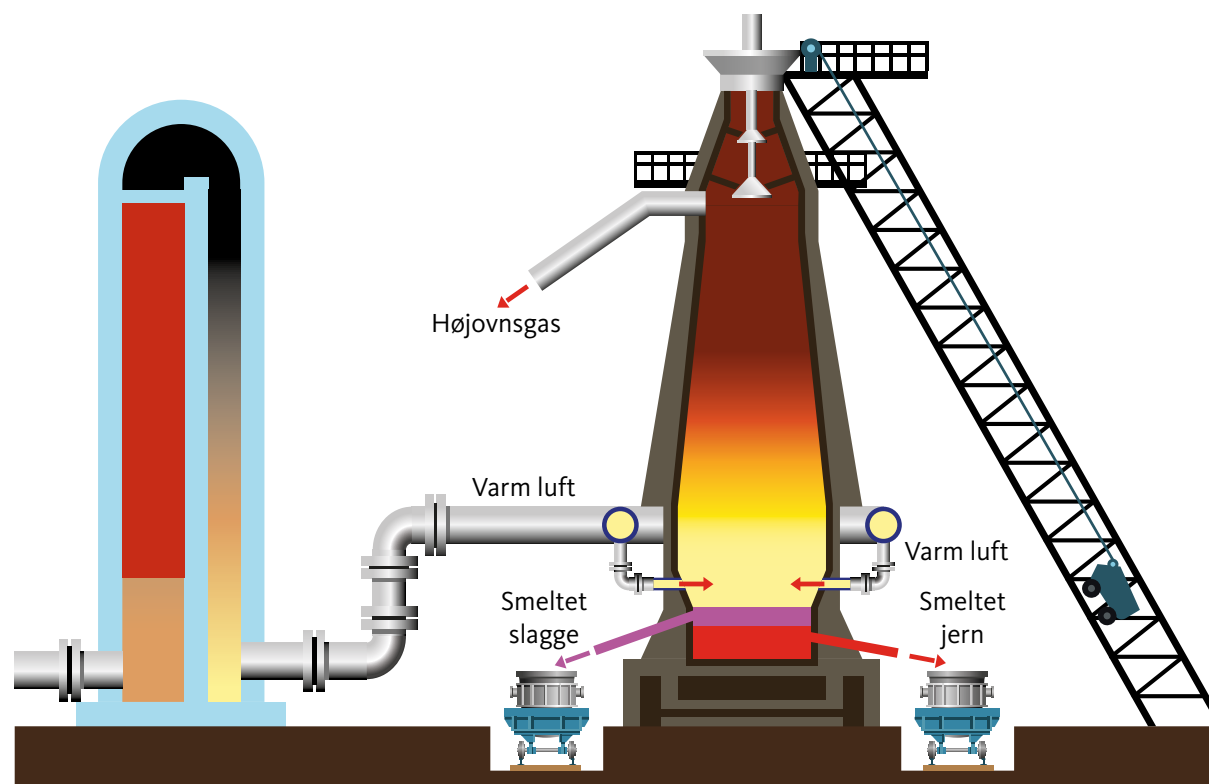
Før myndighederne giver tilladelse til etablering af en ny mine, skal selskabet levere en såkaldt VVM-redegørelse (Viden om Virkninger på Miljøet) med beskrivelse af de mulige miljøpåvirkninger samt detaljerede planer for, hvordan de vil håndtere miljøproblemer i forbindelse med deres konkrete projekt.

FRA JERNMALM TIL STÅL

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

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

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



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

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

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

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

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

LEGERINGSMETALLERNE

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

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

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

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

TRANSPORT AF JERNMALM OG STÅLRÅSTOFFER

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

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

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

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

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

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

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

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

Det kunne også være en stålplade til bilindu-

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

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

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

FREMSTILLING AF STÅL BIDRAGER TIL CO₂-BE- LASTNINGEN

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

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

NØGLEBEGREBER

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

REFERENCER

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

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

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

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

KAPITEL 27



FIGUR 218. Åben grusgrav hvorfra der indvindes sand, grus og knuste sten. Shutterstock.

FRA SAND, STEN OG KALK TIL BETON

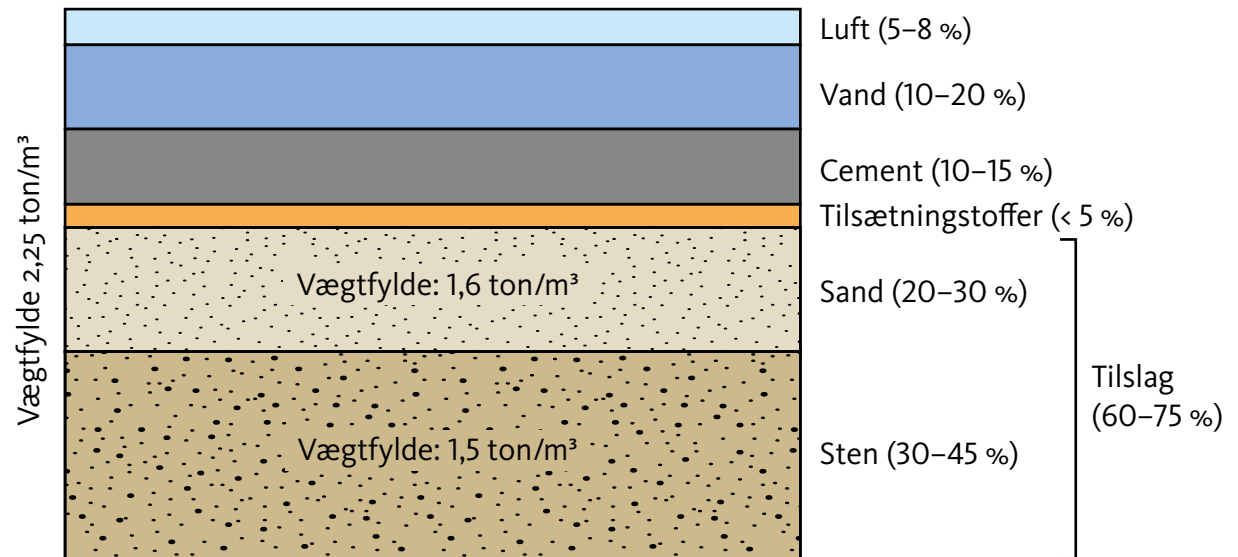
FRA SAND, STEN OG KALK TIL BETON

Beton består af sand, grus og cement samt vand. Beton er det mest anvendte byggemateriale i verden, fordi det som materiale er formbart og kan benyttes til bærende konstruktioner i byggeriet. Desuden kan betons overflade behandles, og der kan opnås en bred vifte af strukturer, mønstre og farvenuancer, så arkitekter og entreprenører kan give betonbyggeri mange forskellige udtryk. Beton kaldes derfor også 'materialet med de mange ansigter'.

Sand og sten som bruges til beton kaldes for tilslagsmaterialer og har den fordel, at de er tilgængelige på det meste af jordkloden. I nogle tilfælde erstattes sand og sten af knuste bjergarter, også kaldet skærver. Ved at bruge enten lokalt produceret eller importeret cement, kan beton fremstilles lokalt de fleste steder i verden. I Danmark bruger vi beton til bygninger, veje og broer, som er lavet af danske råstoffer: sand og sten fra grusgrave og cement udvundet fra kalkgrave primært i Nordjylland.

RÅSTOFFER TIL BETON

Sand, sten, cement og vand anvendes i varie-



rende mængder afhængigt af, hvad betonen skal bruges til. De fleste betontyper er dog lavet ud fra opskriften i figur 219.

TILSLAGSMATERIALERNE

Sand og sten omtales som nævnt tilslagsmaterialerne og udgør normalt 60–75 % af betonens volumen. Man kalder det sand og sten, men reelt er det en blanding af sand, grus og sten i forskellige størrelser; fra mindre end 1 mm og op til omkring 64 mm. For at undgå hulrum i den færdige beton, som kan svække

FIGUR 219. Beton består af sten, sand, cement og vand samt en lille smule tilsætningsstoffer, som giver betonen særlige egenskaber. Efter Rosholm et al. (2016) .

betonens styrke, iblandes sand, grus og sten, da de kan 'pakkes' i betonen, så der bliver færre hulrum, der skal fyldes med det mere finkornede materiale.

Der stilles krav til tilslagsmaterialerne. Det må ikke indeholde hverken flint eller jord (humus), da begge dele nedbryder betonen i løbet af en kort årrække. Strandsand har ofte indhold af klor, som er skadeligt for betonen, og da kornene typisk er af næsten samme størrelse, hvilket gør betonen mindre stærk, er strandsand ikke særligt benyttet. Det er med andre ord nødvendigt at bruge sand- og stenforekomster, som opfylder disse krav.

Danmark har store forekomster af sand, grus og sten, som findes i dele af istidslandska-bet. Mange af disse forekomster udnyttes som grusgrave, hvorfra der indvindes netop sand, grus og sten. Grusgravene ligger over hele landet og leverer tilslagsmaterialer til beton, men fordelingen af sand, grus og sten varierer i forhold til den geologiske historie, og derfor er nogle grusgrave mere attraktive end andre i forhold til betonproduktion. Grusgrave med højt indhold af grus og sten, som især findes i randmoræner og åse, er i høj kurs, da der er relativt underskud af den-

ne type tilslagsmaterialer.

