

Miljøprojekt Nr. 541 2000

Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening.

Frakturering

Inducerede sprækker ved hydraulisk og pneumatisk
frakturering

Bertil Nilsson, GEUS

Claus Gormsen og Birger C. Blem, NIRAS

Bill Slack, FrX, USA

Larry Murdoch, Clemson University, USA

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.

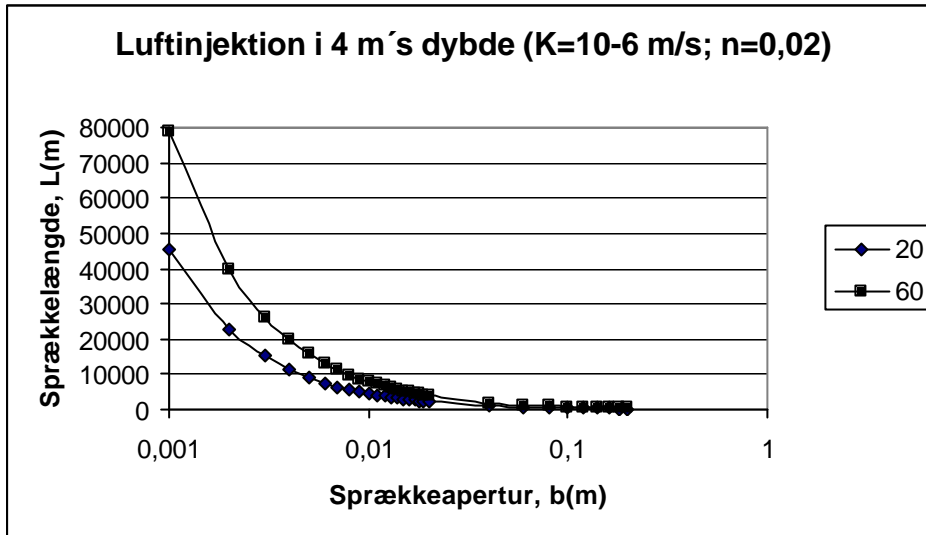
Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Korrektion af Fraktureringsrapportens side 29 (midt).

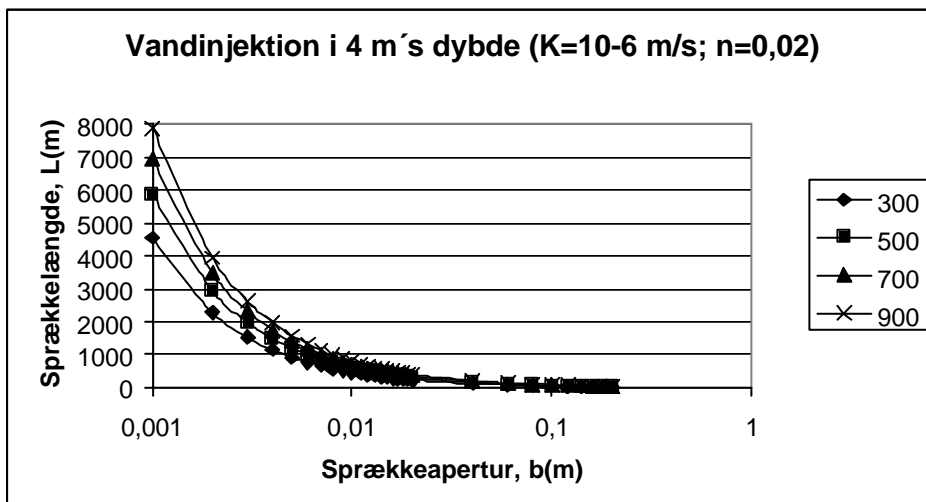
Hvor K er den hydrauliske ledningsevne af formationen, μ er væskens eller gassens viskositet, ΔP er injektionstrykket korrigeret for atmosfæretryk og n er porøsiteten. I bilag 4.1 er angivet repræsentative inputparametrene til ligning (1) og (2) for danske forhold, samt typiske injektionstryk og -tider for hhv. luft og rent vand i 4 meters dybde. Sprækkelængde og -apertur har derpå kunne beregnes. Bilag 4.2 viser en grafisk afbildning af sprækkelængde / apertur relationen for luft og vand injektion med input parametrene som angivet i bilag 4.1. Desuden er i bilag 4.3 og 4.4 vist de beregnede værdier for hhv. luft og vand. ~~Det ses at mest realistiske værdier opnås for injektion af vand i 300 til 900 sekunder, hvor der opnås sprækkelængder eller diametre på mellem 5 og ca. 20 meter med aperturer på fra ca. 8 cm til 2 dm. Derimod synes beregninger ikke egnet for injektion med luft, da der for injektionstider på både 20 og 60 sekunder opnås beregningsmæssige sprækkelængder på 50 meter og derover ved aperturstørrelse på 2 dm. På sammen måde kan sprækkelængde og apertur beregnes for en sprække der induceres med boremudder. Det ses at beregningen ved både injektion med luft og vand giver fysisk helt urealistiske værdier, hvorfor beregning af sprækkelængde og -bredde ved anvendelse af ligning (1) og (2) må anses for uanvendelig i praksis og blot bekræfter at forudsætningerne for beregningen er alt for forsimplede.~~ Som eksempel på en boremudders kan benyttes den benyttede viskositetsværdi på 0,375 kg/m sek, som angivet i eksemplet i bilag 5.

Bilag 4.2

Injektion af luft i 4 meters dybde ved to forskellige injektionstider, hhv. 20 og 60 sekunder.



Injektion af vand i 4 meters dybde i hhv. 300, 500, 700 og 900 sekunder



Bilag 4.3

Beregning af inducerede sprækkers længde (i meter) med sprækkeapertur varierende fra 0,001-0,2 meter og injektionstider på 20 og 60 sekunder. Injektionen sker med luft i 4 meters dybde. Hydraulisk ledningsevne er 10^{-6} m/sek og porøsiteten er 0,02.

m	20 sek	60 sek
0,001	45550,5	78895,8
0,002	22775,3	39447,9
0,003	15183,5	26298,6
0,004	11387,6	19724,0
0,005	9110,1	15779,2
0,006	7591,8	13149,3
0,007	6507,2	11270,8
0,008	5693,8	9862,0
0,009	5061,2	8766,2
0,01	4555,1	7889,6
0,011	4141,0	7172,3
0,012	3795,9	6574,7
0,013	3503,9	6068,9
0,014	3253,6	5635,4
0,015	3036,7	5259,7
0,016	2846,9	4931,0
0,017	2679,4	4640,9
0,018	2530,6	4383,1
0,019	2397,4	4152,4
0,02	2277,5	3944,8
0,04	1138,8	1972,4
0,06	759,2	1314,9
0,08	569,4	986,2
0,1	455,5	789,0
0,12	379,6	657,5
0,14	325,4	563,5
0,16	284,7	493,1
0,18	253,1	438,3
0,2	227,8	394,5

Bilag 4.4

Beregning af inducerede sprækkers længde (i meter) med sprækkeåpning varierende fra 0,001-0,2 meter og injektionstider fra 300-900 sekunder. Injektionen sker med vand i 4 meters dybde. Hydraulisk ledningsevne er 10^{-6} m/sek og porøsitet er 0,02.

m	300 sek	500 sek	700 sek	900 sek
0,001	4546,4	5869,4	6944,8	7874,7
0,002	2273,2	2934,7	3472,4	3937,3
0,003	1515,5	1956,5	2314,9	2624,9
0,004	1136,6	1467,4	1736,2	1968,7
0,005	909,3	1173,9	1389,0	1574,9
0,006	757,7	978,2	1157,5	1312,4
0,007	649,5	838,5	992,1	1125,0
0,008	568,3	733,7	868,1	984,3
0,009	505,2	652,2	771,6	875,0
0,01	454,6	586,9	694,5	787,5
0,011	413,3	533,6	631,3	715,9
0,012	378,9	489,1	578,7	656,2
0,013	349,7	451,5	534,2	605,7
0,014	324,7	419,2	496,1	562,5
0,015	303,1	391,3	463,0	525,0
0,016	284,2	366,8	434,1	492,2
0,017	267,4	345,3	408,5	463,2
0,018	252,6	326,1	385,8	437,5
0,019	239,3	308,9	365,5	414,5
0,02	227,3	293,5	347,2	393,7
0,04	113,7	146,7	173,6	196,9
0,06	75,8	97,8	115,7	131,2
0,08	56,8	73,4	86,8	98,4
0,1	45,5	58,7	69,4	78,7
0,12	37,9	48,9	57,9	65,6
0,14	32,5	41,9	49,6	56,2
0,16	28,4	36,7	43,4	49,2
0,18	25,3	32,6	38,6	43,7
0,2	22,7	29,3	34,7	39,4

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 BAGGRUND	11
2 METODEBESKRIVELSE	13
2.1 INJEKTIONSGASSER OG VÆSKER.....	13
2.2 INJEKTIONSTRYK OG -TIDER.....	14
2.3 LÆKAGE (LEAKOFF).....	16
2.4 Udstyr.....	17
2.4.1 Udstyr over jorden.....	17
2.4.2 Udstyr under jorden.....	20
2.5 BORINGSUDBYGNING.....	22
2.6 SAMMENLIGNING MELLEM HYDRAULISK OG PNEUMATISK FRAKTURERING..	23
3 ETABLERING AF SPRÆKKER	25
3.1 SPRÆKKEORIENTERING.....	25
3.2 MONITERING AF SPRÆKKEORIENTERING.....	25
3.3 SPRÆKKEFORM	26
3.4 SPRÆKKESTØRRELSE	28
3.5 SPRÆKKEPERMEABILITET	30
3.5.1 Åbne sprækker.....	30
3.5.2 Sandfyldt sprække.....	31
3.6 GEOLOGISKE FORHOLD	33
4 DIMENSIONERING	37
5 GEOTEKNISKE PARAMETRE OG PROBLEMER	39
5.1 BESLÆGTEDE BAGGRUNDSERFARINGER.....	39
5.2 RISICI	40
5.3 GEOTEKNISKE PARAMETRE	42
6 KRAV TIL LOKALITET FOR ANVENDELSE AF FORSKELLIGE FRAKTURERINGSMETODER	49
7 METODENS ANVENDELS ESOMRÅDE	51
7.1 VAKUUM EKSTRAKTION (SVE)	51
7.2 LNAPL OPPUMPNING.....	51
7.3 DNAPL OPPUMPNING.....	52
7.4 DOBBELTFASEEKSTRAKTION (DPE).....	52
7.5 BIOLOGISKE OPRENSNINGSMETODE (BIOREMEDIERING)	53
7.6 LUFTINJEKTION OG -OPPUMPNING.....	54
7.7 DAMPINJEKTION	54
7.8 ELEKTROOSMOSE (ELLER ELEKTROKINESE).....	55
7.9 BARRIERER.....	55
7.10 MONITERING.....	56
8 EKSEMPLER PÅ ANVENDELSE FRA USA (CASE HISTORIES)	57
8.1 ANVENDELSE AF HYDRAULISKE SPRÆKKER.....	58
8.1.1 Linemaster Superfund lokaliteten (dobbeltfaseekstraktion).....	58
8.1.2 Center Hill, OH (vakuumekstraktion)	59
8.1.3 Dayton site, OH (biologisk oprensningmetode).....	65
8.1.4 Portsmouth, OH (Barrierer)	64
8.2 ANVENDELSE AF PNEUMATISKE SPRÆKKER.....	66

8.2.1	Centrale New Jersey (Dobbeltfaseekstraktion)	66
9	VURDERING AF POTENTIALET FOR HYDRAULISK	69
9.1	LOKALITETESBESKRIVELSE	69
9.2	FORURENINGSUDBREDELSE	69
9.3	GEOLOGISKE OG HYDROLOGISKE FORHOLD	70
9.4	FORESLÅET SPRÆKKEDESIGN PÅ VESTERGADEN 10	71
9.4.1	Sprækkestørrelse	71
9.4.2	Sprækelokalitet	71
9.4.3	Boremetode og udbygning	73
9.4.4	Fraktureringsteknik	73
9.4.5	Geotekniske undersøgelser	73
9.5	SANDSYNLIGT RESULTAT AF ETABLERING AF INDUCEREDE SPRÆKKER	74
9.5.1	Forventet sprækkeform	74
9.5.2	Påvirkning af eksisterende anlæg på Vestergade 10	75
9.6	SAMMENFATNING	76
10	ØKONOMISK ANALYSE	77
11	REFERENCER	79

BILAG 1
BILAG 2
BILAG 3
BILAG 4.1
BILAG 4.2
BILAG 4.3
BILAG 4.4
BILAG 5
BILAG 6

Forord

Dette udredningsprojekt er gennemført under Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram for jord- og grundvandsforurening.

Formålet med projektet

Formålet med nærværende udredningsprojekt (litteraturstudium) er at beskrive forskellige fraktureringsmetoder og deres anvendelse med særlig vægt på pneumatisk og hydraulisk frakturering. Specielt skal indgå en kritisk vurdering af metodernes egnethed for danske forhold generelt. I udredningsrapporten skal desuden indgå en selvstændig vurdering af mulighederne for at etablere inducerede sprækker ved hjælp af hydraulisk frakturering, med det formål at foretage afværgeforanstaltning baseret på dobbeltfaseekstraktion (*Dual-Phase-Extraction (DPE)*) på lokaliteten Vestergade 10 i Haslev, Vestsjællands Amt.

Rapportens forfattere

Udredningsrapporten er udarbejdet af Bertel Nilsson, GEUS som hovedforfatter og ansvarlig for udarbejdelsen af rapporten. Claus Gormsen, NIRAS har stået for afsnittet ”Geotekniske parametre og problemer” af generel karakter og specifikt på Vestergade 10 i Haslev, mens Birger C. Blem, NIRAS har været ansvarlig for sammenstilling af relevante eksisterende data fra Vestergade 10 i Haslev til brug for en lokalitetsspecifik vurdering. Endelig har GEUS benyttet Dr. Bill Slack fra det amerikanske fraktureringsfirma FRx fra Cincinnati, OH, samt Dr. Larry Murdoch fra Clemson University, SC, USA til den lokalitetsspecifikke vurdering af Vestergade 10 grunden i Haslev.

Finansiering

Udredningsprojektet er finansieret af Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram for jord- og grundvandsforurening og er udarbejdet i perioden juli-november 1999.

Sammenfatning og konklusioner

Frakturering er en teknik, hvor en kunstig opsprækning af lavpermeable lag skabes ved at injicere enten gas / luft (*pneumatisk frakturering*) eller vand / boremudder (*hydraulisk frakturering*) i bunden af en boring. Den kunstige opsprækning danner et fladeareal eller en skålformet struktur i et lavpermeabelt lag.

Frakturering har til formål at øge pumpeydelsen eller sugsevnen af en afværgeboring / ventileringsdræn af den slags, som anvendes til vakuumeekstraktion (*Soil Vapour Extraction (SVE)*) og afværgepumpning. Et andet formål er at øge den hydrauliske forbindelse mellem inducerede sprækker og naturligt forekommende sprækker i det lavpermeable lag. Orienteringen af de kunstigt åbnede sprækker afhænger primært af jordens konsolideringsforhold. Således vil inducerede sprækker fortrinsvis blive subhorisontalt orienteret i de øverste 5-8 meter mens sprækker induceret dybere end ca. 8 meter risikerer at blive mere stejlt til vertikalt orienteret. Længden varierer en del, men kan nå op til 10 meter væk fra injektionspunktet og sprækkeaperturen være fra mm til flere dm størrelse afhængig af fremgangsmåden.

Siden 1994 har den hydrauliske fraktureringsmetode været kommercielt tilgængelig. De første ”kommercielle” sprækker blev udført i forbindelse med projekter, hvor vakuumeekstraktion blev anvendt. Projekterne var typisk små, hvilket var forventeligt, når nye teknikker tages i anvendelse. 10 års erfaringer fra Nordamerika viser, at inducerede sprækker kan etableres i finkornede forurenede sedimenter, hvorved effektiviteten af en afværgeforanstaltning vil stige - samtidigt med at omkostningerne begrænses.

Formålet med nærværende udredningsprojekt er at give en oversigt, samt beskrive forskellige fraktureringsmetoder og deres forventede anvendelighed under danske forhold. Hovedvægten i rapporten er lagt på den pneumatiske og hydrauliske fraktureringsmetode. Der indgår en selvstændig vurdering af mulighederne for etablering af inducerede sprækker ved hjælp af hydraulisk frakturering, med det formål at foretage afværgeforanstaltning baseret på dobbeltfaseekstraktion på lokaliteten Vestergade 10 i Haslev, Vestsjællands Amt.

Teknologien vurderes at kunne finde bred anvendelse i forbindelse med en række danske forureningssager på morænelerslokaliteter. Det gælder f.eks. nedlagte olie/benzinrunde, tjæreforurenede gasværksgrunde og rensrigrunde forurenede med klorerede opløsningsmidler, hvor miljømyndighederne og de rådgivende firmaer i dag har meget begrænsede in-situ oprensningsteknikker at vælge imellem, så bortgravning af forurenede jord er mange gange den mest effektive og valgte metode.

Dobbeltfaseekstraktion af PCE forurening fra hydrauliske sprækker på Vestergade 10 i Haslev forventes at forbedre effekten af in-situ oprensningen i sammenligning med udelukkende at anvende almindelige vertikale boringer. Følgende forhold forventes forbedret: (1) influensradius, (2) strømningshastigheder og pumpeydelse, samt (3) det forhold at inducerede sprækker bedre vil kunne ”nå” den del af forureningen, der er beliggende centralt under bygningerne på lokaliteten.

Summary and conclusions

Fracturing is a method whereby a gas (pneumatic fracturing) or water / slurry (hydraulic fracturing) is injected into the subsurface at pressures exceeding the natural in-situ pressure in the subsurface (i.e. overburden pressure, cohesive stresses, etc.) and at flow volumes exceeding the natural in-situ permeability. The induced fracture itself is commonly a sheet like feature with maximum dimensions of roughly 20 meters and a thickness of 1 to 20 mm depending on the type of injection fluid used. Hydraulic fractures are commonly filled with granular material which serves to prop the fracture open. Pneumatic fractures are not filled with granular material and are kept open due to irregularities along the fracture walls.

Investigations over the past 10 years in North America have shown that fractures can be created in contaminated, fine-grained sediments, where they increase flow rates to and from wells by one or two orders of magnitude. The technique appears to offer the possibility of significantly reducing the costs of remediating contaminated sites underlain by silty clay till by increasing the rate at which remediating agents can be introduced to the subsurface and the rate at which contaminated fluids can be extracted.

The objectives of this study are:

- 1) to carry out a state-of-the-art literature review of the fracturing techniques
- 2) to evaluate the applicability of hydraulic and pneumatic fracturing under typical geologic conditions in Denmark
- 3) to evaluate the feasibility of creating hydraulic fractures at the Haslev field site in Denmark

The literature study was prepared in collaboration between Bertel Nilsson (senior author) at Geological Survey of Denmark and Greenland, Claus Gormsen and Birger C. Blem at NIRAS (Danish consulting company) and the developers of the hydraulic fracturing technique for environmental applications Dr. Bill Slack at FRx, Cincinnati, OH, US (American fracturing company) and Dr. Larry Murdoch, Clemson University, SC, and president of FRx. The study is financed by the Danish Environmental Protection Agency, Danish EPA (DK: Miljøstyrelsen).

1 Baggrund

Nyere forskning dokumenterer, at geologiske heterogenitetsforhold, herunder tilstedeværelsen af lavpermeable zoner og opsprækkede dobbeltporøse bjergarter, udgør en af de største hindringer for en effektiv oprensning af såvel jord som grundvand (f.eks. Mackay og Cherry, 1989).

I erkendelse af, at de hyppigst anvendte oprensningsprincipper, afværgepumpning (*Pump-and-Treat (P&T)*) og bortgravning, har vist sig utilstrækkelige til at oprense forurening fra grundvandsmagasinerne, har især USA og Canada satset på at udvikle alternative oprensningsteknikker. I forbindelse med forsknings- og demonstrationsprojekter finansieret af den amerikanske miljøstyrelse (US EPA) i slutningen af 1980-erne og begyndelsen af 1990-erne blev den pneumatiske og hydrauliske fraktureringsmetode udviklet som et værktøj til oprensning af forurenede jord og grundvand.

Formålet med Fraktureringsmetoden

Formålet med fraktureringsmetoden er at øge indstrømningshastigheden (*enhancement technology*) til indvindingsboringer af den slags, som anvendes til vakuumeekstraktion (*Soil Vapour Extraction (SVE)*) og afværgepumpning. Metoden er oprindeligt udviklet indenfor olieindustrien, hvor den har været anvendt til at øge indvindingen fra lavpermeable olie/gasreservoirer. Behovet for at finde afværgeteknikker der kræver mindst mulig plads på de forurenede grunde er stort, hvorfor frakturering som afværgeteknik har fundet sin anvendelse.

SITE Program

Den amerikanske Miljøstyrelses SITE program (Superfund Innovative Technology Evaluation Program) har finansieret en uafhængig kritisk gennemgang af den pneumatiske & hydrauliske fraktureringsteknologi og publiceret erfaringerne i en rapport, hvor et antal forureningsoprensninger er blevet gennemgået (EPA, 1994).

Siden 1994 har den hydrauliske fraktureringsmetode været kommercielt tilgængelig. De første ”kommercielle” sprækker blev udført i forbindelse med projekter, hvor vakuumeekstraktion blev anvendt. Projekterne var typisk små, hvilket var forventeligt, når nye teknikker tages i anvendelse.

10 års erfaringer fra Nordamerika viser, at inducerede sprækker kan etableres i finkornede forurenede sedimenter, hvorved effektiviteten af en afværgeforanstaltning vil stige - samtidigt med at omkostningerne begrænses.

Frakturering er en teknik, hvor en kunstig opsprækning af lavpermeable lag skabes ved at injicere enten gas / luft (*pneumatisk frakturering*) eller vand / boremudder (*hydraulisk frakturering*) i bunden af en boring. Væske- eller gastrykket skal overstige den indre spændingstilstand (*confining stress*) i bunden af boringen, hvorved en revne eller sprække begynder at åbnes i de omgivende jordlag (Schroeder med flere, 1992; Davis-Hoover med flere, 1991; Murdoch med flere, 1990; Murdoch, 1997; EPA, 1993a; EPA, 1994; Schuring og Chan, 1992). Den kunstige opsprækning danner et fladeareal eller en skålformet struktur i et lavpermeabelt lag.

Frakturering har til formål at øge pumpeydelsen eller sugeevnen af en afværgeboring / ventileringsdræn. Et andet formål er at øge den hydrauliske

forbindelse mellem inducerede sprækker og naturligt forekommende sprækker i det lavpermeable lag. Orienteringen af de kunstigt åbnede sprækker afhænger primært af jordens konsolideringsforhold. Længden varierer en del, men kan nå op til 10 meter væk fra injektionspunktet og sprækkeaperturen være fra mm til flere dm størrelse afhængig af fremgangsmåden.

Teknologien vurderes at kunne finde bred anvendelse i forbindelse med en række danske forureningssager på morænelerslokaliteter. Det gælder f.eks. nedlagte olie/benzinrunde, tjæreforurenede gasværksrunde og renserrunde forurenede med klorerede opløsningsmidler, hvor miljømyndighederne og de rådgivende firmaer i dag har meget begrænsede in-situ oprensningsteknikker at vælge imellem, hvorfor bortgravning vælges som en effektiv og sikker metode.

2 Metodebeskrivelse

I nærværende udredningsrapport er amerikanske termer tilføjet i (*kursiv*) første gang den danske oversættelse forekommer i teksten. Det er tilstræbt at benytte SI enheder, men da hovedparten af fraktureringslitteraturen kommer fra Nordamerika, hvor SI enheder bruges mere sporadisk er der i Bilag 1 vist en konverteringstabel mellem de hyppigst anvendte enheder.

Grundlæggende princip

Det grundlæggende princip for etablering af sprækker ved fraktureringsmetoden er, at der i bunden af en boring injiceres en væske eller gas (*fluid*) med et tryk der skal overstige in-situ spændingstilstand (*confining stress*) i den omgivende jord. Herved dannes en revne eller sprække. Ved en fortsat injektion af fluid udvides sprækken. Sprækken når sin endelige udstrækning når, injektionen af fluid stoppes, når sprækken møder en barriere (f.eks. husfundament), eller når den rammer jordoverfladen. Endelig kan sprækkens udbredelse blive stoppet, hvis gassen eller væsken ”tabes” som lækage til den omgivende jord gennem sprækkens væg (*leakoff*) eller hvis sprækken skærer jordoverfladen (*venting*). Lækage og venting er nærmere beskrevet i afsnit 2.3.

Pneumatisk frakturering

Hydraulisk frakturering

Eksplosiv frakturering

Der kan anvendes følgende typer af væske og gas til etablering af sprækkerne: trykluft /gas, rent vand, samt en specielt udformet geléagtig klæbende boremudder, der består af guar gummi gelé, sand og vand. Når der injiceres luft eller gas benævnes metoden **pneumatisk frakturering**, og hvis der anvendes rent vand eller vand tilsat gelé og eventuelt sand benævnes metoden **hydraulisk frakturering**. Endelig anvendes i sjældnere tilfælde trykket fra eksplosioner til at danne kunstige sprækker. Sidstnævnte metode benævnes **eksplosiv frakturering** eller **blasting** og er mest anvendt i olieindustrien samt i vandforsyningsammenhæng til forbedring af boringers ydeevne i grundfjeldsområder (f.eks. Klemensker vandværk på Bornholm). EPA (1994) giver en oversigt over de forskellige metoder og sammenligner de enkelte metoder indbyrdes. De enkelte metoder kan i nogen grad modificeres til at kunne imødekomme forskellige behov ved specifikke forureningsoprensninger. Den eksplosive fraktureringsmetode vil ikke blive behandlet videre i denne udviklingsrapport.

2.1 Injektionsgasser og væsker

Injektionsgasser

Til pneumatisk frakturering anvendes der i regelen trykluft. Imidlertid kan særlige behov for at opretholde eller skabe aerobe / anerobe forhold i jordlag, der skal renses op ved biologiske oprensingsmetoder medføre, at en gastype med en anden sammensætning må benyttes. Når der benyttes luft til frakturering, er der relativ begrænset mulighed for mobilisering af vandfasen, mens luftfasen med lethed kan mobiliseres. Finkornede partikler eller pulver kan let transporteres med fraktureringsluften ind i en induceret sprække. Dog aftager transportevnen i luftstrømmen med stigende kornstørrelse, vægtfylde og afstand til injektionspunktet. Yderligere er det karakteristisk at luft har en begrænset evne til at injicere et tilstrækkelig volumen af grovkornet sand ind i en induceret sprække, så en stor nok permeabilitet af den inducerede sprække kan opnås. Igangværende forskningsundersøgelser af gassers evne til at transportere fyldmaterialer ind i sprækker viser dog en lovende udvikling.

Injektion af rent vand

Injektion af rent vand ved hydraulisk frakturering er sjældnere brugt og kræver relativ høje initiale injektionstryk (mere end 5 MPa eller ca. 50 atm) (EPA, 1994). Rent vand kan transportere sandkorn ind i en sprække, men bedre resultater opnås med plastikkugler, der har samme densitet som vand og derfor lettere lader sig transportere i vandig opløsning (Waltz and Decker, 1981).

Injektion af guargummi gelé

Guargummi gelé er en viskøs væske, der hyppigt anvendes ved hydraulisk frakturering. Guargummi er et tilsætningsstof der i fødevarerindustrien blandt andet anvendes til at gøre yoghurt og tandpasta tykkere. Vand og guar gummi gelé danner en stiv geléagtig substans, ved tilsætning af en vandig opløsning af borat, der danner krydsbindinger med de øvrige dele af boremudderet. Den geléagtige substans har de rette reologiske egenskaber (mekanisk bevægelse af stof med stor viskositet) til at kunne bære betydelige mængder af sand (*proppant*) i suspension uden at miste evnen til at flyde (1,2-1,8 kg sand pr. liter guar gummi gelé). Et enzym (benævnes ofte *breaker*), som resulterer i at substansen kan nedbrydes til en væske efter 2-4 uger af naturligt forekommende mikroorganismer i jorden tilsættes boremudderet, der derefter uden besvær kan pumpes væk, så kun sand ligger tilbage i den nye sprække. Der er imidlertid ikke fundet oplysninger om undersøgelser, der dokumenterer en fuldstændig fjernelse af guar gummi gelé, borat-krydsbinder eller breakerenzymet fra den oppumpede væske efter 2-4 ugers nedbrydning. Blandingsspecifikationer og kvalitetssikring af opblandingen er detaljeret beskrevet i EPA (1993a).

2.2 Injektionstryk og -tider

Betydende faktorer

Det væske- eller gastryk der skal til, for at etablere en revne eller initial sprække i injektionsboringen afhænger af en række forhold: in-situ spændingstilstanden; den omgivende bjergarts sejhed (*toughness*, jf. afsnit 3.6); injektionshastigheden; størrelsen af den initiale revnedannelse; samt uregelmæssigheder i borehullets form. Hovedreglen er, at injektionstrykket stiger med stigende injektionsdybde, stigende injektionshastighed og for hydraulisk fraktureringens vedkommende med stigende viskositet af borevæsken eller boremudderet. Injektionstrykket vil være højest, når den initiale sprække skal dannes (*initiation pressure*) og reduceres efterfølgende i sprækkens vækstfase (*propagation pressure*). Der er stor forskel på om en sprække etableres med gas eller væske, hvad angår injektionstryk, -hastighed og -tider. I Figur 2.1 er vist eksempler fra to forskellige lokaliteter på injektionstrykkets tidslige udvikling (*pressure-time history*) ved etablering af en sprække med hhv. (a) luft og (b) sandfyldt gelé. Figur 2.1(a) er etableret i en leret siltaflejring, mens (b) er etableret i en siltet leraflejring. Som det ses er injektionstrykket stort set det samme i de to viste eksempler. Dette er imidlertid et tilfælde, da det initiale injektionstryk typisk vil være større ved brug af luft i forhold til sandfyldt gelé i samme type geologisk aflejring. Injektionstiderne for de to eksempler giver dog et retvisende indtryk af, at pneumatisk sprækker typisk etableres på 20-60 sekunder, mens den endelige udbredelse af en hydraulisk sprække nås efter 5-15 minutters injektion.

Injektionstrykkets tidslige udvikling

Injektionstider

Sammenhængen mellem injektionstryk og -hastighed

Sammenhængen mellem injektionstryk og -hastigheden ved injektion med hhv. luft og sandfyldt gelé er illustreret med følgende eksempel. En sprække i en siltet leraflejring etableres i 2 meters dybde med henholdsvis luft og

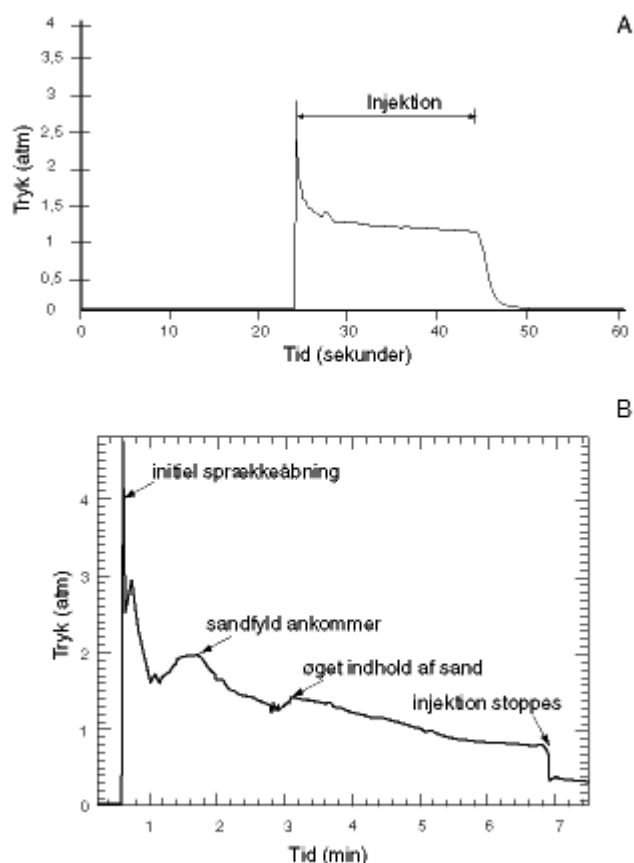
*Trykgradienten med dybden
for luft og vand*

vand med værdierne for injektionstryk og -hastighed, som vist i Tabel 1. Det ses at injektionshastigheden for luft er langt større end for sandfyldt gelé, mens injektionstrykket er mere end 10 gange større for luft end for vand. Dette skyldes at der under normale udføres en indskæring i borevæggen ved hydraulisk frakturering, mens indskæringen normalt ikke laves ved pneumatiske frakturering. Derved behøves der et større initialtryk ved injektion med luft end med vand eller boremudder. Trykgradienten med dybden for luft 0,67-1,11 atm pr. m (3-5 psi per foot) (Schuring og Chan, 1992) og for vand 0,2 atm pr. m (0,9 psi per foot) (EPA, 1994).

