

# Termisk assisteret oprensning - in-situ-fjernelse af jordforurening

Af geolog Tom Heron (NIRAS / Faglig sekretær for Miljøstyrelsen) og civilingeniør Betina Haugaard Heron (NIRAS).

Rensning in-situ af forurening har været kendt og brugt i adskillige år, men endnu er termiske oprensningsteknikker ikke udbredt herhjemme. Denne artikel fortæller både om de forskellige metoder og giver et eksempel på denne lovende teknik.

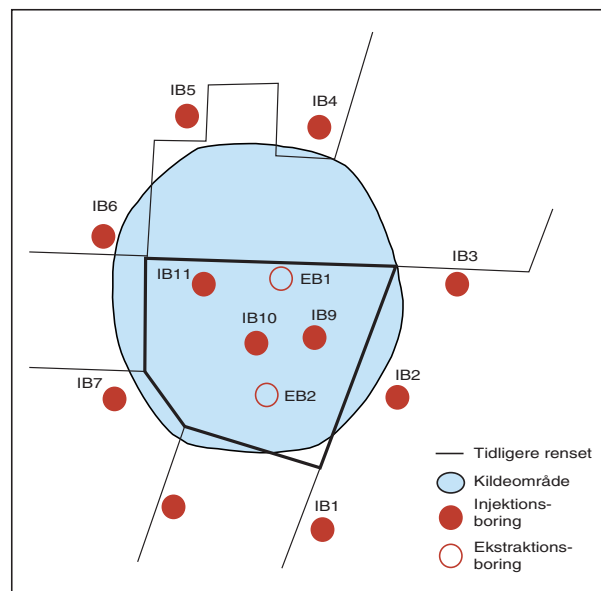
Oprensning af jord- og grundvandsforurening med termiske teknikker (dvs. varme) er vundet frem gennem de senere år, specielt i USA. Herhjemme er der inden for de seneste fem år igangsat og gennemført seks termisk assisterede oprensninger. På fem af disse lokaliteter har Miljøstyrelsen under programmet for teknologiudvikling finansieret særlige aktiviteter til udvikling og dokumentation af teknikkerne, og der tegner sig et billede af en række lovende teknikker med en effektiv og hurtig kildefjernelse i såvel den umættede som den mættede zone.

## Traditionelle oprensningsteknikker

Traditionelle in-situ oprensningsteknikker beror ofte på cirkulation af luft – over grundvandsspejlet ved vakuumelekstraktion eller bioventilation – og under grundvandsspejlet ved air sparging – dvs. indblæsning af luft i grundvandszonen med henblik på stripping (overgang fra opløst i vandet til gasfase i den indblæste luft) af flygtige forureningskomponenter – typisk benzin og chlorerede opløsningsmidler; eller bio sparging – dvs. indblæsning af luft i grundvandszonen med henblik på tilførsel af ilt til forcering af den biologiske nedbrydning af forureningskomponenterne – typisk mindre flygtige som dieselolie mv.. Disse metoder har to væsentlige begrænsninger: Mange forureningsstoffer har begrænset flygtighed ved de naturlige jordtemperaturer (7-12 °C) og fjernes derfor ikke let ved indblæsning og ekstraktion af luft. Endvidere kræver en effektiv oprensning, at den cirkulerende luft berører hele det forurenede volumen, hvilket i praksis oftest begrænses af geologiske og hydrauliske betingelser.

## Termisk assisterede oprensninger

De termiske teknikker har vist sig på



Kildeområdets beliggenhed samt placeringen af injektions- og ekstraktionsboringer. (Grafik: Forfatterne og UH)

mange måder at overkomme ovennævnte begrænsninger. De termiske teknikker er baseret på, at flygtigheden af forureningskomponenterne øges ved opvarmning af det forurenede jord- og grundvandsvolumen. Den øgede flygtighed skyldes dels, at damptrykket for forurening på fri fase, Henry's konstant ( $K_H$ , som er forholdet mellem stoffets ligevægtskoncentration i luft og i vand) samt opløseligheden stiger markant med temperaturen for de fleste stoffer, og dels at sorptionskoefficienten (stoffernes tendens til at blive holdt tilbage i jorden),  $K_d$ , typisk falder svagt til moderat.