Indvindingen af tilslagsmaterialerne foregår i grusgravene, hvor de graves ud med grave-maskine og efterfølgende sorteres i forskellige kornstørrelser på store mekaniske sigter (figur 220). Da grusgrave almindeligvis kun er i produktion i 10-20 år med relativt små årlige produktioner (set i forhold til metal-miner), bliver der ikke investeret i jernbaner til at transportere produkterne til aftagerne. Transporten fra grusgrave sker næsten udelukkende med lastbiler. I enkelte tilfælde køres tilslagsmaterialerne til en havn, hvorfra det udskibes.

Der findes også tilslagsmaterialer i farvande-ne omkring Danmark, da havbunden mange steder består af oversvømmede istidsland-skaber med moræner, åse og bakkeøer. Denne type forekomster udnyttes også, da myndighederne har godkendt, at udvinding kan ske i bestemte afgrænsede områder. Råstofferne i disse 'hav-grusgrave' udvindes ved hjælp af mindre specialskibe, ofte omtalt som sandsugere, udstyret med en pum-pe, så sand, grus og sten kan suges op fra havbunden (figur 220. b). Skibene sorterer materialerne under oppumpningen, hvoref-

ter materialerne sejles til specielle havne-pladser, hvorfra det kan videredistribueres til aftagerne med lastbil eller skib.

Sand, grus og sten udgør den klart største mængde af de danske råstoffer, men det er kun en mindre del, der bruges til beton, den største mængde benyttes som underlag til veje og bygninger, hvor der stilles færre krav til materialerne. I 2015 blev der indvundet i alt 32,3 mio. m³ sand, grus og sten. Heraf blev 76 % indvundet på land, mens de resterende 24 % blev indvundet fra tildelte områder i de danske farvande og losset i forskellige danske havne.

Ved enkelte specielle bygningsopgaver hvor der ønskes en særlig holdbar beton, bliver tilslagsmaterialerne sand og sten erstattet af knuste bjergarter, ofte omtalt som skærver. Der har været en lille produktion af skærver fra Bornholms granitter, men ellers importeres skærver primært fra Norge.

Langt fra alle forekomster af sand og sten kan opfylde kravene til tilslagsmaterialer til beton, og entreprenørerne, der har retten til at indvinde, undersøger hele tiden, hvor de kan grave i fremtiden. Men ofte kan egnede områder være udlagt til andre formål, eller

FIGUR 220. Betonproduktion i billeder.

A. Udslibning af cement fra Aalborg Portlands cementfabrik ved Limfjorden.

B. Kalkbrud på Stevns har været anvendt til både læsket kalk og cement.

C. Betonelementer til metrobyggeri i København.

D. Sand og grus må transportes over store afstande fra grusgrave til byområder. I Europa foregår det mange steder med flodpram som her i Tyskland.

E. Knust beton genanvendes i ny beton, hvor det kan erstatte grus og sten og dermed spare ressourcer.

F. Lastbil henter sten i en grusgrav. I Danmark transporteres langt hovedparten af sten og grus med lastbiler fra grusgravene til betonfabrikkerne.

Fotos fra Shutterstock.

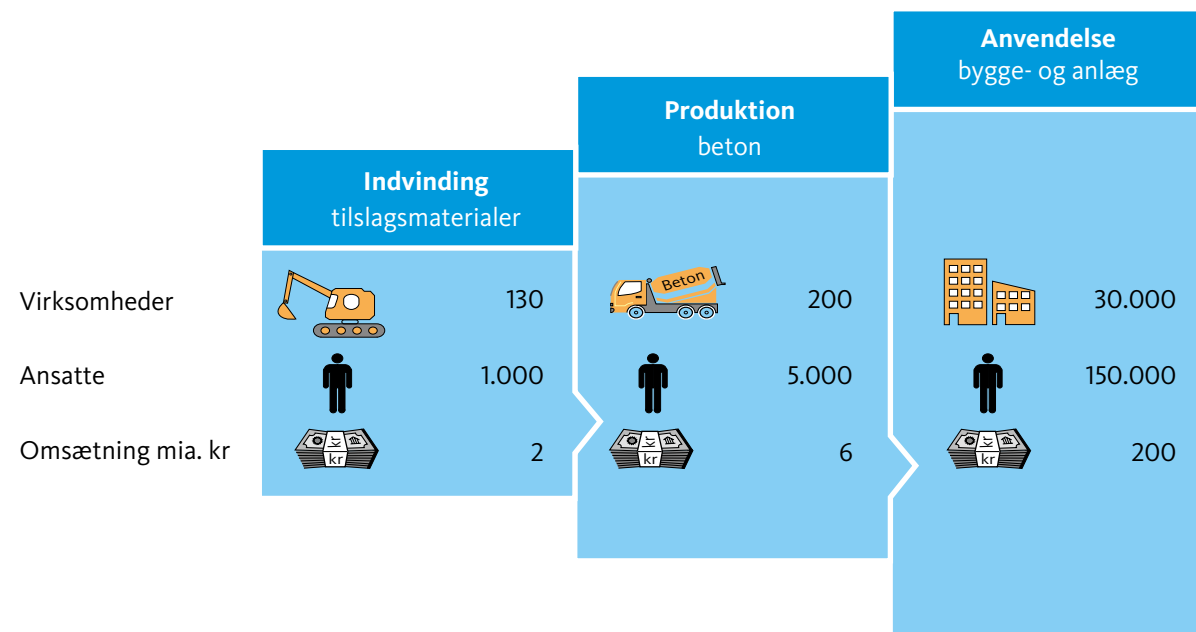


jordejeren ønsker ikke en grusgrav på sin jord, ligesom fiskere kan være imod, at der suges tilslagsmaterialer op fra områder, hvor de fisker. Samlet betyder det, at indvinding af tilslagsmaterialerne er udfordret af både miljøpåvirkninger og af konkurrencen om landområderne, som måske bruges til landbrug, veje, byer og skove. Samtidig påvirkes indvindingen af NIMBY-fænomenet (efter engelsk 'Not In My Back Yard'), som betyder, at borgere peger på en række lokale forhold, der gør, at råstofindvindingen ikke lige skal foregå, der hvor de bor.

Både grusgravning på land og indvinding af marine tilslagsmaterialer påvirker miljøet. I grusgravene er det særligt støj og støv, som generer de omkringboende, og visse steder kan indvindingen forstyrre grundvandet. Indvinding af de marine tilslagsmaterialer kan ødelægge bundforhold for fisk og fauna.

CEMENT

Cement laves af råstofferne kalk og ler i forholdet 3:1. Kalken og leret er først blevet blandet og brændt i en roterende rørovn, hvor kalk og ler langsomt føres fremad, så det er færdigbrændt, når det er kommet



igennem rørovn. Efter brændingen er blandingen blevet til små klumper, som bliver knust til et gråligt pulver, som er cement.

I Danmarks undergrund er der store aflejringer af kalk- og kridtholdige bjergarter. I den østlige del af Sjælland og i Limfjordsområdet i Nordjylland er disse kalkbjergarterne blottet. Kalken i disse områder er igennem mange år blevet udnyttet til både landbrugs-kalk og til fremstilling af cement. I dag er

FIGUR 221. Forsyningskæde for beton. Værdien af produkterne fra udgravning af råstofferne til den færdige beton øges væsentligt, og råstofferne skaber arbejdspladser. Efter Rosholm et al. (2016).

Aalborg Portland den eneste cementfabrik i Danmark, og fabrikken får alle deres kalkråstoffer fra egne kalkgrave i nærheden af fabrikken (figur 220. c).

FRA RÅSTOFFER TIL BETON

I Danmark består en meget stor del nybyggeri af samlesæt af betonelementer, som er fremstillet på en betonvarefabrik (figur 220. d). Disse betonvarefabrikker fremstiller skræddersyede elementer af vægge, facader og gulve til nybyggeri.

Betonvarefabrikkerne køber deres tilslagsmaterialer fra enten grusgrave på land eller i havet eller fra en havn. Tilslagsmaterialerne transporteres til fabrikken, hvor det bliver blandet med cement, vand og tilsætningsstoffer i forhold, som passer til det, der skal fremstilles. Betonblandingen hældes i støbeforme med de mål, som arkitekter og ingeniører har valgt. Når betonen er størket i formen, køres elementerne, oftest på specielle lastbiler, ud til byggepladserne, hvor de bliver monteret og danner skelettet i bygninger. I mange tilfælde fremstilles disse elementer i det østlige Jylland, hvor der er mange velegnede grusgrave, men betonele-

menterne bruges i byer i hele Danmark.

Til byggeopgaver bruges også beton i flydende form. Til sådanne opgaver har betonfabrikkerne blandet betonen, så styrke og flydeevne passer præcis til opgaven. Betonen bliver bragt til byggepladser af specielle lastbiler, som har monteret en roterende beholder; på byggepladsen kan lastbilen pumpe betonen hen til de områder i byggeriet, hvor den skal bruges.

Hver gang der sker en forarbejdning af de råstoffer, der indgår i beton, tilføjes produktet en højere værdi. Det gælder fx når sand og grus er gravet op og sorteret, eller når kalken er gravet op og brændt til cement, og igen når disse råstoffer er blandet sammen til produktet beton. Værdien stiger yderligere, når beton blive brugt til fremstilling af betonelementer.

Forarbejdning af råstoffer giver også arbejdspladser. I grusgravene og på de sandsugere som henter sand og grus i de danske farvande, er der tale om forholdsvis få beskæftigede, men antallet af beskæftigede er stigende i de næste led i forsyningskæden (figur 221).

