

UNDERSVINGSSERIE

# Udvidet geologi og Grundvand

5

# Registreringsblad

**Udgiver:**

Miljø- og Energiministeriet. Miljøstyrelsen  
Strandgade 29, 1401 København K  
telefon 3266 0100 – telefax 3266 0479  
Internet <http://www.mst.dk>

Udgivelsen er støttet af Vandfonden

**Udgivelsesår:** 2001

**Titel:** Udvidet geologi og grundvand

**Forfatter(e):** Bach, Jørgen; Rikskov, Ulrik; Gravesen, Preben

**Foto:** Fie Johansen/BAM

**Resumé:** Denne bog er en håndbog og et undervisningsmateriale. Den er en håndbog for alle der udfører boringer på land: Geologer, ingeniører, brøndborere m.fl. Bogen er også undervisningsmateriale til Brøndboreruddannelsen – en uddannelse for alle der foretager boringer på land.

I serien om udførelse af boringer på land findes i alt seks bøger. Denne bog er den femte i rækken og indeholder afsnit om grundvandskemi, grundvandssænkning, geofysiske metoder og borehulsmålinger.

**Emneord:** grundvand; boringer; lærebøger

**Andre oplysninger:**

En del af en serie om boringer på land, der består af 6 håndbøger. Udover denne publikation består serien af: "Grundlæggende geologi og grundvand (Miljøstyrelsen, 2001), "Boringer" (Miljøstyrelsen, 2001), "Kort, nivellering og arbejdsmiljø" (Miljøstyrelsen, 2001), "Maskinteknik" (Miljøstyrelsen, 2001) og "Vandforsyningsteknik og regler" (Miljøstyrelsen, 2001).

Genoptryk af Kapitel 2, 4 og 6 i undervisningsmaterialet "Udførelse af boringer på land, Håndbog og undervisningsmateriale til brøndboreruddannelsen 1999" (Danske Vandværkers Forening, 1999).

**Md./år for redaktionens afslutning:** oktober 2001

**Sideantal:** 67

**Format:** A4

**Oplag:** 550

**ISBN:** 87-7944-827-5

**Layout:** Rumfang.dk

**Tryk:** Levinson + Johnson + Johnson a/s

**Papir:** Trykt på 100% genbrugspapir Cyclus

**Pris (inkl. moms):** 70 kr.

Ved køb af alle 6 håndbøger: 420 kr.

**Kan købes i:**

Miljøbutikken  
Læderstræde 1-3  
1201 København K  
telefon 3395 4000  
telefax 3392 7690  
[butik@mem.dk](mailto:butik@mem.dk)

Må citeres med kildeangivelse



Denne tryksag er svanemærket

# **Udvidet geologi og grundvand**

# Registreringsblad

**Udgiver:**

Miljø- og Energiministeriet. Miljøstyrelsen  
Strandgade 29, 1401 København K  
telefon 3266 0100 – telefax 3266 0479  
Internet <http://www.mst.dk>

Udgivelsen er støttet af Vandfonden

**Udgivelsesår:** 2001

**Titel:** Udvidet geologi og grundvand

**Forfatter(e):** Bach, Jørgen; Rikskov, Ulrik; Gravesen, Preben

**Foto:** Fie Johansen/BAM

**Resumé:** Denne bog er en håndbog og et undervisningsmateriale. Den er en håndbog for alle der udfører boringer på land: Geologer, ingeniører, brøndborere m.fl. Bogen er også undervisningsmateriale til Brøndboreruddannelsen – en uddannelse for alle der foretager boringer på land.

I serien om udførelse af boringer på land findes i alt seks bøger. Denne bog er den femte i rækken og indeholder afsnit om grund- vandskemi, grundvandssænkning, geofysiske metoder og borehulsmålinger.

**Emneord:** grundvand; boringer; lærebøger

**Andre oplysninger:**

En del af en serie om boringer på land, der består af 6 håndbøger. Udover denne publikation består serien af: "Grundlæggende geologi og grundvand (Miljøstyrelsen, 2001), "Boringer" (Miljøstyrelsen, 2001), "Kort, nivellering og arbejdsmiljø" (Miljøstyrelsen, 2001), "Maskinteknik" (Miljøstyrelsen, 2001) og "Vandforsyningsteknik og regler" (Miljøstyrelsen, 2001).

Genoptryk af Kapitel 2, 4 og 6 i undervisningsmaterialet "Udførelse af boringer på land, Håndbog og undervisningsmateriale til brøndboreruddannelsen 1999" (Danske Vandværkers Forening, 1999).

**Md./år for redaktionens afslutning:** oktober 2001

**Sideantal:** 67

**Format:** A4

**Oplag:** 550

**ISBN:** 87-7944-827-5

**Layout:** Rumfang.dk

**Tryk:** Levison + Johnsen + Johnsen a/s

**Papir:** Trykt på 100% genbrugspapir Cyclus

**Pris (inkl. moms):** 70 kr.

Ved køb af alle 6 håndbøger: 420 kr.

**Kan købes i:**

Miljøbutikken  
Læderstræde 1-3  
1201 København K  
telefon 3395 4000  
telefax 3392 7690  
[butik@mem.dk](mailto:butik@mem.dk)

Må citeres med kildeangivelse



Denne tryksag er svanemærket

# Indhold

<b>1. Grundvandskemi</b>	<b>6</b>
1.1 Nedbør og grundvandets hovedbestanddele	6
1.2 Forvittringsfronterne	8
1.2.1 Den sure front	8
1.2.2 Vandets hårdhed og alkalinitet	8
1.2.3 Redoxfronten	10
1.2.4 Forvittringsgraden	11
1.2.5 Fronternes opførsel	11
1.3 Grundvandsovervågning	13
1.4 Grundvandets klassifikation	13
1.4.1 De seks hovedklasser	13
1.5 Grundvandets rensning	15
1.6 Spildevand	15
1.7 Miljøfremmede stoffer	15
1.7.1 Pesticider	15
1.7.2 Pesticider og arealanvendelse	16
1.7.3 Organiske mikroforureninger	16
1.8 Vandanalyser	16
1.9 Analyseblanketten	17
1.10 Litteratur	18
<b>2. Grundvandssænkning</b>	<b>28</b>
2.1 Teoretisk introduktion	28
2.2 Problemformulering	30
2.3 Forundersøgelser	31
2.4 Afsænkning ved dræn og pumpe-sumpe	33
2.5 Afsænkning med sugespidsanlæg	33
2.6 Afsænkning ved filterbrønds-anlæg	35
2.6.1 Filterbrønds-anlæg	35
2.6.2 Dimensionering af filterbrønds-anlæg	36
2.7 Filterbrønds-anlæg med vacuum	37
2.8 Sikringsanlæg	38
2.9 Metodevalg	38
2.10 Eksempler	40

2.10.1	Byggegrube i frit reservoir	40
2.10.2	Byggegrube over artesisk reservoir	42
2.10.3	Kloakudgravning i frit reservoir	43
2.11	Litteratur	43
<b>3.</b>	<b>Geofysiske metoder og borehulsmålinger</b>	<b>44</b>
3.1	Geofysiske kortlægningsmetoder	44
3.2	Borehulslogging	44
3.2.1	Logmetoder, som giver geologisk information	45
3.2.2	Logmetoder, som giver teknisk information	56
3.3	Et optimalt undersøgelsesprogram for en enkelt boring?	64
3.4	Hvem kan udføre borehulslogging i Danmark?	64
3.5	Hvad koster loggingundersøgelser?	64
3.6	Hvilke logtyper kunne en brøndborer med fordel selv udføre	65
3.7	Litteratur	65



# 1. Grundvandskemi

Grundvandskvaliteten

Man har i mange år vidst, at grundvandets kemiske sammensætning, *grundvandskvaliteten*, i høj grad bestemmes af de kemiske forhold i grundvandsmagasinerne og i den umættede zone. Nu ved man også, at grundvandets sammensætning kan præges af det mikrobielle liv, som udfolder sig i den mættede og umættede zone. Grundvandskvaliteten har meget stor betydning for, om grundvandet kan anvendes til *drikkevand*. En del af grundvandet i Danmark indeholder fra naturens side en række stoffer, som smager eller lugter grimt, eller som kan have en sundhedsskadelig effekt, hvis indholdet er for stort. Dertil kommer, at grundvandet i løbet af de sidste 30 til 40 år er blevet tilført stoffer, som stammer fra de aktiviteter, der foregår på jordoverfladen. En del af disse stoffer findes ikke i naturen i forvejen og betegnes *miljøskadelige stoffer*.

Miljøskadelige stoffer

## 1.1 Nedbør og grundvandets hovedbestanddele

Nedbøren

Der er stor forskel på den kemiske sammensætning af *nedbøren* og af *grundvandet*. Forskellen er især, at nedbørsvand er mere surt og har meget lavere koncentrationer af opløste stoffer end grundvand.

På sin vej fra overfladen og ned gennem jordlagene reagerer nedbørsvandet med disse, hvorved nogle stoffer opløses, og andre omdannes af kemiske processer for til sidst at ende i grundvandet. Herved ændres både vandets og jordlagenes kemiske sammensætning.

Naturlige kemiske bestanddele

Grundvandets naturlige kemiske hovedbestanddele er en række uorganiske komponenter, men derudover karakteriseres grundvandet ved en række egenskaber afledt af den kemiske sammensætning. Et flertal af de stoffer, der findes i grundvandet, optræder på jon-form. At stofferne optræder på *jon-form* betyder, at de ved kemiske reaktioner med vandet eller andre stoffer enten har mistet en eller flere elektroner, eller at de har fået en eller flere elektroner. Det rent praktiske resultat er, at stoffet, når det er på jon-form, ikke er elektrisk neutralt, men optræder som enten positivt eller negativt ladet, og dermed vil kunne tiltrække andre joner med den modsatte ladning og frastøde joner med den samme ladning – fuldstændig som det kendes fra magneter. I vandet vil der være nogenlunde lige mange positivt og negativt ladede joner, så vandet vil være elektrisk neutralt.

Hovedkomponenter og sporstoffer

Stofferne i grundvandet opdeles ofte i kategorierne *hovedkomponenter* og *sporstoffer*. Ordet hovedkomponenter anvendes om stoffer, der forekommer i koncentrationer på eller over 1 milligram pr. liter (mg/l), mens sporstoffer anvendes om stoffer, der forekommer i små mængder, under 1 mg/l. Nogle stoffer, som fx strontium forekommer sommetider som hovedkomponent og sommetider som sporstof.

Til hovedkomponenterne regnes også målinger af luftarter, som forekommer i vandet, og målinger af nogle overordnede egenskaber ved vandet.

På **Figur 1** ses en oversigt over komponenter og karakterer.

Danmark har fugtige klimaforhold, hvilket bl.a. betyder, at nedbøren er større end fordampningen. De øverste jordlag er derfor udsat for en stadig gennemsivning af vand, som udover udvaskning af opløselige stoffer medfører en gradvis forsuring og oxidation (iltning) af de øverste jordlag. *Udvaskning*, *forsuring* og *oxidation* benævnes under et som forvitring.



