

# MINEAFFALD UNDER VAND

- den gode historie om  
miljøskånsom deponering

Om forfatterne:



Anne Mette T. Simonsen er geograf fra Københavns Universitet. Artiklen udspringer af AMTS' speciale. am.tholstrup@gmail.com



Bo Elberling er professor i miljøbiokemi og leder grundforskningscenteret Center for Permafrost (Cenperm), Københavns Universitet. be@ign.ku.dk



Kristine B. Pedersen er forsker i metalforurening og oprensning ved Akvaplan-niva, Tromsø. kristine.pedersen@akvaplan.niva.no



Lis Bach er arktisk økotoxikolog og seniorrådgiver ved Bioscience, Aarhus Universitet. lb@bios.au.dk

En ny undersøgelse viser, at mineaffald fra en jernmine deponeret i en norsk fjord ikke har medført en nævneværdig forurening, fordi tungmetallerne er bundet hårdt til jern i affaldet. Det er ny og vigtig viden i relation til fremtidig minedrift i for eksempel Grønland.

Foto: Kristine B. Pedersen.

**V**i tænker ikke over det til dagligt, men vores samfund er drevet og afhængig af råstoffer, som gemmer sig under jordens overflade. Råstofferne er nødvendige for de hjælpemidler, vi omgiver os med. Men mellem 20 og 90 % af den malm, der udvindes fra miner, ender som affald, og mineselskaberne er udfordret med at håndtere affaldet på en ansvarlig måde, uden at omkostningerne gør minedriften urentabel. Der er en reel bekymring for de konsekvenser, mineaffaldet kan have på naturen på grund af affaldets

forhøjede metalindhold. Der findes mange eksempler på betydelige negative effekter, når miljøet bliver udsat for høje metalniveauer. Et af de mest berygtede eksempler på utilsigtet forurening fra mineaffald findes ved Den Sorte Engel ved Maarmorilik i det nordvestlige Grønland. Mere end 30 år efter minen blev indstillet, kan man stadig spore rester fra deponeringen af de 8-9 millioner tons bly- og zink-affald, som både blev placeret over og under vand.

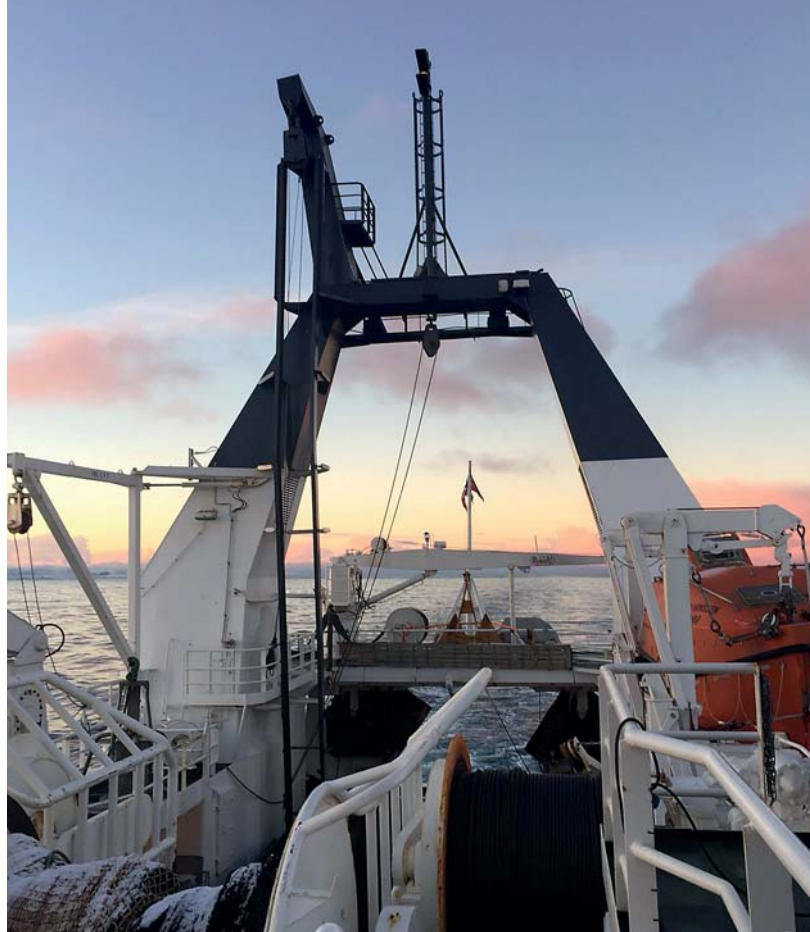
Præmissen for at deponere mineaffald under vand er forventningen