Tabel 1

Eksempel på injektionstryk og -hastighed med luft og vand (fra EPA, 1994)

Dybde: 2 meter	Luft (pneumatisk frakturering)	Vand (hydraulisk frakturering)
Injektionshastighed (liter/minut)	20.000-30.000	75
Injektionstryk (atm)	4,9-9,9 (\approx 0,5-1 MPa)	0,59-0,84 (\approx 60-85 kPa)

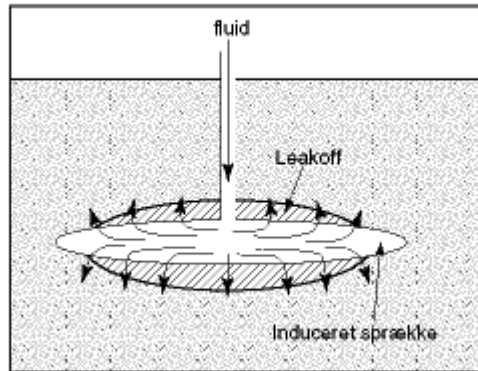


Figur 2.1

Injektionstrykkets tidlige udvikling ved etablering af sprækker, (a) med luft (pneumatisk frakturering) i en leret siltaflejring (fra Schuring og Chan, 1992), (b) med en sandfyldt guargummi gelé (hydraulisk frakturering) i en siltet leraflejring (fra EPA, 1994). Begge injektioner er udført i ca. 2 meters dybde.

2.3 Lækage (*leakoff*)

Teoretisk set ville en sprække kunne udvikle sig til uendelig afstand fra injektionspunktet, hvis jorden der omgiver sprækken var totalt impermeabel. Under naturgivne forhold er der imidlertid flere faktorer, der begrænser udbredelsen af sprækken. Den vigtigste faktor er lækageparameteren (begreb fra olieindustri) (Figur 2.2). Hastigheden for tab af gas eller væske til den omgivende jord ved lækage vil stige, mens en sprække er i vækst som følge af den øgede sprækkeoverflade. Andre faktorer der indvirker på lækagehastigheden omfatter den omliggende jords relative permeabilitet, samt injektionsvæskens viskositet og gas- eller væsketrykket.



Figur 2.2

Tab af injiceret væske eller gas (leakoff) under vækst af en sprække (fra EPA, 1994).

Lækagehastigheden

Væksten af en sprække vil stoppe, når lækagehastigheden bliver lig den hastighed hvormed gas eller væske injiceres i sprækken. F.eks. vil en injektion af 25-50 m³ luft pr. minut i en hærdnet sandsten i ca. 20 sekunder resulterer i dannelsen af et sprækkeplan med en diameter på 10-20 m og med en sprækkeapertur på 2,5-20 cm. En længere injektionstid ville ikke bidrage til en forøgelse af sprækkens størrelse. Kun ved at øge injektionshastigheden kunne en større sprække dannes.

Den høje lækagehastighed ved injektion af luft har yderligere den fordel, at opsprækningsgraden af sidebjergarten vil kunne forøges, hvorved en større direkte adgang til en eventuelt forurennet jord opnås, så effekten af oprensningen potentielt kan forøges.

Injektionshastigheden er således en kritisk designparameter til dimensionering af sprækker induceret med luft. Sprækker etableret ved hydraulisk frakturering i leraflejringer vil normalt ikke være påvirket af nævneværdig lækage. Dimensionen af en hydraulisk sprække vil således primært være begrænset af det injicerede materiales volumen.

Udbredelsen af sprækker dannet med luft og vand vil derimod begge være begrænset af om sprækken skærer jordoverfladen. Dette kan medføre tab af gas eller væske, der kan forringe effekten af en oprensning ved eksempelvis vakuumeekstraktion, da influensradius bliver betydelig reduceret hvis "falsk" luft trækkes ned i formationen via sprækkens skæringssted med jordoverfladen.

2.4 Udstyr

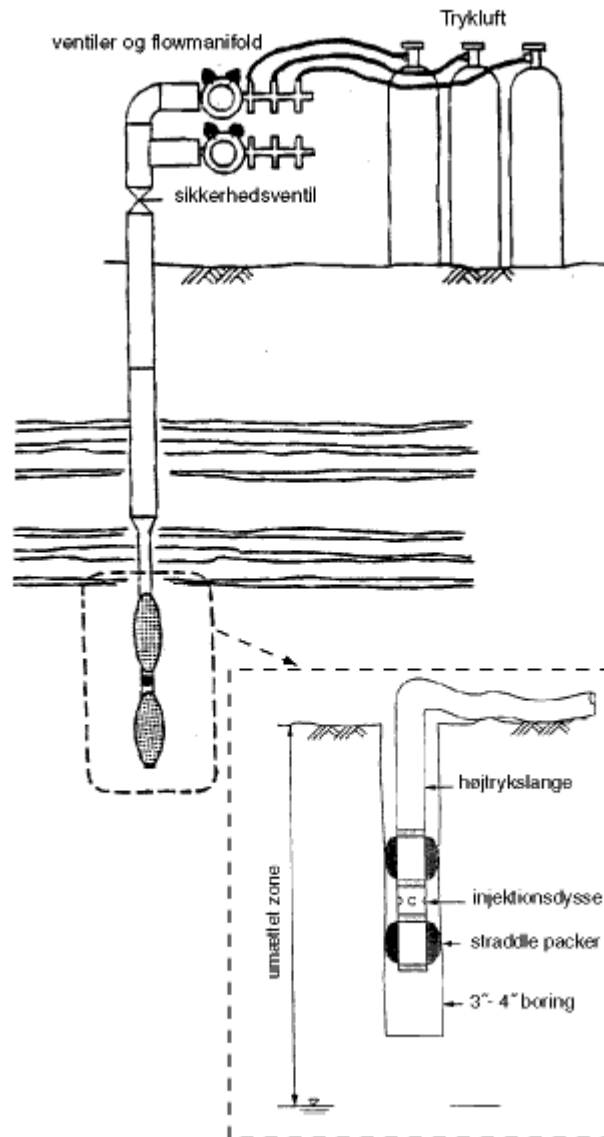
Til etablering af inducerede sprækker anvendes der udstyr både over og under jorden. Designet af udstyret over jorden er bestemt af om der skal anvendes gas eller væske som injektionsmiddel.

2.4.1 Udstyr over jorden

Udstyr der benyttes over terræn til hhv. pneumatisk og hydraulisk frakturering er forskelligt. Den pneumatisk frakturering kræver et udstyr, der kan levere et højt luft- eller gastryk og en tilstrækkelig høj

Pneumatiske frakturerings-udstyr

strømningshastighed på meget kort tid (få sekunder). Udstyret består af en serie af trykløftsflasker koblet sammen i et manifoldsystem, der typisk kan levere en injektionshastighed på 25-50 m³ pr. minut og et tryk på 5-20 atm. Tryksystemet skal være fleksibelt og skal relativt let kunne tilpasses lokale behov mht. gastype, tryk og strømningshastighed (Figur 2.3). Trykløft fra en almindelig kompressor kan normalt ikke bruges, da kompressorer ikke kan levere de krævede høje tryk på kort tid. Desuden er det nødvendigt at benytte filtre til fældning af olie rester fra luftstrømmen når almindelige kompressorer benyttes.



Figur 2.3

Pneumatisk fraktureringssystem. Over jorden: trykluftsystem med diverse ventiler. Under jorden: straddlepakkersystem med injektionsdysse (modificeret fra Schuring og Chan, 1992).

Hydraulisk fraktureringsudstyr

Hydraulisk frakturering udført med rent vand kræver udstyr, der primært består af en stempelpumpe til høje tryk forbundet med diverse trykventiler. Sprækker dannet ved injektion af guar gummi gelé, sand og vand kræver en speciel opblander, der kan blande det sammensatte boremudder. Der er flere løsningsmuligheder til at få blandet boremudderet. Den ene består af en portionsblender, der udgøres af en eller flere åbne kar forbundet med en omrører. Denne løsning er mandskabskrævende og kan kun benyttes, hvor volumen af det injicerede boremudder er relativt lille, så det ikke overstiger portionsblenderens volumen.

En anden mulighed er at bruge en kontinuert opblander, der blander vand med guar gummi gelé, borat-krydsbinder, enzyembreake og sand. En kontinuert opblander repræsenterer en betydelige større investering end en portionsblander, men til gengæld kan opgaven løses hurtigere, hvorved stykprisen pr. etableret sprække bliver mindre. Boremudderet kan i de fleste tilfælde injiceres med en duplex eller triplex stempelpumpe, ligesom ekcentriske snekkepumper eller monopumper hyppigt er blevet anvendt.

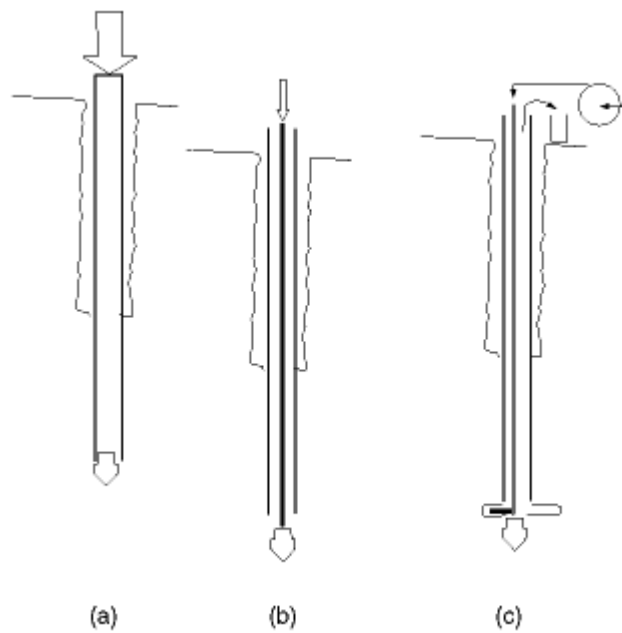
Frakturering fra isoleret zone i åben boring

2.4.2 Udstyr under jorden

Udstyret under jorden skal kunne isolere det interval i boringen, der ønskes opsprækket. Til isolation af sprækkezonen anvendes straddlepakkere, hvorimellem der er placeret en injektionsdysse, der kan fokusere injektionsgassens eller -væskens stråle, så størst muligt injektionstryk kan opnås (Figur 2.3). Til pneumatisk frakturering er der udviklet en specialdysse, der er særlig velegnet til overførsel af gastryk (Schuring og Chan, 1992). Kommercielt tilgængelige udstyr tillader etablering af sprækker med en afstand på ca. 0,5 meter langs et åbent lodret borehul. Der er rapporteret eksempler på problemer med at opnå en tilstrækkelig isolation af injektionszonen i boringer uden filtersætning (dvs. åbne boringer) i vandmættet silt og ler i USA (EPA, 1994). Under danske forhold vurderes det imidlertid, at fraktureringsaktiviteter på ler og siltlokaliteter aldrig eller kun yderst sjældent vil blive gennemført i åbne boringer.

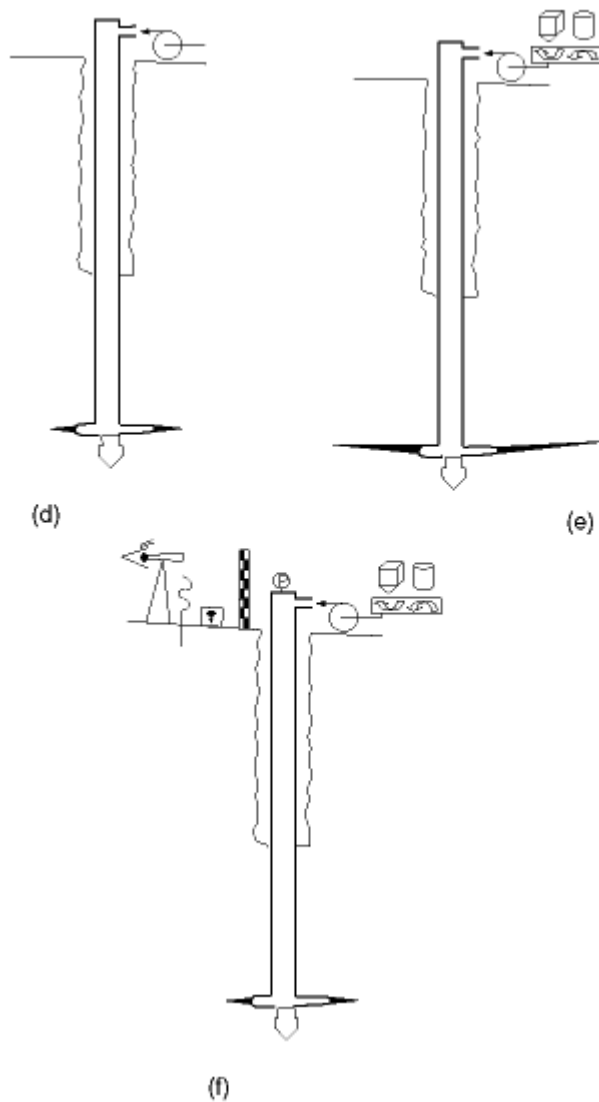
Frakturering fra rammeboring

Principperne for etablering af inducerede sprækker fra rammeboringer (*driven casing*) i lavpermeable bjergarter med både luft, vand eller bore mudder iblandet sand kan skitseres som vist i (Figur 2.4 (a)-(f)) (FRx, 1999). Beskrivelsens punkt (c) er kun gældende for hydraulisk frakturering, da der i forbindelse med pneumatisk frakturering normalt ikke udføres indskæringer.



Figur 2.4 (fra FRx, 1999)

- (a) Et forerør (typisk 2"-3 ") hamres eller trykkes til den ønskede dybde med løs spids, hvor sprækken ønskes lavet. Der kan bores for med en boring (pilot hul), der har en større diameter end boringen, hvorfra sprækkerne skal dannes. Pilothullet bores til 0,5-1 meter over det sted hvor sprækken ønskes lavet. Forerøret presses 0,3 m eller mere ind i den uberørte jord med løs spids, så en god jordkontakt opnås. I bunden af pilothullet kan eventuelt presses en intaktprøvetager gennem intervallet, hvor sprækken ønskes lavet. Prøven kan benyttes til bestemmelse af mineralogisk, hydraulisk og andre jordfysiske/kemiske parametre.
- (b) Den løse spids bankes ned ud af boringen, så et cylindrisk åbent hul etableres. Typisk skal der bruges mindre kraft til at presse den løse spids ned end den kraft, der skal bruges til at hamre / trykke forerøret ned med. Den løse spids kan være designet på en sådan måde at den indeholder en sump eller et blindrør, hvori der senere kan installeres en pumpe til brug under den senere forureningsoprensning.
- (c) I bunden af boringen skæres et tyndt cylindrisk snit i boringens væg med en kraftig vandstråle ved at rotere vandstrålen 360° rundt i det horisontal plan, så en symmetrisk revne eller indskæring dannes. Hvis indskæringen skal vokse i en bestemt retning kan dette gøres ved at etablere en asymmetrisk indskæring ved en partiel rotation af vandstrålen. Derved opnås, at sprækkevæksten får en foretrukket orientering. Sidstnævnte teknik er den hydrauliske fraktureringsteknik, der oprindeligt er udviklet i olieindustrien.



Figur 2.4(fortsat) (fra FRx, 1999)

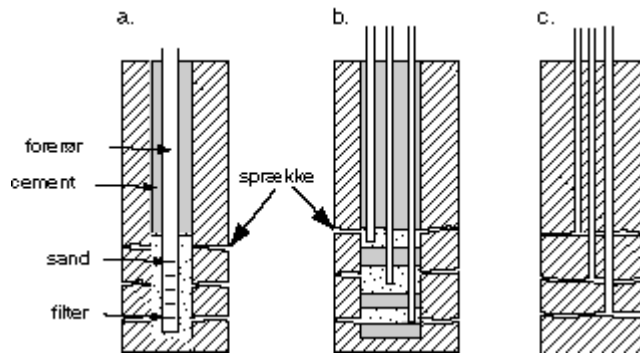
- (d) Indskæringen i boringens bund bliver til en horisontal sprække i den omgivende jord ved, at væske- eller gastrykket fokuseres langs indskæringens perimeter.
- (e) Sprækken vokser til den endelige størrelse.
- (f) Væske/gas-tryk og strømningsrate kontrolleres under injektionen samtidig med, at jordoverfladens hævningsmoniteres.

2.5 Boringsudbygning

Den anvendte metode til udbygningen af boringer med inducerede sprækker er ens for pneumatisk og hydraulisk frakturering. Valget af metode er bestemt af følgende forhold:

- formålet med oprensningen;
- adgangsmuligheder til de enkelte sprækker (fleksibilitet);
- hensyn til økonomiske betingelser.

Boringerne kan principielt udbygges på de tre forskellige måder der er vist på Figur 2.5 (a) – (c):



Figur 2.5 (fra EPA, 1994)

- (a) Filtersætning af inducerede sprækker med ét langt filterrør (4"- 6" diameter). Metoden er relativ billig, men reducerer fleksibiliteten for oprensningen.
- (b) Udbygning med filterrør til hver induceret sprække i samme boringsudbygning. De enkelte filterrør er adskilt med afproppinger. Boringsdiametere er typisk 6"- 8". Udbygningen af (b) er dyrere end (a), men giver til gengæld mulighed for en større fleksibilitet, da der kan injiceres / oppumpes fra de enkelte sprækkezoner samtidigt.
- (c) Filtersætning af hver enkelt induceret sprækkedybde med individuelle rammeboringer (2"-3" borediameter). Metoden er mindst ligeså fleksibel som (b) men vil være dyrere at etablere. Lokale adgangsforhold kan gøre at udbygning (c) må foretrækkes.

I sjældnere tilfælde kan horisontale sprækker etableres i eksisterende borer i geologiske aflejringer, der er så sammenhængende, at formationen ikke falder sammen, hvis en filtersektion fjernes (inklusive gruskastning). I andre tilfælde fjernes filtersektion (og gruskastning) ikke og injektionsstrykket påføres direkte på filtermaterialet i den dybde, hvor sprækken ønskes dannet. Derved er der risiko for, at injektionsvæsken eller gassen kan presses via gruskastningen, udenom straddlepakkeren og u hensigtsmæssigt spredes op langs filtersektionen (eller gruskastningen).

Hvor det alligevel lykkes at etablere en horisontal sprække i en eksisterende boring, uden at fjerne filter og gruskastning, risikerer oprensningseffekten at blive beskedent.

2.6 Sammenligning mellem hydraulisk og pneumatisk frakturering

Forskelle og ligheder mellem de to fraktureringsmetoder kan opsummeres som vist i Tabel 2. De angivne karakteristika og værdier er alle typiske størrelser der rapporteres i litteraturen, men kan naturligvis variere en del. Det skal specielt nævnes for fyldmaterialernes vedkommende, at der i langt fra alle tilfælde benyttes udelukkende sand i forbindelse med hydraulisk frakturering. I et stigende antal sager enten eksperimenteres eller

praktiseres der med injektion af andre materialer end sand i de inducerede sprækker. Andre materialer kan være: grafit, mikrober og næringsalte, iltningmiddel, oxidant og reduktant samt skumbeton og bentonit. Hver enkelt af disse øvrige materialer er nærmere omtalt i kapitel 7 og 8.

Tabel 2.

Sammenligning mellem pneumatisk og hydraulisk frakturering

	Pneumatisk frakturering	Hydraulisk frakturering
Sprække apertur	0,5-1 mm	1-2 cm
Sprække længde	6,5-18 m (diameter)	5-18 m (diameter)
Sprække fluid	Gas /luft	Vand eller boremudder (guargummi gelé)
Sprække orientering	Subhorizontale	Subhorizontale
Sprække dybder	5-8 m	5-8 m
Sprækkefyldmateriele	Normalt ingen	Normalt sand
Injektionstid	20-60 sek.	5-15 min.
Injektionshastighed	25-50 m ³ luft /minut	60-500 liter vand / minut
Injektionstryk		
- Initial	5-10 atm.	2,5-3,5 atm.
- Vækstfasen	1,0 atm.	< 1,0 atm.

3 Etablering af sprækker

3.1 Sprækkeorientering

Flere faktorer spiller ind på hvilken form og permeabilitet en induceret sprække vil få i jorden. De geologiske forhold har størst betydning for, hvorledes sprækken formes og bestemmer sammen med bjergartens styrke om en sprække skal fyldes med permeabelt materiale for at den kan blive stående åben efter at den er dannet, eller kan stå åben af sig selv. Jordens konsolideringsforhold kontrollerer for en stor del sprækkens orientering, idet horisontale sprækker nemmest dannes i overkonsoliderede jordlag mens normal konsolidering af jordlagene favoriserer dannelsen af vertikalt orienterede sprækker. En nok så vigtig faktor er bestemt af specifikke forhold på lokaliteten, hvor sprækker påtænkes etableret, idet belastningstrykket på jordlagene fra bygninger kan medvirke til en betydelig afbøjning af sprækkeorienteringen og -formen.

3.2 Monitering af sprækkeorientering

Sprække orientering

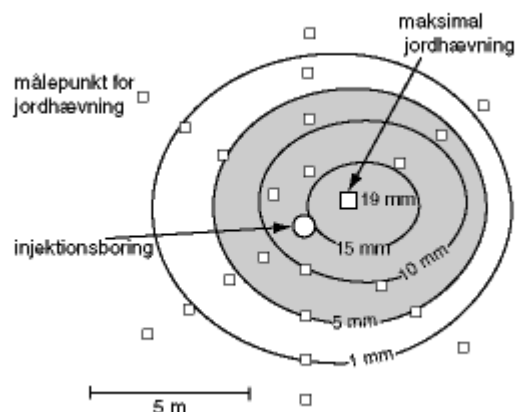
Til at fastlægge inducerede sprækkers orientering i relativ ringe dybde benyttes metoder til at bestemme jordhævning, jordhældning samt den tidslige udvikling i injektionstrykket (EPA, 1991).

Bestemmelse af jordhævning

Den mest udbredte metode til at bestemme en sprækkes orientering (udbredelse og hældning) er ved at registrere hævningsmønstret på jordoverfladen. Den resulterende jordhævning kan indmåles med standard nivelleringsudstyr, hvor fingraduerede landmålerstokke eller stager placeret på jordoverfladen. Disse indmåles før og efter sprækkens etablering. Nivellérinstrumentet placeres udenfor det hævede areal. Som supplement kan fintfølede elektroniske hældningsmålere (tiltmetre), kombineret med dataloggere, benyttes til registrering af små ændringer i jordoverfladens hældning, se Figur 2.4(f). Derved kan en løbende registrering (i real time) af jordhævningen ske mens den finder sted. Dette har den meget store fordel at man får et varsel, før alvorlige skader på bygninger eller ledningsføringer i jorden sker, således at injektionen kan standses betids.

Symmetriforhold

Etablering af en svagt hældende sprække nær terræn giver anledning til symmetrisk hævningsstruktur. Dette ses ved, at injektionspunktet er sammenfaldende med centrum af en cirkulær eller elliptisk form. En asymmetrisk form er defineret ved, at centrum af hævningsformen er beliggende et andet sted end injektionspunktet. Erfaringen viser, at de fleste hævningsmønstre er asymmetriske, hvilket oftest skyldes geologiske heterogenitetsforhold i jorden, så de fleste inducerede sprækker får en svagt hældende orientering, eksempelvis svarende til en svagt hældende lagdeling (se Figur 3.1).



Figur 3.1

Typisk form af jordhævning over en terræn nær svagt hældende hydraulisk eller pneumatisk sprække (EPA, 1994)

Andre metoder til bestemmelse af jordhævning

En geofysisk metode (elektrisk resistivitet) har været forsøgt anvendt til kortlægning af sandfyldte sprækker etableret i siltede leraflejringer i få meters dybde ved Cincinnati i USA (Wang med flere, 1991; EPA, 1991). Til sprækkens sandfyldning var tilsat en stærk elektrolytopløsning, der kunne detekteres med en geoelektrisk tomografimethode, når målinger blev foretaget før og efter etablering af inducerede sprækker. Numeriske inversionsmetoder blev taget i anvendelse til at invertere de elektriske signaler til beregning af en sprækkegeometri, men disse teknikker behøver videreudvikling før de finder praktisk anvendelse. Derfor suppleres med andre metoder, som extensiometre, der måler længdeændringer i f.eks. borehuller, kan bruges til at følge jordhævningen (eller ændringer i sprækkeapertur) som følge af fraktureringsaktiviteterne. Strategisk placerede extensiometre kan ligesom tiltmetre indgå i et varslingsystem.

Endelig giver den tidlige udvikling i injektionstrykket værdifulde kvalitative oplysninger om de etablerede sprækkers orientering og geometri. Erfaringsmæssigt er en horisontalt etableret sprække karakteriseret ved, at injektionstrykket falder i vækstfasen mens en vertikalt voksende sprække dannes ved et stadig stigende injektionstryk. Der har dog vist sig betydelige vanskeligheder med fortolkningen af trykudviklingen, så metoden ikke kan stå alene men bør suppleres med andre metoder / observationer. I olieeftersforskningssammenhæng har Nolte and Smith (1981); Smith med flere (1987) og Ovens med flere (1998) udviklet metoder til fortolkning af sprækkers orientering og geometri ud fra den tidlige udvikling i injektionstrykket.

3.3 Sprækkeform

Effektiviteten af en induceret sprække afhænger primært af sprækkens form bestemt ved dens geometri, apertur, orientering, længde, bredde og placering i forhold til injektionsboringen, samt til en eventuel forureningskilde.

Formen af inducerede sprækker varierer over et bredt spektrum fra stejlt hældende udstrakt til en flatliggende cirkulær eller skålformet flade. De

flatliggende sprækker er nyttige i mange sammenhænge, da de kan opnå betydelig udbredelse uden at skære jordoverfladen, i modsætning til stejltstående sprækker, der har tilbøjelighed til at udvikles opefter og skære jordoverfladen.

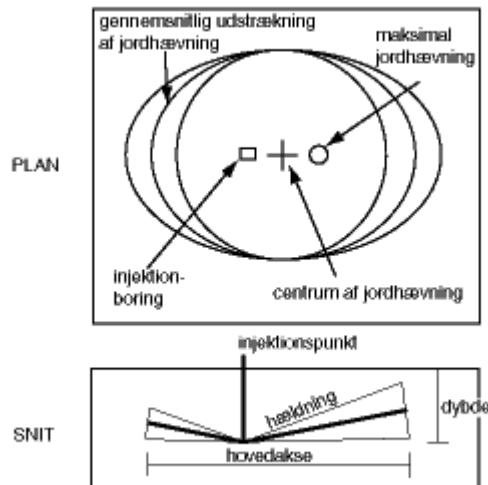
Lokale forhold

Lokale forhold der spiller ind på formen af en sprække er følgende: Bygningers belastningstryk på jordlagene, ledningsføringer i jorden, permeabilitetsforhold og heterogenitetsforhold i jorden, samt en eventuel tilstedeværelse af eksisterende borer på lokaliteten. Sprækker der etableres med en sandfyldning er nemmere at identificere, og deres form er bedre kendt end sprækker der står åbne efter inducering uden tilført fyld. Sprækker uden fyld er vanskelige at identificere i intaktprøver udtaget fra borer.

En "typisk" sprække

Efter gennemgang af et større antal amerikanske fraktureringssager, kan en "typisk" hydraulisk sprækkes orientering og størrelsesforhold karakteriseres ved gennemsnitsværdier af 140 inducerede sprækker etableret i relativ ringe dybde (< 5 meter) i siltede leraflejringer i USA (EPA, 1994).

På denne baggrund er en typisk sprækkes form en anelse udstrakt og svagt hældende ned mod injektionsboringen. Den længste akse i sprækkeplanet vil være ca. 3 gange større end dybden fra jordoverfladen til injektionsstedet i boringen. Den længste akse af en typisk sprække vil være ca. 17 % større end den korteste længde. Længdeaksen af hævningsstrukturen på jordoverfladen varierer fra 5 til mere end 12 meter med et gennemsnit på 8,5 meter. Den maksimale jordhævning for inducerede sprækker varierer fra få mm til mere end 30 mm med et gennemsnit på 19 mm. Injektionsboringens placering falder sjældent sammen med den maksimale jordhævning. Både injektionsboringens og det maksimale jordhævningsstedes ekcentricitet er 0,14, mens de to punkter typisk befinder sig på hver side af centrum for jordhævningen (Figur 3.2).



Figur 3.2

Horisontalt og vertikalt snit af en typisk hydraulisk sprække dannet i en overkonsolideret siltet leraflejring (EPA, 1994)

Diameteren af en typisk sprække i 2 - 5 meters dybde vil være 6 – 10 meter og den gennemsnitlige apertur vil være på 1 – 2 cm. Forholdet mellem aperturen og sprækkeudstrækningen (*aspect ratio*) varierer mellem 1 : 300 og 1 : 1000 .

Den sprækkekarakter, der viste størst variation for de 140 EPA-sager var sprækkernes hældning med en variation mellem 5 og 25 grader. Undersøgelsen konkluderer, at inducerede sprækkes hældningsparameter er mest følsomme over for lokale forhold.

Numeriske inversionsalgoritmer har været anvendt til beregning af sprækkestørrelse, apertur og orientering på baggrund af real time målinger af jordhævningen (Du med flere, 1993; Davis, 1983; Sun, 1969). Erfaringen viser imidlertid, at direkte målinger på jordoverfladen og avancerede real-time beskrivelser af sprækkeformen med matematiske inversioner ikke altid afspejler den inducerede sprækkes virkelige form i jorden.

3.4 Sprækkestørrelse

Sprækkestørrelsen er den design parameter der ønskes bedst kvantificeret, da effekten af en induceret sprække generelt stiger med størrelsen. Der vil dog være en øvre grænse, der kan fastlægges med cost-effective betragtninger.

Sprækkelængde og apertur

Sprækkelængde og apertur kan ofte kvantificeres for sprækker etableret i indtil maksimum 5 meters dybde ved direkte at opmåle jordoverfladens nettohævning. Der er ligefrem proportionalitet mellem nettohævningen og sprækkens apertur efter at injektionstrykket er taget af sprækken. Når en sprække etableres i mere end ca. 5 meters dybde bliver forholdet mellem sprækkelængde og dybde normalt mindre end 3, da sprækken til start udvides ved, at overjorden komprimeres før en egentlig jordhævning finder

sted. Derfor er det vanskeligere at forudsige sprækkelængden og apertur ud fra direkte målinger af jordoverfladens netto-hævning for sprækker etableret i større dybde, hvis en jordhævning overhovedet kan konstateres ved en direkte måling.

Beregning af sprækkestørrelse

Forskellige beregningsmetoder er blevet udviklet gennem årene til kvantificering af en sprækkes størrelse:

Carter (1957)

Længden af en sprække (L) kan beregnes ud fra ligningsudtryk (1) for både horisontale og vertikale sprækker. Udtrykket er opstillet af Carter (1957) og injektionshastigheden af gas eller væske er lig med summen af lækage hastigheden (lækagekoefficienten) og hastigheden hvor med sprækkens volumen vokser. Det antages, at sprækkens apertur er konstant, samt at lækagen af væske eller gas ud i formationen sker vinkelret fra sprækkeplanet. Begge forudsætninger må forventes at være stærkt forsimplede. Dels tages der ikke højde for, at aperturen er stærkt varierende i sprækkens længderetning. Dels indgår der ingen tab af væske eller gas i sprækkens længderetning, hvorfra der reelt kan forventes at ske større tab (Schuring og Chen, 1992).

$$L = (Q t^{1/2}) / (\pi b C) \quad (1)$$

Hvor Q er injektionshastigheden, t er tiden for injektionens varighed, b er sprækkens apertur og C er lækagekoefficienten. C kan udtrykkes ved ligning (2):

$$C = 0,049 (K \mu^{-1} (\Delta P)^n)^{0,5} \quad (2)$$

Hvor K er den hydrauliske ledningsevne af formationen, μ er væskens eller gassens viskositet, ΔP er injektionstrykket korrigeret for atmosfæretryk og n er porøsiteten. I bilag 4.1 er angivet repræsentative inputparametrene til ligning (1) og (2) for danske forhold, samt typiske injektionstryk og -tider for hhv. luft og rent vand i 4 meters dybde. Sprækkelængde og -apertur har derpå kunne beregnes. Bilag 4.2 viser en grafisk afbildning af sprækkelængde / apertur relationen for luft og vand injektion med input parametrene som angivet i bilag 4.1. Desuden er i bilag 4.3 og 4.4 vist de beregnede værdier for hhv. luft og vand. Det ses at mest realistiske værdier opnås for injektion af vand i 300 til 900 sekunder, hvor der opnås sprækkelængder eller diameter på mellem 5 og ca. 20 meter med aperturer på fra ca. 8 cm til 2 dm. Derimod synes beregninger ikke egnet for injektion med luft, da der for injektionstider på både 20 og 60 sekunder opnås beregningsmæssige sprækkelængder på 50 meter og derover ved aperturstørrelse på 2 dm. På sammen måde kan sprækkelængde og apertur beregnes for en sprække der induceres med boremudder. Som eksempel på en boremudders kan benyttes den benyttede viskositetsværdi på 0,375 kg/m sek, som angivet i eksemplet i bilag 5.

