

Miljøprojekt Nr. 699 2002
Teknologiudviklingsprogrammet for
jord- og grundvandsforurening.

Hydraulisk frakturering udført ved vandret boreteknik - Design og anlæg

Lisbeth Walsted, Anders G. Christensen og Henrik Husum
NIRAS

Dana Brock
Veizades & Associates Inc.

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

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

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

Indhold

INDHOLD	3
FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	11
1 INDLEDNING	15
1.1 BAGGRUND	15
1.2 FORMÅL MED AKTIVITETER UNDER TEKNOLOGIPROGRAMMET	15
2 LOKALITET OG FORURENINGSSITUATION	17
2.1 HISTORIK	17
2.2 GEOLOGI OG HYDROGEOLOGI	18
2.3 FORURENINGSSUDBREDELSE	19
2.4 RISIKOVURDERING OG AFVÆRGEKONCEPT	21
2.4.1 Risikovurdering	21
2.4.1.1 Det primære grundvand	21
2.4.1.2 Nærmeste indvindinger og recipienter	21
2.4.2 Afværgekoncept	22
3 DIMENSIONERINGSGRUNDLAG	23
3.1 GEOTEKNISKE FORHOLD	23
3.2 HYDRAULISKE FORHOLD	25
3.3 GEOLOGISKE DETAILFORHOLD	26
3.3.1 Konsolideringsforholdene på lokaliteten	27
3.3.2 Detailbeskrivelse af de geologiske forhold langs frakturerede og ufrakturerede dræn	27
3.3.3 Georadar sondering	29
3.4 DIMENSIONERING AF FRAKTURER	30
3.4.1 Fastlæggelse af antal boringer samt design og installationsdybde for vandret installerede dræn	31
3.4.2 Antal frakturer etableret langs hvert vandret dræn	31
3.4.3 Valg af fyldmateriale samt forventet injektionshastighed og -tryk	32
3.5 DIMENSIONERING AF VANDRETTE DRÆN	34
3.6 DIMENSIONERING AF MONITERINGSBORINGER	37
3.6.1 Monitoringsboringer langs det frakturerede dræn	37
3.6.2 Monitoringsboringer langs referencedrænet	39
3.6.3 Øvrige monitoringsboringer	40
3.7 MONITERINGSPROGRAM	40
4 ETABLERING AF HYDRAULISKE FRAKTURER FRA VANDRETTE BORINGER	43
4.1 HYDRAULISK FRAKTURERING FRA VANDRET BORING	43
4.1.1 Materialer	43
4.1.1.1 Fraktureringssuspension	43
4.1.2 Materiel	44
4.1.2.1 Mixerudstyr til fraktureringssuspension	44
4.1.2.2 Injektionspumpe	44

4.1.2.3	Revneskæreværktøj	44
4.1.2.4	Fraktureringsapparat	45
4.1.3	Arbejdsprocesser ved udførelse af hydraulisk frakturering	45
4.1.3.1	Arbejdsproces 1: Etablering af pilothul	46
4.1.3.2	Arbejdsproces 2: Revneskæring langs drænstrækning	46
4.1.3.3	Arbejdsproces 3: Opreaming af pilothul til ø122 mm	47
4.1.3.4	Arbejdsproces 4: Hydraulisk frakturering langs 5 forskårne zoner	47
4.2	INSTALLATION AF VANDRETTE DRÆN I FRAKTURERET MORÆNELER	50
4.3	VERIFIKATION AF SPRÆKKEUDBREDELSEN	52
4.3.1	Sprækkeidentifikation ved observation af netto-hævning af terræn henholdvis af bygninger.	52
4.3.2	Sprækkeudbredelse fastlagt ved udtag af intakte prøver samt ved XRD-screening	52
4.3.3	Sammenfattende vurdering af den udførte sprækkeidentifikation	56
4.4	VERIFIKATION AF DEN HYDRAULISK EFFEKT FRA VANDRETTE DRÆN	57
4.4.1	Forsøgsbetingelser og monitoringsprogram	57
4.4.2	Resultater af dual-phase test	59
4.4.2.1	Dræn B-B	59
4.4.2.2	Dræn A-A	64
5	HYDRAULISK TEST AF REFERENCEDRÆNET	69
5.1	ETABLERING AF REFERENCEDRÆNET	69
5.2	RESULTATER FRA DUAL-PHASE TESTS	70
6	VURDERING AF EFFEKTEN AF HYDRAULISK FRAKTURERING	75
6.1	HYDRAULISK YDELSE OG PÅVIRKNINGSOMRÅDE	75
6.2	ERFARINGER MED DET GENNEMFØRTE TEKNOLOGIUDVIKLINGSPROJEKT	76
6.2.1	Anlægsfasen	76
6.2.2	Opnåede hydrauliske effekt	78
6.2.3	Anlægsøkonomi	79
7	REFERENCER	81

BILAG

Bilag A	Situationsplan
Bilag B	Geoteknisk rapport
Bilag C	Slugttest afvikling m.v.
Bilag D	Modelopsætning (MODFLOW)
Bilag E	Datablade for kemikalier samt propant
Bilag F	Datablade for anvendte packertype
Bilag G	Feltjournal
Bilag H	Georadar

Forord

For mere end 50 år siden opdagede man, at etablering af kunstige sprækker (frakturer) i aflejringer, hvorfra olie og gas blev udvundet, medførte en væsentlig produktionsstigning. Baseret på denne opdagelse har man, specielt i Nordamerika (USA), igennem de seneste godt 10 år udført pilot- og fuldskalaforsøg med henblik på at vurdere fraktureringsteknikkens egnethed i forbindelse med oprensning af forurenede jord og grundvand i lavpermeable aflejringer. Både ved hydraulisk frakturering (vand/boremudder anvendt) og pneumatisk frakturering (luft anvendt) er sprækker søgt etableret, og begge fraktureringsteknikker har under amerikanske forhold oftest vist sig velegnede og økonomisk favorable /ref. 1, 2, 3 og 4/. Erfaringerne i USA er primært indhentet fra fraktureringsforsøg udført ved lodret boreteknik, mens kun få forsøg ved anvendelse af vandret boreteknik er afprøvet i fuldskala.

I nærværende projektsammenhæng er hydraulisk frakturering, udført ved vandret boreteknik, for første gang afprøvet på en morænelerslokalitet i Danmark, og så vidt vides også i Europa.

Formålet hermed har dels været at beskrive hydraulisk frakturering udført ved vandret boreteknik og tilhørende design for denne teknik, dels at dokumentere denne fraktureringstekniks egnethed i forbindelse med implementering og drift af et afværgetiltag baseret på dobbeltfase-ekstraktion (Dual-Phase-Extraction, efterfølgende benævnt DPE).

Projektet er gennemført på lokaliteten Slagelsevej 190 i Næstved og med Storstrøms Amt som bygherre. Projektet, der er medfinansieret af Miljøstyrelsens Teknologiudviklingsprogram for jord- og grundvandsforurening, er afviklet i perioden oktober 1999 - december 2000.

Situationsplan for lokaliteten, incl. placering af planlagte dræn samt tilhørende behandlingsanlæg m.v., er vedlagt i bilag A.

Rapporten er udarbejdet af NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S. I forbindelse med design- og anlægsfasen har Mr. Dana Brock fra det rådgivende ingeniørfirma Veizades & Associates, Inc., San Francisco, USA, været tilknyttet projektet som NIRAS' underrådgiver. Bertel Nilsson, GEUS, har medvirket som faglig sekretær på projektet og har i samarbejde med Ingelise Møller, GEUS, bidraget med afsnit 3.3.3. om tolkning af georadardata.

Sammenfatning og konklusioner

Formålet med dette projekt har været at belyse, hvorvidt hydraulisk frakturering er en cost-effektiv afværgeteknik i en lavpermeabel aflejringsmoræner. På den aktuelle lokalitet er frakturering benyttet for at forbedre den hydrauliske effekt af vandrette dræn indskudt i moræner. Afværgepumpning fra dræne foretages vha. Dual Phase Extraction (også benævnt DPE).

I rapporten er der givet en beskrivelse af, hvordan systemet er designet, erfaringer fra etablering samt resultaterne af en række kortvarige hydrauliske test af de etablerede dræn. Langtidseffekten af dræne samt driftserfaringerne og -økonomien afrapporteres i en separat rapport, når det samlede afværgetiltag har været i drift i ca. 1 år.

På projektlokaliteten er der konstateret en kraftig forurening med bl.a. chlorbenzener og aniliner fra terræn og ned til en dybde på ca. 5 m u.t. Den horisontale udbredelse af selve 'hot-spot' området er skønnet til ca. 500 m².

Geologien udgøres øverst af 1-2 meter fyld og herunder moræner til en dybde på ca. 23 m.u.t., hvor kalken (Danien) er anført.

I moræneleren er kalken generelt udvasket til ca. 0,5 m.u.t., mens redoxgrænsen, i form af farveskift fra brun til grå, er beliggende ca. 2,3 m.u.t. Moræneleren formodes at være naturligt opsprækket til mere end 5 m.u.t.

Dybere i moræneleren (16-18 m.u.t.) findes der indslag af morænegrus. Dette lag er vandførende, men adskilt i forhold til det primære magasin (kalken) af et lerlag af ca. 5-7 m's tykkelse. I det primære magasin, der er spændt, er der registreret et hydraulisk trykniveau beliggende ca. 1,5-2 m.u.t.

De kvartære aflejringer af moræner udgør et sammenhængende sekundært magasin med en nedadrettet vertikal trykgradient på ca. 0,03 (m/m). Det hydrauliske trykniveau, målt i toppen af moræneleren (2 m.u.t.), viser således et trykniveau, der er ca. 0,5-0,75 m større end i kalken. Sluttest udført i korte filtre (l = 30 cm, diameter = ø25 mm) viser en horisontal hydraulisk ledningsevne i moræneleren på ca. 1,5-3,2E-07 m/s i de øverste 2-3,5 m.u.t., aftagende til ca. 3,5E-08 m/s i en dybde på 4,3 m.u.t.

På baggrund af den udførte risikovurdering blev det oprindeligt vurderet, at den mest velegnede afværgeteknik på lokaliteten var at afskære den naturlige nedadrettede transport af opløste forureningskomponenter. Det blev vurderet, at dette kunne gennemføres ved etablering af en opadrettet gradient vha. afværgepumpning fra 3-5 parallelle og horisontalt installerede dræn lagt i en dybde på ca. 4,5 m u.t. i hot-spot området.

I forbindelse med detailprojekteringen blev det besluttet at erstatte de skitserede 3-5 dræn med 2 hydraulisk frakturerede vandrette dræn, idet der herved forventedes den samme hydrauliske effekt samt en anlægsøkonomisk besparelse.

Baseret på udenlandske erfaringer var det forventet, at de inducerede sprækker, etableret ved hydraulisk fraktureringsteknik, ville blive udbredt i en afstand på 4-8 meter fra drænene (svarende til en samlet sprækkebredde på 8-16 meter).

Effekten af hydraulisk frakturering blev desuden simuleret med en grundvandsmodel (MODFLOW). Simuleringen indikerede, at der kunne opnås en forøget tilstrømning af vand (vandydelse) på ca. 3-5 gange samt en væsentligt større horisontal udbredelse af det sænkingspåvirkede område på ca. 2-3 gange ifht. "almindelige" dræn.

Designet af selve fraktureringsprocessen og beskrivelsen af det nødvendige specialværktøj er i væsentlig grad baseret på underrådgivning fra en ekstern amerikansk konsulent. Disse overvejelser er detaljeret beskrevet i denne rapport, og kan udgøre et vigtigt fundament for fremtidige projekter.

Som en del af designet blev der gennemført laboratorieforsøg på en række kerneprøver af den intakte moræneler på lokaliteten. Formålet hermed var at få fastlagt de væsentligste geologiske og geotekniske parametre for moræneleren. På baggrund af disse forsøg forventes sprækkeorienteringen af de inducerede sprækker i moræneleren at blive overvejende horisontal.

Baseret på erfaringerne fra anlægsfasen er det især følgende forhold, som kræver opmærksomhed:

1. Håndtering af den fraktureringssuspension, der anvendes for injektion i forskårne sprækker, kræver væsentlig erfaring og rutine hos den udførende entreprenør.
2. Arbejdet kræver en del specialudstyr, bl.a. til forskåring af sprækker (revneskæreværktøj), frakturering (fraktureringsapparat), ligesom der skal benyttes en specialpumpe, der kan pumpe det højviskose pumpemedie.

Disse forhold er detaljeret beskrevet i rapporten.

Langs 2 vandrette borer blev der etableret 8 ud af i alt 10 planlagte sprækker (frakturer) samt installeret 35 meter filter i hver af disse.

Før projektets opstart var det planlagt at injicere min. 120 l propant pr. induceret sprække for at opnå den ønskede sprækkeradius på min. 4 m i en sprække med en gns. apertur på 3mm. I forbindelse med fraktureringen blev der til 4 ud af de 8 etablerede sprækker reelt injiceret 160-240 l propant (kvarts sand), mens der i de resterende 4 er injiceret ca. 120 l.

Prisen pr. løbende meter installeret vandret dræn i ufraktureret henholdsvis fraktureret moræneler beløb sig til ca. kr. 3.400,- henholdsvis ca. kr. 7.100,- excl. moms, svarende til at frakturerede dræn for nuværende er min. dobbelt så dyre at etablere som almindelige dræn.

Prisforskellen mellem etablering af de 2 dræntyper vurderes på kommende projekter at blive væsentligt større end ovennævnte erfaringstal fra dette projekt indikerer.

Ved lignende projekter bør der ved budgetteringen derfor benyttes en højere meterpris på i størrelsesordenen 10-15.000 kr., excl. moms, pr. meter installeret fraktureret dræn, indtil større erfaringsgrundlag mht. fraktureringsteknikken er opbygget i Danmark.

Kortlægningen af den faktiske udbredelse af sprækkerne er undersøgt ved visuel inspektion samt mineralogisk analyse af kerneprøver udtaget i afstande op til 4,5 m vinkelret fra drænene. Af de i alt 8 individuelt opsprækkede zoner er udbredelsen af 3 sprækker søgt kortlagt.

En enkelt sprække viser en næsten horisontal udbredelse til mindst ca. 4 m fra drænet, mens de øvrige to lokaliserede sprækker er stejlt stigende (40-50° ifht. vandret) og med en horisontal udbredelse på mindst ca. 3 m fra drænet.

Endvidere er der konstateret gennembrud af enkelte sprækker til terræn ("blow-up"), hvilket kan skyldes en kortslutning via naturlige sprækker og andre inhomogeniteter i morænen.

Sammenfattende kan det konkluderes, at det er muligt at etablere sandfyldte sprækker med en tykkelse på 1-20 mm ud til en afstand på mindst 3-4 m på begge sider af drænet (svarende til en samlet sprækkebredde på 6-8 meter). Den gennemsnitlige apertur vurderes til 2-4 mm, svarende til at sprækker med et fladeareal på 30-120 m² er etableret. Endeligt viser resultaterne af den udførte sprækkeidentifikation, at det er vanskeligt at forudsige sprækkernes orientering.

For at kunne vurdere den hydrauliske effekt opnået ved frakturering af de to dræn er der også etableret et referencedræn. Referencedrænet er placeret i samme kote og opbygget i samme materialer og dimension, men er placeret i en horisontal afstand af ca. 27 m fra de frakturerede dræn. Geologien omkring referencedrænet vurderes i store træk også at være repræsentativ for forholdene omkring de frakturerede dræn.

På såvel de to frakturerede dræn samt på referencedrænet er der gennemført en DPE-test med en varighed på 2-7 dage. Under forsøgene er der løbende gennemført målinger af vandydelsen fra drænet og afsænkningen af vandspejlet i et antal observationsboringer - alle etableret med niveauspecifikke filtre. Vandydelsen fra de frakturerede dræn er registreret til ca. 40-80 liter pr. m filter pr. døgn, mens der fra referencedrænet er registreret en vandydelse på ca. 90 liter pr. m filter pr. døgn. På baggrund af de kortvarige DPE-tests kan der, imod forventning, således ikke registreres nogen signifikant forøgelse i vandydelsen fra de frakturerede dræn ifht. referencedrænet. Om denne tendens også gælder på længere sigt, vil først kunne afgøres efter det første års monitorering.

Afsænkningen af grundvandsspejlet omkring de frakturerede dræn sker meget hurtigt i filtre med direkte kontakt til en af de etablerede sprækker - op til flere meters sænkning allerede efter få timers dræning. Selve sænkingsudbredelsen fra sprækkerne og ud i morænematrixen sker kun langsomt, og efter 2-3 dage vurderes der kun at være sket en afsænkning på 1-10 cm i en afstand på ca. 1 m vinkelret på sprækkerne.

For det ikke frakturerede dræn observeres en begrænset sænkingsudbredelse - svarende til at trykket primært forplantes gennem selve matrixen. Der vurderes her kun at være sket en afsænkning på 1-10 cm i en afstand af 1-2 m fra selve drænet.

Sammenfattende kan det ud fra de kortvarige DPE-test konkluderes, at det horisontale påvirkningsområde for hhv. ufrakturerede og frakturerede dræn er

i størrelsesordenen hhv. ca. 1 m og ca. 3 m på hver side af drænene (svarende til et samlet påvirkningsområde på hhv. 2 og 6-8 m). Dette er i rimelig overensstemmelse med de gennemførte modelberegninger samt amerikanske erfaringer. Derimod har der ikke kunnet eftervises nogen forøget ydelse ved frakturering, hvilket ikke er i overensstemmelse med modelberegningerne, der indikerede en 3-5 gange forøgelse.

Da der ikke er opnået stationære trykforhold ved de kortvarige forsøg, vil kun den løbende monitoring kunne dokumentere, hvorledes trykniveauet udvikler sig, og om det vil lykkes at vende den hydrauliske gradient.

Summary and conclusions

The objective of this project has been to establish whether hydraulic fracturing will be a cost-effective remediation technique in low permeable glacial deposits. At the test site, fracturing has been applied to improve the hydraulic effect of horizontal drainpipes inserted into the moraine clay. Remedial pumping from the drainpipes was carried out by use of Dual Phase Extraction (DPE).

The report gives an account of the design of the remedial system, experiences during the physical establishment of the system, and the results of a series of short-term hydraulic tests of the performance of the installed drain pipes. The long term effectiveness and economy for the drain system and experience acquired during operation will be reported in a separate report after a total remediation period of approximately 3 years.

At the test site, a heavy contamination with chlorobenzene and anilines has been detected from the soil surface to a depth of approx. 5 m below ground level. The horizontal extent of the "hot-spot" has been estimated at approx. 500 m².

The site geology comprises fill in the upper 1-2 meters with moraine clay beneath this to a depth of approx. 23 m, where the "Danien" chalk layer is found.

In the moraine clay layer, any chalky deposits have generally been leached from upper 0.5 m, while the redox boundary is observed as a colour shift from brown to grey approx. 2.3 m below the clay surface. The moraine clay is assumed to be naturally fractured to a depth of 3 - 5 m.

At a depth 16 - 18 m, there are lenses of moraine gravel in the moraine clay. This is a water-bearing layer, separated from the primary water reservoir (in the chalk aquifer) by a 5-7 m thick clay layer. The water table in the primary reservoir is artesian with a hydraulic pressure level 1.5-2 m below ground level.

The quaternary deposits of moraine clay constitute a hydraulically linked secondary reservoir with a downward vertical pressure gradient of approx. 0.03 (m/m). The hydraulic pressure level measured in the top of the moraine clay (2 m below ground level) thus shows a pressure level approx. 0.5-0.75 m higher than measured in the primary chalk reservoir. Slug tests carried out in short filters (l = 30 cm, diameter = 25 mm) show a hydraulic conductivity in the moraine clay of approx. 1.5-3.2e-07 m/s in the upper 2-3.5 m below ground level, decreasing to approx. 3.5e-08 m/s in a depth of 4.3 m.

On basis of a risk assessment, it was initially assessed that the most suitable remediation technique for this locality would be to hinder the naturally occurring downward transport of chlorinated solvents. It was assessed that this could be done by creating an upward gradient by remediation pumping from 3 -5 parallel and horizontally installed drain pipes in a depth of approx. 4.5 m below ground level in the hot-spot area.

During the detailed system design, it was decided to replace the 3-5 drainpipes originally planned with 2 horizontal drainpipes installed with hydraulic fracturing of the moraine clay. These 2 horizontal hydraulic fractured drain systems were expected to give the same hydraulic effect as the “standard” drains, and furthermore would be more economical during operation of the remediation system.

Based on experiences in other lands, it was expected that the fractures induced by hydraulic fracturing would spread to a distance of 4 - 8 meters from the drainpipes (corresponding to a total fracture zone width of 8 -16 meters).

Furthermore, a groundwater model (MODFLOW) was used to simulate the effect of hydraulic fracturing. Compared to a “standard” drain system, the simulation of the hydraulic fractured horizontal drains indicated that the inflow of water could be increased 3 - 5 times, and that a 2 - 3 times significantly larger range of effect on the water table could be achieved.

The design of the fracturing process and the description of the special tools required for the process have to a great extent been based on assistance rendered by an American sub-consultant. These aspects are described in detail in this report, and are of importance for future projects.

As part of the design, lab tests were carried out on a number of core samples of the intact moraine clay from the test site. The objective was to define the determining geological and geo-technical parameters for the moraine clay. On the basis of these tests, the direction of the induced fractures in the moraine clay was expected to be mainly horizontal.

Based on the experiences from the construction phase, the following conditions require special attention:

1. Handling of the fracturing slurry used for injection in the pre-cut fractures demands a great deal of experience and care by the contractor.
2. The work requires special equipment for pre-cutting of fractures (crack cutting tools), fracturing (fracturing machinery), etc., as well as a special pump that can cope with the high viscosity slurry.

These conditions are described in detail in the report.

Eight of the ten planned fractures were established along the 2 horizontal borings, and 35 m of filter screen were installed in each of the borings.

It was initially planned that a minimum of 120 l “propant” (quartz sand mixed in the slurry) per fracture would be injected to achieve the desired average fracture radius of 3 mm for a minimum of 4 m length of the fracture. In the actual test system, 4 of the 8 fractures were injected with 160-240 l propant, while the remaining 4 were injected with approx. 120 l.

The price for the installed horizontal drain pipe in unfractured and hydraulically fractured moraine clay amounted to approx. kr. 3,400 and 7,100 per linear metre, excl. VAT respectively. The hydraulically fractured drain pipe system is therefore at present at least twice as expensive to install as “standard” drainpipes.

It is assessed that in future projects, an even greater price difference can be expected, and it is suggested that a metre price of about 10-15,000 kr. excl. VAT per metre installed fractured drainpipe should be used for economic proposals, until more experience concerning the fracturing technique has been gained.

The actual spreading of the fractures has been assessed by visual inspection as well as mineralogical analysis of core samples taken at a distance of up to 4.5 m perpendicular to the drainpipes. Three fractured zones out of a total of eight were investigated by these techniques.

An essentially horizontal fracture zone spreading to a distance of at least 4 m from the drainpipe was localised for one zone. The other two fracture zones showed steeply inclined fractures rising 40-50 from the horizontal plane and with relative horizontal distances of at least 3 m from the drainpipes.

Furthermore, some fractures extended to the soil surface ("blow-up"), which might be due to formation of short-circuits via natural fractures and other inhomogenities in the moraine clay.

It can be concluded that it is possible to establish 1-20 mm sand-filled fractures with a range of at least 3-4 m on either side the drain (corresponding to a total fracture zone width of 6-8 metres). The average aperture is estimated at 2-4 mm, which indicates a surface area of 30-120 m² has been established in the fracture zone. Furthermore the investigation has shown that it is extremely difficult to predict the orientation of the fractures.

To be able to assess the hydraulic effect obtained by hydraulic fracturing of the two drain systems, a reference drain was also established. The reference drain was placed at the same level and constructed of the same materials and in the same dimension as the fractured drain systems, but was placed at a distance of approx. 27m from the fractured systems. It is assessed that the geology surrounding the reference drain is representative for the conditions around the fractured drain systems.

A DPE-test over the course of 2-7 days has been carried out on both the two fractured drains and the reference drain. During the tests, the water yield from the drains and water table measurements in a number of observation wells – all installed with screens at different levels - have been recorded. The water yield from the fractured drain systems is approx. 40-80 litres/filter screen/day, while the water yield from the reference drain was approx. 90 litres/filter screen/day. Contrary to all expectations, no significant increase in the water yield from the fractured drain compared to the reference drain was observed during the short DPE-test. And whether this lack of increase in water yield also applies over a longer time scale can only be determined after the first year of monitoring.

The lowering of the groundwater level around the fractured drain system occurs rapidly in the filter screens with direct contact to the established fractures – a lowering of several meters is achieved after only few hours of draining. The actual propagation of fall in the water table along the fractures and into the moraine matrix only happens slowly, and it is assessed that the water level is only lowered by 1-10 cm at a distance of approx. 1 m perpendicular to the fractures after 2-3 days.

For the non-fractured drain, only a limited propagation of the fall in water table is observed in that the pressure is primarily transmitted through the matrix itself. Only a total fall of 1-10 cm at a distance of 1 – 2 m's from the drain has been observed.

From the short DPE-tests, it can thus be concluded that the unfractured and fractured drain systems affect a zone on either side of the drains of approx. 1 m and 3- 4 m respectively (corresponding to a total zone width of 2 and 4 - 8 m, respectively). This is also in accordance with the model calculations and experiences in USA. However the model calculations had predicted increases of 3 - 5 times the water yield in the hydraulically fractured drain systems and this increase in yield was not observed in the practical tests. Furthermore, it was not possible to obtain steady state potentiometric measurements during the very short tests, and therefore documentation concerning the changes in water table and reversal of the hydraulic gradient can only be collected during the on-going monitoring during the first year of operation.

1 Indledning

1.1 Baggrund

På Slagelsevej 190 i Næstved har der i perioden 1948-1955 været produktion af sødemidlet Dulcin. De gennemførte undersøgelser har vist, at produktionen har medført en kraftig forurening af jord og terrænnært grundvand med primært chlorbenzener og chloraniliner. På baggrund af gennemførte forureningsundersøgelser på lokaliteten er det vurderet, at forureningen på sigt kan bevirke en uacceptabel påvirkning af det primære magasin, mens forureningen ikke vurderes at udgøre en uacceptabel påvirkning af hverken indeklima eller recipienter /ref. 5, 6 og 7/.

På baggrund heraf iværksatte Storstrøms Amt i 1999 et afværgeprojekt med sigte på at eliminere eller som minimum nedsætte risikoen for en fortsat forurenings-spredning mod det primære magasin samt at reducere forureningsmængden og hermed kildestyrkekonzentrationen, således at påvirkningen af ude- og indeklimaet minimeres. Som udgangspunkt omfattede projektet etablering af 3-5 vandrette dræn i moræneleren med tilhørende behandlingsanlæg for rensning af opsuget forurenede drænvand.

Samtidig med detailprojekteringen af ovenstående blev det af NIRAS foreslået bygherren at frakturere jorden hydraulisk omkring drænniveauet, for herved at reducere antallet af nødvendige dræn og stadig opnå den ønskede dræneffekt. Da Miljøstyrelsen parallelt hermed var interesseret i at gennemføre feltforsøg med hydraulisk frakturering, og da geologien på lokaliteten viste sig at være velegnet, blev der iværksat en række aktiviteter under Miljøstyrelsens Teknologiudviklings-program for jord- og grundvandsforurening.

Parallelt med nærværende projekts gennemførelse er Miljøprojekt nr. 541, år 2000, med titlen "Frakturering" gennemført under Miljøstyrelsens Teknologiudviklings-program for jord- og grundvandsforurening. Heri beskrives forskellige fraktureringsmetoder og teorien bag, og endvidere er anvendelsesmuligheder belyst ved en række eksempler fra USA. Endelig er metodens egnethed under danske forhold vurderet.

1.2 Formål med aktiviteter under teknologiprogrammet

Hovedformålet med gennemførelsen af dette projekt kan opdeles på følgende punkter:

- Design-parametre og generelle retningslinier for dimensionering af hhv. kunstige sprækker ved hydraulisk fraktureringsteknik, vandrette dræn og monitoringsboringer.
- Erfaringer fra gennemførelse af anlægsfasen og betydningen heraf for fremtidige projekter.
- Dokumentation for og sammenligning af opnåede hydrauliske ydelser for vandrette dræn etableret i ufraktureret henholdsvis fraktureret moræneler. Amerikanske undersøgelser indikerer en hydraulisk kapacitetsforøgelse,

målt som oppumpet mængde, på 5-100 gange, som følge af fraktureringen /ref. 1/.

- Dokumentation af den opnåede hydrauliske afsenkning (eller "grundvandssenkning") omkring ovennævnte to typer dræn. Baggrunden herfor var, at det som følge af fraktureringen forventedes, at 2 dræn etableret i fraktureret moræneler ville kunne give samme effekt som 3-5 dræn etableret i ufraktureret moræneler.
- Vurdering af anlægsudgifterne forbundet med etablering af vandrette dræn i hydraulisk fraktureret henholdsvis ufraktureret moræneler.

Ved definitionen af projektet blev det endvidere besluttet, at der skulle udarbejdes en afsluttende statusrapport efter opsamling af 1. års driftsdata. I statusrapporten vil der blive fokuseret på følgende:

- Hydrauliske langtidseffekter af vandrette dræn etableret i ufraktureret henholdsvis fraktureret moræneler.
- Driftsmæssige erfaringer med aktuelle afværgetiltag.
- Retningslinier for drift, monitorering (og afslutning) af aktuelle afværgetiltag.

Denne statusrapport forventes udgivet primo 2002, og alle driftsdata vil blive behandlet samlet heri.

2 Lokaltet og forureningsituation

2.1 Historik

Lokaliteten er beliggende Slagelsevej 190 i Næstved og er af Storstrøms Amt registreret som affaldsdepot 373-92.

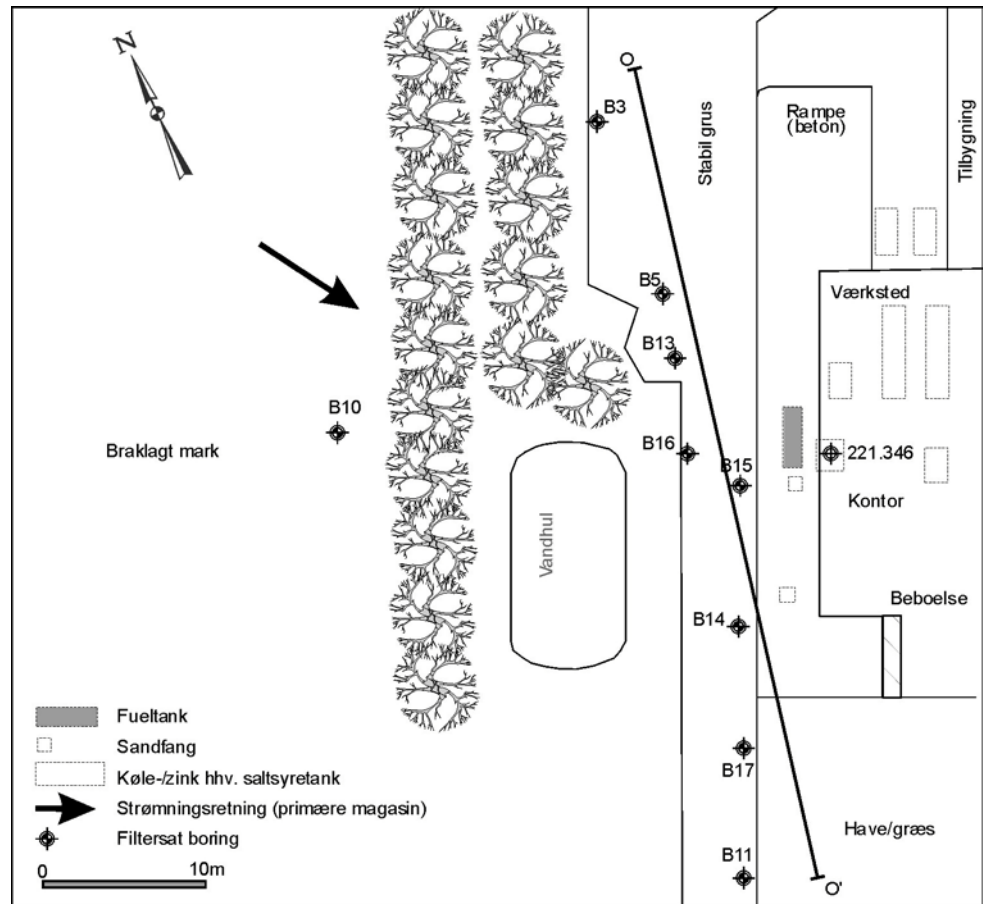
Omkring 1948 opførte virksomheden STAFA fabriksbygningerne til produktion af sødemidlet Dulcin. Det er vurderet som sandsynligt, at der ikke er gennemført destillation af rå benzol på fabrikken, men at produktionen alene var baseret på kemisk ren benzol eller eventuelt kun har omfattet de afsluttende reaktioner med nitrophenol og phenitidin /ref. 6/. I forbindelse med denne aktivitet er der via utætte kloakrør samt ved spild direkte til terrænet sket en jord- og grundvandsforurening med primært chlorbenzen, chlornitrobenzener og chloraniliner.

Efter 1955 drev virksomheden GASA en varmtgalvaniseringsanstalt i fabrikslokalerne på lokaliteten. Ved varmtforzinkning dyppes stålemnerne i et kar med smeltet zink, hvor der foretages en forzinkning af emnerne. Emnerne renses for forzinkning ved nedsænkning i syrebad, kaldet bejdsning, med henblik på fuldstændig fjernelse af glødeskal og rust. Tre kar med smeltet zink var sammen med to mindre kølekar og et saltsyrekar placeret inde på fabrikken. I nogle tilfælde anvendtes loddevand, som bestod af en zink/salmiakopløsning. To saltsyrekar til forrensning var placeret udendørs. Herudover fandtes flere nedgravede tanke til svær fuelolie, som anvendtes til opvarmningen under processen ved smeltning af zink. Brugt kølevand blev udledt via sandfang til et rørlagt vandløb. I forbindelse med varmtforzinkningsaktiviteterne er der via utætte rør, kar og tanke sket en jord- og grundvandsforurening med primært zink og cadmium, hvor sidstnævnte findes som en urenhed i zink /ref. 6/.

Lokaliteten anvendes i dag til blandet bolig- og erhvervsformål (vognmandsforretning med værksted), og er bebygget med en værkstedsbygning med tilhørende kontor og beboelse.

Indretning af lokaliteten fremgår dels af figur 2.1, hvor ligeledes ældre monitoringsboringer samt placering af trace O-O` er vist, dels af bilag A. I dette bilag er placering af planlagte (projekt erede) frakturerede dræn, entrance-pit (indgangshul) og exit-pit (udgangshul), referencedræn, monitoringsboringer m.v. vist. Desuden præsenteres placeringen af det vandbehandlingsanlæg, hvori oppumpet forurennet grundvand skal oprensnes ved biologisk jernfiltrering, kulfiltrering samt nitrifikation før afledning til recipienten (Evergrøften) .

Der er i nærværende rapport ikke nærmere beskrevet vedrørende detailopbygning af vandbehandlingsanlægget, da dette ligger uden for dette projektets rammer.



Figur 2.1 Indretning af lokaliteten, incl. tracé O-O

2.2 Geologi og hydrogeologi

Terrænkoten på lokaliteten er beliggende i omkring kote 14-15 meter, DNN (efterfølgende angives kote i m, DNN, som kote xx m).

Geologien består øverst typisk af et fyldlag med en mægtighed på 1-2 meter. Fyldlaget består ofte af fugtigt sand/grus med en rødlig farve og er underlejret af kalkholdig moræneler.

I moræneleren træffes et lokalt indslag af morænegrus i 16-18 meter under terræn (efterfølgende m.u.t.), svarende til kote -1 m til -3 m.

Kalkgrænsen er, pba. en visuel prøvebedømmelse, tidligere lokaliseret i kote ca. 13,4 m, svarende til 0,5-1,5 m.u.t. /ref. 6/. Som led i nærværende projekt blev kalkgrænsens placering verificeret ved tilsætning af fortyndet saltsyre (ca. 10% HCl) langs gravefronter. Syre-/basereaktion ("brusning") blev registreret i ca. kote 13,4 m og herved i overensstemmelse med den visuelle bedømmelse.

Redoxfronten, dvs. den front, hvor der registreres et farveskift fra brunt til gråt, grundet overgang fra oxiderede til reducerede forhold i formationen, blev visuelt påvist i ca. kote 11,9 m. Det påviste farveskifte skyldes oxidering af jernforbindelser.

Moræneleren på lokaliteten vurderes sammenlignelig med moræneleren i Haslev, hvor der tidligere er gennemført en omfattende sprækkeidentifikation

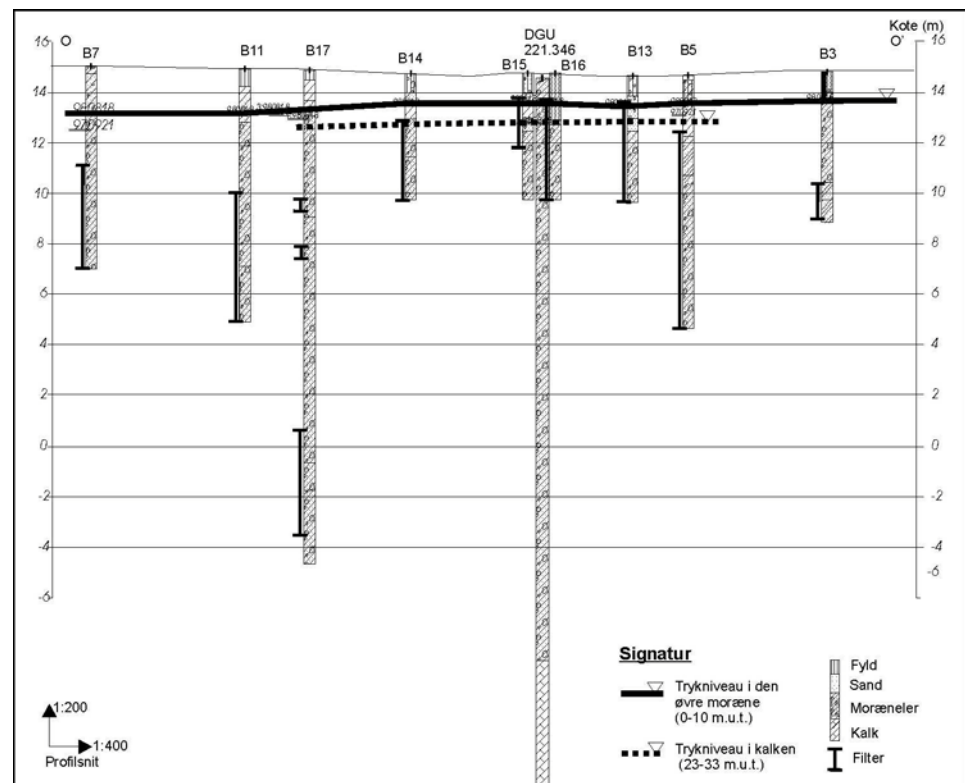
/ref. 8/. Baseret på denne vurdering antages moræneleren på aktuelle lokalitet at kunne karakteriseres som opsprækket til 4-5 m.u.t. og lokalt til større dybde.

Moræneleren underlejres ca. 23 m.u.t. af kalken (Danien), der regionalt udgør det primære grundvandsmagasin. Potentialet i det primære magasin ligger i omkring kote ca. 13, og strømningsretningen er sydøstlig mod Karrebæk fjord.

Trykniveauet i det sekundære magasin, der udgøres af moræneleren, ligger ca. 50-75 cm højere end i kalken, svarende til kote 13,5-13,75. Ud fra de målte trykniveauer samt tidligere målte tørstofindhold i udvalgte prøver vurderes moræneleren at være næsten 100% vandmættet.

Under de nuværende forhold optræder der derfor regionalt en nedadrettet trykgradient i moræneleren, som vurderes at kunne medføre en uacceptabel risiko for forureningsspredning mod det primære grundvandsmagasin.

I figur 2.2 er vist et geologisk længdeprofil langs trace O-O` samt det registrerede trykniveau i moræneleren og kalken. Placering af tracéer fremgår af tidligere viste figur 2.1.



Figur 2.2 Lokalt geologisk længdeprofil langs tracé O-O` samt indmålte trykniveauer

2.3 Forureningsudbredelse

I forbindelse med tidligere gennemførte undersøgelser på lokaliteten /ref. 6 og 7/ er der påvist en forholdsvis kraftig jord- og grundvandsforurening hidrørende fra den tidligere sødemiddelproduktion og varmtgalvaniseringsvirksomhed. Forureningen vurderes at udgøre en risiko for grundvandsressourcen.

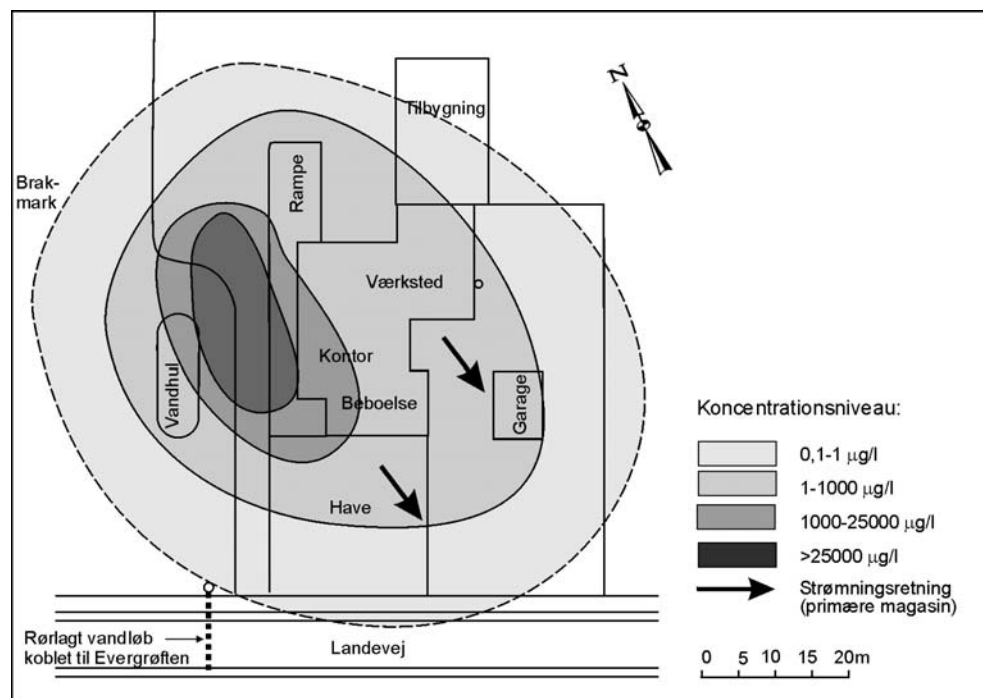
Forureningen udgøres primært af chlorbenzen, chlornitrobenzener og chloraniliner, og der er påvist koncentrationer på 5-50 mg/liter til ca. 5 dybde. Et maksimalt benzenindhold på 265 µg/liter, et markant indhold af chlorid på max. 1 mg/l samt forhøjede indhold af jern, mangan, ammonium, CO₂ (aggressivt) og NVOC er ligeledes påvist. Det høje chloridindhold tilskrives forurening med afledt procesvand ved kloring af benzen.

Den kraftigste grundvandsforurening på lokaliteten er afgrænset til et ca. 500 m² stort areal beliggende mellem vandhullet og kontor-/beboelsesafsnittet, jf. figur 2.3. Forureningen er her overvejende påvist i de øverste 5 m af den vandmættede moræneler. Omkring boring B13 og B16 er der påvist fri fase, som vurderes domineret af chlornitrobenzener og chloraniliner.

Da moræneleren vurderes næsten 100% vandmættet, forventes forureningstransporten alene at foregå på opløst form eller som separat fri fase.

Der er ved tidligere undersøgelser /ref. 6 og 7/ påvist forureningsspredning til et meget vandførende og ca. 2 m tykt lag af morænegrus indlejret i moræneleren fra ca. 16-18 m.u.t, mens der ikke er konstateret forurening i kalken og hermed ikke vurderes at være sket gennemslag af forurening til det primære magasin.

På nedenstående figur 2.3 er vist forureningsudbredelsen for hovedforureningskomponenterne chlornitrobenzener og chloraniliner i vandprøver udtaget fra moræneleren.



Figur 2.3 Forureningsudbredelse i grundvandet

2.4 Risikovurdering og afværgekoncept

2.4.1 Risikovurdering

I det følgende er gennemgået risikovurderingen i relation til grundvandsressourcen samt overfladerecipienten Evergrøften. Denne recipient er placeret ca. 100 m syd for lokaliteten.

Indeklimaproblemstillingen og metalforureningen er der ikke redegjort nærmere for i det følgende. Der henvises i stedet til tidligere forureningsundersøgelse /ref. 6/, hvori det konkluderes, at påviste poreluftforurening under bygningen ikke vurderes at give anledning til uacceptabelt indeklima, ligesom der ikke vurderes at være uacceptabel kontaktrisiko ved aktuelt påviste metalforurening.

2.4.1.1 *Det primære grundvand*

Risikovurderingen over for grundvandet er gennemført og underbygget ved simulering med en opstillet grundvandsmodel (MODFLOW med stoftransport).

På baggrund af modelresultaterne er det skønnet, at der sker en årlig stoftransport af total mængde miljøfremmede stoffer i størrelsesordenen ca. 50 gram til det højpermeable lag af morænegrus indlejret (16-18 m.u.t.) i morænelersaflejringen /ref. 7/.

Da dette højpermeable lag på lokaliteten tilsyneladende er adskilt fra selve kalken af et ca. 5 m tykt morænelerslag, samt da trykniveauet i det indlejrede lag er af samme størrelsesorden som i kalken, er den videre vertikale transport til kalken her vurderet at være minimal. Denne vurdering er i overensstemmelse med de observerede forhold, idet der ikke er påvist miljøfremmede stoffer i kalken. Drikkevandskriteriet for det primære magasin på 1 µg/l for klorholdige stoffer er således overholdt i toppen af det primære magasin i kalken.

Det vurderes dog, at der er en risiko for en væsentlig horisontal stoftransport i det højpermeable lag af morænegrus, men strømningshastigheden og retningen er ikke fastlagt, da der kun er filtersat én boring i dette niveau. Hvis lerlaget mellem den højpermeable zone og kalken lokalt mangler nedstrøms grunden, er der mulighed for en direkte kontakt med kalken og dermed risiko for en forurening af det primære magasin.

Der er ikke identificeret nogen recipienter eller andre terrænnære hydrogeologiske enheder i området, der kan medføre en dræning og dermed opadrettet vandtransport fra den højpermeable zone. Det vurderes derfor, ud fra denne generelle betragtning, at den konstaterede forurening i denne zone ultimativt må ende i kalken /ref. 7/.

Potentialet for en naturlig biologisk omsætning af de miljøfremmede stoffer i kalken vurderes at være ringe, idet de påviste chlorbenzen-forbindelser ikke er påvist nedbrydelige under anaerobe forhold.

2.4.1.2 *Nærmeste indvindinger og recipienter*

En eventuel kontakt mellem den højpermeable zone i morænen og kalken kan medføre risiko for en påvirkning i de nærmeste nedstrøms beliggende borer. Såfremt den nærmeste enkeltindvinding (DGU ark 221.986) i 600 m's afstand ligger direkte nedstrøms, skønnes den på sigt at kunne påvirkes

måleligt. Denne vurdering er alene baseret på et skøn, idet modelopsætningen alene har omfattet et mindre område omkring grunden, hvor geologien er kortlagt /ref. 7/.