om, at der ikke forekommer omfattende spredning eller miljøeffekter ved deponering. Minevirksomhedens planer og forudsigelser for affaldshåndteringen skal godkendes af myndighederne, inden minevirksomheden kan starte sin operation. Alligevel kan det hænde, at uforudsete naturlige processer kan have en uheldig indvirkning på mineaffaldet.

Nye resultater har vist, at marin deponering af mineaffald ikke altid har konsekvenser for miljøet. Resultaterne blev opnået af et hold forskere, som i efteråret 2016



Stationer (1-7) i et transekt ud af Bøkfjorden brugt til sedimentprøvetagning. Mineaffald blev deponeret ca. 500 m nord for Kirkenes (rød stjerne)



Sedimentprøver blev indsamlet i Bøkfjorden ombord på forskningsfartøjet R/V Hjelmer Hansen som tilhører Universitetet i Tromsø. Foto: Anne Mette Simonsen.

drog til Bøkfjorden i Nordnorge for at undersøge de miljømæssige konsekvenser af en jernmines deponering af mineaffald under vand i fjorden.

### Mineaffald under vand

En af minedriftens største økonomiske og miljømæssige udfordringer er, som ovenfor beskrevet, håndteringen af det restmateriale, der er tilbage, når metallerne er udvundet af malmen. Der er flere gode argumenter for deponering af mineaffald under vand, som både kan foregå i opdæmmede vandreservoirer, søer, fjorde eller i havet. Under vand er der begrænset adgang til ilt, og frigivelsen af metaller er derfor reduceret. Derudover forventes det, at affaldet med tiden vil blive begravet i sedimentet på bunden, hvilket vil reducere mobiliseringen og spredningen af metaller.

Flere lande har i midlertidig i fælles aftaler (OSPAR) forsøgt at forebygge forurening fra marine deponier globalt ved at begrænse deponeringen til udelukkende inert

affald – altså affald, som er utilbøjeligt til at reagere kemisk. Det skyldes bekymring for ukontrolleret spredning af mineaffaldet, frigivelse af metaller grundet uforudsete strømforhold og andre marine processer samt ødelæggelse af havbundens naturlige habitater, som udsættes for enorme mængder af unaturligt tilført materiale.

