

Undersøgelser af hydrokemiske og hydrauliske forhold omkring miljøkontrolboring K2, Stenlille naturgaslager

Troels Laier og Lasse Gudmundsson



Undersøgelser af hydrokemiske og hydrauliske forhold omkring miljøkontrolboring K2, Stenlille naturgaslager

Troels Laier og Lasse Gudmundsson

Resumé

I forbindelse med etablering af en af de godt 1600 m dybe borerer ned til naturgaslageret ved Stenlille, Vestsjællands Amt, konstaterede Dansk Naturgas A/S, der driver lageret, at der var sket et spild af stensalt på pladsen. Uheldet, der skete i 1992, gav anledning til klage fra lodsejeren på nabogrunden, og Dansk Naturgas A/S besluttede derfor at etablere en boring, K2, til overvågning af kloridindholdet i det øverste grundvand. Siden oktober 1993 er kloridindholdet analyseret regelmæssigt, ca. 4 gange om året, i 4 niveauer i K2 boringen, og i tre andre kontrolboringer, der tidligere var etableret nær andre dybe gaslagerboringer.

I grundvandsmagasinet, hvorfra det lokale vandværk henter sit drikkevand, er kloridindholdet ca. 30 mg/l, og analyserne fra kontrolboringerne viste kun forhøjede klorid i forhold hertil i de to øverste niveauer af K2. I det øverste niveau, 4,5-5,5 m u. terræn, steg klorid fra 200 til 1800 mg/l i perioden 1996-97, hvorefter koncentration faldt for så igen at stige fra 100 til 900 mg/l i perioden 2001-02. I det næste niveau, 9,5-10,5 m u. terræn, steg klorid jævnt fra 70 til 180 mg/l i perioden 1998-2001, og de seneste 2 år er det forblevet nær de 180 mg/l. Da forhøjede kloridindhold viste sig i 2 omgange med nogle års mellemrum er det muligt, at kloridforureningen ikke kun stammer fra det observerede spild, men muligvis også fra andre episoder i løbet de mange års (1990-96) borearbejde på pladsen. Udsivning fra det støbte bassin, hvor det udborede materiale blev deponeret midlertidigt er en tredje mulighed. Med de foreliggende oplysninger kan det ikke med sikkerhed afgøres, om de forhøjede kloridindhold i det øverste grundvand eksplisit stammer fra det konstaterede uheld i 1992.

Grundvandsmagasinet, der udgøres af et ca. 10 m lag af smeltevandssand, er dækket af ca. 20 m moræneler i det pågældende område. Den hydrauliske ledningsevne i moræneleret blev bestemt ved slugtests i de tre øverste niveauer af K2 boringen, med følgende resultat: $K=1,2 \times 10^{-6}$; $5,0 \times 10^{-9}$ og $1,7 \times 10^{-8}$ m/s for henholdsvis 5, 10 og 15 m under terræn. Alderen af grundvandet i det øverste niveau af K2 blev beregnet til ca. 30 år vha. CFC-metoden, hvilket synes at stemme dårligt med den kendsgerning, at de forhøjede kloridindhold viste sig kun 5 år efter uheldet var sket. Forklaringen på disse tilsyneladende modstridende informationer, kan være udveksling mellem det næsten stagnante matrix-vand og det mere mobile vand i sprækkerne. Sidstnævnte repræsenterer det hurtige gennembrud mht. klorid-pulsene, mens CFC afspejler en blanding, der skyldes udveksling mellem de to vandtyper. Udvekslingen af stof mellem matrix og sprækker kan betyde, at let forhøjede kloridindhold må forventes endnu et stykke tid fremover i det øverste grundvand. De hidtidige målinger synes også at pege i den retning.

I grundvandsmagasinet under moræneleret vil der næppe heller i fremtiden kunne spores forhøjede kloridindhold pga. fortyndingen, dels med matrix-vand, dels med vand fra oplandet uden for borepladsen. Derfor skønnes det ikke længere nødvendigt med fortsat overvågning af kloridindholdet i kontrolboringerne.

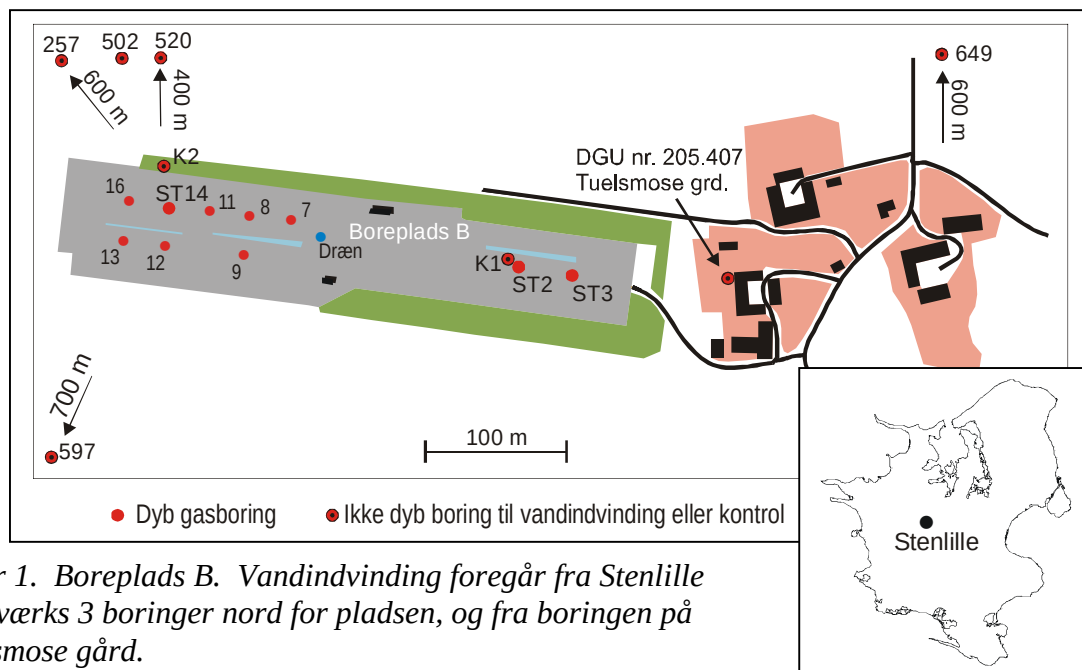
Indholdsfortegnelse

RESUMÉ	1
BAGGRUND OG FORMÅL	3
OVERVÅGNING AF KLORID I GRUNDVANDET.....	6
BAGGRUNDSINFORMATIONER	7
GEOLOGI	7
OVERVÅGNINGSBORINGER.....	8
PEJLERØR I MORÆNELER	9
UNDERSØGLSER AF HYDRAULISKE FORHOLD.....	10
SLUG TESTS.....	10
KONTINUERTE PEJLINGER MELLEMLUGTESTS.....	12
HYDROKEMI OG ALDER AF GRUNDVAND	14
RENPUMPNING AF PEJLERØR	14
CFC DATERING AF GRUNDVAND	14
HYDROKEMI.....	15
MULIG UDBREDELSE AF KLORIDFORURENING	17
KONKLUSION OG ANBEFALINGER.....	19
REFERENCER	20
APPENDIKS 1 - SLUGTEST ANALYSER VED HVORSLEVS METODE	21
APPENDIKS 2 – BORETEKNISKE OPLYSNINGER OM OVERVÅGNINGSBORINGER	28

Baggrund og formål

Naturgaslageret ved Stenlille er et akviferlager, hvor vandet i sandstenens porerum gradvis presses tilbage efterhånden som gassen pumpes ned. Akviferen er Gassumformationen (Trias-Jura), der danner en hvælving ved Stenlille pga. af pudedannelse i stensaltet i de underliggende lag. Gassumformationen befinder ca. 1500 m under terræn. Laget over sandstenen består af en tæt lersten (Fjerritslev-formationen), der danner låg ”cap-rock” over naturgaslageret. Lageret blev taget i brug i maj 1989, hvor den første naturgas blev pumpet ned. Inden da var baggrunds niveauet mht. lette kulbrinter blevet undersøgt i lagene over det planlagte lager, især methanindholdet i det grundvand, der anvendes til indvinding af drikkevand /1/. Siden er grundvandet i en række boringer over og omkring gaslageret regelmæssigt blevet undersøgt mht. indhold af methan og andre lette kulbrinter, uden at der er fundet det mindste tegn på lækage af gas fra lageret /2/.

Foruden boringen til injektion henholdsvis tapning af naturgas er der udført en række dybe boringer af kontrollensyn, herunder gas/væske grænsen i sandstenen. Af praktiske grunde og af miljøhensyn valgte Dansk Naturgas A/S at lade en del af boringerne udføre som afbøjede boringer, hvilket gav mulighed for at benytte samme boreplads til flere boringer. På boreplads B (figur 1) blev der således i perioden fra september 1990 til marts 1996 boret 8 boringer, hvoraf 6 var afbøjede.



Figur 1. Boreplads B. Vandindvinding foregår fra Stenlille vandværks 3 boringer nord for pladsen, og fra boringen på Tuelsmose gård.

Boringerne afvigelse fra lodret betyder at boringenes totale dybde ”Total Depth” er større end deres sande lodrette dybde (TVD = true vertical depth), se tabel 1.

Tabel 1. Dybe boringer på boreplads B.

Well	Spud date	Completion date	Total depth (m MD bKB)	Total depth (m TVD bKB)
ST-2	27 July 1987	28 August 1987	1662	1662
ST-3	30 August 1987	16 September 1987	1504	1504
ST-7	9 September 1990	17 December 1990	1852	1677
ST-8	8 November 1991	16 January 1992	1743	1662
ST-9	22 January 1992	20 February 1992	1670	1670
ST-11	5 April 1992	23 May 1992	1898	1664
ST-12	11 January 1994	9 February 1994	1780	1672
ST-13	13 February 1994	15 March 1994	1841	1664
ST-14	5 June 1995	14 July 1995	1815	1675
ST-16	6 February 1996	6 March 1996	1698	1668

I forbindelse med borearbejdet på ST-11 boringen skete der et spild af stensalt på pladsen, de nærmere omstændigheder er ikke oplyst, men det gav anledning til en klage fra en lodsejer. For at danne sig et overblik over forureningens omfang lod Dansk Naturgas A/S kontrolboring K2 udføre. K2, der ligger nedstrøms ST-11, giver mulighed for at overvåge vandkvaliteten af det øverste grundvand fra 4,5 m til 39,5 m dybde.

Stensalt blandes sammen med andre materialer i den borevæske, der anvendes ved dybe boringer for at bringe det udborede materiale (cuttings) til overfladen. Borevæske anvendes også af sikkerhedshensyn, da man herved kan hindre blow-outs i tilfælde af gasforekomster. Borevæsken opbevares i tanke ved boretårnet, og det udborede materiale, der naturligvis også indeholder noget saltvand, opbevares i bassiner tæt ved (de lyseblå markeringer på boreplads B, figur 1). Det udborede materiale køres bort, men udgør en midlertidig potentiel risiko for grundvandet, hvorfor drænvandet fra bassinerne ledes bort til rensningsanlæg, efter at eventuelle spor af olie er fjernet i ”oil skimmer’en”.

For at undgå direkte forurening af grundvandet med den saltholdige borevæske, skærmer man de øverste lag med et forerør ”conductor-pipe” før arbejdet med den dybe boring går i gang.

Ved de efterfølgende arbejder på boringerne (workovers) anvendes også saltvand, derfor er tidspunkterne for disse aktiviteter også medtaget i nærværende rapport, tabel 2.