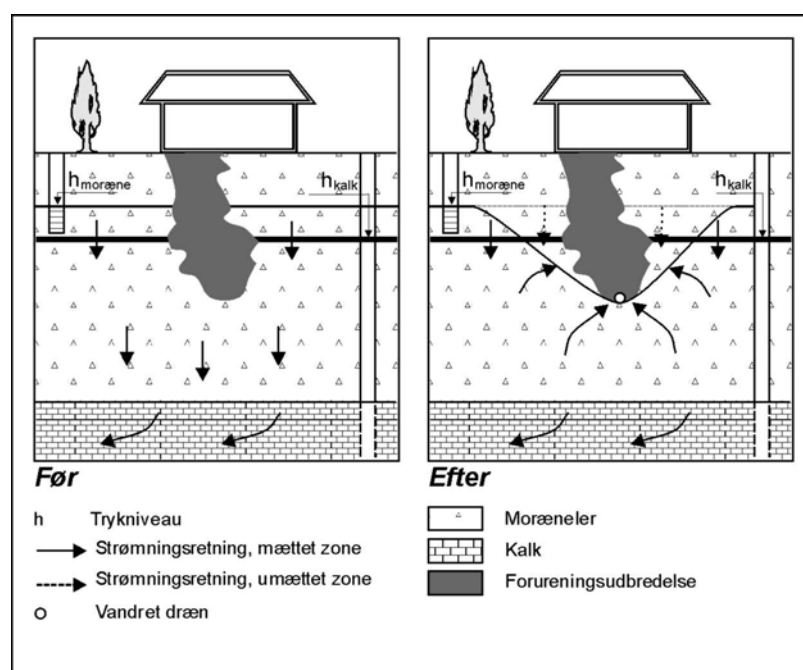
Drænvandet fra lokaliteten, som tilledes en grøft på den modsatte side af Slagel-sevej, vurderes at belaste Evergrøften med en lang række miljøfremmede stoffer som benzen, klorbenzener og aniliner. Den samlede årlige stofbelastning kan med udgangspunkt i den ene måling af drænflow og koncentration estimeres til i størrelsesordenen 0,1-1 kg/år. Denne størrelsesorden er behæftet med en væsentlig usikkerhed /ref. 7/.

2.4.2 Afværgekoncept

I forbindelse med de afsluttende supplerende undersøgelser /ref. 7/ blev det vurderet, at den mest sikre løsning til afværge mod en spredning af den konstaterede forurening til det primære grundvandsmagasin var en ændring i de hydrauliske forhold ved etablering af vandrette dræn i moræneleren.

Formålet med drænløsningen var at skabe en opadrettet gradient mellem det primære og det sekundære grundvandsmagasin inden for det kraftigst forurenede område.

Den ønskede effekt på de hydrauliske forhold uden hhv. med afsænkningen af trykniveauet i morænen er skitseret på figur 2.4.



Figur 2.4 Forventet hydraulisk effekt ved etablering af dræn

For optimering af afværgeløsningen blev det i detailprojekteringsfasen besluttet at udbygge drænløsningen med etablering af kunstige højpermeable sprækker (frakturer) omkring de vandrette dræn.

3 Dimensioneringsgrundlag

3.1 Geotekniske forhold

For at vurdere risikoen for eventuel uacceptabel påvirkning af aktuelle bygningsdele samt underjordiske installationer i forbindelse med borings- og fraktureringsarbejdets gennemførelse er der gennemført en række geotekniske forsøg på lokaliteten for fastlæggelse af følgende parametre:

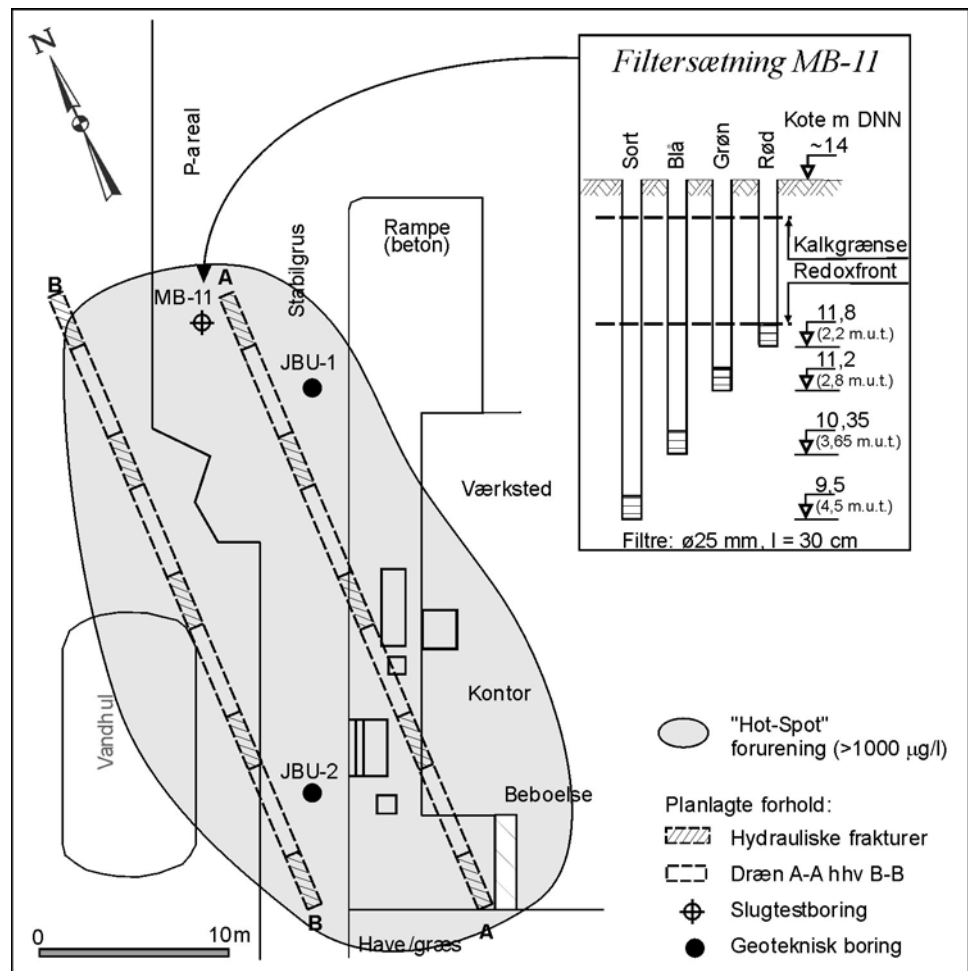
- Kornstørrelsesfordelingen
- In-situ rumvægt (γ)
- Plasticitetsindeks (PI)
- Det naturlige vandindhold (w)
- Forkonsolideringsspændingen (σ'_{pc})
- Det oprindelige spændingsniveau (σ'_o)
- OCR-værdien

For nærmere beskrivelse af anførte parametre, deres anvendelse i aktuelle sammenhæng, samt hvorledes hver af disse er fastlagt, henvises til bilag B.

Prøvetagningen er udført fra terræn og til max. ca. 5,0 m.u.t. i de 2 prøvetagningspunkter, JBU-1 henholdsvis JBU-2, jf. figur 3.1.

De første 2 meter blev udført som snegleboringer, mens de efterfølgende 3 meter blev udført ved udtag af intakte $\varnothing 50$ mm kerneprøver til 1 m rør.

Resultater af udtagne kerneprøver i 3 forskellige dybdeniveauer pr. boring danner her grundlag for vurdering af de geotekniske forhold på lokaliteten.



Figur 3.1 Placering af projekterede fraktureringsdræn, JBU-1, JBU-2, slugtest boring MB-11 samt udbredelsen af forureningen til ca. 5 m.u.t.

Hovedresultaterne fra bilag A er sammenfattet i tabel 3.1.

Boring nr. - dybde (m u.t.)	Jordart	w	PI	σ'_{pc}	σ'_o	OCR
JBU1 - 2,5	Moræneler	14,2	10,0	400	28	14
JBU1 - 3,53	Sand	16	7,4	500	40	12
JBU1 - 4,53	Moræneler	12,6	11,2	400	52	7
JBU2 - 2,5	Moræneler	16,2	10,2	180	28	6
JBU2 - 3,55	Moræneler	12,3	10,8	400	40	10
JBU2 - 4,55	Moræneler	13,1	7,2	300	52	6
Enheder		%	%	kN/m ²	kN/m ²	

Tabel 3.1 Fastlagte geotekniske parametre i boring JBU-1 og JBU-2

På det foreliggende grundlag vurderes moræneleren generelt at kunne karakteriseres som værende stærkt siltet og sandet til stærkt sandet. Der er således målt et plasticitetsindeks mellem ca. 7 og 11%, hvilket indikerer, at der er tale om en sandet moræneler, hvilket resultatet af kornstørrelsesfordelingsforsøgene også peger imod. De registrerede plasticitetstal tyder ikke på risiko for udblødning af ler og dermed risiko for evt. deformationer i jorden forårsaget af udblødning under fraktureringsarbejdet.

Desuden viser dataene, at der er tale om en overkonsolideret formation, hvor OCR-værdier på 6-14 er påvist. Dette indikerer, at overvejende vandret orienterede sprækker må forventes, hvilket tilgodeser brug af hydraulisk frakturering i aktuelle formation. Af dataene fremgår desuden, at OCR-

værdien varierer med dybden. At værdien ikke vokser med dybden, hænger udelukkende sammen med de enkelte formationers spændingshistorie (forbelastning).

I forbindelse med borearbejdet blev der ikke udført bestemmelse af den udrænedede forskydningsstyrke. Denne parameter bør dog normalt fastlægges ved lignende projekter, idet denne kan anvendes til at beskrive OCR-mønstret ned gennem lagfølgen og dermed yderligere danne grundlag for en vurdering af den forventede sprækkeorientering.

3.2 Hydrauliske forhold

For fastlæggelse af den hydrauliske ledningsevne (efterfølgende benævnt K-værdien) vertikalt igennem formationen i den øvre moræneler er der gennemført slugttests i 4 dybdeniveauer i en udvalgt monitoringsboring, benævnt MB-11.

Boringen er, jf. figur 3.1, placeret i et område langs dræn A-A, hvor der var projekteret, men aldrig blev udført en sprække (fraktur). De påviste K-værdier vurderes derfor at afspejle de faktiske forhold i den uforstyrrede/intakte moræneler.

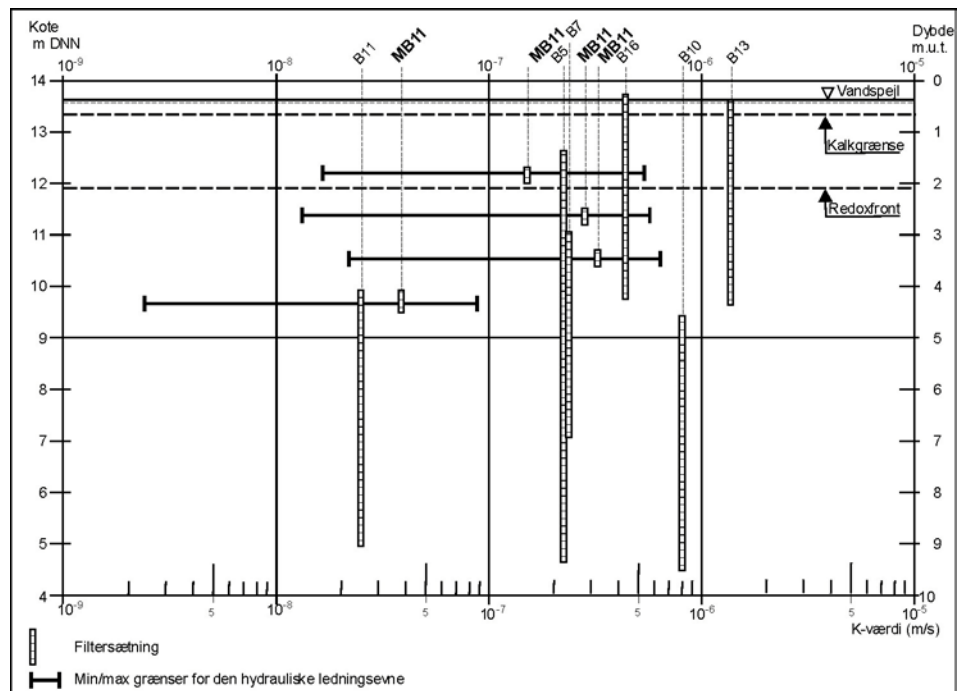
Slugttests blev udført ved henholdsvis at opsuge (benævnt "recovery") og efterfølgende tillæde (benævnt "falling head") ca. 200 ml vand til aktuelle filtre. Herved blev systemet påført en vandspejlsændring regnet i forhold til et Ro-vandspejl på ca. 1 m ved testens opstart.

For at minimere risikoen for hydraulisk påvirkning er der udført samtidig slugttest i det sorte (4,5 m.u.t.) og grønne (2,8 m.u.t.) henholdsvis i det blå (3,65 m.u.t.) og røde (2,2 m.u.t.) filterniveau, fremfor samtidig test i alle 4 filterniveauer.

På baggrund af resultaterne fra udførte slugttests er der til bestemmelse af K-værdien anvendt to empirisk udviklede beregningsudtryk, udarbejdet af hhv. Herman Bouwer/R.C. Rice og M.J. Hvorslev. De to beregningsudtryk er indeholdt i beregningsprogrammet AQTESOLV™ for Windows™.

For nærmere beskrivelse af selve slugtestafviklingen, anvendte beregningsmetoder for fastlæggelse af K-værdier samt fremkomne resultater henvises til bilag B.

I figur 3.2 er gengivet middelværdi samt max./min.værdier for K-værdier fastlagt vertikalt i den øvre del af morænen ved boring MB-11. Som det fremgår af figuren, er det her valgt også at præsentere K-værdier, fastlagt i forbindelse med tidligere udførte slugttests i andre boringer på grunden /ref. 7/.



Figur 3.2 Beregnede K-værdier i MB-11, samt tidligere fastlagte K-værdier i gamle boringer på lokaliteten

Grundet meget lange afsænkingsforløb samt indtrædelse af en kraftig regnhændelse blev slugttests i boring MB-11 gennemført, indtil der var opnået fra 50 til 100% recovery i de enkelte filtre, og ikke som ideelt til der var opnået minimum 90% recovery, jf. bilag B.

De opnåede resultater viser, at den gennemsnitlige K-værdi stiger fra ca. $1,5E-7$ m/s i en dybde på ca. 2,2 m.u.t., svarende til dybdeniveauet omkring den fastlagte redoxfront, og til en K-værdi på ca. $3,0 E-7$ m/s i en dybde på ca. 3,5 m.u.t. Herunder aftager K-værdien til ca. $3,8E-8$ m/s i 4,5 m.u.t.

Tidligere gennemførte slugttests på geologisk sammenlignelige lokaliteter har vist, at K-værdien umiddelbart under redoxfronten aftager 1-2 størrelsesordener /ref. 11/.

Resultatet af tidligere udførte slugttests på lokaliteten udviser en betydelig større variation i K-værdien ($\sim 10 E-8$ m/s til $10 E-6$ m/s) end påvist ved MB-11. Dette vurderes primært at kunne henføres til de noget længere filterlængder samt metoden for selve slugttests afviklingen, hvorfor der ikke af de tidligere fremkomne slugttest data kan ses tendens til generelt aftagende K-værdier som funktion af dybden.

Generelt vurderes de fastlagte K-værdier, grundet den inhomogene geologi på lokaliteten, ikke nødvendigvis at være entydigt repræsentative for forholdene på hele lokaliteten.

3.3 Geologiske detail forhold

I forbindelse med fastlæggelse af en induceret sprækkes resulterende form er det vigtigt af få kortlagt jordens in-situ spændingstilstand, også kaldet jordens konsolideringsforhold.

I nærværende projekt er der gennemført i alt 3 konsolideringsforsøg i hvert af prøveudtagningspunkterne JBU-1 og JBU-2, jf. figur 3.1. Resultaterne er beskrevet i afsnit 3.3.1, mens der i afsnit 3.3.2 er præsenteret resultatet for gennemførte geologiske prøvebestemmelse langs hhv. de frakturerede dræn og referencedrænet.

Endeligt er der langs referencedrænet gennemført Georadar sonderinger for at vurdere, om denne metode kan anvendes til at identificere sandede indslag i moræneleren. Resultatet af disse sonderinger er diskuteret i afsnit 3.3.3.

3.3.1 Konsolideringsforholdene på lokaliteten

Baseret på i alt 6 kerneprøver udtaget i 3 dybdeniveauer (hhv. i 2,5, 3,5 og 4,5 m.u.t.) blev overkonsolideringsraten (efterfølgende benævnt OCR-værdien) fastlagt ved gennemførte konsolideringsforsøg.

De beregnede OCR-værdier for moræneleren angiver, at der er tale om en lettere overkonsolideret moræneler, hvorfor orienteringen af de inducerede sprækker primært må forventes at blive horisontal.

Der er i øvrigt tale om noget høje vandindholdsværdier i forhold til en "normal" moræneler. Dette kan relateres til, at den trufne ler er ret fed (og siltet).

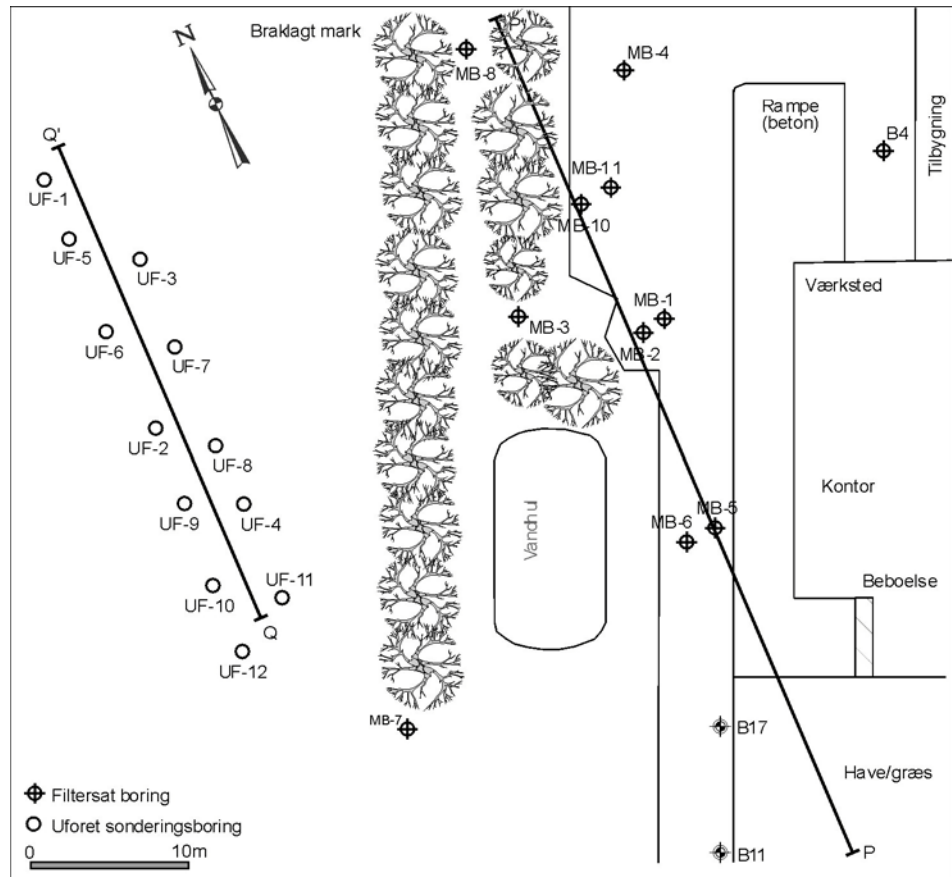
Der blev som allerede nævnt i afsnit 3.1 ikke udført forsøg, der umiddelbart siger noget om bæreevneforholdene. Men på baggrund af udførte konsolideringsforsøg blev det vurderet, at der ikke ville være umiddelbare formationsproblemer i forhold til eksisterende bygninger og underjordiske installationer i forbindelse med gennemførelse af hydraulisk frakturering. En forudsætning herfor var naturligvis, at funderingen af berørte bygningsafsnit var gennemført forsvarligt.

For nærmere uddybning vedrørende konsolideringsforhold samt en anden væsentlig geologisk parameter, kaldet formationens sejhed, set i relation til vurdering af sprækkeform og orientering, henvises til /ref. 8/.

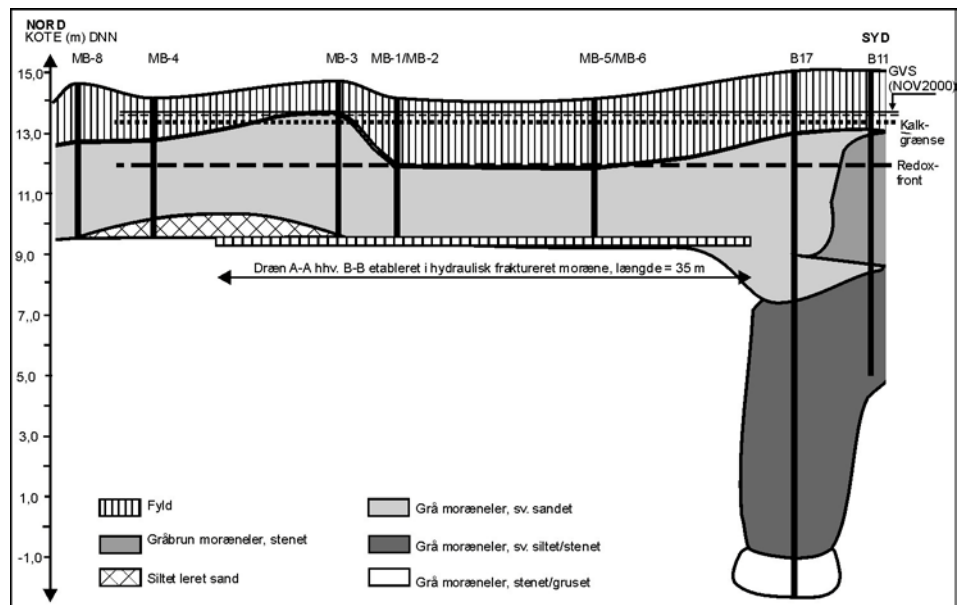
3.3.2 Detailbeskrivelse af de geologiske forhold langs frakturerede og ufrakturerede dræn

På baggrund af en geologisk prøvebestemmelse af jordprøver, udtaget fra 0,5 til ca. 4,5 m.u.t., er der optegnet et geologisk profilsnit, som repræsenterer forholdene langs dræn A-A og B-B, jf. figur 3.4, henholdsvis langs referencedrænet, jf. 3.5.

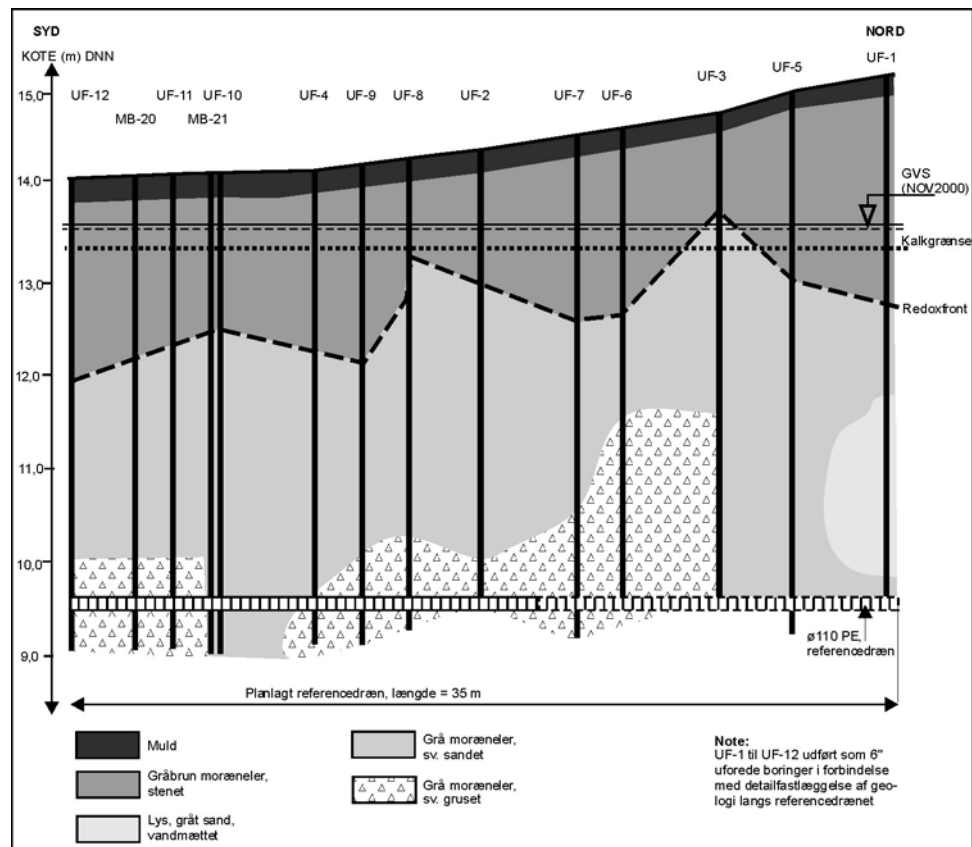
Snittenes placering på lokaliteten fremgår af figur. 3.3.



Figur 3.3 Placering af tracé P-P' og Q-Q' på lokaliteten



Figur 3.4 Geologiske profil snit ved dræn A-A og B-B (tracé P-P')



Figur 3.5 Geologiske profil snit ved referencedrænet (tracé Q-Q')

3.3.3 Georadar sondering

I området omkring referencedrænet (RFD) er der i perioden januar - februar 2000 udført i alt 11 georadar linier langs med og tværs over RFD, samt i området langs med de to frakturerede dræn. Undersøgelsen blev udført af firmaet Faxe Kalk A/S med Sensors & Software PulseEKKO 100 system. Til denne undersøgelse blev valgt at benytte 50MHz antenner med en antenneafstand på 2 meter. De målte refleksionstider er omsat til dybder ved at anvende en bølgehastighed på 0,06 m/ns, hvilket erfaringsmæssigt er en typisk hastighed for lerede moræneaflejringer /ref. 10 og 11/.

Undersøgelsen har til formål at vurdere metodens egnethed til at afklare den geologiske lagfølge på den aktuelle lokalitet, herunder at kunne udskille geologiske heterogeniteter (primært forekomsten af sandlinser/lag).

Metoden bygger på et princip om, at når elektromagnetiske bølger (radiobølger) sendes ned gennem jorden vha. en sender, reflekteres bølgerne helt eller delvis på laggrænser, hvor der sker ændringer i de elektromagnetiske bølgers udbredelsehastighed /ref. 12/. Udbredelsehastigheden afhænger f.eks. af vandindhold, kornstørrelse og geologiske materialer. De reflekterede bølger registreres af en modtager på jordoverfladen og omsættes til et radargram. Georadarsignalet dæmpes meget hurtigere i elektrisk konduktive materialer, såsom ler, end i resistive materialer, såsom sand og grus. Penetrationsdybden vil derfor være mindre i ler end i sand og grus. Desuden influerer antennefrekvensen på penetrationsdybden, idet en lavere frekvens som hovedregel vil give en dybere penetration. Til gengæld vil strukturopløsningen af de interne strukturer formindskes. Endelig vil penetrationsdybden mindskes noget under vandmættede forhold.

Penetrationsdybden afhænger således af flere forhold: Materialernes resistivitet, vandindholdet, samt frekvensen af de benyttede antenner.

Penetrationsdybden på lokaliteten er maksimalt 4–5 meter og typisk ca. 3 m. Penetrationsdybderne er opnået på baggrund af en skønnet bølgehastighed på 0,06 m/ns. Hvis denne hastighed faktisk er højere, er penetrationsdybden også større.

Penetrationsdybder på 2–4 meter er i rimelig god overensstemmelse med de erfaringer, der er opnået med anvendelsen af georadarmetoden på andre morænelerslokalteter i Danmark /ref. 13/. Placeringen af Georadar sonderingerne fremgår af bilag H. Overordnet viser de opmålte radargrammer en relativ stor indbyrdes variation i reflektionsmønstrene, der vanskeliggør sammenstilling af georadarprofilerne til en samlet geologisk tolkning af morænelersaflejringen på lokaliteten. Dog kan der i mange af radargrammerne ses 2 tydelige reflektorer i hhv. 2,5 – 3 meters dybde, samt i ca. 4 meters dybde.

Dybden af sidstnævnte reflektor viser fin overensstemmelse med det karakteristiske lithologiske skift i den grå morænelersenhed, fra svagt sandet til svagt gruset ved både RFD, jf. figur 3.5, og de frakturerede dræn, jf. figur 3.4.

Reflektoren, beliggende i 2,5–3 meters, dybde kan kun ses i profiler opmålt langs RFD og ikke ved de frakturerede dræn. Reflektoren tolkes af Faxe Kalk som en mulig overgang fra "fed ler" til "moræneler". Denne tolkning er dog ikke understøttet af den geologiske beskrivelse i afsnit 3.3.2. Tolkningsmæssigt synes der at være et bedre sammenfald med dybden til redoxgrænsen, der kan indikere forskelle i porøsitet og dermed vandmætning over og under denne med refleksion af de elektromagnetiske bølger til følge.

Den samlede vurdering af georadarmetodens anvendelighed til forbedring af den geologiske tolkning på den aktuelle lokalitet synes således begrænset. Det skal dog bemærkes, at man i forbindelse med andre undersøgelser på moræneler har erfaret, at, hvor der er moræneler direkte under pløjelaget, bliver signalet dæmpet meget hurtigt og der ses ofte kun en enkelt reflektor under reflektoren fra jordoverfladen. Hvor der ses en øget penetration på radargrammerne, er der også observeret, at aflejringerne direkte under pløjelaget er sandede /ref. 13/. De sparsomme erfaringer, man har indtil nu med georadarundersøgelser på moræneler, viser, at man kan kortlægge heterogeniteter i form af sandlag og -linser, der har kontakt med overfladen. Et morænelerslag på 1–3 m dæmper georadarsignalet så meget, at det ikke er muligt at detektere sandlag eller linser, der måtte ligge dybere end 2–3 m.

3.4 Dimensionering af frakturer

Udgangspunktet for detailprojekteringen var at kunne opfylde formålet om at afsænke det sekundære grundvandsspejl inden for et areal på ca. 500 m², hvor "hot-spot" for påviste grundvandsforurening (konc. > 1000 µg/l) er lokaliseret, jf. figur 2.3 og 3.1.

Da der ifølge /ref. 8/ ikke forefindes nogen egentlig dimensioneringsvejledning, som kan anvendes ved design af aktuelle fraktureringsprojekt, er detailprojekteringen af de væsentligste operationer udført ved Dana Brock fra det rådgivende ingeniørfirma, Veizades & Associates, San Francisco, USA (efterfølgende benævnt Dana Brock).

Projekteringen har baseret sig på ovennævnte formål samt på de kortlagte lokale geologiske, hydrogeologiske og geotekniske forhold.

De væsentligste overvejelser i forbindelse med detailprojekteringen er angivet i følgende afsnit.

3.4.1 Fastlæggelse af antal boringer samt design og installationsdybde for vandret installerede dræn

Baseret på Dana Brocks erfaringer fra sammenlignelige projekter blev det i designfasen forudsat, at de inducerede sprækker kunne opnå en horisontal/subhorisontal udbredelse med en radius på 5-8 m, regnet væk fra injektionspunktet, og hermed væk fra hvert vandret installerede dræn.

Med baggrund i denne antagelse samt ud fra kendskabet til udbredelsen af "hot-spot" for grundvandsforureningen blev det fastlagt, at frakturering langs 2 vandrette boringer, placeret med en indbyrdes afstand på ca. 10 m, skulle etableres for at opnå den tilsigtede afsænkningseffekt inden for "hot-spot" området.

Til sammenligning kan det anføres, at det oprindeligt var påtænkt at etablere 3-5 vandrette boringer, /ref. 7/, såfremt den ønskede afsænkning skulle have været gennemført ved installation af et tilstrækkeligt antal vandrette dræn i ufraktureret moræneler.

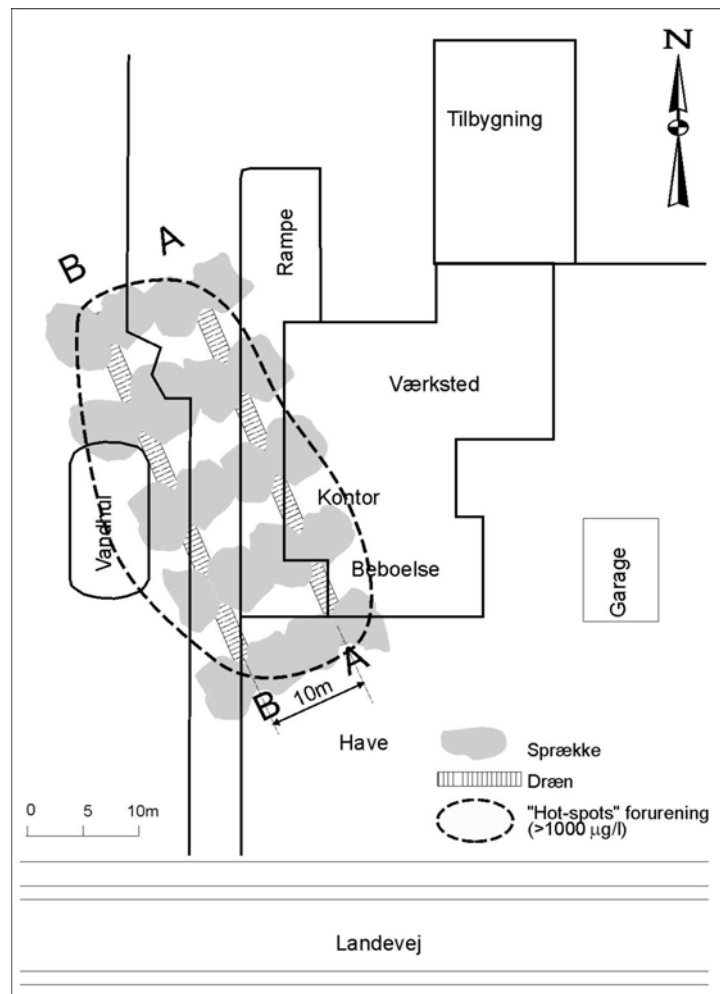
Længde og installationsdybde for hvert af de 2 vandrette dræn blev fastsat dels på baggrund af kendskabet til forureningens udbredelse. På baggrund heraf blev drænlængden fastsat til 35 m, svarende til at et forureningsområde på op til ca. 700 m² teoretisk set ville blive påvirket. Installationsdybden blev fastlagt til ca. 5 m.u.t., svarende til den maksimale dybde med markant påvist forurening.

Pba. modelberegningerne blev ydelsen pr. løbende meter vandret installeret dræn estimeret til 50-100 l, svarende til en forventet døgnvandmængde på 1,75-3,5 m³, jf. afsnit 3.5. Dimensionen af drænene blev fastlagt til ø110 mm, som er en standarddimension for typisk gennemførte opgaver, hvor vandret boreteknik anvendes.

3.4.2 Antal frakturer etableret langs hvert vandret dræn

Baseret på Dana Brocks erfaringer med sprækkeudbredelse i en moræneler, der befinder sig i en overkonsolideret spændingstilstand, blev det vurderet, at der i alt skulle etableres 5 sprækker jævnt fordelt langs hvert af de 35 m lange dræn.

Sprækkeudbredelsen, regnet fra injektionspunktet placeret ca. 5 m.u.t., vurderedes at blive overvejende horisontal/subhorisontal, og den forventede sprækkeudbredelse i planen er vist på figur 3.6.



Figur 3.6 Planlagt sprækkeudbredelse langs dræn A-A og B-B samt vejledende forureningsudbredelse ved "Hot-Spot".

3.4.3 Valg af fyldmateriale samt forventet injektionshastighed og -tryk

Fyldmateriale

Valg af fyldmateriale (efterfølgende benævnt propant) er en meget væsentlig faktor for at sikre optimal hydraulisk influens i den relativt lavpermeable moræneler. Som tommelfingeregul skal propantens kornstørrelsesfordeling dimensioneres således, at permeabiliteten af denne er mindst 1000 gange højere end den omgivende lavpermeable formation /ref. 8/.

Med ønsket om i den aktuelle sag at opnå en radius for den inducerede sprække (fraktur) på min. 5 m, regnet vinkelret ud fra de etablerede vandrette dræn, er det vurderet, at den ønskede sprække kan etableres ved injektion af minimum 120 l højpermeabelt kvartssand (propant). Herved forventes etableret en sprække med en gennemsnitlig tykkelse (efterfølgende benævnt apertur) på 3 mm. Fladearealet pr. induceret sprække bliver herved på ca. 40 m².

Den hydraulisk ledningsevne for anvendte propantmateriale vil være 10E⁻² til 10 E⁻³ m/s.

For at opnå så stor en sprækkeudbredelse som muligt blev det besluttet at forsøge at injicere op til 240 l propant pr. etableret sprække, svarende til at op

til 600 l færdigblandet fraktureringssuspension, indeholdende de 240 l propant, skulle injiceres.

Grundet forekomst af naturlige sprækker samt eventuelle rødder og andre inhomogeniteter i jorden, dels af tekniske årsager, blev det dog vurderet urealistisk at opnå injektion af så megen fraktureringssuspension til hver af de i alt 10 planlagte horisontale sprækker.

Førstnævnte forhold, dvs. forekomst af inhomogeniteter, vurderes således at kunne medføre, at den injicerede fraktureringssuspension søger via områder med mindre formationsmodstand og eventuelt mod terræn, og herved kun delvist bliver injiceret til traceet for planlagte horisontale sprækker.

Et andet væsentligt problem, der kan hindre injektion af den ønskede mængde fraktureringssuspension til planlagte sprækker, vil kunne opstå ved tilklogning af selve injektionssystemet. Dette problem opstår typisk, hvis propanten ikke kan holdes opslemmet i fraktureringssuspensionen og herved udsedimenterer i pumpe, fødeslange eller fraktureringsskemat.

Injektionshastighed

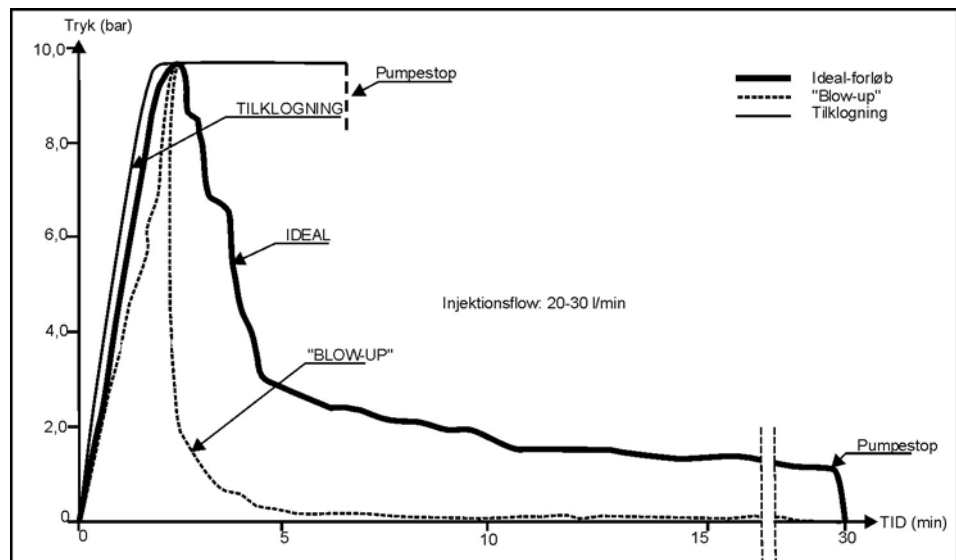
På baggrund af Dana Brocks erfaringer blev det valgt at injicere ved en injektionshastighed på 20-30 l/min, svarende til at fraktureringen langs hver sprække kunne afvikles på max. ca. 30 min. ved injektion af op til 600 l fraktureringssuspension.

Injektionstryk

Hvis der kan gennemføres frakturering, hvor der hverken forekommer "blow-ups", dvs. opprensning af fraktureringssuspension til terræn, eller tilklogning af injektionssystemet, er det forventet, at det initiale injektionstryk vil være 8-10 bar for at få åbnet en sprække, hvorfra frakturen efterfølgende kan udbrede sig i formationen.

I den efterfølgende fase, også kaldet vækstoffasen, vurderes injektionstrykket at falde til 2-4 bar frem til fraktureringens afslutning.

I figur 3.7 er den forventede udvikling i injektionstrykket ved fastholdt pumpeydelse illustreret for såvel "ideal-forløbet" som i tilfælde af "Blow-up" og tilklogning. Den tidlige udvikling for "ideal-forløbet" er skitseret ud fra forudsætningen om, at der kan injiceres op til 600 l fraktureringssuspension pr. induceret sprække.

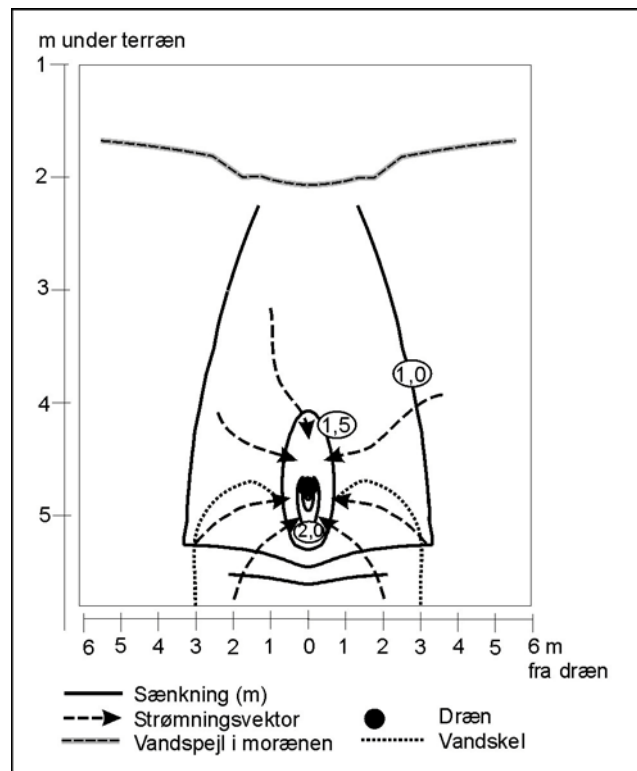


Figur 3.7 Forventet udvikling i injektionstryk ved "ideal-forløbet", "blow-ups" samt tilklogning i forbindelse med frakturering fra vandrette borer placeret ca. 4,5 m.u.t.

3.5 Dimensionering af vandrette dræn

For at belyse, hvilken effekt hydraulisk frakturering ville have på strømningsforholdene i moræneleren, blev der gennemført simuleringer med en grundvandsmodel. Formålet med benyttelse af modellen var at belyse den relative forskel imellem vandrette dræn hhv. med og uden frakturering. Opsætningen af modellen har taget udgangspunkt i de lokale forhold, men der har ikke været tilstrækkeligt med data til at validere de beregnede sænkninger. Den hydrauliske frakturering er i modellen repræsenteret ved et tyndt horisontalt og højpermeabelt sandlag med en tykkelse på 2,5 cm, som horisontalt når ud i en afstand af 4 m på begge sider af selve drænet. Det tynde sandlag er i direkte hydraulisk kontakt med det vandrette dræn.

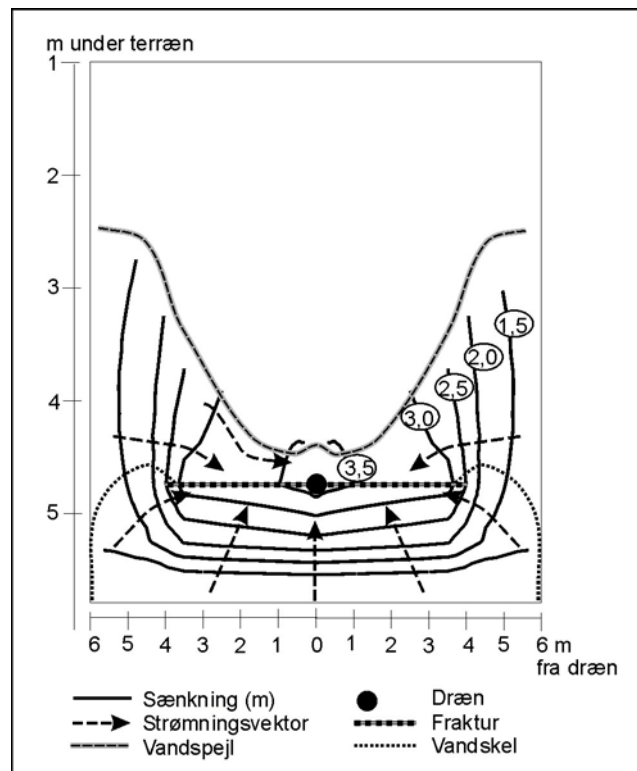
En detaljeret beskrivelse af modelopsætningen og optegning af udvalgte resultater fremgår af bilag C, og i det følgende præsenteres og diskuteres de væsentligste resultater.



Figur 3.8 Simuleret sænkningssudbredelse og strømningmønster for et almindeligt dræn etableret i ufraktureret moræneler

De simulerede sænkninger, afbildet vinkelret på det vandrette dræn, er vist på figur 3.8. Drænet er i modellen placeret 3,25 m under normal grundvandsstand, svarende til ca. 4,5 m.u.t., og herved i den projekterede kote for de frakturerede dræn. Fra drænet breder sænkningen sig stort set radiært ud i formationen. I nærfeltet af drænet er det beregnet, at der opnås en sænkning på 1,5 m i en afstand af ca. 0,8 m fra drænet, mens en sænkning på 2,0 m opnås i en afstand af ca. 0,4 m fra drænet. I større afstand fra drænet ses en sænkning på 1 m i en afstand af ca. 3 m fra drænet.

Grundvandets strømningretninger i drænets nærfelt indikerer, at en del af drænets tilstrømning kommer fra infiltrerende vand (fra terræn) og at en del kommer fra den underliggende moræneler. Beregningerne indikerer, at ca. 50% af drænets ydelse kommer nede fra den dybere del af morænen, og at denne tilstrømning sker inden for en bredde af ca. 3 m under drænet. Ydelsen af drænet er beregnet til i størrelsesordenen 15 l/døgn pr. løbende meter dræn.



Figur 3.9 Simuleret sænkingsudbredelse og strømningens mønster for et fraktureret dræn

For situationen med en indlagt fraktur (sprække) er sænkningerne vinkelret på sprækkens længderetning vist på figur 3.9. Drænet er placeret i samme dybde som det almindelige dræn.

Beregningen viser her, at sænkningen ikke længere udbreder sig radiært i formationen. I nærfeltet af frakturen er det beregnet, at der opnås en sænkning på 1,5 m ned til en dybde på ca. 0,7 m under selve sprækken og vinkelret ud fra dens to endepunkter. En afsenkning på 2 m opnås ned til en dybde af ca. 0,6 m under selve sprækken og vinkelret ud fra dens to endepunkter. En afsenkning på 1 m opnås i en dybde af ca. 0,8 m under selve sprækken, mens den når ca. 5 m vinkelret ud fra de to endepunkter.

Den vertikale grundvandsstrømning er dominerende i forhold til den horisontale inden for området lige over og under selve sprækken, som følge af de relativt lave tryk i sprækken i forhold til i den omgivende moræneler. Beregningerne indikerer, at ca. 80-90% af drænets ydelse kommer fra den dybere del af morænen, og at denne tilstrømning sker inden for en bredde på ca. 10 m under drænet. Ydelsen af drænet er beregnet til i størrelsesordenen 50-100 l/døgn pr. løbende meter dræn, svarende til 1,75-3,5 m³ pr. dræn pr. døgn.