“Stofnavn”		Kemisk udtryk	Egenskab
Surhedsgrad	egenskab	pH	Syrestyrke
Konduktivitet	egenskab	–	elektrisk ledningsevne
Inddampningsrest	fast stof	–	vandets indhold af salte og andre faste stoffer
Calcium	pos. jon	Ca <sup>++</sup>	
Magnesium	pos. jon	Mg <sup>++</sup>	
Kalium	pos. Jon	K <sup>+</sup>	
Natrium	pos. Jon	Na <sup>+</sup>	
Klorid	neg. Jon	Cl <sup>-</sup>	
Sulfat	neg. Jon	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	
Carbonat	neg. Jon	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	
Bikarbonat			
Hydrogencarbonat	neg. Jon	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Nitrat	neg. Jon	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Nitrit	neg. Jon	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
Ammonium	pos. Jon	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
Fosfat, total	neg. Jon		
Ortho-fosfat	neg. Jon	PO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	
Fluorid	neg. Jon	F <sup>-</sup>	
Ilt			
Oxygen	luftart	O <sub>2</sub>	
Kuldioxid			
Carbondioxid	luftart	CO <sub>2</sub>	
Aggressiv kuldioxid	egenskab		
Svovlbrinte	luftart	H <sub>2</sub> S	
Hydrogensulfid	neg. Jon	HS <sup>-</sup>	
Methan	luftart	CH <sub>4</sub>	
Permanganattal	egenskab		
Jern	pos. Jon	Fe <sup>++</sup> og Fe <sup>+++</sup>	
Mangan	pos. Jon	Mn <sup>++</sup>	
Chlor, total			
Chlor, frit			
Chlor, bunden			
Alkalinitet, total TA			
Alkalinitet, phenolphthalin PA			
Hårdhed total	egenskab		
Hårdhed permanent	egenskab		
Hårdhed, carbonat	egenskab		
Kalkfældning	egenskab		
Natriumhydrogen-karbonat	salt	NaHCO <sub>3</sub>	
Kiselsyre	salt	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	
Restaktivitet			

Figur 1  
Grundvandets hovedkomponenter og deres egenskaber.

## 1.2 Forvittringsfronterne

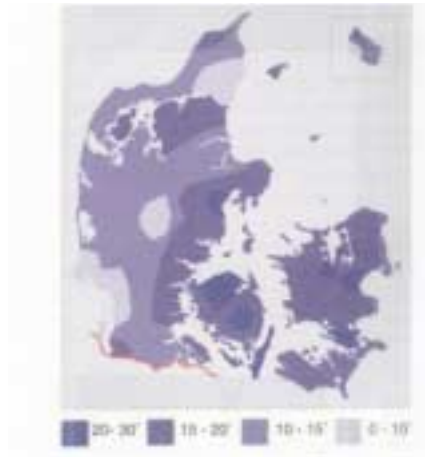
Fronter	Forsuringen og oxidationen bevæger sig nedefter gennem jordlagene som "fronter", der egentlig er grænseflader mellem forskellige kemiske miljøer. Fordi fronterne dannes som følge af forsuring og oxidation, omtales de ofte som hhv. "Den sure front" og "Redoxfronten". Forsuring og oxidation skyldes primært naturlige forhold, men kan også påvirkes af menneskelig aktivitet.
Forsuring	Den naturlige forsuring, som hovedsagelig skyldes <i>kuldioxidholdigt</i> vand ("kulsyre"), er flere gange større end den menneskeskabte. Den menneskeskabte forsuring skyldes fx forurening af luften med svovl- og kvælstofforbindelser og jordbrugets anvendelse af kvælstofgødninger. Oxidation af svovl- og kvælstofforbindelser medfører dannelse af de stærke uorganiske syrer svovlsyre og salpetersyre, der kan føre til ekstremt sure forhold (dvs. pH mindre end ca. 4,5).
Sænkning af grundvandspejlet	En særlig type menneskeskabt forsuring skyldes sænkning af grundvandspejlet i jordlag, der indeholder reducerede svovlforbindelser især <i>pyrit</i> ( $\text{FeS}_2$ ). Når luftens ilt får adgang til de tidligere vandmættede jordlag, fx ved for stor vandindvinding, oxideres pyriten, hvorved der dannes svovlsyre og jernsulfat. Samtidigt kan der ske en frigørelse af giftige tungmetaller (fx nikkel, bly og arsen), der kan være bundet i pyriten. Pyritoxidation ved sænkning af grundvandsstanden kan lokalt medføre en forsuring, som er større end både den naturlige og den forureningsbetingede forsuring. Sådanne forhold kendes fx i de vestjyske brunkulsområder.
Oxidation	Oxidationen af de øverste jordlag skyldes nedtrængning af atmosfærens ilt i den umættede zone samt opløst ilt og nitrat i det nedsivende vand. Indholdet af opløst ilt i det nedsivende vand er af samme størrelsesorden både under skov- og naturarealer og under dyrkede arealer. Derimod er nitratindholdet meget større i det nedsivende vand fra dyrkede arealer. Mængden af oxiderende stoffer er ca. fem gange så stort i det nedsivende vand fra dyrkede arealer som fra tilsvarende skov- og naturarealer.

### 1.2.1 Den sure front

Kalk og forsuring	Store dele af Danmarks undergrund består af kalk, kridt og andre kalkholdige bjergarter. Desuden indeholder de øverste jordlag i de unge morænelandskaber nord og øst for sidste istids <i>hovedopholdslinie</i> oftest kalk (calciumkarbonat), som er løst af isen fra de underliggende kalkbjergarter og indlejret i istidslagene. Menneskelige aktiviteter har i de seneste 500 år medført en stigning i forsuring og oxidation af de øverste jordlag. Men disse aktiviteters betydning for dybden til beligheden af den sure front og redoxfronten er dog ringe. Jordlagene har nemlig været udsat for den naturlige forvitring i ca. 10.000 år siden sidste istid (Weichsel) i de unge landskaber nord og øst for sidste istids hovedopholdslinie, og yderligere i 100.000 år siden den sidste interglacialtid (Eem) på bakkeøerne i det vestlige Jylland. Det er forvitringen gennem disse lange tidsrum, der er hovedårsagen til de nuværende dybder af forvittringsfronterne.
-------------------	--

### 1.2.2 Vandets hårdhed og alkalinitet

Hårdhed og hårdhedsgrad	Det nedsivende regnvand og smeltevand fra sne optager kuldioxid fra atmosfæren og især fra jordluften i rodzonen, hvorved der dannes "kulsyre". Kulsyren kan foruden kalk opløse <i>magnesiumcarbonat</i> , der findes i mindre mængder i kalken. Kalkudvaskningen tilfører derfor grundvandet calcium og magnesium. Grundvandets totale
-------------------------	--

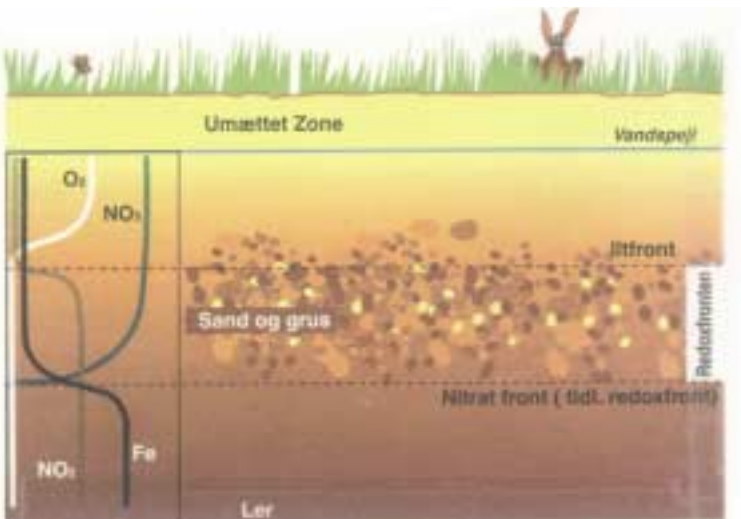


Figur 2  
Oversigtskort over hårdhedsgrader i Danmarks drikkevand.



Figur 3  
Eksempel på en af de vigtigste redox-processer i jordlagene.

Processen mod højre viser iltning af det blå ferrojern ( $\text{Fe}^{2+}$ ) til det røde ferrijern ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Iltningen foregår ved, at der afgives en elektron ( $e^-$ ), hvorved ladningen stiger fra 2+ til 3+. Processen mod venstre viser reduktion af det røde ferrijern til det blå ferrojern. Reduktionen foregår ved, at der optages en elektron, hvorved ladningen falder fra 3+ til 2+.



Figur 4  
Grundvandskemisk model fra det vestlige Danmark, der angiver udviklingen af redoxfronten.

indhold af opløst calcium og magnesium betegnes som *hårdheden*, idet en *hårdhedsgrad* svarer til 10 mg opløst calciumoxid pr. liter, eller ca. 5 mg opløst magnesiumoxid pr. liter (Figur 2).

Ved opløsningsprocesserne tilføres grundvandet samtidig tilsvarende mængder af *bikarbonat* ( $\text{HCO}_3^-$ ). Koncentrationen heraf benævnes grundvandets *alkalinitet*. Den del af hårdheden, der svarer til alkaliniteten, betegnes som *karbonathårdheden* eller den "*forbigående hårdhed*", som forsvinder ved kogning. Den overskydende hårdhed

Alkalinitet  
Forbigående hårdhed,  
blivende hårdhed og  
aggressiv kulsyre

betegnes som den “blivende hårdhed”. Eventuel overskydende kulsyre betegnes som *aggressiv kulsyre*.

Den totale hårdhed er med til at bestemme *grundvandets hovedklasse*, og en høj hårdhedsgrad er karakteristisk for grundvand i kalkholdige jorder.

En høj andel af blivende hårdhed afspejler en stærk forsuringpåvirkning (høj forvittringsgrad), som kan findes i grundvand fra såvel kalkholdige som kalkfrie jorde.

### 1.2.3 Redoxfronten

Redoxprocesser	<p><i>Oxidations-</i> og <i>reduktionsprocesser</i> betegnes under et som <i>redoxprocesser</i>. En redoxproces er egentlig en overførsel af elektroner fra et reducerende stof (elektron donor) til et oxiderende stof (elektron acceptor) (<b>Figur 3</b>). Ved oxidation af kulstof (C) med ilt til kuldioxid (CO<sub>2</sub>) overføres der eksempelvis 4 elektroner fra kulstofatomet til de to iltatomer, således at den elektrisk neutrale kuldioxid kan opfattes som en kemisk forbindelse af C<sup>4+</sup> og 2 O<sup>2-</sup>. De to stoffer, som deltager i processen, kaldes under et for et redoxpar.</p>
Ilt og nitrat	<p>De vigtigste oxiderende stoffer i de øverste jordlag er <i>ilt</i> og <i>nitrat</i>. De er i stand til at oxidere en række reducerende stoffer som fx organisk stof, reducerede svovlforbindelser, reducerede kvælstofforbindelser og reducerede jernforbindelser (ferrojern). Efterhånden som de reducerende stoffer i de øverste jordlag opbruges, bliver der overskud af oxiderende stoffer (<b>Figur 4</b>).</p>
Redoxpotentialet	<p>Jordlagenes mulighed for at oxidere hhv. reducere betegnes som redoxpotentialet. I princippet falder <i>redoxpotentialet</i> med dybden i såvel jordlag som grundvandsmagasiner. Når redoxpotentialet bliver lavere, kan flere kemiske forbindelser få betydning som oxiderende stoffer. I grundvandsmagasiner med meget lavt redoxpotentiale optræder fx sulfat som et oxiderende stof i en redoxproces med fx metan eller organisk stof. Ved denne proces reduceres sulfat til sulfider eller frit svovl, og metan eller organisk kulstof oxideres til kuldioxid. Processen kaldes normalt <i>sulfatreduktion</i>, og afspejler sig i grundvandskvaliteten som meget lave sulfatkoncentrationer i de dybe, reducerede dele af grundvandsmagasinerne.</p>
Stoffers tilstandsform	<p>Redoxpotentialet i grundvandsmagasinerne bestemmer mange stoffers tilstandsform. I den øverste oxiderede del af grundvandszonen, hvor der kan være højt redoxpotentiale, kan vandet indeholde opløst ilt, og kvælstof kan optræde som opløst nitrat. I dette niveau vil jern og mangan findes som henholdsvis røde eller rødbrune ferri- og sorte manganforbindelser, der ikke er opløselige ved de pH-værdier (surhedsgrader), som er normale for grundvand.</p> <p>Dybere nede, med lavere redoxpotentiale, indeholder grundvandet ikke opløst ilt, og kvælstof kan ikke optræde som nitrat, men vil i stedet kunne findes i grundvandet i reduceret form som luftformigt kvælstof eller som ammonium eller ammoniak. I dette niveau vil jern og mangan findes som reducerede blå ferro- og manganforbindelser. Da jern og mangan er lettere opløseligt i den reducerede form, vil grundvandet indeholde noget opløst jern og mangan.</p>
Rensning	<p>Når grundvand af denne type pumpes op fra vandværkernes indvindingsboringer, skal det renses for jern og mangan, og rensningen består netop i en beluftning og dermed “iltning”, hvorved jern og mangan omdannes til den oxiderede form, der udfældes og frafiltreres som okker ved hjælp af et grusfilter. I naturen kan man se processen, hvor reduceret grundvand træder frem som kilder, der udskiller okker.</p> <p>Redoxprocesserne kan, som omtalt ovenfor, være stærkt forsurrende, fx ved oxidation af reducerede svovl- og kvælstofforbindelser til sulfater og nitrater i de øverste jordlag.</p>