Tabel 2. Liste over ”workovers” på boringene på boreplads B

ST-2	10 April - 3 May 1996
ST-8	8 May - 31 May 1995
ST-14	28 February - 26 March 1996

Når naturgas i vinterhalvåret ”tappes” fra lageret følger der lidt saltvand med, dog ikke mere end at det kan opsamles i tankvogne og operationen skulle dermed ikke udgøre nogen miljørisiko.

Efter uheldet med spild af stensalt bad Dansk Naturgas A/S Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) om at foretage regelmæssige bestemmelser af kloridindholdet i drænvand og i grundvandet i kontrolboringerne på boreplads B. Det drejede sig om boringerne K1, K2, samt drænbrønden, vist på figur 1. GEUS har derfor siden oktober 1993 udtaget prøver og foretaget kloridanalyser fra de nævnte boringer 4 gange om året. Siden juni 1998 har boringerne DGU nr. 205.597 og DGU nr. 205.649, på pladserne D henholdsvis A, indgået i kloridovervågningen af grundvandet .

Analyseresultaterne er rapporteret til Dansk Naturgas A/S hvert kvartal, men der er ikke tidligere præsenteret en samlet oversigt over kloridundersøgelserne, ej heller er der givet en vurdering af udbredelsen af kloridforureningen og dennes mulige betydning for vandindvindingen i området. Formålet med nærværende rapport er derfor at præsentere en samlet oversigt over kloridundersøgelserne og give en vurdering af udbredelsen af kloridforureningen. Til brug for denne vurdering indeholder rapporten relevante informationer mht. geologi, boringernes tekniske data, samt procedurer vedr. prøvetagning og analyse. Forbindelsen mellem det øverste grundvand i lagene over grundvandsreservoiret, der anvendes til indvinding af bl.a. Stenlille vandværk, er kun dårlig kendt fordi de øverste lag overvejende består af moræneler. Derfor blev der udført en række slugtests i efteråret 2003, med henblik på at undersøge de hydrauliske forhold omkring K2 boringen. Resultaterne af disse tests præsenteres for første gang med denne rapport. Endelig er der udført aldersbestemmelse af grundvandet vha. CFC-metoden, og en mere fuldstændig kemisk analyse af grundvandet er foretaget for at kunne bedømme stoftransporten i de øverste lag. Rapportens sidste afsnit rummer konklusion og anbefalinger til fremtidig overvågning af grundvandets kloridindhold.

Overvågning af klorid i grundvandet

Regelmæssige analyser af klorid i grundvandet under boreplads B blev først gennemført efter uheldet med spild af stensalt i 1992. K1 boringen (figur 1) er primært anvendt til overvågning af methan, og kloridanalyser er derfor kun foretaget på nogle få prøver i perioden fra 1989 til 1993, tabel 3.

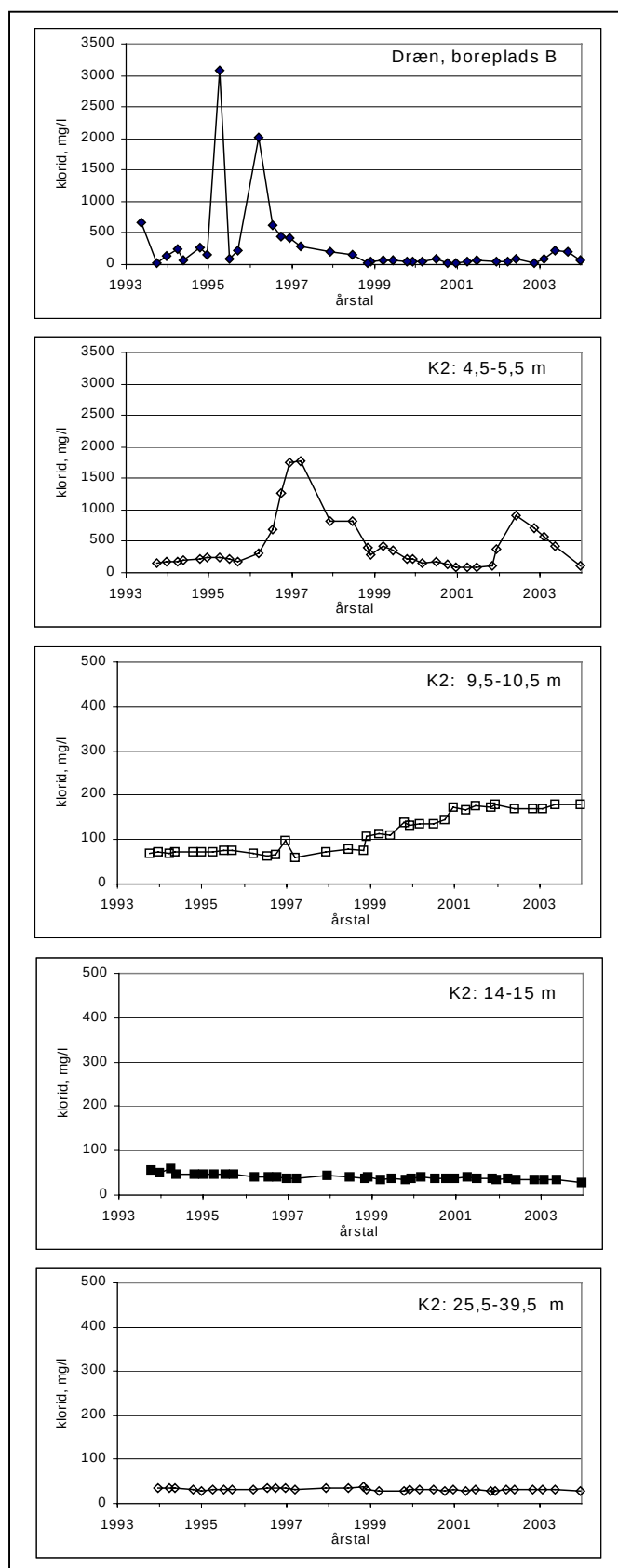
Tabel 3. Klorid i K1 boring , 35-45 m u. t.

Dato	Klorid, mg/l
22-5-1989	34
21-8-1989	36
7-11-1989	36
29-1-1990	37
30-3-1992	46
8-12-1992	46
4-10-1993	46

Regelmæssige analyser af klorid i prøver fra drænbrønden (figur 1) og fra de fire niveauer i K2 boringen påbegyndtes den 4. oktober 1993, figur 2.

En enkelt analyse af drænvandet den 28. november 1991 viste 5400 mg/l klorid, men løbende kontrol af drænvandet er ikke udført under borearbejdet. Efter ophør af boreaktiviteterne på boreplads B, er kloridindholdet i drænvandet faldet betydeligt. Forhøjede kloridindhold målt efter 1996 i det øverste niveau i K2, og efter 1999 ses også en svagere påvirkning af niveauet derunder. Kloridkoncentrationen i de to dybe niveauer har ligget på det normale for oplandet i hele perioden.

Figur 2. Kloridkoncentration i drænvand og grundvand fra K2 boringen (figur 1). Bemærk forskellige skalaer for klorid.

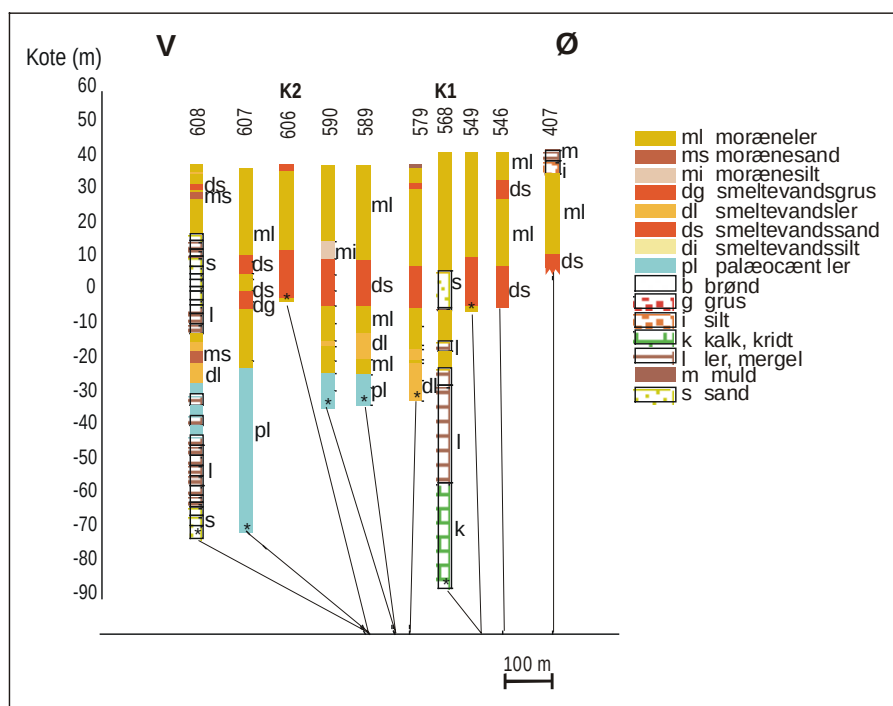


Baggrundsinformationer

I dette afsnit er samlet relevante informationer med henblik på at vurdere den mulige udbredelse af kloridforureningen af det øverste grundvand (figur 2) på og omkring borepladsen.