De gennemførte beregninger indikerer, at der er en række markante forskelle i strømningens mønstre langs frakturerede henholdsvis ufrakturerede dræn. Således er der en markant forskel på den horisontale bredde, inden for hvilken der langs disse dræntyper skabes den ønskede opadrettede strømning. Bredden, regnet på hver side af drænet, er således beregnet til ca. 3 m for almindelige dræn og ca. 10 m for dræn installeret i fraktureret moræneler.

Dette afspejles også i hvor stor en del af drænenes ydelse, der, iht. modellen, reelt kommer fra den dybere del af morænen (50% vs. 80-90%). En anden

markant forskel ses også for den horisontale udbredelse af en sænkning på fx 1 m (hhv. 0,4 m hhv. 4,6 m), hvilket skyldes antagelsen om, at sprækken når 4 m væk fra drænet.

På baggrund af gennemførte modellering kan det sammenfattende konkluderes, at påvirkningszonen i det horisontale plan forventes at være ca. 3 gange større for et fraktureret dræn sammenlignet med et almindeligt dræn, jf. tabel 3.2.

Dræntype	Hydraulisk ydelse (l/dag/m.filter)	Relativt bidrag under drænkote (%)	Sænkning i 1,5 m's afstand fra drænet (m)
Almindeligt dræn (1)	15	50	1
Fraktureret dræn (2)	50-100	80-90	5
Relativt forhold mellem (1) og (2)	3-7	1,8	5

Tabel 3.2 Relativ sammenligning af hydraulisk effekt ved frakturering

Beregningerne indikerer også, at sprækker har en væsentlig betydning for både drænets ydelse og afsænkning. Det skal pointeres, at beregningerne her viser forholdene efter, at der er opnået ligevægt i systemet. Hvor hurtigt dette reelt opnås på den aktuelle lokalitet, kan først afgøres på baggrund af det opstillede monitoringsprogram. Endvidere er der i forbindelse med modelleringen ikke taget højde for det naturligt forekommende sprækkesystem i moræneleren, som erfaringsmæssigt kan påvirke strømningsbilledet betydeligt.

3.6 Dimensionering af monitoringsboringer

Til beskrivelse af de hydrauliske forhold omkring de frakturerede dræn henholdsvis omkring referencedrænet er der som supplement til tidligere etablerede filtersatte boringer på lokaliteten installeret en række nye monitoringsboringer. Opbygning samt placering af disse er diskuteret i dette afsnit.

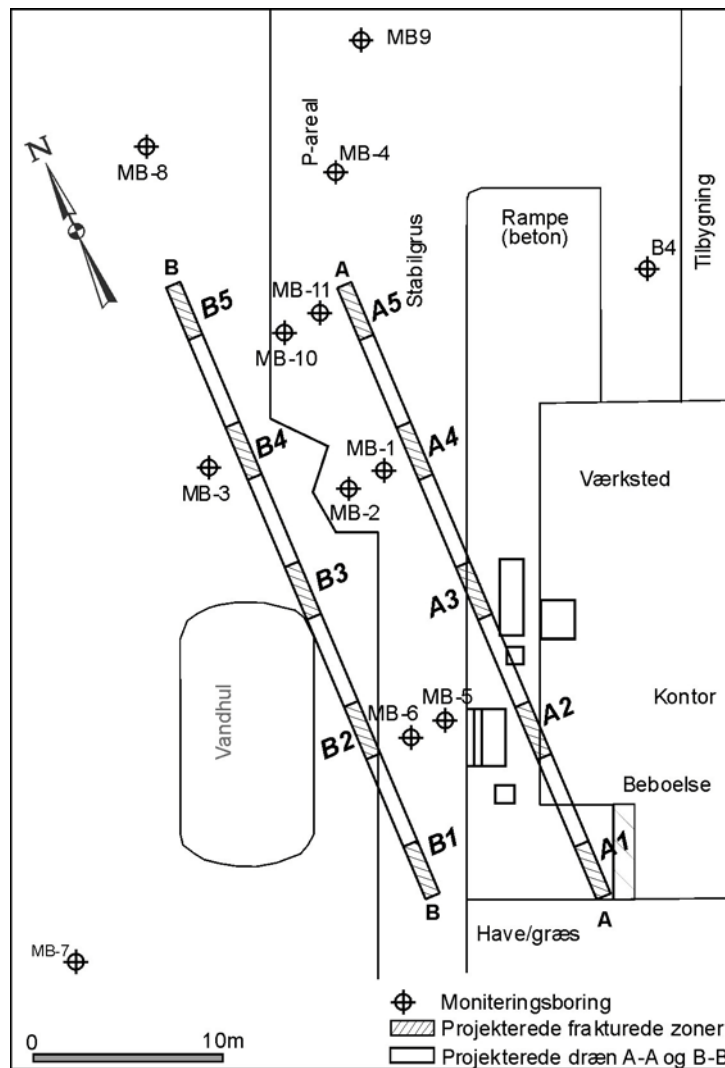
3.6.1 Monitoringsboringer langs det frakturerede dræn

Omkring de 2 frakturerede dræn er der etableret i alt 11 nye monitoringsboringer, benævnt MB-1 - MB-11. Boringsplaceringen, som vist på figur 3.10, er fastlagt ud fra ønsket om at dokumentere den hydraulisk effekt langs de frakturerede dræn.

Ud fra denne strategi blev 9 af de 11 boringer placeret inden for en maximal horisontal afstand på 5 m fra drænene, svarende til den forventede afstand inden for hvilke der, jf. afsnit 3.5, kunne forventes influens langs de frakturerede dræn.

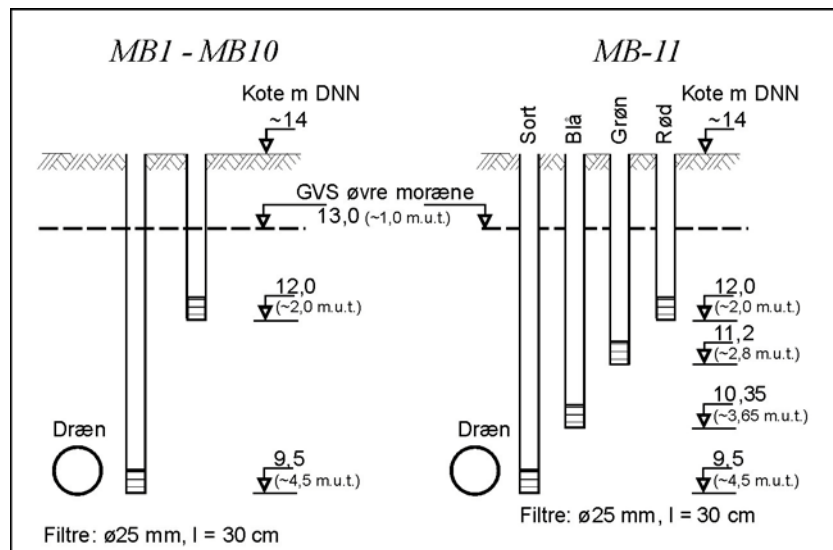
Alle boringer blev etableret som 3" forede snegleboringer.

Boring MB-1 til MB-10 er filtersat separat i 2 niveauer, svarende til henholdsvis 1,0 m under grundvandsspejlet (kote ~12,0) henholdsvis til niveauet for etablerede dræn (kote ~ 9,5). MB-11 er filtersat separat i 4 vertikale niveauer, idet denne boring blev anvendt ved gennemførelse af tidligere beskrevne slugtests, jf. afsnit 3.2.



Figur 3.10 Placering af monitoringsboringer ved de frakturerede dræn A-A og B-B

Filteropbygningen for anførte 2 boringstyper fremgår af figur 3.11.



Figur 3.11 Opbygning af monitoringsboring MB-1 til MB-11

Boringerne blev generelt udført som traditionelle forede snegleboringer til en dybde på ca. 40 cm over det fastsatte filterniveau. Herefter blev der i bunden uddybet med et skarpkantet kernerør, kaldet en Shelby tube. Shelby tuben var

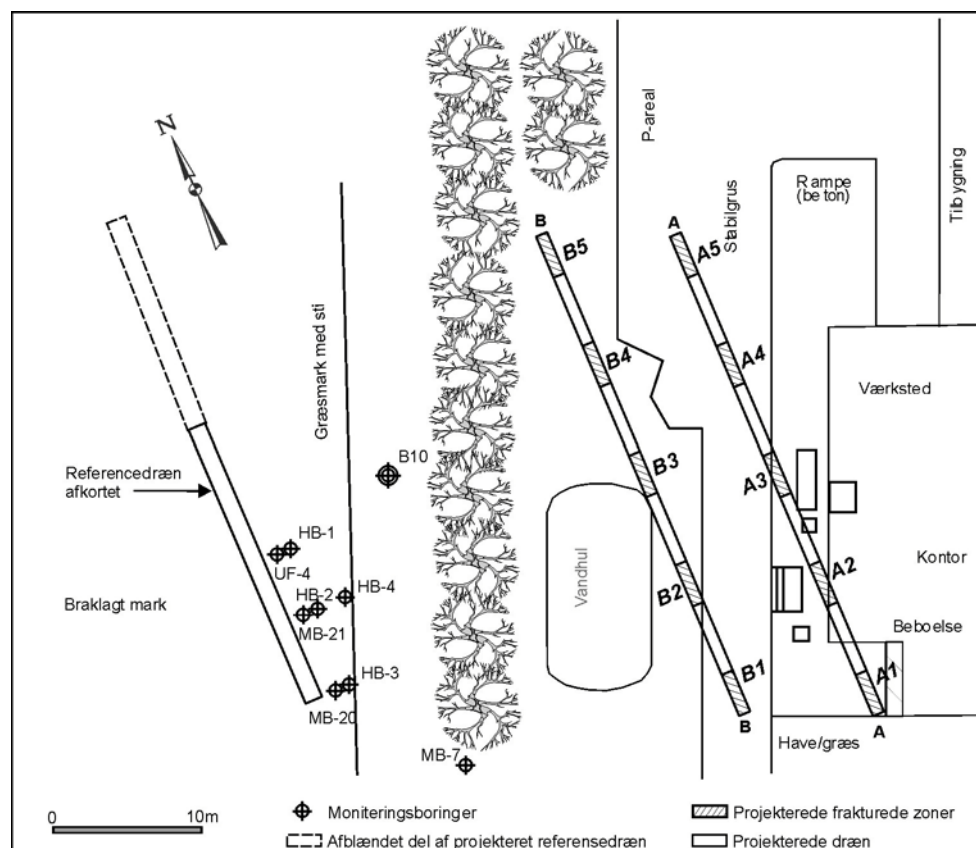
placeret i en cylinder, der var tilpasset i diameter og længde for efterfølgende filtersætning af boringen.

Ved filtersætningen blev der anvendt $\varnothing 25$ mm PE-filtre (PE: Polyethylen) med en slidestørrelse på 0,5 mm og med en længde på 30 cm. Filtrene blev udført med præfabrikeret gruskastning (0,5 cm tykkelse), lagt i en dobbelt sok af PE-væv. Metoden blev anvendt for at minimere gruskastningen omkring monitoringsboringerne og hermed sikre mindst mulig afsmitning fra denne i forbindelse med gennemførte slugtests.

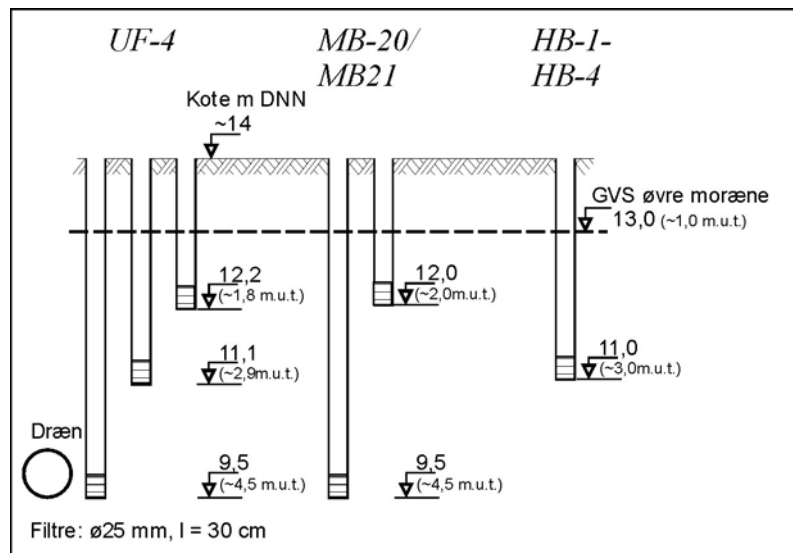
Over filterene blev der monteret en plastkrave henholdsvis fyldt op med omkring 20 cm filtersand, hvorefter der blev afproppet til 0,5 m.u.t med bentonitpiller, som blev vandet op.

3.6.2 Monitoringsboringer langs referencedrænet

Omkring referencedrænet er der etableret i alt 7 monitoringsboringer, benævnt HB-1 - HB-4, UF-4 og MB-20 - MB-21. Placering af disse fremgår af figur 3.12, mens boringsopbygningen for de 3 typer boringer er illustreret i figur 3.13.



Figur 3.12 Placering af monitoringsboringer langs referencedrænet



Figur 3.13 Opbygning af monitoringsboringerne UF-4, MB-20 – MB-21 samt HB-1 - HB-4

Boring UF-4 er udført som uforet snegleboring, mens MB-20 og MB-21 er udført identisk med tidligere foreskrevne for MB-1-MB-11. Endeligt er HB-1 til HB-4 udført som uforede håndboringer.

Som det fremgår af figur 3.13, er det langs referencedrænet valgt at etablere en række filtre i kote ca. 11,0 fremfor i kote 12,0. Denne disposition er truffet på baggrund af resultaterne fra den forudgående dual-phase test udført på ikke afkortet referencedræn), som viste, at der generelt ikke kunne måles nogen væsentlig vandspejlsændring i de diskrete filtre, etableret i kote 12,0. I forsøg på bedre at kunne registrere afsænkningen af trykniveauet langs det afkortede referencedræn blev det derfor valgt at placere en række filtre en meter lavere og hermed tættere på drænet.

I april 2001 er monitoringsboringerne langs referencedrænet fjernet pga. landbrugsdrift.

3.6.3 Øvrige monitoringsboringer

Som supplement til allerede omtalte monitoringsboringer benyttes også to tidligere etablerede borerør (boring B4 og B10). Boring B4 er filtersat med ø63 mm filter i kote 10,7 - 13,7, svarende til 2 - 5 m.u.t., mens boring B10 er filtersat i ø63 mm i kote 4,6 - 9,6, svarende til 5 - 10 m.u.t.

Placering af disse fremgår af figur 3.10 (B4) henholdsvis figur 3.12 (B10).

3.7 Monitoringsprogram

For dokumentation af effekten af de hydraulisk frakturerede dræn er der udarbejdet et program for overvågning af udviklingen i grundvandskvaliteten samt for monitorering af de hydrauliske forhold gennem det første driftsår.

Der er inden for denne periode planlagt gennemført i alt 2 halvårige monitoringsrunder, hvor der udtages vandprøver til belysning af udviklingen i vandkvaliteten. Vandprøverne udtages dels fra de 2 hydraulisk frakturerede dræn, dels fra 2 forskellige filterniveauer (filtersat hhv. i kote ca. 9,5-9,8 og ca. 12,0-12,3) i 2 udvalgte monitoringsboringer. Desuden udtages vandprøver

fra det filter i boring B17, som er filtersat fra 16-18 m u.t. i et indlejret sand-/gruslag i moræneleren.

Analyseprogrammet omfatter de påviste hovedforureningskomponenter, dvs. chlorerede benzenforbindelser og chloraniliner. Derudover analyseres for indhold af de flygtige kulbrinte-forbindelser, BTEX.

Der udtages desuden vandprøver til boringskontrol for fastlæggelse af pH, ledningsevne samt indhold af chlorid, ammoniak/ammonium, nitrit og jern og følgende redoxparametre: Ilt, nitrat, sulfat, mangan, kuldioxid og bikarbonat.

Redox-relaterede parametre samt øvrige uorganiske parametre vurderes væsentlige at monitorere, idet der som funktion af oprensningstiden forventes at ske en ændring i den generelle sammensætning i det oppumpede grundvand. Ændringen i bl.a. jernindholdet vil kunne få afgørende betydning for drænenes ydelse (potentiel tilklogning grundet iltning af jern), mens ændring i redox-forholdet kan indikere fra hvilken zone vandet tilstrømmer drænene (oppe- eller nedefra)

Parallelt med udtagning af vandprøverne gennemføres der manuelle pejlerunder i tilgængelige monitoringsboringer, ligesom der søges gennemført on-line logning (vha. tryktransmitter) af grundvandspejlet i en repræsentativ boring, filtersat i kote 12 henholdsvis kote 9,5, samt i boring B17's dybe filterniveau. Ved installation af on-line måleudstyr kan den tidlige udvikling i trykniveau i den øvre moræne henholdsvis kalken fastlægges og herved understøtte de manuelle pejlinger.

Efter det første års drift sammenstilles, præsenteres og diskuteres pejle- og analysedata med henblik på en kvantificering af, hvor stor en del af vandet, som tilstrømmer drænene nedefra henholdsvis fra moræneleren oppefra. Endvidere beskrives eventuelle ændringer i grundvandskvaliteten i forhold til ændrede ydelser i drænene efter 1. års drift.

Resultater af første års drift og monitoring forventes afrapporteret primo 2002 i selvstændig rapport, og vil blive publiceret på elektronisk form på Miljøstyrelsens hjemmeside www.mst.dk.

4 Etablering af hydrauliske frakturer fra vandrette boringer

4.1 Hydraulisk frakturering fra vandret boring

I det følgende er der gennemført en beskrivelse af anvendte materialer og materiel samt af de væsentligste arbejdsprocesser forbundet med udførelsen af hydraulisk frakturering langs 2 vandrette boringer.

Ligeledes fokuseres der i afsnittet på opnåede erfaringer fra selve anlægsfasen, som blev udført ved entreprenørfirmaet Højgaard & Schultz, Anlæg.

4.1.1 Materialer

4.1.1.1 Fraktureringssuspension

Opblandingen af fraktureringssuspension (efterfølgende benævnt suspension) i batches af 300 l blev udført i følgende 3 tempi:

- 24 timer før fraktureringens opstart blev der opblandet 20 liter "cross-linker", bestående af 20 liter lunken vand tilsat 144 g Natrium Tetraborat – et metalholdigt pulver (efterfølgende benævnt ved handelsnavnet "Boraks") og 72 g Kaliumklorid.
- Ca. 15 min. før fraktureringen blev "cross-linkeren" opblandet med 1,1 kg Guar-Gum (efterfølgende benævnt Guar), 280 l lunken vand, 50-100 ml tracer/sporstof (af typen "Uranine") samt 120 l kvartssand (kornstørrelse 0,3 – 0,8 mm. Efterfølgende benævnt propant). Andelen af propant i den færdigblandede suspension udgjorde således ~ 40% (vægtprocent) .

Den anvendte Guar er bionedbrydelig og kan samtidig karakteriseres som en "lineær" gel, dvs. dens viskositet stiger proportionalt med mængden af Guar tilsat. For at opnå en tilstrækkelig viskositet i hver batch, uden at skulle tilsætte meget store mængder af Guar, tilsættes metal ("Boraks"), hvorved molekylestrukturen i Guaren bliver meget tæt og viskositeten stiger markant. Selv om viskositet i den færdigblandede batch er høj, øges friktionsmodstanden i den ikke signifikant. Dette er en klar fordel ved anvendelsen af "cross-linkeren".

For at sikre en effektiv udnyttelse af aktuelle "cross-linker" kræves en pH-værdi på 8,5-9,0, og helst ikke over 9,5, idet breaker-enzymet da ikke vil være fuldt aktivt.

- Umiddelbart før start på injektionen blev der tilsat ca. 360 ml såkaldt "breaker-enzym" (et enzym med forhandlernavnet GBW-12, som blev importeret fra Holland i 20 l dunke). Enzymet tilsættes suspensionen for at sikre, at den heri tilsatte Guar nedbrydes umiddelbart efter dennes injektion til sprækken. Herved skabes optimal hydraulisk kontakt mellem det vandrette dræn og den etablerede samt fyldte sprække.

Datablade for Guar, Boraks og Uranine samt sigtekurve for anvendte propant er vedlagt i bilag D.

4.1.2 Materiel

4.1.2.1 Mixerudstyr til fraktureringssuspension

Der blev anvendt en almindelig tvangsblender med et effektivt volumen på ca. 325 liter. Ved opblandings afslutning blev suspensionen tømt ned i en tragt, som via en sugeslange var forbundet til injektionspumpen.

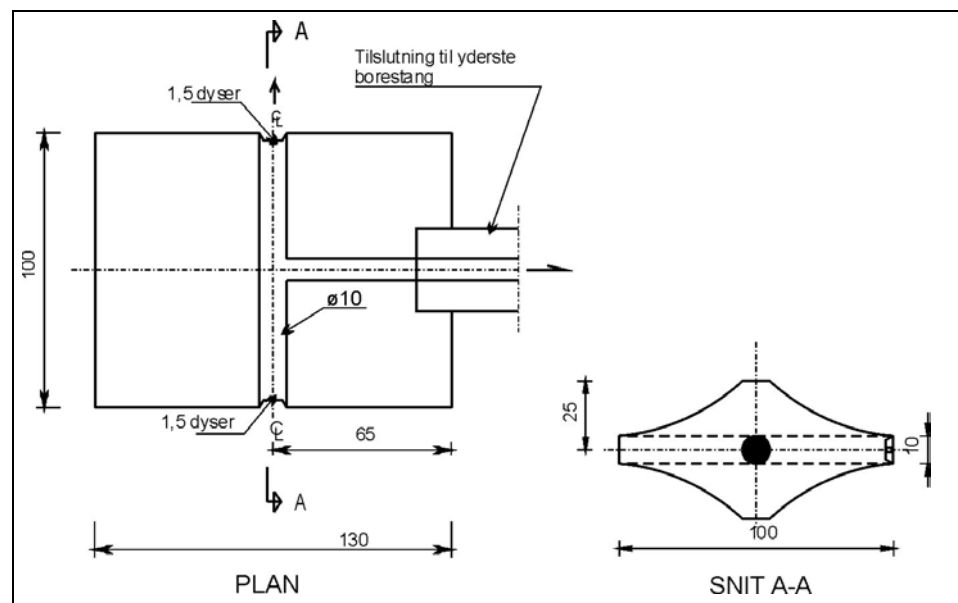
4.1.2.2 Injektionspumpe

Der blev anvendt en tryklufstdreven spiralpumpe af typen Diaphrame (fabrikat "Sandpipes"), som blev lejet hos og drevet af off-shore firmaet Slumberger, Esbjerg. På tryksiden af pumpen var monteret et manometer (måleområde 0-10 bar) samt en sikkerhedsventil (max. 10 bar).

Flowregistrering blev foretaget ved at tælle pumpe slag, hvor 1 slag svarede til 0,8 liter udpumpet suspension.

4.1.2.3 Revneskæreværktøj

Revneskæreværktøjet, se figur 4.1, er et specialfremstillet værktøj i stål, der påskrues den yderste borestang. Værktøjet er designet af Dana Brock, og fremstillet for Højgaard & Schultz, Anlæg, af en smed i Køge.



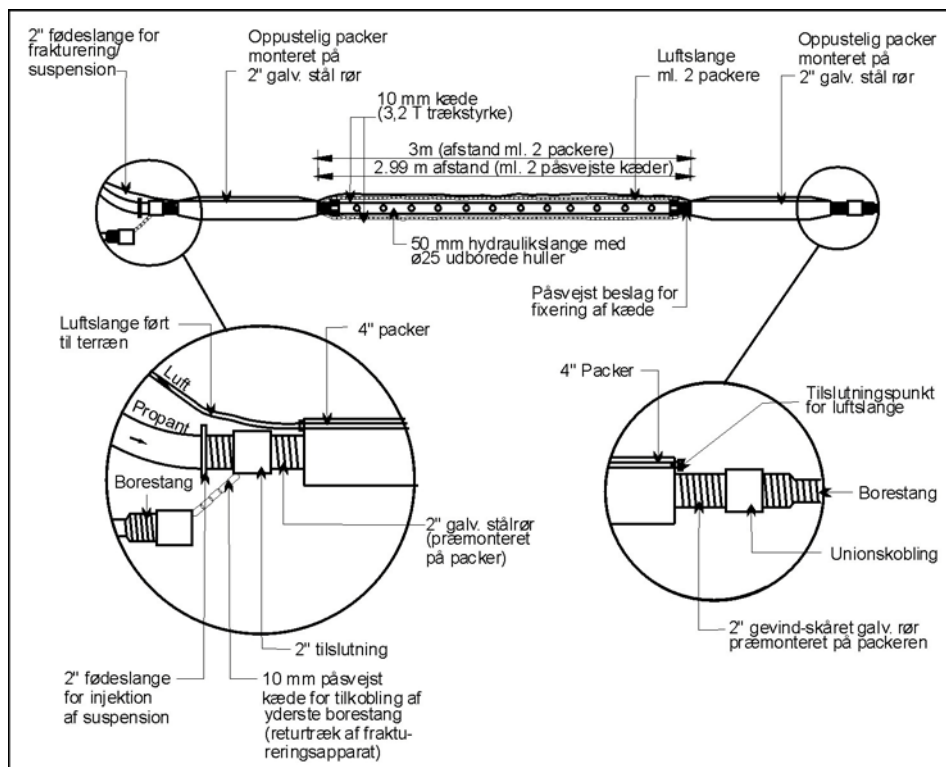
Figur 4.1 Design af revneskæreværktøj - snit og plan. Som udført (alle mål er i mm)

Via de 2 dyser, som er monteret med en indbyrdes vinkel på 180 grader, påføres den intakte formation et vandtryk på omkring 80-90 bar. Vandet tilledes dyserne via de hule borestænger. Ved det påførte dysetryk skæres en vandret orienteret revne med en forventet dybde på 10-15 cm, regnet vinkelret ud fra dysen. Skærehastigheden er ca. 1 m/min og injektionsflowet for det tilsatte vand ca. 50 l/min. Tidsforbruget forbundet med etablering af en forskåret revne langs hver af de i alt 5 frakturerede zoner af hver 3 m var således generelt på ca. 6 min.

4.1.2.4 Fraktureringsapparat

Fraktureringsapparatet er som revneskæreværktøjet designet af Dana Brock og fremstillet samme sted som revneskæreværktøjet.

Fraktureringsapparatet består overordnet af 2 oppustelige packere, imellem hvilke der er monteret et perforeret og fleksibelt rør. Packerne, af typen LD inflatable straddle packers, er importeret fra Tam International, Houston, USA. For nærmere specifikation af packerne henvises til bilag E, mens opbygningen af fraktureringsapparatet er vist i figur 4.2.



Figur 4.2 Design af fraktureringsapparat – snit. Som udført (ikke mål fast).

De 2 oppustelige packere er placeret med en indbyrdes afstand på 3 meter, svarende til længden af den forskårne revne, langs hvilken der skal fraktureres.

Imellem packerne er monteret en $\varnothing 50$ mm hydraulikslange med $\varnothing 25$ mm udborede huller. Igennem disse huller injiceres fraktureringssuspensionen ud i den forskårne revne. Oppustning af packerne sker via en luftslange, som er ført til terræn og her forbundet til en kompressor.

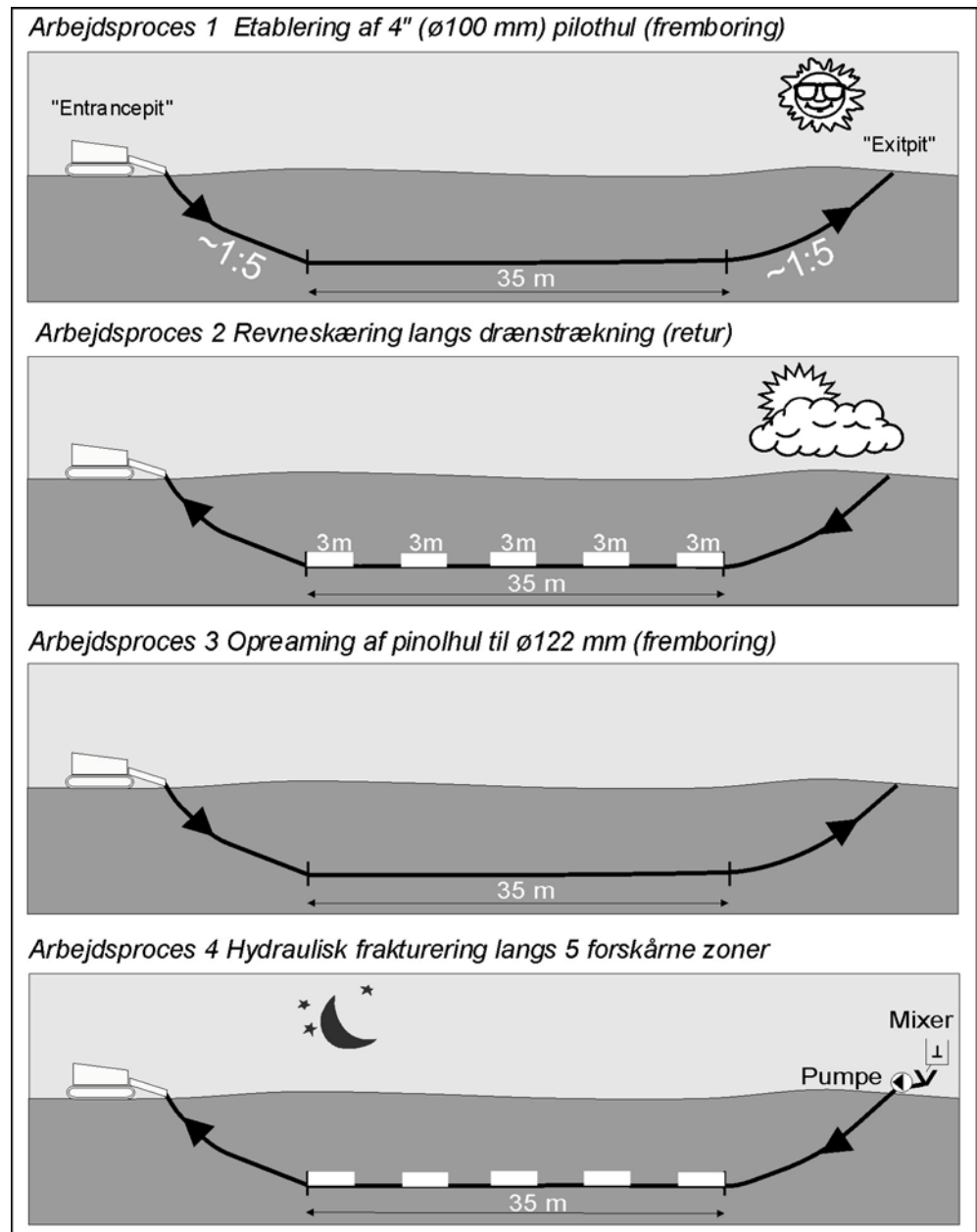
For at minimere risikoen for at fraktureringsapparatet "tabes" i tilfælde af brud på hydraulikslangen o.lign. er der imellem de 2 packere monteret 2 stk. kæder, hver med en trækstyrke på 3,2 ton. Kæderne er påsvejst hver af packerne.

4.1.3 Arbejdsprocesser ved udførelse af hydraulisk frakturering

Ved hydraulisk frakturering fra vandrette borerer gennemføres i alt 4 overordnede arbejdsprocesser, som nærmere beskrevet i det følgende.

4.1.3.1 Arbejdsproces 1: Etablering af pilothul

Pilothullet er etableret ved traditionel retningsstyret underboringsteknik, hvor der fra startpunktet (efterfølgende entrancepitten) er fremboret langs det projekterede trace og frem til modtagedstedet (efterfølgende exitpitten), jf. figur 4.3. Den fysiske placering af entrance- og exitpitten er vist i bilag G.



Figur 4.3 Overordnede arbejdsprocesser ved hydraulisk frakturering

Under borearbejdet er der anvendt et 4" borehoved (~ Ø100 mm). Navigationen af borehovedet er udført ved anvendelse af walk-over locator, da der grundet den aktuelle boreddybde ikke var behov for anvendelse af et mere avanceret navigationsudstyr, som eksempelvis et magnetisk søgesystem.

4.1.3.2 Arbejdsproces 2: Revneskæring langs drænstrækning

Fra exitpitten og via det forborede pilothul blev den specialfremstillede revneskærer vha. boreriggens borestænger herefter trukket frem til start af den vandrette del af pilothullet.

Langs denne del af pilotboringen blev der efterfølgende etableret i alt 5 forskårne revner af 3 meters længde. Den indbyrdes afstand mellem 2 forskårne revner blev således 5 meter, mens den indbyrdes afstand mellem de 2 yderste forskårne revner blev på 35 m, svarende til den samlede længde af det senere installerede vandrette dræn.

4.1.3.3 Arbejdsproces 3: Opreaming af pilothul til $\varnothing 122$ mm

Efter revneskæringen blev pilothullet opreamet til $\varnothing 122$ mm for dels at sikre tilstrækkelig plads for fremføring af fraktureringsværktøjet dels for at oprense pilothullet efter at revneskæreværktøjet, vha. boreriggens borestænger, var blevet trukket retur til terræn.

4.1.3.4 Arbejdsproces 4: Hydraulisk frakturering langs 5 forskårne zoner

I det aktuelle projekt blev der forud for etablering af hver sprække opblandet suspension i batches af 300 liter. Årsagen til, at der ikke blev opblandet større batches var, at der som funktion af injektionstiden ville være en stadig større risiko for at det tilsatte breaker-enzym nedbrød Guaren så meget, at den iblandede kvartssand ikke kunne holdes i suspension. Opstod denne situation, ville dette som tidligere omtalt medføre tilklogning af injiceringspumpen, fødeslangen samt fraktureringsapparatet.

Et sådant driftsstop kan blive meget bekosteligt, idet pilothullet typisk vil blive ødelagt i forbindelse med forsøg på returtrækning af fraktureringsapparatet. I værste fald kan fraktureringsapparatet slet ikke returtrækkes; en situation som opstår ved at den udsedimenterede kvartssand pakker sig hårdt omkring dette.

For at minimere risikoen for tilklogning mest muligt blev der flere dage før fraktureringens opstart opblandet en række batches med suspension. Til hver batch blev der tilsat forskellige mængder breaker-enzym. Erfaringerne fra batch-forsøgene blev efterfølgende anvendt til at optimere doseringen af breaker-enzym, således at der kunne sikres et så optimalt timet "break" (dvs. nedbrydning af den tilsatte Guar) som muligt. Ved et optimalt timet "break" forstås her et "break", der medfører, at Guaren vil være 80-100% nedbrudt ca. 2 timer efter fraktureringens ophør (kilde: Dana Brock).

Før selve fraktureringens opstart blev fraktureringsværktøjet, igen ved hjælp af boreriggens borestænger, trukket frem til den første forskårne revne. De 2 packere blev herefter oppustet ved at påføre disse et tryk på ca. 6 bar i 15-30 min. Herved blev der etableret en tæt forsegling mellem den 3 meter forskårne revne og det øvrige pilothul.

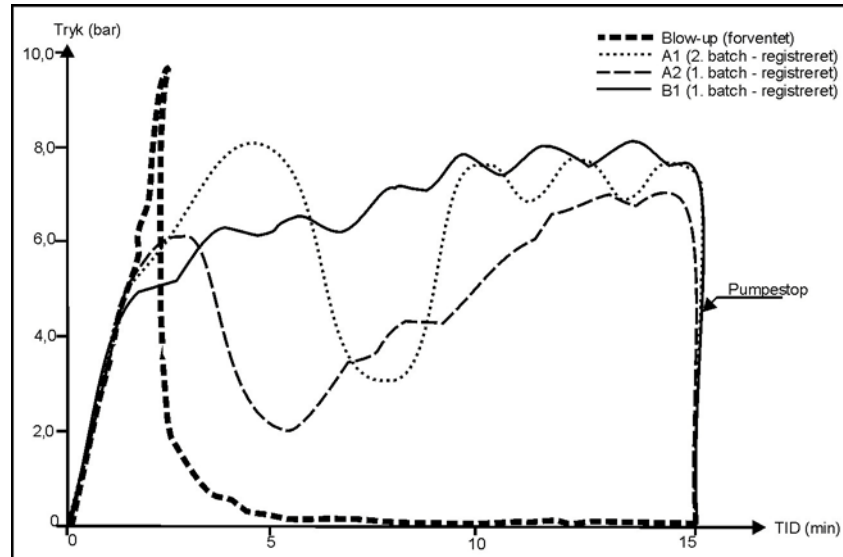
Fra en $\varnothing 50$ mm, PN 10, PE100, fødeslange blev den færdigblandede suspension efterfølgende injiceret via fraktureringsapparatet og ud i den forskårne revne og den sandfyldte sprække herved dannet. Benævnelsen PN 10 angiver det max. tilladelige tryktrin, her max. 10 bar, som kan påtrykkes aktuelle slange. PE 100 er en materialebetegnelse, for højdensitet svejsbar polyethylen.

Injektionshastigheden blev fastlagt ved at tælle antal pumpe slag, hvor et pumpe slag svarer til indpumpning af 0,8 l suspension. Den gennemsnitlige injektionshastighed blev registreret til ca. 20 l/min.

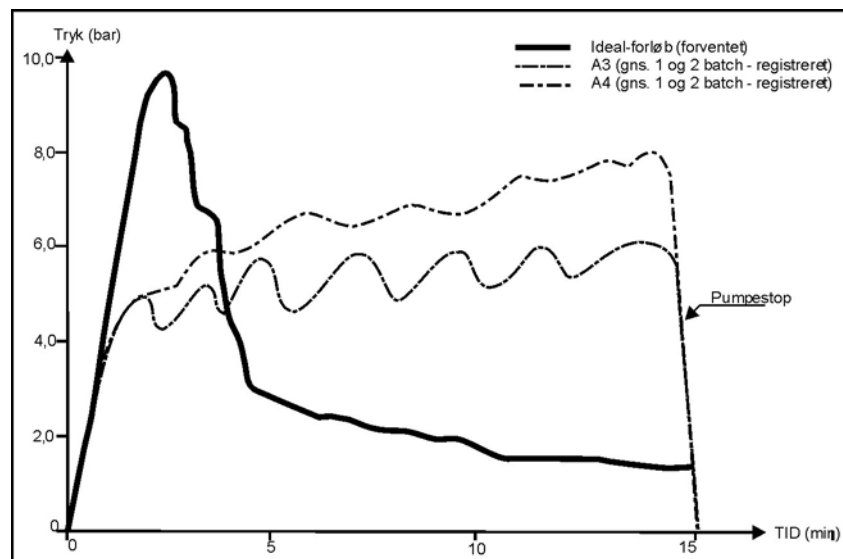
Et overordnet billede for injektionstrykkets tidlige udvikling i forbindelse med frakturering langs de inducerede sprækker A1, A2 og B1 er søgt illustreret på figur 4.4, mens forholdene langs A3 og A4 er præsenteret på figur 4.5.

De tolkede forløb er optegnet på baggrund af feltobservationerne anført i feltjournalen, jf. bilag G.

Grundet meget vanskelige arbejdsforhold, som uddybende beskrevet i bilag G, foreligger der ingen trykdata for gennemførte frakturering langs B2, B3 og B4, da Dana Brock i denne fase af projektet var fuldt koncentreret om at holde indpumpningssystemet i drift, samtidig med at suspension skulle sikres injiceret med korrekt enzym-breaker dosering.



Figur 4.4 Forventet hhv. registreret tidslig udvikling i injektionstryk for frakturer med registrering af "Blow-up"



Figur 4.5 Forventet hhv. registreret tidslig udvikling i injektionstryk for frakturer uden observeret "Blow-up"

Sammenholdes den observerede tidlige udvikling i injektionstrykket med henholdsvis uden forekomst af "Blow-up", fremgår det generelt, at de registrerede forløb afviger markant fra det forventede. Årsagen hertil vurderes helt overvejende at skyldes, at der opstod nogen tilklogning af indpumpningssystemet, dvs. af pumpe og tilhørende fødeslange i forbindelse med hver gennemført frakturering.

Årsagen hertil var dels, at den anvendte pumpetype (trykluftdrevet spiralpumpe) ikke kunne pumpe den højviskose suspension som ønsket, samt at **det var nødvendigt** at anvende en ca. 90 m lang fødeslange, idet entrancepitten måtte etableres syd for Slagelsevej, jf. bilag G.

Ovennævnte forhold, kombineret med den ugunstige vejsituation (frostvej ned til -10 C) gjorde, at det blev nødvendigt generelt at injicere ved tryk på 6-8 bar for at overvinde såvel formationsmodstanden som modstanden i selve indpumpningssystemet.

Efter fraktureringens ophør blev trykket på packerne fastholdt i 20-30 min. for herved at sikre, at den injicerede suspension fortsatte med at brede sig ud i formationen fremfor at søge retur mod pilothullet.

I forbindelse med aktuelle projekt viste det sig muligt at indpumpe 300-600 liter fraktureringssuspension, svarende til injicering af 120-240 liter propanat pr. etableret sprække.

Ligeledes blev der registreret i alt 6 "blow-ups", hvoraf et indeholdt propanat, mens de resterende 5 overvejende indeholdt en blanding af Guar og gråbrun moræneler. I tabel 4.1 er resultaterne sammenfattet. De anførte "nettomængder", angiver et estimat for den mængde fraktureringssuspension hhv. propanat, som vurderes injiceret til de etablerede sprækker. Estimaterne er baseret dels på kendskabet til de faktisk tilsatte mængder fraktureringssuspension dels på en visuel bedømmelse af de mængder fraktureringssuspension, som er tabt ved hvert registreret "blow-up".

Sprække nr.	Injiceret mængde fraktureringssuspension		Injiceret mængde Propanat		Injiceret mængde fraktureringssuspension tabt ved blow-up
	Udført (liter)	Nettomængde (liter)	Udført (liter)	Nettomængde (liter)	
A1	400	300-350	160	160	50-100 (+) (2)
A2	600	500-550	240	220-230	50-100 (+)/(1)
A3	600	600	240	240	Intet
A4	450	450	180	180	Intet
A5	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
B1	300	200-250	120	120	50-100 (+)(1)
B2	300	250-280	120	120	20-50 (+) (2)
B3	300	300	120	120	Intet
B4	300	300	120	120	Intet
B5	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)

Tabel 4.1 Injiceret mængde fraktureringssuspension hhv. propanat til hver projekteret fraktur samt påviste "blow-ups". (+) Guar og ler (+) propanat, Guar og ler (0) ikke udført, (1) 1 stk. "blow-up" registreret, (2) 2 stk. "Blow-ups" registreret.

Som det fremgår af tabel 4.1, blev sprække nr. A5 og B5 ikke etableret, og begge ligger i udkanten af det kraftigt forurenede område. Selve drænet er dog installeret på disse strækninger.

Årsagen til at sprække nr. A5 ikke blev udført var, at der i forbindelse med den trinvis fremtrækning af fraktureringsapparatet mod denne løbende blev udfældet propanat foran hhv. bagved fraktureringssapparatet samt at fødeslangen var delvist tilklogget. Efter udført frakturering langs sprække nr. A4 var fremtrækningen blevet meget kritisk. For at undgå tab af såvel fraktureringssapparat som ødelæggelse af de 4 allerede udførte sprækker blev

der derfor truffet beslutning om hurtigst muligt at forsøge at få trukket fraktureringsapparatet mod terræn. Operationen lykkedes næsten, idet den ene packer blev voldsomt beskadiget og måtte udskiftes. Desuden blev koblingen mellem fødeslangen og fraktureringsapparatet ødelagt og ny trækfast kobling måtte efterfølgende fremstilles.

Sprække B5 blev ikke udført pga. tilklogning af hele indpumpningssystemet. Problemet opstod grundet et forkert timet "break" af Guaren, som medførte, at propanten udsedimenterede i hhv. fraktureringsapparatet og fødeslangen. Ekstreme vejrforhold, her hård frost (-13C°), var årsag til det fejl-timedede "break". Umiddelbart efter tilklogningen rensplejede en slamsuger det tilkloggede system, hvorefter der vha. injektionspumpen blev pumpet en "ren" Guar-vandblanding (i Guar:vand forhold på 3,4 kg:950 l) frem til fraktureringsapparatet og ud i formationen. Ved denne operation blev der således tilsat en blanding, som kunne "smøre" og hermed nedsætte friktionsmodstanden i området mellem pilothullet og fraktureringsapparatet så meget, at returtrækning til terræn blev mulig.

I forbindelse med det samlede fraktureringsarbejde blev der registreret i alt 6 "blow-ups". Et af disse indeholdt propant, mens de resterende 5 indeholdt en blanding af Guar og gråbrun moræneler, men intet propant. På baggrund af den registrerede sammensætning af påviste "Blow-ups" vurderes det, at kun en ubetydelig mængde propant, ca. 10-20 l, er søgt mod terræn ved sprække A2.

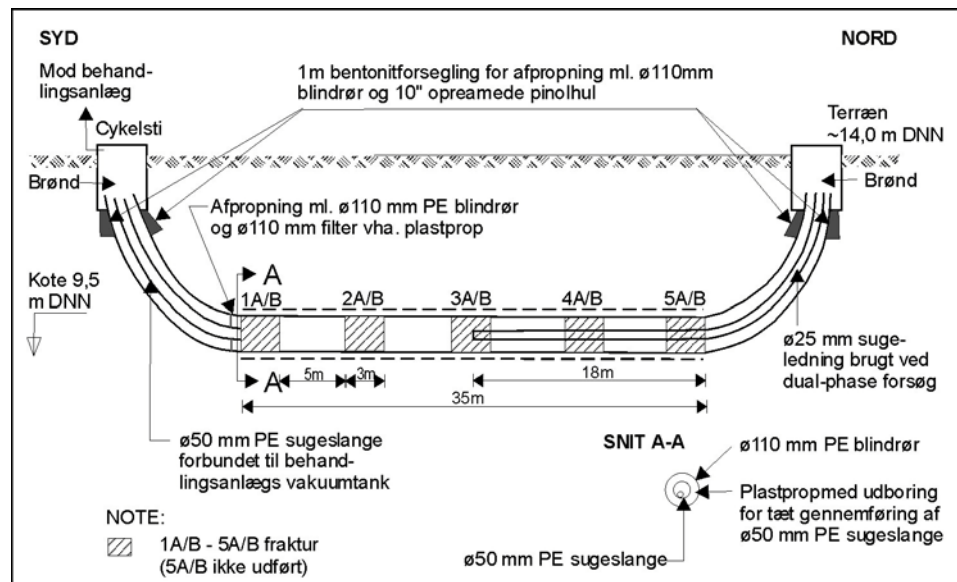
Den fysiske placering af registrerede "Blow-ups" er vist i figur 4.9.

Vurdering af den hydrauliske effekt af de etablerede sprækker er nærmere beskrevet i afsnit 4.4.2, mens en sammenfattende vurdering af den opnåede sprækkeåbning og – udbredelse er drøftet i afsnit 4.3.

4.2 Installation af vandrette dræn i fraktureret moræneler

Efter udført frakturering blev pilothullet opreamet til 10" (~ ø250 mm). Via det opreamede pilothul blev der herefter tilbagetrukket et foringsrør (ø160 PN10, PE 100), hvori dræn og blindrør på forhånd var monteret.

Drænet er opbygget som et 35 m langt ø110 mm, PN10 PE100 rør, med ø20 mm udborede huller og dobbelt filtervæv (maskevidde: 0,2 µm). Blindrør, som her monteret i begge ender af drænet og frem til anførte brønde, er udført i samme dimension og materiale, som foreskrevet for drænet, jf. figur 4.6.



Figur 4.6 Installation af dræn, blindrør samt sugeslanger efter gennemført frakturering.