## 1.2.4 Forvittringsgraden

Sålænge *kalkudvaskningen* kun er en opløsning af kalk med kuldioxidholdigt vand, vil der være ligevægt mellem grundvandets hårdhed og alkalinitet [milliækvivalenter ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^-$ ) = 1]. *Forvittringsgraden* er defineret som forholdet mellem hårdhed og alkalinitet og er (sammen med den totale hårdhed) med til at bestemme grundvandets hovedklasse. Eksempelvis afspejler en forvittringsgrad på 1 en grundvandstype, som er et resultat af udvaskning af kalkholdige jordlag med kulsyreholdigt vand (svagt forvittringspræget).

Forvittringsgrad

Når alt kalk er udvasket fra jordlagene af det nedsivende vand, sker der en forsurening, som medfører opløsning af calcium og magnesium fra lerminerale og andre silikater. Denne forsurening medfører yderligere forøgelse af grundvandets hårdhed, men uden en samtidig forøgelse af alkaliniteten.

Forholdet mellem grundvandets hårdhed og alkalinitet forøges dermed [milliækvivalenter ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^- > 1$ )]. Forvittringsgraden bliver altså større end 1 og afspejler dermed en grundvandstype, som er stærkere forvittringspræget.

På tilsvarende måde ændres forholdet mellem hårdhed og alkalinitet, hvis der produceres uorganiske syrer i kalkholdige jordlag, fx ved oxidation af pyrit, hvorved der som nævnt dannes svovlsyre. Ved opløsning af calciumkarbonat med svovlsyre ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) bliver kun halvdelen af karbonaten omdannet til bikarbonat (med deraf følgende formindskelse af alkaliniteten), medens den anden halvdel forsvinder som kuldioxid ( $\text{CO}_2$ ) og vand ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Kalken opløses altså i lige store dele calciumbikarbonat [ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ] og calciumsulfat ( $\text{CaSO}_4$ ). Dette medfører, at forvittringsgraden bliver større end 1, og at grundvandet bliver stærkere forvittringspræget.

Syredannelse

## 1.2.5 Fronternes opførsel

Den sure front og redoxfronten (forvittringsfronterne) vil under naturlige forhold bevæge sig gradvist nedad, efterhånden som forvittringen har omdannet de øverste jordlag. Forvittringsprocessens fremadskriden kan ses som en fuldstændig udvaskning af kalk fra de øverste jordlag, og som omdannelse af de blå reducerede jernforbindelser til røde oxiderede jernforbindelser (rødler og rustfarvet sand).

Fronternes bevægelse

Hastigheden, hvormed fronterne skrider frem, bestemmes dels af forvittringstrykket (som er størrelsen af nettonedbøren, der bestemmer mængden af det nedsivende vand, samt koncentrationen af forsurende og oxiderende stoffer i vandet) og dels af jordlagenes modstandsevne (resistens) mod forvittring, der overvejende er bestemt af indholdet af kalk og reducerende stoffer.

Hastighed

I sandede områder, som fx i det sydvestlige Jylland, er nettonedbøren stor, og de sandede jordlag har oprindeligt kun haft et lavt indhold af kalk og reducerende stoffer. I disse sandede områder er kalken udvasket til langt under grundvandsspejlet, og nitrat- og iltholdigt grundvand er ofte trængt ned til stor dybde (> 10 m under grundvandsspejlet).

Sandområder

I morænelersområderne på øerne og i Østjylland er nettonedbøren oftest forholdsvis lav, og morænelerslagene indeholder betydelige kalkmængder og reducerede jernforbindelser i lerminerale. I disse områder er kalkudvaskningen ofte kun trængt 1-2 m ned under terræn og sjældent ned til grundvandsspejlet. Redoxfronten vil typisk ligge 3-8 m under terræn, således at grundvandet i dybere liggende magasiner normalt er nitratfrit.

Morænelersområder

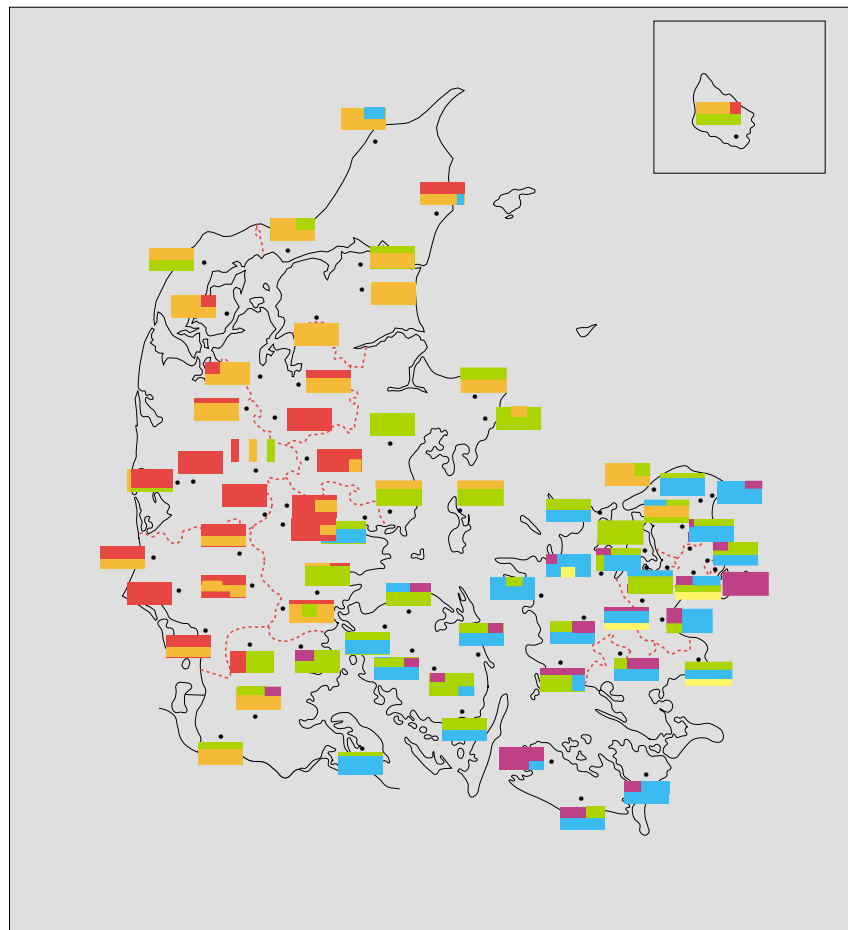
De omtalte områder repræsenterer hver sin ende af forvittringsskalaen. I mange egne kan der være tale om varierende geologiske forhold, som repræsenterer forskel-

Særlige forhold

Figur 5  
Klassifikation af det danske grundvand.

Klasse	Total Hårdhed	Forvittringsgrad	Benævnelse
A	5,27°	3,19	Blødt forvittringsgrundvand
B	11,0°	1,39	Middelhård grundvand
C	25,3°	1,44	Meget hårdt forvittringsgrundvand
D	18,3°	1,43	Hårdt forvittringsgrundvand
E	16,7°	1,02	Hårdt grundvand
F	18,5°	0,84	Ionbyttet grundvand

Figur 6  
Fordelingen af grundvandet hovedklasser indenfor grundvandsovervågningsområderne. Hovedklasserne er angivet med farve, sådan at de viser det omtrentlige indbyrdes mængdeforhold (farveskala Figur 5).



lige forvittringssituationer. Særlige forhold findes endvidere fx på Djursland og i egne omkring Limfjorden, hvor undergrundslag af kalk og kridt næsten når helt op til rodzonelaget. Kalken i disse områder udgør en stødpude mod forsuring, og den sure front har derfor ikke nået grundvandet i disse egne. Da kalken kun har et ubetydeligt indhold af reducerende stoffer, kan redoxfrontens nedtrængning ses ved udbredt forekomst af nitratholdigt grundvand til stor dybde. Modsat kan kalkfattige jorde med et højt indhold af organisk stof (fx tørvejord) have stor resistens mod oxidation, men ringe modstandskraft mod forsuring.

#### Perspektiv

Nedtrængningen af forvittringsfronterne fortsætter ikke ud i al fremtid. Den vil forløbe langsommere og langsommere og til sidst gå helt i stå. Årsagen er, at grundvandet strømningsmønster vil medføre, at en større og større andel af det afstrømmende vand vil passere allerede forvitrede lag undervejs til vandløbene, efterhånden som fronterne når dybere ned i grundvandsmagasinerne.

## 1.3 Grundvandsovervågning

Der er i de senere år sket alvorlige forringelser af grundvandskvaliteten. Det kan få ubehagelige konsekvenser for drikkevandet, vandløbene og havet. For at kunne holde øje med de forandringer, der sker med grundvandets kemiske sammensætning, blev der i forbindelse med den store *Vandmiljøhandlingsplan* iværksat et såkaldt *grundvandsovervågningsprogram*. De første spinkle resultater af dette program forelå i 1989, og siden er der årligt udført ca. 25.000 kemiske analyser fordelt på ca. 80 forskellige stoffer. Ved bearbejdelse af alle disse analyser er det danske grundvand blevet inddelt i *seks hovedklasser* ud fra det kemiske særpræg.

Det grundvand, som analyseres i grundvandsovervågningsprogrammet, stammer hovedsageligt fra landbrugsarealer og områder i nærheden af de store byer. Der indgår kun få naturområder og skovområder. Derfor kan det tænkes, at der eksisterer flere end seks hovedklasser. Hovedklasserne passer dog så godt sammen med tidligere klassifikationer og dækker så stor en del af det grundvand, der anvendes til drikkevand, at de kan benyttes til en generel beskrivelse af det meste af det danske grundvand. De seks hovedklasser dækker tilsammen det ferske grundvand. Salt grundvand er holdt uden for denne klassifikation.