Geologi

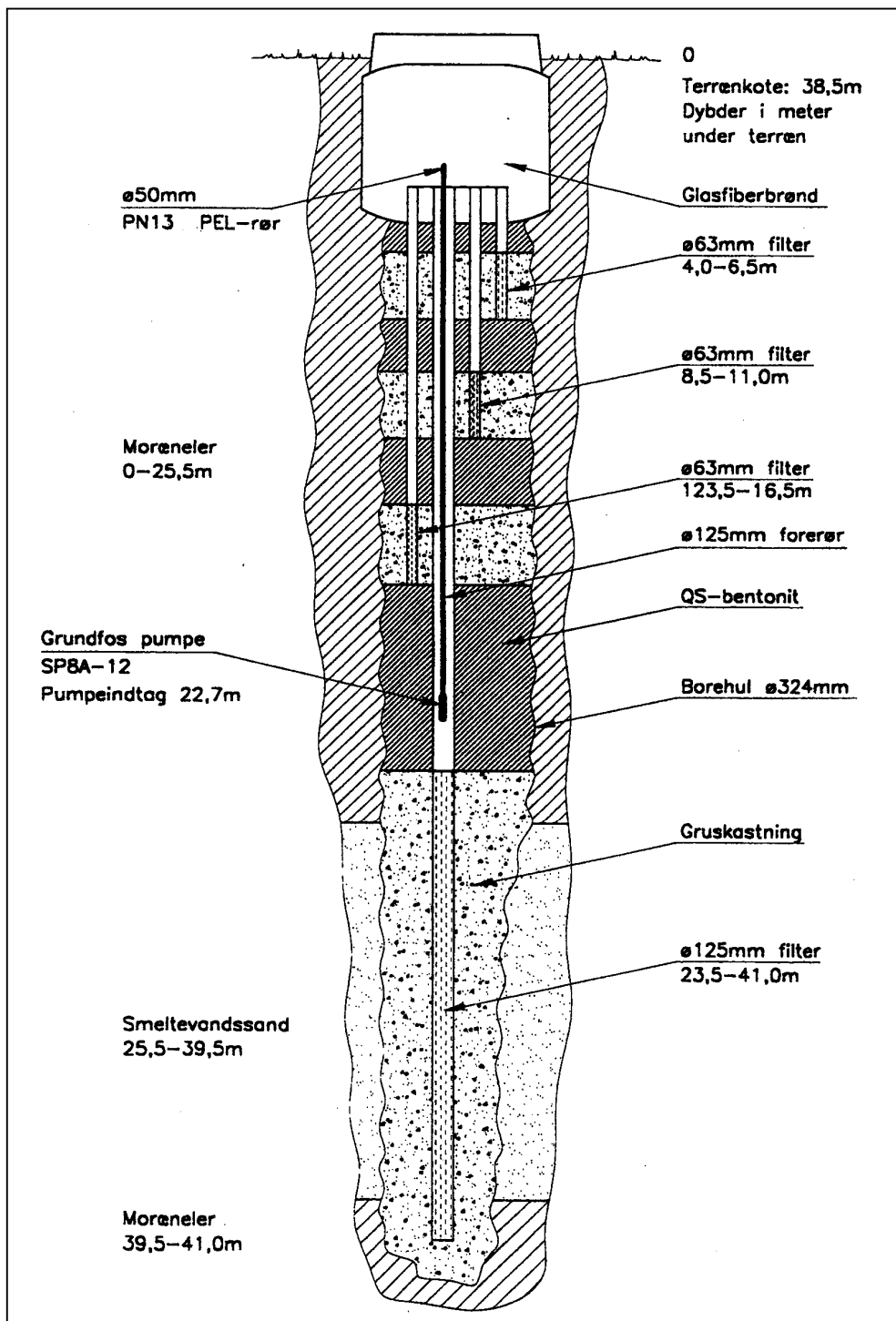
De øverste lags beskaffenhed er af væsentlig betydning for, hvor hurtig en given forurening når frem til grundvandsmagasinet, hvorfra vandindvinding finder sted. Grundvandsmagasinet i området omkring borepladsen udgøres af et ca. 10 m mægtigt lag af smeltevandssand, som er dækket af ca. 20 m moræneler, figur 3. Vandets strømningshastighed i moræneler er normalt relativ lav, men afhænger af sprækketæthed og sprækkemønster i leret. Derfor blev der udført en række slugtest i K2 boringen med henblik på at få et mere præcist mål for strømningshastigheden i leret. De nævnte tests er omtalt i et senere afsnit. Hvis moræneleret er tyndere eller helt mangler, kan nedsivningen af det forurenede vand lokalt set foregå væsentlig hurtigere. De mange boringer, der er udført i området, inklusive indvindingsboringerne, tyder dog på, at moræneleret udgør et samlet dække.



Figur 3. Vest-øst profil boreplads B (figur 1). Den geologiske beskrivelse er baseret på prøver fra kontrolboringerne K1 og K2, samt forboringerne til de dybe gaslagerboringer.

Overvågningsboringer

De tekniske detaljer inklusive dybden til de 4 niveauer i K2 boringen er vist på figur 4.



Figur 4. Skitse af kontrolboring K2, placeret nedstrøms de dybe gaslagerboringer, figur 1.

Boringen blev udført som tørborring i maj 1993.

Pejlerør i moræneler

Pejlerørene i K2 boringen blev etableret med henblik på at udtage vandprøver for kloridanalyse, og ikke for at bestemme de hydrauliske egenskaber i moræneleret i de pågældende niveauer. Derfor gennemførtes en række pejlinger med henblik på at opnå mere præcise oplysninger vedrørende rørenes dimensioner til brug for beregning af den hydrauliske ledningsevne ud fra de planlagte slugtests. Pejlingerne viste at dybden til bund af filter stemte godt med de tekniske oplysninger vist i figur 4, men at diameteren af to af rørene var større end angivet, tabel 4. For det øverste rør passer den beregnede indre diameter på 56 mm med en ydre diameter på 63 mm, som oplyst. Ved nedsenkning af ”slug’en” i de to andre pejlerør, se næste afsnit, steg vandspejlet kun 24-25 cm, mod forventet ca. 36 cm. Den beregnede indre diameter for de to rør er derfor større end muligt for et 63 mm rør, som angivet i figur 4. Det er derfor sandsynligt, at der er anvendt rør af en større dimension, f.eks. 75 mm.

Tabel 4. Kontrol af pejlerør i forbindelse med slugtests

Pejle-Rør	Bund af rør m u. terræn	Pejling ved slugtest m u. t.		Difference m	Indre diameter af rør, beregn., m
		før	efter		
F1	5,5	3,30	2,94	0,36	0,056
F2	10,4	5,67	5,42	0,25	0,067
F3	14,9	9,58	9,34	0,24	0,069

På grundlag af pejleresultaterne kunne vandvolumenerne i pejlerørene beregnes, og disse var, som det fremgår af tabel 5, noget mindre end de volumener der måltes i forbindelse med de regelmæssige prøvetagninger for kloridanalyse.

Tabel 5 Volumen vand i pejlerør

Pejlerør	Vandspejl m u.t.	Ydre diameter, mm	Beregnet volumen, l	Vol. ved prøvetagning
F1	3,46	63	4,3	4 - 6
F2	5,73	75	13,8	19
F3	9,61	75	15,6	22

Forklaringen herpå er sandsynligvis, at der også sker en vis afsenkning af vandstanden i gruskastningen omkring filteret i forbindelse med tømning af røret. Tilstrømning fra moræneleret er så langsom, at vand herfra ikke bidrager direkte ved tømning af røret. Dette forhold må der tages hensyn til ved renpumpning før udtagning af repræsentative prøver for f.eks. CFC-datering af vandet, som omtalt i et senere afsnit.

Undersøgelser af hydrauliske forhold

Slug tests

Forberedelserne til slugtest er illustreret i figur 5. Slug'en er 107 cm lang (5A) og vil, når den nedsænkes i pejlerøret (5C), replacere et volumen vand svarende til 888 cm^3 . Herved stiger vandstanden i røret, og stigningen registreres vha. en tryktransducer (5B), der er anbragt i røret forinden (5C).



Figur 5. Forberedelserne til første slugtest den 26. august 2003

Vandstanden i røret vil herefter gradvis falde til samme niveau, som før nedsænkning af slug'en. Ændringen i vandstanden med tiden registreres af tryktransducere og data herfra opsamles vha. en datalogger (5D). Testen kan også udføres som en bail-test, hvor slug'en trækkes op af røret, og den gradvise stigning i vandstanden i røret herefter måles som funktion af tiden.

Tryktransducerne var typen PSL fra HP Jensen (www.hpjensen.dk) og dataloggeren en Aquatronic Micrologger fra samme firma. Dataloggeren blev indstillet til maksimal følsomhed, og laboratoriekalibrering blev foretaget på alle fire transducere forud for udførelsen af diverse slugtests. Resultaterne af kalibreringerne viste at en difference på 1 mV svarede til følgende trykændringer angivet som mm vandsøjle for de 4 transducere: 2,50; 2,65; 2,65 og 5,0.

Opsamling af data kan ske lineært eller logaritmisk mht. tidsintervallerne. For slugtests skete dataopsamlingen logaritmisk, men i en 2 ugers periode uden tests foregik dataopsamlingen lineært, se næste afsnit. Af ukendte årsager lykkedes det ikke at opsamle data fra den første slugtest, der involverede alle tre pejlerør. Fra september til november 2003 gennemførtes i alt 9 tests, hvoraf 5 gav tilpas systematiske data for beregning af den hydrauliske ledningsevne, tabel 6.

Tabel 6. Oversigt over slug tests udført K2 boringens pejlerør

Dato	F1 = 4,5-5,5 m	F2 = 9,5-10,5 m	F3 = 14-15 m	Test nr. (filter)
26-08-03	S	S	S	Ingen data opsamling
02-09-03	B	B	B	1 (F1)
16-09-03	S	-	-	2 (F1)
14-10-03	-	S	-	
21-10-03	-	-	S	4 (F3)
28-11-03	B	B	B	3 (F2) & 5 (F3)

S = faldende vandspejl; **B** = stigende vandspejl (bail)

Beregning af den hydrauliske ledningsevne (K) blev foretaget efter Hvorslevs metode vha. Aquitest, et software udviklet af Waterloo Hydraulic Institute (WHI), Canada. Resultaterne er vist i tabel 7.

Tabel 7. Resultater af slug tests i K2 boringens pejlerør

Test nr.	Filter	Type	Rør diam. cm	Gruskastn. diam. cm	K (m/s)
1	F1 = 4,5-5,5 m	B	5,14	35	$1,2 \times 10^{-6}$
1	Do	B	do	20	$1,5 \times 10^{-6}$
2	Do	S	do	20	$1,4 \times 10^{-6}$
3	F2 = 9,5-10,5 m	B	*)6,1	35	$5,0 \times 10^{-9}$
4	F3 = 14,0-15,0 m	S	6,1	35	$2,4 \times 10^{-8}$
5	Do	B	do	35	$1,1 \times 10^{-8}$

*) Indre diameter for formodede 75mm rør i F2 og F3 er beregnet ud fra firmaoplysninger

Som det ses af tabel 7 er der betydelige forskelle i de hydrauliske egenskaber af moræneleret i de tre niveauer. Beregninger af den hydrauliske ledningsevne er mest pålidelige når de baseres på data, der repræsenterer mindst 70 procents retablering af den oprindelig vandstand i røret. De 70 procents retablering af vandstanden i rørene skete efter henholdsvis 10 min; 2,3 døgn og ca. 1 døgn, som det ses af måleserierne for hver af testene i F1-F3, Appendiks 1. Spredningen af datapunkter omkring den beregnede hældning lå inden for det acceptable, selvom spredningen var tydelig for F2 pga. den langsomme retablering af vandstanden, og påvirkningen fra vandværkets indvindingsboringer, se omtalen under afsnittet om kontinuerte pejlinger.

I beregningen af den hydrauliske ledningsevne indgår radius af gruskastningen omkring pejlerøret, og da denne ikke kendes med sikkerhed er beregningerne udført for både $R=17,5$ cm og $R=10$ cm. Borediameteren for K2 er 32,4 cm ifølge de boretekniske oplysninger (figur 4), men da der er flere rør i samme boring, er det muligvis rigtigere at anvende en radius der er mindre end halvdelen af boringens diameter. For en mindre radius af gruskastningen beregnes en lidt højere ledningsevne, men forskellen mellem de to beregninger er ikke særlig stor, som det ses for F1, tabel 7. Derfor er beregningerne kun udført for $R=17,5$ cm for de to øvrige pejlerør.