Ved tilstrækkelig opvarmning opnås desuden kogning af porevand og eventuel forurening på fri fase. Ved atmosfæretryk koger porevandet ved ca. 100 °C, mens

kogning på skillefladen mellem porevand og fri fase optræder, når summen af damptrykkene for porevand og den frie fasede forurening når atmosfæretryk. Kogningen på skillefladen mellem faserne vil således ofte foregå ved temperaturer under 100 °C til trods for, at kogepunktet for den frie fase kan være større end 100 °C. Eksempelvis optræder der kogning ved 87 °C i et system af vand og PCE, hvor PCE alene har et kogepunkt på 121 °C. PCE (tetrachlorethylen) er et chloreret opløsningsmiddel brugt til kemisk tøjrensning og affedtning af metalemner.

Endelig medfører opvarmningen for de fleste stoffer en nedsættelse af densiteten, viskositeten og overfladespændingen af eventuel fri fase, hvorved tilbageholdte

Teknik	Jordtype	Opnåelig temp.	Oprensning af	Kommentarer
Termisk lednings-evne	ler/silt	ca. 700 °C	olieprodukter, chlorerede opløsningsmidler, creosot, PAH'er, tjæreprodukter mv.	forudsætter en meget lille indstrømning af grundvand til oprensningsområdet
Elektrisk opvarmning	ler-finsand	100-120 °C	olieprodukter, chlorerede opløsningsmidler, creosot, lette tjæreprodukter mv.	forudsætter en meget lille indstrømning af grundvand til oprensningsområdet
Dampstripping	grus-finsand	100-120 °C	olieprodukter, chlorerede opløsningsmidler, creosot, lette tjæreprodukter mv.	mest velegnet i rimeligt permeable jordlag ( $k > \text{ca. } 1 \text{ darcy}$ )

Tabellen viser en oversigt over termiske teknikker

puljer af fri fase eventuelt kan mobiliseres og oppumpes.

I tabellen nedenfor ses en oversigt over de tre mest anvendte opvarmningsteknikker, opnåelige temperaturer og stoffer, som teknikken kan anvendes overfor, samt forudsætninger med hensyn til jordtype mv.

### Termisk opvarmningsevne

Opvarmning af jorden gennemføres ved, at der placeres filtersatte borerer med varmelegemer i det forurenede område. Varmelegemerne opvarmes til 700-1.000 °C, hvorved de omkringliggende jordlag opvarmes som følge af varmeledning. Afhængigt af opvarmningstiden og afstanden til varmelegemerne kan der i praksis opnås jordtemperaturer på op til ca. 700 °C. Ved denne opvarmning bringes al jordvæske samt langt de fleste forureningskomponenter på gasfase. Ved vakuumeekstraktion fra borerne med varmelegemerne samt eventuelle supplerende borerer fjernes vanddamp og forureningskomponenter på gasfase. En stor del af forureningskomponenterne vil nedbrydes ved oxidation i de ekstremt varme områder umiddelbart omkring og i borerne.