Grundvandsovervågning

Grundvandets hovedklasser

## 1.4 Grundvandets klassifikation

Opdelingen af grundvandet i hovedklasser er en forenkling, som ikke dækker alle lokale variationer i grundvandets kemiske sammensætning. Til gengæld giver en sådan opdeling mulighed for et landsdækkende overblik over hovedtrækkene i grundvandets sårbarhed overfor forskellige miljøpåvirkninger. Et sådant overblik er nødvendigt som baggrund for en vurdering af forskellige tiltags egnethed til at beskytte grundvandet mod forurening fra overfladen eller andre forhold, som kan forringe grundvandskvaliteten, fx en for stor vandindvinding.

Opdeling

### 1.4.1 De seks hovedklasser

Opdelingen i hovedklasser er baseret på en statistisk sammenligning af koncentrationerne af aggressiv kulsyre, sulfat, klorid, magnesium, calcium, og bikarbonat og forholdet mellem disse. En vurdering af fordelingen i seks hovedklasser har vist, at det især er grundvandets gennemsnitlige totale hårdhed og dets forvitningsgrad (forholdet mellem hårdheden og alkaliniteten), som har været afgørende for i hvilken hovedklasse, det analyserede grundvand falder. Det er derfor også disse to begreber, der har været anvendt til at karakterisere de seks hovedklasser, som er vist på **Figur 5**.

Baggrund for hovedklasser

Hovedklasse A er udbredt i den øverste del af grundvandsmagasinerne i de sandede egne i det vestlige Jylland. Grundvandet i klasse A er blødt, fordi bjergarterne i magasinerne er kalkfrie. Grundvandet er stærkt forvitningspræget, da forsurenningen er markant i de øverste jordlag i området. Af samme grund har grundvandet som hovedregel høje koncentrationer af aggressiv kulsyre. Endvidere indeholder grundvand i klasse A som hovedregel opløst ilt og nitrat.

Hovedklasse A

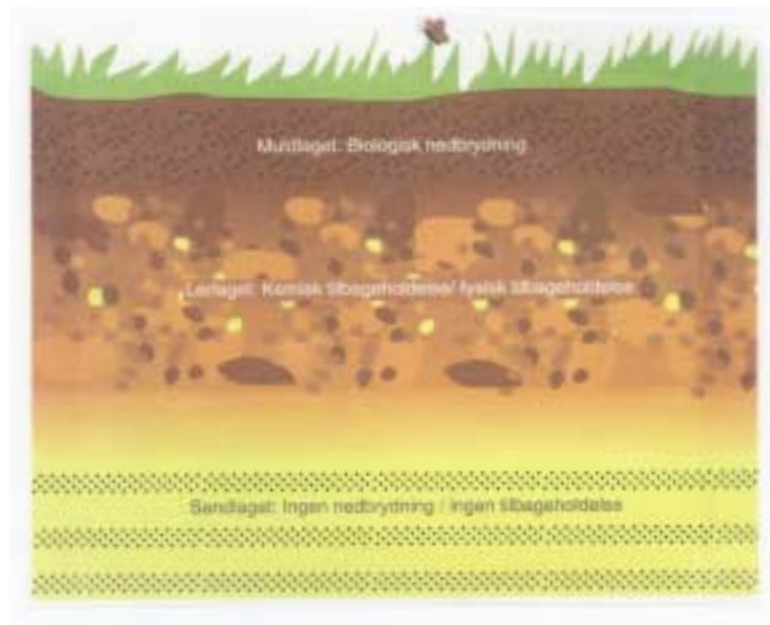
Hovedklasse B findes i de dybere dele af grundvandsmagasinerne i de samme egne som A, og er desuden udbredt over større dele af Jylland og i sandede områder på Nordsjælland. Grundvandet i klasse B er middelhårdt, fordi bjergarterne i magasinerne er kalkfattige, men hovedklassen er i langt mindre grad præget af forvitring end grundvand i klasse A.

Hovedklasse B

Hovedklasse C forekommer i de øverste grundvandsmagasiner i egne med kalk-

Hovedklasse C

Figur 7  
 Model for den naturlige  
 rensningsproces, der  
 finder sted i jordlagene.



holdigt moræneler, typisk på øerne. Grundvand af hovedklasse C er et resultat af oxidation af pyritholdige jordlag, fx som følge af periodisk sænkning af grundvandspejlet. Forvittringspåvirkningen har normalt ikke ført til surt og oxideret grundvand med aggressiv kulsyre og nitrat, fordi de kalkholdige lerjorder har stor resistens mod forurening og oxidation, men har i stedet medført, at grundvandet er meget hårdt med en relativ stor andel af blivende hårdhed.

Hovedklasse D

Hovedklasse D findes udbredt i de øvre grundvandsmagasiner i egne med kalkholdigt moræneler i det østlige Jylland og på øerne. Grundvand af hovedklasse D er hårdt og præget af forvitring, men i mindre grad end hovedklasse C.

Hovedklasse E

Hovedklasse E findes udbredt i de dybe grundvandsmagasiner i egne med kalkholdigt moræneler på øerne. Grundvand af denne klasse er hårdt, fordi det er præget af de kalkholdige bjergarter i magasinerne, men er næsten upåvirket af forvitring fra overfladen.

Hovedklasse F

Hovedklasse F findes især i de dybe grundvandsmagasiner i de centrale dele af Sjælland, men kan dog forekomme lokalt andre steder, hvor der er marine sedimenter i grundvandszonen. Grundvandet er præget af jonbytning, idet en del af grundvandets opløste calcium og magnesium er ombyttet med natrium.

Marint ler

Marint ler har overvejende natriumjoner bundet til lerkolloiderne (lerpartikler). Når ferskvand med opløst calcium- og magnesiumbikarbonat kommer i kontakt med det marine ler, fx efter en landhævning, vil en del af det ferske grundvands calcium- og magnesiumjoner blive ombyttet med natriumjoner, medens indholdet af bikarbonat ikke berøres. Grundvandet får derved et indhold af natriumbikarbonat, og forvittringsgraden bliver mindre end 1.

De seks hovedklasser afspejler således en række meget komplekse sammenhænge mellem den geologiske opbygning, klimaet, arealanvendelsen og de hydrauliske forhold. Blandt hovedklasserne vurderes det, at hovedklasse A og C er stærkest påvirket af samfundsmæssige aktiviteter (**Figur 6**).



## 1.5 Grundvandets rensning

Den ændring, der sker i den kemiske sammensætning af vand, som siver ned gennem jorden til grundvandsmagasinet, har også en rensende virkning på nedsivende forurenede vand. Er vandringsvejen til en indvindingsboring for kort, gennemgår det forurenede vand ikke i tilstrækkelig grad en naturlig rensning. Øverst i jorden bearbejder muldlagets rige biologiske aktivitet de fleste organiske urenheder fra regn- og overfladevandet. De fleste tungmetaller og radioaktivt støv bindes også i overfladejorden, så forureningen ikke når grundvandet. Længere nede i jorden filtreres det meste af resten af de opløste skadelige stoffer fra. Her kan biologisk aktivitet også nedbryde stoffer som nitrat. Smittekim nedbrydes ligeledes på vandets vej gennem jorden. Ler og brunkulslag i undergrunden er særligt gode til at tilbageholde og forsinke forurening på vej til grundvandet.

Jordens rensningsanlæg kan dog ikke klare alt, og forureninger er trængt dybt ned mange steder (Figur 7).

Naturlig rensning

## 1.6 Spildevand

I Danmark er ansvaret for bortskaffelse og rensning af *spildevand* lagt ud til amterne. Den største del af spildevandet afledes gennem lukkede rørsystemer til rensningsanlæg. Rensningsanlæggene er af vidt forskellig konstruktion og udleder rensset spildevand med stærkt varierende kemisk sammensætning. Udledningen sker til vandløb, søer og havet.

Et afledt forureningsproblem af rensningsanlæggenes drift er bortskaffelsen af *spildevandsslam*. Det indeholder store mængder organisk materiale, kvælstof- og fosforforbindelser og bliver derfor i en del tilfælde anvendt som jordforbedringsmiddel ved udspreddning på dyrkede jorde. Men spildevandsslam kan indeholde så store mængder tungmetaller, at det kan blive et problem for anvendeligheden af afgrøder, der optager tungmetallerne. Fx kan tungmetalindholdet i brødkorn stige til uacceptable koncentrationer. Det kan også frygtes, at tungmetalindholdet i det udsprede spildevandsslam på længere sigt kan nedvaskes til grundvandet. Her er der med andre ord risiko for at få etableret et uhensigtsmæssig kredsløb.

Rensningsanlæg

Spildevandsslam

## 1.7 Miljøfremmede stoffer

Udviklingen inden for den kemiske industri har medført, at der i dag anvendes en lang række naturfremmede stoffer såvel indenfor jordbruget som i industrien og husholdningen. I grundvandsovervågningsprogrammet analyseres der for en række af disse stoffer såvel i overvågningsområderne som i de større vandværkers forsyningsboringer, de såkaldte råvandsundersøgelser.

Overvågning

### 1.7.1 Pesticider

I overvågningsprogrammet er der i perioden 1990-1995 blevet analyseret for otte *pesticider*. Det er alle herbicider, det vil sige ukrudtsbekæmpelsesmidler. Disse otte, der omfatter fenoxysyrerne Diklorprop, Meklorprop, MCPA og 2,4-D, triazinerne Atrazin og Simazin, samt fenolmidlerne Dinoseb og DNOC, er udvalgt blandt flere hundrede anvendte stoffer, fordi de har været anvendt hyppigt gennem en lang årrække og anses for at være relativt mobile.

Otte pesticider

Der er analyseret for pesticider i 976 filtre. Filtrene er blevet undersøgt 2.870

Fund i grundvandet

gange, og der er påvist pesticider en eller flere gange i 100 filtre svarende til 10%. *Grænseværdien* for indhold af pesticider i drikkevand er overskredet i grundvandet i 2,9 % af de undersøgte boringer. Påvisningsprocenten på 10% er af samme størrelse, som den, der er fundet ved udenlandske undersøgelser.

Herudover er der indtil efteråret 1995 påvist pesticider i grundvand fra 235 boringer svarende til 8,4 % af de undersøgte vandværksboringer, og i 3,6 % af de 2.798 undersøgte boringer overskrider pesticidindholdet i grundvandet de fastsatte grænseværdier for indhold i drikkevand. Det kan således frygtes, at pesticider i grundvandet kan udgøre et problem for drikkevandsforsyningen.

## 1.7.2 Pesticider og arealanvendelse

Forekomsten af pesticider

Indholdet af de forskellige pesticider i kombination med de geokemiske forhold i grundvandet afspejler arealanvendelsen.

*Fenoxysyrerne* findes under reducerende forhold og er særligt hyppigt påvist i det meget hårde forvittringsvand. *Triazinerne* forekommer såvel under reducerende som under oxiderende forhold, men er ikke påvist til så stor dybde som fenoxysyrerne. Fenoxysyrerne er i overensstemmelse hermed især fundet inden for de landominerede områder i Østjylland og på øerne, mens triazinerne kan forekomme alle steder, ikke mindst i tilknytning til områder med unge nåletræsplantager. *Fenolmidlerne* har tilsyneladende samme udbredelsesmønster som fenoxysyrerne.