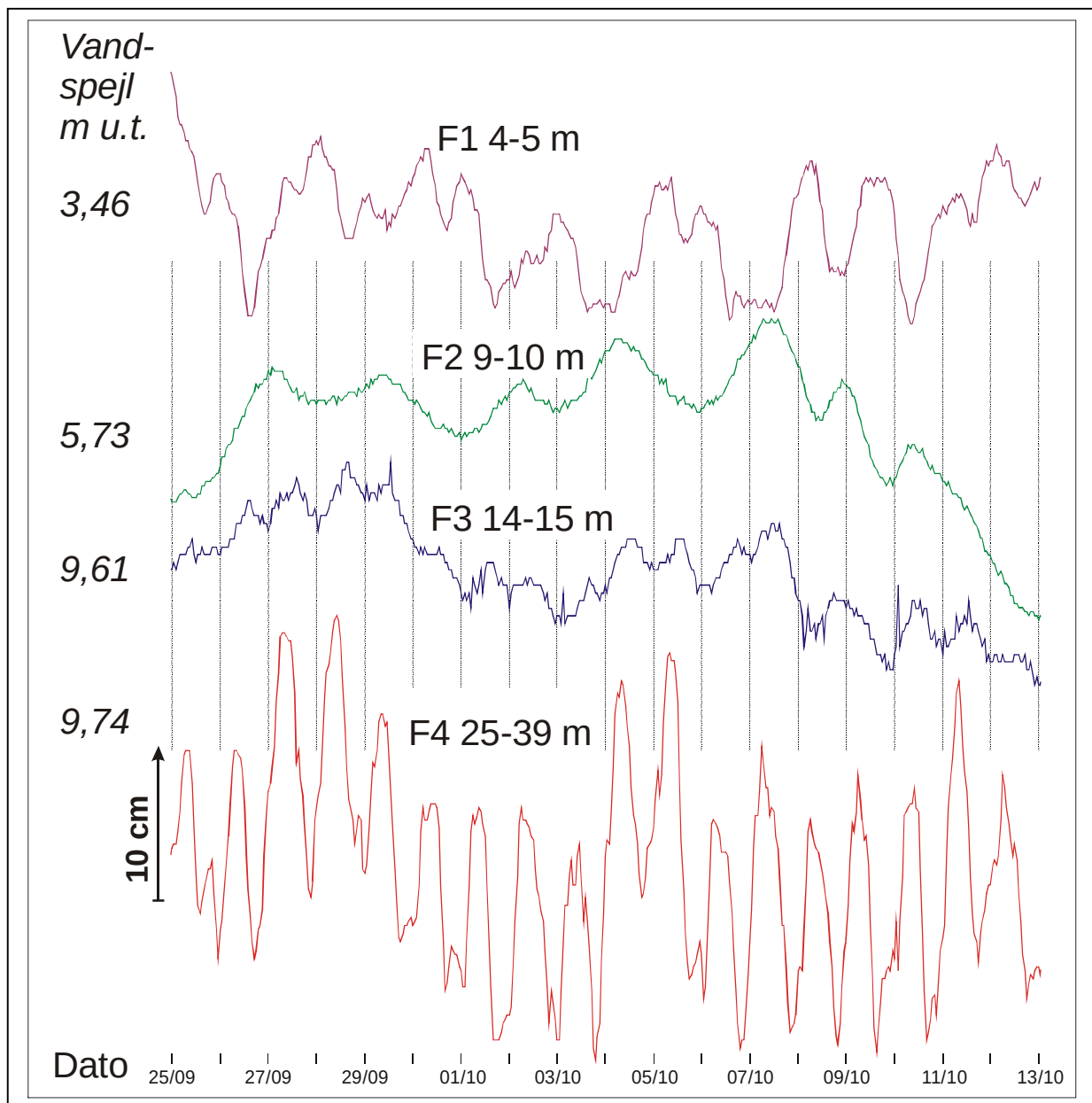
For F1 og F3 pejlerørene er den hydrauliske ledningsevne beregnet ved både slugtest og bail-test, og beregningerne stemmer godt overens (tabel 7), måleusikkerheden taget i betragtning. Slugtesten for F2 pejlerøret viste for stor spredning, derfor er den hydrauliske ledningsevne for F2 kun beregnet for bail-testen.

Kontinuerte pejlinger mellem slugtests

Pejling af grundvandstanden i alle 4 niveauer af K2 boringen foregik kontinuerligt fra den 25. september til den 13. oktober 2003, og resultaterne er vist i figur 6. Dybden til grundvandspejlet, vist i venstre side af figuren, blev bestemt manuelt i de fire rør den 26. august. Kurverne repræsenterer de relative variationer i grundvandstanden, bestemt ved dataopsamling fra de 4 transducere. Målingerne korrigeres automatisk for ændringer i barometerstanden, fordi transduceren har kontakt til atmosfæren via en tynd nylon slange som er lagt ind i kablet.

Den relativ store forskel i dybden til vandspejlet i de fire rør viser, at der ikke er nogen direkte hydraulisk kontakt mellem de 4 niveauer. I det nederste niveau ses en døgnrytme med betydelig variation af vandspejlet (figur 6), der sandsynligvis skyldes påvirkning fra Stenlille vandværks indvindingsboringer beliggende ca. 400 m nord for K2 boringen (figur 1). En del vandværker pumper vand op om natten, hvor elektriciteten er billigere end om dagen, og det kan være forklaringen på den observerede døgnrytme. I magasiner med frit vandspejl forplanter afsænkningen af vandspejlet ved pumpning sig ikke særlig langt fra indvindingsboringen. Den kendsgerning, at afsænkningen kan registreres op til 400 m fra boringen bestyrker formodningen om at moræneleret udgør et samlet dække i området.

Vandstanden i F3 og F2 varierer også, om end udsvingene er betydelig mindre end i grundvandsmagasinet. Variationerne i de tre dybeste niveauer i K2 er ikke synkrone, alligevel tyder mønsteret på, at der er en vis kontakt mellem lagene. Kontakten tillader imidlertid ikke en udligning af grundvandsstanden i de tre niveauer. Variationerne i grundvandspejlet i det øverste niveau synes ikke at være påvirket af variationerne i grundvandsmagasinet, som følge af vandindvindingen. Muligvis kan variationer i det øverste niveau skyldes ændringer i vandstand som følge af nedbør og/eller ændringer barometerstanden.



Figur 6. Kontinuerte pejlinger af grundvandstand i K2 boringens 4 filtre

Hydrokemi og alder af grundvand

Renpumpning af pejlerør

Renpumpning af pejlerør er nødvendig for udtagning af repræsentative vandprøver til CFC-datering og kemianalyser, der omfatter flere stoffer end klorid. Sidstnævnte regnes for konservativt, dvs. det kan med rimelighed antages at kloridindholdet i pejlerøret er det samme som i det oprindelige grundvand. På grund af den langsomme tilstrømning af vand fra moræneleret til pejlerørene var det ikke muligt at renpumpe og udtage prøver samme dag. De regelmæssige kloridanalyser (figur 2) er derfor normalt udført på det vand, der stod i røret. For at undgå, at der trængte atmosfærisk luft ned i gruskastningen omkring filterrøret ved tømning, anbragtes pumpen ca. en halv meter over top af filter. Pejlerøret blev herefter tømt dagligt i løbet af en uge, og to dage efter sidste renpumpning blev prøver udtaget for diverse analyser. Før start blev pumpen forsigtigt sænket til ca. en halv meter over bund af filter og pumpehastigheden blev reguleret til en tilpas lav ydelse, ca. 0,2 l/min. I de to øverste pejlerør anvendtes en batteridrevet Whale-pumpe, og i det nederste rør en MP1 pumpe, der har større løfteevne. Feltnålinger af vandets ledningsevne, pH og redoxpotentiale, blev fortaget vha. elektroder monteret i flowcelle.

CFC datering af grundvand

Vandprøver for CFC-analyse blev opbevaret i lufttætte 60 ml glasampuller. Vandet fra pumpen blev ledt direkte til ampullen på en sådan måde, at kontakt til atmosfæren blev undgået, og ampullen blev lukket (smeltet) straks efter fyldning. CFC-analyser blev udført på en gaskromatograf udstyret med et purge&trap system og ECD detektor. Alderen af grundvandet, tabel 8, blev beregnet vha. CFC indholdet /3/.

Tabel 8. Alder af grundvand udtrykt ved CFC-årstallet for grundvandsdannelsen

Lokalitet	Boring, DGU nr.	Dybde (m)	CFC-årstal	
Boreplads B	K1 = 205.568	35,5-45,5	1947	
		98,3-128,3	<1940	
	K2 = 206.606	4,5-5,5	(1967)	1970
		9,5-10,5	(1965)	1968
		14,0-15,0	(1968)	1963
		25,5-39,5	<1940	1945
Boreplads A	205.649	23,7-29,7	1950	
Boreplads D	205.597	24,5-27,5	1950	
		9,3-11,3	1974	
Stenlille vandværk	205.257	36-42	Usikker	
	205.502	18,9-27,5	<1940	
	205.520	18,7-24,6	<1940	
Tuelsemosegård	205.407	32-35	1950	

CFC-årstal i første kolonne er bestemt i 1999, anden kolonne i 2003

Det var usikkert om renpumpning af pejlerørene var tilstrækkelig for de prøver, der blev udtaget i 1999. Pejlerørene blev i 1999 tømt om morgenen og prøverne for CFC-analyse udtaget sidst på dagen. Som omtalt ovenfor var renpumpningen af pejlerørene i 2003 ”grundigere”. Det ser alligevel ikke ud til, at den grundigere renpumpning har haft en væsentlig betydning for aldersbestemmelsen af grundvandet, tabel 8. Det højere CFC-årstal for det dybeste pejlerør ”målt” i 1999 kan enten skyldes utilstrækkelig renpumpning eller, at der er trængt atmosfærisk luft ned i gruskastningen omkring filteret, da pejlerørene blev tømt ”til bunden” ved renpumpningen i 1999.

Den relativ høje alder af grundvandet i området omkring boreplads B stemmer med at vandets strømningshastighed gennem moræneleret er lav, og at lerdækket er nogenlunde sammenhængende i hele området.

Hydrokemi

Vandprøverne for kemisk analyse blev udtaget og opbevaret i 100 ml glasflasker med tætsluttende låg. Flaskerne fyldtes helt, så luftbobler i flaskerne blev undgået. Prøverne blev analyseret få dage senere vha. væskechromatografi, på et Dionex instrument. Analyseresultaterne er vist i tabel 9.

Foruden resultaterne fra K2 boringen (DGU nr. 205.606), viser tabel 9 også analyseresultaterne for de andre boringer, der regelmæssigt undersøges for klorid. De fleste analyser viser reducerende forhold i grundvandet, dvs. ingen nitrat og for nogle endda med et vist indhold af methan. Kun vandprøver fra pejlerøret i boring DGU nr. 205.597 (figur 1) og fra drænbrønden indeholder nitrat. Det relativt høje methanindhold i de to dybeste pejlerør, skyldes muligvis ikke naturlige forhold, men kan være en midlertidig følge af borearbejdet, som antydtes af methans unge alder bestemt ved kulstof-14 metoden. Disse forhold er omtalt i en tidligere Stenlille overvågningsrapport /2/.

På grund af den langsomme tilstrømning af vand fra moræneleret skete der en gradvis tømning af pejlerørene under prøvetagningen den 16. december 2003. Der blev derfor udtaget flere vandprøver, for at kontrollere om vandkemien i rørene var homogen. Det var den for det dybeste rør, og næsten så for det mellemste rør. For det øverste rør sås et mindre, men tydeligt, fald i ionkoncentrationerne med tiden, dvs. efterhånden som røret blev tømt. Da vandet blev pumpet fra bunden af røret, kunne variationen indikere at saltindholdet er højere i bunden end i toppen af filteret. Kloridkoncentrationen i det øverste pejlerør er faldet jævnt siden medio 2002 fra 900 mg/l til ca. 100 mg/l ultimo 2003 (figur 2), så det virker ikke usandsynligt at klorid skulle være lidt højere i bunden af filteret, da tilstrømning af mere ferskt vand sandsynligvis sker oppefra.

Udover de allerede nævnte forskelle synes magnesium:calcium forholdet at være den væsentligste forskel på grundvandet i de forskellige lag. Et stigende Mg:Ca forhold afspejler sandsynligvis en øget reaktion mellem grundvandet og de glaciale jordlags kalkindhold. F.eks. er Mg:Ca højest (0,45) i de dybeste pejlerør F3, og mindst (0,11) i de terrænnære lag: Drænvandet, F1 og 205.597.