BETON OG CO₂-BELASTNINGEN

Fremstilling af cement er meget energi-krævende, og da cement bruges i store mængder (ca. 4,7 mia. ton i 2018) til beton over hele verden, er miljøaftrykket af beton ganske betydelig.

Dansk Betonforening har beregnet, at CO₂-udledningen fra cementproduktion udgør ca. 5 % af verdens totale CO₂-udledning. Til gengæld har betonkonstruktioner en meget lang levetid, og vurderes CO₂-belastningen over betonbyggeriets levetid, er miljøbelastningen for beton relativ lille.

Den geografiske tilgængelighed af råstofferne betyder, at de nogle gange skal transporteres over store afstande, hvilket bidrager til byggeriets miljøbelastning.

NØGLEBEGREBER

- Beton
- Cement
- Kalk
- NIMBY – Not In My Back Yard
- Skærver
- Tilslagsmateriale

REFERENCER

Rosholm, L. S., Kalvig, P., & Fold, N. (2016).
Råstofforsyning: Fra sand og sten til betonbyg-
geri (Nr. 2016/2). Videntcenter for Mineralske
Råstoffer og Materialer (MiMa).

KAPITEL 28



FIGUR 222. Den lagdelte syenit (magmatisk bjergart) ved Kringlerne i Sydgrønland set mod syd. Dette antages at være verdens største forekomst af sjældne jordartsmetaller. Et mineselskab undersøger, om det kan betale sig at bryde forekomsten. Den har fået navnet kringlerne, fordi erosion af lagene danner forbundne cirkler, der ligner kringler. Af Per Kalvig (2014).

SJÆLDNE JORDARTSMETALLER

HVORFOR HEDDER DET SJÆLDNE JORDARTS-METALLER?

Betegnelsen 'sjældne jordartsmetaller' er et paradoks, fordi de hverken er sjældne eller jordarter. Paradokset skyldes, at de første opdagelser blev gjort i 1787, hvor det lykkedes at påvise yttrium, som skulle vise sig at blive det første af de 17 grundstoffer, som i dag går under betegnelsen sjældne jordartsmetaller (figur 223).

Da yttrium ikke var påvist tidligere, mente man, at det måtte være et sjældent grundstof. Begrebet jordarter blev dengang brugt som betegnelse for de mindste bestanddele i naturen, altså grundstoffer. I dag ved man, at de ikke er sjældne, omend de kun findes i små mængder i Jordens skorpe. Betegnelsen sjældne jordartsmetaller har imidlertid holdt ved og forkortes ofte blot til 'sjældne jordarter', som dermed udelader den vigtigste del af navnet, nemlig metaller. Mange bruger desuden den engelske forkortelse REE, som står for 'Rare Earth Elements'.

Kemikere definerer de sjældne jordartsmetaller som gruppen lanthaniderne sammen med overgangsmetallerne scandium og yttrium, og tilsammen udgør de 17 forskellige

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Tb	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

grundstoffer i det periodiske system. Kemisk ligner de enkelte sjældne jordartsmetaller hinanden med næsten samme ionradius, de fleste er trivalente, og fælles for lanthaniderne er bl.a., at de er magnetiske. Det gennemsnitlige indhold i Jordens skorpe er omkring 9 g/ton bjergart. Men der er meget store forskelle mellem de enkelte jordartsmetaller: cerium, som er det mest almindelige i gruppen, udgør ca. 43 g/ton, hvorimod thulium og lutetium kun findes i en koncentration

FIGUR 223. De sjældne jordartsmetaller omfatter lanthaniderne (grundstofferne 57-71) samt overgangsmetallerne scandium (grundstof 21) og yttrium (grundstof 37). Af MiMa (2019).

på ca. 0,3 g/ton. Til sammenligning er skorpens gennemsnitlige indhold af kobber og bly henholdsvis 27 og 11 g/ton og er altså mere sjældne end cerium. Til gengæld er både guld og sølv med gennemsnitlige koncentrationer på henholdsvis 0,006 g/ton og 0,07 g/ton mere sjældne end de sjældneste sjældne jordartsmetaller. Men da guld og sølv let opkoncentreres under geologiske processer, findes der mange forekomster, og da de kulturhistorisk og økonomisk har spillet en stor rolle, er de blevet til en del af vores hverdag. Sådan kan det også blive med de sjældne jordartsmetaller.

Den industrielle anvendelse af sjældne jordartsmetaller begyndte allerede i 1884, hvor man med udgangspunkt i råstoffer fra Sverige fandt ud af at bruge lanthan og yttrium til fremstilling af glødelamper. Dette blev også starten på efterforskningen af forekomster af sjældne jordartsmetaller. Brydning af monazit, som er et af de mineraler der indeholder sjældne jordartsmetaller, begyndte i 1887 i USA og Brasilien og i Indien i 1911, men der skulle gå næsten 100 år, inden der for alvor kom gang i mineralefterforskningen af monazit. Det skete nemlig først i 2011, da verden erfarede, at priserne pludseligt steg

voldsomt, fordi Kina næsten havde opnået monopolstatus på alle led i værdikæderne for sjældne jordartsmetaller og selv kunne bestemme priserne.

SJÆLDNE JORDARTSMETALLER ER VIGTIGE TIL DEN GRØNNE OMSTILLING

De sjældne jordartsmetaller bruges sammen med andre grundstoffer til materialer, som bruges i computerskærme, hukommelseskort i smartphones, linser i kameraer og i magneter til elektromotorer i biler og vindmøller (figur 224).

De sjældne jordartsmetaller indgår også i mange af de materialer, der bruges til den grønne omstilling, og de er derfor meget vigtige råstoffer. Selv om de sjældne jordartsmetaller ligner hinanden kemisk og fysisk, så er der små fysiske forskelle mellem deres egenskaber, fx graden af magnetisme og smeltepunkt. Dette gør, at nogle af de sjældne jordartsmetaller er efterspurgt til ét formål, mens andre bruges til noget andet. Neodymium, praseodymium og dysprosium bruges eksempelvis til at lave særligt stærke magneter; lanthan og cerium bruges i katalysatorer, mens yttrium især bruges til frem-

stilling af LED-lys. Der findes ingen andre grundstoffer, som kan give præcis de samme egenskaber som de sjældne jordartsmetaller, men nogle af dem kan indbyrdes erstatte hinanden.

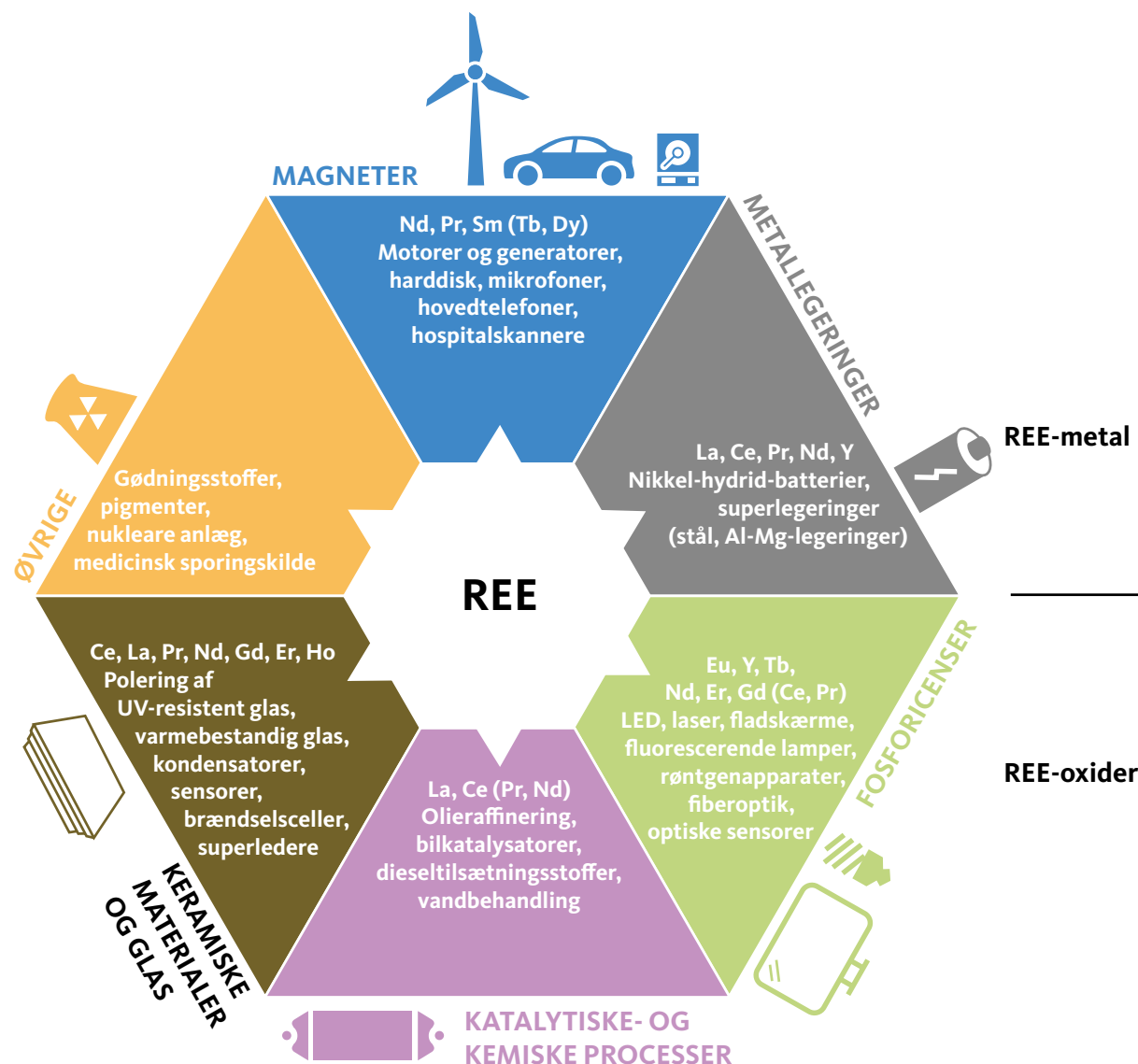
En stor del af de sjældne jordartsmetaller bruges til fremstilling af stærke permanente magneter. Magneter bruges til mange forskellige formål, men især magneter til dynamoerne i vindmøller bruger store mængder sjældne jordartsmetaller, fordi tilsætningen af sjældne jordartsmetaller betyder, at man kan lave mindre magneter, der har samme styrke som store traditionelle magneter. De lettere magneter gør det nemmere at løfte møllehuset med dynamoen op og montere det på toppen af mølletårnene. Men der bruges også store mængder magneter i biler. I almindelige biler sidder der omkring 70 små magneter, fortrinsvis placeret i små elektromotorer, der bl.a. bruges til at drive viskerblade, åbne vinduer, stille sidespejle, skubbe sæderne frem og tilbage, dreje hjulene så det er lettere at styre, få højtalere til at spille og til power-steering. Og igen, fabrikanterne vil hellere have små kraftige magneter end større og/eller svagere magneter. I en almindelig diesel- eller benzindre-