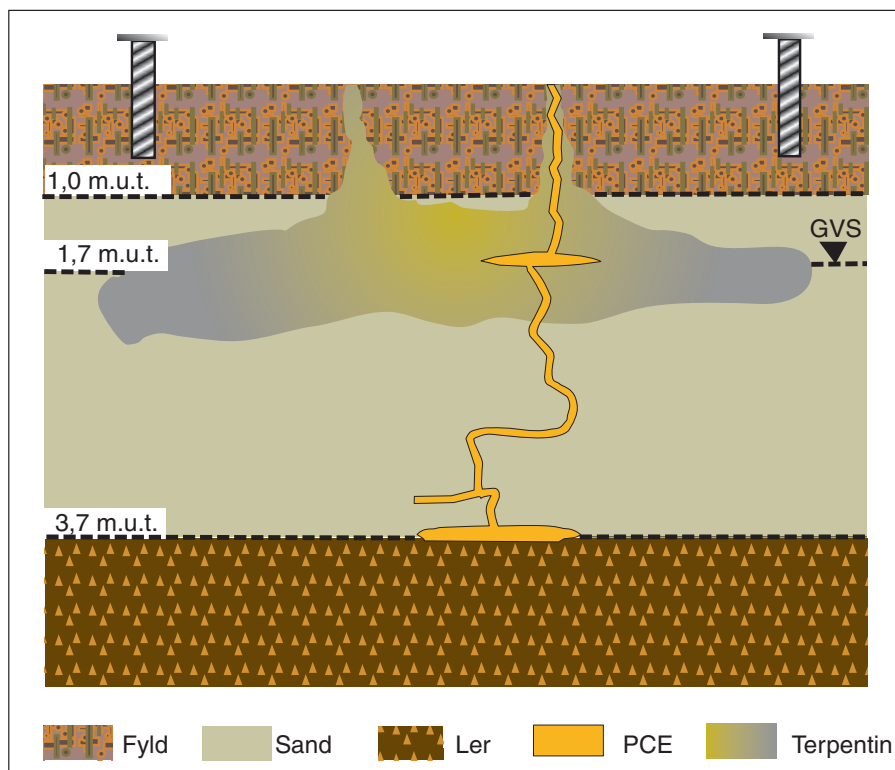
Opvarmningen ved varmeledning foregår forholdsvis langsomt, mens forureningsfjernelsen ved ekstraktion af gasfasen er hurtig. Endvidere er ledningsevnen i luften i de opvarmede og udtørrede jordlag markant højere end i de omkringliggende ikke-udtørrede områder. Herved minimeres også risikoen for utilsigtet spredning af forureningen fra den centrale del af kildeområdet.

Den termisk assisterede oprensning forudsætter, at der ikke forekommer en nævneværdig indstrømning af grundvand til det opvarmede område, idet kogning af dette vand vil være bekosteligt og nedsætte energitilførslen til de omkringliggende jordlag. Ved forekomst af væsentligt vandførende lag i oprensningsområdet kan indstrømningen til kildeområdet eventuelt minimeres med et pumpe- eller drænsystem.

Ved de høje temperaturer sker der en ekstrem udtørring af de opvarmede jordlag, hvilket muligvis kan påvirke jordens geotekniske egenskaber i uønsket retning. Dette er ikke belyst nærmere i litteraturen, men undersøges i forbindelse med et igangværende projekt under Miljøstyrelsens teknologipulje. Endelig vil naturligt organisk stof i jorden oxideres (afbrændes) ved opvarmningen.

### Elektrisk opvarmning

Ved elektrisk opvarmning påtrykkes de forurenede jordlag en vekselspænding, og som følge af jordlagenes ohm'ske modstand afsættes energi fra den inducerede strøm. Det forurenede område forsynes med elektroder i et triangulært mønster og med en indbyrdes afstand på ca. 6-10 m. Elektroderne påføres en spænding, som for hver elektrode er faseforskudt 120° eller



Forenklet geologisk snit for lokaliteten. (Grafik: Forfatterne & BES)

60° (tre- eller seksfase opvarmning). Herved opnås, at der til ethvert tidspunkt er en spændingsforskel mellem samtlige mulige elektrodepar, hvilket medfører et forholdsvis ensartet spændingsfelt og således en rimelig jævn opvarmning af hele oprensingsområdet. Den mest jævne opvarmning opnås med vekselspænding i seks faser. Imellem elektroderne etableres borerer til vakuumeekstraktion af vanddamp og forureningskomponenter.

Den elektriske modstand varierer markant afhængigt af jordlagenes geologiske sammensætning. Således stiger modstanden betydeligt gennem en sekvens af jordlag fra ler, silt, sand til grus. Den inducerede strøm vil således overvejende løbe i lerede horisonter, som herved opvarmes effektivt, mens en mindre del af strømmen vil løbe i sandede og grusede jordlag. Teknikken er således specielt velegnet i lavpermeable jordlag, men kan i visse situationer med langsom grundvandsstrømning også anvendes i sandede lag. I sandede jordlag søges opnået en forholdsvis hurtig oprensning ved kogning af porevand/fri fase i kildeområdet uden udtørring af jorden. En kritisk faktor herved er energitabet til opvarmning af indstrømmende grundvand. Den høje modstand af de sandede jordlag medfører desuden, at energioverførslen fra elektroderne kan være dårlig.

