

Vurdering af stødvis ventilation og pneumatisk opsprækning

Loren Ramsay
HOH Vand & Miljø A/S

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

Forord 5

Dansk Sammendrag 7

English Summary 11

1 Indledning 15

2 Beskrivelse af teknikkerne 17

2.1 Stødvis ventilering 17

2.2 Pneumatisk opsprækning 19

3 Udenlandsk erfaringsopsamling 23

3.1 AGA AB (stødvis ventilering) 23

3.1.1 *Baggrund* 23

3.1.2 *Felterfaringer* 23

3.1.3 *Driftstid* 26

3.1.4 *Økonomi* 26

3.2 Accutech Remedial Systems, Inc. (pneumatisk opsprækning) 26

3.2.1 *Baggrund* 26

3.2.2 *Felterfaringer* 27

3.2.3 *Driftstid* 28

3.2.4 *Økonomi* 28

3.3 Andre kildern 29

4 Dansk erfaringsopsamling 30

4.1 Aktuelle projekter 30

4.1.1 *KK Technical* 30

4.1.2 *Hede Nielsen A/S* 32

4.2 Forespørgsler i Danmark 33

5 Vurdering 34

5.1 Anvendelsesområder 34

5.2 Fordele og ulemper 35

5.3 Tests 36

5.4 Dokumentation af teknikkerne 36

5.5 Egnethed til forsøgsprojekt 37

6 Referencer 38

Bilag

Bilag 1 Resultater fra udenlandsk erfaringsopsamling

Bilag 2 Danske forespørgsler

Forord

Denne rapport beskriver og vurderer to nye in-situ afværgeteknikker, stødvis ventilation og pneumatisk opsprækning. Endvidere omfatter rapporten en gennemgang af danske og udenlandske erfaringer med teknikkerne.

Rapporten henvender sig primært til Miljøstyrelsen, men også til andre myndigheder, institutioner, rådgivere og entreprenører, som kan tænkes at anvende teknikkerne.

Rapporten er udarbejdet i 1997 af HOH Vand & Miljø A/S (tidligere Kemp & Lauritzen Vand & Miljø A/S) på baggrund af en anmodning fra Miljøstyrelsen.

Udredningsprojektet hører under en særlig ordning for udviklingen af rensnings- og afværgeteknologier på jord- og grundvandsforureningsområdet.

Dansk Sammendrag

Denne rapport blev udarbejdet for Miljøstyrelsen i 1997 af HOH Vand & Miljø A/S (tidligere Kemp & Lauritzen Vand & Miljø A/S). Den beskriver og vurderer to nye in-situ afværgeteknikker, stødvis ventilering og pneumatisk opsprækning. Herudover angiver rapporten en oversigt over udenlandske og danske projekter, som har anvendt disse teknikker og vurderer behovet for test af metoderne under danske forhold.

Rapporten er begrænset til en gennemgang af litteraturen samt vurdering af anvendelse i den umættede zone. Der blev ikke udført laboratorie- eller feltforsøg.

De to beskrevne teknikker blev udviklet i 1990'erne og bliver anvendt i forbindelse med oprensning af lossepladser eller forurenede jord. Teknikkerne omfatter indblæsning af luft eller iltberiget luft i jorden i de korte stød. Dette udskifter den eksisterende forurenede poreluft, fremmer et aerobt miljø til forbedring af nedbrydningshastigheder samt danner og udvider sprækker i jord og klipper, hvis der anvendes tilstrækkeligt tryk. Teknikkerne er egnede til lokaliteter, der er forurenede med organiske forureningskomponenter, som er bionedbrydelige eller flygtige.

Hovedparten af aktiviteterne omkring denne teknik er udført i forbindelse med bestemte firmaer samt patenteret udstyr og/eller metoder. Disse firmaer omfatter AGA AB, Sverige (stødvis ventilation) og Accutech Remedial Systems, Inc., USA (pneumatisk opsprækning).

Stødvis ventilation

Anvendelsen af stødvis ventilation findes indenfor følgende hovedområder: 1) lugtstabilisering/reduktion af eksplosionsrisiko i forbindelse med opgravning og sortering af gammelt lossepladsaffald, 2) fremskynning af bionedbrydning i lossepladsaffald og 3) bioventilering af forurenede jord. Driftstiden for disse anvendelsesområder er hhv. 10-14 dage, 3-8 måneder og individuel fra sag til sag.

Afværgeprocessen involverer indblæsning af luft via en specielt udformet trykklanse samtidig med, at der fjernes poreluft ved almindelige ventilationsboringer i nærheden. Indblæsning af luft sker ved små trykbeholdere (2-10 bar) placeret ved hver trykklanse. Luften indblæses på en gang som et stød via en hurtig ventil. Stødet bliver gentaget med et bestemt interval (sekunder til minutter).

En beskrivelse af luftflowteori ved stødvis ventilation blev ikke fundet i litteraturen.

I Danmark findes der p.t. kun en enkelt lokalitet, hvor stødvis ventilation bliver anvendt. Lokaliteten er en tidligere tankstation i Bredsten. Her udføres et afværgeprojekt i forbindelse med en dieselurening. Der

anvendes 2 indblæsningslanser omgivet af 7 vacuumventileringsboringer. Monitering på grunden har ikke frembragt data, som kan bekræfte eller afkræfte forbedringer ved anvendelse af stødvis ventilation i forhold til almindelig bioventilering.

Der findes en del erfaringer fra udlandet, især i Østrig, hvor metoden blev udviklet, og Tyskland. Hovedanvendelsen i udlandet har været lugtstabilisering/reduktion af eksplosionsrisiko i forbindelse med opgravning og sortering af gammelt lossepladsaffald. Flere store lossepladser er blevet opgravet, og det er lykkedes at opnå en volumenreduktion af affaldet. Anvendelse af metoden til fremskyndelse af bionedbrydning af lossepladsaffald og bioventilering af forurenede jord er kun forsøgt på få udenlandske lokaliteter.

Det vurderes, at de mest lovende anvendelser af stødvis ventilation i forhold til lovbekendtgørelse nr. 939 fra oktober 1996 om affaldsdeponier er fremskyndet bionedbrydning af lossepladsaffald og bioventilering af forurenede jord.

Prisen for lugtstabilisering/reduktion af eksplosionsrisiko er angivet til at være ca. 35-70 DKK pr. tons affald. Prisen for andre anvendelser var ikke tilgængelige.

Denne rapport forslår 2 undersøgelser i forhold til anvendelse af stødvis ventilation under danske forhold: 1) pilot eller fuldskala fremskyndet bionedbrydning af lossepladsaffald og 2) feltundersøgelser af luftflowmønstre i stødvis ventilation sammenlignet med almindelig bioventilation i inhomogene jordlag.

Pneumatisk opsprækning

Anvendelsen af pneumatisk opsprækning findes inden for følgende hovedområder: 1) forbedring af mulighederne for en efterfølgende vacuumventilering i lavpermeable lag, 2) forbedring af oppumpning af frifase på grundvandsspejlet, og 3) afvanding af hængende grundvandsspejl.

Desuden kan pneumatisk opsprækning også forbedre resultatet af pump-and-treat i den mættede zone. Den fysiske proces til pneumatisk opsprækning varer nogle dage. En mulig besparelse i driftstid ved det efterfølgende in-situ afværgeprojekt er vanskeligt at kvantificere.

Opsprækningsprocessen er baseret på indblæsning af trykluft i korte pulser (under et minut) i specialudbyggede boringer. Pulsen gentages ved forskellige dybder i samme boring (hver puls påføres et filterinterval på ca. en meter) samt i andre boringer for at sikre, at den ønskede jordvolumen bliver behandlet.

Et højt starttryk (ofte omkring 5 bar) skal anvendes for at overkomme lagenes sammenkitning samt massen af de overliggende lag.

Efter at opsprækningen er påbegyndt, skal et luftflow, der overstiger jordens permeabilitet, anvendes for at forplante sprækkerne ud fra injektionsboringen. Efter at luftinjektionen er sluttet, lukkes sprækkerne delvist.

Teorien omkring luftflow er baseret på åbne sprækker frem for flow i porøse lag. Kubikloven – som angiver, at luftflow er proportionel med sprækkens størrelse opløftet til 3. potens – er den teoretiske basis. Det påstås, at det er forklaring på de meget forøgede luftflow, der kan opnås efter udførelse af pneumatisk opsprækning.

Der er på nuværende tidspunkt endnu ikke anvendt pneumatisk opsprækning i Danmark.

Fuldskalaanvendelse af pneumatisk opsprækning til in-situ afværgeprojekter er blevet anvendt i stor stil i USA. Forbedret permeabilitet af den opsprækkede jord eller klippe er tilstrækkelig dokumenteret. Efter opsprækning har forskellige teknikker til den egentlige oprensning været anvendt, herunder vacuumventilering, bioventilering og termisk behandling. Herudover er teknikker såsom oppumpning af frifase kulbrinter og air sparging blevet anvendt i den mættede zone.

Forskellige beregninger af udgifter i forbindelse med pneumatisk opsprækning findes i litteraturen. Udgiften for at leje opsprækning og moniteringsudstyr for de nødvendige 2 uger er i 1993 estimeret til ca. 170.000 kr. med yderligere udgifter på ca. 95.000 kr. til honorar. Prisen pr. tons opsprækket jord (ud over udgifter til den primære oprensning) er skønnet til 25-60 kr.

Da mange forurenede lokaliteter i Danmark findes i områder med lav-permeable jordlag, vurderes det her, at pneumatisk opsprækning er en relevant teknik. Da teknikken er veldokumenteret i USA, foreslås det, at et fuldskala forsøg udføres under danske forhold.

English Summary

This report was prepared for the Danish Environmental Protection Agency in 1997 by HOH Vand & Miljø A/S (previously Kemp & Lauritzen Vand & Miljø A/S). It describes and evaluates two new in-situ remediation techniques, pulsed venting and pneumatic fracturing. In addition, the report provides an overview of foreign and Danish projects which have made use of these techniques, and evaluates the need for testing the methods under Danish conditions.

The report is limited to a literature review and to a discussion of use of the techniques in the vadose zone. No laboratory or field testing was carried out.

The two techniques of interest have been developed since approximately 1990 and are used to remediate landfills or contaminated soil.

