

Eksperimenter på den olieforurenede grund Rantzausgade 57

Materialekarakterisering, fysiske betingelser
og ventileringsmetoder

E. Nygaard, A. E. Rosenbom, og
K. E. S. Klint



Eksperimenter på den olieforurenede grund Rantzausgade 57

Materialekarakterisering, fysiske betingelser
og ventileringsmetoder

Samlet rapportering af delprojekterne nr. 3 og 9 under
CEnter for VENTilering af jord og grundvand
som *in situ* rensningsteknik (CEVENT)

E. Nygaard, A. E. Rosenbom og
K. E. S. Klint

Indholdsfortegnelse

1	Forord	2
2	Indledning	3
3	Formål	5
	Ventilationskoncept	6
4	Undersøgelsens rammer	7
	Undersøgelsens elementer	7
	Generelt om vandrette boringer	8
	Vandret boreteknik	9
	Boremaskiner med skærende rørkroner	9
	Boremaskiner med gravnede kroner	9
	Boremaskiner med fortrængende kroner	10
	Boreteknologi i dette projekt	10
	Om etablering af en vandret boring	11
	Boringsudbygning	11
	Filtermaterialer	12
	Filterudformning	12
	Undersøgelsesstrategi	12
	Generelt om prøvetagning af jord	14
5	Lokaliteten Rantzausgade 57	15
6	Forundersøgelser på lokaliteten	16
	Ventilerbarhedstest	18
	Slugtest	22
	Luftinjektions test	23
	Opmålinger og beskrivelser i tankgraven	25
	Udtagne prøver	30
7	To vandrette boringer	33
	Boring af den dybestliggende vandrette boring	34
	Boring af den øverstliggende vandrette boring	34
	Udvikling af prøvetager til vandrette boringer	35
	Analyser af "intaktprøver"	36
	Geofysiske sondemålinger	38
	Loggeudstyret	39
	Loggearbejdet i Rantzausgade	40
	Nedre boring	41
	Øvre boring	41
8	Udformning af et forsøgs-ventilationsanlæg	42
	Moniteringsboringer	48
	Driftsenhed og monitoringssystem	49
9	Ekspementer	53
	Test af transducere i moniteringsrør	53
	Afprøvning af lækage fra 1 m moniteringsrørene	54
	Afprøvning af pakkere i den øvre vandrette boring	54
	Afprøvning af pakkere i den nedre vandrette boring	55
10	Resultater og Diskussion	56
	Karakterisering af jorden	56
	Intaktprøver	62
	Parametre	65
	Ventilering	72
	Boringsudbygning	76
	Afprøvning af vandrette boringer	80
	Erfaringsopsamling	80
	Rehabilitering/effektivisering af vandrette boringers ydeevne	81
11	Protokoller	82
12	Tak	116
13	Referencer	117
	Bilag 1 - 3	124

1 Forord

Projektet CEVENT (Center for VENTilering af jord og grundvand) er et FoU-center under Erhvervsfremmestyrelsen. Centrets emne er oprensning af jord og grundvand ved "air sparging" kombineret med vakuumventilation og rensning af afkastluft. Målet med projektet er at tilvejebringe et samlet koncept for *in situ* jord- og grundvandsrensning med de udvalgte teknikker, udmøntet i et antal emnespecifikke Protokoller.

Centrets deltagere er:

OM, Oliebranchens Miljøpulje
Dan Jord A/S
NCC Danmark (tidl. Rasmussen & Schiøtz Anlæg A/S)
Geokon Edb A/S
DHI (tidl. VKI, Vandkvalitetsinstituttet)
DTI, Dansk Teknologisk Institut
Forskningscenter Risø
DMU, Danmarks Miljøundersøgelser og
GEUS, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse

Deltagerne bidrager i forskellige kombinationer til gennemførelsen af projektets 10 delprojekter.

"Materialekarakterisering og fysiske betingelser" og "Ventileringsmetoder", Delprojekterne nr. 3 og 9, forestås af GEUS, NCC Danmark og OM samt DHI og Dan Jord (kun i Delprojekt nr. 3).

Denne rapport er baseret på bidrag fra A.E. Rosenbom, K.E.S. Klint og E. Nygaard.

2 Indledning

Menneskets industrielle aktiviteter har affødt et stort antal jord- og grundvandsforureninger. I forbindelse med disse forureninger er der gennem de seneste årtier blevet anvendt betydelige ressourcer på forundersøgelser og afværgetiltag. Beslutningsgrundlaget er i denne forbindelse i væsentlig grad baseret på analyseresultater af jord og grundvand. Det er derfor væsentligt, at prøver til analyse indsamles, så de er hensigtsmæssigt repræsentative for den situation, de skal karakterisere. Det indebærer bl.a., at prøverne skal være præcist stedfæstede, og at de evt. skal være uforstyrrede (D'Astous et al., 1989) og orienterede (Murdoch et al., 2000). Dette er en del af forudsætningerne for optimal lokalisering og afgrænsning af forureningen, herunder udformning af *in situ* afværgeforanstaltninger ved ventiler og monitoringsnetværk (J. Haz. Materials, 2000).

Som følge af *in situ* ventiler kan der ske ændringer i finkornede og/eller lermineralholdige jordlags fysiske egenskaber. For eksempel kan jordlag, hvis bæreevne er betinget af vandindholdet, blive deformeret ved reduktion af vandindholdet eller udtørring ved ventiler. Risikoen for denne type deformationer og sætninger i forbindelse med air sparging og vakuum ventilation er dårligt kendt (Poulsen, 1992), og forudsætningerne for at bedømme den i forhold til eventuelle bygværkers funderingsgrad er derfor ringe. Også indfald af jordarter i annulus omkring vandrette borer og filtre kan indvirke på funderinger.

Jordartens hydrauliske ledningsevne og permeabilitet kan i nogle tilfælde blive påvirket ved air sparging og vakuum ventilation. Påvirkningen kan dels skyldes omfordeling af jordartsmaterialet i strømningsruterne, dels mikrobiel aktivitet.

Den store erfaring, som gennem en årrække er indhentet via *in situ* rensning af jord og grundvand for organiske forurenende stoffer såsom olie, Miljøstyrelsen 1999, knytter sig altovervejende til den trediedel af de overfladenære danske jordlag, som har kunnet karakteriseres som løse, homogene sandaflejringer.

Modsat kan heterogeniteter i jordlag, såsom lavpermeable zoner i sandede aflejringer eller dobbeltporøsitet i finkornede aflejringer, have afgørende indflydelse på strømningsforholdene og dermed på effektiviteten af en oprensning af såvel jord som grundvand og jordluft (Wagner and Gorelick, 1987; James and Freeze, 1993; Wingle and Poeter, 1993; MacKay and Cherry, 1989; Haley et al., 1991; Schroeder et al., 1992). Da der i øjeblikket kun er sparsom dokumentation af effekten af fjernelse af forurening fra finkornede inhomogeniteter og makroporer i jordlagene (f.eks. Miljøstyrelsen, 2000; USDOE, 2000), og da de mest gængse oprensningsmetoder ("Pump and Treat" og bortgravning) har vist sig ikke altid at være tilstrækkelige til at rense især grundvand (Keely, 1989; MacKay and Cherry, 1989; Haley et al., 1991), er der især i USA og Canada blevet satset kraftigt på udviklingen af alternative *in situ* teknikker til oprensning (f.eks. USEPA, 1994, 1998).

De almindelige danske jordarter sand og moræneler udgør hver for sig og i forskellige varianter og kombinationer de overfladenære lag (Fredericia, 1993). Transport og nedbrydningsforhold i moræneler er anderledes end i homogene sandede aflejringer. I sandede aflejringer kan der tages udgangspunkt i et koncept om stempelstrømning og transport gennem matrix. *In situ* teknik er derfor umiddelbart egnet til oprensning i sandede aflejringer (især de som er mellem- til grovkornede og homogene). Angrebsvinklen for oprensning

i sand er relativt enkel og er blevet udviklet til en rutine-praksis, jævnfør Miljøstyrelsen 1999.

Heroverfor står moræneler, som bl.a. på grund af lerindholdet har andre fysiske, geokemiske og hydrauliske egenskaber (Ernstsen, 1996; Klint in prep.; Fredericia 1991; Jørgensen og Fredericia, 1991; Harrar og Nilsson, 2001). Moræneler er blandt andet ofte karakteriseret ved at være "dobbeltporøst", idet det ud over porøsiteten i matrix kan være gennemsat af makroporer i form af ormehuller, rodhuller og sprækker (Beven and German, 1982). Hvor der forekommer dobbeltporøsitet influerer den på transportmønstret i jordarten eller bjergarten, fordi den kan tillade præferentiel strømning og transport (McKay et al., 1993, 1998; Tsuboyama et al., 1994; Mortensen et al., 2001). Det er dokumenteret, at denne strømning og transport kan foregå relativt hurtigt og dermed også potentielt afføde en hurtige forureningstransport (McKay et al., 1995; Broholm et al., 1995; Nilsson et al., 2001).

Som følge af makroporenes funktion som transportruter kan der være uligevægt mellem stofindholdet i det vand som findes i matrixen og makroporerne, og der kan derfor foregå udveksling af vand og stof mellem matrix- og makroporer i områder dikteret af den selektive hurtige transport i sprækker og makroporer. Dette kan f.eks. betyde, at en del af en forurening vil kunne befinde sig i matrix, hvortil den evt. er transporteret gennem makroporerne, og hvorfra den kun langsomt frigives (Parker et al. 1994; Broholm et al., 1999 a+b).

Den dobbeltporøse struktur har selvsagt også en modsat rettet effekt, idet den kan tillade kanalisering af iltningsmidler og bakterier frem til et forureningsområde (Vesper et al., 1994 a+b; Davis-Hoover et al., 1991). Makroporerne har derfor betydning for nedbrydning af forureningskomponenterne. Disse forhold er naturligvis af stor betydning i forbindelse med en vurdering af muligheden for *in situ* oprensning på grunde, forurenede med olie og/eller andre organiske stoffer.

En væsentlig inspirationskilde til alternative tilgange til *in situ* oprensning på jord og grundvandsområderne findes i de gode resultater olieindustrien har haft med at øge indvindingsgraden for olie og gas gennem kunstig opsprækning og vandret boreteknik (Jones, 1999; Ovens et al., 1998). Et eksempel er udviklingen af vandret boreteknik, som har erstattet traditionelle lodrette borer til nogle formål. Således anvendes vandret boreteknik efter amerikansk forbillede af danske entreprenører til bl.a. fremføring af ledninger og kabler under bygninger og veje (USEPA, 1994). I enkelte tilfælde er den vandrette boreteknik blevet anvendt i forbindelse med danske afværgeprojekter (Walsted og Christensen, 2000; NIRAS, 1999), mens den nogle steder i udlandet indgår som en af de etablerede tilgange til afværgeløsninger (Karlsson et al., 1992; USEPA, 1994; Ditch Witch, 1996). Med vandrette borer er det i princippet muligt at behandle forurenede jord og grundvand på steder, som ikke kan nås med lodrette borer, f.eks. under bygninger. Hertil kan en vandret boring etableres langs f.eks. en forureningsfanens længdeakse, så der principielt er bedre kontakt til forureningen.

Projektdelen vedr. barrierer er ikke gennemført i dette forsøgsprojekt, idet der ikke var en forureningssituation at teste på forsøgslikaliteten. Derfor rapporteres der ikke om barrierer i nærværende rapport.

3 Formål

Det overordnede formål med Cevent projektet er angivet i forordet og de overordnede resultater samlede i rapporten for Delprojekt 10 (Informations og beslutningsstøttesystem). Der er fire faglige delmål med de dele af det samlede Cevent projekt, som denne rapport handler om, herefter blot "projektet" (den hovedansvarlige partner er angivet i parentes):

Materialeteknisk karakteristik

at identificere metoder til udtagning af uforstyrrede jordprøver til brug for laboratorieforsøg til geologisk, geoteknisk, geokemisk og mikrobiologisk karakterisering (GEUS).

at identificere geologiske og geotekniske parametre, som er kontrollerende for eventuelle sætninger i forbindelse med ventilerings (GEUS).

at identificere processer, der kan forårsage tilstopning (clogging) af strømningsruterne i jorden og ventileringsrørene, samt metoder til at modvirke dette (GEUS).

Afklaring af forudsætninger og muligheder (undersøgelsens rammer):

at identificere de hydrauliske og geologiske parametre, som kontrollerer oprensningsforløbet ved vakuumventilering og air-sparging i såvel sandede sedimenter med finkornede inhomogeniteter som moræneler med dobbeltporøsitet (GEUS).

at afklare hensigtsmæssig udformning, virkningsgrad, fordele og ulemper ved forskellige ventilerings teknikker (GEUS).

at identificere prøvetagningsmetoder for uforstyrrede prøver m.h.p. at skaffe materiale fra vandrette borer til geologiske, geokemiske, mikrobiologiske og geotekniske undersøgelser (GEUS).

at udarbejde en konceptuel model for gennemførelse af *in situ* oprensning ved ventilerings under anvendelse af vandret boreteknik (GEUS).

Teknikker knyttet til vandret boreteknik:

at tilpasse boremetoden så der kan udtages uforstyrrede og intakte jordprøver i sammenhængende jordarter og forstyrrede prøver i usammenhængende jordarter (NCC).

at udvikle filterrør, som har en trækstyrke og lysning, som er egnet til installation i vandrette borer (NCC).

at undersøge anvendeligheden af filtertæppe og klarlægge filtertabet og effektiviteten som funktion af ventileringsstid (NCC).

at afprøve og udvælge teknikker som muliggør afpropning af en blindrørs strækning (NCC).

at tilpasse og afprøve geofysisk sondemåling i vandrette borer (GEUS).

at afprøve teknikker vedrørende rehabilitering / effektivisering af vandrette boreres ydeevne (NCC).

at videreudvikle og teste den vandrette boremetode og boreres udbygning på en sand- og en lerlokalitet (NCC).

at foretage en bred geokemisk, geologisk og strukturel karakteristik af en udvalgt lokalitets materiale (GEUS).

Design af ventileringsystem:

at opsamle og systematisere de indsamlede og genererede data (GEUS).

at udarbejde protokoller for design af det optimale ventileringsystem (NCC og GEUS).

at udarbejde specifikationer for et ventileringsystem, som minimum opfylder Olibranchens Miljøpuljes kvalitetsmanual (GEUS).

at udarbejde specifikationer til et monitoringssystem til efterkontrol (GEUS).

Ventilationskoncept

Konceptet for den ventilationstest af en olieforurening i de øverste jordlag, som projektet skal føre frem til at afprøve, er baseret på to vandrette borestreng. Den ene vandrette borestreng ligger dybt (et lille stykke under grundvandsspejlet) og anvendes til at presse luft ud i jorden. Da luften injiceres under grundvandsspejlet vil den pible op gennem de permeabilitetsruter, som måtte være tilstede, og derved belufte, afgasse og medrive eventuel olieforurening.

Den anden vandrette borestreng ligger over grundvandsspejlet tæt under terrænoverfladen og bruges til at suge luft ud af jorden, sådan at både den luft, som findes i jorden og den som injiceres i den dybereliggende boring, opsamles. Den forurenede afkastluft ledes gennem et behandlingsanlæg, hvor de uønskede bestanddele indfanges eller nedbrydes, før luften afledes til atmosfæren.

For at undersøge den vandrette udbredelse af injektionsluften etableres de to vandrette borer forløb parallelt, men både lodret og sideværts forskudt. Dette giver plads til at installere et monitoringssystem langs ydersiderne af forsøgsfeltet og i mellemrummet mellem de vandrette borer for luftstrømmene i jorden omkring de vandrette borer. Monitoringssystemet består af "reder" med tryksensorer og prøvetagningsudstyr i tre niveauer:

- i niveau med den dybtliggende vandrette boring,
- i dybdeintervallet mellem de to vandrette borer og
- i niveau med den øverste vandrette boring.

Hele dette system er beregnet til manuel prøvetagning og automatisk registrering af trykvariationer, som foregår i en container, hvor også kompressoren til injektionsboringen er placeret.

Ventilationskonceptet er detaljeret og illustreret i senere afsnit i denne rapport.

4 Undersøgelsens rammer

Cevent blev oprindeligt udformet med 10 delprojekter som et integreret hele, der skulle udføres på eller v.h.a. materiale fra samme lokalitet. Hensigten var, at projektet skulle udføres som et supplement til igangværende aktiviteter i en eksisterende entreprise.

I praksis viste det sig (p.g.a. problemer vedr. ansvarspådragelse) umuligt at gennemføre det samlede projekt som en udvidelse af en igangværende oprensning på én og samme lokalitet. Inden dette stod endegyldigt klart, var der gået over et år af den oprindeligt planlagte projektperiode. Herefter blev det prioriteret, at Cevent skulle gennemføre sine aktiviteter på en forurennet grund sideløbende med og til dels forud for en ny hovedentreprise. Da dette ville indebære betydeligt flere installationsomkostninger end oprindeligt påregnet besluttede projektgruppen at satse forskningsressourcerne på en lerlokalitet og opgive de planlagte undersøgelser på en supplerende sandlokalitet. Rationalet var, at der allerede er betydelig erfaring blandt danske rådgivere og entreprenører vedr. ventilering i sandede jordarter, men kun sparsom erfaring vedr. finkornede / lerede (Miljøstyrelsen, 2001 a+b).

Der blev herefter, med velvilje fra problemejeren (OM), ejeren af grunden (Københavns Kommune), som godkendte en aktivitetsplan (Rosenbom og Howardsen, 1998) og hovedentreprenøren (Erik K. Jørgensen A/S: EKJ), givet adgang til den olieforurenede grund Rantzausgade 57 i ét år. Dog skulle EKJ gennemføre sin forundersøgelse og fjerne gamle tanke og andre installationer i jorden, før grunden blev overdraget til Cevent med DHI (det daværende VKI) som pladsansvarlig. Under EKJ's indledende undersøgelser viste det sig, at grunden kunne færdigoprensnes alene ved bortgravning af tankene og fyldet i tankgravene. Der var således ikke grundlag for at gennemføre det samlede Cevent projekt på grunden.

Cevent er herefter gennemført ved delindsatser på forskellige lokaliteter. Kun delprojekterne 3 og 9 er hovedsagelig gennemført i Rantzausgade og indenfor en kortere periode end oprindeligt forudset, idet feltaktiviteten var begrænset til ét år. Den konkrete gennemførelse af aktiviteterne i Rantzausgade skete i samarbejde mellem NCC Danmark, som stod for det boringsrelaterede arbejde, og GEUS, som stod for sondemålinger, monitoringsudstyr og afprøvninger. I den praktiske udførelse af indsatsen medførte en utilstrækkelig koordination en forsinkelse af afprøvningerne til vinterhalvåret.

De praktiske vanskeligheder har indebåret en mindre bredde i forsøgene end oprindeligt planlagt, og at eksperimenterne er blevet udført på tidspunkter, hvor betingelserne ikke har været optimale p.g.a. højere grundvandsstand.

Undersøgelsens elementer

Som følge af at der blev valgt en graveløsning på forureningsproblemet på Rantzausgade 57 var det, som nævnt ovenfor, ikke relevant at gennemføre de delprojekter under Cevent, som vedrører behandling og håndtering af forurennet vand, jordluft og afkastluft på denne lokalitet. Herefter fremstod lokaliteten alene som projektets eneste mulighed for at gennemføre delprojekterne nr. 3 og 9, som kræver adgang til et areal, hvor der kan foretages installationer og karakterisering af jordens egenskaber. Delprojekterne nr. 3 og 9 er herefter søgt gennemført på lokaliteten.

Cevent's undersøgelser i Rantzausgade har ud over litteraturstudier følgende hovedelementerne:

- Beskrivelse af jordprofilen
- Ventilerbarhedstest
- Stabilitetstest af vandret hul
- Udtagning af intaktprøver i udgravning
- Design af airsparging og ekstraktionssystem
- Design af monitoringsnetværk
- Udvikling af monitoringssystem
- Opbygning af disse systemer
- Udvikling af prøvetagningsudstyr for intaktprøver
- Logging i vandrette boringer
- Udvikling og installation af filterstrenger
- Afprøvning af installationerne
- Undersøgelse af jordens ventilerbarhed

Generelt om vandrette boringer

Siden slutningen af 1980'erne er boreteknikken for vandret fremboring blevet udviklet til overfladenære miljørelaterede formål. Disse vandrette boringer har vist sig at være anvendelige i forbindelse med bl.a. vakuumventilering (SVE) og airsparging (USDOE, 1996), og private firmaer anvender i dag denne boreteknik (Ditch Witch, 1996). Under de rette geologiske, forureningsmæssige og logistiske forhold kan ventilation via vandrette boringer frem for de traditionelt anvendte lodrette boringer give en bedre oprensningseffekt og dermed lavere omkostninger (USEPA, 1994). Blandt de potentielle fordele ved anvendelsen af vandrette boringer er, at de:

- giver adgang til områder, som ikke er tilgængelige med lodrette boringer, såsom under bygninger og veje
- kan have større influens-zone end lodrette boringer, fordi de kan opretholde en lineær, konstant og uniform luft eller vakuum leverance til jorden/grundvandet.
- kan øge effekten af remedierings-systemet (SVE, bioventing og air sparging), fordi den vandrette borings udstrækning svarer bedre til forureningsfordelingen end en lodret borings udstrækning.
- kan orienteres på tværs af grundvandets strømningsretning, så påvirkningen af det passerende grundvand øges, f.eks. iltning ved airsparging.

Ved nogle tidligere undersøgelser er det fundet, at vandrette boringer som del af et integreret remedieringssystem bestående af boringer såvel under som over grundvandsspejlet er egnede som middel til at rense jord, poreluft og grundvand (Downs, 1996). I områder hvor grundvandsstanden varierer meget, vil anvendelsen af vandrette boringer specifikt til fjernelse af fri fase ikke være berettiget, idet beliggenheden af den fri fase kan komme til at afvige for meget fra den vandrette borings beliggenhed (USEPA, 1994).

Grundet de særlige muligheder der er knyttet til ventilering via vandrette boringer, er der sket en betydelig udvikling indenfor vandrette boremetoder og teknikker knyttet hertil.

Vandret boreteknik

De første vandrette borer blev udført under anden verdenskrig af olieindustrien. Gennem de forløbne 60 år er teknologien udviklet og forbedret meget, og siden 1980-erne er den blevet tilpasset og videreudviklet til anvendelser tæt under terrænoverfladen.

Afbøjede og vandrette borestrækninger blev oprindeligt boret som en afbøjning fra en lodret boring. Selve afbøjningen skete ved i en gentagen process at føre kiler ned i boringen, efterlade dem med en forudbestemt orientering og så bore forbi dem, hvorved boringen blev tvunget til at ændre retning. Denne tidlige teknologi var ikke egnet til anvendelse nær terrænoverfladen på grund af den ret upræcise styring og behovet for at tage udgangspunkt i en lodret boring.

Siden er afbøjnings og styringsteknologien for dybe borer udviklet meget. Bl.a. anvendes der nu indstillelige og styrbare borekroner, som drives af mudderstrømsaktiverede turbiner bag borekronen. Dette i kombination med borerigge med mulighed for skrå an boring har forbedret anvendelsesmulighederne for "vandrette" borestrækninger på større dybder, så der f.eks. nu rutinemæssigt i et par kilometers dybde bores vandrette strækninger på flere kilometer (Jones, 1999; Ovens et al., 1998).

Der er foregået en analog udvikling af boreteknologien for vandrette borestrækninger tæt under terrænoverfladen, idet der dog allerede i udgangspunktet er blevet anvendt boremaskiner med mulighed for skrå an boring. Mens der ved større opgaver, så som under boring under floder i faste bjergarter, anvendes store boremaskiner med avancerede muddersystemer, pumper, turbiner og styresystemer er der efterhånden udviklet tre principielt forskellige boreprincipper, som kan anvendes i løse eller let konsoliderede jordarter:

Boremaskiner med skærende rørkroner

En roterende rørstreng skærer sig frem i en forud fastsat retning uden afbøjning. Vandrette borestrækninger kan kun bores fra udgravninger eller ind i skrænter. Under borearbejdet skæres der en kontinuert borekerne, som i konsoliderede jordarter vil være en "intakt prøve".

Metoden er velegnet til små huldiametre i konsolideret materiale, hvor der kan bores gennem lithologiske inhomogeniteter. Der arbejdes typisk med "normal cirkulation af borevæske", hvorfor clogging af borehulsvæggen vil kunne forekomme. Også borerørets relativt fine pasform til borehullet vil kunne afstedkomme en deformation af borehulsvæggen og dermed unaturlige hydrauliske egenskaber nær hullet. Dette vil være mere udpræget for løse jordarter, men kan kompenseres delvist ved en hensigtsmæssig sammensætning af borevæsken.

Boremaskiner med gravende kroner

En rørstreng roterer sig gravende, skubber eller spuler sig frem. Vandrette borestrækninger kan etableres fra terræn, idet borestrengen kan bøjes en anelse og boreretningen kan justeres under arbejdet, sådan at der etableres krumme eller lige borestrækninger efter behov. Styringen af boreretning og dybde kan være ret præcis.

Borekronen har større diameter end borerørene og dens gravende bevægelse efterlader en uregelmæssig og antagelig deformeret borehulsvæg med unaturlige hydrauliske egenskaber. Hullets regelmæssighed og de hydrauliske egenskaber kan forbedres samtidig med at diameteren øges ved at trække en skærende "reamer" gennem hullet.

Denne boremetode skærer ikke gennem lithologiske inhomogeniteter, men skubber dem til side eller graver dem fri. Friboret materiale bringes bagud langs borestammen med den strømmende borevæske. I løse jordarter er hulstabiliteten afhængig af hensigtsmæssigt sammensat borevæske.

Boremaskiner med fortrængende kroner

En borespids drives frem af et pneumatisk eller hydraulisk hammerværk.

Anboring sker typisk fra en beskeden udgravning, men vil kunne foregå direkte fra terræn. Styrbarheden er ringe og retningen påvirkes af mindre lithologiske inhomogeniteter, mens større inhomogeniteter (sten) vil kunne standse boringen.

- Jordlagene skubbes til side (komprimeres) under etableringen af hullet.
- Borehullets deformerede væg har unaturlige hydrauliske egenskaber.
- Der fribores ikke noget af jordarten og der anvendes ikke borevæske.

Boreteknologi benyttet i dette projekt

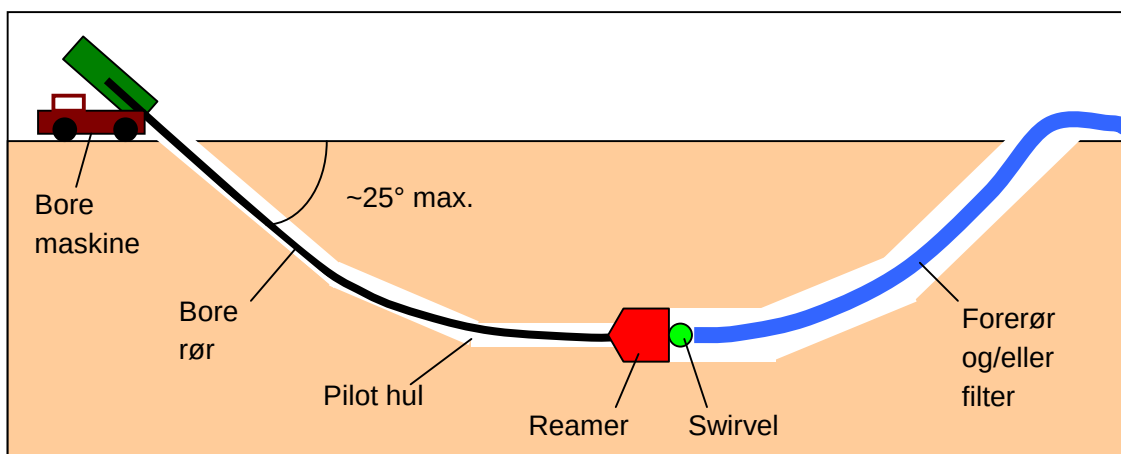
De vandrette boringer, som blev anvendt i dette projekt, blev udført med en boremaskine med gravende krone (NAVIGATOR D24 udstyr), der består af et hydraulisk drivværk med mudderpumpe. Drivværket roterer og/eller skubber borerør af stål fremad i en lav vinkel eller vandret, mens mudderstrømmen sørger for køling, smøring og fjernelse af friboret materiale. Der anvendes en lav anboringvinkel, hvor den vandrette del af borestrækning skal ligge dybere, end boremaskinen er placeret, mens vandret anboring benyttes, hvor drivværket er placeret i den ønskede dybde for den vandrette borestrækning (i en udgravning eller under en kælder). Styringen af boringens lokalisering og retning sker ved hjælp af den pladeformede borekrone, som er skråtstillet i forhold til borehullets akse. Borekronens dybde og orientering i forhold til borehullets akse kan aflæses på et udstyr, som anbringes på terræn over borefronten. Styring sker ved at orientere den skrå borekrone, så den vil glide i den ønskede retning og hen til den ønskede position ved frempresning uden rotation med drivværket. Dersom boringen leder ud i en udgravning eller skrænt, eller op gennem terrænoverfladen, kan borehullet udvides til den ønskede diameter og tværsnitsfaconen forbedres ved at trække en skærende eller kompakterende "reamer" tilbage til boremaskinen.

Boretekniske forhold så som smøring, fjernelse af friboret materiale og stabiliteten af det vandrette borehul kan forbedres med tilslag til borevandet. Sådanne "borevæsker" er enten baserede på tilsætning af bentonit-ler eller naturlige / syntetiske polymerer. Valget af borevæske er ofte afgørende for, hvor vellykket borearbejdet er, og for hvor hensigtsmæssigt boringen kommer til at fungere. Nogle nyere forbedrede typer af borevæske består af bentonit med blandede metalhydroxider eller xantham polymer systemer, som har en høj geleringsstyrke og er velegnede til at transportere løsboret materiale og til at forsegle/stabilisere borehullets væg. Der findes også specielt sammensatte borevæsker beregnet til at fjerne den først anvendte borevædske fra borehullet (hvis der for eksempel er brugt borevæske, som indeholder bentonit med blandede metalhydroxider, må der anvendes en sur polyfosfatholdig væske for at få bentoniten til at flokkulere, hvis boringen skal renses).

Polymer-baseret borevæske af Xantham typen nedbrydes angiveligt af sig selv i løbet af et stykke tid. Nedbrydningen kan fremmes ved tilsætning af natrium-hypoklorit under udbygningen af boringen. Det er påvist, at denne type borevæske forbedrer vandrette boringer, idet der er mindre tendens til reduceret permeabilitet gennem borehulsvæggen end ved anvendelse af bentonitbaseret borevæske (Driscoll, 1986).

Om etablering af en vandret boring

Til en retningsstyret vandret boring udført med den teknik, der er til rådighed, etableres der anborings- og udboringsrender og et pilothul, som i reglen udføres med en anboringsvinkel på under 25° fra vandret, Figur 1 (Wilson 1995). Når pilothullet er nået ud i udboringsrenden skiftes borekronen ud med en "reamer", der under rotation og skylning udvider og jævner borehullet, mens den trækkes tilbage til anboringsrenden. Samtidig med reamingen trækkes der i reglen en hjælpe-foring ind i borehullet, Figur 1.



Figur 1. Princip for udformning, udførelse og udbygning af vandret ventilations- og air sparging-boring.

I tilfælde hvor den vandrette boring ender blindt (uden udboringsrende) foretages reamingen og indførslen af hjælpe-foring fra anboringshullet.

Hjælpeforingen forbliver i borehullet for at lette indføringen af det udstyr, der skal installeres i boringen. Når f.eks filtre og blindrør er på plads i boringen trækkes hjælpeforingen ud, sådan at installationen efterlades på plads og i orden.

Herefter foretages der de eventuelt fornødne oprensninger, skylninger og fjernelse af uønsket borevæske.

Boringsudbygning

Filtre og blindrør til brug i en vandret boring svarer til, hvad der benyttes i lodrette boringer bort set fra at materiel, som skal anvendes i vandrette boringer, skal kunne tåle mere træk, tryk og vrid, samtidig med at fleksibiliteten bevares. Det relativt høje krav til materielets styrke skyldes at det skal kunne modstå friktionen fra borehullets væg og vriddet især i kurvede dele af borehullet.

Valget af materialer til rør og filtre afhænger af jord- og forureningstype samt af boringens krumningsradius. De meget fleksible materialer HDPE og fiberglas/epoxy er velegnede til installation i boringer med lille krumningsradius. I boringer med stor krumningsradius kan der anvendes materialer af stål, f.eks. rustfrit stål. PVC er ikke egnet til anvendelse i vandrette boringer, idet det hverken har den fornødne styrke eller fleksibilitet (Mast and Koerner, 1996).

Filtermaterialer

Traditionelle filtre med gruskastning er ikke en hensigtsmæssig filterløsning i vandrette borerer på grund af vanskeligheder med installation og fyldning. Derimod anvendes der ofte præsamlede sektioner med pålimet sand, filtre indpakket i geotekstiler eller porøse polyethylenrør. Også andre udformninger af filtersektioner (f.eks. trådomvundne filtre) er blevet anvendt i vandrette borerer. Fælles for de forskellige løsninger er, at de må udformes og installeres, så der ikke sker skade på filtersektionerne.

Der er udviklet et filterrør af porøs HDPE specielt til installation i vandrette borerer. Filtret består af polyethylenkugler som er blevet sintret svagt sammen, så de udgør et porøst rør. Permeabiliteten afhænger af den valgte kuglestørrelse. Det gennemstrømmelige areal gennem dette materiale ligger omkring 30% og dets styrke overfor sammenbrud er betydeligt større end for slidsele HDPE filtre.

Filter udformning

Et af problemerne i forbindelse med anvendelse af vandrette borerer til vakuumelekstraktion og air-sparging er at sikre, at der foregår en ensartet ydelse af luft langs hele filtersektionen. Uensartet ydelse kan skyldes variationer i jordens permeabilitet omkring filtret, uheldig installation i boreren (især dårlig afpropning af filterstrækningen) eller dårligt design af filtret. Disse problemer gælder også vandrette filterslanger installeret via grøfter.

Et almindeligt problem er, at der injiceres (tabes) eller indvindes for stor en del af luften i den del af filtret som er nærmest pumpen som følge af et for stort trykfald langs filterstrækningen. Dette kan f.eks. skyldes utilstrækkelig afpropning af filterstrækningen, at slidserne er for store eller at det åbne areal er for stort. Hvis der anvendes en ensartet slidsestørrelse gennem hele filterstrækningen er det sandsynligt at det i sig selv kan medføre uensartet fordeling af luftstrømmen. En af de vigtigste faktorer i udformning af filtre er derfor en sikring af ensartet fordeling af luftstrømmen.

Lundegard et al. (1996) eksperimenterede med en forsøgsinstallation til at teste air sparging i vandrette borerer. Det lykkedes dem at udforme filtre der afgav en ensartet fordelt luftstrøm ved at benytte en beregningsmodel ved navn TETRAD (Vinsome and Shook 1993; Lundegard and Anderson 1996). Ved at kombinere den beregnede luftstrømning med rør-/filterdimensioner og afstande mellem borerer, som var bestemt med design kriterier jævnfør bl.a. Knaebel (1981), lykkedes det også at etablere en jævnt fordelt luftafgivelse i praksis. Dette aspekt er yderligere diskuteret i Holm (1999).

Undersøgellesstrategi

M.h.p. karakterisering af en forureningssituation foretages der bl.a. tre basale valg: hvilke medier der analyseres, hvor på lokaliteten der skal foretages undersøgelser, og hvordan undersøgelserne foretages. Da forurening kan være dampformig, fast eller flydende (med densitet højere eller lavere end vand) vælges det indlysende at karakterisere den eller de relevante medier.

Valget af hvor på lokaliteten der skal foretages undersøgelser må baseres på undersøgelsens formål og krav om dokumentationsgrad. Typiske formål er:

Lokalisering af kerneområde
Afgrænsning af en forurening
Beskrivelse af forureningsniveau
Monitering af afværgeforløb
Monitering af forureningsudbredelsen
Monitering af tiltagenes afledte virkninger
Risiko vurderinger

Kravene til dokumentation er i væsentlig grad politisk bestemt og afhænger i øvrigt af den enkelte undersøgelses formål og den aktuelle fase i "sagen". Karakteristisk er der konflikt mellem niveauerne for de politiske, faglige, praktiske og økonomiske ønsker til dokumentationen.

Af faglige angrebsvinkler til fastlæggelse af dokumentationskrav er der:

- den Kognitive, baseret på sund sans, historik og erfaring,
- den Statistiske, baseret på tilfældig eller målrettet dokumentation og
- den Modelmæssige med massebalance og "historietilpasning" som verifikationsmulighed.

I praksis vælges næsten altid en Kognitiv angrebsvinkel eller en Model baseret på Kognitive antagelser. Den nævnte Statistiske tilgang er principielt at foretrække, men anvendes kun i ringe grad grundet det høje omkostningsniveau.

Ved valg af hvor der foretages prøveindsamling eller *in situ* undersøgelser, tilstræbes det, at der bliver undersøgt før, i og efter forureningen i forhold til den kognitivt fastlagte transportretning, subsidiært tidsmæssigt "før", under og efter den påvirkning der skal undersøges.

Valg af prøvetagningsstrategi (prøveindsamlingssteder, *in situ* analysesteder og analysehyppighed) er behandlet i diverse vejledninger, bla. Vejledning om Prøvetagning og Analyse af Jord, No. 13, 1998, fra Miljøstyrelsen, Miljørigtig oprensning af forurenede jord og grundvand (LIFE projekt, Banestyrelsen), Oliebranchens Miljøpuljes Kvalitetsmanual, 1997. Amternes Videncenter har i Teknik og Administration Nr. 5, 1999, beskrevet amternes kortlægnings- og registreringspraksis. Herudover er principper for og praktisk prøvetagning kommenteret og diskuteret i mange rapporter og publikationer med andet hovedemne.

Generelt om prøvetagning af jord

Generelt skal "punktformige" jordprøver være præcist lokaliserede i tre dimensioner og de skal fuldt ud og udelukkende indeholde det relevante materiale fra indsamlingspunktet. Dette indebærer at materialet skal være egnet til kvantitative analyser.

Formål (Jordprøver)	Minimums krav til jordprøver (undersøgelserne kan altid udføres på materiale udtaget efter højere krav)
Kemiske analyser, fast stof	Sneglede / omrørte prøver
Kemiske analyser, flydende og opløste stoffer	Indpressede rør
Kemiske analyser, incl. volatiler	Indpressede forseglede rør
Jordens bestanddele	Sneglede / omrørte prøver
Jordens struktur	Orienterede friktionsfrit indpressede rør eller fritgravet/-boret materiale
Styrke- og strømningsanalyser	Orienterede friktionsfrit indpressede rør eller fritgravet/-boret materiale
Mikrobiologiske undersøgelser	Sneglede eller rammede prøver (højt hygi- ejneniveau for udstyret)

5 Lokaliteten "Rantzausgade 57"

Rantzausgade 57 er en af grundene i et forløb gennem København, som i en lang årrække har været reserveret m.h.p. etablering af en banelinie. I reservationsperioden har området været udlejet til erhvervsformål - herunder mange værksteder og (frem til midten af 70-erne) en benzinstation. I 1997 overtog Københavns Kommunes Tekniske Forvaltning området for at gøre arealet til et grønt område med cykelsti. Derfor rykkede erhvervsvirksomhederne ud af området og alle bygninger blev fjernet i foråret 1998. Oliebranchens Miljøpulje var i forbindelse med overdragelsen til kommunen ansvarlig for at rydde op efter en olieforurening på den grund, hvor der havde været en benzinstation.

Entreprisen for oprydningen var givet til Erik K. Jørgensen A/S (EKJ), som efter aftale med de involverede parthavere velvilligt udsatte afslutningen af opgaven et år, sådan at det blev muligt at gennemføre Cevent-projektet på lokaliteten. Det var, som nævnt ovenfor, på dette tidspunkt forventningen blandt Cevent partnerne, at hele projektet med alle dets aspekter og delprojekter kunne gennemføres på Rantzausgade lokaliteten i forbindelse med en *in situ* afværgе.

EKJ gennemførte en afgrænsende forureningsundersøgelse (i 1997), hvori det blev konkluderet, at forureningen var mindre omfangsrig end frygtet. Der blev derfor valgt en graveløsning som afværgе, hvilken indebar, at de nedgravede tanke straks skulle fjernes. Cevent havde herefter lokaliteten til rådighed et år (primo 98 – primo 99) inden den skulle færdigmeldes efter oprensningen. Da der efter fjernelsen af tankene ikke var nævneværdig forurening tilbage, var lokaliteten irrelevant for undersøgelserne i de fleste af Cevents delprojekter og partnere. Da det imidlertid var den eneste lokalitet vi kunne få adgang til (m.h.p. installation af vandrette borer og fysiske tests) og da det, som prioriteret under "Rammer" (side 7), er en "lerlokalitet", blev det fastholdt at gennemføre delprojekterne 3 og 9 vedrørende de fysiske eksperimenter og egenskaber på lokaliteten Rantzausgade 57.

6 Forundersøgelser på lokaliteten

I januar 1998 blev der på baggrund af en projektbeskrivelse udformet af EKJ og GEUS (Rosenbom og Howardsen, 1998) indgået en aftale med Københavns Kommune om ret til at disponere over Københavns Kommunes grund, Rantzausgade 57. Projektet var på daværende tidspunkt beskrevet i 4 dele (Rosenbom og Howardsen, 1998) samt en karakteriseringsdel af jordarternes egenskaber:

- Udgravning af den nyeste/sydligste tankgrav. Jordarten karakteriseres og evt. sprækkesystem kortlægges.
- Etablering af et kombineret airsparging/vakuumventileringsanlæg i form af to specialindrettede vandrette borer nord for den ældste tankgrav.
- Etablering af monitoringsboringer på lokaliteten til overvågning af forureningsniveauet samt potentialet.
- Etablering af en driftsenhed og monitoringsystem bestående af en container med vakuumpumpe og kompressor, overvågningsudstyr og bio-rensningsanlæg til oppumpet luft samt slanger, rør og kabler mellem borer og container.
- Karakterisering af jordartsparemetre.

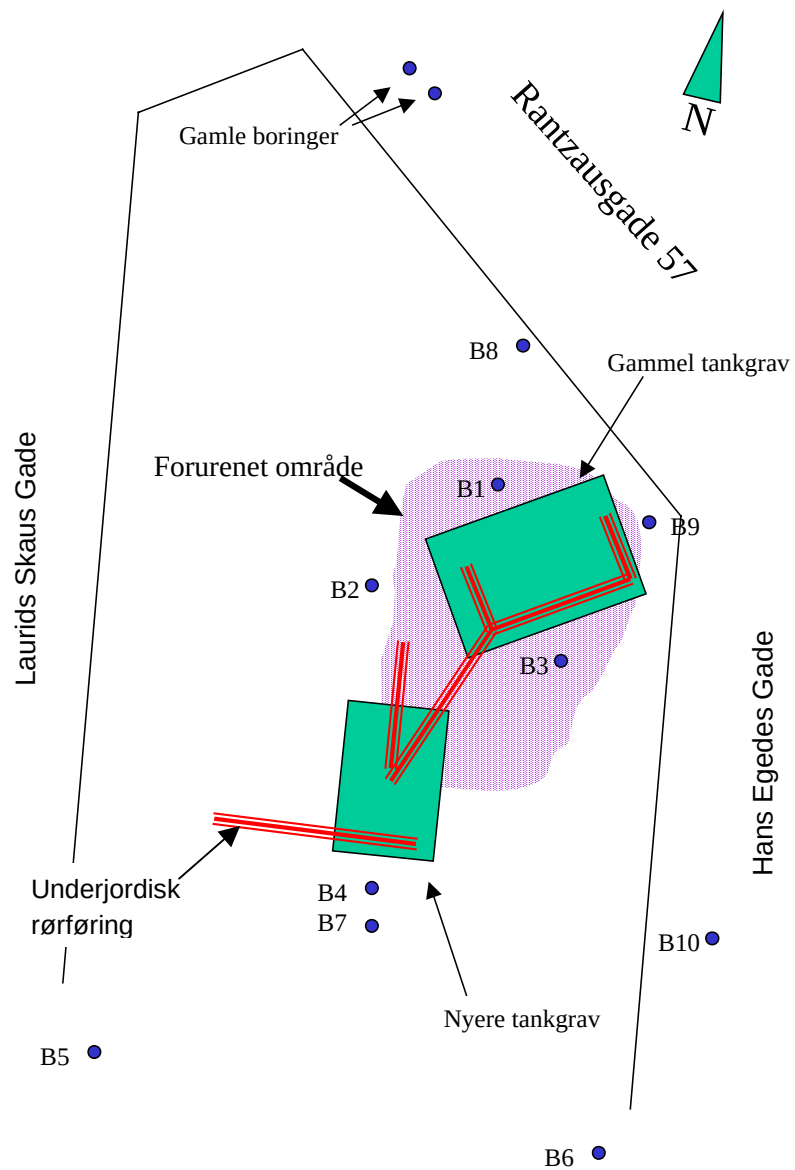
En af forudsætningerne for at Cevent-projektets aktiviteter på grunden Rantzausgade 57 kunne iværksættes var, at der var foretaget en Afgrænsende Forundersøgelse. Denne blev udført af Oliebranchens Miljøpulje's rådgiver Erik K. Jørgensen A/S (1997).

Forundersøgelsen indebar bl.a., at der blev boret 10 korte borer til mellem 3,5 og 9 m's dybde og undersøgt for kemiske forureningsselementer. Boringerne viste at jorden består af fast moræneler som bliver hårdere i sydlig retning. Moræneleret indeholder i nogle af boringerne tynde sandstriber som er svagt vandførende. Borer uden sandstriber var tørre ned til slutdybden (5 m). Tidligere udførte borer i Rantzausgade har vist, at toppen af det primære grundvandsmagasin, kalklagene, ligger ca. 15 m nede.

Undersøgelserne viste også, at kun et begrænset volumen centreret omkring den yngste tankgrav var svagt forurenat, og at forureningen kun var trængt nogle få meter frem mod øst.

På dette grundlag blev det besluttet at vælge en graveløsning, som blev effektueret før grunden med den åbne udgravning blev midlertidigt overdraget til Cevent projektet.

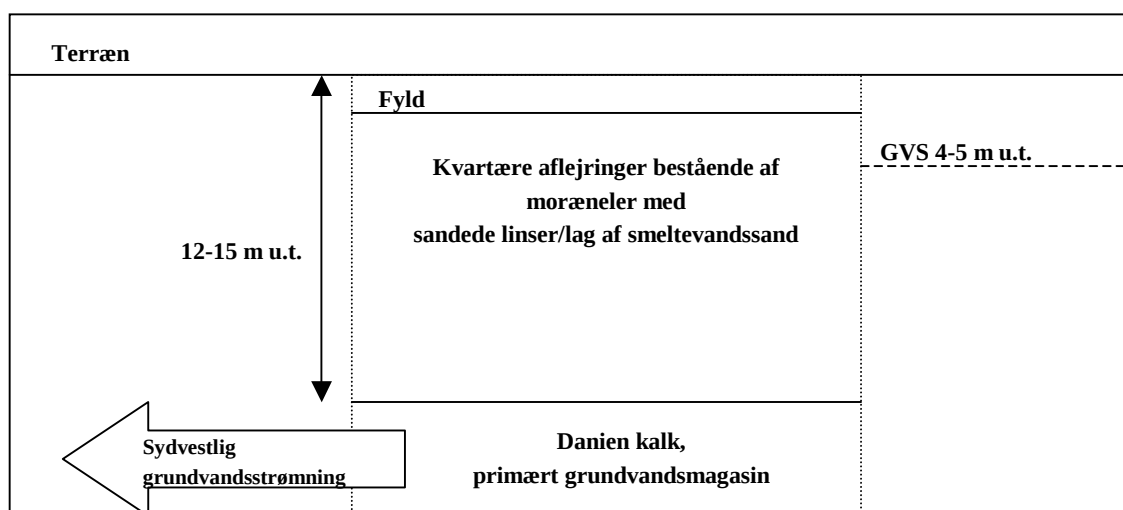
Af disse grunde valgte projektet at undlade de direkte forureningsafhængige undersøgelser i de ovenstående punkter på Rantzausgade lokaliteten. En anden følgevirkning var at placeringen af de vandrette borer blev ændret, så de anboede den nyeste tankgrav fra syd. De væsentligste forhold på Rantzausgadelokaliteten er skitseret efter Oliebranchens Miljøpulje (1997) i Figur 2.



Figur 2. Skitse over grunden Rantzausgade 57, tankanlæggene, forundersøgelsesboringerne (prikker med "B"-numre), rørkanaler og forureningsudbredelsen. Efter Oliebranchens Miljøpulje, 1997.

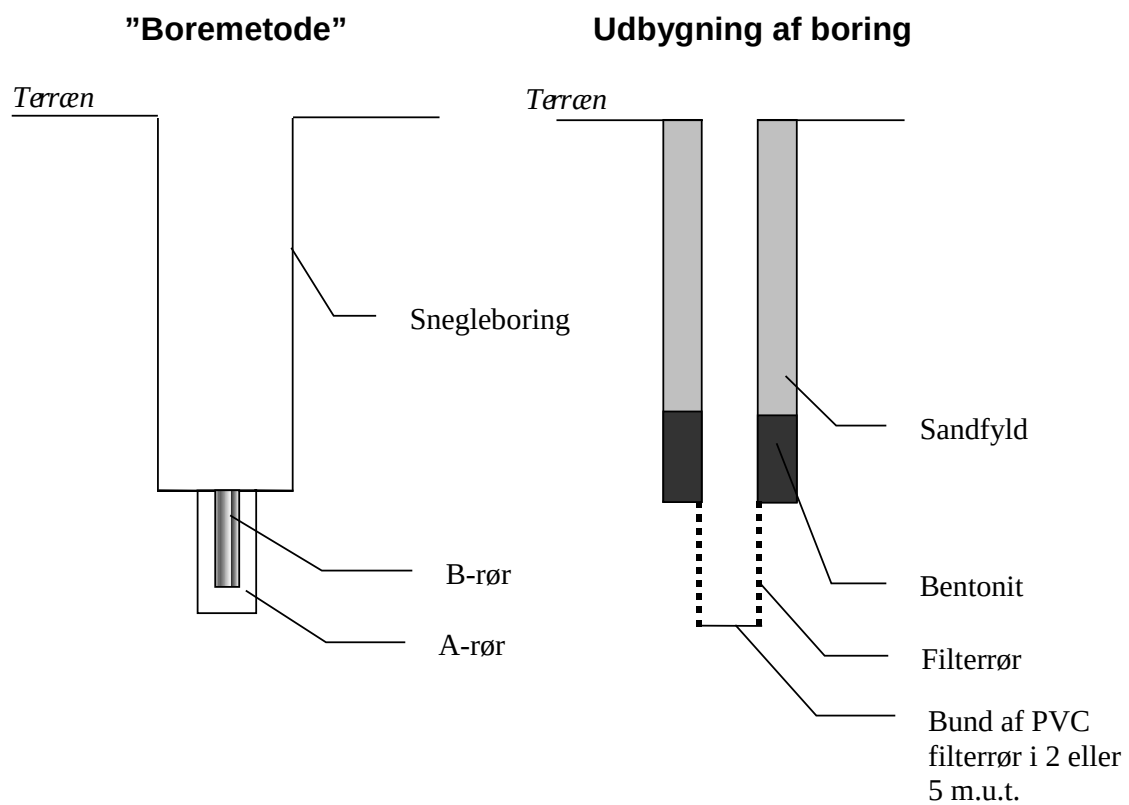
Ventilerbarhedstest

Der blev, på basis af generel information om lokalitetens geologi og grundvandsforhold som beskrevet i Oliebranchens Miljøpulje, 1997: "Afgrænsende forureningsundersøgelse. Rantzausgade 57, 2200 København N. OM-sag nr. 2200-20-569", Figur 3, etableret fire boringer i nordenden af grunden (A22, A25, A72 og A75) med henblik på at teste jordens (morænelerets) ventilerbarhed, Figur 4. Disse boringer var beregnede til siden hen at skulle indgå i det monitoringssystem, som skulle etableres omkring to vandrette ventiltionsboringer gennem den olieforurenede jord, og som skulle bores fra nord mod syd ind i den nyeste tankgrav. Denne lokalisering af de vandrette boringer blev siden ændret da det, som omtalt tidligere, stod klart at der ikke var den forurening nord for tankgravene, som det samlede Cevent-projekt skulle have beskæftiget sig med.



Figur 3. Principskitse af de geologiske forhold og grundvandsforhold baseret på forundersøgelserne i Rantzausgade 57.

De to af boringerne blev afsluttet i den umættede og de to andre i den mættede zone. Boringerne er navngivet efter systemet Aij, hvor A er et forundersøgelsesborested (terminologi jævnfør Rosenbom og Howardsen, 1998), "i" identificerer en "rede" af forundersøgelsesboringer (indeholdende boringer filtersat i de to dybder 2 og 5 m.u.t.) og "j" er dybden af boringen i m u.t. Under borearbejdet blev der udtaget omrørte prøver, som er beskrevet i Tabel 1. I bunden af boringerne blev der udtaget først en B-rørs prøve og derefter i samme dybdeinterval en A-rørs prøve, Figur 4. Denne afslutning af boringerne blev valgt i et forsøg på at reducere eller undgå udsmering af moræneleret i borigsvæggen og dermed en reduceret hydraulisk ledningsevne langs filterstrækningen. Forventningen var at det hul, som efterlades efter udtagningen af B-rørsprøven, ville tillade moræneleret at ekspandere indad under udtagningen af den efterfølgende A-rørsprøve sådan at materialet omkring A-røret ikke blev kompakteret. Denne metode er kendt som en "dobbelt Shelby tube" (D'Astous et al., 1989).

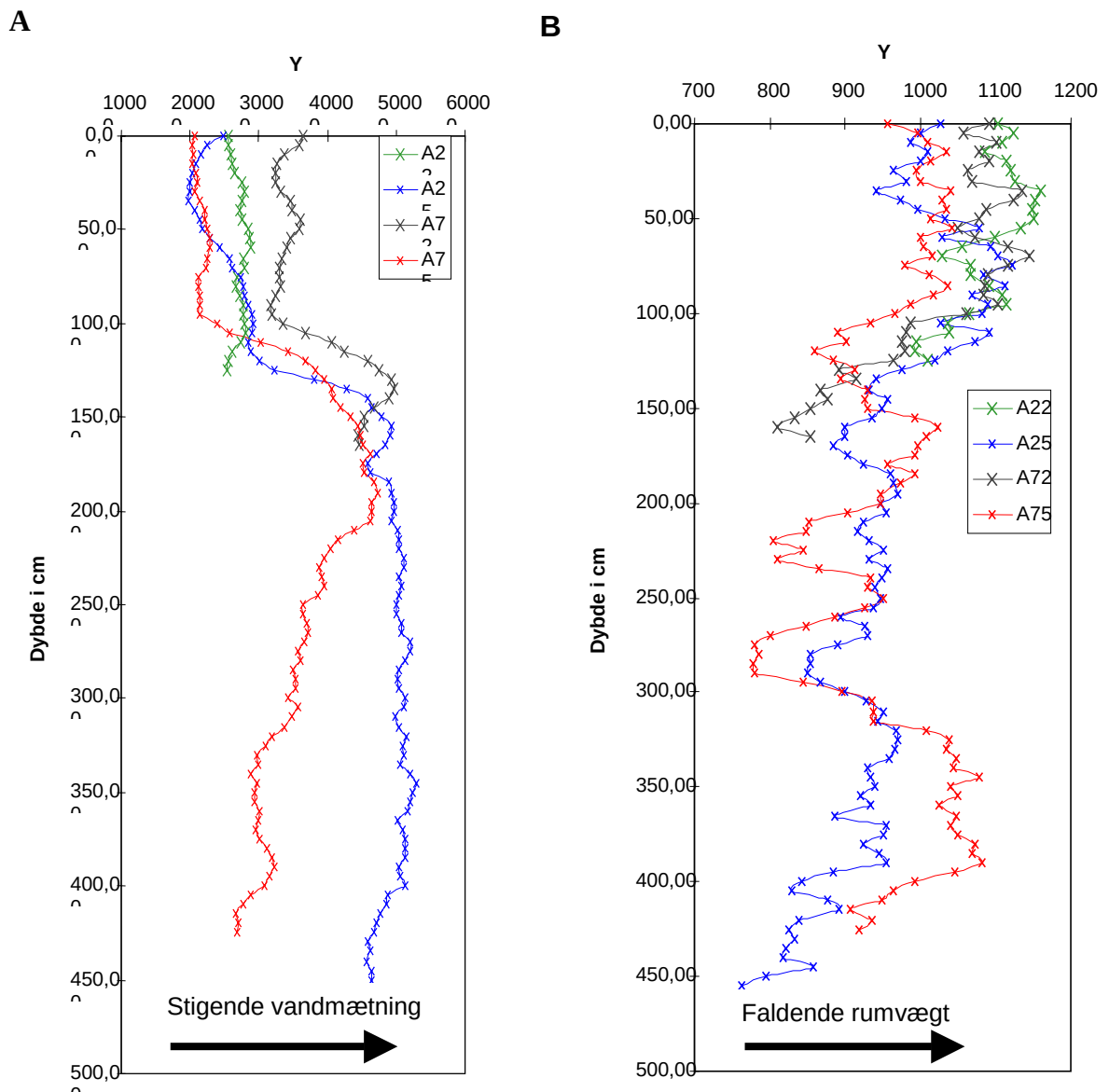


Figur 4. Principskitse af forundersøgelsesboringernes boremetode og udbygning.