### Dampstripping

Ved dampstripping opvarmes jordlagene af den varme, som afgives, når vanddamp kondenserer ved kontakt med kold jord/grundvand. Ved påbegyndelse af dampinjektionen opvarmes jordlagene umiddel-

bart omkring borerne gradvist til damp-temperatur, hvorefter der udbredes en vanddampzone fra injektionsboringerne.

Dampinjektionen indledes typisk fra en række borerer i periferien af forureningskildeområdet, således at der opnås en sammenhængende ring af damp omkring kildeområdet og herefter en mobilisering af forureningen mod den centrale del af kilden ved hjælp af en central ekstraktion. Forureningen mobiliseres dels ved kogning af fri fase, nedsættelse af viskositet, densitet og overfladespænding for frie faser af forureningskomponenter, ved desorption af jordforurening dels ved afdampning af opløst forurening til damp/poreluft. Den mobiliserede forurening føres med dampen frem til kondensationsfronten, som markerer overgangen til områder, som endnu ikke har nået damp-temperatur. I kondensationsfronten vil der ske ansamling af fri-fase-forurening samt kondensation af damp og gasformig forurening. I den centrale del af kilden foretages ekstraktion af poreluft, grundvand og damp med henblik på at opnå en dampstrømning fortrinsvis ind mod kildeområdet samt for at opnå en opsamling af den mobiliserede forurening på gas- og væskeform.

Dampstrippingen foretages typisk med kontinuert injektion, indtil hele oprensingsområdet har nået damp-temperatur, hvorefter der følger en periode med cyklisk drift. Ved cyklisk drift foretages en pludselig trykafledning i det opvarmede område (ved neddrøling/standsning af dampinjektionen og eventuelt samtidig øgning af ekstraktionsvakuummet), hvorved den forurenede porevæske momentant vil være

overophedet og således koge spontant. Her ved frigives forureningskomponenter via forskellige mekanismer. Den cykliske drift medfører desuden, at kondensat (udfældet forurening på fri fase) over dampzonen vil kunne trænge ned i de varme umættede jordlag og herved frigive forureningskomponenter. Endelig vil der ved standsning af injektionen kunne ventileres med ikke kondenserbar luft i den tidligere dampzone for at fjerne forureningskomponenter som er tilbageholdt i kondensationsfronten.

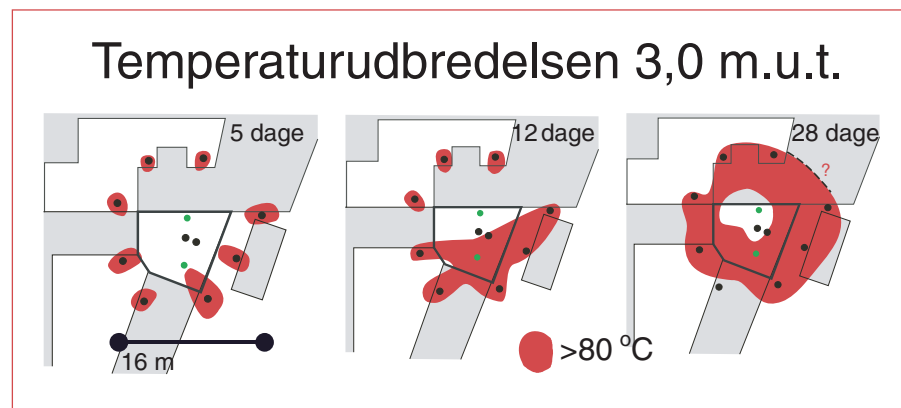
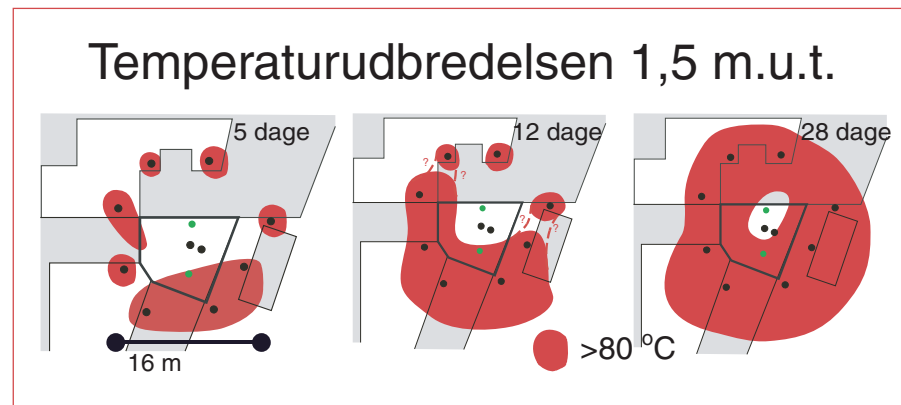
Med dampstripping kan der afhængigt af injektionsdybde og grundvandsforhold opnås temperaturer på ca. 100-120 °C. Der forventes således at kunne opnås en effektiv oprensning af stoffer med et kogepunkt på op til ca. 300 °C, f.eks. chlorerede opløsningsmidler, lettere olieprodukter og creosot. For stoffer med højere kogepunkter er oprensningseffekten mere usikker.