Efter installation af dræn og blindrør blev foringsrøret trukket retur til terræn.

Herefter blev boringen udviklet for at sikre nedbrydning af eventuel Guar efterladt i pilothullet. Såfremt Guaren ikke sikres nedbrudt, vil der ikke kunne skabes effektiv kontakt mellem installerede dræn og de etablerede sprækker.

Boringsudviklingen blev udført i følgende 2 trin:

- I første trin blev der tilsat 980 liter vand og 20 liter breaker enzym til hvert filter. Enzymopløsningen henstod i 24 timer med det formål at nedbryde eventuelle rester af den tilsatte biologisk nedbrydelige Guar. Herefter blev opløsningen opsuget til slamsuger.
- Andet trin i processen omfattede renskylning af selve drænene. Dette blev udført ved at gennemspule disse i hele længderetningen ved et spuletryk på 50-80 bar. Skyllingen blev gennemført med rent vand og indtil skyllevandet var helt klart. Der blev forbrugt ca. 4-6 m³ skyllevand pr. renskyllt dræn af 35 m.

For tætning mellem det installerede blind-/drænrør og det opreamede pilothul er der umiddelbart før blindrørets indføring til anviste brønde etableret en ca. 1 m lang bentonitforsegling.

Fra brønd (syd) blev der via den sydligt monterede blindrørssektion og frem til ca. 0,2 m inde i selve drænet efterfølgende installeret en ø50 mm PE sugeslange. For at sikre tæt samling mellem sugeslange og blindrørssektionen blev der ved overgangen mellem blindrør og dræn afproppet med plastprop, jf. figur 4.6, snit A-A.

En del af sugeslangen blev desuden lagt i frostfri dybde og fremført til behandlingsanlægget, hvor tilledt drænvand oprenses før afledning til Evergrøften.

Via den nordligt monterede blindrørssektion og frem til midt i drænet blev der monteret en ø25 mm PN10, PE80 sugeslange, som blev anvendt i forbindelse

med gennemførte Dual-phase tests. Sugelangen er fremført til brønd (nord) og her afsluttet med kuglehaneventil og stuts.

4.3 Verifikation af sprækkeudbredelsen

Til verifikation af sprækkeudbredelsen langs de frakturerede dræn er der forud for, såvel som under, samt efter selve fraktureringen, foretaget registrering af jordoverfladens henholdsvis udvalgte bygningsdeles kote for vurdering af eventuelle nettohævninger/nettoforskydninger.

Supplerende er der gennemført udtag af intakte kerneprøver til ca. 5 m.u.t. fra i alt 22 sonderingspunkter for visuelt at vurdere sprækkeudbredelsen.

Resultaterne heraf er beskrevet i dette afsnit.

4.3.1 Sprækkeidentifikation ved observation af netto-hævning af terræn henholdsvis af bygninger.

I et forsøg på at fastlægge de etablerede sprækkers orientering og tykkelse (apertur) blev netto-hævningen af terræn henholdsvis af udvalgte bygningsdele fastlagt ved anvendelse af nivelleringsudstyr (laser). Nivelleringsudstyret blev opstillet 10-20 m væk fra det område, inden for hvilket sprækken forventedes udbredt i planen.

Langs hver sprække blev der etableret 8-10 nivelleringspunkter, hvortil der blev nivelleret hhv. før, 4-6 gange under, samt 24 timer efter fraktureringens ophør.

Den gennemførte nivellering viste entydigt, at der mod forventning ikke kunne påvises en målbar (> 1 mm) netto-hævning eller netto-forskydning af hverken terræn eller bygningsdele.

4.3.2 Sprækkeudbredelse fastlagt ved udtag af intakte prøver samt ved XRD-screening

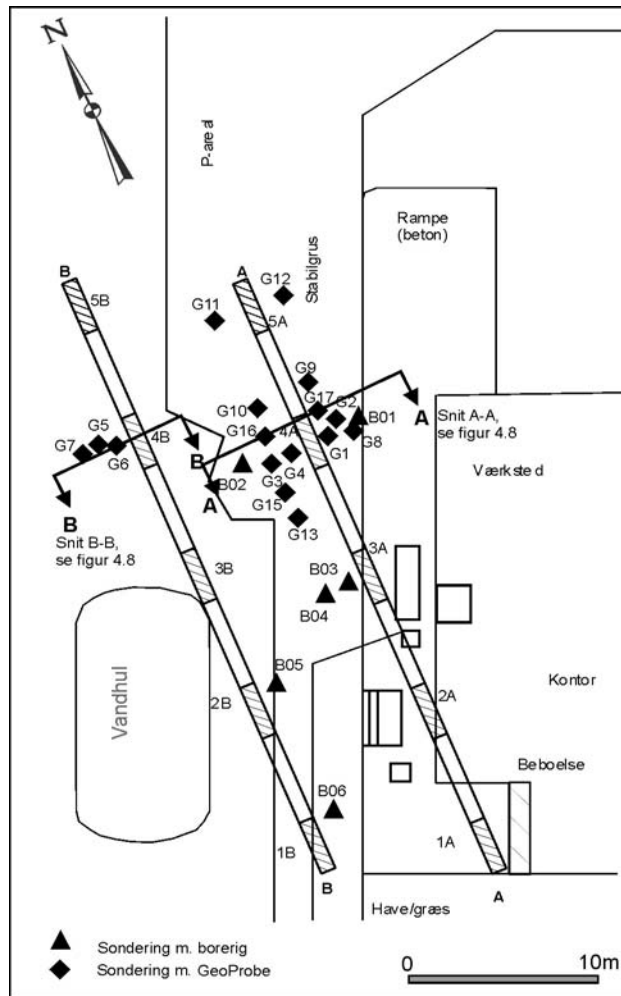
Visuel bedømmelse på baggrund af udtagne intaktprøver

Sonderingerne er primært foretaget langs sprække 4A (i i alt 13 punkter) og sprække 4B (i i alt 6 punkter) grundede egnede adgangsforhold langs disse.

Herudover er der udført i alt 4 sonderinger langs sprække 1B (BO6), 2B (BO5) og 3A (BO3 og BO4) samt 2 sonderinger langs den ikke udførte sprække 5A. Sonderinger ved sprække 5A blev gennemført for at be-/eller afkræfte, om sprækkeudbredelsen fra 4A skulle have udbredt sig mod denne.

Sonderingspunkternes placering fremgår af figur 4.7.

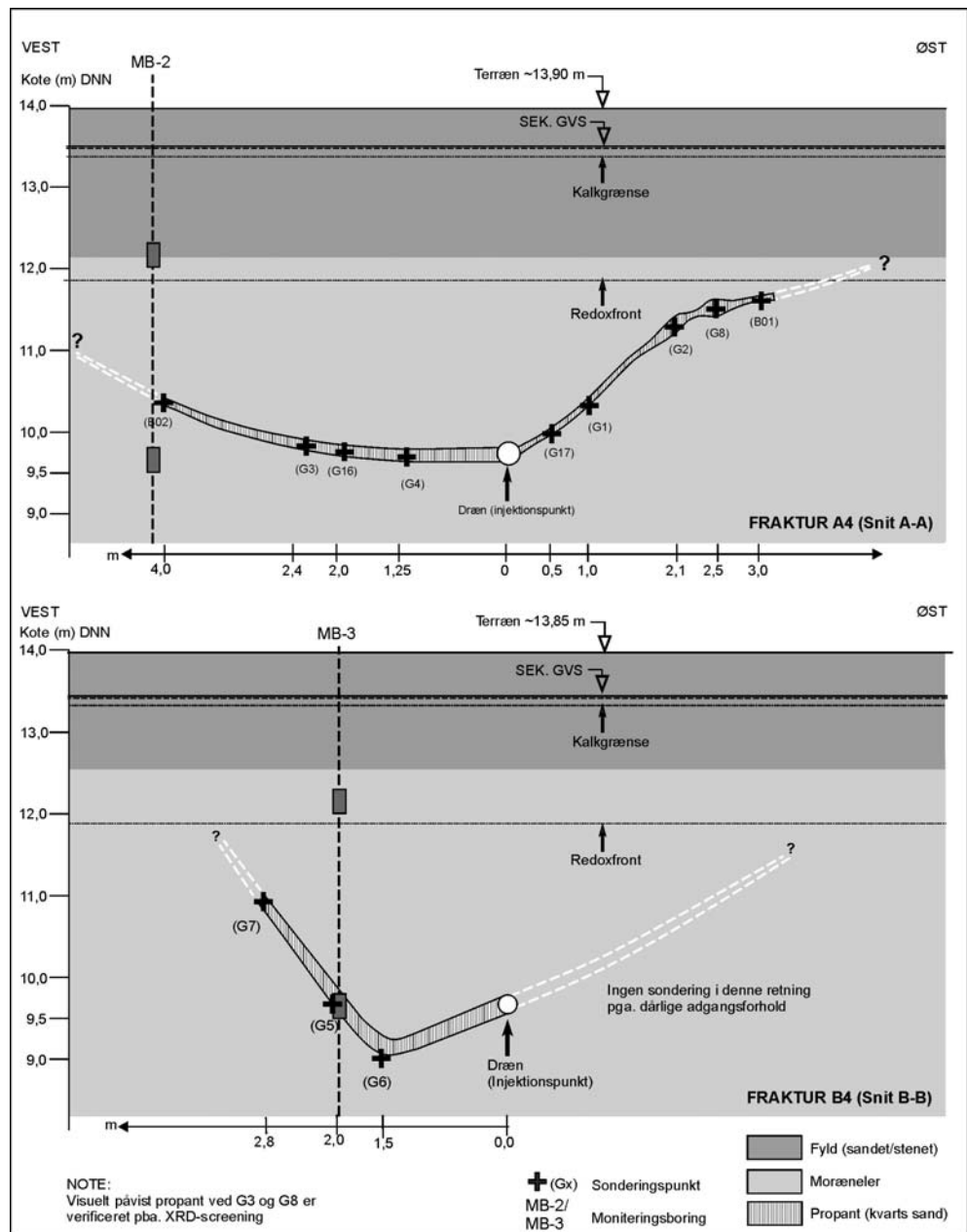
Sondering BO1-BO6 er udført med borerig af typen UNIMOG, vha. hvilken der blev udtaget ø50 mm kerneprøver af 1 m længde fra terræn og til 5 m.u.t. Resterende kerneprøver, benævnt G1-G17, i samme dimension og længde blev udtaget vha. NIRAS' Geoprobeudstyr.



Figur 4.7 Placering af sonderingspunkter for sprækkeidentifikation langs sprække nr. 1B, 2B samt 3A og 4A

Generelt har udtagning af kernepróver i den vandmættede moræneler samt kompaktering/smearing af kernepróverne vanskeliggjort en entydig visuel sprækkeidentifikation, selv om sporstoffet Uranine var tilsat fraktureringssuspensionen.

Tolkningen af den horisontale sprækkeudbredelse, baseret på en visuel bedømmelse af udtagne kerner langs fraktur 4A og 4B er vist på figur 4.8, mens hovedresultaterne for den gennemførte visuelle sprækkeidentifikation, er gengivet i tabel 4.2.



Figur 4.8 Tolket sprækkeudbredelse langs fraktur 4A og 4B (tværsnit).

Sonderingspunkt nr.	Injektionspunkt (sprække nr.)	Vinkelret afstand fra injektions- til sonderingspunkt (m)	Dybde til identificeret sprække (m.u.t.)	Apertur (mm)
BO1	A4	3,0	2,3	1-3 (+)
BO2	A4	4,0	3,5	1-3 (+)
G1	A4	1,0	3,5	1-3 (+)
G2	A4	2,1	2,6	3-5 (+)
G3	A4	2,4	4,4	~20 (+,x)
G4	A4	1,25	4,5	3-5 (+)
G8	A4	2,5	2,4	5,0 (+,x)
G16	A4	2,0	3,9	1-3 (+)
G17	A4	0,5	4,5	1-3 (+)
G5	B4	2,0	4,4	3-5 (+)
G6	B4	1,5	4,8	5-10 (+)
G7	B4	2,7	2,9	1-2 (+)
BO3	A3	1,0	4,0	1-3 (+)
BO4	A3	2,5	2,6	1-3 (+)
BO5	B2	1,2	4,3	4-5 (+)
BO6	B1	1,5	3,8	5 (+)

Tabel 4.2 Sprækkeidentifikation langs de sonderingspunkter, hvor propant er påvist (+) usikker identifikation, (+) sikker identifikation, (x) XRD-screening udført

Af tabel 4.2 fremgår, at der er udført sikker visuel sprækkeidentifikation i 10 ud af i alt 16 sonderingspunkter. Af tabellen fremgår desuden, at 6 sonderingspunkter, benævnt G9-G13 samt G15, jf. figur 4.7 ikke er indarbejdet, idet der her generelt ikke kunne påvises synlig propant. De 6 punkter er alle placeret i en sådan afstand fra nærmeste inducerede sprække A4, at positiv sprækkepåvisning også var vurderet urealistisk.

Der blev aldrig gennemført sondering langs et oprindeligt planlagt sonderingspunkt G14, hvorfor G14 heller ikke er indarbejdet i tabel 4.2.

XRD-screening

For verifikation af den visuelle sprækkeidentifikation er 4 prøver analyseret ved røntgendiffraction, efterfølgende XRD-screening, hos Geologisk Institut, København. 2 af prøverne blev udtaget langs fraktur 4A (G3 og G8), hvor der ved den visuelle identifikation blev påvist sprækker med en tykkelse (apertur) på hhv. ca. 20 mm og ca. 5 mm.

De resterende 2 prøver omfattede en referenceprøve af den intakte formation (udtaget ca. 4,8 m.u.t. ved B02) samt en prøve af det anvendte propant (kvartssand).

Screening ved XRD-metoden foretages ved røntgenstråling igennem krystallinske stoffer. Atomerne i krystalstrukturen fungerer som afbøjningsgitter, og der formes mange sekundære (diffrakterede) røntgenstråler, der spreder sig i rummet i veldefinerede retninger. På baggrund af afbøjningsretninger og intensitet af de sekundære røntgenstråler kan de enkelte stoffer identificeres, da hvert stof har sit eget diffraktionsmønster og kan identificeres efter det /ref. 9/.

Resultatet af XRD-screeningen er sammenfattet i tabel 4.3.

Sonderingspunkt	Dybde [mut]	Sammensætning				
		Kvarts %	Calcit %	Albit %	Mikrolin %	Lermine- Raler %
GO2 (intakt formation)	4,8	55	11	10	13	11
referenceprøve kvarts sand (propant)	-	97	1,5	1,5	-	-
G3 (ved fraktur 4A)	4,6	88	1,5	5	4	1,5
G8 (ved fratur 4A)	2,5	82	3	7	5	3

Tabel 4.3 Resultater af udført XRD-screening.

Resultaterne viser, at propanten er sammensat af næsten rent kvarts, med små indhold af calcit og albit.

Lidt over 50% af intaktformationen (G02) består af kvarts, men ligeledes af betydelige indhold af feldspat (blanding af albit og mikrolin i et forhold tæt på 1:1), samt calcit og lerminerale, hvilket er en typisk sammensætning for moræneler.

Sammenlignet med referenceprøven fra den intakte formation, indeholder de 2 prøver udtaget fra fraktur 4A, forhøjede mængder af kvarts, hvilket indikerer, at de repræsenterer en blanding af moræneler og propant.

4.3.3 Sammenfattende vurdering af den udførte sprækkeidentifikation

På det foreliggende grundlag vurderes der i den aktuelle sag at kunne påvises sprækker med en apertur på 1- 20 mm. Aperturen af den inducerede sprække vurderes overvejende at aftage i tykkelse som funktion af den vinkelrette afstand regnet væk fra injektionspunktet.

Orientering af sprækkerne vurderes overvejende at være subhorisontal og udviser overvejende tendens til at søge mod terræn i en vinkel på 10-50 grader, regnet fra vandret. Dog er det også påvist, at sprækkeudbredelsen kan orienteres nedad, regnet i forhold til injektionsdybden. Dette betyder, at det niveau, hvorfra der efterfølgende drænes, kan variere med op til 2-3 m i vertikal retning.

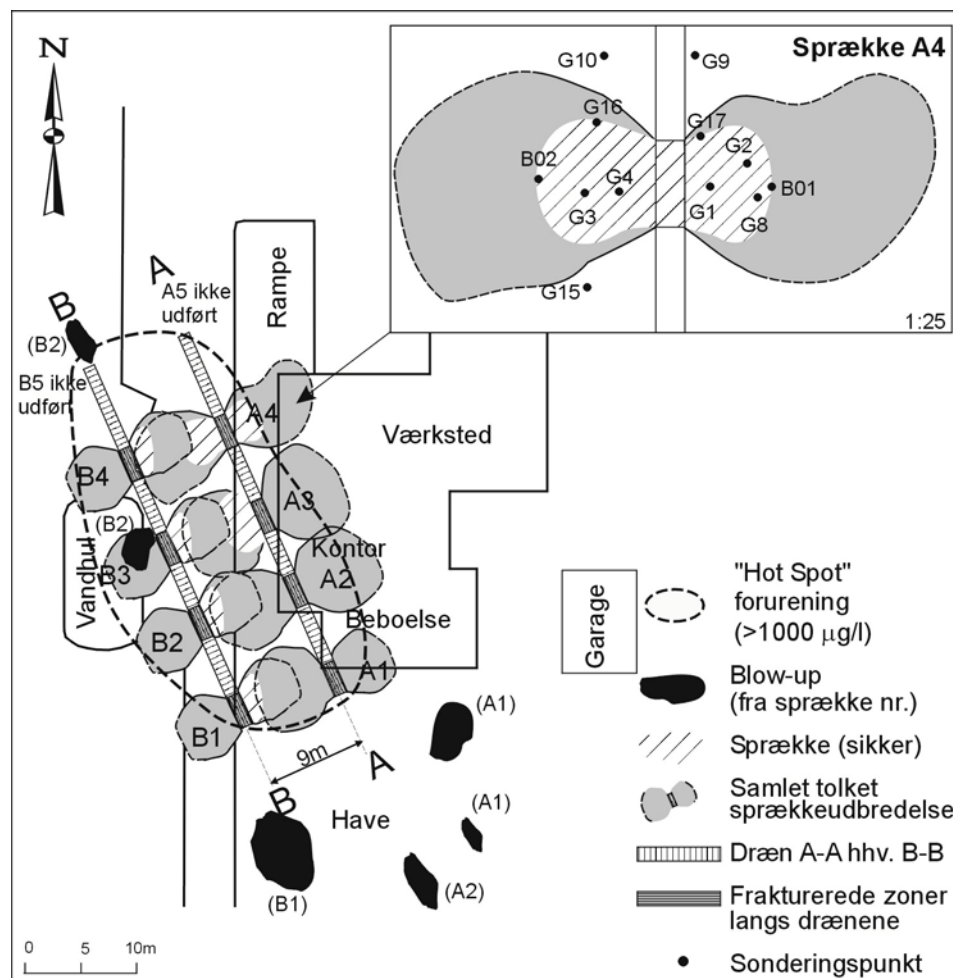
Langs dræn A-A skønnes den opnåede sprækkelængde generelt at være > 8 m, svarende til en sprækkeudbredelse på begge sider af drænet på over 4 m. Den gennemsnitlige apertur for de inducerede sprækker langs dræn A-A vurderes til 2-3 mm, svarende til et opnået sprækkeareal pr. sprække på 55 - 120 m². Anførte sprækkeareal er fastlagt på baggrund af estimatet for den gennemsnitlige apertur, jf. tabel 4.2, samt ud fra et estimatet for "nettomængden" af injiceret propant, jf. tabel 4.1.

Langs dræn B-B skønnes den opnåede sprækkelængde generelt at være > 4-6 m, svarende til en sprækkeudbredelse på begge sider af drænet på over 2-3 m. Den gennemsnitlige apertur for de inducerede sprækker langs dræn B-B vurderes til 2-4 mm, svarende til et opnået sprækkeareal pr. induceret sprække på 30-60 m².

På det foreliggende grundlag vurderes den visuelle identifikationsmetode umiddelbart at være egnet for fastlæggelse af sprækker med en apertur > ca. 3-5 mm, og den tolkede sprækkeudbredelse langs dræn A-A og B-B er præsenteret i figur 4.9.

Havde man i den aktuelle sag valgt kun at gennemføre sprækkeidentifikation ved at observere "netto-hævninger/-forskydninger" på terrænet, kan det konkluderes, at der reelt ikke ville være påvist sprækker. Den generelle erfaring fra USA viser dog, at registrering af "netto-hævninger/-forskydninger" i forbindelse med frakturering i relativt ringe dybde (< 5 m) ofte kan give vigtige informationer om apertur og sprækkeorientering i planen /ref. 8/.

Det samlede foreliggende identifikationsgrundlag indikerer dog, at der ved anvendte fraktureringsteknik på Slagelsevej 190 i Næstved er blevet etableret sprækker, hvis apertur og specielt sprækkeudbredelse er noget mindre end forventet, jf. afsnit 3.4.3.



Figur 4.9 Tolket sprækkeudbredelse langs frakturerede dræn – som udført

4.4 Verifikation af den hydrauliske effekt fra vandrette dræn

4.4.1 Forsøgsbetingelser og monitoringsprogram

For verifikation af den hydrauliske effekt fra de vandret frakturerede dræn A-A og B-B er der udført en dual-phase test på hvert af disse dræn.

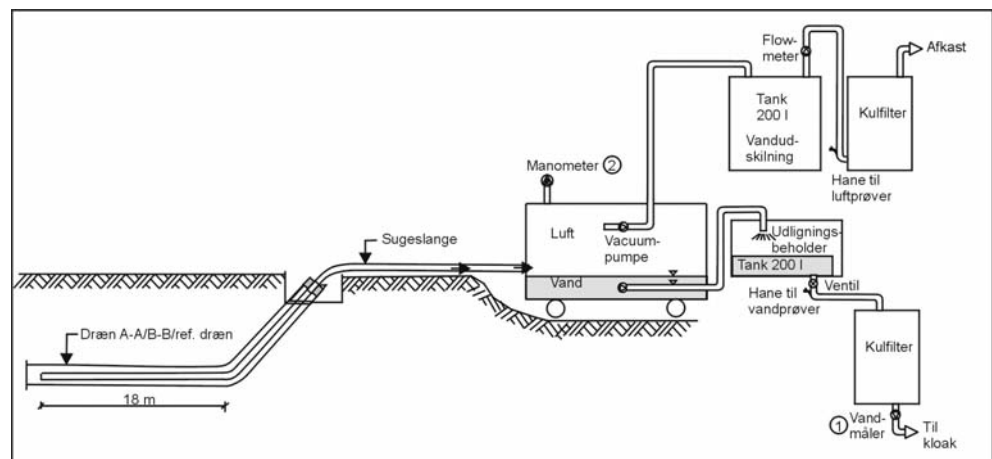
Dual-phase testen er udført ved at påtrykke de frakturerede dræn et vakuum. Derefter er der gennemført en monitoring af vandspejlsænkningen i de nærliggende monitoringsboringer for vurdering af influensradius, ligesom de

oppumpede luft- og vandmængder fra drænene er registreret for vurdering af deres hydrauliske kapacitet.

Dual-phase testene af de 2 frakturerede dræn er udført i perioden 11. - 17. maj 2000. Hver test forløb over ca. 48 timer. Under testene blev drænene påtrykt et vakuum ved hjælp af et forsøgsanlæg, der var tilsluttet drænene via en $\varnothing 25$ mm sugeslange, installeret 18 meter inde i de vandrette frakturerede dræn.

Forsøgsanlægget består af et sugespidsanlæg, der indeholder en 2 m^3 tank med indbygget vakuum- og vandpumpe. Anlæggets kapacitet er ca. 60 m^3 luft/time og 5 m^3 vand/time. På afkastsiden er der monteret 2 kulfiltre til rensning af den afkastede luft og vand. Tilkoblingen til det testede dræn er udført med en special- hætte.

På figur 4.10 er vist en principskitse af anlægsopbygningen anvendt ved dual-phase testene på dræn A-A og B-B.

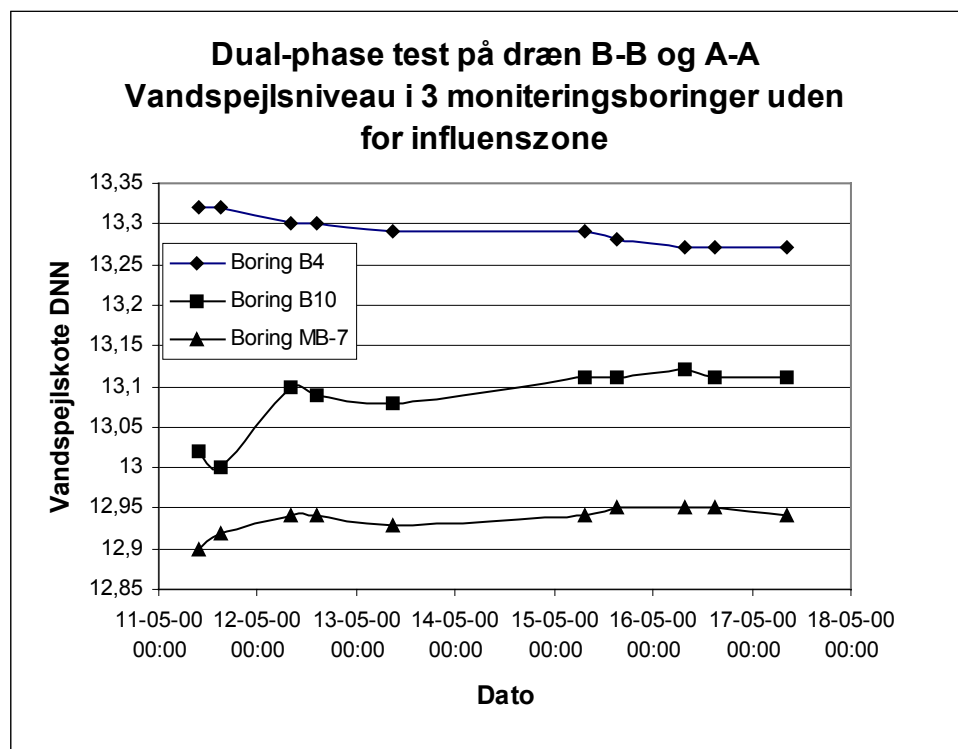


Figur 4.10 Principskitse af anlægsopbygning ved Dual-phase test

Pejling af grundvandsstanden blev i testperioden udført i en række monitoringsboringer placeret omkring de 2 frakturerede dræn. Mht. monitoringsboringerne dimensionering og opbygning henvises til afsnit 3.6.

I forbindelse med testsafvikling blev der gennemført en manuel pejling i monitoringsboring MB-2 til MB-10 samt i boring B4 og B10. I udvalgte boringer, MB-2, MB-3 og MB-10, er der pejlet i både øvre (~ kote 12) og nedre (~ kote 9,5) filter, mens der i MB-4 til MB-9 kun er pejlet i nedre filter (~ kote 9,5). Boring B4 og B10 er kun filtersat i et niveau, svarende til kote 10,7 – 13,7 hhv. kote 4,6 – 9,6.

For 3 boringer (MB-7, B4 og B10) er vandspejlsvariationen gennem testperioderne vist på figur 4.10. Disse boringer er placeret i en horisontal afstand på 15 - 30 meter fra dræn A-A og B-B, og er således uden for det område, som forventes påvirket under testen, jf. figur 4.12.



Figur 4.11 Vandspejlsvariation i 3 boringer placeret uden for influenszonen.

For at belyse den nedbørsbetingede påvirkning af de to Dual-phase tests er der indhentet nedbørsdata fra DMI's observationspunkt etableret på Næstved Rensningsanlæg, der er beliggende ca. 5 km fra Slagelsevej 190. De indhentede data viser, at der i perioden 11. - 17. maj 2000, hvor de to dual-phase tests på dræn A-A hhv. B-B blev udført, ikke er registreret nedbør på over 0,1 mm.

Det ses på figur 4.11, at der i dybdeintervallet 0-6 m.u.t. (B4 og MB-7) kun er registreret vandspejlsvariationer på ca. 2-5 cm gennem testperioden, mens der i dybdeintervallet 6-10 m.u.t. (B10) er sket en stigning på ca. 10 cm. Der vurderes derfor ikke at være grundlag for en generel korrektion af de observerede vandspejlsvariationer i monitoringsboringerne filtersat i de øverste 6 m.u.t.

4.4.2 Resultater af dual-phase test

4.4.2.1 Dræn B-B

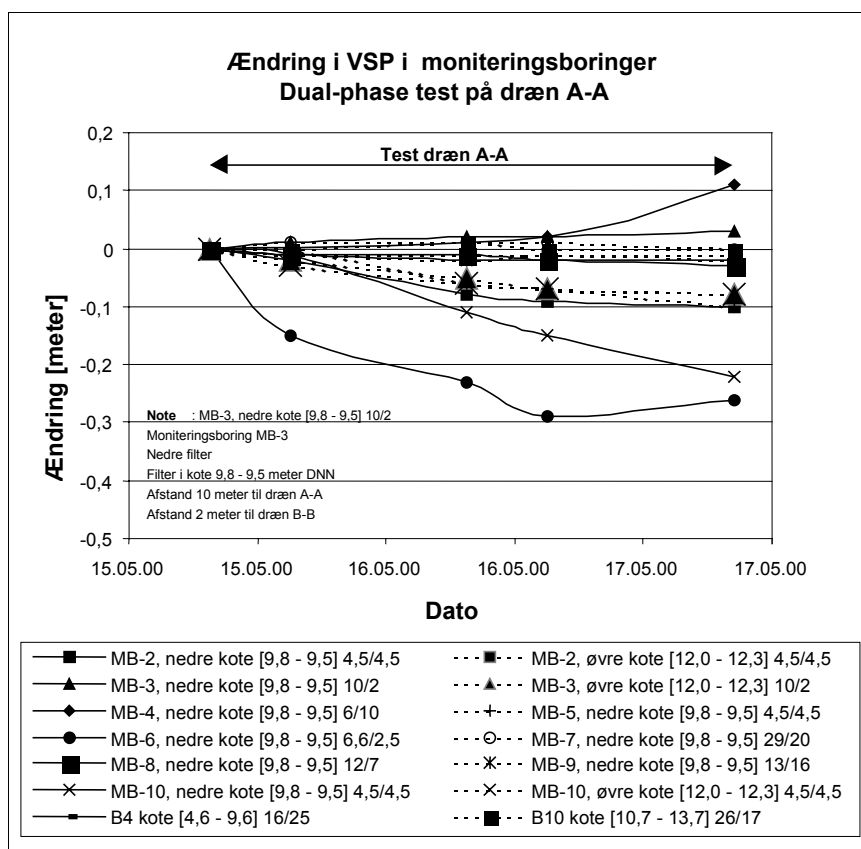
Dual-phase testen for dræn B-B blev foretaget fra den 11.-13. maj 2000. Ved testen blev følgende nøgleparametre, anført i tabel 4.4, registreret.

Dræn	Hydraulisk kapacitet		Luftflow		Vakuum [bar]
	[m ³ /døgn]	[m ³ /lbm filter/døgn]	[m ³ /døgn]	[m ³ /lbm filter/døgn]	
B-B (35 meter)	1,25	0,036	570-720	16,3-20,6	0,55-0,60

Tabel 4.4 Nøgleparametre for dual-phase test på dræn B-B

Gennem testperiodens 48 timer er der foretaget 5 pejlerunder, svarende til 2 gange i døgnet. Retableringen efter forsøget kan vurderes ud fra pejlingen af boringerne gennemført 3 dage efter stop. Ændringen i vandspejlet i forhold til startniveauet for samtlige monitoringsboringer er vist på figur 4.12. En enkelt

pejling (MB-3 øvre den 12-05-00, 12:00) vurderes at være fejlagtig, idet den afviger meget fra alle øvrige.



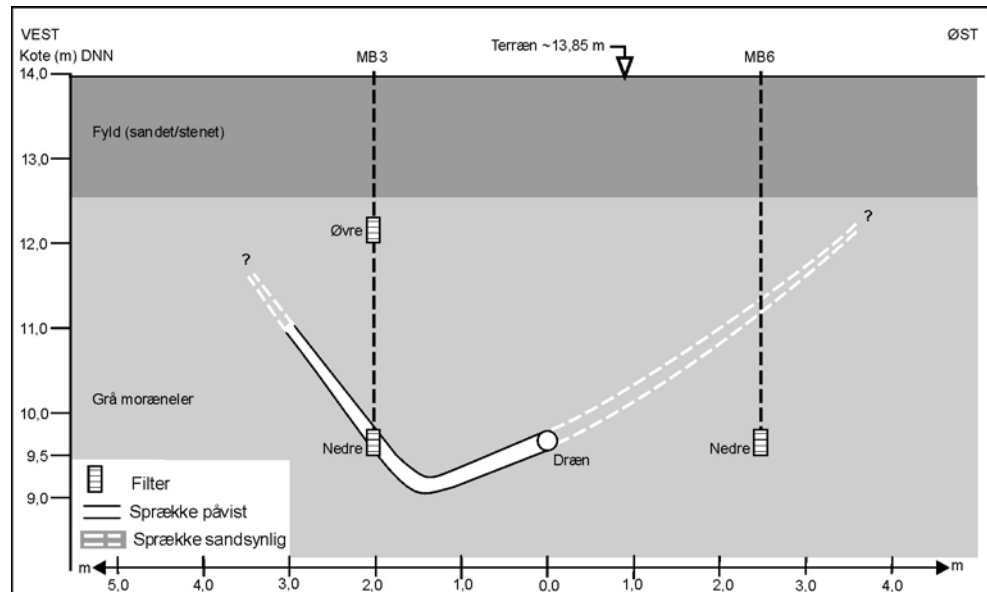
Figur 4.12 Vandspejlsændring ifht. startniveau. Dual-phase test på dræn B-B

Sænkingsforløbene i de enkelte boringer viser meget store forskelle, og kan overordnet inddeles i 3 typer.

Den første type (A) er karakteriseret ved en hurtig afsænkning på 1-2 meter i løbet af de første 12 timer, og et stabilt niveau herefter. Retableringen foregår også relativt hurtigt. Dette forløb er påvist i to filtre (MB-2 øvre, MB-3 nedre).

Den anden type (B) er karakteriseret ved en langsommere og relativt mindre afsænkning på op til ca. 0,25 m over 2-3 dage. Dette forløb er tydeligt i to filtre (MB-2 nedre, MB-6 nedre). Retableringen foregår her langsommere, og er ikke – som for type A – fuldstændig efter ca. 4 døgn. Den tredje type (C) har ændringer, der ikke vurderes som signifikante i forhold den naturlige vandspejlsvariation, og der kan således være en afsænkning på op til 5 cm, som blot ikke kan erkendes. Denne gruppe omfatter de resterende 10 filtre placeret i varierende niveauer.

De 3 typer af sænkingspåvirkning vurderes at være styret af et komplekst samspil mellem trykudbredelse i morænenes naturligt forekommende sprækker og de kunstigt inducerede højpermeable sprækker samt selve matrixen af lavpermeabelt moræneler. Som støtte ved tolkningen af resultaterne er placeringen af monitoringsfiltre og de påviste hydraulisk inducerede sprækker langs dræn B-B vist på figur 4.13.



Figur 4.13 Pålignende sprækker samt placering af monitoringsfilter langs dræn B-B

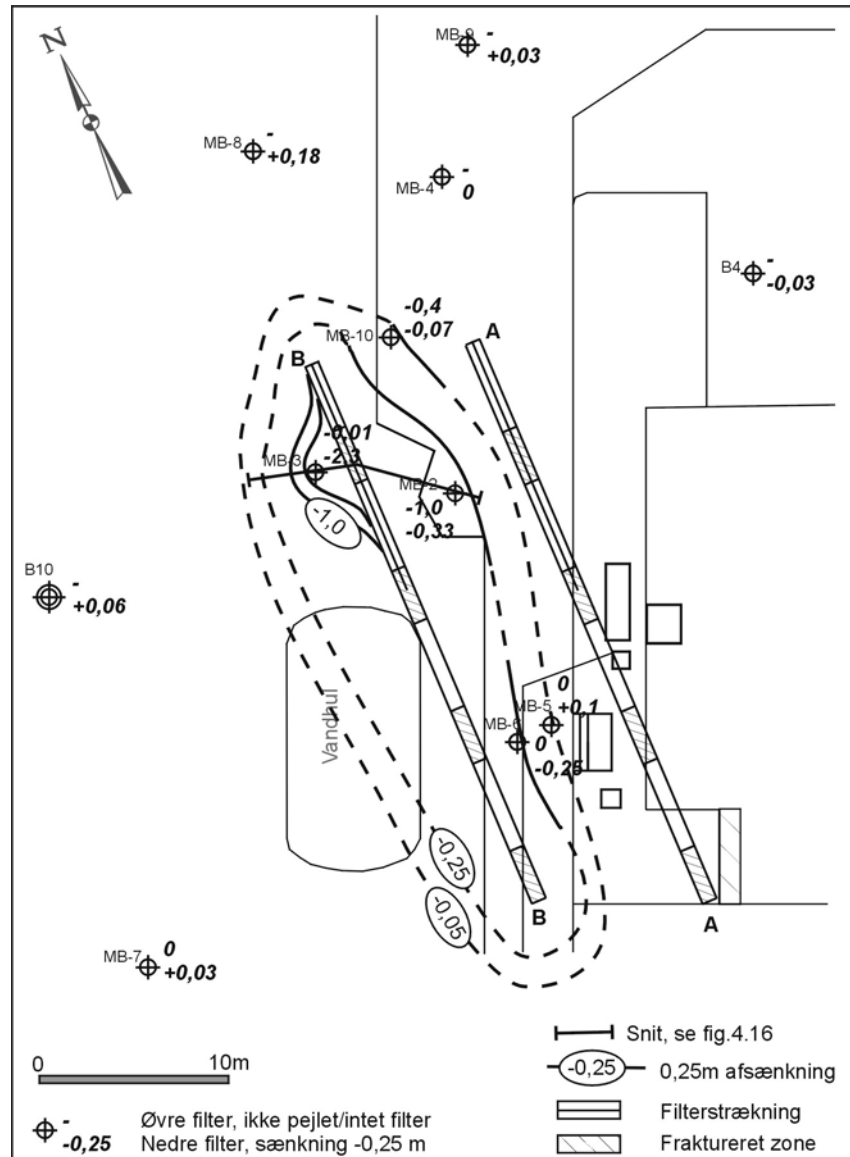
Sænkingsforløbet (type A) vurderes at være repræsentativt for de filtre, som direkte skærer de inducerede sprækker. Dette underbygges af filter MB-3 nedre, hvor der netop i niveauet for filtersætningen blev påvist en sprække, jf. figur 4.13 og 4.8. Den hurtige retablering underbygger teorien om direkte kontakt til sprækker.

Ved start af forsøget tømmes de kunstigt inducerede sprækker relativt hurtigt, og vandstanden i selve filtret falder til et niveau omkring filterstrækningens overkant. Også filtret MB-2 øvre vurderes at have kontakt til inducerede sprækker, men ved borestedet for MB-2 blev der kun tydeligt konstateret en sprække ca. 2 m dybere end dette filter, jf. figur 4.8. Det vurderes dog sandsynligt, at en sprække induceret fra dræn B-B skærer MB-2 øvre ca. 2-2,5 m.u.t., og at de inducerede sprækker fra både dræn A-A og B-B gennemskærer området ved MB-2 i hhv. ca. 2 og 4 m.u.t.

I det tilfælde, at vandstanden skulle blive sænket ned under overkant af filterstrækningen, vil der kunne trækkes luft ind i filtret og videre via de inducerede sprækker til selve drænet. I dette tilfælde vil der kunne opbygges et vist vakuum i sprækken, hvilket vil øge den effektive hydrauliske gradient. Hvis vakuomet i pumpeboringen er ca. 0,5 bar, svarende til 5 m vandsøjle og er der opbygget et vakuum i selve sprækken på 20% af pumpeboringens vakuum, vil dette være ækvivalent med en afsænkning på ca. 1 m vandsøjle i sprækken (1 bar = 10 m vandsøjle).

Den anden type af sænkingsforløb (B) har et mere "typisk" forløb, og vurderes at være resultatet af selve tryksænkningen i de inducerede sprækker og en videre forplantning vinkelret herpå ud i formationen. Placeringen af filter MB-6 nedre er sammen med en mulig sprækkeudbredelse i denne retning vist på figur 4.14. Uanset den nøjagtige placering af sprækken, vurderes den vertikale afstand mellem sprække og filter at være under ca. 1-2 m. Det samme forhold gør sig gældende for MB-2 nedre, til trods for at den horisontale afstand til dræn B-B er 4 m i fht. MB-6 Nedre, der kun ligger 2 m fra dræn B-B. Igen er det sandsynligt, at en sprække med et lavt tryk nær MB-2 øvre medfører en vertikal trykforplantning til MB-2 nedre, placeret ca. 2 m dybere.

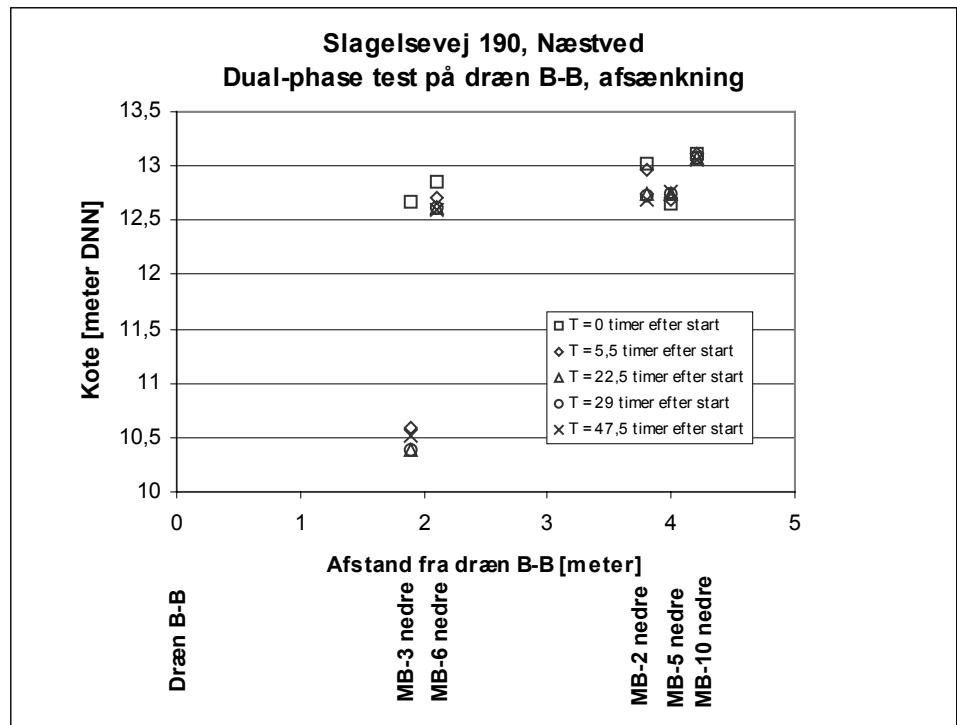
På grund af de store vertikale gradienter omkring sprækkerne er det generelt vanskeligt at afbilde de hydrauliske forhold. For de filtre, der ligger i niveau med drænet og som udviser en sænkning svarende til at de ligger et stykke inde i matrixen i forhold til sprækkerne (type B), er den skønnede udbredelse af sænkningerne i det horisontale plan omkring drænet vist på fig. 4.14.



Figur 4.14 Afsenkning i matrixen i samme dybde som dræn B-B.

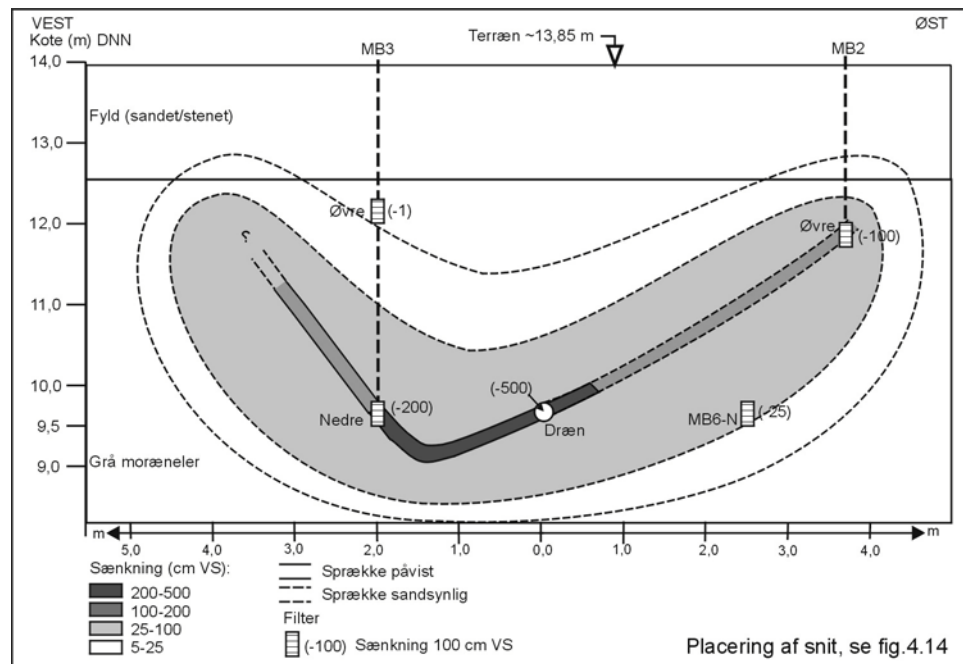
I selve drænet er trykniveauet afsænket svarende til ca. 5 m VS, jf. tabel 4.4. I de omkringliggende filtre vurderes det, at der i matrixen generelt opnås en afsenkning på op til 0,25 m inden for en horisontal afstand på ca. 1-2 m fra drænet, stærkt afhængig af sprækkernes lokale udbredelse og hældning væk fra drænet. Baseret alene på MB-10 nedre, vurderes der at ske en påvirkning på under 0,05 m i en afstand af ca. 3-4 m fra drænet. En væsentlig konklusion på baggrund af bl.a. figur 4.14 er, at der vurderes at være en sænkningpåvirkning ud til minimum den afstand, hvortil det er lykkedes at lave sprækker.

Det tidlige forløb i afsenkningen i de enkelte filtre fremgår af figur 4.15.



Figur 4.15 Afsenkning i monitoringsboringer som funktion af tid og afstand til dræn B-B

I det vertikale plan kan de komplicerede hydrauliske forhold illustreres ved et snit igennem frakturen 4B, jf. figur 4.16. Det bør dog bemærkes, at MB-6 Nedre er medtaget på snittet for at illustrere sænkningen ude i matrixen (type B). Effekten af sprækkerne fremgår meget klart, og det vurderes, at der opnås en sænkingspå-virkning på ca. 25-100 cm vinkelret ud fra sprækkerne og ind i matrixen efter ca. 2 døgn. I selve sprækken er der en effektiv afsenkning af trykniveauet på ca. 100-500 cm, afhængig af afstand og dybde af sprækken i forhold til drænet. Der er således en meget kraftig hydraulisk gradient rettet imellem sprække og matrix, og denne gradient er effektiv over hele kontaktfladen mellem sprække og matrix.



Figur 4.16 Afsenkning af vandspejlet i et snit vinkel ret på fraktur 4B.