Perkins og Kern (1961)

En tredje beregningsmetode, præsenteret af Perkins og Kern (1961), skal kunne bestemme aperturen af en sprække ud fra ligningsudtryk (3). Den analytiske løsning er udledt for etablering af horisontale sprækker og beregner en gennemsnitlig sprækkeapertur i et sprødt elastisk medium (*brittle elastic solid*).

$$L = 0,45 [(G Q^3) / ((1-\nu) \mu b^4)]^{1/3} t^{1/3} \quad (3)$$

Udtrykkets parametre L , Q , μ , b og t er beskrevet ovenfor. G er formationens forskydningsmodul og ν er Poisson's forhold. Ligning (3) tager højde for tab af injektionsvæske eller gas ved lækage. Forudsætningen for lækagetabet er de samme som beskrevet ved ligning (1).

Forskydningsmodulet (G) kan estimeres ud fra følgende:

- $G = 300 - 400 \times c_u$
- $G = 1500 \times c_u$ ved meget små forskydninger

c_u er den udrænedede forskydningsstyrke. Poisson's forhold kan sættes til $\nu = 0,3 - 0,35$.

Ved gennemregning af ligning (3) opnås imidlertid helt urealistiske værdier for forholdet mellem b og L . Eksempelvis kunne opnås en sprækkelængde på mere end 41 km med en apertur på 2 dm ved injektion af vand i få meters dybde. I ligningen er indsat varierende C_u værdier ($50-400 \text{ kN/m}^2$) og to ν værdier (0,3 og 0,35), der begge er karakteristiske intervaller for danske morænelersaflejringer, samt samme Q , μ og t , som angivet i bilag 4.1 for henholdsvis luft og vand. Anvendeligheden af denne ligning (3) i forbindelse med induktion af terrænnære sprækker både ved luft og vand er således diskutabel.

3.5 Sprækkepermeabilitet

3.5.1 Åbne sprækker

Strømningsforholdene i en induceret sprække kan beskrives med eksisterende viden om strømnings- og stoftransport i heterogene aflejringers naturlige sprækkesystem (f.eks. moræneler).

Den kubiske lov

Den forsimplede beskrivende model, der hyppigt anvendes til at beskrive vandets strømning i det naturlige sprækkesystem bygger på ligningsudtryk (4), der ofte benævnes den kubiske lov (Snow, 1969). Vandets vertikale strømningshastighed (v_f) kan beregnes i en enkelt lodret sprække ved:

$$v_f = b^2 \rho g i / 12 \mu \quad (4)$$

Hydraulisk ledningsevne i sprække

hvor b er sprækkeaperturen, ρ er vægtfylden af vand, g er tyngdeaccelerationen, i er den hydrauliske gradient og μ er vandets kinematiske viskositet. Bemærk at den kubiske lov også er gældende for horisontale sprækker. Da $v_f = K_f i$, hvor K_f er den hydrauliske ledningsevne i en sprække, kan denne bestemmes ved udtryk (5).

$$K_f = b^2 \rho g / 12 \mu \quad (5)$$

Forudsætningerne for den kubiske lovs gyldighed er blandt andet, at sprækker beskrives, som planparallelle sider (dvs. konstant sprække apertur). Samme antagelser kan gøres for beskrivelse af væsker eller gassers strømning i en induceret sprække uden fyldmateriale (ligning (6)):

$$b_e = (12k_e)^{1/2} \quad (6)$$

Effektiv apertur og permeabilitet af åben sprække

Hvor b_e er den effektive sprækkeapertur og k_e er den effektive permeabilitet af sprækken.

Aperturen af en induceret sprække varierer ganske betydeligt i lighed med det naturlige sprækkesystems aperturer. Den ”effektive sprækkeapertur” tager højde for denne variation, idet den udtrykker et gennemsnit af sprækkens åbningsvariation. Den effektive sprække permeabilitet og apertur kan dog bedst bestemmes ved hydrauliske tests eller tracerests i felten, da ingen eksisterende matematiske modeller kan simulere det naturlige eller inducerede sprække system godt nok, til at modelberegninger kan stå alene ved kvantificering af en åben sprækkes permeabilitet.. (Jeg foreslår afsnittet slettet, hvis der ikke er refereret talværdier for apertur, K m.v.)

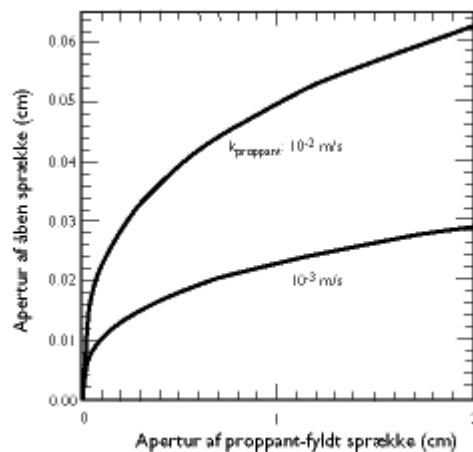
Effektiv apertur af sandfyldt sprække

3.5.2 Sandfyldt sprække

Den effektive apertur (b_p) af en sandfyldt sprække kan beregningsmæssigt bestemmes, som produktet af fyldningsmaterialets permeabilitet (k_p) og den effektive sprække apertur (b_e) af en åben sprække (7):

$$b_p = (12 k_p b_e)^{1/3} \quad (7)$$

Den hyppigst anvendte kornstørrelse for granulære fyldmaterialer er mellem-til grovkornet sand med en permeabilitet på $10^{-5} - 10^{-6} \text{ cm}^2$, svarende til en hydraulisk ledningsevne på $10^{-2}-10^{-3} \text{ m/s}$. Aperturen af en induceret sprække fyldt med mellem- til grovkornet sand vil typisk være fra 0,5 – 1 cm, hvilket ækvivalerer med en effektiv sprækkeåbning på en åbenstående sprække (uden fyldmateriale) på 0,02-0,05 cm (se Figur 3.3). Opmåling af sprække aperturen i hårde bjergarter efter frakturering ligger i denne størrelsesorden. Sprækkeaperturen i dansk moræneler er ekstremt vanskelige at opmåle på grund af deres lille apertur. Ved udtagning af intakte prøver til opmåling af blandt andet apertur kan prøven udsættes for trykaflastninger så den målte sprækkes apertur ikke svarer til in-situ aperturen. På baggrund af tracerforsøg, udført i Ringe på Fyn, kunne aperturen af naturlige åbne sprækker beregnes (Sidle med flere, 1998). I 2,5 meters dybde varierede aperturen mellem 0,110 – 0,158 cm (gennemsnit på 0,143 cm) og i 4 meters dybde mellem 0,065 – 0,127 cm (gennemsnit på 0,094 cm).



Figur 3.3

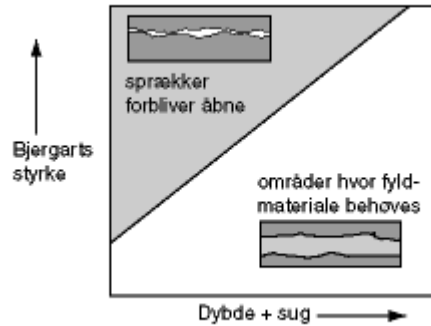
Sammenhængen mellem sprækkeaperturen af en sandfyldt sprække og den effektive sprækkeapertur for en åben sprække uden sandfyldning (EPA, 1994).

Ujævnheder (*asperiter*)

Den effektive apertur af åbentstående sprækker kan relateres til den effektive apertur af sandfyldte sprækker. Styrken af ujævnheder (*asperiter*) på sprækkeoverfladerne vil være forskellige for løse bjergarter og faste bjergarter, således at styrken af ujævnhederne er svagest for de løse bjergarter. Derfor lukker inducerede sprækker sig nemmere i løse bjergarter end i faste.

Styrken af en finkornet løs bjergart (f.eks. moræneler) aftager med stigende vandindhold og formindsket konsolidering. Således vil inducerede sprækker stå åbne i tør moræneler, mens de lukker til under vandmættede forhold. Hvorvidt en sprække lukker er bestemt af en balance mellem spændingstilstanden i bjergarten og belastningstrykket fra den overliggende jord. For en horisontal sprække vil dette forhold svare til produktet af den overliggende jords vægt gange dybden til sprækken plus størrelsen af det undertryk eller sug der kan påføres sprækken inden den overskrider en lokalitetsspecifik kritisk værdi. Dette betyder at både en løs bjergart og en hård bjergart vil kunne holde inducerede sprækker åbne uden fyldmaterialer, hvis bjergartens styrke overstiger bjergartens lukningsstress.

Det kan generelt siges, at en induceret sprække skal fyldes med granulært materiale, hvis styrken af bjergarten aftager, hvis sprækkedybden stiger, eller hvis undertrykket overstiger en kritisk værdi. Figur 3.4 viser skematisk relationerne mellem disse betydende faktorer, der beskriver, hvornår sprækker kan stå åbne eller behøver injiceret fyldmateriale for at kunne holdes åbne.



Figur 3.4

Relationen mellem faktorer der kontrollerer at sprækker selv kan stå åbne uden sandfyldning og sprækker der behøver fyldmateriale for at kunne holde sig åbne (EPA, 1994).

3.6 Geologiske forhold

De to vigtigste geologiske parametre, der er bestemmende for de inducerede sprækkers resulterende form og orientering, er formationens sejhed, samt jordens in-situ spændingstilstand.

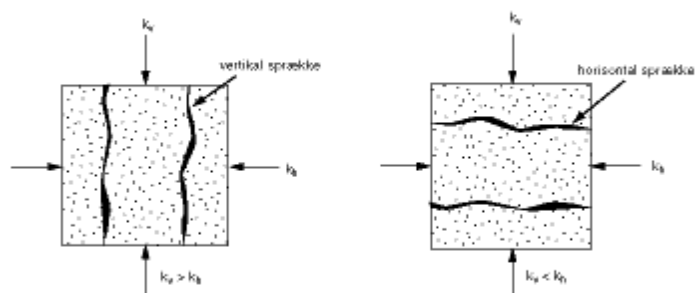
Definition af sejhed (toughness)

Sejhed (*toughness*) er et bjergartsmekanisk begreb der definerer hvorledes en geologisk materiale sprækker op. En sprækkes sejhed er den spænding der behøves til at fremme væksten af en sprække en given længde. Sejhed angives ved produktet af stresskomponenten gange kvadratroden af sprækkens længde. Der skelnes mellem et sejt og et sprødt brud, hvor det sprøde brud er at foretrække ved frakturering.

En sprækkeflade, der er skabt ved naturlige geologiske processer såvel som kunstige processer (f.eks. inducerede sprækker) vil normalt orienteres med sprækkeplaner der står vinkelret på den minimale stressretning i jordlagene. De inducerede sprækker bliver således orienteret horisontalt, når jordlagenes horisontale spændingskomponent er større end jordlagenes vertikale spændingskomponent. Omvendt bliver en induceret sprække orienteret skråt eller vertikalt, hvor den vertikale spændingskomponent er størst (Figur 3.5). Lagdeling i de geologiske aflejringer er af stor betydning for inducerede sprækkers foretrukne udvikling, idet sprækkerne generelt følger lagdelingen. Der findes desuden eksempler på, at inducerede sprækker udvikles langs en horisontal lagdeling, selv om spændingstilstanden tilsiger, at sprækkerne burde blive vertikale.

Definition af konsolidering

Jordlag, der er blevet konsolideret under belastningstryk, der var større end belastningstrykket, er i dag, er pr. definition overkonsoliderede og hyppigst karakteriseret ved at den horisontale spændingskomponent er større end den vertikale. Figur 3.5 viser skematisk forskellen på sprækkesystemers udvikling i (a) en normalt konsolideret geologisk formation (vertikal sprækkeorientering) og (b) i en overkonsolideret formation (horisontal sprækkeorientering).



Figur 3.5

Sprækkeplaners orientering i (a) normalt konsolideret aflejring og i (b) overkonsolideret aflejring (Schuring og Chan, 1992)

Overkonsoliderede danske leraflejringer

Spændingsforholdene i løse bjergarter afhænger bl.a. af jordlagenes konsolideringshistorie, samt variationen af vandmætningen i jorden. Den sidste istids trykbelastning af jordlagene har resulteret i, at disse i dag er overkonsoliderede. Sedimenter der befandt sig under gletscherne har således normalt indbygget en dominerende horisontal spændingskomponent. Eksempler på sådanne lerarter er de fede tertiære lerarter, såsom lillebæltler, septarieler og glimmerler og sandede morænelersaflejringer.

Normalt konsoliderede leraflejringer

Af normalt konsoliderede danske leraflejringer kan nævnes de meget unge aflejringer såsom postglaciale lerarter eller nutidige dyndaflejringer. Ethvert lerlag kan bringes i en normalkonsolideret tilstand, hvis det udsættes for belastninger, der bringer de effektive spændinger op over de tidligere maksimale spændinger (Harremoës med flere, 1974).

Vertisoler

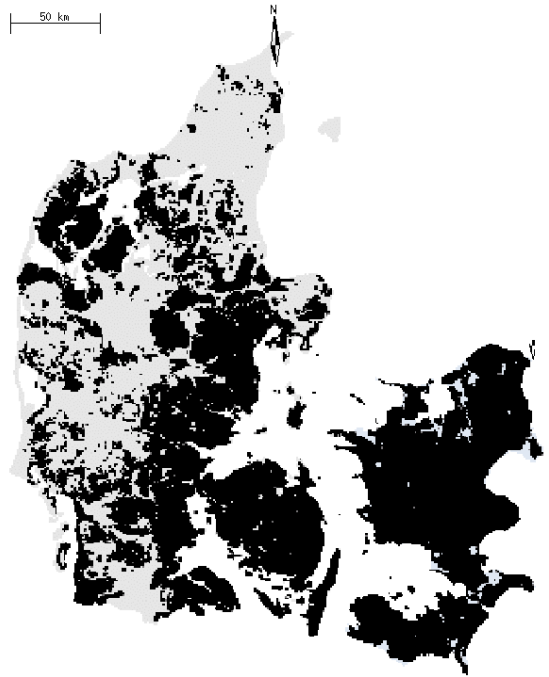
Bjergarter med stort indhold af lermineraller med svællende egenskaber kan undergå betydelige volumenændringer som følge af ændrede vandmætningsforhold. Cykliske udtøringer og vandmætninger påvirker en leraflejring, så der opbygges en horisontal spændingskomponent. Vertisoler er en jordbundstype, der har et højt indhold af svællende lermineraller. Den er mest almindeligt udviklet i subhumide klimater og findes ikke som jordbundstype i Danmark. I USA findes den i mindre områder af sydstatene (specielt Texas), hvor flere af de fraktureringsprojekter, der er rapporteret i litteraturen, er blevet udført.

Lermineralogisk sammensætning

Kendskabet til den lermineralogiske sammensætning i danske kvartære aflejringer er meget sparsom. En dansk undersøgelse sammenstiller lermineralogiske data fra 8 lokaliteter på Sjælland og Fyn (Ernstsen, 1998).

Lerbjergarters regionale udbredelse i Danmark

Undersøgelsen viser store regionale forskelle, samt betydelige vertikale variationer på den enkelte lokalitet. Figur 3.6 viser den regionale udbredelsen af danske lerbjergarter med mere end 15 % lerindhold. Langt hovedparten af disse aflejringer har været belastet af sidste istids gletschere og er dermed overkonsoliderede. Det ses således af Figur 3.6, at på store dele af Sjælland, Fyn og i det østlige Jylland vil der muligvis være potentiale for at etablere inducerede horisontale sprækker ved fraktureringsmetoden.



Figur 3.6
Regional udbredelse af lerbjergarter med mere end 15 vægt-% ler i Danmark (GEUS, 1998).

4 Dimensionering

Ingen guidelines i litteraturen

Egentlige vejledninger (guidelines) for dimensionering af fraktureringsmetoden er ikke beskrevet i litteraturen. Designbetragtninger må således baseres på visse teoretiske overvejelser men primært på vurdering af de konkrete feltundersøgelser, hvor metoden er blevet anvendt (jf. kapitel 7). Generelt tilpasses dimensioneringen til karakteren af det problem der skal løses, det vil sige: typen af forurening, udbredelsen af forureningen i mættet / umættet zone, dybden af forureningen, geologiske og geotekniske forhold samt lokale forhold såsom bygningsfundamenter og underjordiske ledningsføringer.

Influensradius

Afstanden mellem de enkelte sprækker og antallet af boringer er bestemt af hvor stort et areal der hydraulisk ønskes påvirket (dvs. influensradius). Som tommelfingerregel vil gælde, at trykniveauet i den lavpermeable formation, omkring den induceret sprække, påvirkes med en influensradius der er mindst tre gange den inducerede sprækkes egen radius. Så ved sammenligning med almindelige vertikale boringers influensradius viser erfaringen, at et langt større jordvolumen i lavpermeable bjergarter bliver påvirket ved etablering af inducerede sprækker.

Dybdeplacering af inducerede sprækker

Dybdeintervallet, hvori inducerede sprækker med en horisontal orientering kan forventes etableret i Danmark, er optimalt fra 1-2 meters dybde til maksimalt 8 meters dybde. Sprækkernes foretrukne orientering i dette interval forventes at blive tilnærmelsesvis horisontal, da de danske lerdæklag i overvejende grad befinder sig i en overkonsolideret spændingstilstand. Etablering af sprækker dybere end 5-8 meter risikerer således at få en uønsket vertikal orientering, grundet normalkonsolideringen i jorden i denne dybde. Ligeledes er sprækker etableret i den øverste meter uønsket da der i denne dybde er større risiko for at inducerede sprækker skærer jordoverfladen. Ganske mange forureningssager på lavpermeable aflejringer i Danmark har hovedmassen af forureningen beliggende i de øvre 5-8 meter af jordlagene (eksempler: Ringe Tjære og Asfaltsgrund samt på gasværkgrunden i Haslev). Dette til trods for at forureningen kan være flere årtier gammel og derved have haft mulighed for at spredes over store afstande og til stor dybde.

Sprækkeapertur og kornstørrelsesfordeling af fyldmateriale

Fyldmaterialer der anvendes i hydraulisk inducerede sprækker skal være så velsorteret som muligt med meget lille kornstørrelsesvariation i sandfraktionen. Derved opnås størst mulig effektiv porøsitet og højest permeabilitet. Den mindste sprækkeapertur der kan injiceres med sandfyldning er teoretisk set ca. 1 mm, svarende til en sprække fyldt med et enkelt lag af sandkorn. Erfaringen viser dog i praksis, at de fleste sprækker får en apertur på 0,5 – 1 cm. Den hyppigst anvendte kornstørrelse for granulære fyldmaterialer er mellem- til grovkornet sand der har en hydraulisk ledningsevne på 10^{-2} - 10^{-3} m/s. Permeabilitetskontrasten mellem fyldmaterialet og den omgivende formation har vist sig af være en kritisk faktor. Fyldmaterialets kornstørrelsesfordeling skal dimensioneres således, at permeabiliteten af sandfyldningen er mindst 1000 gange højere end den omgivende lavpermeable jord. Derved opnås optimal hydraulisk influens i den lavpermeable formation ved pumpning på den sandfyldte sprække.

Sprækkestørrelse

Ved direkte at opmåle jordoverfladens netto-hævning kan sprækkestørrelsen (dvs. sprækkelængde og -apertur) kvantificeres for inducerede sprækker, der

etableres i maksimalt 5-8 meters dybe (jf afsnit 3.4). Nettohævningen er ligefrem proportional med sprækkens apertur efter at injektionstrykket er taget af sprækken. Sprækkens længde bliver typisk 3 gange afstanden fra jordoverfladen til injektionspunktet i dybder indtil 5-8 m.u.t. Når en sprække etableres i mere end ca. 5-8 meters dybde bliver forholdet mellem sprækkelængde og dybde normalt mindre end 3, da sprækken til start udvides ved, at overjorden komprimeres før en egentlig jordhævning finder sted.

Injektionstryk

Injektionstryk ved hydraulisk frakturering vil typisk være fra 2,5-3,5 atm i den initiale fase, aftagende til ca. 1 atm i vækstfasen. Trykgradienten med dybden er for vand på 0,15-0,2 atm pr. meters injektionsdybde. Ved pneumatisk frakturering kræves typisk et noget højere initial injektionstryk, da der normalt ikke laves indskæringer i boringsvæggen ved denne fraktureringsmetode (jf. afsnit 2.4.2). Trykgradienten ved brug af luft stiger med 0,67-1,11 atm pr. meters injektionsdybde.

Injektionshastighed

Injektionshastigheden er en kritisk design parameter til dimensionering af sprækker induceret med luft. Sprækker etableret ved hydraulisk frakturering i leraflejringer vil normalt ikke være påvirket af nævneværdig lækage. Dimensionen af en hydraulisk sprække vil således primært være begrænset af det injicerede materiales volumen.

Forholdet mellem sand og gelé i boremudder

Forholdet mellem sand og gelé i boremudder kan beregnes med et ikke kommercielt modelværktøj der er baseret på beregningsforudsætninger der er angivet i Murdoch (1993). Et eksempel på inputparametre er til denne model er givet i Bilag 5.

Materialeforbrug

Materialeforbruget til fyldning af en hydraulisk sprække vil som tommelfingerregel skulle 8 dobles ved fordobling af sprækkens længde. Økonomiske / tekniske overvejelser skal således gøres hvis den hydrauliske og oprensingsmæssige effekt / gevinst ved at fordoble sprække størrelsen lige så godt - og muligvis billigere - kunne opnås, ved at etablere en ny sprække i kort afstand fra den første sprække. Derved undgår entreprenøren at skulle investere i en uforholdsmæssig stor og omkostningsfuld ”portionsblender”, der sandsynligvis vil fordyre prisen på den enkelte sprække.

Numeriske modelberegninger

Numeriske modelberegninger er benyttet til at vurdere strømnings- og stoftransportforhold omkring anvendelsen af inducerede sprækker versus almindelige vertikale boringer (EPA, 1994). Ikke overraskende viser modelberegningerne, at inducerede sprækker influerer væsentligt mere på at opnå større trykgradienter, kortere opholdstider og større stofflux end ved anvendelsen af almindelige vertikale boringer. Konkrete felldata fra Center Hill lokaliteten i Cincinnati i USA (jf. afsnit 8.1.2) viste, at værdierne for trykgradienter, stofflux og opholdstider alle blev forøget med en faktor ti i forhold til en vertikal kontrol boring. Yderligere blev oppumpningsydelsen fra den inducerede sprække øget med en faktor 20 med en forøgelse af influensradius på ca. 10 ift. kontrol boringen. I Bilag 2 er gengivet eksempler på effektforbedringer på 10-50 gange ved anvendelse af inducerede sprækker indenfor miljø, olie og vandforsyning (beskrives nærmere kapitel 8).

5 Geotekniske parametre og problemer

5.1 Beslægtede baggrundserfaringer

Beslægtede geotekniske teknikker

Fraktureringsmetoden er beslægtet med de geotekniske teknikker, rørsprængning (*pipe cracking*) og jordstabilisering (*ground improvement*).

Kendskabet til det naturlige sprækkesystem opbygning, samt in-situ spændingstilstanden i jorden, er af afgørende betydning når de ovenfor nævnte geotekniske teknikker skal anvendes.

Rørsprængning

I forbindelse med reovering af kloakker kan det ofte betale sig, at lave en reovering uden opgravning (*no dig*), fordi ledninger ofte ligger under befæstede arealer eller under bygninger.

Reoveringen af kloakker kan foregå efter to principper:

- Knusning af rør efterfulgt af trækning af nyt rør med mindre ydre diameter end det oprindelige, så udvidelse af den oprindelige rørgrav undgås.
- Knusning og udvidelse af rørgrav ved at føre rør med en større rørdimension igennem.

Selve knusningen af de eksisterende rør foregår med en raket, hvorpå der er påmonteret en trykluftshammer. Trykket fra lufthammeren er regulerbar og kan tilpasses de lokale forhold. Vibrationer fra lufthammeren kan imidlertid påvirke nærliggende ledninger og konstruktioner, især hvis de er i dårlig tilstand.

En udvidelse af rørgraven kan ligeledes ved jordfortrængning påvirke nærliggende installationer, således at påvirkningsgraden vil være størst hvis den omgivende jord er fast. Desuden vil påvirkningen være størst på bygningskonstruktioner og underjordiske rørføringer i en dårlig tilstand.

Under befæstede arealer er der i Danmark observeret hævnings af disse og beskadigelse på nærliggende underjordiske ledninger. Skadernes omfang er imidlertid ikke blevet kvantificeret. Hvor vidt der er sket skadelige påvirkninger af bygningskonstruktioner i Danmark er ukendt.

Princippet omkring rørsprængning anvendes også i olieindustrien som retningsstyret underboringer, hvor f.eks. kalk formationer nedbrydes og en udvidelse kan finde sted.

Jordstabilisering

Ved jordstabilisering etableres typisk en boring, hvor der via denne foretages en injektion i undergrunden, med det formål at stabilisere og forbedre dens bæreevne og deformationsforhold. Stabilisering foregår primært via injicering med en kalk- eller cementblanding som pumpes ind under tryk.

Jordstabilisering er hyppigst anvendt i bløde jordarter. I praksis pumpes blandingen ind med et injektionstryk, der ikke må overstige forud bestemt

maksimalt tryk, svarende til en maksimal tilladelig ”komprimering” og dermed afdræning. Bliver det direkte tryk for stort i de bløde aflejringer eller på de overliggende faste jord-/bjergarter er der risiko for en nettoflytning af jorden (terrænhævning).

I Østrig er der observeret hævnings af jordoverfladen som følge af, at et højtliggende fast lag blev udsat for tryk på undersiden. Hvis det faste lag opfattes som et ”uendelige lag” virker dette, som trykoverfører til de overliggende jordlag eller bjergarter, som så havde overført fladebelastningen som et samlet usprækket medie.

Terrænhævning

Helt analogt til fraktureringsmetoden er det rimeligt at antage, at størrelsen af en midlertidig terrænhævning svarer til den indpumpede stabiliseringsmasses volumen. Da indpumpningsprocessen medfører en vis forstyrrelse af det omkringliggende materiale, vil en del af terrænhævningen reduceres som følge af en rekonsolidering af de forstyrrede jordlag.

Skumbeton

Skumbeton finder anvendelse ved sløjfning af både store og små underjordiske ledningsføringer. En forholdsvis lavviskøs skumbeton injiceres under tryk og observationer viser, at utætheder i rørsamlinger og revner, mv. kan lokaliseres på terrænoverfladen omkring rørindgange og brønde, men også i det fritliggende terræn. Dette tages som bevis for, at lunger og sprækker bliver lukket i forbindelse med injektionen af skumbetonen samtidigt med, at det illustrerer sprækkers egenskab som spredningsveje for den injicerede skumbeton.

5.2 Risici

Generelt gælder for de to geotekniske metoder, rørsprængning og jordstabilisering, at jo fastere aflejringer des større er risikoen for, at der kan opstå skader på nærliggende underjordiske ledningsføringer og bygningskonstruktioner imodsætning til blødere jordarter, der har tilbøjelige til at give sig ved konsolidering. Utætte ledninger eller ledninger i anden dårlig forfatning er udsat for en særlig risiko ved, at den injicerede substans til jordstabilisering (*grouting*) helt eller delvis kan tilstoppe ledningerne, med reduktion af anlæggets funktion til følge.

Hævning af gulve og fundamenter

Som følge af erfaring fra de nævnte processer, vil det være rimeligt at antage, at en terrænhævning kan medføre hævnings af gulve og fundamenter, helt afhængig af gulvenes opbygning. Det er også rimeligt at antage, at påvirkningen bliver mindre med stigende injektionsdybde.

ledningsanlæg eller konstruktioner i et lukket sprækkesystem

Hydraulisk frakturering med en guargummi gelé under tryk i jorden vil, udvise analoge tendenser med de beskrevne principper for rørsprængning og jordstabilisering:

Trykudligning i et lukket sprækkesystem

- I et lukket sprækkesystem kan der opstå et så stort tryk, at hvis sprækkesystemet ligger i faste aflejringer, vil trykket momentant kunne overføres til en konstruktion eller et ledningsanlæg med risiko for brud. Omfanget af skadepåvirkningen på konstruktion eller ledningsanlæg kan ikke kvantificeres, idet det afhænger af den pågældende obstruktions tilstand, fleksibilitet, stivhed etc.
- I et lukket sprækkesystem i faste aflejringer vurderes risikoen for beskadigelse af ledninger at være større end for øvrige konstruktioner i nogenlunde normal sundhedstilstand.

- I et lukket sprækkesystem i blødere aflejringer vurderes risikoen for beskadigelse af ledninger at være mindre end i faste aflejringer. Dette skyldes, at det påførte tryk på de bløde aflejringer ikke overføres momentant til ledninger og konstruktioner, men derimod påvirker de bløde aflejringer ved en tidsafhængig konsolidering indtil det forud definerede maksimale tryk opnås.

Sprækkesystemer med uendelig udstrækning

I sprækkesystemer med en "uendelig" udstrækning, vil trykket under injektion udlignes til et trykniveau der svarer til trykniveauet i det omgivende ydre miljø og være uafhængig af atmosfæretrykkets variationer. I faste aflejringer vil der,

- Foregå en hævning af jordoverfladen indtil et neutralt trykniveau (= *atmosfæretryk*) er opnået.
- Foregå en transport af den injicerede gelé via ledningsanlæg og brønde indtil et neutralt trykniveau har indstillet sig.
- Foregå en transport af den injicerede gelé via konstruktioners omkringliggende indbygningsmaterialer, f.eks. dræntæppe inkl. stikdræn (eller lignende under konstruktioners gulve) udvendige drænkasser og videre ud omkring brønde til det neutrale trykniveau er nået.
- Ske en påvirkning af en konstruktion (typisk en bygning) såfremt sprækkesystemet her lokalt ikke kan udlignes til neutralt trykniveau.
- Ske en hævning af terræn, hvis sprækkesystemet er endeligt (begrænset), så en trykudligningen kan finde sted.
- Ske en hævning af gulve i konstruktioner, hvor der ikke er taget foranstaltninger, der tilgodeser almindelige krav til kapillarbrydende lag samt afledningssystemer forbundet hertil.

Trykudligning i bløde aflejringers sprækkesystemer

I blødere lag kan samme påvirkninger iagttages som angivet i de fastere aflejringer, men til forskel fra de faste lag vil trykudviklingen nemmere kunne kontrolleres, idet der forinden den skadelige påvirkning er sket, vil foregå en konsolidering af aflejringerne, som foregår over en registrerbar og kontrollabel tidshorisont. Desuden vil påvirkningen være mindre momentan og dermed potentielt mindre skadelig, såfremt der foregår en trykkontrolleret injektion.

Sprækkesystemer med begrænset udstrækning

I endelige (begrænsede) sprækkesystemer kan trykudviklingen enten være negligeeable, forstået sådan, at trykudviklingen kan have direkte tilknytning til neutralt miljø og derfor ikke nogen fysiske konsekvenser for ledningssystemer eller konstruktioner. Eller også kan trykudligningen ikke ske, hvorved trykpåvirkninger kan finde sted.

Har den injicerede zone hydraulisk kontakt til en traditionel bygningskonstruktion via naturlige sprækkesystemer, kan dette medføre et utilsigtet forøget tryk f.eks. på en gulvkonstruktion og / eller tilstopning af drænsystemer. Trykkets størrelse er naturligvis afhængig af det tryk der er påført, reduceret for de tryktab der opstår under vejs (se tidligere i dette

afsnit). Der skal i ovennævnte skelnes mellem faste og bløde aflejringer ud fra de hidtidige betragtninger.

Dansk funderingsnorm (DS 415)

Den danske funderingsnorm (DS 415) redegør for, at sætninger af fundamenter for normalt belastede byggerier er i størrelsesordenen 10 – 20 mm anses for at være normalt, gulve noget mindre. Funktionsmæssigt skal der tages hensyn til de indgående materialer og selve udførelsesfasen af byggeriet, før der kan redegøres for konsekvenserne af de nævnte sætninger. Man kan således ikke uden videre overføre registreringer fra f.eks. jordskælvsområder.

Sætninger i størrelsesordenen 10 – 20 mm skal ses i forhold til de berørte byggerier, idet sætninger i denne størrelsesorden som regel tillægges større æstetisk værdi for et bevaringsværdig ejendom end for f.eks. en simpel hal.

Byggerier kan videre gennem tiderne have været udsat for belastninger ved f.eks. trafiklast eller nærliggende entreprenørarbejder, der efterfølgende kan have ændret på de oprindelige statiske forhold så meget, at selv små påvirkninger kan ændre byggeriets tilstand. Der henvises til handlingsplanen, som omtalt i kap. 9.4.5.