Dampstripping er anvendt med succes i sandede jordlag og i tilstødende lavpermeable lag. Opvarmningen af de lavpermeable lag foregår i denne situation primært ved varmeledning fra dampzonen i det højermeable lag, hvorfor tykkelsen af det lavpermeable lag som opvarmes primært afhænger af driftsperioden (såfremt området er afskærmet fra indstrømmende grundvand). Forureningsfjernelsen fra det lavpermeable lag sker primært ved afdampning til dampzonen i forbindelse med cyklisk drift. I praksis anses det for muligt at oprense indtil 1-1,5 meter af et lavpermeabelt lag, der støder op til en dampzone i et højermeabelt lag.

Det skal bemærkes, at Miljøstyrelsen har udviklet en regnearksbaseret model, hvor dampzoner og injektionsraters udvikling over tid kan estimeres. Modellen samt brugervejledning kan downloades fra Miljøstyrelsens hjemmeside ([www.ms.dk](http://www.ms.dk)).

#### Dampoprensning på tidligere renserigrund

I efteråret 2000 har NIRAS og Ove Arkil A/S for Nordjyllands Amt gennemført en dampoprensning af en tidligere renserigrund i Aalborg. Som led i oprensningen er der gennemført en række aktiviteter finansieret af Miljøstyrelsen under pul-



Temperaturudbredelsen ved 1,5 m.u.t. og 3,0 m.u.t. (Grafik: Forfatterne)

jen for teknologiudvikling.

Renseri har frem til 1990 haft en driftsperiode på 54 år, og renseridriften har forårsaget en markant jord- og grundvandsforurening med terpentiner og perchlorethylen (PCE). Mere end 99% af forureningen skønnes lokaliseret i et kildeområde under det tidligere renseri, som det ses på figurene de to foregående sider.

Jordlagsforholdene på lokaliteten består, som illustreret på figuren øvers på foregående side, af sandet fyldt til ca. 1,5 m.u.t. Herunder træffes fin-, mellem- og grovkornet sand til dybder mellem ca. 3,5 og 4,0 m.u.t. Kornstørrelsen af sandet stiger med dybden, og dybest er truffet et gruslag. Gruslaget underlejres af fed yoldialer. Yoldialeren er ikke gennemboret, men forventes

at have en mægtighed på minimum 5 meter. Der er truffet et terrænnært grundvandsmagasin med frit vandspejl ca. 1,7 m.u.t.

Efter en vurdering af samtlige mulige afværgeteknikker til kildefjernelse stod valget mellem afgravning og dampstripping. Forureningsbeliggenhed – overvejende under bygninger – betød, at en løsning ved afgravning ville være meget vanskelig at gennemføre og forholdsvis dyr. Dampstripping – som dels kan gennemføres uden nedrivning/afstivning af bygninger og dels vurderes at have en høj oprensningseffekt – blev således valgt som afværgeteknik.

Formålet med oprensningen har været at sikre nærliggende beboelsesejendomme mod uacceptable indeklima påvirkninger.