Remediation occurs through the introduction of air or oxygen-enriched air into the ground in short bursts. This replaces existing contaminated soil gas, provides an aerobic environment for the improvement of biodegradation rates and creates and expands fractures in soil and bedrock, if adequate pressures are used. The techniques are suitable for remediation of organic contaminants which are biodegradable or volatile.

The majority of activity regarding the techniques are connected to specific companies and patented equipment and/or methods. These companies include AGA AB, Sweden (pulsed venting) and Accutech Remedial Systems, Inc. (pneumatic fracturing).

Pulsed venting

The three major applications of pulsed venting are: 1) odour stabilization/explosion risk reduction in landfills prior to excavation and waste sorting, 2) acceleration of biodegradation of landfill wastes and 3) bioventing contaminated soils. Operation times for these three applications are 10-14 days, 3-8 months and individual from case to case, respectively.

The remediation process involves the injection of air via specially constructed pressure lances concurrent with the continuous removal of displaced soil gas via normal vacuum extraction wells in the proximity. Air injection occurs via individual small pressurized containers (2-10 bars) placed on top of each pressure lance. The air is injected all at once in a shock-like manner through a fast-working valve. This pulse is repeated in each lance at suitable intervals (seconds to minutes).

A description of the theory of air flow during pulsed venting was not found in the literature.

There is currently only one site in Denmark where pulsed venting is used. The site is a former service station located in the town of Bredsten.

Here, diesel contamination is currently being remediated by two injection lances surrounded by 7 vacuum extraction wells. Monitoring at the site has not produced data which can support or refute claims of improved clean-up with pulsed venting as compared to normal bioventing.

Considerable foreign experience with the method has been achieved in Austria (where the method was developed) and Germany. Here, the main application has been odour stabilization/explosion risk reduction at landfills prior to excavation and sorting. Numerous large landfills have been successfully excavated using this method resulting in waste volume reduction. Application of the technique for accelerated biodegradation of landfill wastes and bioventing of contaminated soils has been attempted at very few foreign sites.

The most promising applications for pulsed venting in regard to the Danish law no. 939 of October 1996 on contaminated sites (lovbekendtgørelse om affaldsdepoter) is judged to be accelerated biodegradation of landfill wastes and bioventing contaminated soils.

The price of odour stabilization/explosion risk reduction is reported to be approx. 5-10 US dollars pr. ton waste. Prices for the other applications were not available.

Two recommendations for testing pulsed venting under Danish conditions are set forth at the conclusion of the report: 1) pilot or full-scale accelerated biodegradation of landfill wastes and 2) field studies to compare air flow patterns of pulsed venting contra continuous bioventing in inhomogeneous soils.

Pneumatic fracturing

The three major applications of pneumatic fracturing are 1) improving the results of soil vapor extraction or bioventing projects by increasing the permeability of the soil, 2) accelerating removal of separate phase hydrocarbons, 3) dewatering perched water tables. In addition, pneumatic fracturing can improve results of pump-and-treat in the saturated zone. The actual process of pneumatic fracturing requires typically a period of several days. Potential savings in operation times of the following in-situ clean up is difficult to quantify.

The fracturing process is based on the injection of short pulses (under one minute) of air under high pressure in specially constructed wells. The pulse is repeated at various depths in the same well (each pulse is applied on a screen interval of about 1 meter) as well as in other wells to ensure the desired soil volume is treated. A high initial pressure (often about 5 bars) must be used to overcome cohesion and the mass of the overlying layers. After initiation, an air flow which exceeds the permeability of the soil layer is used to extend the fractures away from the injection well. At the conclusion of the air injection, partial closure of the fractures occurs.

The reported theory of air flow is based on flow in open fractures rather than porous media. Here, the cubic law - which states that the air flow is proportional to the cube of the fracture size - is the theoretical basis. It is

claimed that this is the explanation for the greatly increased air flows made possible by pneumatic fracturing.

To date, no in-situ remediation projects in Denmark have used pneumatic fracturing.

Full-scale application of pneumatic fracturing for in-situ remediations has been extensive in the United States. Improved permeability of the fractured soils or bedrock has been adequately documented. Following the fracturing a variety of techniques have been applied, such as soil vapor extraction, bioventing and thermal treatment. In addition, techniques for the saturated zone such as removal of free-phase hydrocarbon or air sparging have been investigated.

Various calculations of prices are to be found in the literature. Expenses for renting fracturing and monitoring equipment for the necessary two weeks have been estimated at 28,000 U.S. dollars and an additional 16,000 for labor. The price pr. ton fractured soil (in excess of the primary remediation) is estimated at 4 - 10 U.S. dollars.

Due to the fact that many contaminated sites in Denmark are located in areas with low permeable soils, it is deemed that pneumatic fracturing is a relevant technique. Since the technique is well-documented in the United States, it is recommended that a full-scale test be carried out under Danish conditions.

1 Indledning

Definition

Dette miljøprojekt omhandler 2 nye in-situ afværgeteknikker, stødvis ventilering og pneumatisk opsprækning. Teknikkerne er udviklet siden ca. 1990 og anvendes til at oprense lossepladsfyld eller forurenede jord i den umættede zone. Teknikkerne omfatter tilførelse af luft eller iltberiget luft til jorden i korte stød under tryk. Den tilførte luft sikrer en udskiftning af poreluften, danner et aerobt miljø til gavn for aerobe mikroorganismer og kan danne sprækker i jordlagene, hvis der anvendes tilstrækkeligt højt tryk.

Teknikkerne er egnede til lokaliteter, der er forurenede med organiske forureningskomponenter, der er nedbrydelige eller flygtige. Hovedanvendelsen er dermed udskiftning af lossepladsgasser samt oprensning af forurening med oliekomponenter og chlorerede opløsningsmidler. Teknikkerne anvendes ikke til oprensning af forurening med tungmetaller eller uorganiske salte i lossepladsfyld.

Dette udredningsprojekt er alene en opsamling af udenlandske og danske erfaringer. Der er ikke i forbindelse med projektet udført felt- eller laboratorieforsøg.

Formål

Formålet med udredningsprojektet er at beskrive og vurdere stødvis ventilering og pneumatisk opsprækning. Det er ligeledes vurderet, om det er relevant at igangsætte konkrete forsøgsprojekter med teknikkerne.

Grundlag

Udredningsprojektet er iværksat i henhold til Lovbekendtgørelse om affaldsdepoter (Miljøstyrelsen, 1996) § 8a, stk. 2 (Asp Fuglsang, 1996). Loven fastlægger en særlig ordning for udvikling og afprøvning af ny teknologi på depotområdet.

Baggrund

Interessen for anvendelse af in-situ teknikker til oprensning af jord og grundvandsforurening har været stigende op igennem 90'erne. In-situ oprensninger har en række fordele frem for oprensninger baseret f.eks. på opgravning af forurenede jord eller afværgepumpning af forurenede grundvand. Disse fordele kan især omfatte lavere oprensningsøkonomi samt begrænset forstyrrelse af arealanvendelsen under oprensningen.

På denne baggrund har Miljøstyrelsen igangsat dette udredningsprojekt.

Rapporten

Denne rapport er opdelt i 6 kapitler. Efter indledningen gives i kapitel 2 en præsentation af teknikkerne stødvis bioventilering og pneumatisk sprækkedannelse. Kapitel 3 er en gennemgang af udenlandske erfaringer med disse teknikker, mens kapitel 4 indeholder en gennemgang af de begrænsede erfaringer, der indtil videre er opnået i Danmark. Teknikkerne vurderes i kapitel 5, herunder om det er formålstjenligt at iværksætte konkrete forsøgsprojekter. Rapporten afsluttes i kapitel 6 med en sammenfatning.

2 Beskrivelse af teknikkerne

Dette udredningsprojekt omhandler de 2 afværgeteknikker, stødvis ventilering og pneumatisk opsprækning. Teknikkerne anvendes in-situ til at oprense lossepladsfyld eller forurenede jord i den umættede zone. Pneumatisk opsprækning kan tillige anvendes i den mættede zone. I de følgende afsnit præsenteres disse to teknikker.

2.1 Stødvis ventilering

Virkemåde

Som ved almindelig ventilering, virker stødvis ventilering ved at udskifte jordens poreluft med uforurenede iltholdig luft. Ved at anvende stødvis tilførelse af luft under højt tryk kan den tilførte lufts udbredelsesmønster muligvis forbedres ved at undgå dannelse af permanente luftkanaler.

Anvendelser

Der findes flere anvendelser for stødvis ventilering. De vigtigste er (Lange, 1997) på nuværende tidspunkt:

- lugtstabilisering i forbindelse med bortgravning af lossepladser
- fremskyndet nedbrydning af lossepladsaffald
- in-situ ventilering af forurenede jord.

Formålet med lugtstabilisering er at fjerne risikoen for eksplosion af methangas i forbindelse med opgravning af affald samt at reducere lugtgener for arbejdere og omgivelserne. Begge formål kræver blot udskiftning af poreluften, og der er derfor tale om en kortvarig ventilering (få uger).

Efter lugtstabilisering kan lossepladsaffaldet opgraves og sorteres i fraktioner. Den del, der kan nedbrydes, kan efterfølgende behandles over en længere periode (adskillige måneder) med stødvis ventilering. Sorteringen reducerer kraftigt mængden af behandlingskrævende affald samtidig med, at der sker en homogenisering af affaldet. Slutresultatet er en volumenreduktion af affaldet samt et renere perkolat med hensyn til indhold af organiske stoffer.

Nedbrydningen af lossepladsaffald kan også fremskyndes uden en forudgående opgravning og sortering. Ved denne anvendelse tilføres luft eller iltberiget luft i et behersket tempo, der er afpasset mikroorganismernes iltforbrug under nedbrydningsprocessen. Hermed dannes den organiske fraktion hovedsagelig til kuldioxid og vand.

Den sidste anvendelse er stødvis ventilering af forurenede jord, som kan sammenstilles med almindelig vacuumventilation (se f.eks. Johnson, et al, 1990) eller bioventilation (se f.eks. Leeson & Hinchey, 1997).

Formålet med vacuumventilation er at optimere fjernelse af forurening ved fordampning, mens formålet med bioventilation er at optimere fjernelse af forurening ved bionedbrydning. Stødvis ventilering kan anvendes til begge metoder ved tilpasning af design og drift af afværgeanlægget, herunder størrelsen af luftflow.