4.4.2.2 Dræn A-A

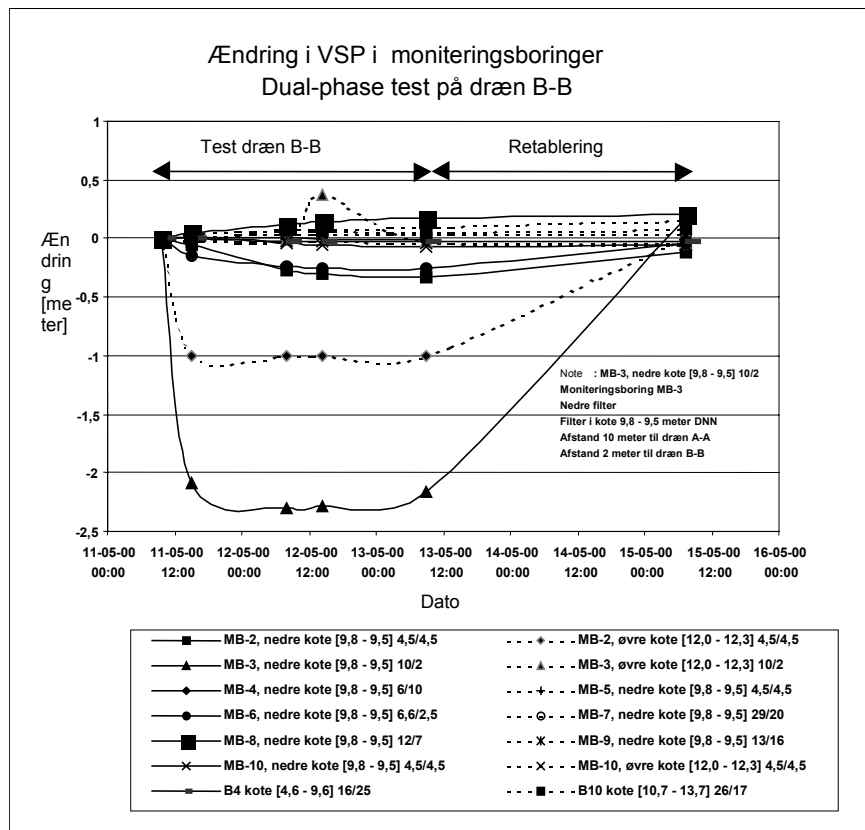
Dual-phase testen af dræn A-A blev foretaget fra den 15.-17. maj 2000. Ved testen blev nøgleparametrene i tabel 4.5 registreret.

Dræn	Hydraulisk kapacitet		Luftflow		Vakuüm
	[m ³ /døgn]	[m ³ /lbm filter/døgn]	[m ³ /døgn]	[m ³ /lbm filter/døgn]	[bar]
A-A (35 meter)	2,78	0,079	380-500	10,9-14,3	0,52-0,60

Tabel 4.5 Nøgleparametre for dual-phase test på dræn A-A

Gennem testperiodens 48 timer er der foretaget 4 pejlerunder, svarende til 2 gange i døgn. Testen på dræn A-A er udført ca. 2 dage efter afslutningen af testen på dræn B-B, men monitoringsboringeres trykniveau vurderes at være retableret. Der er ikke gennemført pejlinger efter stop af forsøget, og retableringsforløbet kendes derfor ikke. Ændringen i vandspejlet i forhold til startniveauet for samtlige monitoringsboringer er vist på figur 4.17.

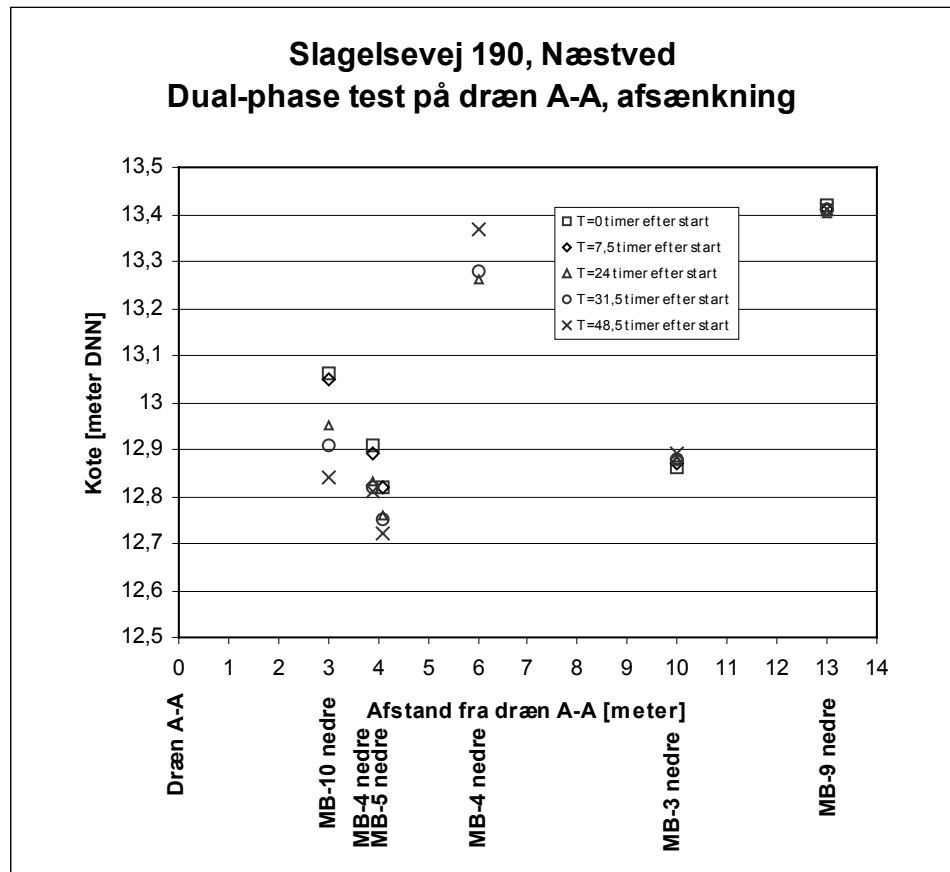
Som ved beskrivelsen af testen af dræn B-B kan der identificeres tre typer af sænkingsforløb. Kun filter MB-6 Nedre afdrænes markant hurtigere end de øvrige, og indikerer en mulig kontakt med en sprække (type A). Afdræningen sker dog ikke nær så hurtigt som for den tilsvarende type under testen af dræn B-B. Der er ikke påvist nogen sprækker i monitoringsboringeres filterintervaller, hvilket således er i overensstemmelse med de observerede sænkingsforløb.



Figur 4.17 Vandspejlsændring ifht. startniveau. Dual-phase test af dræn A-A

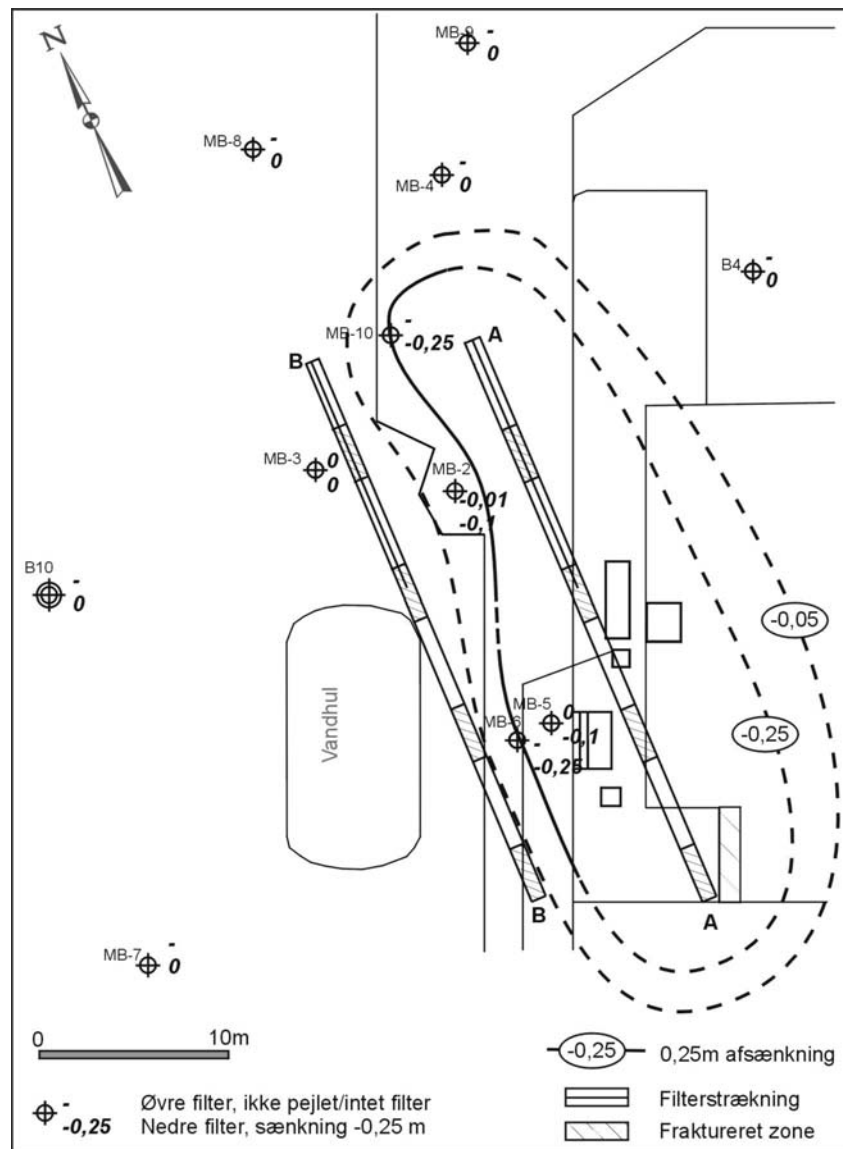
I alt 4 filtre (MB-2 nedre, MB-5 nedre, MB-10 øvre og MB-3 Øvre) viser en langsommere og mindre afsænkning på ca. 10 cm over de 2 dage (type B). En enkelt boring (MB-10 nedre) afsænker fortsat ved afslutningen af forsøget. De resterende 8 filtre udviser ingen signifikante ændringer i forhold til den konstaterede naturlige vandspejlsvariation. Generelt observeres sænkningerne i filtrene placeret i dybdeniveauet svarende til drænet, mens der i niveauet ca. 2 m højere oppe kun ses sænkninger i 2 filtre.

De tidlige forløb i afsænkningen i de enkelte filtre fremgår af figur 4.18.



Figur 4.18 Afsenkning i monitoringsboringer som funktion af tid og afstand til dræn A-A

For de filtre, der ligger i niveau med drænet og som udviser en sænkning svarende til at de ligger et stykke inde i matrixen i forhold til sprækkerne (type B), er den skønnede udbredelse af sænkningerne i det horisontale plan omkring drænet vist på figur 4.19.



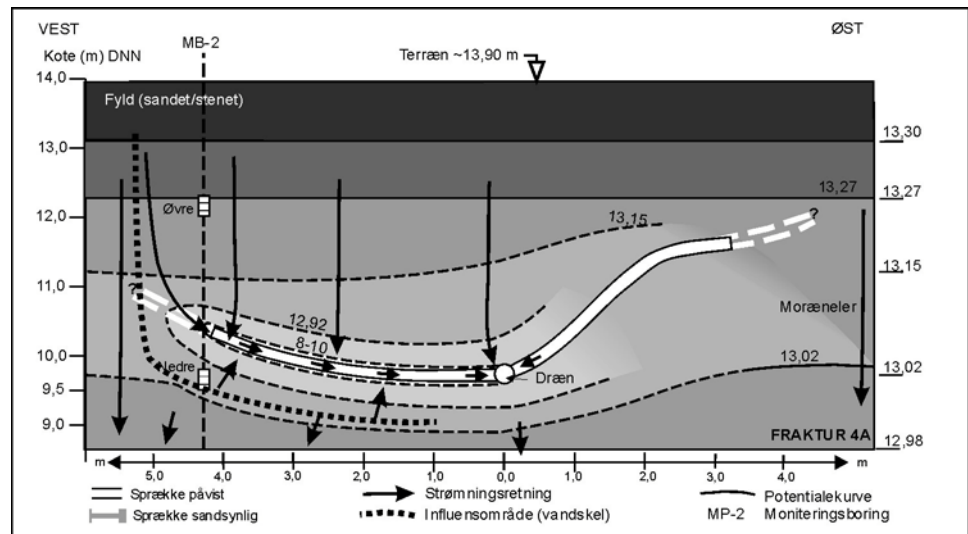
Figur 4.19 Afsenkning i matrixen i samme dybde som dræn A-A.

I selve drænet er trykniveauet afsænket svarende til ca. 5 m VS, jf. tabel 4.5. I de omkringliggende filtre vurderes det, at der i matrixen generelt opnås en afsenkning på op til 0,25 m inden for en afstand af ca. 1-4 m fra drænet, stærkt afhængig af sprækkernes lokale hældning væk fra drænet. Baseret på MB-3 nedre og MB-4 nedre, vurderes der at ske en påvirkning på under 0,05 m i en afstand af ca. 5-10 m fra drænet. En væsentlig konklusion på baggrund af bl.a. figur 4.19 er, at der vurderes at være en sænkingspåvirkning ud til minimum den afstand, hvortil det er lykkedes at lave sprækker.

I det vertikale plan vil sækningsudbredelsen ud fra sprækkerne principielt være som indikeret for dræn B-B (figur 4.16). For at illustrere betydningen af sprækkerne på den vertikale strømning i morænen er det derfor i stedet valgt at vise den skønnede variation i det absolutte tryk i morænen over dybden, jf. figur 4.20.

Den generelle naturlige vertikale gradient i morænen er ca. 0,03 (m/m), og medfører den viste nedadrettede vandtransport uden for området påvirket af dual-phase testen (influensområdet). Et stykke under de etablerede sprækker vil der også findes et vandskel, og dette kan efter 2 dages pumpning forsigtigt

skønnes at ligge 1-2 m under sprækken – baseret på sænkningen i MB-2 Nedre på ca. 0,1 m.



Figur 4.20 Absolut trykniveau i morænen langs snit omkring fraktur 4A.

Inden for influensområdet vil porevandet blive opsamlet i drænet, idet det absolutte trykniveau i sprækkerne knyttet hertil vurderes at være 2-4 m lavere end i matrixen omkring. Selvom en række filtre viser relativt stabile trykniveauer efter kun få dages pumpning på drænet, vurderes trykudviklingen ud i selve matrixen omkring drænene endnu ikke at være fuldt udviklet. Dette skyldes morænelerets meget lave permeabilitet. Trykudviklingen i sprækkesystemet, der gennemsetter de øverste 5 m, vurderes derimod at være fuldt udviklet.

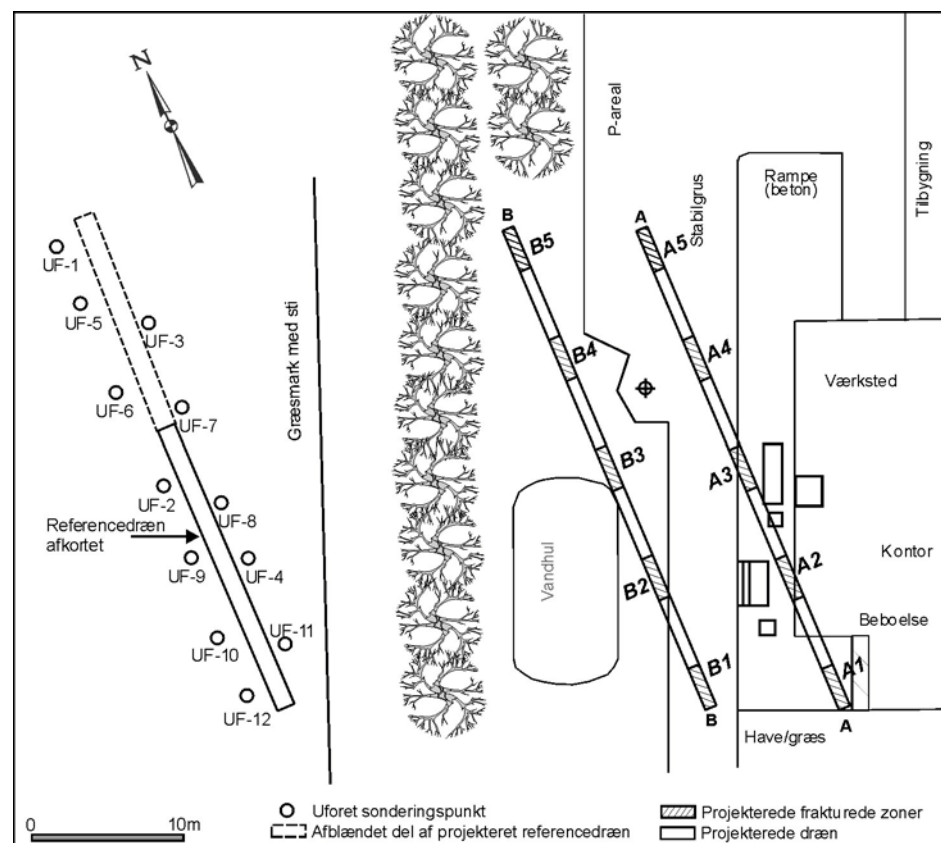
5 Hydraulisk test af referencedrænet

5.1 Etablering af referencedrænet

Referencedrænet er etableret på en åben mark, jf. figur 5.1. Drænet er her placeret i en horisontal afstand på ca. 27 m, regnet vinkelret på dræn B-B, jf. tidligere figur 3.3, hvor trace Q-Q` anviser placeringen for det senere etablerede referencedræn.

Referencedrænet er opbygget og installeret på samme måde og i samme kote (~9,5) som dræn A-A og B-B.

I forbindelse med afvikling af Dual-phase testen i referencedrænet blev det konstateret, at drænet mod forventning ydede væsentligt mere vand end de frakturerede dræn. For at afgøre om dette var betinget af variationer i lokalgeologien, blev der efterfølgende gennemført sondering langs 12 punkter, benævnt UF-1 til UF-12, jf. figur 5.1.



Figur 5.1 Placering af referencedræn hhv. frakturerede dræn, incl. sonderings- og monitoringsboringer langs disse.

I den nordlige ende af referencedrænet, nærmere bestemt ved UF-1, blev der påvist et vandmættet sandlag i kote 9,7-11,8. Sandlaget vurderes at strække sig ca. 5 meter i sydlig retning, mens orienteringen af dette lag ikke er nærmere afgrænset i øvrige retninger.

På baggrund af den gennemførte sondering er der i figur 5.2 optegnet et geologisk profilsnit.

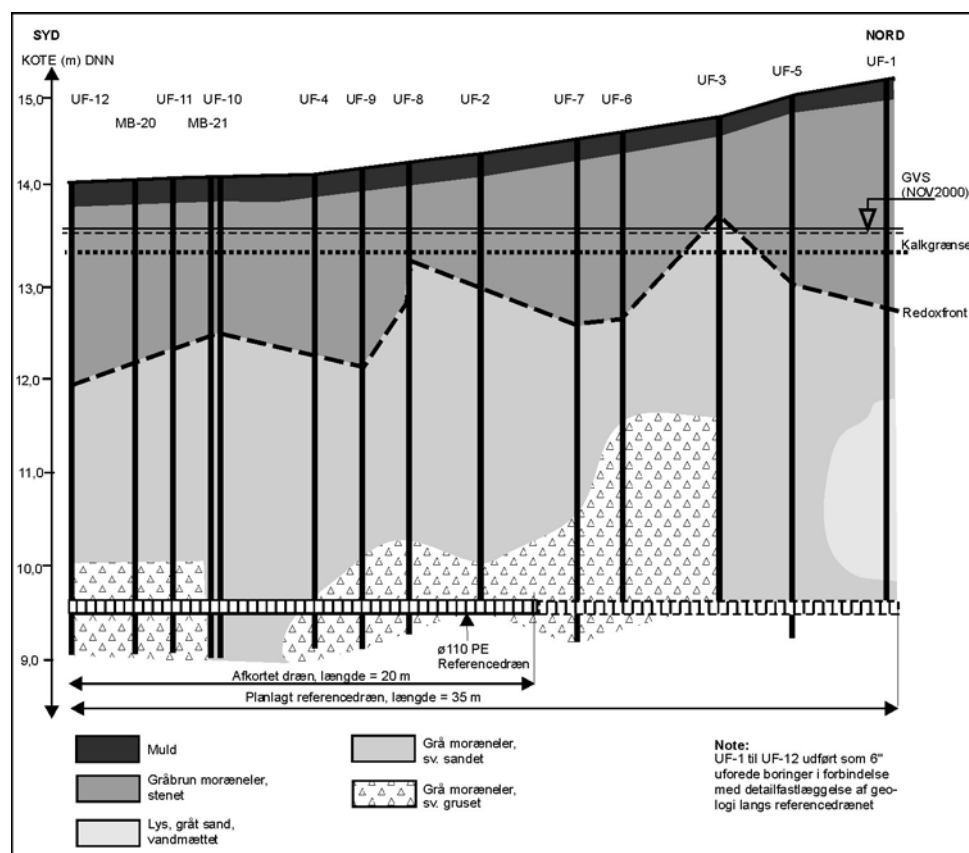


Fig. 5.2 Geologisk profilsnit ved referencedrænet

For at opnå en bedre overensstemmelse mellem geologien ved de 2 frakturerede dræn og referencedrænet, blev det efterfølgende valgt at afkorte referencedrænet med 15 meter i den nordlige ende. Det afkortede dræn blev dermed i alt 20 meter langt.

For at hindre utilsigtet vandtilstrømning fra den 15 m drænstreng, som blev efterladt afsnøret nord for det afkortede punkt, blev der langs ydersiden af det "døde" drænafsnit afproppet ved injektion af brøndsikum. Herved blev der tætnet mellem drænafsnittets yderside og det forborede pilothul. Samtidig blev det afsnørede dræn afproppet med en plastprop.

Den nordlige ende af det afkortede referencedræn blev via en påsvejst 90 graders bøjning og en blindrørssektion ført til terræn og en $\varnothing 25$ mm, PN10, PN80 sugeslange efterfølgende monteret for anvendelse ved afvikling af Dual-phase tests.

5.2 Resultater fra Dual-phase tests

Dual-phase testen for det oprindelige dræn (35 m) blev udført fra den 9.-11. maj 2000, mens testen på det afkortede dræn (20 m) blev udført fra den 13.-21. november 2000. Ved de to test blev følgende nøgleparametre registreret, jf. tabel 5.1.

Dræn	Hydraulisk kapacitet		Luftflow		Vakuum [bar]
	[m ³ /døgn]	[m ³ /lbm filter/døgn]	[m ³ /døgn]	[m ³ /lbm filter/døgn]	
Referencedræn (35 meter)	4,82	0,138	<145	<4	0,65-0,80
Referencedræn (20 meter)	1,84	0,092	<145	<4	0,80-0,86

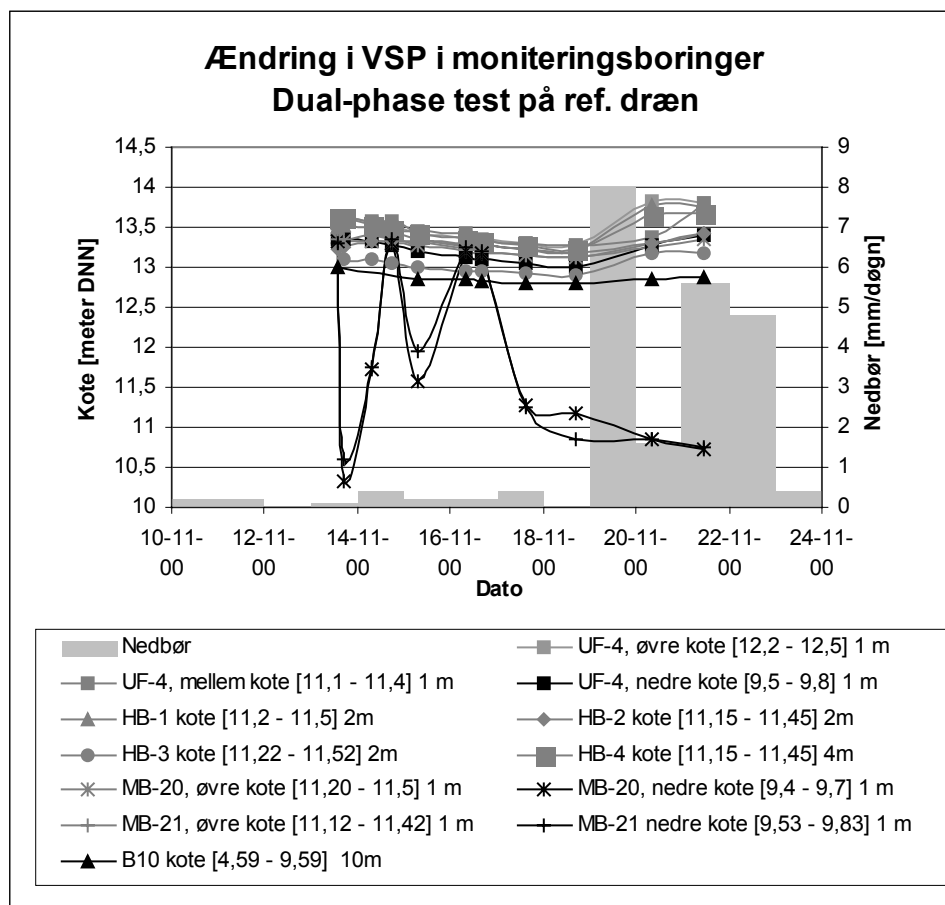
Tabel 5.1 Nøgleparametre for Dual-phase test på referencedræn

I det følgende er der kun tolket på data indhentet i forbindelse med den gennemførte Dual-phase på det afkortede referencedræn.

Gennem testperioden på 7 dage blev der foretaget 10 pejlerunder, svarende til 1-2 gange i døgn. I en enkelt boring (HB-3) er vandspejlet i testperioden registreret med datalogger. Retableringen efter forsøget kan ikke vurderes, grundet et mangelfuldt datagrundlag.

Variationen i koten til vandspejlet i monitoringsboringerne er vist på figur 5.3.

Endvidere er DMI's registreringer af daglig nedbør op til og i selve forsøgsperioden afbildet.



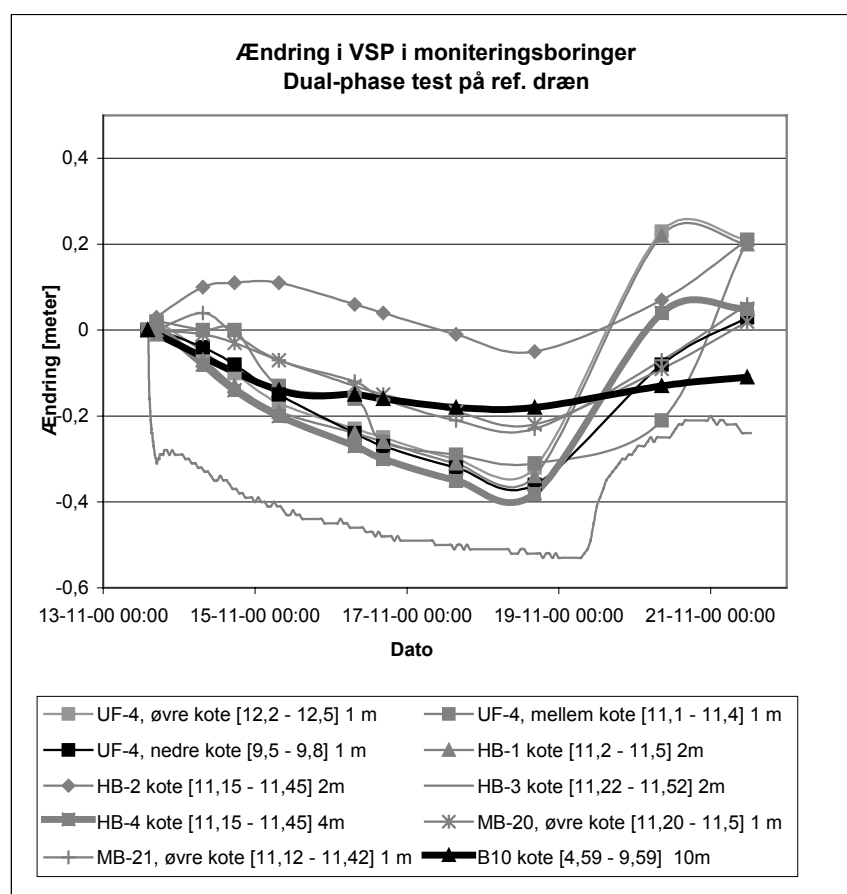
Figur 5.3 Vandspejlsvariation i monitoringsboringer og nedbør under Dual-phase test på afkortet referencedræn

Det generelle trykniveau i området vurderes at være svagt aftagende med ca. 0,2-0,4 m i de første 5 døgn, idet der umiddelbart før start (2 døgn) af forsøget er registreret i alt 6 mm nedbør, der generelt har hævet trykniveauet inden forsøgsstart. Hen imod afslutningen af forsøget (dag 5-7) stiger trykniveauet generelt 0,3-0,5 m som følge af den registrerede nedbør på i alt

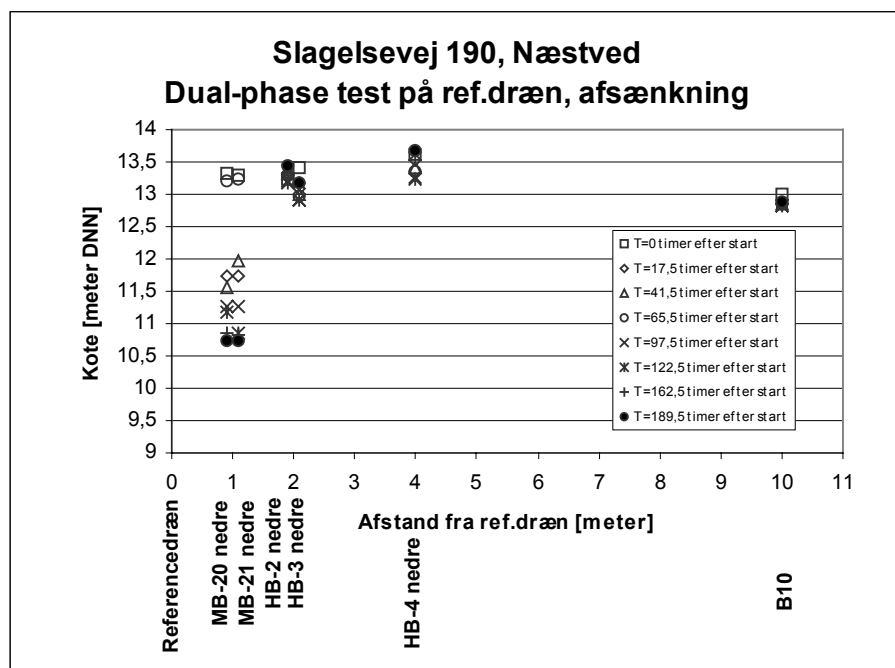
9,6 mm. Denne naturlige variation betyder, at egentlige sænkninger som følge af forsøget skal være relativt store eller systematiske for at kunne erkendes.

Der kan dog tydeligt erkendes to filtre (MB-20 nedre og MB-21 nedre), som udviser en hurtig og markant afsænkning på op til ca. 2,5 m, men også en kraftig variation over perioden, jf. figur 5.3. Sænkingsforløbet ligner meget det observerede for filtre i direkte kontakt med kunstige sprækker (type A). Det observerede forløb kan ikke umiddelbart forklares, men kan skyldes kontakt til naturlige sprækker. En anden mulig forklaring er, at der ved selve opboringen af den vandrette boring er skåret en sprække, således at der er direkte kontakt mellem borehullet og området omkring monitoringsboringen. Både MB-20 og MB-21 er placeret 1 m fra drænet, og udviser efter ca. 3 døgn en relativ stabil afsænkning på ca. 2,5-3 m. I filter UF-4 nedre, placeret i samme afstand og dybde fra drænet, ses ikke en tilsvarende kraftig sænkning. Da der ikke er fundet væsentlige forskelle i geologien ved etableringen af disse filtre, kan forskellen ikke umiddelbart forklares.

For at kunne sammenligne med de øvrige test og for at kunne identificere evt. små sænkninger er vandspejlsændringen i forsøgsperioden vist på figur 5.4. Filtrene HB-4 og B10, beliggende hhv. 4 og 10 m fra drænet, vurderes at repræsentere den naturgivne variation. Sammenholdes udviklingen i disse med de øvrige filtre, kan der ikke erkendes nogen væsentlige forskelle, som kan tilskrives en egentlig sænkningpåvirkning fra forsøget. En eventuel sænkningpåvirkning i de viste filtre vurderes derfor at være mindre end 1-10 cm og vil være forårsaget af en langsom trykudbredelse igennem matrixen (type B).

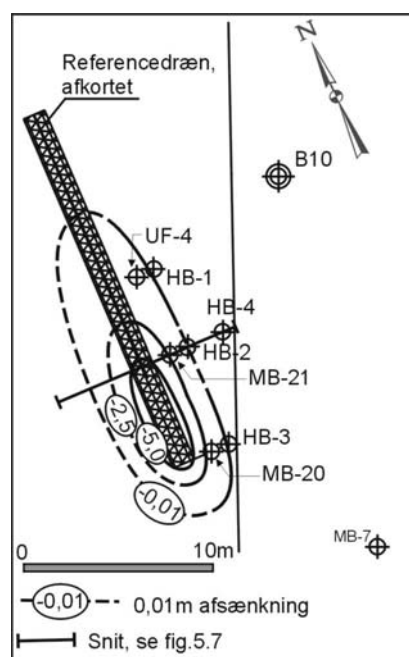


Figur 5.4 Ændring af trykniveau i monitoringsboringer ift. udgangsniveau. Dual-phase test på afkortet



Det tidlige forløb af afsænkningen i de enkelte filtre fremgår af figur 5.5
 Figur 5.5 Afsænkning i monitoringsboringer som funktion af tid og afstand til referencedræn

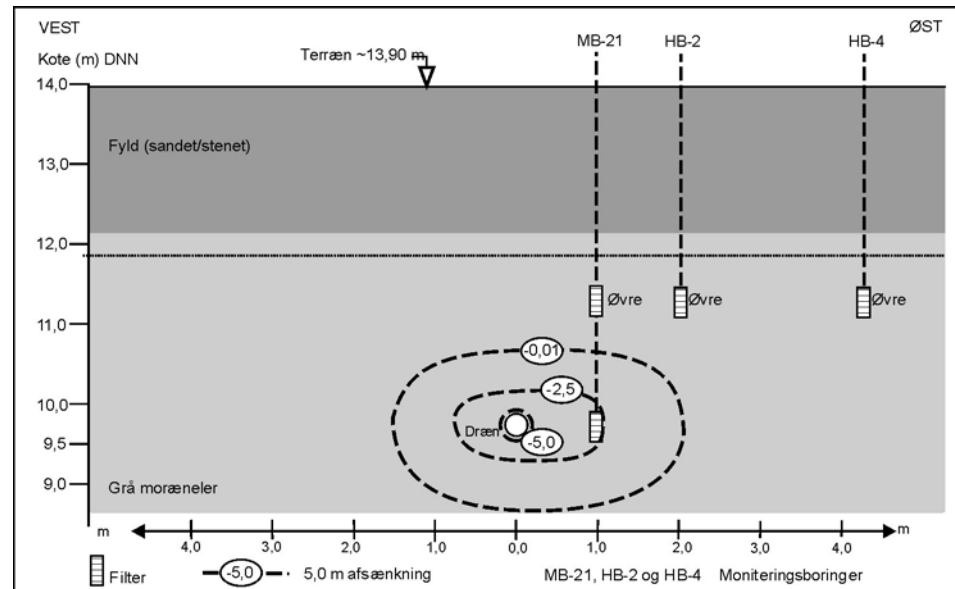
For de filtre, der ligger i niveau med drænet og som vurderes at have en sænkning (sænkningen sat til 1 cm), svarende til at de ligger et stykke inde i matrixen (jf. type type B), er den skønnede udbredelse af sænkningernes i det horisontale plan omkring drænet vist på figur 5.6. Det er valgt også at afbilde en sænkning i de to boringer, som muligvis har direkte kontakt til drænet (type A) for at få en fornemmelse af den betydelige variation, der tilsyneladende findes langs med drænet.



Figur 5.6 Afsænkning i matrixen i samme dybde som referencedrænet.

I selve referencedrænet er trykniveauet afsænket svarende til ca. 8 m VS, jf. tabel 5.1. I de omkringliggende filtre vurderes det, at der i matrixen højst opnås en afsenkning på 1-5 cm inden for en afstand af ca. 1-2 m fra drænet, stærkt afhængig af en evt. lokal kontakt til drænet.

I det vertikale plan kan de skønnede hydrauliske forhold omkring drænet illustreres ved et snit som vist på figur 5.7, mens placeringen af snittet fremgår af figur 5.5.



Figur 5.7 Afsenkning af vandspejlet i et snit vinkel ret på referencedrænet (afkortet)

Lokalt omkring drænet kan der ske en kraftig afsenkning (type A) i op til en afstand på 1 meter pga. direkte kontakt til referencedrænet. I større afstand (1-2 m) opnås højst en sænkingspåvirkning (type B) på ca. 1-5 cm efter ca. 7 døgns pumpning. De etablerede filtre (HB-2 og HB-4) er dog ikke placeret i samme dybde som drænet, hvilket vanskeliggør vurderingen af sækningsudbredelsen i dette niveau.

6 Vurdering af effekten af hydraulisk frakturering

Vurderingen af effekten opnået ved at udføre hydraulisk frakturering langs 2 vandrette dræn kan baseres dels på de gennemførte Dual-phase tests på hhv. referencedrænet (afkortet) og de 2 frakturerede dræn, dels på de gennemførte modelberegninger.

6.1 Hydraulisk ydelse og påvirkningsområde

Ved de tre Dual-phase tests blev følgende nøgleparametre registreret, jf. tabel 6.1.

Dræn	Hydraulisk kapacitet	Luftflow	Vakuüm i boring	Testlængde
	[l/lbm filter/døgn]	[m ³ /lbm filter/døgn]	[mVS]	(timer)
Referencedrænet (afkortet)	92	<145	8-8,8	170
Dræn A-A	79	380-500	5,2-6	48
Dræn B-B	36	570-700	5,5-6	48

Tabel 6.1 Sammenfatning af ydelser samt vakuüm ved gennemførte Dual-phase tests.

Den hydrauliske kapacitet af referencedrænet er ca. 1,2 – 2,5 gange større end for de to frakturerede dræn, mens luftflowet er mindst 4-5 gange mindre. Den anførte forskel i luftflowet, og dermed også i det påtrykte vakuüm, skyldes forskellige indstillinger af den luftskrue, der var monteret på selve test-setup'et for Dual-phase test afviklingen. Det er derfor vigtigt at bemærke, at det registrerede luftflow helt overvejende er et udtryk for falsk luft tilledt via luftskruen, og således ikke er luft, der er transporteret igennem morænen og hen til de vandrette dræn som det er tilfældet ved et klassisk vakuümventilationsdræn.

Effekten af de anførte forskellige driftsbetingelse for Dual phase tests afviklingen medfører, at den totale hydrauliske afsenkning i referencedrænet (8 mVS) er ca. 25-30% højere end i de 2 frakturerede dræn (5-6 mVS). Ud fra en simpel hydraulisk betragtning ville denne forskel i afsenkning medføre en tilsvarende større ydelse. Korrigeres ydelsen på referencedrænet herfor, vil ydelsen mere være på niveau med, hvad der registreres i dræn A-A.

Sammenfattende vurderes det dog, at fraktureringen langs dræn A-A og B-B ikke har medført nogen forøgelse af den hydrauliske kapacitet.

Det andet væsentlige aspekt er ændringerne i det hydrauliske trykniveau omkring de to typer dræn. Ved referencedrænet vurderes der at være en meget begrænset sænkning på mindre end 1 cm til 10 cm, i en horisontal afstand af ca. 1-2 m fra drænet. Disse sænkninger vurderes forventelige i en lavpermeabel moræneler. For de frakturerede dræn er der generelt observeret sænkninger af samme størrelse, men her i en horisontal afstand af op til 3-4 m regnet fra drænet – svarende til den afstand inden for hvilken der er

inducerede sprækker ud for disse dræn. De kortlagte enkelte sprækkers påvirkning af trykniveauet er således sandsynliggjort, men kan ikke endeligt dokumenteres, da der ikke er filtre i større afstand fra og i samme dybde som referencedrænet.

Der er observeret en afsænkning af trykniveauet på 1-2 m i de filtre, der direkte skærer de skabte sprækker. Herved er der etableret en opadrettet gradient i forhold til trykniveauet i det primære magasin, jf. figur 4.20.

Sammenfattende vurderes det endvidere ud fra de kortvarige Dual-phase tests, at påvirkningsområdet i horisontal retning for de to typer dræn er ca. 2 m hhv. ca. 6-8 m, svarende til hhv. ca. 1 m og 3-4 m, på hver side af de installerede vandrette dræn.

Afkortningen af referencedrænet har overordnet set haft en positiv effekt, selv om der forsat vurderes at være en forskel i de hydrauliske forhold langs det afkortede referencedræn og de frakturerede dræn – en forskel som ikke umiddelbart kan henføres til de beskrevne geologiske forhold.

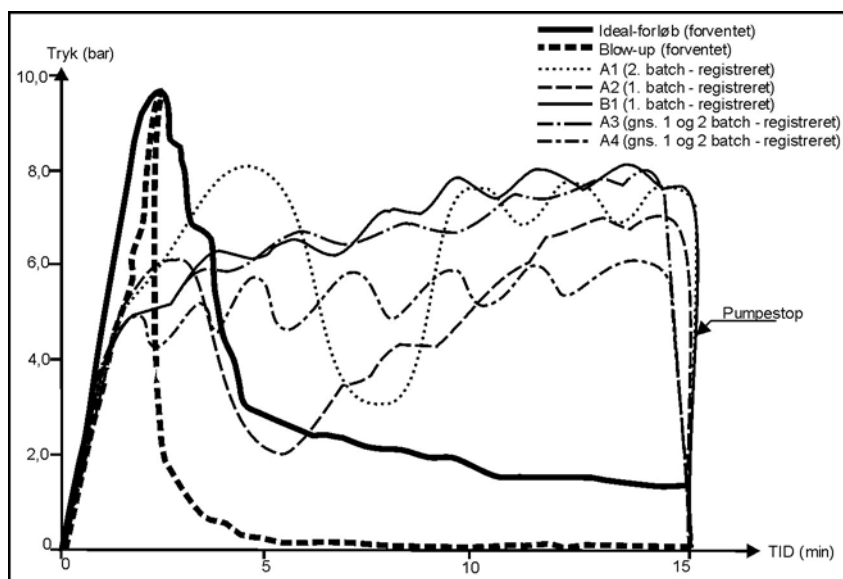
6.2 Erfaringer med det gennemførte Teknologiuudviklingsprojekt

I dette afsnit er der gennemført en sammenfatning af de væsentligste erfaringer indhentet i forbindelse med gennemførelse af anlægsfasen samt de hydrauliske test. Afslutningsvist drøftes de anlægsøkonomiske forhold, og i den forbindelse om hydraulisk fraktureringsteknik fra vandrette borer skønnes af være cost-effektiv under danske forhold.

6.2.1 Anlægsfasen

Erfaringerne fra den gennemførte hydrauliske frakturering viser:

- Pr. etableret sprække er der indpumpet 300-600 l fraktureringssuspension, svarer til at 120 - 240 l propan (kvarssand) er injiceret til 8 ud af 10 planlagte sprækker. De sidste 2 planlagte sprækker blev aldrig udført, grundet tilklogning af indpumpningssystemet henholdsvis ekstreme vejrforhold. Dette vurderes dog ikke at være kritisk, da begge planlagte sprækker lå i udkanten af "hot-spot" området.
- I forbindelse med frakturering ved injektionstryk på 4-8 Bar, blev der registreret i alt 6 "Blow-ups", dvs. optrængning af fraktureringssuspension med hhv. uden propan, til terræn. I den aktuelle sag vurderes denne optrængning til terræn, alt overvejende at være sket via naturlige sprækker, langs rødder eller andre højpermeable zoner i formationen. På fremtidige fraktureringprojekter må forekomst af "Blow-ups" også påregnes at forekomme. Erfaringsmæssigt (kilde: Dana Brock) vil antallet typisk stige jo tættere mod terræn fraktureringen gennemføres, da inhomogeniteter i jordmatricen typisk vokser med aftagende fraktureringsdybde. Frakturering gennemført ved et for højt injektionstryk vil også medføre en forøget risiko for forekomst af "Blow-ups".
- I forbindelse med indpumpning af fraktureringssuspension til 5 af de i alt 8 etablerede sprækker blev den tidlige udvikling i injektionstrykket registreret. Resultatet er sammenfattet herunder:



Figur 6.1 Forventede og faktisk registrerede injektionstryk som funktion af fraktureringstiden.

Som det fremgår af figur 6.1, er der påvist markant forskel mellem de forventede og faktisk registrerede forløb. Årsagen hertil er dels, at anvendte pumpetype (trykluftdrevet spiralpumpe) ikke var velegnet til at pumpe den højviskose suspension, dels at der opstod nogen tilklogning af den 90 m lange fødeslange. Disse forhold medførte, at der i hele injektionsperioden (20-30 min.) reelt skulle injiceres ved 6-8 bar for at overvinde formationsmodstanden samt modstanden i selve indpumpningssystemet.

På fremtidige projekter anbefales det at anvende en hydraulisk drevet pumpe (olietryk) af typen monopumpe, som også var planlagt i aktuelle projektsammenhæng. Ligeledes bør længden af den anvendte fødeslange være så kort som mulig, for herved at minimere risiko for tilklogning mest muligt. I aktuelle projektsammenhæng var det af fysiske årsager dog ikke muligt at arbejde med kortere fødeslanger, jf. bilag A.

- På baggrund af udtagne kerneprov (intakte prøver af 1 m længde) til ca. 5 m.u.t. er der ved visuel bedømmelse påvist sprækker med en tykkelse (apertur) på op til 20 mm og med en sprækkeradius på min. 3- 4 m. Den gennemsnitlige apertur for de inducerede sprækker er vurderet til 2-4 mm, svarende til at der vurderes induceret sprækker med et fladeareal på 30-120 m².
- Orienteringen af de inducerede sprækker vurderes overvejende at være subhorizontal og med en tendens til at søge mod terræn i en vinkel på 10-50 grader, regnet fra vandret. Dog er det også påvist, at sprækkeudbredelsen kan orienteres nedad, regnet i forhold til injektionsdybden. Dette betyder, at det niveau, hvorfra der efterfølgende drænes, kan variere med op til 2-3 m i vertikal retning.

- Der har ikke kunnet konstateres målbare netto-hævninger hhv. netto-forskydninger af terræn samt konstruktioner ved den gennemførte frakturering i 4,5-5,0 m.u.t. Ved frakturering udført tættere mod terræn vil risiko for netto-hævninger/forskydninger dog erfaringsmæssigt vokse betydeligt.

Supplerende kan det bemærkes, at det kræver et stort forarbejde samt meget lange arbejdsdage at gennemføre hydraulisk frakturering ved vandret boreteknik. På efterfølgende fraktureringsprojekter, med samme kompleksitet og omfang, som det her gennemførte, vurderes der derfor fortsat at være behov for at tilknytte ekspertbistand fra eksempelvis USA, for at optimere muligheden for succesfuld gennemførelse.

Ligeledes bør det tilstræbes at gennemføre denne type projekter i perioder, hvor temperaturen ikke kommer under ca. 10°C, og hvor lufttemperaturens døgnvariation ikke bliver for store. Er disse forhold ikke opfyldt, bliver dosering af optimal breaker-enzym mængde meget vanskelig, med heraf forøget risiko for tilklogning af injektionssystemet.