## Dansk Geofysik arbejder med vand....

- Kortlægning af grundvandsressourcer
- Kildepladsundersøgelser
- Risikoanalyser
- Sporing af forureningskilder
- Opstilling af grundvandsmodeller
- Kortlægning af nedgravede tankanlæg og rør
- Kortlægning af råstoffer

## Dansk Geofysik

Kortlægning og rådgivning

Dansk Geofysik A/S  
 Forskerparken  
 Gustav Wieds Vej 10  
 DK-8000 Århus C

Tel. +45 86 20 50 80  
 Fax. +45 86 20 97 88  
 E-mail: [dg@geofysik.dk](mailto:dg@geofysik.dk)  
 Web: [www.geofysik.dk](http://www.geofysik.dk)

Dampinjektionen i Aalborg er foretaget ved hjælp af 11 injektionsboringer. Otte af de 11 injektionsboringer er placeret i periferien af forureningen, mens der centralt i oprensingsområdet er etableret tre injektionsboringer med henblik på at sikre en tilstrækkelig opvarmning i centrum af forureningen sidst i driftperioden. Gennem oprensingsforløbet er der tilladt i alt ca. 1000 kg/damp per time via de 11 injektionsboringer. Boringsplaceringen fremgår af artiklens første figur.

Centralt i kildeområdet er der ekstrahe- ret grundvand (ca. 1-3 m<sup>3</sup>/time) og pore- luft/damp (ca. 150 m<sup>3</sup>/time) fra to boringer. Den ekstraherede gas- og væskefase er ført til et behandlingsanlæg, hvor der efter kø- ling af begge medier er foretaget en udskil- ning af kondensat og en opsamling af fri fase forurening i en særskilt beholder. Det kølede grundvand/kondensat samt den ikke kondenserbare del af gasfasen er ledt gen- nem filtre med aktivt kul inden afledning til henholdsvis kloak og atmosfære.

### 30 dages injektionsboringer

På baggrund af simuleringer af den teoreti- ske dampudbredelse på lokaliteten blev det estimeret, at der indenfor ca. 15 dages kon- tinuert injektion kunne etableres en sam- menhængende ring af damp i periferien af kildeområdet. Ved etableringen af en dampring i den mættede zone mellem injektionsboringerne er det hensigten at opnå en hydraulisk adskillelse af kildeom- rådet fra det omkringliggende grundvands- magasin. Dampzonen blokerer så at sige for tilstrømmende grundvand, hvorefter kildeområdet delvist kan afvandes.

Endvidere blev det estimeret, at kilde-

området i al væsentlighed ville have opnået damptemperatur efter ca. 30 dage. Den samlede driftsstrategi omfattede således 30 dages kontinuert injektion efterfulgt af 30 dages cyklisk drift.

Dampfronternes faktiske udbredelse under oprensningen er monitoreret ved hjælp af i alt ca. 300 termofølere fordelt på 40 monitoringsboringer i og omkring oprens- ningsområdet. Temperaturmonitoringen er som minimum foretaget manuelt hver an- den dag i løbet af driftperioden, og resul- tatet efter 5, 12 og 28 dage fremgår af figu- rerne øverst på modstående side.

Efter 30 dages drift af anlægget var der opnået en dampring omkring kildeområdet, og efter 70 dages drift var kildeområdet stort set opvarmet til damptemperatur. Her- efter overgik anlægget til en cyklisk drifts- periode på 30 dage. Den forlængende kon- tinuerte driftsperiode – 70 dage i forhold til de planlagte 30 dage – skyldes i høj grad tekniske problemer med pumper, som følge af det aggressive miljø (høje temperaturer og fri fase forurening), ligesom gruslaget umiddelbart over lerlaget ca. 3,7 m.u.t. medførte en uventet stor indstrømning af grundvand til området.

Ved afslutning af oprensningen er der fjernet ca. 1.000 kg fri-fase-forurening – overvejende terpentiner – hvilket vurderes at udgøre størstedelen af det tidligere kilde- område på lokaliteten. I kondensatzonen over det opvarmede område (ca. 1,0 m.u.t.) er der dog efterladt en mindre restforure- ning, og på nuværende tidspunkt gennem- føres monitoring med henblik på at vur- dere, om der fremover vil være en risiko for arealanvendelsen på lokaliteten. Så- fremt dette viser sig tilfældet, vil der blive

etableret et midlertidigt – og meget simpelt – vakuumelekstraktionssystem, og efter 3-12 måneders, vurderes de tilbageblevne kon- centrationer at være tilstrækkeligt nedbragt.