Processen

Stødvis ventilering omfatter injektion af luft i korte pulser via specialkonstruerede tryklanser eller filterboringer placeret i den umættede zone. Samtidig kan poreluft opsuges kontinuerligt i få meters afstand fra tryklanserne via sugelanser eller filterboringer, der også placeres i den umættede zone. Den opsugede poreluft kan renses ved f.eks. at lede luften igennem et biofilter bestående af en container fyldt med jord eller et kulfilter.

Tryklanserne kan f.eks. bestå af stålrør af 1 tomme, der presses ned i jorden. Vacuumboringerne kan bestå af almindelige filterboringer med en filterdiameter på f.eks. 63 eller 110 mm.

Ved at anvende en passende geometri af tryklanser og sugelanser samt et luftflow på vacuum-siden, der er større end det injicerede luftflow, sikres det, at gasser og flygtige forureningskomponenter ikke vandrer urensset bort fra det forurenede område.

Luftinjektion sker via små kugleformede trykbeholdere ved hver tryklanse. I de små beholdere opbygges et tryk på 2-10 bar. Beholderens indhold af luft injiceres momentant ned gennem tryklansen ved hjælp af en hurtigvirkende ventil. Disse luftstød gentages med passende mellemrum (sekunder/minutter).

Hvis det ønskes, kan luften beriges med ren ilt inden injektion. Ydermere kan luften tilsættes næringsstoffer, vand og/eller mikroorganismer til at forøge forureningens nedbrydningshastighed.

Teori

Teknikken stødvis ventilation er baseret på processer, der forårsager transport af gasser. Disse processer omfatter følgende:

- a) advektion forårsaget af en trykgradient
- b) diffusion i gasfase
- c) advektion forårsaget af densitetsforskelle i poreluften
- d) diffusion af gasser i vandfase

På grund af de relative høje trykgradier anvendt i stødvis ventilation vurderes proces a) ovenfor at overskygge proces c). Da diffusionskoefficienter i gasfasen typisk er en faktor 30-40 større end i vandfasen, vil proces b) ligeledes overskygge proces d). Hermed er det alene de første 2 processer ovenfor, der i praksis er væsentlige.

Diffusion i gasfase beskrives af Fick's første lov, se nedenfor:

$$J = -D \frac{\delta c}{\delta x},$$

hvor J er flux med enheden $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$

D er diffusionskoefficienten med enheden cm^2/s

c er koncentration med enheden mol/cm^3

x er afstand med enheden cm.

Hvis formålet med ventileringen er at forøge transport af ilt ind i mindre permeable lag, hvor transport ved advektion ikke er signifikant, kan man ifølge Fick's lov forøge koncentrationsgradienten $\delta c / \delta x$. Dette kan gøres i praksis ved at anvende iltberiget luft til injektion.

Hvis der er tale om jordlag med et stort vandindhold, vil udtørring/dræning forøge det luftfyldte tværsnitsareal, hvori diffusion kan foregå.

Advektion i porøse medier beskrives ofte af Darcy's lov, en form for Fick's første lov. Midt i 1800-tallet fandt Darcy, at strømning af vand i et springvand i Dijon, Frankrig, kunne beskrives af følgende udtryk:

$$Q = A \cdot \Delta p / L$$

hvor Q er flow,

A er tværsnitsarealet,

Δp er trykforskellen mellem enderne af en cylinder med længde L.

Selv om Darcy's lov oprindeligt beskrev transport af vand, gælder den også for luft. Loven er grundlaget både for strømningsmodeller, der anvendes til grundvand og til luft ved f.eks. bioventileringsprojekter. Massmann (1989) fandt f.eks., at grundvandsmodeller baseret på Darcy's lov gav en god approksimation af luftflow under forudsætning af en trykforskel på mindre end 0,5 atm.

Til det foreliggende formål kan Darcy's lov beskrives således i ord:

- luftflow stiger lineært med det tryk, der anvendes til injicering af luften
- luftflow stiger lineært med jordporernes tværsnitsareal.

Afvielser fra loven fremkommer først ved store flowhastigheder, der forårsager turbulent flow. Da stødvis ventilering anvender et tryk fra 2 til 10 atm, vil der forventes et turbulent flow, således at der vil forekomme afvielser fra Darcy's lov. Der er ikke i litteraturen fundet en udredning af den gældende teori bag luftflow ved stødvis ventilering.

Anlæg

Der er 5 hovedkomponenter i et anlæg til stødvis ventilering.

- Kompressor med tilhørende trykbeholder.
- Vacuumpumpe til at suge poreluft op til overfladen.
- Lanser eller borer, evt. specialkonstruerede.
- Decentral trykbeholder med hurtigvirkende ventil ved hver tryklanse til udløsning af luftstød til jorden.
- Luftrensning af afkastluft ved et biofilter eller kulfilter.

En principskitse af stødvis ventilering ses på figur 2.1.

2.2 Pneumatisk opsprækning

Virkemåde

Teknikken pneumatisk opsprækning anvender injektion af luft ved højt tryk til at danne sprækker, enten i den umættede eller mættede zone, og

hermed forbedre jordlagenes permeabilitet. I denne rapport medtages kun den umættede zone samt evt. zoner over grundvandet med frifase eller et hængende grundvandsspejl. Ved opsprækning i den umættede zone fås et bedre resultat ved efterfølgende in-situ afværgeløsninger såsom bioventilering og vacuumventilering, og driftstider kan forkortes. Desuden udvides anvendelsesområderne for disse metoder til at omfatte mere vanskelige, dvs. mindre permeable geologiske lag. Teknikken må opfattes som en forberedelsesteknik frem for en egentlig oprensningsteknik.

Anvendelser

Teknikken pneumatisk opsprækning kan bruges til en række meget forskellige anvendelser, især i lerede formationer. De tre hovedanvendelser er:

- forbedring af vacuumventilering og bioventilering
- forbedring af oppumpning af frifase på grundvandsspejlet
- afvanding af hængende grundvandsspejl (Leonard & Liskowitz, 1997)

Desuden er det nævnt i litteraturen, at teknikken kan anvendes til tilsætning af sporstoffer, mikroorganismer eller vand samt til at opnå en hurtig beluftning af permeable lag.

Processen

Opsprækningsprocessen er baseret på injektion af korte pulser (dvs. under et minut) af luft under højt tryk i specialkonstruerede borer. Der afskærmes typisk et filterinterval på ca. 1 m ved hjælp af en pakker inden luftinjektionen. Erfaringer viser, at opsprækningen hovedsagelig sker i horisontalt plan ud fra injektionsintervallet. Pulsen gentages ved forskellige dybder i samme boring ved at flytte pakkeren, og i flere borer for at sikre, at hele det ønskede jordvolumen behandles.

For at påbegynde opsprækningen skal der anvendes et tilstrækkeligt højt tryk, som ofte er på omkring 5 atmosfære i lerede aflejringer og noget højere i f.eks. skifer. Det aktuelle tryk, der skal anvendes, beregnes ud fra kendskab til lokalitetens geologi samt massen af de overliggende jordlag (dvs. dybden af injektionsboringen).

Efter at opsprækningen er påbegyndt, skal der injiceres et luftflow, der overskrider formationens permeabilitet. Hermed forplanter sprækkerne sig ud fra injektionsboringen.

Luftinjektionen menes at forårsage udvidelse og forlængelse af eksisterende sprækker i jorden.

I ler vil dette hovedsageligt ske langs lagfladerne, bl.a. på grund af svagheder imellem jordlagene. Herudover menes luftinjektionen at forårsage dannelse af nye sprækker, hvor jordlagene er dårligst konsoliderede og hærdede. Figur 2.2 viser konceptet for pneumatisk opsprækning.

Ved afslutning af luftinjektionen kan sprækkerne falde sammen igen. De fleste jordtyper udviser dog en karakteristisk, der her kaldes for egenafstivning. Egenafstivning (på engelsk self-propping) er den egenskab, der holder sprækkerne åbne efter afslutning af luftinjektion, og menes at skyldes ujævnheder langs sprækkeplanet samt bevægelse af jordpartikler

under luftinjektion. Hårde geologiske materialer udviser egenafstivning i større grad end f.eks. blødt ler. Ved udpræget mangel på egenafstivning kan injektion af afstivningsmaterialer såsom sand være nødvendig.

En væsentlig bivirkning af sprækkedannelse er hævnning af jordoverfladen. Under injicering af trykluft er der observeret hævnning fra 0,3 til 5 cm. Den største hævnning sker i umiddelbar nærhed af injektionsboringen og reduceres med afstanden fra boringen. Efter afslutning af injektion er den tilbageblivende hævnning typisk på 10 til 20 % af det maksimale under injektionen. Der skal naturligvis altid tages stilling til risikoen for skader på bygninger mm. inden anvendelse af pneumatisk sprækkedannelse.

Hvis de forurenede jordlag har en permeabilitet svarende til finsand eller højere, kan metoden anvendes til at frembringe en hurtig beluftning. Desuden kan næringsstoffer, mikroorganismer eller vand tilsættes under luftinjektionen for at forbedre nedbrydningsbetingelserne. I litteraturen er omtale af denne anvendelse dog ikke udbredt på nuværende tidspunkt.

Flere oplysninger om processen findes i Schuring, et al., (1995).

Teori

Efter at der er foretaget en pneumatisk opsprækning på en grund, udføres der normalt en traditionel in-situ oprensning med teknikker som vacuumventilering eller bioventilering. Denne efterfølgende oprensning er baseret på advektions- og diffusionsprocesser, der forårsager transport af gasser.

Som tidligere beskrevet kan diffusion i gasfase beskrives af Fick's første lov. Med hensyn til advektiv transport af luft i sprækkerne, dannet af pneumatisk opsprækning, menes Darcy's lov (der gælder for strømning i porøse medier) ikke at gælde. Da de dannede sprækker er åbne frem for at være fyldt med et porøst materiale, gælder kubikloven i stedet for. Denne lov kan udtrykkes som følger:

$$Q \propto b^3,$$

hvor Q er flow,
b er sprækkens størrelse.

Hermed kan en sprække med en åbning på 0,1 cm yde samme flow som en sandfyldt sprække med åbning på 58 cm (Liskowitz, et al., 1993; Keffer, et al., in press). Da de sprækker, der dannes under pneumatisk opsprækning, ikke dækker hele jordvoluminet, kan den langsomme diffusion af gas inde i jordlagene uden sprækker dog stadig være afgørende for oprensningens succes.