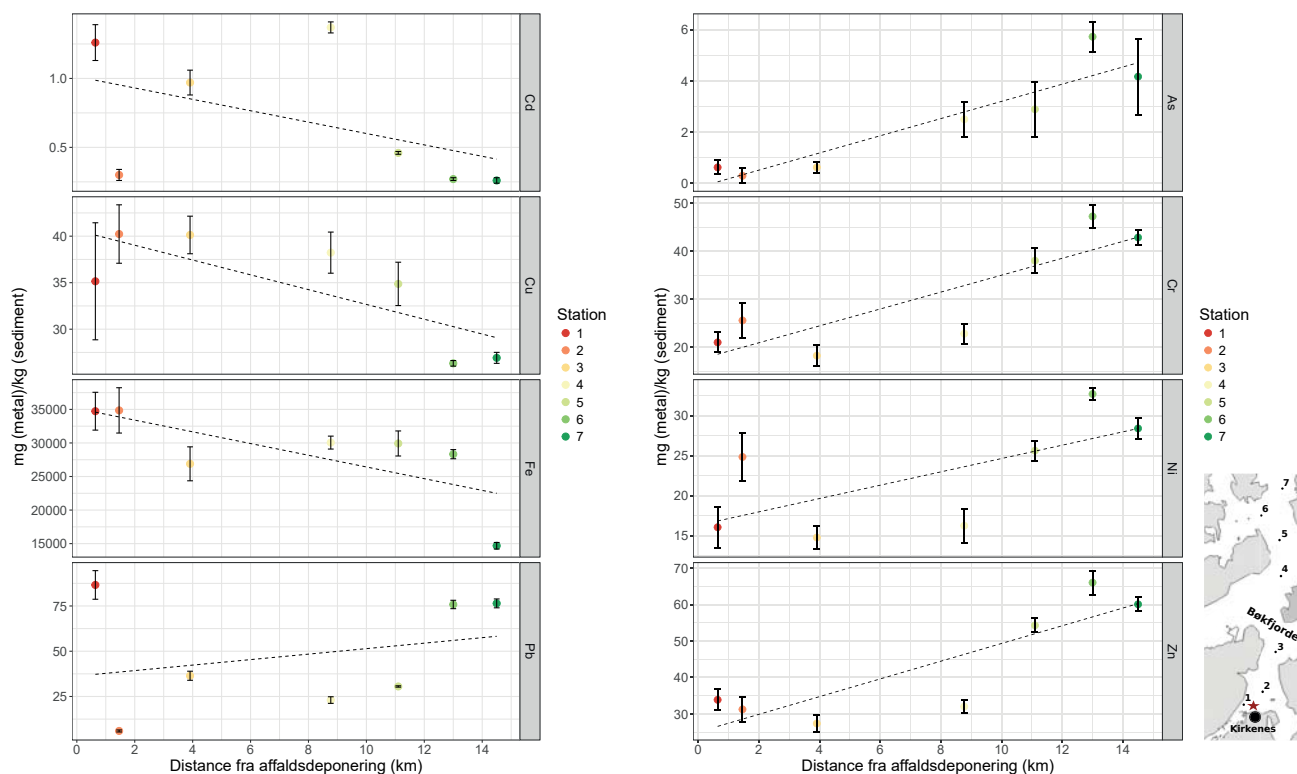
Norge benytter sig dog i stort omfang af deponering af mineaffald i fjordene. Det norske landskab byder på stejle klippesider og dybe fjorde med et udbredt fravær af søer og flade områder, hvor en kunstig dæmning ville kunne etableres. Disse forudsætninger gør marin deponering til det eneste reelle alternativ til deponering på land.

### Miljøundersøgelser af Bøkfjorden

Den norske undergrund rummer en lang række ressourcer, som er blevet udnyttet siden 1500-tallet. Minedrift er et af Norges primære erhverv og omfatter blandt andet jern, titan og kobber. I Nordnorge

tæt på grænsen til Rusland ligger Kirkenes ud til den 23 km lange fjord, Bøkfjorden. Kirkenes lever af fiskeri, især kongekrabber, og fjorden er erklæret national laksefjord for at beskytte vildtlaksens overlevelse. Hovederhvervet i Kirkenes har været minedrift siden 1906, hvor jernminen Sydvaranger Gruve AS blev grundlagt. Minen drejede nøglen om i 1997 og blev efterfulgt af AS Sydvaranger Gruve fra 2009-2015. I de mere end 100 år er magnetit-bundet jernmalm udvundet fra underjordiske miner og åbne brud. Restproduktet efter udvinding af jern fra malmen er gennem tiden blevet deponeret i Bøkfjorden, som har modtaget mere end 70 millioner tons mineaffald. De norske myndigheder igangsatte den første afdækning af miljøeffekter i 1989 og har siden da givet løbende tilladelse til den omfattende deponering af mineaffald i fjorden.

For at undersøge miljøeffekterne af udledningen, efter minevirksomheden lukkede, blev der i november 2016 indsamlet sedimentkerner



Indholdet af tungmetaller i overfladesedimentet (0-5 cm) på de syv stationer i Bøkfjorden, hvor vi udtog prøver. På baggrund af den nedadgående koncentration af Cd, Cu, Fe og til dels Pb med distancen til deponeringsområdet (0 km) kunne man antage, at disse metaller er associeret med mineaffaldet i modsætning til As, Cr, Ni og Zn.

af overfladesedimenter fra spredte lokaliteter i fjorden med det formål at vurdere spredningen og belastningen af metaller i sedimentet.