5.3 Geotekniske parametre

OCR-værdien

En af de parametre der har betydning for sprækkeudviklingen er overkonsolideringsraten (fremover OCR-værdien). OCR-værdien er større end 1 når den aktuelle jordart belastes med et tryk der overstiger det tryk jordarten maksimalt har været udsat for (forbelastningsspændingen).

Som nævnt tidligere i afsnit 3.6 er jordarten hyppigt karakteriseret ved, at de vandrette spændinger er større end de lodrette spændinger, som følge af senere aflastning på grund af afsmeltning af is.

Mohr-Coulomb's brudteori

Hubert og Willis (1957) var nogen af de første, som havde et teoretisk grundlag til beskrivelse af de forhold, der opstår i jorden i forbindelse med induceret frakturering. De forudsatte blandt andet, at bruddet fulgte Mohr – Coulomb's brudteori.

En vigtig og stadig gældende detalje er, at de inducerede sprækkers orientering vil være vinkelret på den mindste hovedspændings retning. Sprækker vil således være vandrette i overkonsoliderede aflejringer og lodrette i normalkonsoliderede aflejringer (se Fig. 3.5).

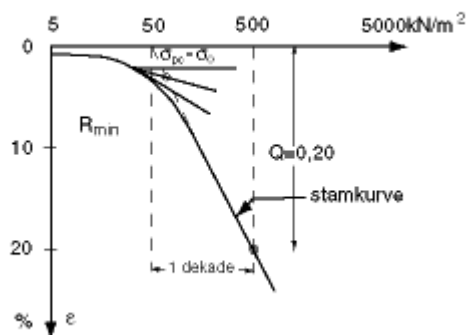
For begge konsolideringshistorier er begyndelsestrykket under sprækkedannelsen lig med 1/3 af den respektive in-situ spænding og kan stige op til 3 gange in-situ spændingen (Morgenstern og Vaughan, 1961).

Bestemmelse af OCR ved forsøg.

Den aktuelle OCR-værdi bestemmes via et konsolideringsforsøg, hvor en jordprøve udsættes for en lodret spændingsforøgelse. På baggrund af samtidige aflæsninger af en given spændingstilvækst og dertil hørende deformation kan der optegnes en belastningskurve, der består af to grene:

- En primær gren
- En sekundær gren

Den primære gren illustrerer jordprøvens spændingsafhængige deformationer frem til forbelastningsspændingen σ_{pc} og den sekundære gren illustrerer de spændingsafhængige deformationer ved spændinger ud over σ_{pc} . σ_{pc} kan for en helt uforstyrret prøve tilnærmelsesvis bestemmes ud fra Casagrandes metode, jf. Hansen (1978), som illustreret efterfølgende på figur 5.1. Et belastningsforløb gældende for normalkonsolideret jord er illustreret i figur 5.1.



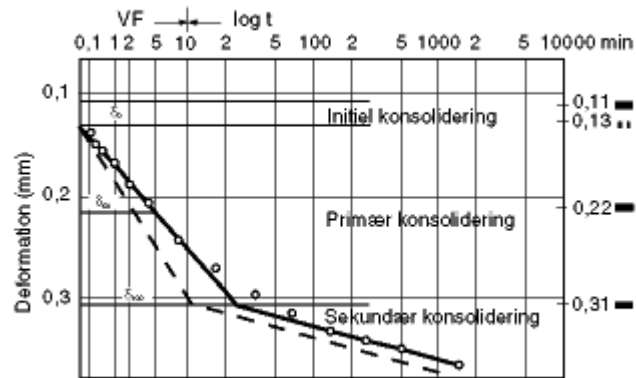
Figur 5.1.

Eksempel på konsolideringsdiagram for normalkonsolideret ler. e defineres som tøjningen af leren.

I figur 5.1 er σ_{pc} (effektiv) ca. 70 kN/m^2 , afhængig af hvor kurvens krumning er størst.

Primær grenen illustrerer den pågældende jords deformationer ("komprimering") ved voksende spændinger (f.eks. injiceringstryk) indtil jorden går i brud. I laboratoriet fortsættes forsøget indtil brudspændingen nås for at få kendskab til hvor jordartens brudspænding er. Dette tryk kan efterfølgende sidestiles med injiceringstrykket.

Den primære og sekundære konsolidering kan illustreres ved optegning af en tidsskive som illustreret i fig. 5.2, jf. Hansen (1961). Den første del af tidsskalaen følger en kvadratrodsskala, mens resten er logaritmisk hovedsageligt på grund af krybning.



Figur 5.2

Eksempel på tidsskurve fra konsolideringsforsøg. Belastningstrin 80 – 150 kN/m². *d* defineres som forholdet mellem sætning og deformation.

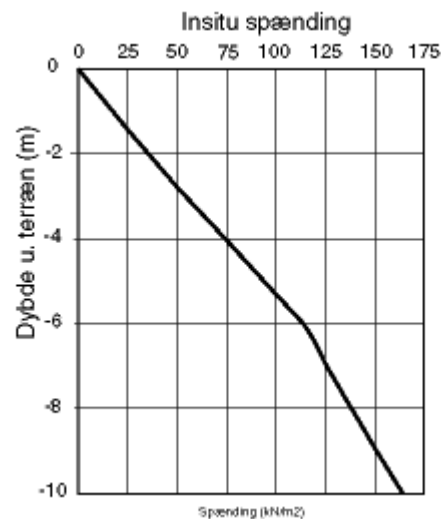
OCR-værdien bestemmes på baggrund af forsøgsresultaterne, som forholdet mellem forbelastningsspændingen σ_{pc} og in-situ spændingen σ_0 (8):

$$OCR = \frac{s_{pc}}{s_0} \quad (8)$$

Der benyttes effektive parametre.

In-situ spænding.

In-situ spændingen, σ_0 , er afhængig af jordartens rumvægt, dybde og vandspejlsforhold. For den aktuelle grund i Haslev er in-situ spændingen i figur 5.3 optegnet som funktion af dybden. Der er ikke taget hensyn til vægt fra konstruktioner. Vandspejlet er sat til 6 meter under terræn.



Figur 5.3

In-situ spænding som funktion af dybden.

Bestemmelse af forbelastningsspændingen

OCR værdien kan også vurderes på baggrund af SHANSAP konceptet, idet σ_{pc} her kan bestemmes (9):

$$\left(\frac{c_u}{s_0} \right) = \left(\frac{c_u}{s} \right)_{NC} \left(\frac{s_{pc}}{s_0} \right)^\Lambda, \quad (9)$$

hvor man med rimelighed her kan antage at:

$\Lambda \approx 0,85$ er en konstant

$\left(\frac{c_u}{s} \right)_{NC} \approx 0,4$, hvor nc står for normalkonsolideret for danske jordarter.

SHANSAP konceptet (Stress History And Normalized Soil Engineering Parameters), formuleret af Ladd og Foot (1974), er et empirisk koncept baseret på empiriske relationer (ikke naturlige) og skal bruges med stor forsigtighed.

Forskydningsstyrken c_u som funktion af dybden

I Tabel 3 er vist et beregningseksempel, hvorledes forskydningsstyrken c_u (ikke målt) antages at udvikle sig med dybden i en jord der geoteknisk set minder om lerjorden på Vestergade 10 i Haslev.

Tabel 3

Forskydningsstyrken som funktion af dybden.

Dybde (m)	0 – 2	2 - 4	4 – 6	6 – 10
c_u (kN/m ²)	50	100	250	400

På denne baggrund kan følgende kurve vist i Figur 5.4 optegnes for OCR værdien som funktion af dybden.

Som det fremgår af Figur 5.4 falder OCR værdien med dybden i lag, hvor c_u er konstant.

Som tillægsspænding kommer trykket fra f.eks. et byggeri. Disse er ikke medtaget i de efterfølgende beregninger af OCR-værdien.

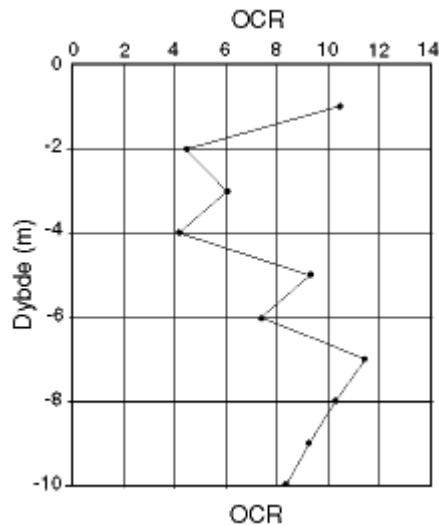


Fig. 5.4.
Dybde som funktion af OCR-værdien.

Permeabilitetskoefficienten.

Optegnes tidskurven for primær konsolidering kan man for lere beregne permeabilitetskoefficienten ved ligning (10):

$$k = 0,2 \frac{\gamma_w H^2}{t_{50} K} \quad (10)$$

hvor

- K er konsolideringsmodulet, som bestemmes som tangenthældningen på primær grenen.
- H er prøvehøjde
- t er tiden for 50 % primær konsolidering
- γ_w er vands rumvægt

Spændinger fra bygninger

Spændingsudvikling i dybden hidrørende fra en belastning i funderingsniveauet er som følger (11):

$$s_{Byg} = \frac{V}{(b+z)(l+z)} \quad (11)$$

hvor s_{Byg} er fundamentstrykket, V er den lodrette belastning (nedad), b er bredden af fundamentet, l er længden af fundamentet og z er dybden til det betragtede lag. Forudsætningen er her, at trykket fordeler sig med forholdet mellem vandret og lodret som 1:2 .

Som det fremgår af udtrykket, så falder spændingen i jorden fra en bygningslast med dybden samtidig med at in-situ spændingen stiger.

Fundamentsberegning.

Selve fundamentstrykket per arealenhed (A) bestemmes traditionelt ved (jævnfør Hansen, 1961) (ligning (12)):

$$\frac{V}{A} = \frac{1}{2} \gamma b N_g s_g i_g + q N_q s_q i_q + c N_c s_c i_c \quad (12)$$

hvor

- γ er jordens rumvægt
- b er fundamentsbredden
- N_i er dimensionsløse bæreevnefaktorer afhængig af friktionsvinklen
- s_i og i_i er dimensionsløse formfaktorer
- q er det effektive overlejringstryk
- c er den udrænedede forskydningsstyrke

Brudkriteriet er i henhold til Mohr – Coulomb.

Ud fra de geologiske profiler forventes det, at bygningen er funderet direkte i moræneleret, selvom der er registreret op til 2 m fyld, som normalt betegnes som funderingsuegnede aflejringer. I leret er kortidsbæreevnen (ligning (13)):

$$\frac{V}{A} = c_u N_c^0 s_c^0 i_c^0 + q \quad (13)$$

Tilladelig belastning V/A

For at kunne bestemme den tilladelige belastning V/A skal den udrænedede forskydningsstyrke, c_u , være kendt. Såfremt denne ikke er kendt ud fra eksisterende materiale bestemmes den i forbindelse med den geotekniske undersøgelse, som det fremgår af kap. 9.4.5.

Når fundamentsarealet eller fundamentsbredden per løbende meter fundament er kendt, kan spændingsniveauet som funktion af dybden under fundamentsunderkant beregnes og optegnes.

Denne fremgangsmåde til bestemmelse af maksimale belastninger er ikke den normale, men dog en metode der bestemmer den maksimale lodrette last jorden kan udsættes for, inden den går i brud. Den styrende parameter (c_u – værdien) behøver nemlig ikke nødvendigvis at være udnyttet fuldt ud i projekteringen af byggeriet.

Selvsagt kan der også være en risiko for, at den maksimale tilladelige beregningsmæssige belastning er overskredet, men dette vil være et særtilfælde. En byggeteknisk gennemgang vil redegøre for dette (jævnfør kapitel 9.4.5).

Deformationsberegning

Ved beregning af deformationer anvendes traditionelt følgende udtryk.

Kvadratisk fundament (14):

$$\mathbf{d} = \frac{V}{K(b+z)} \frac{\frac{d}{b+z}}{1 + \frac{d}{b+z}} \quad (14)$$

og for et sribefundament (15):

$$\mathbf{d} = \frac{V}{K} \ln \left(1 + \frac{d}{b+z} \right) \quad (15)$$

hvor d er tykkelsen af det betragtede lag.

Sammenfatning

Som det fremgår af ovenstående er det i afsnittet tale om en anskueliggørelse af beslægtede påvirkninger, overvejelser over risici og en opstilling af betydningsfulde geotekniske parametre og metoder til belysning af spændings- og deformationsforhold i jorden.

6 Krav til lokalitet for anvendelse af forskellige fraktureringsmetoder

Som nævnt tidligere vil flere krav skulle være opfyldt, hvis de forskellige fraktureringsmetoder skal kunne finde anvendelse på en forurenede grund, der er underlejret af lavpermeable aflejringer.

Geologiske aflejringer

Permeabilitetsforholdene af de geologiske aflejringer er ikke i sig selv begrænsende for om fraktureringsteknikken kan anvendes på en forurenede lokalitet. Permeabiliteten af jordlagene er derimod af afgørende betydning for effekten af oprensningen. Generelt gælder dog at metoden næsten udelukkende er anvendt på lavpermeable aflejringer med en hydraulisk ledningsevne på mindre end 10^{-6} m/s. Anvendelsen af inducerede sprækker i højpermeable sedimenter er mere sjælden og begrænser sig til en relativ ny anvendelse i forbindelse med etablering af reaktive barrierer.

Forureningsdybde

Der synes at være sammenfald mellem den maksimale vertikale forureningsspredning af hovedmassen i lavpermeable aflejringer og den største dybde, hvor inducerede sprækker kan forventes at få en subhorisontal orientering. Fraktureringsteknikken er bedst egnet indtil 5-8 meters dybde i lavpermeable aflejringer. Den er mindre egnet helt terrænnært eller dybere end ca. 8 meter under terræn. Dette skyldes at inducerede sprækker mest sandsynligt vil udvikles vertikalt dybere end 5-8 m og risikerer, at skære jordoverfladen ved etablering i den øverste meter af jorden. Subhorisontale sprækker foretrækkes i forbindelse med oprensninger af de fleste terrænnære forureninger, da der derved opnås størst influensradius samt oprensningseffekt.

Forureningstyper

Erfaringerne fra Nordamerika viser, at følgende forureningstyper i praksis har kunne oprensnes cost-effektivt ved at inddrage inducerede sprækker i oprensningkonceptet. Mest almindeligt er de anvendt på sager med forurening med fri og opløst fase af klorerede opløsningsmidler og olie / benzinprodukter. Frifase omfatter således både DNAPL's og LNAPL's. Yderligere er gasfasen og den sorberede fase blevet oprenset. På eksperimentel plan men endnu ikke i fuldskala udføres forsøg med oprensning af tungmetalforurening. Endelig har nitrat kunne oprensnes.

Pladskrav

Der er visse pladskrav til den forurenede lokalitet, der skal være opfyldt, da der i sagens natur skal være fysisk plads til boremaskine og diverse fraktureringsudstyr. Størst pladskrav kræver injektionsboringer, hvor flere sprækker skal etableres, mens boringer med enkeltsprækker kræver relativ lille plads. Således kan sprækker etableres i kældre med lille loftshøjde, ved at benytte korte sammenskruele borestænger. Endelig skal de nævnes at pladskravet også gælder frie adgangsforhold op efter i luften, så el- og telefonkable, mv. ikke hænger i vejen.

Bebyggede områder

Endelig skal nævnes, at fraktureringsaktiviteterne kræver relativ stor lokalitetsspecifik kendskab til geologi og geoteknik på en forurenede grund, der er beliggende i bebygget område (jf. kapitel 5). Særlig årvågenhed er påkrævet, hvor oprensningen ved brug af inducerede sprækker involverer forurenede jord, der er beliggende i jorden under bygninger. Det skal her bemærkes, at der kan være nogen forskel på størrelsen af den akkumulerede jordhævning fra etablering af sprækker i dybder fra 1-5 m.u.t. ved

anvendelse af hhv. hydraulisk og pneumatisk frakturering, grundet i mindre forskelle i aperturstørrelse mellem de to metoder (jf. afsnit 2.6).

7 Metodens anvendelsesområde

Den typiske anvendelse af inducerede sprækker har været i forbindelse med lavpermeable naturligt opsprækkede medier, hvor afværgeboringer i mange tilfælde har vist for ringe effektivitet mht. etablering af influenszoner og nedbringelse af forureningskoncentrationer i jord og grundvand. Erfaringen viser, at frakturering kan forbedre effekten af forskellige in-situ afværgemetoder. Yderligere har frakturering vist sig effektiv til at placere kemisk reaktive materialer (jernspåner, grafit og stærke oxidationsmidler som kalium permanganat) i form af horisontale barrierer. Nedenfor er beskrevet de sædvanlige anvendelser af inducerede sprækker, der har dokumenteret effektforbedring af oprensningen ved demonstrationsforsøg. Endelig er i nærværende beskrevet alternative anvendelser, der indtil videre hverken er demonstreret i laboratoriet eller i felten.

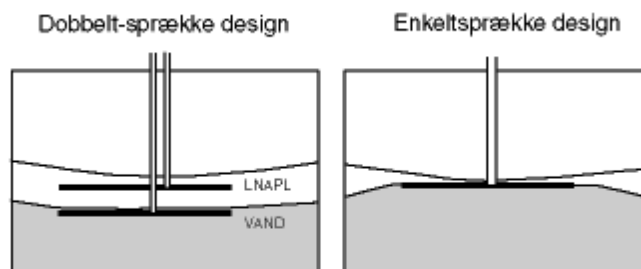
7.1 Vakuumeaktion (SVE)

Siden 1994 har den hydrauliske fraktureringsmetode været kommercielt tilgængelig, hvor de første kommercielt etablerede sprækker blev udført i forbindelse med SVE projekter. Af almindelig benyttede afværgeteknologier er SVE en af de mest udbredte. I lavpermeable aflejringer har frakturering medvirket til, at øge afværgeeffekten betydeligt på SVE projekter. Det primære formål med at anvende frakturering i forbindelse med SVE er, at opnå en væsentlig forbedring af pumpeydelsen, samt en forøgelse af en borings influensradius. Typisk øges pumpeydelsen med en faktor 10 til 100 og influensradius med en faktor 10 eller mere sammenlignet med en vertikal kontrolboring uden inducerede sprækker (EPA, 1993a og b). En yderligere gevinst kan opnås, hvis afværgeboringen udbygges til at have individuel adgang til de enkelte sprækker, hvorved en fleksibel injektion / oppumpning i de enkelte sprækker kan opnås. Erfaringen viser, at hvis flere inducerede sprækker forbindes med et enkelt filterrør, da vil oprensningen af forureningen være mindre effektiv i områder nær afværgeboringen end i området langs sprækkernes randområder (EPA, 1994).

7.2 LNAPL oppumpning

Inducerede sprækker kan i lavpermeable formationer forbedre oppumpningen væsentlig af forurening med LNAPL (= Light Non Aqueous Phase Liquid, dvs. kemiske stoffer med en vægtfylde lettere end vand, fx olie-forurening). Inducerede sprækker der skal benyttes til LNAPL-oppumpning bør være beliggende i, eller en anelse under, den forurenede zone. Derimod skal sprækker der er beliggende mange meter dybere end den forurenede zone ikke benyttes til oppumpning, da residual fasen af NAPL kan risikere at blive fanget i afsnørrede ender af sprækkesystemet, eller medvirke til en uhensigtsmæssig vertikal spredning af forureningen. En tyk zone forurennet med LNAPL håndteres bedst ved at placere en eller flere inducerede sprækker i den forurenede zone. Størst effekt opnås ved at forbinde alle sprækkerne med et langt filter og pumpe på alle sprækkerne samtidigt. EPA (1994) vurderer, at oppumpningen af LNAPL kan øges med en størrelsesorden i forhold til en almindelig vertikal afværgeboring. Hvis den forurenede LNAPL zone er relativ tynd kan den underliggende NAPL / vand-grænseflade forskydes op efter, som følge af LNAPL oppumpningen. Hvis grænsefladen når pumpefilteret vil forholdet mellem oppumpet LNAPL og vand mindskes, selv om der stadig forekommer betydelige mængder af

LNAPL i formationen nær pumpeboringen. For at undgå denne situation etableres en sprække i grundvandet under grænsefladen mellem LNAPL og vand. Ved separat at oppumpe vand fra denne nedre sprække samtidig med, at LNAPL-oppumpningen fortsættes på det øvre sprækkesystem, derved kan LNAPL / vand-forholdet forbedres betydeligt, fordi der herved kan oppumpes LNAPL fra den øvre sprække og vand fra den nedre (Figur 7.1).



Figur 7.1
LNAPL-oppumpning ved henholdsvis enkelt- og dobbeltsprækkedesign (EPA, 1994)

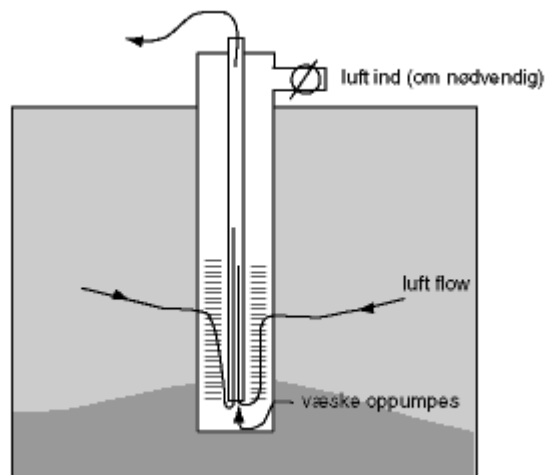
7.3 DNAPLoppumpning

Brugen af inducerede sprækker i lavpermeable formationer har vist sig rimelig effektiv ved oprensning af forurening med DNAPL's (= Dense Non Aqueous Phase Liquid, dvs. kemisk stof der er tungere end vand, f.eks. klorerede opløsningsmidler). Som altid, hvor der påtænkes oprensning af DNAPL's med en aktiv oprensningsmetode, skal fordele afvejes mod eventuelle alvorlige risici. Det risikeres nemlig, at DNAPL-forureningen spredes til større dybde, når DNAPL mobiliseres som følge af oppumpning fra en induceret sprække. For at undgå denne negative spredningseffekt bør der kun anvendes inducerede sprækker på lokaliteter, hvor svagt hældende sprækker med rimelig sikkerhed kan dannes. Specielt i forbindelse med DNAPL-lokaliteter anbefales det, at udføre forundersøgelser. Det foreslås at etablere en sprække i et uforurenet område, nær det forurenede sted, samt efterfølgende at bestemme sprækkens orientering. Derved kan den sandsynlige orientering af sprækker induceret på det forurenede sted bedre vurderes. Svagt hældende sprækker anses for at have den optimale orientering til at hindre spredning af DNAPL-forurening.

7.4 Dobbeltfaseekstraktion (DPE)

Ved oppumpning af poreluft nær grundvandsspejlet er det nærmest uundgåeligt at oppumpe en blanding af luft og vand. Denne samtidige oppumpning af luft og vand fra den umættede zone benævnes dobbeltfaseekstraktion (*Dual Phase Extraction (DPE)*) (Figur 7.2). Oppumpningen kan foregå fra enten en almindelig afværgeboring, eller fra en eller flere sprække(r) etableret ved frakturering. Boringen udføres med et lufttæt topstykke og en indre sugeslange med indtag i boringens filter, som er tilkoblet en vakuumpumpe på jordoverfladen. Derved kan en strømning af poreluft (og vand) gennem de boringsnære umættede jordlag opnås. Vand der suges op med luftstrømmen fældes ved jordoverfladen. Så længe

oppumpningen udgøres af en blanding af luft og vand vil luftens strømningshastighed blive reduceret. Men når en afsænkning af grundvandstanden omkring vakuumboringen har fundet sted vil raten af oppumpet luft på ny forøges. Dobbeltfase-princippet er det hyppigst benyttede, når sandfyldte sprækker bruges til oppumpning af luft. Resultater fra en amerikansk undersøgelse på Center Hill lokaliteten i Ohio, USA viste imidlertid at DPE i hydraulisk inducerede sprækker etableret i umættet zone i lavpermeable formationer producerer mere vand end almindelige afværgeboringer gør (Wolf og Murdoch, 1993). Center Hill lokaliteten er nærmere beskrevet i kapitel 8. Desuden er kort refereret en TCE oprensning i New Jersey, USA, hvor pneumatisk inducerede sprækker med DPE er blevet benyttet (kap. 8). Endelig diskuteres i kapitel 9 anvendelsen af hydrauliske sprækker kombineret med DPE ved et demonstrationsprojekt på Vestergade 10 i Haslev, Vestsjællands amt.



Figur 7.2
Dobbeltfaseekstraktion (EPA, 1994).

7.5 Biologiske oprensningsmetode (Bioremediering)

Forskellige biologiske oprensningsmetoder har været anvendt med held i lavpermeable formationer, hvor inducerede sprækker var etableret. I Dayton, Ohio i USA har injektionraten af opløsninger med næringssalte og ilt (typisk som hydrogen peroxid, H_2O_2) i en olie/benzin-forurening kunne øges i inducerede sprækker med næsten 100 gange. Opløsningerne injiceredes gennem sandfyldte hydrauliske sprækker i en finkornet aflejrings til stimulation af mikrobielle nedbrydningsprocesser (Vesper med flere, 1994 a & b). Undersøgelsen er nærmere beskrevet i kapitel 8. Yderligere viser laboratorieundersøgelser, at in-situ kemisk oxidation af TCE kan finde sted ved brug af H_2O_2 (Gates and Siegrist, 1995). Teknikken er så vidt vides ikke demonstreret ved feltskalaforsøg endnu. En anden biologisk oprensningsmetode omhandler injektion af natrium percarbonat ($Na_2CO_3 \cdot 1.5H_2O_2$) som fast stof i en sandfyldt sprække. Natrium percarbonat har den egenskab, at stoffet langsomt afgiver ilt til sine omgivelser. I denne anvendelse afgives ilt til de omgivende jordlag, hvor ilt fungerer som

elektronaccepter til stimulation af mikrobielle nedbrydningsprocesser. Laboratorieforsøg er gennemført med brug af natrium perkarbonat til nedbrydning af propylene glycol (Vesper med flere, 1994a).

7.6 Luftinjektion eller -oppumpning

Strømningshastigheden af injiceret eller oppumpet luft, samt influensradius i umættet zone af lavpermeable aflejringer, kan øges væsentlig ved etablering af inducerede sprækker. Derved kan blandt andet en stimulation af mikroorganismers aktivitet øges betydeligt, således at en aerob omsætning af visse organiske stoffer stimuleres (f.eks. olie/benzinkomponenter). Ved yderligere at opvarme den injicerede luft eller gas fremmes fordampningen af flygtige organiske stoffer (VOC), så en betydelig VOC stoffjernelse øges.

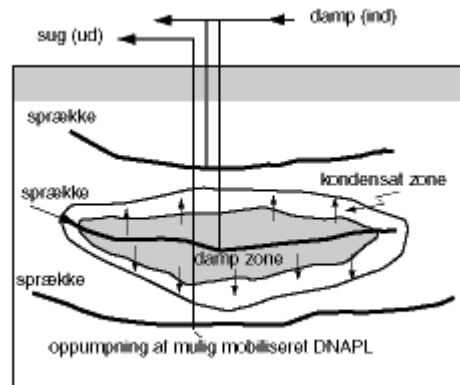
7.7 Dampinjektion

Dampinjektion (*Steam injection*) er en metode, hvor varm luft (damp) injiceres i en almindelig boring eller induceret sprække, hvorved flygtige organisk stoffer kan fordampe til gasfasen. Dampinjektion har mest været anvendt i sandede aflejringer, mens erfaringer fra finkornede aflejringer, herunder specielt sprækket moræneler, er meget sparsomme (EPA, 1998).

I lavpermeable formationer er foreslået en beskrivende model, hvor tre eller flere sprækker etableres over hinanden (EPA, 1994). En dampfase injiceres i den midterste sprække og vakuum påføres en eller flere sprækker over og under. Derved etableres en strømningsudbredelse af varm damp oppefter og nedefter i den finkornede formation (Figur 7.3). Langs dampfrontens kanter kondenseres den varme damp ved mødet med koldere luft- og vandpartikler. Kondenseringsprocessen fremmes yderligere af, at de over- og underliggende sprækker evakueres ved sug.

Det anbefales af EPA (1998), at det injicerede damptryk ikke overstiger 0,11 atm. pr. dybdemeter for at undgå frakturering, og dermed præferentielle strømningsveje, som resultat af dampinjektionen.

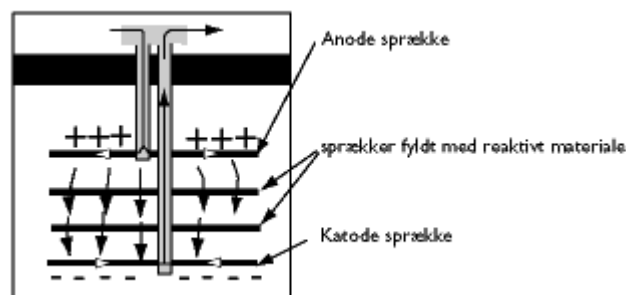
Ekstraktionsboringerne i de(n) nedre og øvre sprække(r) skal således indrettes til både at kunne suge luft og vand (kondensat). Der er et specielt krav til injektionsboringen, der skal være lavet af stål og ikke af plastik grundet dampens høje temperatur. I de tilfælde hvor dampinjektionen sker i en DNAPL-zone får de(n) nedre sprække(r) en yderligere funktion idet de(n) skal opsamle mobiliseret DNAPL i kondenseringsfronten.



Figur 7.3
Dampinjektion (EPA, 1994)

7.8 Elektroosmose (eller elektrokinese)

Grafit kan benyttes som fyldmateriale i inducerede sprækker, således at et elektrisk spændingsfelt kan påtrykkes jorden, hvis to grafitfyldte sprækker etableres med få meters afstand over hinanden (Figur 7.4). Derved vil vand og visse forurenende stoffer strømme i retning mod katodesprækken ved den proces der benævnes elektroosmose eller elektrokinese (Shapiro og Probstein, 1993). Hvis kemisk eller biologisk reaktive sprækker er induceret imellem de to grafitlag kan en egentlig immobilisering, sorption eller biologisk nedbrydning af det mobiliserede stof finde sted. Processen er analog til hydrauliske trykforskelle mellem sprækker der skaber vandbevægelse. Forskellen er blot at strømningshastigheden ved elektrokinese kan blive væsentlig større end ved hydraulisk strømning i finkornede aflejringer. Konceptet er blevet testet i forbindelse med et feltstudium i USA. Undersøgelsen benævnes Lasagne-projekt og er nærmere beskrevet af Ho med flere (1995) & Murdoch og Chen (1997).



Figur 7.4
Elektroosmose (Murdoch og Chen, 1997)

7.9 Barrierer

I årevis har fraktureringsteknikken været benyttet til jordstabilisering under byggeanlæg. Barrieremetoden har i nyere tid desuden fundet begrænset anvendelse som fysisk barriere under lossepladser og kemikaliebassiner,

hvor der er rejst tvivl om lossepladsmembraners tæthed. Mens der har været en intensiv forskningsindsats i gang til udvikling af vertikale permeable reaktive barrierer (f.eks. O'Hannesin og Gillham, 1998; Miljøstyrelsen, 1996), har der først for nyligt været forskningstiltag i gang på at udvikle horisontale barrierer i lavpermeable formationer (Murdoch med flere, 1997; Siegrist med flere, 1999). Horisontale barrierer designes til med kemiske, biologiske og fysiske processer at nedbryde eller fjerne en vertikalt nedhængende forurening. To metoder er indtil nu blevet undersøgt i laboratoriet og under kontrollerede feltskalaforhold (pilotskala) i USA, hvor henholdsvis et granulært materiale af jernspåner, samt kalium permanganat er blevet injiceret i hydrauliske sprækker, med det formål at undersøge disse to reaktive stoffers evne til in-situ nedbrydning af TCE i en lavpermeabel aflejring. Hydrauliske sprækker blev etableret i to forsøgsceller i Ohio, USA. To sæt med hver fem sprækker blev fyldt med sand kombineret med henholdsvis jernspåner (Fe^0) som reduktionsmiddel, subsidiært det stærke oxidationsmiddel kalium permanganat ($KMnO_4$) til oprensning af en 25-30 år gammel TCE forurening. Forsøget er nærmere beskrevet i afsnit 8.1.4.

7.10 Monitering

Til monitering af generelle strømning og stoftransportforhold i moræner, er der anvendt mange forskellige moniteringsprincipper de seneste 10-15 år. For de fleste instrumenteringssystemer gælder at moniteringsmålingerne er vanskelige at benytte til vurdering af for eksempel pesticid eller nitratbelastningen af de danske grundvandsmagasiner.

Instrumenteringsprincipper eller -systemer, der bedre afspejler nedsivningsforholdene af vand og forurening fra sådanne større arealer (gerne hektarskala) findes ikke i dag. En fremtidig anvendelse af fraktureringsteknikken kunne overvejes, hvor cm-dm tykke sandfyldte sprækker, i princippet på størrelse med en fodboldbane, kunne etableres i nedre dele af den umættede zone eller toppen af grundvandszonen til integreret opsamling af nedsivende porevand på markskala (early warning system). Fremtidige forskningsundersøgelser må vise om fraktureringsteknikken har et potentiale til denne anvendelse.