vet bil bruges der typisk omkring 0,5 kg sjældne jordartsmetaller, mens der i el- og hybridbiler bruges store magneter til elmotoren, så det samlede indhold er omkring 5 kg. Men sjældne jordartsmetaller bruges ikke kun til magneter i bilerne; det bruges også til Li-ion-batterier, som bruges i eldrevne biler. Da markedet for elbiler vokser hurtigt vokser forbruget af sjældne jordartsmetaller også meget hurtigt.

FORSYNINGSKÆDEN FRA MINE TIL MOBIL

Minerne er det første led i forsyningskæden af sjældne jordartsmetaller. I minerne brydes de bjergarter, som indeholder de sjældne jordartsmetal-mineraler (figur 225). Mineselskabet behandler bjergarten på en sådan måde, at de kan fremstille et produkt, der kun består af mineralet med de sjældne jordartsmetaller, som sælges til virksomheder, der er specialiserede i at frigøre metallerne fra mineralet. Det sker typisk ved at mineralet opløses i en syre, og alle 16 sjældne jordartsmetaller (promethium er radioaktiv og henfalder, derfor kun 16 og ikke 17 grundstoffer) findes derfor først på væskeform. Inden de kan bruges, skal væsken behandles, så de enkelte grundstoffer adskil-

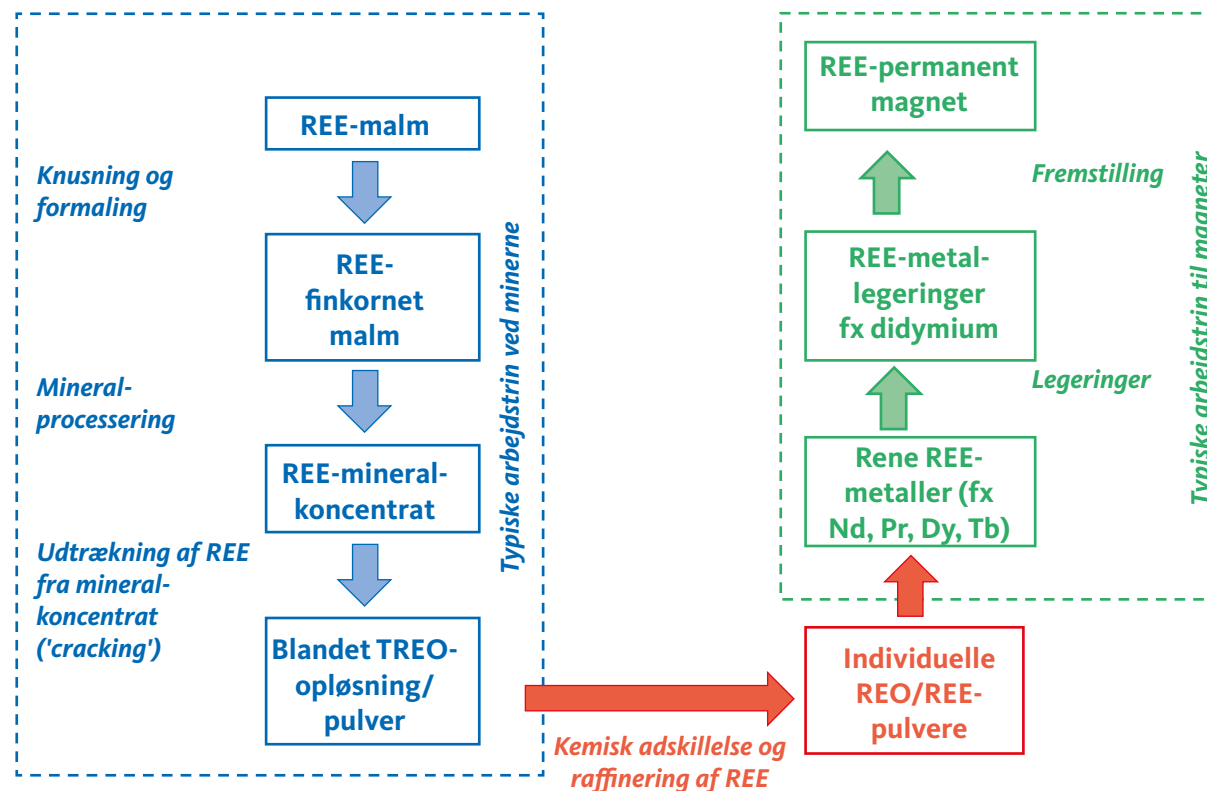
FIGUR 224. Oversigt over de seks vigtigste områder som bruger sjældne jordartsmetaller. Efter EURARE (2017).



les fra hinanden. Da de sjældne jordartsmetaller kemisk og fysisk har store ligheder, er det en teknisk kompliceret proces, som kun få virksomheder i verden kan udføre; Kina er helt dominerende på dette område. Man anvender hovedsagelig en teknik, som kaldes ion-bytter-metoden. Efter adskillelsen er der i princippet 16 forskellige halvfabrikata, som sælges videre til virksomheder, som har specialiseret sig i at raffinere og blande disse halvfabrikata til produkter, som kan bruges industrielt. Hver type industri har helt specifikke krav til metallernes kemiske sammensætning afhængig af, hvilke produkter de skal indgå i. Nogle industrier skal bruge de sjældne jordartsmetaller på en form, hvor de er bundet til karbonat; til andre formål skal de være bundet til klor, mens produkterne skal være helt rene metaller til magneter. Kina har opbygget en industri, som er specialiseret i disse produkter, og Kina kontrollerer det globale marked for sjældne jordartsmetaller.

HVAD MED MILJØET?

Fremstilling af råstoffer til grønne energiteknologier er ikke i sig selv 'grønt' eller bæredygtigt. Det gælder også produktionen af



FIGUR 225. Principdiagram for de forarbejdningstrin som sjældne jordartsmetal-mineraler skal igennem for at blive til de råvarer, som industrien efterspørger.

Den blå del viser de trin, som typisk udføres ved minen, mens de røde og grønne dele beskriver processer, som oftest udføres i Kina. Hver af de grønne kasser udføres af virksomheder, som har specialiseret sig i netop disse processtrin.

Forklaring: REE = Rare Earth Elements, REO = Rare Earth Oxides og TREO = Total Rare Earth Oxides. Efter Machacek & Kalvig (2017).

råstoffer med sjældne jordartsmetaller, hvor især følgende forhold belaster miljøet:

I lighed med fremstilling af mange andre mineraler skal der bruges meget energi til fremstilling af de mange forskellige sjældne jordarts-produkter, både til udvinding og raffinering. Der er desuden et betydeligt vandforbrug. De mineralforekomster, som indeholder sjældne jordartsmetaller, indeholder ofte også uran og/eller thorium. Begge er radioaktive grundstoffer, der kan give anledning til miljøproblemer for de mennesker, der arbejder med brydning og forarbejdning af mineralerne og for mennesker og dyr i nærheden af minen og forarbejdningsanlæggene.

Der er særligt store miljøproblemer knyttet til udvinding af sjældne jordartsmetaller fra den type af forekomster, hvor de er bundet til lermineralers overflade. Denne type kaldes for ion-adsorptions-forekomster og findes især i Kina. Miljøbelastningen skyldes primært metoden, hvorved de sjældne jordartsmetaller udvindes: typisk er der tale om småskala-minearbejdere, som hælder store mængder lud ud over en forekomst; herved frigøres de sjældne jordartsmetaller

fra lermineralerne, og man indsamler efterfølgende væsken. Men meget lud trænger ned og forurener undergrunden. Kina er i gang med at stramme op på miljøforholdene for denne produktionsform.

Sjældne jordartsmetaller er væsentlige for omstilling til vedvarende energi og dermed for at reducere CO₂-udledningen. Men under fremstillingen af magneter og batterier, som indeholder betydelige mængder sjældne jordartsmetaller, uledes også CO₂. Omfanget af denne CO₂-udledning varierer både fra fabrik til fabrik, men især imellem de forskellige typer af produkter. Kinesiske forskere har beregnet udledningen til at være mellem 165-672 kg CO₂ pr. ton produceret REE-metal.