## 1.7.3 Organiske mikroforureninger

Typer af fund

Analyseprogrammet omfatter i alt 15 stoffer fordelt på hovedgrupperne *aromatiske kulbrinter* (hovedsageligt komponenter fra benzin, olie og tjæreforurening), *klorerede opløsningsmidler*, *fenoler* og *klorfenoler*. For de *organiske mikroforureninger* gælder det, lige som for pesticiderne, at analyserne er teknisk svære at gennemføre på det meget lave koncentrationsniveau, der generelt gør sig gældende i grundvandsprøver. Data-materialet må derfor tolkes med stor varsomhed. Efter de fire første års analyser kan det fastslås, at der har været 49 påvisninger af aromatiske kulbrinter i seks forskellige overvågningsområder og 42 påvisninger af klorerede opløsningsmidler i ti forskellige overvågningsområder. Det er vanskeligt at se et landsdækkende mønster, men påvisningerne af klorerede opløsningsmidler synes især at koncentrere sig om de store byer, navnlig hovedstadsområdet, mens de aromatiske kulbrinter er mere spredte.

Problemer

Hele problematikken omkring organiske mikroforureninger er stadig under afklaring. Hvor alvorligt man skal vurdere fundet af disse stoffer, må blandt andet afhænge af en nærmere udredning, af hvilke omdannelser, der sker af de fundne stoffer ved naturlige processer. En lang række af stofferne kan nedbrydes mikrobielt, men de kan også omdannes til andre, langt farligere stoffer. Således kan der under reducerende betingelser (iltfrie forhold) ske en omdannelse af det klorerede opløsningsmiddel triklorethylen til vinylklorid, der er et af de mest giftige stoffer, der kendes. Det har således ikke været muligt at fastslå en nedre grænseværdi, hvorunder stoffet ikke har helbredsskadelig virkning.

## 1.8 Vandanalyser

Boringskontrol

Det er almindelig praksis at undersøge vands egnethed til drikkevand. Normalt vil det dreje sig om grundvand, men få steder i Danmark anvendes også overfladevand til fremstilling af drikkevand. Egnethedsundersøgelsen foretages, såvel inden en bo-

Analyseresultater på vandprøve, Vigerslevparken – boring X			
Modtaget på laboratoriet 11. august 1994			
Analysevariabel	Metode	Enhed	Analysesresultat LEKO pr. nr. 6111.94
Farve, klarhed, bundfald	Subjektiv	–	hvidlig, uklar
pH	DS 287	–	7,3
Ledningsevne	DS 288	mS/m	1720
Permanganattal	DS 275	mg KMnO <sub>4</sub> /l	9
Tørstof (inddampningsrest)	DS 204	mg/l	1530
Calcium	ICP	mg Ca <sup>++</sup> /l	260
Magnesium	SM 3120, ICP	mg MG <sup>++</sup> /l	28
Natrium	ICP	mg Na <sup>+</sup> /l	94
Kalium	SM 322B	mg K <sup>+</sup> /l	6,3
Ammonium	DS 224	mg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /l	0,21
Jern, opløst	SM 3120, ICP	mg Fe/l	0,10
Mangan	SM 3120, ICP	mg Mn/l	0,045
Bicarbonat	DS 253	mg HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	427
Klorid	DS 239	mg Cl <sup>-</sup> /l	239
Sulfat	DS 286	mg SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /l	210
Nitrat	FIA	mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	49
Nitrit	DS 222	mg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l	0,007
Total fosfor	DS 292	mg P/l	0,02
Fluorid	DS 218	mg F <sup>-</sup> /l	0,33
Ilt	DS 2206	mg O <sub>2</sub> /l	1,3
Aggressiv kuldioxid	DS 236	mg CO <sub>2</sub> /l	0
NVOC	Sjælsø	mg C/l	2,91

Figur 8  
Eksempel på en blanket  
med en normal kemisk  
analyse.

ring tages i brug, som løbende under brugen, den såkaldte *boringskontrol*. Normalt foretages undersøgelsen af et anerkendt laboratorium, enten på indsendte vandprøver, eller på *vandprøver*, som laboratoriet selv udtager.

Hvis man ønsker at indsende vandprøver til undersøgelse på et bestemt laboratorium, bør man først kontakte laboratoriet, idet laboratorierne ofte har visse krav til måden, hvorpå prøven skal udtages og emballagen, som prøven skal opbevares i. Alt efter hvor omfattende en undersøgelse, der skal laves, er der også sommetider visse krav til forskellige stoffer, som skal tilsættes vandprøven, for at konservere den og undgå, at vandet ændrer sig under transporten til laboratoriet. Hvis der skal laves en større undersøgelse, vil det ofte være nødvendigt at tage flere prøver på samme tidspunkt. Prøvetagning skal foretages efter metoden i ISO 5667 af certificerede laboratorier/personer ifølge den nyeste bekendtgørelse på dette område fra 1997.

Prøvetagning

## 1.9 Analyseblanketten

Når laboratoriet har afsluttet undersøgelsen, samles resultaterne ofte på en såkaldt analyseblanket. Analyseblanketten kan have forskelligt udseende alt efter hvilket laboratorium, der er anvendt, men de fleste analyseblanketter har fælles træk, som næsten altid fremgår fx

Blanketten

- Laboratoriets navn og adresse, datoen for analysernes udførelse eller for analyseblankettens udskrivning

Administrative  
oplysninger

- Hvad det er for vand, der er undersøgt fx grundvand (som oftest kaldes ubehandlet grundvand for råvand) eller drikkevand eller et andet slags vand
- Hvad formålet med undersøgelsen har været
- Hvilket omfang undersøgelsen har haft

I Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 871 er der fastlagt bestemte krav til omfanget af forskellige undersøgelsestyper, der fx betegnes som begrænset, normal og udvidet kontrol.

Hvor prøven er udtaget, hvornår den er udtaget, og af hvem, den er udtaget af.

#### Undersøgelsestyper

Undersøgelsen kan inddeles i forskellige typer. Normalt inddeles undersøgelsen i tre forskellige typer, nemlig

a. Direkte undersøgelse.

Ved den direkte undersøgelse tages der stilling til vandets lugt, smag, farve og klarhed

b. Mikrobiologisk undersøgelse.

Ved den mikrobiologiske undersøgelse optælles vandprøvens indhold af bakterier og eventuelt andre mikrobiologiske parametre.

c. Kemiske undersøgelser.

Ved den kemiske undersøgelse bestemmes vandprøvens reaktionstal (pH) og dens indhold af et mindre eller større antal kemiske stoffer og forbindelser. Undersøgelsens udfald for et bestemt stof angives ved stofnavnet og den kemiske formel for stoffet samt et analyseresultat, bestående af et tal og en enhed. Ofte angives også den metode, der er anvendt, udtrykt som DS plus et nummer. DS refererer til Dansk Standard, som har udarbejdet standardmetoder til næsten alle undersøgelser. Derudover angiver mange laboratorier grænseværdien for drikkevand på samme linje som analyseresultatet, så modtageren af undersøgelsen selv kan se, om det undersøgte vand kan anvendes til drikkevandsproduktion.

Eksempler på analyseblanketter se på **Figur 8** og **9**. En oversigt over de danske grænseværdier for drikkevand kan ses i **Bilag 1**.

## 1.10 Litteratur

- Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, 1995: Grundvandsovervågning 1995. – GEUS, Miljø- og Energiministeriet, 209 sider + bilag.
- Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, 1996: Grundvandsovervågning 1996. – GEUS, Miljø- og Energiministeriet, 60 sider.
- Miljø- og Energiministeriet, 1997: Bekendtgørelse om kvalitetskrav til miljømålinger udført af akkrediterede laboratorier, certificerede personer mv. Miljø- og Energiministeriets bekendtgørelse nr. 637 af 30. juni 1997, 53 sider.
- Miljøministeriet, 1980: Bekendtgørelse om udførelse af boringer efter grundvand. – Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 4 af 4. januar 1980.
- Miljøministeriet, 2001: Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 871 af 21. september 2001, 29 sider.
- Miljøstyrelsen, 1990: Vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. – Vejledning fra Miljøstyrelsen, Nr. 3, 72 sider.
- Miljøstyrelsen, 1997: Boringskontrol på vandværker. – Vejledning fra Miljøstyrelsen, Nr. 2, 183 sider.

## Undersøgelse af drikkevand/råvand

Figur 9  
Eksempel på en blanket  
med en udvidet kemisk  
analyse.

Rekvirent

Kopieret til Geoteknik 200  
11. Okt. 1996

Koprt til

- Levnedsmiddelkontrollen  
 Stadsisagen  
 Københavns amt (kvartalsvis)  
 Frederiksborg amt (kvartalsvis)  
 Roskilde amt (kvartalsvis)  
 Vestsjællands amt (kvartalsvis)  
 DGU

<b>Formål</b>		<b>Analysens omfang</b> <input checked="" type="checkbox"/>	
Undersøgelse af		Mikro. Fys. biol. kem.	
<input type="checkbox"/> Drikkevand <input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Begrænset kontrol
<input type="checkbox"/> Drikkevand, andet		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Normal kontrol
<input checked="" type="checkbox"/> Råvand		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Udvidet kontrol
<input type="checkbox"/> Forurening		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Boringskontrol
Andet:		<input type="checkbox"/>	Andet:
<b>Anlægstype</b>		<b>Råvandskilde</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Husholdning		<input checked="" type="checkbox"/> Boring	
<input type="checkbox"/> Institution		<input type="checkbox"/> Kildeplads	
<input type="checkbox"/> Erhverv		<input type="checkbox"/> Brønd	
<input type="checkbox"/> Nødforsyning		<input type="checkbox"/> Sø	
<input type="checkbox"/> Gartneri		<input type="checkbox"/> Vandløb	
<input type="checkbox"/> Markvanding		Andet:	
Andet:		Indtag 192.1041 m.u.o. DGU nr. —ej-reg.	

<b>Direkte undersøgelse</b>		Kommune København	
Temperatur ved prøvetagning 11,3 °C		Anlægsnavn Københavns Vandforsyning	
Lugt svovlbrinte		Prøvetagningssted Hørup kildeplads, erstatningsboring 1A	
<input checked="" type="checkbox"/> Smag -		Prøvetager Palle Dønig	
<input checked="" type="checkbox"/> Farve ingen		Prøvetagningstidspunkt 09.10.95 kl 10.10	
<input checked="" type="checkbox"/> Klared. Bundfald klar		Modtaget på laboratornet 09.10.95 kl 12.30	
<b>Mikrobiologisk undersøgelse</b>		<b>Resultat</b>	<b>Grænseværdier for drikkevand</b> <input checked="" type="checkbox"/> vejl. højest
Coliforme bakterer	pr 100 ml		i.m. DS 2255
<input checked="" type="checkbox"/> Termotolerante coliforme bakterer	pr 100 ml		i.m. DS 2255
Kimtal, 37°C	pr ml	5	20 DS 2254
Kimtal, 21°C	pr ml	50	200 DS 2251
Clostridium perfringens	pr 50 ml		i.m. DS 2256
<input checked="" type="checkbox"/> Alger	pr ml		intern
<input checked="" type="checkbox"/> Detritus	pr ml		intern
<b>Fysisk-kemisk undersøgelse</b>		<b>Resultat</b>	<b>Grænseværdier for drikkevand</b> <input checked="" type="checkbox"/> vejl. højest
Farve Pt	mg/l	5	15 DS 289
Turbiditet (Uklared)	FTU	0,3	0,5 DS 290
pH ved 12°C		7,23	7,0-8,0 8,5 DS 287
Konduktivitet (Ledningsevne) ved 12°C	mS/m	59,0	> 30 DS 288
Permanganattal KMnO <sub>4</sub>	mg/l	4,1	6 12 DS 275
Tørstof (Inddampningsrest)	mg/l	544	1500 DS 204
<input checked="" type="checkbox"/> Chlor, total Cl <sub>2</sub>	mg/l		DS 282
<input checked="" type="checkbox"/> Chlor, frit Cl <sub>2</sub>	mg/l		DS 282
<input checked="" type="checkbox"/> Chlor, bundet - monochloramin Cl <sub>2</sub>	mg/l		DS 282
<input checked="" type="checkbox"/> Chlor, bundet - dichloramin Cl <sub>2</sub>	mg/l		DS 282
Kun ved begrænset kontrol	Jern Fe	mg/l	0,05 0,2 DS 219
	Nitrit NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	u.d. 0,1 DS 222

Laboratornets bemærkninger:  Ingen  Bilag:

-  vand  
m.u.o. = meter under overflade  
i.m. = ikke målelig

Søren Lind

Bilag 1  
Grænseværdier for  
kemiske parametre  
i drikkevand

Hvor intet andet er anført, er der i tabellerne tale om højst tilladelige værdier.