8 Eksempler på anvendelse fra USA (Case histories)

Inducerede sprækker har i kombination med andre oprensningsprincipper været brugt siden slutningen af 1980'erne til at forbedre oprensningseffekten fra lavpermeable aflejringer. De fleste anvendelser er pt. blevet testet ved pilotskala feltforsøg, mens lidt færre er dokumenteret ved oprensninger i fuldskala på kommercielle betingelser (Tabel 5). I Bilag 2 er vist resultaterne af effektforbedringen ved etablering inducerede sprækker i borer der er udført til så forskellige formål som vandforsyning, olieindvinding og forskellige miljøanvendelser (fra EPA, 1994). For miljøanvendelsernes vedkommende har strømningshastigheden ved op- eller nedpumpning af væske eller gas kunne øges med en faktor 10 til 50. Det skal bemærkes at effekten er relativ uafhængig af hvilken væske-/gastype der anvendes og hvilken afværgemetode der benyttes, da vakuumeekstraktion, væskeinjektion, dampinjektion og NAPL-oppumpning opnår ret ens effektforbedringer. Til vandforsyningsformål er opnået ydelsesforbedringer på fra 5 – 25 gange indvingen af olie/gas typisk er blevet forbedret med op til 20 gange. I denne forbindelse kan nævnes, at i et dansk olie/gasfelt i Nordsøen (Dan-feltet) er der opnået indvindingsforbedringer på en faktor 10 fra horisontale olie/gas brønde, hvorfra der er etableret vertikalt orienterede hydrauliske sprækker (Jones, 1999).

Tabel 5

Oversigt over frakturering anvendt med andre metoder. (a) Kun på ideplan. (b) Eksperimentelt pilotforsøg (feltkala). (c) Fuldskalaoprensning.

Anvendelse	(a)	(b)	(c)	Dokumentation (nøglereferencer)
Vakuumeekstraktion			√	EPA(1993a&b)
LNAPLoppumpning			√	EPA(1994)
DNAPLoppumpning			√	EPA(1994)
Dobbeltfaseekstraktion		(√)	√	Wolf og Murdoch(1994)
Bioremediering		√	√	Vesper med flere (1994a&b)
Luftinjektion/oppumpning		√	√	EPA(1993b)
Dampinjektion	√			EPA(1998)
Elektrosmose		√		Murdoch og Chen (1997)
Barriere		√	√	Siegrist med flere (1998a&b)
Monitering	√			Ingen

I det følgende er resumeret resultaterne fra fem miljømæssige anvendelser fra USA, hvor inducerede sprækker er blevet benyttet. Det er valgt at præsentere fire afværgeteknologier i kombination med hydrauliske sprækker, hvoraf en af disse er en passiv metode (biologiske oprensningsmetoder) samt tre aktive metoder: dobbeltfaseekstraktion, vakuumeekstraktion og elektrosmose. Endelig præsenteres en TCE oprensning med dobbeltfaseekstraktion i pneumatisk inducerede sprækker.

8.1 Anvendelse af hydrauliske sprækker

8.1.1 Linemaster Superfund lokaliteten (dobbeltfaseekstraktion)

På Linemaster lokaliteten i Connecticut, USA blev i 1995 udført forundersøgelser, med det formål at vurdere muligheden for fuldskalaoprensning af en TCE forurening fra moræneler ved DPE i hydraulisk inducerede sprækker. I 1998 blev etableret et DPE system med dobbeltfase-oppumpning og luftinjektion fra inducerede sandfyldte sprækker i 3 – 11 meters dybde med en sprækkediameter på op til 10 meter og en sprækketykkelse på gennemsnitlig 1 – 1,5 cm.

Hydrogeologi og forureningsudbredelse

En 12-15 meter tyk morænelersenhed er primært forurenet med TCE. Forureningen stammer fra en tørbrønd i moræneleren, hvori TCE er blevet bortskaffet af en industrivirksomhed fra slutningen af 1960'erne til slutningen af 1970'erne. Forureningens kildeområde i moræneleren er kendt, med koncentrationer over 1000 µg TCE/l. Højeste koncentrationer er på 220 mg TCE/l i kildeområdet. Forureningen har en horisontal udstrækning på 25 x 35 meter, der delvis spredt sig ind under en industribygning. Under tørbrønden strækker forureningen sig vertikalt ned til en underliggende skifferformation. Skiferen udnyttes som grundvandsmagasin for områdets vandforsyning, der i dag er forurenet med TCE fra kildeområdet (Whiting med flere, 1998).

Moræneleren har en ca. 5-6 meter tyk oxideret zone, der underlejres en reduceret moræneler. Den oxiderede og reducerede zone har en hydraulisk ledningsevne på henholdsvis $5,2 \times 10^{-8}$ m/s og 1×10^{-8} m/s. Grundvandsspejlet varierer med årstiden fra 1,5 – 3 meter under terræn. Kildeområdet er beliggende på et topografisk og hydrologisk højedrag i området. Det forurenede grundvand har således kunne spredes gennem morænelersenheden og følge grundvandsstrømmens retning i skiferen mod øst og nordøst. Den hydrauliske ledningsevne af den opsprækkede skifer er $1,7 \times 10^{-6}$ m/s. Flere lokale vandforsyninger i skifermagasinet er forurenet fra kildeområdet på Linemasterlokaliteten.

I 1992 blev der installeret en afværgepumpning til oprensning af det TCE forurenede grundvand i skifermagasinet. Afværgeoppumpningen har vist sig at kunne hydraulisk fiksure forureningsspredningen. Indenfor et år var TCE-koncentrationen i pumpevandet aftaget fra 800 µg/l til 5 µg/l i 1993. Der var dog stadig så høje koncentration af TCE i den overliggende moræneler at det blev besluttet at etablere et DPE system fra et større antal hydraulisk inducerede sprækker fra 3-11 meters dybde i moræneleren.

Design

Til oprensning af TCE jordforureningen blev syv hydraulisk frakturerede afværgeboringer med 3 – 5 sprækker etableret i hver. Sprækkerne blev etableret i intervallet fra ca. 3 meters dybde til ca. 11 meter fra boringer med 6" PVC forerør. Boremudderet bestod af et blandingsforhold mellem guar gelé og sand på fra 4:1 til 3:1. De individuelle sprækker blev isoleret med pakkere, så en forceret udvaskning fra de enkelte sprækker kunne finde sted. I andre boringer blev installeret straddlepakkere til etablering af op til fem inducerede sprækker i enkeltboringer.

Den del af sprækkerne der blev etableret i indtil 5-6 meters dybde var alle rimelig horisontalt orienteret og symmetriske, mens sprækker etableret dybere blev mere stejltstående og asymmetriske. Flere af de dybere inducerede sprækker voksede med en stejl hældning indtil 5-6 meters dybde, hvor de fik et mere horisontalt forløb.

For at øge luftgennemstrømningen ved DPE i de mest forurenede dele af kildeområdet skulle grundvandsspejlet først afsænkes i moræneleren til størst mulig dybde (start april 1998). Til afsænkningen blev anvendt en 2"-blærepumpe placeret i en pumpeump under filterintervallet og vakuumpumper placeret på jordoverfladen, der kunne producere et kraftigt sug på op til ca. 400 mmHg, svarende til 53 kN/m². En skiftevis DPE og luftinjektion (op til 9 psi, svarende til 62 kN/m²) blev igangsat i foråret 1999 for at forcere den vekslende luftstrømning mellem sprækkerne og afværgeboringerne.

Der blev etableret et monitoringsystem i jordlagene til indsamling af to typer målinger. For det første blev ændringerne i luft- og vandtryk målt. Herunder måling af ændringer i jordfugtighed ved TDR-udstyr (TDR = Time Domain Reflectometry). 39 reder af pejlerør blev installeret igennem hele morænelersenheden i udvalgte dybder fra ca. 2,5 m.u.t. til ca. 15 m.u.t. For det andet målte TCE i poreluft og vandprøver. Til bestemmelse af TCE massefjernelse monitoreredes poreluften med on-line gaskromatografi, mens mere periodiske prøveudtagninger af vandprøver blev foretaget. Alle strømningshastigheder og tryk måles on-line og registreres med datalogger.

Resultater

I forbindelse med forundersøgelserne på lokaliteten i 1995, viste hydrauliske tests af almindelige vertikale afværgeboringer, at en influenszone på mindre end 2 meter kunne etableres ved en vedvarende luftpumpeydelse på 0,0085 m³/dag/kPa². På samme tid viste tests med DPE fra to pilot afværgeboringer med 3-5 hydrauliske sprækker i hver, :

- at den effektive hydrauliske ledningsevne kunne øges med en faktor 10 i forhold til de almindelige vertikale boringer;
- at influensradius blev forøget til mere end 33 meter (100 fod) eller mere end tre gange sprækkens diameter
- at ved brug af vakuum kunne en vedvarende pumpeydelse på 0,26-0,46 m³/dag/kPa² fra den oxiderede moræneler og på 0,05 m³/dag/kPa² i den reducerede moræneler opnås.
- at DPE var istand til at etablere en afsænkning på mere end 3 meter (10 fod) efter 3 dage i området over sprækkearealet. Forundersøgelserne viste desuden, at det tog 220 dage at etablere 7 meters afsænkning i moræneleren på Linemasterlokaliteten.

Foreløbige resultater af den skiftevis DPE og luftinjektion viser, at jordforureningen i kildeområdet visse steder har kunne reduceres fra 200 µg TCE / kg til 5 µg TCE / kg.

Konklusion

Fjernelsen af TCE forbedredes med 4-6 gange efter få måneders oppumpning. Efter fem års oprensning gennemføres et ekstensivt jordprøvetagning, der skal vise hvor effektivt DPE kombineret med luftinjektion fra hydraulisk inducerede sprækker er til fjernelse af TCE fra en morænelerssekvens.

8.1.2 Center Hill, OH (vakuumelekstraktion)

Center Hill lokaliteten er en ikkeforurenet grund, der er beliggende ved Cincinnati i Ohio, USA. Den har i begyndelsen af 1990'erne været benyttet, som forskningslokalitet af universitetet i Cincinnati til den initiale udvikling af fraktureringsteknologien til miljømæssige formål. Lokaliteten består af en siltet leraflejring, hvor der forekommer indslag af tynde sand og grus horisonter.

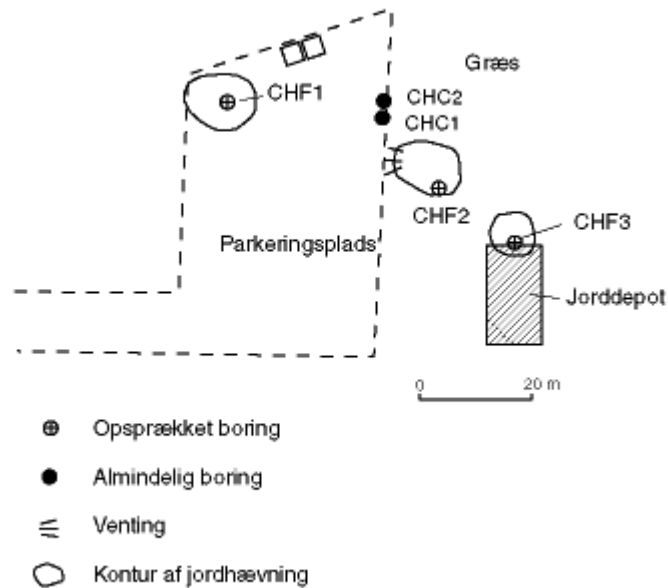
Formål

På lokaliteten er effekten af SVE undersøgt med det formål, at bestemme influensradius i en opsprækket glacial aflejring (Wolf og Murdoch, 1993).

SVE princippet blev testet fra sandfyldte hydrauliske sprækker og blev sammenlignet med effekten ved SVE fra almindelige vertikale borerer uden hydrauliske sprækker i.

Design

Fem borerer blev etableret i forbindelse med undersøgelserne til brug for SVE testene. To af borererne er etableret som almindelige vertikale borerer, der benævnes CHC1 og CHC2. Tre andre borerer er etableret med hydrauliske sprækker, der benævnes CHF1, CHF2 og CHF3. De fem borerer er beliggende indenfor en maksimal indbyrdes afstand på 50 meter (Figur 8.1).



Figur 8.1

Center Hill forskningslokaliteten i Cincinnati, OH, USA. Placeringen af de hydraulisk opsprækkede borerer CHF1, CHF2 og CHF3 er vist sammen med de to almindelige borerer CHC1 og CHC2 (fra Wolf og Murdoch, 1993).

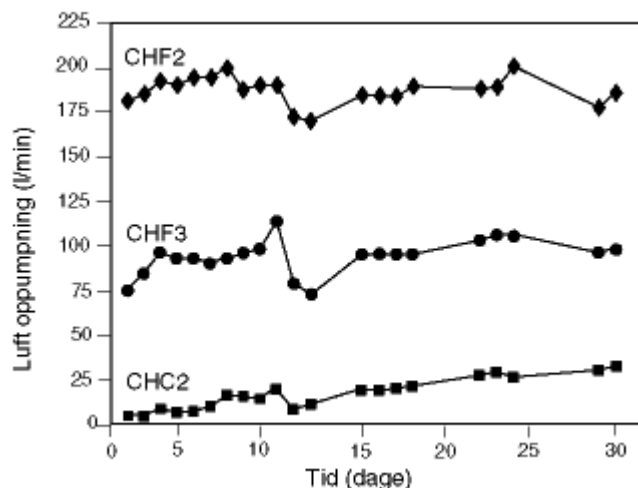
Tre hydrauliske sprækker blev etableret i boring CHF1 i 2, 3,5 og 5 meters dybde. Yderligere to sprækker blev etableret i ca. 2 meters dybde i hhv. boring CHF2 og CHF3. Borererne blev primært indrettet til vakuumelekstraktion, men kunne også anvendes ved dobbeltfaseekstraktion. Boring CHF1 blev etableret, som en 18" boring og blev udbygget med 0,5 meter lange individuelle 2"-filterrør til hvert sprækkeinterval. Annulus mellem borehul og forerør blev forsejlet med en cementblanding for at undgå lækage mellem de enkelte filtre. Borererne CHF2 og CHF3 blev udbygget med ca. 0,5 meter lange 6"-filtre placeret i sprækkeintervallet i ca. 2 meters dybde.

De sandfyldte sprækker dækker hver et areal på ca. 7 x 10 meter. Tykkelsen af de fem sandfyldte sprækker er 1,5-2,5 cm. Opmåling af hævnings størrelse af jordoverfladen korrelerer med den observerede tykkelse af sand i sprækkerne. En enkelt sprække er cirkulær i form, mens resten er ellipsoidale. Sprækkernes form er asymmetrisk med en svagt hældende orientering. Det skal bemærkes at sprækken i boring CHF2 skærer jordoverfladen (venting) på en mindre strækning i en afstand på ca. 10 meter fra boringen.

De to almindelige boringer blev udbygget med korte filtre i de øverste 1,5 til 2,5 meter under terræn. Endelig blev etableret et større antal pejlerør i forskellig dybde og afstand fra boringerne og sprækkerne.

Resultater

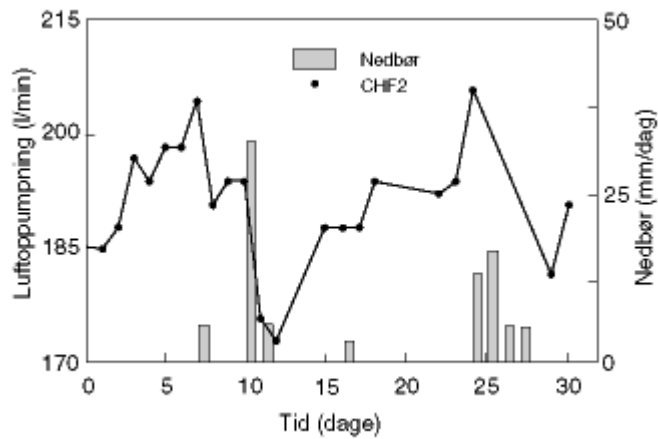
I boringerne CHF2, CHC3 og CHC2 blev udført en SVE test af 30 dages varighed. Pumpeydelse og trykfordeling blev registeret kontinuert og konstante værdier blev nået inden for meget kort tid (få minutter). Som følge af nedbørshændelser i området observeredes dog betydelige fluktuationer. Figur 8.2 viser pumpeydelsen af luft i de tre boringer som funktion af tid. Der er en svag tendens til stigende pumpeydelse i løbet af testperioden, sandsynligvis som følge af en samtidig afsænkning af vandspejlet, så adgangen for luftstrømningen øges. Det ses endvidere, at største ydelse opnås fra CHF2 med 175 – 200 l/min, mens ydelsen fra CHF3 er ca. halvt så stor. Grundet CHF2's skæring med jordoverfladen trækkes falsk luft ned via denne passage, hvilket forklarer CHF2's væsentlig højere ydelse end CHF3. Endelig kan det konstateres, at pumpeydelsen af luft fra den almindelige boring CHC2 er en faktor 4 til 8 lavere end for de to opsprækkede boringer.



Figur 8.2

Luftoppumpningen som funktion af tid i de to hydraulisk opsprækkede boringer CHF2 og CHF3, samt i den almindelige lodrette boring CHC2 (fra Wolf og Murdoch, 1993).

Infiltration af nedbør påvirker pumpeydelsen betydeligt, således at ydelsen falder når nedbøren infiltrerer jordlagene og vandmætningen stiger. Figur 8.3 viser relationen mellem fluktuerende pumpeydelse af luft fra boring CHF2 og regnhændelser i forsøgsperioden. Det ses, at et kraftige regnvejr med en intensitet på mere end 30 mm på én dag (ca. 10 dage efter pumpestart), reducerer ydelsen med 10-12% indenfor selv samme døgn. Selv mindre regnhændelser på mindre end 10 mm/dag har ligeledes en tydelig effekt på ydelsen. Pumpeydelsen stiger dog igen til ydelsesniveauet fra før nedbørshændelsen efter nogle få dages fortsat oppumpning.



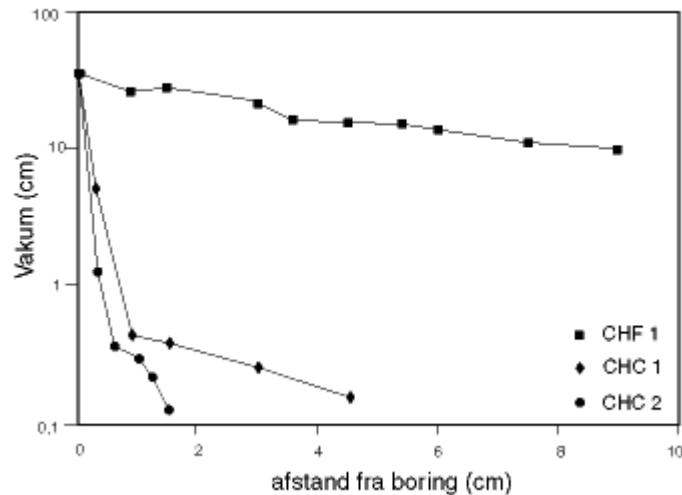
Figur 8.3

Relationen mellem en fluktuierende pumpeydelse af luft fra boring CHF2 og nedbør i testområdet (fra Wolf og Murdoch, 1993).

Poreluftens trykændringer i den umættede zone nær en induceret sprække er flere størrelsesordener større end ved en almindelig lodret boring med filter i den umættede zone. Figur 8.4 viser poreluftens trykændringer i indtil 10 meters afstand fra boringerne CHF1, CHC1 og CHC2. Til sammenligning var poreluftens trykniveau upåvirket af SVE testene i en afstand på mindre end 0,5 meter fra de almindelige vertikale boringer.

Konklusion

På baggrund af undersøgelserne på Center Hill lokaliteten blev det konkluderet, at hydrauliske sprækker kan forøge strømningshastigheden af luft væsentligt i forhold til oppumpning af luft fra almindelige vertikale boringer. Den gennemsnitlige influensradius for boringerne med frakturering var fra 5 – 10 meter mens almindelige boringer kun kunne påvirke trykfordelingen til en maksimal afstand på 0,5 meter.



Figur 8.4

Relationen mellem det pneumatiske trykniveau og den radiale afstand fra borerne CHF1, CHC1 og CHC2 til poreluftfiltre placeret i afstande indtil ca. 10 fra de tre borer (fra Wolf og Murdoch, 1993).

8.1.3 Dayton site, OH (biologisk oprensningsmetode)

Dayton lokaliteten er beliggende i Ohio, USA. I 1989 blev et større antal underjordiske brændstoftanke gravet op efter det var konstateret, at betydelige mængder af BTEX komponenter og total kulbrinterne var sivet ud i jorden. I 1991 blev et undersøgelsesprogram igangsat med biologisk rensning til bekæmpelse af forureningen.

Hydrogeologi og forureningsudbredelse

De geologiske forhold på lokaliteten består af en stiv sandet til siltet leraflejring med indslag af tynde grushorisonter. Lerformationen underlejes af en ler- og kalksten i ca. 6 meters dybde. Den bulk hydrauliske ledningsevne af den lavpermeable lerjord er mindre end 10^{-9} m/s. Forureningen er spredt over hele arealet med det opgravede tankanlæg og over det meste af dybden til den underliggende ler- og kalksten. I jorden blev primært påvist xylen og toluen i koncentrationer på op til 55 - 60 mg BTEX/kg jord. Total kulbrinterne blev påvist i koncentrationer op til 8-9 mg/kg jord og total bly op til 150 μ g/kg jord.

Design

Der blev i alt induceret ni hydrauliske sprækker på lokaliteten, hvoraf syv blev etableret i dybder fra 2,5 til 4,0 m.u.t. fra to injektionsboringer indenfor forureningens kildeområde. I hver af de ni sandfyldte sprækker blev der injiceret mellem 140-280 liter sand og 320-475 liter gelé. Det initiale injektionstryk varierede mellem 120-420 kN/m², mens injektionstrykket i sprækkernes vækstfase varierede mellem ca. 50 og 200 kN/m². Den maksimale hævnings af jordoverfladen var på 1,2 - 2,3 cm og radius af sprækkernes udstrækning varierede mellem 4,5 og 7,0 meter.

Der blev i en ca. 9 måneders periode frem til august 1992 injiceret hydrogenperoxid (H₂O₂) og næringssalte med vand i en enkelt opsprækket boring, samt i en almindelig vertikal boring (uden opsprækning).

Resultater

I den opsprækkede boring kunne der injiceres 25- 40 gange mere vand (+ H₂O₂ og næringssalt) til sammenligning med den almindelige vertikale boring over de ni måneder. Den øgede strømningshastighed resulterede i en 4-dobling af vandmætningen i jordlagene omkring den opsprækkede boring.

Der blev udtaget jordprøver hhv. 3 og 8 måneder efter injektionsstarten, for at bestemme den procentvise fjernelse af forureningen, som resultat af de biologiske nedbrydningsprocesser. Efter 8 måneders drift var der i forhold til startkoncentrationerne fjernet mellem 60 – 90 % af ethylbenzen, 12-80 % af benzen og 55-80 % af total kulbrinterne i de opsprækkede boringer. Fjernelsesprocenten for de uopsprækkede boringer var kun målbar for ethylbenzen (37-90 % i to ud af tre boringer) og for total kulbrinterne med 25-67 % stoffjernelse i alle tre almindelige boringer. Til gengæld kunne ingen fjernelse af toluen konstateres i hverken de opsprækkede eller almindelige boringer efter 8 måneders drift.

Konklusion

Det kunne således konkluderes, at biologiske nedbrydningsprocesser i hydrauliske sprækker på Dayton lokaliteten kunne fjerne mere benzen, ethylbenzen og total kulbrinter fra jorden ved injektion af H₂O₂ og næringssalte end almindelige vertikale boringer. Til gengæld kunne ingen af de to boringsudbygninger fjerne toluen med den anvendte bioremedieringsteknik.

8.1.4 Portsmouth, OH (Barrierer)

Portsmouth lokaliteten er beliggende i det centrale Ohio i USA, hvor et kontrolleret pilotskalaforøg med horisontale barrierer blev udført på en grund med et nedlagt gasanlæg. Grunden er ejet af det amerikanske energiministerium (DOE). Den 2,2 hektar store grund blev forurenet med olierester og klorerede opløsningsmidler i 1970'erne. I 1980 blev arealet overdækket med en midlertidig geomembran for at reducere perkolat nedsivningen fra grunden. I 1996 blev etableret hydrauliske sprækker i to forsøgsceller fra ca. 1 - 5 meters dybde med fem sprækker i hver (tidligere omtalt i afsnit 7.9). Det primære formål med undersøgelsen var, at teste in-situ oprensning af TCE i en lavpermeabel aflejrings ved, at injicere reaktive stoffer (oxidation- og reduktionsmidler) i de hydrauliske sprækker.

Hydrogeologi og forureningsudbredelse

De geologiske forhold på forsøgslokaliteten udgøres af 6-8 meter lavpermeable siltede leraflejringer, der indeholder et naturligt sprækkesystem. Den mættet hydraulisk ledningsevne af leren er bestemt til mindre end 10⁻⁸ m/s. Et permanent vandspejl optræder i ca. 4 meters dybde. Et permeabelt sand/gruslag underlejrer lersekvensen. Der er påvist 300 mg TCE /kg i den umættede zone, mens grundvandszonen indeholder mere varierende TCE indhold, herunder fri fase TCE.

Design

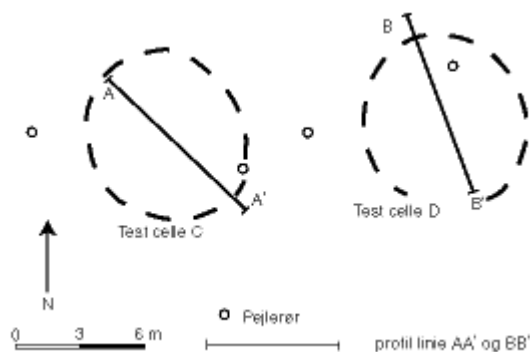
To forsøgsceller blev etableret på grunden, som vist på Figur 8.5. I begge celler blev etableret fem hydrauliske sprækker, hvor de øvre og nedre sprækker blev fyldt med sand. I den ene forsøgscelle blev de tre mellemste sprækker fyldt med jernspåner (Fe⁰) og de tilsvarende sprækker i den anden celle blev fyldt med kalium permanganat (KMnO₄). To profilsnit gennem de to celler er vist i Figur 8.6. I Tabel 6 er vist karakteristika for de to celler. Jernspånerne består af Fe⁰ partikler (0,2 mm i diameter), der i suspension i guar gummi gelé blev injiceret i de mellemste sprækker i den ene celle. Tilsvarende blev oxidationsmidlet, der bestod af partikulært KMnO₄ (0,1-0,3 mm i diameter) i suspension i en mineralbaseret gelé injiceret i den anden celle.

Tabel 6.

Karakteristika ved de to forsøgsceller (fra Siegrist med flere, 1999).

Karakteristika	Jernfyldte sprækker til deklorering	Permanganatfyldte sprækker til oxidation
Metode	Jernmetal og guar gelé	Permanganat i mineralbaseret gelé
Installationstid	2-3 timer	2-3 timer
Dybde/proppant/mængde	1,2 m / sand / 0,14 m ³ 1,8 m / Fe ⁰ / 1000kg 2,4 m / Fe ⁰ / 3000kg 3,6 m / Fe ⁰ / 2600kg 5,0 m / sand / 0,57 m ³	1,2 m / sand / 0,14 m ³ 1,8 m / KMnO ₄ / 1000kg 2,4 m / KMnO ₄ / 3000kg 3,6 m / KMnO ₄ / 2600kg 5,0 m / sand / 0,57 m ³
Testcellens diameter	6 m	6 m
Testcellens dybde	5 m	5 m
Testcellens volumen	148 m ³	148 m ³
Sprække hældning	SØ	NV

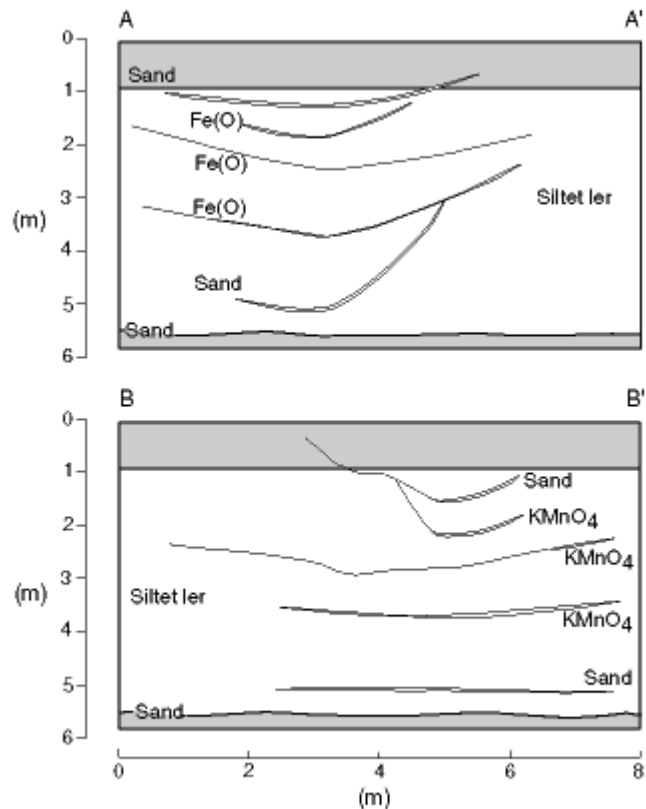
Hver af de fem sprækker i de to celler blev etableret fra individuelle stål rammeboringer. Sprækkernes udbredelse blev registreret ved opmåling af jordens hævnings på terræn og senere verificeret med et større antal kerneboringer. Sprækkernes form var horisontale nær injektionspunktet og hældende opefter i større afstand, så de dannede en skålform. I flere tilfælde skar sprækkerne hinanden.

**Figur 8.5**

Placering af to forsøgsceller på lokaliteten i Portsmouth i Ohio, USA (fra Siegrist med flere, 1999).

Resultater og konklusion

Forsøgene viste, at de jernfyldte sprækker dannede en mindre end 1 cm tyk reaktiv zone omkring sig, hvori et fald i redox potential kunne erkendes, samtidig med at en reduktiv deklorering af TCE fandt sted. Forsøget viste desuden, at nulvalens jernet ingen yderligere indtrængelseffekt havde på den TCE-forurenede sidebjergarts matrix. Derved kunne det konstateres, at jernet ingen nedbrydningseffekt havde på den øvrige del af sidebjergarten med TCE-forurening. De permanganat-fyldte sprækker dannede en diffusiv reaktionszone omkring sig der voksede til en tykkelse på 40 cm over en 10 måneders forsøgsperiode. Indenfor denne oxiderede zone blev mere end 99% af TCE indholdet fjernet i relativ lav koncentration efter 2 timers kontaktid. Langtidseffekten af begge typer af fyldmaterialer viste, at nedbrydningspotential af høje TCE indhold kunne opretholdes efter 10 måneders reaktionstid. Yderligere detaljer vedrørende metode og resultater kan findes i Siegrist med flere (1999).



Figur 8.6

Tværsnit af de to forsøgsceller. Profil AA': Sprækker med Fe⁰ metal fyldning og profil BB': Sprækker med KMnO₄ fyldning (fra Siegrist med flere, 1999).

8.2 Anvendelse af pneumatiske sprækker

8.2.1 Centrale New Jersey (Dobbeltfaseekstraktion)

Baggrund

I det centrale New Jersey pågår en fuldskala oprensning af TCE fra pneumatisk inducerede sprækker ved dobbeltfaseekstraktion. Fuldskala oprensningen igangsattes i september 1995.

Hydrogeologi og forureningsudbredelse

Geologisk udgøres den forurenede lokalitet af en skifer formation med en bulk hydraulisk ledningsevne på $4,5 \times 10^7$ m/s. TCE-forureningens horisontale udbredelse dækker et areal på ca. 3700 m², mens den vertikale udbredelse strækker sig fra ca. 3,5 – 8 meters dybde. TCE koncentrationen er relativ høj (op til 150 mg TCE / l) svarende til over 10 % vandmætning.

Design

Afværgesystemet består af 20 vakuumeekstraktions borer, hvor der er etableret et større antal pneumatisk inducerede sprækker indtil 8 meters dybde. Sprækkerne har en horisontal til svagt nedad hældende orientering ind mod injektionspunktet. Over jorden består afværgesystemet af en vakuumbløser, en væske- / gasseparator, en luftkompressor og to aktive kulfiltre.

Resultater

En pilottest har vist, at vandspejlet kunne afsænkes fra 3,5 m.u.t. til 8 meter i skiferen indenfor en 2 dages forsøgsperiode. I samme periode kunne en

influenradius på mere end 17 meter opnås i skiferformationens umættet zone (ARS, 1999).