Boring	Prøve type	Dybde [m.u.t.]	Prøve nr.	Beskrivelse <i>ML = moræneler</i>
A72	Omrørte	0,50	1	Fyld, sandet, svagt gruset, sv. humusholdigt, kalkholdigt, mørkebrunt, løst, tørt.
		1,00	2	Ler, stærkt siltet, svagt sandet, meget mørkebrunt 3/3, svagt kalkholdigt, blødt, let fugtigt.
		1,50	3	Sandet ML, <u>svagt</u> flammet med overvejende lys gulbrun 6/4 + brun-gul 6/98 + 5 % meget mørkebrunt (evt. forurening), svagt kalkholdigt, blødt, fugtigt.
		1,75	4	Do.
		2,00	5	ML med kalkindslag, stærkt sandet, brunt, vådt.
	Intakt (B-rør)	1,75-1,87		Do.
	Prøve fra A-rør		Prøven tabt	
A75	Omrørte	0,50	6	Fyld, stenet
		1,00	7	Do.
		1,50	8	ML med kalkindslag, gråt
		2,00	9	ML med kalkindslag, vådt, brunt
		2,50	10	ML med kalkindslag, vådt, brunt, meget løst
		3,00	11	ML, meget hård, vådt, stenet, brunt
		3,50	12	Do.
		4,00	13	ML, stærkt stenet, hård, gråt/brunt
		4,50	14	Do.
	Intakt (B-rør)	4,79-4,87		
	Prøve fra A-rør		til 4,97	
A25	Omrørte	0,50	15	Fyld
		1,00	16	Muld
		1,50	17	ML med kalkindslag, brunt, enkelte sten.
		2,00	18	ML, kalkrigt, brunt, enkelte sten
		2,50	19	ML, mindre kalk, brunt/gråt, enkelte sten, vådt. Fine sandstriber. Kraftig indstrømning af vand i boring.
		3,00	20	ML, kalkrigt, gråt, vådt. Fine sandstriber. Kraftig indstrømning af vand i boring.
		3,50	21	Do.
		4,00	22	Do.
		4,50	23	Do.
	Intakte (B-rør)	4,9-5,02		
	Prøve fra A-rør		til 5,10	
A22	Omrørte	0,50	24	Fyld
		1,00	25	Fyld
		1,50	26	ML med kalkindslag, stærkt sandet, brunt
		2,00	27	Do.
	Intakte (B-rør)	1,75-1,87		
	Prøve fra A-rør		Prøven tabt.	

Tabel 1. Beskrivelse af jordprøver fra forundersøgelses borerne A22, A25, A72, A75. Data i tabellen viser at vandspejlet i vinterhalvåret. lå ca. 2.5 m.u.t..

To uger efter etableringen af borerne blev det antaget at grundvandsstanden i borerne var reetableret; sådan at de var klar til at der kunne optages logs for vandmætning og rumvægt, Figur 5.



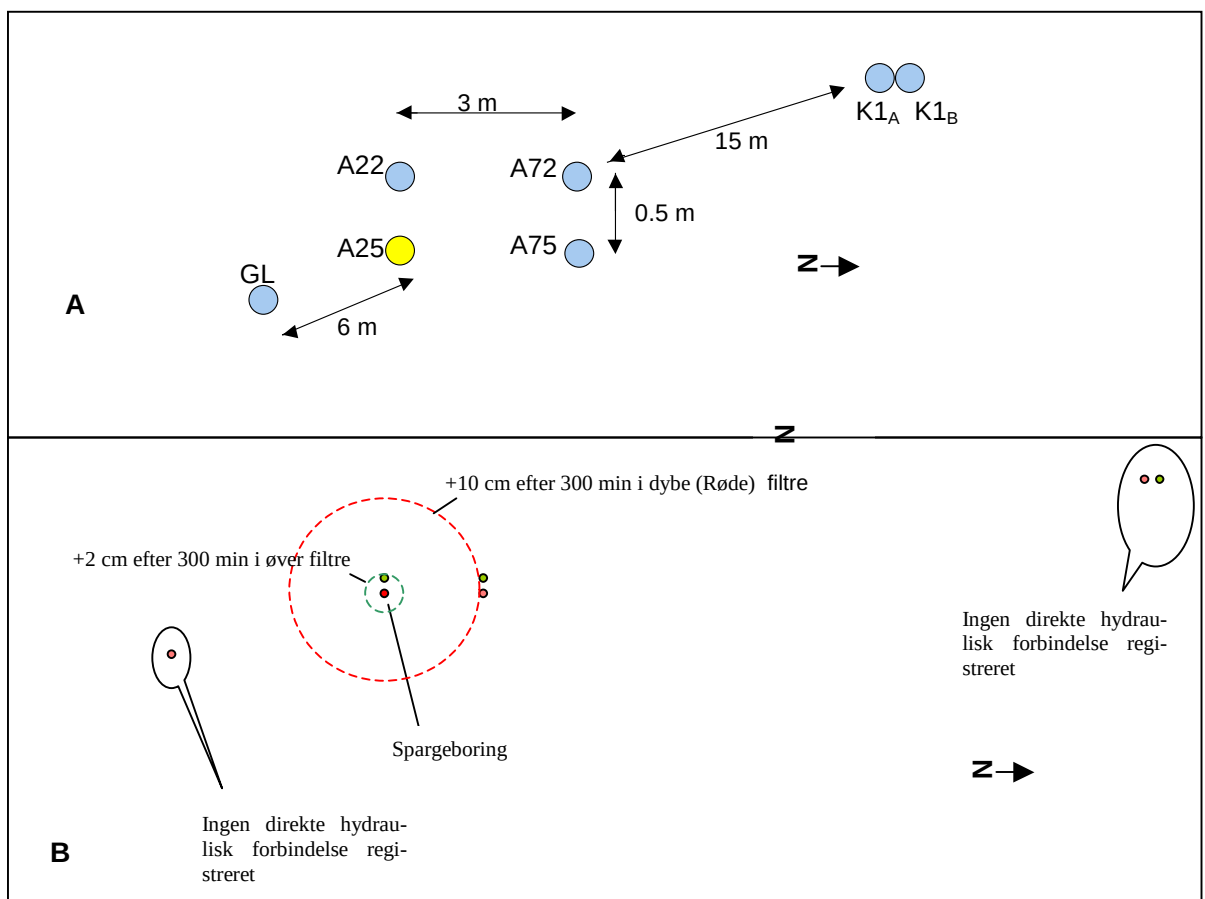
Figur 5. Vandmætningslogs (A) og Rumvægtslogs (B) fra forundersøgelingsboringerne A22, A25, A72 og A75, februar 1998. Den angivne "Y-værdi" på x-aksen viser "counts pr. minut". For neutronloggen stiger tælle-tallet med vandindholdet mens stigende tælle-tal for densitetsloggen viser faldende rumvægt. Loggene viser sammenhængende høj vandmætning i matrix og lav densitet i ca. 1,5m's dybde. I fyldlaget er densiteten lav på grund af løs pakning af organisk materiale. I dybden mellem 3 og 4 m.u.t. er morænen's densitet relativt lav, hvilket antagelig skyldes at der er vandfyldte makroporer. Samhørende kurver har samme farve.

Af Figur 5 ses at vandmætningen stiger markant i matrix fra 1-1,5 m u.t., svarende til overgangen fra fyld til moræneler. Der er således en høj-mættet kapillær zone i moræneleret over det frie grundvandsspejl, som blev fundet under borearbejdet i 2,5 m's dybde. Den

højkapillære zone brydes delvist ved overgangen til det løsere Fyldlag. Densitetsloggen viser, at konsolideringsgraden generelt stiger nedad, men at der er en lidt lavere densitet i intervallet 3-4 m.u.t.. Da der ikke var kortlagt nogen forurening i området med testboringerne, blev der kun foretaget slugtest og air-sparging test (ikke vakuumtest).

Slugtest

Disse tests blev gennemført ved momentant at hælde en vandslug ned i de filtersatte boringer (filterstrækningerne var 0,25 m). Herved steg vandstanden hhv. 12 og 18 cm i boringerne A25 og A75 når der blev tilført 4 og 6 liter respektive. Afsænkningen under den efterfølgende reetablering var generelt langsom og foregik tre gange langsommere i A75 end i A25. I boringerne A22 og A72, hvor reetableringen var hurtigere er de beregnede hydrauliske ledningsevner på henholdsvis $3,24 \cdot 10^{-5}$ m/s og $8,43 \cdot 10^{-6}$ m/s (Hvorslev's metode). På baggrund af disse resultater og tilstedeværelsen af sandslirer i boring A25 blev det valgt at airsparge i denne og monitorere vandstandsvariationer i de øvrige forundersøgelsesboringer samt boringerne GL (beliggende på sydsiden umiddelbart ud for midten af den ældste tankgrav) og K1 (filter A og B, beliggende på færdselshelle i Rantzausgade), Figur 6. Valget af boring A25 til airsparging er yderligere begrundet i at det er den af de to dybe boringer, som når ned under grundvandsspejlet, hvor reetableringen efter tilførslen af sluggen er hurtigst, og at det er den boring, hvor der blev konstateret den største vandtilstrømning under borearbejdet.



Figur 6. A). Skitse over de relative beliggenheder af de boringer, som blev anvendt under airspargingtesten. Sparge-boringen er vist med gult. B). Konturer for det inducerede potentiale efter 300 min (Figurtekst fortsættes på næste side).

Figur 6. Figurtekst fortsat:

Boring K1 (DGU.nr. 201.4673) er filtersat i to niveauer:

A 6-9 m.u.t. i sekundært grundvandsmagasin bestående af smeltevandssand.

B 12.5-15.5 m.u.t. i primært grundvandsmagasin bestående af kalk/smeltevandssand.

Boring GL (tidl. Forurenings undersøgelsesboring B3, Figur 2,) er filtersat mellem 4 og 6 m u.t. i moræneler med inklusioner af smeltevandssand.

Borejournal samt rumvægt- og vandmætningslogs for borerne K1 og GL (samt boring B7) findes i Bilag 1.

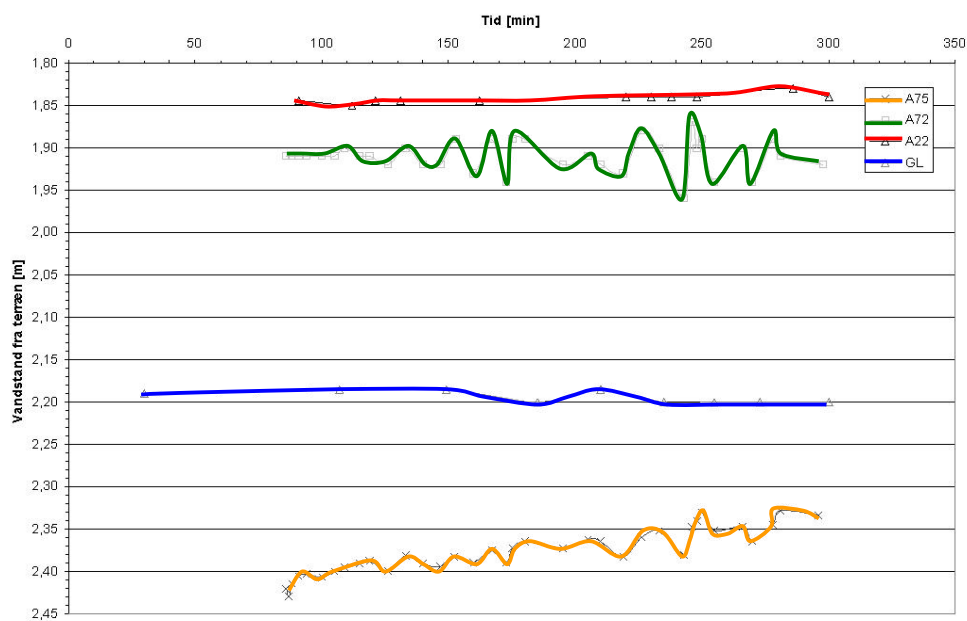
Luftinjektionstest

Formålet med at injicere luft i A25 var at belyse størrelsen af influensradius. Vandstanden i boring A25 stod i udgangspunktet op over filterniveauet, sådan at luften ikke havde mulighed for umiddelbart at strømme ud i jorden. De første forsøg blev gennemført ved at injicere direkte i borerøret med den aktuelle vandstand i dette.

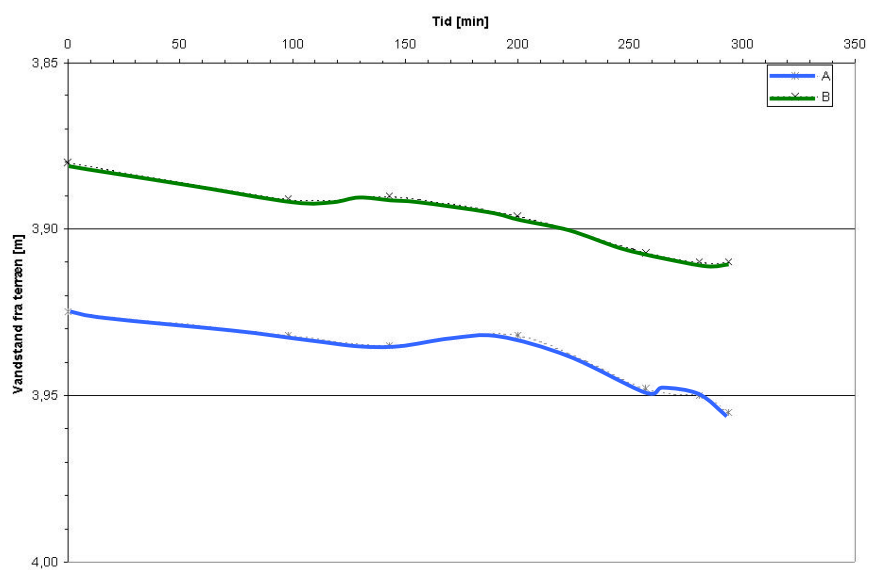
Det viste sig, at det vand som stod i boringen over filterniveauet kun meget langsomt blev trykket ud i jorden, og at luften derfor aldrig nåede ud i jorden under de indledende forsøg, selvom vi faldt for fristelsen til at øge injektionstrykket, endda så meget (2,5 bar, og altså betænkeligt tæt på det mulige hydrauliske fraktureringstryk) at der til sidst opstod luftlækage gennem bentonitafpropningen, da luften fik trykket vandet ned under filterets overkant. Som en første fase af luftinjektionsforsøget blev boringen herefter tømt for vand. Airsparging forsøget blev herefter udført ved 1,8 bar og svag lækage gennem bentonitproppen. En bedre afpropning end den aktuelt benyttede er klart nødvendig. Danske rådgivere der udfører ventilerings-tests fra borer i moræneler udbygger således ofte testboringen med en prop af fiberbeton.

Resultaterne af monitoringen under airsparging forsøget er vist i Figur 7 og 8, som viser at vandstanden stiger i boring A22 og A75, falder i filtrene i boring GL samt A og B i boring K1, mens den fluktuerer omkring en middelværdi i boring A72. Det er lagt til grund at de manuelle målinger er bedre end +/- 0,5 cm på baggrund af den svage jævne udvikling i A22. Udviklingen er synkron og varierer proportionalt i filtrene A72 og A75, sådan at vandstanden i filtrene kan anses for influeret af trykopbygningen i matrix omkring A25 når påvirkningen overstiger 10 cm efter 5 timers injektion. Med dette udgangspunkt er influensradius i matrix 6 m for de dybe filtre i Rantzausgade 57, hvilket er væsentligt mere end de knapt 2 m som blev fundet i Haslev (Miljøstyrelsen, 2001b).

Som beskrevet i Tabel 1 er der fundet sandstriber i den filtersatte del af boring A25 (men ikke i A75). Strømningskontakt med luftgennembrud gennem disse sandstriber kan være årsagen til, at vandstanden falder i boring K1's filtre (~18 m væk) og lidt i boring GL (~6m væk), samtidig med at der presses vand ind i borerne A75 og A22, som står i lavpermeabel lermatrix. Med andre ord påvirker denne airsparging volumer vandret mere end lodret og influensradius langs preferentielle strømningsruter kan estimeres til mere end 18m i nordlig retning.



Figur 7. Variationer i vandstanden i forundersøgelsesboring A75, A72 (målt med transducere) og A22 samt boring GL (målt manuelt) under luftinjektion i boring A25. Se lokalisering i figur 6 A og B.

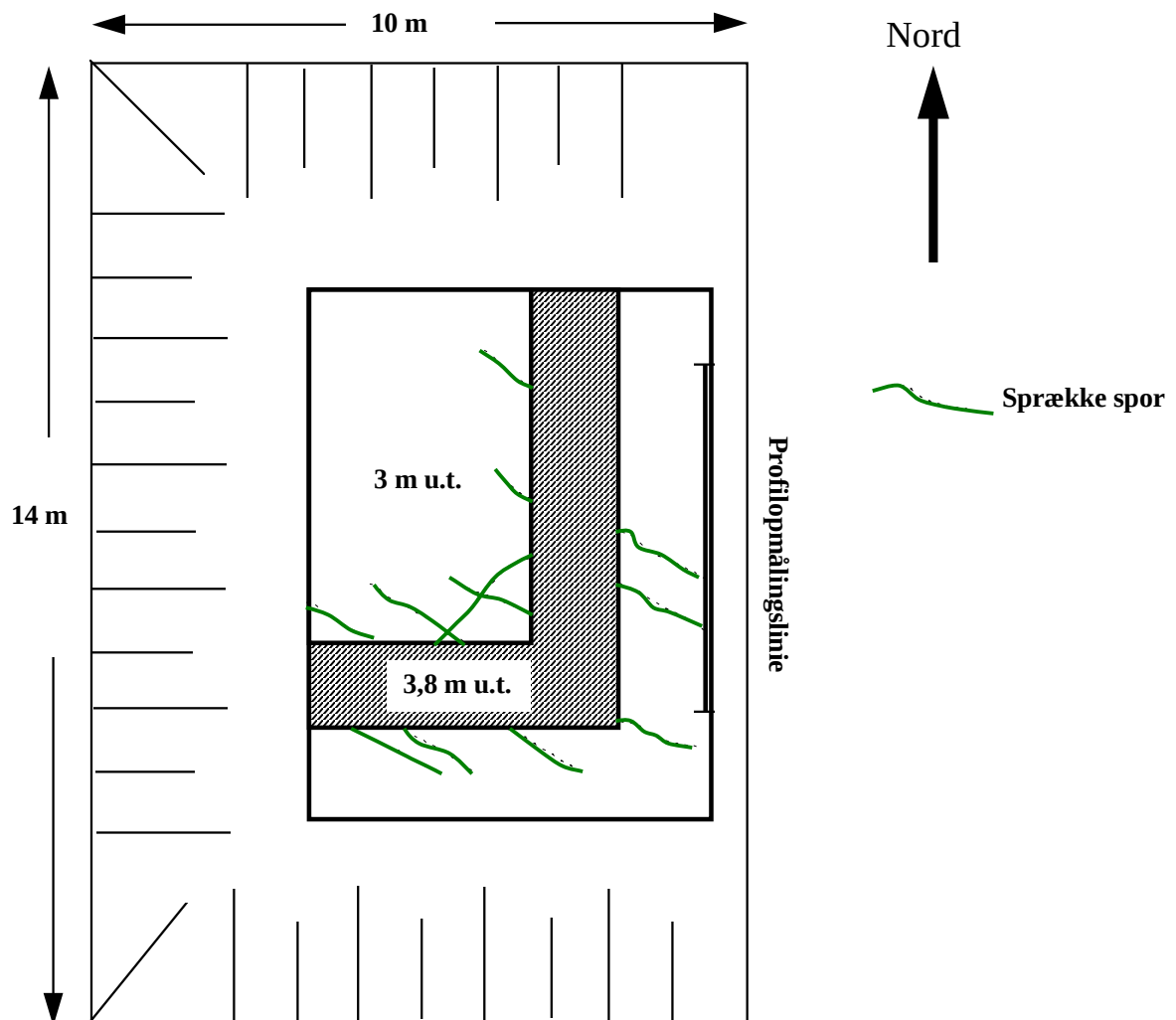


Figur 8. Variationer i vandstanden i boring K1 filter A og B under luftinjektion i boring A25. Se lokalisering i figur 6 A og B.

Opmålinger og beskrivelser i tankgraven

I tilgift til beskrivelsen af jordarterne i borerne er profilet på lokaliteten blevet beskrevet, samt sprækkesystemer og redoxzoner kortlagt i tankgraven. Til dette formål blev to af tankgravens vægge og en del af bunden oprenset og afrettet med henblik på visuel geologisk beskrivelse, efter at den var blevet tømt for forurenet materiale. Den meget præcise beskrivelse af især moræneleret i tankgraven udgjorde grundlaget for den specifikke opbygningen af forsøgsinstallationerne i jorden.

Tankgraven, der var på 10m·14m, blev uddybet i trin ned til 3,8 m u.t. og væggene mod syd og øst afrettede, så de var lodrette, Figur 9.

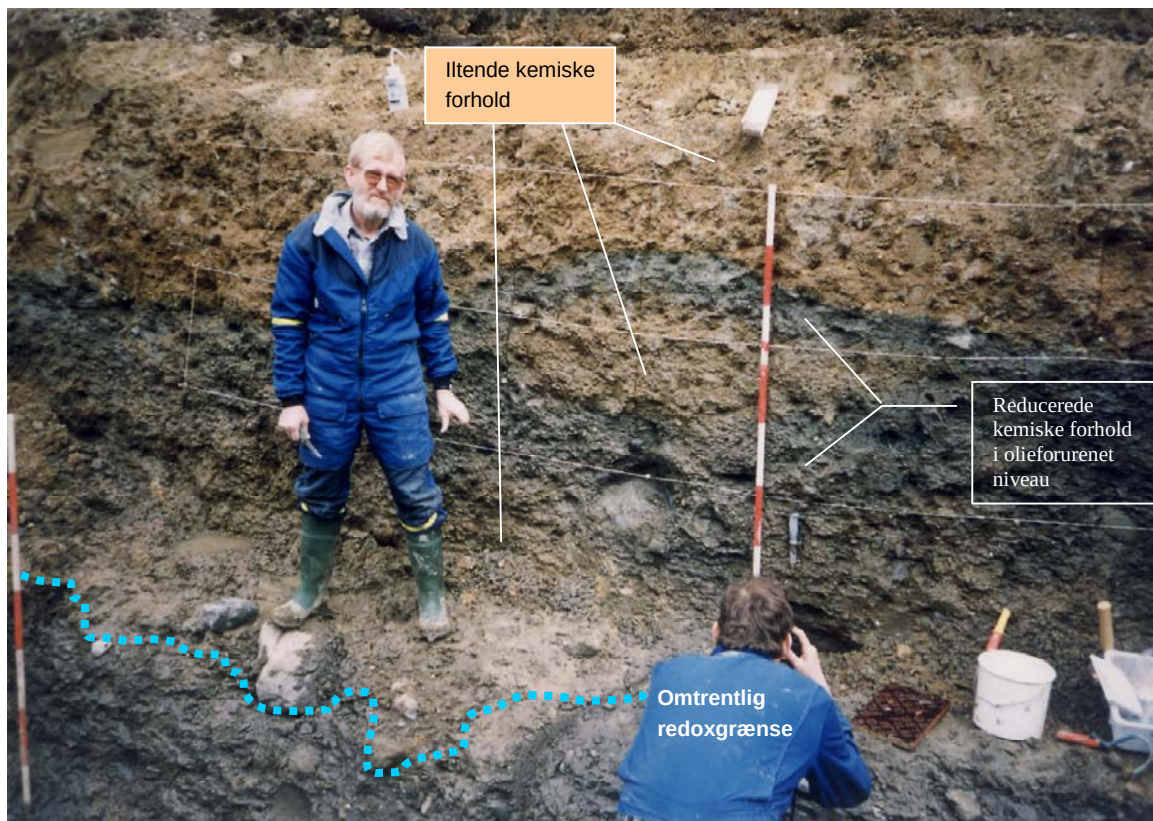


Figur 9. Plan over udgravningen med indtegnede sprækker i de vandrette terrasser. Blotningerne blev skrabet rene, og de enkelte sprækker blev gravet fri med simple hjælpemidler.

For at kunne beskrive sprækkernes forløb i tre dimensioner blev de undersøgt såvel i gravens bund og terrasseplaner som gravens øst- og sydvægge (som stod vinkelret på hinanden). I forbindelse med gravearbejde kan der opstå overfladiske kunstige sprækker i en udgravning. For ikke at inddrage kunstige sprækker i beskrivelsen er der i tvivlstilfælde set

bort fra sprækker, som ikke havde tegn på, at der er foregået en form for strømning, transport eller reaktion.

I praksis blev der trukket og indmålt nogle linier langs de profiler, som skulle opmåles, hvorefter alle observationer blev registreret og sprækker indmålt i forhold til linierne, Figur 10. Udfra de indsamlede data blev der lavet en detaljeret beskrivelse af sprækkesystemet.



Figur 10. Beskrivelse af moræneler og sprækkeopmåling i delvist forurenet morænelersprofil. Figuren viser tankgravens østvæg med iltet, brunligt moræneler i den øverste trediedel af synsfeltet, moræneler med reducerende forhold i den nederste trediedel. Midten af billedet viser en zone med vekslende farver som skyldes at der er reducerende forhold i områder hvor der er restforurening. Bemærk også de spredte store sten og de vandrette referencelinier (snore) der skal støtte opmålingen.

Opmålingen, hvis resultat summeres i det følgende, blev foretaget som grundlag for detailudformningen af ventileringsanlægget.

Lithologisk beskrivelse:

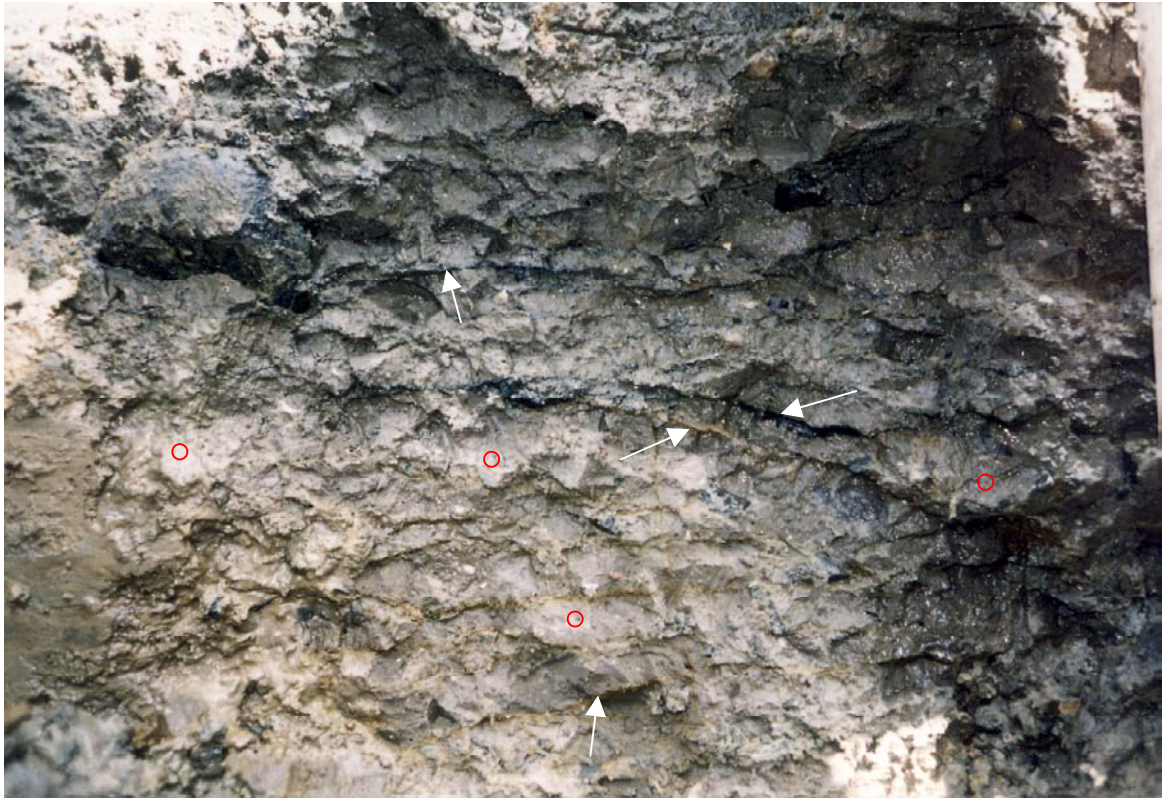
0 -1 m u.t.. Blandet jordfyld med underordnet indhold af murbrokker, asfaltrester, træ og muld.

1 - 3,2 m u.t.. Spættet lys grå-brunt, sandet moræneler, som bliver mere gråligt nedad (delvist oxideret zone). Mange vandrette sprækker som gør moræneleret nærmest flaget / lagdelt.

I en horisont imellem 3,2 og 3,7 m u.t indeholder moræneleret mange sandslirer, sten og blokke med diametre op til 40 cm. Stenene udgør sandsynligvis en glacial brolægning med indslag af smeltevandssand, sådan som den kendes fra store dele af det østlige Køben-

havn. Matrix er stærkt kalkholdig og farven er mørk olivengrå (farveskift ved 3,2 m u.t. svarende til toppen af den reducerede zone, som i forundersøgelingsboringerne lå mellem 3 og 4 m u.t.; jævnfør Oliebranchens Miljøpulje, 1997).

Mellem ca. 2,5 og 3,2 m u.t. var moræneleret stærkt vandmættet, og der piblede vand ud langs sprækkerne. I dette interval var der også en forurenet horisont med en kraftig lugt af olie. Sten og en del sprækkeplaner havde tydelige blåsorte hinder af olieprodukter, Figur 11.



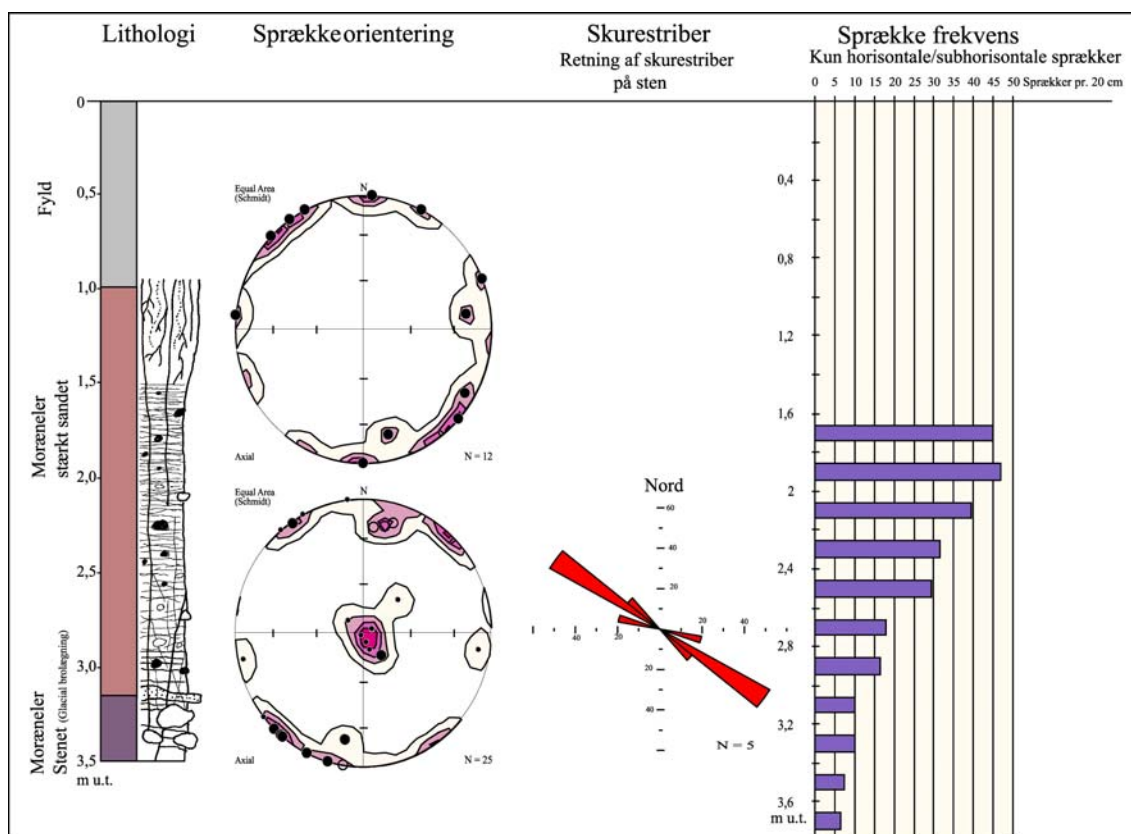
Figur 11. Detalje af tankgravens væg, som bl.a. udgøres af sprækker, som er åbnede ud mod betragteren (ses som glatte flader, enkelte fremhævede med rød cirkel). Her ud over er der bl.a. sprækker (eksempler angivet med pile) i den blålige del af moræneleret med reducerede forhold som følge af bakteriel omsætning af olieforurening. Langs sprækkerne er der sket en iltning (rustfarvning, også eksempler med pile). Dette viser, at der er sket en naturlig ilttilførsel gennem disse sprækker, og at dette har medført naturlig nedbrydning af olieforureningen. På sten og nogle sprækkeflader er der blåsorte hinder af olieprodukter. Enten er der ikke sket transport af ilt langs disse sprækker eller olietilførslen til/via sprækken har stadig været aktiv.

Sprækkebeskrivelse:

I den aller øverste del af moræneleret (ca. 1 m u.t.) er størstedelen af sprækkerne lodrette og har en tilfældig orientering. Disse sprækker tolkes at være forårsagede af udtørring. I sprækkeplanerne er der stedvist "bioporer" (orme- eller rodhuller)..

Fra ca. 1,5 til 3,6 m u.t. er moræneleret tæt og næsten vandret opsprækket (svag hældende tendens mod nordvest), hvilket giver intervallet skiferagtig lagdeling. Overfladerne på sprækkeplanerne er meget ru og irregulære, og de har en tydeligt rustfarvet overfladebelægning (Fe-oxider). Afstanden imellem de enkelte vandrette sprækker stiger gradvist med dybden fra ca. 4 mm 1,6 m u.t. til over 3 cm 3,5 m u.t. og den enkelte sprække kan følges op til 0,5 m i profilet.

Disse vandrette sprækker kan enten være skabt i forbindelse med en vandret forskydningsspænding langs sålen af en af de gletschere, som overskred området under sidste istid, eller ved gentagne fryse/tø påvirkninger. Den samme type sprækker er beskrevet flere steder i Københavnsområdet bl.a. ved Gemmas Allé, Englandsvej og Kastrup.



Figur 12. Sammenstilling af resultaterne fra opmålingen og beskrivelsen af tankgraven. Lithologikolonnen er suppleret med en tegning af strukturerne i jorden. Sprækkeorienteringerne af hældende sprækker er angivet som poler (der hvor "den vinkelrette" til sprækken skærer kugleskallen) på indersiden af en kugleskal, idet alle sprækkeplaner indeholder kuglens centrum. Polerne til sprækkeplanerne er angivet med forskellige punktsignaturer, og deres fordeling er maskinkontureret.

Vandrette sprækker er angivet særskilt som "Sprækkefrekvens".

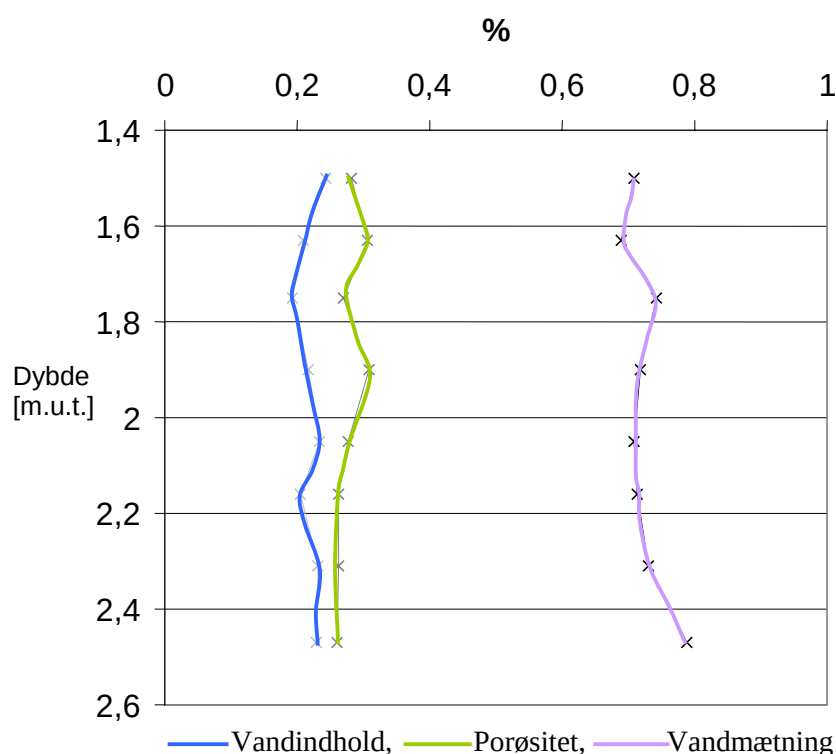
Fra 3 m u.t. til bunden af tankgraven (altså overlappende med en del af det interval, hvor der er mange vandrette sprækker) er der et system af stejlstående sprækker, der kan følges op til 2 m, og hvis strygningsretning er ca. øst-vest. Disse sprækker må være opstået på grund af belastningen fra en overskridende gletscher.

På baggrund af iagttagelserne af sprækker i udgravningen må det formodes, at der ikke er nogen vandret hydraulisk anisotropi i de øverste 2 m af morænelersintervallet (1-3 m u.t.), og at en eventuel hydraulisk gradient vil medføre strømning ad de tætliggende vandrette sprækker. Da de vandrette sprækker ligger ganske tæt udgør de antagelig også et sammenhængende system, som kan tillade lodret strømning og transport til mere end 3 m's dybde.

De stejlstående sprækker, som findes under 3 m u.t., må formodes at øge den hydrauliske ledningsevne i strygningsretningen ØSØ-VNV, men vil sandsynligvis også kunne udgøre en lodret transportrute. Resultaterne af den geologiske opmåling i tankgraven er opsummeret i Figur 12.

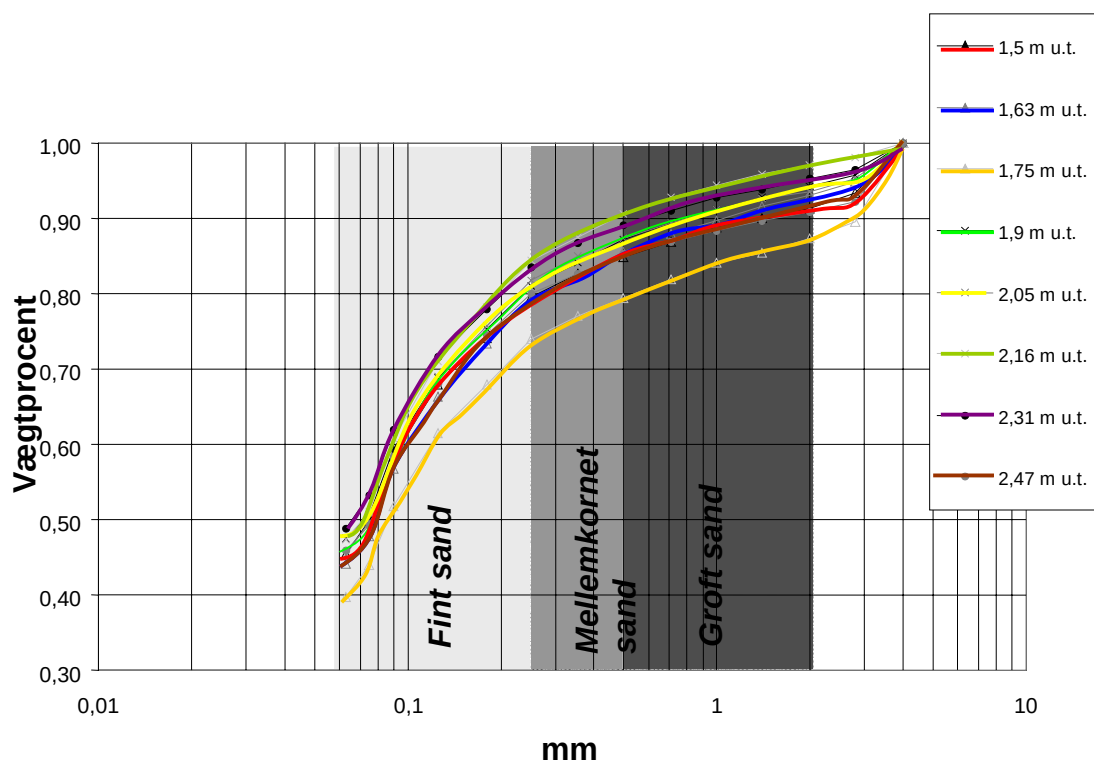
Udtagne prøver

I tankgravens vægge blev der udtaget 8 jordprøver v.h.a. stål cylindre med en diameter på 5 cm og en højde på 5 cm. Cylindrene blev presset ind i moræneleret, samtidig med at der blev gravet fri omkring dem, sådan at prøverne om fornødent ville kunne anvendes som orienterede intaktprøver. Prøverne blev analyseret for vandindhold og porøsitet, mens vandmætningen blev beregnet. Resultaterne fremgår af Figur 13.



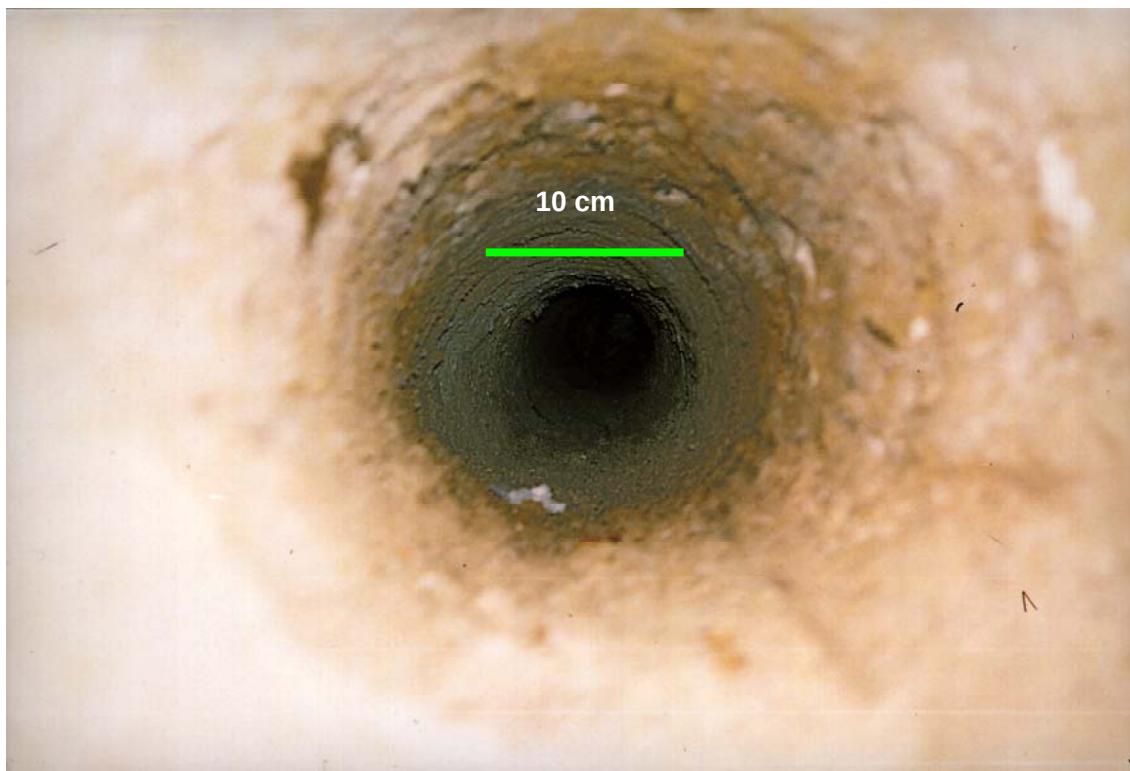
Figur 13. Vandindhold, porøsitet og vandmætning målt på intaktprøver af moræneleret i tankgraven.

Figur 13 viser variationerne med dybden i morænelerets porøsitet, vandindhold og vandmætning. Data tillader ikke en meget detaljeret fortolkning, men det svage fald i porøsitet med dybden fra 30-25% parret med ret konstant vandindhold på ca. 20% afspejler sig i den svagt stigende vandmætning med dybden. Også kornstørrelses fordelingen i sand- og grusfraktionerne blev analyseret for de samme 8 prøver, Figur 14. Sigteanalyserne viser, at 40-48% af prøverne består af ler og silt, og en tendens til at prøverne fra den øvre del af moræneleret i det analyserede profilet ned til 2,5 m.u.t. er mest grovkornet og usorteret. Med lerprocenter over 40 vil de grovere korn "svømme" leret, hvorfor det er lerfraktionen der dominerer de tekniske egenskaber.



Figur 14. Kornstørrelsesfordelingen i sand- og grusfraktionerne for jordprøverne fra tankgraven.

Da det videre projekt var baseret på analyser i vandrette borer, heriblandt logging af borerne, blev der udført en vandret håndboring i tankgravens væg for at teste moræ- nens stabilitet, sådan at logging ville kunne fravælges, dersom der var frygt for at hullet ville falde sammen omkring loggesonderne. Det håndborede hul var 2 m langt og havde en di- ameter på 6", Figur 15. Hullet blev boret 2 m u.t., altså over grundvandsspejlet. Hullet for- blev stabilt, og der var ingen tegn på sammenfald eller deformation af hullet i løbet af det trekvarte år, det var tilgængeligt; heller ikke da det senere blev vandfyldt på grund af det stigende grundvandsspejl. Loggeforsøgene blev derfor gennemført som planlagt (se sene- re).



Figur 15. Håndboret vandret 6", 2 m langt forsøgshul i moræneler 2 m u.t.. Der blev ikke konstateret nogen ændringer af hullet gennem det trekvarte år det var åbent.

8 To vandrette borer

Den afgørende finesse ved den NAVIGATOR boremaskine, som var til rådighed, er at fremboringsretningen kan ændres under borearbejdet, sådan at den ønskede lokalisering, orientering og placering opnås indenfor en nøjagtighed på 5 – 50cm fra det ønskede, afhængig af dybde under jordoverfladen (der kan bores vandrette sektioner ned til dybder på 30m under anboringstedet). Korrektionerne foretages på baggrund af et særligt aggregat, som kan stedfæste borekronens placering og rotationsstilling fra terrænoverfladen.

Borestængernes elasticitet tillader en mindste drejningsradius på 90m, hvilket betyder, at anboringen af fladt terræn skal ske i en passende afstand fra det sted i undergrunden, hvorfra den vandrette borestrækning skal etableres. Med de valgte dybder for de vandrette borestrækninger i Rantzausgade var en afstand på 20 m passende. Derfor skete anboringen i to korte gravede render udenfor det planlagte forsøgsområde. Fra renderne blev også det løsborede materiale, som blev skyllet tilbage af den borevæskens, der bliver spulet ud i borefronten, pumpet væk.

Borearbejdet var tilrettelagt sådan, at borerne efter en vandret strækning på 20m ville ramme ud i den åbne tankgrav. Denne løsning blev valgt dels fordi den er billig, idet udboringen til terræn kan spares, dels for at lette de sondemålinger og installationer, som skulle foretages i de vandrette borer, idet tilslutninger og indføringer ville kunne føres direkte og vandret ind i borerne.

Borehullets tværsnit bestemmes normalt af en roterende "reamer", som trækkes tilbage gennem borehullet fra udboringshullet, Figur 1. I dette tilfælde blev der brugt en "skærende reamer" hvis diameter var 30cm. "Reameren" efterlader boringen med en overfladepopografi med en ruhed på ca. 1cm, hvoraf noget kan være udsmyrt materiale. Hvor der er grus- og stenlag i jorden vil "reameren" kunne gøre skade på annulus ved at "mølle" materialet rundt, sådan at finkornet matrix udvaskes med borevæskens, groft materiale bliver liggende, og strukturen i lagene forstyrres.

Tilstedeværelsen af udsmyrt materiale på borehullets vægge kan, som nævnt tidligere, være en boreteknisk fordel, dels stiver det hullet af, så risikoen for sammenfald af væggene bliver mindre, og dels mindsker det friktionen under borearbejdet. Med henblik på at øge disse effekter tilsættes der i reglen en hurtig nedbrydelig gele til borevæskens. Formålet med dette projekt er netop at undersøge strømning mellem borehul og jord, og der skal derfor være så lidt forstyrrelse af især sprækker i moræneleret som muligt. Derfor blev der foretaget et geleringsforsøg for at se, hvor hurtigt geleen bliver naturligt nedbrudt, idet det ikke blev vurderet forureningsmæssigt hensigtsmæssigt at tilsætte et nedbrydningsfremmende kemikalie. Gele blev fordelt i prøveglas, som så fik lov at stå uberørt ved stuetemperatur. Geleen viste sig at være langtidsholdbar, hvorfor det blev besluttet at bore projektets vandrette borer uden gele. Ved feltstudiernes afslutning blev geleblokkene kasseret.

Fremgangsmåden ved borearbejdet i dette projekt var planlagt lidt afvigende fra det normale, idet den gennemborede jord skulle logges i det uforede hul. Planen var derfor at bore frem til udgravningen, påmontere reameren og binde en wire fast til den. Under reamingen, mens borestængerne blev trukket tilbage til boremaskinen, skulle der så samtidig trækkes en wire gennem hullet. Med denne wire ville det så efterfølgende være muligt at trække loggeudstyr (og siden et forerør) gennem hullet.

Boring af den dybestliggende vandrette boring

Ved etableringen af den dybe boring, som i praksis blev udført sidst, blev der boret igennem en istids-stenbrolægning, som lå knapt så dybt som forudset på grundlag af observationerne i tankgraven, samt gennem en større stenansamling på overgangen mellem den kurvede og vandrette borestrækning. Fremboringen gik dog godt og næsten planmæssigt, idet borekronen kunne kile og presse sig frem mellem stenene. Udvidelsen af hullet ved at trække en reamer (og wire) bød på næsten uoverstigelige problemer. I stedet for at skære sig frem møllede reameren rundt i stenene så det nær aldrig var lykkedes at trække den og den påmonterede wire tilbage til anboringsrenden. Herved blev der skabt en boresektion med uregelmæssigt tværsnit og lokalt fyldt med løse sten.

Det var planen at foretage sondemålinger i de uforede vandrette boringer, sådan at f.eks. huldiameteren kunne blive målt. På grund af de mange sten i den dybe boring kunne dette hul ikke stå helt åbent. Det blev forsøgt at trække en loggesonde gennem det åbne borehul fra både tankgraven og anboringshullet, men sonden kunne i første omgang ikke trækkes hele vejen gennem hullet, Figur 19. Et forsøg på at trække et $\phi 250\text{mm}$ forerør, som skulle lette installationen af filtersektioner (for siden at blive trukket ud igen), ind i boringen, endte frugtesløst p.g.a de mange sten. Der blev herefter installeret et 12m langt $\phi 90\text{mm}$ perforeret forerør med håndskårne slidser i den vandrette boring fra tankgraven (ingen perforationer i de 2m længst ude mod tankgraven).

Gennem denne foring blev der logget gennem hele den vandrette boringsektion og videre frem til anboringsrenden. Siden kom foringen til at udgøre filtret i den nederste vandrette boring.

Boring af den øverstliggende vandrette boring

Den øverste boring blev udført uden tilsvarende problemer, som i den dybereliggende. Borehullernes længdeforløb vil i praksis ondulere lidt på grund af de dybdekorrektioner, som foretages under fremboringen. Herved kan der opstå tærskler eller vandlås i boreforløbet, som vanskeliggør fjernelsen af friboret materiale. Fjernelsen af det friborede materiale foregår, som nævnt ovenfor, ved oppumpning af borevæske fra "anboringsrenden" med en dyk-pumpe. En effektiv fjernelse af friboret materiale forudsætter derfor bl.a., at der er balance mellem kapaciteterne af boremaskinens mudderpumpe og dyk-pumpen. En anden forudsætning er, at alt friboret materiale bringes frem til dykpumpen i suspension.

Da boregeometrien er "J"-formet, vil alt det friborede materiale fra den vandrette del af boringen skulle fjernes fra noget nær det højest beliggende punkt i boreforløbet. Dette afstedkommer, at friboret materiale i kornstørrelserne fra mellem sand og opad vil tendere til at blive udfældet omkring borerørene ved de nævnte tærskler i den vandrette del af boringen. Herved kan der skabes midlertidige blokeringer af borehullet. Da pumpen ved normal drift konstant sender ny borevæske frem gennem borekronen under højt tryk, vil der kunne opstå betydeligt overtryk foran opstuede blokeringer, hvorved der opstår risiko for frakturering af jordarten og/eller opfyldning af eventuelle naturlige sprækker.

Under boringen af den øvre boring i Rantzausgade forekom der flere fraktureringer af den nævnte type, før boringen var nået frem til det interval i den vandrette sektion, hvor filtrene skulle installeres, hvorved der blev induceret/åbnet sprækker til terræn og gennem terrændækket. Borevæske med opslæmmet finkornet materiale strømmede herved ud på terrænoverfladen, Figur 16. Boremetoden blev derfor justeret med henblik på at mindske fraktureringsrisikoen, mens den vandrette installationsstrækning blev boret.



Figur 16. Hydraulisk frakturering af gammel asfaltbelægning i terræn ved etablering af den øvre vandrette boring.

Denne uheldige effekt af stuvning forekom ikke under "reamingen", idet der herunder var afløbsmulighed fremad gennem den vandrette del af borehullet til tankgraven.

Af hensyn til fremtidig brug af vandrette borer til lignende formål, ville problemet med utilsigtet trykophugning formodentlig kunne reduceres eller undgås ved at lade boringen skære igennem en brønd ved overgangen fra krum til vandret sektion til samling og op-pumpning af friboret materiale.

Udvikling af prøvetager til vandrette borer

Under borearbejdet skulle der planmæssigt udtages prøver til brug for karakterisering af jorden, til hvilket formål der skulle udvikles en prøvetager til brug i kombination med vandret boreteknik. Da udtagning af uforstyrrede orienterede jordprøver stiller de største tekniske krav til en prøvetagers udformning, er der udviklet en sådan prøvetager til anvendelse i vandrette borer.