Bøkfjorden huser en rigdom af marine organismer, som udgør grundlaget for et omfattende fiskeri. Det betyder, at det ikke kun er dyr, der kan optage metallerne, men også mennesker, som lever af alt godt fra havet. Organismer i fjorden kan optage metaller gennem vand, eller via den føde de indtager – som

for eksempel kan være knyttet til sedimentet på bunden af fjorden. De metaller, der ikke kan udskilles eller kun udskilles langsomt, ophobes i fødekæden i planter og dyr.

### Metalholdigt mineaffald

Restproduktet fra oparbejdningen af malmen i Kirkenes er et finkornet materiale blandet med proceskemikalier fra separationsprocessen og havvand. Havvand tilsættes for at tynde restproduktet ned på bunden for at begrænse

spredningen i vandsøjlen. Mineaffaldet indeholder en del jern samt tungmetaller, som naturligt findes i malmen, men som det ikke er rentabelt at ekstrahere. Fjordmiljøet kan altså tilføres store mængder tungmetaller, når der udledes mineaffald i fjorden.

Resultaterne fra Bøkfjorden viser da også, at bundsedimenterne indeholder tungmetaller. Dog optræder de mest bekymrende og giftige metaller som arsen,

## Tungmetaller i miljøet

Tungmetaller findes naturligt i jorden og frigives ved kemiske, fysiske og biologiske nedbrydningsprocesser. Metallerne er således en naturlig del af de terrestriske og akvatiske økosystemer, og det naturlige indhold af metaller i jorden varierer grundet geologiske variationer i udgangsmaterialet. Tungmetaller er grundstoffer tungere end jern (5 g/cm<sup>3</sup>). Nogle tungmetaller er essentielle for, at biokemiske og

fysiologiske processer kan fungere i levende organismer, hvorimod for høje koncentrationer af samme tungmetaller er sundhedsskadelige og økotoksiske. Andre metaller er til gengæld udelukkende toksiske for organismers biologiske funktion og kan derfor have sundheds- og miljømæssig skadelige effekter i selv små mængder. Hvad enten det er høje koncentrationer af essentielle eller mindre koncentrationer af

toksiske tungmetaller, kan metallerne ophobes i organismer, hvis de optager mere, end de har mulighed for at udskille (kaldet bioakkumulation). Globalt har man vedtaget, at tungmetaller med størst påvirkning på organismers funktionsdygtighed er arsen (As), cadmium (Cd), krom (Cr), kobber (Cu), nikkel (Ni), bly (Pb) og zink (Zn). Alle disse tungmetaller blev udover jern (Fe) grundigt undersøgt i Bøkfjorden.



cadmium, krom, nikkel og zink ikke i mængder over de norske kvalitetskriterier. Overraskende nok viser resultaterne, at områder længst væk fra affaldsdeponiet indeholder højere koncentrationer af arsen, bly, krom, nikkel og zink end tættest på deponiet. Spørgsmålet er, om disse højere værdier kan tilskrives helt andre kilder end jernminen, om der naturligt eksisterer forhøjede metalconcentrationer længere ude i Bøkfjorden, eller om mineaffaldet er spredt i så stor udstrækning. Til at belyse dette spørgsmål anvendte vi de høje koncentrationer af jern i sedimenterne, som var associeret med mineaffaldet, og brugte disse til at kortlægge mineaffaldets spredning i fjorden. Resultaterne viser, at det er overvejende sandsynligt, at fjordens naturlige strømningsforhold har ført mineaffaldet mindst 9 km væk fra deponiet og ud i Bøkfjordens midterste del.

### Metallers bindingsform og tilgængelighed

Når miljøpåvirkning af metaller skal vurderes, er det ikke kun den totale koncentration, der er interessant, men derimod metallernes biologiske tilgængelighed, blot kaldet biotilgængelighed. Metallers biotilgængelighed afhænger af, i hvilken form metallerne findes og er stærkt styret af det omgivende miljø.