Tabel 9. Kemianalyse af vandprøver udtaget 16-12-2003 fra overvågningsboringer

				Felt-analyser			Laboratorieanalyser ved ionkromatografi, koncentrationer angivet i mg/l											mg/l	mol:mol
Boring	Dybde, m	Lagtype	Tidspunkt	pH	Eh, mV	mS/m	Cl	SO ₄	NO ₃	F	Br	PO ₄	Na	Ca	Mg	K	NH ₄	CH ₄	Mg:Ca
205.568 = K1	35,5-45,5	sand, silt					30	13	<0,05	0,32	<0,05	<0,05	28	90	17,0	3,1	<0,05		0,31
205.568	98-128	kalksand					1337	59	<0,05	3,93	<0,05	<0,05	1180	72	32,6	57	<0,05		0,75
211.597	9,3-11,3	sand					14	34	4,0	0,14	<0,05	<0,05	23	99	6,5	2,4	<0,05		0,11
211.597	24,5-31,5	sand					24	126	<0,05	0,18	<0,05	<0,05	16	127	8,3	1,5	<0,05		0,11
205.649	25,5-39,5	sand					16	10	<0,05	0,29	<0,05	<0,05	24	102	11,5	4,1	<0,05		0,19
205.606 =K2	25,5-39,5	sand		6,9	-136	61	26	27	<0,05	0,27	<0,05	<0,05	23	96	11,8	4,5	0,91	0,03	0,20
205.606	4,5-5,5	ler, sandet	11:25	7,0	-115	94	142	12	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	91	144	9,6	1,8	<0,05	0,02	0,11
			11:30	6,7	-115	95	104	11	<0,05	0,15	<0,05	<0,05	82	133	9,8	7,5	<0,05		0,12
			11:35				100	11	<0,05	0,14	<0,05	<0,05	77	128	7,0	1,0	<0,05	0,04	0,09
205.606	9,5-10,5	ler	10:00	7,2	-141	115	169	11	<0,05	0,29	<0,05	<0,05	112	108	17,9	4,4	<0,05	0,48	0,27
			11:00	7,5	-153	124	183	12	<0,05	0,29	<0,05	<0,05	125	105	17,8	5,0	<0,05	0,83	0,28
205.606	14-15	ler	12:20	7,6	-143	70	28	5	<0,05	0,42	<0,05	<0,05	56	72	19,5	5,8	<0,05	2,10	0,45
			12:25	7,5	-183	70	28	5	<0,05	0,43	<0,05	<0,05	58	72	19,8	5,2	<0,05	2,22	0,45
			12:30	7,5	-185	70	28	5	<0,05	0,43	<0,05	<0,05	55	71	19,6	5,1	<0,05	2,24	0,45
Dræn							59	21	15,7	0,14	<0,05	<0,05	41	103	7,2	1,9	<0,05		0,11

Mulig udbredelse af kloridforurening

Som omtalt under ”Baggrund og formål” var anledningen til overvågning af klorid i grundvandet et uheld under borearbejdet på ST11 i 1992, hvor der skete et spild af stensalt. Ca. 1½ år efter uheldet påbegyndtes en regelmæssig undersøgelse af kloridindholdet i det øverste grundvand. En markant stigning i kloridindholdet fra 200 til 1800 mg/l i perioden 1996-97 blev observeret i det øverste grundvand (4,5-5,5 m u. terr.) i K2 boringen nærmest stedet hvor uheldet skete (figur 2). Kloridforureningen klingede af og var forsvundet omkring 2001. En ny stigning i kloridindholdet til ca. 900 mg/l skete omkring medio 2002 i samme boring og samme dybde, men denne forurening er nu også næsten forsvundet. Det er lidt overraskende, at et enkelt uheld giver anledning til 2 klorid toppe (figur 2) i samme niveau, med ca. 5 års mellemrum. Forklaringen kan være, at der er også andre årsager til de forhøjede kloridindhold, f.eks. udsivning af saltvand fra de støbte bassiner, som anvendtes til midlertidig deponering af udboret materiale (cuttings). Uheldet i 1992 gav anledning til synlige spor på overfladen, derfor klagen fra lodsejeren på den tilstødende grund, men der blev ikke umiddelbart foretaget undersøgelser af, hvor forureningen bevægede sig hen. K2 boringen blev derfor placeret nedstrøms spild-stedet vurderet ud fra potentiale forholdene i grundvandsmagasinet. Derfor kan det ikke, på basis af de tilgængelige oplysninger, med sikkerhed siges, om det forhøjede kloridindhold i det øverste grundvand i K2 eksplicit skyldes uheldet i 1992, eller blot boreaktiviteterne i almindelighed.

Borearbejdet på boreplads B skete i 5 kampanjer, tabel 1, hvoraf den mest intense må formodes at være perioden 1991-92, hvor 3 boringer blev udført i række. I denne periode blev der foretaget en enkelt analyse af drænvandet, der viste et kloridindhold på 5400 mg/l. Drænvandet fra betonbassinerne blev udledt til vandløb og videre til rensningsanlæg efter at eventuelle olierester var blevet fjernet.

Det maksimale kloridindhold i øverste pejlerør viste sig ca. 5 år efter uheldet, der fandt sted under den mest intensive borekampagne på boreplads B, så det må antages at de 5 år er den tid det tager en forurening at nå ned til det øverste grundvand. CFC-dateringerne indikerer imidlertid en alder på omkring 30 år (tabel 8). Forklaringen på den tilsyneladende forskel kan være, at der sker en udveksling mellem vandet i sprækkerne og vandet i morænelerets matrix, således at CFC repræsenterer en blanding, mens de markant forhøjede kloridkoncentrationer hovedsagelig repræsenterer det mere mobile vand i sprækkerne. Hvis det er rigtig, er det muligt at matrix-vandets kloridindhold er også øget, og at klorid herfra vil udvaskes med tiden og give anledning til let forhøjede kloridindhold i grundvandet fremover. I perioden 1998-2001 er der i det mellemste pejlerør (9,5-10,5 m u. terr.) sket en jævn stigning i kloridindholdet fra ca. 70 til ca. 180 mg/l. Siden 2001 har kloridindholdet været konstant (figur 2). Den brede ”kloridtop” i det mellemste pejlerør (figur 2) viser at der er sket en fortynding af det kloridforurenede vand. Fortyndingen kan være sket ved opblanding med vand stammende fra et ikke forurenede areal, eller ved udveksling med matrix-

vand. Det noget højere Mg:Ca forhold i mellemste filter sammenlignet med øverste filter tyder på at opblanding med matrix-vand i det mindste spiller en vis rolle for fortyndingen af kloridforureningen. Endnu 10 år efter uheldet ses ingen spor af kloridforurening i det dybeste pejlerør (14-15 u. terr.). Kloridindhold på ca. 30 mg/l i det dybeste pejlerør og i grundvandsmagasinet, svarer til baggrundsniveauet for grundvand i området. Om der med tiden vil vise sig en let stigning i kloridindholdet i det dybeste pejlerør, er svært at forudsige idet grundvandets strømning kan være delvis lateral, og derfor føre det kloridholdige vand bort fra K2 boringen.

Det anses imidlertid for meget lidt sandsynligt, at der som følge af boreaktiviteterne på boreplads B i perioden 1990-1996, i fremtiden vil kunne spores et forhøjet kloridindhold i grundvandsmagasinet ved K2 boringen. Dels fordi fortyndingen vil være betydelig som det ses ved sammenligningen af klorid-udviklingen i de 3 pejlerør, og dels fordi Mg:Ca forholdet i grundvandsmagasinet tyder på at grundvandsdannelsen ikke i hovedsagen sker i området omkring boreplads B.

Konklusion og anbefalinger

Det kan ikke med sikkerhed fastslås om det konstaterede spild af stensalt på boreplads B i 1992 alene er årsagen til de forhøjede kloridindhold (op til 1800 mg/l), der blev observeret i det øverste grundvand 5 år senere. Andre dele af borearbejdet kan have bidraget, f.eks. udsivning af saltvand fra betonbassinerne, der anvendtes til midlertidig deponering af udboret materiale.

Forskellen mellem den tid det tog forureningen at nå frem til det øverste grundvand (ca. 5 år), og vandets alder (ca. 30 år, CFC-metoden) skyldes antagelig udveksling mellem det mobile vand i sprækkerne og matrix-vand i moræneleret. Denne udveksling kan give anledning til let forhøjede kloridindhold i det øverste grundvand et stykke frem i tiden.

Fortynding med matrix-vand og med vand fra oplandet uden for boreplads B betyder, at man næppe i fremtiden vil kunne spore forhøjede kloridindhold, stammende fra boreaktiviteterne, i grundvandsmagasinet, der anvendes til vandindvinding.

Da der ifølge oplysninger fra Dansk Naturgas A/S ikke siden 1996 er udført arbejder på boreplads B, der kunne give anledning til kloridforurening af betydning, skønnes det ikke længere nødvendigt at fortsætte overvågningen af klorid i grundvandet i kontrolboringerne.

Referencer

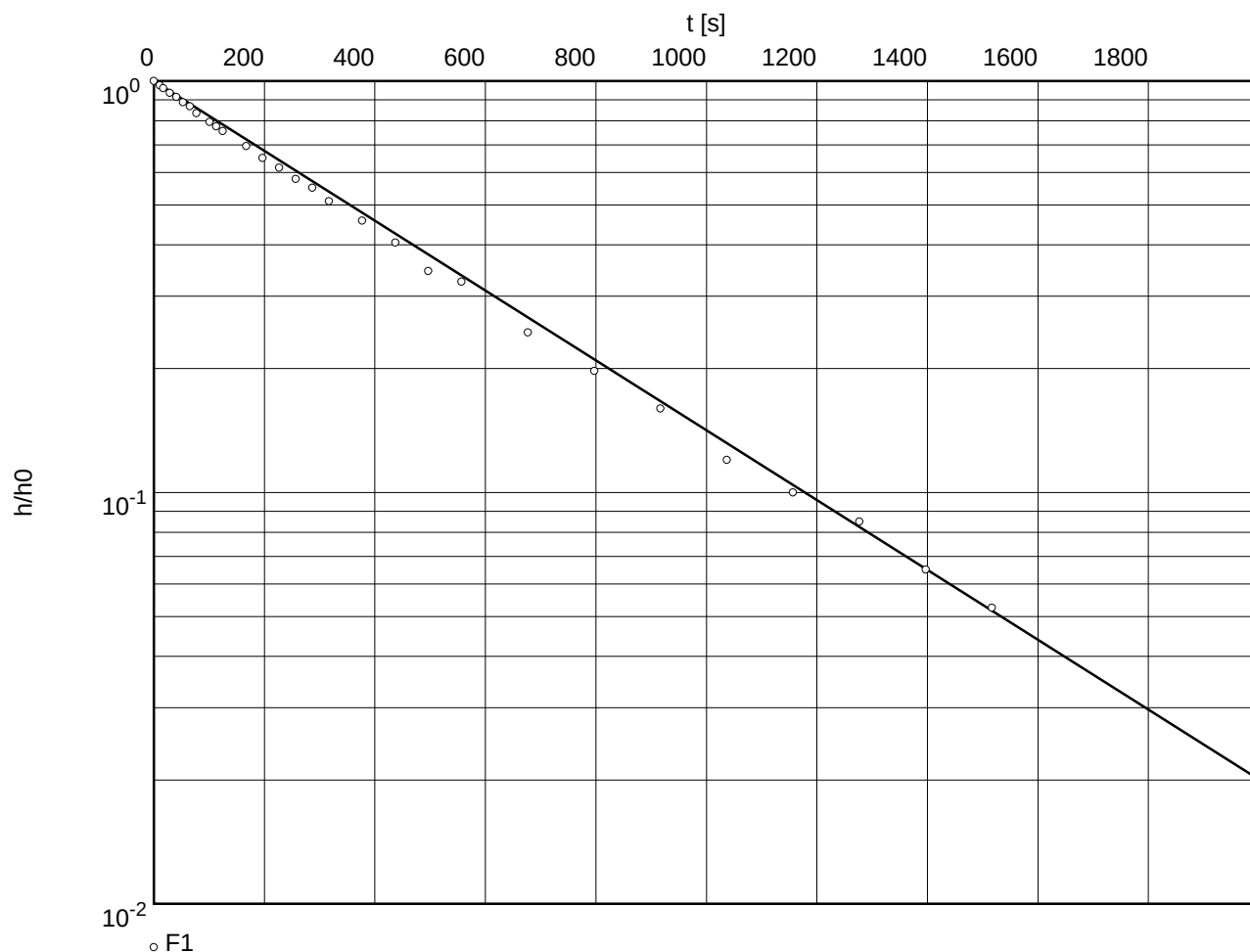
- /1/ Stenlille Gas Storage – Study of naturally occurring hydrocarbon gases before injection. Geological Survey of Denmark. DGU report No. 15, (1989). 53 pp.
- /2/ Overvågning af methan i grundvand over Stenlille naturgaslager, 1989-2001. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Rapport 2002/31, 37 pp.
- /3/ Grundvandets alder. Naturens Verden (1998) p.72-80.