En rørformet prøvetager blev udviklet til montering forrest på borerøret, hvor borekro-nen var afmonteret, sådan at boremaskinens presseværk kunne udnyttes til at udtage en prøve i fronten af boreaksen forud for selve fremboringen gennem den pågældende stræk-ning. Prøvetagerens kammer, et B-rør, har en indre diameter på 70mm og en længde på 400mm. Bagtil på prøvetageren er der lækagehuller med tilbageløbs ventiler, som sikrer, at prøven under indpresning kan fortrænge den borevæske eller luft, som fylder kammeret. Fortil er den skærende æg på prøvetageren og prøve-kammeret beskyttet af et engangs-anvendeligt plastlåg, som yder nogen beskyttelse mod indsamling af tilfældigt materiale under

fremføringen af prøvetageren til borefronten. Så snart indpresningen m.h.p. selve prøvetagningen begynder brydes plastlåget. Et løst stempel umiddelbart bag prøvetagerens skærende æg støtter intaktprøven, mens den skubbes ind i prøvetageren og stabiliserer enden af prøven i tilfælde af, at prøvetageren kun bliver delvist fyldt. Prøvetageren er bagtil forsynet med udvendige glidesko for at sikre, at den ikke aktiveres i det krumme hul, før den er fremme ved borefronten, Figur 17.



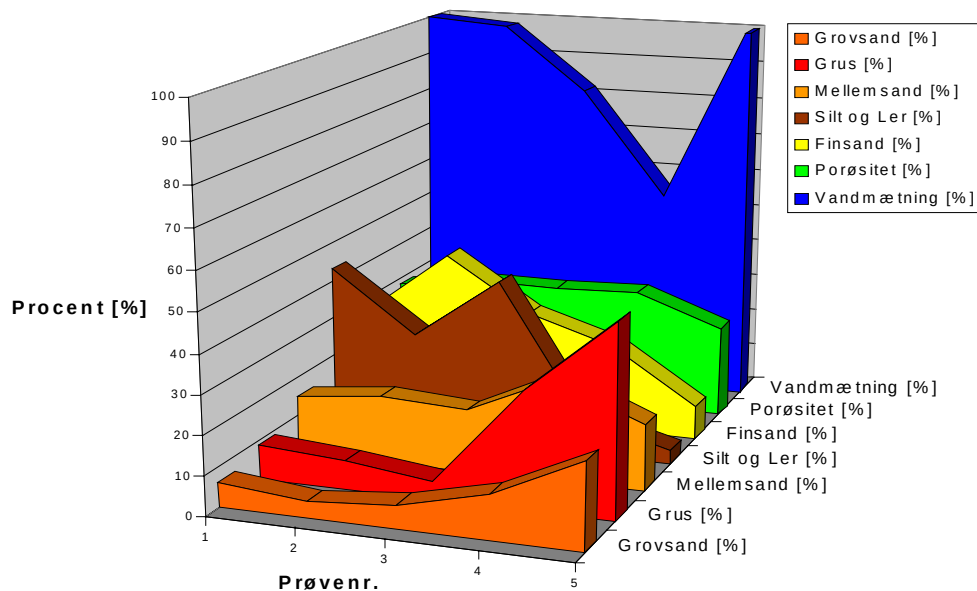
Figur 17. Prøvetageren til indsamling af "uforstyrrede" prøver i en vandret boring er her monteret i enden af borerøret. Vandstrålen rammer en af de slæder ved prøvetagerens rod, som er beregnede til at holde prøverøret fri af borehullets vægge.

Lokaliseringen af den udtagne prøve foregår fra jordoverfladen ved at bestemme borekro-nens position fra overfladen (standardteknologien for boremaskinen) før den trækkes ud af borehullet og erstattes med prøvetageren. Derfor er nøjagtigheden i bestemmelsen af prøvetagningsstedet afhængig af dybden; 2m nede er nøjagtigheden +/- 0.1m i alle retninger. I den øvre vandrette borestreng, 2 m under terræn, hvor der ikke blev mødt ret mange sten, blev der udtaget en prøve for hver 2m i det oxiderede moræneler. Det var ikke muligt at udpresse prøver med dette udstyr i den dybe vandrette borestreng, fordi den blev boret frem gennem en grov glacial stenbrolægning.

Analyser af "intaktprøver"

De "intakte" prøver af moræneler viste sig under beskrivelsen at bestå af forholdsvis uforstyrret materiale, hvor der kun var få tegn på kunstig deformation og opsprækning bort set fra slæbedeformation i den yderste halve cm langs prøverøret. Prøverne vurderes at være egnede til analyse af organisk indhold incl. forurening og mikrobiologi, men dette blev ikke

testet da de øvrige delprojekter ikke arbejdede på grunden, idet den i mellemtiden var vurderet kun at indeholde en uproblematisk restforurening. Prøverne blev derfor analyseret på samme måde som de prøver, der var udtaget i tankgraven, Figur 18.



Figur 18. Sammenstilling af de forskellige analyser af de 5 B-rørprøver fra den øverste vandrette boring.

Geofysisk sondemåling

Loggeprogrammet i den dybest beliggende boring var planlagt til at skulle gennemføres uden forerør. I udgangspunktet var det hensigten at logge umiddelbart efter boringens afslutning, mens der stadig var borevæske i hullet, idet nogle af sonderne (for temperatur og ledningsevne) forudsætter, at borehullet er vandfyldt. Borearbejdet skulle afsluttes med, at der

Logtype	Parameter	Forventet information	Logging udstyr	Sonde længde (cm)	Sonde diameter (mm)
1. Kaliper	Diameter	Hulrum	Robertson	213	38
2. Induktion & Gamma	Jordlagenes elek. ledningsevne (mS/m) og gammastråling (impuls per sek.)	Relativ variation i lerindhold	Robertson	220	44
3. TCGS	Temperatur og elek. ledningsevne (mS/m) af borevæske	Ledningsevne til sammenligning med induktionsloggens ledningsevne. Temperaturanomali kunne indikere vandflow på tværs af boring.	Robertson	244	38
4. Moisture & Density	Neutro-neutron tælleletal og gamma-gamma tælleletal, begge i impulser per sek.	Porøsitetsvariation og store sten	Nucletronic	60	35

Tabel 2. Det planlagte loggeprogram i rækkefølge og med angivelse af nogle væsentlige karakteristika.

blev trukket en wire gennem hullet, hvilket ville muliggøre at logsonden kunne trækkes baglæns gennem hullet forud for loggeoperationerne. Alle logs gennemføres ved, at sonden trækkes hen imod operatøren og dataloggeren ved anboringsrenden. Planlagt loggeprogram, resultattyper og sondedimensioner er vist i Tabel 2.

Flow-logning med propel kan kun gennemføres i helt luftfyldt borehul eller med rent vand (ikke borevæske) i hullet, og kun med centraliseret sonde under samtidig pumpning/indblæsning. Varme-puls logning (Heat-pulse) kan kun foretages i en rent vandfyldt boring og under pumpning. Da de nævnte forudsætninger ikke var opfyldt er disse sondemålinger ikke gennemført.

Loggeprogrammet i den øverste boring var planlagt til skulle foregå under samme betingelser og være identisk med programmet i den dybestliggende boring. Dersom logningen i den dybest beliggende boring viste sig problematisk, skulle den øverste boring afsluttes midlertidigt med et 250 mm PEL forerør, hvori logtyperne 2 og 4 skulle udføres. Logtype 1 og 3 er ikke relevante i forerør.

Loggeuddstyret

Robertson udstyret er digitalt og med 2,1 til 2,5 m lange sonder. Nucletronics udstyret er et oprindeligt analogt loggeudstyr, som nu er forsynet med en data registreringsenhed, som konverterer det analoge signal til digitale data. Sonden til dette udstyr er 60 cm lang.

Vandmætnings-loggen (Porositets-loggen) kaldes også neutron-neutron moisture log. Fra sonden sendes der hurtige neutroner ind i borehullets væg, mens langsomme, som er blevet tilbagekastede eller opbremsede i borevæsken og jorden ved kollision med brintatomer og neutroner, registreres. Målesonden har derfor bagest/nederst en 30 milliCurie Americium 241-Beryllium kilde og ovenover kilden en Lithium-glas scintillator til at registrere de langsomme neutroner. Antallet af registrerede langsomme neutroner (tællertallet per tidsenhed) vil stige med øget vandindhold, og vil dermed i vandmættet jord afspejle porositeten.

Geometrien i målesonden i henseende til afstand mellem neutron kilde og detektor fastsættes normalt i forhold til borehulsdiameter. Den benyttede Nucletronic sonde er beregnet til små boringsdiametre (1-2"), og derfor er afstand mellem kilde og detektor kun 6 cm. Målesonden er derfor ikke kalibreret for andre diametre, hvorfor resultaterne i form af tællertal per minut i disse tilfælde kun giver relativ information om variationen i vandindhold og dermed porositet. Hertil kommer at variationer i borehullets diameter også vil påvirke tællertallene. I vand- eller væskefyldte borehuller vil øget diameter resultere i højere tællertal (det modsatte vil være tilfældet hvis borehullet ikke er fyldt med en vandig væske).

Rumvægt-loggen kaldes også gamma-gamma log. Der sendes gamma stråling ind i jorden omkring borehullet og den tilbagekastede gamma-stråling, reflekteret fra atomerne i formationen, i formationens porevand og i borehullets væske, registreres. Denne log udføres samtidig med og med samme målesonde som porositetsloggen. Rumvægtssonden er derfor også forsynet med en 3 milliCurie Caesium 137 gamma kilde, som sidder 14 cm under neutron kilden. Registreringen af tilbagekastet gamma stråling sker med den samme Lithium glas scintillator som for porositetsmålingen. Adskillelsen af registreringerne af de to typer stråling sker ved hjælp af en pulsehøjde diskriminator.

En øget rumvægt af jorden enten på grund af mindre porositet eller på grund af øget indhold af tungere mineraler vil resultere i en større absorption af gamma stråling, sådan at mindre gamma stråling når tilbage til detektoren. Tællertallet per tidsenhed vil derfor falde med stigende rumvægt i jorden. Variationer i tællertallet i vandmættet jord vil altså afspejle variationer i rumvægten som følge af forskelle i porositet eller i jordartens tørrumvægt (kornrumvægt). Tællertallene stiger imidlertid også med øget borehulsdiameter, fordi der er mere væske eller luft mellem sonde og borehulsvæg.

Også Rumvægtssonden er beregnet til små boringsdiametre (1-2"), hvorfor resultaterne i form af tællertal per minut kun viser den relative variationen i jordlagenes rumvægt.

Loggearbejdet i Rantzausgade

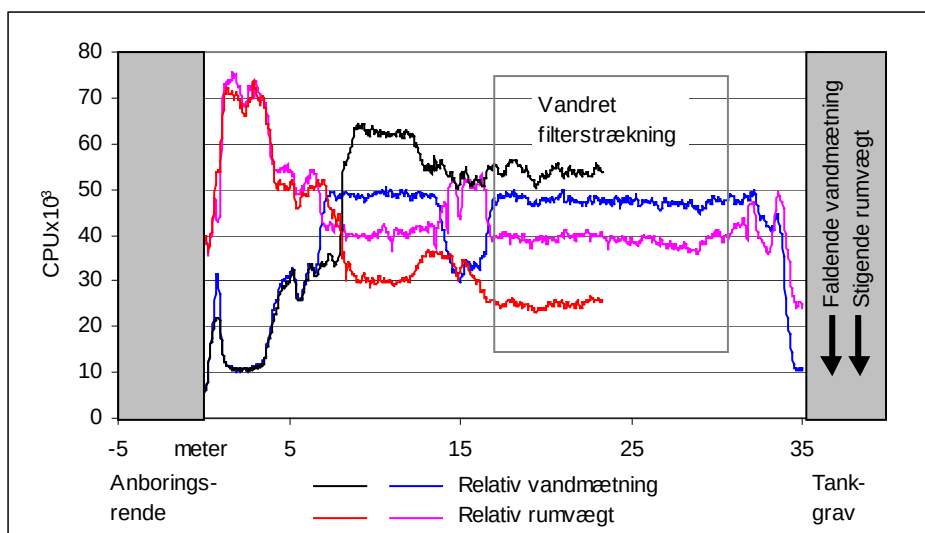
Forudsætningen om at loggene i de vandrette borerer skulle udføres i vædskefyldte borehuller kunne ikke opfyldes, idet det meste af borevæsken drænede af fra den vandrette sektion af borererne til den åbne tankgrav. Tankgraven havde ganske vist været vandfyldt til over den dybe borings niveau, men var blevet pumpet tør af hensyn til beskrivelsen af og forsøgene i tankgraven. Da loggearbejdet blev forsinket til sent i sommerhalvåret var grundvandsstanden for lav til at den dybe boring kunne holdes vandfyldt. Den øvre boring var beregnet til at skulle ligge i den umættede zone og kunne derfor heller ikke holdes vandfyldt ud over småpytter langs bunden af boringen.

Der blev den 3 september 1998 logget for porøsitet og rumvægt i den 35 m lange nedre boring (den skrå anboringsstrækning og den vandrette sektion ca. 3 m under terrænoverfladen), efter at boringen var reamet til en diameter på 300 mm. Sonden kunne imidlertid ikke komme mere end ca 25 m (baglæns) ind i borehullet fra anboringsrenden, hvorfor der kun blev logget i uforet hul på strækning herfra og tilbage, Figur 19.

Loggene blev udført igen den 8 september efter forsøg på oprensning af borehullet og installation af et $\phi=9\text{cm}$ PVC filterrør i hele boringens længde, Figur 19. Under vandmættede forhold vil de to logs variere i medfase, d.v.s. øget rumvægt (aftagende tællethal) vil korrelere med mindre porøsitet (aftagende tællethal på porøsitetsloggen). Når loggene derimod varierer i modfase er det tegn på, at det er andre faktorer end formationens porøsitet og rumvægt som varierer (f.eks. diametervariation under umættede forhold). En tolkning af loggene er vist i Tabel 3.

Strækning i cm	Fase +Med -Mod	ϕ niveau	ϕ tendens	Rumvægt niveau	Rumvægt tendens	Tolkning
0 - 50	+	m.lavt	konst.	lavt	konstant	tæt materiale, lille vandindhold
50-150	+	forholdsvis højt	stign.	højt	stigning	let materiale, større vandindhold
150-200	+	lavere	fald	lavt	fald	tæt materiale, mindre vandindhold
200-325	+	højt	stign.	højt	stigning	let materiale, normalt vandindhold
325-600	+	normalt	sv. fald	lavere	fald	tættere og en sten, norm. vandindhold
600-1775	+	normalt	sv. var.	normalt	sv. var.	normal var. tæth. og vandindhold
1775-2150	-	lavt	st. fald	højt	st.stign	stor diam., ikke tot. vandfyldt, 2 sten
2150-2675	+	normalt	sv. var	normalt	sv.var.	norm. var. tæth. og vandindhold, 2 sten
2675-2800	-	normalt	sv.var.	højere	sv.stign	øget diam. vandfyldt
2800-2900	-	lavt	st.fald	højt	st.stign.	stor diam. ikke tot. vandfyldt
2900-3000	+	lavt	yderl. fald	højt	fald	stadig stor diam. ikke tot. vandfyldt, men tættere materiale, mindre vandindhold
3000-3050	-	lavt	konst.	højt	konst	stor diam. ikke tot. vandfyldt
3050-3375	-	m.lavt	st.fald	m.højt	st.stign	meget stor diam. ikke tot. vandfyldt
3375-3425	-	lavt	st.stign	normalt	st.fald	stor diam. ikke tot. vandfyldt
3425-3500	+	m.lavt	st.fald	lavt	fald	forholdsvis tæt med lille vandindhold

Tabel 3. Den loggede strækning i den nedre vandrette boring opdelt i medfase og modfase response og tolket:



Figur 19. Sammenstillede resultater af geofysisk logning i den nedre vandrette boring 3. og 8. September 1998. Ved første forsøg kunne sonden ikke trækkes hele vejen gennem boringen. Efter trækning af et forerør blev hele borestrækningen logget.

Nedre boring

Netop længden på sonderne viste sig at være kritisk ved udførelse af logging i de vandrette boringer, idet ujævnheder i boringen kombineret med boringens krumning forhindrede passage af Robertson sonderne, hvorimod Nucletronic sonden kunne passere. Der blev derfor kun opnået en vandmætnings- og densitets-log fra dels en del af det uforede hul, dels fra hele der forede borehul, Figur 19.

Øvre boring

Her blev det forsøgt at logge borehulsdiameteren, men da sonden og dens arme gled langs bunden af hullet blev de mekaniske arme straks blokerede af sand. Det lykkedes kun at måle få meter af hullet med en induktionslog, som illustrerede, at der lå en lille restforurening ved hullets indgang, inden sonden kørte fast.

7 Udformning af et forsøgs-ventilationsanlæg

Da Cevent overtog feltlokaliteten Rantzausgade 57 var de mange værkstedsbygninger og skure netop blevet fjernet ned til gulv/terrænniveau. Området henlå derfor med et slidt terrændæk af vekslende tykkelse og materiale, og der hvor tankene havde ligget var der et hul på 10x14x3m omgivet af bunker med den uforurenede overjord, Figur 20.



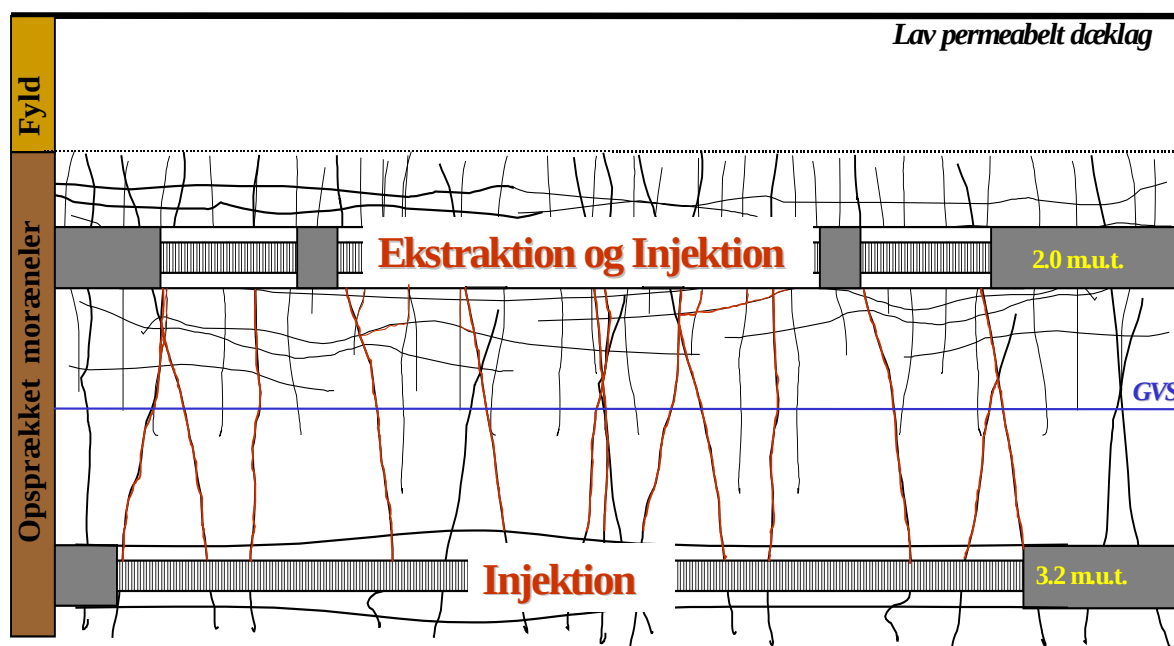
Figur 20. Tankgraven på lokaliteten set fra vest.

Da det ikke var muligt at holde de forholdsvis lange vandrette borer indendørs, uden at skære udgravningen eller komme u hensigtsmæssigt tæt på den, blev tankgraven i stedet udnyttet: fremboring til tankgraven, hvorfra det ville være muligt at tilslutte sonder, installere filtre, m.v..

Ved et grundvandsspejl på ca. 2,5 m u.t. og et ønske om at kunne airsparge fra en vandret boring (under grundvandsniveau) var det nødvendigt at etablere den ene vandrette boring i mindst 3 m u.t.. Af boretekniske grunde og for at skaffe et ensartet og jævnt hul til installation af filtre måtte den nederste boring ikke ligge i niveauet med eller skære den

glaciale stenbrolægning, som var beskrevet i dybdeintervallet 3,2-3.7 m u.t. i tankgraven, Figur 12. Der var herefter kun mulighed for at etablere den nederste vandrette boring i dybdeintervallet 3-3,2 m u.t.. For at kunne etablere et vandret pilothul i denne dybde er det nødvendigt med en afstand på 20 m til den anboringsrende, hvorfra fremboringen til udgravningen skal foregå. Dette krav om "boreafstand" betød, at den planlagte placering af de vandrette borer nord for de nedlagte tankanlæg, beskrevet i Rosenbom & Howardsen (1998), ikke var mulig, idet det ville indebære at anboringsrenden skulle graves i fortovej eller vej. Københavns Kommune tillod på denne baggrund, at en større del af "jernbanestrækningen" blev inddraget i projektet. Med denne tilladelse blev det muligt at etablere de vandrette borer m.v. indenfor nedrivningsarealet og med borerne fremboret til tankgraven fra syd, hvorved pilothullet ville skære den dominerende retning af stejltstående sprækker i en stor (om end ikke ret-) vinkel.

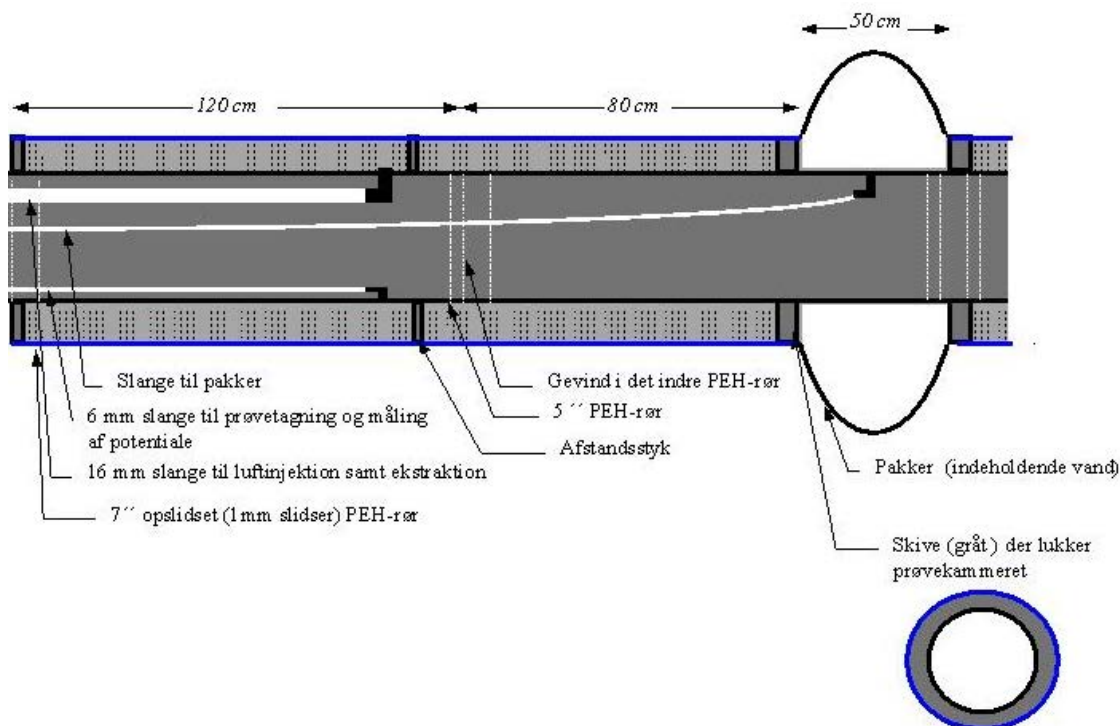
Med baggrund i at de dybtliggende sprækker ved den nye anboringsretning ville blive gennemboret i en ikke ret vinkel, blev det valgt at etablere de to vandrette borer parallelt, men forskudt, for hinanden (dybdemæssigt såvel som i det vandrette plan) for at muliggøre iagttagelse af sideværts luftbevægelse og for at kunne "-sparge" fra den dybest liggende boring, mens der blev vakuumventileret på den øverste, Figur 21.



Figur 21. Principskitse af det system, som blev installeret til ventileringsforsøgene i Rantzausgade. Oprindeligt var det ønsket at installere identiske opdelte filtersektioner i begge bringer, så der kunne eksperimenteres med injektion og ekstraktion på kryds og tværs mellem de enkelte filtersektioner. Bore- og installationsproblemer i den dybe boring medførte den viste løsning med én lang filterstreng i den dybe boring og flere filtersektioner i den øverste. Figuren viser også planen om tætte afpropninger i filterstrengenes ender og mellem filtersektionerne i den øverste boring. De uregelmæssige streger illustrerer sprækker i moræneleret. De sprækker, hvori der strømmer luft under injektionsforsøgene, er tegnet med rødt på principskitsen.

Grundvandsspejlet lå som nævnt i 2.5 m u.t. da ventileringsystemet blev udviklet. Begrænset af denne grundvandsdybde, og den naturlige stenbrolægning i 3.2-3.7 m u.t., blev den nedre boring, som var beregnet til airsparging, planlagt i 3-3.2 m u.t. svarede til et niveau med reducerende kemiske forhold og vandførende sandslirer lige over istidsbrolægningen. Den øvre boring, som var beregnet til ventilation, blev boret i det stærkt opsprækkede niveau lige under fyldlaget, 2 m u.t. , hvor der er iltede kemiske forhold.

Det var forudset at moræneleret langs begge de vandrette bore-/filterstrækninger kunne have varierende permeabilitet, bl.a. på grund af variationer i sprækketæthed. Hvis der under disse forhold blev installeret én lang filterstrækning i hver af de vandrette boringer, ville der være risiko for, at luftstrømmen igennem jorden fra boring til boring alene ville foregå gennem den mest veludviklede strømningsrute, mens der ikke ville foregå strømning gennem hovedparten af jorden (sprækkerne). Da formålet med det planlagte anlæg netop var at karakterisere strømningsforholdene i jorden skulle begge boringer, for at luftstrømmen kunne kontrolleres, udbygges så den 12,5 m lange vandrette filterstrækning blev opdelt i sektioner af 2m's længde. Filtersektioner af denne type, som skulle være mekanisk og strømningsmæssigt adskilt fra hinanden af oppustelige pakkere, blev derfor udviklet i samarbejde med Jensen Filter A/S, Figur 22. I hver filtersektion er der monteret slanger til injektion/ekstraktion af vand i pakkeren og af luft i filteret samt til prøvetagning og måling af tryk.



Figur 22. Principskitse af vandret filtersektion. I det gennemgående inderrør er der ført manøvre- og monitoringslanger til filtersektioner og pakkere.

Formålet med pakkerne mellem filtersektionerne var at lukke af for eventuel strømning af luft eller vand i borehullet på ydersiden af filtrene, idet der ikke er nogen hensigtsmæssighed i at kontrollere udstrømningen gennem filtret, dersom der er mulighed for langsgående strømning og trykudligning i annulus. Pakkerne, som bestod af et stykke traktorslange, kunne teknisk set åbnes enten ved hjælp af trykluft eller vand. Det blev valgt at bruge vand, for at undgå at pakkernes volumen blev påvirket af trykændringer under de efterfølgende

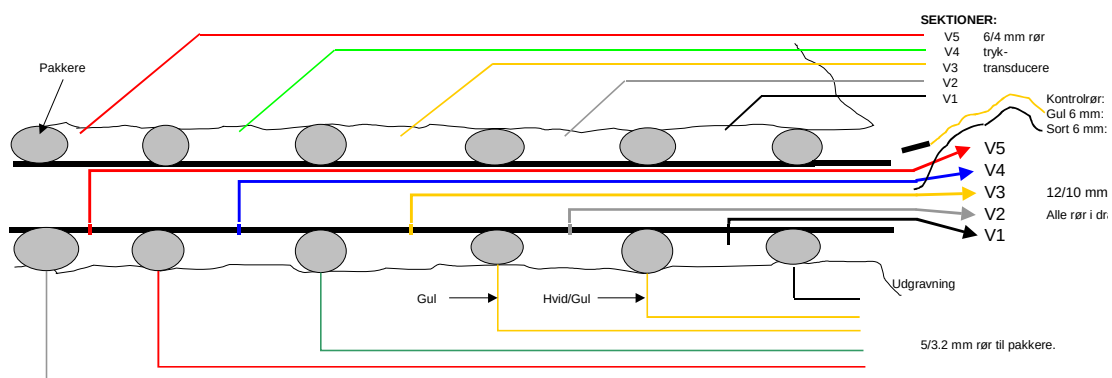
eksperimenter og fordi pakkere, som er åbne med vand frem for luft, er relativt mindre sårbare for lækager. En overskydende pakke blev testet for tryk og udvidelse efter installationen af de øvrige pakkere i den øvre vandrette boring, idet der manglede specifikationer. Testen viste at pakkeren udfoldede sig til rigelighed, men ukoncentrisk, Figur 23. Kombinationen af dette pakke materiale og design kunne forudses at have svært ved at isolere filtersektionerne strømningsmæssigt, men blev installeret som test af en billig løsning. På basis af testen af pakkeren og borehullets diameter blev det besluttet som standard at ekspandere pakkerne med 25 l vand.

Normalt anvendes der lange injektionsfiltre og små perforationer for at sikre, at der er et ensartet lufttryk i hele filtret, sådan at perforationerne yder lige meget langs hele filtret, idet det forudsættes, at der ikke sker en langsgående strømning i annulus. Da det til eksperimenterne i Rantzausgade blev valgt at opdele filtrene i isolerede sektioner, var der allerede i designfasen indbygget en kontrolmulighed for ensartet ydelse fra de enkelte sektioner. Derfor var slidsernes areal ikke afgørende. I den valgte filterløsning svarede injektionsslængens areal, hvor den munder ud i filtrets inderrør, til de gængse løsninger. Slidsdimensionerne i filtersektionernes yderrør havde derimod et større strømningsareal.



Figur 23. Pakker lavet af et stykke traktorslange. Der skal to mands vægt på filterrøret til den øvre vandrette boring for at gøre pakkeren tilnærmelsesvis symmetrisk.

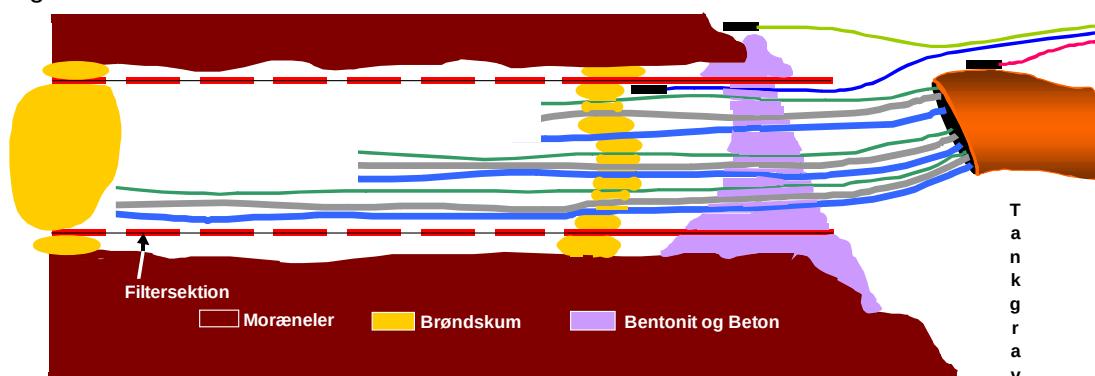
Under den praktiske fremboring af den dybestliggende boring viste det sig desværre, at istidsbrolægningen blot 10-15m syd for tankgraven lå højere end de forudsete 3.2 m u.t.. Det betød, at det ikke var muligt at udbygge boringen med de planlagte filtersektioner. Det lykkedes derimod at installere et langt sammenhængende filterrør med diameter på 90 mm og stort udstrømningsareal gennem håndskårne slidser. Strømningsåbningen i dette opslidsede filterrør var forholdsvis stor i sammenligning med de perforationer, som er blevet brugt til luftinjektion i praktiske oprensninger.



Figur 24. Principskitse af filterudbygningen og slange forbindelserne som planlagt for begge vandrette borer og installeret i den øverste (vakuumboringen).

Samtlige slanger fra de fem sektioner i den øvre boring føres via inderrøret i sektionerne (Figur 24) og videre gennem en blindstrækning ud i en hud af drænslange, som fører videre via udgravningen til en samlepudd i en container, Figur 26.

Det ændrede udbygningsprincip for den nedre boring fremgår af Figur 25. Der indgår ni slanger i installationen. Der er dels slanger til prøvetagning/trykmåling (T_i tryk, $i=1,2$ og 3) dels til injektion og ekstraktion ($T_{i,a}$ og $T_{i,b}$, $i=1,2$ og 3). Slangerne ligger løst i filterrøret, hvor en slange til hvert af de nævnte formål ender midt i og i enderne af filterrøret. Ligesom for den øvre filterudbygning føres også slangerne fra det nedre filterrør via en blindrørsstrækning og en drænslange, Figurene 25 og 26, til en samlepudd i en manøvrecontainer, Figur 33.



Figur 25. Principskitse for den nedre boring med filtersektion, afpakkninger og slangeforbindelser. Midt i og i hver ende af det 15 m lange filter udmunder der tre slanger: en 6/4 mm slange til trykmåling og prøvetagning og to 12/10 mm slanger til hhv. injektion og ekstraktion. Her ud over er der tre slanger til lækagekontrol. Yderligere forklaringer i teksten.

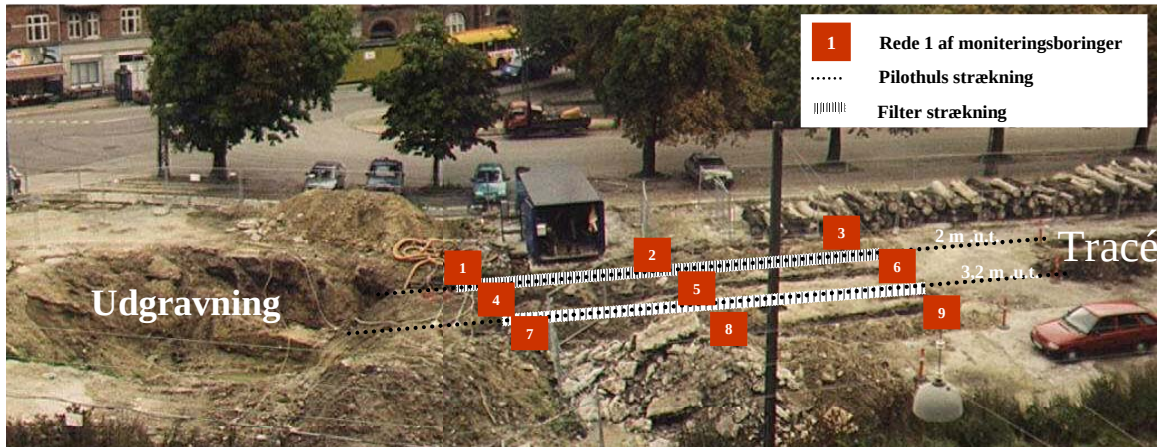


Figur 26. Forbindelsesslangerne mellem de to vandrette filterstrækninger og manøvrecontaineren er ført gennem beskyttende drænslinger til containeren.

Filtersektionerne i den øverste vandrette boring blev som planlagt forseglede indbyrdes og ud mod filtersektionernes ender med pakkere. I den dybestliggende af de vandrette boringer, hvor der blev etableret én samlet filterstreng, skete forseglingen på anden måde: Først blev den blindrørsstrækning, som førte fra det vandrette filterinterval hen til anboringsrenden, trukket ud, efter at være blevet kappet i en smal udgravning. Herefter blev enden af filterstrækningen afproppet med brøndskum og kastet til. Filterstrækningen ud mod udgravningen sluttede også med en blindrørsstrækning med manøvreslanger. Denne ende af filterstrækningen blev afproppet med brøndskum både omkring blindrøret og inden i dette (mellem slangerne). Disse afpropninger blev udført, uden at der var modhold mod skumets ekspansion i filterrørets længderetning. Senere, da brøndskumsafpropningerne viste sig utilstrækkelige, blev der kastet bentonit ind langs filterrøret fra tankgraven og efterfyldt med beton.

Moniteringsboringer

For at kunne opsamle prøver og monitere trykpåvirkningerne fra airsparging og vakuumentilation i de vandrette borer i den omgivende jord blev der nedrammet monitoringsrør (jernrør) til 1, 2 og 3 m u.t. i hver af de 9 "reder", Figur 27.



Figur 27. Placering af de ni reder af monitoringsboringer i forhold til containeren, de to vandrette borer og udgravningen.

Der blev ført trykslanger ud til alle monitoringsrørene, så det var muligt fra containeren både at tage prøver af luften/vandet og samtidig måle trykket via en tryktransducer, Figur 28. Der blev også ført trykslanger til at fjerne et evt. overtryk i monitoringsrørene. Denne udbygning var baseret på, at der ville kunne være såvel vand som luft i monitoringsrørene under forsøgene.



Figur 28. Tryktransducer med kabel og topafslutning til monitoringsrør i ikke samlet tilstand.

Inden selve nedramningen af monitoringsrørene blev der etableret fire 30 cm dybe render mellem de ni reder og containeren, Figur 27. Efter installationen af slanger og transducer i monitoringsrørene blev slanger og kabler samlet i drænrørsslanger (placeret i renderne) og ført til containeren, Figurerne 26 og 29. Renderne blev efterfølgende tilbagefyldt så installationerne var nogenlunde beskyttede (mod bl.a. hærværk).



Figur 29. Rede 3 - færdigmonteret i rende før tilkastning.

Hvert monitoringsrør blev inden nedramningen udstyret med en løs jernspids (konus) i bunden. Efter nedramningen blev spidsen slået 5-10 cm ud af røret, hvorved der blev skabt en åbning ud til jordmediet (filterinterval). Ved hjælp af en børste blev det forsøgt at fjerne udsurt jord i det åbne interval. De 1 meter lange monitoringsrør ($\phi \frac{3}{4}$ ") blev slået ned med en mukkert. Nedramningen af de 2 og 3 meter lange rør ($\phi 1\frac{1}{4}$ ") skete med en gravko med pneumatisk hammer. Monitoringsrørene identificeres med et "redenummer" efterfulgt af dybden til det pågældende filter, f.eks. er filter nr. 3-2 placeret i 2 m's dybde i rede 2.

Driftsenhed og monitoringssystem

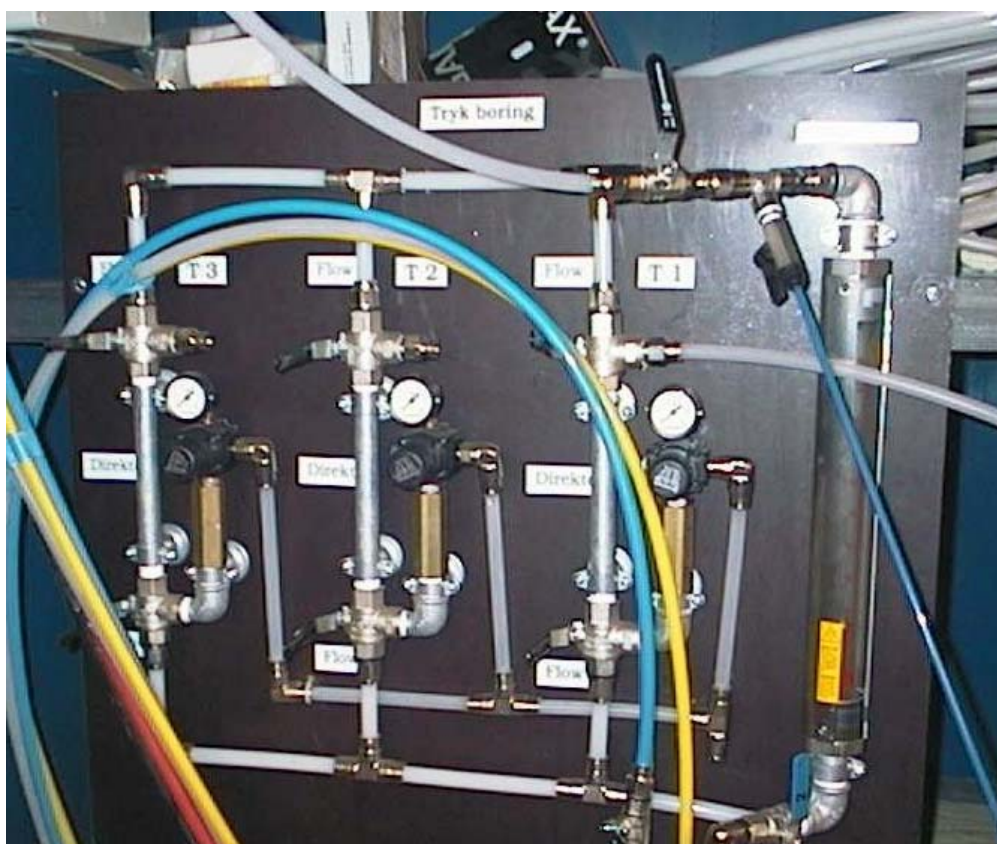
Monitorings- og ventileringsystemet blev installeret i en 20 fods container, hvor alle slanger og kabler fra monitoringsrørene og de to vandrette borer blev samlet.

Til ventilering via de vandrette borer blev der indkøbt en brugt Rielschle pumpe, Figur 30 (se databladet Bilag 2).

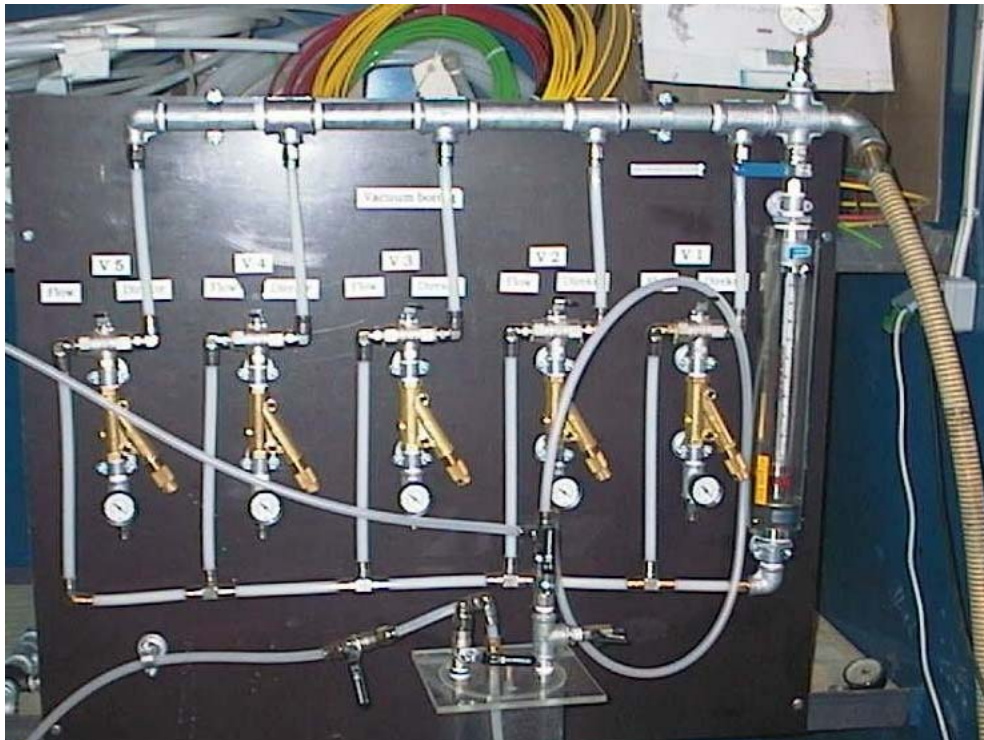


Figur 30. Rielschle pumpe med vandfilter.

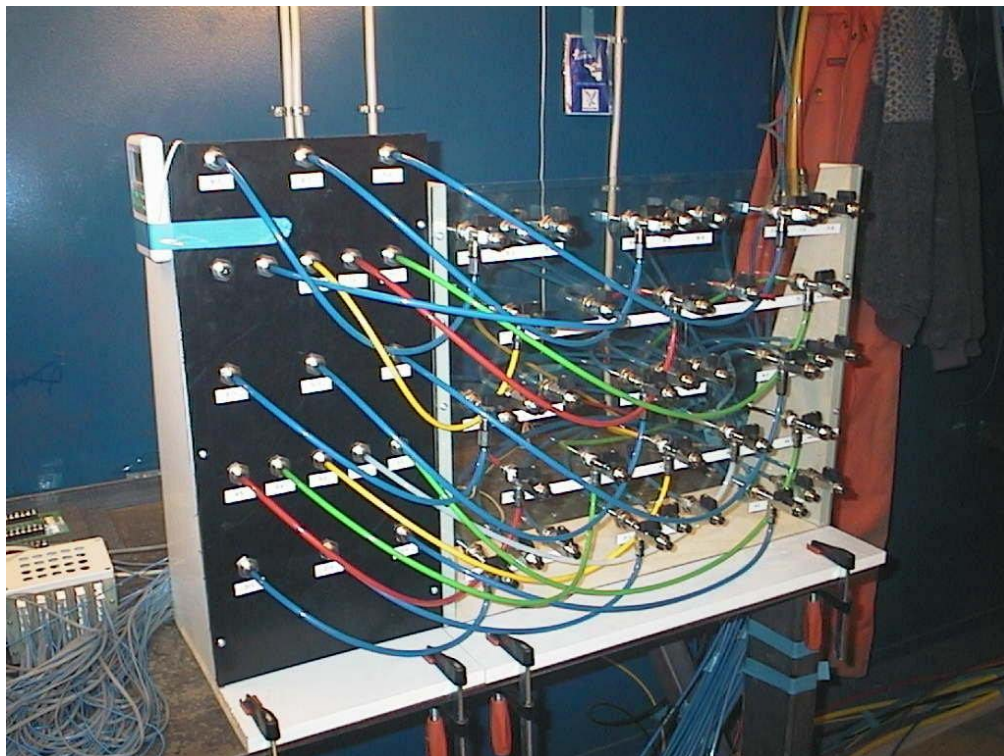
Pumpen kan fungere som såvel kompressor som vakuumpumpe og blev koblet op til både trykpanelet (Figur 31) og vakuumpanelet (Figur 32). Via disse paneler var det muligt at koble en eller flere filtre til enten vakuum- eller tryksystemet og samtidig måle flow for filtrene separat eller samlet. Til vakuumpanelet var der koblet et forlag til at separere og opsamle vand.



Figur 31. Trykpanel med metre og ventiler.



Figur 32. Vakuumpanel med metre og ventiler.



Figur 33. Monitoringspanel. Bag den sorte plade er samtlige transducere, som måler trykket i 1 meter monitoringsrørene, placerede. Alle slanger til luftprøvetagning fra 2 og 3 meters monitoringsrørene og de to vandrette borer er monterede på den gennemsigtige plade til højre.

Til monitoring af trykfeltet i og omkring de to vandrette borer/filterstrækninger udviklede K.H. Monitoringsteknik i samarbejde med GEUS et automatisk monitoringssystem med håndtering af 35 tryktransducere. 18 af disse tryktransducere er placeret i 2 og 3 meters monitoringsrørene og de øvrige i containeren på monitoringspanelets slangeforbindelser til monitoringsstederne, Figur 33. Det analoge signal fra transducerne bliver oversat til digital form v.h.a. en A/D converter, som sender det digitale signal videre til lagring i en computer.

Samtlige trykmålinger blev registeret v.h.a. en computer, hvori et BASIC-program, som registrerede måleserierne i tid, var inkorporeret, Figur 34. Programmet var baseret på funktionen $t_{i+1} = t_i + dt_i$, hvor $dt_i = dt_{i-1} + c \cdot \log(dt_{i-1})$, $dt_{i=0} = 5$ sekunder, $c = 0.1$ og $t_i = 0, 1, 2, 3, \dots, N$.



Figur 34. Systemet til opsamling af signal er her forbundet til tryktransducerne (under bordet), A/D converteren (på bordet) og computeren hvor data lagres.

Containerens vakuumpanel indeholdt yderligere vandseparator og kugleflowmetre til manuel måling af udstrømmende luft fra de enkelte vandrette filtersektioner under vakuumventilation, Figur 32.

9 Eksperimenter

Efter opsætningen af driftsenhed samt monitoringsdel blev ventilerings- og monitorings-systemerne tests. Der blev udført følgende test:

- Test af transducere i monitoringsrør – slug tests i 2 og 3 meter monitoringsrør.
- Test af 1 meter monitoringsrørenes ventilerbarhed
- Test af pakkerernes effektivitet i den øvre vandrette boring.
- Test af afpropringernes effektivitet i den nedre vandrette boring.

Test af transducere i monitoringsrør.

Der blev udført slugtest i monitoringsrørene for dybderne 2 og 3 m.u.t. for at bestemme den lokale hydrauliske ledningsevne og sikre at tryktransducerne (installeret ~10 cm over udslåede konus) virkede efter hensigten.



Figur 35. Slugtestene blev udført ved spontant at tilføre 1l vand til jernrørene via en tragt.

Ved slugtesten blev det udnyttet, at der ved bunden af hvert af monitoringsrørene var installeret en tryktransducer. Monitoringsrørene blev desuden pejlede for at afklare om transducerne i rørene fungerede korrekt i udgangspunktet. Der blev benyttet en slug på 1 liter vand (~11 cm vandsøjle i rørene), som umiddelbart efter hinanden blev hældt i alle 2 og 3 m monitoringsrør, Figur 35. Ændringen i vandstanden og dermed vandtrykket blev registeret ved hjælp af monitoringsystemet. Resultaterne fremgår af Bilag 3, hvoraf det fremgår at alle transducere på nær 2-2 og 2-3 reagerer efter hensigten, idet de viser en vandstandsændring i monitoringsrørene ved tilførslen af sluggen på ca.110cm 53

standsændring i monitoringsrørene ved tilførslen af sluggen på ca. 110 cm. Vandstanden forud for slugtesten varierer en del indenfor de to monitorerede dybdeniveauer (2 og 3 m u.t.).

Reetableringstiden for monitoringsrørene 3 m u.t. er meget lang undtagen i 4-3 og 7-3. Retableringen af trykniveauet i monitoringsboringerne til 2 m er generelt noget hurtigere end i 3 m u.t.. De højeste beregnede hydrauliske ledningsevner (Hvorslev's metode) i de to niveauer er:

Boring	Hydraulisk ledningsevne
3-2	$1,56 \cdot 10^{-6}$ m/s
4-3	$1,66 \cdot 10^{-6}$ m/s

Afprøvning af lækage fra 1 meter monitoringsrørene

Lækagen af luft mellem monitoringsniveauet for 1 meter monitoringsfiltrene og terrænoverfladen blev testet. Dette blev gjort ved en samtidig vakuumtest på alle ni 1 m monitoringsrør, idet topstykket var blevet testet for tæthed før montering, så lækage i installationerne kunne udelukkes.

Testresultaterne (Bilag 3) viser, at reetableringen er momentan på nær i filtrene 3-1 og 5-1. Da der ikke skulle kunne forekomme utætheder i selve installationerne, må der derfor være betydelig lækage til overfladen fra de fleste filtre

Afprøvning af pakkere i den øvre vandrette boring

For at afklare om de asymmetrisk pakkere, som var installeret mellem filtersektionerne i den øvre boring, reelt udgør strømningsmæssige barrierer, og dermed underopdelser den samlede filterstrækning, blev det i januar 1999 forsøgt at vakuumventilere i hver sektion for sig, mens trykvariationen blev målt i de øvrige sektioner, - men uden held: der stod, i modsætning til forholdene på boretidspunktet i august, så meget vand i filtrene, at der overvejende blev produceret vand under forsøget. I stedet blev den strømningsmæssige adskillelse undersøgt ved én for én at trykteste filtersektionerne ved at påtrykke dem et lufttryk på 6-8 mH₂O (svarende til en luftstrømning på 7-11,5 m³/t) med samtidig monitoring af trykket i alle filtersektioner. For filtersektionerne i enderne af filterstrengen testes selvklart også endepakkerne. Resultaterne (Bilag 3) viste, at der kun mellem de to filtersektioner længst fra tankgraven var en strømningsbarriere.

En af årsagerne til pakkernes øjensynlige dårlige funktion under den første afprøvning kunne være, at den påtrykte strømningsrate (og dermed trykket) var for stor. For at undersøge, hvor stor indflydelse flowraten har på pakkernes evne til strømningsmæssig adskillelse af filtersektionerne, blev der gennemført trykforsøg i hver sektion. Rationalet var, at der, i det mindste ved lave strømningsrater, burde opstå tydelige trykforskelle mellem de enkelte filtersektioner, såfremt pakkerne slutter tæt mod borehullets væg. Resultaterne af disse forsøg (Bilag 3) viste, at kun filtersektionen V5, som er fjernest fra tankgraven, var nogenlunde strømningsmæssigt isoleret fra de øvrige.

For om muligt at forbedre pakkernes effektivitet blev pakkernes volumen herefter øget med 5 l, for at afprøve om dette ville mindske lækagen forbi dem. Dette eksperiment viste, at ingen af pakkerne på noget tidspunkt har fungeret optimalt. Da den høje vandstand hindrede vakuumventilation af filtersektionerne, blev der arrangeret en afsluttende tryktest, hvor pakkerne gradvist blev ekspanderet ved tilførsel af yderligere vand, og afslutningsvis kvælstof, indtil sprængning, samtidig med at der blev injiceret i V3. Såfremt der var nogle pakke-re, som ville slutte tæt til boringsvæggen ved et bestemt volumen, skulle det blive opdaget ved denne test. Der skete imidlertid i ingen tilfælde en tydelig reduktion af trykudligningen, hverken under den yderligere tilførsel af vand til pakkerne eller under den afsluttende tilførsel af kvælstof til pakkerne indtil sprængning. Dette viser klart at pakkerne aldrig har fungeret efter hensigten.

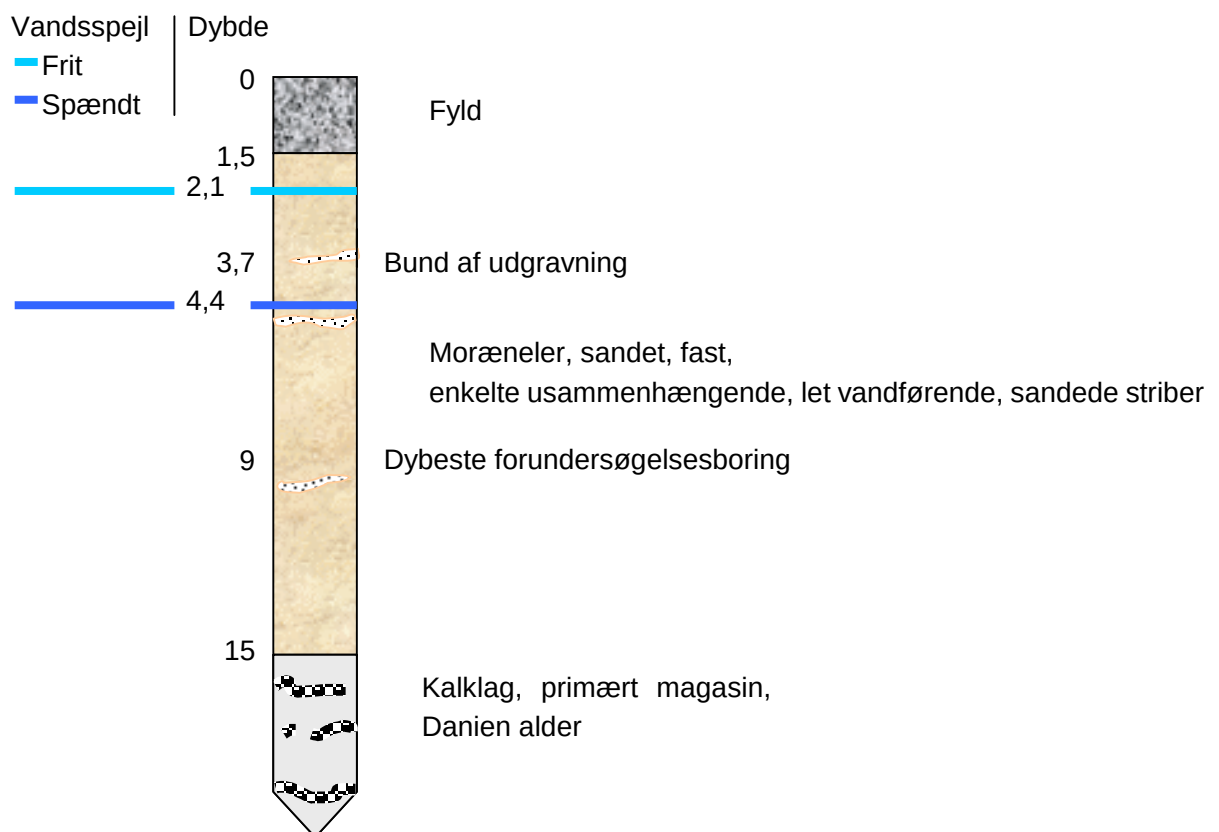
Afprøvning af afpropning i den nedre vandrette boring

For at afprøve afpropningen af den nedre boring ud mod udgravningen blev der inden opfyldning af udgravningen placeret trykmoniteringsslang i afpropningen, i drænslangen samt i sandet over drænslangen (se Figur 35). Det viste sig ved det efterfølgende trykforsøg (Bilag 3) at der var lækage fra den nedre boring ud i udgravningen, hvorfor det ikke var muligt at foretage airsparging i boringen.