Naturligt forekommende metaller findes ofte i stabile kemiske forbindelser, som kan være svært optagelige for organismer, hvori mod metaller tilført fra menneskelige aktiviteter ofte forekommer i forbindelser, som er mere opløselige og dermed mere tilgængelige for organismer. Når metallerne tilføres det marine miljø, søger de at binde sig til de mest finkornede mineraler og kemiske forbindelser, som naturligt findes i vandet og i bundsedimenterne. De mineraler, som bedst binder metaller, er ler, karbonater, jern- og manganoxider, men også organiske stoffer og salte som sulfater kan binde metaller. De bundne metaller er



Børsteorme (*N. Virens*) brugt til forsøg med metaloptag i sediment fra Bøkfjorden og Roskilde fjord. Foto: Anne Mette Simonsen.

stabile, så længe det marine miljø forbliver uforstyrret. Hvis iltforhold, pH eller temperatur ændres i miljøet, kan metallerne frigives fra de forbindelser, de forekommer i, og blive tilgængelige for organismer. Det kan for eksempel ske ved kraftige storme eller skibstrafik, som roder i havbunden og får sedimenter op i vandet. Denne ophvirvling kan frigøre metaller fra porevandet ved tilførsel af ilt og kan samtidig frigøre metallerne fra sedimentet.

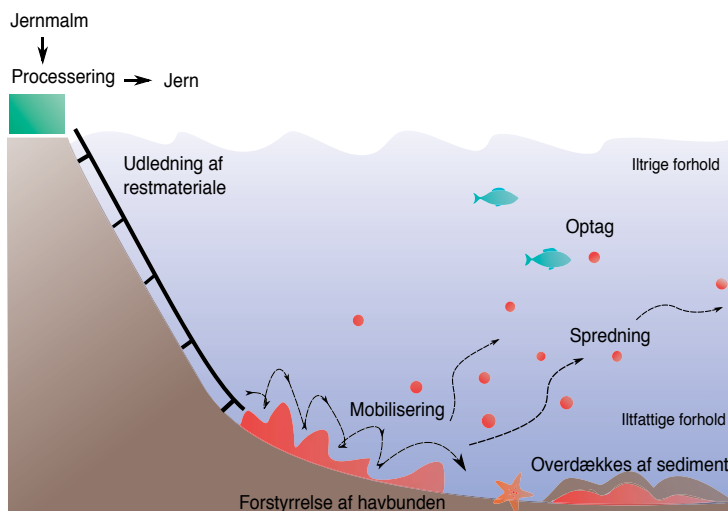
For at vurdere biotilgængeligheden af metaller udsatte vi børsteorme (*N. Virens*) fra Roskilde fjord for de indsamlede mineaffaldssedimenter fra Bøkfjorden i 4 uger. Derefter analyserede vi børsteormene for indhold af tungmetaller samt analyserede for metallernes biotilgængelighed i sedimentet. Som kontrol blev tilsvarende børsteorme eksponeret for sediment fra Roskilde fjord. På de mest metalbelastede stationer i Bøkfjorden fandt vi et markant metaloptag i børsteormene, som viser to overraskende resultater.

Vi havde forventet, at metaloptagelsen i børsteormene ville være bestemt af den biotilgængelige andel af metaller i sedimentet. Men det var ikke tilfældet. Det antyder, at koncentrationen af metaller i sedimentet ikke er det eneste, der afgør hvor meget børsteormene optager.

Samtidig viste forsøget, at børsteorme, som havde levet i kontrolforsøg med sediment fra Roskilde fjord, havde optaget mere arsen, cadmium, krom, kobber, nikkel, bly og zink end orme, der havde levet i sediment fra Bøkfjorden, til trods for at Bøkfjordens sediment var mere metalbelastet end det fra Roskilde fjord. Sedimentet fra Bøkfjorden havde imidlertid et væsentligt højere jernindhold end sedimentet fra Roskilde fjord, og det satte os på sporet af en mulig forklaring på børsteormenes tungmetaloptag.

### Jerns rolle

Nærmere studier viser, at affalds-sedimenterne i Bøkfjorden indeholder en del rester af jern, som ikke



Efter separeringen af jern fra malmen, udledes det overskydende materiale til bunden af Bøkfjorden. Mineaffaldets skæbne afhænger af de eksisterende forhold på fjordbunden.

er blevet fjernet inden deponering. Jern er kendt for under iltede forhold at danne jernoxider, som binder tungmetaller hårdt i restproduktet fra malmen og derved begrænser den biologiske tilgængelighed af metallerne. Jernoxiders binding af metaller er en naturlig kemisk proces, som i dag er under udvikling til brug i industrien. Her manipulerer man den kemiske proces til for eksempel at stabilisere tungmetalforurenede flyveaske fra

affaldsforbrænding ved tilsætning af jernoxider.