Anlæg

Der er 3 hovedkomponenter i et anlæg til pneumatisk sprækkedannelse:

- Kompressor/trykbeholder: der er enten behov for en kompressor, der kan opbygge et tryk op til ca. 35 bar samt en tilhørende trykbeholder eller et batteri af trykcylindre, der kan opbevare et tilstrækkeligt luftvolumen for at sikre, at sprækkerne forplanter sig ud fra

injektionspunktet. Tryk og flow under injektionen skal kunne kontrolleres.

- Injektionsanordning: der skal være en speciel anordning til injektion af trykluft f.eks. baseret på en øvre og en nedre lufttæt pakke placeret i filtret i en almindelig boring. Pakkerne afgrænser injektionen til et bestemt dybdeinterval.
- Monitoringssystem: dette skal kunne måle hævnningen af jordoverfladen adskillige steder for at dokumentere påvirkningsradius.

Efter at pneumatisk opsprækning er udført, er der behov for et anlæg til f.eks. vacuumventilering eller bioventilering.

3 Udenlandsk erfaringsopsamling

Indsamlingen af udenlandske erfaringer er foretaget ved hjælp af databaser med fagtidsskrifter, søgerobotter på internet samt ved gennemgang af artikler fra relevante konferencer.

Adgang til mange af de udenlandske erfaringer findes via private firmaer, nemlig AGA (stødvis ventilering) og Accutech Remedial Systems, Inc. (pneumatisk sprækkedannelse). Oplysninger med relation til disse 2 firmaer angives i de første 2 afsnit nedenfor. I det sidste afsnit angives resultatet af undersøgelse af en række andre kilder.

3.1 AGA AB (stødvis ventilering)

3.1.1 *Baggrund*

I begyndelsen af 1990'erne opfandt en østrigsk ingeniør, Dietrich Ranner, en ny metode til behandling af lossepladsaffald (Mattäus & Ord, 1996). Et konsortium, ARGE Bio-Puster, der består af de 3 entreprenørfirmaer (Porr-Umwelttechnik, G. Hinteregger & Söhne samt Grün & Bilfinger) tog patent på metoden. Senere købte AGA AB et udstyrspatent fra opfinderen Ranner.

Metoden blev afprøvet i forbindelse med EXPO 1995, der blev afholdt i Østrig. På grund af pladsbehov til EXPO 1995 skulle en losseplads midt i Wien (Donaupark) med ca. 1,1 mio. tons affald fjernes. De kraftige lugtgener fra lossepladsgasser og eksplosionsrisikoen ved gravearbejdet i fyld med methangas, gjorde det ikke muligt umiddelbart at bortgrave affaldet.

I 1991 behandlede ARGE Bio-Puster lossepladsen med specielt udviklet udstyr (BIOPUSTER®) til stødvis ventilering for at ændre lossepladsens tilstand fra anaerobe til aerobe forhold. Hermed blev lugten ”stabiliseret” og eksplosionsrisikoen fjernet.

Lossepladsen blev behandlet i små etaper, som hver krævede 2-3 uger, inden bortgravning kunne finde sted. Efter bortgravning blev affaldet sorteret og bortkørt.

Figur 3.1 viser et typisk anlæg anvendt til lugtstabilisering.

3.1.2 *Felterfaringer*

Der er iværksat/afsluttet fuldskala projekter i forbindelse med stødvis lufttilførsel (Lange, 1997). Disse projekter omfatter alle 3 anvendelser: lugtstabilisering, fremskyndet nedbrydning af lossepladsaffald og oprensning af forurenede jord. Udvalgte projekter beskrives nedenfor.

Donaupark losseplads

De første fuldskala erfaringer med lugtstabilisering blev opnået på den førømtalte losseplads i Wien. Anlægget her bestod af flere rækker tryklanser omgivet af flere rækker vacuumlanser. Normalt blev der oppumpet 30% mere luft via vacuumlanserne, end der blev injiceret for at sikre at gasserne ikke undslap behandlingen.

Afkastluften blev behandlet med et biofilter (dvs. en container fyldt med organiskholdig muldjord) efterfulgt af et kulfilter.

Under drift af anlægget steg temperaturen af afkastluften voldsomt i løbet af de ca. 3 uger, der blev anvendt til lugtstabilisering. Den store stigning fandt kun sted ved behandling af husholdningsaffald, mens behandling af byggeaffald resulterede i en ganske svag stigning. Figur 3.2 viser disse temperaturstigninger.

Lugtstabiliseringen fungerede tilfredsstillende, og affaldet blev bortgravet uden explosionsrisiko eller uacceptable lugtgener.

Berger-Deponie

Et lignende projekt til lugtstabilisering er påbegyndt i oktober 1996 på Berger-Deponie syd for Wien. Her skal der behandles ca. 0,9 mill. tons affald. Projektet forventes afsluttet medio 1998. Herudover er der udført adskillige mindre lugtstabiliseringsprojekter i Østrig og Tyskland i størrelsesordenen 100.000 - 300.000 tons affald (Kragelund, 1995). Der meldes om tilfredsstillende resultater og vellykket fjernelse af affald.

Stendal

Et demonstrationsprojekt til fremskyndet nedbrydning af lossepladsaffald er påbegyndt april 1997 i Stendal i Sachsen-Anhalt, Tyskland. Her skal der behandles 4.000 tons affald over en periode på ca. 8 måneder. Formålet med behandlingen er volumenreduktion og en uproblematisk deponering efterfølgende. Lokaliteten er tilkøbt forskningsaktiviteter.

Dresden

Der er udført et enkelt stødvis ventileringsprojekt på forurenede jord ved en servicestation i Dresden, Tyskland (Arge Bio-puster, 1995, Ecosystem Saxonia, 1994). Jorden på lokaliteten består af mellemkornet sand. Ca. 2.000 tons jord var forurenet med 12.000 kg kulbrinter. De højeste målte koncentrationer var ca. 12.000 mg/kg jord. Formålet med projektet var at reducere forureningsindholdet til 500 mg/kg, således at jorden ved senere opgravning kunne fjernes til en billigere takst. Forureningen er skønnet til at befinde sig i den umættede zone (ned til ca. 7 m's dybde) over grundvandspejlet, som stod ca. 9,3 m u.t..

Afværgeanlægget bestod af 3 tryklanser med tilhørende trykbeholdere og 2 vacuumventilationsboringer.

Anlægget var i drift i 6 måneder fra ca. 1. august 1993 til udgangen af januar 1994, 14 timer om dagen med indblæsning af 114 m³/t atmosfærisk luft med op til 10 bars tryk i tryklanserne og opslugning af 276 m³/t luft fra ventilationsboringerne.

Effektradius af tryklanserne var skønnet til 5 m ud fra forsøg med indblæsning af ren ilt. Ved forsøget blev iltindholdet målt i 2 observationsboringer hhv. 4,2 og 7,3 m fra indblæsningsstedet. Der blev indblæst 5 m³ ren ilt og suget med et undertryk på 300 mbar. Efter 21 minutter var der iltgennembrud i den nærmeste boring, mens der ikke blev observeret gennembrud i den fjerneste boring efter 90 minutter.

Forud for dimensioneringen af anlægget blev der udført laboratorieforsøg med nedbrydning af forurening i jordprøver udtaget fra lokaliteten. Nedbrydning blev undersøgt under forskellige forhold: nemlig uden tilsætninger af nogen art samt med tilsætning af én eller flere af følgende: næringsstoffer, glukose og vand. Der blev endvidere undersøgt nedbrydning under anaerobe forhold.

I oktober 1993 blev der tilsat 300 l vandig opløsning med 20 l humus for at sikre en tilstrækkelig population af mikroorganismer. I driftsperioden blev der tilsat i alt 240 kg handelsgødning indeholdende 30 kg kvælstof og 30 kg fosfor opløst i 4 m³ vand. Vandet blev infiltreret via 5 infiltrationspunkter i 1 m's dybde. I driftsperioden blev der endvidere løbende tilsat vand til erstatning af den vanddamp, der blev opsuget af ventilationsanlægget.

Under driften blev iltindholdet i afkastluften målt til mindst 18%.

Projektrapporten (Ecosystem Saxonia, 1994) konkluderer følgende:

- Omkring 100 kg BTEX blev fjernet ved vacuumventilation. Dette resultat er baseret på måling af belastningen af anlæggets kulfilter.
- Nedbrydning af forurening blev påvist indirekte ved at måle ændringen i jordtemperaturen. Jordtemperaturen steg typisk ca. 10 grader til mellem 20 og 30 grader.
- Nedbrydning blev påvist direkte ved måling af CO₂ i afkastluft fra vacuumventilationsanlægget. Før oprensningens start var CO₂ indholdet 0,48%. Ved opstarten steg CO₂ indholdet til 1,8% efter 10 dage, for derefter at falde til 0,7% 5-6 måneder senere. Ved at antage et baggrundsniveau på 0,2% CO₂ blev det beregnet, at 3,5 tons hydrocarboner blev nedbrudt. Dette svarer til ca. 30% af den anslåede forurening. Det bemærkes, at anvendelse af CO₂ indhold i afkastluften til beregning af nedbrydning vides at være en usikker metode.
- Ved projektets afslutning var en væsentlig del af jorden ikke tilstrækkelig rensset (dvs. kulbrinteindholdet var stadig større end 500 mg/kg) til at undgå videre behandling efter bortgravning.
- Jord, der var forurenet med under 5.000 mg/kg, udviste en tydelig rensningseffekt, mens jord med koncentrationer over 8.000 mg/kg (hot spots) ikke viste samme effekt (stigning) pga. ugunstige fysiske betingelser for nedbrydning. Den ringere virkning i de dybere lag skyldtes manglende gødning pga. utilstrækkelig tilførselsmetode.
- Fordelene ved Biopusterteknikken i forhold til de hidtil anvendte konventionelle lufttilførselsmetoder kunne tydeligt påvises.
- Ved fremtidig anvendelse af metoden er det vigtigt bl.a. at 1) identificere hot-spots, der kræver mere intensiv behandling, 2) sikre et effektivt tilførselssystem til næringsstoffer og vand, således at alle jordlag bliver behandlet, 3) oprensningsperioden bør skønnes på basis af nedbrydnings-

forsøg på laboratorium, hvor der tages hensyn til de aktuelle betingelser på lokaliteten.

Der er ikke angivet økonomiske tal for projektet.

Det vurderes, at en delvis oprensning, som angivet, har fundet sted. De stærkeste beviser stammer fra 1) kulfiltrets indhold af BTEX, 2) jordens temperaturstigning samt 3) afkastluftens forøgede indhold af CO₂.