10 Resultater og Diskussion

Med forsøgene i Delprojekterne 3 og 9 under det samlede Cevent projekt satte vi os for at undersøge og dokumentere morænelers ventilerbarhed. Dette valg blev gjort efter en længerevarende frugtesløs fase, hvorunder gennemførligheden af den oprindelige plan om at tilknytte projektets undersøgelser til en igangværende fuldskala air-sparging oprensning, måtte kuldastes. Ressourcen for de aktuelle delprojekter blev herefter, for at gøre en lang historie kort, satset på den nævnte problemstillingen. Det er primært projektets resultater, der diskuteres her på baggrund af, men uden systematisk gengivelse af, de mange væsentlige erfaringer og overvejelser som er publicerede af især USEPA. Målsætningerne for Delprojekterne er ikke blevet fuldtud opfyldte, men der er gennemført en række eksperimenter og gjort væsentlige erfaringer, som igen har ledt til overvejelser. Dette diskuteres i det følgende.

Karakterisering af jorden



Figur 35. Sammenstilling af geologiske informationer fra forundersøgelsen i Rantzausgade 57. De 8 af forundersøgelsesboringerne gik ned til 5 m u.t., én gik til 6 m og endelig én til 9 m. Halvdelen af de korteste borer, i hvilke der ikke blev konstateret sandstriber, var "tørre" umiddelbart efter afslutningen af borerne. Der flød trægt vand ind i de øvrige borer.

Geologisk, strukturel og geokemisk karakteristisk af materialet i Rantzausgade.

Lokaliteten Rantzausgade 57 er blevet geologisk beskrevet i to omgange. Først udførte EKJ en afgrænsende forundersøgelse på basis af 8 korte nye borer og to eksisterende som var dybere. Det geologisk/hydrogeologiske resultat af denne undersøgelse (sammenstillet i Figur 35) var, ud over konstateringen af at olieforureningen var så begrænset at den kunne graves væk, at grundvandsstrømmen i moræneleret er rettet nedad, at vandtilstrømningen skete fra sandstriber og at moræneleret var fast og blev endnu fastere i sydlig retning.

I anden omgang blev den geologiske beskrivelse suppleret med en detailopmåling i tankgraven, Kapitel 6, til hvilket formål to af gravens vægge og en del af bunden blev afrettede og manuelt rensede for løs overflade, som var påvirket af gravearbejdet. Resultatet var en detaljering af profilet ned til 3,5 m u.t., som bl.a. viste at det sandede moræneler indeholder spredte sten og en glacial stenbrolægning under ca. 3,2 m u.t.. Over stenbrolægningen er der et få centimeter tykt gennemgående sandlag. Under stenbrolægningens overflade er morænelerets matrix mørk olivengrå, mens den ovenover er lysere og gennemgående brunlig. Farveskiftet afspejler redoxfrontens beliggenhed, idet der dog nederst i den iltede zone er flere områder med reducerende forhold, især hvor der er olierester i matrix, omgivet af iltede zoner langs makroporer (sprækker). Også langs sprækkerne under 3,3 m u.t. har matrix en afvigende lys farve.

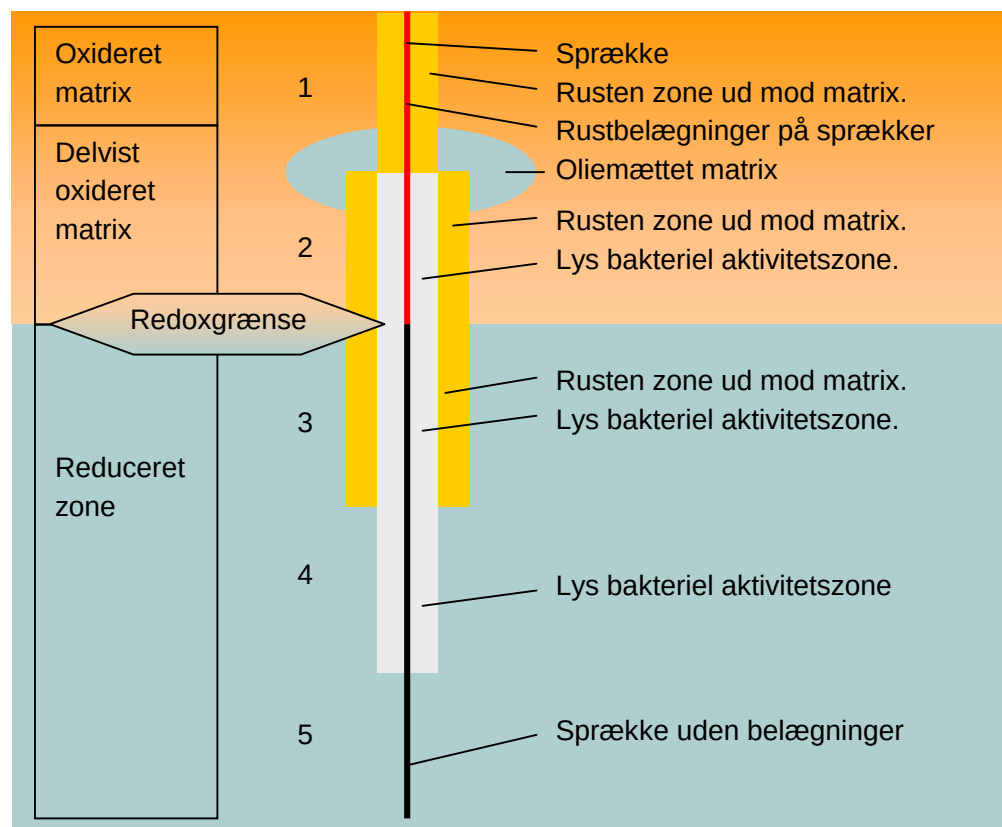
Som en del af den geologiske karakterisering af lokaliteten blev der i forberedelsesfasen udført sondemålinger i fire af Cevent-projektets egne borer, som var udført mhp. en ventilationstest, Figur 5. Der blev logget for porøsitet og rumvægt, hvilket viste høj kapillær vandmætning i matrix helt op til fyldlaget. Herudover viste loggen højere rumvægt i moræneleret end i fyldlaget og et interval fra 3-4,5 meters dybde med relativ lav rumvægt. Intervallet i moræneleret med lav rumvægt, og det generelt urolige mønster for denne log, må tilskrives, at hullet har været uregulært i forbindelse med sten, især i den glacielle brolægning under 3,2 m u.t..

Strukturelt viste opmålingen af tankgraven at lagene er gennemsat af sprækker. I fyldlaget dominerer lodrette sprækker med tilfældige orienteringer. Disse sprækker skyldes antagelig udtørring af fyldet. I moræneleret ned til den glacielle stenbrolægning dominerer lagparallelle sprækker, med rustfarvede overflader, der tolkes at være dannet som følge af friktion i forbindelse med en overskridende glecher eller gentagne fryse/tø påvirkninger. Tætheden af disse lagparallelle sprækker aftager nedad, Figur 12. Under den glacielle stenbrolægning dominerer et system af stejle parallelle sprækker med en øst-vestlig retning og gennemsnitlig indbyrdes afstand på cirka en halv meter.

Geokemisk aftager iltningsgraden på Rantzausgade nedad i morænelerets matrix mod stenbrolægningen, idet redoxgrænsen nås ved brolægningen, hvorunder moræneleret er mørkt olivengråt. Den gradvise overgang fra oxiderede til mere reducerede forhold viser sig i et farveskift af matrix fra gråligt brunt til brunligt gråt. I sprækkerne og i zoner langs dem forekommer der dog en mere udpræget rusten farve (Fe^{3+}). Dette er mest tydeligt, hvor der i ca. 2 meters dybde er trængt "blålig" olie ind i matrix, som så er blevet "reduceret" som følge af bakteriel aktivitet, Figur 11, men mange af sprækkefladerne umiddelbart under

fyldlaget har tydelige rustbelægninger og er omgivet af tynde rustfarvede zoner. Dette forekommer også i nogle af sprækkerne ned mod den glaciale brolægning, hvor der yderligere forekommer lysere farvninger langs sprækkefladerne. Sprækkerne i den reducerede zone under den glaciale brolægning er omgivet af en meget lys indre zone, der kan skyldes reducerende forhold forårsagede af bakteriel vækst og omsætning af stof, hvorunder ilt bliver forbrugt. Denne lyse indre zone kan ud mod matrix være omgivet af en ydre oxidationszone med rustfarver.

Disse observationer, som stemmer overens med en del andre iagttagelser (f.eks. Klint, 1996), er sammenfattede i princip-figuren Figur 36. Figuren illustrerer og tolker sprækkeobservationerne som udtryk for naturlig strømning og transport. Det er her vist at zonerne er koncentriske omkring sprækkerne, hvilket ikke altid er tilfældet i virkeligheden, hvor farvemønstrene kan antage en lang række former. De strømnings- og transportmæssige implikationer af den geokemiske sprækkekarakteristik, relateret til de nummererede zoner i Figur 36, er bl.a.:



Figur 36. Principskitse for redoxforhold, farvezoner og belægninger i tilknytning til sprækker i moræneler i Rantzausgade 57. Forklaring i teksten.

- Zone 1. Luftfyldte sprækker i umættet zone. I den største del af året er der rigelig luftudskiftning og tilførsel af ilt til iltning af organisk materiale, ferrojern og mangan. Matrix iltes ved diffusion fra sprækkerne og overfladen.
- Zone 2. Periodisk vandmættede sprækker i umættet zone. Der tilføres ilt via luft/vand, og i perioder vil der kunne opstå reducerende forhold, især hvis der tilføres organisk stof fra overfladen. Matrix indeholder olieforurenede "øer", hvor der er reducerede forhold.
- Zone 3. I almindelighed vandmættet. Det overfladenære grundvand er iltet, men strømmer overvejende i sprækkerne gennem en matrix med reducerende forhold. Ilttilførslen er ringe/langsom og omsættes tæt ved sprækkerne.
- Zone 4. Organisk stof, bl.a. fra olieforurening, introduceres langs sprækkerne og omsættes mikrobielt under fjernelse af jernoxider. Herved skabes en bleg zone omkring sprækkerne.
- Zone 5. Der er ingen kemisk forskel på grundvandet i sprækken og porevandet i matrix. Sprækken er i praksis lukket.

Belægningerne på og zonerne omkring sprækkerne i Rantzausgade viser, at der er foregået en naturlig strømning og øjensynligt en transport af ilt i sprækkerne med aftagende rate nedad, ned til ca. 3,5 m u.t.. Den matrix der lokalt indeholder en restforurening af olieprodukter ligger i den øverste del af grundvandets fluktuationszone, hvortil det formodes at være tilført ved strømning gennem sprækkerne og kapilær/diffusiv opslugning i matrix. Siden er der igen etableret iltende forhold i disse sprækker. Nogle af oliekomponenterne er i opløst form transporteret dybere ned i sprækkerne, hvor de ved bakteriel medvirken har afstedkommet sprækkernes lyse rande, som dog også kan dannes pga. nedbrydning af diverse andre organiske materialer.

Strømningen af grundvand kunne konstateres under beskrivelsen af profilet i tankgraven, hvor der pibede vand ud af profilet i intervallet 2,5-3,3 m u.t.. Også i de tynde sandede indslag i moræneleret foregår der strømning og transport, som bl.a. dokumenteret i forundersøgelsen. Endelig antages de "tilfældigt" orienterede udtørringssprækker i fyldlaget at være i god indbyrdes strømningskontakt.

På dette grundlag blev det dels vurderet, at strømningsmuligheden til de korte, oprindeligt tørre undersøgelsesboringer måtte have været reduceret på grund af udsurt materiale langs borehullernes vægge, dels at moræneleret ville være ventilerbart, om end antagelig kun svagt ventilerbart, gennem makroporer og sandstriber. Fyldlaget ville antagelig lække til sprækker i det øverste moræneler, men terrændækket ville dog reducere lækagestrømningen noget.

Senere i projektet under pejlinger i monitoringsboringer viste det sig, at stærkt varierende vandstand fra boring til boring ikke alene er betinget af grundvandsspejlets beliggenhed, men også skyldes at den stærkt mættede morænelersmatrix kan dræne en beskeden vandmængde ud som et frit vandspejl i bunden af en boring selv om denne ikke når ned under det responderende grundvandsspejl. Dette viser, at de strømningsindikationer, som kan konstateres i sprækker i udgravninger afspejler situationen over et tidsspand. Den aktuelle strømningsmulighed i sprækkerne afhænger af sprækkeaperturen, som kan være følsom overfor lermineralernes svældning og dermed grundvandsstanden.

Parametre som er kontrollerende for eventuelle sætninger i forbindelse med ventileringsformål.

Arbejdet på Rantzausgade 57 omfattede også geotekniske overvejelser og eksperimenter. I forbindelse med vandrette borer til ventileringsformål kan eventuelle sætninger, som kan influere på funderingsforhold, borehulsstabilitet og ventilerbarhed have tilknytning til såvel selve borearbejdet som ventileringen. De eventuelle sætninger, som måtte følge af ventileringsformål, må overvejes for sparging og vakuumfildning hver for sig. Sætningsrisikoen bør altid vurderes for den aktuelle jordart, - f.eks. gælder den almindelige erfaring at sparging (iltning) af jordarter, som er rige på eller består af organisk materiale (tørv), vil medføre sætninger både på grund af volumentabet under iltningen og på grund af den reducerede opdrift under spargingen ligevel vandrette og lodrette borer.

I projektets indledningsfase blev dette spørgsmål diskuteret med nogle af de rådgivere, som har erfaringer med in situ oprensning, og som ikke mente at dette var det mest betydelige problem i forbindelse med de jordarter, der er aktuelle for projektet: sand og moræneler. Blandt andet derfor er sætningsproblematikken blevet nedprioriteret.

Sætninger af betydeligt omfang vil dog kunne forekomme under uheldige kombinationer af injektionstryk og vandmætning, Tabel 4. Ved for høj injektionsrate vil der være mulighed for fluidisering af løse overfladenære sandlag under opstarten af injektionen med deraf følgende tab af styrke, - en effekt som selvsagt ville være mere betydningsfuld under pulseret drift.

Der er også en beskeden risiko for sætninger af vandmættet sand omkring injektionsfiltre på grund af påvirkninger fra luftstrømmen, hvilket kan få boringen til at falde sammen omkring filtret, hvilket kan modvirkes ved at vælge et filter der udfylder borehullet.

Typen af skader	Ved boreprocessen	Ved airsparging	Ved vakuumvent.
Funderingssætninger	Hævning/senkning grundet frakturering ved for højt skyllepumpestryk, især i sammenhængende jordarter	Ved massetab ved iltning af organisk materiale, ved tab af opdrift og fluidisering ved for høj flowrate, især i løse jordarter	Ved massetab ved iltning af organisk materiale i løse lag
Borehulssætning	Sammenfald af ustabil hul, især i løse sandede-stenede jordarter, på grund af skylleprocessen	Sammenfald af ustabil hul ved tab af opdrift og udtørring ved for høj flowrate, især i løse sandede-stenede jordarter	Sammenfald af ustabil hul ved udtørring og medrivning, især i løse sandede-stenede jordarter

Tabel 4. Typen af sætninger som under uheldige omstændigheder vil kunne forekomme i forbindelse med airsparging.

Risikoen for sætninger afhænger, som det fremgår, af strømningsparametre i sammenhæng med jordartsegenskaber. Det er derfor muligt forlods at analysere jordens geotekniske egenskaber mhp. at undgå sætninger. De kendte publicerede geotekniske parametre for danske jordarter er blevet sammenstillede i Tabel 5 a og b, og morænelerets sorteringsgrad er blevet analyseret for projektlokaliteten, Figurerne 13, 14 og 18. Forud for son-

demålingerne i de vandrette borer morænelerets stabilitet overvåget i et håndboret vandret 6" hul, uden at der kunne konstateres sætninger, Figur 15.

Sætninger vil således kunne forekomme især i løse granulære jordarter med højt indhold af organisk stof, men vil i almindelighed kunne modvirkes ved enkle forholdsregler.

Geofysisk sondemåling i vandrette borer.

Også i de vandrette borer blev det forsøgt at lave geofysiske sondemålinger. I den dybeste af de to borer blev der logget for vandmætning og rumvægt, Figur 19. Loggen afspejler at der er store variationer i især hullets diameter på grund af et overraskende stort indhold af sten. Stenene og variationerne i hulstørrelse kan lokaliseres langs borestrækningen, men ikke kvantificeres, og den strækning, hvor der var store problemer med hulstabiliteten på grund af de mange sten, kan let identificeres ved sammenligning af logkørslerne uden og med filterrør. Fortolkningen af porøsitetsloggens visninger vanskeliggøres af den varierende delvise vand/luftmætning og når boringen, som her, følger en laggrænse. Resultaterne af sondemålingerne bliver bedst, dersom der udelukkende er vand eller luft i borehullet, og der er boret i et homogent medium, hvor der ikke er uklarhed i signaler fra lag med forskellig sammensætning langs borehullets overflade.

Det blev forsøgt at måle borehullets diameter med en Caliper sonde, hvilket viste sig umuligt, idet nedbrudt løst morænelers-sand i småpytter langs borehulernes bund hindrede målearmenes bevægelighed. Mekanisk Caliper-måling ville formodentlig kunne gennemføres, dersom sondens arme var blevet beskyttede i en pose, og der havde været så kraftige centraliseringsfjedre på sonden, at den ikke havde slæbt langs bunden.

Der blev også lavet en kort elektrisk måling med en induktionssonde i den øverste vandrette boring (sonden kan måle i et luftfyldt hul i modsætning til resistivitetssonden, som kræver at der er vand). Sonden registrerede klare forskelle mellem moræneler med svag olieforurening og uforurenet moræneler.

Fælles for Caliper- og Induktionssonderne var, at de hang fast få meter inde i borehullet, idet sonden kilede sig fast (antagelig mellem sten). Det er imidlertid en væsentlig erfaring at forureningsudbredelse langs en vandret boring lader sig stedfæste med en elektrisk log.

Systemet med at trække sonderne gennem de vandrette borer v.h.a. en lang line, som altid ragede ud i begge ender af boringen, så der kunne trækkes begge veje, var meget anvendeligt. Vanskelighederne knyttede sig til at hullerne kun var delvist vandmættede, at det nederste hul var delvist faldet sammen, at sonderne blev trukket asymmetrisk langs bunden af hullerne, hvor de kilede sig fast, at hullerne ikke havde en regulær cylindrisk facon, og at sondernes dimensioner i forhold til hullets (evt. forerørets -) diameter og krumning var kritisk. Disse vanskeligheder er dog ikke teknisk uoverkommelige. Vandfyldningen af borehuller kan sikres kunstigt i tilfælde hvor der er boret ud i terræn (ikke i en grav), og passagemuligheden for sonderne kan (ud over rent beregningsmæssigt) sikres ved at trække en "dummy" gennem hullet. I tilfælde, hvor der vurderes at være risiko for sammenfald omkring sonden, kan en del logs gennemføres inde i et forerør (Naturlig Gamma, Vandmætning, Rumvægt, Induktion) mens andre (Caliper, Resistivitet, Sonic, Telescanning) evt. kan gennemføres ved trækning af sonde og forerør samtidig, sådan at sondens målesektion hele tiden rager bagud af forerøret. Ved sammenfald af borehullet vil sonden så antagelig kunne bjærges gennem forerøret.

Jordarter	Symbol	Kornstørrelser			CaCO ₃	Org. indh.	Vand- indh.	Poretal	Korndensitet	Rumvægt	Lednings- evne
		Ler	Silt	Sand	%	%	W, %	e	kN/m ³	kN/m ³	K = m/sec
Smeltevandssand	DS	0			0		0-30	0,5-0,8	26.4-26.7	18-22	
Smeltevandsler	DL d	20-30					17-25	0,5-0,7	26.7-27.3	20-22	
Morænegrus	MG	< 12		> 25							
Morænesand	MS	<12		>45-50	0-25	<2	0-15	0,2-0,4	26.5-27	22-23	
Morænesilt	MI	< 12	>45-50			<2					
Moræneler st.sandet og siltet	ML d	12-15			<20	<2	10-16	0,3-0,5	26.7-27.3	21-23	
Moræneler sandet og siltet	ML d	15-20			<20	<2	10-16	0,3-0,5	26.7-27.3	21-23	
Moræneler ret fedt	ML d	>20			<20	<2					
Moræneler forkonsolideret	ML d	15-25	25-50	40-60	13-25	<2	9-12		26.7-27.3	22-24	Lab: (6-40)10 ⁻¹⁰
											Felt: 10 ⁻⁶ -10 ⁻⁸
Moræneler forvitret og blødt (Sabro)	ML d				0.5		19	0.52			
Yoldialer	YL b-c	30-70			30-70		28-30	0,8-1,0	27-27.5	19-20	
Septarieler (Tertiær)	VL a-b	60-80			10-40		34-44	1,0-1,2	27.5-28.5	19-19,5	
Lillebæltssler (Tertiær)	LL a	70-90			0-30		35-45	1,1-1,3	27.8-28.2	18-19	
Norsk kvikler	L d	40-65					32-45	1,0-1,3	26.5-27.5	18-19,5	
Dynd	P	0-30					50-300	1,0-8,0	13-25	10-15	
Færøsk basaltsand	S	0			0		0-25	0,5-0,8	30-35	21-27	
	a: meget høj plasticitet										
	b: høj plasticitet										
	c: middel plasticitet										
	d: lav plasticitet										

Tabel 5 a. Geotekniske parametre hentet fra litteraturen (Harremoës et al., 1984; Larsen et al., 1988; Fredericia, 1990, 1991; Jacobsen, 1970; Hansen, 1978) og GEUS' databaser, jævnfør Malinovsky og Klint, 1997.

Intaktprøver

Generelt om metoder til udtagning af uforstyrrede prøver.

Ved "uforstyrrede prøver" af uhærdede jordarter forstås ideelt "prøver af uhærdede jordarter, i hvilke der hverken er sket nogen relativ intern ændring af den naturlige lejring og tekstur i prøvens indre, umiddelbart under et evt. overfladisk skind, eller af deres sammensætning og poreindhold under og siden prøvetagningen". Ideelt indebærer dette at uforstyrrede prøver kun meget vanskeligt kan indsamles, da der normalt altid vil ske trykaflastning, afgasning og foregå en påvirkning gennem forskydningsspændinger eller kompression. Som praktisk mål er det valgt at anse prøver, som visuelt ser upåvirkede ud, og hvorom det vides at de ikke har været udsat for væsentlige forskydningsspændinger eller tilførsel af

fremmet materiale, for "uforstyrrede". Der er et særligt problem ved udtagning af uforstyrrede prøver at bevare eventuel sprækkeapertur uændret.

Jordarter	Konsistens				Styrkeparametre		
	Flydegrænsen	Plasticitetsgrænsen	Plasticitetsindeks	Konsistensindex	Kohæsion	Intern friktion	Vingestyrke
	WL	Wp	Ip	$I_c = \frac{(WL - Wp)}{Ip}$	C = kN/m ²	o	kN/m ²
Smeltevandssand							
Smeltevandsler	23-35	12-18	11-17	0,7-1,1			100-500
Morænegrus							
Morænesand							
Morænesilt			<4				
Moræneler st.sandet og siltet	16-27	10-15	4-7	0,6-1,3	0-50	30-35	150-max
Moræneler sandet og siltet	16-27	10-16	7-10	0,6-1,3	0-50	30-35	150-max
Moræneler ret fedt			>10				
Moræneler forkonsolideret				0.8-1.2	30-70	30-33	>700
Moræneler forvitret og blødt (Sabro)	27.5	13.7	13.8	0.61	11	30.6	57
Yoldialer	45-65	20-25	25-40	0,6-0,8			150-250
Septarieler (Tertiær)	70-110	20-40	50-70	0,95-1,05	60 D	17 D	
Lillebælteler (Tertiær)	80-300	38-48	40-250	0,95-1,05	40 D	16 D	150-max
Norsk kvikler	21-35	16-22	5-13	-2 - -1			
Dynd						40 D	5-100
						D: drænet	

Tabel 5 b. Geotekniske parametre hentet fra litteraturen (Harremoës et al., 1984; Larsen et al., 1988; Fredericia, 1990, 1991; Jacobsen, 1970; Hansen, 1978) og GEUS' databaser, jævnfør Malinovsky og Klint, 1997.

Praktiske metoder til indsamling af uforstyrrede prøver af moræneler omfatter frigravning af blokke og søjler, som i afstivet form er noget nær den optimale type intaktprøver til brug i umættet zone. Kun luftarter vil blive tabt. I geotekniske undersøgelser anvendes der i reglen nedpressede eller rammede rør i bunden af sneglede borer til indsamling af uforstyrrede prøver. Prøvetagning med disse metoder påvirker moræneleret mere end frigravning, men prøverne anses dog for at være af god kvalitet, om end sprækkeaperturer vil kunne blive ændrede. Ved prøvetagning i sneglede borer (eller udgravninger) kan gennemskylning af makroporer med borevæske helt undgås.

I forskningssammenhæng er det muligt at benytte en lang række andre metoder og kombinationer af metoder, som ikke er i praktisk rutinemæssig anvendelse. Blandt mulighederne er:

- kerneboring, evt. af frossen borefront
- prøvetagere som kan åbnes og altså ikke kræver at prøverne presses ud
- småprøver (plugs) som udtages med rør der presses ind i borehullets væg.

Generelt gælder det, at prøvernes repræsentativitet for jordmediet/moræneleret stiger med stigende prøvestørrelse, idet inhomogeniteter såsom sandslirer og sprækker i de fleste tilfælde bliver bedre repræsenterede.

Metoder til at udtage uforstyrrede prøver i vandrette borer.

Prøvetagningsmetoder til udtagning af uforstyrrede prøver i vandrette borer adskiller sig i grundprincipperne ikke fra mulighederne i lodrette borer. De vanskeligheder, som er knyttet specielt til vandrette borer, hænger sammen med boremetoden, boringernes kurvatur, irregularitet, udfældet løsboret materiale på borehullets bund, og at tyngdekraften ikke kan anvendes som kraft under prøvetagningen.

I princippet er det muligt at udtage uforstyrrede vandret orienterede prøver ved ramning direkte i væggen af en udgravning eller i borefronten af et håndboret vandret hul. Håndborede huller kan, lige som almindelige snegleboringer, udføres tørt, sådan at der ikke sker indtrængning af nogen borevæske i makroporer. I praksis, hvor der skal kunne indsamles uforstyrrede prøver på større dybder eller langt inde i borestrækningen, er teknikkerne begrænsede til det der er muligt med det aktuelle boreudstyr (for Rantzausgade og i det følgende et NAVIGATOR D24 udstyr).

Boreteknikken indebærer, at uforstyrrede prøver kan udtages på to måder: enten baseres prøvetagningen på borestrengens rotation, hvorved der skæres en kerne fri, eller den baseres på aksial indpresning af et prøverør ved hjælp af boremaskinens hydrauliske presseværk. I begge tilfælde foregår prøvetagningen i borefronten.

Udborede prøver kan skæres så de ligger løst i prøvetageren, og der kan i princippet skæres gennem sten som kommer prøvetageren på tværs. Til gengæld kræver denne metode, at der skyldes ved den skærende front for at fjerne det friborede materiale.

Prøvetagning ved indpresning foregår uden skylning, sådan at der ikke sker yderligere ændring af makroporerens indhold, ud over hvad der måtte være sket under fremboringen. Indpressede prøver vil have en overflade ud mod prøverøret, som er deformeret. Tykkelsen af denne deformationszone vil afhænge af kornstørrelsen af det materiale der rammes af prøverørets skærende kant, idet f.eks. gruskorn tvinges ind i / uden om røret.

Tilpasning af boremetoden til uforstyrret prøvetagning

Til udtagning af uforstyrrede prøver i de vandrette borer i Rantzausgade blev der udviklet en prøvetager. Prøvetageren bestod af et A-rør, som blev monteret i stedet for borekronen, se kapitel 7. Prøverne skulle tages i borefronten i pilothullet. Ved de første forsøg på at føre prøvetageren (Figur 17) ind i boringen greb den fat i bunden i boringens krumme anboringsstrækning. Dette skete til trods for, at der var monteret en afstandsslæde på undersiden ved roden af prøvetageren. Efter at slædens afstand til prøvetageren var øget lykkedes det at udtage de ønskede prøver. Det er indlysende at de indledende vanskeligheder hang sammen med forholdet mellem afstandsslædens dimensioner og anboringshullets krumningsradius. Derfor kan de konkrete dimensioner kun anvendes ved den aktuelle (minimale) krumningsradius på 90m.

Afstandsslæden sikrer, når prøvetageren er nået ind i den vandrette borestrækning, at prøverøret holdes løftet over udsedimenteret friboret materiale langs bunden af boringen. Det er derfor indlysende, at den afstand, som slæden holder mellem borehullets underside og prøvetagerrøret, ikke må være lig med eller næsten lig med pilothullets diameter, hvorved prøvetageren ville gribe fat i uregelmæssigheder langs borehullets overside.

I tilfældet Rantzausgade er der næppe tvivl om, at de uforstyrrede prøver af hårdt moræneler blev taget i materiale, som var upåvirket af borekronens gravebevægelser. Derimod viste udstrømningen af borevæske gennem sprækker i terrændækket, at der er risiko for at makroporer i de uforstyrrede prøver kan være fyldt med borevæske. Prøvetagningen lykkedes kun i den øverste vandrette boring, mens den end ikke blev forsøgt i den nederste, på grund af det store indhold af sten.

Af hensyn til prøvetagningen bør der derfor anvendes mindst muligt skylletryk under fremboringen til prøvetagningsstedet. Dette kan opnås/forbedres dels ved en udformning af oppumpningen af borevæske (med friboret opslemmet materiale), så dette foregår ved den vandrette borestræknings begyndelse, sådan at hullet holdes gravitativt fri for materiale, som ellers kunne lukke sig omkring borestrengen med ukontrollabelt øget tryk til følge. I bl.a. denne sammenhæng viser erfaringerne i projektet, at udviklingen af en systematisk (automatisk) registrering af de basale oplysninger om boringen, især muddertryk/volumen, presstryk på borekronen/prøvetageren og evt. rotationshastighed/torsionskraft ville være værdifulde for fortolkningen af resultaterne.

Parametre

Geologiske og hydrauliske parametre som er styrende for oprensning.

Det jordmedie, som en oprensning foregår i, er geologisk opbygget af "lag" med anisotrop eller isotrop "matrix", der kan indeholde "makroporer". Oprensning ved ventilation og air-sparging er selvklaart baseret på, at luft skal bringes til at strømme gennem jorden på en sådan måde, at den opnår bedst mulig kontakt til forureningen (I dette projekts sammenhæng er der fokuseret på forurening med olieprodukter). Oprensningen foregår dels ved at en del af forureningen fjernes på dampform, dels ved at der tilføres iltningmiddel (luft) til jorden, så den bakterielle nedbrydning af forureningen fremmes, og dels ved at den strømmende luft kan strippe forurening ved medrivning (især ved airsparging). Forurening udenfor strømningsruterne oprenses relativt langsomt, ved at den siver gravitativt ud i strømningsruterne, ved diffusion, eller at den nedbrydes ved diffusion af ilt væk fra strømningsruterne.

Hele energien til oprensningen opnås altså ved strømning af især luft og luftens veje er derfor afgørende for effektiviteten. Luftens vej i den umættede zone vil afspejle de mest permeable ruter fra indsugnings- til udsugningssted i balance med trykfaldet (pumperaten). Samme princip gælder for strømning i den mættede zone, men der er strømningsforholdene noget anderledes, bl.a. fordi der er en betydelig lodret komponent i luftstrømningen.

Det er indlysende at oprensningseffektiviteten er afhængig af, om der er hydraulisk forskel på de enkelte lag på en lokalitet. Den bedste oprensningseffektivitet kan opnås i vel-sorterede granulære medier, med kornstørrelser fra mellem-sand og op, og hvor der er lav vandmætning. Jo dårligere sorteringsgrad og jo mindre gennemsnitskornstørrelse desto dårligere er oprensningseffektiviteten. Med den nævnte lavere oprensningseffektivitet følger også en stigende påvirkelighed af små variationer i kornstørrelse og vandmætning.

Ventilation i den umættede zone kan have en udtørrende effekt, hvilket vil øge matrix-permeabiliteten i forhold til den oprindelige, men især for de mere finkornede jordarter vil dette være i labil balance med genfugtningen på grund af kapillær vandstigning.

Disse forhold betyder at selv beskedne lagvise forskelle i jordarterne eller deres matrix-egenskaber (såsom lamination) kan optræde som barrierer for især den lodrette strømningskomponent. Dette kan i princippet udgøre kapillære barrierer.

I de mere finkornede jordarter, såsom moræneleret, der er emnet for de aktuelle undersøgelser, er der i reglen under givne vandmætningsforhold i praksis ikke nogen luftpermeabilitet i matrix, og al ventilation foregår derfor direkte gennem makroporer (sprækker, rodhuller, ormehuller) og indslag af grovere kornede inhomogeniteter. Oprensning i den finkornede matrix sker langsomt gennem diffusionsbegrænsede processer.

Morænerets mineralogi, bl.a. hvis det indeholder smektit, gør at matrix vil svelle, når vandindholdet er højest, og skrumpe, når det er lavest. Dette indebærer, at der kan være klima/sæson-betingede variationer i makroporers hydrauliske egenskaber, hvilket vi mener var årsagen til at "grundvandsspejlet" under forsøgene i Rantzausgade, målt i de enkelte borer, blev mere og mere forskelligt efterhånden som det blev efterår og vinter.

I den mættede zone foregår ventilationen (airsparging) ved indblæsning af luft under grundvandsspejlet. Der er altså tale om mindst tofasestrømning (vand, luft og evt. olieforurening) indtil der evt. sker udtørring i strømningsruterne. I tofasesituationen vil densitetsforskellen på de mobile faser primært drive den injicerede luft opad. Dette vil foregå i form af forgrenede strømningsruter, der spreder sig over et areal, der afspejler den lodrette strømningsanisotropi.

For det undersøgte moræneler i Rantzausgade vil strømningen af injiceret luft i den mættede zone være begrænset til makroporerne. Det drejer sig, jævnfør den geologiske beskrivelse, om en kombination af vandrette / lodrette sprækker og sandslirer. I denne situation betinges strømningsmuligheden altså af sprækkernes aperturer, og hvor godt systemet af sprækker / sandslirer er forbundet. Beskrivelserne viser, lige som for all andre lerlokaliteter i Danmark, hvor GEUS har foretaget sprækkekarakteristik (Klint in prep.), at graden af "forbundethed" i Rantzausgade falder med dybden.

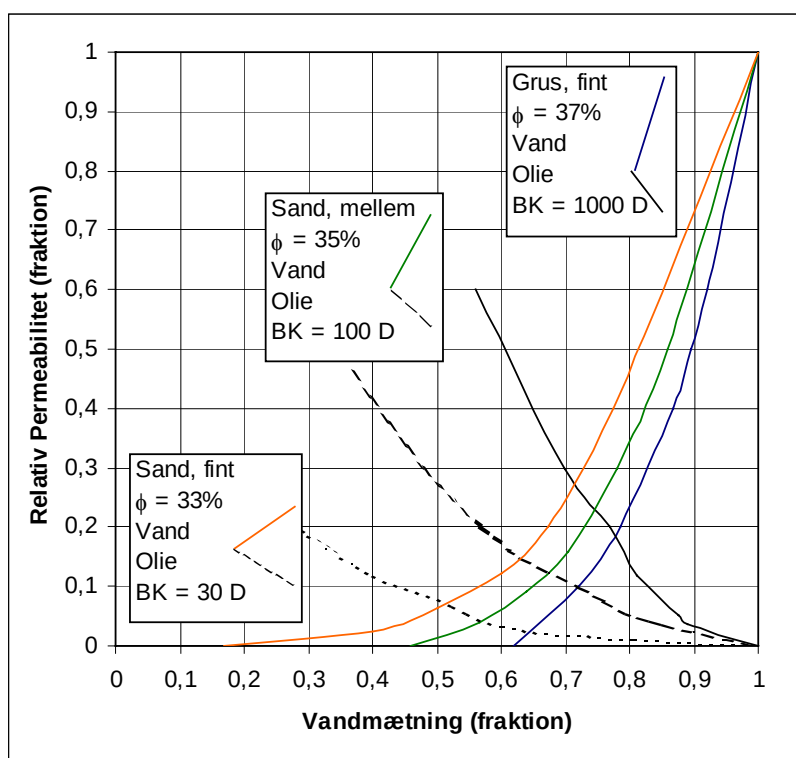
Luftstrømning i dette system under mættede forhold vil konceptuelt bestå i en kombination af vandret udbredelse, som luftlommer langs vandrette sprækker og sandlinser og lodret kanalisering op gennem åbne sprækker, der hvor de er forbundet med / skærer "luftlommerne". Direkte kontakt til forurening i morænelerets matrix sker således konceptuelt langs strømningsruter med et maksimalt overfladeareal svarende til 2 gange arealerne af sprækker og sandslirer. I Rantzausgade er dette areal i det mættede sparginginterval (2,5-3,2 m u.t.) beregnet til maksimalt $220 \text{ m}^2/\text{m}^3$, mens den i den umættede zone maksimalt er $410 \text{ m}^2/\text{m}^3$. En sammenligning med andre jordarter fremgår af Tabel 6.

Interval \ Jordart	Moræneler, Rtzg	Sand, velsorteret, f0,5 mm	Fyld, Rtzg
Umættet 1,5-2,5 m u.t.	$410 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$9000 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$*3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$
Mættet 2,5-3,2 m u.t.	$220 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$*3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$	-

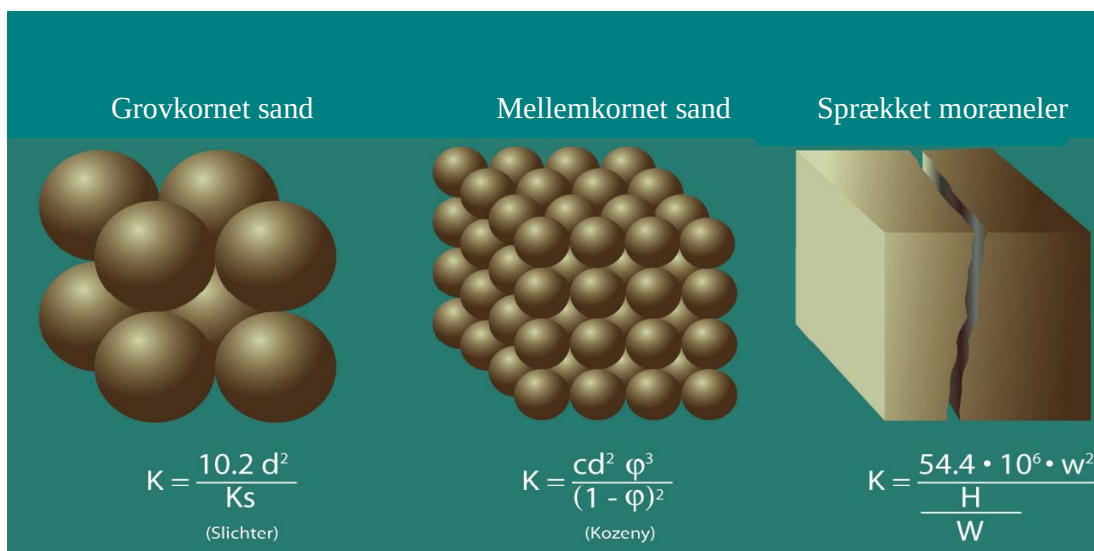
Tabel 6. Sammenligning af maksimale kontaktflader mellem injektions/ventilationsluft og jordmedie. Værdierne er dels beregnede, dels anslåede *. For mættet sand er strømningsruterne anslået til at optage 1/3 af porøsiteten. Tallenes størrelsesordener afspejler, at kontaktarealet i sand er størrelsesordenen 10 gange større end i moræneleret i Rantzausgade, og at oprensning ved airsparging i moræneleret derfor er afhængig af diffusion over 10 gange så store afstande som i sandet. Det er indlysende at for finere sand og mere usortet sand vil den indre overflade stige, uden at kontaktfladen stiger tilsvarende på grund af større indhold af kapillært/residualt vand. Rtzg står for Rantzausgade.

Den større afhængighed af diffusiv transport ved in situ oprensning i moræneler end i sand (Tabel 6) kan omsættes til, at oprensningstiden alene på dette grundlag er ca. 10 gange længere i moræneler end i sand.

De hydrauliske parametre for matrix i konsolideret moræneler, Tabel 5, ligger omkring 10^{-10} m/s, mens feltresultater ligger 2-4 størrelsesordener højere. Resultaterne fra slug testene i Rantzausgade viste hydrauliske ledningsevner på ca. $1,6 \times 10^{-6}$ m/s, altså 4 størrelsesordener over rene matrixværdier. Disse relativt høje ledningsevner må skyldes makroporerne (s.l.) i moræneleret. For sandaflejringer er de hydrauliske ledningsevner typisk på 10^{-4} - 10^{-3} m/s, altså endnu et par størrelsesordener højere end for sprækket moræneler, Figur 37. Sammenlagt betyder diffusionsovervejelserne ovenfor, og de hydrauliske forhold, at oprensning ved sparging og/eller ventilation i forurenede morænelersmatrix, alt andet lige, vil have et tidsperspektiv, der er en til to størrelsesordener længere på grund af forureningsforholdets ringe tilgængelighed. Disse forskellige hydrauliske forhold er illustrerede i Figur 38.



Figur 37. For vand i et ikke blandbart to-fase vand-oliesystem falder permeabiliteten drastisk ved vandmætninger under ca. 0,7 afhængig af kornstørrelse (D for Darcy). Den specifikke permeabilitet kan beregnes ved at gange den relative permeabilitetsfraktion med BK. Også oliepermeabiliteten er angivet som illustration af den store mætningsafhængighed af oliefasens mobilitet. For et system med tre ikke blandbare faser (luft, vand, olie) ligger den specifikke permeabilitet for luft, i området omkring skæringspunkterne mellem samhørende relative permeabiliteter for vand/olie, yderligere en størrelsesorden lavere. Basis permeabiliteten BK (for én-fase strømning) falder proportionalt med kornstørrelsen. 1 Darcy er $0,966 \times 10^{-3}$ cm/sec. Sammenstillet på basis af Rosenbom et al. (2000).



Figur 38. Illustration af hvordan sands permeabilitet bliver mere afhængig af størrelsen af den indre overflade (kornoverfladen) med faldende kornstørrelse. For sprækkede jordarter med lav matrix permeabilitet er den effektive permeabilitet især afhængig af sprækkeaperturen. K er permeabiliteten, d er korndiameteren, K_s er en pakningskonstant, c er den specifikke overflade af kornene, W er sprækkeaperturen og H er strømningslængden gennem sprækken. Blandt andre baseret på Slichter 1889 og Kozeny 1927.

Dette indebærer, at fuld in situ oprensning i moræner ved airsparging og kunstig vakuumventilation vil være forholdsmæssigt dyr sammenlignet med oprensninger af sandlokaliteter. Dette indebærer imidlertid ikke, at en sådan oprensning er umulig. Den relativt langsomme udveksling med matrix tillader, at der anvendes en anden strategi for forurenede moræner end for sandlokaliteter. På grund af det forholdsvis ringe bestrøgne areal pr. m^3 vil det være muligt at anvende pulseret ventilation med særligt lange pauser. Først sparges / ventileres der indtil afkastluftens indhold af forureningsbestanddele har nået et acceptabelt niveau. Herefter lukkes anlægget af i en periode, indtil yderligere forurening er trængt fra matrix ud i makroporerne som rebound, hvorefter der igen sparges / ventileres til et acceptabelt niveau er nået osv. Reboundperioderne kan så tilrettelægges, så de falder sammen med den våde årstid, hvor høj grundvandsstand vanskeliggør vakuumventilation. Denne angrebsvinkel kan bl.a. være relevant ved forureninger, som ikke kan bortgraves, ved svage forureninger og ved efterbehandling efter en hovedoprensning, hvor der forekommer rebound. Men angrebsvinklen forudsætter, at oprensningstiden kan tilpasses metoden.

Naturlig nedbrydning forekommer spontant i moræneleret, som dokumenteret i det geologiske afsnit. Olieforurening i moræner vil selvsagt også blive reduceret ad denne vej. Den naturlige nedbrydning kan fremmes ved etablering af tæt terrændæk med passivt styret lækage, sådan at variationer i grundvandsspejl og barometertryk vil forårsage en vis ventilation og dermed understøtte den naturlige nedbrydning.

Endelig vil det lithologisk- / makroporestyrede strømningsmønster, som beskrevet ovenfor bevirke at udformningen af test af influensradius bør overvejes, idet det er muligt at registrere i hvilken dybdeinterval i en monitoringsboring, der optræder gennembrud. Denne

oplysning vil være uvurderlig i forbindelse med dimensionering og konstruktion af et remedieringsanlæg. Dette gælder for moræneler, men forventeligt også for test i andre jordarter.

Clogging, frakturering og smearing

Disse effekter er alle forårsagede af selve de kunstige indgreb, som foretages i jorden i forbindelse med borearbejder, indvinding, airsparging og vakuumventilation.

Clogging består i en reduktion af strømningsarealet, så strømningsraten reduceres. Fænomenet kendes især fra vandforsyningsboringer. Her transporteres jordpartikler med det grundvand, som strømmer mod pumpeboringen. Da strømningshastigheden stiger hen mod filtret i boringen, vil partikler, der først er revet løs, kunne fortsætte indtil de evt. kiler sig fast i gruskastning eller filter. Her kan de efterhånden reducere strømningsåbningerne så meget, at boringens ydelse reduceres.

Under afsækning af grundvandet i forbindelse med oppumpning vil der også ske et trykfald i vandet. Dette trykfald vil være koncentreret i filtret, hvor det kan forårsage en anden type clogging: udskillelse af kalk, som hæfter på filtret. Også de kemiske ændringer i grundvandet i området umiddelbart omkring filtret, f.eks. introduktion af iltholdigt vand i den reducerede zone, kan medføre clogging i form af rust- eller manganudfældninger. Endelig kan bakteriebelægninger, især i forbindelse med forurening, reducere strømningsarealet. Da disse typer produktionsrelateret clogging optræder i eller umiddelbart omkring filtret, er det erfaringsmæssigt muligt at bringe dem tilbage til fuld ydelse ved forskellige former for stimulering.

I indledningsfasen af nærværende projekt blev clogging diskuteret med flere rådgivere, som havde praktisk erfaring for at clogging ikke var et betydeligt problem i forbindelse med airsparging og vakuumventilation. Dette må hænge sammen med, dels at det ved disse teknikker er luft der strømmer, hvorfor transportevnen for partikler er lille og den kemiske reaktivitet, bort set fra iltning, er ringe, og dels at strømningsretningen for airspargings vedkommende er rettet væk fra filtret og ud i jorden. Den transport af partikler og udfældning af rust/mangan, som måtte forekomme, vil foregå i en zone et stykke væk fra injektionspunktet, hvorfor den samlede effekt på ydelsen vil være ringe.

Clogging kan imidlertid også forekomme i forbindelse med etableringen af ventilationsanlæg, der er baserede på boringer. Dette hænger sammen med boremetoden, især ved boringer, hvor der bruges skyllevæske til at fjerne friboret materiale og til at stabilisere hullet. Da skyllevæsken pumpes rundt, vil der være overtryk ved borefronten og langs den uforede del af boringen, hvorfor væsken med indhold af friboret materiale vil påvirke den strømningsmæssige kontakt mellem borehul/filter og den omgivende jord. I sandede jordarter med matrixpermeabilitet vil opslemmet materiale i borevæsken blive afsat som en belægning langs borehullet, idet materialet afsættes nærmest som grums i et kaffefilter. Denne form for clogging kan fjernes mekanisk forud for installation af filter. Derimod kan den clogging, der vil kunne forekomme ved at opslemmet materiale i borevæsken trænger ind i makroporøse jordarter (med sprækker, rodhuller, ormehuller), kun fjernes ved renpumpning om end den vanskeligt lader sig fjerne helt. Jo kortere filterinterval desto mere effektiv vil renpumpningen være.

Med disse overvejelser er det indlysende, at der er større risiko for clogging med opslemmet friboret materiale i forbindelse med vandrette boringer end ved lodrette. Dette skyldes, at hele det tilsigtede lange vandrette filterinterval påvirkes med samme væsketryk, og at den nærmeste del påvirkes gennem hele den periode, som borearbejdet varer. Dermed det friborede materiale lukker sig omkring borestrengen, vil der kunne opstå overtryk

hvorved opslemmet materiale injiceres i den omgivende jord med utilsigtet højt tryk. Denne effekt er dokumenteret i Rantzausgade, hvor borevæske blandet med opslemmet friboet materiale blev injiceret i et sådant omfang i en del af det vandrette boreforløb, at det løb ud på terrænoverfladen 2 m over borehullet, Figur 16. Det er indlysende, at så dramatisk clogging og dermed ændring af den hydrauliske ledningsevne ikke kan restaureres fuldstændigt ved renpumpning, bl.a. fordi det er relativt vanskeligt at opnå samme renpumpningseffekt langs hele den åbne sektion i en vandret boring.

Endelig kan der forekomme clogging med stivnede eller immobile tilsætningsstoffer til borevæsken. Disse tilsætningsstoffer har som hovedformål at stabilisere borehullets væg og at holde friboet materiale i suspension, så det kan pumpes væk. Også disse hensyn er særligt relevante i forbindelse med vandrette boringer. I matrixporøse jordarter kan tilsætningsstofferne fjernes ved skyldning med rent vand under reamningen samtidig med at et forerør (ved hjælp af hvilket filtret siden installeres) trækkes ind. Derimod er det vanskeliggere eller umuligt at fjerne denne type clogging, hvis den er trængt ind i makroporer. Bentonit i makroporerne vil næppe kunne fjernes ved renpumpning. Nogle polymerer nedbrydes angiveligt spontant eller kan nedbrydes ved tilsætning af en "krakker", så de kan fjernes ved renpumpning. Denne renpumpning af boringer i den umættede zone kræver selvsagt særlige forholdsregler til sikring af vandfyldning under processen. I Rantzausgade blev der ikke anvendt tilsætningsstoffer, idet en test af en selvnedbrydende polymer var negativ indenfor den relevante tidsramme (2 måneder).

Kunstig frakturering af jorden kan især forekomme i forbindelse med borearbejde (hydrauliske sprækker), men også under injektion / airsparging (pneumatiske sprækker), som følge af at den samlede vægt, træghed og kohæsion af jordarten(erne), over det niveau, hvor trykpåvirkningen sker, overskrides (meget lokale sprækker kan også blive dannede eller åbne mekanisk i forbindelse med snegleboring og trækning af, især lodrette, forerør). Frakturering / sprækkedannelse vil ske ved åbning af sprækkeplaner, altså ved udvidelse på tværs af sprækkeplanet. Da åbningen af en hydraulisk sprække vil ske i den retning, hvor udvidelsen kræver mindst energi, vil sådanne sprækker (i det mindste indenfor de øverste 8.10 m u.t.) primært være vandrette og åbningen foregå i lodret retning, så der dannes en lav topografisk bule. Som en følgevirkning vil der kunne dannes eller åbnes stejltstående sekundære sprækker, som er knyttede til opbulingen.

Frakturering kan være ønskelig i forbindelse med, at der f.eks. skal etableres ventilationsforbindelse til isolerede makroporer ved at injicere sand i en kunstig sprække. Det vigtige er imidlertid, at være i stand til at styre, hvorvidt der dannes kunstige sprækker. Under airsparging injiceres der luft under grundvandsspejlet. I den dynamiske injektionsfase vil den injicerede luft kunne presse jordarterne over injektionsstedet opad med en kraft svarende til summen af opdriften og injektionstrykket. Opdriften af injiceret luft i en luftlomme (vægten af den overlejrende frie vandsøjle) kan i normal oprensingspraksis med injektion tæt under grundvandsspejlet ikke overstige 1 bar, hvorfor frakturering alene på grund af opdriften ikke vil kunne forekomme. Med dynamisk overtryk i jordmediet under injektionen vil der kunne opstå kunstige pneumatiske sprækker ved et initialtryk på 5-10 atm og kumulativt stigende med 0,67-1,11 atm pr. meter u.t.. Initialiseringen af den pneumatiske sprække kræver kun et meget beskedent løfteareal; f.eks. kun en pakke i en lodret boring, men et større løfteareal, såsom i en vandret boring, fremmer selvklart sprækkedannelsen.

Efter initialiseringen af den pneumatiske sprække vil den fortsat kunne udbrede sig ved overtryk på ca. 1,5 bar pr. meter u.t.. Det er derfor vigtigt at være opmærksom på, at kontrollere eventuelle høje trykpulser i forbindelse med især den indledende fase af airsparging. Under forsøgene i Rantzausgade nåede luft-injektionstrykkene inde i filtrene (og derfor heller ikke udenfor filtrene) ikke op på et kritisk niveau.

Kunstige hydrauliske sprækker dannes ved tryk (initialtryk såvel som propageringstryk), som generelt er halvt så store som for pneumatiske. Til gengæld er det nødvendige initialtryk langt mere afhængigt af det løfteareal, som er til rådighed. Derfor er der stor mulighed for, at der vil kunne dannes hydrauliske sprækker i vandrette borer, idet hele eller store dele af den vandrette borestrækning kan komme under tryk samtidig under borearbejdet. Hydrauliske sprækker initialiseres ved tryk på 2,5-3,5 atm overtryk og stigende med 0,15-0,2 atm pr. meter u.t. Efter initialiseringen udbreder sprækken sig ved overtryk ned til 1 atm. Det er indlysende, at et "højt" pneumatisk tryk under en sikkerhedsmargin mht. frakturering vil kunne transformeres til et hydraulisk tryk over sikkerhedsmarginen ved injektion i den mættede zone. I Rantzausgade skete der en hydraulisk frakturering fra den øverste vandrette boring (og med forbindelse gennem sekundære frakturer til terræn), på grund af at der opstod et voldsomt, men ikke målt, tryk i en del af den vandrette strækning, på grund af at løsboret materiale blokerede for strømning langs borerøret, mens skyllevandspumpen var i fortsat funktion. Sprækkerne i Rantzausgade var stejle, idet overtrykket hævede og dermed skabte tensionssprækker i overjorden over den ret overfladenære boring. Med dannelsen af kunstige frakturer kan en betydelig del af spargeluften blive ledt uden om de naturlige makroporer, hvorfor det bør sikres, at trykkene ikke utilsigtet når op i nærheden af det kritiske niveau.

Overalt, hvor der graves og bores eller udpresses prøverør i jordarter, vil der foregå en deformation af den overflade, som eksponeres mod værktøjet (D'Astous et al., 1984; Young and Gates, 1997; Paul, 1987). Dette hænger sammen med, at værktøjet tvinges gennem jordmediet under anvendelse af et overskud af forskydningsspænding langs dets overflade. I jordmediet kompenseres forskydningskraften ved intern deformation / dilatation / smearing som aftager med afstanden fra værktøjet. Ved denne deformation fordeles jordarten langs den bearbejdede flade, sådan at strømningsegenskaberne gennem den ændres. Ændringen af de hydrauliske forhold er beskeden i kornede jordarter så som sand og grus, mens den kan være betydelig i lerede jordarter.