Appendiks 1 - Sluttest analyser ved Hvorslevs metode

Slug Test No. 1; 2. sept. 2003 (bail)

Test conducted on: F1 4,5-5,5 m u.t.

DGU 205.606; F1



Hydraulic conductivity [m/s]: 1.15×10^{-6}

Borings data

borerør: 5,14 cm ID

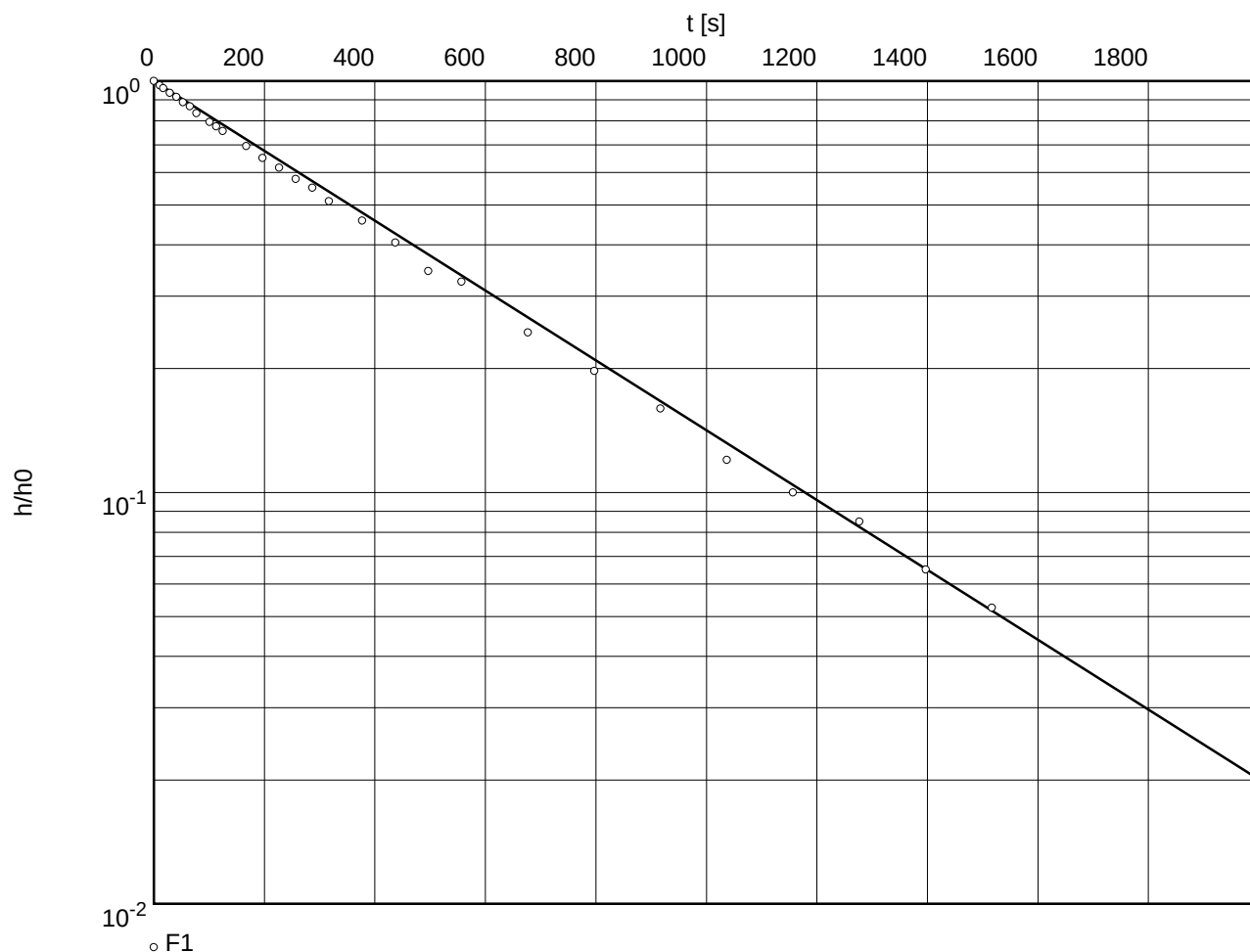
filtergrus diam. 35,0 cm

GVS 1,47 m u.m.p.

Slug Test No. 1; 2. sept. 2003 (bail)

Test conducted on: F1 4,5-5,5 m u.t.

DGU 205.606; F1



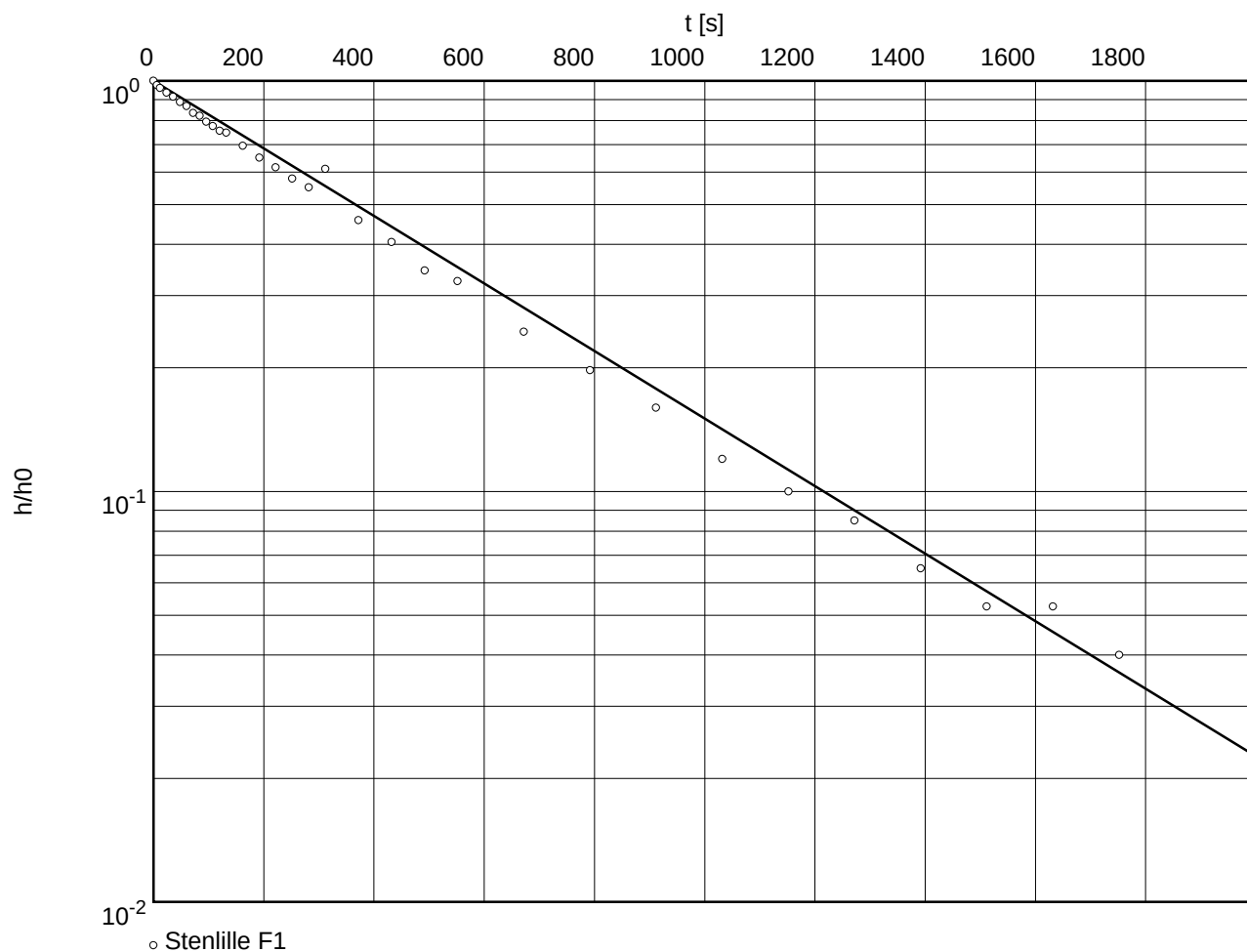
Hydraulic conductivity [m/s]: 1.52×10^{-6}

Borings data
borerør: 5,14 cm ID
filtergrus diam. 20,0 cm
GVS 1,47 m u.m.p.

Slug Test No. 2; 16-09-2003 (slug)

Test conducted on: F1 4,5-5,5 m. u.t.