Til gengæld vurderes det, at der mangles belæg for flere af rapportens konklusioner. For eksempel vurderes det, at antallet af analyserede jordprøver har været for lille i forhold til forureningens inhomogene fordeling i jorden til at kunne anvendes. Hermed er det ikke muligt f.eks. at beregne en oprensningsprocent. Der blev ikke fundet belæg for rapportens påstand om, at den manglende oprensning i de dybere lag skyldtes manglende næringsstoffer frem for f.eks. utilstrækkelig ilttilførsel. Endvidere er der ikke fundet belæg for påstanden om, at stødvis ventilerer fungerer bedre end konventionelle teknikker, idet der ikke er foretaget nogle direkte sammenligninger.

3.1.3 Driftstid

De forskellige anvendelser af stødvis ventilerer har vidt forskellige driftstider (Lange, 1997). Lugtstabilisering kræver normalt behandling i 10-14 dage. Fremskyndet nedbrydning af lossepladsaffald kræver typisk 3-8 måneder. Projekter vedrørende in-situ ventilerer med stødvis tilførelse af luft kan variere kraftigt fra sag til sag, men vil formentlig være i samme størrelsesorden som for almindelig ventilationssager, dvs. ca. 1-4 år (Miljøstyrelsen, 1995).

3.1.4 Økonomi

Prisen for udførelse af lugtstabilisering ved stødvis ventilation på en meget stor losseplads i Tyskland er opgjort til ca. 50 kr./t (Matthäus & Ord, 1996). Her blev der behandlet ca. 1.100.000 tons affald for ca. kr. 50.000.000 (1991 priser, kurs på 4 kr. pr. DM). Som svar på et udsendt spørgeskema til AGA er der angivet en pris i området 30 - 50 kr./t affald.

Der er ikke fundet eksempler på priser for fremskyndet nedbrydning af lossepladsaffald eller in-situ stødvis ventilerer af forurennet jord.

3.2 Accutech Remedial Systems, Inc. (pneumatisk opsprængning)

3.2.1 Baggrund

I 1988 erkendte Hazardous Substance Management Research Center ved New Jersey Institute of Technology (NJIT) et behov for teknikker, der kunne forbedre effekten af in-situ løsninger i jord og formationer med lav permeabilitet. Forskere begyndte herefter at udvikle en teknik til opsprækning af jordlag ved hjælp af trykluft. Efter en række laboratorieforsøg og småforsøg i felten blev en prototype afprøvet på en grund i Richmond, Virginia i 1990 (Liskowitz, et al., 1993).

Teknikken var baseret på hydraulisk frakturering, en beslægtet teknologi anvendt i olieindustrien. Forskellen er, at man ved pneumatisk sprækkedannelse injicerer trykluft fremfor vand.

Accutech Remedial Systems, Inc. blev dannet i 1991 med hovedkvarter i Keyport, New Jersey, og specialviden inden for opsprækning (Pneumatic Fracturing ®).

3.2.2 Felterfaringer

Oversigter over adskillige demonstrationsprojekter findes i EPA, 1995a og Schuring, et al., 1995, hvor det konkluderes, at hovedfordelene ved pneumatisk opsprækning er afkortning af driftstiden samt udvidelse af traditionelle in-situ metoders anvendelse til mere vanskelige geologiske forhold. En litteraturliste findes i EPA, 1995b.

Teknikken Pneumatic Fracturing ® er af firmaet Accutech Remedial Systems, Inc. nu anvendt på mere end 40 forurenede grunde. (Schuring, et al., 1995).

Richmond, Virginia

Den første feltdemonstration med pneumatisk opsprækning foregik i 1990 i Richmond, Virginia, hvor effekten af et vacuumventilerings-system til oprensning af chlorerede opløsningsmidler i lerlag skulle forbedres (Schuring, et al., 1995). Her blev der foretaget 6 opsprækninger i 2 borer i dybder fra 2,0 til 3,3 meter under terræn. Opstartkoncentrationer i afkastluft efter den første opsprækning steg fra 17 ppm til 8.677 ppm for methylenchlorid. Koncentrationen faldt til under 500 ppm efter ca. 1 times drift af ventileringsystemet. Luftflow i systemet steg en faktor 1.000 efter opsprækningen. Hermed må opsprækningen anses for at være en succes.

Sommerville, New Jersey

Senere blev der udført forsøg med oprensning af chlorerede opløsningsmidler i Sommerville, New Jersey, under U.S. EPA Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) Demonstration Program. Her blev der udført en 6 m dyb boring i et jordlag med lavpermeabilitet bestående af skifer. Der blev udført opsprækning (500 psig i 10-20 sekunder) for hver halve meter. Opsprækningen resulterede i en forøgelse af luftflow med en faktor 6 over en 4 timers ventilationstest. Opsprækningen havde indflydelse på monitoringsboringer 6 m væk, hvor luftflow blev forøget 2-11 gange. Fjernelse af trichlorethylen ved ventilering i opsprækningsboringen steg en faktor 6-7. Effekten af en efterfølgende injektion af varm luft i sprækkerne viste til gengæld ikke klare forbedringer i forhold til forureningsfjernelse (EPA, 1993 & 1994).

Hillsborough, New Jersey

Et andet demonstrationsprojekt fandt sted på en lokalitet i Hillsborough (Liskowitz, 1993). Her var jord og grundvand forurenet med trichlorethylen (TCE). TCE blev fjernet ved hjælp af vacuumventilering. Efter gennemførelse af 4 opsprækninger i en boring var påvirkningsradius forøget med 150% (målt som den afstand fra ventilationsboringen, hvor

en vacuum på 1 tomme kviksølv kunne måles) og fjernelsesraten for TCE ved ventilering forøget 7,5 til 25 gange i forhold til før opsprækningen. Hermed må udførelsen af pneumatisk opsprækning på lokaliteten anses som en succes. Desuden blev infiltrationen af hængende grundvand ind i borerne forøget, således at jordlagene blev afvandet. Afvanding kan være med til at forbedre jordlagenes permeabilitet over for luft. Virkningen af afvandingen blev dog ikke kvantificeret.

Tinker Air Force Base, Oklahoma

På 2 lokaliteter ved Tinker Air Force Base (Anderson, et al., 1995) blev teknikken anvendt i fuldskala til hhv. at forbedre permeabiliteten for bioventilering af en olieforurening, og til at forbedre oppumpning af olie i fri fase. Resultater af demonstrationen ved Southwest Tanks Site viste, at permeabiliteten i gennemsnit blev forøget fra 0,017 darcy til 0,32 darcy. Udbredelsen af påvirkningsradius før og efter opsprækning er angivet i figur 3.3. Figur 3.4 viser forløbet af oppumpning af olie i fri fase ved North Tank Area før og efter sprækkedannelse.

Flemmington, New Jersey

På en anden lokalitet, forurenet med TCE, blev rendyrkede mikroorganismer injiceret i den mættede zone ved hjælp af pneumatisk opsprækningsudstyr, se figur 3.5. Der blev udført 5 injektioner i 4 dybder i én boring. Optælling af bakterierne i grundvandsprøver indikerede, at de blev spredt ud i en radius på ca. 7-8 m fra injektionsboringen. Monitoringsresultater af TCE koncentrationer i perioden efter injektion er ikke entydige, da selve injektionen af luften formentlig har fjernet noget af forureningen ved almindelig sparging. (Walsh, et al., in press).

3.2.3 Driftstid

Udførelse af pneumatisk opsprækning på en grund kan udføres i løbet af et par uger. Opsprækning er et éngangsforetagende, således at der ikke er tale om nogen egentlig driftstid. Ved udførelse af pneumatisk opsprækning er det påstået, at den efterfølgende driftstid for en almindelig in-situ oprensning vil være forkortet. Denne påstand er dog næsten umulig at dokumentere, og der er kun fundet dokumentation for forøgede fjernelsesrater i litteraturen.

3.2.4 Økonomi

Udgifter til leje over en 2-ugers periode af udstyr til pneumatisk opsprækning og monitorering er i 1993 beregnet til ca. kr. 170.000 (EPA, 1993). Inkluderet er en kompressor 12 HK (hestekræfter), 340 atm., 12 trykcylindre samlet via en manifold, rørsystem, instrumenter, 2 pakkersystemer, feltgaschromatograf, computer, software, m.m. Ca. halvdelen af udstyrsprisen stammer fra opsprækningsudstyr og ca. halvdelen fra monitoringsudstyr. Yderligere udgifter til honorar i denne 2-ugers periode udgør ca. kr. 95.000.

Prisen for fjernelse af TCE ved vacuumventilering over en periode på 1 år er ligeledes beregnet for en sag, der indledes med pneumatisk opsprækning. Beregningen er baseret på mange antagelser, herunder at

fjernelsesraten, der blev opnået ved et 4-times forsøg, falder lineært til 90% i løbet af driftsåret.

Lokaliteten er antaget at være ca. 7 m dyb og 1500 m² i areal, således at 15 ventilationsboringer var påkrævet (hver med en effektradius på ca. 8 m). TCE-koncentrationen i afkastluften er antaget til ca. 50 ppm og et totalt luftflow til ventilerings på 8 m³/min. Der anvendes aktiv kulfilter til fjernelse af TCE fra afkastluft.

På denne baggrund er der beregnet en pris på 1.800 kr./kg fjernet TCE eller en samlet pris på 110 kr./t jord behandlet med pneumatisk opsprækning efterfulgt af vacuum ventilation (1993 priser, kurs på 6 kr./USD).

Ved et andet prisoverslag (Schuring, et al., 1995) er merprisen alene for behandling ved pneumatisk opsprækning opgjort til ca. kr. 25 - 60 kr. pr. tons jord (1995 priser, kurs på 6 kr./USD). Denne merudgift skal opvejes mod de potentielle besparelser ved gennemførelse af den efterfølgende in-situ oprensning. De nævnte besparelser fokuserer på følgende 2 punkter:

- reduktion i antallet af nødvendige ventilationsboringer
- formindskelse af driftstiden

I visse tilfælde vil pneumatisk opsprækning gøre det muligt at gennemføre en in-situ løsning, hvor der ellers skulle anvendes traditionel bortgravning. Her skal in-situ projektets omkostninger sammenlignes med bortgravningsprojektets omkostninger.