Sammenfattende vurderes det efter af- slutning af oprensningen i Aalborg – og ligeledes ud fra NIRAS' kendskab til andre dampoprensninger herhjemme og i udlan- det, at dampstripping er en meget effektiv afværgeteknik til kildefjernelse i højper- meable aflejringer (både umættet og mættet zone) såvel i ubebyggede områder som un- der bygninger.

### Fleksibilitet, samarbejde og rigtigt udstyr

Dampstripping er dog en relativt ny op- rensningsteknik, og med garanti vil der opstå uventede episoder undervejs i op- rensningsforløbet som følge af svigtende "hardware", opvarmning i en ikke forventet retning samt lugt- og støjgener i nærmiljø- et. Der bør rettes en særlig opmærksomhed mod følgende ved termisk oprensning:

- Vigtigheden af et korrekt og ikke mindst et fleksibelt design (boringsplacering, justeringsmuligheder mv.).

- Dampstripping er en aggressiv oprens- ningsteknik, som kræver hurtig aktion hos både entreprenør, bygherre og rådgiver. Ligeledes kræves daglige tilsyn.... også i weekender og juleaften!

- Et godt forhold mellem entreprenør, byg- herre, rådgiver og de berørte grundejere, som tilfældet har været ved den aktuelle oprensning i Aalborg, er en STOR hjælp.

God fornøjelse med de termiske teknikker! ■

## Kort nyt

**En guldåre ligger og venter på Grønland**  
I Kirkespirdalen i det sydligste Grønland lokker naturen med en to kilometer lang tunge af guldhoidigt kvartsmalm.

Grundige undersøgelser tyder på, at den to meter lange, tykke åre er så rig på guld, at det 21. århundredes moderne guldgra- vere med sindsro kan forgribe sig på fore- komsterne.

To firmaer regner da også med, at de i samarbejde kan åbne Grønlands første gulddmine med udgangen af 2002.

Fjeldenes åre skønnes at indeholde ca. 15 tons guld til en samlet værdi af 1,2 mia kr.

Det canadiske firma Crew Development Corporation vil gå løs på guldkornene i samarbejde med det statsejede grønlandske selskab Nuna Minerals A/S. Og hvis mine- driften bliver realiseret, vil guldet også skinne på både hjemmestyret og Danmark i

form af provenuet fra selskabsskatter, der for tiden er på 35 procent af fortjenesten.

Direktøren for Råstofdirektoratet under hjemmestyret, Kristian Schönwandt venter dog ikke, at selskaberne kan have en udvin- dingstilladelse før 2003. "Før de kan få en tilladelse, skal de gøre rede for økonomien i projektet. Derudover skal de aflevere en plan for, hvordan anlægget og produktionen kan etableres under hensyntagen til miljøet. Endelig skal de også have en plan for, hvor- dan de vil lukke minen, når der ikke er mere guld at hente", siger Kristian Schönwandt.

*Berlingske/PBS/J*

**Undersøiske vulkaner ved Gakkel Ridge**  
Amerikanske geologer har i forbindelse med et togt på U.S. Coast Guards isbryder Cut-ter Healy for nyligt opdaget flere un- dersøiske vulkaner og varme kilder i dyb-

havet i forbindelse med Gakkel Ridge, der er den nordligste og dybeste gren af de glo- bale midt-oceanske rygge.

Forskerne regnede egentligt ikke med at Gakkel Ridge ville være vulkansk aktiv, idet kontinentalpladerne fjerner sig hér eks- tremt langsomt fra hinanden – især i den nordlige ende af ryggen. Men alligevel re- gistrerede man tolv ukendte undersøiske vulkaner i forbindelse med irregulære vul- kanske lommer, og via prøver fra havbun- den fandt man hér vidnesbyrd på et ulat af nu inaktive black smokers. Derfor tror for- skerne nu på, at aktive hydrothermale kil- der kan findes langs ryggen med hidtil ukendte marine or-ganismer, fordi der i forbindelse med black smokers kan findes bizarre og eksotiske livsformer, som er til- vænnet de ekstreme livsbetingelser.

*Reuters/TBT* ■