6.2.2 Opnåede hydrauliske effekt

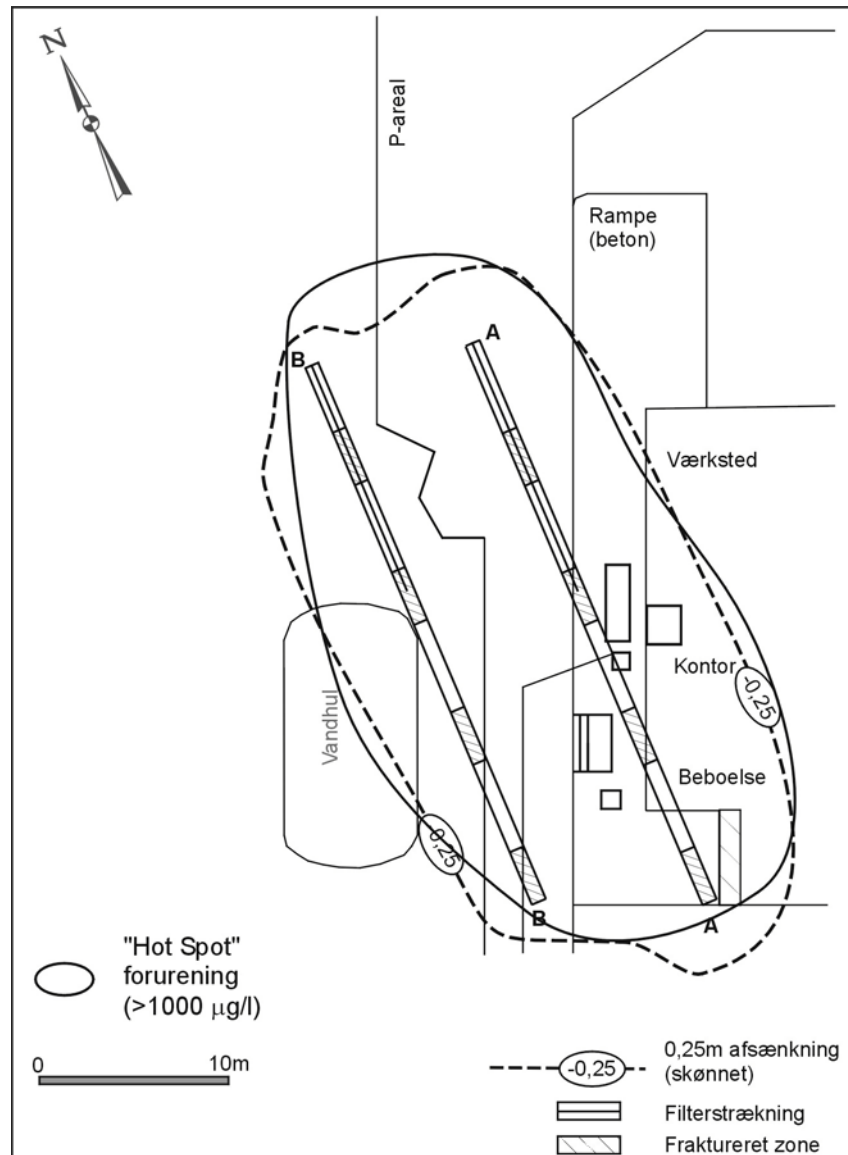
Baseret på udførte Dual-phase tests samt modellering er det søgt sandsynliggjort, om der opnås et 3-4 gange større påvirkningsområde ved de hydraulisk frakturerede dræn i forhold til påvirkningsområdet ved traditionelt etablerede dræn i moræneler. Det begrænsede antal af monitoringsfiltre og de forventede minimale sænkninger i større afstand fra referencedrænet (2-10 m fra og i samme dybde som drænet), vanskeliggør dog en entydig verifikation af effekten.

Der er også en række forhold, der vanskeliggør en direkte verifikation af modelberegningerne. Dog kan det konkluderes, at den forventede merydelse ved frakturering som modelleringen indikerede – ikke kan registreres i felten.

For at afværge inden for et givent forureningsområde kan det således ikke med sikkerhed ud fra de foreliggende resultater afgøres, om der skal etableres væsentligt færre hydraulisk frakturerede dræn end almindelige dræn for at opnå den ønskede hydrauliske effekt. I det konkrete projekt skønnedes 2 frakturerede dræn at ville have samme hydrauliske effekt som 3-5 almindelige vandrette dræn, og dette har ikke kunnet eftervises.

På grund af den korte varighed af de gennemførte Dual-phase tests (2-7 dage) vurderes de hidtil observerede sænkninger og ydelser sandsynligvis ikke at være fuldt repræsentative for den effekt, som reelt vil kunne opnås over en længere periode. Som bedste bud på, hvordan afsænkningen udbredes omkring drænene ved forsøgene i forhold til "hot-spot" området, er 0,25 m kurverne sammenfattet på figur 6.2. "Hot-spot" området er stort set omfattet af afsænkningen.

Den endelige effekt vil dog først kunne verificeres på baggrund af fremtidige registreringer af ydelser og trykniveauer i morænen i forbindelse med kontinuerlig drift af de hydraulisk frakturerede dræn.



Figur 6.2 Forureningsudbredelsen ("hot-spot") og skønnet udbredelse af området med 0,25 m afsækning i matrixen i selve drændyden.

6.2.3 Anlægsøkonomi

Anlægsudgiften forbundet med komplet installation af 2 vandrette $\varnothing 110$ mm dræn af 35 lbm i fraktureret henholdsvis et vandret dræn (referencedrænet) med samme opbygning i ufraktureret moræneler har beløbet sig til hhv. ca. kr. 7.100 og ca. kr. 3.400 pr. lbm dræn. (prisniveau år 2000, excl. moms). Således kan det udledes, at det har været mere end dobbelt så dyrt at installere dræn i fraktureret fremfor i ufraktureret moræneler. I de præsenterede lbm-priser er indregnet alle udgifter til entreprenør, amerikansk konsulent samt udgifter forbundet med indledende geologiske og geotekniske undersøgelser (sigtekornsanalyse, OCR-værdi bestemmelse m.v.). Derimod er udgifterne forbundet med den gennemførte sprækkeidentifikation, hydrauliske test, supplerende geologiske undersøgelser (sonderinger, incl. Georadarsondering), etablering af nye monitoringsboringer samt udgifter til rådgiverydelser ikke indeholdt.

Sammenholdes de ovenfor anførte enhedspriser med vurderingen om, at der med 2 dræn etableret i fraktureret moræneler, vil kunne opnås samme

hydrauliske effekt, som ved etablering af 3-5 dræn i ufraktureret moræneler, kan det i den aktuelle sag konkluderes at anlægsudgiften forbundet med gennemførelse af hver af disse drænløsninger vil beløbe sig til hhv. kr. 497.000, (2 dræn af 35 lbm) mod kr. 238.- 595.000 (3-5 dræn af 35 lbm). Priserne er anført excl. moms og prisniveauet for de 2 drænløsninger vurderes på det foreliggende grundlag sammenlignelige.

Dog vurderes den anførte lbm-pris for komplet etablering af et fraktureret dræn ikke at være repræsentativ under aktuelle danske forhold, men snarere at være et udtryk for entreprenørens faktiske kostpris forbundet med arbejdets gennemførelse.

Set i lyset af ovenstående samt ud fra det faktum, at hydraulisk frakturering ved vandret boretækning stadig er på forsøgsstadiet i Danmark og hermed kræver store udgifter til såvel rådgivnings- som entreprenørydelser, vurderes en realistisk lbm-pris på kr. 10.000-15.000 at skulle påregnes i forbindelse med udarbejdelse af budgetoverslag for kommende projekter af denne type.

I takt med at fraktureringsteknikken afprøves på andre danske lokaliteter, vurderes disse projekter at kunne udføres på normal kommerciel basis, hvorved den faktiske forskel i lbm-pris for etablering af dræn i ufraktureret hhv. fraktureret moræneler vil mindskes betydeligt.

Enhedsprisen vil naturligvis også være afhængig af den aktuelle opgaves omfang, herunder væsentligst hvor mange sprækker, der ønskes etableret langs hvert dræn, i hvilken dybde der ønskes fraktureret og ikke mindst hvor mange frakturerede dræn, der skal etableres.

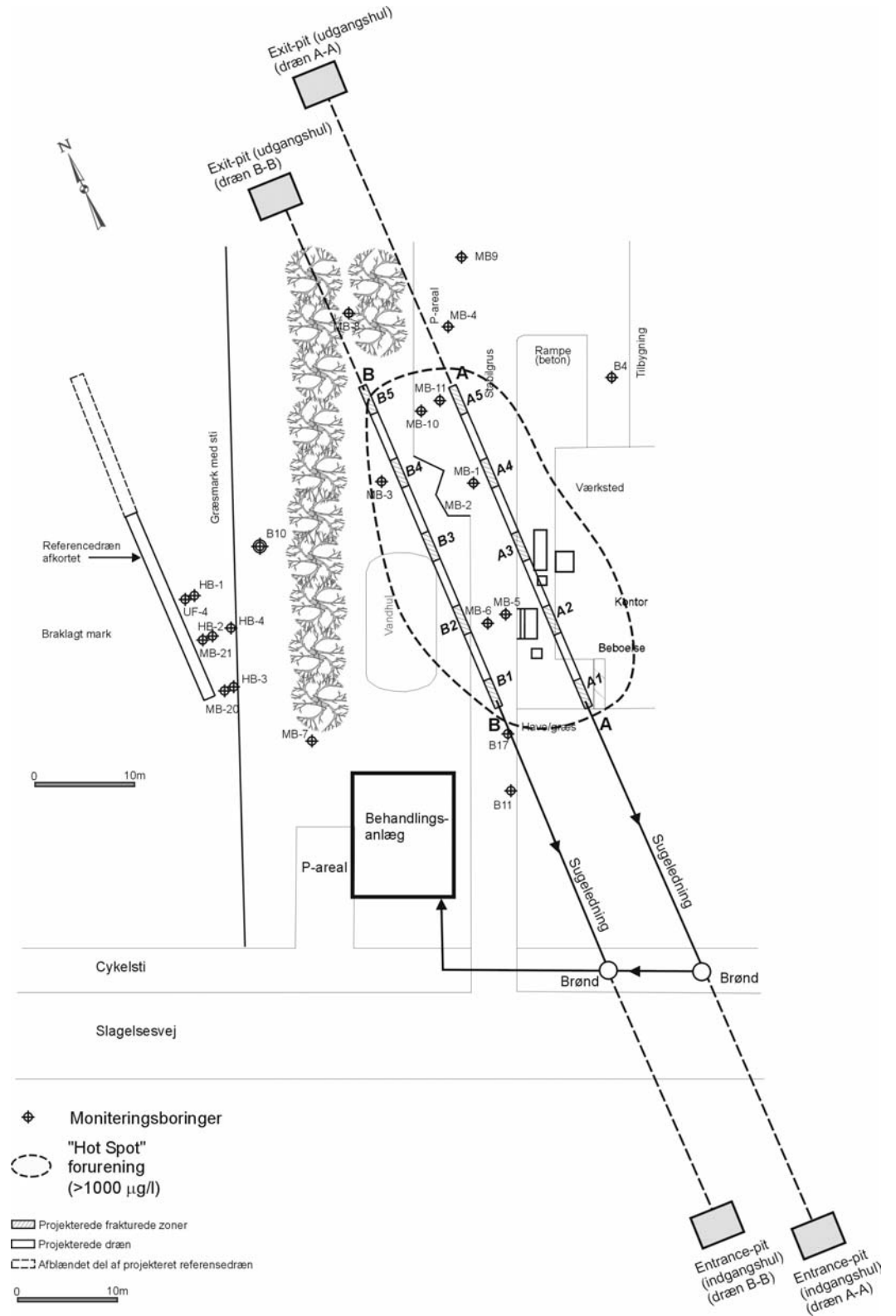
Sammenholdes den forventede enhedspris med den forventede øgede hydrauliske effekt af frakturerede dræn i forhold til almindelige dræn, kan fraktureringsteknikken muligvis blive en økonomisk attraktiv metode i forbindelse med gennemførelse af fremtidige afværgedræn.

7 Referencer

- /Ref.1/ : Alternative Methods For Fluid Delivery and Recovery. Manual. EPA/625/R-94/003. U.S.EPA. 1994.
- /Ref.2/ : Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction. EPA-542-R-97-007. U.S.EPA. 1997.
- /Ref.3/ : Hydraulic and Pneumatic Fracturing. In Situ Remediation Technology Status Report. EPA-542-K-94-005. U.S.EPA. 1994.
- /Ref.4/ : Hydraulic Fracturing to Enhance the Remediation of DNAPL in Low Permeability Soils. Murdoch, L.C. University of Cincinnati, Ohio, and Slack, B. FRX Inc. Cincinnati, Ohio. 1995.
- /Ref.5/ : Storstrøms Amt. Registreringsundersøgelse. Historik og forslag til undersøgelsesprogram. Depot nr. 373-92 galvaniseringsanstalten GESA, Slagelsevej 190, Næstved. 1996.
- /Ref.6/ : Storstrøms Amt. Afgrænsende forureningsundersøgelse på Slagelsevej 190, Næstved. Kampsax Geodan, december 1997.
- /Ref.7/ : Storstrøms Amt. Depot nr. 373-92 Slagelsevej 190, Næstved. Supplerende undersøgelser og skitsering af mulige afværgeforanstaltninger. NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S. December 1998.
- /Ref.8/ : Teknologiuudviklingsprojekt Fra Miljøstyrelsen. Frakturering. Inducerede sprækker ved hydraulisk og pneumatisk frakturering. Miljøprojekt nr. 541 2000.
- /Ref.9/ : Storstrøms Amt. E-mail dateret 11. januar 2001 fra Tonci Balic-Zunic, Geoteknisk Institut att. Lisbeth Walsted, NIRAS Rådgivende ingeniører og planlæggere A/S.
- /Ref.10/ : Faxe Kalk, 2000a. Undersøgelse af moræneler, Slagelsevej 190. Rapport stilet til NIRAS, Allerød (dateret 10. januar 2000).
- /Ref.11/ : Faxe Kalk, 2000b. Georadarmålinger på Slagelsevej 190, Næstved. Rapport stilet til Storstrøms amt (dateret 24. februar 2000).
- /Ref. 12/ : Møller, I., 2001. Geofysik i umættet zone: En vurdering af metoder og instrumentsystemers egnethed til kortlægning af den umættede zone. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer. Rapport 1. Udarbejdet i samarbejde mellem GEUS og DJF.
- /Ref. 13/ : Lindhardt, B., Abildtrup, C., Olsen, P., Torp, S., Vosgerau, H., Iversen, B. V., Gravesen, P., Jørgensen, O., Plauborg, F. & Rasmussen, P., 2001. The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme. Sites Characterization and Monitoring Design. Geological Survey of Denmark and Greenland, Ministry of Environment and Energy.

1. Situationsplan

Bilag A



1 Geoteknisk rapport

Definitioner m.v. på fastlagte geotekniske parametre :

Kornstørrelsesfordelingen

Analysen udføres i laboratorium ved sigtning og slemning af de enkelte kornpartikler i en given jordprøve. Analysen angiver den procentvise fordeling af de enkelte korn som funktion af korndiameteren. Analysen danner grundlag for bestemmelse af den enkelte type jordart, dvs. hvorvidt der er tale om sand eller ler eller en overgangsjord, og hvilke kornfraktioner den består af.

Naturlige vandindhold (w)

Den enkelte jordarts naturlige vandindhold bestemmes i laboratorium og som procent naturlig bundet vand i forhold til procent tørstof (vægtprocent). Det naturlige vandindhold er en yderligere medvirkende indikator for vurdering af den enkelte jordarts egenskaber og her for vurdering af de plastiske forhold (plasticitetsgrænsen).

Plasticitetsindeks(PI)

Plasticitetsindekset er differensen i vandindholdet mellem flydegrænsen og plasticitetsgrænsen og bestemmes i laboratorium. F.eks. overgår en ler under vandudpresning fra en flydende til en plastisk konsistens (flydegrænsen). Ved yderligere udpresning overgår leren fra plastisk til halvfast konsistens (plasticitetsgrænsen). For begge grænser bestemmes det aktuelle vandindhold. Tallet er således et udtryk for, hvor følsom en jordart er over for vand, dvs. jo større PI er, des mere følsom er jordarten overfor vand. Plasticitetsgrænsen indgår her i vurderingen af bestemmelsen af grænsen mellem sand- og lertilfældet og til vurdering af potentiel risici (deformation af formationen) ved tilsætning af gel under fraktureringen (evt. udblødning af ler).

In-Situ rumvægt (γ)

Ved en jordarts rumvægt forstås vægten per rumenhed. Denne bestemmes i laboratorium og normalt ved udtagning af intakte prøver. Rumvægten benyttes her til bestemmelse af det oprindelige spændingsniveau.

Forkonsolideringsspændingen (σ'_{pc})

En jordart kan i en tidligere periode (f.eks. istiden) have været udsat for en væsentlig større last end den i dag er udsat for i den aktuelle lagserie. Denne spændingstilstand kaldes forkonsolideringsspændingen og bestemmes ved laboratorieforsøg. Værdien benyttes her til vurdering af overkonsolideringsgraden.

Oprindeligt spændingsniveau (σ'_{v0})

Jævnfør ovenstående svarer det oprindelige spændingsniveau til den belastning jorden er udsat for nu. (f.eks. vægten af overliggende jord).

Værdien benyttes i nærværende til vurdering af overkonsolideringsgraden og bestemmes på baggrund af de enkelte formationers rumvægte.

Overkonsolideringsgraden (OCR-værdien)

Defineres som forholdet mellem forkonsolideringsspændingen og det oprindelige spændingsniveau. Udtrykket giver en indikation af sprækkes orientering i formationen. Når OCR-værdien er større end 1 er den enkelte formation mere eller mindre overkonsolideret. Jo højere OCR-værdi, desto større sandsynlighed er der for, at de enkelte formationer har vandret orienterede sprækker. Der henvises i øvrigt til /ref. 8/ for uddybende beskrivelse af OCR-værdien.

Geoteknisk Institut

NIRAS Resultater af laboratorieforsøg.

Rapport 1, 2000-05-25

I henhold til Deres brev af 2000-04-13 er der udført klassifikations- og konsolideringsforsøg på de medsendte prøver fra Slagelsevej 190, Næstved. Resultaterne fra de enkelte forsøg er angivet på bilag 1-8.

Bilag:	1-2	Klassifikationsforsøg
	3-8	Konsolideringsforsøg

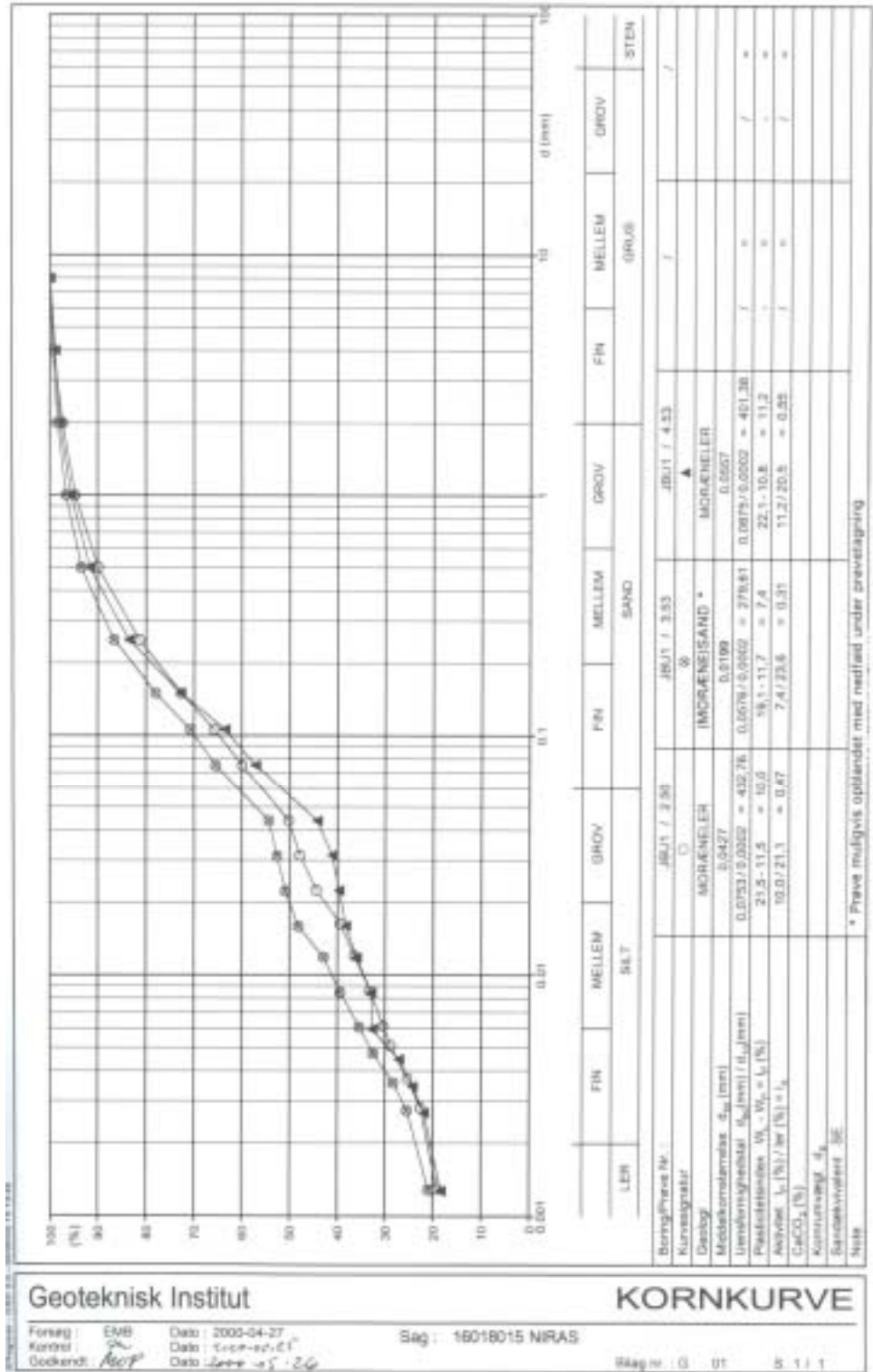


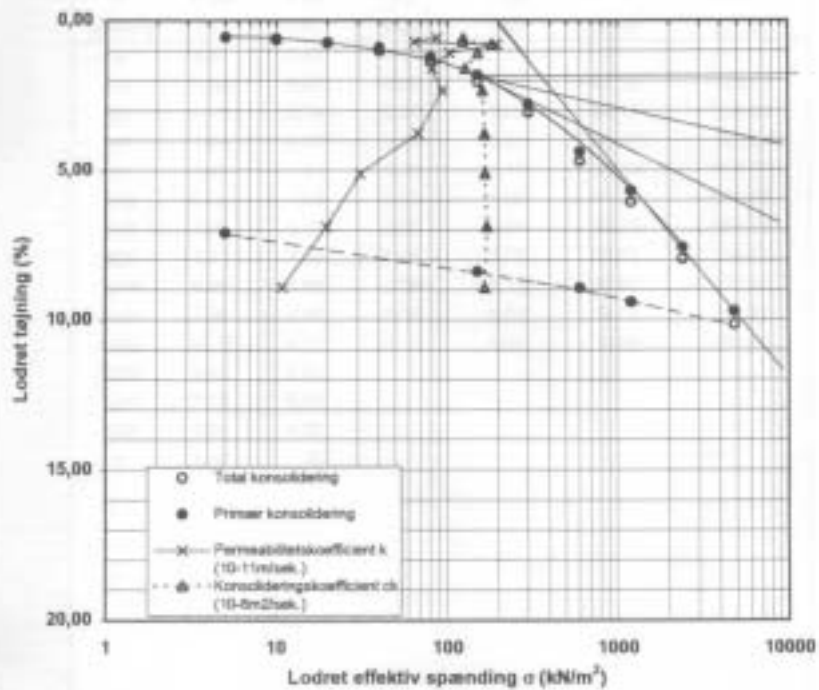
Udarbejdet for
NIRAS
Sortemosevej 2
3450 Allerød

Att.: Lisbeth Walsted

Udarbejdet af
John L. Christensen, tlf.: 4588 4444
e-mail: jlc@geoteknisk.dk
Mogens Porsvig, tlf.: 4588 4444
e-mail: mop@geoteknisk.dk

Maglebjergvej 1 • Postboks 119 • 2800 Kgs. Lyngby
Tlf.: 4588 4444 • Fax: 4588 1240 • e-mail: dgi@geoteknisk.dk





Beskrivelse af jordprøve:

Geologi: Morseler, ret fedt, sandet, sv. Gruset

Trykareal	10 cm ²	σ_v	kN/m ²
Prøvehøjde	20 mm	σ'_0	kN/m ²
e (før forsøg)	0,379	σ'_{pc}	400 kN/m ²
ρ (før forsøg)	2,22 g/cm ³ (1,7)	Q	7,1 (%/s/c)
w (før forsøg)	14,2 %	S_u	100,5 %
Temperatur	23 °C	ρ_s (stiknet)	2,68 g/cm ³

Dybde:	2,5 m	Bor. Nr.	jbu 1
Kote:	11,53 m	Lab. Nr.	

Forsøgsmetode: Trinvis belastning

Procedure: I henhold til afsn. 3, BS 1377:1990, del 5.

Tidskurveberegning: Afsnit 3.6.3.2

Geoteknisk Institut

Job: 160 18015 Niras

Udført : EMB Dato : 2000-05-24 Emne: Konsolidering JBU 1 011

Kontrol : JFC Dato : 2000-05-24

Godkendt : JFC Dato : 2000-05-26 Rapport: 1 Bilag nr. 3 Side: 1/2

GI-BILAG

Forsøgsparametre

σ (kN/m ²)	e_{skt} (%)	e_{100} (%)	e_s (% _{skt})	e_{90} (%)	$k \times 10^{-11}$ (m/s)	$ck \times 10^{-8}$ (m ² /s)
5	0,57	0,57	0,00			
10	0,65	0,62	0,00	0,60	87,38	123,31
20	0,76	0,74	0,00	0,72	64,17	123,03
40	1,04	0,92	0,03	0,81	195,93	181,84
80	1,40	1,24	0,01	1,10	103,02	150,37
150	2,06	1,83	0,03	1,60	81,20	126,55
300	3,08	2,79	0,06	2,35	93,72	161,17
600	4,71	4,39	0,00	3,78	67,78	166,22
1200	6,06	5,68	0,08	5,13	30,89	166,66
2400	7,95	7,58	0,15	6,89	19,72	171,27
4800	10,16	9,71	0,13	8,92	10,89	165,69
1200	9,41	9,41				
600	8,94	8,94				
150	8,39	8,39				
5	7,10	7,10				

Identifikation af jordprøve:

Dybde:	2,5 m	Bor. Nr.	jbu1
Kote:	11,53 m	Lab. Nr.	

Geoteknisk Institut

Job: 160 16015 Niras

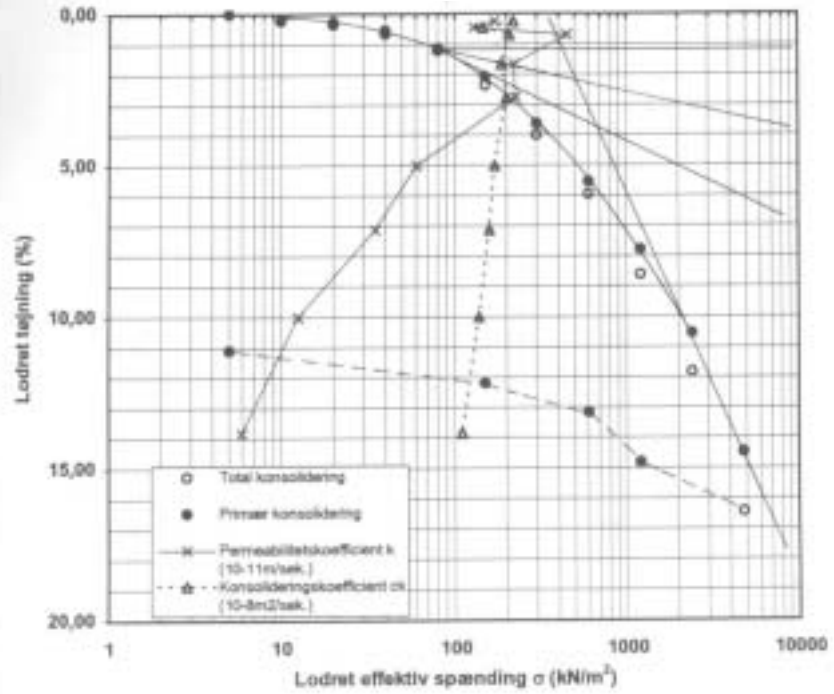
Udført : EMB Dato : 2000-05-24

Emne: Konsolidering JBU 1

Kontrol : *PH* Dato : 2000-05-24Godkendt : *MGP* Dato : 2000-05-26

Rapport: 1

Bilag nr. 3 Side: 2/2



Beskrivelse af jordprøve:

Geologi: Sand, sv leret, siltet, m. striber af ret fedt ler, grøngrå			
Trykareal	10 cm ²	c_v	kN/m ²
Prøvehøjde	20 mm	σ'_c	kN/m ²
e (før forsøg)	0,443	σ'_{pe}	500 kN/m ²
ρ (før forsøg)	2,15 g/cm ³	Q	13,1 (%/s/c)
w (før forsøg)	18 %	S_c	96,9 %
Temperatur	23 °C	ρ_s (skønnet)	2,68 g/cm ³

Dybde:	3,53 m	Bor. Nr.	jbu 1
Kote:	10,5 m	Lab. Nr.	

Forsøgsmetode: Trinvis belastning
 Procedure: I henhold til afsn. 3, BS 1377:1990, del 5.
 Tidskurveberegning: Afsnit 3.6.3.2

Geoteknisk Institut		Job. 160 18015 Niras	
Lidant	EMB	Dato	2000-05-24
Kontrol	MB	Emne	Konsolidering, jbu 1
Godkendt	MGP	Dato	2000-05-25
		Rapport	1
		Blag nr.	4
		Side	1/2

GI-BILAG

Forsøgsparametre

σ (kN/m ²)	ϵ_{sat} (%)	ϵ_{100} (%)	ϵ_s (%sic)	ϵ_{90} (%)	$k \times 10^{-11}$ (m/s)	$ck \times 10^{-8}$ (m ² /s)
5	0,00	0,00				
10	0,22	0,22				
20	0,35	0,29	0,02	0,25	171,62	219,30
40	0,65	0,55	0,03	0,46	128,58	146,42
80	1,22	1,14	0,01	0,71	449,83	208,11
150	2,37	2,08	0,08	1,66	222,53	186,88
300	4,00	3,62	0,15	2,77	226,89	199,99
600	5,96	5,55	0,15	5,02	60,47	171,05
1200	8,61	7,79	0,26	7,14	34,69	158,62
2400	11,83	10,55	0,52	10,00	12,49	138,08
4800	16,46	14,48	0,50	13,84	5,90	109,63
1200	14,81	14,81				
600	13,15	13,15				
150	12,20	12,20				
5	11,10	11,10				

Identifikation af jordprøve:

Dybde:	3,53 m	Bor. Nr.	JBU 1
Kote:	m	Lab. Nr.	

Geoteknisk Institut

Job: 160 18015 Niras

Udført : EMB

Dato : 2000-05-24

Emne: Konsolidering JBU 1

Kontrol : Mv

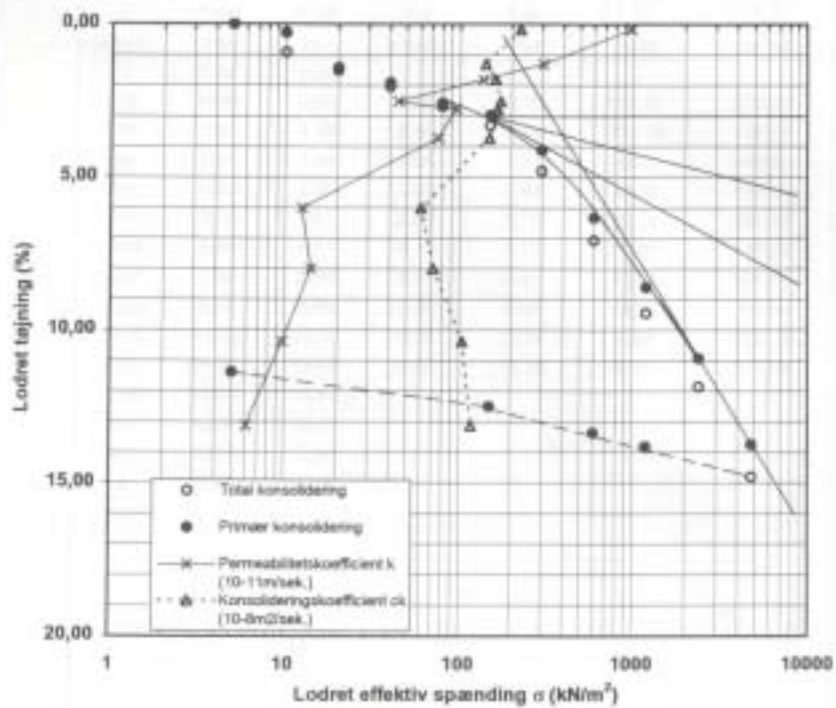
Dato : 2000-05-25

Godkendt : Mv

Dato : 2000-05-26

Rapport: 1

Bilag nr. 4 Side: 2/2



Beskrivelse af jordprøve:

Geologi: Monener, ret fedt, sandet, gruset, m. kalkkorn, grå

Trykareal	10 cm ²	c_v	kN/m ²
Prøvehøjde	20 mm	σ'_0	kN/m ²
e (før forsøg)	0,361	σ'_{pc}	400 kN/m ²
ρ (før forsøg)	2,22 g/cm ³	Q	9,4 (%/sik)
w (før forsøg)	12,6 %	S_c	93,7 %
Temperatur	23 °C	ρ_s (skønnet)	2,68 g/cm ³

Dybde:	4,53 m	Bor. Nr.	JBU 1
Kote:	9,5 m	Lab. Nr.	

Forsøgsmetode: Trinvis belastning $\sigma_1 = 0, 2, 5, 7$

Procedure: I henhold til afsn. 3, BS 1377:1990, del 5.

Tidskurveberegning: Afsnit 3.6.3.2

Geoteknisk Institut

Job: 160 18015 Niras

Udført : EMS Date : 2000-05-24 Emne: Konsolidering JBU 1

Kontrol : JH Date : 1.08.00

Godkendt : MOP Date: 2000-05-26 Rapport: 1 Bilag nr. 5 Side: 1/2

GH-BILAG

Forsøgsparametre

σ (kNm ²)	ϵ_{skt} (%)	ϵ_{100} (%)	ϵ_s (%alc)	ϵ_{50} (%)	$k \times 10^{-11}$ (m/s)	$ck \times 10^{-4}$ (m ² /s)
5	0,02	0,00				
10	0,93	0,30	0,03	0,19	976,87	225,80
20	1,51	1,42	0,01	1,31	304,05	140,09
40	2,04	1,90	0,05	1,81	136,21	160,82
80	2,69	2,57	0,03	2,52	44,66	172,06
150	3,32	2,97	0,06	2,77	95,19	164,86
300	4,80	4,11	0,10	3,73	75,83	148,20
600	7,08	6,32	0,11	6,01	12,58	60,31
1200	9,46	8,59	0,29	7,99	14,11	71,16
2400	11,86	10,93	0,18	10,37	9,69	104,10
4800	14,81	13,75	0,22	13,13	6,07	117,64
1200	13,81	13,81				
600	13,37	13,37				
150	12,50	12,50				
5	11,37	11,37				

Identifikation af jordprøve:

Dybde:	4,53 m	Bor. Nr.	jbu 1
Kote:	9,5 m	Lab. Nr.	

Geoteknisk Institut

Job: 160 18015 Niras

Udført : EMB

Dato : 2000-05-24

Emne: Konsolidering JBU 1

Kontrol : JMB

Dato : 5. maj 2000

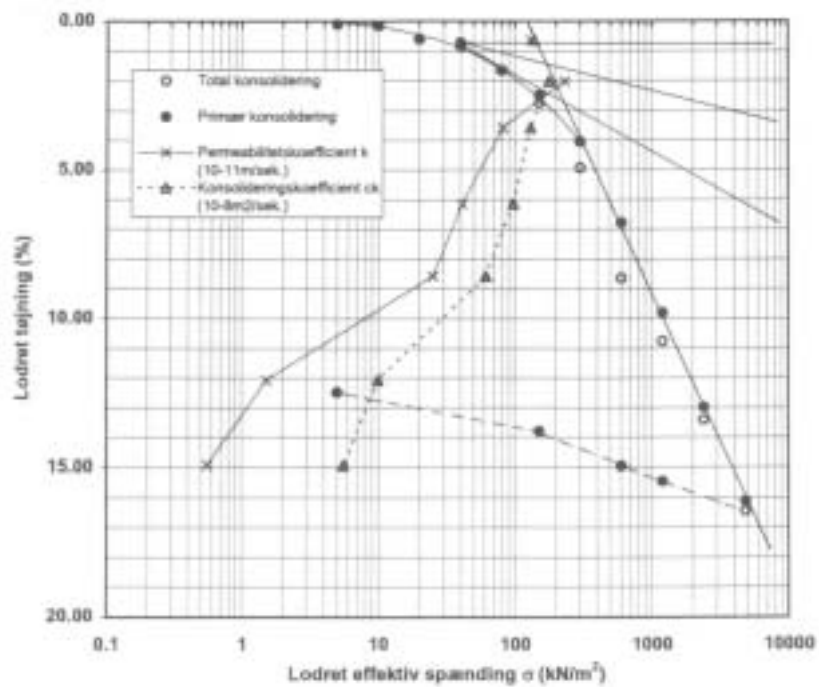
Godkendt : MJP

Dato : 2000-05-26

Rapport: 1

Bilag nr. 5

Side: 2/2



Beskrivelse af jordprøve:

Geologi: Moræneler, ret fedt, sandet, gruset, m. kalkkorn, grå

Trykareal	10 cm ²	e_v	kN/m ²
Prøvehøjde	20 mm	σ'_0	kN/m ²
e (før forsøg)	0,515	σ'_{pc}	180 kN/m ²
ρ (før forsøg)	2,06 g/cm ³	Q	10,4 (%/slc)
w (før forsøg)	16,2 %	S_v	84,2 %
Temperatur	23 °C	ρ_s (skønnet)	2,66 g/cm ³

Dybde:	2,5 m	Bor. Nr.	JBU 2
Kote:	11,55 m	Lab. Nr.	

Forsagsmetode: Trinvis belastning.

Procedure: I henhold til afsn. 3, BS 1377:1990, del 5.

Tidskurveberegning: Afsn 3.6.3.2

Geoteknisk Institut

Job: 160 18015 Niras

Lidfert: EMB Dato: 2000-05-24 Emne: Konsolidering, JBU 2

Kontrol: g⁺ Dato: 14-05-2000

Godkendt: MGP Dato: 14-05-2000 Rapport: 1 Bilag nr: 6 Side: 1/2

GI-BILAG

Forsøgsparametre

σ (kN/m ²)	ϵ_{skj} (%)	ϵ_{100} (%)	ϵ_{a} (%sic)	ϵ_{50} (%)	$k \times 10^{-11}$ (m/s)	$ck \times 10^{-6}$ (m ² /s)
5	0,10	0,10	0,00			
10	0,15	0,15	0,00			
20	0,60	0,60	0,02			
40	0,86	0,72	0,01	0,62	130,03	137,73
80	1,64	1,64	0,06			
150	2,75	2,47	0,08	2,02	231,19	176,66
300	4,94	4,06	0,17	3,59	81,32	129,12
600	8,64	6,78	0,49	6,14	41,10	96,49
1200	10,76	9,81	0,07	8,57	25,30	61,23
2400	13,41	12,99	0,25	12,07	1,53	9,97
4800	16,46	16,12	0,28	14,92	0,56	5,56
1200	15,45	15,45				
600	14,96	14,96				
150	13,80	13,80				
5	12,48	12,48				

Identifikation af jordprøve:

Dybde:	2,5 m	Bor. Nr.	JBU 2
Kote:	11,55 m	Lab. Nr.	

Geoteknik Institut

Job: 160 18015 Niras

Udført : EMS

Dato : 2000-05-24

Erne: Konsolidering JBU 2

Kontrol : JH

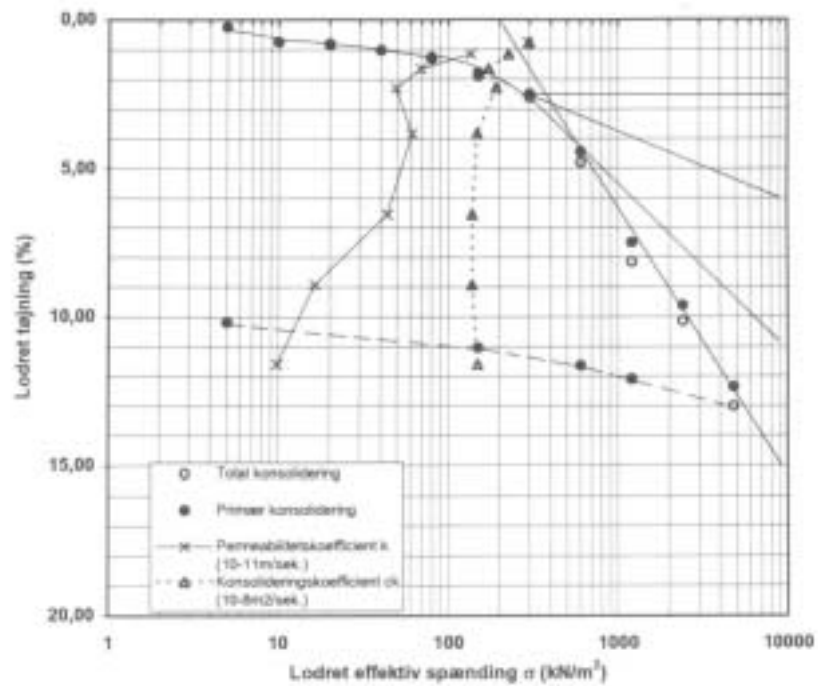
Dato : 2000-05-25

Godkendt : MSF

Dato : 2000-05-26

Rapport: 1

Bilag nr. 6 Side: 2/2



Beskrivelse af jordprøve:

Geologi: Moræneler, ret faldt, sandet, gruset, m. kalkkom, grøngrå			
Trykareal	10 cm ²	c_v	kN/m ²
Prøvehøjde	20 mm	σ'_0	kN/m ²
e (før forsøg)	0,359	σ'_{pc}	400 kN/m ²
ρ (før forsøg)	2,22 g/cm ³	Q	9,1 (%/sek)
w (før forsøg)	12,3 %	S_v	92,2 %
Temperatur	23 °C	ρ_s (skønnet)	2,68 g/cm ³

Dybde:	3,55 m	Bor. Nr.	JBU 2
Kote:	10,5 m	Lab. Nr.	

Forsøgsmetode: Trinvis belastning $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$
 Procedure: I henhold til afsn. 3, BS 1377:1990, del 5.
 Tidskurveberegning: Afsnit 3.6.3.2

Geoteknisk Institut		Job: 160 18015 Niras	
Udført : EMB	Dato: 2000-05-24	Emne: Konsolidering JBU 2	
Kontrol : <i>EM</i>	Dato: 2000-05-25		
Godkendt : <i>EM</i>	Dato: 2000-05-26	Rapport: 1	Blag nr. 7 Side: 1/2

GI-BILAG

Forsøgsparametre

σ (kN/m ²)	e_{ult} (%)	e_{100} (%)	e_{20} (%alc)	e_{50} (%)	$k \times 10^{-11}$ (m/s)	$ck \times 10^{-4}$ (m ² /s)
5	0,25	0,25				
10	0,75	0,75				
20	0,85	0,81	0,00	0,76	292,60	298,97
40	1,02	1,02	0,00			
80	1,31	1,27	0,00	1,15	135,81	225,16
150	1,90	1,79	0,00	1,65	68,91	172,49
300	2,60	2,49	0,04	2,29	49,30	190,45
600	4,80	4,44	0,06	3,82	61,20	147,44
1200	8,16	7,51	0,10	6,56	43,54	137,64
2400	10,16	9,62	0,15	8,91	16,38	137,68
4800	13,03	12,37	0,20	11,58	9,83	149,72
1200	12,10	12,10				
600	11,65	11,65				
150	11,04	11,04				
5	10,19	10,19				

Identifikation af jordprøve:

Dybde:	3,55 m	Bor. Nr.	jbu 2
Kote:	10,5 m	Lab. Nr.	

Geoteknisk Institut

Job: 160 18015 Niras

Udført : EMB

Dato : 2000-06-24

Emne: Konsolidering JBU 2

Kontrol : JH

Dato : 2-10-01-75

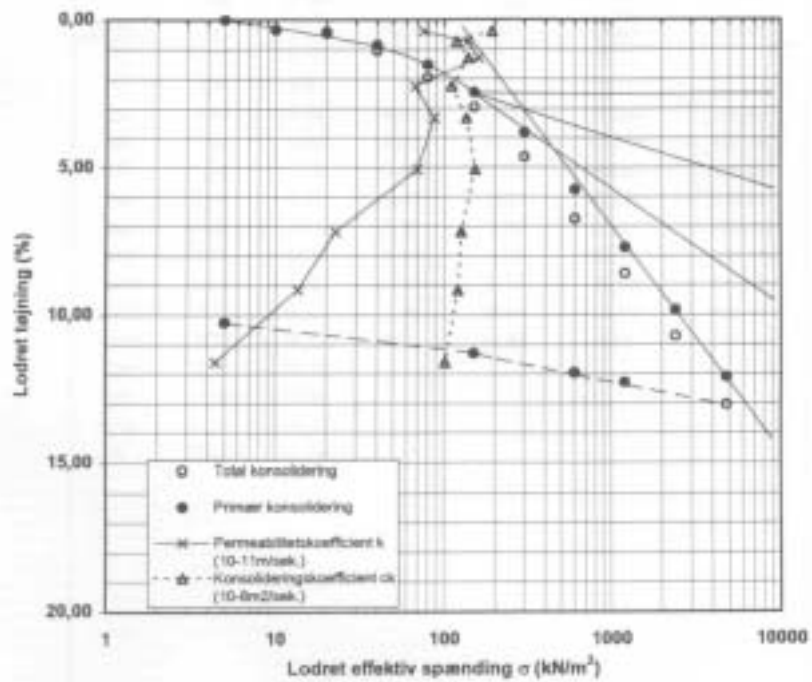
Godkendt: JEP

Dato : 2000-05-26

Rapport: 1

Bilag nr. 7

Side: 2/2



Beskrivelse af jordprøve:

Geologi: Moræneler, sandet, gruset, m. kalkkor, grå

Trykareal	10 cm ²	σ_v	kN/m ²
Prøvehøjde	20 mm	σ'_0	kN/m ²
e (før forsøg)	0,362	σ'_{pc}	300 kN/m ²
ρ (før forsøg)	2,22 g/cm ³	Q	7,6 (%/slc)
w (før forsøg)	13,1 %	S ₂	96,8 %
Temperatur	23 °C	ρ_s (skønnet)	2,68 g/cm ³

Dybde:	4,55 m	Bor. Nr.	JBU 2
Kote:	9,5 m	Lab. Nr.	