3.3 Andre kilder

I forbindelse med den udenlandske erfaringsopsamling er der undersøgt en række andre kilder for oplysninger om stødvis ventilerings og pneumatisk opsprækning. Disse kilder omfatter litteratursøgning på DIALOG, BFSS databasen, US Air Force, US Army Corps of Engineers, konferencer og internettet.

Ved flere af de ovennævnte kilder er der kun fundet ganske få eller slet ingen relevante oplysninger. Resultatet af disse undersøgelser er alligevel medtaget, således at der er dokumentation for, såvel hvor der findes relevante oplysninger, som hvor der ikke findes relevante oplysninger.

Resultaterne fra den udenlandske erfaringsopsamling findes i bilag 1.

4 Dansk erfaringsopsamling

4.1 Aktuelle projekter

Der er p.t. kun et enkelt aktuelt projekt under udførelse i Danmark. Dette projekt (Bredsten) beskrives i det følgende. Endvidere nævnes et projekt i Skjern, hvor der oprindeligt var planlagt stødvis ventilering samt et projekt i Horsens, hvor der anvendes stødvis/periodevis injektion af luft i den mættede zone (sparging).

4.1.1 *KK Technical*

Bredsten

På en grund i Bredsten (affaldsdepot nr. 605-024) har tidligere detailsalg af dieselolie og autobenzin givet anledning til forurening af jord og grundvand. Der drives nu (1997) et in-situ afværgeanlæg, der indebærer brug af BIOPUSTER®. I det følgende beskrives grunden kort, og udvalgte resultater angives. Grundlaget for beskrivelsen er Nielsen, 1996, Birch & Krogboe, 1996, og Birch & Krogboe, 1997.

Grunden blev først undersøgt af Vejle Amt (registreringsundersøgelse) i 1992 og senere af Birch & Krogboe A/S i 1994 for Oliebranchens Miljøpulje. I 1995 blev en afværgeløsning baseret på in-situ oprensning udbudt i totalentreprise. Ingeniør- og handelsfirmaet KK Technical, Ringkøbing, blev valgt til opgaven.

Forureningen med dieselolie findes i et tidligere tankområde samt under et nærliggende værksted og en beboelsesbygning. Det angives, at forureningen kan udgøre en risiko for Bredsten Vandværk, der indvinder grundvand ca. 50 m under terræn omtrent 600 m fra grunden.

Jordbunden består af vekslende lag af sand og ler med indslag af grus og sten. Grundvandsspejlet varierer en del med tiden, og ligger ca. 4-6 m under terræn. Der blev fundet koncentrationer af totale kulbrinter op til 11.000 mg/kg tørstof i jorden og op til 270 mg/l i grundvandet.

Afværgeanlægget består af 7 vacuumboringer oprindeligt filtersat i ca. 1 - 7½ m under terræn og 2 injektionsboringer med spids omkring 6½ m under terræn, dvs. netop under grundvandsspejlet. Hermed fungerede injektionsboringerne oprindeligt som spargingsboringer.

Senere i driftsforløbet blev vacuumboringerne omboret, og i foråret 1997 blev injektionsspidsene hævet over grundvandsspejlet, således at de fungerede som ventileringsboringer. Injektionsboringerne er centralt placeret med vacuumboringerne i en omgivende cirkel.

Herudover er der udført en afværgeboring til hydraulisk kontrol af grundvandsforureningen. En situationsplan med angivelse af afværgeanlæggets placering er vist i figur 4.1.

Anlægget blev sat i drift august 1995. Indblæsning af luft sker ved et tryk mellem 2 og 4 bar ca. 1 gang pr. minut, 7 timer pr. døgn. Ydelsen er ca. 20 Nm³ pr. døgn for hver af de 2 boringer. Vacuumboringerne yder ca. 400 Nm³ pr. døgn, dvs. ca. 10 gange så stor en ydelse som injektionsboringerne. Der er i perioder fra efteråret 1996 tilsat ren ilt i injektionsboringerne.

Moniteringsprogrammet har blandt andet omfattet bestemmelse af afkastluftens sammensætning. Her blev der fundet et iltindhold på omkring 20% samt et meget lavt indhold af kuldioxid og kulbrinter.

Der er nu udført 3 kontrolboringer både efter et halvt års drift samt efter lidt over 1 års drift (nov. 1996). Jordprøver er målt med PID og analyseret for olieindhold med GC/FID. PID-målingerne viser en stigning i udslag i 2 af 3 boringer mellem opstart og den første kontrolrunde, og et fald i udslag i 3 af 3 boringer mellem første og anden kontrolrunde. GC/FID-analyserne viser generelt samme mønster. Koncentrationerne varierer fra 4.100 til 11.000 mg/kg inden driftstart og fra 25 til 7.200 mg/kg ved anden kontrolrunde. Det vekslende tal vurderes at skyldes inhomogeniteter i forureningsspredning.

Endvidere er der udført kemiske analyser af grundvandsprøver fra 2 boringer før driftstart, efter 6 måneder samt efter 21 måneders drift. Resultaterne herfra viser et fald i totalkulbrinter efter 21 måneders drift fra 270 mg/l til 11 mg/l i LB1 og et fald fra 3,3 mg/l til 2,4 mg/l i LB7. Det bemærkes, at indholdet af totalkulbrinter i LB7 efter 6 måneder var højere, nemlig 56 mg/l.

Set i lyset af denne rapports formål, er det ønskeligt at sammenligne denne in-situ metode (hvor der anvendes stødvis tilførelse af trykluft) med den gængse bioventilering (hvor der anvendes kontinuerlig indblæsning af luft). Her vil resultater fra ventilationstests og gasmåling af poreluft i monitoringsboringer være behjælpelige. Denne type resultater er ikke tilvejebragt på denne lokalitet.

Med baggrund i den meget varierende geologi på lokaliteten samt den begrænsede kontrol og monitoring er det vanskeligt at vurdere effekten af afværgeforanstaltningen. Sammenligning med gængs bioventilering kan af samme grund ikke foretages på denne lokalitet.

Skjern

På Banestyrelsens arealer ved Skjern station har oplagring og brug af diesel til tankning af lokomotiver givet anledning til forurening af jord og grundvand under banearealet. Der var oprindeligt projekteret med anvendelse af en kombination af almindelig air sparging i den mættede zone og stødvis bioventilering i den umættede zone. KK Technical blev valgt som entreprenør.

Inden udførelse af anlægget blev ventilering af den umættede zone opgivet, da spargingsanlægget blev vurderet som tilstrækkeligt til oprensningen. Som følge heraf omtales dette projekt ikke videre.

4.1.2 Hede Nielsen A/S

Horsens

På Hede Nielsens fabriksarealer i Horsens har tidligere produktion af acetylen givet anledning til forurening af grundvandet og den nærliggende Torsted Bæk. Der drives nu (1997) et in-situ afværgeanlæg, der indebærer periodisk injicering af ren ilt under grundvandsspejlet (sparging). Hermed ligger afværgemetoden uden for udviklingsprojektets afgrænsning, der kun omfatter den umættede zone. Alligevel medtages grunden her, da den er én af få i Danmark med relevans for projektet. Grundlaget for beskrivelsen er Petersen & Vestergaard, 1997.

Grunden blev undersøgt i perioden 1987-88. Efterfølgende blev der udført laboratorieforsøg og pilotforsøg. I marts 1996 blev et fuldskala anlæg opstillet af Carl Bro A/S for Hede Nielsen A/S.

Forureningen stammer fra udsivning af procesvand fra kalkkuler og klæringsbassiner i forbindelse med efterbehandling af procesvand fra acetylenproduktion. Det udsivende vand indeholdt især sulfid og base og medførte kraftige lugtgener i Torsted Bæk.

Jordbunden består af op til 2 m fyld underlejret af smeltevandssand. Under sandlagene er der i enkelte borer truffet moræneler. Grundvandsspejlet findes ca. 1,5 - 2 m under terræn. Det er vurderet, at forurening strømmer i dette øvre magasin ud til bækken. Koncentrationer af svovl i forureningsfanen er anslået til ca. 250 mg/l.

Afværgeanlægget består af 7 iltanser og en række monitoringsboringer. Lansernes spids er sat i smeltevandssandet i 3 - 6 m under terræn, dvs. ca. 1- 4 m under grundvandsspejlet. Lanserne er placeret i en række parallelt med bækken for at sikre, at forureningsfanen iltes inden udstrømning til bækken. En situationsplan med angivelse af afværgeanlægget angives i figur 4.2.

Anlægget blev sat i drift i marts 1996. Indblæsning af luft sker i pulser, der varer ca. 10 sekunder. Tryk og flow er fastsat individuelt i de forskellige lanser. Maksimumstrykket er dog 5 bar.

I forbindelse med et pilotforsøg blev der målt vandspejlsstigninger på ca. 0,5 m i en afstand på 2 meter fra injektionsboringen. Denne ændring er vurderet til at have betydning for ilttransporten via konvektion ud i magasinet.

Monitoringsprogrammet under drift af fuldskaalanlægget har omfattet måling af pH, redoxpotentiale og sulfidkoncentration i grundvandet i to borer (M5 og M8) nedstrøms spargingsboringer og i én boring (M7) opstrøms. Desuden er bækkens tilstand observeret.

Resultaterne har vist et fald i sulfidkoncentration fra 400 til 15 mg/l i M5 og fra 200 til 60-100 mg/l i M8. pH-værdien har været nogenlunde stabil i hele perioden, omkring 10 i begge borer. Opstrøms boring M7 har vist en varierende sulfidkoncentration mellem 35 og 200 mg/l. Det vur-

deres, at denne ændring har sammenhæng med grundvandspejlsændringer i samme periode.

Observationer af bækkens tilstand har vist en klar forbedring, siden anlægget blev sat i gang. Belægninger af svovlbakterier er stort set forsvundet og lugtgenerne ligeså.

Afværgeanlægget beskrevet ovenfor omfatter udelukkende pulserende injicering af luft i den mættede zone. Da der ikke er anvendt kontinuerlig indblæsning af luft, kan værdien af pulserne ikke vurderes.

4.2 Forespørgsler i Danmark

For at undersøge om ovenstående projekter er de eneste eksempler, hvor der er opbygget danske erfaringer med stødvis bioventilering eller pneumatisk opsprækning, er der taget kontakt til flere relevante firmaer, m.m. Bilag 2 angiver en liste over de steder, der er blevet kontaktet.

Forespørgselsrunden har ikke resulteret i andre kilder til danske erfaringer end de ovenfor beskrevne. Der er heller ikke nærtstående forsøg eller oprensninger i Danmark.