9 Vurdering af potentialet for hydraulisk frakturering på Vestergade 10, Haslev

9.1 Lokaltetsbeskrivelse

I ejendommen Vestergade 10 i Haslev har der siden 1967 været drevet renserivirksomhed, hvor der har været anvendt tetrachlorethylen (PCE) til den kemiske renseproces. I forbindelse med registrering af potentielt forurenede virksomheder i Haslev kommune blev der i 1992-93 konstateret forurening med specielt PCE og dets nedbrydningsprodukter i det underliggende jord og grundvand. Kildehistorien, forureningsudbredelsen, forureningstype, samt de geologiske og hydrologiske forhold er indgående beskrevet i Vestsjællands amt (1998a & b).

9.2 Forureningsudbredelse

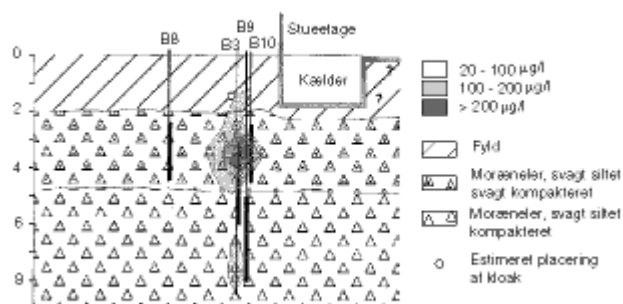
Grundvandsmagasin

De klorerede opløsningsmidler er hovedsagelig knyttet til de øvre vandmættede dele af moræneleren, mens det underliggende grundvandsmagasin i mindre, men målbare koncentrationer (samlet ca. 1 µg/l af TCE og dets nedbrydningsprodukter). Vinylklorid er påvist i indtil 0,3 µg/l i grundvandsmagasinet.

Mættet zone af moræneler

Forureningen har en horisontal udbredelse i moræneleren på ca. 15 meter, således at den både forekommer i baggården til renseribygningen, samt under selve bygningen, der bl.a. huser renseriet. Vertikalt har forureningen spredt sig til mere end 8 meters dybde i moræneleren med hovedparten af forureningen i 2,5 - 5 meters dybde (Figur 9.1). Poreluftmålinger i de umættede øvre to meter indeholder mindre end 300 µg/l af klorerede opløsningsmidler. To hot spots i 2-5 m.u.t. har mere end 10 mg/l PCE, svarende til nærværd 10 % mætning af vandfasen. Yderligere er påvist 2 mg/l af vinylchlorid. På baggrund af disse høje koncentrationer forventes der at optræde frifase klorerede opløsningsmidler på lokaliteten. Grundet beliggenheden af flere udhuse og naboejendomme forhindrer dette bortgravning af 8 meter forurenede jord, hvorved valgmulighederne for oprensning er begrænset til enten afværgepumpning eller in-situ teknikker.

Umættet zone af moræneler



Figur 9.1
Vertikal forureningsfordeling på Vestergade 10 i Haslev (fra Vestsjællands Amt, 1998a)..

9.3 Geologiske og hydrologiske forhold

Geologi

Haslev-området domineres af 14-17 meter siltet moræneler, med stedvise indslag af op til flere meter tykke lag og linser af smeltevandsgrus og sand. Morænelersenheden er underlejrer af den stærkt opsprækkede grønsandskalk, hvorfra byens vandforsyning primært henter sit vand. Det primære grundvandsmagasins trykniveau i moræneleren er beliggende ca. 6 m.u.t., mens grundvandsspejlet i moræneleren står 1-1,5 m.u.t. i vinterperioden og 2 - 2,5 m.u.t. i sommerperioden. Der er således hele året en nedadrettede hydraulisk gradient i moræneleren.

Trykniveau

Sprækkesystemer

De øverste 2 meter udgøres af fyldlag på grunden. Leraflejringerne mellem 2 og ca. 5 m.u.t. består af en forvitret morænelersenhed, der er mindre kompakteret. På baggrund af kendskabet til sprækkesystemet i moræneleren på en nærliggende tidligere gasværksgrund (Vestsjællands Amt, 1997) forventes der at være en relativ høj sprækkefrekvens af horisontale og vertikale sprækker i indtil 3,5-4 meters dybde på Vestergade 10. Dybere end 5 m.u.t. er moræneleren uforvitret og stærkere kompakteret. På baggrund af sprækkeopmålingerne på gasværksgrunden, forventes sprækkehyppigheden at være lav og domineret af vertikale sprækker dybere end 5 m.u.t. Yderligere forventes der at være et horisontalt sprækkesystem i dybere dele af morænelersenheden. Morænelerslaget forventes således at indeholde en til flere størrelsesorden(er) flere sprækker indtil ca. 5 meters dybde, end i den underliggende moræneler. Uden at en detaljeret hydraulisk karakterisering af moræneleren er udført på Vestergade 10-grunden vurderes den hydrauliske aktivitet at være størst i de øverste 2 til ca. 4 m.u.t. med en stærk aftagen tendens under 5 meters dybde, hvor hovedparten af stofspredningen antages at ske via få vertikale dybe sprækker. Denne fordeling bekræftes af, at hovedparten af den næsten 30 år gamle forurening stadig er begrænset til de øverste 2,5-5 meters dybde. Fundet af relativ høje koncentrationer af PCE i 8 meters dybde indikerer dog, at dybe sprækkesystemer er hydraulisk aktive.

Stofspredning

Et defekt kloakrørsystem anses for at være den primære spredningskilde for PCE forureningen på grunden (Vestsjællands amt, 1998a). Yderligere er dette medvirkende til en periodisk total vandmætning af de overfladenære jordlag i baggården.

9.4 Foreslået sprækkedesign på Vestergade 10

9.4.1 Sprækkestørrelse

Sprækkestørrelse

Forureningens hot spots på Vestergade 10 er lille i udbredelse (3 meter x 4 meter). Den største, der forekommer under det nordøstlige hjørne af renseribygningen, er omkring 4 meter i bredde og 6 meter i længde. Renseribygningens placering i forhold til de kendte hot spots, samt eksistensen af adskillige monitoringsboringer på grunden taler for, at der etableres inducerede sprækker med en lille diameter (4 meter) flere steder under renseribygningen samt en større sprække med en 5 meter diameter i baggården. Små sprækker kan bedre finde plads ind mellem og omkring disse mange forhindringer. Sprækkerne der passer med den begrænsede plads på grunden vurderes at være de mindst mulige der med fordel kan bruges til in-situ oprensningen på Vestergade 10. Etablering af en 6 meter stor sprække ville rimelig sandsynligt blive påvirket af såvel over- som underjordiske anlæg på lokaliteten, samt af bygningsfundamentet fra de tilstødende naboejendomme. Sprækker der dannes under baggården på Vestergade 10 kan blive større end dem der etableres under renseribygningen, grundet belastningstrykket på jorden fra bygningen.

Sprækkestørrelsesmodel

En ikke kommerciel sprækkestørrelsesmodel, der er udviklet af det amerikanske firma FRx, er baseret på input parametre, der er beskrevet i Murdoch (1993) og angivet i Tabel 7. Modelopsætningen er angivet i Bilag 5, hvor et eksempel på en beregning indikerer, at blandingsforholdet mellem sand og gelé vil være 200-250 kg sand opblandet i 200 liter gelé i en boremudder til etablering af en sandfyldt hydraulisk sprække i 3,5 meters dybde med en radius på 3,5 meter.

Tabel 7.

Beregningsparametre

Beregningsparametre til en ikke-kommerciel sprækkeudbredelsesmodel.

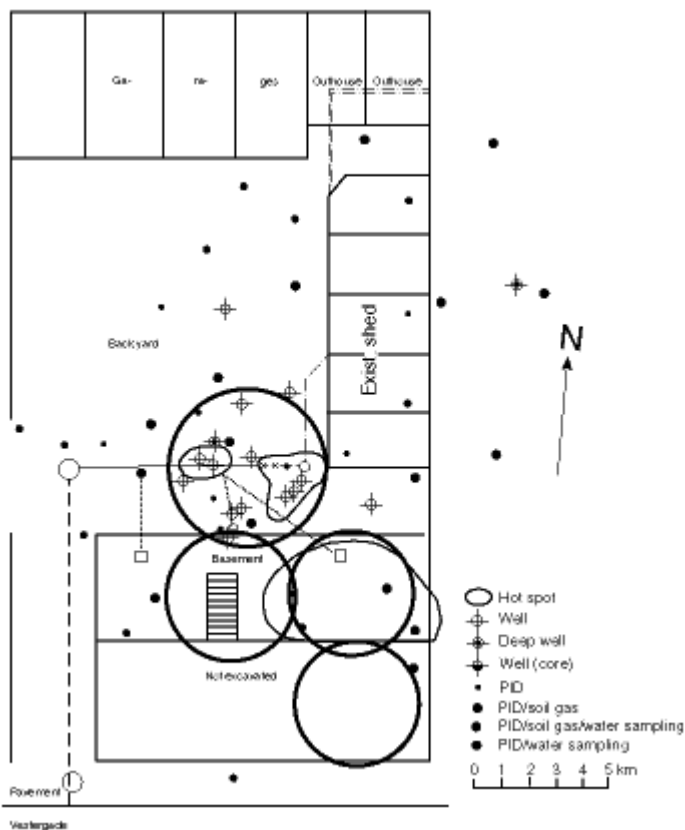
Jordens spændingstilstand (<i>Soil modulus</i>)
Poisson's forhold
Jordens sejhed (<i>toughness</i>)
Jordens densitet
Boringsdiameter
Lækagekoefficienten
Injektionsraten af boremudder
Viskositet af boremudder
Indholdet af sand og gelé i boremudder
Typisk kornstørrelse af sand
Injektionsdybde
Størrelse af indskæring (<i>Nucleation notch size</i>)

9.4.2 Sprækkelokalitet

Sprækkerne skal etableres på steder, hvor de får fat i mest mulig af den forurenede zone. Vestsjællands amt (1998a & b) har dokumenteret, at PCE forekommer i 2 hot spots fra 2,5 – 5 meters dybde. Poreluftmålinger og vandanalyser har vist, at forureningen optræder to steder under bygningen, dels under kældertrappen og dels under den sydøstlige krybegang. To inducerede sprækker etableres på hver af disse to lokaliteter i hhv. 3-3,5 m.u.t. og ca. 4,5 m.u.t., hhv. i baggården og under det nordøstlige hjørne af hovedbygningen på Vestergade 10. Den dybest liggende sprække skulle

blive placeret ved bunden af hot spotten, mens den anden placeres indenfor de mindre kompakterede øvre lerflejringer. Med en sådan placering kan den nedre sprække afskære den nedadstrømmende forurening samtidig med at grundvandsspejlet afsænkes, så en øget luftstrømning gennem leren kan opnås. Den øvre inducerede sprække placeres centralt i det mest forurenede område, så en oprensning af forureningen ved dobbeltfaseekstraktion kan optimeres.

Figur 9.2 viser et plansnit af Vestergade 10, hvor forureningsstedernes placering og de foreslåede inducerede sprækker er indtegnet. En særlig opmærksomhed er påkrævet ved placering af de inducerede sprækker i baggården til Vestergade 10. Sprækkerne skal etableres i en afstand af mindst en meter væk fra de eksisterende monitoringsboringer. Det vurderes at renseribygningen vil indvirke på de inducerede sprækkers udbredelse ved enten at bremse dens vækst i retning mod bygningen eller at afbøje retningen for sprækkens vækst langs bygningsfundamentets underside.



Figur 9.2
Foreslået placering af hydrauliske sprækker på Vestergade 10 i Haslev.

9.4.3 Boremethode og udbygning

De største hydrauliske sprækker (5 meter), der skal etableres i baggården i hhv. 3-3.5 m.u.t. og ca. 4.5 m.u.t., injiceres fra den samme vertikale boring med en diameter på 6” – 8”. Hvis det beslutes på baggrund af testforsøgene andet steds i baggården, at etablere en sprække i 8 meters dybde, bliver den ligeledes etableret fra denne boring. Alle øvrige hydrauliske sprækker (4 meter) bliver forsøgt etableret fra skråstillede individuelle 2”-boringer. Den generelle boringsudbygning af beskrevet i afsnit 2.5.

Vertikale og skråstillede boringer

Dobbeltfaseekstraktionen vil blive mest effektiv når vandspejlet i boringen kan afsænkes til dybden af den nederste inducerede sprække. I lighed med enkeltsprække-boringer skal pumper placeres i en sump under hver enkelt induceret sprækkezone for at opnå størst mulig effekt af dobbeltfase ekstraktionen.

9.4.4 Fraktureringsteknik

To testsprækker i hhv. 3 - 4,5 m.u.t. og ca. 8 m.u.t.

Det anbefales i det fjerneste hjørne af baggården - nær hundegården, at der etableres en testsprække i dybdeintervallet 3 – 4,5 m.u.t., som et testforsøg til demonstration af metodens anvendelighed på lokaliteten. Yderligere forsøges etableret en hydraulisk testsprække i 8 meters dybde, uden for det forurenede område i baggården til Vestergade 10 med det formål, at opnå lokalitetsspecifik erfaring for etablering af hydrauliske sprække i den nedre del af morænelersenheden på Vestergade 10. 8 meters dybde er det dybeste hvor subhorisontale sprækker har kunne etableres på lokaliteter i Nordamerika med analoge geologiske forhold, som beskrevet ved Haslev. Ved at etablere en testsprække i 8 meters dybde på et ikke forurenat sted på grunden, kan det bedre bedømmes, om det er formålstjenligt at etablere en sprække 8 meter under hot spot til afskæring af den dybe stofspreddning til kalken.

Det skal sikres, at ingen underjordiske rørføringer eksisterer i denne del af baggården. Begge testsprækker skal etableres med brug af en relativ højviskøs boremudder af guar gummi gelé og det størst mulige sandindhold der kan iblandes gelé. En sådan blanding skulle garantere, at den hydrauliske sprække kun breder sig få meter fra injektionspunktet. Den generelle fraktureringsteknik er beskrevet i afsnit 2.4.2.

9.4.5 Geotekniske undersøgelser

Til vurdering af mulige påvirkninger og konsekvenser for udførelse af den foreslåede oprensningmetode, skal vurderingen underbygges af geotekniske undersøgelser og rutineforsøg in-situ og i laboratoriet.

Geotekniske parametre der skal måles

På den aktuelle grund er det planlagt, at der udføres én dyb geoteknisk boring (geografisk begrænset, én ekstra boring havde været ønskelig), som har til formål at vurdere:

- Kohæsive aflejrings udrændede forskydningsstyrke.
- Friktionsaflejringeres karakteristiske friktionsvinkel.
- Lejringsstæthed i de trufne jordarter.
- In-situ rumvægten.
- Kornstørrelsesfordelingen i friktionsaflejringer.
- Porøsiteten.
- In-situ spændingen.
- Forkonsolideringsspændingen.

- Brudlasten.
- Bestemmelse af deformationsparametre (på længere sigt).
- OCR-værdien.
- Niveau specifikke vandspejl.
- Plasticitetsindekset, hvis ”bløde” aflejringer træffes (kolaps/svelning af sprækkezoner kan evt. opstå).
- Konsekvensen af evt. dynamisk påvirkning ved pulserende tryk.

Det skal understreges, at det er svært at generalisere resultater fra en boring og efterfølgende kvantificere skader eller skadeophobninger på baggrund af en boring.

Resultaterne af undersøgelserne forventes at underbygge oprensningens berettigelse (geoteknisk set), idet vi forud herfor, finder det nødvendigt, at der foretages en omhyggelig byggetekniske gennemgang af den berørte bygning.

Herudover skal der forinden foretages en detailregistrering af ledninger i området inkl. en vurdering af ledningernes tilstand, materialemæssigt (ledningsegenskaber, egenskaber vedrørende opfyldnings- og omkringfyldningsmaterialer), en vurdering af deres lægningsmiljø (inklusive lægningsklasse) og endelig alder for etablering / renovering, inklusive indmåling.

9.5 Sandsynligt resultat af etablering af inducerede sprækker

9.5.1 Forventet sprækkeform

De sprækker der foreslås etableret fra 3 til 4,5 meters dybde på Vestergade 10 i Haslev, forventes alle at blive orienteret subhorizontalt. Sprækkernes hældning vil være horisontal nær injektionsboringen og forventes at hælde længst fra injektionspunktet med 10° - 20° . Sprækkerne forventes at blive skålformede, med en mere elliptiske end cirkulære form. Forhold mellem ellipsens længste og korteste akser bliver henholdsvis 6 meter og 4 meter. Det vurderes, at den maksimale sprækkeapertur (under tryk med indhold af boremudder) vil være op til 1cm, mens den gennemsnitlige apertur vil være ca. 3 mm efter at boremudderet er væk fra den sandfyldte sprække.

9.5.2 Påvirkning af eksisterende anlæg på Vestergade 10

Hovedparten af områdets underjordiske gas-, el-, telefon- og vandledninger er ikke beliggende på de dele af Vestergade 10 grunden, hvor det er påtænkt at gennemføre fraktureringsaktiviteterne. De nævnte ledningsføringer er beliggende enten direkte under Vestergade eller under fortovet langs Vestergade i ca. 80 til 100 cm's dybde.

De inducerede sprækker forventes at få et forhold mellem apertur og sprækkelængde på 1 : 300. Dette forhold vurderes ikke at forvolde skader på stedets ledninger, da der er relativ stor afstand til de eksisterende ledningsføringer på grunden. Diverse ledningsføringer til selve hovedbygningen vurderes ikke at lide skade.

Kloaksystemet

Kloaksystemet, der er beliggende ovenpå de mest forurenede partier på grunden, har adskillige forgreninger i baggården. Det vurderes, at fraktureringsaktiviteterne nok ikke kan undgå at påvirke kloaksystemet. Blot håbes på, at kloakrørene kan tåle belastningen, men hvis skader skulle ske, skønnes det, at de skadede rørsektioner uden større besvær vil kunne udskiftes på grunden. Erfaringen viser desuden, at kloakrør i almindelighed er rimelig fleksible.

Hovedbygningen

Hovedbygningen, der huser rensriet, er en fleretages murværkskonstruktion. Kælderen under bygningen er mod nord udgravet (ståhøjde), mens den sydlige del udgøres af en krybekælder. Bygningen hviler på ydervæggene samt på en centralt placeret (øst-vest gående) bærende væg. Jorden under bygningen kan således inddeles i en nordlig og en sydlig del. En gennemgang af bygningens ydre og indre vægge viser ingen tegn på sætninger, dvs. ingen spor af fugning kunne ses på ydervæggene og de indvendige vægge stod frem som glatte uden revner. Summarisk vurderes det at bygningen er tung og velkonstrueret. En hvilken som helst beskadigelse af bygningen i forbindelse med fraktureringsaktiviteterne vil tydeligt stå frem som enkeltstående sprækker. Bygningen vil sandsynligvis blokere for sprækkernes udbredelse, da husets vægt i sig selv skulle være tilstrækkeligt til at afbøje sprækkerne. Husfundamentet antages at stikke dybt nok til at afskære en subhorisontal sprække der i 3 meters dybde forsøges dannet. Hvis dette er tilfældet vil boremuddret trænge op til jordoverfladen langs bygningens fundament. Uanset hvor lille risikoen vurderes at være for skader på bygninger og diverse rørføringer som følge af induktionen af hydrauliske sprækker, så installeres der et varslingsystem på Vestergade 10 grunden.

Varslingsystem

Et varslingsystem bør bestå af installation af forskellige elektroniske sensorer. Belastningsmålere (*strain gauges*) placeres på kritiske steder på bygningskonstruktionen og over underjordiske rørføringer. Eksisterende monitoringsboringer kan fyldes med vand og transducere til måling af væsentlige vandspejlsændringer. Tiltmetre kan benyttes til måling af jordoverfladens deformation. De hér foreslåede hydrauliske sprækker vurderes ikke at forstyrre jorden i en afstand på mere end fem meter fra injektionspunktet. Det vil ikke være muligt at foretage et standard nivellement på grunden før, under og efter fraktureringsaktiviteterne grundet de mange blinde hjørner på grunden.

Øvrige bygninger

De øvrige bygninger på lokaliteten er af en letvægts-konstruktion og ingen af dem kommer til at ligge oven på de påtænkte fraktureringssteder. Som følge heraf vurderes der ingen påvirkning at være på disse bygninger som følge af fraktureringsaktiviteterne.

9.6 Sammenfatning

Horisontalt liggende sprækker kan med stor sandsynligvis blive etableret på Vestergade 10 i Haslev i dybder fra 3 – 4,5 m.u.t. Det er dog mere uvist om en eventuelt etableret hydraulisk sprække i 8 meters dybde bliver mere stejltstående. Vurderingen bygger på, at jordens beskaffenhed og forureningens karakter på Vestergade 10 minder meget om de erfaringer der er gjort på flere nordamerikanske lokaliteter. Der har horisontalt inducerede sprækker kunne etableres ved hydraulisk frakturering til mindst 5 meters dybde, hvilket er det primære dybdeintervallet på Vestergade 10, der ønskes dækket med hydrauliske sprækker.

Bygninger, samt ledningsføringer under jorden, gør det ikke muligt at etablere en enkelt sprække af en størrelse der kan dække hele den horisontale udstrækning af forurening. Derfor anbefales det, at etableret 4 x 2 mindre sprækker med størrelser på 4 – 5 meter i diameter fra flere injektionsboringer. Etableringen af et system med flere sprækker tjener yderligere til formål, at optimere de hydrauliske designparametre der skal bestemmes på stedet så dobbeltfaseekstraktion bliver optimalt udnyttet. Det forventes ikke, at sprækkerne udvikler sig ensartet i alle retninger fra injektionspunktet (dvs. cirkulært eller ellipsoidalt) under renseribygningen. Heldigvis vil mindre sprækker dog mindske risikoen for skader på bygninger og ledningsføringer ved at etablere inducerede sprækker med en lille diameter (4 meter) under bygningen. Hydrauliske sprækker med en størrelse på 4-5 meter synes at passe godt til den kendte udstrækning af forureningen.

Forventet effektforbedring

Dobbeltfase ekstraktion af PCE-forurening fra hydrauliske sprækker forventes, at forbedre effekten af in-situ oprensning i sammenligning med oppumpning fra almindelige vertikale boringer. Følgende forhold vil forbedres: For det første øges influensradius betydeligt i de lavpermeable aflejringer. Til sammenligning skal nævnes, at på alle de amerikanske lokaliteter, hvor strømmingen til eller fra hydrauliske sprækker er blevet målt, blev influensradius større end radius af sprækken (ofte 3 gange større). En korttidstest med SVE udført i 1998 (Vestsjællands amt, 1998a) viste influensradius på mindre end 4 meter (boring B12 til B10), hvilket er langt mindre end hvad må forventes at blive målt fra de foreslåede hydrauliske sprækker. For det andet bestemtes en meget lille strømningshastighed i moræneleren i Haslev under både de kort og længerevarende pumpetests, så det forventes at pumpeydelsen bliver forbedret væsentligt. En lokalitet i USA hvor pumpeydelsen blev sammenlignet mellem anvendelsen af almindelige boringer med anvendelsen af boringer med hydrauliske sprækker steg ydelsen med en størrelsesorden efter etablering af sprækkerne. For det tredje skal forureningens udbredelse under renseribygningen nævnes, da almindelige boringer placeret ved siden af huset vil have vanskeligt ved at "nå" forurening i modsætning til inducerede sprækker. Endelig forventes en bred sænkingskegle i den umættet zone at kunne etableres med et optimalt design af sprækkerne. Derved kan store volumener af forurennet poreluft pumpes fra den umættede zone. På Linemaster Superfund lokaliteten i USA viste en lignende løsningsmodel med etablering af hydrauliske sprækker stor effektivitet i forhold til effekten af almindelige boringer, der viste meget ringe effekt (Hart, 1997). Det kan på denne baggrund konkluderes at hydrauliske sprækker med fordel kan tages i anvendelse på Vestergade 10 i Haslev.

10 Økonomisk analyse

Prisen for etablering af inducerede sprækker ved hydraulisk og pneumatisk frakturering er ens. Stykprisen for en induceret sprække viser erfaringsmæssigt, at være stærkt afhængig af flere forhold, hvor den mest betydelige er bestemt af antallet af sprækker der skal etableres i den enkelte boring. Det anføres yderligere, at specielle krav fra klienten samt i hvor høj grad klienten ønsker at være involveret i projektet kan virke betydelig ind på sprækkeprisen. EPA (1993a) har opgjort engangsudgifter, daglige driftudgifter, samt stykprisen for en hydraulisk sprække, som angivet i Tabel 8. Det ses at stykprisen for en sprække varierer mellem 950 og 1425 US\$. Den totale daglige driftudgift er opgjort på baggrund af etablering af 4 til 6 sprækker.

Tabel 8.

Økonomisk oversigt for udgifterne ved hydraulisk frakturering (EPA, 1993a).

Økonomisk oversigt

Omkostningstype	Dagspris (US\$ i 1993 priser)
Klargøring af areal	1000
Tilladelser og myndighedskontakt	5000
Afskrivning af udstyr	1000
Opstart	0
Løn	2000
Udstationering	1000
Behandling af luft og vand	0
Analyser og monitorering	700
Demobilisering	400
<i>I alt engangsudgift</i>	5400
<i>I alt daglig drift</i>	5700
<i>Pris pr. sprække</i>	950 til 1425

Pris pr. sprække

I Bilag 3 er vist en jobliste fra det amerikanske firma FRx's projektaktiviteter igennem de seneste 5 år (1995-1999). For hvert projekt er angivet en relativ pris pr. sprække, idet der skelnes mellem en lav pris (< 1.500 US\$), en medium pris og en høj pris (> 2.500 US\$). Det ses af Tabel 9, at pris pr. sprække for kommercielle SVE- og bioremedieringsprojekter erfaringsmæssigt er lav til medium, mens pris pr. sprække på forskningspilotprojekter ikke overraskende bliver høje.

Tabel 9.*Sammenstilling af udvalgte informationer fra Bilag 3.*

Lokalitet	Antal Dybder/ Sprækker/boring er	Oprensningsmetode	Pris pr. sprække Lav < 1500 US\$ 1500 US\$ < Med. < 2500 US\$ Høj > 2500 US\$
Lima, Ohio	3 / - / -	SVE – benzintank	Lav
Sarnia, Ontario	- / flere / -	DNAPL - forskning	Høj
Univ. Heights, Ohio	flere / ca. 25 / 9	SVE - benzintank	Lav
Oakfield, Maine	- / 14 / -	benzin / SVE	Medium
Macedonia, Ohio	flere / 15 / flere	SVE	Medium
Denver fed. Center	- / flere / 2	Bioremediering, Isolite ^R	Lav
Linemaster, CT	3-11m/ 21-35/7	DPE	Medium
Lasagne Proj., OH	- / - / -	Elektrosmose- forskning	Høj
Portsmouth, OH	1-5m/10/10	Barrierer-forskning	Høj
Offutt AFB	-/-/-	Barrierer-forskning	Høj
Foremost Solutions	-/-/-	Biorem., Bionets ^R	Lav
Birmingham, AL	flere/80-90/40-50	LNAPL oppumpning	Lav

11 Referencer

ARS (1999). <http://www.arstechnologies.com/>.

Carter, R.D. (1957). Appendix to "Optimum fluid characteristics for fracture extension", af G.C. Howard and C.R. Fast, Drill. And Prod. Prac., API, 267.

Davis-Hoover, W.J, Murdoch, L.C. og Vesper, S. (1991). Hydraulic fracturing to improve nutrient and oxygen delivery for in-situ bioremediation. First International Symposium on In-situ and On-Site Bioreclamation, San Diego, CA, April 1991.

Davis, P.M.(1983). Surface deformation associated with dipping hudrofracture. J. Geoph. Resour. 88:5, 826-5,834.

Du, Y., Aydinm, A. og Murdoch L.C. (1993). Incremental growth of shallow hydraulic fracture at a waste remediation site,. 34th Symposium on Rock Mechanics, Madison, WI (June).

EPA (1991). The feasibility of hydraulic fracturing of soil to improve remedial actions. Final report. EPA/600/2.91/012 (NTIS PB91-181818).

EPA (1993a). Hydraulic fracturing technology: Applications analysis and technology evaluation report. EPA/540/R-93/505

EPA (1993b). Accutech pneumatic fracturing and hot gas injection, Phase I. Technology deminstration summary. EPA/540/SR-93/509.

EPA (1994). Alternative methods for fluid delivery and recovery. EPA/625/R-94/003.

EPA (1998). Steam injection for soil and aquifer remediation. EPA/540/S-97/505.

Ernstsen, V. (1998). Clay minerals of clayey subsoils of Weichselain Age in the Zealand-Funen area, Denmark. Bulletin of the Geological Society of Denmark, Vol. 45, pp. 39-51. Copenhagen, 1998-09-25.

FRx (1999). Internetadresse: <Http://www.frx-inc.com/>

Gates, D.D. og Siegrist, R.L.(1995). In-situ Chemical Oxidation of Trichloroethylene Using Hydrogen Peroxide. *J. Environmental Engineering.* 121(9): 639-644.

GEUS (1998). National vandressource model. Sjælland, Lolland, Falster og Møn. 1998/109. <http://www.vandmodel.dk/>.

Hansen, B. (1978). Geoteknik og fundering, Del I. Polyteknisk forlag.

Hansen, J. Brinch (1961). A general formula for bearing capacity. GI-Bulletin No. 11.

- Harremoës, P, Ovesen, N.K og Jakobsen, H.M. (1994). Lærebog i geoteknik. 3.reviderede udgave. Polyteknisk forlag
- Hart, P.H. (1997). Dewatering and Soil Vapor Extraction Using Hydraulic Fractures, Master Thesis, University of Cincinnati, Cincinnati OH USA,1997.
- Ho, S.V., Sheridan, P.W., Athmer, C.J., Heitkamp, M.A., Brackin, J.M., Weber, D. og Brodsky, P.H. (1995). Integrated In-situ soil remediation technology: the lasagna process. *Environmental Science Tech.*, 29 (10), 2528-2534.
- Hubert, M.K. og Willis, D.G. (1957). Mechanics of hydraulic fracturing. *Trans. AIME*, Vol. 210, pp. 153-166.
- Jones, L. (1999). Fracpacking horizontal wells allows ultra-high rates from mediocre formations. *Petroleum Engineer International*, 37-40 (Juli).
- Ladd, C.C. og Foott, R. (1974). New design procedures for stability of soft clays. *ASCE*, Vol. No. 100, GT/, 763-786.
- Mackay, D.M. og Cherry, J.A. (1989). groundwater contamination: Pump-and-treat remediation. *EST*, 23(6):620-636.
- Miljøstyrelsen (1996). Barriers to development and application of new remedial technology. *Soil and groundwater project no. 21*.
- Morgenstern, N.R. og Vaughan, P.R. (1963). Some observations on allowable grouting pressures. In: *Grouts and drilling muds in engineering practice*, Butterworths, London.
- Murdoch, L.C., Losonsky, G., Klich, I. og Cluxton, P. (1990). Hydraulic fractures to increase fluid flow. *Contaminated Soil '90*, ed. F.Arendt, M. Hinsfeld and W.J. van der Brink, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1087-1094.
- Murdoch, L.C. (1993). Hydraulic Fracturing of Soil During Laboratory Experiments, Part III: Theoretical Analysis. *Geotechnique*, 43 No 2, 277-287.
- Murdoch, L.C. (1997). Hydraulic fracturing – an innovative technology for enhancing the extraction of volatile pollutants from low permeables. *ATV-Vintermøde*, 11-12 marts 1997. Vingstedcentret. (Foredrag).
- Murdoch, L.C. og Chen, J.-L. (1997). Effects of conductive fractures during in-situ electroosmosis. *J. Hazardous Mat.*, 55, 239-262.
- Murdoch, L., Slack, W., Siegrist, B., Vesper, S. og Meiggs, T. (1997). Hydraulic Fracturing Advances. *Civil Engineering*. Am. Soc. Civil Eng. May 1997. pp. 10A-12A.
- Nolte, K.G. og Smith, M.B. (1981). Interpretation of fracturing pressures. *J. Petr. Tech.*, *Trans. AIME*. 1767-1775.
- O'Hannesin, S.F. og Gillham, R.W. (1998). Long-term performance of an in-situ "Iron Wall" for remediation of VOC's. *Groundwater*. 36(1): 64-170.