Forsøgsmetode: Trinvis belastning $\sigma'_v = 0,1 \dots 1$
 Procedure: I henhold til afsn. 3, BS 1377:1990, del 5.
 Tidkurveberegning: Afsnit 3.6.3.2

Geoteknisk Institut

Job: 160 18015 Niras

Lidfert : EMS Dato : 2000-06-24 Emne: Konsolidering JBU 2

Kontrol : JPL Dato : 2/9/00 - er - 17

Godkendt : *MWP* Dato : *2000-06-24* Rapport: 1 Bilag nr. 8 Side: 1/2

GI-BILAG

Forsøgsparametre

σ (kN/m ²)	ϵ_{ult} (%)	ϵ_{100} (%)	ϵ_x (% _{slc})	ϵ_{30} (%)	$k \times 10^{-11}$ (m/s)	$ck \times 10^{-4}$ (m ² /s)
5	0,00	0,00				
10	0,35	0,35				
20	0,45	0,42	0,00	0,40	76,34	192,52
40	1,05	0,86	0,05	0,74	137,76	117,54
80	1,95	1,53	0,04	1,30	160,03	138,03
150	2,96	2,46	0,07	2,24	67,86	110,54
300	4,65	3,81	0,12	3,32	87,63	134,35
600	6,75	5,76	0,18	5,07	69,57	152,19
1200	8,80	7,72	0,15	7,18	22,59	125,47
2400	10,71	9,83	0,16	9,16	13,56	120,87
4800	13,05	12,12	0,21	11,60	4,43	101,39
1200	12,29	12,29				
600	11,96	11,96				
150	11,30	11,30				
5	10,26	10,26				

Identifikation af jordprøve:

Dybde:	4,55 m	Bor. Nr.	JBU 2
Kote:	9,5 m	Lab. Nr.	

Geoteknisk Institut

Job: 160 18015 Niras

Udført : EMB Dato : 2000-05-24

Emne: Konsolidering JBU 2

Kontrol : JAS Dato : 14-08-00

Godkendt : KOP Dato : 20-05-06

Rapport: 1

Blag nr. 8 Side: 2/2

1 Slugtest afvikling m.v.

I forbindelse med projektets gennemførelse blev der til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne K [m/s], gennemført en række slugtests, der dannede grundlag for beregning af den hydrauliske ledningsevne i den øvre moræneler til 4,5 meter under terræn.

1.1 Teori

Til beregning af den hydrauliske ledningsevne K er der anvendt 2 metoder: Hvorslev metoden og Bouwer & Rice metoden.

1.1.1 Hvorslev metoden

Hvorslev metoden bygger på et empirisk studie af sammenhængen mellem vandspejlets retablering i en boring efter der momentant enten er tilført eller fjernet vand fra boringen. Hvorslev udledte i 1951 følgende udtryk :

$$\ln(s_0) - \ln(s_t) = \frac{2KLt}{r_{ce}^2 \ln(L/2r_{we} + \sqrt{1 + (L/2r_{we})^2})}$$

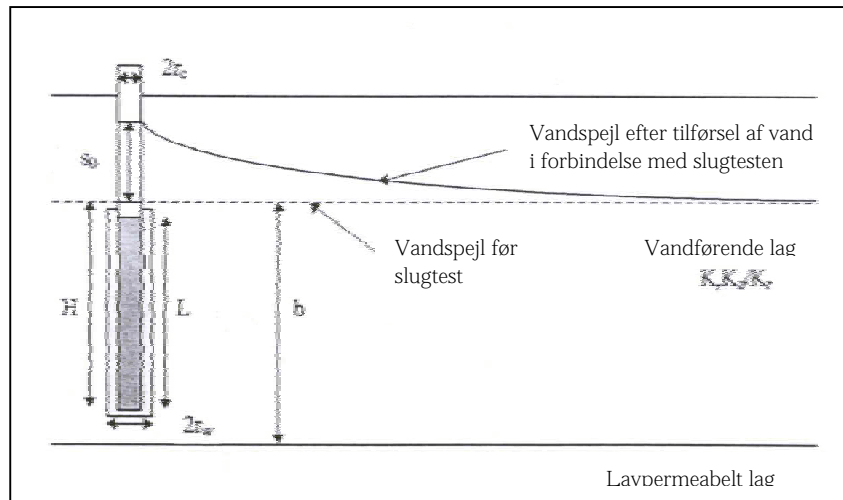
$$r_{ce} = \sqrt{r_c^2 + n(r_w^2 - r_c^2)}$$

$$r_{we} = r_w \sqrt{\frac{K_z}{K_r}}$$

hvor :

- s_0 : initiale vandspejlsændring i forhold til rovandspejl i boring
- s_t : vandspejlsændring i forhold til rovandspejl i boring til tiden t
- K : hydraulisk ledningsevne af det vandførende lag
- K_z : vertikal hydraulisk ledningsevne af det vandførende lag
- K_r : radial hydraulisk ledningsevne af det vandførende lag
- L : filterlængde i boring
- t : tid
- r_c : filtterradius
- r_w : boringsradius
- r_{ce} : ækvivalent filtterradius
- r_{we} : ækvivalent boringsradius

Betydningen af ovenstående parametre fremgår af nedenstående figur C1



Figur C1, illustration af parametre ved slugtest, Hvorslev

Der er opstillet følgende forudsætninger for Hvorslev metoden :

- Det vandførende lag har en uendelig udbredelse såvel horisontalt som vertikalt.
- Det vandførende lag er homogent.
- Vandspejlet for det vandførende lag er til at begynde med horisontal.
- Vandvolumenet V er tilført eller fjernet momentant.
- Det vandførende lag har frit vandspejl.
- Vandflowet til og fra boringen er jævnt.

Kendes dybden af det vandførende lag kan der med fordel anvendes Bouwer & Rice metoden.

1.1.2 Bouwer & Rice metoden

Bouwer & Rice metoden bygger på et empirisk studie af sammenhængen mellem vandspejlets retablering i en boring efter der momentant enten er tilført eller fjernet vand fra boringen. Bouwer & Rice udledte i 1976 følgende udtryk :

$$\ln(s_0) - \ln(s_1) = \frac{2KLt}{r_{ce}^2 \ln(r_c / r_{we})}$$

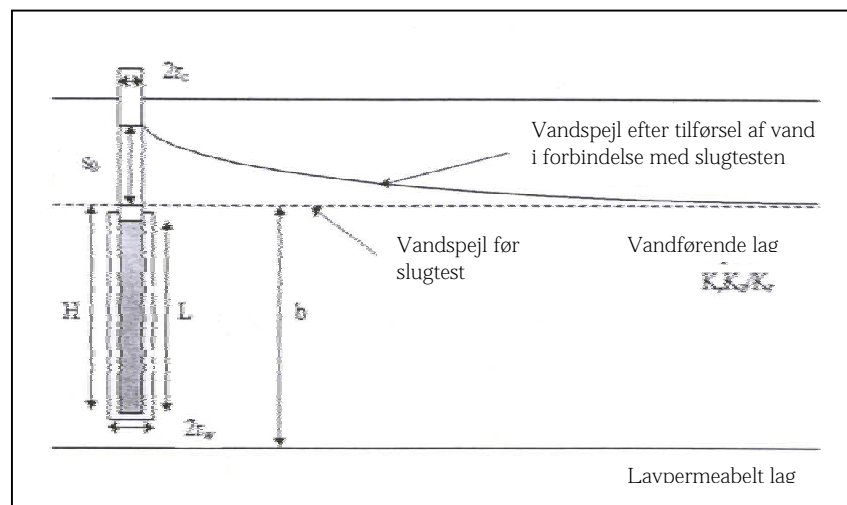
$$r_{ce} = \sqrt{r_c^2 + n(r_w^2 - r_c^2)}$$

$$r_{we} = r_w \sqrt{\frac{K_z}{K_r}}$$

hvor :

- s_0 : initiale vandspejlsændring i forhold til rovandspejl i boring
 s_t : vandspejlsændring i forhold til rovandspejl i boring til tiden t
 K : hydraulisk ledningsevne af det vandførende lag
 K_z : vertikal hydraulisk ledningsevne af det vandførende lag
 K_r : radial hydraulisk ledningsevne af det vandførende lag
 L : filterlængde i boring
 t : tid
 r_c : filtterradius
 r_w : boringsradius
 r_{ce} : ækvivalent filtterradius
 r_{we} : ækvivalent boringsradius

Betydningen af ovenstående parametre fremgår af nedenstående figur C2



Figur C2, illustration af parametre ved slugtest, Bouwer & Rice

Der er opstillet følgende forudsætninger for Bouwer & Rice metoden :

- Det vandførende lag har en uendelig horisontal udbredelse
- Det vandførende lag er homogent og har en ensartet tykkelse
- Vandspejlet for det vandførende lag er til at begynde med horisontal.
- Vandvolumenet V er tilført eller fjernet momentant.
- Det vandførende lag er spændt eller har frit vandspejl.
- Vandflowet til og fra boringen er jævnt.

1.1.3 Andre metoder

Ud over Hvorslev og Bouwer & Rice metoden findes der en række andre metoder, hvoraf skal nævnes: Dagan metoden og KGS modellen. Omkring deres udledning og udformning i øvrigt henvises til speciallitteraturen ¹.

Hvorslev og Bouwer & Rice metoden er anvendt, da de to metoder er en del af beregningsprogrammet AQTESOLV for Windows™, der vha. en række inddata beregner den hydrauliske ledningsevne K.

1.2 AQTESOLV for Windows™

AQTESOLV for Windows™ er et hydrogeologisk beregningsprogram til analytisk bestemmelse af egenskaber for vandførende lag ved udførelse af pumpe- eller slugttests.

Vha. en række inddata fra de udførte slugttests kan der i AQTESOLV grafisk præsenteres en retablerings/afsænkningsskurve (afhængig af om der er fjernet eller tilført vand til testboringen). Kurverne optegnes i et semilogaritmisk koordinatsystem, hvor der ud af førsteaksen er afbildet tiden, mens vandspejlets afvigelse fra ro-vandspejlet er afbildet ud af den semilogaritmiske andenakse.

I AQTESOLV er der mulighed for at beregne den bedste rette linie gennem koordinatsættene, der repræsenterer retablerings/afsænkningsskurven afbildet i det semilogaritmiske koordinatsystem.

På baggrund af den bedste rette linie og den valgte beregningsmetode (Hvorslev eller Bouwer & Rice) beregner AQTESOLV den hydrauliske ledningsevne K.

Ud over denne automatiske kurvefitting er der også mulighed for visuelt/manuelt at indlægge den bedste rette linie for delstrækninger af retablerings/afsænkningsskurven. Herved opnår man mulighed for at beregne den hydrauliske ledningsevne for delstrækninger og derved mulighed for evt. at korrigere for tidsstrækninger, der ikke vurderes at være repræsentative for den pågældende slugttest. Eksempelvis vil man ofte se en stor afsænkning/retablering i starten, hvis der er anvendt gruskastning omkring filtrene. Dette vil kunne korrigeres med den visuelle/manuelle kurvefitting.

1.3 Inddata til AQTESOLV

Til beregning af den hydrauliske ledningsevne K vha. AQTESOLV er følgende inddata nødvendige:

- Metode: Hvorslev eller Bouwer & Rice.
- Tidsserie af vandspejlets retablering efter at have fjernet eller tilført vand til testboringen.
- Er magasinet i det vandførende lag spændt eller er der frit vandspejl. Der er i beregningerne regnet med et frit vandspejl.
- Den momentane vandspejlsændring ved enten at have fjernet eller tilført vand til testboringen. Varierer mellem 0,3 og ca. 1 meter.
- Radius af boring: 0,05 meter.
- Radius af filter: 0,009 meter.
- Længde af filter: 0,3 meter

- Porøsitet af gruskastning. Da gruskastningen omkring de etablerede filtre er minimal er der anvendt porøsitet for selve formationen. Data for porøsitet for formationen beregnet vha. data fra Geoteknisk rapport for lokaliteten udarbejdet af Geoteknisk Institut ².

Porøsiteten n kan beregnes ud fra følgende formel : $n = e/(1+e)$, hvor e = poretallet

I den geotekniske rapport er der i forbindelse med de udførte klassifikations- og konsolideringsforsøg gennemført en bestemmelse af poretallet i dybderne 2,5 mut, 3,5 mut og 4,5 mut. Dette er gjort i en geoteknisk boring (jbu-1) placeret ca. 6 meter fra slugtestboring MB-11, jf. figur C3.

I nedenstående tabel C1 er porøsiteten i de fire filterniveauer ved slugtestene beregnet på baggrund af de oplyste poretal i den geotekniske rapport.

Filter [mut]	Poretal (mut)	Porøsitet
1,9 - 2,2	0,379 (2,5)	0,275
2,5 - 2,8	0,379 (2,5)	0,275
3,35 - 3,65	0,443 (3,5)	0,307
4,2 - 4,5	0,361 (4,5)	0,265

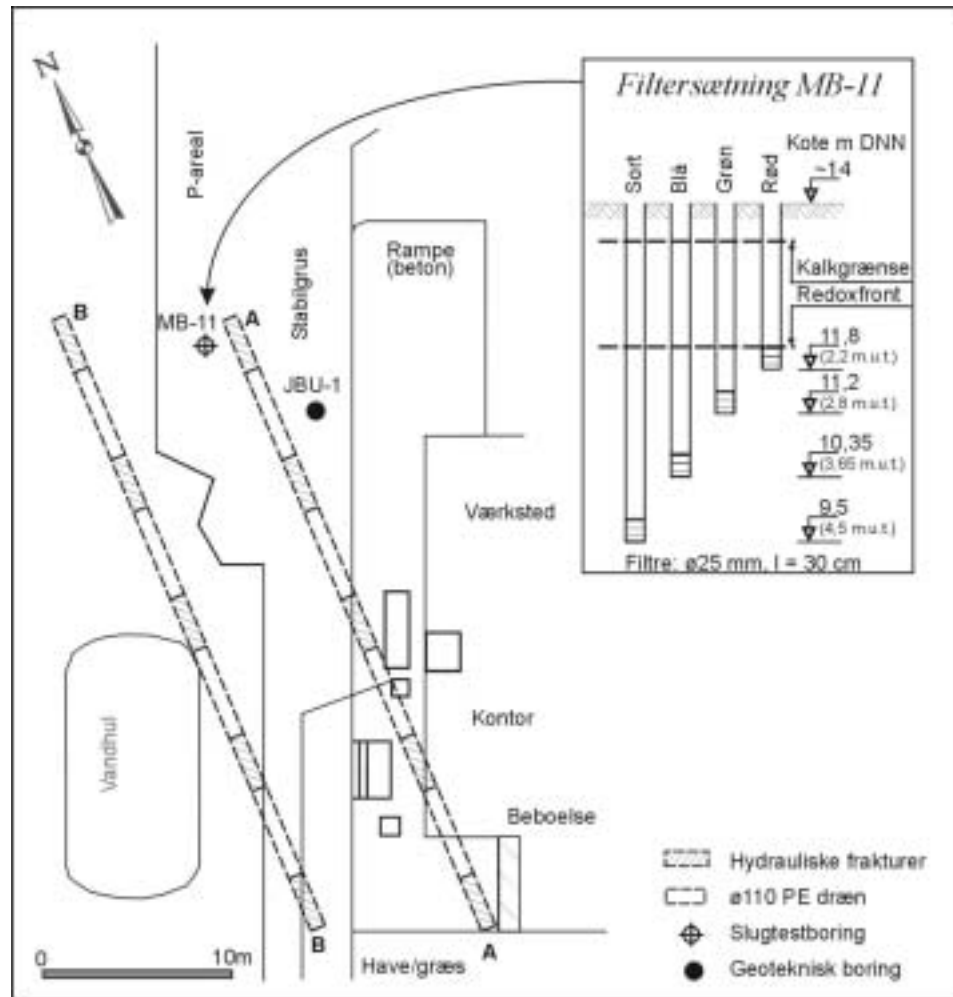
Tabel C1, porøsitet anvendt ved inddata til slugtests

- Statisk højde af vandspejl over bund af filter: varierer mellem 0,3 til ca. 1 meter
- Tykkelse af den vandmættede zone: I forbindelse med de udførte beregninger er tykkelsen af den vandmættede zone varieret mellem 0,3 til 1 meter. De 0,3 meter svarer til en vandret tilstrømning til filteret i filterets bredde, mens der ved de 1 meter regnes på en strømning, der medtager 0,35 meter på hver side af filteret
- Anisotropisk forhold mellem den horisontale og vertikale hydrauliske ledningsevne: Er ukendt og derfor sat til 1.

1.4 Udførelse af slugtest

Slugtesten er udført i perioden 26. - 29. juli 2000.

Slugtesten er udført i boring MB-11, der er filtersat i 4 niveauer. Placering og filtersætning af MB-11 fremgår af nedenstående figur C3.



Figur C3, Placering og filtersætning af MB-11

Der blev udført et 3" borehul til hvert filter. Borehullerne blev etableret med foring af borerig. Boring MB-11 er således etableret som en rede med 4 filtre placeret så tæt på hinanden som muligt med den valgte boreteknik.

Den forede snegleboring blev udført til ca. 40 cm over det fastsatte filtterniveau, hvorefter der i bunden blev uddybet med et skarpkantet kernerør i en cylinder, kaldet Shelby tube, der er tilpasset i diameter og længde til den efterfølgende filtersætning.

Ved filtersætningen blev der anvendt $\varnothing 25$ mm PE-filtre med 0,5 mm slidser af 30 cm længde. Omkring filterene blev der monteret en dobbelt sok, hvori der var fyldt op med filtergrus, svarende til 0,5 cm gruskastning. Metoden blev anvendt for at minimere gruskastningen omkring slugtestfilterne.

Filter med gruskastning i dobbelt sok passede således i det cylinderformede hul udført med Shelby tube. Over filteret, blev der monteret en specialkrave, så mængden af filtersand over filteret kunne minimeres. Over specialkraven blev der afproppet med bentonit til terræn.

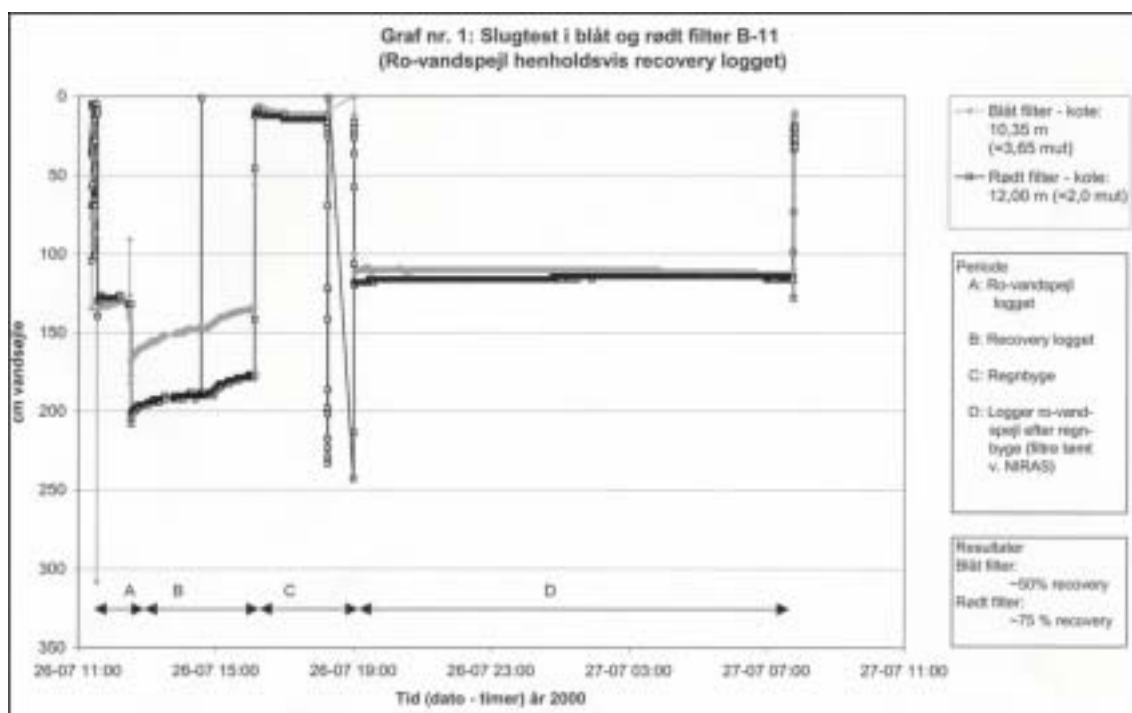
Ved slugtesten er udført test samtidigt på hvert andet filter, dvs. sort filter er testet sammen med grønt filter og blåt filter er testet sammen med rødt filter.

Slugttesten på de enkelte filtre blev udført på følgende måde :

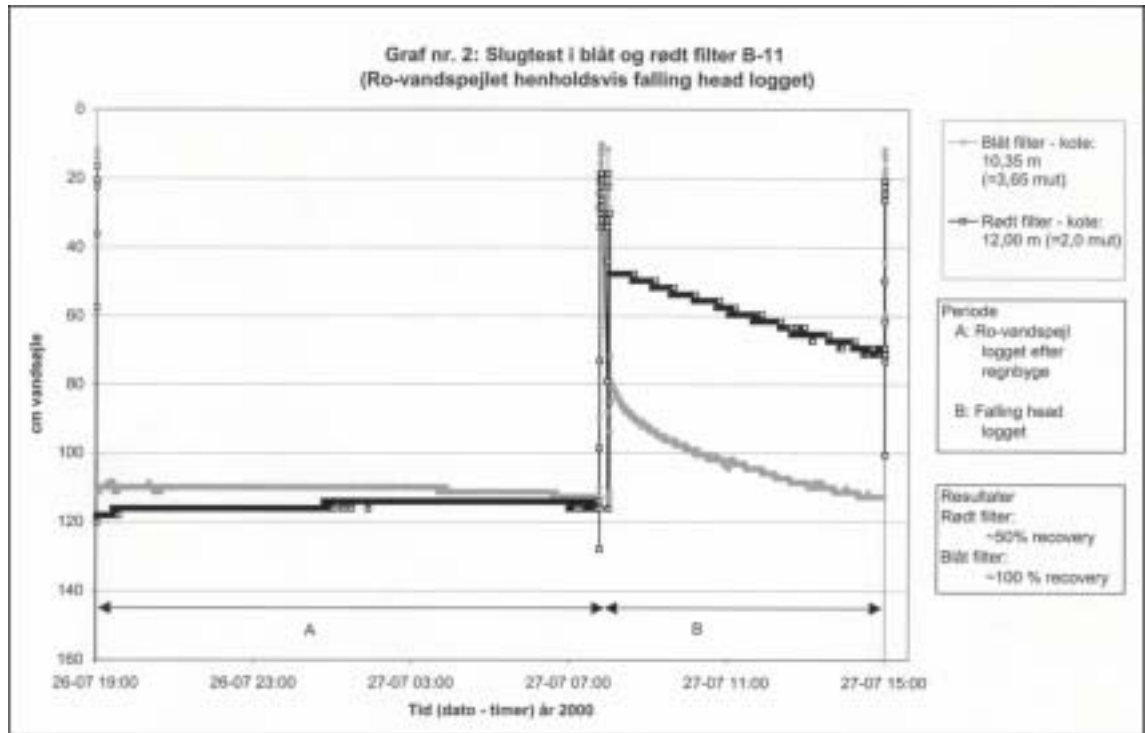
- Ro-vandspejlet i filteret blev pejlet. Derefter blev filteret tømt 2-3 gange for tilstrømmende grundvand, hvorefter der blev afventet til ro-vandspejlet var reableret.
- Derefter blev en tryktransmitter monteret i filter og ro-vandspejlet logget.
- Der blev da foretaget en vandspejlsændring i filteret ved enten at opsuge eller tilføre vand med en 300 ml sprøjte. Den opsugede hhv. tilsatte vandmængde var på ca. 200 ml svarende til en vandspejlsændring i forhold til ro-vandspejl på omkring 1 meter i filteret.
- Ved forsøgenes udførelse blev der først fjernet og siden tilsat vand til de enkelte filtre for ikke at ændre grundvandskemi væsentligt under forsøget.
- Tryktransmitter med datalogger har da løbende logget grundvandspejlet som funktion af tid.
- Ved slugttestene bør der tilstræbes en reablering i forhold til ro-vandspejlet på omkring 90-95 % for at sikre repræsentative data i et sprækket medie som den aktuelle moræneler. Af hensyn til det tidsmæssige perspektiv er der i forbindelse med de udførte slugttests anvendt en reablering på 50-100%.

1.5 Resultater

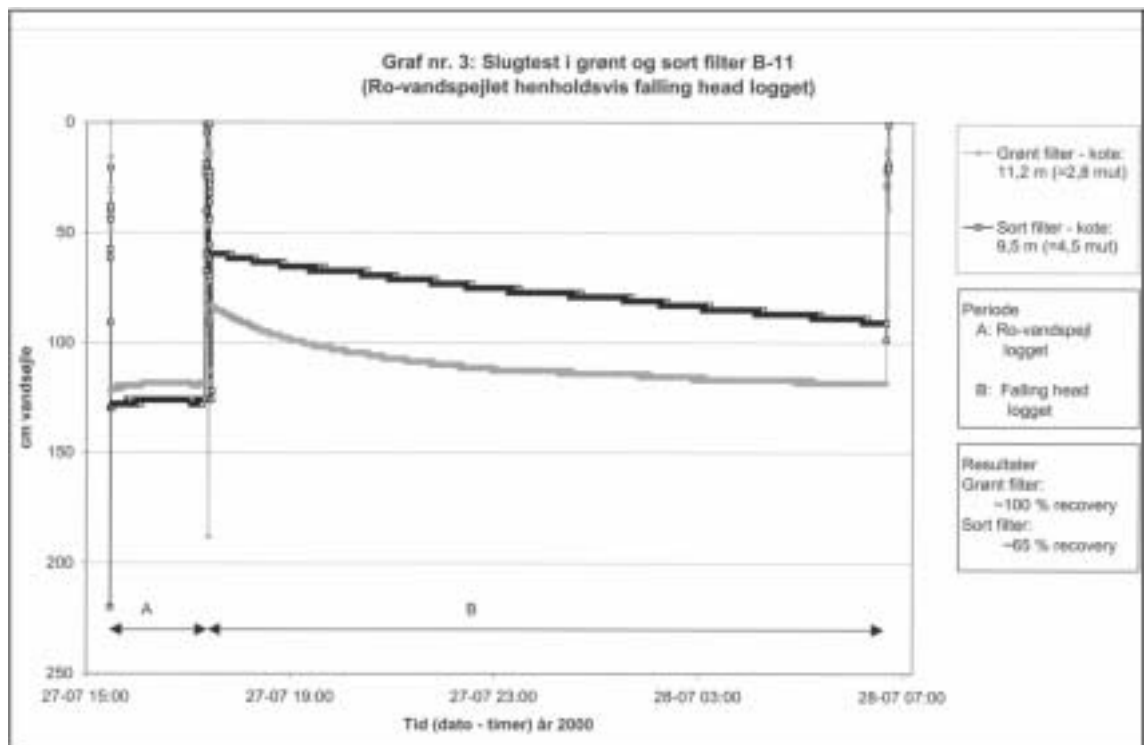
Resultaterne af de udførte logninger ved de udførte slugttests er gengivet på nedenstående graf nr. 1 - 4.



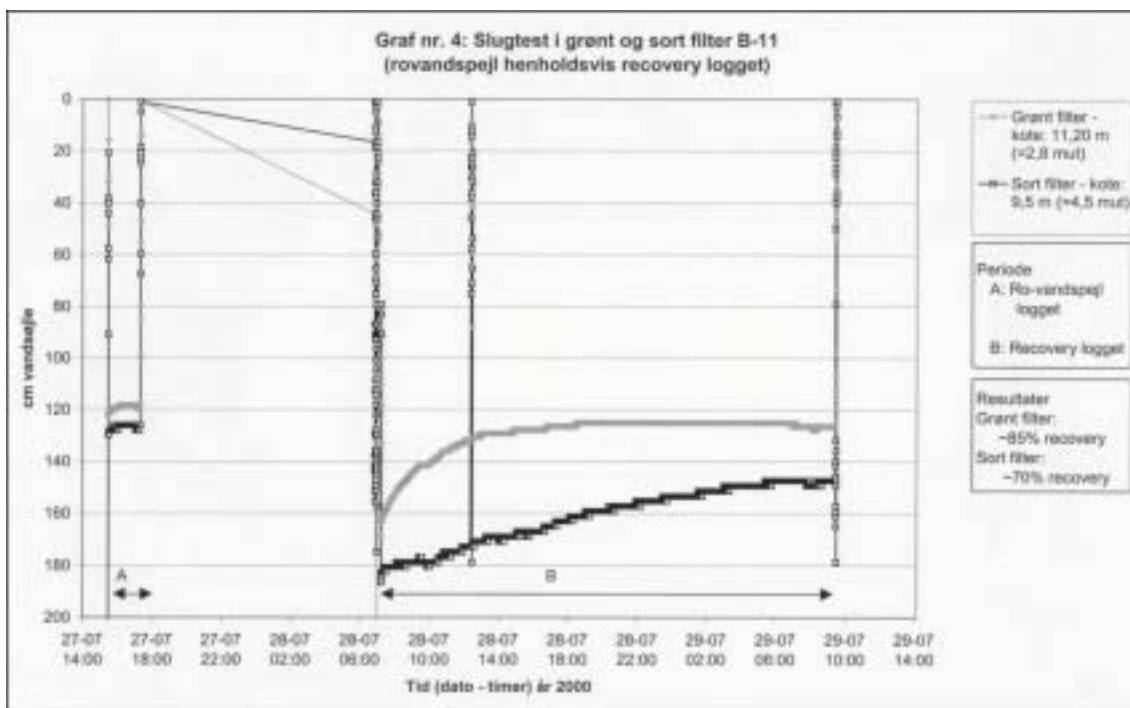
Figur C4, Graf nr. 1, slugtest i blått (3,35-3,65 mut) og rødt filter (1,9 - 2,2 mut), recovery



Figur C5, Graf nr. 2, slugtest i blått (3,35-3,65 mut) og rødt filter (1,9 - 2,2 mut), falling head



Figur C6, Graf nr. 3, slugtest i grønt (2,5-2,8 mut) og rødt filter (4,2 - 4,5 mut), falling head



Figur C7, Graf nr. 4, slugtest i grønt (2,5-2,8 mut) og rødt filter (4,2 - 4,5 mut), recovery

Af C4-C7 fremgår det, hvornår de forskellige typer tests (opsuget/tilført vand) er blevet udført i de enkelte filtre, ligesom ro-vandspejl er angivet. Endvidere er angivet som note, hvor stor en retablering, der er opnået ved de enkelte tests.

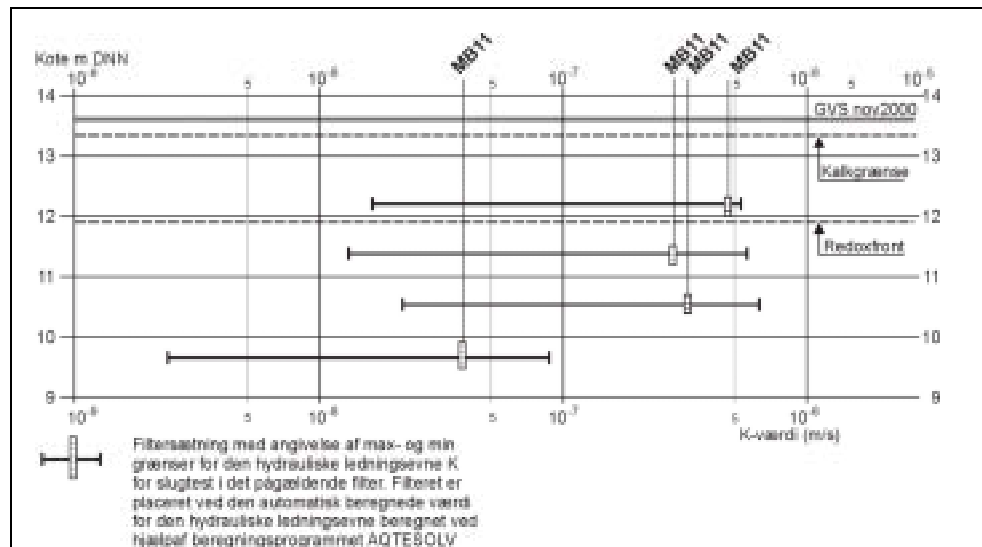
Data fra de enkelte testperioder er da anvendt som inddata til AQTESOLV, til beregning af den hydrauliske ledningsevne K.

Resultaterne af de udførte beregninger ved hhv. Hvorslev metoden og Bouwer & Rice metoden er gengivet i nedenstående tabel C2.

Boring B-11	Metode	Dybde mut	Bouwer & Rice				Hvorslev				Total gensnit [m/sek]
			max [m/sek]	Auto [m/sek]	Min [m/sek]	gensnit [m/sek]	max [m/sek]	Auto [m/sek]	Min [m/sek]	gensnit [m/sek]	
Rødt filter	falling head	2,00	4,1E-08	4,1E-08	4,1E-08	4,1E-08	3,9E-08	3,9E-08	3,9E-08	3,9E-08	1,5E-07
Rødt filter	recover	2,00	4,7E-07	5,7E-08	1,6E-08	2,5E-07	5,2E-07	5,4E-08	1,8E-08	2,7E-07	
Grønt filter	falling head	2,80	5,6E-07	3,5E-07	3,3E-07	4,5E-07	4,7E-07	2,8E-07	2,6E-07	3,6E-07	2,8E-07
Grønt filter	recover	2,80	3,5E-07	1,8E-07	1,3E-08	1,8E-07	2,4E-07	1,4E-07	1,6E-08	1,3E-07	
Blåt filter	falling head	3,65	6,4E-07	2,5E-07	1,3E-07	3,8E-07	4,7E-07	2,2E-07	1,4E-07	3,0E-07	3,2E-07
Blåt filter	recover	3,65	5,8E-07	2,0E-07	2,2E-08	3,0E-07	5,0E-07	1,7E-07	5,3E-08	2,8E-07	
Sort filter	falling head	4,50	8,9E-08	4,6E-08	1,5E-08	5,2E-08	5,9E-08	3,5E-08	1,8E-08	3,8E-08	3,8E-08
Sort filter	recover	4,50	6,3E-08	2,5E-08	3,3E-09	3,3E-08	5,8E-08	1,9E-08	2,4E-09	3,0E-08	

Tabel C2, resultat af slugtest i boring B-11

Resultaterne fra tabel C2 er gengivet grafisk i figur C8, hvor de 4 filtre er afbildet i et koordinatsystem, hvor den hydrauliske ledningsevne K er afbildet som funktion af dybden.



Figur C8, Hydraulisk ledningsevne K som funktion af dybden

1.6 Diskussion af resultater og følsomhedsanalyse

Ud over at variere valg af beregningsmetode (Hvorslev eller Bouwer & Rice) er der foretaget en følsomhedsanalyse ved at variere tykkelsen af den vandmættede zone, jf. afsnit 1.3.

Derudover er der som nævnt i afsnit 1.2 benyttet den mulighed for at foretage en visuel/manual kurvefitting til retableringskurven.

Variationen af tykkelsen af den vandmættede zone mellem 0,3 og 1 meter har ikke givet anledning til en ændret hydraulisk ledningsevne K ved nogen af de udførte beregninger.

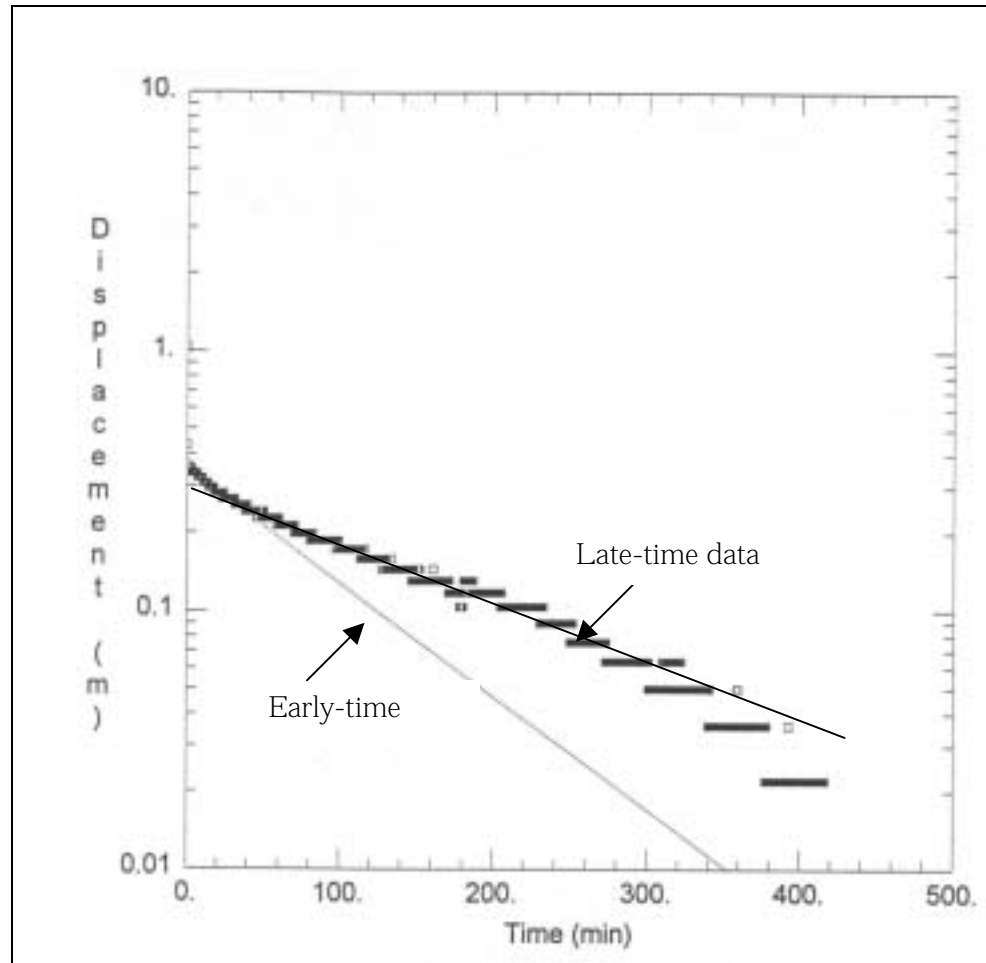
Derimod ses en variation af den hydrauliske ledningsevne, afhængig af valg af metode. Generelt giver Bouwer & Rice metoden større K-værdier end Hvorslev metoden. Forskellen er ved at betragte resultaterne af de automatiske kurvefittings i tabel C2 op til omkring 20%.

Ved at foretage en visuel/manual kurvefitting kan der for mange af de udførte slugtest opnås en synlig afvigelse i K-værdien i forhold til den automatiske kurvefitting. Denne afvigelse kan aflæses som min og max-værdierne i tabel C2 angivet for det enkelte filter og beregningsmetode.

Grunden til denne afvigelse skal formentlig søges i retableringsforløbet ved de pågældende slugtests. Da der er anvendt en lille gruskastning omkring filterne kan den første del af kurveforløbet kaldet "early time" være påvirket af en "afsmitning" fra gruskastningen, så afsænkningen sker for hurtigt i forhold til hvad der ses i formationen. Man opnår da for store K-værdier i forhold til formationen.

De mest repræsentative data vurderes derfor at være data i den sidste del af forløbet for afsænkingskurven også kaldet "late time data".

Den pågældende problematik er afbildet i nedenstående figur C9, der viser et plot i AQTESOLV med angivelse af early og late time data.



Figur C9, Retableringskurve med angivelse af "early-" og "late time" data

De angivne max-værdier af den hydrauliske ledningsevne i tabel C2 repræsenterer derfor typisk "early time" data mens de angivne min-værdier typisk angiver "late time" data.

Af tabel C2 og figur C8 ses det, at der ved at variere på valg af metode og ved visuel/manuel fitting kan opnås en variation på den hydrauliske ledningsevne på op til halvanden størrelsesorden.

På trods af denne variation ses en tendens til en stigende hydraulisk ledningsevne ned gennem formationen fra ca. 2 - 3,5 mut fra i gennemsnit omkring $1,5 \cdot 10^{-7}$ [m/s] til $3,0 \cdot 10^{-7}$ [m/s].

Fra omkring 3,5 mut til 4,5 mut ses en reduktion i den hydrauliske ledningsevne til omkring $3,8 \cdot 10^{-8}$ [m/s].

¹ The design, Performance and Analysis of Slug Tests. James J. Butler, Jr. Lewis Publishers. 1998.

² Geoteknisk Institut. NIRAS. Resultater af laboratorieforsøg. Rapport 1, 2000-05-25.

1 Modelopsætning (MODFLOW)

1.1 Indledning

Med baggrund i en undersøgelse af afværgemuligheder overfor jord- og grundvandsforurening på Slagelsevej 190 /ref.1/, er det valgt at benytte en drænløsning, hvis formål er at vende den nedadrettede strømningsgradient omkring hot-spot og at opsamle den grundvandsforurening der måtte udvaskes med nedbøren.

Til overordnet vurdering af afværgemulighederne blev der opstillet en lokal 3D grundvandsmodel /Ref. 1/, der beskrev strømningsforholdene fra de terrænnære jordlag til og med det primære grundvandsmagasin. Modelberegningerne viste, at en afsenkning af vandspejlet i den øvre moræneler omkring et område ved hot-spot både kunne fiksere jordforureningen og samtidig oprense/dræne det underliggende grundvand.

Modellen viste således, at en "effektiv drænløsning" ville kunne opfylde det opstillede formål. Derfra og til detaildedimensioneringen af en "effektiv drænløsning" er der imidlertid et stykke vej, hvor en mængde forhold, som en grundvandsmodel ikke kan tage højde for, skal overvejes.

Forhold som inhomogeniteter i form af varierende hydrauliske parametre, sprækker, varierende nedsivningsforhold, søer, andre dræn, trærodde mv. kan ikke umiddelbart behandles i modellen. Derfor vil dimensionering af dræn ofte baseres på erfaringer og skøn med en hvis sikkerhedsmargen.

På baggrund af de aktuelle forhold på lokaliteten og kendskab til forureningens udbredelse blev det derfor vurderet, at 3-5 horisontale dræn gennem det forurenede område vil kunne bevirke en tilstrækkelig afsenkning af grundvandsspejlet.

1.2 Erfaringer med frakturerede dræn

En relativ ny metode til effektivisering af dræn i lavpermeable aflejringer, er hydraulisk frakturering. Princippet i metoden har i olieindvindingsindustrien været kendt i omkring 50 år, men er først indenfor de seneste godt 10 år taget i anvendelse ved miljøoprensning af forurenede jord/grundvand. Metoden har ikke tidligere været anvendt i Danmark. Erfaringerne fra Amerika viser, at drænenes effektivitet øges betydeligt i forhold til almindelige underborede dræn.

De erfaringer, der ligger til grund for det efterfølgende er derfor hentet fra USA og Canada /ref.2/ og /ref.3/.

Metoden består i at generere horisontale sprækker ud fra underskudte dræn i en lavpermeabel formation. Ved fraktureringen fyldes sprækkerne (apertur 3-

50 mm) med groft sand (middel korndiameter 0,3-0,8 mm). Sprækkerne når ifølge Amerikanske erfaringer typisk 4-8 m ud fra drænet /ref.3/. Fraktureringen har ved etableringen overvejende tendens til at søge mod terræn.

De generelle erfaringer viser, at der med frakturerede dræn opnås en øgning af effektiviteten (målt som tilstrømningen) på mellem 5 og 100 gange i forhold til almindelige dræn. Størrelsen af den øgede effektivitet er afhængig af de lokale forhold hvor den største effekt typisk vil kunne opnås i lavpermeable og overkonsoliderede jordarter, som tilfældet i denne sag.

1.3 Forudsætninger for opsætning af model

For at belyse om de amerikanske erfaringer også kan underbygges ved modellering og for at opnå en hydrologisk forståelse for princippet i fraktureringen er der opstillet en grundvandsmodel hvormed effekten af frakturering kan belyses. Modellen og resultaterne er præsenteret og diskuteret i dette afsnit.

Det kræver ifølge /ref.3/ så detaljerede og omfattende oplysninger om geologi, hydrauliske parametre, inhomogeniteter, vandindhold osv. at opstilling af modelværktøj for detaildimensionering af dræn i praksis er særdeles svært. Den her opstillede model kan da heller ikke umiddelbart benyttes til dimensionering, men kan illustrere den relative forskel mellem almindelige underborede dræn og horisontalt frakturerede dræn.

Formålet med dette notat er således, at vurdere en evt. øget effekt af hydraulisk frakturerede dræn i forhold til almindelige underborede dræn og i nogen grad, at vurdere størrelsen af forskellen.

Dette er gjort ved at opstille en idealiseret grundvandsmodel og beregne den relative effektforskel på indskudte dræn med og uden frakturering. Vurderingen af effektiviteten bliver således en relativ vurdering af fracturenes betydning.

De her udførte beregninger er udført under en lang række antagelser om geologi, hydrogeologiske parametre potentialeforhold m.v. der ikke er baseret på en enkelt lokalitets faktiske forhold. Det er derfor kun muligt at vurdere drænenes effekt relativt i forhold til hinanden.

1.4 Model opsætning

Den benyttede grundvandsmodel er Visual Modflow, version 2.8.2. Beregningerne er "steady-state" beregninger.

Beregningerne foretages på 2 identiske modeller med den ene forskel, at der i den ene er indlagt et 2,5 cm tyndt sandlag omkring drænene, jf figur 1. Dette sandlag skal simulere fraktureringen.

Diskretisering

Modellerne er beregningsteknisk 3D-modeller, der horisontalt dækker et areal på 100 x 10 m og vertikalt beskriver en dybde fra terræn til 5 m.u.t. (x, y, z) = (100, 10, 5). Idet modellernes parametre ikke varierer i y-retningen er de i princippet 2D-modeller. Resultaterne kan derfor vises grafisk med 2d vertikale snit i xz-planen.

Modellerne har 15 beregningslag (z), 52 kolonner (x) og 5 rækker (y). Diskretiseringen varierer således at cellestørrelsen i området omkring drænet er lille og tiltager mod randene af modelområdet. De mindste cellestørrelser er 10 cm horisontalt og 2,5 cm vertikalt. Figur 1 viser celleinddelingen i et vertikalt snit i xz -planen gennem modellen.

Infiltration

I modellen anvendes en infiltration på ca. 150 mm/år.

Hydrogeologisk model

Som udgangspunkt er der kun et geologisk lag i modellerne, der hydraulisk svarer til homogent lavpermeabelt moræneler. Den hydrauliske ledningsevne i modellen er sat til $5e-8$ m/s.

Der er i modellerne indlagt et dræn i dybden 1,2 til 1,3 m ($\varnothing 10$ cm) regnet fra bund af model. Det svarer til ca. 3,2 m under vandspejlet. I drænet fastholdes et trykniveau på 1,25 m over bund af model. Drænet går gennem hele modellen i y -aksens retning. Drænet er vist på figur 1, der er et vertikalt snit gennem modellen.

I den model, der skal simulere det frakturerede dræn, er der indlagt et højpermeabelt lag på 2,5 cm fra drænet og 4 m til hver side. Det er valgt, at benytte en frakturradius på 4 m selvom der ofte ses en betydeligt større udbredelse. Frakturen er vist på figur 1.

Der er udført beregninger med to forskellige hydrauliske ledningsevner i sandlaget ($1e-4$ m/s og $1e-5$ m/s). Dette er gjort dels for at afspejle variationer i den hydrauliske ledningsevne dels for at afspejle variationer i lagets tykkelse, idet en reduktion af ledningsevnen hydraulisk set svarer til en tilsvarende reduktion af lagtykkelsen.

Størrelsen af infiltration og den valgte hydrauliske ledningsevne for det lavpermeable lerlag har ikke betydende indflydelse på resultatet, da vurderingen er baseret på den relative forskel mellem de to dræntyper.

Randbetingelser

I modellen er der indlagt randbetingelser i det øverste lag ($z = 0$) langs "enderne" af modellen ($x = -40$ og $x = 60$). Disse består af fastholdt tryk på 4,5 m over bund af model. Hertil kommer at der er fastholdt tryk i hele det nederste lag på 4,0 m over bund af model. Der er således en nedadrettet trykforskel i modellen på ca. 0,5 m svarende til en nedadrettet gradient på ca. 0,1 m/m.