5 Vurdering

5.1 Anvendelsesområder

Som nævnt i afsnit 2.1 og 2.2 har afværgeteknikkerne stødvis ventilering og pneumatisk opsprækning hver især 3 hovedanvendelser. Figur 5.1 er et flowdiagram, der angiver forskellige anvendelser eller oprensingsbehov, samt den teknik, der er mest relevant for at opfylde behovet.

Ud af de anvendelser, der kan medføre brug af stødvis ventilering eller pneumatisk opsprækning, vurderes følgende at have den bredeste interesse i Danmark i henhold til Lovbekendtgørelse om affaldsdepoter (Miljøstyrelsen, 1996):

- Fremskyndet nedbrydning til reduktion af forureningsudslip på lossepladser ved stødvis ventilering
- Forbedret in-situ oprensning af lavpermeable, forurenede grunde ved pneumatisk opsprækning efterfulgt af vacuumventilation eller ved stødvis ventilering.

Andre anvendelser kan være af særlig interesse inden for andre sammenhænge.

På baggrund af erfaringsopsamlingen er det pneumatisk opsprækning på lavpermeable grunde og lugtstabilisering med stødvis ventilering, der er bedst undersøgt i udlandet. Ingen af anvendelserne er velundersøgt under danske forhold.

5.2 Fordele og ulemper

Tabel 5.1 giver en oversigt over de væsentligste fordele og ulemper af de 6 anvendelser nævnt i afsnit 5.1.

Afværgeteknik	Potentielle fordele	Potentielle ulemper
stødvis ventilering	• øget effektradius • forbedret luftudbredelsesmønster i inhomogene lag • lugtstabilisering af lossepladser inden opgravning • afkortelse af oprensningens driftstid • volumenreduktion af lossepladser • mulighed for dosering af næringsstoffer eller mikroorganismer	• kan kun anvendes under gunstige geologiske forhold • højere anlægsudgifter i forhold til almindelig ventilation
pneumatisk opsprækning	• udvidelse af anvendelsesområdet for almindelig ventilation til også at omfatte lavpermeable lag • afkortelse af oprensningens driftstid • fremskyndet oppumpning af fri fase ved opsprækning i den kapilære zone • fremskyndet afvanding af delvist mættet zone • mulighed for dosering af næringsstoffer eller mikroorganismer	• kan kun anvendes under gunstige geologiske forhold • hævnning af terræn • reduceret luftflow-andel igennem den del af matricen, der ikke er opsprækket

Tabel 5.1

Oversigt over fordele og ulemper med teknikkerne stødvis ventilering og pneumatisk opsprækning.

5.3 Tests

I litteraturen er der nævnt enkelte tests, der kan udføres inden dimensionering af et anlæg. Generelt er disse tests de samme som ved almindelige oprensninger baseret på ventilation.

Testene, nævnt i litteraturen, omfatter følgende:

- ventilationstest til bestemmelse af jordens permeabilitet over for luft, før og efter udførelse af pneumatisk opsprækning
- ventilationstest til bestemmelse af effektradius ved brug af f.eks. helium som sporgas
- geotekniske undersøgelser for at vurdere risikoen for hæveskader på bygninger
- laboratorietest til undersøgelse af nedbrydelighed af affaldet/forureningen

5.4 Dokumentation af teknikkerne

Typen af dokumentationen af de to in-situ teknikker er forskellig, da stødvis ventilering omhandler et oprensningsforløb med en egentlig driftsperiode, mens pneumatisk opsprækning omhandler en diskret behandling uden egentlig driftsperiode.

Stødvis ventilering

Til dokumentation af oprensning af forurennet jord med teknikken stødvis ventilering anvendes hovedsagelig de samme parametre, der anvendes til dokumentation af almindelig ventilering. Dokumentation omfatter hovedsagelig måling af tryk og udløsningsfrekvens ved hver tryklanse samt måling af tryk og flow ved hver vacuumboring. Herudover vil dokumentation omfatte måling af afkastluften for indholdet af forureningskomponenter (før og efter evt. luftrensning), ilt, kuldioxid og methan.

Da stødvis ventilering kan opfattes som alternativ til bioventilering, er det ønskeligt at dokumentere mere end blot, at lokaliteten oprenses. Her tænkes på, at stødvis ventilering og bioventilering bør sammenlignes med hensyn til økonomi og oprensningstiden. En sådan sammenligning er i sagens natur vanskelig at udføre. Der er ikke fundet nogen sammenligninger i litteraturen.

Pneumatisk opsprækning

Til dokumentation af virkningen af pneumatisk opsprækning anvendes hævnings af terræn (målt ved nivellering), forøgelse af permeabilitet (målt ved ventilationstest) samt forøgede fjernelsesrater for forureningen. Disse mål for virkningen synes at være veldokumenteret i USA.

Da pneumatisk opsprækning kan opfattes som et supplement til ventilering frem for et alternativ, er det ønskeligt at dokumentere mere end blot

en forbedring af almindelig ventilering. Her tænkes på, at omkostningerne i forbindelse med pneumatisk opsprækning bør sammenlignes med besparelserne til vacuumventilering. En sådan sammenligning er i sagens natur vanskelig at udføre. Der er ikke fundet empiriske sammenligninger i litteraturen. Til gengæld er teknikken så udbredt i USA, at det tyder på en vis tro på, at den kan betale sig.

5.5 Egnethed til forsøgsprojekt

Da der i litteraturen ikke er fundet dokumentation for påstanden om et forbedret luftudbredelsesmønster i inhomogene jordlag og/eller affald ved brug af stødvis ventilering i forhold til almindelig kontinuerlig ventilering, vurderes laboratorie- eller feltforsøg i pilotskala til dokumentation af udbredelsesmønstret også at være relevant. Da der her er tale om dokumentation af fysiske processer fremfor de langsomme mikrobielle processer, kan et sådant forsøg udføres under kontrollerede forhold på en uforurenet grund over en kortere periode (uger til måneder). Måleparametre omfatter hovedsagelig tryk, flow og indhold af sporgas.

Under depotloven anvendes i Danmark store ressourcer på undersøgelser, afværgeforanstaltninger og drift af afværgeanlæg på gamle lossepladser. Der er indlysende økonomiske og miljømæssige fordele ved at forkorte driftstiden af disse afværgeanlæg. Pilot- eller fuldskalaforsøg ved fremskyndet nedbrydning med stødvis ventilering på en gammel losseplads, f.eks. med den hensigt at nedbringe perkolatstyrken, vurderes derfor at være relevant. Driftstiden på et sådant forsøg kunne f.eks. være ca. 1 år pr. behandlet område (en større losseplads vil kræve trinvis behandling for ikke at blive for udstyrskrævende).

På grund af Danmarks geologi findes der mange forurenede grunde på lokaliteter med en lav permeabilitet overfor luft. Da almindelig ventilation er mindre egnet på sådanne lokaliteter, vælges ofte opgravning frem for in-situ løsninger. Der kan være store fordele forbundet med pneumatisk opsprækning, således at også disse lokaliteter kan oprensnes ved in-situ løsninger. Da metoden er velafprøvet i fuldskala i udlandet, vurderes det at være relevant at udføre fuldskalaforsøg under danske forhold.

6 Referencer

Anderson, D., B. Peyton, J. Liskowitz, C. Fitzgerald, J. Schuring, 1995. Enhancing In Situ Bioremediation with Pneumatic Fracturing. Third International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, San Diego, California. 3(6) pp 467-473.

Arge Bio-puster, 1995. Personlig kommunikation under studietur hos Arge Bio-puster, Wien.

Asp Fuglsang, 1996. Program for teknologiudvikling, jord- og grundvandsforurening. INFO-NYT nr. 15, pp 2-8.

Chitla, S.R., & R.J. Portier, 1995. In Situ Bioremediation of Diesel Contamination in Low-permeability Soils. Fourth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, Louisiana, 4(5), pp 535-540.

Christopher, M., Litherland, S.T., O'Clearigh, D. & C. Vaughn, 1997. Anaerobic Bioremediation of Chlorinated Organics in a Fractured Shale Environment. Fourth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, Louisiana, 4(5), pp 507-512.

Ecosystem Saxonia Gesellschaft für Umweltsysteme mbH, 1994. Induzierte In-situ bodenmikrobiologische Reinigung durch Gasinjektion mittels Bio-Puster Verfahren.

EPA (United States Environmental Protection Agency), 1993. Accutech Pneumatic Fracturing Extraction and Hot Gas Injection, Phase 1. Applications Analysis Report. Superfund Innovative Technology Evaluation. EPA/540/AR-93/509. 44 pp.

EPA (United States Environmental Protection Agency), 1994. Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) Program, Technology Profiles, Seventh Edition. November 1994. EPA/540/R-94/526. pp 20-21.

EPA (United States Environmental Protection Agency), 1995a. In Situ Remediation Technology Status Report: Hydraulic and Pneumatic Fracturing. April 1995. EPA/542-K-94-005.

EPA (United States Environmental Protection Agency), 1995b. Soil Vapor Extraction (SVE) Enhancement Technology Resource Guide. October 1995. EPA/542-B-95-003.

EPA (United States Environmental Protection Agency), 1995c. Bioremediation in the Field Search System, Database with user documentation, August, 1995.

Johnson, P.C., C.C. Stanley, M.W. Kemblowski, D.L. Byers & J.D. Colthart, 1990. A Practical approach to the Design, Operation, and Monitoring of In Situ Soil-Venting Systems. Groundwater Monitoring Review, Spring 1990, pp 159-178.

Keffer, E., J. Schuring, M. Ferries & S. Abrams, in press. Remediation of a Low Permeability TCE Contaminated Bedrock. Part 1, Pneumatic Fracturing Technology for Permeability Enhancement. American Society of Civil Engineers Special Volume "Remediation in Rock Masses".

Kragelund, K., 1995. Personlig kommunikation. Liste over projekter udført med BIOPUSTER®.

Lange, S., 1997. Fax dateret 7. maj fra Søren Lange, AGA A/S, København som svar på spørgeskema fremsendt af Loren Ramsay, Kemp & Lauritzen Vand & Miljø A/S.

Leeson, A & R. Hinchey, 1997. Soil Bioventing. Principles and Practice. CRC Press, Inc., Boca Raton, 244 pp.

Leonard, A. & J. Liskowitz, 1997. Use of Pneumatic Fracturing to mitigate hydrodynamic isolation of contaminants (Abstract). Accutec Remedial Systems, Inc.