De kemiske forhold i malmen har ligeledes bundet metallerne hårdt til sedimentet og medført et mindre optag af metaller i børsteorme end forventet. Bøkfjorden står derved som et glimrende eksempel på, hvor central en rolle biotilgængeligheden spiller, når man skal vurdere mulige effekter af marin deponering.

### Bedre affaldshåndtering

I Grønland er der ikke anvendt marin deponering af mineaffald, siden Den Sorte Engel var i drift. Derimod er affaldet blevet deponeret i udtømte minegange, som det skete ved guldminen Nalunaq ved Nanortalik, eller i søer, som det nu sker ved rubinminen ved Fiskerøsset.

Resultaterne fra Bøkfjorden kan bidrage med ny viden til udviklingen af nye teknologier for affaldshåndtering. Jerns evne til at binde metaller kan være et lovende udgangspunkt for teknologi til at stabilisere metallerne i affaldet, inden det deponeres i havet. At deponere mineaffald i havet kan ikke undgå at have fysiske effekter på havbunden i deponiet, men så længe, man sikrer, at affaldet er "inaktivt", kan marin deponering være et muligt alternativ til deponering på land.

Minevirksomheder er pålagt krav om miljøbeskyttelse i affaldshåndteringen, som både omhandler omhyggelig processering og rensning af malmen samt deponering af det bearbejdede restprodukt. Processer, som kan være yderst ressourcekrævende både hvad angår tid og økonomi. En forbedring af affaldsteknologien, som mindsker konsekvenserne for det marine miljø og er økonomisk rentabel, vil derfor gavne den fremtidige udvikling af minedrift. ■

### Marin deponering af mineaffald – for og imod:

#### Fordele:

Undgår spredning af metalholdigt støv fra landdeponier  
Iltfattige forhold nedsætter frigivelsen af metaller  
Mineaffald begraves med tiden under sedimentet på havbunden  
Undgår katastrofale dæmningskollaps

#### Ulemper:

Frigivelse af metaller fra mineaffald ved tilførsel af ilt  
Spredning af mineaffald i vandet  
Forstyrrelse og ødelæggelse af det marine økosystem  
Ophobning af metaller i marine dyr og planter  
Hvis uheld sker, er skaden uoprettelig

### Tværvideenskabelig tilgang:

Undersøgelserne blev udført af det norske Environmental Waste Management –projekt (EWMA) finansieret af det norske forskningsråd og ENI med det formål at undersøge de afledte miljøeffekter af mineaffald i Norge. Projektet var et bredt arbejde mellem en lang række norske og internationale aktører, herunder Akvaplan-niva AS, Københavns Universitet og Universitetet i Tromsø her med særlig hjælp fra Institut for Geovidenskab, som muliggjorde feltarbejdet. Resultaterne omtalt her knytter sig primært til Anne Mette Simonsens speciale ved Københavns Universitet, som viser styrken mellem privat og offentlig forskning og uddannelse.

#### Relevant litteratur og videre læsning

Dold, B., 2014: Submarine Tailings Disposal (STD) – A Review. Minerals 4: 642-666.

Elberling, B., Asmund, G., Kunzendorf, H., Krogstad, E. J., 2002: Geochemical trends in metal-contaminated fiord sediments near a former lead-zinc mine in West Greenland. Applied Geochemistry 17: 493-502.

Johansen, P., Asmund, G., Glahder, C. M., Aastrup, P., Secher, K. 2001: Minedrift og miljø i Grønland. Danmarks Miljøundersøgelser, Roskilde, 38/2001.

Pedersen, K. B., Jensen, P., Sternal, B., Ottosen, L., Henning, M. V., Kudahl, M. M., Juntilla, J., Skirbekk, K., Frantzen, M., 2017: Long term dispersion and availability of metals from submarine mine tailings disposal in a fjord in Arctic Norway. Environ Sci Pollut Res: 1-12.

Søndergaard, J., Asmund, G., Johansen, P., Rigét, F., 2011: Long-term response of an arctic fiord system to lead-zinc mining and submarine disposal of mine waste (Maarmorilik, West Greenland). Marine Environmental Research 71: 331-341.