DGU nr. 205.606; F1



Hydraulic conductivity [m/s]: 1.44×10^{-6}

Dimensioner:

Borerør: 5,1 cm; ID

Gruskastning: 20,0 cm

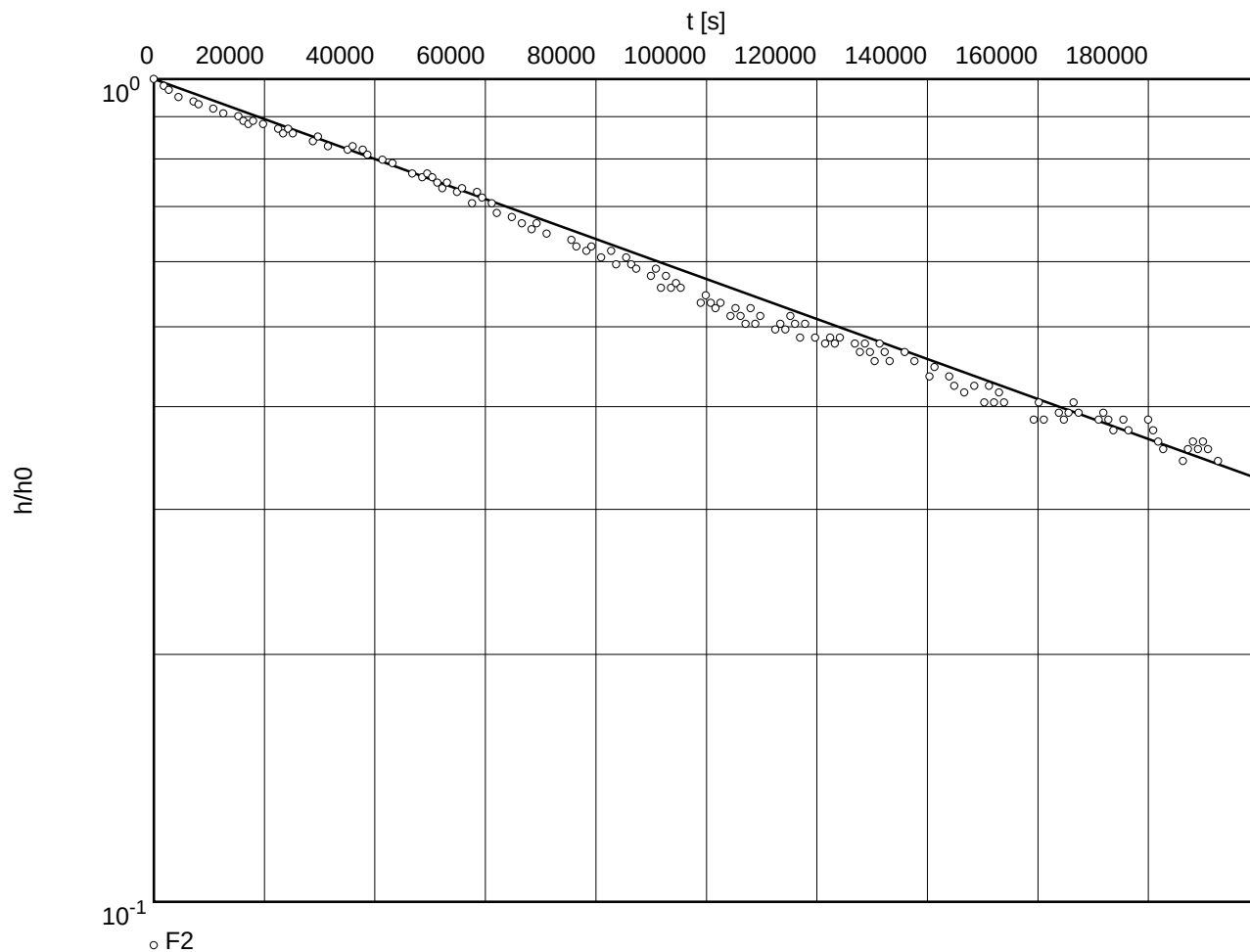
Filter : 4,5-5,5 m u.t

GVS : 1,47 m u. m.p.

Slug Test No. 3; 28. okt. 2003 (bail)

Test conducted on: F2 9.5 - 10.5 m u.t.

DGU nr. 205.606 F2



Hydraulic conductivity [m/s]: 5.02×10^{-9}

Boringsdata:

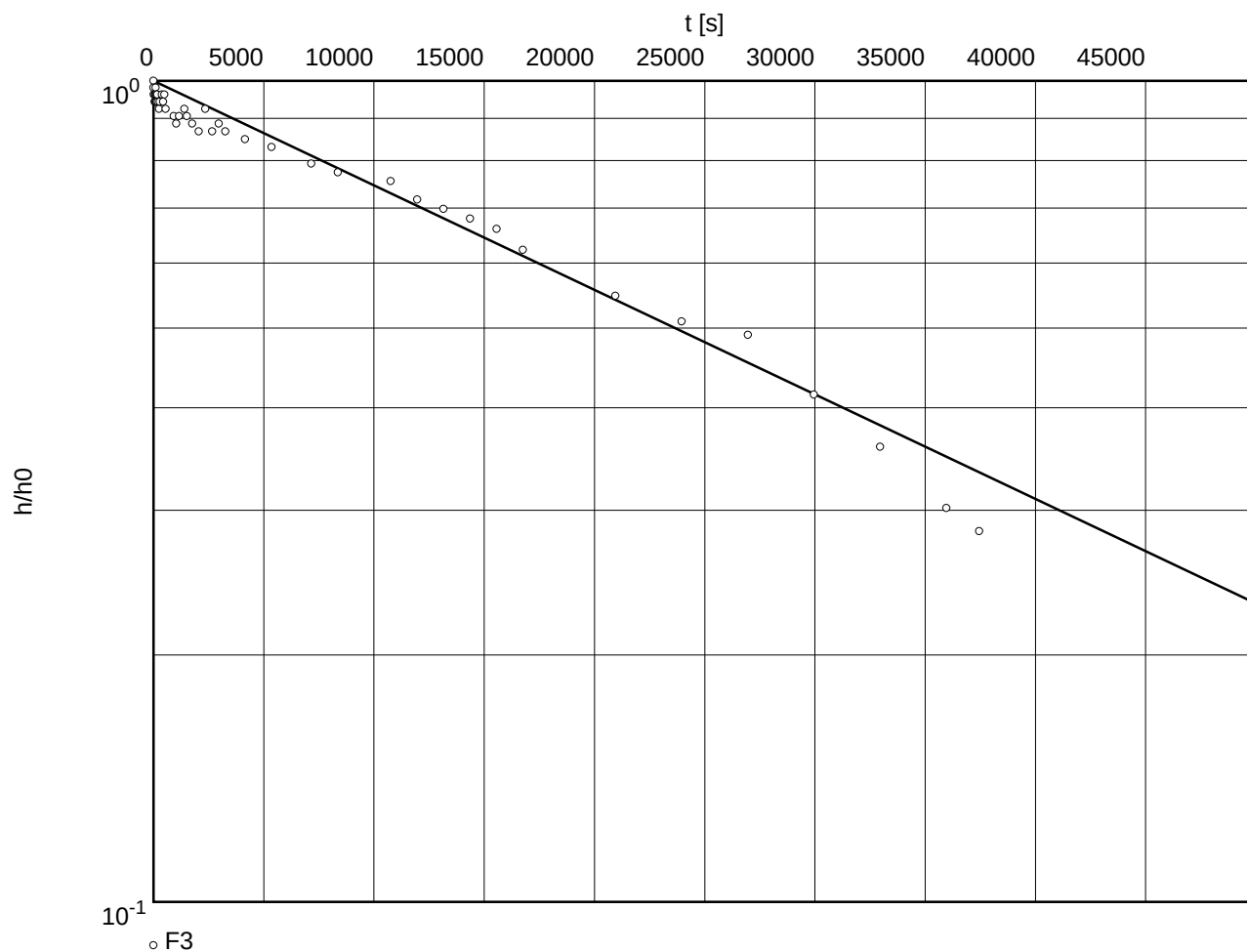
borerør 6,1cm ID
filterdiam. 35,0 cm

GVS 3,68 m u.m.p.

Slug Test No. 4; 21. okt. 2003 (slug)

Test conducted on: F3 14-15 m u.t.

DGU nr. 205.606; F3



Hydraulic conductivity [m/s]: 2.46×10^{-8}

Boringsdata

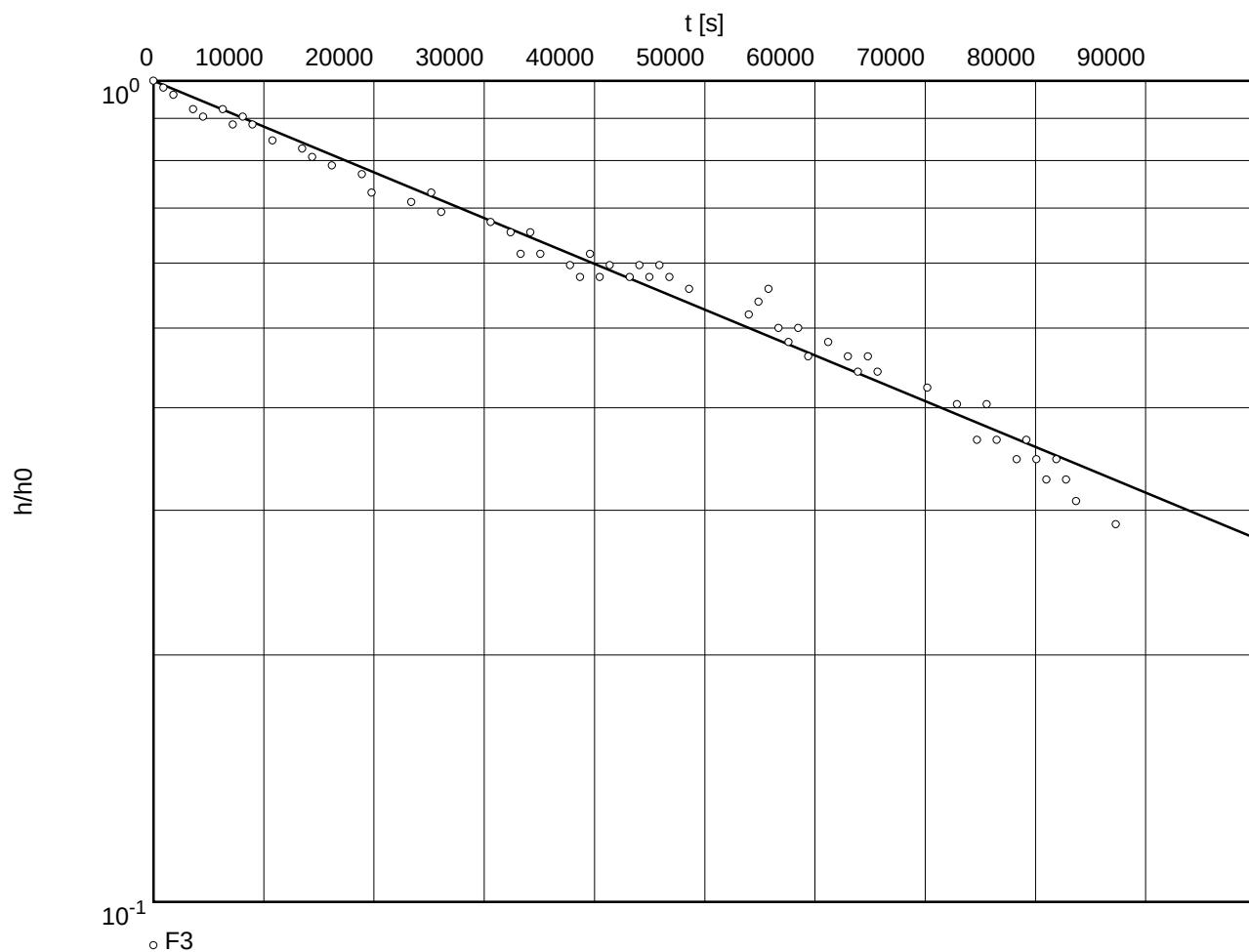
Borerør 6,1 cm ID
Filterdiam. 35,0 cm

GVS 7,54 m u.m.p.

Slug Test No. 5, 28. okt. 2003 (bail)

Test conducted on: F3 14-15 m u.t.