I forbindelse med overvejelser om airsparging og vakuumventilation i sprækket moræneler er det især vigtigt at anlægget designes, så der tages højde for de naturlige sprækkesystemer og -orienteringer. Derfor er det nødvendigt at fjerne smear fra de overflader, der beskrives med henblik på karakteristik af sprækkerne. Dette gøres ved at "tippe overfladen af" med en kniv eller lignende, sådan at hele overfladen består af friske brud i overfladen. Disse brud vil dels være irregulære, hvor moræneleret er blevet delt gennem sammenhængende matrix, og dels være sprækkeflader hvis modpart er blevet fjernet. Efter denne behandling står blotningen så at sige åben for beskrivelse i sin samlede teksturelle kompleksitet. En analyse af denne type lå også bag beskrivelsen af sprækkesystemerne i Rantzausgade.

Ligesom smear må fjernes, for at åbne en gravet blotning så den kan beskrives, må det smear, der er dannet under borearbejde, så vidt muligt fjernes, for at der kan blive strøm-

ningsadgang mellem en boringen og de omgivende (især lerede) jordarter. Den mest effektive strømningsmulighed opnås ved at efterligne den førnævnte afplukning af overfladen.

Ved forsøgene i Rantzausgade blev der anvendt tre teknikker i forsøg på at fjerne smear. Til de vandrette boringer blev der benyttet en standard skærende reamer, hvis grove radiære tænder må forventes nærmere at "pløje" sig gennem moræneleret under dannelse af nyt smear end at afplukke overfladen. Med mindre ændringer, så færre og bredere skærende tænder rettes let fremad i rotationsretningen, ville fjernelsen af smear formodentlig kunne forbedres, samtidig med at hullets tværsnit ville blive mere regulært, sådan at det udgør en mere hensigtsmæssigt anlægsflade for pakkere.

En særlig form for smear opstod i den ene ende af den dybestliggende vandrette boring i Rantzausgade, hvor reameren møllede rundt i håndstore sten. Denne type "smear" vil formodentlig under alle omstændigheder være svær at håndtere.

I de snegleborede lodrette boringer, hvor ventilerbarhedstestene blev gennemført, blev smear forsøgt fjernet ved at udtage to koncentriske rørprøver i filterintervallet, Figur 4: *Først* blev der udtaget en prøve med et nedpresset B-rør. Dette medfører, at der efterlades et smear i overfladen af det efterladte hul, samtidig med at moræneleret omkring hullet muligvis er blevet noget komprimeret under prøvetagningen, idet skæret på B-røret er asymmetrisk, sådan at den masse som fortrænges af røret forskydes udad. *Dernæst* blev der udtaget en koncentrisk prøve med et A-rør i samme dybdeinterval for at fjerne det først dannede smear under forhold, hvor det volumen moræneler, som fortrængtes af A-røret, kunne ekspandere nogenlunde frit ind i det hul der var efterladt af B-røret. Effekten af denne procedure ville antagelig have kunnet optimeres dersom slibningen af den skrå skærende flade på A-røret havde været på dets inderside. Imidlertid viste ventilerbarhedstesten, at det var lykkedes ved denne fremgangsmåde at etablere strømningskontakt mellem boringerne og den omgivende jord.

De 9 monitoringsboringer blev etablerede ved nedramning af rør med løs konisk spids, som blev slået 10 cm længere ned end rørene. På denne måde blev der åbnet et "filterinterval" mod den omgivende jord. Installationsmetoden medførte betydelig kompression og smear af moræneleret omkring filterintervallet. Denne mekanisk influerede zone blev forsøgt fjernet eller åbnet for strømningskontakt til sprækkerne ved at børste intervallet med en roterende stålborste. Denne fremgangsmåde var nem og billig, men, som slugtestene viste, var der kun skabt strømningskontakt i 2/3 af filtrene. Derfor ville en lille skærende reamer have været at foretrække. Ud over den formodede suboptimerede fjernelse af smear i monitoringsboringerne kan enkelte af de dybest placerede filtre eventuelt være installeret i intervaller uden frakturer og dermed med naturlig dårlig strømning.

Sammenlagt er resultaterne med de simpelt installerede monitoringsboringer overraskende gode i forhold til resultaterne ved hjælp af de mere sofistikeret installerede boringer til ventilationstest. Andre teknikker er dog at foretrække (NIRAS, 2001).

Ventilering

Forskellige teknikker.

Kunstig ventilering af jord (vakuumventilering og air sparging) er en velbeskrevet praktisk teknik til in situ fjernelse af volatil og bionedbrydelig forurening fra jord, f.eks. Johnson et al. 1993, Madsen og Larsen 1995. En betydelig del af den tekniske udvikling, dokumentation og udformning af vejledning er sket i regi af det amerikanske EPA, som har udgivet en detaljeret gennemgang af og oversigt over status for ventilering, USEPA 1997. I Danmark har

Oliebranchens Miljøpulje produceret en kvalitetsmanual (1997), og Miljøstyrelsen har udarbejdet en vejledning om oprydning af benzin- og olieforurenede grunde (1997).

Ventilering indebærer kunstig beluftning af in situ forurening. Herved fjernes gasformig forurening fra luftens strømningsruter, mens væskeformig forurening iltes og i et vist omfang flyttes / fjernes ved medrivning og bionedbrydes. Forureningen diffunderer ud i luftens strømningsruter, hvis form og overfladeareal afhænger af det forbundne porenets karakteristika (fri fase vil også kunne strømme ud i ruterne). Luftindblæsning under grundvandsspejlet og omfordelingen af væskeformig forurening kan yderligere stimulere en bakteriell nedbrydning. I praksis kombineres ventilering ofte med andre teknikker eller varianter af de nævnte teknikker. Blandt de betydelige varianter er "periodevis pumpning", hvor grundvand og forurening invaderer luftens strømningsruter i pauserne, sådan at ny forurening er tilgængelig for beluftning under næste indblæsningspuls (f.eks. Broholm, 2000) og "bioventing", hvorved forureningen primært nedbrydes af naturlige eller tilsatte bakterier ved udsugning / indblæsning af luft eller andet oxidationsmiddel (USDOE, 1995).

Fælles for kunstige ventilationsteknikker er at luftstrømmene skal kunne kontrolleres så der ikke utilsigtet undslipper forurening til atmosfæren eller til ubehandlede og/eller uforurenede områder i jorden og grundvandet. I praksis indebærer dette, at der ikke kan oprenses alene ved indblæsning af luft og, for et kombineret air sparging / vakuumventilationssystem, at der skal suges betydeligt mere jordluft ud end der blæses ind for at kompensere for lækage fra omgivende jordluft og atmosfæren. Det må selvklart undgås, at der skabes yderligere utilsigtet lækage til atmosfæren gennem kunstigt inducerede sprækker. Håndfast dokumentation for, at vakuumsystemet indfanger al injiceret luft kan skaffes ved en tracer-test af det kombinerede injektions- og vakuumelekstraktionssystem. En sådan tracertest med sporstoffet SF₆ indgik i planerne for Rantzausgade, men kunne ikke gennemføres, på grund af at afpakningerne i enderne af filterstrengene ud mod tankgraven ikke holdt tæt. En vellykket tracertest sikrer ikke i sig selv, at luftstrømmen på hensigtsmæssig måde belufter jord / grundvand, men kun at den injicerede luft genindfanges. Absolut dokumentation kan kun skaffes ved et fuldskalet forsøg, som afsluttes uden "reboundeffekter", men kan tilnærmes ved sektionvis test og trykkontrol af det samlede ventilationssystem. Også dette var planlagt for Rantzausgade, men måtte opgives.

Kombinerede air sparging og vakuumventilationsanlæg er teknisk baserede på, at der etableres et indblæsnings- og et udsugningssystem til at behandle forureningen. Injektion i et punkt (kort filter) vil drive injektionsluften opad og centripetalt i et mønster, som er dikteret af jordmediets strømnings anisotropi. Da den vandrette udbredelse øger det jordvolumen, der beluftes, kan vakuumelekstraktionssystemet derfor hensigtsmæssigt placeres i den umættede zone rundt omkring indblæsningsfiltret. Denne konfiguration vil sikre, at der skal tilføres minimal indblæsningsluft, men til gengæld vil vakuumsystemet skulle håndtere en betydelig mængde ekstra luft, som tilføres fra det omgivende jordvolumen.

Den omvendte strømningsretning, hvor luften sparges langs forureningens yderkant og ekstraktionen foregår centrifugalt, er også mulig. I dette tilfælde vil der være meget kontrol over ekstraktionsluften, mens en del af den tilførte luft vil kunne lække ud af behandlingsområdet.

Disse to principielle konfigurationer modificeres i praksis efter logistik, økonomi og teknologi. I dette projekt eksperimenteres der især med anvendelse af vandrette borer til ventilationsformål. En teknisk sammenligning af forskellige udbygningsmåder er vist i Tabel 7.

	Lodret boring	Vandret boring	Gravet dræn
Filter etableres fra	Filter-lokaliteten	Vilkårlig lokalitet	Dræn-lokaliteten
Afpropninger	En pr. filter	Mindst to pr. filter	Hele drænlængden
Propper etableres	Med tyngdekraften	Mod tyngdekraften	Med tyngdekraften
Filtrenes effekt	Punktvis	Elongeret	Elongeret
Inddel filterstrækning	Ikke påkrævet	Fordelagtig	Fordelagtig
Flowstyring	Mellem enkeltfiltre	Mellem filtersektioner	Mellem drænsektioner
Flowsystem	Distribueret	Samlet	Samlet
Filter installation	Enkel	Kompliceret	Enkel

Tabel 7. Væsentlige logistiske og tekniske forskelle på forskellige typer af ventilationsfiltre.

Som supplement til de forskellige former for ventilations implementering kan barrierer inddrages. Det er oplagt at barrierer, som er etablerede for at afskære en forureningsudbredelse eller luftstrøm, vil reducere det nødvendige volumen af og behovet for kontrol med luften (Miljøstyrelsen, 1996). Barrierer forekommer nogle steder, bl.a. som strømningsbegrænsende barrierer ved fundamenter, kældre og spunsvægge eller lækagegivende barrierer ved udgravninger og grøfter, allerede før ventilationsanlægget installeres.

En væsentlig del af et ventilationsanlæg udgøres af et monitoringsystem, der skal dokumentere ventilationens funktion og effekt. Monitoringsystemet skal bestå af målepunkter, som er i tryk- og strømningskontakt med jordmediet på steder og i dybder, hvor ventilationens effekt skal dokumenteres eller, i området udenfor influensradius, afkræftes.

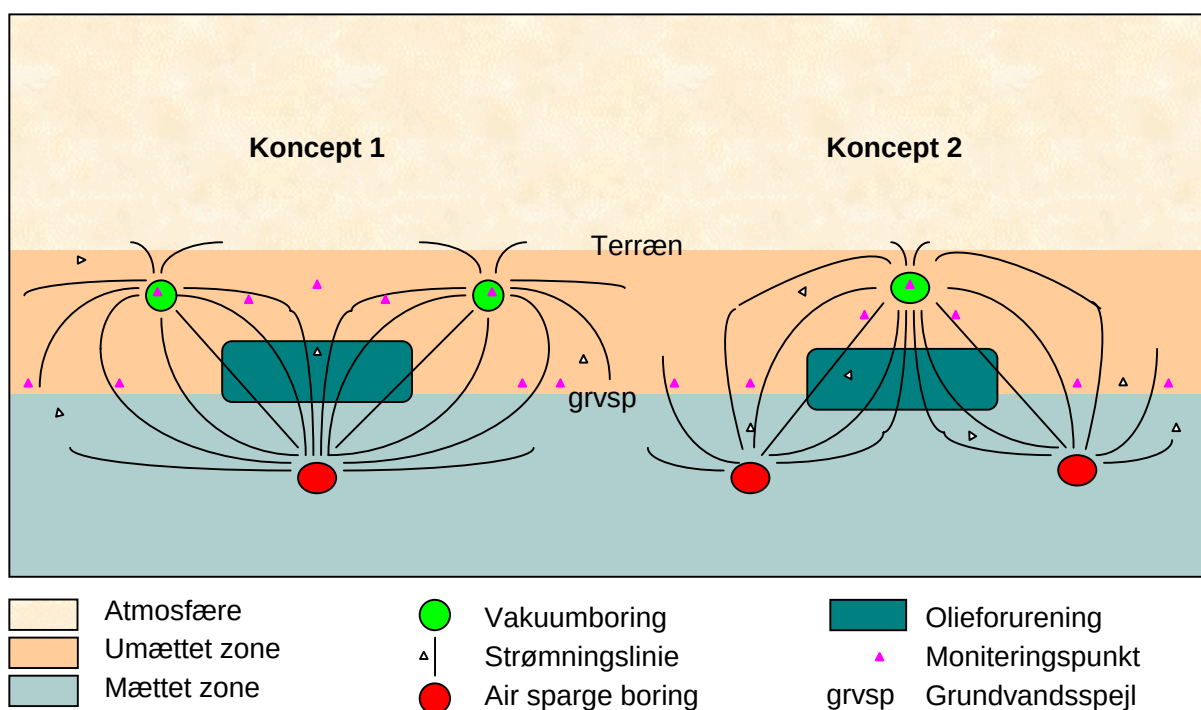
Særligt ved lange vandrette filtre til air sparging kan det være af betydning at monitere trykket udenfor filtret (i annulus) for at dokumentere den ønskede trykfordeling mod jorden og funktionen af de eventuelle afpakninger mellem filtersektioner. Vandrette air sparging filtre er *a priori* beliggende under grundvandsspejlet, hvorfor injektionen af luft forudsætter at det vand, som findes inden i filtret, fjernes i hele dettes længde før den omgivende jord beluftes. Tømningen af filterstrækningen for vand kan ske ved at injicere luft i filtret ved overtryk så vandet presses ud af filtrets åbninger (typisk få små huller) for til sidst, når der er luftpassage gennem hele filterstrækningen, at gå over i air sparging. Dette indebærer det problem at hurtig tømningen for vand må foregå ved ret højt overtryk med deraf følgende fare for frakturering af jorden ud for de områder, hvor filteråbningerne først giver adgang for luften. Yderligere er der den hage ved denne fremgangsmåde, at filtret ikke kan tømmes for vand under niveauet for den lavestliggende injektionsåbning (Åbningerne vender typisk opad). Det resterende vand langs bunden af filterrøret øger derfor luftens strømningsmodstand i filtrets længderetning.

I dette projekt er der derfor blevet indbygget lækageslanger i filtrene, og med åbninger ved filtrets bund, så vandet kan tømmes af filtrene ved lavt overtryk. Når så der er luftgennembrud i lækageslangerne lukkes disse, og der er sikkerhed for at hele filtret er luftfyldt, sådan at lufttrykket kan øges til det ønskede injektionsniveau og med "fuld kapacitet" i hele filtret. Problemet med at det vand, som tappes af filtrene vil være forurenet, og derfor skal bortskaffes, kan eventuelt elimineres ved at sørge for, at filtrene er udfyldt med en ballon med rent vand under installationen (punkteres efter installationen) som siden fjernes via "lækageslangerne".

Konceptuel model for in situ ved vandret boring

Flere konceptuelle udformninger af kombinerede air sparging og vakuumventilationsanlæg er mulige jævnfør diskussionen ovenfor. Her præsenteres to grundlæggende koncepter for en olieforurening baserede udelukkende på vandrette ventilationsfiltre i kombination med lodrette monitoringsfiltre, Figur 39.

Selve installationen af et vandret filter kan være vanskelig, idet der kan være friktion langs borehullet, såden at f.eks. filtervæv ødelægges under indføringen. Den praksis der blev fulgt under installationen i Rantzausgade, hvor installationen skete fra en åben tankgrav, som de vandrette borer var boret ud i, lader sig modificere så den er generelt anvendelig til borer, der er standardmæssigt boret med såvel anboring som udboring i terræn: Før filtersætningen trækkes der en foring med så stor lysning, så filtret kan føres ind i forerøret. Ved at lave modhold, mens forerøret derefter trækkes ud, efterlades filtret i den forudbestemte del af den vandrette boring. Dersom filtrets orientering (op/ned) er af betydning, kan den korrekte stilling opnås ved at forlænge filtret med tilstrækkeligt langt påskruet blindrør, så filtret kan drejes (højre om) fra udmundingen(-erne) i terræn og holde det i position, mens forerøret trækkes ud. Når den blivende sektion af filterrøret herefter er blevet afproppet og fikseret med f.eks. pakkere, kan blindrøret (-ene) skrues af og fjernes. Den fleksibilitet, som kræves for at filtret kan skydes ind i forerøret og trækkes forbi krumningerne ved indgangs- og udgangshullerne, blev opnået med almindeligt plast filtermateriale som viste sig at være tilstrækkeligt fleksibelt til at følge kurvaturen i forerøret. Filtrets ydre diameter var 7"-178 mm, mens forerørets indre diameter var 270 mm.



Figur 39. Tværsnit i to koncepter for kombineret air sparging og vakuumventilation, baseret på filtre i vandrette borer. Beluften påvirker i begge tilfælde et større areal / volumen end det aktuelt forurenede, og der monitoreres såvel indenfor det forurenede felt som udenfor dets afgrænsning og i afgangsluften. I begge tilfælde er de "dublerede" borer lagt umiddelbart udenfor forureningens afgrænsning, mens den enlige boring ligger centralt over forureningens længdeakse.

Ved installation af vandrette filtre i sand kan hullet stabiliseres med bentonit og/eller polymer. Disse midler kan, dersom de ikke kan fjernes fuldtud fra borehullet og dets vægge, være hindrende for både luftstrømmen under oprensningen og monitoringen af oprensningens effekt. Da der yderligere kan være smear i de særlige monitoringsfiltre, blev der på grundlag af erfaringerne fra Rantzausgade, ved udbygningen af et målefelt i Flakkebjerg med vandrette filtre, etableret monitoringsfiltre forud for boringen af det vandrette hul. Herved var det muligt at følge trykudviklingen, som følge af såvel den mekaniske påvirkning under fremboringen som fra skyllevandsstrømmen og dermed dels at justere påvirkningen til det mindst mulige, dels at verificere filterintervallets og monitoringsfiltrenes kontakt til jordmediet (moræneleret). Et vigtigt element i trykkontrollen drejer sig om at hindre trykopbygning så fraktureringstærsklen overskrides (se tidligere i dette kapitel).

Boringsudbygning

Filtterrør til vandrette boringer

Filtterrør til vandrette boringer er normalt beregnede til anvendelse i sandaflejringer. I almindelig praksis anvendes der et sammenhængende filtterrør med små filtersatte "spargehuller" placeret i recesser i rørets overflade og med indbyrdes afstand i meter-størrelse. Filtterrørene kan være beklædte med filtervæv til fordeling af luften, hvis/når sandet falder sammen omkring filtret. Dette system har den fordel at luftstrømmen gennem de meget små "spargehuller" modvirker vandindstrømning i én strækning, mens der sparges i en anden. Med dette system er det, som nævnt ovenfor, vanskeligt at tømme filtterrøret for vand, så der er ligelig luftadgang til hele filterstrækningen. Med de små spargehuller vil der kunne opretholdes et højt sparge-tryk inde i filtret. Dette tryk er imidlertid ikke identisk med trykket udenfor filtterrøret, hvor der er risiko for trykudligning på langs af borehullet og selektiv luftindtrængning i sandet langs dele af filterstrengen.

Med disse overvejelser blev der udviklet et filtterrør, som dels skulle kunne tømmes effektivt for vand, dels skulle være sektionsofbygget og afpakket, så langsgående strømning i borehullet ikke er mulig, og dels skulle have så store filteråbninger, at der ikke var noget tryktab ud mod jorden (så trykmålingerne inde i filtret svarede til trykket i borehullet/annulus).

Filtrene, hvis konstruktionen er omtalt i detaljer i kapitel 4, fungerede, så vidt eksperimenternes delvise succes kan underbygge det, tilfredsstillende, bort set fra at pakkerne var af en for dårlig kvalitet. Assymetriske sektioner af traktorslange viste sig at være en økonomisk attraktiv men praktisk ubrugelig løsning. Selv om pakkerne udvidede sig noget til alle sider var deres anlæg mod borehulets væg ikke tilstrækkeligt jævnt til alle sider, hvorfor de ikke sluttede tæt. Selv ved oppustning til sprængningsgrænsen sluttede pakkerne ikke tæt, idet de tilsyneladende kunne ekspandere aksialt i hullet. Et medvirkende problem var at pakkernes foretrukne ekspansionsretning ikke var ensartet orienteret langs den samlede sammenskruede filterstrækning. Herved har den ene assymetriske pakke tvunget filterstrengen opad, den næste har tvunget den nedad, til siden, osv., med det resultat at filterstrengen er blevet vredet og har medvirket til den dårlige pakkefunktion. Det er projektets opfattelse at princippet med at bruge pakker er anvendeligt og robust, men at det kun vil kunne fungere med bedre pakker, som ekspanderer symmetrisk, og som primært ekspanderer radialt (ikke aksialt). Det er indlysende, at de slangedimensioner, som anvendes til filtrene, skal være dimensionerede til det konkrete behov.

Anvendelighed af filtervæv, filtertabet, effektivitet som funktion af ventileringstiden

Da projektet i Rantzausgade specielt drejede sig om ventilerbarhed af sprækket moræneler, og omstændighederne ikke muliggjorde alle de planlagte tests, er disse aspekter ikke behandlet i videre omfang. Der er ikke gennemført eksperimenter med filtervæv, idet det blev anset for at være for sart i installationsfasen og iøvrigt unødvendigt i moræneler. Med den ovenfor omtalte filterkonstruktion er det tilstræbt at eliminere filtertabet ved at anvende stort slidseareal, men der er ikke gennemført sammenlignende undersøgelser, lige som der ikke har været anledning til at konstatere ændringer i effektiviteten som funktion af tiden på denne morænelerslokalitet.

Afpropning af blindrør i vandrette borer

Effektiviteten af vandrette filtre er helt afhængig af at afpropningerne af blindrørsstrækningerne og eventuelle øvrige pakkere er tætte. Eksperimenterne i Rantzausgade har vist meget om, hvordan afpropninger ikke skal foretages, og inspireret til mulige løsninger på hvordan det kan gøres.

Principper og materialer der benyttes til lodrette borer er udgangspunktet for løsningerne i vandrette borer. Kravene til propperne er, at de skal slutte tæt til blindrør og borehulsvæg i den vandrette sektion, at de skal bevare denne tæthed under den nødvendige trykdifferens ved air sparging eller vakuumventilation, og at afpropningen inde i blindrøret skal opfylde de samme kvalitetskrav. Propperne er beregnede til en given trykfaldsretning i modsætning til pakkere mellem filtersektioner, som skal kunne modstå trykdifferenser i begge retninger. I lodrette borer er grundelementet i propper typisk, at der fyldes og proppes bentonit i et interval over gruskastningen. Når bentonitfyldningen er veludført udgør den en tæt forsegling mellem blindrør og borehul, men bentonit kan ikke modstå nogen nævneværdig trykdifferens. Derfor etableres der et bagstop over bentonitproppen. Hvis bagstoppet f.eks. består af tilbagefyldt materiale fra boringen vil det i sig selv være permeabelt, og dets funktion er da primært at tynde bentonitten ned, så den ikke kan ekspandere og dermed tillade at der, under påvirkningen af trykdifferenser, foregår lækage gennem proppen. Det tilbagefyldte materiale må være stampet og fylde over en så lang borestrækning som muligt.

Svagheden i afpropning ved kombineret bentonit og tilbagefyld er, at det er elastisk og ikke yder et stabilt modhold mod borehullets væg. Derfor vil især sparge-trykket kunne forrykke hele afpropningen en anelse, hvilket er tilstrækkeligt til at skabe lækage ved mellem 1 og 2 bar trykdifferens. Med et absolut, fast modhold mod borehullets væg og blindrøret vil trykdifferensen derimod komprimere bentonitten op imod modholdet, hvilket øger tætheden i takt med trykstigningen. Det er indlysende, at der i denne situation skal tages højde for risikoen for, at det faste modhold bryder sammen under trykket og den deraf følgende risiko for, at proppen bliver skudt ud. Som faste modhold anvendes beton som tager optimal form af omgivelserne, hærder noget nær uelastisk op, og fra en praktisk betragtning er impermeabelt. Fragmentationsrisikoen af betonen kan yderligere mindskes, og formstabiliteten øges, ved at anvende specialbeton, såsom fiberbeton. I lodrette ventilationsboringer er der typisk kun ét filter, hvorfor der ikke er et afpropningsproblem inde i blindrøret.

Etableringen af propper i lodrette huller lettes, ved at blindrøret er centralt placeret i borehullet, og at afpropningen skabes med tyngdekraften, så fyldningen bliver ensartet omkring blindrøret, samt at afpropningen delvist vil kunne etableres over grundvandsspejlet.

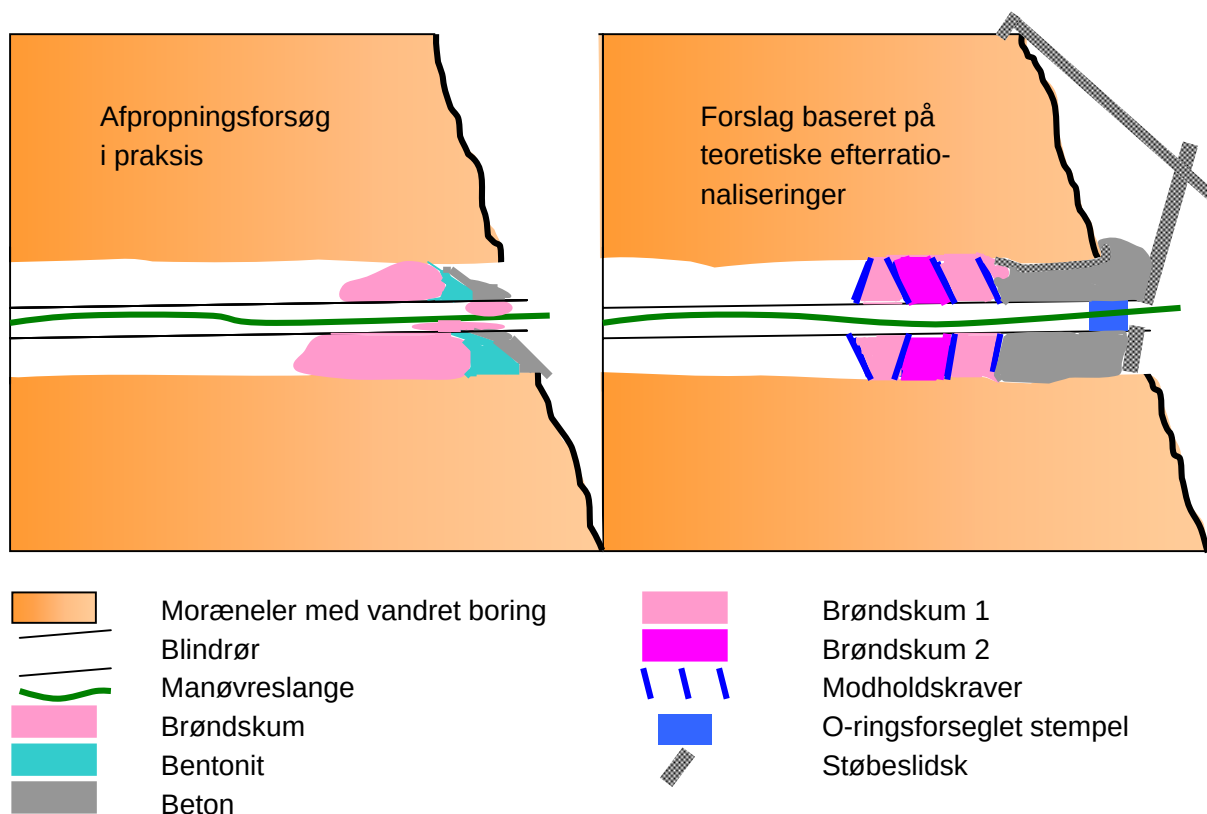
Ved afpropning af vandrette blindrørsstrækninger arbejdes der på tværs af tyngdekraften, som vil tendere til at få forseglingsmaterialet til at samle sig langs borehullets under-

side eller overside, afhængig af om afpropningsmaterialet er relativt let eller tungt, og af om hullet er beliggende i mættet eller umættet zone. Da vandrette borer i reglen ikke gruskastes, er der ikke umiddelbart nogen barriere, som hindrer afpropningsmaterialet i at trænge frem langs filtret. Derfor må der etableres et modhold i form af en krave, ring eller oppustelig pakke, som kan danne "bund" under etableringen af proppen, og som permanent kan beskytte denne ende af proppen, der er eksponeret mod filtersektionen. De samme vanskeligheder med modhold under etableringen af proppen gør sig gældende i propens anden ende, hvor der må være de samme typer afskærmninger, sådan at afpropningsmaterialet tilføres til et volumen mellem to modsatrettede modhold. Tilførslen af bentonit er vanskelig og indpumpning kan være nødvendig, idet det vandrette huls til tider store dimension i forhold til filtersektion og blindrør kan gøre faste ekspanderende bentonitpakke- re utilstrækkelige. Som fast permanent modhold kan der anvendes samme princip med betonfyldning som for lodrette borer, men også her må indfyldningen ske mellem modhold og altså mest nærliggende ved indpumpning. Det er indlysende, at denne type afpropning er kompliceret og skal indbygges allerede i designfasen. I forbindelse med sektionsopdelte og afpakkede vandrette filtre vil der også skulle foretages en afpropning inden i blindrøret for at tætnes mellem manøvrerørene.

På denne baggrund er det indlysende, at afpropninger af blindrør i forbindelse med vandrette filterstrækninger i praksis fortrinsvis foregår i de skrå anborings og udboringssektioner, hvor der kan arbejdes med tyngdekraften, idet propperne blot skal være længere end i lodrette borer på grund af den skrå vinkel. Et modhold ind mod filtret vil dog altid være påkrævet.

I forbindelse med arbejderne i Rantzausgade, hvor der var én skrå og én vandret blindrørsstrækning i den dybe boring (vakuumentilationsboringen blev afpakket med ekspanderbare pakkere), blev der gennemført flere eksperimenter med afpropning. På et tidspunkt, hvor vandet fra den nedre vandrette boring kunne dræne frit ud i udgravningen, blev det forsøgt at afproppe blindrørsstrækningen og blindrøret med brøndskum. Brøndskum er impermeabelt og ekspanderer, sådan at det i princippet skulle kunne forsegle mellem blindrør og borehulsvæg, samtidig med at indføringen er meget lettere end for bentonit. Da en tryktest viste, at skummet ikke forseglede som håbet, blev hullet tilkastet med først bentonit og siden beton. Denne propopbygning skete uden modhold, og resultatet var da også, at der var så god strømningsmulighed forbi proppen, at filtret ikke kunne tømmes for vand, idet udpumpe vand blev erstattet med indstrømmende vand fra tankgraven. Brøndskum blev også anvendt til afpropning mellem manøvreslangerne i blindrøret, men uden held. I forbindelse med opfyldning af tankgraven blev der monteret monitoringslanger omkring de formodede lækagepunkter, og fyldet blev herefter komprimeret omkring enden af blindrørsstrækningen. En tryktest dokumenterede herefter lækagen forbi afpropningerne til alle målepunkterne.

Resultatet bør ikke umiddelbart afskrive brøndskum som erstatning for bentonit, men det bør kun anvendes imellem modhold, der sikrer at skummet ekspanderer radiært i stedet for aksialt. Eventuelt kan skummet ekspanderes i tempi, sådan at der først ekspanderes to yderpropper og herefter en mellemliggende sektion, Figur 40.



Figur 40. Afpropningsforsøget i Rantzausgade i praksis og den teoretiske løsning, som erfaringerne inspirerer til. Den væsentligste erfaring er, at der skal være modhold ved alle operationerne for at sikre at ekspansionstrykket fra brøndskummet medgår til at tætnepresse mod blindrøret og borehullets væg, og at betonfyldningen bliver total. Figuren viser et forslag, hvor der blæses brøndskum ind ad to omgange. Først brøndskum "1" i begge ender af afpropningen, hvorved modholdet yderligere effektiviseres, og når dette er afhærdet brøndskum "2" midt imellem til at sikre optimal forsegling.

Den samme fremgangsmåde kan benyttes ved afpropning i skrå an- eller udboringssektioner. Den indre afpropning i blindrøret kan ske med et O-ringsforseglet stempel, hvor der også er O-ringe omkring manøvrerlangerne. Alternativt kan den indre afpropning ske ved faststøbning af manøvrerlangerne med beton eller araldit, hvilket kan foregå før installationen i boringen, idet filtersystemet installeres samlet. I den ende af boringen, hvor der ikke skal være adgang for manøvrerlanger, kan afpropningen alene rettes mod en tæt opfyldning af borehullet, idet det ikke er afgørende, om enden af filtret er forankret i en prop.

Afpropningen kan imidlertid også foretages via en lodret boret eller gravet skakt, som opfyldes med pakmateriale (bentonit eller lignende) og efterfyldes med det opgravede jord og/eller beton. Denne løsning giver mulighed for at installere afpropningen "med tyngdekraften" og er særligt relevant, hvis der allerede er blevet gravet/boret et "fang" til at opsamle det materiale, som fribores i forbindelse med især pilothullet. Denne løsning blev afprøvet i Rantzausgade, og var, så vidt det kunne vurderes, den bedst fungerende løsning.

Afprøvning af vandrette borer

Test og videreudvikling af den vandrette boremetode på sand- og lerlokaliteter

Den vandrette boremetode er blevet afprøvet på morænelerslokaliteten Rantzausgade. På basis af erfaringerne herfra er metoden videre afprøvet på lerlokaliteten Flakkebjerg. De opnåede erfaringer fra Cevent og undersøgelserne i Flakkebjerg har dannet grundlag ved etableringen af Varslingssystemet for Udvaskning af Pesticider til Grundvand (VAP). VAP systemet består bl.a. af 50-75 m lange vandrette dræn, der er etablerede under forsøgsmarker til prøvetagning af mobilt porevand (GEUS, 2001). Hovedkonklusionerne er at:

- boremetoden producerer stabile huller, selvom der ikke anvendes bentonit eller polymer
- friboret materiale fra pilothullet skal fjernes ved overgangen til vandret forløb
- skyllevandstrykket skal holdes så lavt som muligt, for at modvirke frakturering og clogging
- reameren kan med fordel videreudvikles mhp. en mere skærende funktion, for at undgå smear og sikre et glat hul, som er egnet til afpropning/pakkerforsegling
- boringens strømningskontakt til jordmediet kan verificeres under borearbejdet via et præinstalleret monitoringsystem
- boremetoden er ikke egnet til moræneler med stenbrolægninger

Med hensyn til erfaringerne fra sandlokaliteter henvises til afrapporteringerne af projektets fuldskalaoprensninger på Storegade (OM nr. 6740-42-172), i Jedsted (OM nr. 6760-43-054) og i Tibirke (OM nr. 3220-10-254), lige som en del tidligere erfaringer er opsamlede i Miljøstyrelsen (1997).

Teknikker til rehabilitering/effektivisering af vandrette borerings ydeevne

Sådanne teknikker er ikke blevet afprøvede i Rantzausgade, idet problemer med højt grundvandsniveau og pakkerfunktionen hindrede gennemførelsen af testprogrammet for luftstrømme. Blandt de overvejelser, som ligger til grund for de planlagte eksperimenter, var en test af beluftningseffektiviteten, idet udbygningen muliggjorde test af filterstrengens enkeltsektioner, så det kunne afgøres, i hvilken grad anisotropi og strømning langs filterstrengens yderside eliminerer den distribuerede injektion, således at den/de væsentligste strømningsruter evt. i praksis leder hovedmængden af luft. Herved var det meningen at afklare, hvorvidt underinddeling af filterstrækningen med pakkere er nødvendig.

For fuldskalaoprensningerne på sandjord viste forsøgene, at der inden for vakuumområdet sker en grundvandsstigning, hvilket medfører at der kan være behov for separat at afsænke grundvandet i dette område for at sikre den vandrette vakuumborings effektivitet (DHI, pers. kom. 2001).

Erfaringsopsamling

Opsamling og systematisering af indsamlede og genererede data

Indsamlingen af data vedrørende forsøgene i Rantzausgade blev baseret på dels manuel dagbogsregistrering af manøvrer og flowmetermålinger, dels et automatiseret PC-baseret dataopsamlingssystem, som blev udviklet til projektet til monitoringsdata og øvrige tryk og flowdata i jordsystemet. Det vurderes, at der ikke er gjort lokalitetsrelaterede erfaringer, der tilsiger, at det anvendte system er overlegent over andre systemer, som er i praktisk anvendelse. Derimod må de registreringer, som ikke er "født" digitale, omsættes til digital form efter fordringerne i beslutningsstøttesystemet, Delprojekt 10. Disse omsætninger kan udemærket tage udgangspunkt i regneark med de genererede data.

For fuldskala oprensninger er det almindelig praksis løbende at opsamle alle driftsdata og integrere dem via et opkoblet styrings- og alarmeringssystem, der muliggør automatisk regulering på stedet eller manuel regulering ved tilkaldealarm.

Protokoller for design af ventileringsystem under anvendelse af vandrette boringer.
Der henvises til nedenstående særskilte kapitel om "Protokoller".

Specifikationer for et vent-syst som min opfylder OM's kval-manual

En del specifikationer fremgår af nedenstående kapitel om Protokoller. Specifikt vedrørende ventilationstest og influensradius henvises til Miljøstyrelsens Teknologiuudviklingsprojekt om "Frakturer fra lodrette testboringer på Vestergade 10, Haslev" (NIRAS, 2001)

Specifikationer af et monitoringssystem til efterkontrol

Der henvises til rapporteringen af Cevent projektets fuldskalaoprensninger på Storegade (OM nr. 6740-42-172), i Jedsted (OM nr. 6760-43-054) og i Tibirke (OM nr. 3220-10-254).

Rehabilitering /effektivisering af vandrette boringers ydeevne

Da omstændighederne i Rantzausgade 57 ikke muliggjorde de strømningsmålinger, som det var hensigten at gennemføre har eksperimenter vedr. dette punkt ikke kunnet udføres.

Protokoller for vandrette boringer

- 3-9;1. Luftinjektion uden vand i filtret
- 3-9;2. Sprækkeopmåling
- 3-9;3. Sprække- og makroporekarakterisering
- 3-9;4. Fremboring uden trykopbygning
- 3-9;5. Design af boringer mhp. logging
- 3-9;6. Boring med samtidig trykmonitoring
- 3-9;7. Logging
- 3-9;8. Logfortolkning
- 3-9;9. Bevidst frakturering
- 3-9;10. Simpel installation af monitoringsfiltre
- 3-9;11. Sæsonbetinget airsparging i sprækket ler
- 3-9;12. Grundvandsstanden i sprækket moræneler
- 3-9;13 Afpropning af filterstrækninger
- 3-9;14. Krav til pakkere
- 3-9;15. Hydraulisk ledningsevne i moræneler
- 3-9;16 Udtagning af intakte prøver

CEVENT PROTOKOL 3-9;1
LUFTINJEKTION UDEN VAND I FILTRET

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001



Formål

At udføre test af ventilerbarhed ved luftinjektion under grundvandsspejlet uden først at skulle fortrænge det vand ud i jorden, som står i og over filtret. Metoden har yderligere til hensigt at give injektionsluften adgang til den omgivende jord i hele det lodrette filterinterval, for dermed at reducere strømningsmodstand og pneumatisk trykopbygning, især under forsøgets start.

Baggrund

Under injektionstest er luftens adgang til den omgivende jord betinget af adgang gennem filtret (alias under forerørs-/blindrørniveau). I tilfælde, hvor der foregår en umiddelbar tilstrømning til filtret vil grundvand, som står op i blindrøret, først skulle presses ud i jorden indtil vandstanden er faldet så meget, at luften møder perforationerne i filtret. Grundet viskositetsforskellen mellem luft og vand vil luften injiceres forholdsvis meget og forholdsvis pludseligt gennem den øverste del af filtret. Ved høj permeabilitet i jorden vil luftinjektionen muligvis i det hele taget kun foregå gennem den allerøverste del af filtret, idet luften trænger ud i jorden frem for at trykke grundvandet yderligere ud af filtret.

For hurtigt at få indledt injektionstesten kan det være fristende at påtrykke vandet i blindrøret et ret højt overtryk for at fremme fortrængningen af vand ud i jorden. Dette indebærer en risiko for, at der kan transmitteres et højt pneumatisk trykstød til de vandmættede dele af den omgivende jord, når den første luft trænger frem, hvilket indebærer fraktureringsrisiko. Denne risiko er selvsagt større dersom lufttrykket ikke blot skal give adgang til filtrets øverste perforationer, men også tømme dette i hele dets dybdeudstrækning. Jo mere vand der skal fortrænges desto større er fraktureringsrisikoen, hvorfor den er størst for vandrette borer.

Forsøgsopstilling og funktion

Den foreslåede løsning består i, at der installeres et lækagerør i testboringen efter principet for Montejuspumper. Dette rør udmunder via en tæt boringsafslutning og en hane på overfladen, mens den anden åbne ende udmunder ved filtrets dybeste niveau.

Ved at påtrykke et svagt overtryk af luft kan det vand, som står i filtret, trykkes ud gennem lækagerøret indtil der er luftadgang til hele filtersektionen, hvorefter lækagehanen lukkes og lufttrykket øges til arbejdstrykket.

Andre virkninger

Under air sparging vil der ved visse kombinationer af hydrauliske ledningsevner og injektionstryk kunne indstille sig en trykbalance mellem injektionsluft og tilbagestrømmende grundvand til filtret, sådan at ikke hele filterstrækningen er tilgængelig for luftudstrømning. Da denne situation vil opstå under overtryk vil den vandfyldte del af filtret kunne genaktiveres til air sparging, ved at åbne for lækageslangen, indtil den giver luft.

For vandrette filterstrækninger, hvor perforationerne er anbragt i filtterrørets overside og, hvor der er fast endeprop i filtrets fjerneste ende, er det fysisk umuligt at tømme filtret for vand til under den dybestliggende perforation uden at anvende lækageslange. Uden lækageslange vil der derfor ikke være ensartet pneumatisk adgang til hele filterstrækningen, og filtret vil derfor ikke være fuldtud effektivt.

Bredere anvendelse

Denne teknik er en ny anvendelse af Montejusprincippet. Metoden med at tømme filterintervallet ved lavt overtryk af luft vil i nogle tilfælde også kunne være favorabelt under den egentlige oprensning ved air sparging.

Ulemper

Det vand, som fortrænges og opsamles på overfladen via lækageslangen, kan evt. indeholde forureningskomponenter, om end air sparging i princippet skal foregå i niveauet under forureningen for at fungere optimalt.

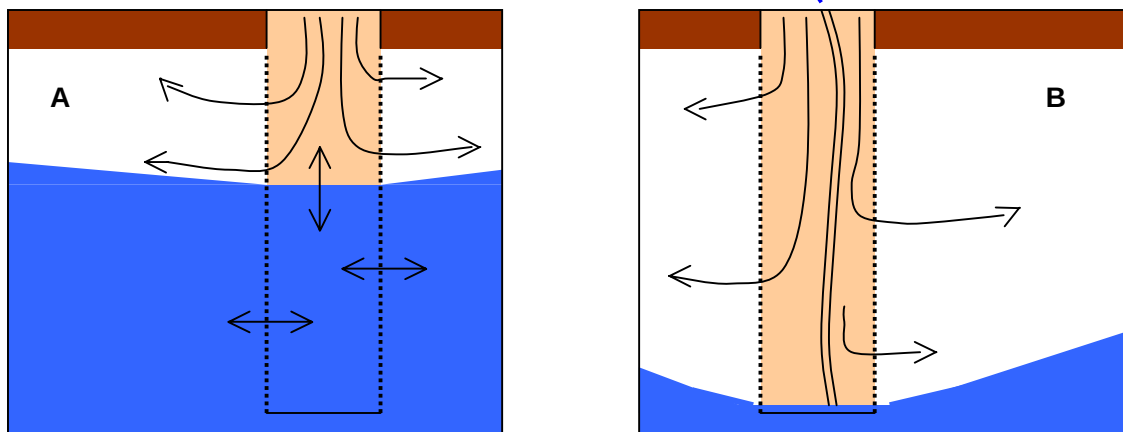
Dersom bortskaffelsen af dette vand er bekostelig, kan det overvejes at installere filtret luftfyldt med mekanisk åbne-/lukkemekanisme ved perforationerne, at installere under indblæsning eller at installere med en vandfyldt ballon i filtret, sådan at denne kan tømmes gennem en lækageslange i takt med at der injiceres luft.

Referencer

Miljøstyrelsen, 1989: Lossepladsprojektet, Udredningsprojekt U3, 223 p.

Gillham, R.W., Robin, M.J.L., Barker, J.F. and Cherry, J.A., 1983: Groundwater monitoring and sampling bias. Dep. Earth Sci., Univ. Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

Figuren illustrerer princippet for en lodret boring, men princippet er det samme for en vandret: A, luften injiceres i trykbalance med grundvandet i jorden, sådan at kun en del af filtret er effektivt. B, Luftens injektionstryk tillader, at det vand som samler sig i filtret kan tømmes af, sådan at der kan injiceres via hele filterstrækningen.



CEVENT PROTOKOL 3-9;2
OPMÅLING AF SPRÆKKESYSTEMER

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

Karakterisering af sprækkers orientering med henblik på at afklare potentialet for anisotrop strømning i makroporer. Karakteristikken skal være systematisk m.h.p. at gøre det etablerede forståelsesgrundlag sammenligneligt fra sted til sted (regionalisering).

Baggrund

De hydrauliske forhold i de fleste jordarter kan, ud over de egenskaber, der karakteriserer de ensartede dele af matrix, være prægede af strømningsmuligheder gennem sprækker. Betydningen af sprækkestrømning for den samlede strømning er selvsagt størst, hvor den permeabiliteten af matrix er ringe.

I nogle jordarter med ringe matrix permeabilitet, såsom moræneler, hvor kapillærkræfterne reducerer den specifikke ledningsevne ved tofasestrømning (luft/vand), er sprækker de betydeligste strømningsveje i forbindelse med air sparging og vakuumventilation, idet udvekslingen med matrix altovervejende foregår ved diffusion. Sprækker kan, alt afhængig af om de er opstået ved aflastning, udtørring, frost/tøpåvirkning, isoverskridelser eller på grund af tektonisk aktivitet, tilføre jorden en strømningsanisotropi der vil være dikterende for udformningen af et ventileringsystem.

Forureningsudbredelse, såvel som dennes begrænsning og *in situ* oprensning, foregår derfor i finkornede jordarter, så som moræneler, i høj grad gennem sprækker (og andre makroporer så som orme- og rodhuller). Kortlægning af sprækker er derfor et centralt element i de undersøgelser, der går forud for design af en *in situ* oprensning i især finkornede jordarter.

Elementer

Sprækker er flader, hvor den fysiske sammenhæng mellem de to sider er brudt eller reduceret. Sprækkens apertur (se protokol 3-9;3) udtrykker den vinkelrette afstand mellem sprækkens to sidevægge.

Da sprækker er udviklede langs planer (mere eller mindre flade planer), grupperes de efter disse forhold i sprækkesystemer.

Metode

Da sprækker er planer i tre dimensioner, er det tilsvarende nødvendigt at observere dem i tre dimensioner for at kunne karakterisere dem kvantitativt. Derfor beskrives de i en udgravning med to lodrette vægge i uforstyrret jord, som er vinkelrette på hinanden, og en afrenset vandret bund i udgravningen. Det er i reglen ikke muligt umiddelbart at danne sig et realistisk indtryk af sprækkesystemerne i en nygravet udgravning, idet graveprocessen, især i lerede jordarter, efterlader et kamuflerende udsmyrt lag på overfladen (engelsk: smearing). Derfor skal udgravningens flader afrenses, hvilket foregår ved omhyggelig aftipning med en kniv eller lignende, som er egnet til så at sige at "plukke" overfladen af. Den overflade, som herved etableres, vil netop illustrere sprækkerne, idet jordarten fortrinsvis brydes langs svaghedszonerne (sprækkeplanerne).

Selve opmålingen af sprækkers orienteringer og indbyrdes afstande foregår med kompas (med klinometer) i forhold til et udlagt målenet. Der måles en kombination af strygning og hældning eller azimuth og maksimalt dyk. Indmålingen foregår i forhold til den konkrete blotlagte flade, hvorefter der kan omregnes til tæthed og indbyrdes afstande. Det er ikke nødvendigt, at fladerne bliver totalt opmålt, blot det opmålte areal er repræsentativt og stort i forhold til sprækkernes indbyrdes afstand.

Sprækkerne sorteres i systemer efter dominerende karakteristika. Herudover rubriceres sprækkerne, efter hvor prominente de er (typisk vil der være et eller to sæt af relativt plane sprækker, mellem hvilke der er mere undselige forbindende sprækker med andre retninger).

En måde at rubricere sprækkerne er gennem en klassifikation i systemer efter

- a, orientering
- b, form
- c, dannelses måde
 - Neotektonisk
 - Glaciotektonisk
 - Frost/tø
 - Udtørring/befugtning
 - Aflastning

Referencer

Klint, K.E.S., Abildtrup, C.H., Gravesen, P., Jakobsen, P.R. og Vosgerau, H., 2001: Spræk-
kers oprindelse og udbredelse i moræneler. Vand og Jord, 8. årg., nr. 3, pp 111-119.

Klint, K.E.S.: Fractures in Diamict Deposits; Origin and Distribution; Ph.D. thesis 2002;
GEUS Rapport, in prep.

Fredericia, J., 1990: Saturated hydraulic conductivity of clayey till and the role of fractures;
Nordic Hydrology, Vol. 21, pp119-132.

Fredericia, J., 1991: Fractures in clayey till. Occurrence, genesis and hydrogeological signi-
ficance. Ph.D.-Thesis. Technical University of Denmark, Institute for Geology and Geo-
technics.

CEVENT PROTOKOL 3-9;3

STRØMNINGSKARAKTERISERING AF SPRÆKKER OG MAKROPORER

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001



Formål

Karakterisering af jordens sprækker og makroporer, med henblik på differentiering af forståelsesgrundlag for strømningspotentialer i makroporer. Karakteristikken skal så vidt muligt være systematisk, omend den i nogen grad vil være kvalitativ.

Baggrund

Den aktuelle og historiske hydrauliske betydning af sprækker og makroporer kan være afspejlet i disse porers udformning, tæthed og lokalisering, samt i udseendet af deres umiddelbare omgivelser, som kan afvige fra matrix generelt p.g.a. påvirkninger via makroporerne. Også eventuelt fyld i makroporerne kan have betydning. Betydningen af makroporestrømning for den samlede strømning er selvsagt størst, hvor den hydrauliske ledningsevne i matrix er ringe.

I nogle jordarter med ringe hydraulisk ledningsevne i matrix, såsom moræneler, hvor kapillærkræfterne reducerer den specifikke ledningsevne ved tofasestrømning (luft/vand), er makroporerne de eneste reelt mulige strømningsveje i forbindelse med air sparging og ventilation, idet udvekslingen med matrix altovervejende foregår ved diffusion.

Udbredelsen af forureningen, såvel som begrænsning af yderligere spredning og *in situ* oprensning, foregår derfor i finkornede jordarter i høj grad gennem makroporer, hvorfra den invaderer matrix. Karakterisering af makroporerne er derfor et centralt element i de undersøgelser, der går forud for design af en *in situ* oprensning, idet den kan illustrere naturlige, såvel som kunstige, strømninger og beluftningsmuligheder.

Elementer

Kategorien "makroporer" består af porer, hvis dimensioner individuelt er mindst en størrelsesorden større end matrixporerne. I praksis kan man se den enkelte makropore, mens dette ikke er muligt i finkornet matrix.

Makroporer udgøres normalt af vand- eller luftfyldte sprækker, ormehuller og rodhuller, men f.eks. kan også tynde sandslirer og andre inhomogeniteter i moræneler have makroporefunktion.

Sprækker er flader, på tværs af hvilke bindingen mellem de to modstående sider af matrix er brudt. Sprækkens apertur udtrykker den vinkelrette afstand mellem de to modparter af sprækkens vægge. Sprækkefladerne er imidlertid sjældent flade planer men snarere mere eller mindre skulpturerede, hvilket i form af ruhed har betydning for strømningsforhol-

dene gennem dem. Sprækkernes aperturtype, belægninger og eventuelle reaktionszoner i deres omgivelser karakteriseres.

Ormehuller har et større potentiale for at forblive åbne, som da de blev skabt, jo mere finkornet jordarten er. Ormehuller afspejler det gravende dyrs diameter og udgør aflange kanaler med konstant diameter gennem jordarten. Ormehuller kan have hvilken retning somhelst, men er i reglen overvejende lodrette og findes fortrinsvis i matrix, idet ormenes vandring langs sprækkeflader sjældent modificerer disse. Ormehuller karakteriseres i lighed med sprækker, og deres tæthed og forekomstdybde noteres.

Rodhuller afspejler planterødders forløb, som igen afspejler adgangsvejen til vand og luft. Derfor vil rødder i langt højere grad forløbe gennem sprækker end gennem matrix. I udgangspunktet er rodhuller fyldt med rødderne selv, og muligheden for strømning gennem rodhuller opstår derfor, i takt med at rødderne formolder. Rødder i sprækkeaperturer reducerer derfor strømningsmuligheden gennem sprækken, - i hvert fald i en periode. Rødder og rodhuller karakteriseres analogt med sprækker, deres tæthed og dybderelation noteres.

Princip

Strømningsmuligheden gennem makroporer er betinget af en række effekter:

- dels er én-fase-strømning afhængig af, i hvilket omfang den enkelte makropore er forbundet til andre makroporer. Hertil skal lægges, at makroporerne antal i reglen falder med dybden, og at der i reglen kun er sprækker tilstede i dybder under 3-4 m i moræneler (ormehuller kan nå ned til "kalkgrænsen", mens rodhuller kan nå noget dybere ned). Også antallet af sprækker falder med dybden, så der under ca. 10 m u.t. kun forekommer sprækker af tektonisk oprindelse.
- dels vil to faser (vand plus en let og ikke blandbar NAPL fase, f.eks. olie) tendere til at udskille sig, så oliefasen i makroporerne er relativt immobil og fylder makroporerne i den zone, indenfor hvilken grundvandsstanden fluktuerer, hvorfra den langsomt trænger ind i matrix.
- dels vil to faser (vand plus en tung ikke blandbar fase så som tjære) kunne strømme ved gravitativ udveksling, så f.eks. DNAPL kommer til at optage den dybestliggende del af makroporesystemet.

Det er derfor vigtigt i tilgift til karakteristikken af makroporerne at beskrive den måde, hvorpå de er forbundne.

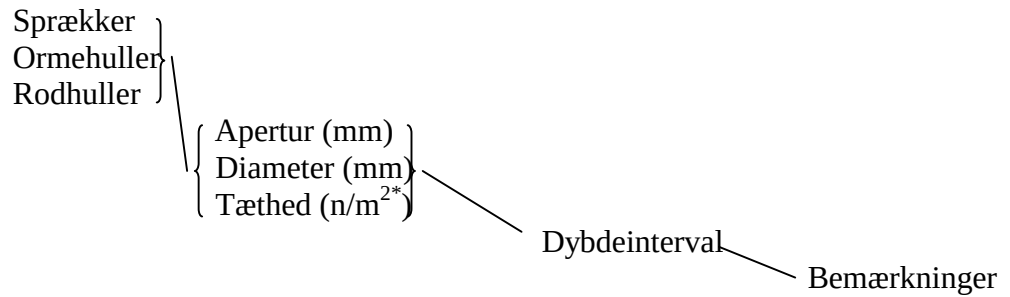
Metode

Karakteristikken af makroporerne, som har kvantitative såvel som kvalitative elementer, foregår mest hensigtsmæssigt i en afrenset udgravning i tilknytning til en sprækkeopmåling. De kvantitative registreringer omfatter apertur/diameter, tæthed/indbyrdes afstand og lokalisering (fortrinsvis dybdeinterval). Da disse observationer kan variere indenfor undersøgelsesfeltet, må der foretages så mange målinger som muligt mhp. beregning af gennemsnitsværdi og spredning.