**Drikkevandets hovedbestanddele**

Parameter	Enhed	Vandkvalitetskrav			Bemærkninger
		Værdi ved afgang fra vandværk <sup>1)</sup>	Værdi ved indgang til ejendom <sup>2)</sup>	Værdi ved forbrugers taphane <sup>3)</sup>	
Farve <sup>4)</sup>	mg Pt/l	5	15	15	Hvis farven er forårsaget af vandets humusindhold, kan der tillades op til 10 i farvetal afgang fra vandværk
Turbiditet <sup>5)</sup>	FTU	0,3	0,5	0,5	
Lugt Smag	Subjektiv bedømmelse				Vandet må ikke have en afvigende smag og lugt, desinfektionsmidler undtaget
Temperatur	°C				Det bør tilstræbes, at vandet er højst 12°C ved taphanen
pH		7 - 8,5			Vandet må ikke være kalk-aggressivt
Ledningsevne	mS/m	30	30	30	Minimumskrav
NVOC	mg C/l	4	4	4	
Inddampningsrest <sup>6)</sup>	mg/l	1.500	1.500	1.500	
Calcium	mg Ca/l				Indholdet bør ikke overstige 200 mg/l
Magnesium	mg Mg/l	50	50	50	
Hårdhed, total °dH					Vandets hårdhed bør ligge mellem 5° og 30°dH
Natrium	mg Na/l	175	175	175	
Kalium	mg K/l	10	10	10	
Ammonium <sup>7)</sup>	mg NH <sub>4</sub> /l	0,05	0,05	0,05	
Jern <sup>8)</sup>	mg Fe/l	0,1	0,2	0,2	
Mangan <sup>9)</sup>	mg Mn/l	0,02	0,05	0,05	
Bikarbonat	mg HCO <sub>3</sub> /l				Indholdet bør være over 100 mg/l
Klorid	mg Cl/l	250	250	250	
Sulfat	mg SO <sub>4</sub> /l	250	250	250	
Nitrat	mg NO <sub>3</sub> /l	50	50	50	
Nitrit <sup>6)</sup>	mg NO <sub>2</sub> /l	0,01 <sup>7)</sup>	0,1	0,1	Indholdet bør være mindre end 0,5 mg/l ved desinfektion med kloramin
Totalt fosforindhold <sup>4)</sup>	mg P/l	0,15	0,15	0,15	
Fluorid	mg F/l	1,5	1,5	1,5	
Ilt <sup>4)</sup>	mg O <sub>2</sub> /l	<sup>10)</sup>	5	5	Minimumskrav
Aggressiv kuldioxid <sup>8)</sup>	mg CO <sub>2</sub> /l	2	2	2	
Svovlbrinte <sup>4)</sup>	mg H <sub>2</sub> S/l	0,05	0,05	0,05	
Metan <sup>4)</sup>	mg CH <sub>4</sub> /l	0,01	0,01	0,01	

---

Klor, frit og

total<sup>4)9)</sup> mg Cl/l

Indholdet bør være mindst muligt under samtidig overholdelse af de mikrobiologiske krav

---

- 1) Prøven udtages fra afgangsledning eller rentvandsbeholder på vandværket.
  - 2) Prøven udtages ved indgang til bygning (ved vandmåler eller nærmeste taphane herefter), når vandet har løbet så længe, at det vand, der står i installationer og stikledning, er udskyllet, og vandet mindst har løbet 5 minutter
  - 3) Prøven udtages på en af Miljøstyrelsen anvist måde.
  - 4) Undersøgelserne foretages efter en af Miljøstyrelsen anvist metode.
  - 5) For at undgå overskridelse af nitritgrænseværdien i ledningsnet bør indholdet i iltet og filtreret vand være mindre end 0,05 mg/l. Ammoniumindhold op til 0,5 mg/l kan accepteres, når drikkevandet ikke filtreres på vandværket, og ammoniumindholdet i øvrigt ikke omdannes til nitrit i ledningsnettet.
  - 6) Overskridelser som følge af fornyelse af filtermaterialer kan forekomme, men bør indskrænkes mest muligt.
  - 7) Såfremt det kan dokumenteres, at grænseværdien ved indgang til ejendom er overholdt, kan der tillades højere værdi ved afgang fra vandværk dog maksimalt 0,1 mg/l.
  - 8) De angivne grænser svarer til detektionsgrænsen for de anvendte metoder.
  - 9) Eller rest af andet desinfektionsmiddel.
  - 10) Iltindholdet skal være så højt, at minimumsværdien ved indgang til ejendom på 5 mg/l kan overholdes.
-

**Uorganiske sporstoffer**

Parameter	Enhed	Vandkvalitetskrav		Bemærkninger
		Værdi ved indgang til ejendom <sup>2)</sup>	Værdi ved forbrugers taphane <sup>3)</sup>	
Aluminium	µg Al/l	100	200	
Antimon	µg Sb/l	2	5	Beregnet gennemsnitsværdi <sup>3)</sup>
Arsen	µg As/l	5	10	Beregnet gennemsnitsværdi <sup>3)</sup>
Barium	µg Ba/l	700	700	
Bly	µg Pb/l	5	10 15	Beregnet gennemsnitsværdi <sup>3)</sup> Efter henstand 12 timer i forbrugerens installation
Bor	µg B/l	1000 <sup>4)</sup>	1000	
Cadmium	µg Cd/l	2	5	Beregnet gennemsnitsværdi <sup>3)</sup>
Krom	µg Cr/l	20	50	Beregnet gennemsnitsværdi <sup>3)</sup>
Cyanid	µg CN/l	50	50	
Kobber	µg Cu/l	100	2000	Efter henstand 12 timer i forbrugerens installation
Kviksølv <sup>5)</sup>	µg Hg/l	1	1	
Nikkel	µg Ni/l	20 <sup>6)</sup>	20	Beregnet gennemsnitsværdi <sup>3)</sup>
Selen	µg Se/l	10	10	
Sølv <sup>7)</sup>	µg Ag/l	10	10	
Tin	µg Sn/l	10	1500	Efter henstand 12 timer i forbrugerens installation
Zink	µg Zn/l	100	3000 5000	Beregnet gennemsnitsværdi <sup>3)</sup> Efter henstand 12 timer i forbrugerens installation
<b>Halogenholdige omdannelsesprodukter</b>				
Chlorit <sup>8)</sup>	µg ClO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l	50	50	
Chlorat <sup>8)</sup>	µg ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	50	50	
Sum af chlorit og chlorat	µg/l	50	50	
Bromat <sup>9)</sup>	µg BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	10	10	
<b>Radioaktivitets – indikatorer</b>				
Tritium <sup>10) 11)</sup>	Bq/l	100	100	
Total indikativ dosis <sup>10) 11)</sup>	mSv/år	0,1	0,1	



- 1) Prøven udtages ved indgangen til bygning (ved vandmåler eller nærmeste taphane herefter), når vandet har løbet så længe, at det vand der står i installationer og stikledning er udskyllet, og vandet mindst har løbet 5 minutter. Hvis vandværket kan dokumentere, at der ikke sker en tilførsel af metaller i ledningsnettet, kan målingen i stedet foretages ved afgang fra vandværket jf. bilag 6.
- 2) Prøven udtages af forbrugerens taphane efter en af Miljøstyrelsen anvist måde.
- 3) Gennemsnitsværdien bestemmes efter en af Miljøstyrelsen anvist metode.
- 4) Det bør tilstræbes at levere vand med så lavt et indhold af bor som muligt og bedst under 300 µg/l.
- 5) Det bør tilstræbes at levere vand med så lavt et indhold af kviksølv som muligt og bedst under 0,1 µg/l.
- 6) Det er tale om en midlertidig grænseværdi, som vil være gældende, mens Miljøstyrelsen undersøger, hvorledes den præcise fordeling skal være mellem værdi ved indgang til ejendom og værdi ved forbrugers taphane.
- 7) Bestemmes kun, hvis der anvendes sølv som materiale eller kemikalie.
- 8) Nedbrydningsprodukterne er til stede i den anvendte kloropløsning og vil kunne øges yderligere ved henstand på vandværket.
- 9) Bestemmes kun ved desinfektion med klor, ozon eller lignende stærkt iltende stoffer.
- 10) Målingen foretages på udvalgte stationer på nationalt plan.
- 11) Målingen foretages på en af Miljøstyrelsen anvist måde.

**Organiske mikroforureninger**

Parameter	Vandkvalitetskrav			Bemærkninger
	Værdi ved afgang fra vandværk <sup>1)</sup> µg/l	Værdi ved indgang til ejendom <sup>2)</sup> µg/l	Værdi ved forbrugers taphane <sup>3)</sup> µg/l	
<b>Klorholdige opløsningsmidler</b>				
Flygtige organiske klorforbindelser <sup>4)</sup>	1	1	1	Værdien gælder for hvert enkelt stof
Sum af flygtige organiske klorforbindelser <sup>4)</sup>	3	3	3	Sumværdien kan kun anvendes, hvis koncentrationen af enkeltstofferne er under 1 µg/l
Vinylchlorid	0,3	0,3	0,5	
Chlorbenzener mono-, di- og tri-	1	1	1	Værdien gælder for hvert enkelt stof
Sum af trihalomethaner <sup>5)</sup>	25	25	25	Kloringen bør gennemføres, så indholdet bliver lavest muligt
<b>Indhold i olieprodukter</b>				
Alkylbenzener <sup>6)</sup>	1	1	1	Bestemmes som summen af 1-methyl-3-ethylbenzen, 1,2,4-trimethylbenzen og 1,3,5-trimethylbenzen
Benzen <sup>6)</sup>	1	1	1	
Naftalen <sup>6)7)</sup>	2	2	2	
Methyl-tertiær-butylether MTBE <sup>6)</sup>	2-10	2-10	2-10	Stoffet indgår i benzinprodukter
1,2-dibromethan <sup>6)</sup>	0,01 <sup>8)</sup>	0,01 <sup>8)</sup>	0,01 <sup>8)</sup>	Stoffet indgik i de gamle blyholdige benzinprodukter
Total olie <sup>6)9)</sup>	5	5	10	
<b>PAH forbindelser<sup>7)</sup></b>				
Fluoranthen	0,1	0,1	0,1	
Benzo (a) pyren	0,01	0,01	0,01	
Sum af benzo (b) fluoranthen, benzo (k) fluoranthen, benzo (ghi) perylen og indeno (1,2,3-cd)pyren	0,1	0,1	0,1	
<b>Pesticider<sup>10)</sup></b>				
Aldrin, dieldrin, heptachlor, heptachlorepoxyd	0,03	0,03	0,03	Værdien gælder for hvert enkelt pesticid
Andre pesticider	0,1	0,1	0,1	Værdien gælder for hvert enkelt pesticid
Sum af alle pesticider	0,5	0,5	0,5	
<b>Fenoler</b>				
Sum af octylphenol og nonylphenol	20	20	20	
Øvrige fenoler	0,5	0,5	0,5	Værdien gælder for hver enkelt type fenol