DGU nr. 205.606 F3



Hydraulic conductivity [m/s]: 1.08×10^{-8}

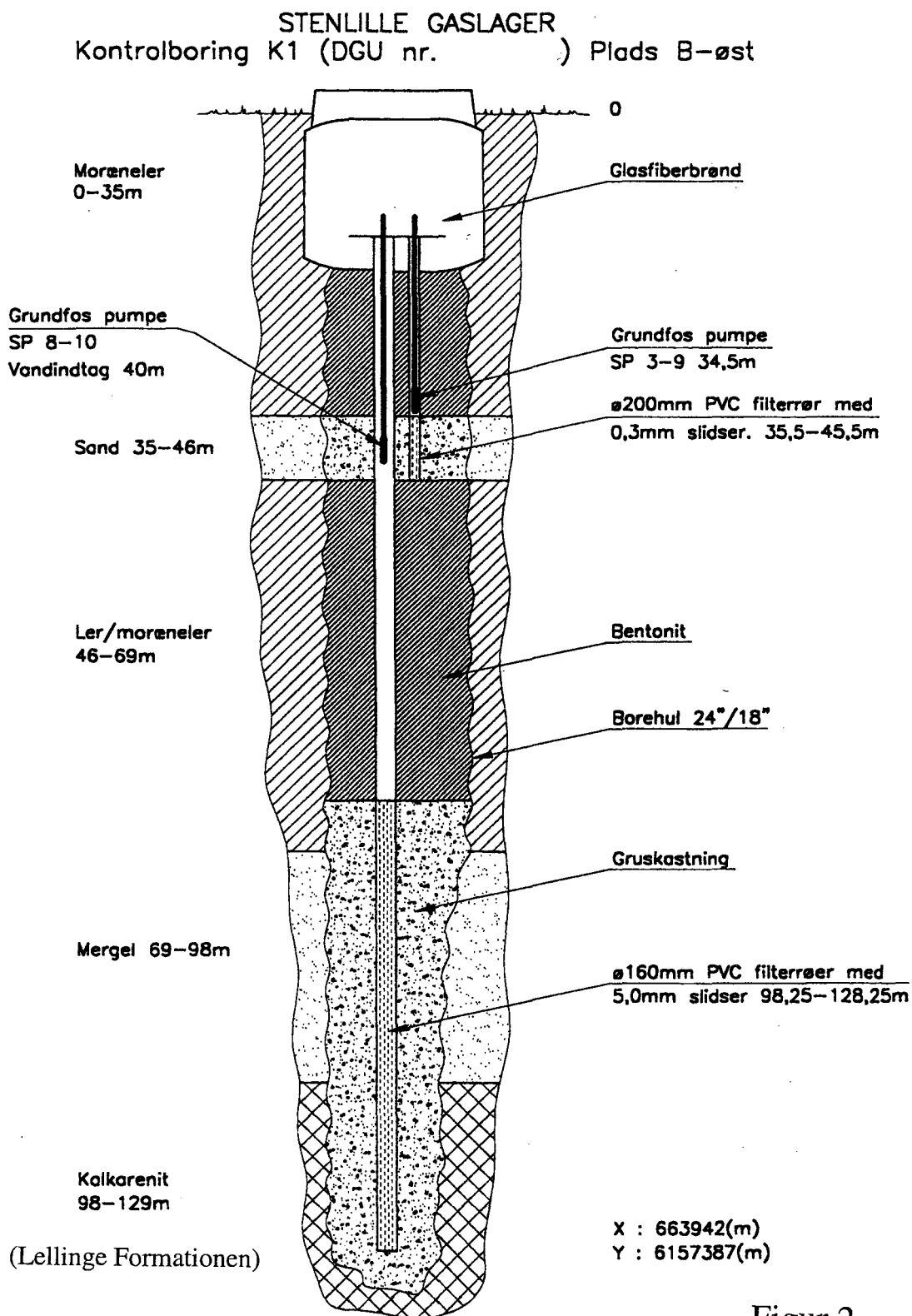
Boringsdata

borerør 6.1 cm ID
filterdiam. 35,0 cm

GVS 7,59 m u.m.p.

Appendiks 2 – Boretekniske oplysninger om overvågningsboringer

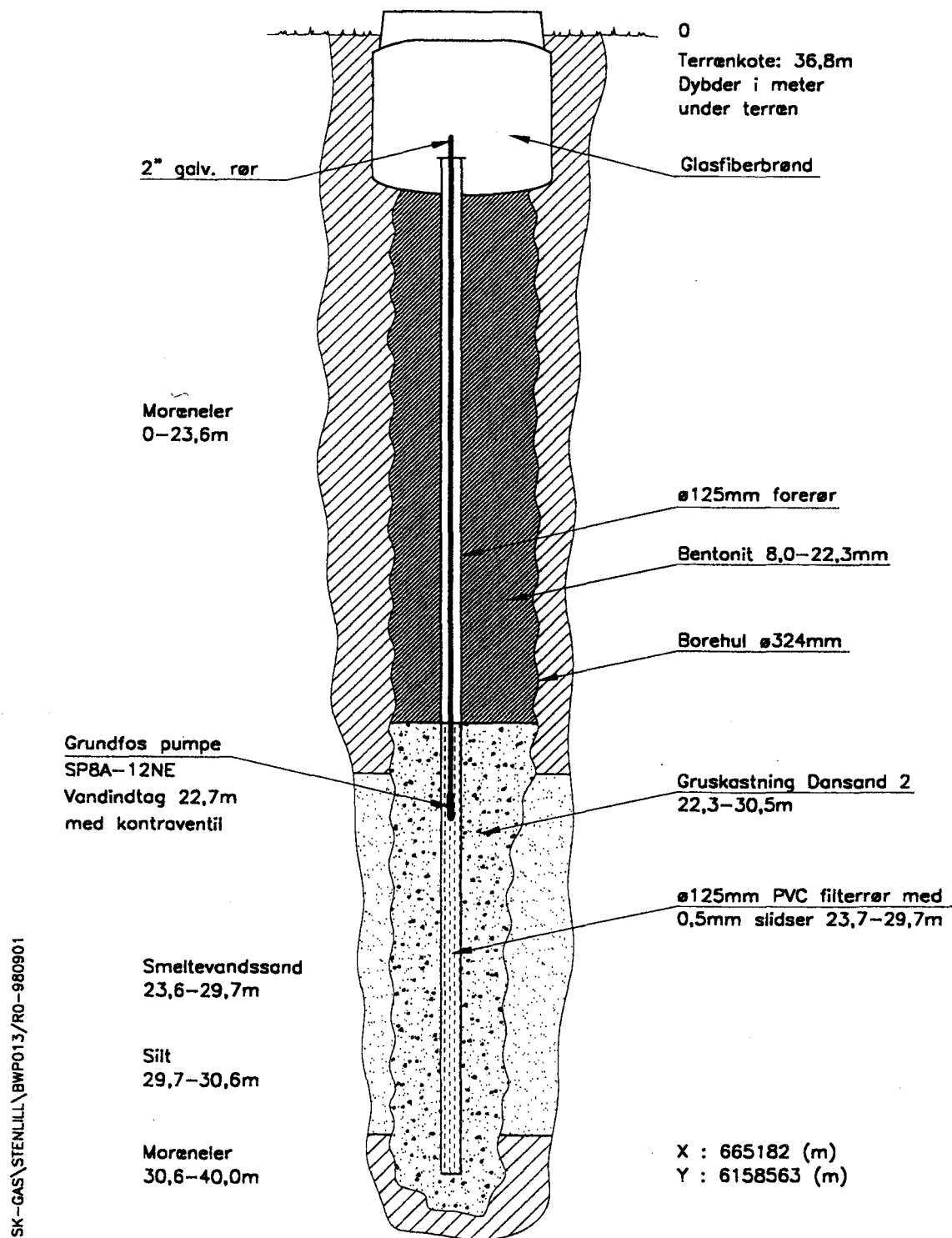
5.1 Kontrolboring K1. Plads B-Øst



Figur 2

5.3 Kontrolboring K3. Plads A

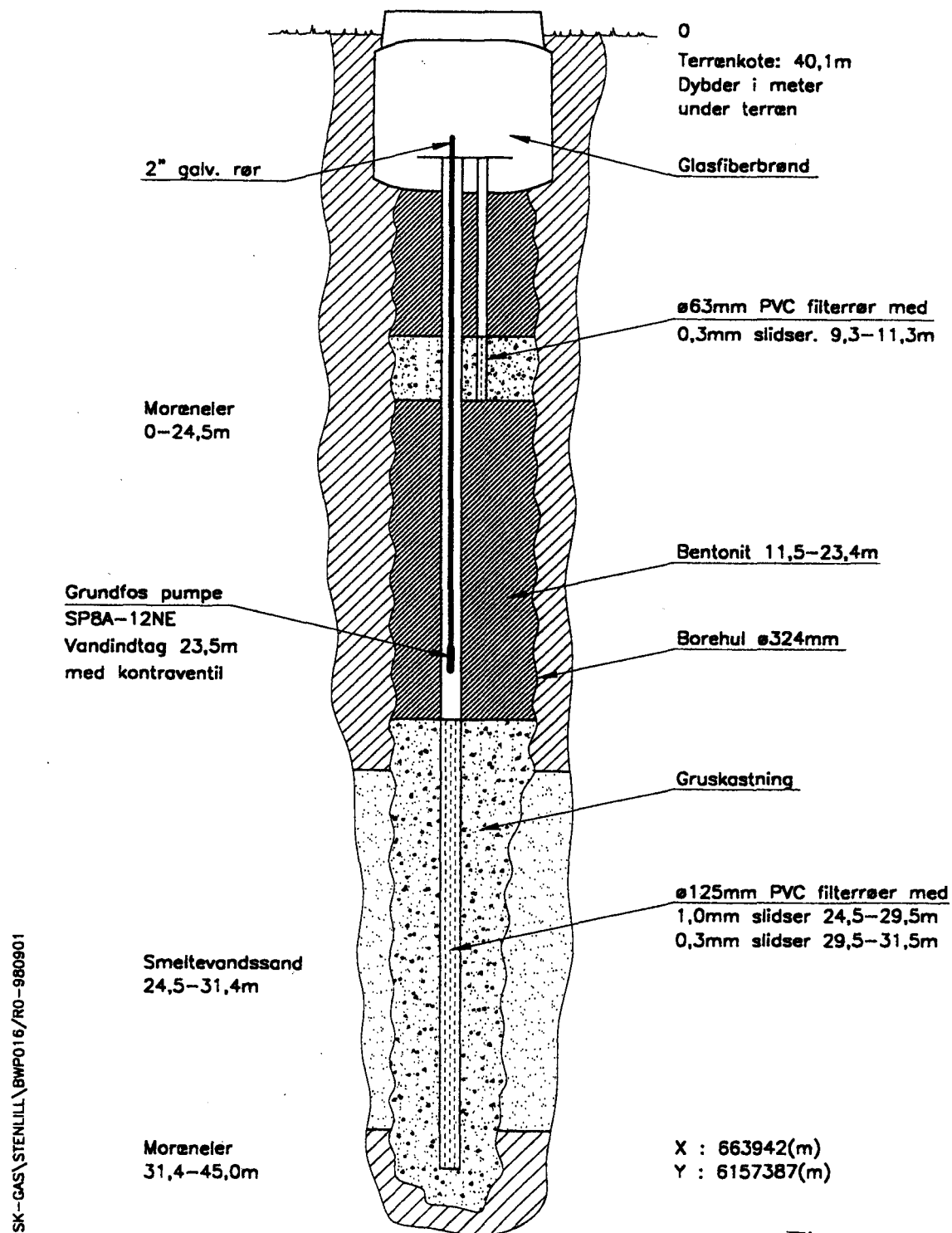
STENLILLE GASLAGER Kontrolboring K3 (DGU nr.205.649) Plads A



Figur 4

5.4 Kontrolboring K4. Plads D

STENLILLE GASLAGER
Kontrolboring K4 (DGU nr.211.597) Plads D



Figur 5