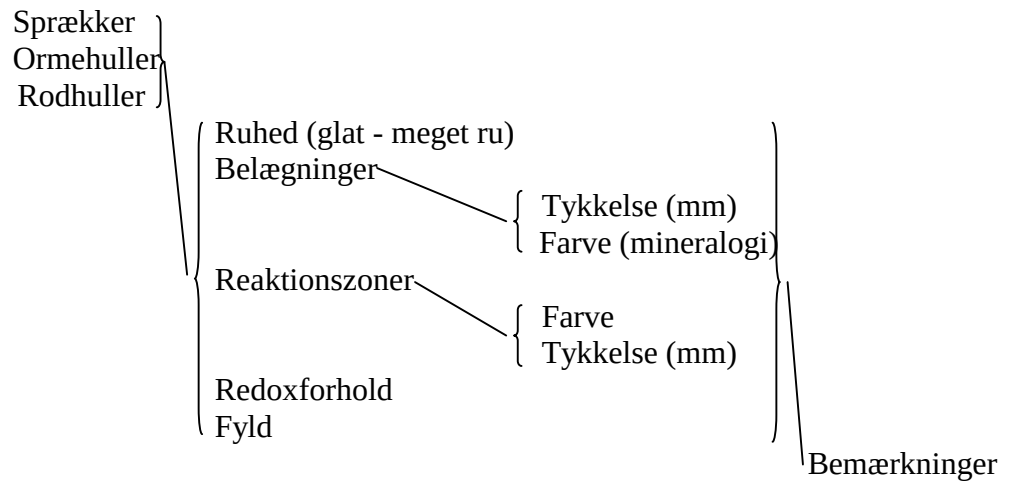
Den kvalitative karakteristik af sprækker/makroporer omfatter ruhed af porens overflade, belægninger på fladerne, reaktionszoner ud mod porerne, redoxforhold og eventuelt fyld.

Det er indlysende, at der er behov for, at den, der beskriver sprækkerne/makroporerne, er opmærksom på usædvanlige forhold med udsagnskraft om strømningsforholdene (oliehinder, fyld/rødder i porerne, udsivende grundvand osv). Nedenstående hierarki kan anvendes til registreringerne af makroporer (sprækker, bioporer og sandslirer):

Kvantitativt



Kvalitativt



* sprækker måles typisk i n/m (se protokol nr. 2)

Referencer

Klint, K.E.S.: Fractures in Diamict Deposits; Origin and Distribution; Ph.D. thesis 2002;
GEUS Rapport, in prep.

CEVENT PROTOKOL 3-9;4
FREMBORING UDEN TRYKOPBYGNING

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

At mindske risikoen for utilsigtet frakturering og clogging af makroporer under fremboring af vandrette borer.

Baggrund

Vakuumentilering og air sparging i forbindelse med forureninger baserer sig bl.a. på, at jorden er uforstyrret, sådan at de strømningsruter for luft, som introduceres, i høj grad vil være identiske med de ruter, ad hvilke forureningen er opstået. Dersom der trænger friboret opslemmet materiale fra borevæske ud i makroporer og evt. matrix, vil den hydrauliske ledningsevne blive mindre og kontakten mellem luft og forurening dermed begrænset (der vil være en stor skin effekt på borevæggen).

Et andet aspekt er at et jordlags sammenhængskraft (en kombination af vægten af lagserien over det aktuelle niveau, jordartens kohæsion og dens deformationsstyrke) ikke må overskrides utilsigtet, idet dette vil medføre, at der dannes kunstige sprækker. Kunstige sprækker dannes principielt langs planer som står vinkelret på den største strukturelle trykretning. Dette vil sige, at kunstige sprækker i de dybder, der er aktuelle for air sparging og vakuumentilation, fortrinsvis vil være vandrette. Kunstige sprækker vil kunne opstå ved overtryk på 2-3 atm, hvorfor det er væsentligt at trykket i borevæsken omkring borestrengen holder sig indenfor en margin på maksimalt 2 atm overtryk. Sådanne sprækker vil kunne skabe strømningsforbindelse mellem den vandrette boring og sprækker, som ikke er gennemborede, og vil derfor kunne have en positiv effekt på influensradius, men de vil også kunne medføre en fejlagtig beluftning ved at luftstrømmen omgår dele af forureningen.

Princip

En vandret boring består i reglen af 1) en skrå sektion, som når fra terræn (en kort anboringsrende) ned til den planlagte dybde for 2) en vandret sektion, som fortsættes i en skrå sektion, der fører tilbage til terræn. Det jordartsmateriale, som bores fri, fjernes ved skylning med borevæske, der sprøjtes ud gennem borekronen og bringer det friborede materiale bagud til en slampumpe. Denne pumpe er typisk anbragt i anboringsrenden, hvorfor der vil stå vand i hele borestrækningen op til anboringsrenden.

I borehullet, hvis udformning ligner en vandlås, vil der kunne udfældes friboret materiale omkring borestrengen, sådan at der blokeres for transport og trykudligning på langs af borehullet. Herved stiger trykket foran blokeringen indtil barrieren bryder sammen eller indtil

det svarer til injektionstrykket inde i borerøret. De tryk, som herved kan opstå i borehullet, kan overskride fraktureringsgrænsen for jorden. Under en sådan trykopbygning vil naturlige makroporer kunne blive fyldt med friboret materiale.

Anbefalingen går ud på at undgå en sådan utilsigtet situation.

Metode

Fremboring sker ved lavest mulige skylletryk på borevæsken, idet dyserne dimensioneres så ydelsen stadig er tilfredsstillende. Dette reducerer muligheden for trykopbygning, samtidig med at en tilstrækkelig vandstrøm bibeholdes, til at transportere friboret materiale bagud i borehullet. For at undgå at det friborede materiale udfældes og blokerer borehullet sikres det, at der ikke er retnings- og hastighedsændringer i den strømmende væske, og at strømningen går med graviteten (vandret eller nedad). Dette er vanskeligt at opnå i det skrå anboringshul, som alternativt kan etableres udenfor problemzonen, eller der bores i korte sektioner afbrudt af oprensning af hullet. For den resterende del af boringen foreslås det, at effekten opnås ved at foretage oppumpningen fra det sted, hvor den vandrette borestrækning begynder. Dette opnås antagelig lettest ved at pumpe fra en gravet brønd, der skærer den vandrette boring ved begyndelsepunktet af den vandrette strækning. Friboret materiale og borevæske vil frit kunne dræne ud i denne brønd, hvorfra det kan oppumpes.

Alternativt kan slampumpen anbringes samme sted, men med adgang gennem boringen, idet der først bores lidt forbi begyndelsen af den vandrette strækning, trækkes tilbage, renses op, og bores frem igen, men med skarp afbøjning nedad ved overgangen fra anboringshullet til den vandrette sektion. Herved skabes der en brøndlignende fordybning, som kan rumme pumpen, samle det friborede materiale og sikre pumpen mod skade fra borestammen.

Referencer

Lindhardt, B., Abildtrup, C., Vosgerau, H., Olsen, P., Torp, S., Iversen, B.V., Jørgensen, J.O., Plauborg, F., Rasmussen, P. and Gravesen, P., 2001: Site Characterization and Monitoring Design, The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme. Geological Survey of Denmark and Greenland, Danish Institute of Agricultural Sciences, National Environmental Research Institute, 73p (+App).

Miljøstyrelsen, 2000: Frakturering; Miljøprojekt Nr. 541, 115 p.

CEVENT PROTOKOL 3-9;5
DESIGN AF BORINGER MHP. LOGGING

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001



Formål

At konstruere og indrette vandrette borer, sådan at karakterisering af den gennemborede strækning ved hjælp af sonder muliggøres og optimeres.

Baggrund

Forudsætningerne for at kunne karakterisere vandrette borer ved hjælp af sondemålinger adskiller sig fra tilsvarende forudsætninger for lodrette borer. De forhold, som der skal tages hensyn til, knytter sig til gravitationens indvirkning på sondeføringen, hullets aksiale/tværegulartitet og hullets fyldning med luft/vand.

Da gravitationen ikke (som i lodrette borer) kan benyttes til at føre loggesonden den ene vej i vandrette borer må disse udformes, sådan at sonderne eller sondekablerne kan føres aktivt i begge borehullets retninger.

Irregulariteten af et vandret borehul adskiller sig fra lodrette huller ved dels potentielt at kunne være større, dels at være mere asymmetriske i forhold til borehullets akse, og dels at borehullets akse kan være relativt irregulær, afhængig bl.a. af om der måles i pilot- eller reamet hul.

Den potentielt større irregularitet skyldes, at der normalt vil blive boret parallelt med lagdelingen, sådan at forskellige lag (med mindre tykkelse end borehullet/med laggrænser langs borehullet) vil kunne udvaskes/graves præferentielt under borearbejdet. Herved kan det vandrette borehul få et meget irregulært tværsnit. Dette potentiale for irregularitet fremmes af, at materiale (f.eks. løst sand eller sten) i borehullets overside vil kunne falde ind i hullet. I lodrette borer er laggrænseirregulariteten principielt radialsymmetrisk og tendensen til indfald af materiale i hullet relativt mindre.

Det fyld, som findes i et borehul, er afgørende for hvilke sondemålinger, der kan udføres, idet nogle sonder (bl.a. resistivitetssonder, salinitetssonder, flowsonder og til dels temperatursonder) forudsætter, at der er fuld vandmætning i borehullet, og for flowsondernes vedkommende yderligere at der ikke ligger fri boret materiale langs hullets underside.

Andre sonder (vandmætning og rumvægt) forudsætter, at der er fuld, eller i det mindste ensartet, vandmætning i jorden omkring sonden så langt ind, som den måler, hvilket igen i praksis indebærer, at borehullet skal være helt vandfyldt, eller at målingerne skal foregå gennem forerør (alternativt skal hullet og dets omgivelser være ensartet tørre). TV-inspektion af borehuller kan foregå i såvel vandfyldte som luftfyldte borehuller, men antagelig bedst i luftfyldt hul p.g.a. sandsynligheden for suspenderet materiale under borevæske-/vandfyldning. Kun måling af naturlig gammastråling er normalt uafhængig af fyldet i borehullet.

Metode

Den vandrette boremetode må, jævnfør ovenstående, udformes under hensyntagen til særlige forhold, for at der kan gennemføres logging:

- Sondeføringen må kunne foregå i begge retninger, idet der altid måles på vej hen mod boringens anboringsrende. For på simpel måde at kunne trække loggekablet (og evt. sonden) ind i hullet til det punkt, hvorfra sondemålingen skal indledes, må boringen normalt have såvel et anborings- som et udgangshul. I tilfælde, hvor der bores vandrette huller uden udgangshul, må der i boreprocessen indregnes en fase, hvorunder loggesonden føres baglæns ind i borehullet med borestrengen eller med andet rør/stang gennem et forerør.
- Hullets radiale irregularitet kan mindskes: gennem forsigtig fremboring med lavest mulige skylletryk, gennem stabilisering af borehullets væg ved at tilsætte bentonit eller polymer til borevæsken, eller ved at hæve trykket i borevæsken og holde det konstant. Mekaniske løsninger på at forbedre hullets tværsnit er at reame (med skærende reamer), evt. suppleret med at der samtidig trækkes en stabiliserende foring ind i boringen. Disse løsningsmuligheder kan ikke vælges frit, men må udvælges nøje under hensyntagen til de fordringer der er til borehullet (hvilke sondemålinger er der behov for? frakturerings- og cloggerisiko? m.v.). Borehullets aksiale irregularitet skyldes fortrinsvis, at borekronens lodrette position (z-aksen) korrigeres under borearbejdet. Trinvis ændringer langs borehullets akse vil blive udglattede ved reaming, men af hensyn til muligheden for at logge i især det uforede pilothul, må boreparametrene holdes så konstante som muligt. Dette indebærer så hyppig korrektion af borekronens position, at der ikke opstår trinvis ændringer.
- Fyldet i det vandrette borehul må, jævnfør ovenstående, være så ensartet som muligt, for at gøre udbyttet af loggearbejdet størst muligt. Ved vandrette borestrækninger under grundvandsspejlet er det alene det friborede materiale, som kan samle sig langs borehullets bund, der kan udgøre en fejlkilde. Med henblik på at minimere udfældningen af sådant materiale henvises der til Protokol nr. 3-9;4.

For vandrette boringer i den umættede zone vil det være naturligt at logge med luft i borehullet og at begrænse loggeprogrammet til det, som kan gennemføres under disse forhold. Da borearbejdet imidlertid foregår under skyldning med vand/borevæske, vil der opstå en midlertidig mættet zone omkring boringen, ligesom der tilføres vand til borehullet. Derfor vil det være muligt at foretage sondemålinger "under mættede betingelser" i umættet zone, ved at opretholde tilførslen af vand indtil målingerne er gennemført. Alternativt tørlægges den vandrette boring, og der måles med de relevante få mulige sonder.

Referencer

Ingen kendes.

CEVENT PROTOKOL 3-9;6
BORING MED SAMTIDIG TRYKMONITERING

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

I tilfælde, hvor vandrette borer skal etableres med henblik på strømningskontakt til den omgivende jord (air sparging og ventilation), kan det være hensigtsmæssigt allerede under borearbejdet at sikre, at der eksisterer en sådan forbindelse, og at den bibeholdes under arbejdet.

Baggrund

I forbindelse med etablering af vandrette borer i især finkornede/lerede jordarter kan der opstå en belægning af udsmyrt jordartsmateriale på boringehullets overfladet. Denne belægning vil helt eller delvist kunne hindre den hydrauliske forbindelse mellem borehullet og jorden (især dens makroporer).

Friboret materiale, som er opslemmet i borevæsken, vil på grund af overtrykket i boringen, kunne sætte sig som en filterkage på borehullets vægge, især hvor væggene udgøres af matrixporøse jordtyper. Der hvor boringen skærer makroporer vil væggene kunne blive udfyldt med friboret materiale. Begge disse effekter vil kunne reducere den naturlige strømningsmulighed umiddelbart omkring boringen.

Under borearbejdet vil der under uheldige omstændigheder kunne opstå kunstige sprækker (Protokol nr. 3-9;9), som vil kunne øge den hydrauliske ledningsevne i boringens omgivelser.

Hvis disse typer fysiske modifikationer af borehullets vægge og omgivelser ville kunne udgøre et problem for boringens formål, må der derfor indtænkes forholdsregler mod dem i planen for boringens etablering.

Princip

Med henblik på styring af fremboringen under de gunstigst mulige betingelser, og dokumentation af de ændringer, som måtte opstå, etableres der et monitoringsystem omkring den vandrette boring forud, for at den bores. Herved kan påvirkninger af og ændringer i strømningskontakten mellem vandret boring og jord dokumenteres, og kompenserende tiltag iværksættes.

Metode

Der etableres et monitoringsanlæg omkring den tracé som den vandrette boring skal følge. Monitoringspunkterne (-filtrene) etableres i nær afstand fra tracéen, sådan at trykpåvirkning p.g.a. selv beskedent overtryk i borevæsken under boringen af den vandrette boring kan

registreres. Denne afstand kan f.eks. være 0,5-1 m fra den vandrette boring, for at sikre nærhed til den vandrette boring, uden risiko for at denne presser sig ud i monitoringsboringen. Den konkrete afstand må baseres på en bedømmelse af de aktuelle forhold inklusive borediameteren efter reaming, idet de samme monitoringspunkter bør kunne monitorere påvirkningen under reamingen.

Monitoreringssystemet kan etableres med målepunkter ved siderne af den vandrette boring, men specifikt for air sparging boringer (under grundvandsspejlet) bør der også placeres monitoringsfiltre over den vandrette boring. Monitoringsfiltrene dokumenterer de hydrauliske forhold punktvis langs den vandrette borestrækning. Det er derfor en del af den foreslåede metodik, at de boretekniske forhold, som iværksættes som effektive på en strækning ud for et monitoringspunkt, bibeholdes under det videre borearbejde indtil der evt. ved næste monitoringspunkt dokumenteres et behov for korrektion.

De målinger, som gennemføres i monitoringsfiltrene, vil i almindelighed være trykmålinger. Derfor foreslås det, at være fordelagtigt, at det monitoreringssystem, som skal dokumentere det færdigetablerede anlægs funktion, etableres forud for at den/de vandrette boring etableres. Forbindelsesslangerne til monitoringspunkterne kan så (om fornødent) blot siden flyttes til monitoringspunkter, som er hensigtsmæssigt placerede i forhold til dokumentation af oprensningsforløbet.

Referencer

Cote, C.M., Bristow, K.L. and Ross, P.J., 2000: Increasing the efficiency of solute leaching: impacts of flow interruptions with drainage of the "preferential flow paths". J. Cont. Hydr., 43, 191-209.

Nilsson, B., Brüsck, W., Harrar, W.G., Vosgerau, H.J., Bojesen, O. (in prep): Glyphosate leaching to tile drains and shallow groundwater in a macroporous glacial till. Manuskript fremsendes til Journal of Env. Q.

Lindhardt, B., Abildtrup, C., Vosgerau, H., Olsen, P., Torp, S., Iversen, B.V., Jørgensen, J.O., Plauborg, F., Rasmussen, P. and Gravesen, P., 2001: Site Characterization and Monitoring Design, The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme. Geological Survey of Denmark and Greenland, Danish Institute of Agricultural Sciences, National Environmental Research Institute, 73p (+App).

CEVENT PROTOKOL 3-9;7

LOGGING

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

At optimere mængden af informationer om jordens sammensætning, forureningen og de hydrauliske betingelser i jorden via sondemålinger.

Baggrund

Under fremboringen af en vandret boring kan man danne sig et indtryk af den gennembo-rede strækning gennem det friborede materiale, som skylles ud af boringen, og gennem borehastigheden i kombination med trykket på skyllevandet, presset på borestrengen og rotationshastigheden.

Det indtryk, man kan danne sig på det nævnte grundlag, er imidlertid meget sporadisk, hvorfor der, i forbindelse med etablering af anlæg til air sparging og ventilation, vil kunne være behov for yderligere karakteristik gennem sondemålinger.

I vandrette boringer kompliceres måling med sonder ved, at der er relativt stor risiko for: (1) at hullet falder sammen omkring sonden, (2) at de stangformede sonder skal føres gennem borehullets eller forerørets krumninger, (3) at de skal slæbes begge veje gennem hullet, (4) at tyngdekraften er tilbøjelig til, at decentrere sonderne (hvoraf de fleste bør være centrerede) og ved (5) at hullet ikke kun indeholder én fase.

Den tekniske fremgangsmåde ved loggearbejdet må modvirke negative effekter af disse forhold.

Anvendelsesområder for forskelligs typer logs og sonder er vist i følgende tabel (modificeret fra Scott Keys, 1997):

Anvendelsesområde for udvalgte sondetyper til karakterisering af jorden				
I åbent borehul	I stålforet borehul	I kunststofforet hul	Muligt boringsfyld	"måledybde"
<i>Registrerer borehullets overflade</i>				
Kaliber	-	-	Luft, Vand/Væske	0
TV	-	-	Luft, Vand	0
Borehulsscanner	-	-	Luft, Vand/Væske	0
<i>Registrerer jordartsegenskaber omkring borehullet</i>				
Naturlig gamma	Naturlig gamma	Naturlig gamma	Luft, Vand/Væske	0,1 - 0,2 m
Vandmætning	Vandmætning	Vandmætning	Luft, Vand/Væske	0,1 - 0,2 m
Rumvægt	Rumvægt	Rumvægt	Luft, Vand/Væske	0,1 - 0,2 m
Resistivitet	-	-	Vand/Væske	<1,5 m (fokuseret)
Induktion	-	Induktion	Luft, Vand/Væske	<1,0 m
<i>Registrerer væske- og strømningsforhold i borehullet</i>				
Ledningsevne	-	-	Vand/Væske	0
Temperatur	Temperatur	Temperatur	Vand/Væske	0
Heat pulse	-	-	Vand/Væske	0
Spinner	-	-	Vand/Væske	0

Metode

Her foreslås afbødende eller verificerende tiltag mod en række vanskeligheder ved konkret sondemåling i vandrette boringer.

1) Hulstabiliteten må overvejes i forbindelse med sondemåling, dels fordi et helt eller delvist sammenfaldent hul giver fejlagtige læsninger (afstanden til hullets vægge anses ved normal tolkning for konstant eller i det mindste for regulær), og dels fordi sammenfald af et hul under loggeprocessen kan koste dyrt udstyr. Generelt synes erfaringerne fra Cevent projektet at vise, at vandrette boringer i moræneler er tilstrækkeligt stabile til at kunne holde sig åbne under et loggearbejde, umiddelbart efter at en boring er gennemført. I den anden ende af skalaen er de grovkornede løse jordarter, såsom diluvialt grus og sten. Ved vandret boring i sådanne lag kan der forventes sammenfald i boringen, og sondemålinger i åbent hul må frarådes. Ind mellem disse yderpunkter er der en bred vifte af jordarter og kombinationer af jordarter, hvori der er en ikke nøjere kendt risiko for sammenfald. Det er naturligvis en vurderingsag, hvor stor sikkerhed der skal være, for at sonderne ikke tager skade. Generelt kan man regne med at sikkerheden skal være større jo dybere den vandrette sektion etableres, eller jo flere bygninger der står over den, idet det bliver vanskeligere at grave en sonde fri.

Sonderne kan sikres ved at trække et forerør før målingerne, hvilket imidlertid hindrer måling af hulstørrelse (kaliber), elektrisk modstandslog, TV og Telescanner logs samt flowlogs. Det foreslås derfor, som en hybrid sikkerhedsforanstaltning, under kritiske forhold at trække et forerør samtidig med sondemålingen, idet kun sondens måleaggregater tillades at rage bagud af forerøret. I tilfælde af at hullet falder sammen, vil sonden kunne bjerges gennem forerøret, som herefter selv vil kunne trækkes ud.

2) Kurvaturen af en "vandret" boring, især i anborings- og udboringssektionerne, i kombination med diameteren, er afgørende for hvor lange sonder, der kan trækkes gennem boringen. Normalt etableres en wire, der, som en ring, går gennem boringen og tilbage til

udgangspunktet på overfladen. Med denne wire trækkes sonderne først bagud gennem boringen, før de trækkes fremad igen, mens der måles (andre løsninger er omtalt under Protokol nr. 3-9;5). Da det åbne hul har den største diameter, vil det også være i de åbne huller, at de længste sonder kan slippe gennem boringen. Ved den aktuelle diameter i pilothullet (15cm+ for en Navigator rig) er det i højere grad pilothullets ruhed end dets diameter og kurvatur (mindste drejeradius er 90m), der kan begrænse sondernes passage. Anderledes er det med forede huller, hvor der vil kunne anvendes vilkårlige rørdiametre. Af hensyn til sikringen, af at sonderne kan føres gennem den vandrette boring eller forerør, anbefales det derfor først at trække en fuldskala attrap gennem hullet.

3) Da sonderne principielt først skal føres bagud og siden fremad i borehullet (tovejstræk), er der brug for at begge ender af boringen er åbne og tilgængelige (evt. kan borerne være ført ud i en udgravning). Dersom sonderne føres bagud i borerne er det nødvendigt at ombinde/beskytte sonder, som har bagudrettede gribearme, afstandsfjedre eller strømningsåbninger. Beskyttelsen fjernes inden loggetrækket påbegyndes. I tilfælde af at boringen ender blindt, må beskyttelsen bestå i et løst rørhylster, der bliver liggende, når sonden trækkes kontra, omkring sondens sarte dele.

4) Bort set fra Kaliber sonden er alle de sonder, som er til rådighed for måling i overfladenære miljøboringer, beregnede til at skulle være centraliserede i borehullet. Denne centralisering er en forudsætning for pålidelige målinger, hvorfor der til praktisk brug må monteres så kraftige afstandsfjedre/-slæder på sonderne, at de kan bære sondens vægt (nedykket eller i luftfyldt hul), samtidig med at de når ud til borehullets maksimale diameter. Det er vigtigt at afstandsfjedrene danner en så lav vinkel med sondens akse, at de ikke kan gribe fast i borehullets ruheder. Hvor der er kurvatur eller forsætninger i borehullets retning vil sondens forende kunne kile sig fast, hvorfor det foreslås, at forenden påmonteres en langfibret børste som stritter i alle retninger, sådan at der kan ske en afbøjning før fastkilingen ville være indtrådt.

5) Det er afgørende for et godt resultat af de fleste sondemålinger, at boringen og dens omgivelser er ensartede mættede. I boringen bør der derfor helst være vand og ellers luft. Da borerne udføres under fjernelse af friboret materiale med vandig borevæske er det nærliggende at sikre, at selv boringer i den umættede zone logges med vandfyldt borehul. Dette foreslås i den normale situation, hvor der er anborings og udboringshul i terræn, gennemført ved tilførsel af vand. Dersom den vandrette boring i umættet zone er ført ud i en udgravning eller skrænt forudsætter mættet sondemåling, at den vandrette strækning afproppes i enden, med deraf følgende vanskeligheder med wireføringen. Et alternativ kan i dette tilfælde være, at tilslutte et tæt afproppet forlængerrør fra den vandrette borings udmunding til et niveau godt og vel over det højeste niveau i den vandrette sektion, sådan at der vil kunne etableres vandfyldning til dette niveau.

Referencer

Scott Keys, W., 1997: Borehole geophysics in environmental investigations; A practical guide. Lewis Publishers, 176 p.

CEVENT PROTOKOL 3-9;8

LOGFORTOLKNING

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

Kvantitativ og kvalitativ detaljering af jordens egenskaber, herunder dens sammensætning, forureningen og bestemmelse af jordfysiske parametre.

Baggrund

Mens der gennem mange år er skabt erfaring med indsamling og fortolkning af sondemålinger i lodrette borer, er erfaringsbaggrunden for tilsvarende tolkning af vandrette borer mere beskeden. Dette hænger dels sammen med, at den vandrette boreteknik er relativt ny, og dels at forudsætningerne for fortolkning gør den vanskeligere end for lodrette borer: Mens lodrette borer normalt krydser jordbundens lag i en næsten ret vinkel, sådan at variationer i logresponset kan tilskrives lagvise variationer langs hele borehullets periferi i det pågældende niveau, forløber vandrette borer basalt set og normalt, parallelt med lagene. Ændringer i logresponset afspejler derfor ikke alene geologisk variation langs borehullet, men også borehullets afstand til nærliggende ikke ancorede lag med afvigende respons over og under boringen. Hertil skal lægges at registreringer med sonder, hvis signal ikke omfatter hele deres periferi, er afhængige af sondens orientering og eventuelle rotation, sådan at der for eksempel registreres nedad med en sonde og opad med en anden. Denne vanskelighed er normalt ikke aktuel for lodrette borer p.g.a. den radiære symmetri i jorden.

Ud over selve karakteriseringen af jorden med loggene har de også nogle praktisk tekniske formål, såsom registrering af hullets tværsnits størrelse og irregularitet, der er afgørende for en hensigtsmæssig lokalisering af pakkere. Af denne grund er kaliber loggens funktion væsentlig, og der må tages højde for eventuel fejlfunktion p.g.a. partikler, der hindrer armens bevægelser.

Princip

De konkrete karakteristika for sonder afhænger af hvilket udstyr, der benyttes. I det udstyr, som har været aktuelt i Cevent projektet (GEUS' udstyr), er kun kaliber og resistivitetssonderne fokuserede, hhv. ca. 1° og ca. 90°. Der blev benyttet en énarmet kalibersonde da den skulle glide langs borehullets bund.

For alle sonder, undtagen kaliberen, gælder at de ved overførsel af principperne fra måling i lodrette huller skal føres centralt i borehullet, så læsningen sker symmetrisk. Når sonderne, som her, glider langs bunden af den vandrette boring, vil læsningerne primært afspejle jordens karakteristika under boringen og sekundært jordarter ved siden af og over boringen. Ved meget små huldiametre er denne forskel ringe, men ved de størrelser, som er aktuelle ved den konkret anvendte boreteknik (ϕ større end ~15cm), har de betydning.

For den fokuserede resistivitetssonde er det selvsagt betydningsfuldt, i hvilken retning den læser.

I forbindelse med air sparging vil det i reglen være jordlagene over den vandrette boring, der har størst interesse, hvorfor det må overvejes at optimere målingerne øverst i borehullet. Dette har ikke været praktiseret, som bevidst fremgangsmåde, i Cevent projektet, men vurderes, at kunne tilstræbes ved 1) at logge i pilothullet (den mindst mulige diameter), 2) at måle centreret eller øverst i det vandrette borehul, ved at forsyne sonderne med så kraftige og store afstandsskinner, at de kan bære sondens vægt og holde den midt i hullet eller 3) ved yderligere at fiksere de aktuelle sonders fokusretning opad i forhold til glide/styreskinner.

En del sonder registrerer alene borehullets overflade. Dette gælder kaliber-, TV- og telescanner sonder. Andre sonder registrerer jordartens egenskaber, ved at optage et signal som genereres i jordvoluminet eller modificeres af jordvoluminet og dets poreindhold. Sådanne sonder registrerer karakteristika integreret over en vis "indtrængningsdybde". Endelig er der sonder, som afspejler forholdene i den væske/luft der fylder borehullet. Indtrængningsdybderne for det aktuelle udstyr er anført i parentes i afsnittet Baggrund i Protokol nr. 3-9;7.

I praksis knytter udfordringen i fortolkningen af logs i vandrette boringer sig især til oplysninger fra sonder med "indtrængningsdybde", se kolonnen "læsningsdybde" i tabellemn i protokol nr. 3-9;7.

Metode

Fortolkningen af sondemålinger i vandrette boringer følger i udgangspunktet gængs praksis. Det er specielt de sonder, der måler jordartsegenskaberne omkring borehullet, som det er vanskeligt at fortolke. Logs fra disse sonder må fortolkes i to trin, idet de mange fejlkilder hele tiden må samtænkes med resultaterne. Resultaterne kan derfor kun tolkes håndfast kvantitativt i tilfælde, hvor de indikerer ensartede og homogene jordartsforhold.

Første tolkningstrin er en enkeltvis tolkning af de logs, der karakteriserer jordartsegenskaberne omkring borehullet, i sammenhæng med de logs, som illustrerer borehullets overflade og beskriver væsken/luften og strømningen. Denne fremgangsmåde vil resultere i et antal (aktuelt 5) tolkninger for hver komplet kørt log suite. Ved i andet tolkningstrin at sammenligne og samtolke de første fortolkninger vil konfliktende resultater blive stedfæstede, sådan at problemløsningen kan fokuseres på netop at fortolke disse intervaller.

Denne relativt simple angrebsvinkel tillader, at der anvendes gængse fortolkningsrutiner fra lodrette boringer, som udgangspunkt for den endelige samfortolkning.

Som ledetråd i fortolkningen er det essentielt at registrere sammensætningen af friboet materiale successivt under især boringen af de skrå indgangs- og udgangshuller samt profiler i nærliggende udgravninger (f.eks. i forundersøgelsesboringer og en samlebrønd ved overgangen fra anboringshullet til den vandrette sektion, se Protokol 3-9;4).

Referencer

Rider, M., 2000: The geological interpretation of well logs; Second edition, Whittles Publishing, 280p.

Scott Keys, W., 1997: Borehole geophysics in environmental investigations; A practical guide. Lewis Publishers, 176p.

CEVENT PROTOKOL 3-9;9
BEVIDST FRAKTURERING

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001



Formål

At fremme strømningsadgangen til og beluften af jordmediet i tilfælde, så som i finkornede jordarter, hvor processen er vanskelig, ved at introducere kunstige sprækker.

Baggrund

Udviklingen af kunstige sprækker, i forbindelse med etablering af vandrette borer, påvirker strømningsforholdene i jordmediet. Derfor må borearbejdet tilrettelægges, så der alene udvikles sprækker i tilfælde, hvor de er ønskede (se Protokol 3-9;4).

I finkornede (i særdeleshed i lerede-) jordarter er en betydelig/dominerende del af strømnings- og belufteningspotentialer knyttet til makroporer. En øget strømningsadgang til jordmediet gennem kunstige sprækker vil derfor kunne have positiv virkning på effektiviteten af oprensningen.

Princip

Når et jordlags sammenhængskraft (en kombination af vægten af lagserien over det aktuelle niveau, jordartens kohæsion og dens deformationsstyrke) overskrides, opstår der kunstige sprækker. Kunstige sprækker dannes principielt langs planer, som står vinkelret på den største strukturelle trykretning. Dette vil sige at kunstige sprækker, i de dybder der er aktuelle for air sparging og ventilation, fortrinsvis vil være vandrette. Kunstige sprækker, som vil kunne opstå ved overtryk på 2-3 atm, vil kunne skabe forbindelse mellem den vandrette boringen og sprækker/makroporer, der ikke er gennemborede, og vil derfor kunne have en positiv effekt på influensradius og ventilationseffektiviteten, dersom de holdes strømningsmæssigt åbne under beluften.

Metode

Kunstige sprækker udvikles ved at jordmediet påvirkes med en tensionsspænding, som overstiger den kombinerede vægten af lagserien over det aktuelle niveau samt jordartens kohæsion og deformationsstyrke. Som beskrevet i ovenstående Princip, og i Protokol nr. 3-9;4, vil kunstige sprækker fortrinsvis udvikle sig vandret/lagparallelt. Der kan i lodrette borer udvikles én kunstig sprække for hvert afpakket dybdeinterval, mens der i vandrette borer principielt kun kan udvikles én kunstig sprække i alt (freregnet mulighederne i de

skrå anborings- og udboringssektioner). Den enlige kunstige sprække, der kan udvikles i en vandret boring har teoretisk og et potentielt et større udbredelsesareal end sprækker dannet i lodrette boringer under analoge betingelser, pga. at filtersektionens længdeakse ligger i sprækkeplanet:

Sprækkeudbredelsesareal i lodret boring, πb^2 , b er mindste udbredelsesretning i et isotropt medium

Sprækkeudbredelsesareal i vandret boring, $\pi b(b+\lambda/2)$, λ er den vandrette boresektions længde.

Benyttes der som eksempel " b " og " λ " på 10 m fås kunstige sprækkearealer på 300 m² for en lodret boring og 1500 m² for en vandret. De nuværende erfaringer tyder imidlertid ikke på, at det endnu er lykkedes opnå det fulde potentielle udbredelsesareal i praksis.

Sprækker dannes ved at øge trykket i borehullet (dets væske- eller luftfyld). Denne trykforøgelse skabes indenfor en strømningsforseglet sektion i boringen. Når trykket øges til et niveau, som overstiger den kombinerede vægten af lagserien over det aktuelle niveau samt jordartens kohæsion og deformationsstyrke, vil lagserien over boringen blive løftet sådan, at der åbnes en sprække langs den vandrette borings sider. Det tryk, der skal til for at etablere den første åbning af sprækken, er højere end det, som skal til at sikre at sprækken fortsat propagerer ud til siderne, men mængden af den væske/luft, der skal til at sikre en fortsat sprækkeudbredelse, stiger proportionalt med sprækkens areal (se ovenstående regneeksempler). På grund af det store "løfteareal" i vandrette boringer er det indledningstryk, som er nødvendigt for sprækkedannelse, relativt lavere end for lodrette boringer. For vandrette boringer ned til 10 meters dybde i løse jordarter er "indledningstrykket" (2-4 atm), mens "udbredelsestrykket" er ca. 2 atm.

Kunstige sprækker, som udvikles med ren væske eller luft, forbedrer fortrinsvis jordartens strømningssegenskaber i det korte tidsrum, mens sprækken dannes, idet vægten af lagene over sprækken vil tendere til at lukke den igen, når injektionstrykket bliver lavere. Strømningssegenskaberne i sprækken kan opretholdes på et højere niveau, ved at der er opslemmet filtersand eller lignende granulært materiale i injektionsvæsken.

Referencer

Miljøstyrelsen, 2000: Frakturering. Miljøprojekt Nr. 541, 115 p.

NIRAS, 1999. Airsparging og jordventilering med vandrette boringer. Rapportering af drift og monitorering for perioden 16.03-03.11.1998. Teknologiudviklingsprojekt. (Statusrapport nr. 1). Udarbejdet for Miljøstyrelsen og Københavns kommune/Miljøkontrollen.

CEVENT PROTOKOL 3-9;10
RAMMEDE MONITERINGSFILTRE I LERHOLDIGE JORDLAG

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

Installation af funktionelle, simple og prisbillige overvågningsfiltre i overfladenære lerholdige jordlag.

Baggrund

I Cevent projektet var der brug for at installere en del "permanente" overvågningsfiltre til trykmonitoring og prøveindsamling. Økonomiske omstændigheder inspirerede til en billig og hurtig løsning, som rigtigt udformet vurderes at opfylde behovet.

Kravene til metoden er at filtrene skal kunne nå dybder på 5 m u.t. i fin-mellemkornede løse jordarter, at der skal være tryktæt forsegling langs filtrets blindrør, så der kan måles såvel vand- som lufttryk, at der skal være tryk og strømningskontakt til jordmediet i filterintervallet, at der skal kunne udtages vand/luftprøver, at der skal kunne laves slugtests, og at der kontinuert skal kunne monitoreres tryk.

Metode

Den foreslåede og afprøvede metode består i, at der nedpresses eller -rammes glatte jernrør med løs, fortrængende (konisk) rørspeids til toppen af det ønskede filterinterval. Pakningen omkring røret opstår automatisk under ramningen, som et smear af den lerholdige jord. Med en jernstang, som føres ned inden i det nedrammede rør, rammes den løse fortrængende rørspeids yderligere ned i jorden, indtil den ønskede "filterstrækning" står åben. Adgangen til jordmediet sker gennem dette "filterinterval", hvorfor det skal sikres, at der er tryk- og strømningskontakt til jordmediet. Da denne type filterintervaller typisk er ganske korte (f.eks. 10 cm), da røret og dets løse speids fortrænger jorden, og dermed danner et komprimeret smear, og da filtret installeres i lerholdig jord, hvor strømningskontakten i væsentlig grad afhænger af, at filterstrækningen skærer en makropore, er det nødvendigt at dokumentere strømningskontakten for det enkelte filter og eventuelt forbedre filtrets funktion.

I det aktuelle tilfælde blev filterfunktionen søgt forbedret v.h.a. en roterende børste i det åbne filterinterval. Det lykkedes ikke ved denne fremgangsmåde, at få alle filtre til at fungere (som dokumenteret med slugtests). En vis proportion af misfungerende filtre vil formodentlig altid forekomme p.g.a. usikkerheden med at "ramme" en makropore, men det kan ikke udelukkes at børstemetoden har været utilstrækkelig til at fjerne smearet.

Det foreslås derfor (i tilfælde af fremtidig brug af samme installationsmåde), at smear fjernes med manuelt håndbor af den type som åbner sig til større diameter, når det drejes den ene vej rundt (graver) og lukker sig om prøven og får reduceret diameter, når det drejes den anden vej, - sådan at prøven kan trækkes ud gennem blindrøret.

Filtre, som ikke opnår strømningskontakt til jorden, erstattes med nye, idet de ikke fungerende efterlades *in situ*, eller rørene trækkes (excl. spidsen), og hullet efterpakkes for at hindre utilsigtet lækage.

Advarsel

Denne metode har udelukkende sin fordel i prisbillighed. Metoden viste sig at have for stor fejlprocent. I stedet henvises til de refererede afprøvede teknikker.

Referencer

D'Astous, A.Y., Ruland, W.W., Bruce, J.R.G., Cherry, J.A. and Gillham, R.W., 1989: Fracture effects in the shallow groundwater zone in weathered Sarnia-area clay. Canadian Geotechnical Journal, 26, p 43-56.

Harrar, B. og Nilsson, B. 2001. 3D strømning og transport i sprækket moræneler. Vand og Jord. Nr. 4, p 136-139.

CEVENT PROTOKOL 3-9;11

SÆSONBETINGET AIRSPARGING I SPRÆKKEDE LERHOLDIGE JORDLAG

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P.Gravesen
Dato	17/01 2001



Formål

Forceret remediering af forurening i sprækkede lerholdige jordarter med sæsonvarierende vandmætning i makroporer.

Baggrund

På grund af de store kapillære kræfter i finkornede lerede jordarter (og jordarter hvor matrix udgøres af denne type materiale) kan der opretholdes meget stor vandmætning mange meter over det frie grundvandsspejl. Dette indebærer, at grundvandets fluktuationer overvejende vil afspejle makroporøsiteten, idet infiltrerende nedbør altovervejende vil opsamles i de større porer, som ikke er kapillært mættede. Da makroporøsiteten i reglen udgør få procent af den totale porøsitet, vil det frie grundvandsspejl fluktuere relativt meget, hvilket betyder (som erfaret i Cevent projektet), at airsparging systemer, der er optimerede til grundvandsstanden i den tørre sæson, ikke nødvendigvis er anvendelige i den våde.

Metode

I finkornede lerede jordarter kan air sparging og ventilation kun foregå via makroporer (især sprækker) og matrixpermeable inhomogeniteter (sandslirer). Remedieringen af forurening i matrix foregår altovervejende indirekte ved afdræning og diffusion til beluftede makroporer. Da makroporerne kan være vandfyldte i en sæson og luftfyldte i en anden, bør grundvandsspejlets variationer observeres igennem en passende lang periode forud for udformningen af et ventilationsanlæg. Disse observationer lægges til grund for, om det er muligt at placere en vandret spargeboring, der ligger konstant under grundvandsspejlet, og en ventilationsboring, som hele tiden ligger i den umættede zone (men under terræn).

I tilfælde, hvor de nævnte krav ikke kan opfyldes, kan det vælges at benytte en alternativ belufningsstrategi ved at sparge og ventilere i den sæson, hvor grundvandsspejlet har en hensigtsmæssig beliggenhed i forhold til de vandrette boringer, og så overlade systemet til naturlig desorptions- og diffusionsmæssig udligning i hvileperioder i de øvrige sæsoner. På grund af at spargingen/ventilationen i makroporøse finkornede jordarter fortrinsvis påvirker forureningen i makroporer, og således fungerer via kombinerede processer (hurtig rensning i makroporer og langsom diffusionsbegrænset i matrix), vil en sådan stimuleret "passiv" ventileret evt. kunne være effektivitetsmæssigt og økonomisk fordelagtig.

Referencer

Parker, B.L., Gillham, R.W. and Cherry, J.A., 1994: Diffusive disappearance of immiscible-phase organic fluids in fractured geologic media. *Ground Water*, 32(5), pp 805-820.

Dowler, D.A., Todd, A. and Hook, P.E., 1997: Pulsed air sparging with remote soil vapor extraction: theory and pilot test case study (www.bektnxt.com/hilites/airsparge01.htm), 13 p.

CEVENT PROTOKOL 3-9;12
GRUNDVANDSSTANDEN I SPRÆKKET MORÆNELER

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

Installation af vandrette air sparging- og ventilationsboringer i moræneler med årstidsbestemt fluktuerende grundvandsspejl.

Baggrund

I finkornede lerede jordarter og i jordarter, hvor matrix udgøres af dette materiale, er den kapillære stighøjde meget stor. Dette betyder, at der i mange almindelige situationer i Danmark, hvor der kun er få meter til grundvandsspejlet, vil være meget høj kapillær vandmætning helt op til muld-/fyldlaget.

I et sådant tilfælde kan fastlæggelsen af grundvandsspejlets niveau være vanskeliggjort, ved at der kan samle sig lidt vand på bunden af borehuller, selv om de reelt er afsluttede over det egentlige grundvandsspejl. Ansamlingen af vand skyldes, at der dræner lidt vand fra makroporer og sandslirer.

Metode

Fejltolkning af grundvandsniveauet i den umættede zone, på grund af ansamling af en mindre mængde afdrænet vand fra makroporer i det gennemborede interval, kan imødegås ved dels ikke at tage "grundvandsniveauer" for gode varer, dersom de kun udgøres af få cm vand på bunden af en boring, dels ved at monitorere "grundvandsstanden" i boringen, indtil den har stabiliseret sig.

Herudover viser generel erfaring, at boringer i moræneler, som er filtersat lige under redoxgrænsen, afspejler årstidsvariationen og at vandstanden derfor kan tages som udtryk for det reelle trykniveau.

Referencer

Harrar, W., og Nilsson, B., 2001: 3D strømning og transport i sprækket moræneler. Vand & Jord, Nr. 4, pp 136-139.

CEVENT PROTOKOL 3-9;13
AFPROPNING AF FILTERSTRÆKNINGER

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

Sikre en strømningstæt endeafslutning af vandrette borestrækninger.

Baggrund

Effektiviteten af air sparging og vakuumventilation, v.h.a. vandrette borer, er afhængig af, at den luft som injiceres/ekstraheres stammer fra den jord, der omgiver de vandrette filterstrækninger.

Mens der i lodrette borer kan etableres vekslende filter og pakkersektioner, som afgrænser intervaller i boringens længderetning, blot ved at hælde materialerne ned i boringen (med tyngdekraften som medspiller), er dette ikke muligt i vandrette borer. Da der imidlertid er samme behov for strømningstæt endeforsegling af den vandrette filterstrækning i vandrette borer, må der anvendes en anden fremgangsmåde.

Metode

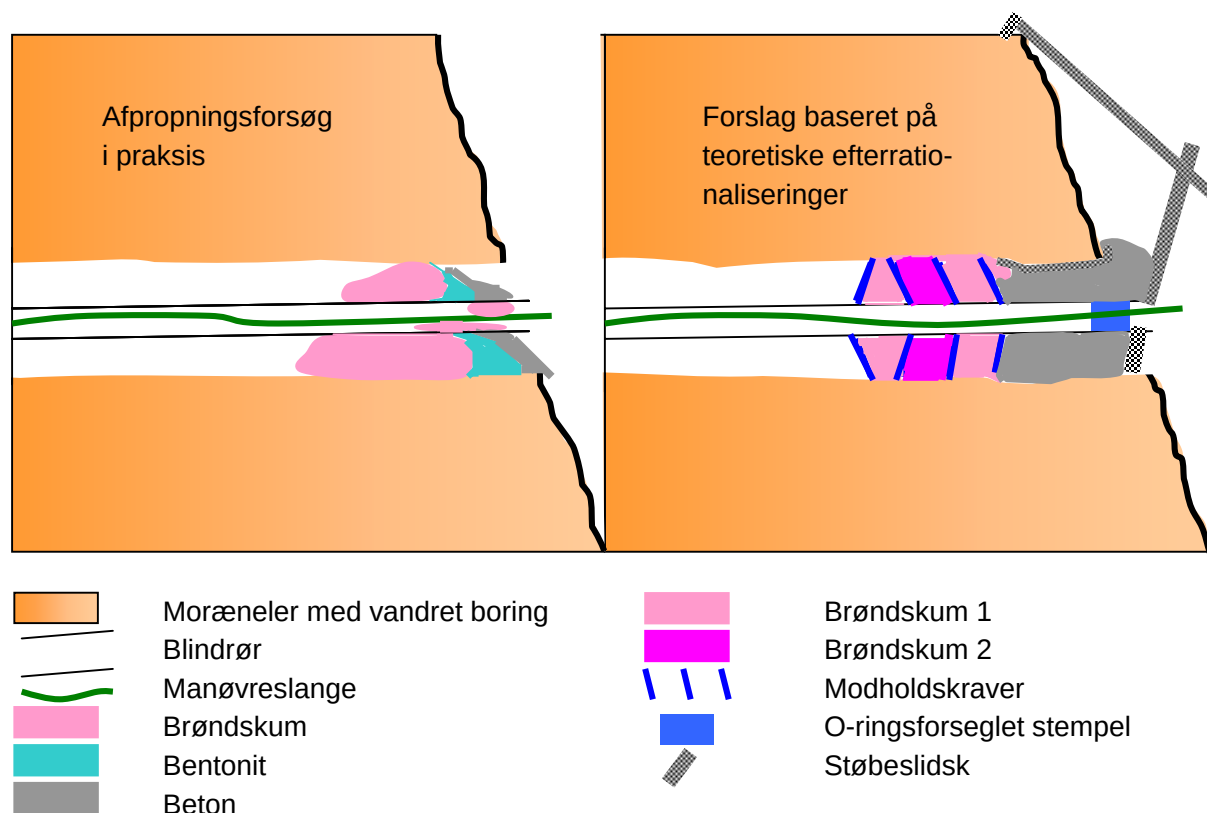
Der foreslås tre mulige angrebsvinkler til ende-afpropning:

- Afpropningen foretages i de skråtstillede an- og udboringsrender, hvorved tyngdekraften kan nyttiggøres til jævn lejring af pakkematerialet. De lave borevinkler betyder imidlertid, at denne type propper skal have en betydelig længde i boreaksens retning for fuldtud at omslutte bindrøret i et tværsnit gennem borehullet.
- Afpropningen etableres i enden af den vandrette boresektion, ved at der bores/graves en brønd i dette punkt. Gennem denne adgangsvej tilføres borehullet pakkematerialer, så det opfyldes og filterstrengen omsluttes.
- Der etableres en afpropning ved hjælp af modhold, hvilket er mest velegnet, hvor filtersektionerne afsluttes vandret ud i udgravning eller skrånt (se figur).

Ved de to første metoder er det muligt at benytte de klassiske materialer baseret på en indeklemt bentonitprop til forseglings, men det vurderes, at være fordelagtigt at hindre, at pakkematerialet løber / fordeler sig vandret langs filterstrækningen ved at påmontere kraver på filterrøret, eller ved at blokere hullet med brøndskum eller lignende. Denne type forseglingshuller må fyldes og komprimeres op til terræn.

Forseglinger af vandret boring ud mod en tankgrav eller i en skrånt må foregå med et materiale, der skaber perfekt pasform og kontakt til borehullets væg og omkring filterrørets blindstrækning, og dette materiale må tilføres op mod skærme eller blokader, der sikrer at

hullet lukkes tæt i fuld højde, uden at fordele sig på langs i borehullet. Modstandsdygtigheden mod tryk i boringens aksiale retningen må desuden sikres, ved modhold over en tilstrækkelig strækning f.eks. i form af en betonprop.



Afpropningsforsøget i Rantzausgade i praksis og den teoretiske løsning, som erfaringerne inspirerer til. Den væsentligste erfaring er, at der skal være modhold ved alle operationerne for at sikre, at ekspansionsstrykket fra brøndskummet medgår til at tætnepresse mod blindrøret og borehullets væg, og at betonfyldningen bliver fuldstændig. Figuren viser et forslag, hvor der blæses brøndskum ind ad to omgange. Først brøndskum "1" i begge ender af afpropningen, hvorved modholdet yderligere effektiviseres. Når dette er afhærdet injiceres brøndskum "2" i midten for at sikre optimal ekspansion ud mod borehullet og forsegling.

Referencer

Damera, P.E.R., Murali, P.G.D., Rebecca, A. and Kinal, E.I.T., 2000: Retrofitting horizontal sparge wells. 2nd Int. Conf. on Contaminated Soils, Sediment and Water, Amherst, M.A., USA (www.gpworldwide.com/pdf/envir/envir_horiz_sparge_wells.pdf), 8 p.

CEVENT PROTOKOL 3-9;14
KRAV TIL PAKKERE

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 

Formål

At opstille fordringerne til pakkere, som kan anvendes til strømningsmæssig sektionering af vandrette filterstrækninger.

Baggrund

Lokaliseringen af luftinjektion eller ekstraktion via vandrette filterstrækninger styres af to tekniske forhold (ud over strømningsrate og -tryk). Disse forhold er dels den anisotropi, der kan forekomme i jordmediets permeabilitet, og som betinger, at jordmediet ikke gennemtrænges ligeligt af luften langs hele filterstrækningen, og dels muligheden for at langsgående strømning i annulus langs filterstrækningens yderside kan fremme den uensartet fordelte strømning gennem jorden.

Under sådanne betingelser, som må forventes at være særligt udprægede i finkornede og lerede jordarter med makroporer, modvirkes eller elimineres den ensartet fordelte injektion, som tilsigtes gennem dimensionering af filtrets perforationer. Der kan derfor være behov for at reducere eller hindre den langsgående strømningsmulighed i annulus for at fremme en ensartet beluftning.

Metode

Det foreslås, at der anvendes ekspanderbare pakkere til strømningsmæssig adskillelse i annulus i vandrette borer mellem sektioner af filterstrengen for at reducere den langsgående strømning og dermed sikre beluftning langs hele filterstrengen (via alle pakkeradskilte filtersektioner). Pakkerne må være konstruerede, så de dels lukker tæt mod borehullet og filterrøret, og dels kan modstå en på forhånd fastlagt trykdifferens mellem de adskilte filtersektioner.

Ved test af pakkernes effektivitet vil der, ud over lækage mellem pakkeren og dens anlægsflader, kunne foregå en strømning via forbundet porennetværk gennem jorden. Pakkernes effektivitet må derfor vurderes i forhold til jordens generelle permeabilitet (i den pågældende retning).

Pakkerens funktion afhænger i meget høj grad af dens anlæg mod borehullet. Ruheden og irregulariteten af borehullet, i en tværsnitszone omkring afpakningsstedet, må derfor være så beskeden som muligt, og i tilfælde af at der benyttes opblæselige pakkere, må

ekspansionsstrykket være så højt og pakker materialet så fleksibelt, at pakkeren vil forme sig ud i borehullets ruhed.

Borehullet skal derfor helst være glat og regulært, hvilket i princippet vil kunne opnås med en fortrængende reamer. Men da hullet heller ikke må have smear, er det nødvendigt at benytte en skærende reamer med så flade/liggende knivformede skær, som muligt. Borehullets facon kan verificeres med en kaliber log eller bedre med en Telescanner log. I nogle finkornede lerholdige jordarter vil pakkeranlægsfladerne i boringen kunne forbedres v.h.a. en roterende børste på borerørets spids.

Blandt de mange måder at foretage afpakninger på i vandrette boringer omtales her tre typer:

- Pakkersektioner af bentonit ekspanderer som en løs masse, der ved modhold kan øve et moderat tryk på borehullets væg. Denne type pakker kan føje sig nøje efter borehullets uregelmæssigheder, men er ikke strømningstæt og kan udtørre ved beluftning. Strømningstætheden og trykstabiliteten vil formodentlig kunne forbedres v.h.a. en plastpose, trukket over pakkersektionens ender.
- Pakkere af gummimembraner som ekspanderes med luft-, gas- eller vandtryk. Gummiets elasticitet gør det muligt igen at fjerne pakkeren. Pakkere kan være af glidebøsningstypen, hvor en strømpe af ret stift gummi ekspanderer radiært, mens den ene (frie) ende glider frem i en kompenserende bevægelse. Alternativt kan pakkeren bestå af en fleksibel tynd gummislange, der ekspanderes under strækning af gummiets og former sig efter borehullet. Denne sidste type må forsynes med kraver, som sikrer, at den bløde pakker ikke ekspanderer i borehullets længderetning.
- Billige pakkere af fleksible, tynde, asymmetriske slangestykker (traktorslange). Disse pakkere ekspanderer asymmetrisk og kan derfor kun anvendes i bedste fald, hvilket vil sige i glatte huller, hvor alle pakkere er asymmetriske til samme side i forhold til borehullet, sådan at pakkerne ikke gennem ekspansionen modvirker hinandens forseglende virkning.

Referencer

Duffy, B.E., 2001: Application of in-situ remediation technologies by subsurface injection. Sixth annual in-situ and on-site bioremediation conference, San Diego, CA, Battelle Press, Columbus, OH, in review for the proceedings (www.regenesis.com/pdf%20files/Battell%2001%20abs.paper/DUFFY%20-%20B2001%20-%20Paper.pdf), 9 p.

CEVENT PROTOKOL 3-9;15
HYDRAULISK LEDNINGSEVNE I MORÆNELER

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001 <i>Peter Gravesen</i>

Formål

At opstille erfaringsværdier for den mættede hydrauliske ledningsevne i moræneler.

Baggrund

Air sparging og ventilation foregår i finkornede og lerede jordarter (specielt moræneler) lige som i grovere matrixporøse jordarter gennem systemer af forbundne porer. Jo mere finkornet en jordart er, desto vanskeligere er beluften gennem matrix, og desto mere afgørende for beluftningsmuligheden og -effektiviteten er den alternative strømning gennem makroporer.

Strømningsmuligheden i makroporerne afhænger fortrinsvis af gennemstrømningsarealet i sammenhæng med porevægsarealet. Dette betyder at tætheden af forbundne makroporer er afgørende for jordartens hydrauliske egenskaber. For hver aktuell leret jordart er der således karakteristiske samhørende værdier for matrixpermeabilitet og sprække/makroporepermeabilitet.