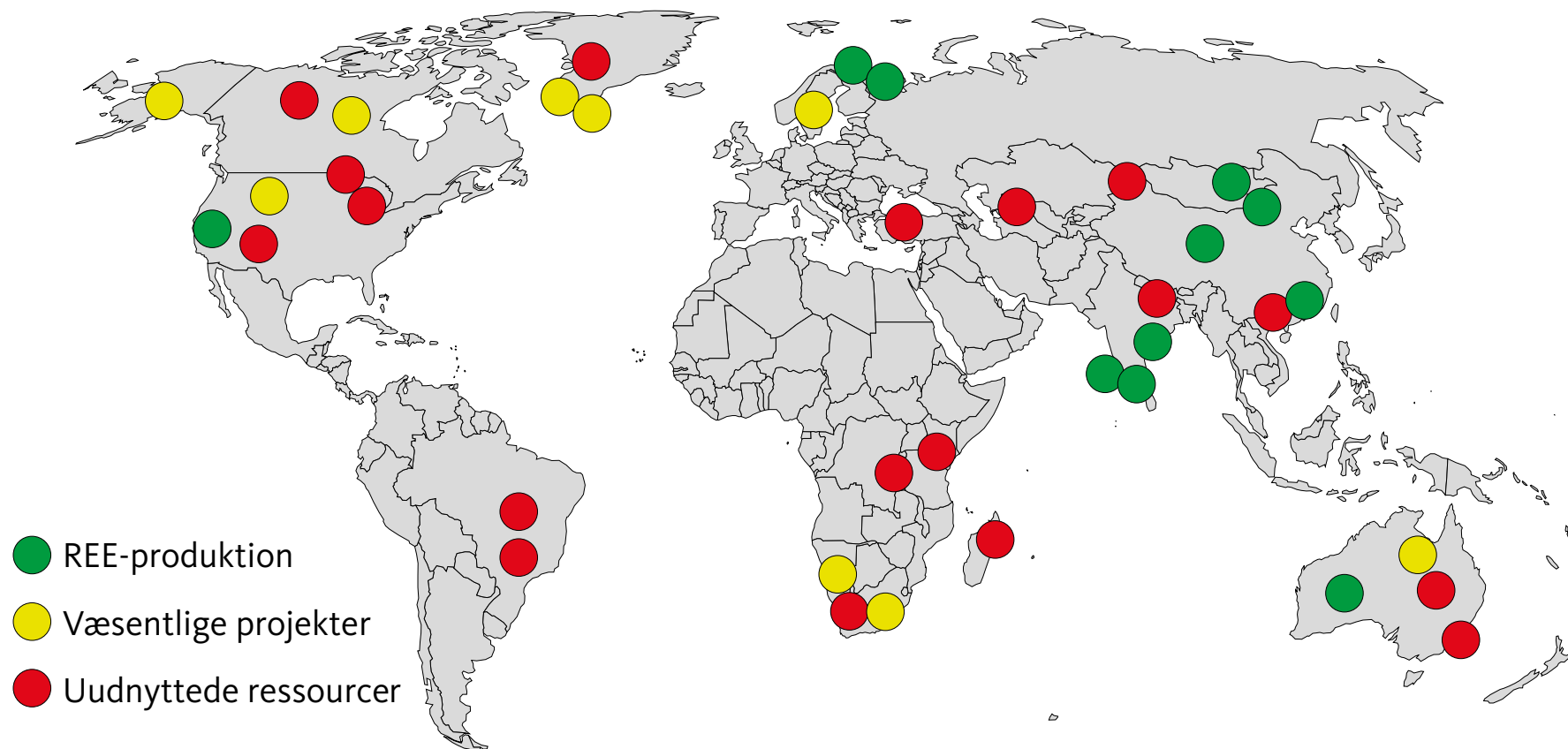
GEOLOGISKE MILJØER MED FOREKOMSTER AF SJÆLDNE JORDARTSMETALLER

Mineralforekomster, hvor der er højt indhold af de sjældne jordartsmetaller, findes i flere forskellige geologiske miljøer og i mange forskellige lande (figur 226). Geologerne deler dem op i tre hovedtyper:

- De magmatiske forekomster som er dannet fra magmatiske smelter i Jordens skorpe. Der kendes mere end 500 fore-

komster af denne type. De er ofte knyttet til riftområder, og mange findes derfor i Østafrika, i det østlige Canada og i Oslofjordens riftzone ved byen Fen. Langt størstedelen af verdens REE produceres fra denne gruppe, hvor Bayan Obo-forekomsten i Kina er den største.

- De sedimentære forekomster som består af forvittringsprodukter, herunder bl.a. tung og robuste REE-mineraler bliver opkoncentreret i floder og kystzoner. Denne type kaldes også for tungsandsforekomster. I Asien er dette en vigtig type. I Europa kendes denne type fra Sverige og Østgrønland, hvor den dog ikke er i produktion.
- Som en undergruppe under de sedimentære typer findes ion-adsorptions-forekomsterne. De opstår, hvor surt nedsvigende grundvand over lange tidsperioder (tusindvis af år) har udvasket de sjældne jordartsmetaller fra granit. Ionerne af de sjældne jordartsmetaller udfælder og sætter sig på overfladen af lermineralkorn, og over tid sker der en opkoncentrering. Denne forekomsttype er vigtig i Kina.



FIGUR 226. Geografisk fordeling af REE-miner og -efterforskning. På basis af Kalvig & Machacek (2018).

MINERALER SOM INDEHOLDER SJÆLDNE JORDARTSMETALLER

Der kendes mere end 200 forskellige mineraler, som indeholder sjældne jordartsmetaller. De mest almindelige er bastnäsit, monazit, xenotim og loparit. Det karakteristiske for disse mineraler er, at de altid indeholder alle 16 sjældne jordartsmetaller (med undtagelse af promethium, som er radioaktivt og henfalder meget hurtigt). Faktisk findes der ikke mineraler, som kun indeholder et udvalg af de sjældne jordartsmetaller. Men hvert af mineralerne har et givent forhold mellem de enkelte metaller, og tilsvarende er den mængde sjældne jordartsmetaller, der er i mineralet, bestemt af mineralets karakteristiske krystalstruktur. Mineselskaberne foretrækker derfor de mineraler, som har den mest værdifulde sammensætning af sjældne jordartsmetaller (figur 227).

I Sydgrønland arbejder flere mineselskaber på at udvinde sjældne jordartsmetaller af mineralerne steenstrupin og eudialyt. I 2019 er der ikke andre mineselskaber, som udnytter disse mineraler, og derfor skal mineselskaberne i Grønland udvikle nye metoder for at kunne fremstille de endelige produkter af

REE-mineraler	Kemisk formel	Vægt% REO
Carbonater		
Bastnæsit	CeCO_3F	75
Fosfater		
Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$	-
Monazit	CePO_4	70
Xenotim	YPO_4	61
Oxider		
Loparite	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Ca}, \text{Sr})(\text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$	30
Silikater		
Allanit	$\text{CaNdAl}_2\text{Fe}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$	23
Eudialyt	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Si}(\text{Si}_{25}\text{O}_{73})(\text{O}, \text{OH})(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl}, \text{OH})_2$	9
Fergusonit	$\text{CaNdAl}_2\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$	53
Steenstrupin	$\text{Na}_{14}\text{Ce}_6(\text{Mn}_2)_2(\text{Fe}_3)_2\text{Zr}(\text{PO}_4)_7\text{Si}_{12}\text{O}_{36}(\text{OH})_{23}\text{H}_2\text{O}$	31

sjældne jordartsmetaller.

DEN GEOGRAFISKE FORDELING AF MINER MED SJÆLDNE JORDARTSMETALLER

I 2018 var der minedrift efter sjældne jordartsmetaller i følgende syv lande: Australien, Brasilien, Burundi, Indien, Kina, Rusland og Vietnam (figur 226). Af disse produktioner er det kun malmen fra Australien og Rusland, som ikke forarbejdes i Kina. Den australske malm forarbejdes i Malaysia,

FIGUR 227. De mest almindelige mineraler der indeholder sjældne jordartsmetaller. Efter Machacek & Kalvig (2017).