Liskowitz, J., J. Schuring & J. Mack, 1993. Application of Pneumatic Fracturing Extraction for the effective removal of volatile organic compounds in low permeable formations. Focus Conference on Eastern Regional Groundwater Issues, New Orleans, Louisiana.

Massmann, J.W., 1989. Applying groundwater flow models in vapor extraction system design. Journal of Environmental Engineering, 115(1), pp 129-149.

Mattäus, T. og N. Ord, 1996. The Bio-puster method - a new method for treatment of waste materials. Chem Environmental Protection Bulletin, Issue 045, November 1996, pp 29-33.

Miljøstyrelsen, 1996. Lovbekendtgørelse om affaldsdepoter. Nr. 939, 27. okt. 1996.

Miljøstyrelsen, 1995. Erfaringer med in-situ afværgeforanstaltninger. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 7, 1995.

Reisinger, J.H.; Mountain, S.A.; Montney, P.A.; Hullman, A.S. og A.W. Darnall, 1995. Pressure dewatering: An extension of Bioventing Technology. Third International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium, 1995 San Diego, California, 3(2) p 267-276.

Schuring, J., P. Chan & T. Boland, 1995. Using Pneumatic Fracturing for In-Situ Remediation of Contaminated Sites. Remediation/Spring 1995. John Wiley & Sons, Inc. pp 77-90.

Trowbridge, B.E., Keegan, J. & J. Wolf, 1997. Integrated Technologies for Successful In Situ Bioremediation i Low-Permeability Soils. Fourth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, Louisiana, 4(5), p 505.

USACE (United States Army Corps of Engineers), 1995. Soil Vapor Extraction and Bioventing. Engineering and Design Manual. EM 1110-1-4001.

Venkatraman, S.N., Schuring, J.R., Boland, T.M., Bossert, I.D., Massry , I.W. & D.S. Kosson, 1997. Pneumatic Fracturing Enhanced In-Situ Bioremediation: Field Demonstration and System Modeling. Fourth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, New Orleans, Louisiana, 4(5), pp 495-504.

Walsh, M., T. Boland, J. Liskowitz, M. DeFlaun, & R. Steffan, in press. Remediation of a low Permeability TCE Contaminated Siltstone Bedrock, Part 2. Pneumatic Injection of Constitutive TCE Degrading Organisms. American Society of Civil Engineers Special Volume "Remediation in Rock Masses".

Bilag 1:

Udenlandsk erfaringsopsamling

I det følgende angives resultaterne fra den udenlandske erfaringsopsamling i forbindelse med følgende potentielle kilder: litteratursøgning, Bioremediation in the Field Search System (BFSS), US Air force Center for Environmental Excellence (AFCEE), US Army Corps of Engineers (USACE), konferencer og internet.

Litteratursøgning

Der er foretaget en litteratursøgning hos databaseudbyderen DIALOG. De undersøgte databaser er:

BIOSIS Previews (1969 til i dag)
CAB Abstracts (1972 til i dag)
Ei Compendex (1970 til i dag)
Energy Science and Technology (1974 til i dag)
Enviroline (1975 til i dag)
Environmental Bibliography (1973 til i dag)
GeoArchive (1974 til i dag)
GEOBASE (1980 til i dag)
GeoRef (1985 til i dag)
NTIS National Technical Information Service (1964 til i dag)
Pollution Abstracts (1970 til i dag)
Water Resources Abstracts (1968 til i dag).

Der er i disse databaser søgt på følgende nøgleord:

- Bioventing
- Pneumatic fracturing
- Pressure dewatering
- Low permeable
- Landfill/Waste disposal site/dumpsite og
- Methane removal/reduction/inhibition.

Disse søgninger resulterede i et væld af referencer med begrænset relevans. Der blev fundet enkelte artikler omhandlende pneumatisk opsprækning, men ikke stødvis ventilering. Herudover blev der fundet mange generelle artikler omhandlende almindelig bioventilering.

Bioremediation in the Field Search System (BFSS)

United States Environmental Protection Agency har udarbejdet en søgebar database over biologiske afværgeprojekter udført i USA.

Databasen kaldes Bioremediation in the Field Search System (EPA, 1995c) og fungerer som en erfaringsopsamling på området biooprensning. Databasen er gennem søgt for emnerne biopustning, bioventilering og pneumatisk sprækkedannelse.

Af de 450 projektbeskrivelser, der indgår i BFSS, er der konstateret 50, hvor ordet bioventilering indgår, heraf er 18 ægte bioventileringsprojekter. Der er i ingen af projektbeskrivelserne konstateret anvendelse af stødvis ventilering eller pneumatisk sprækkedannelse.

US Air force Center for Environmental Excellence (AFCEE)

US Air Force har vurderet bioventileringens anvendelighed på over 120 lokaliteter. Hvor det var gunstigt, blev pilot-skala bioventileringsanlæg anlagt og holdt i drift i en et-årig periode. Dette har medført en række resultater, som er anvendt til vurdering af, hvilke parametre, der er anvendelige for at afgøre, om bioventilering er en god oprensningsmetode på den enkelte lokalitet.

Hverken Biopuster ® eller stødvis lufttilførsel er nævnt i rapporten.

US Army Corps of Engineers (USACE)

US Army Corps of Engineers har udarbejdet en ingeniør manual (USACE, 1995), der indeholder en praktisk vejledning i design af vacuum ventilering og bioventilering. Manualen nævner ikke pneumatisk opsprækning eller stødvis bioventilering.

Til gengæld er der beskrevet tests, der kan udføres for at vurdere, om en given lokalitet egner sig til in-situ oprensning. Disse tests omfatter søjletest på forurenede jordprøver i laboratoriet til bestemmelse af fjernelsesrater, ventilationstest i felten til bestemmelse af permeabilitet og pilot-skala test til bestemmelse af forureningskoncentration i afkastluft, den rumlige trykfordeling i jorden, m.m.

Konferencer

Der er indhentet artikelsamlinger fra 3 væsentlige tilbagevendende konferencer i USA, der omfatter in-situ oprensning. Alle artikler fra de indhentede samlinger er gennemset for relevans for stødvis ventilering og pneumatisk opsprækning. De relevante konferencer beskrives kort nedenfor:

Las Vegas, Nevada

Konferencetitlen er National Outdoor Action Conference and Exposition. Konferencerne afholdes hvert år. Arrangøren er National Ground Water Association. Konferencerne omhandler grundvandsrensning, grundvandsmonitoring, geofysiske metoder og jordbehandling.

San Diego/New Orleans

Konferencen afholdes hvert andet år under titlen In Situ and On-Site Bioremediation. Arrangøren er Battelle Memorial Institute.

Konferencen berører en bred vifte af emner i relation til in situ og on-site biooprensning.

Blandt relevante emner i denne sammenhæng indgår: Air sparging and related technologies, Bioventing applications and extensions, Integrated

approaches to bioremediation, In situ and on-site case histories og Low permeability soils applications.

Houston, Texas

Hvert år afholdes denne konference i Houston under titlen Petroleum Hydrocarbons & Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Remediation. Som titlen antyder, omhandler konferencen forebyggelse af, registrering af og rensning for organisk forurening i grundvand. Arrangørerne er American Petroleum Institute og National Ground Water Association.

I tabel 3.1 ses en oversigt over det totale antal artikler og posters fra konferencerne. Artiklerne indeholdende bioventilering, stødvis bioventilering og pneumatisk sprækkedannelse er optalt. De artikler, der er fundet om emnet pneumatisk sprækkedannelse, indeholder ligeledes beskrivelser af bioventilering, hvorfor de indgår i optællingen af begge emner.

Som det ses af tabellen, er interessen for bioventilering udpræget ved Las Vegas/New Orleans konferencen. Til gengæld er der kun fundet få artikler, der omhandler de emner, der er relevante i forbindelse med denne erfaringsopsamling (Anderson, et al., 1995; Reisinger, et al., 1995; Chitla & Portier, 1997; Christopher, et al., 1997; Trowbridge, et al., 1997; Venkatraman, et al., 1997).

Internet

Internettet er anvendt ved 3 forskellige metoder til indhentning af oplysninger: Disse metoder er:

- Der er søgt på nøgleord relevante for erfaringsopsamlingen for relevante hjemmesider ved hjælp af søgemaskiner, en søgetjeneste, der findes på internet.
- Der er søgt efter publikationer hos US Environmental Protection Agency og US Department of Energy.
- Der er fremsendt et åbent brev vedrørende stødvis ventilering til diskussionsgruppen "Bioremediation Discussion Group", som har GZA GeoEnvironmental Technologies, Inc. som vært.

På internet er der bl.a. fundet en del materiale vedrørende specifikke produkter, såsom Biopuster®.

Relevante publikationer, der blev fundet ved søgningerne, er inkluderet i litteraturlisten.

I diskussionsgruppen indkom adskillige reaktioner på brugen af stødvis ventilering. De mest saglige af disse reaktioner omhandlede bekymring for risikoen for følgende: 1) tilstopning af jordlagene ved kompression, 2) forureningsspredning som følge af bortblæsning fra grunden, 3) eksplosionsrisiko ved anvendelse af iltberiget luft, 4) driftsomkostninger til unyttig komprimering af luft og 5) ingen væsentlige forskelle i luftudbredelsesmønstre.

Til gengæld blev det foreslået, at der eventuelt dannes mikrosprækker under trykstødene, der vil kunne fremme iltens udbredelsesmønster, samt at erfaringer fra olieeftersøgning eventuelt vil kunne inddrages.

Bilag 2:

Danske forespørgsler

For at finde frem til relevante danske erfaringer med stødvis bioventilering og pneumatisk opsprækning er der taget kontakt til følgende steder:

Firma, m.m.	Adresse	Kontaktperson
AGA	Vermlandsgade 55 2300 København S	Søren Kjær Lange
Banestyrelsen Rådgivnings Division	Pilestræde 58, 3. sal 1112 København K	Dennis Bruhn
Hede Nielsen A/S	Høje Taastrupvej 42 2630 Taastrup	Lise Christensen
Institut for Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet	Bygning 115 2800 Lyngby	Erik Arvin
KK Technical	Nygade 28 6950 Ringkøbing	Karsten Kragelund
Foreningen Oliebran- chens Miljøpulje	Vognmagergade 7, Postbox 50 1002 København K	Steen Berg Pedersen