Værdier

Matrix permeabiliteter kan bestemmes i laboratoriet på kerneprøver. Derimod kan sprække/makroporepermeabiliteten kun bestemmes indirekte som resultanten af den bulkhydrauliske ledningsevne bestemt ved feltforsøg fratrullet matrix permeabiliteten ($K_{\text{bulk}} = K_{\text{makropore}} + K_{\text{sprække}}$), idet der for tiden ikke findes nogen metode til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne af en sprække/makropore. Erfaringsværdier for hydrauliske ledningsevner i finkornede og lerede jordarter (moræneler) er kompilerede i følgende tabel:

Moræneler med makroporer over kalkgrænsen	$10^{-5} - 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$
do. mellem kalk-og redoxgrænsen	$10^{-7} - 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$
do. under redoxgrænsen	$10^{-9} - 10^{-10} \text{ ms}^{-1}$
Moræneler med sandslire	10^{-6} ms^{-1}
Moræneler uden makroporer (matrix perm.)	10^{-10} ms^{-1}
Sand (fint- / mellemkornet)	$10^{-4} - 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$

Referencer

Cote, C.M., Bristow, K.L., Ross, P.J. (2000). Increasing the efficiency of solute leaching: impacts of flow interruptions with drainage of the "preferential flow paths". J. Cont. Hydr., 43, 191-209.

Harrar, W. og Nilsson, B., 2001: 3D strømning og transport i sprækket moræneler. Vand & Jord, Nr. 4, pp 136-139.

Nilsson, B., Sidle, R.C., Klint, K.E.S., Bøggild, C.E. and Broholm, K., 2001: Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till - sandy aquifer system. Journal of Hydrology, 243, pp 162-179.

Nilsson, B., Brüsch, W., Harrar, W.G., Vosgerau, H.J., Bojesen, O. (in prep). Glyphosate leaching to tile drains and shallow groundwater in a macroporous glacial till. Manuskript fremsendes til Journal of Env. Q.

McKay, L., Fredericia, J., Lenczewski, M., Morthorst, J. and Klint, K.E.S., 1999: Spatial variability of Contaminated Transport in a Fractured Till, Avedøre, Denmark. Nordic Hydrology, Vol. 30, 4/5, pp333-360.

Rivad, T., Hasholt, B., Skjernaa, L. og Jørgensen, P., 2001: Vandtryk variationer i moræne- og sandlag; Vand & Jord, 8 årg., Vol. 3, pp 91-94.

CEVENT PROTOKOL 3-9;16
UDTAGNING AF INTAKTE PRØVER

Beskrevet af	Erik Nygaard, GEUS - Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse
Kontrolleret af	P. Gravesen
Dato	17/01 2001



Formål

At skaffe materiale fra vandrette borer, som er egnet til at gennemføre analyser, der kræver at jordartens struktur og sammensætning ikke er blevet ændret under prøvetagningen.

Baggrund

Til en del undersøgelser af geotekniske og hydrauliske parametre, samt til undersøgelse af mikrobiologi, tekstur m.v., fordres det, at de prøver, som analyseres, er så nært identiske med *in situ* jordartsmaterialet som muligt. Prøvetagningsudstyret skal være anvendeligt i vandrette borer og så vidt muligt kunne indsamle prøven, uden at den bliver forurennet eller deformeret.

Metode

Den foreslåede metode er blevet afprøvet i en vandret boring, hvor den producerede prøves kvalitet er sammenlignelig med prøver udtaget med lignende teknik i lodrette borer.

Metoden består i, at der tages en prøve med et vandret liggende A-rør, som presses ind i borefronten v.h.a. boremaskinens presseværk. A-røret er placeret i enden af borerøret, hvor det erstatter borekronen. Det er således kun muligt at udtage intaktprøver med udstyret under boring af pilothuller, hvorfor prøvetagningen koster rig-tid til udskiftning af borekrone før og efter prøvetagningen.

Forkanten af prøvetagerens (rengjorte) A-rør er beskyttet af et blødt plastlåg under fremføringen til borefronten, sådan at røret ikke utidigt opsamler løst materiale fra borehullet. Prøvetageren penetrerer plastlåget, når presseværket indleder selve prøvetagningen. Et løst stempel i A-røret sikrer, at der ikke løsnes materiale fra prøven under indpresningen og transporten ud af hullet, ligesom det hindrer kontakt til løst materiale, som måtte komme "bag ind" i prøvetageren. Indpresningslængden kontrolleres på boremaskinen, så A-røret ikke bliver overfyldt, og borerørets rotationsposition viser, hvad retning der er opad på prøven (oplysningen overføres manuelt til A-røret inden afmontering).

Den kritiske styring af prøvetageren, så den ikke griber en prøve undervejs gennem det kurvede adgangshul til den vandrette borestrækning, foregår med kurvede styreslæder, hvis afstand til borerøret er tilpasset boreudstyrets minimale krumningsradius på 90m. Efter at den fyldte prøvetager er bjerget, ekstraheres prøven hydraulisk lige som for konventionelle A-rørsprøver.

Dette udstyr er kun egnet til løse jordarter med lille kornstørrelse, idet der vil opstå en deformationszone med samme tykkelse som diameteren af de groveste korn. Udstyret kan

ikke benyttes til prøvetagning i jord der indeholder sten med diameter over ca. 2 cm, idet A-rørets skærende kant vil blive deformeret.

Referencer

D'Astous, Y.A., Ruland, W.W., Bruce, J.R.G., Dherry, J.A. and Gillham, R.W., 1989: Fracture effects in the shallow groundwater zone in weathered Sarnia-area clay. Canadian Geotechnical Journal, 26, pp 43-56.

USEPA, 1994: Alternative methods for fluid delivery and recovery. EPA/625/R-94/003.

Tak

Det ville ikke have været muligt at gennemføre Ceventprojektets Delprojekter 3 og 9 uden omfattende og velvillig støtte. Uden Dorthe Glensvigs engagerede indsats, som sekretær for det samlede Cevent projekt i den indledende fase, ville de omfattende startvanskeligheder aldrig være blevet overvundne. Oliebranchens Miljøpulje vovede at stille en grund til rådighed og Erik K. Jørgensen A/S udskød afslutningen af oprensningen i Rantzausgade 57, så det var muligt at foretage forsøg, og var meget behjælpelig med iværksættelsen af projektets undersøgelser. Københavns Tekniske Forvaltning gav velvilligt tilladelse til at klarmeldingen af grunden kunne udskydes 1 år. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse tilførte ekstra ressourcer da det kneb.

Også en del aktører i rådgiverbranchen bidrog i indledningsfasen ved at øse af deres praktiske erfaring. Teknologistyrelsen bidrog med finansiering og accepterede tilpasninger i tidsplanen.

Vi takker alle for denne velvillighed, støtte og hjælp.

13 Referencer

Amternes Videncenter, Teknik og Administration Nr. 5, 1999.

Banestyrelsen, Miljørigtig oprensning af forurenede jord og grundvand (LIFE projekt).

Beven, K. and Germann, P., 1982. Macropores and water flow in soils, *Water Resources Research*, 18, 1311-1325.

Broholm, K., Arvin, E., Hansen, A., Hinsby, K. and Jørgensen, P., 1995: The fate of dissolved creosote compounds in an intact fractured clay column. In: *Groundwater Quality; remediation and protection (GQ'95); Proceedings, IAHS-AISH Publ. No. 225*, pp 115-123.

Broholm, M.M., Broholm, K., Arvin, E. 1999a. Diffusion of heterocyclic compounds from a complex mixture of coal-tar compounds in natural clayey till. *J. Cont. Hydr.*, 39, 227-247.

Broholm, M.M., Broholm, K., Arvin, E. 1999b. Sorption of heterocyclic compounds on natural clayey till. *J. Cont. Hydr.*, 39, 183-200.

Cote, C.M., Bristow, K.L. and Ross, P.J., 2000: Increasing the efficiency of solute leaching: impacts of flow interruptions with drainage of the "preferential flow paths". *J. Cont. Hydr.*, 43, 191-209.

D'Astous, A.Y., Ruland, W.W., Bruce, J.R.G., Cherry, J.A. and Gillham, R.W., 1989. Fracture effects in the shallow groundwater zone in weathered Sarnia-area clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 43-56.

Damera, P.E.R., Murali, P.G.D., Rebecca, A. and Kinal, E.I.T., 2000: Retrofitting horizontal sparge wells. 2nd Int. Conf. on Contaminated Soils, Sediment and Water, Amherst, M.A., USA (www.gpworldwide.com/pdf/envir/envir_horiz_sparge_wells.pdf), 8 p.

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

Ditch Witch, 1996. The Green Book. Horizontal directional drilling systems: A new dimension for remediation. CMW-950. pp. 150

Dowler, D.A., Todd, A. and Hook, P.E., 1997: Pulsed air sparging with remote soil vapor extraction: theory and pilot test case study (www.bektnxt.com/hilites/airsparge01.htm), 13 p.

Downs, C.E., 1996: Multimedia Remediation Applications of Horizontal Wells. In: *Proceedings of the Tenth National Outdoor Action Conference and Exposition*, Las Vegas, Nevada. National Ground Water Association. Las Vegas, Nevada, pp 237-243.

Driscoll, F.G., 1986: Groundwater and Wells, Second Edition. Johnson Division, St. Paul, Minnesota, 1089 p.

Duffy, B.E., 2001: Application of in-situ remediation technologies by subsurface injection. Sixth annual in-situ and on-site bioremediation conference, San Diego, CA, Battelle Press, Columbus, OH, in review for the proceedings (www.regenesis.com/pdf%20files/Battell%2001%20abs.paper/DUFFY%20-%20B2001%20-%20Paper.pdf), 9 p.

Ernstsen, V., 1996: Reduction of nitrate by Fe²⁺ in clay minerals. Clays and Clay Minerals 44, pp 599-608.

Fredericia, J., 1990: Saturated hydraulic conductivity of clayey till and the role of fractures. Nordic Hydrology, Vol. 21, pp 119-132.

Fredericia, J., 1991a: Morænelers hydrauliske egenskaber, foreløbige resultater af feltforsøg, Enø, Rapport.

Fredericia, J., 1991b: Fractures in clayey till. Occurrence, genesis and hydrogeological significance. PhD-Thesis. Technical University in Denmark, Institute for Geology and Geotechnics.

Fredericia, J., 1993: Fractures in clayey till in Denmark: Occurrence, Genesis and Hydrogeological Significance. In: Geological Society of America, Annual Meeting, Boston, Massachusetts, A426.

Gillham, R.W., Robin, M.J.L., Barker, J.F. and Cherry, J.A., 1983: Groundwater monitoring and sampling bias. Dep. Earth Sci., Univ. Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

Haley, J.E., Hanson, B., Enfield, C. and Glas, J., 1991). Evaluating the effectiveness of ground water extraction systems. Ground water Monitoring Review, Winter, 119-124.

Hansen, B., 1978: Forelæsningsnotater til kursus 5811-geoteknik. Grundkursus 1. Den private ingeniørfond ved Dansk Teknisk Højskole.

Harrar, B. og Nilsson, B. 2001. 3D strømning og transport i sprækket moræneler. Vand og Jord. Nr. 4, 136-139.

Harremöes, P., Jacobsen, M. og Ovesen, K., 1984: Lærebog i Geoteknik 1. Poluteknisk Forlag, 5. udg., København.

Holm, J., 1999: Modellering af luftstrømning og forureningstransport ved design og drift af ventileringsanlæg. Teknikker til ventilering af forurennet jord og grundvand, ATV Jord og Grundvand, Schæffergården, 9. nov., pp 19-36.

Jacobsen, M., 1970: Strength and deformation properties of preconsolidated moraine clay. Bull. Danish Geotechnical Institute, Vol. 27, pp 21-45.

James, B.R. and Freeze, R.A., 1993: The worth of data in predicting aquitard continuity in hydrogeological design. *Water Resources Research*, Vol. 29/7, pp 2049-2065.

Johnson, R.L., Johnson, P.C., McWhorter, D.B., Hinchey, R.E. and Goodman, I., 1993: An Overview over In Situ Air Sparging, *GWMR*, Fall 1993, pp 127-135.

Jones, L. (1999). Fracpacking horizontal wells allows ultra-high rates from mediocre formations. *Petroleum Engineer International*, 37-40 (Juli).

Journal of Hazardous Materials, 2000. Special Issue on Air Sparging. Vol. 72, No. 2-3.

Jørgensen, P.R. og Fredericia, J. 1991. Migration of nutrients, pesticides and heavy metals in fractured clayey till, *Geotechnique*, Vol. 42, 67-77.

Karlsson, H., Losonsky, G. and Jacques, G.E., 1992: Horizontal Wellbore Completions for Aquifer Restoration and Their Economics. In: *Proceedings of the 10th Annual Hazardous Materials and Environmental Management Conference*, pp154-181.

Keely, J. (1989). Performance evaluation of pump-and-treat remediations, USE-PA/540/4-89-005, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma.

Klint, K.E.S., 1996: Fractures and Depositional Features of the St. Joseph Till and upper part of the Black Shale Till at the Laidlaw site, Lambton County, Ontario. *GEUS Rreport 9*, 39 p (+App.).

Klint, K.E.S., Abildtrup, C.H., Gravesen, P., Jakobsen, P.R. og Vosgerau, H., 2001: Spræk-
kers oprindelse og udbredelse i moræner. *Vand og Jord*, 8. årg., nr. 3, pp 111-119.

Klint, K.E.S.: Fractures in Diamict Deposits; Origin and Distribution; Ph.D. thesis 2002; *GEUS Rapport*, in prep.

Knaebel, K.S. 1981. Simplified Sparger Design. *Chemical Engineering*, March 9, pp 116-117.

Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Gravesen, P., Foged, N., Knudsen, B. og Baumann, J., 1988: Vejledning i ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse. *Bull. Dansk Geoteknisk Forening* 1, 145 p.

Lindhardt, B., Abildtrup, C., Vosgerau, H., Olsen, P., Torp, S., Iversen, B.V., Jørgensen, J.O., Plauborg, F., Rasmussen, P. and Gravesen, P., 2001: Site Characterization and Monitoring Design, The Danish Pesticide Leaching Assessment Programme. *Geological Survey of Denmark and Greenland, Danish Institute of Agricultural Sciences, National Environmental Research Institute*, 73p (+App).

Lundegard, P.D., Chaffee, B. and LaBrecque, D., 1996: Effective Design of a Horizontal Air Sparging Well. Presented at the St. International Conference on Air Sparging, International Network of Environmental Training, Inc.

- Lundegard, P.D. and Anderson, G., 1996: Multi-Phase Numerical Simulation of Air Sparging Performance: Groundwater, Vol. 34(3), pp 451-460.
- Madsen, M. og Larsen, T.H., 1995: In-situ teknikker i Danmark. Vand og Jord, 2, nr. 2, pp 59-61.
- Malinovski, D. og Klint, K.E.S., 1997: Geotekniske undersøgelser af moræner ved Flakkebjerg. SMP 96, GEUS rapport 27, 21 p (+Bilag).
- Mast, V.A. and Koerner, C.E., 1996: Environmental Horizontal Directional Drilling Technology. No-Dig Engineering, Vol. 3, No. 2, pp 17-21.
- Mackay, D.M. and Cherry, J.A., 1989: Groundwater Contamination: Pump-and-Treat Remediation. Environ. Sci. Technol. 23(6), pp 630-636.
- McKay, L. and Fredericia, J., 1995. Origin, distribution and hydraulic influence of fractures in clay-rich tills glacial tills. Canadian Geotechnical Journal, 32, 957-975.
- McKay, D.M., Wilson, R.D, Brown, M.J., Ball, W.P. and Durfee, D.P., 1997: Field and laboratory studies of pulsed pumping for cleanup of contaminated aquifers. University of Waterloo, Department of Earth Sciences, Waterloo, ON, United States, 219 p.
- McKay, L.D., Cherry, J.A. and Gillham, R.W., 1993. Field experiments in a fractured clay till: 1. Hydraulic conductivity and fracture aperture. Water Resources Research, 29(4), 1149-1162.
- McKay, L.D., R.W. Gillham, and J.A. Cherry. 1993. Field experiments in a fractured clay till 2. solute and colloid transport. Water Resour. Res. v. 29, no. 12, pp. 3879-3890.
- McKay, L.D., D.J. Balfour, and J.A. Cherry. 1998. Lateral chloride migration from a landfill in a fractured clay-rich glacial deposit. Ground Water. v. 36, no. 6, pp. 988-999.
- McKay et al. (1999)
- McKay, L., Fredericia, J., Lenczewski, M., Morthorst, J. and Klint, K.E.S., 1999. Spatial variability of Contaminant Transport in a Fractured Till, Avedøre, Denmark. Nordic Hydrology, Vol 30, 4/5, 333-360.
- Miljøstyrelsen, 1989: Lossepladsprojektet, Udredningsprojekt U3, 223 p.
- Miljøstyrelsen, 1996: Barriers to development and application of new remedial technology. Soil and groundwater project no. 21.
- Miljøstyrelsen, 1998: Vejledning om Prøvetagning og Analyse af Jord, No. 13.

Miljøstyrelsen, 1999: Vakuumentileringssager fra Oliebranchens Miljøpulje. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening, Miljøprojekt Nr. 421.

Miljøstyrelsen, 2000: Frakturering. Inducerede sprækker ved hydraulisk og pneumatisk frakturering. Miljøprojekt Nr. 541.

Miljøstyrelsen, 2001a. Jordventilering. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. December 2001.

Miljøstyrelsen, 2001b. Air sparging. Statusnotat, teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. December 2001.

Mortensen, A.P., Jensen, K.H., Nilsson, B. og Juhler, R.K. 2001. Multiple tracing experiments in unsaturated fractured clayey till. Fremsendt til J. of Contaminant Hydr., December 2001.

Murdoch, L.C., Slack, W.W., Harrar, W. and Siegrist, R.L. (2000). Embedded sidewall samplers and sensors to monitor the subsurface. Groundwater, Vol. 38 (5), 657-664.

Nilsson, B., Brusch, W., Harrar, W.G., Vosgerau, H.J., Bojesen, O. (in prep): Glyphosate leaching to tile drains and shallow groundwater in a macroporous glacial till. Manuskript fremsendes til Journal of Env. Q.

Nilsson, B. Sidle, R.C., Klint, K.E., Bøggild, C.E. and Broholm, K., 2001: Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till - sandy aquifer system. Journal of Hydrology, 243, 162-179.

NIRAS, 1999. Airsparging og jordventilering med vandrette borer. Rapportering af drift og monitoring for perioden 16.03-03.11.1998. Teknologiuudviklingsprojekt. (Statusrapport nr. 1). Udarbejdet for Miljøstyrelsen og Københavns kommune/Miljøkontrollen.

Oliebranchens Miljøpuljes Kvalitetsmanual, 1997.

Oliebranchens Miljøpulje, 1997: "Afgrænsende forureningsundersøgelse. Rantzausgade 57, 2200 København N. OM-sag nr. 2200-20-569". Udført af EKJ Rådgivende Ingeniører A/S.

Ovens, J.E.V., Larsen, F.P. og Cowie, D.R. (1998). Making sense of water injection fractures in the Dan Field. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Dec. 1998.

Parker, B. L., Gillham, R.W., and Cherry, J.A. 1994. Diffusive disappearance of immiscible-phase organic liquids in fractured geologic media, Ground water, 32(5), 805-820.

Paul, D.G., 1987. The effect of construction, installation, and development techniques on the performance of monitoring wells in fine-grained glacial tills. M.S.thesis, Dept. of Geological and Geophysical Sciences, Univ. of Wisconsin-Milwaukee, WI.

Poulsen, M.M., 1992: Feltundersøgelser af jord- og grundvandsforurening. DTV01, Lyngby, 87 p.

Rider, M., 2000: The geological interpretation of well logs; Second edition, Whittles Publishing, 280p.

Rivad, T., Hasholt, B., Skjernaa, L. og Jørgensen, P., 2001: Vandtryk variationer i moræne- og sandlag; Vand & Jord, 8 årg., Vol. 3, pp 91-94.

Rosenbom A., Howardsen J., 1998: CEVENT, Dansk Center for Ventilering af Jord og Grundvand. In-situ opresning ved Rantzausgade 57, Nørrebro. Projektbeskrivelse.

Schroeder, J.D., et al., 1992: In Situ Air Stripping: Cost Effectiveness of a Remediation Technology Field Tested at the Savannah River Integrated Demonstration Site, LA-UR-92-1927, Los Alamos National Laboratory, NM.

Scott Keys, W., 1997: Borehole geophysics in environmental investigations; A practical guide. Lewis Publishers, 176p.

Sidle, R.C., Nilsson, B., Hansen, M. and Fredericia, J., 1998. Spatially varying hydraulic and solute transport characteristics of a fractured till determined by field tracer tests, Funen, Denmark. Water Resources Research, 34(10), 2515-2527.

Tsuboyama, Y., Ditle, R.C., Noguchi, S. and Hosoda, I., 1994: Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment. Water Resources Research, Vol. 30/4, pp 879-890.

USDOE, 1996. In situ air stripping using horizontal wells.
(www.em.doe.gov/plumesfa/intech/isasuhw/summ.html).

USDOE, 2000. Remediation of DNAPL in low permeability soils. Subsurface contaminants focus area. DOE/EM-0550.

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

USEPA, 1997: Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapour Extraction. EPA-542-R97, 124p.

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

Vesper, S. J., Murdoch, L.C., Hayes, S. og Davis-Hoover, W.J. (1994a). Solid oxygen source for bioremediation in subsurface soils. J.Haz.mat. 36: 265-274.

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

Vinsome, P.D.W. and Shook, G.M., 1993: Multi-Purpose Simulation. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 9, pp 29-38.

Wagner, B.J. and Gorelick, S.M., 1987: Optimal groundwater quality management under parameter uncertainty. Water Resources Research, 23(7), pp1162-1174.

Walsted, L. og Christensen, A.G., 2000. Hydraulisk frakturering langs vandretteboringer. Afværge- og teknologiudviklingsprojekt for Storstrøms Amt og Miljøstyrelsen. ATV-Vintermøde, 7.8. marts 2000.

Wilson, D.D., 1995: Environmental Horizontal Well Drilling and Installation Methods. World Wide Web Home Page (<http://www.horizontalwell.com>), by Environmental Consultants, LLC.

Wingle, W.L. and Poeter, E.P., 1993: Uncertainty associated with semivariograms used for site simulation. Ground Water, Vol. 31/5, pp 725-734.

Yang, Y.J. and Gates, T.M., 1997. Wellbore skin effect in slug-test data analysis for low-permeability geologic materials. Groundwater, 35(6), 931-937.

Bilagsliste

- Bilag 1: Borejournal, samt gamma og neutron logs for boringerne B3, B7 og K1.
- Bilag 2: Datablad for Rielsche-pumpe.
- Bilag 3: Eksperimenter.

Bilag 1: Borejournal, samt gamma og neutron logs for boringerne B3, B7 og K1.

Boring K1

Lokalitet: I Rantzausgade ud for nr. 68, 2200 København N.

DGU nr.: 201.4673

Udført: 2.-3. oktober 1996.

Bygherre: Oliebranchens Miljøpulje, Vognmagergade 7,5., 1120 København K.

Sag: Hans Egedes Gade 10, 2200 København N.

Sags nr.: OM 2200-10-150

Borecentreprenør: Franck Geoteknik A/S, Industrivej 22, 3550 Slangerup.

Boremethode: 6" snegl/sandspand med forerør.

Dybde: 15,5 m.u.t.

Kote: Ikke nivelleret.

Filtersætning: Filtersat med ø 63 mm opslidset PVC fra 6-9 m.u.t. (Filter 1) i sekundært grundvandsmagasin bestående af smeltevandssand.

Filtersat med ø 63 mm opslidset PVC fra 12,5-15,5 m.u.t. (Filter 2) i primært grundvandsmagasin bestående af kalk/smeltevandssand.

Afropning: Bentonit over begge filtre til 2 m.u.t.

Afslutning: Aflåselig hætte over begge filtre. Ved terræn afsluttet med ø 25 cm betonrør med kørebanedæksel.

Pejling: Filter 1: 4,38 m.u.t. den 3. oktober 1996.
Filter 2: 4,40 m.u.t. den 3. oktober 1996.

Renpumpning: Filter 1: Grundfoss MP1 dykpumpe i 75 minutter, i alt ca. 4 m³.
Filter 2: Grundfoss MP1 dykpumpe i 80 minutter, i alt ca. 4 m³.

Prøveudtagning: Direkte fra pumpe i 1 liters glasflaske.

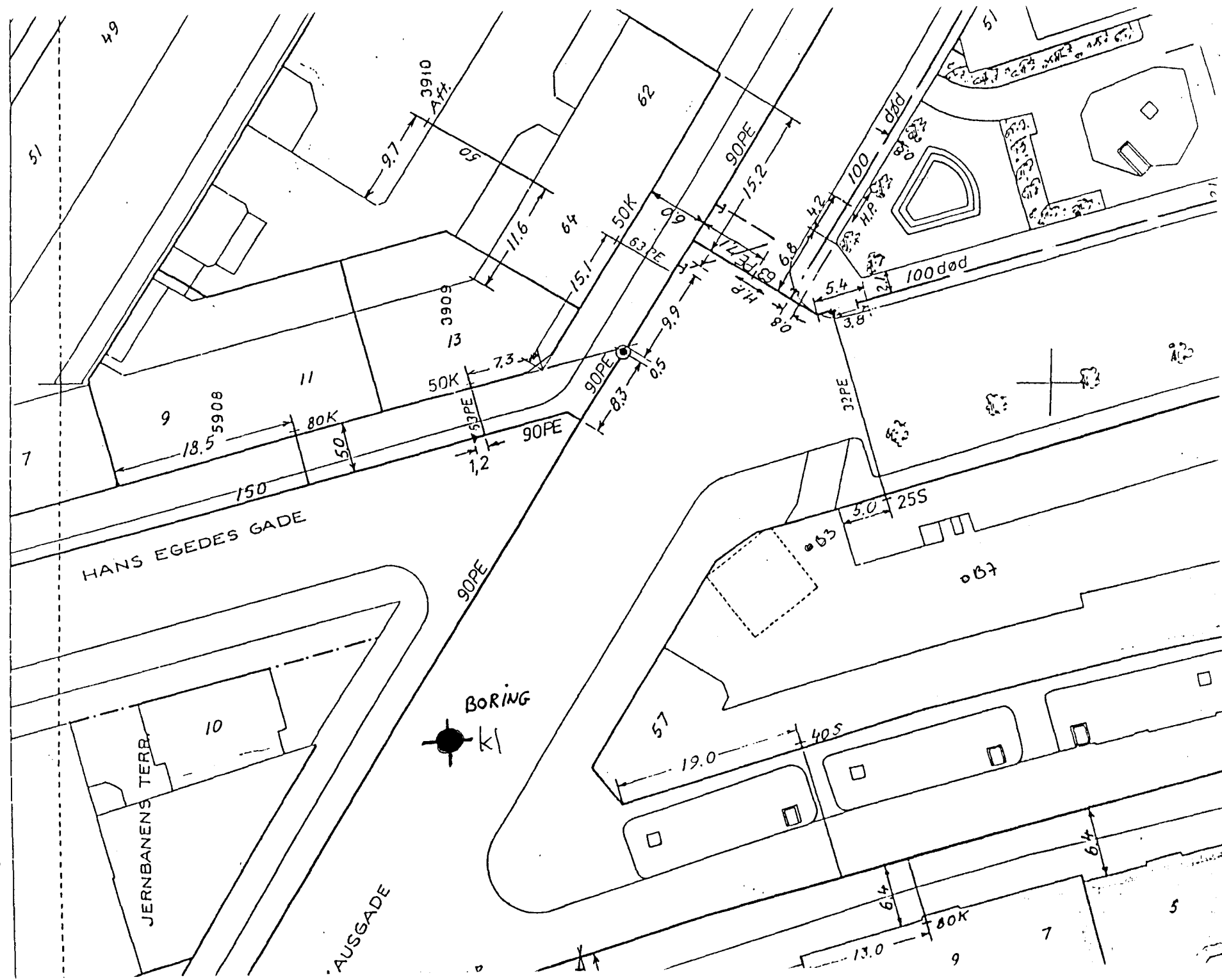
Dybde (m.u.t.)	Signatur	Jordartsbeskrivelse	Lugt	PH
0,0		Brostensbelægning		
		FYLD, ler, slaggholdigt, sort/brunt	0	0
1,0		FYLD, ler, brunt	0	0
		FYLD, ler, brunt	0	0
2,0		MORÆNELER, fast, brunt, kalkholdigt	0	0
		MORÆNELER, fast, brunt, kalkholdigt	0	0
3,0		MORÆNELER, fast, brunt, kalkholdigt	0	0
		MORÆNELER, fast, gråt, kalkholdigt	0	0
4,0		MORÆNELER, fast, stenet, gråt, kalkholdigt	0	0
		MORÆNELER, fast, gråt, kalkholdigt	0	0
5,0		MORÆNELER, fast, gråt, kalkholdigt	0	0
		MORÆNELER, fast, gråt, kalkholdigt	0	0
6,0		MORÆNELER, fast, stenet, gråt, kalkholdigt	0	0,4
		SMELTEVANDSSAND, fint, siltet, gråt	0	8,1
7,0		SMELTEVANDSSAND, fint, siltet, gråt	0	9,2
		SMELTEVANDSSAND, fint, siltet, gråt	0	7,2
8,0		SMELTEVANDSSAND, fint, gråt	0	0,8
		SMELTEVANDSSAND, fint, let siltet, gråt	0	0
9,0		SMELTEVANDSSAND, fint, leret, siltet, gråt	0	0
		SMELTEVANDSSAND, fint, let siltet, gråt	0	0
10,0		MORÆNELER, fast, gråt, kalkholdigt	0	0
		MORÆNELER, fast, gråt, kalkholdigt	0	0
11,0		SMELTEVANDSSAND, fint, gråt	0	0
		SMELTEVANDSSAND, fint, leret, gråt	0	0
12,0		SMELTEVANDSSAND, fint, leret, gråt	0	0
		SMELTEVANDSSAND, fint, siltet, gråt	0	0
13,0		SMELTEVANDSSAND, fint, siltet, gråt	0	0
		MORÆNELER, stærkt sandet, gråt	0	0
14,0		MORÆNELER, fast, gråt, kalkholdigt	0	0
		MORÆNELER, stærkt kalkholdigt, gråt	0	0
15,0		KALK, flintholdigt, hvidt	0	0
		KALK, hvidt	0	0
16,0				

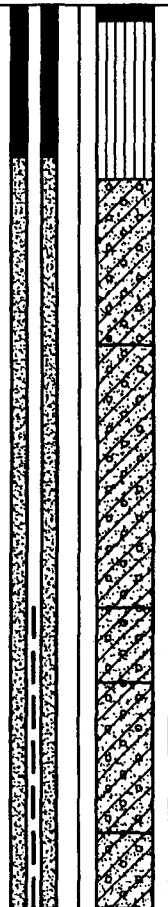
Miljø- og Energiministeriet

J.nr. GEUS: 073-029

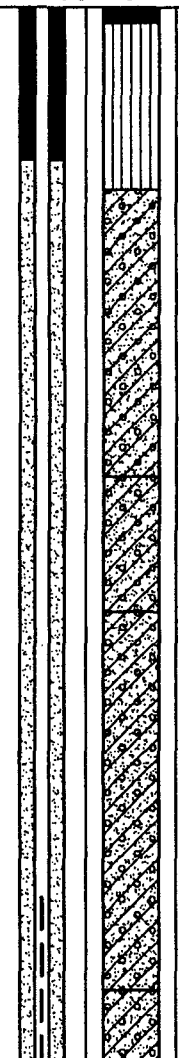
26 SEP. 1997

AKT. NPL 49



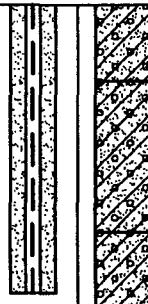
FORSØGSRESULTATER				BOREPROFIL	GEOLOGI			
Dybde	Syn	Lugt	PID	Udbygning	M.u.t.	Jordtype	Aflejringsstype	Alder
1.00	0	0	<10		0,0-0,1	ASFALT		
					0,1-1,15	FYLD, muldet, leret, sandet, mørk brun		R
	0	0	<10					
2.00	0	0	<10		1,15-2,25	MORÆNELER, sandet, stenet, okret, lys brun	Gletcher afl.	G
	0	0	<10					
	0	1	16		2,25-4,0	MORÆNELER, sandet, sv. stenet, sv. kalket, gråbrun, lugt af diesel/benzin	Gletcher afl.	G
3.00	0	3	450					
	0	2	355					
	0	2	198		4,0-4,5	MORÆNELER, sandet, sv. kalket, grå, lugt af diesel/benzin	Gletcher afl.	G
4.00	0	1	68		4,5-5,5	MORÆNELER, sandstriber m. vand, grå, lugt af diesel/benzin	Gletcher afl.	G
	0	1	47					
	0	1	55					
5.00	0	1	47		5,5-6,0	MORÆNELER, sv. kalket, fast, grå, svag lugt af diesel/benzin	Gletcher afl.	G
	0	1	62					
7.00								
SYN	0 = Ingen synlig forurening 1 = Synlige spor			Vandspejlskote: +5.523	SAG: Rantzausgade 57		SAG NR: 1704,01	DATO: 1997-11-03
	2 = Tydelig forurening 3 = Meget kraftigt foruren				BOREENTREPRENØR: Franck Geoteknik A/S		BORING NR.: 3	BILAG NR.: 5
LUGT	0 = Ingen lugt 1 = Svag lugt			Terrænskote: +7.719	BOREMETODE: 6" sneglebor		Erik K. Jørgensen AS Rådgivende ingeniører F.R.I. Kronprinsessegade 20 1306 København K Tlf. 33 11 14 14 Fax. 33 93 13 29	
	2 = Tydelig lugt 3 = Meget kraftig lugt			Toprørskote: +7.603	UDBYGNING: Filterrør Ø63 mm, filtersand, bentonit			
	PID-måler: Microtip Range: 0-200 ppm				EKJ SAGSBEHANDLER: MSK/RIP KONTROL: MSK			



FORSØGSRESULTATER				BOREPROFIL	GEOLOGI				
Dybde	Syn	Lugt	PID	Udbygning	M.u.t.	Jordtype	Aflejringsstype	Alder	
1.00	0	0	<10		0,0-0,1	ASFALT			
					0,1-1,2	FYLD, muldet, leret, sandet, brun		R	
2.00	0	0	<10						
	0	0	<10		1,2-3,1	MORÆNELER, sandet, okret, sv. kalket, lys brun	Gletcher afl.	G	
3.00	0	1	<10						
	0	3	<10		3,1-4,0	MORÆNELER, st. sandet, hård, gråbrun	Gletcher afl.	G	
4.00	0	2	<10						
	0	2	<10		4,0-6,5	MORÆNELER, st. sandet, st. kalket, hård, gråbrun	Gletcher afl.	G	
5.00	0	1	<10						
	0	1	<10						
6.00	0	1	<10						
	0	1	<10						
7.00	0	1	<10						
	0	1	<10	6,5-7,5	MORÆNELER, sandstriber m. vand, fint gruset, blød, grå	Gletcher afl.	G		
SYN	0 = Ingen synlig forurening 2 = Tydelig forurening		1 = Synlige spor 3 = Meget kraftigt forurennet	Vandspejlskote: +3.620	SAG: Rantzausgade 57		SAG NR: 1704,01	DATO: 1997-11-03	
					BOREENTREPRENØR: Franck Geoteknik A/S		BORING NR.: 7	BILAG NR.: 5	
LUGT	0 = Ingen lugt 2 = Tydelig lugt		1 = Svag lugt 3 = Meget kraftig lugt	Terrænskote: +7.600 Toprørskote: +7.450	BOREMETODE: 6" sneglebor		Erik K. Jørgensen AS Rådgivende ingeniører F.R.I. Kronprinsessegade 20 1306 København K Tlf. 33 11 14 14 Fax. 33 93 13 29		
			UDBYGNING: Filtrerrør Ø63 mm, filtersand, bentonit						
	PID-måler: Microtip Range: 0-200 ppm		EKJ SAGSBEHANDLER: MSK/RIP KONTROL: MSK						





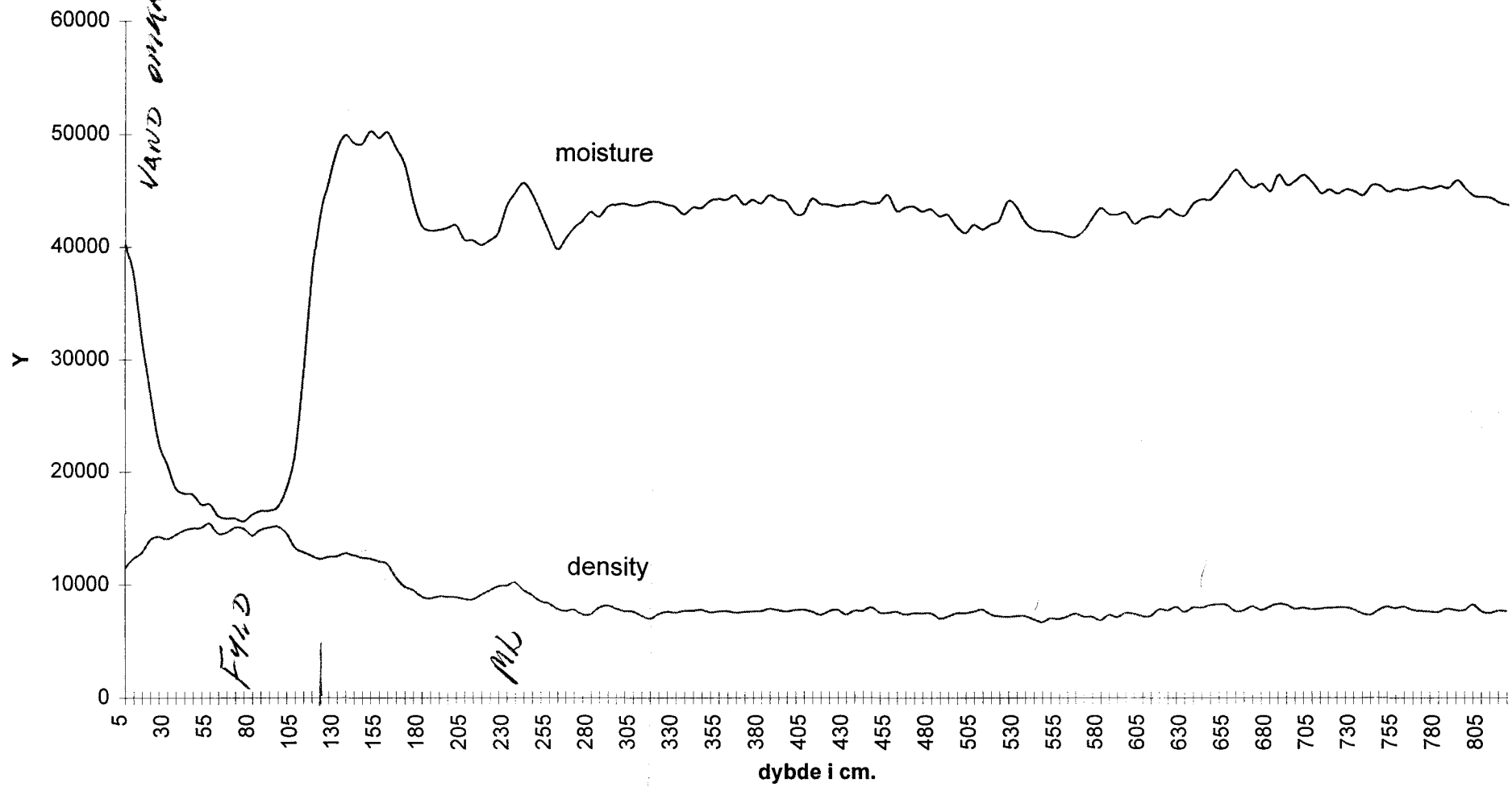
FORSØGSRESULTATER				BOREPROFIL		GEOLOGI			
Dybde	Syn	Lugt	PID	Udbygning		M.u.t.	Jordtype	Aflejringsstype	Alder
8.00	0	0	<10			6,5–7,5	MORÆNELER, sandstriber m. vand, fint gruset, blød, grå	Gletcher afl.	G
	0	0	<10			7,5–8,5	MORÆNELER, st. sandet, st. kalket, fast, grå, fugtig	Gletcher afl.	G
	0	0	<10						
9.00	0	0	<10			8,5–9,0	MORÆNELER, sandet, kalket, blød, grå, fugtig	Gletcher afl.	G
10.00									
11.00									
12.00									
13.00									
14.00									
SYN	0 = Ingen synlig forurening 1 = Synlige spor		Vandspejlskote: +3.620	SAG: Rantzausgade 57			SAG NR: 1704,01		DATO: 1997–11–03
	2 = Tydelig forurening 3 = Meget kraftigt forurenet			BOREENTREPRENØR: Franck Geoteknik A/S			BORING NR.: 7		
LUGT	0 = Ingen lugt 1 = Svag lugt		Terrænskote: +7.600	BOREMETODE: 6" sneglebor			Erik K. Jørgensen AS Rådgivende ingeniører F.R.I. Kronprinsessegade 20 1306 København K Tlf. 33 11 14 14 Fax. 33 93 13 29		
	2 = Tydelig lugt 3 = Meget kraftig lugt		Toprørskote: +7.450	UDBYGNING: Filterrør Ø63 mm, filtersand, bentonit					
	PID-måler: Microtip Range: 0–200 ppm			EKJ SAGSBEHANDLER: MSK/RIP KONTROL: MSK					



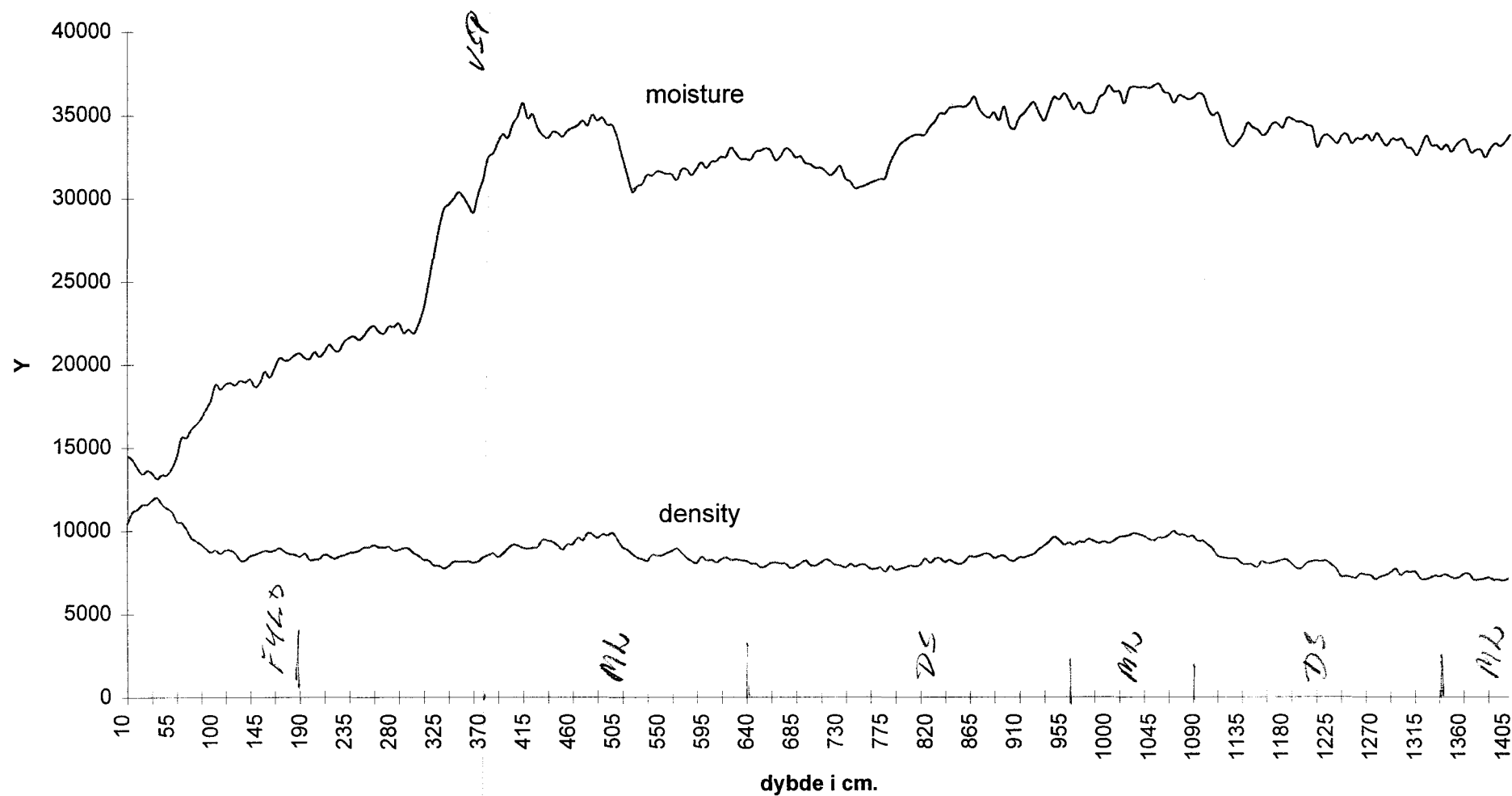


VSP

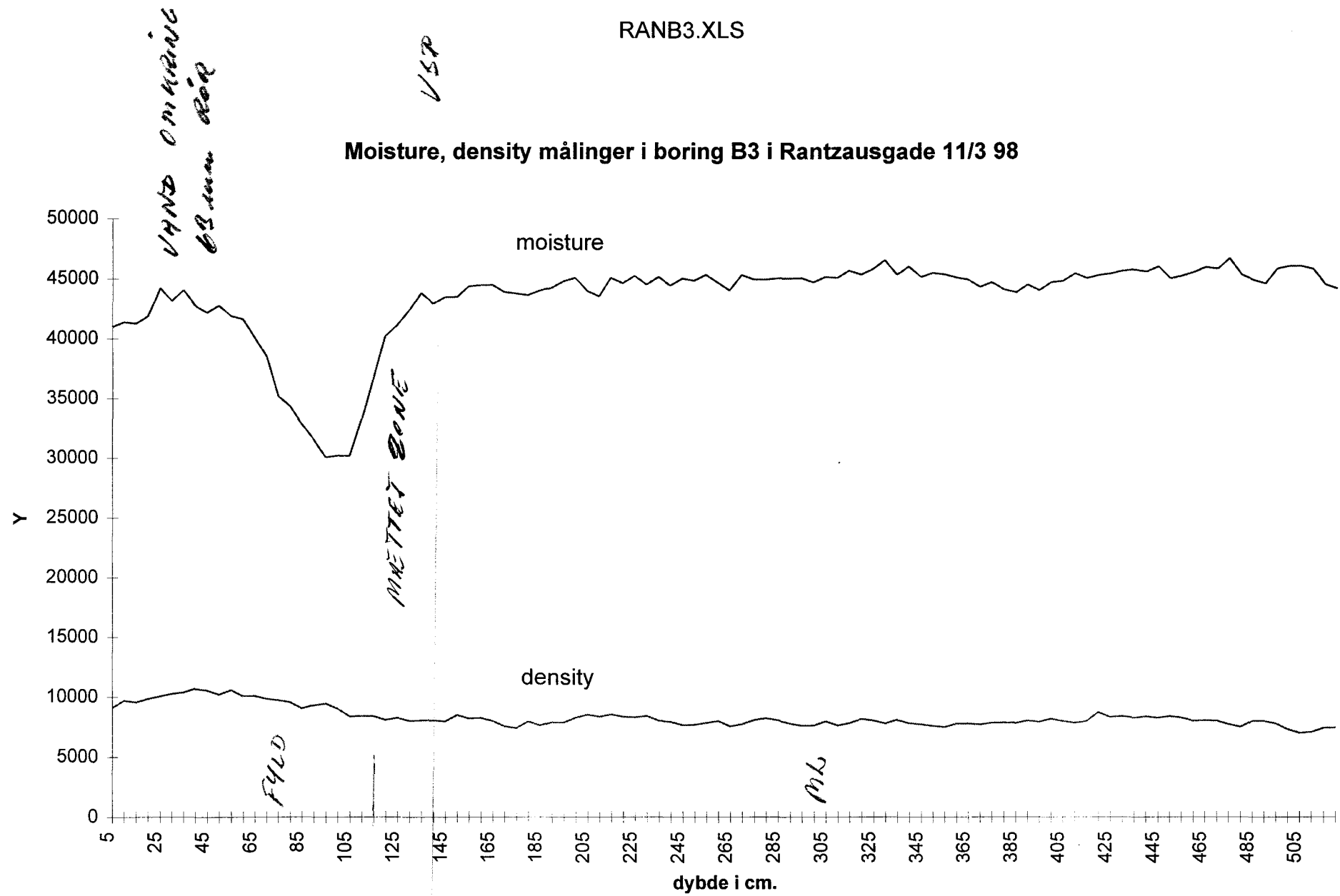
Moisture, density målinger i boring B7 i Rantzausgade 11/3 98



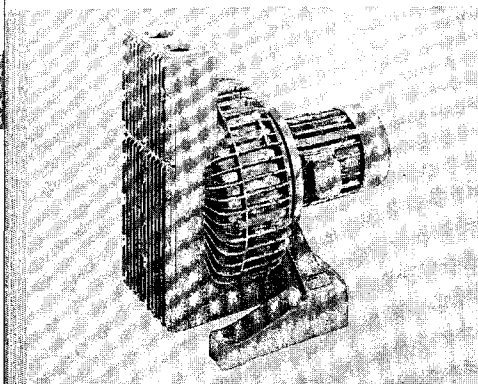
Moisture, density målinger i boring K1 i Rantzausgade 11/3 98



Moisture, density målinger i boring B3 i Rantzausgade 11/3 98



Bilag 2: Datablad for Rielsche-pumpe.



Zweistufige Seitenkanalvakuum-pumpen. Volumenströme bis 420 m³/h. Differenzdrücke bis 500 mbar. Integrierte Schalldämpfung und Ansaug-sieb. 4 verschiedene Anschlußstellungen. Die Motoren entsprechen DIN/VDE 0530 und sind in Schutzart IP 54 und Isolationsklasse F ausgeführt.

Two stage side channel vacuum pumps. Capacities upto 420 m³/hr, pressure differences upto 500 mbar. Integral silencer and suction mesh. Four different connection positions. Motors correspond to DIN/VDE 0530 and have IP 54 protection and insulation class F.

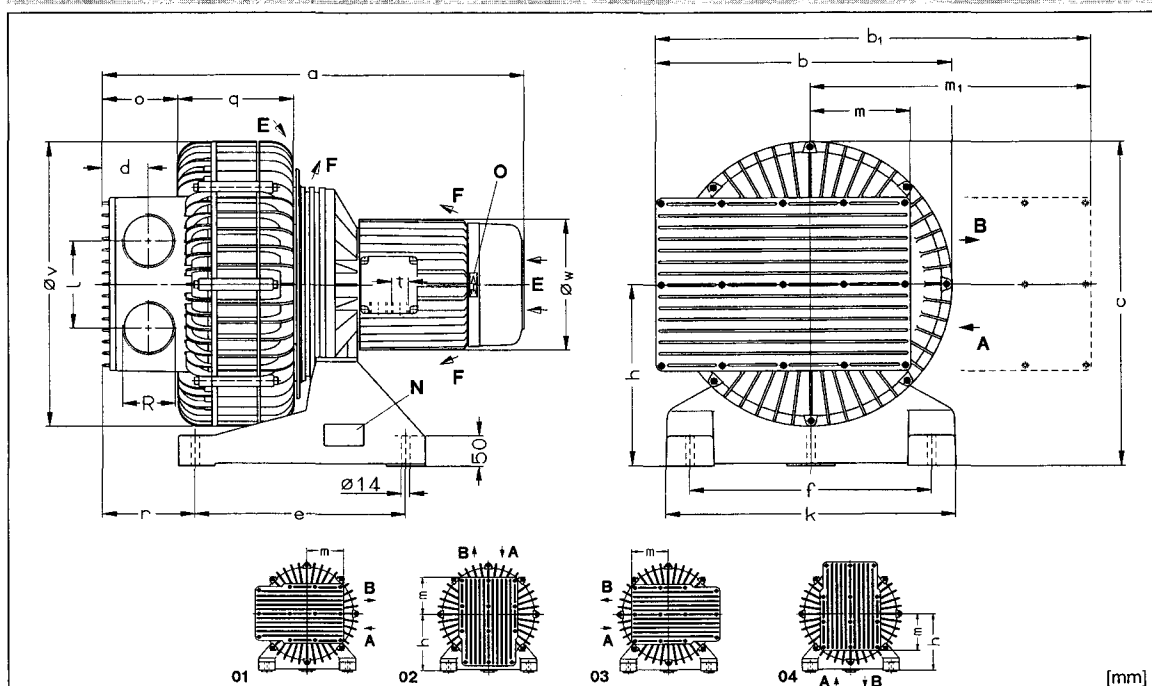
Turbines latérales à double flux, ayant des débits jusqu'à 420 m³/h et des pressions différentielles jusqu'à 500 mbar. Silencieux et filtre d'aspiration sont montés en série. Quatre positions de raccordement sont possibles. Les moteurs répondent aux normes DIN/VDE 0530 et sont en IP 54, classe F.

Pompa per vuoto a canali laterali a due stadi in serie con portate fino a 420 m³/h. Pressioni differenziali fino a 500 mbar. Silenziatori integrati e filtro a rete sull'aspirazione. Quattro posizioni di collegamento a scelta. I motori sono a norme DIN/VDE 0530, classe di protezione IP 54, classe di isolamento F.