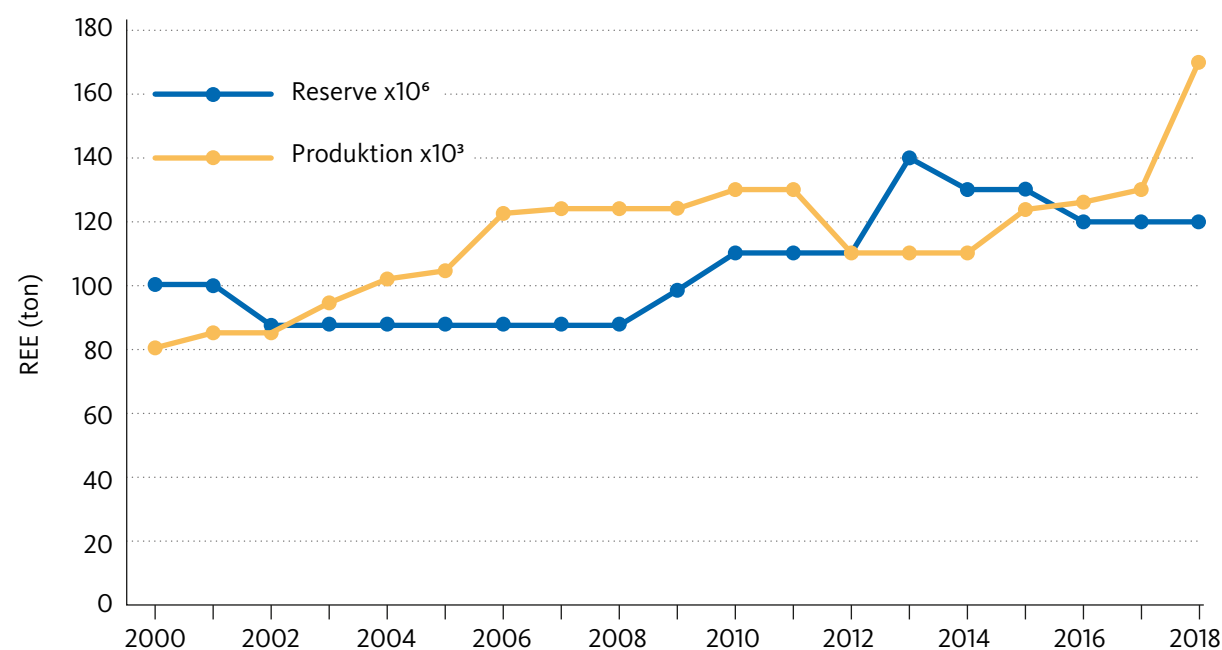
men en betydelig del af produkterne sælges efterfølgende til Kina. Rusland forarbejder selv malmen, men der er meget lidt viden om, hvad der efterfølgende sker med denne produktion.

INGEN GEOLOGISK MANGEL PÅ SJÆLDNE JORDARTSMETALLER

Da Kina næsten har monopol på forsyningskæderne for de sjældne jordartsmetaller, har mange industrier i lande uden for Kina van-

skeligt ved at få tilstrækkelige forsyninger af de materialer og produkter, som indeholder sjældne jordartsmetaller. En del af disse industrier har stor økonomisk betydning. Set fra en europæisk synsvinkel, er materialer med sjældne jordartsmetaller økonomisk vigtige samtidig med, at forsyningssituationen er meget usikker, fordi Kina kan bestemme, hvor meget der sælges til de forskellige typer af industrier og til hvilke lande. Dette forsyningsproblem omtales ofte som at de sjældne jordartsmetaller er kritiske.

Det er værd at bemærke, at kritisk i denne forstand betyder, at det er økonomisk vigtigt, samtidig med at det kan være vanskeligt for virksomhederne at få tilstrækkelige mængder. Men det siger altså ikke noget om en geologisk mangel på forekomster med sjældne jordartsmetaller. Reserverne er på mere end 120 mio. ton, så med et forbrug på ca. 170.000 ton om året (i 2019) (figur 228 og figur 229), er der til omkring 800 år med det nuværende forbrug. Hertil kommer, at der er meget store ressourcer, som på sigt sikkert også kan indgå i reserverne.



GRØNLANDS SJÆLDNE JORDARTSMETALLER

Som nævnt er de sjældne jordartsmetaller meget efterspurgte råstoffer til især omstillingen til de nye energiteknologier. Derfor er der meget stor interesse for at finde nye mineralforekomster med sjældne jordartsmetaller, som kan udnyttes. Nogle af disse forekomster ligger i Grønland, og otte af disse forekomster har så højt indhold, at flere mineselskaber har investeret i undersøgelser af, om det er økonomisk rentabelt at lave en

FIGUR 228. Oversigt over den globale produktion af sjældne jordartsmetaller i perioden 2000 til 2018 (gul kurve). Der ses en generelt stigende tendens.

Den blå kurve viser, hvor store reserverne er i de pågældende år; de er vokset lidt. Med det nuværende forbrug er der reserver til omkring 800 år. Hertil kommer mange kendte ressourcer.

Af MiMa efter data fra USGS (2000-2019).

mine (figur 231). Seks af disse forekomster er imidlertid opgivet, fordi det blev vurderet, at de ikke var økonomisk rentable. Men i Sydgrønland, ved byerne Narsaq og Qaqortoq, findes der to meget store forekomster, Kvanefjeld og Kringlerne. De indeholder begge nogle af verdens største forekomster af sjældne jordartsmetaller, og to mineselskaber har lavet efterforskning og ønsker nu at etablere en mine. De har derfor begge søgt de grønlandske myndigheder om en udnyttelsestilladelse, dvs. om tilladelse til at bryde forekomsterne. Først når de har fået myndighedernes tilladelser, kan arbejdet med at opbygge miner og infrastruktur gå i gang.

I geologisk terminologi tilhører forekomsterne Kvanefjeld og Kringlerne gruppen af magmatiske forekomster. De er dannet i tilknytning til en riftudvikling i Sydøstgrønland, som fandt sted for 1,3-1,2 mia. år siden. I Sydgrønland kaldes denne udviklingsperiode for Gardar-perioden, en periode som geologisk kan følges over 4.000 km og spores ind i det østlige Canada. Gardar-perioden er karakteriseret ved, at specielle magmaer (syeniter) trængte ind i brudzonerne, og mineraler med mange specielle metaller, bl.a. sjældne jordartsmetaller, findes i dag over et stort

	Mineproduktion		Reserver
	2010	2018	2018
USA	(Ingen data)	15.000	1.400.000
Australien	-	20.00	3.400.000
Brasilien	500	1.000	22.000
Myanmar	-	5.000	(Ingen data)
Burundi	-	1.000	(Ingen data)
Kina	130.000	120.00	44.000.000
Indien	2.700	1.800	6.900.000
Malaysia	350	200	30.0000
Rusland	(Ingen data)	2.600	12.000.000
Thailand	(Ingen data)	1.000	(Ingen data)
Vietnam	(Ingen data)	400	22.000.000
Andre lande	(Ingen data)	-	4.400.000
Verden total	133.550	170.000	120.000.000

område i Sydgrønland (figur 232). Området, som domineres af Gardar-periodens bjergarter, betegnes også som Gardar-provinsen. En anden forekomst fra Gardar-perioden er kryolitforekomsten ved Ivittuut, hvor det sjældne mineral kryolit blev udvundet i mere end 100 år. Mange forekomster i dette område af Sydgrønland, foruden Kvanefjeld og Kringlerne, har forhøjet indhold af sjældne jordartsmetaller, niobium, tantal, zirkon og uran.

Selvom Kvanefjeld og Kringlerne er en del af samme geologiske historie og ligger tæt på

FIGUR 229. Oversigt over lande som udvandt sjældne jordartsmetaller i 2010 og 2018. Bemærk at tallene er meget usikre. Efter USGS (2011) og USGS (2019).

FIGUR 230. Sjældne jordartsmetaller i billeder.

A. Udsigt mod Kvanefjeld, Sydgrønland, hvor et mineselskab arbejder på at etablere en mine for brydning af sjældne jordartsmetaller.

B. En geolog undersøger en bjergart med sjældne jordartsmetaller ved Kringlerne, Sydgrønland, hvor et mineselskab ønsker at anlægge en mine.

C. Prøvetagning af bjergarter med sjældne jordartsmetaller ved Kringlerne, Sydgrønland, hvor et mineselskab ønsker at anlægge en mine.

D. En geolog laver et profil for at undersøge, hvor der er højt indhold af sjældne jordartsmetaller, Kringlerne, Sydgrønland.

E. Prøve af steenstrupin, som indeholder sjældne jordartsmetaller og uran, fra Kvanefjeld i Sydgrønland, hvor et mineselskab ønsker at anlægge en mine.

F. Stor krystal af mineralet eudialyt, som indeholder sjældne jordartsmetaller

Fotos A-C Per Kalvig, D-F Anouk Borst.