**Klorfenoler**

Pentachlorphenol	0,01 <sup>11)</sup>	0,01 <sup>11)</sup>	0,01 <sup>11)</sup>	
Øvrige klorfenoler	0,1	0,1	0,1	Værdien gælder for hver enkel type klorfenol

**Phthalater**

Di-ethyl-hexyl-phthalat (DEHP)	1	1	1	
Sum af øvrige phthalater	1	1	5	

**Detergenter**

Anioniske detergenter <sup>9)</sup>	100	100	100	Målt som natriumlaurylsulfat
-------------------------------------	-----	-----	-----	------------------------------

**Materiale monomerer<sup>12)</sup>**

Acrylamid	0,1	0,1	0,1	Anvendelse af kemikalier med indhold heraf bør undgås til vandbehandling
Acrylonitril	0,05	0,05	0,1	
Epichlorhydrin	0,1	0,1	0,1	
Formaldehyd	10	10	50	
Styren	0,2	0,2	1	
Vinylchlorid	0,3	0,3	0,5	

- 1) Prøven udtages fra afgangsledning eller rentvandsbeholder på vandværket.
- 2) Prøven udtages ved indgangen til bygning (ved vandmåler eller nærmeste taphane herefter), når vandet har løbet så længe, at det vand, der står i installationer og stikledning, er udskyllet, og vandet mindst har løbet 5 minutter.
- 3) Prøven udtages efter en af Miljøstyrelsen anvist metode.
- 4) Ved flygtige organiske klorforbindelser forstås di-, og trichlormethan, dichlorethener, 1,2-dichlorethan, trichlorethen og trichlorethaner, tetrachlorethen og tetrachlorethaner.
- 5) Ved trihalomethaner forstås summen af det indhold af trichlormethan, dichlorbrommethan, chlordibrommethan og tribrommethan, som dannes ved klorering af vandets naturlige indhold af organisk stof.
- 6) Indikatorer for olie- og benzinprodukter.
- 7) Indikatorer for tjæreprodukter.
- 8) Det angivne kvalitetskrav kan ikke bestemmes med en metode, der er almindelig anvendt i laboratoriet. Der må, indtil bedre teknikker er udviklet, anvendes en metode, der har en detektionsgrænse på højst 0,05 µg/l.
- 9) Undersøgelserne foretages efter en af Miljøstyrelsen anvist metode.
- 10) Ved pesticider forstås organiske insekticider, herbicider, fungicider, nematocider, acaricider, algicider, rodenticider og slimicider samt lignende produkter (bl.a. vækstregulatorer) og deres metabolitter, nedbrydnings- og reaktionsprodukter.
- 11) Det angivne kvalitetskrav kan ikke bestemmes tilstrækkelig godt med en metode, der er almindelig anvendt i laboratoriet. Der må, indtil bedre teknikker er udviklet, anvendes en metode, der har en detektionsgrænse på højst 0,01 µg/l.
- 12) Det angivne kvalitetskrav henviser til indholdet af monomerer i vandet beregnet efter specifikationerne for den maksimale migration fra tilsvarende polymere produkter i kontakt med drikkevandet.

**Mikrobiologiske parametre 1)**

Parameter	Enhed	Vandkvalitetskrav		Bemærkninger
		Værdi ved afgang fra vandværk <sup>1)</sup>	Værdi ved indgang til ejendom <sup>2)</sup>	
Coliforme bakterier	Pr. 100 ml	i.m.	i.m.	
Escherichia coli (E. coli)	Pr. 100 ml	i.m.	i.m.	
Kimtal ved 37°C	Pr. ml	5	20	
Kimtal ved 22°C	Pr. ml	50 10 <sup>5)</sup>	200	
Enterokokker	Pr. 100 ml	i.m.	i.m.	
Clostridium perfringens, herunder sporer <sup>4)</sup>	pr. 50 ml	i.m.	i.m.	

1) Undersøgelserne foretages efter en af Miljøstyrelsen anvist metode.

2) Prøven udtages fra afgangsledning eller rentvandsbeholder på vandværket.

3) Prøven udtages ved indgangen til bygning (ved vandmåler eller nærmeste taphane herefter), når vandet har løbet så længe, at det vand, der står i installationer og stikledning, er udskyllet, og vandet mindst har løbet 5 minutter.

4) Parameteren bestemmes kun, hvis vandet hidrører fra eller påvirkes af overfladevand.

5) Værdien gælder for desinficeret vand.

i.m. = ikke målelig ved den anviste metode.



## 2. Grundvandssænkning

Hvorfor grundvandssænkning?

*Grundvandssænkning*, som led i bygge- og anlægsarbejder, blev introduceret i Danmark i 50'erne og har siden udviklet sig til en dagligdags foreteelse. Kompendiet er baseret på erfaringer, indhentet gennem de seneste 40 år suppleret med viden opnået gennem udenlandsk litteratur.

Entreprenører kender den situation, hvor et udgravningsarbejde generes af grundvand. I nogle tilfælde kan problemet løses ved simpel dræning og lænsumpning, men ofte er konsekvenserne alvorligere, idet den tekniske løsning forudsætter etablering af grundvandssænkingsanlæg (eller alternative metoder), hvilket medfører såvel økonomiske som tidsmæssige overraskelser.

I værste tilfælde kan en for sen erkendelse af et grundvandsproblem motivere drastiske projektændringer, fx fra direkte fundering til pælefundering, såfremt byggegrubens bund er ødelagt. Hertil kommer, at det kan blive en juridisk opgave at bedømme, hvorvidt det er bygherren eller entreprenøren, som skal dække merforbruget af tid og penge. Der er således rigelig motivation til at inddrage grundvandsproblematikken som et led i forundersøgelser og projektering af bygge- og anlægsarbejder.

### 2.1 Teoretisk introduktion

Definitioner

Vi er nødt til at starte med nogle definitioner:

- *Grundvandsspejlet* er det niveau, hvor trykket i porevandet svarer til atmosfærens tryk.  
Grundvandsspejlet registreres ved at bestemme vandspejlskoten i et pejlerør.
- *Grundvandspotentialet* (eller blot potentialet) i et punkt er et udtryk for grundvandsspejlets beliggenhed i punktet.

Grundvand strømmer altid fra et punkt med et højere potentiale til et punkt med et lavere potentiale. Grundvandsstrømmen styres af gradienten og permeabilitetskoefficienten:

- *Gradienten* defineres som potentialforskellen pr. længdeenhed

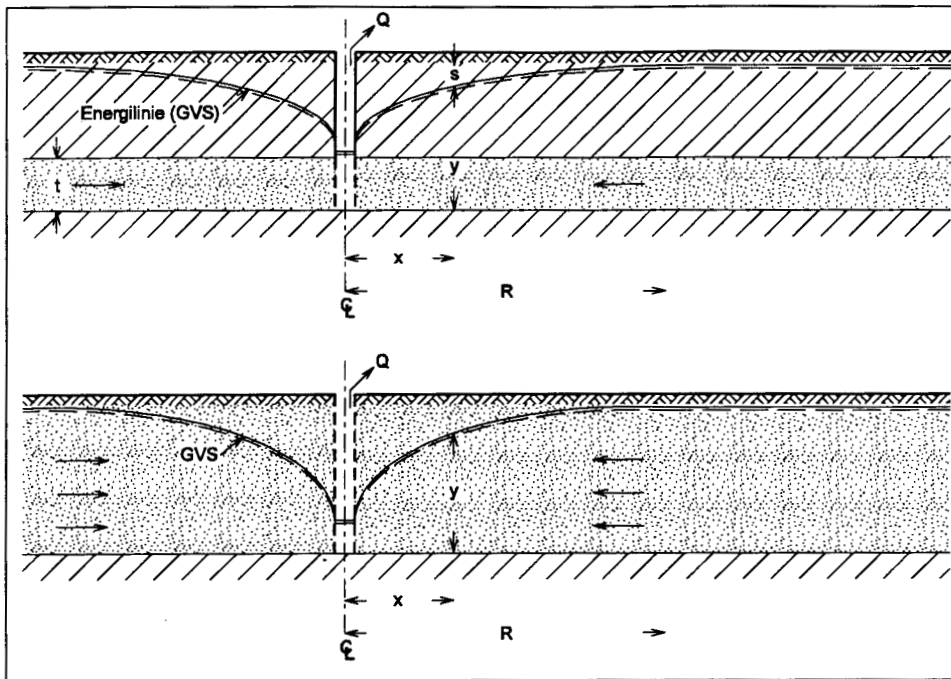
$$i = \frac{dh}{ds}$$

- *Permeabilitetskoefficienten* er en materialeegenskab, som udtrykker jordens evne til at lade vandet passere. Permeabilitetskoefficienten er defineret ved Darcys lov  $v = k \cdot i$ , som udtrykker, at vandets hastighed, dvs. forholdet mellem den vandmængde,  $Q$ , som strømmer gennem et givet tværsnit og arealet,  $A$ , dette tværsnit er proportional med permeabilitetskoefficienten,  $k$ , og gradienten,  $i$ ,

$$v = \frac{Q}{A} = k \cdot i$$

Grundvandsbevægelse kan foregå som artesisk strømning eller som fri strømning, jf. **Figur 1**.

- *Artesisk strømning* (i et artesisk reservoir) forekommer, hvor vandet strømmer i en zone, som opad og nedadtil er begrænset af lag med lavere permeabilitet.



Figur 1  
Artesisk og fri strømning  
til en boring

- *Fri strømning* (i et frit reservoir) forekommer, hvor vandet strømmer i en zone, som op ad til er begrænset af grundvandsspejlet og nedadtil af et lag med lavere permeabilitet.

Vi har nu det, der skal til for at beskrive grundvandets bevægelse hen mod en brønd, hvorfra der oppumpes vand.