- Ovens, J.E.V., Larsen, F.P. og Cowie, D.R. (1998). Making sense of water injection fractures in the Dan Field. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Dec. 1998.
- Perkins, T.K. og Kern, I.R.(1961). Widths of hydraulic fractures, J. Pet. Tech., Trans. AIME, Vol. 222.
- Schuring, J.R. og Chan, P.C. (1992). Removal of contaminants from the vadose zone by pneumatic fracturing. NTIS PB92-161207, Reston, VA: U.S. Geological Survey, Water Resources Division (January).
- Schroeder, S., Mckenzie, D. og Murdoch, L.C. (1992). Soil vapor extraction from hydraulic fractures in glacial till: initial field testing in Chicago, Illinois. Air and Waste Management Conference, Kansas City, MO, June 21-26, 1992.
- Shapiro, A.P. og Probst, R.F. (1993). Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis. Environmental Science Technology, 1993, 27, 283-291.
- Sidle, R.C., Nilsson, B., Hansen, M. og Fredericia, J. (1998). Spatially varying hydraulic and solute transport characteristics of a fractured till determined by field tracer tests, Funen, Denmark. Water Resources Research, 34(10), 2515-2527.
- Siegrist, R.L., Lowe, K.S., Murdoch, L.C., Case, T.L., Pickering, D.A. og Houk, T.C. (1998a). Horizontal Treatment Barriers of Fracture-Emplaced Iron and Permanganate Particles. Proc. Treatment Walls and Permeable Reactive Barriers. 1998 Special Session of the NATO/CCMS Pilot Study on Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater. EPA 542-R-98-003. May 1998. pp. 77-82.
- Siegrist, R.L., Lowe, K.S., Murdoch, L.C., Slack, W. og Houk, T.C. (1998b). X-231A Demonstration of In-situ Remediation of DNAPL Compounds in Low Permeability Media by Soil Fracturing with Thermally Enhanced Mass Recovery or Reactive Barrier Destruction. Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/TM-13534. March 1998.
- Siegrist, R.L., Lowe, K.S., Murdoch, L.C., Case, T.L. og Pickering, D.A. (1999). *In-situ* Oxidation by Fracture Emplaced Reactive Solids. *J. Environmental Engineering*. Am. Soc. Civil Eng. May 1999.
- Smith, M.B., Miller, W.K. og Haga, J. (1987). Tip screenout fracturing: A technique for soft unstable formations. SPE Production Engineering. 2:95-103.
- Snow, D.T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. Water Resources Res., 5, 1273-1289.
- Sun, R.J.(1969). Theoretical size of hydraulically induced fractures and corresponding surface uplift in an idealized medium. J. Geoph.ys. Resour. 74:5,995-5,6,011.
- Vesper, S. J., Murdoch, L.C., Hayes, S. og Davis-Hoover, W.J. (1994a). Solid oxygen source for bioremediation in subsurface soils. J.Haz.mat. 36: 265-274.

Vesper, S.J., Narayanaswamy, M., Murdoch, L.C. og Davis-Hoover, W.J. (1994b). Hydraulic fracturing to enhance in-situ bioreclamation of subsurface soils. In: Hinchey, R., Anderson, D.B., Metting, F.B., Sayles, G.D. (eds.), Applied biotechnology for site remediation. Lewis Publishers. Boca raton, FL. USA. pp. 36-48.

Vestsjællands Amt (1997). Sprækker i moræneler ved Haslev. Undersøgelse af sprækkers optræden. Opridelse og udbredelse af tjæreforurenet grund i Haslev (tidligere Haslev Gasværk). GEUS, rapport 1997/154 Udarbejdet for Natur & Miljø, Vestsjællands Amt.

Vestsjællands Amt (1998a). Rekord Rens, Vestergade 10, Haslev. Skitseprojekt, Afrapportering af fase 1-3, maj 1998. Nellemann, Nielsen & Rauschenberger. Udarbejdet for Natur & Miljø, Vestsjællands Amt.

Vestsjællands Amt (1998b). Rekord Rens, Vestergade 10, Haslev. Skitseprojekt, Afrapportering af fase 4, juli 1998. Nellemann, Nielsen & Rauschenberger. Udarbejdet for Natur & Miljø, Vestsjællands Amt.

Waltz, J.P. og Decker, T.L. (1981). Hydro-fracturing offers many benefits. Johnson Drillers J. 53:4-9.

Wang, T., Stodt, J.A., Stierman, D.J. og Murdoch, L.C. (1991). Mapping hydraulic fractures using a borehole-to-surface electrical resistivity method. In: B.K. Sternberg, M.M. Poulton and M.J. Sully (Editors), Int. Symp. On Borehole Geophysics method: petroleum, Hydrogeology, Mining and Engineering Applications. Geoexploration, 28: 349-369.

Whiting, T., Slack, W. og Murdoch, L.C. (1998). Dual-Phase Extraction with Hydraulic Fractures at a Superfund Site. First International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey CA USA, May 1998. Konference-artikel findes på hjemmeside: www.frx-inc.com

Wolf, A. og Murdoch, L.C. (1993). A field test of the effect of sand-filled hydraulic fractures on air flow in silty clay till. Proceedings of the Seventh national Outdoor Action Conference, Las Vegas, NV (May).

Bilag 1. Måleenheder og omregningstabel af tryk

	Pa	bar	Atm	mmHg	psi
1 Pascal (Pa) (= 1N/m ²)*	1	1 x 10 ⁻⁵	9,669 x 10 ⁻⁶	0,007501	1,45 x 10 ⁻⁴
1 bar	1 x 10 ⁵	1	0,9869	750,1	14,50
1 atmosfære (atm)	1,01325 x 10 ⁵	1,013	1	760	14,70
1 mmHg	133,3	0,001333	0,001316	1	0,01934
1 pound per square inch (psi)	6895	0,06895	0,06895	51,72	1

*1 MPa = 1 000 000 Pa, 1 KPa = 1 000 Pa

Bilag 2. Eksempler på inducerede sprækkers effekt på oppumpning ved forskellige anvendelser (fra EPA, 1994).

Lokalitet	Formål	Injektionsfluid	Antal sprækker / lodret boring	Formations type	Resultat uden sprækker	Resultat med sprækker	Øget effekt af Induceret sprække / uden sprække
<u>Miljømæssig anvendelse</u>							
Dayton, OH	Bioremediering	Gel + vand	4	Glacialt siltet ler	0.14-0.57 L/min m	18-33 L/min m	50-100
Beaumont, TX	Liquid recovery	Gel + vand	2	Svællende ler	0.0027 L/min m	0.13 L/min m	50
Beaumont, TX	LNAPL oppumpning	Gel + vand	2	Svællende ler	0.0024 L/min m	0.046 L/min m	19
Center Hill Site, Cincinnati, OH	Air recovery	Gel + vand	1	Glacialt siltet ler	3.34 L/min m _{H2O}	67 L/min m _{H2O}	20
Xerox Oak Brook, Chicago, IL	Soil Vapour Extraction	Gel + vand	3	Glacialt siltet ler	4.4 L/min m _{H2O}	56-135 L/min m _{H2O}	22
Cincinnati, OH	Dampinjektion	Gel + vand	1	Glacialt siltet ler	<0.0019 kg/min m _{H2O}	0.055-0.066 kg/min m _{H2O}	30+
Frelinghuysen, NJ	Air recovery	Luft	2	Glacialt siltet ler	6.6-11 L/min m _{H2O}	87-204 L/min m _{H2O}	13-19
Newark, NJ	Air recovery	Luft	2	Sandsten	27-113 L/min m _{H2O}	397-580 L/min m _{H2O}	5-14
Bristol, TN	DNAPL + vand	Vand	2	Sedimentær bja.	0.32-0.98 L/min m	1.6-2.7 L/min m	2.8-6.2
<u>Olieindustri anvendelse</u>							
California	Olieoppumpning	Gel	1	Reservoirbja.	20 bopd	120 bopd	6
California	Olieoppumpning	Gel	1	Reservoirbja.	10 bopd	70 bopd	7
Alaska	Olieoppumpning	Gel	1	Reservoirbja.	1128 bopd	1584 bopd	1
Texas	Olieoppumpning	Gel	1	Reservoirbja.	6 bopd	65 bopd	10.8
Texas	Olieoppumpning	Gel	1	Reservoirbja.	50 bopd	130 bopd	2.6
Texas	Naturgas	Gel	1	Reservoirbja.	15 bopd	1100 mcf	73
West Virginia	Naturgas	Gel	1	Reservoirbja.	3.5 bopd	66.1 mcf	19
<u>Vandforsyningsanvendelse</u>							
New Hampshire	Vand	Vand	1	Grundfjeld	18 L/min	109.2 L/min	6
New Hampshire	Vand	Vand	1	Grundfjeld	68.4 L/min	68.4 L/min	4.4
Massachusetts	Vand	Vand	1	Grundfjeld	11.4 L/min	11.4 L/min	22-25
Australia	Vand	Vand	1	Grundfjeld	13.2 L/min	13.2 L/min	6.9

Resultatet målt som flowrate eller flowrate/afsækning day

bopd: barrels of oil per day (tønder olie pr. dag)

mcf: millions of cubic feet of gas per

1 m_{H2O} head = 1.42 psi

6 Bilag 3. FRX Fracturing Experience

General notes:

Geology: All soils were clay or silty clays. Most soil was of glacial origin, except as noted.

Costs: Many factors influence the charges for fracturing. For instance, client preferences and the degree of our involvement in other aspects of each project are reflected in final charges. Also, economies of scale strongly impact the significance of mobilization charges. In order to preserve confidentiality, isolate the cost of creating fractures, and eliminate gross variations in scale, the following table assigns costs as high, medium, or low. For purposes of discussion, low should be considered as <\$1500 per fracture while high is >\$2500 per fracture.

Client, Location, and Date	Project Description
<ul style="list-style-type: none"> ● Hull & Associates and B. P. Oil Co. ● Lima, Ohio ● August, 1994 	<p>Fractures were created at three depths in a pilot test well at the site of a former gasoline station. The remediation contractor reported that flow rates in an SVE pilot test were enhanced by more than an order of magnitude in the presence of the fractures and that the lower fracture served to control water level in the vicinity of the well.</p> <p>Contact: Nancy P. Kiernan BP Oil Co. 200 Public Square Cleveland, Ohio 44114-2375 (216) 586 8833, FAX 216 586 8222</p> <p>Costs: Low</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● American Petroleum Institute, US Department of Energy, Oregon Graduate Institute, University of Waterloo, and 	<p>Several fractures were installed to provide systems for various research programs conducted under the auspices of the University of Waterloo. One fracture, of particular interest, was installed in a 10 m by 10 m isolation cell that was constructed of sheet piling driven 10 m into the earth. The cell provided a field-scale laboratory for studying the migration of nonaqueous phase liquids that were</p>

<p>B. P. Oil Co.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Sarnia, Ontario ● August, 1994 	<p>intentionally spilled on the ground surface in the cell. The fracture was created well below the known water table in this very extensively characterized system. Its purpose was to control the water level in the cell, thus facilitating studies of NAPL movement. It also served as a hydraulic barrier against sinking DNAPL. The principal investigator of the test area reported that the fracture operated as planned.</p> <p>Contact:</p> <p>Terry Walden BP Research Warrensville Research & 4440 Warrensville Center Road Cleveland, Ohio 44128-2837 216 586 5590, Fax 216 581 5406</p> <p>Costs: Because of the research flavor of the project, costs may not be representative of a commercial application. Otherwise there were no special factors that would increase the cost of fracturing.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● Alta Consulting Corp. and Premier Restaurant Management Company ● University Heights, Ohio ● October, 1994 	<p>Hydraulic fractures were created to enhance SVE remediation at the site of a former gasoline station. Two or three fractures, depending on depth to bedrock, were created at nine locations across the site. Access points to the fractures were completed below grade to allow imminent erection of a restaurant on the location. Remediation activities have been in abeyance since discovery of a previously undocumented UST on the property.</p> <p>Contact:</p> <p>John Blackman Alta Consulting Corporation 4 Corporation Center Drive Broad View Heights, Ohio 44147 216 838 0550 Fax 216 838 0528</p>

Costs: Fracturing at the site was constrained by its small size and multiple concurrent construction activities. Nonetheless, the project was representative of a low cost, turn-key type project.

- State of Maine Department of Environmental Resources
- Oakfield, Maine
- September, 1994

Fourteen fractures were installed along the perimeter of a parcel of land adversely affected by fuel spills from a gasoline station and fuel storage yard that was located up-hill and up-stream of the site. The effort showed that suitable fractures could be created in Maine, even though the soil was considerably more poorly sorted than any other location. Some of the fractures were installed within a triangle formed by three pre-existing, conventionally completed SVE pilot wells. Although the pilot wells were not significantly affected by the presence of the fractures, the wells from which the fractures were created exhibit substantial (probably 10x) increase in air flow. Another of the fractures produced water with a heavy sheen of oil, whereas a monitoring well in the same vicinity had not indicated presence of contaminants.

Contact:

Paul Blood
Maine Dept. Environmental Protection
106 Hogan Road
Bangor, Maine
04401
207 941 4570, FAX 207 941 4584

The remote site location in northern Maine increased mobilization charges as well as freight charges for sand. Water was retrieved from a local bog, which necessitated careful review of its compatibility with gel. After accounting for these factors, project cost can be characterized as medium.

- Earth Sciences Consultants, Inc. and Specialty Chemical Resources, Inc.
- Macedonia, Ohio
- December, 1994

SVE pilot tests with a single hydraulic fracture confirmed ability of fractures to extend radius of influence of extraction wells from a few feet to dozens of feet. Subsequently, fourteen hydraulic fractures, both above and below the water table, were created along the perimeter of an area subjected to repeated spills of commercial solvents. The project objective was to establish complete hydrological control of the area by as few wells as possible. The project was executed on a tight time table to facilitate construction of a new overlying building. Approval for the remediation system was obtained from the Ohio EPA in the spring of 1996. A required NPDS permit from the local sewer authority is expected in April of 1997.

Contact:

Mark Elicker
Earth Sciences Consultants Inc.
(330)535-6966
3575 Forrest Lake Drive
Uniontown, Ohio
44685
(330)535-6966

Costs: Despite a tight time frame, project costs can be considered as medium.

-
- Foremost Solutions and GSA
 - Denver Federal Center
 - June 1995
- Hydraulic fractures were created with Isolite[®] a manufactured porous solid that served as a transport for microbes cultured for efficient bioremediation. Fractures were created at two locations in surficial soils and weathered bedrock contaminated with cutting oils. Biological activity at one location was stimulated by periodic addition of nutrient solutions and injection of air. At both locations, TPH concentrations in samples at several depths decreased from ~3000 ppm to ~200 ppm in 5 months.

Seth Hunt
Foremost Solutions
350 Indiana St
Suite 415
Golden, Colorado
80401
303 271 9114, Fax 303 278 0624

Costs: Other than the use of a specialty proppant, fracturing costs were low.

-
- Linemaster Switch Corp.
 - Woodstock, CT
 - October - December, 1995
- This Superfund site resulted from the disposal of machining oils and solvents in a dry well. The hydrocarbons penetrated the underlying 40 feet of clay soil and entered a weathered bedrock system that serves as drinking water aquifer for the surrounding area. Pump and treat operations have managed to stabilize the aquifer plume, but the contaminated clay soils act as a persistent source. Attempts to remediate the clay by SVE were foiled by low permeability and high water content. A two well pilot was performed to demonstrate the enhancements effected by hydraulic fracturing.
-

The test showed that fractures could assist SVE recovery by dewatering the clay and extending the radius of influence of the wells. Full scale installations are planned for the summer and fall of 1996.

Contact:

Gary Kennett
Linemaster Switch Corp.
29 Plaine Hill Road
Woodstock, CT
06281
680 974 1000 Fax 860 974 1533

Costs: The Superfund status of the site increased the degree of oversight and planning and logistical activities. The greater depth of contaminated soil, when compared to sites discussed above, permitted creation of larger fractures, which consumed commensurably more material. The convenient location and availability of resources diminished costs of the project. In aggregate, representative fracture costs were medium.

-
- US EPA, Lasagna Program
 - Rickenbacker ANGB, Columbus, OH
 - July - December 1996
- Electro kinetics, which perform better in finer pore media, offer a opportunity to mobilize contaminants in tight clay soil that do not permit substantial hydraulic or pneumatic flow. Hydraulic fractures filled with conductive material, such as graphite, serve as horizontal, plate-like electrodes for in situ electrokinetic processes. Contaminants in between the electrodes can be mobilized and driven to intermediate fractures that can be completed as collectors or filled with agents to destroy the contaminants. Techniques for creating suitable fractures have been worked out, and several means of treating chlorinated solvents, such as biodegradation or iron catalyzed dechlorination , will be tested at the site.

Contact:

Mike Roullier
US EPA
5995 Center Hill Road
Cincinnati, OH
45224
513 569 7206

Costs: More expensive propants must be used. Even without the research nature, cost must be considered to be high.

- US DOE, Oak Ridge National Lab, Martin Marietta Energy Systems
- Portsmouth Uranium Enrichment Plant, Piketon, Ohio
- July - September, 1996 and July - September, 1997

A TCE plume is available for demonstrations and tests of innovative and enhanced technologies in low permeability media. Target soil is a ~20 ft thick surficial clay unit. The current year project will test four technologies, all of which will utilize hydraulic fractures as enhancements. Steam and hot air will be injected into sand filled fractures while adjacent fractures are connected to conventional SVE or pump and treat systems. Extensive temperature measurements will permit estimates of efficiency of the processes. Two in situ chemical processes will be tested at other locations at the site. Fractures will be created with iron and with encapsulated permanganate to test iron catalyzed reduction of chlorinated hydrocarbons and to test destructive oxidation of contaminants.

Contact:

Bob Seigrist
Oak Ridge National Lab and
Colorado School of Mines
1500 Illinois
Golden CO 80401
(303) 273 3490

Costs: Security and health concerns substantially inflated costs of this project. Otherwise, fracturing costs would be low.

- University of Waterloo
- Test Facility, Sarnia ON
- July 1996

Multiple hydraulic fractures were installed for use in various research projects concerning fluid flow in the subsurface. Some fractures were created using directional techniques to manipulate the shape and orientation of the fracture.

Contact:

Prof. Dave Rudolph
Department of Earth Sciences
University of Waterloo
Waterloo, Ontario

Canada
(519) 888 4567 x6778

- US Air Force
- Offutt AFB
- June 1995

Hydraulic fractures were successfully created to demonstrate feasibility of fracturing in clay and silt soils at the base. Soils are lacustrine with strong bedding. Nearly perfectly symmetrical fractures were formed. The site is being considered for the EPA Lasagna program

Contact:
Jennifer Rock
55CES/CEVR
106 Peacekeeper Drive
Suite 2N3
Offutt AFB, NE
68113-4019

Costs: More expensive propanants must be used. Even without the research nature, cost must be considered to be high.

- Foremost Solutions
- U-Pump-It, Lakewood, CO
and
Mustang Gas, Grand Junction, CO
- October 1997

Hydraulic fractures were created with porous granules that were inoculated with selected bacteria. The resulting structures, which are known as Bionets.®, have reduced soil and groundwater concentrations of gasoline compounds at the sites.

Seth Hunt
Foremost Solutions
350 Indiana St
Suite 415
Golden, Colorado
80401
303 271 9114, Fax 303 278 0624

Costs: Other than the use of a specialty propanant, fracturing costs were low.

<ul style="list-style-type: none"> ● Linemaster Switch, Corp ● Woodstock, CT ● November 1996 - August 1997 	<p>See description of Linemaster site, above.</p> <p>Full scale implementation of fracturing was implemented during two deployments in 1996 and 1997. A fracture testing program was developed to provide quantitative assessment of the created fractures. Monitoring of process function was augmented by emplacement of TDR sensors designed and installed by FRX. The project was the subject of a platform presentation at the 1st Annual Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds at Monterey, CA, May 14- 20, 1998.</p> <p>Contacts: See above.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● US DOE, Oak Ridge National Lab, Lockheed Martin Energy Systems ● Portsmouth Uranium Enrichment Plant, Piketon, Ohio ● 1998 	<p>Following the results the 1996 and 1997 tests at the site (see above) in situ destruction by potassium permanganate was selected for application in adjacent locations. Potassium permanganate fractures were created in and below a back-filled section of landfill that was contaminated with TCE and petroleum hydrocarbons.</p> <p>Contacts: see above</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● Applied Engineering Science, Atlanta GA ● CSX Railyard, Birmingham, AL ● 1997 & 1998 	<p>Several feet of diesel fuel has been observed in monitoring wells in an abandoned railyard near downtown Birmingham. Hydraulic fractures created around recovery wells have improved the rate of recovery by a factor of 6. Several dozen fractures have been installed across an area amounting to six city blocks.</p> <p>Dave Butler Applied Engineering Science 2261 Perimeter Park Drive Atlanta, Georgia 30341 770 454 1810 Fax 770 454 1816</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● Foremost Solutions, Inc & AGRA Earth & Environmental & New Mexico Dept of Transportation 	<p>Gasoline leaks and spills from USTs migrated fifty feet downward and several hundred feet laterally. Hydraulic fractures were created with porous granules that were inoculated with selected bacteria, creating structures that are known as Bionets[®].</p>

- Continental Divide, NM

Contacts: see above &

- 1998

Bob Wilcox
AGRA Earth & Environmental
Albuquerque, NM
505 821 1801 Fax 505 821 7371

Bilag 4.1 Beregning af Sprækkelængde og -bredde

Beregning af sprækkelængden (L) og sprækkebredden (b) udfra ligning (1) og (2). Se afsnit 3.4 i teksten.

$$L = (Q t^{1/2}) / (\pi b C) \quad (1)$$

hvor Q er injektionshastigheden, t tiden for injektionen varighed, b er sprækkens apertur og C er lækage koefficienten. C kan udtrykkes ved ligning (2):

$$C = 0,049 (K \mu^{-1} (\Delta P)^n)^{0,5} \quad (2)$$

Hvor K er den hydrauliske ledningsevne af formationen, μ er væskens eller gassens viskositet, ΔP er injektionstrykket korrigeret for atmosfæretryk og n er porøsiteten.

Inputparametre ved injektion af luft:

$$Q = 0,4166 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\mu = 1,83 \times 10^{-5} \text{ kg/m s (ved } 20^\circ \text{ C)}$$

$$K = 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$n = 0,02$$

$$t = 20 \text{ sek og } 60 \text{ sek}$$

$$b = 0,001 \text{ m} - 0,2 \text{ m}$$

ΔP i 4 m's dybde: 364,8 kN/m² ved en trykgradient på 91,2 kN/m²/m (svarende til 0,9 atm pr. meter)

Inputparametre ved injektion med rent vand:

$$Q = 0,00125 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\mu = 0,00131 \text{ kg/m s (ved } 10^\circ \text{ C)}$$

$$K = 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$n = 0,02$$

$$t = 300, 500, 700, 900 \text{ sek}$$

$$b = 0,001 \text{ m} - 0,2 \text{ m}$$

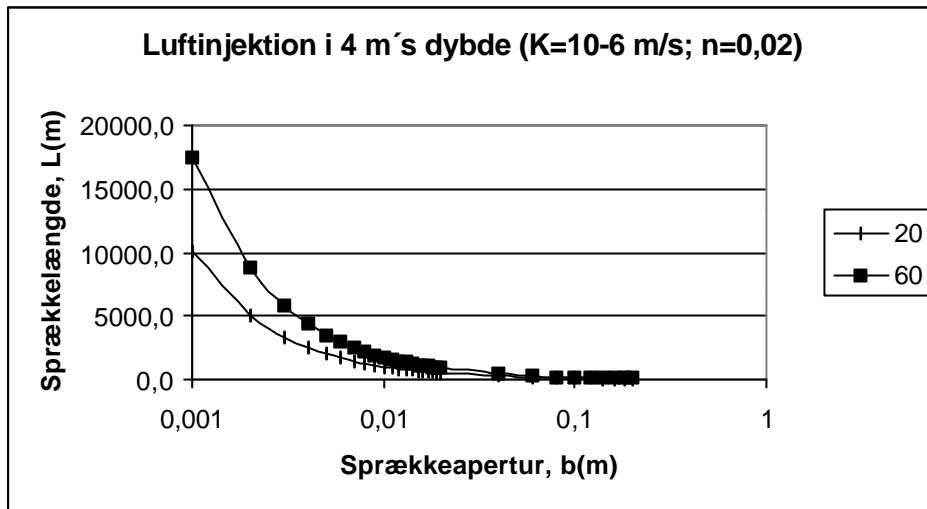
ΔP i 4 m's dybde: 81,1 kN/m² ved en trykgradient på 20,3 kN/m²/m (svarende til 0,2 atm pr. meter)

Inputparametre ved injektion med boremudder (guargummi gelé)

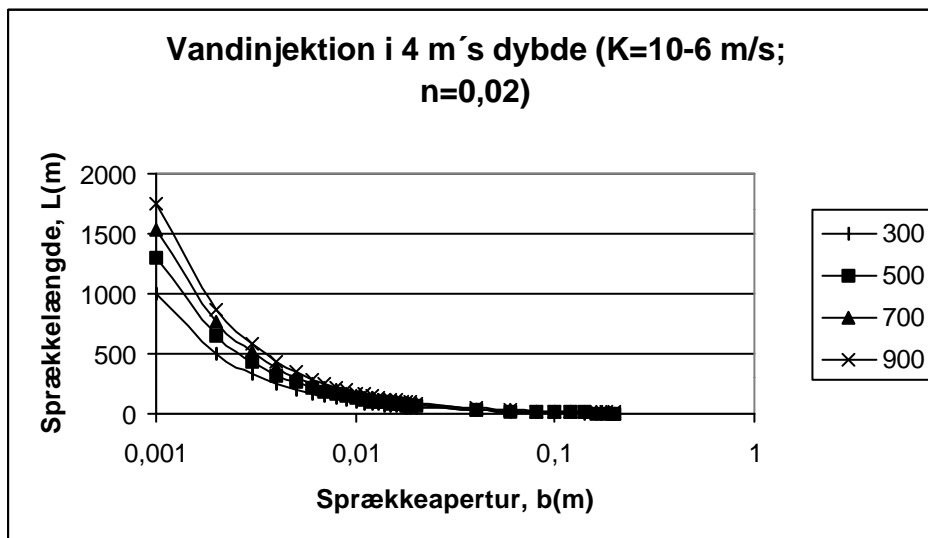
Realistisk eksempel på inputparametre ved injektion af sprække på Haslevgrunden i Vestsjællands amt er vist i bilag 5.

Relationen mellem sprækkelængde og –apertur er vist i bilag 4.2 mens beregninger af L for variable K, n, t og b er vist for hhv. luft- og vandinjektion i bilag 4.3.

Bilag 4.2



Angiv signatur for de to symboler, Injektionstid i s



Bilag 4.3 Beregning af inducerede sprækkers længde (i meter) med sprækkeapertur varierende fra 0,001-0,2 meter og injektionstider på 20 og 60 sekunder. Injektionen sker med luft i 4 meters dybde. Hydraulisk ledningsevne er 10^{-6} m/sek og porøsiteten er 0,02.

K/n= 10^{-6} /0,02 i 4m

	20	60
0,001	10112,8	17516,0
0,002	5056,4	8758,0
0,003	3370,9	5838,7
0,004	2528,2	4379,0
0,005	2022,6	3503,2
0,006	1685,5	2919,3
0,007	1444,7	2502,3
0,008	1264,1	2189,5
0,009	1123,6	1946,2
0,01	1011,3	1751,6
0,011	919,3	1592,4
0,012	842,7	1459,7
0,013	777,9	1347,4
0,014	722,3	1251,1
0,015	674,2	1167,7
0,016	632,1	1094,7
0,017	594,9	1030,4
0,018	561,8	973,1
0,019	532,3	921,9
0,02	505,6	875,8
0,04	252,8	437,9
0,06	168,5	291,9
0,08	126,4	218,9
0,1	101,1	175,2
0,12	84,3	146,0
0,14	72,2	125,1
0,16	63,2	109,5
0,18	56,2	97,3
0,2	50,6	87,6

Bilag 4.4 Beregning af inducerede sprækkers længde (i meter) med sprækkeapertur varierende fra 0,001-0,2 meter og injektionstider fra 300-900 sekunder. Injektionen sker med vand i 4 meters dybde. Hydraulisk ledningsevne er 10^{-6} m/sek og porøsiteten er 0,02.

K/n= 10^{-6} /0,02 i 4m

	300	500	700	900
0,001	1006,4	1299,3	1537,3	1743,1
0,002	503,2	649,6	768,7	871,6
0,003	335,5	433,1	512,4	581,0
0,004	251,6	324,8	384,3	435,8
0,005	201,3	259,9	307,5	348,6
0,006	167,7	216,5	256,2	290,5
0,007	143,8	185,6	219,6	249,0
0,008	125,8	162,4	192,2	217,9
0,009	111,8	144,4	170,8	193,7
0,01	100,6	129,9	153,7	174,3
0,011	91,5	118,1	139,8	158,5
0,012	83,9	108,3	128,1	145,3
0,013	77,4	99,9	118,3	134,1
0,014	71,9	92,8	109,8	124,5
0,015	67,1	86,6	102,5	116,2
0,016	62,9	81,2	96,1	108,9
0,017	59,2	76,4	90,4	102,5
0,018	55,9	72,2	85,4	96,8
0,019	53,0	68,4	80,9	91,7
0,02	50,3	65,0	76,9	87,2
0,04	25,2	32,5	38,4	43,6
0,06	16,8	21,7	25,6	29,1
0,08	12,6	16,2	19,2	21,8
0,1	10,1	13,0	15,4	17,4
0,12	8,4	10,8	12,8	14,5
0,14	7,2	9,3	11,0	12,5
0,16	6,3	8,1	9,6	10,9
0,18	5,6	7,2	8,5	9,7
0,2	5,0	6,5	7,7	8,7

Bilag 5. Typical Output of Hydraulic Fracture Size Module

```
haslev2b.out
*****
Analysis of horizontal, circular hydraulic fracture
Using CIRFRX 1.1 by FRX Inc.
File: haslev2b.out
*****
***** Input *****
Flowrate l/min: 57.8800, 15.2919 gpm
Depth: 3.5000 m, 11.4800 ft
Modulus kPa: 8000.00
Poisson ratio: 0.30
Viscosity cp: 375.000
Sand/fluid: 0.300
Max Pressure (psi): 46.000
Slot radius (cm): 10.000
Leakoff coefficient: cm/min1/2: 0.025
Unit weight soil: 22.000
Min. frx aper for sand (cm): 0.2000
Slot radius (cm): 10.00 Borehole radius (cm): 1.50
***** Results *****
Radius: 14.2 ft, Duration: 10.2 minutes
Toughness (kPa cm1/2): 850.00
Propped radius: 11.67 ft, Minimum aperture for sand: 0.2000 cm
Volume in Fracture (gal): 92.9 Lost Volume: 63.6 gal
Pumped volume (gal): 156.0 Fluid efficiency: 0.5954
Gel volume: 120.0 gal, Sand volume: 36.0
Total Bulk Volume Sand: 65.4 gal, 8.8 cuft
Gel rate: 11.8 gpm, Bulk sand rate: 85.90 lbs/min
Lbs. sand/gal gel: 6.63
Maximum pressurized aperture: 1.78 cm At half radius:
1.00 cm
Maximum propped aperture: 0.75 cm
Max propped aperture at half radius: 0.42 cm
```

Bilag 6

Assessment of Hydraulic Fracturing Potential at Vestergade 10, Haslev, Denmark

Prepared for
Miljøstyrelsen

By
FRx, Inc.
P.O. Box 37945
Cincinnati, OH
45222
USA

1 Introduction

Continuing dry cleaning operations at the site have contaminated the underlying soil and groundwater with tetrachloroethylene (PCE) and daughter compounds. The sources and extent of contamination, as well as geology and hydrology, are thoroughly described and mapped by NIRAS (1999). In general, the chlorinated solvents are trapped in the upper clay till, which is wet. An underlying primary aquifer has suffered minimal though measurable impact. The contaminants have not spread laterally beyond the limits of the premises, so the remediation target remains compact. However, the principal structure, several outbuildings, and neighboring properties preclude excavation and thus constrain remedial options to recovery or in situ processes. Dual phase extraction has been shown to be marginally effective for recovery of the contaminants.

The site is proposed for demonstration of hydraulic fracturing in Denmark because of the characteristics of the soil, the type and distribution of contaminant, the known performance of conventional remedial technologies such as dual phase extraction, the typical urban setting, and the proximity to the Haslev gasworks site where soil has been extensively characterized. Presumably horizontal or sub-horizontal fractures can be created to enhance dual phase extraction at the site.

On June 21 and 22, 1999, Bill Slack, vice president of FRx Inc., toured the site and was briefed by the staff of GEUS and representatives of NIRAS, NCC, and Broker Drilling. FRx provides hydraulic fracturing and related services in the United States. The tour and briefing provided insight that coupled with FRx experience permits an assessment of the viability of hydraulic fracturing at the site. This report, which transmits our evaluation, was requested to support subsequent decisions and actions at the site.

2 Background – Induced Hydraulic Fractures

2.1 Character, Development, and Uses of Hydraulic Fracturing

Hydraulic fracturing involves injecting fluid into an open well at a pressure such that a crack, or fracture, forms within the surrounding soil, and continuing injection to dilate the fracture and fill it with beneficial material. Most fractures are created with slurries of granular solids that have desirable chemical or physical properties. The first, and still most widely used application, couples sand-filled fractures to soil vapor extraction (SVE) or pump-and-treat recovery. This technique results in highly permeable layers that increase the flow rate of a well, typically by one to two orders of magnitude. A variety of other applications have been demonstrated since the initial use of hydraulic fracturing twelve years ago in United States Environmental Protection Agency (USEPA) research projects. Also, refinements in the techniques have broadened the spectrum of sites and problems that can be addressed.