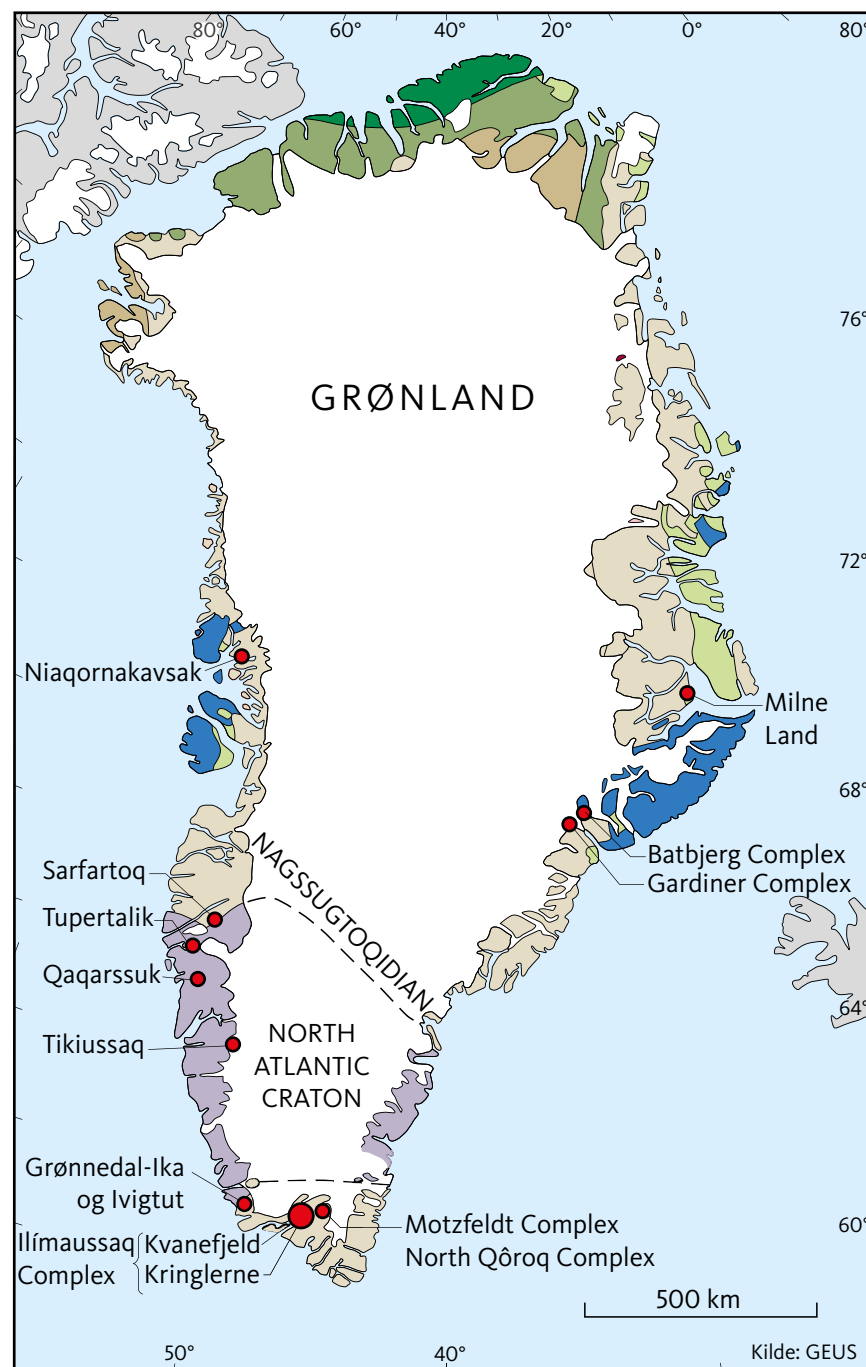


hinanden (ca. 15 km), har de alligevel forskellige mineraler. Det skyldes, at de begge er en del af et lagdelt magma, hvor de bjergarter, der danner Kringlerne ligger under de bjergarter, der danner Kvanefjeld. Det vil sige, at der har været forskellige kemiske forhold i magmaet, hvilket bl.a. har medført, at Kvanefjeldets indhold af sjældne jordartsmetaller findes i mineralet steenstrupin, mens de i Kringlerne findes i mineralet eudialyt. Steenstrupin indeholder også uran, hvilket eudialyt ikke gør; det indeholder derimod lidt niobium, tantal og zirkon.

PROJEKT KVANEFJELD

Siden 2007 har forskellige mineselskaber udviklet planer for, hvordan der kan etableres minedrift i forbindelse med Kvanefjeld og Kringlerne for at udnytte forekomsternes indhold af sjældne jordartsmetaller. I det følgende ser vi nærmere på planerne for Projekt Kvanefjeld.

Det australske mineselskab Greenland Minerals (GM) fik i 2007 af de grønlandske myndigheder tilladelse til at undersøge området ved Kvanefjeld for at finde ud af, om lokalitetens indhold af sjældne jordartsmetaller



FIGUR 231. Der kendes 12 forekomster af sjældne jordartsmetaller i Grønland, hvoraf otte har været undersøgt af mineselskaber.

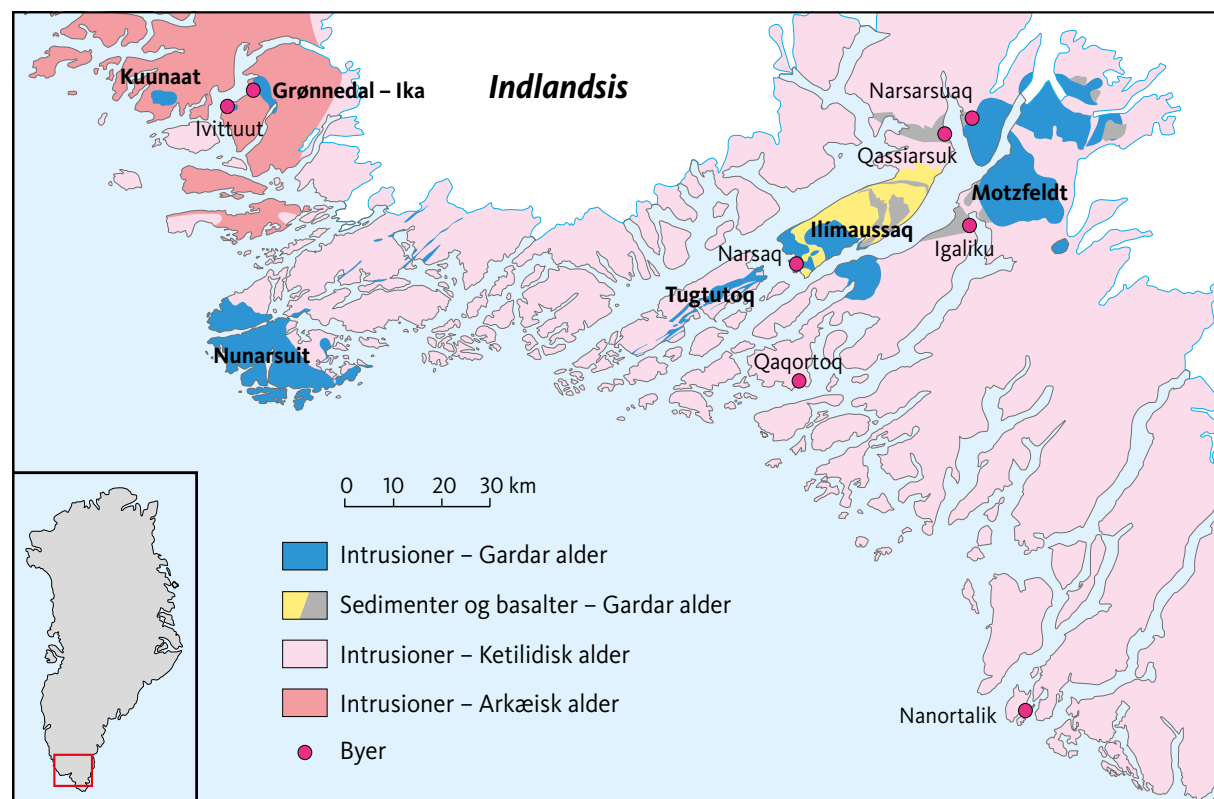
Blandt disse er forekomsterne Kvanefjeld og Kringlerne, som er så store, at det forventes, at de alene ville kunne forsyne verden med sjældne jordartsmetaller i mere end 100 år. To mineselskaber er i gang med at undersøge, om det er økonomisk rentabelt at udnytte forekomsterne. I 2019 var disse undersøgelser ikke afsluttet. Efter Goodenough et al. (2016).

- Cenozoiske basalter
- Devon-Palaeogene sedimenter
- Cambriske-Siluriske sedimenter
- Proterozoiske sedimenter og vulkanitter
- Nord Grønlands foldebælte (Palaeozoikum)
- Prækambrisk skjold (Nagssugtoqidian) (1.600–3.100 mio. år)
- Prækambrisk skjold (2.500–3.900 mio. år) North Atlantic Craton
- REE-forekomster

var tilstrækkeligt til etablering af en mine. Tilladelsen er en såkaldt mineral-efterforskningstilladelse, som beskriver, hvilke undersøgelser selskabet har lov til at gennemføre, og hvordan det skal foregå, så det er miljømæssigt forsvarligt.