1.5 Resultater

På baggrund af modelberegningerne med de to modeller er der optegnet tværsnit i xz -planen, der illustrerer potentialerne ved steady-state for de to drænløsninger. Disse er vedlagt som figur 2. Figur 2 viser potentialet med almindeligt horisontalt dræn og potentialet med fraktureret horisontalt dræn med hydraulisk ledningsevne i frakturen på henholdsvis 10^{-4} m/s og 10^{-5} m/s.

Til sammenligning er startpotentialebilledet inden ilægning af dræn udtegnet og vist på figur 1.

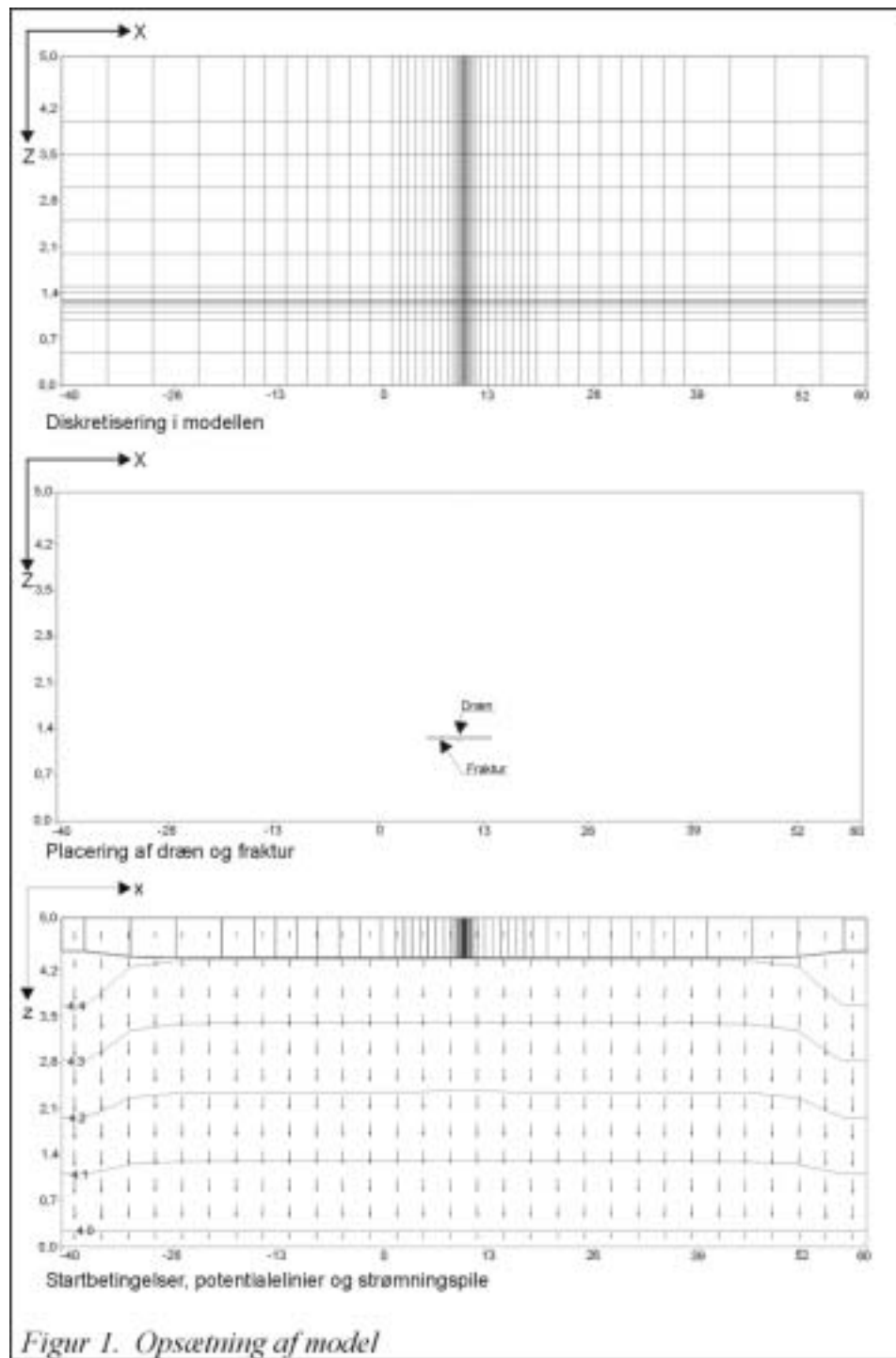
Af figurerne fremgår det, at fraktureringen tydeligt påvirker strømningsskildringen omkring drænet. For detaljeret beskrivelse af modelresultaterne henvises til afsn. 3.5.

Af modelberegningerne fremgår desuden, at det almindelige dræn vil opsamle ca. 15 l/døgn/lbm dræn og at det frakturerede dræn vil opsamle mellem 45 og 100 l/døgn/lbm dræn primært afhængigt af tykkelse af og ledningsevne i frakturen. Relativt set er det frakturerede dræn således 3-7 gange så effektivt som et almindeligt dræn, målt på ydelsen.

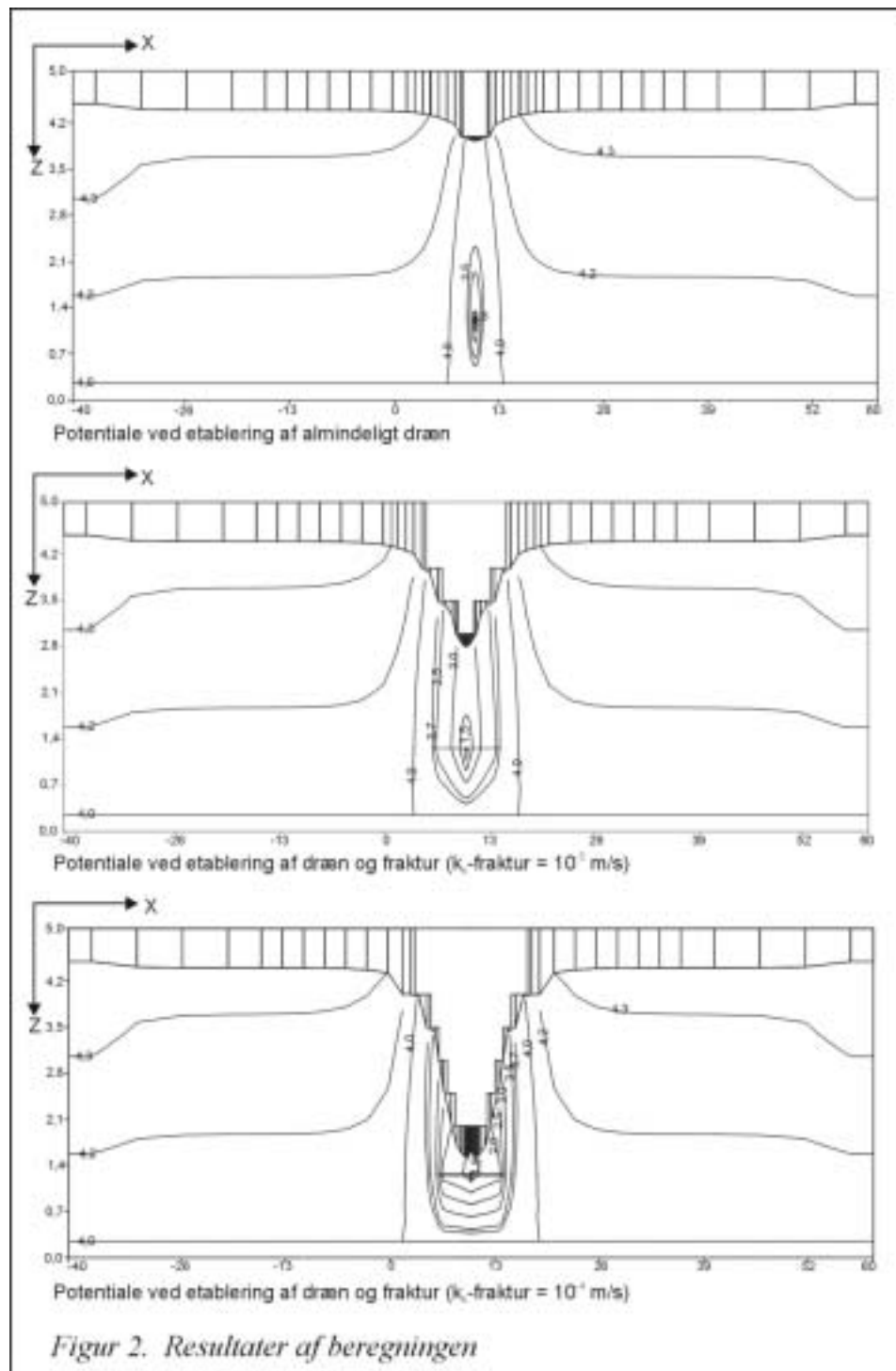
Det er værd at bemærke, at 80-90 % af det opsamlede vand i det frakturerede dræn kommer nedefra og at 85-95 % opsamles via det tynde sandlag. I det almindelige dræn kommer omkring 50 % af vandet nedefra.

1.6 Referencer


- /Ref.1/ Storstrøm Amt. Jord- og Grundvandskontoret. "Supplerende undersøgelser og mulige afværgetiltag". Rapport og bilagsdel. Udarbejdet af NIRAS, december 1998.
- /Ref.2/ United States, Environmental Protection Agency. EPA 542-K-94-005. April 1995. "In-situ Remediation Technique Status Report - Hydraulic and Pneumatic Fracturing"
- /Ref.3/ United States, Environmental Protection Agency. EPA 542-R-97-007. September 1997. "Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction".
- /Ref.4/ Miljøstyrelsen, Hydraulisk Frakturering, "Modellering af hydraulisk frakturerede dræn". Notat udarbejdet af NIRAS, februar 2000.



Figur 1. Opsætning af model



1 Datablade

 <small>ALUMINUM OF OILFIELD SERVICES PHONE: (408) 48 88 88 TELEFAX: (408) 48 88 88</small>		PRODUCT DATA	
GUARGUM			
SPECIFICATIONS			
3500 CPS 200 mesh			
Form	:	Free flowing powder	
Colour	:	Tan.	
Moisture	:	6 - 12%	
Carbohydrate	:	82%	
Bulk density	:	600 - 800 kg/m ³	
Protein (N x 6.25)	:	4%	
pH	:	5.0 - 7.0	
Ash	:	1% max.	
Particle size	:	98% thro' 200 mesh	
Viscosity	:	3500 rps (1% solution Brookfield R.V.T. spindle 4/20 rpm)	
pH stability	:	pH 3 - 12	
Salt compatibility	:	Compatibility with high concentrations of salt with mono and polyvalent cations. Can be formulated in muds of KCl, NaCl and complex mixed salts.	

BORAKS Tekn.Gran.

01. Varebetegnelse

Boraks, tekn.gran.
Andre navne:
Natriumtetraborat, decahydrat

02. Kemisk forml

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
CAS-nr./EF-nr.:
1303-96-4

03. Typisk analyse

B_2O_3	37,00%
Na_2O	16,48%
H_2O	46,46%
Massefylde	1,73 g/cm ³
Volamængde	0,812 g/cm ³
Kornfraktion	0,6 - 0,15 mm

04. Emballagetyper

Varenr: 17912. 25 kg sække

05. Opbevaring

Opbevares tæt i tæt emballage, der holdes tilsluttet af hensyn til spild og forurening af produktet.

06. Beskrivelse

Hvidt, krystallinsk pulver. Reagerer basisk i vandig opløsning.

07. Fremstilling

08. Analyse metoder

09. Anvendelse

I den kemiske industri.

10. Additiver

11. Færdigheder ved omgang med stoffet

Under arbejdet med produktet bruges beskyttelseshandsker og -briller eller ansigtsskærm. Arbejdspladsen skal være suppleret med lokal afugning.

12. Sundhedsfarlige egenskaber

Stoffet virker irriterende for øjne, hud og slimhinder (se Leveringsbetingelsesgarantiering).

13. Litteratur

14. Forbehold

Med disse oplysninger om ovennævnte vare og dens anvendelsesmuligheder har det været vores mål at vejlede Dem bedst muligt. Oplysningerne er imidlertid ikke afgivet med forpligtigende virkning for os, hvorfor enhver konkret anvendelse af varen sker for købers egen risiko og uden garantier fra vor side.

Udarbejdet af:



HCI Nordic
Specialkern

Ol. Strandvej 16 - 2980 Næstved
Tel: 43 29 20 00 - Fax: 43 14 89 37

CERTIFICATE OF ANALYSIS

• IDENTIFICATION

Colour URAMINE 44844

Batch Number : F0591

Laboratory Number : 1380

Production Date : 18/06/1998

• ANALYSIS REPORT

Ingredients :

5000g / 10000g

WATER SOLUBLE FLUORESCENCE 18187


Equivalent in shade and strength to an agreed control when tested by the following method under identical conditions :

Weigh 0.5g of the colour and dissolve into 100ml of purified water, warming if required. Pipette 1ml of the above solution into a 100ml beaker and dilute to mark with purified water.

Test with control sample.

Compare both solutions in beaker cylinders visually.

Date: 20/01/1999


Quality Control

CERTIFICATE OF ANALYSIS

• IDENTIFICATION

Colour : URANINE 44844

Batch Number : F0785

Laboratory Number : 11584

Production Date : 18/06/1999

• ANALYSIS REPORT

Ingredients :

WATER SOLUBLE FLUORESCINE 19187

Equivalent in shade and strength to an agreed control when tested by the following method under identical conditions :

Dilute 10ml of sample to 100ml with purified water / Pipette 1ml of the above solution into a 100ml nessler and dilute to mark with purified water.

Repeat with control sample.

Compare both solutions in nessler cylinders visually.

Date : 14/08/1999


Quality Control

04-11-99

Anvendt kvartssand (propant)

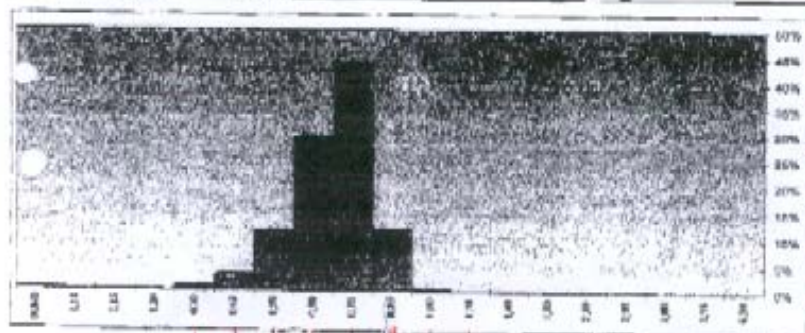


SIGTEANALYSE:

Producent og kontroleret råvare DIN 4256, 1 Kl. A - R. Ø
 Tilsættel: Seriel og Skon kontrollet DK og Amp. Materialiseringsstatistik af Rosenskov Engenevej 60

Maskedimension	KLANT	LADDER	RAPPORT NR	0,4 - 0,8 MM	1000	04-11-99
mm	Erførelsesmængde på sigte		Beregningsmængde gennem sigte		Kemisk analyse Råvare	
	%	gram	gram	%		
6,00	0,0	0,0	307,0	100,0	SiO ₂%	99,300
3,15	0,0	0,0	307,0	100,0	Al ₂ O ₃%	0,010
2,80	0,0	0,0	307,0	100,0	CaO.....%	0,010
2,36	0,0	0,0	307,0	100,0	K ₂ O.....%	0,270
2,00	0,0	0,0	307,0	100,0	Na ₂ O.....%	0,000
1,70	0,0	0,0	307,0	100,0	Fe ₂ O ₃%	0,000
1,40	0,0	0,0	307,0	100,0	TiO ₂%	0,000
1,18	0,0	0,0	307,0	100,0		
1,00	0,3	1,0	308,0	80,7		
0,80	11,7	38,0	270,0	87,9		
0,71	43,8	134,0	126,0	44,2		
0,60	29,3	90,0	48,0	15,0		
0,50	11,4	38,0	11,0	3,8		
0,42	2,9	8,0	2,0	0,7		
0,30	0,7	2,0	0,0	0,0		
0,20	0,0	0,0	0,0	0,0		
0,15	0,0	0,0	0,0	0,0		
0,10	0,0	0,0	0,0	0,0		
RIJND	0,0	0,0	0,0	0,0		
Sum	100,0	307,0	0,0	0,0		

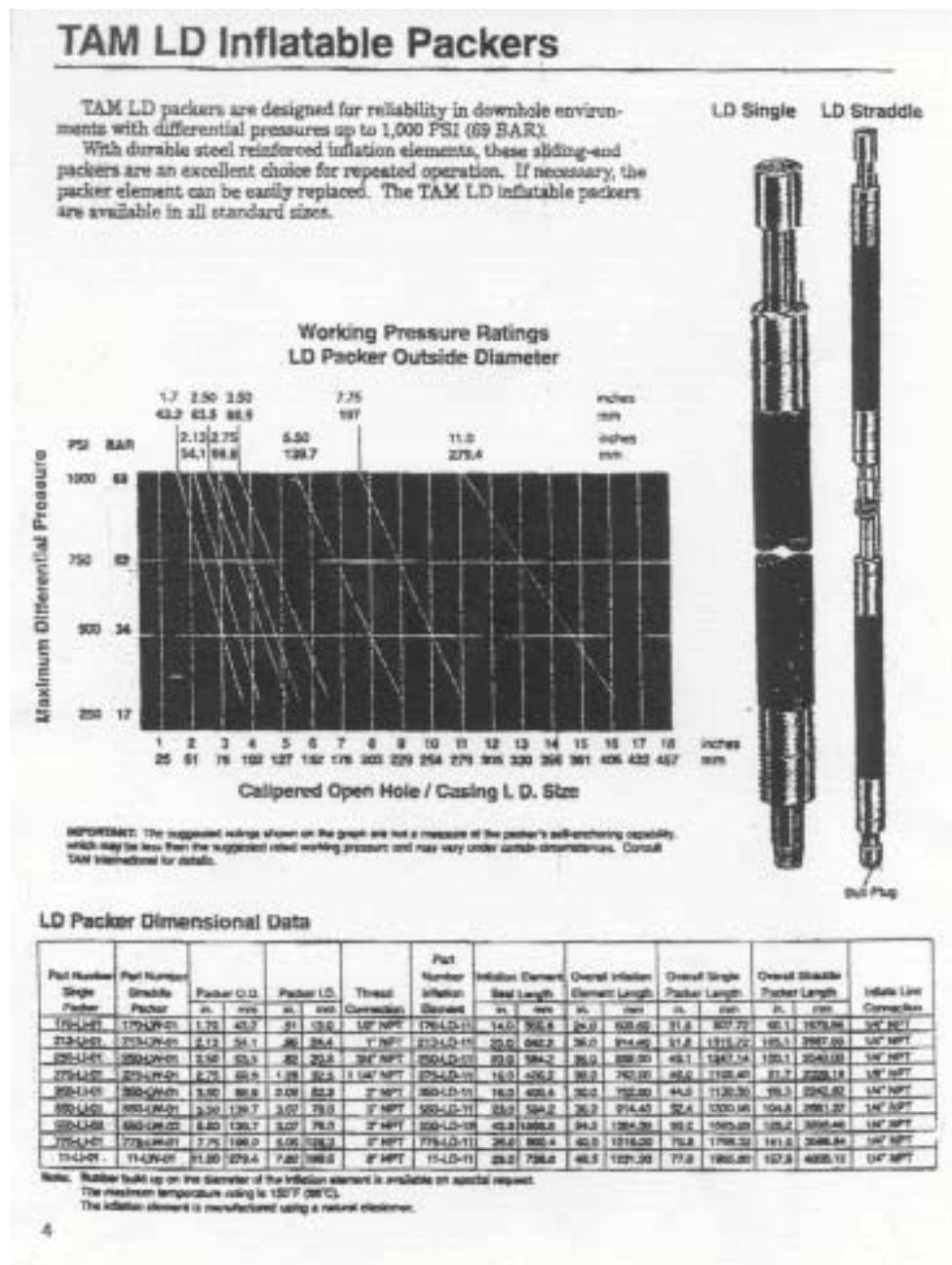
Laboratorie:
 Teknologisk institut DK



% by weight
 50
 40
 30
 20
 10
 0

0,250 0,300 0,355 0,425 0,500 0,600 0,750 0,900 1,060
 GRIJSDALENS FILTERVÆRK A/S
 Hald Allévej 7, DK 7100 Vagnø
 Tel. 79 62 66 69
 Fax. 79 72 21 22
 E-mail: Grijpsdal@Grijpsdal.dk
 2000 2 00 99 49

1 Datablade for anvendte packertype





GENERIC PROCEDURE FOR EXTERNAL INFLATE STRADDLE PACKERS

1. Install lower packer and perforated spacing (as required) to top packer.
2. Attach 1/4" O.D. inflation line between packers. Making sure coil is attached.
3. Install first joint of work string to top packer.
4. Install 1/4" O.D. inflation tubing in connection on top of top packer.
5. Run in hole to depth banding inflate line to work string as the packer is run in hole.
6. With packer at proper set depth, install pressure gauge and shut off valve to 1/4" O.D., inflate line.
7. Connect inflate line to pump or nitrogen supply and slowly pressure up to set packer.
8. Pressure up as per company instructions.
9. To release packer, open shut off valve and allow packer 10 minutes to fully deflate.

Feltjournal

Dana Brocks feltjournal

November 30, 1999

Re: Project Field Summary, November 5-23, 1999
Horizontal Drilling and Fracturing Project
Naestved, Denmark

Presented below are summary notes of field activities for the installation of two hydraulically fractured groundwater extraction wells near Naestved, Denmark in November, 1999.

Friday and Saturday, November 5 and 6, 1999

Flew British Airways to LHR, then to CPH. Arrived Saturday afternoon 1500. Lisbeth picked me up and drove me to The Cottage Inn, B&B near airport for overnight stay.

Sunday, November 7, 1999

Lisbeth picked me up at B&B and took me to NIRAS Allerød. Worked in office for 4 hours and then drove to Karrebæksminde in the evening.

Monday, November 8, 1999

On-site at 08:00. Cool (+4C), radiation fog. Set up office equipment in field trailer. Chemicals for fracturing not yet on site. Fracturing apparatus at machine shop in Køge.

Travelled to the machine shop to observe progress of fabrication. Changed the following:

- Eliminated use of BARCO joints.
- Added 30 cm section of solid 2" pipe from rear packer towards lead packer.
- Added flexible, wire wrapped (double spiral) hose from solid 2" pipe to lead packer.

- H&S (Højgaard & Schultz, Anlæg) decided to use an EZ Flex joint to connect grout hose to rear packer. I recommended a fusion joint for strength but understood from conversation that this was not available.
- Chose a wire-wrapped rubber Parker air line (with plastic tubing insert) for air line between packers and from rear of lead packer to surface. Requested a spare air line (for between the packers only) to keep on-site.

Back on site, well path being laid out for fracture no A-A and B-B.

Tuesday, November 9, 1999

On site at 0700. Cool (+3C), some fog. Truck from Esbjerg (Schlumbergers) on-site with frac mixing tank and pumps. Mixing tank is huge (1-2 cubic meters just to reach the bottom of the paddle), far larger than the Chem-grout 550 mixer and pump system I had specified. I suggested we contact a well drilling company or a grouting company to find a more appropriately sized mixing plant. The pumps are double diaphragm and air driven. It is not possible to tell from the nameplate what working pressure and flow ranges are appropriate so we will need to talk to Schlumberger.

Traveled to Optiroc to observe grout mixer. The several large mixers at their facility are the approximate size we need (300-700 liters).

Met Flemming from the County of Storstrom. Met with Kim Radmer and Karsten Haslund (H&S) at 1300 to discuss project logistics. Karsten brought "Borax", KCO₃. Sand, breaker and Guar already on site. Schlumberger guys show up to check in. Kim says come back tomorrow.

We discussed:

Grooving tool

I asked for a 3/8" NPT threaded fitting for the jets for this tool based on past similar equipment. They use 1/8" NPT plug for their jets so we changed to reflect this. I asked for a 0.065" (~ 1.7mm) hole in each jet. They made a 1.5mm hole – OK. The Vermeer drill rig D16/20 is good for approximately 1500 psi (103 bar) pressure. I had hoped for higher pressure although I had stated 1200 psi in specs.

Double diaphragm pumps

The Sandpiper pumps are air driven and used for transferring liquids and sludge. Each diaphragm produces 0.8 liters per stroke. The outlet pressure is same (minus minor losses) as the air pressure available from the compressor driving the pump. I said we needed at least 8 bar and optimum delivery rate would be in the range of 20-30 liters per

minute. They said the pumps could operate in these pressure and flow ranges but that the flow characteristics could be better maintained if we had an 8 cubic meter capacity compressor rather than the 3 cubic meter compressor at the site. The pumps are rated for 0-20 bars but need adequate compressor capacity.

Mixing tank

There is a misunderstanding regarding the capacity of mixing tank needed for the project. Although we will mix approximately 3000 liters per well, the fluid couldn't be stored until it needs to be used. Once the breaker is added, it is imperative to pump the fluid down hole as soon as possible. Even the guar should be fresh and the cross linking fluid added a few minutes before pumping. Therefore a capacity of 150 liters minimum to about 600 liters maximum per batch is appropriate.

The mixer supplied by Schlumberger will not mix quantities this small (propeller is too high and tank is too big). New mixing tank must be found.

Wednesday, November 10, 1999

On-site at 0700. Drilled pilot hole without problems. Began mixing frac fluid test batches. Cross-linker works well using typical concentrations, breaker is a little sensitive. Added tracer dye, which may make the Guar a little more salty than typical. Came up with reasonable consistency and subsequent break after 3 trials.

Thursday, November 11, 1999

Mixed 10 batches (for 300 liter frac fluid batches) of cross linking fluid and placed in Schlumberger container (with workbench) (to keep out of night cold).

Friday, November 12, 1999

On-site at 0400. Stirred cross-linking fluid. Weighed out guar for grooving (and first fracturing), 3.4 kg/950 liters. Connected grooving tool to rods at exit pit. Pulled in a meter or so to observe effectiveness. Groove is approximately 4mm x (at least) 10cm. Looks good. After checking the groove location with Jan, pulled into place and began grooving.

Horizontal Boring #1 (Well completed as well no. A-A)

Observations during grooving are as follows:

Groove #1: 14+1.95 to 15+2.00 (# rods + # meters)

90 bar
Stopped twice during grooving (once to change rods)
Approximately 30seconds/meter (s/m)

Groove #2: 16+40 to 17+60
90 bar
One stop to change rods, one small spike in pull back pressure
50s/m

Groove #3: 19+00 to 20+00
90 bar
Smooth pull
40s/m

Groove #4: 21+2.00 to 22+2.00
90 bar
Smooth pull
60s/m

Groove #5: 24+70 to 25+70
90 bar
Smooth pull
80s/m

Completed grooving at day break. Schulumberger guys arrived at 0700am.. I asked them to set up pumps and run small compressor for packers. Began exercising packers in 1 bar increments to 8 bars. Then held pressure at 5.8 bars for ½ hour.

Pulled packers into place and hooked up to drill rods on exit end. After protracted discussion about correctly positioning the packers, pulled them into hole for first fracture.

Observations during fracturing are as follows:

Fracture #1 (frac A1):

Flemming and big group from County on site during 1st fracture interval.

Pressured packer set to 5.8 bar for five minutes. Pumped mix as designed at 20 l/m for 300 l. Pump pressure at 5 to 8 bar. Mixed second identical batch and pumped into formation at 15 l/m at 7-8 bar. At ~150 l pumped, pressure dropped to 3-4 bar, then increased back to 7-8 bar. At ~400 l pumped observed ~5 l Guar outside of exit end of hole. Pressure still at 7-8 bar. Later observed a surface vent in the garden 16m down line of well toward exit pit. No change in levels reported.

Fracture #2: (frac A2)

Pressured packers at 5.8 bar for five minutes. Pumped design mix at 4-6 bar and 20 l/m for 3 minutes. Pressure dropped to 2-4 bar briefly, then 4-7 bar for remainder of pumping. Mixed 2nd batch. Added 50% more breaker. Pumped 300 l. Some clear liquid, then green liquid, then sand and frac fluid mix into exit pit. Otherwise, no other indications of extent of fracturing. No change in levels reported.

Fracture #3: (frac A3)

Pressured packers at 6 bar for five minutes. Design mix, except 50% more breaker. Pumped 300 l at 1-4 bar, occasional spikes to 6 bar. Pumped 300 l at 1-6 bar, 20 l/m.

Maximum pull barely moves packer set out of position # 3 to position #4, so mixed fresh guar and pumped 100 l down hole to packers (with packers deflated). Packers then easily pull to position #4.

Fracture #4: (frac A4)

Pressured packers at 6+ bar for five minutes. Added 50% more breaker. Pumped 300 l standard mix at 6-8 bar at 20 l/m. Mixed second batch, also with 50% more breaker. Pumped 150 l at 7-8 bar, pressure began rising to 8+ bar. Pump using both diaphragms ceases to work. Switched to single diaphragm pump with similar results. Attempted pumping for 10-15 minutes. Checked lines, sand bridge in pipe just downstream of pump, sand bridge at transition between grout hose and plastic pipe, both cleared. Tried to pump again. No response. Cut blue pipe so only 9m showing out of hole. Appears to be plugged.

Attempted to pull packers forward. Stopped. Attempted to pull back. Also stopped. Hooked up pumps to grout hose and attempted to pump. After >100 liters, packer set began to move. Pulled out of hole. Lead packer damaged. Grout hose pulled off of EZ Flex joint on back of back packer. Air line broken.

Washed off packer, secured equipment and chemicals and left site at 0030, Saturday morning.

Saturday, November 13, 1999

Traveled to Copenhagen by car in AM. Took train back to Naestved and bus to Karrebæksminde in evening.

Sunday, November 14, 1999

Spent day in Karrebæksminde.

Monday, November 15, 1999

Arrived on site with Lisbeth at 0700. Clear, cold (-4C). No one else on site yet. Crew showed minutes later. Brief discussion about approach to today with Lisbeth. Requested tools for rebuilding packer from H&S. About 1030 an packer set moved inside Larsen's shop on site. We removed lead packer and Christian and I rebuilt it. It was difficult to remove the sliding sub because sand had lodged in it. I was not sure about grease supplied with replacement element, but later confirmed with TAM that it is meant for the replacement rebuild. Reassembled but not tested by 1300.

Observed core drilling that Lisbeth was conducting in afternoon. First push 2 1/2m west of boring encountered 10 cm sand lens from fracturing. Second push, approximately 1m east of fracture #4 encountered very thin lens, 2-3mm, probably infilling of an existing fracture at 4 1/2m (this one displayed color of dye tracer). Also, 4m away 3.4m depth, 15mm fracture.

Called TAM at 1545 to request a replacement (new packr) element in DK by Wednesday. He will call back about shipping.

Tuesday, November 16, 1999

Exercising packers and preparing equipment for next fracturing attempt. Obtained new air line from Køge.

Wednesday, November 17, 1999

On-site at 0400. Cool (+3C), cloud cover. Weighed guar for four 950 liter batches. Mixed tracer (50g/l, 100ml per 300 liter batch). Started pulling back at 0520. Hard spot (rock?) at 24-27m back from exit pit. Worked past with grooving tool. Rig went down due to pump problems at 0620, snowing lightly. Mud filter clogged with guar. Tanks have clumps of guar. Started again at 0640, filter clogged again at 0645, then again completely at 0700. Mixed new batch of guar, started grooving again at 0740. Completed grooving and pulled out of hole at 0810.

Horizontal Boring #2 (Not completed as a well, later abandoned)

Observations during grooving are as follows:

Groove #1: 17+2.0 to 18+2.0
80-90 bar
Fluctuating 40-80 bar mud delivery pressure – pump filter problems – stopped, repeated interval after fixing filter, uniform pull and pressure at 80 bar
Approximately 90seconds/meter (s/m)

Groove #2: 20+1.0 to 21+ 1.0

Pulling back at 60s/m. Fluctuating from 40-80 bar – filter problems. Stopped, cleared filter.
Second try no problems, uniformly 85 bar.
90s/m

Groove #3: 24+00 to 25+00

At 2m in, tool began turning in hole, pump pressure dropped to 0. Stopped. Started pump. Moved back 1m, pulled back at 80 bar. Pump pressure dropped to 40 bar. Fixed pump. Pulled back at 85 bar
Smooth pull
90s/m

Groove #4: 27+2.00 to 28+2.00

80 bar
Smooth pull
90s/m

Groove #5: 29+70 to 30+70

80 bar
Smooth pull
90s/m

At 1000, set up to ream but pump clogged again. Began reaming at 1030. Tight spot before first fracture point, Klaus worked past. Stopped at 1120 to repair rod clamp. Reaming again at 1145. Completed reaming just before lunch time. At 1430, pulled in packer assembly to Fracture interval #1. The assembly broke apart with relatively low pullback pressure (<3 tons) – surprising. Later inspection indicates that assembly broke at coupling behind lead packer. Mandrel on lead packer is scored. Some white flint is in clay plug pulled out ahead of lead packer. All other components are retrieved from hole intact (portion ahead of the break pulled out of entrance pit, portion behind the break pulled out of exit pit).

Thursday, November 18, 1999

On-site at 0800. Overcast, cool (+2C). Crew preparing to pull casing into Well #1. I travel to Køge to rebuild packers at 1000. Arrived at 1130. Rebuilt lead packer using TAM replacement element that arrived Wednesday. Completed at 1400. Drove back to site.

No progress since I left the site (it is now 1500). Starting solenoid on D16/20 broke, Vermeer came out to fix it.

H&S pulled shelter casing into hole in evening. Installation and removal of shelter casing went smoothly.

Friday November 19, 1999

On-site at 0700. Cool (+2C), overcast. Rig was down all day and did not drill pilot hole for boring #3. Grouting company on-site to abandon boring #2 with cement/bentonite mixture (I suggested 5% or less bentonite to Lisbeth).

I went to Køge to pick up fracturing apparatus. I arrived just before noon and had one of the welders grind a bevel in the couplings between packers and on the back of the trailing packer to make less of a kink in the air line. Tried airing the packers and discovered that the air line we removed with the assembly on Wednesday is clogged. Shop closed down at noon but Kim stayed on until a new air line (154m) was shipped down from Copenhagen. Installed fittings and aired up line. It held tight at 5.8 bars. Loaded up truck and returned to the site about 1630. It was raining lightly. Unloaded packers (and aired them up twice), checked out grouting operation, got things organized for Monday and left site in PM. After dinner, traveled to Copenhagen with Lisbeth Walsted.

Saturday, November 20, 1999

I stayed in Copenhagen. Klaus and Jens on site installed pilot boring #3 (well B-B) in preparation for fracturing attempt on Monday, November 22, 1999. We learned from them Sunday night that the pilot bore encountered difficult conditions just beyond the first and last planned fracture intervals.

Sunday, November 21, 1999

I stayed in Copenhagen. Returned by train to Naestved in afternoon. Lisbeth drove me to Karrebæksminde.

Monday, November 22, 1999

Arrived on site at 0400. Cold (-8C), snowflakes falling occasionally. Jens filling truck with water. Klaus setting up rig. While I am in shop exercising new lead packer element, Klaus come in with mud transfer hose for rig, which is frozen solid. I help Klaus with hose, keep exercising packers, three (3) hours to thaw and get rig operational.

Began pulling in grooving tool at 0710. Stopped to repair hydraulic oil leak (20 minutes down). Next, bearing in rack broke. Bearing fixed by 0800, pulling back grooving tool. Grooving completed at 0840 with following results:

Horizontal Boring #3 (Completed as Well no. B-B)

Observations during grooving are as follows:

Groove #1: 19+1.0m to 20+ 1.0m

80-85 bar
Smooth pull, one stop to change rods
Approximately 60 seconds/meter (s/m)

Groove #2: 21+00 to 22+00
80-85 bar
Smooth pull
45s/m

Groove #3: 23+2.0 to 24+2.0
80 bar
Smooth pull, one stop to change rods
45s/m

Groove #4: 26+1.0 to 27+1.0
80 bar
Smooth pull, one stop to change rods
45s/m

Groove #5: 29+00 to 30+00
80 bar
Smooth pull
80s/m

Lisbeth meeting with DEPA at 0900. Klaus set up 250mm reamer to open first portion of boring from the exit pit to within three rods of the first fracture interval. We are doing this because of Klaus and Jans' report of rocks or other obstruction that caused steering difficulties when installing the pilot boring on Saturday.

Completed reaming with the 250mm to within three rods of first fracture, then pushed reamer back out of hole to exit pit with no problems (H&S had been initially concerned about pushing the reamer backwards). Pulled 122mm reamer into exit pit end of boring and pulled back to rig. Completed pulling back in late afternoon. Set up for fracturing.

Began pulling fracturing apparatus into place after 1630. Once in place, mixed first batch of fracture fluid and attempted to pump down casing. Sandpiper pumps will not pump. Schlumberger guy having difficulty troubleshooting. I suggest he call his office. It is a critical time and he needs to fix the pumps. Klaus pitches in to take a pump apart. Schlumberger guy calls his office. He suspects he needs a little positive suction head and that we should reconfigure the mixing unit and hopper so they are above the elevation of the pumps. Jakob and others start moving components. Pumps are taken apart and reassembled. We mix a new batch of fracture fluid and try again (I am not sure of timing of any of this).

Observations during fracturing are as follows:

Fracture #1 (frac B1):

We pump 300 liters fluid plus 120 liters sand into first interval. Pressure at 6-8 bar. Venting noticed in garden so we limit injection to 300 liters (+120 liters sand) and plan to inject this amount for all subsequent fractures (1/2 the amount injected into the fracture intervals for Well nr. A-A). Deflated packers after 20 minutes, then waited 10 minutes and pulled to next interval. Rotated reamer and injected guar in front of packers and injected guar down grout hose behind packers. No problems moving packers.

Fracture #2 (frac B2):

Second fracturing 300 liters (+120 liters sand). One small venting next to pond.

Fracture #3 (frac B3):

Third fracturing same as second, except no venting noticed.

Fracture #4 (frac B4):

Fourth fracturing similar to third, also no venting.

Fracture #5 (frac B5):

We did not attempt a fifth fracture because the pumps, once again, had difficulty moving the fluid/sand mixture and the fracturing apparatus got stocked. Klaus and Jens pulled out fracturing apparatus beginning about 0030 Tuesday morning.

Tuesday, November 23, 1999

Left site at 0100. Slept at house in Karrebæksminde until 0400. Drove to CPH for 0815 flight on British Airways to LHR. LHR to SFO, arrived 1500.

Closing

Thanks for the opportunity to contribute to this project. I will be very interested to hear about the progress of the remaining drilling and casing installation as well as the performance of the system.

If you have any questions, concerns or other needs, please call, write or e-mail.

Best regards

Dana J. Brock

Consulting Engineer / Geologist

224-001

1 Georadar

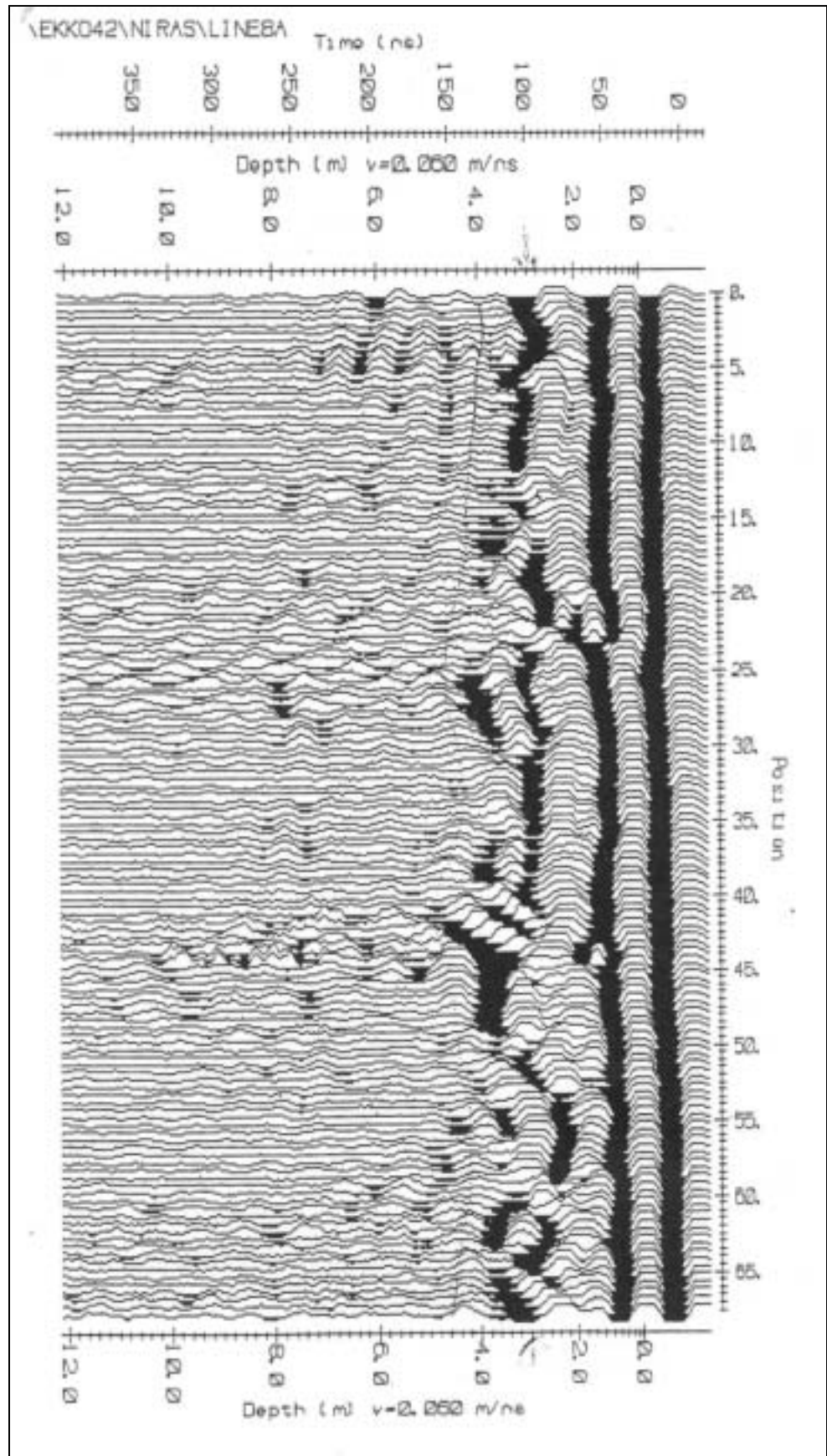
I området omkring referencedrænet (RFD) er der i perioden januar - februar 2000 udført i alt 11 georadar-linier langs med og tværs over RFD, samt i området langs med de to frakturerede dræn.

Undersøgelsen blev udført af firmaet Faxø Kalk A/S med Sensors & Software PulseEKKO 100 system. Til denne undersøgelse blev valgt at benytte 50MHz antenner med en antenneafstand på 2 meter. De målte reflektionstider er omsat til dybder ved at anvende en bølgehastighed på 0,06 m/ns, hvilket erfaringsmæssigt er en typisk hastighed for lerede moræneaflejringer (Faxø Kalk, 2000a & b). Undersøgelsen har til formål at vurdere metodens egnethed til at afklare den geologiske lagfølge på den aktuelle lokalitet, herunder at kunne udskille geologiske heterogeniteter (primært forekomsten af sandlinser/lag).

Metoden bygger på et princip om, at når elektromagnetiske bølger (radiobølger) sendes ned gennem jorden vha. en sender, reflekteres bølgerne helt eller delvis på laggrænser, hvor der sker ændringer i de elektromagnetiske bølgers udbredeshastighed (Møller, 2001). Udbredeshastigheden afhænger f.eks. af vandindhold, kornstørrelse og geologiske materialer. De reflekterede bølger registreres af en modtager på jordoverfladen og omsættes til et radargram. Georadarsignalet dæmpes meget hurtigere i elektrisk konduktive materialer, såsom ler, end i resistive materialer, såsom sand og grus. Penetrationsdybden vil derfor være mindre i ler end i sand og grus. Desuden influerer antennefrekvensen på penetrationsdybden, idet en lavere frekvens som hovedregel vil give en dybere penetration. Til gengæld vil strukturopløsningen af de interne strukturer formindskes. Endelig vil penetrationsdybden mindskes noget under vandmættede forhold. Penetrationsdybden afhænger således af flere forhold: Materialernes resistivitet, vandindholdet, samt frekvensen af de benyttede antenner.

Penetrationsdybden på lokaliteten er maksimalt 3-3,5 m. Penetrationsdybderne er opnået på baggrund af en skønnet bølgehastighed på 0,06 m/ns. Hvis denne hastighed faktisk er højere, er penetrationsdybden også større. Penetrationsdybder på 2-3,5 m er i rimelig god overensstemmelse med erfaringer, der er opnået med anvendelsen af georadarmetoden på andre morænelerslokaliteter i Danmark (Lindhardt m.fl., 2001). Overordnet viser de opmålte radargrammer en relativ stor indbyrdes variationer i reflektionsmønstrene, der vanskeliggør sammenstilling af georadarprofilerne til en samlet geologisk tolkning af morænelersaflejringer på

lokaliteten. Dog kan der i mange af radargrammerne ses mindst én tydelig reflektor i 2,5–3 meters dybde. Reflektoren beliggende i 2,5–3 meters dybde kan kun ses i profiler opmålt langs RFD og ikke ved de frakturerede dræn. I figur H1 er vist et radargram



Figur H1 Radargram

fra et profil optaget parallelt med referencedrænet i en afstand ca. 1,5 m vest for dette. Reflektoren tolkes af Faxe Kalk som en mulig overgang fra "fed ler" til "moræneler". Denne tolkning er dog ikke understøttet af den geologiske beskrivelse i afsnit 3.3.2.

Tolkningsmæssigt synes der at være et bedre sammenfald med dybden til redoxgrænsen, der kan indikere forskelle i porøsitet og dermed vandmætning over og under denne med refleksion af de elektromagnetiske bølger til følge.

Den samlede vurdering af georadarmetodens anvendelighed til forbedring af den geologiske tolkning på den aktuelle lokalitet synes således begrænset. Det skal dog bemærkes, at i forbindelse med andre undersøgelser på moræneler har man erfaret, at, hvor der er moræneler direkte under pløjelaget, bliver signalet dæmpet meget hurtigt og der ses ofte kun en enkelt reflektor under reflektoren fra jordoverfladen. Hvor der ses en øget penetration på radargrammerne, er der også observeret, at aflejringerne direkte under pløjelaget er sandet (Lindhardt, 2001). De sparsomme erfaringer man har indtil nu med georadarundersøgelser på moræneler viser, at man kan kortlægge heterogeniteter i form af sandlag og -linser, der har kontakt med overfladen. Et morænelerslag på 1–3 m dæmper georadarsignalet så meget, at det ikke er muligt at detektere sandlag eller linser, der måtte ligge dybere end 2–3 m.

Faxe Kalk, 2000a: Undersøgelse af moræneler, Slagelsevej 190. Rapport stilet til NIRAS, Allerød (dateret 10. januar 2000).

Faxe Kalk, 2000b: Georadarmålinger på Slagelsevej 190, Næstved. Rapport stilet til Storstrøms Amt (dateret 24. februar 2000).

Lindhardt, B., Abildtrup, C., Olsen, P., Torp, S., Vosgerau, H., Iversen, B. V., Gravesen, P., Jørgensen, O., Plauborg, F. & Rasmussen, P., 2001: The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme. Sites Characterization and Monitoring Design. Geological Survey of Denmark and Greenland, Ministry of Environment and Energy.

Møller, I., 2001: Geofysik i umættet zone: En vurdering af metoder og instrumentsystemers egnethed til kortlægning af den umættede zone. Koncept for Udpegning af Pesticidfølsomme Arealer. Rapport 1. Udarbejdet i samarbejde mellem GEUS og DJF.