A sequence of USEPA research and demonstration projects developed hydraulic fracturing as a tool for restoration of contaminated soil and ground water. Initially, the project objectives envisioned methods to improve the flow rate of recovery wells, such as those used in soil vapor extraction (SVE) or pump and treat. The development borrowed heavily from the technology used to increase petroleum production from low permeability reservoirs. In general, the effort defined the smaller scale methods that are required by shallow surface soils and identified or proved several useful applications for hydraulic fracturing at contaminated sites. The USEPA Superfund Innovative Technology Evaluation Program (SITE Program) sponsored an independent review of the technology and published the findings in a widely distributed report (USEPA 1993).

Since 1994 hydraulic fracturing has been commercially available. The first commercial applications were installed as part of SVE projects. These projects typically were of small scope, as might be expected for an innovative technology, and not heavily publicized. Murdoch et al. (1995) presents some case histories. Bilag 3 lists projects undertaken by FRx.

One project has several parallels to the Haslev site. In 1995 and 1996 hydraulic fractures were created at the Linemaster Superfund site in Connecticut to enable dual phase extraction of chlorinated solvents, which were trapped in surficial glacial tills. In a pilot test a, water recovered through fractures induced a fifteen-foot deep cone of depression in the water table in three weeks, whereas a conventional well failed to have any measurable effect. Air movement through the exposed soil column yielded satisfactory recovery of TCE and daughter compounds. Pilot results justified more widespread application. Use of fractures in six contiguous wells has resulted in a 30-foot deep and 200 ft wide cone of depression in the water table in six months.

More recently, hydraulic fracturing techniques have been used to create permeable reactive barriers that intercept and destroy contaminants. Iron-filled vertical fractures have been created in aquifers to remediate chlorinated solvent plumes, and horizontal fractures in low permeability media have been filled with a variety of materials to immobilize or destroy contaminants released from overlying sources. Thus fracturing should be considered an enabling technology, but is not a remedial process by itself

2.2 Methods of creating fractures

Certainly any of a variety of methods can be used to create horizontal hydraulic fractures. A 1994 USEPA publication (Murdoch et al. 1995) outlines and compares several. Furthermore, any method can be fine-tuned to most effectively satisfy project and site constraints. The site-specific factors that weigh in selection of methods include target depths for the fractures, remedial processes to be used, surface access, subsurface obstructions such as utilities or existing wells, schedule, budget, etc.

Nonetheless most horizontal fractures have been created in accordance with methods developed by the USEPA research projects conducted in the late 1980's and early 1990's. In summary, these steps include (1) installing a dedicated well by hammering to desired depth a piece of 2-inch pipe fitted with a drive point, (2) dislodging the drive point downward to expose a short section of open hole, (3) cutting a thin kerf in the wall of the borehole by means of a horizontal hydraulic jet, (4) pressurizing the kerf with liquid so as to nucleate a horizontal fracture from the hoop that constitutes its outer edge, (5) delivering sand-laden slurry to the open hole section of the well so as to propagate the fracture, and (6) monitoring the injection pressure and surface deformation, which permits deduction of the fracture form. This sequence of steps constitutes one of the simplest, reliable, and effective methods for creating fractures. More details can be found in Appendix "B". The method results in the maximum degree of control over the fracture, both during creation and during ultimate use.

Multiple fractures can be made from a single well, but the creation process and effective utilization become more complicated. For each fracture, an open section of borehole must be exposed by cutting away a section of casing. Straddle packers are used to isolate each open section of borehole during creation of the fractures. Individual access of each fracture, which is certainly the preferred method for operation of most remedial processes, requires packers with multiple passages. Such well completion components may need to be fabricated especially for the project, incurring expense as well as requiring long lead-time. The size of equipment used in the well, both during creation and subsequent operations, requires use of larger wells that are six or eight inches in diameter.

Rarely can existing wells, which typically have long screen sections, be used for creation of horizontal hydraulic fractures. First, the screen and surrounding gravel pack, which have been carefully engineered to exclude soil particles, needs to be cut away to permit passage of fracturing slurry. More importantly, pressurization essential for nucleation of a fracture is applied to the entire screened or gravel packed interval, whichever is longer. Pressurization of such a long section of borehole will tend to result in a vertical fracture through the axis of the borehole. Even if a horizontal fracture could be nucleated and propagated, the resultant combination of a linear well and a planar fracture does not effectively enhance remedial processes, especially those that rely upon fluid flow to or from the well.

3 Site Characteristics Relevant to Fracturing

3.1 Geology and hydrology

Geological factors influence the form of induced fractures as strongly as variations in the methods of creation. State of stress and toughness of the formation exert principal control. Several other geological or geotechnical characteristics also correlate with fracture form, but these relationships result, at least in part, through effects on the predominant factors.

The state of stress in a formation affects orientation of an induced fracture once it has propagated away from the borehole. Fractures are usually flat lying where horizontal formation stresses are greater than vertical stresses, whereas they tend to be steeply dipping where vertical stresses are greatest. The state of stress of soils and unlithified sediments depends on several factors, including consolidation history, and wetting and drying history. Soils that were consolidated under a load greater than the present load are overconsolidated, and many such soils contain horizontal stresses that exceed vertical stresses. For example, glacial loads can result in overconsolidation, so soils deposited subglacially are good candidates for high lateral stress. Soils containing clay minerals that undergo large volume changes in response to changes in moisture content can become overconsolidated with repeated cycles of wetting and drying. For instance, vertisols (soils rich in swelling clays) are particularly susceptible to large lateral stresses. Soils of poorly sorted particles can be dense, and stress-inducing mechanisms, such as specific volume increases due to oxidation, can readily effect high lateral stress. Thus soils derived from weathered bedrock can sustain horizontal fractures. In some cases lateral stresses are greater in surficial soils, which have been heavily weathered, than in similar underlying units.

The toughness of the soil at the fracture tip, coupled with the elasticity of soil surrounding the fracture, determines whether a horizontal fracture is thick and confined close to the injection well or thin and of large extent. Tougher soil limits propagation of a fracture and favors thicker aperture. Anisotropic toughness can occur along contacts between different strata. Induced fractures may follow contacts in interbedded sediments. The effect of bedding can be capricious, with fractures following beds in some cases and crosscutting beds in others.

Permeability has little direct effect on fracture form but deserves careful attention because of its impact on the application of fractures and also on the creation process. Permeability critically effects the relative performance of wells installed to recover fluid. In order for wells with fractures to discharge at rates substantially greater than conventional wells, the fracture sand should have permeability more than 1000 greater than the surrounding media. If the target soils have sufficient permeability, fractures can not aid the greedy operator who desires faster recovery of contaminants. In cases where fractures are being created rationally in permeable media, such as for the construction of a permeable treatment barrier, the permeability of the media provides a mechanism for separation of fluid and granules in the fracturing slurry. Fracturing techniques are available for such circumstances.

The role natural fractures play in determining the form of induced fractures has not been extensively explored. Few sites have undergone thorough evaluation of natural fractures, and fractures have been created at yet fewer. Flat lying fractures have been created in the upper 5 meters of glacial till near Sarnia, Ontario, Canada, for the purpose of characterizing in situ flow

around fractures. Below 5m, vertical fractures were favored. In separate projects, naturally occurring fractures have been described in similar soil nearby. Several natural steeply dipping fractures were traced from the surface to depths of 5m and appeared to have resulting from weathering processes. By inference, a predominance of near vertical natural fractures at a site does not preclude creation of useful horizontal or sub-horizontal fractures.

Water content of a formation appears to have negligible effect on creating fractures by injecting fluid.

3.2 Contaminant distribution

The distribution of contaminant within the impacted soils generally effects only the locations selected for fractures and has essentially no impact on the resultant form of the fracture.

Ideally, the fractures will be placed to optimally remediate the site. Exact placement depends, of course, upon the radius of influence of a fracture. Fractures should be concentrated around hot spots or source zones. For remedial designs involving fluid recovery, at least one fracture should be placed at the down gradient limit of contamination.

Fractures can have an optimal orientation for intercepting or recovering contaminants. In homogeneous media, selecting the fracture orientation follows from evaluation of streamlines in the system. In multiple porosity media, such as naturally fractured clay, contaminants may be preferentially distributed in flow channels. Fractures should be oriented to intercept these natural flow paths so that the remedial processes can address the greater portion of contaminant.

3.3 Structures, utilities and surface restrictions

A common concern is that fracturing may dislodge or otherwise move and disrupt structures or utilities at a site. The concern arises from the very real fact that creation of a hydraulic fracture displaces surrounding soil by a few millimeters. The magnitude of displacement depends upon the form and size of the fracture as well as the distance between the fracture and the point of interest. In the case of shallow horizontal fractures, the overlying soil and ground surface will be displaced upwards a distance that correlates closely to the aperture of the fracture. Displacement will taper to zero within a short distance outside of the extent of the fracture. At greater depths, the amplitude of displacement is diminished but a larger area is affected. (A pea under a mattress is a simple analogy for this effect.) Elastic soils attenuate the displacements caused by fractures.

Displacement is greatest at the conclusion of fracturing. Afterwards, the fracture closes and the dome of overlying soil subsides. The injected sand prevents the fracture walls from closing completely. The amount of contraction depends on the concentration of sand in the slurry. Here the ratio of maximum aperture when the fracture is pressurized to thickness of resultant sand pack after the liquid separates is similar to the ratio of total slurry volume to bulk volume of sand in the slurry.

Across a site, the displacements experienced by structures and utilities are gradual because the upward displacement follows the aperture of the fracture, both during and after fracture creation. Small fractures created at depths of two to five meters in glacial till, as probably will be the case at Vestergade 10, may have a radius three to four meters and maximum uplift of 1 cm. This 1:300 gradient can be tolerated by many structures as well as utility lines, which are often constructed to accommodate strain induced by temperature changes or subsidence. Rarely will

steep gradients be created at the surface, although slabs of concrete paving, which are stiff and non-bending, may shift to reveal throw of several cm at their edges. Nonetheless, counsel of structural experts should be sought if structures are considered delicate and valuable.

Surface structures can impact the propagation of fractures. The trenches and excavations used to install subsurface utilities represent a path of weak soil. If the tip of a propagating fracture intersects such a feature, it will either quickly penetrate to the ground surface, or (less frequently) propagate along the bottom of it. Fortunately, most utilities are installed close to the surface, above the target depth of many fractures. Note, shallow, sub-horizontal fractures may easily climb to the depth of utilities.

The foundations of buildings and other heavy structures can have a dual impact upon the propagation of fractures. Like subsurface utilities, the bottom of a foundation may intercept a fracture and channel slurry to the ground surface. In such case, the fracture clearly does not propagate beyond the line of the foundation. Deeper fractures that do not intersect the foundation can be influenced by the weight of the overlying structure. Multi-story masonry structures or large tanks filled with liquids impose sufficient load to alter the in situ state of stress that governs fracture form. At the least, these structures deflect propagating fractures. In the extreme, the structures may induce conditions that favor formation of vertical fractures. The phenomena are not sufficiently reliable to be used to advantage during the selection of fracturing locations. A building that appears stout may have little influence on fractures while a light frame building may seem to repel fractures.

The presence of structures and utilities at a site usually complicates the activities of creating fractures. Positioning of a drill rig to create fracture wells requires consideration of overhead electric and communication lines, the course of crushable sewers etc., and the existence of buildings, alcoves, porches, etc. Walls and fences, even with doors or gates, represent obstructions to hoses that connect the fracturing equipment to the fracture well. Likewise, active roadways or railroads disrupt site activities. These factors do not prevent application of fracturing, but must be taken into account during planning for the work.

3.4 Interaction with existing wells and borings

The creation and use of a fracture among existing monitoring wells and borings frequently arises at heavily characterized or confined site. Many effects can occur, and a definitive answer may not be readily forthcoming nor common among sites.

An attempt to create a fracture near an existing well may be frustrated by the tendency of the well casing to suppress opening of the fracture aperture. In a simple sense, the well can act as a reinforcing pin that holds the earth together. This effect is especially pronounced if the well is within a meter of the fracture nucleation point and if the fracture intercepts solid casing as opposed to a screen and gravel pack. Exceptions have been observed: we have created satisfactory horizontal fractures within 40 cm of an existing well.

A more distantly offset existing well may or may not interact with a propagating fracture. In some cases fractures have propagated to and around the well casing, as indicated by sand-filled aperture exposed during subsequent excavation. In other cases the aperture pinches to zero some distance before the fracture encounters the well, only to open at some distance beyond the well, i.e. the well is centered on an island of unfractured soil within the plane of the fracture. The

reasons for either phenomenon have not been delineated. The consequences limit the options for planning to connect fractures into existing wells.

If a propagating fracture encounters a borehole or screen section of an existing well, the zone can be pressurized. Unsecured borings, such as those back-filled with cuttings or poorly constructed wells with insufficient annular seal, can provide a pathway for fracture slurry to reach the ground surface and frustrate fracturing operations. Likewise fracturing pressure has popped off the caps of monitoring wells. In an extreme case, well screen has collapsed when fracture intercepted an existing well. The screen is very effective at excluding the sand in fracturing slurry while passing the liquid. The resultant filter pack provides the area over which the fracturing pressure achieves sufficient force to collapse the screen. In addition to these mechanical effects, the pressurized borehole or well provides a pathway for fracture fluid to propagate in unplanned directions, especially if a secondary fracture can nucleate elsewhere along the length of the bore. We have no direct evidence of this phenomenon, but the opportunity exists.

The intersection of fractures with long sections of well screen complicates the flow patterns of almost all remediation schemes. Flow to a fracture can be characterized as linear and generally perpendicular to the fracture face. Flow to a well screen is characterized as radial. Even in a homogeneous infinite case, the flow resulting from merger of the two patterns can not be characterized by simple calculations, and thus becomes more difficult to utilize. In reality, the well often serves as a short circuit that floods the fracture with fluid from an undesired source.

As mentioned, practically no site considered for fracturing is devoid of wells and borings. Thus creative thinking and strategic use of existing wells has become the standard practice. Rarely have wells been abandoned and plugged. Often existing wells have been used as monitoring points during creation of fractures and continue in useful function during remedial activities.

4 Suggested Fracture Design

The native soil between 2 and 5 mbgl at Vestergade 10 is a moist, less compacted clay that contains an order of magnitude more natural fractures than the underlying more compacted clay. The soil appears to have similar origin and properties to the Sarnia, Ontario, site where several flat lying fractures have been created to depths as great as 5 mbgl. Both sites are composed of glacial tills that are demarcated into upper and lower units. We fully expect that horizontal or sub-horizontal sand-filled fractures can be created between 2 and 5 mbgl at Vestergade 10.

Contaminant distribution at Vestergade 10 may necessitate creation of a fracture at 8 mbgl. Achievement of the desired sub-horizontal can not be assured. At analogous North American locations, such as Sarnia, Ontario, or near Cincinnati, Ohio, the less weathered clay units deeper than 5 mbgl do not allow propagation of sub-horizontal fractures. However, the deeper unit at Haslev may be different. Indeed, it is more compacted and presumably denser than the overlying unit and thus should be as amenable to propagation of sub-horizontal fractures. The only definitive method of determining the form is to create a fracture.

4.1 Fracture sizes

The contaminant hot spots at Vestergade 10 are fairly small areas. The largest, under the northeast corner of the main building is about four meters in width and six meters in length. The smaller hot spots, in the back yard, are less than three meters across and within five meters of the largest hot spot. At some sites, one modest fracture with a radius of five meters would be installed to address such a distribution of contaminants. However, the building and the presence of several existing borings and monitoring wells suggests that fairly small fractures at multiple locations be used at this site. Small fractures can be fit in and around the various obstructions, should still prove effective enhancements to dual phase extraction, and allow tighter control of subsurface flow.

Fractures that fit within the confines of the site may be the smallest ever created for purposes of environmental remediation. Our proprietary fracture propagation model, which is based on the mechanisms outlined in Murdoch (1993), indicates that a fracture composed of 200 to 250 kg of sand and 200 l of gel may be confined to radius of 2.5 m. The inputs to the model are listed in Table 1 and an example output is shown as Appendix D. The use of alternative but equivalently reasonable parameters in the model suggests that an equal quantity of material may propagate a fracture as far as 6 meters from the injection well. A far-reaching fracture may adversely interact with structures and utilities on the site and on adjoining properties. A field test in similar soil is the only certain method of determining exact behavior.

Fractures created in the backyard can be larger than those created under the building because of the additional space. In Figure 1 the backyard fracture is drawn with a 5 m diameter while the fractures under the build are drawn with 4 m

Table 1 – Fracture Size Calculation Parameters

Soil Modulus	Slurry Injection Rate
Poisson Ratio	Slurry Viscosity
Soil Toughness	Sand & Gel Content of Slurry
Soil Density	Typical Sand Size
Well Diameter	Nucleation Depth
Leakoff Coefficient	Nucleation Notch Size

diameter.

4.2 Fracture location

The fractures should be created to directly address the most serious contamination. NIRAS (1999) has documented that PCE occurs in two hot spots, one in the backyard and the other under the northeast corner of the principal building at Vestergade 10. These hot spots appear to be confined between 2.5 and 4.5 mbgl. The moisture in the soil necessitates dual phase extraction as the recovery process. Thus two fractures should be created at each hot spot. The lowermost fracture should be placed at the bottom of the hot spot but still within the less compacted clay. At such location, it can intercept any contaminant migrating from above. Also, water should be recovered through the lowermost fracture so that pore water can be removed from the hot spot to open more pore space to airflow. The uppermost fracture should be placed in the middle of the hot spot, so that the contaminant recovery can be maximized.

Two secondary locations for fractures should be considered. Soil gas and ground water analyses show contamination under the basement stairs and below the southeast crawl space at Vestergade 10. Two fractures should be created at each of these locations for similar purposes as the hot spots.

Figure 1 indicates the recommended locations for the fractures. Placement of fractures in the backyard will required consideration of the several existing borings and monitoring wells. Fractures should be created at least one meter away from existing wells; least the wells serve as reinforcing pins and prevent opening of a fracture aperture or the wells collapse upon nucleation of the fracture. The building probably will impact fracture propagation. These facets are discussed in Section 5 of this report.

4.3 Well placement technique

The well placement methods that can be most effectively employed within the confines of the site should be used. In most other sites an individual well is dedicated to each fracture at depths encountered at this site. The individual wells can be of made from small diameter pipe. Two-inch pipe has been widely used in the United States, but fractures have also been created through 1-inch pipe. The well should be installed as described in Appendix "B". Regardless of pipe size, the well can be installed in segments that are screwed together, permitting well installation inside the basement.

Dual phase extraction can be performed most efficiently when draw down can be effected to the elevation of the fracture. If applied vacuum approaches 250 cm of water, then water can be slurped out of the wells. If less strong vacuum is to be applied, then a pump will need to be installed at the bottom of the well. Most pumps require modest submersion to operate, so the pump should be placed below the level of the fracture. Accordingly, a hollow drive point needs to be fitted into the bottom of the casing. Furthermore, the casing diameter needs to accept the pump.

If multiple fractures are created from a single well, the well necessarily will be of larger diameter, and a drill rig will be required. Directional or slant drilling can accomplish access under the building. The borehole should be cased to bottom and a swelling grout used along the entire length of casing. We have had poor experience with use of bentonite. Cuts in the casing can be made with mechanical, hydraulic, or explosive means. Presumably the cut will be perpendicular

to the axis of the well. If the axis of the well is steeply inclined, nucleation of a horizontal fracture may be disrupted.

Effective application of dual phase extraction through multiple fractures in a single well requires individual access to each fracture. A system of packers and risers must be designed for the well before the final well size is selected. As with small diameter single fracture wells, consideration must be given to placement of a pump below the fractures for efficient dual phase extraction.

4.4 Fracturing technique

Fracturing should be demonstrated in uncontaminated area of the site so that planned size of the fractures to be created at Vestergade 10 can be assured. In particular, a fracture should be created at 8 mbgl if the design incorporates such depth. Eight-meter is well within the lower till unit and is below the depth where sub horizontal fractures have been successfully created at analogous North American sites. If this preliminary work can not be conducted in the confines of the site, it should be performed in the vicinity of Haslev

The fractures should be created with the most viscous slurry and with the greatest concentration of sand that can be prepared by the equipment. This consistency should help confine the fractures to the vicinity of the injection well.

Otherwise, fracturing should follow methods developed during the course of USEPA research projects and outlined in Appendix "B".

4.5 Monitoring methods

Fractures have the potential to adversely effect all structures on the site. As discussed in Section 3.3, above, creation of a fracture displaces surrounding soil. The fracturing locations and fracture sizes have been chosen to minimize the amplitude of uplift at the walls of the building and along water, gas, electric, and telephone lines. The sewer line, from which contamination leaked, overlies some of the hot spots, so its possible disruption can not be avoided.

Nonetheless, monitoring while creating the fractures can provide warning if fracture threatens the integrity of the buildings or utilities. Monitoring also provides documentation of the impact of fracturing.

Too many walls and blind corners exist at the site for surveying techniques to follow the course of fracture propagation. Besides, surveying is too slow to provide timely warning of detrimental reactions to the fracture. Rather, electronic sensors should be deployed. Strain gauges can be placed at critical points along the building foundation and above utility lines. Nearby monitoring wells should be loaded with water and transducers installed to alert operators upon fracture penetration into the wells. Tiltmeters can be used to measure deformation of unrestrained ground surface. The small fractures recommended herein should not cause significant soil displacements more than five meters away from an injection wells.

Success of the monitoring program depends upon the quality of the underlying plan. The key elements include selection of critical points for placement of monitoring sensors, identification for each sensor of the threshold signal that will invoke intervention or other action, and establishment of a set of actions, i.e. protocols, to be followed.

5 Probable Results of Creating Fractures

5.1 Expected form of induced fractures

Fractures create at the target intervals listed above, i.e. between 3 and 4.5 mbgl, most likely will be sub-horizontal. That is, the fractures will nucleate in plane established by the techniques employed (presumably a horizontal notch will be cut), initially propagate horizontally, but gradually assume increasing dip. Dip at the extreme limits may approach 20°. The configuration after creating two fractures will resemble a pair of poorly nested saucers. The fractures will be more elliptical than circular, with major and minor axes of 6m and 4m, respectively. Maximum fracture aperture when pressurized with slurry will be on the order of 1 cm, and the average closed aperture after separation of the fracturing fluid may be 3 mm.

The fractures will be similar to fractures created in southwest Ohio (near Cincinnati) and Sarnia, Ontario, Canada. These sites have similar geological setting and fractures created there have been extensively characterized. Murdoch (1995) presents more details.

5.2 Probable interaction of induced fractures and structures

The majority of the utility services do not appear to lie within the target areas for fracturing. Gas, electric, telephone, and water services are laid under the street of Vestergade or the adjoining sidewalk. These utilities appear to be installed in the upper 80 to 100 cm of soil. Fractures are not expected to interact strongly with these utilities because of the distance from the fracturing locations and because the building foundation shields them from the injection wells. The service lines into the building are suspended from or integrated into the frame of the building and need not be considered separate from the building.

The sewer system overlies the hot spots – as might be expected since it was the source of contamination. The sewer has several branches and laterals throughout the backyard. Fracturing activities can not avoid the sewer system. Hopefully the sewer can tolerate some displacement. Sewers, which are either short lengths of clay pipe or longer lengths of plastic pipe, are usually fairly flexible. Any sections damaged by fracturing should be easily replaced.

The main building on the site, and the building over much of the contamination, is of multi-story masonry construction. A basement has been dug under the northern half, while only a crawl-space provides access under the southern portion. The foundations extend under the exterior walls and under a central east-west load-bearing wall. Thus the soil underneath the building is divided into a north and south half. An examination of the exterior and interior walls revealed no indication of settlement, i.e. no pointing traces could be seen in the exterior walls and the interior walls were smooth and without cracks. In summary, the building appears to be heavy and well constructed. Any disruption of the building will be readily evident as unique cracks.

The building probably will block propagation of hydraulic fractures. The weight alone should be sufficient to deflect the fractures. The foundations may extend deep enough to intercept a sub-horizontal fracture nucleated at 3 mbgl. If so, fracture slurry will vent to the surface along the foundation. Nonetheless, the chance that the fracture may deform such a pristine building warrants the monitoring program defined in Section 4.5.

Secondary buildings at the site are of light construction and do not overlie any fracturing targets. There should not be any interaction between them and the fractures.

5.3 Probable fracture performance

Fractures will be created at the site to enhance performance of dual phase extraction for recovery of PCE from moist clay soil. Previous tests at the site have yielded unacceptable vapor discharge and radius of influence.

Projection of system performance can be obtained by analogy to two sites where fractures were employed as remedial tools.

At the Linemaster Superfund Site in Connecticut, hydraulic fractures were created to enable dual phase extraction of TCE and daughter products from dense, silty glacial till. Fractures allowed draw down in the water table in a matter of days where none could be effected by conventional wells. Air movement through the exposed soil column recovered contaminants at a satisfactory rate. Linemaster differs from this site in that its contamination is spread through a 15m thick column. Nonetheless, the similarities in process and targets encourage a similar favorable projection for Vestergade 10.

Quantitative projections of well discharges and extent of influence draw upon flow characterization work conducted during the USEPA research projects of the early 1990's. Fracture response at the Center Hill Site is presented in the EPA SITE report (1993) and discussed at length in Murdoch (1995). About 4% of the vacuum applied to a 6m diameter fracture located 1.7 mbgl could be detected over 6m away from the well. In contrast, similar influence of a conventional well was less than 2m. Although this comparison is encouraging, it needs to be considered in the context of the Vestergade 10 pilot test. A dual phase extraction pilot at Vestergade 10 exerted influence over 4m. By extrapolation, creation of a 5m diameter fracture may extend influence to only 5m. The contrast between 4m and 5m is not nearly as spectacular as between 2m and 6m. Thus the effect of fracturing may be less evident than presumed.

6 Conclusions

Our experience suggests that useful flat lying fractures can be created in the soil at the Vestergade 10, Haslev, Denmark. The soil has origin and character similar to sites in North America where several flat lying fractures have been created. At the particular North American sites, flat lying or shallow dipping fractures have been created at various depths that include the intervals expected to be fractured at Vestergade. The fractures were created for various applications, including dual phase extraction as is contemplated at Vestergade.

Contamination at Vestergade will need to be addressed by creating fractures at multiple locations and depths. In addition to hydrologic design issues, which yet have not been resolved and may well require multiple fractures, structures at the site preclude creation of fractures from a single location; uniform propagation under the various building foundations can not be assured. Fortunately, smaller fractures minimize the risk of adverse impact on the building and utilities. Smaller fractures also coincide well with the size of contaminant hot spots.

Performance of dual phase extraction operated through fractures should substantially exceed what was accomplished during a dual phase extraction pilot test that utilized conventional wells. The advantages should be realized as three characteristics, all of which contribute to accelerated contaminant removal. First, fractures effectively extend the radius of influence of wells in low permeability material. At all sites where flow to or from induced fractures has been measured, the radius of influence exceeds the size of the fractures, often by a factor of three or more. At Vestergade, short term SVE tests have shown influence to extend less than 4m (Well B12 to B10), which is certainly smaller than the anticipated fractures. Secondly, fracturing can improve the discharge from wells. Specifically, conventional wells at analogous sites in the United States discharged air and water at rates similar to those reported in the long-term SVE tests at Vestergade, while wells completed with fractures discharged at rates an order of magnitude greater. Finally, proper operation of multiple fractures can develop a wide cone of depression in the phreatic surface, thereby exposing large volumes of soil for vapor flow into overlying fractures. At the Linemaster Superfund site, this approach has proved successful when a similar configuration could not be effected by conventional wells.

In summary, fracturing should be undertaken at 10 Vestergade, Haslev for the purpose of recovering the contaminants from the subsurface soils and groundwater.

7 References

NIRAS. "Summary of Soil and Ground Water Investigations at Vestergade 10". Internal memorandum. June 1999.

Murdoch, L.C., D. Wilson, K. Savage, W. Slack, and J. Uber. "Alternative Methods for Fluid Delivery and Recovery". USEPA/625/R-94/003. 1995.
www.epa.gov/ordntrnt/ORD/WebPubs/fluid.html (for entire document download in PDF format) or www.epa.gov/clariton/clhtml/pubtitle.html (search for 625R94003 for page-by-page on-line viewing)

USEPA Risk Reduction Laboratory and The University of Cincinnati. "Hydraulic Fracturing Technology - Applications Analysis and Technology Evaluation Report" USEPA/540/R-93/505. 1993. www.epa.gov/ORD/SITE/reports/051.htm (for entire document download in PDF format) or www.epa.gov/clariton/clhtml/pubtitle.html (search for 540R93505 for page-by-page on-line viewing)

Murdoch, L.C. "Hydraulic Fracturing of Soil During Laboratory Experiments, Part III: Theoretical Analysis". *Geotechnique*, 43 No 2, 277-287. 1993.

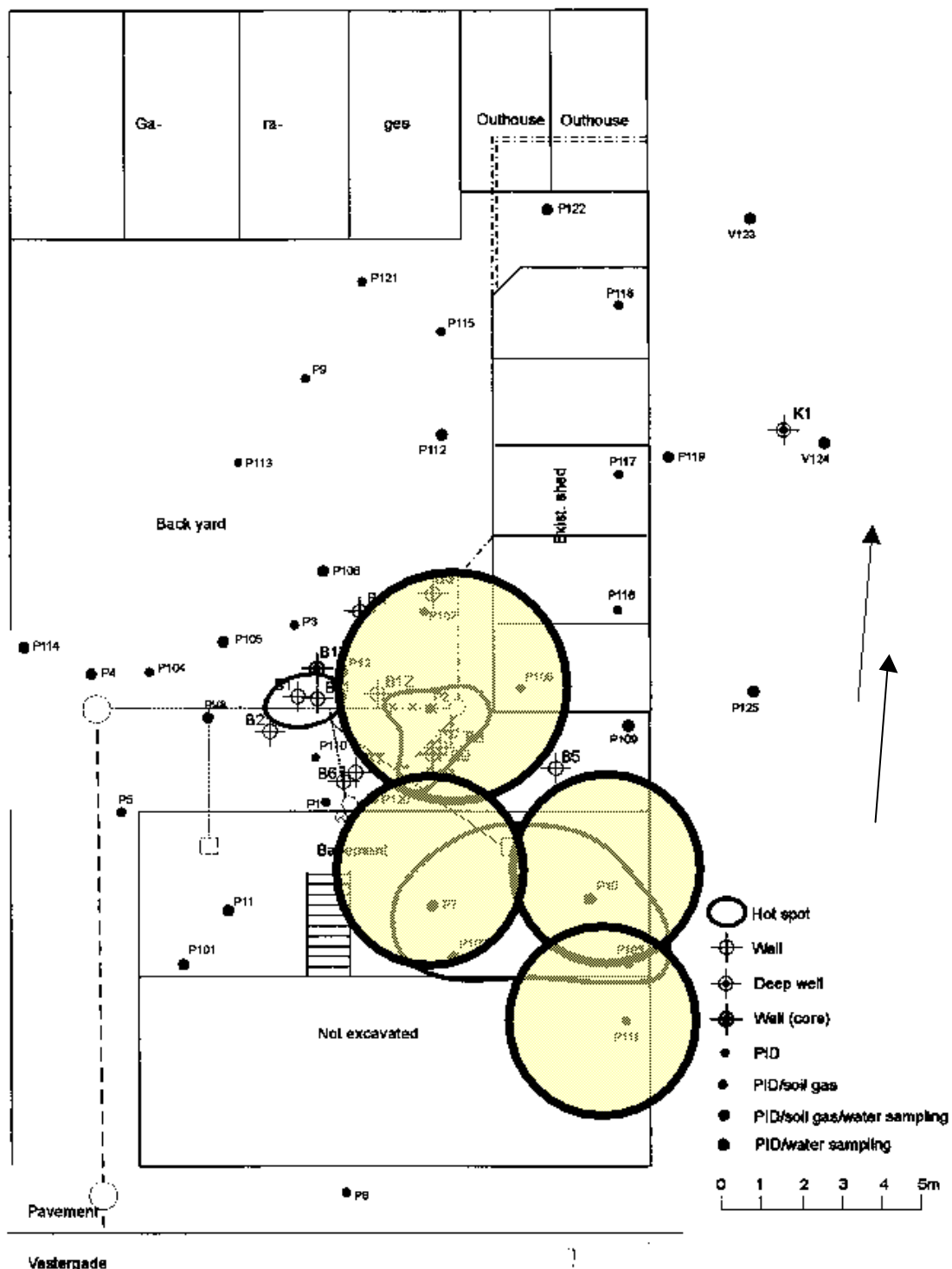


Figure 1 – Proposed Fracture Locations – Vestergade 10, Haslev
 Two fractures should be created at the center of each shaded circle. In each set, the uppermost fracture should be nucleated at 3 to 3.5 mbgl and the lowermost at 4.5 mbgl. Fractures within the building have smaller (4m) diameter to fit within the confines of foundations and utilities. The backyard fractures can be larger and are shown with a 5m diameter.