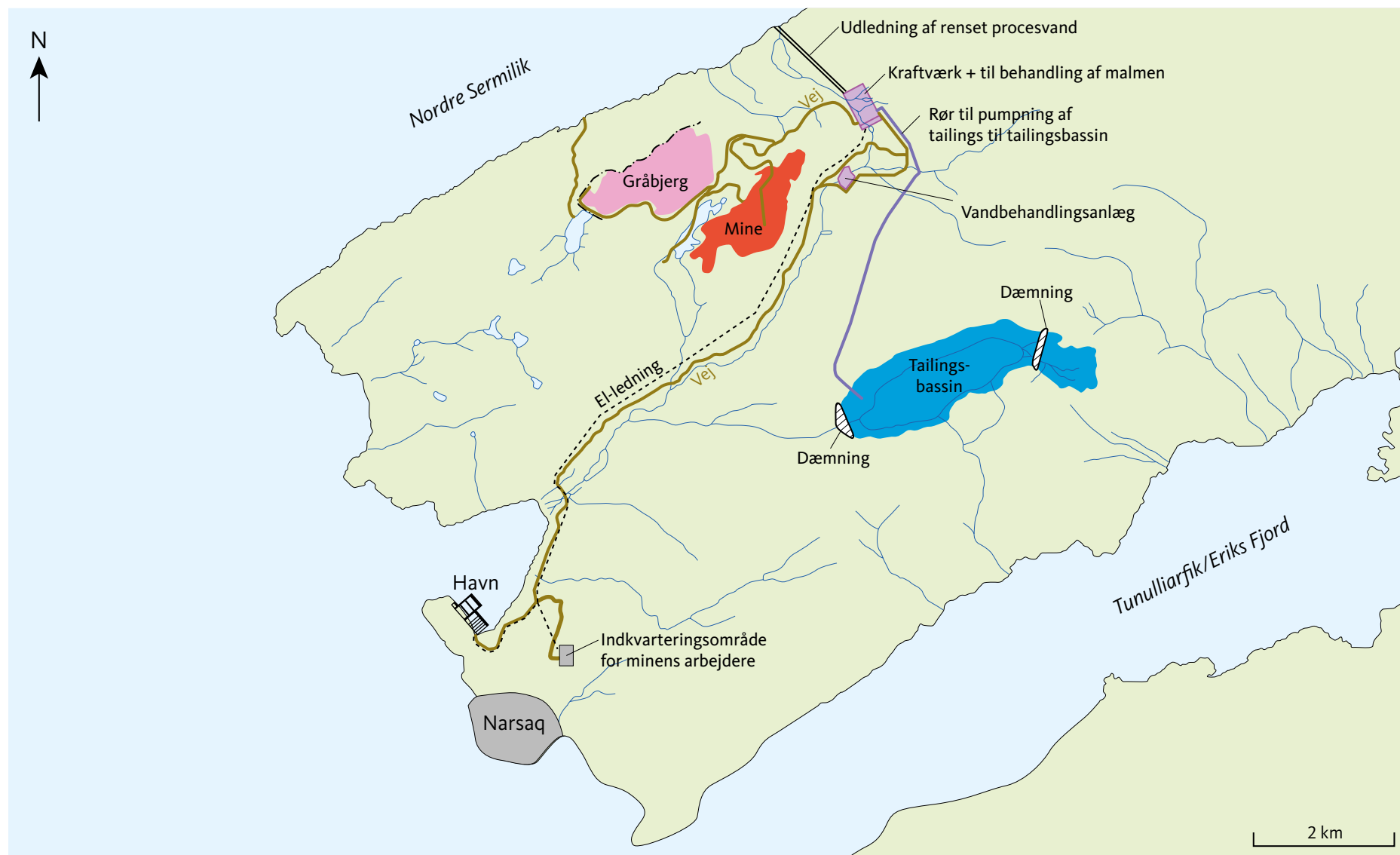
Kvanefjeld ligger 8 km nord for byen Narsaq med knap 1.400 indbyggere (2019). Byen har ikke den fornødne infrastruktur til en ny, stor mine. Derfor har mineselskabet udarbejdet planer for anlæg af nye veje, havn og energiproduktion (dieselgenerator) for selve minen, inklusiv det anlæg, som skal behandle malmen. GM planlægger at bryde malmen i en stor åben mine. Fra minen skal malmen køres til et anlæg, hvor bjergarterne bliver knust. Mineralet steenstrupin, som indeholder de sjældne jordartsmetaller og uran, skal derefter separeres fra bjergarternes øvrige mineraler. Selskabet planlægger, at de mineraler som ikke er interessante for udvindingen af sjældne jordartsmetaller, de såkaldte tailings, skal deponeres i en sø syd for minen, som i den ene ende skal lukkes med en 35 m høj dæmning (figur 233).

Efter separationen skal steenstrupin-mineralerne opløses i en syre, for at der kan



FIGUR 232. Gardar-periodens intrusioner er knyttet til en tidlig kontinental riftzone. Disse intrusioner har ofte forhøjet indhold af mindre almindelige metaller som fx sjældne jordartsmetaller, niobium, tantal, zirkon og uran. Mange mineselskaber har derfor gennemført mineralefterforskning i området, og det vurderes stadig, om det er muligt at etablere miner ved Kvanefjeld og Kringlerne for at udnytte de sjældne jordartsmetaller samt biprodukter af niobium, tantal, zirkon og uran. Efter Kolb et al. (2016).

FIGUR 233. Greenland Minerals plan for mine og infrastruktur for Projekt Kvanefjeld ved Narsaq i Sydgrønland. Som det ses, er selve minen kun en mindre del af projektet, der yderligere vil bestå af et anlæg, som behandler malmen, et deponeringsområde til tailings og gråbjerg, rørforinger til tailings og spildevandsstrømme, transportveje, dieselgenerator til forsyning af strøm, elledninger, havneanlæg og en ny by til de ansatte. Efter Lupton & Brook (2018).



fremstilles et koncentrat af alle de 16 sjældne jordartsmetaller. Herudover vil man producere biprodukter af uran, fluor og zink. Ved biprodukter forstås mineraler, som man lige så godt kan udvinde i forbindelse med ekstraktionen af hovedproduktet, uanset at disse kun i mindre grad bidrager til selskabets indtægter.

Fra fabrikken i Kvanefjeldsområdet vil man køre de udvundne koncentreter til havnen ved Narsaq, hvorfra de udskibes. Koncentreterne med sjældne jordartsmetaller vil sandsynligvis blive eksporteret til Kina, hvor de enkelte sjældne jordartsmetaller skal separeres fra hinanden og efterfølgende forarbejdes yderligere, så de kan bruges af virksomheder, som fremstiller magneter, skærme til smartphones, elektronik, katalysatorer osv.

MINEARBEJDE KRÆVER SPECIALISTER

Når minen er i drift, forventer mineselskabet, at der er brug for ca. 300 ansatte til at drive minen og anlæggene. Denne arbejdsstyrke vil især være specialister, som der ikke findes mange af i Grønland, og derfor vil en betydelig del af arbejdsstyrken komme fra

udlandet. Det vil også være nødvendigt at lave et boligområde ved minen, hvor minens ansatte kan indkvarteres.

Selskabets foreløbige beregninger viser, at der med sikkerhed er malm nok til ca. 35 års minedrift; og med det nuværende forbrug sandsynligvis endda til mere end 100 års produktion. Hvis denne plan bliver godkendt, må det forventes, at en lille by som Narsaq vil ændre sig betydeligt fra det nuværende samfund, som domineres af fiskeri, fåreavl, grøntsagsdyrkning og turisme, til en mere industrialiseret by med en stor havn, store veje og nye indbyggere, som arbejder i minen.

MILJØUDFORDRINGERNE

Inden myndigheder kan beslutte, om de vil godkende et mineprojekt, skal der foretages en vurdering af virkninger på miljøet, også kaldet en VVM-redegørelse. Greenland Minerals har udarbejdet en sådan VVM-redegørelse for Kvanefjeldsprojektet. Indbyggere og myndigheder i Narsaq har især haft fokus på tre miljøudfordringer:

- Minens eventuelle indflydelse på, hvor meget uranholdigt støv der kommer til

Narsaq, når de stærke 'sydøst-storme' (Føhn-vinde) passerer mineområdet i retning mod Narsaq.

- Forekomsten indeholder et vandopløseligt mineral, villiaumit, som bevirker en forhøjet fluorudledning i det vand, som kommer fra mineområdet.
- Der stort fokus på, om deponeringen af tailings, som beskrevet af selskabet, vil være miljø- og sikkerhedsmæssigt forsvarlig.

Myndighederne vurderer stadig i slutningen af 2019, om der kan gives tilladelse til at etablere minen.

NØGLEBEGREBER

- Sjældne jordartsmetaller / Rare Earth Elements (REE)
- Forsyningskæde
- Kritiske råstoffer
- Magmatiske forekomster
- Tungsandsforekomster
- Ion-adsorptions-forekomster.
- Infrastruktur til mineprojekter
- Gardar-periode
- Syenit
- Kontinental riftzone
- Udnyttelsestilladelse
- Efterforskningstilladelse
- VVM-redegørelse (Vurdering af Virkninger på Miljøet)
- Tailings
- Biprodukter
- Føhn-vind

REFERENCER

EURARE. (2017). What are Rare Earth Elements? Hentet fra <http://www.eurare.org/RareEarthElements.html>

Goodenough, K. M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., ... Keulen, N. (2016). Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 72, 838–856.

Kalvig, P., & Machacek, E. (2018). Examining the rare-earth elements (REE) supply--demand balance for future global wind power scenarios. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 41, 87–90.

Kolb, J., Keiding, J. K., Steinfeld, A., Secher, K., Keulen, N., Rosa, D., & Stensgaard, B. M. (2016). Metallogeny of Greenland. *Ore Geology Reviews*, 78, 493–555.

Lupton, R., & Brook, M. (2018). Greenland Minerals and Energy A/S Kvanefjeld Project Environmental Impact Assessment. Hentet fra <https://noah.dk/sites/default/files/inline-files/Greenland%20Minerals%20and%20Energy%20AS%20Kvanefjeld%20Project%20Environmental%20Impact%20>

[Assessment%20%28October%202018%29.pdf](https://noah.dk/sites/default/files/inline-files/Greenland%20Minerals%20and%20Energy%20AS%20Kvanefjeld%20Project%20Environmental%20Impact%20Assessment%20%28October%202018%29.pdf)

Machacek, E., & Kalvig, P. (2017). Development of a Sustainable Exploitation Scheme for Europe's Rare Earth Ore Deposits. Hentet fra <http://www.geus.dk/media/9099/nyheder-07-04-2017-road-map-for-ree-material-supply-autonomy-in-europe.pdf>

USGS. (2000-2019). Mineral Commodity Summaries. Hentet fra <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/index.html>

Forfattere: Troels Kullberg, Per Kalvig &
Matilde Rink Jørgensen

Redaktion: Troels Kullberg & Per Kalvig

Konsulent: Bodil Wesenberg Lauridsen

Layout og opsætning: Troels Kullberg

Illustrationer: Jette Halskov

Korrektur: Mariannne Vestergaard &
Kisser Thorsøe

Udgiver:
Videncenter for Mineralske Råstoffer og
Materialer (MiMa)
De Nationale Geologiske Undersøgelser
for Danmark og Grønland (GEUS)
Øster Voldgade 10, 1350 København K

1. udgave februar 2020 (kun digital)

Frit tilgængelig på <http://mima.geus.dk/>

ISBN: 978-87-7871-524-1