SKG 340-2V

SKG 390-2V

SKG 420-2V



01-04	Anschlußstellungen	Connection positions	Positions raccordement	Posizioni di collegamenti
02	Normal-Ausführung	Standard version	Exécution standard	Esecuzione standard
A	Vakuum-Anschluß	Vacuum connection	Raccord du vide	Attacco vuoto
B	Abluft-Anschluß	Exhaust air connection	Raccord air d'échappement	Raccordo aria di scarico
E	Kühlluft-Eintritt	Cooling air entry	Entrée air refroidissement	Entrata aria di raffreddamento
F	Kühlluft-Austritt	Cooling air exit	Sortie air refroidissement	Uscita aria di raffreddamento
N	Datenschild	Data plate	Etiquette caractéristique	Targhetta dati
O	Drehrichtungsschild	Direction of rotation	Flèche sens rotation	Targhetta senso rotazione

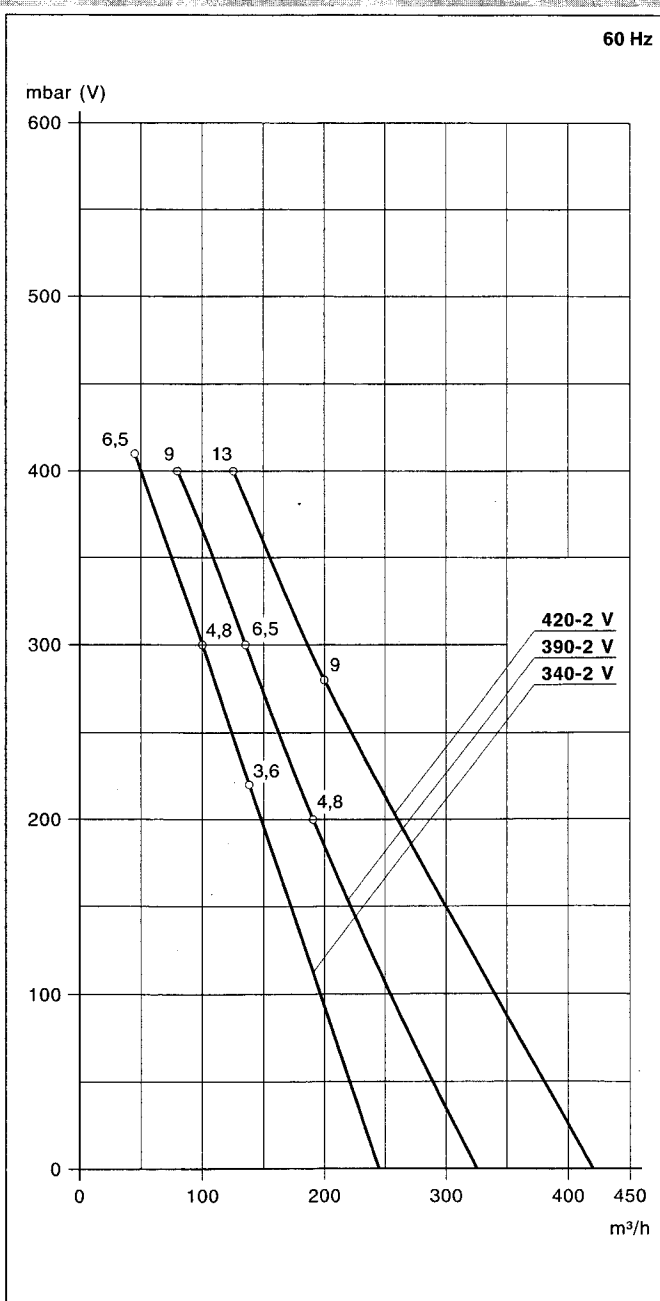
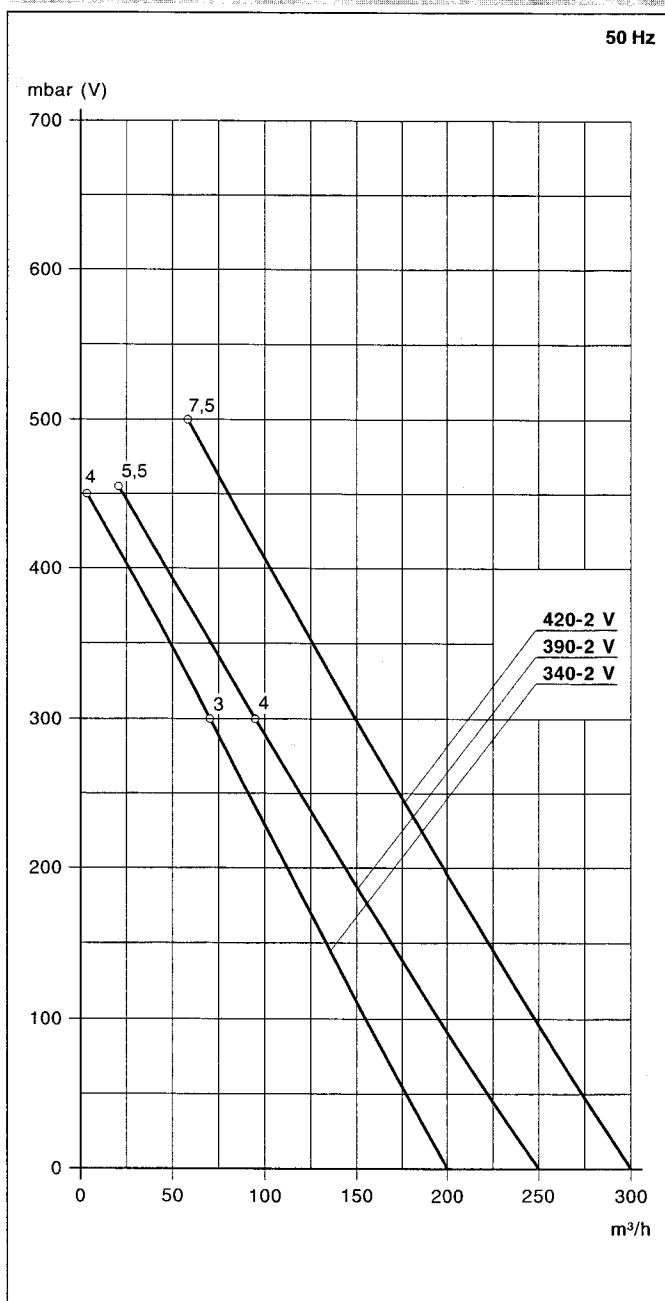
SKG...-2V	340	390	420
[mm]			
a	625	667	748
b / b ₁	425 / -	- / 617	- / 688
c	510	535	550
d / e	67 / 350	67 / 350	83 / 350
f / h	400 / 300	400 / 300	400 / 300
k / l	480 / 120	480 / 120	480 / 134
m / m ₁	151 / -	- / 365	- / 413
o	97	94	115
q	178	194	220
r	106	119	152
t	Pg 21	Pg 21	Pg 21
ø v	420	470	498
ø w	212	212	256
R	G 2	G 2 1/2	G 3

ZRK	50 (03)	65 (03)	80 (03)
ZBS	40	40	40
ZVF	50 (53)	65 (52)	65 (53) / 100 (51)
ZGD	50 (06)	65 (06)	80 (06)
ZFP	216 (01)	216 (51)	216 (52)
ZMS	160/100	160/100	200/100
ZWS	83 (02)	96 (00)	131 (00)

ZRK	Zubehör	Optional extras	Accessoires	Accessori
ZBS	Rückschlagventil	Non-return valve	Clapet anti-retour	Valvola di non ritorno
ZVF	Saug-Begrenzungsventil	Vacuum limitation valve	Limiteur de dépression	Valvola limitatrice di aspirazione
ZGD	Vakuumdichter Ansaugfilter	Vacuum tight suction filter	Filtre d'aspiration étanche	Filtro aspirazione ermetico
ZFP	Zusätzlicher Schalldämpfer	Additional silencer	Silencieux complémentaire	Silenziatore supplementare
ZMS	Staubabscheider	Dust separator	Filtre séparateur	Separatore polveri
ZWS	Motorschutzschalter	Motor starter	Disjoncteur moteur	Interruttore magnetotermico
	Wechselschaltung	Change over valve	Inverseur de débit	Valvola di inversione

SKG...2V		340			390			420		
m³/h	50 Hz	200			250			300		
	60 Hz	245			325			420		
mbar (V)	50 Hz	300	450	-	300	455	-	500	-	-
	60 Hz	220	300	410	200	300	400	280	400	-
3~	50 Hz	230/400 V ± 10%			400/690 V ± 10%					
	60 Hz	220/380V			220/380V			380/660V		
kW	50 Hz	3,0	4,0	-	4,0	5,5	-	7,5	-	-
	60 Hz	3,6	4,8	6,5	4,8	6,5	9,0	9,0	13	-
A	50 Hz	11,1/6,7	18,2/10,5	-	16,5/9,5	11,5/6,6	-	16,5/9,5	-	-
	60 Hz	#	18,2/10,5	12,0/7,0	#	14,5/8,4	19,1/11,0	21,0/12,0	25,4/14,7	-
min⁻¹	50 Hz				2850					
	60 Hz				3450					
dB(A)	50 Hz	70			77			80		
	60 Hz	77			84			88		
kg		70	74	78	105	105	110	120	125	

m³/h	Volumenstrom	Capacity	Volume engendré	Portata volumetrica
mbar	Druckdifferenz	Pressure difference	Pression différentielle	Differenza di pressione
V	Vakuumbetrieb	Vacuum operation	Fonction dépression	Esercizio in aspirazione
3~	Motorausführung	Motor version	Exécution moteur	Esecuzione motore
kW	Motorleistung	Motor rating	Puissance moteur	Potenza motore
A	Stromaufnahme	Current drawn	Intensité absorbée	Corrente nominale
min⁻¹	Drehzahl	Speed	Vitesse rotation	Numero giri
dB(A)	Mittlerer Schalldruckpegel (Ausblasung über Schlauchleitung)	Average noise level (Discharge connected to a pipeline)	Niveau sonore moyen (Refoulement au travers d'un tuyau)	Rumorosità media (Scarico tramite tubazione flessibile)
kg	Max. Gewicht	Maximum weight	Poids maxi.	Peso massimo



Die Kennlinien haben eine Toleranz von ± 10% und beziehen sich auf freie atmosphärische Luft von 1 bar (abs.) und 20°C./ The curves have a tolerance of ± 10% and refer to free atmospheric air at 1 bar (abs.) and 20°C./ Les courbes ont une tolérance de ± 10% et sont établies à l'atmosphère de 1 bar (abs.) à 20°C./ Le curve hanno una tolleranza del ± 10% e si riferiscono alla pressione atmosferica di 1 bar (ass.) e 20°C.

Technische Änderungen vorbehalten!// We reserve the right to alter technical information!// Sous réserve de modification technique!// Salvo modifiche tecniche!

auf Anfrage

on request

sur demande

a richiesta

Bilag 3, Eksperimenter

Efter opsætningen af driftsenhed samt monitoringsdel blev ventilerings- og monitorings-systemerne afprøvede. Der blev udført følgende afprøvninger:

- af transducere i monitoringsrør – slug tests i 2 og 3 meter monitoringsrør.
- af 1 meter monitoringsrørenes ventilerbarhed
- af pakkerernes effektivitet i den øvre vandrette boring.
- af afpropningernes effektivitet i den nedre vandrette boring.

Afprøvning af transducere i monitoringsrør.

Der blev udført slugtest i monitoringsrørene for dybderne 2 og 3 m.u.t. for at bestemme den lokale hydrauliske ledningsevne og sikre at tryktransducerne (installeret ~10 cm over den udslåede konus) virkede efter hensigten.



Figur 101. Slugtestene blev udført ved spontant at tilføre 1l vand til jernrørene via en tragt.

Ved slugtesten blev det udnyttet, at der ved bunden af hvert af monitoringsrørene var installeret en tryktransducer. Monitoringsrørene blev desuden pejlede for at afklare om transducerne i rørene fungerede korrekt i udgangspunktet. Der blev benyttet en slug på 1

ducerne i rørene fungerede korrekt i udgangspunktet. Der blev benyttet en slug på 1 liter vand (~11 cm vandsøjle i rørene) som umiddelbart efter hinanden blev hældt i alle 2 og 3 m monitoringsrør, Figur 101. Ændringen i vandstanden og dermed vandtrykket blev registreret ved hjælp af monitoringsystemet. Af resultaterne fremgår Figurerne 102 og 103 som viser at alle transducere på nær 2-2 og 2-3 reagerer efter hensigten, idet de viser en vandstandsændring i monitoringsrørene ved tilførslen af sluggen på ca. 110 cm. Vandstanden forud for slugtesten varierer en del indenfor de to monitorerede dybdeniveauer (2 og 3 m u.t.).

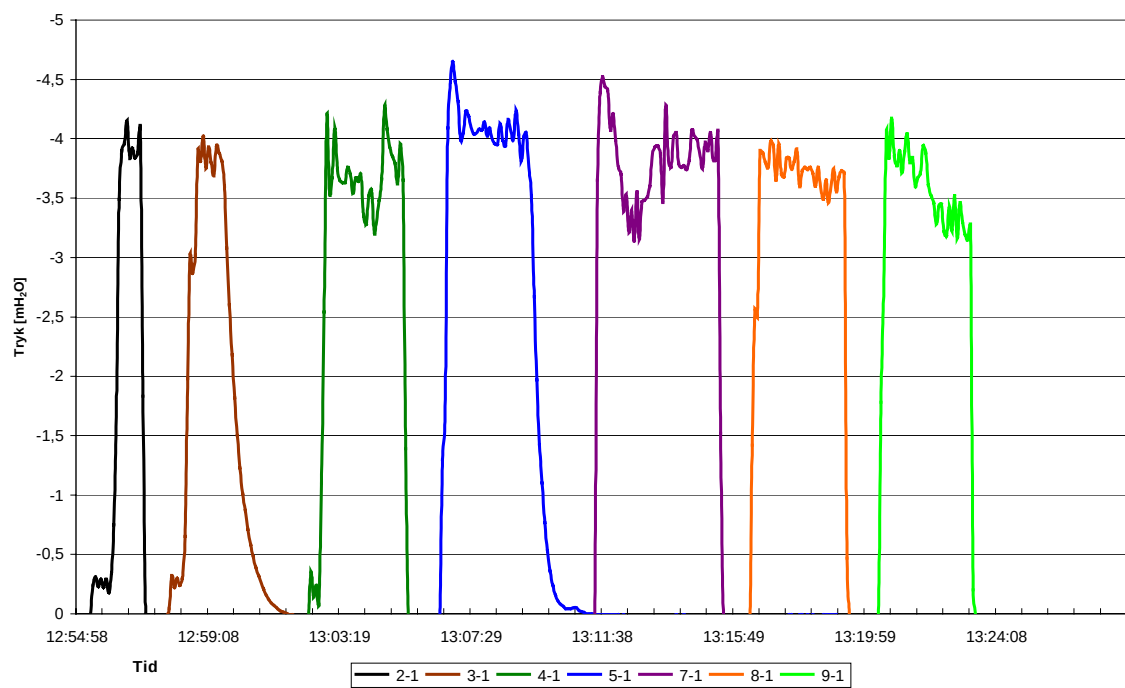
Reetableringstiden for monitoringsrørene 3 m u.t. er meget lang undtagen i 4-3 og 7-3. Retableringen af trykniveauet i monitoringsboringerne til 2 m er generelt noget hurtigere end i 3 m u.t.. De højeste beregnede hydrauliske ledningsevner (Hvorslev's metode) i de to niveauer er:

Boring	Hydraulisk ledningsevne
3-2	$1,56 \cdot 10^{-6}$ m/s
4-3	$1,66 \cdot 10^{-6}$ m/s

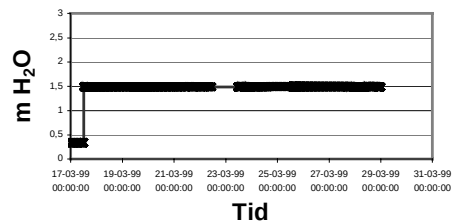
Afprøvning af lækage fra 1 meter monitoringsrørene

Lækagen af luft mellem monitoringsniveauet for 1 meter monitoringsfiltrene og terrænoverfladen blev afprøvet. Dette blev gjort ved en samtidig vakuumtest på alle ni 1 m monitoringsrør, idet topstykket var blevet afprøvet for tæthed før montering så lækage i installationerne kunne udelukkes:

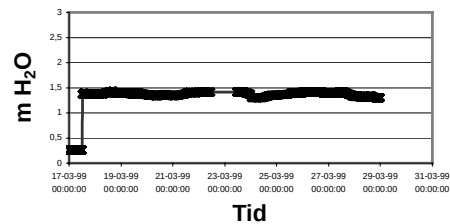
Inden vakuumtesten blev 1m monitoringsrørene pejlet for at se, om der stod vand i dem. Det viste sig at der stod vand i 1-1 og 6-1 (hhv. 9 og 2,5 cm vand). På grund af vandet i de to monitoringsrør blev de udeladt af forsøget, idet målingerne bliver unøjagtige, hvis der er både en komprimerbar og en ikke komprimerbar fase i monitoringsrøret. Der blev sat 0,4 bar vakuum på alle de øvrige filtre. Testresultaterne herfra fremgår af Figur 104. Pånær filtrene 3-1 og 5-1 er reetableringen momentan. Da der ikke skulle kunne forekomme utætheder i selve installationerne må der være betydelig lækage til overfladen fra de fleste filtre



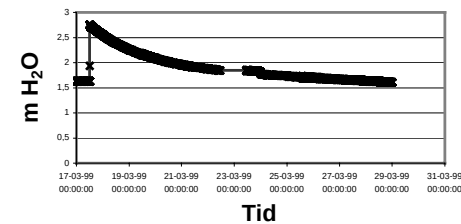
Figur 104. Vakuumtest ved 0,4 bar i 1 meter monitoringsrørene. Reetableringen er momentan undtagen for 3-1 og 5-1.



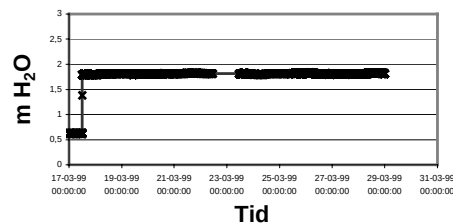
9



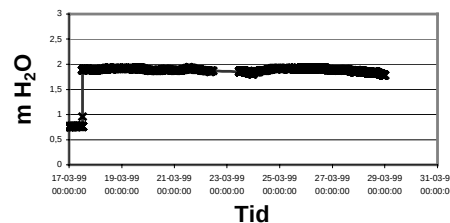
8



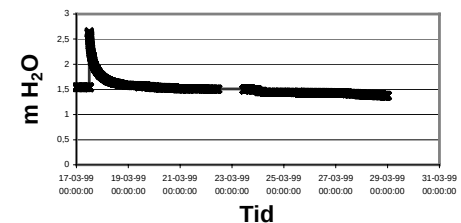
7



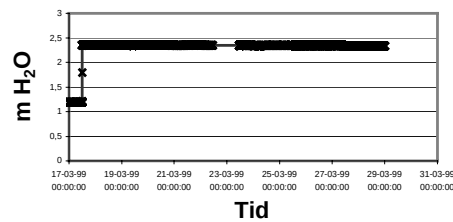
6



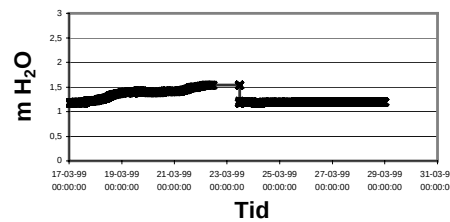
5



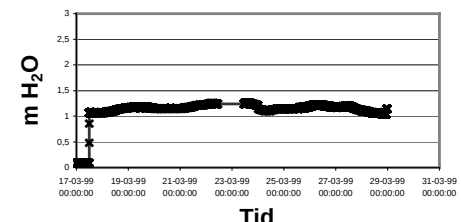
4



3

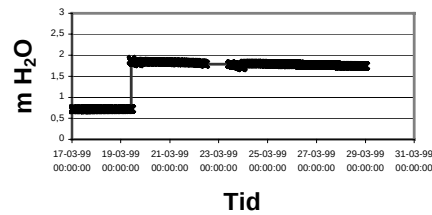


2

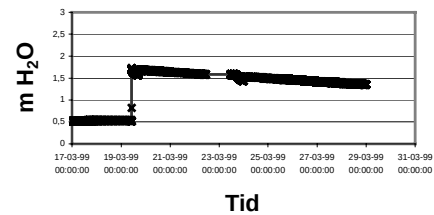


1

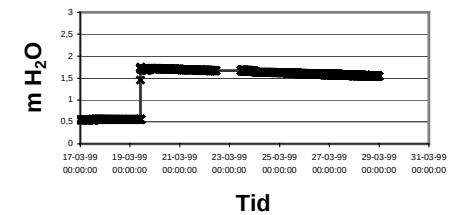
Figur 102. Meter vandsøjle i monitoringsrør (filtersat i 3 m u.t.) i ca. 14 dage efter injektion af 1 liter vand svarende til 1,1 m vandsøjle. Tallet 1- 9 markerer nummeret på den rede, hvor monitoringsrøret er placeret. Den udgravede tankgrav findes i denne planoversigt til højre for monitoringsrørene. Den manglende afsenkning (f.eks. i filterne 3, 6 og 9) kan skyldes dårlig strømningsadgang til jorden på grund af "sme-ar".



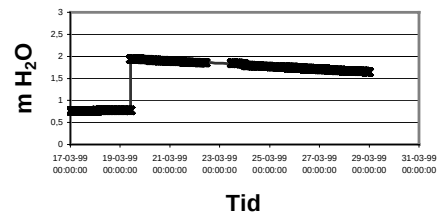
9



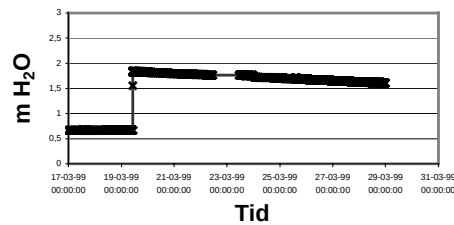
8



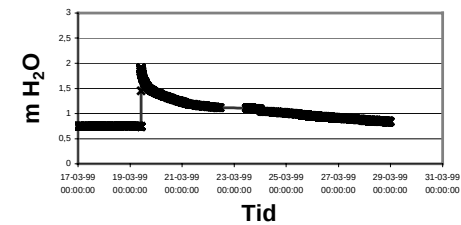
7



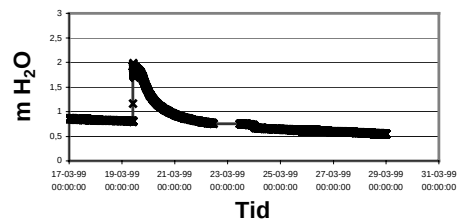
6



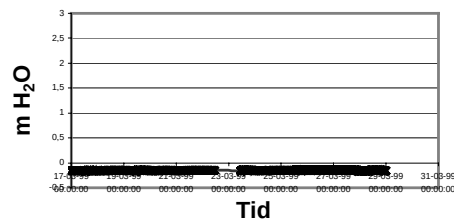
5



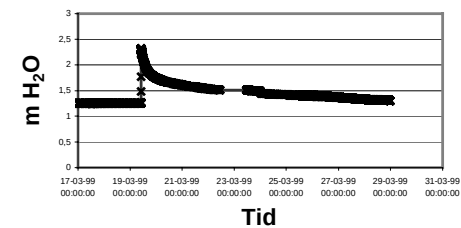
4



3



2

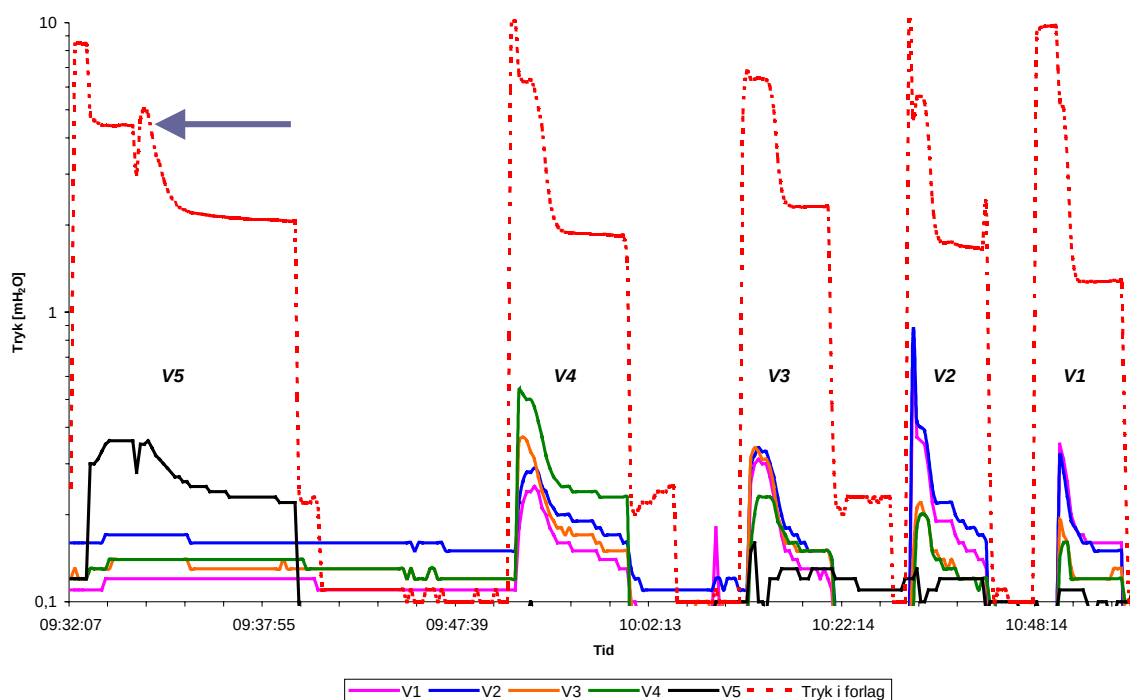


1

Figur 103. Meter vandsøjle i monitoringsrør (filtersat 2 m u.t.) i løbet af ca. 14 dage efter injektion af 1 liter vand svarende til 1,1 m vandsøjle. Tallene 1- 9 markerer nummeret på den rede, hvor monitoringsrøret er placeret. Den udgravede tankgrav findes i denne planoversigt til højre for monitoringsrørene.

Afprøvning af pakkere i den øvre vandrette boring

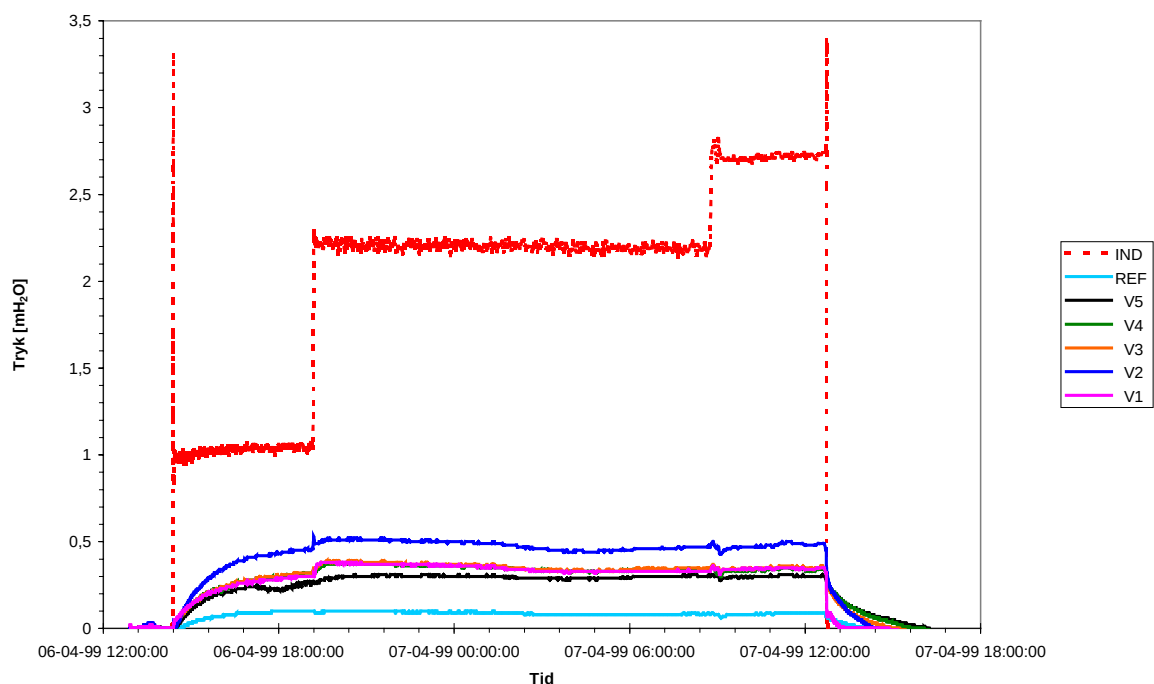
For at afklare om de asymmetrisk pakkere, som var installeret mellem filtersektionerne i den øvre boring, reelt udgør strømningsmæssige barrierer og dermed underopdeler den samlede filterstrækning blev det i januar 1999 forsøgt at vakuumventilere i hver sektion for sig, mens trykvariationen blev målt i de andre sektioner, - men uden held: der stod, i modsætning til forholdene på boretidspunktet i august så meget vand i filtrerne at der overvejende blev produceret vand under testen. I stedet blev den strømningsmæssige adskillelse undersøgt ved en for en at trykteste filtersektionerne ved at påtrykke dem et lufttryk på 6-8 mH₂O svarende til en luftstrømning på 7-11,5 m³/t med samtidig monitorering af trykket i alle filtersektioner. For filtersektionerne i enderne af filterstrengen testes selvklart også endepakkerne. Resultatet fremgår af Figur 105, som for hver testet filtersektion viser trykket målt i alle filtersektionerne samt trykket i injektionsrørene til sektionerne. Det viser sig at det kun er mellem ventilationssektionerne 4 og 5 (betegnet V4 og V5, hvor V5 er længst fra tankgraven) at der er en strømningsbarriere.



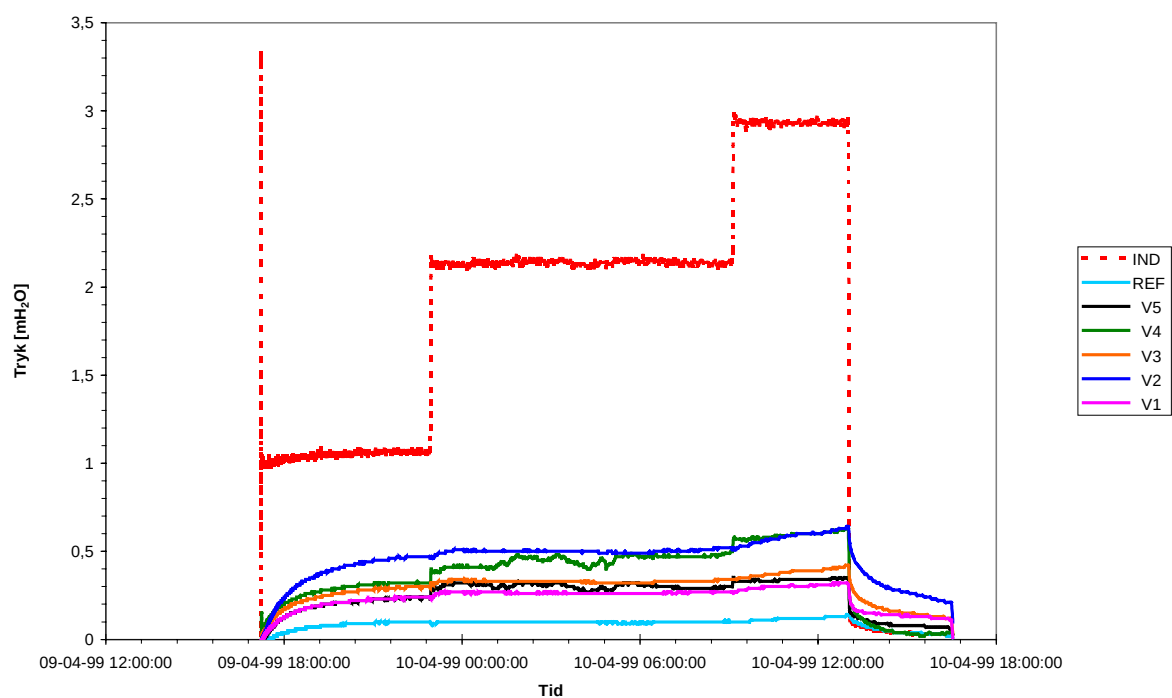
Figur 105. Tryktest i de 5 filtersektioner i den øverste vandrette boring. Grafen viser samplottede kurver for både variationerne i indgangstrykket (forlaget), trykvariationen i de enkelte filtersektioner. Testgrafen betegnet V5 viser som eksempel indgangstrykket i forlaget til filtersektion V5 samt det resulterende tryk i de 5 filtersektioner i den øvre vandrette boring. Grafen viser at der i alle tilfælde, bort set fra V5 (pil), er trykrespons i nabofiltersektionerne under tryktest. V5 holder indledningsvis trykket, men lækker efter få minutter, dog uden respons i de øvrige filtersektioner. Filtersektion V1 er nærmest tankgraven. Y-aksen er logaritmisk.

En af årsagerne til pakkernes øjensynlige dårlige funktion under den første testsession kunne være at den påtrykte strømningsrate (og dermed trykket) var for stor. For at undersøge hvor stor indflydelse strømningsraten har på pakkernes evne til strømningsmæssig adskillelse af filtersektionerne blev der gennemført længerevarende 3-trins trykforsøg i hver sektion. Rationalet var at der, i det mindste ved lave strømningsrater, burde opstå tydelige trykforskelle mellem de enkelte filtersektioner, såfremt pakkerne udgør barrierer (hvis de slutter tæt til borehullets væg). Resultaterne af disse forsøg er vist i Figurerne 106 - 110.

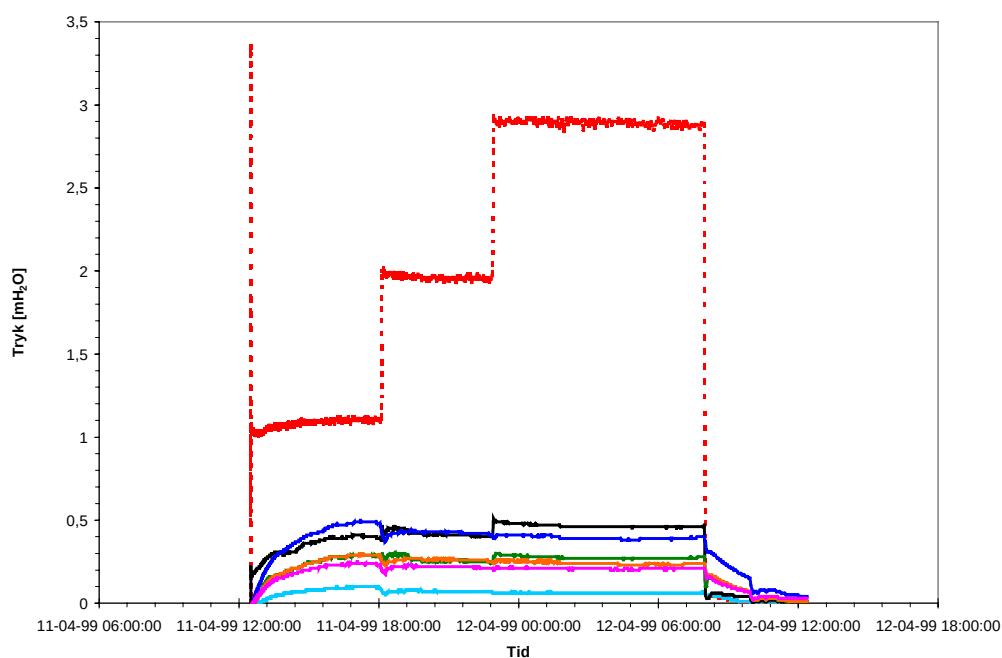
Ved længere varende drift af pumpen/kompressoren steg temperaturen i containeren, hvilket påvirkede de transducere som findes i containeren. Målinger med tryktransducere i containeren (i det følgende identificerede som "REF"-værdier) muliggør korrektion for denne opvarmningseffekt og eventuelle fejlkilde.



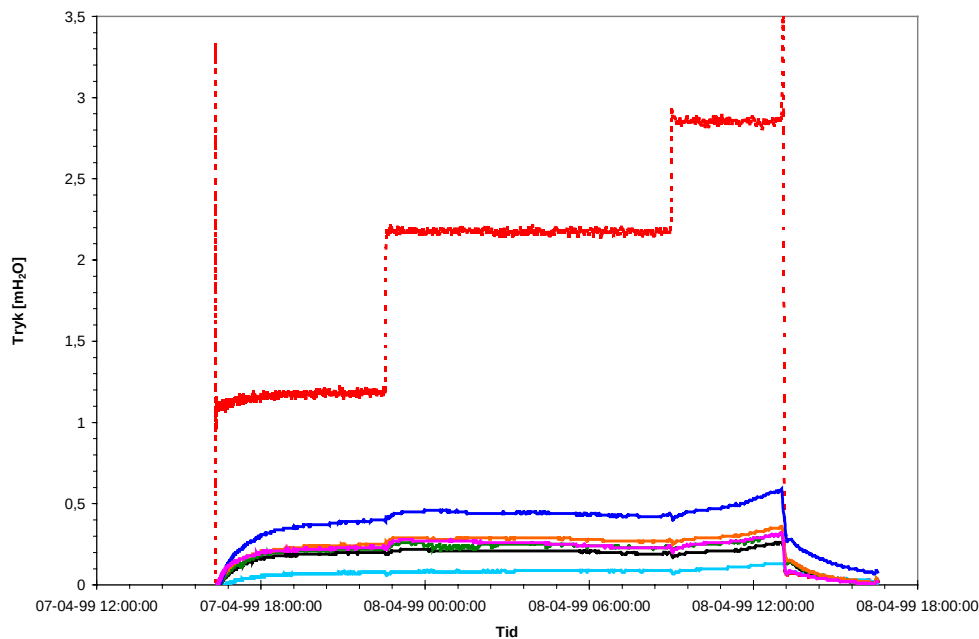
Figur 106. 3-trins trykforsøg i V1. Strømnings-trin: 1. ved 2,7 m³/t; Trin 2 ved 7,0 m³/t; Trin 3 ved 7,1 m³/t. Kurverne viser trykvariationerne i alle filtersektioner og indgangstrykket under injektionen i V1. Yderligere forklaring i teksten.



Figur 107. 3-trins trykforsøg i V4. Strømnings-trin: 1. ved 2,9 m³/t; Trin 2 ved 4,7m³/t; Trin 3 ved 5,8m³/t. Kurverne viser trykvartiationerne i alle filtersektioner og indgangs-trykket under injektionen i V4. Yderligere forklaring i teksten.



Figur 108. 3-trins trykforsøg i V5. Strømnings-trin: 1. ved 2,9 m³/t; Trin 2 ved 4,7m³/t; Trin 3 ved 5,9m³/t. Kurverne viser trykvartiationerne i alle filtersektioner og indgangs-trykket under injektionen i V5. Yderligere forklaring i teksten.

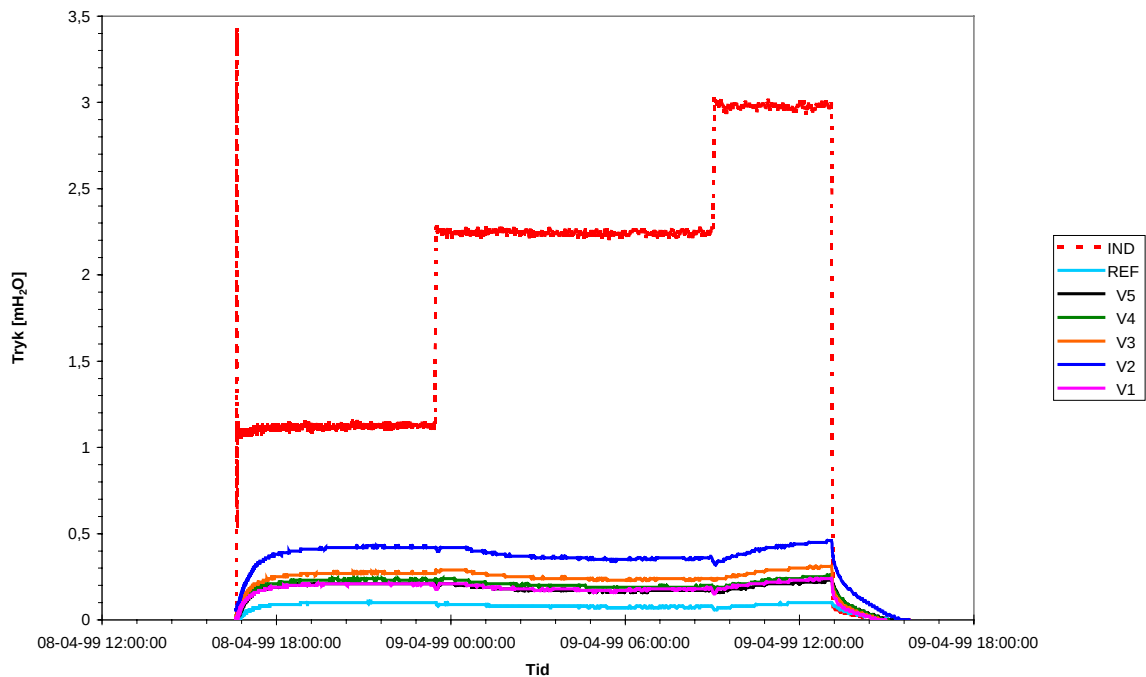


Figur 109. 3-trins trykforsøg i V2. Strømnings trin: 1. ved 3,2 m³/t; Trin 2 ved 5,1m³/t; Trin 3 ved 6,3m³/t. Kurverne viser trykvariationerne i alle filtersektioner og indgangs-trykket under injektionen i V2.

Når strømningsraten øges fra 2,7 til 7,0 m³/t i V1 øges trykket også i de øvrige filtersektioner på nær V5, Figur 106. Ved yderligere at øge strømningsraten fra 7,0 til 7,1 m³/t i V1 forbliver trykket det samme i alle filtersektioner. I de fleste filtersektionerne sker der kun en svag ændring af trykket imellem de enkelte strømningstrin, mens det nærmest er konstant i V5 efter den indledende stigning (og lavere end i de øvrige filtre). Alle trykvariationer er dog beskedne. Desuden fremgår det, at trykket i V3 og V4 er det samme som i injektionsfiltret V1, mens trykket i V2 er højere end i injektionsfiltret. Disse forskellige observationer kan skyldes:

- at pakkerne imellem sektion V4 til V1 ikke hindrer langsgående strømning i borehullet
- at der er lækage gennem makroporer i jorden
- at pakkerne ikke slutter tæt til boringsvæggen
- at V2 transduceren ikke viser korrekt
- at strømning forbi endepakkeren ud i udgravningen hindrer en trykopbygning
- at strømningsraten ikke i sig selv er afgørende for pakkernes effektivitet.

3-trins tryktestene i de øvrige filtersektioner underbygger, med små nuancer, resultaterne af testen i V1. Tryktesten i V4 udmærker sig ved et fluktuerende trykforløb i det mellemste trykstadie, både i injektionsfiltret og nabofiltret V3, som evt. kan afspejle periodisk undslipende lommer af injektionsluft i det opstuede vand i filtersektionerne.



Figur 110. 3-trins trykforsøg i V3. Strømnings trin: 1. ved 2,8 m³/t; Trin 2 ved 4,4m³/t; Trin 3 ved 5,0m³/t. Kurverne viser trykvariationerne i alle filtersektioner og indgangs-trykket under injektionen i V3.

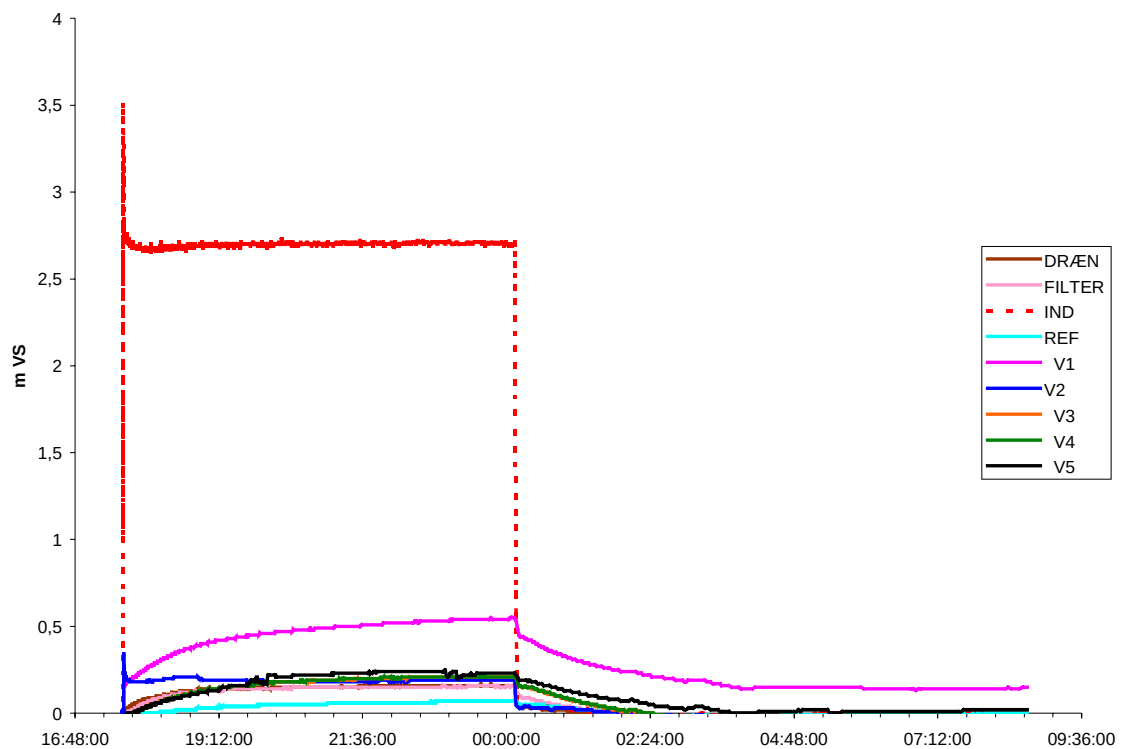
Trykopbygningen i filtersektion V5 (Figur 108) illustrerer at dette er den bedst isolerede sektion. Her afspejles tryktrinene, om end svagt, og der er en aftagende effekt af tryktrinene med afstanden til nabofiltrene. Den alt i alt beskedne trykopbygning også i V5 kan ud over lækage forbi pakkerne til de øvrige filtersektioner, skyldes lækage forbi endepakkeren.

Det hurtige trykresponse og udligningen imellem sektionerne V1, V2, V3 og V4 under de fem 3-trins trykforsøg sandsynliggør at der er lækage mellem dem grundet ikke forseglende pakker og muligvis yderligere med en strømningskomponent gennem jorden. Det altid relativt høje tryk i V2 tyder på en fejl ved tryktransduceren.

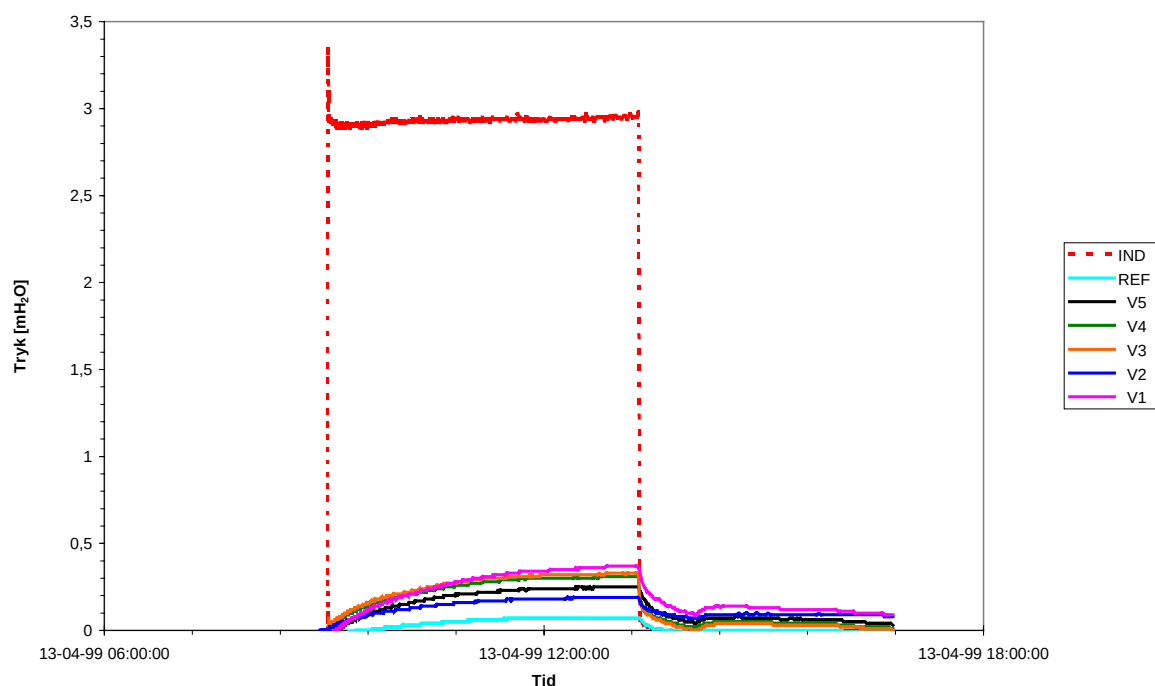
For om muligt at forbedre pakkernes effektivitet blev pakkernes volumen øget med 5 l, for at afprøve om dette ville reducere lækagen. Ved samme lejlighed blev tryktransduceren i V2 udskiftet. Denne test blev gennemført med injektion først i V1 og siden i V3. Af resultaterne (Figur 111 og 112) af denne test kan det tolkes:

- at V2-transduceren ikke fungerede efter hensigten under 3-trins tryktestene.
- at pakkeren imellem sektion V1 og V2 nu slutter tættere til boringsvæggen, idet trykresponset i V2, V3, V4 og V5 er betydeligt mindre end i injektionsfiltret V1. Dette tyder også på at der er lækage fra V1 til tankgraven, hvilket yderligere underbygges af tryktesten i V3, hvor trykket udvikler sig analogt i alle sektioner. Det er muligt at også den nye transducer i V2 er fejlbehæftet; under alle omstændigheder er det egendommeligt at trykket i V2 straks stiger under testen af V1 for siden at være konstant mens trykket i V1 stadig øges.

Det ser ud til, at ingen af pakkerne på noget tidspunkt har fungeret optimalt. Da den høje vandstand hindrede vakuumventilation af filtersektionerne blev der arrangeret en afsluttende tryktest, hvor pakkerne gradvist blev ekspanderet ved tilførsel af yderligere vand, og afslutningsvis kvælstof, indtil sprængning samtidig med at der blev injiceret i V3. Såfremt der var nogle pakkere som ville slutte tæt til boringsvæggen ved et bestemt volumen, skulle det blive opdaget ved denne test. Resultaterne heraf fremgår af Figur 113.

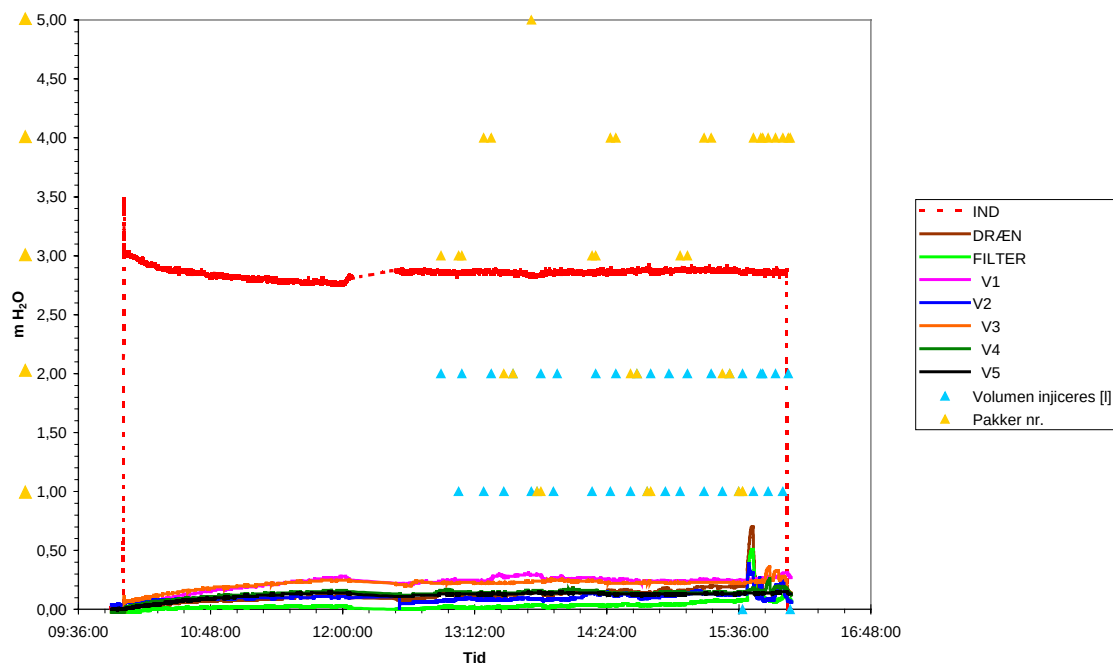


Figur 111. Tryktest i V1 efter påfyldning af 5l i samtlige pakkere. Strømnings-rate ~6.9 m³/t. Transducer nr. 2 viser næsten konstante værdier idet den ikke fungerer korrekt.



Figur 112. Tryktest i V3 efter påfyldning af 5l i samtlige pakkere. Strømnings-rate ~7.1 m³/t.

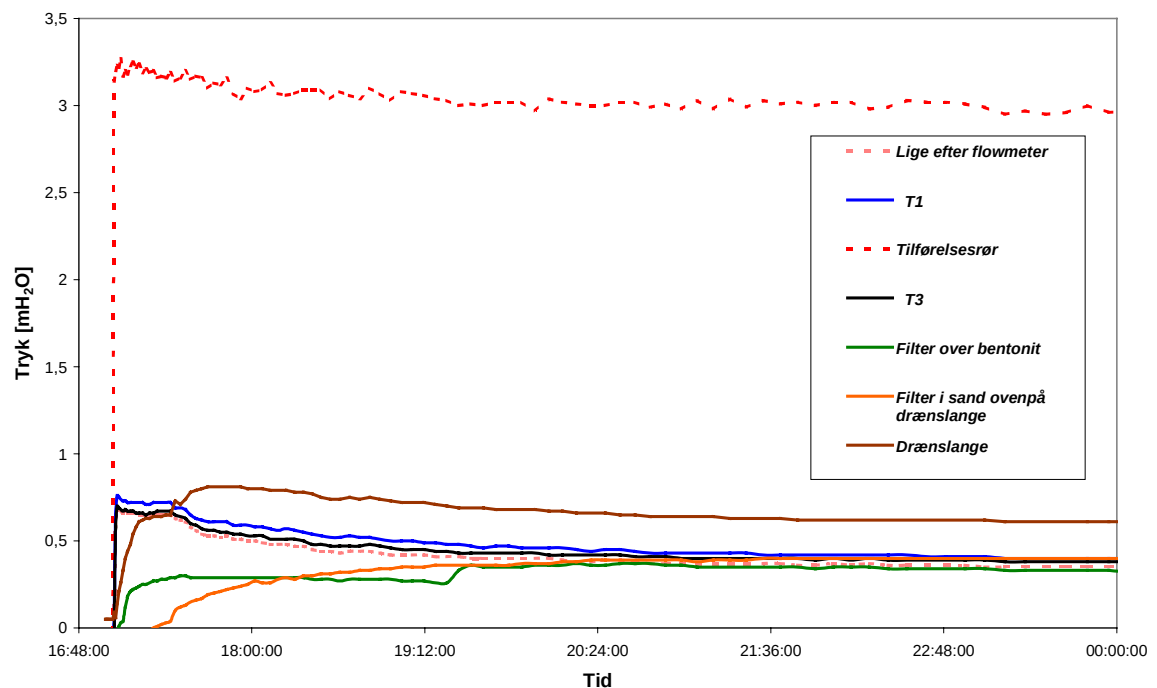
Der sker i ingen tilfælde en tydelig ændring i trykket under den yderligere tilførsel af vand til pakkerne. Under den afsluttende tilførsel af kvælstof til pakkerne sådan at de sprænges, sker der en markant øgning i trykket i de nærliggende sektioner, hvorefter trykket straks falder tilbage til niveauet fra før kvælstof injektionen. Dette indikerer kraftigt, at pakkerne aldrig har fungeret efter hensigten.



Figur 113. Tilførelse af vand og (fra kl 15.14) kvælstof til pakkerne under konstant injektion af luft i V3. Strømnings-rate ~ 5.3 Nm³/t. De gule trekanter angiver pakker-nummer samt hvornår der er fyldt vand /kvælstof i den angivne pakke (pakkernummer er anført på skalaen til venstre). De blå trekanter angiver hvornår der er fyldt 1 hhv. 2 l vand/kvælstof i den til samme tidspunkt med gul trekant angivne pakke. De afsluttende trykpulser i alle filtersektioner undtagen V5 viser tidspunktet for sprængningen af pakkerne på grund af det høje påtrykte kvælstoftryk. Af det jævne kurveforløb frem mod sprængningstidspunktet ses at øgningen af pakkernes volumen ikke forbedrede afpakningen mellem de enkelte filtersektioner.

Afprøvning af afpropning i den nedre vandrette boring

For at afprøve afpropningen af den nedre boring ud mod udgravningen blev der inden opfyldning af udgravningen placeret trykmoniteringsslang i afpropningen, i drænslangen samt i sandet over drænslangen (se Figurerne 25, 26 og 114).



Figur 114. Afprøvning af den nedre borings afpropning ud mod udgravningen.

Efter at EKJ havde fyldt udgravningen op, blev der sat et tryk svarende til 3,25 mH₂O på slangen til den nedre boring (Tryk målt lige efter flowmeteret i containeren). Det var kun muligt at opnå et tryk på 0,7 mH₂O midt i den nedre borings filtersektion. Samtidig blev der iagttaget trykstigning i de tre monitoringspunkter i udgravningen. Dette tydede på lækage fra den nedre boring ud i udgravningen, Figur 114. Grundet denne lækage var det ikke muligt at foretage airsparging i boringen.