Ved at antage idealiserede randbetingelser, hvorved vandet antages at strømme symmetrisk mod brønden, kan der opstilles følgende 2 udtryk:

Vandmængde

$$\text{Artesisk strømning } Q = \frac{2\pi k t s_x}{\ln R/r_x} \quad (1)$$

$$\text{Fri strømning } Q = \frac{\pi k (H^2 - y_x^2)}{\ln R/r_x} \quad (2)$$

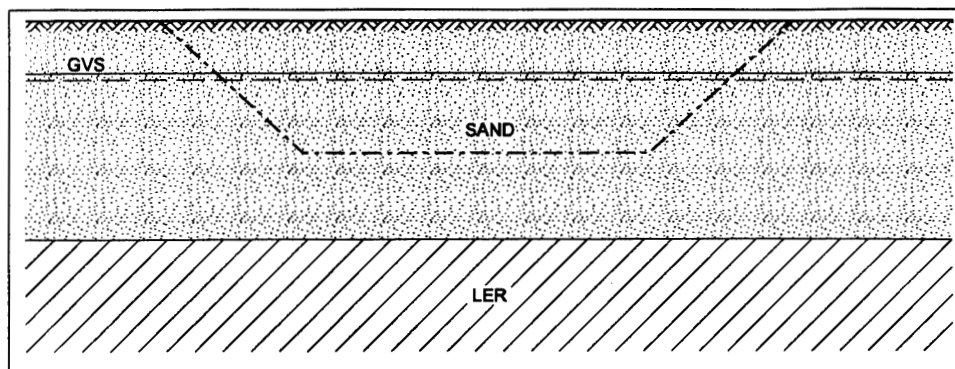
I disse udtryk er:

- $Q$ , m<sup>3</sup>/sek. den oppumpede vandmængde,
- $k$ , m/sek. permeabilitetskoefficienten i det lag, vandet strømmer,
- $t$ , m mægtigheden af det lag, hvori vandet strømmer,
- $s_x$ , m vandspejlsænkningen i afstanden  $x$  fra brønden,
- $R$ , m grundvandssænkningens rækkevidde (den radius inden for hvilken, der foretages indgreb i den hydrauliske ligevægt),

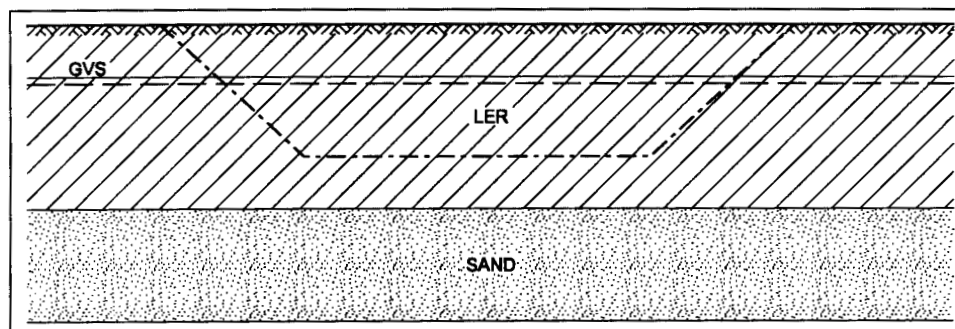
og ved frit reservoir desuden:

- $H$ , m grundvandsspejlets højde over det underliggende lavere permeable lag inden pumpning,
- $y_x$ , m grundvandsspejlets højde over det underliggende lavere permeable lag i afstanden  $x$  fra pumpebrønden under pumpning.
- $H - y_x$ , m svarer til  $s_x$  ved artesiske forhold.

Figur 2  
 Udgravning under grund-  
 vandsspejlet i frit reservoir



Figur 3  
 Udgravning i ler over sand  
 med artesiske potentiale



Ofte anvendes betegnelsen transmissivitet  $T = k \cdot t$  for produktet af et lags permeabilitetskoefficient og mægtighed. Enheden er  $m^2/\text{sek}$ .

I virkeligheden burde tidsrummet fra pumpningens start til sænkningen registreres også indgå i ovennævnte udtryk, men for ethvert praktisk forhold i forbindelse med grundvandssænkingsanlæg har dette kun underordnet betydning, og ovennævnte udtryk, som svarer til en stationær situation ("efter lang tid"), anbefales derfor anvendt generelt.

Dette er det nødvendige og ofte også det tilstrækkelige grundlag for dimensionering af grundvandssænkingsanlæg.

## 2.2 Problemformulering

Fire situationer

Ved bygge- og anlægsarbejder under grundvandsspejlet kan det vise sig nødvendigt at kunne kontrollere grundvandsforholdene midlertidigt eller permanent.

De fire situationer, som typisk foreligger er:

- Udgravning under grundvandsspejlet i et frit grundvandsreservoir, se **Figur 2**.
- Sikring af bunden af en udgravning mod løftningsrisiko som følge af artesiske forhold i et dybereliggende reservoir, se **Figur 3**.
- Vandtryksaflastning af byggegrubeindfatninger.
- Imødegåelse af udblødning af en byggegrubebund som følge af opadrettet strømning (gradienter).

Der er fire principielt forskellige metoder til styring af grundvand i forbindelse med et bygge- eller anlægsprojekt under grundvandsspejlet:



- Man tillader, at vandet siver ind i udgravningen/konstruktionen og fjerner det ved lænspumpning (eventuelt med dræn).
- Man etablerer en midlertidig eller permanent grundvandssænkning, hvorved man sænker grundvandsspejlet under konstruktions-/udgravningsniveau.
- Man afskærer grundvandsbevægelsen med tætte vægge, fx spunsvægge, slidsevægge, frysning, injektion.
- Man holder vandtrykket tilbage med lufttryk, fx i tunneler og sænkekasser.

For at kunne vælge metode skal der foreligge tilstrækkelig information om:

- jordbundsforholdene
- grundvandsforholdene
- størrelse og dybde af udgravning
- mulig byggegrubeindfatning
- omkringliggende bygninger og disses fundering
- krav til det færdige bygværk
- tidsplan
- eventuel grundvandsforurening.

#### *Læns-pumpning*

Tre løsninger

Læns-pumpning er oftest den billigste metode, men kun anvendelig under gunstige omstændigheder som:

- ringe dybde under grundvandsspejlet,
- mulighed for flade skråningsanlæg,
- udgravning i grove materialer (grus),
- udgravning i ler
- udgravning i kalk.

#### *Grundvandssænkning*

Hvis ovennævnte gunstige omstændigheder ikke er til stede, kan der blive tale om egentlig grundvandssænkning.

Ved egentlig grundvandssænkning etableres et antal *boringer* eller *sugespidser*, hvorfra der pumpes. Pumpningen medfører en sænkning af grundvandsspejlet, og ved rigtigt valg af boringsantal og -placering samt pumpekapacitet kan man opnå, at grundvandsspejlet sænkes netop så meget inden for det aktuelle byggefelt, at arbejdet kan gennemføres uden yderligere grundvandsgener.

#### *Alternative metoder*

Som tidligere nævnt kan grundvandsproblemer også løses med andre metoder, fx ved afskærende vægge, spunsvægge, slidsevægge, frysning, injicering, trykluft mv.

Fælles for disse løsninger er, at de som regel er meget dyrere end grundvandssænkning og derfor kun bliver aktuelle, såfremt grundvandssænkning ikke kan gennemføres.

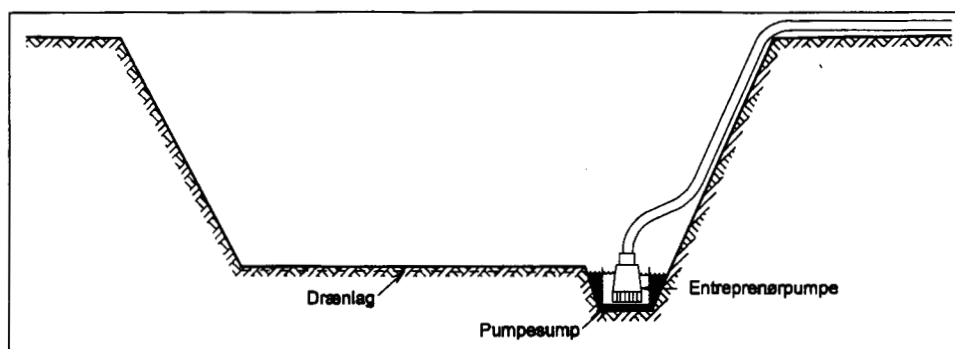
## 2.3 Forundersøgelser

Forundersøgelserne skal tilvejebringe tilstrækkelig viden om jordbunds- og grundvandsforholdene til, at:

Geoteknisk viden

- behovet for grundvandssænkning kan vurderes,
- metoden kan vælges,

Figur 4  
Lænsning fra byggegrube



- anlægget kan dimensioneres som grundlag for udbud,
- anlægget kan etableres og drives uden væsentlige uforudsete hændelser.

De geotekniske undersøgelser opdeles ofte i 2 faser, de indledende undersøgelser også kaldet *placeringsundersøgelser*, som skal føres så vidt, at funderingsmetode, behov for grundvandssænkning samt metodevalg kan vurderes, og projektundersøgelser også kaldet *parameterundersøgelser*, som skal kunne danne grundlag for endeligt valg af tørholdelsesmetode samt for dimensionering af anlæg.

De indledende undersøgelser består normalt af geotekniske borerer med en maksimal afstand på 15-30 m. Borererne skal belyse jordbunds- og grundvandsforholdene til tilstrækkelig dybde.

Tilstrækkelig dybde er et lidt flydende begreb, men som tommelfingerregel bør man undersøge mindst til en dybde under udgravningsniveau svarende til grundvandsspejlets højde over udgravningsniveau (i daglig tale benævnt kritisk dybde). Problemet kan da være, at man hverken kender udgravningsdybde eller grundvandsspejlets beliggenhed på tidspunktet for de geotekniske undersøgelser udførelse, og supplerende (dybere) undersøgelser kan derfor blive nødvendige.

#### Prøvepumpning

Projektundersøgelserne for et grundvandssænkingsanlæg omfatter typisk supplerende borerer og *prøvepumpning* på de relevante vandførende horisonter. Formålet med prøvepumpningen er at skaffe et tilstrækkeligt grundlag for at dimensionere det efterfølgende grundvandssænkingsanlæg.

Til prøvepumpning anvendes en filterboring samt et antal pejlerør, fx etableret i de tidligere udførte geotekniske borerer. Ved prøvepumpning pumpes på filterboringen under samtidig registrering af oppumpet vandmængde samt vandspejlsændringer i pumpe- og pejleboringer.

Der er andetsteds redegjort for dataindsamling og bearbejdning af prøvepumpningsdata.

I forbindelse med prøvepumpning bør der udtages en vandprøve til kemisk analyse. Vandanalysen skal benyttes som grundlag for vurdering af:

- særlige korrosions- eller tilstopningsforhold,
- særlige udledningsproblemer,
- generel grundvandsforurening.

## 2.4 Afsenkning ved dræn og pumpe-sumpe

Den mest simple form for grundvandssenkning består i pumpning fra et system af drænrender og pumpe-sumpe etableret i udgravningens bund (benævnt simpel *lænsning*), se **Figur 4**.

Dræn

Uanset at der her er hæftet betegnelsen "simpel" på denne afsenkningmetode, bør den udføres professionelt. Drænrenderne bør fyldes med et grusmateriale, som sikrer materialefri vandbevægelse fra jorden ud i drænrenden og frem til pumpestedet.

Materialet skal som filtergrus være erosionsstabil samt have tilstrækkelig permeabilitet. Hvor udgravningens bund består af ler (moræneler) eller sand, kan normalt anvendes et groft grusmateriale, fx perlesten 2-8 mm.

Såfremt udgravningens bund består af silt, kan det være hensigtsmæssigt at lægge en *filterdug* i rendens bund og sider, inden gruset udlægges.

*Pumpe-sumpen* kan udformes som en 315 mm korrugeret plastbrønd med slidser, som placeres i en udgravning fyldt med perlesten og med tilslutning til drænstrækningerne.

Pumpe-sump

Som pumpe kan anvendes en eldrevet, dykket *lænsepumpe*, som vælges i størrelse efter behov (kan leveres med kapaciteter på op til omkring 100 m<sup>3</sup>/h). Det kan hævdes, at den dykkede lænsepumpe er uøkonomisk i drift, idet den arbejder konstant, uanset hvor lidt vand der strømmer til, men alternativet er en styring med niveauføler, hvilket kan være svært at få til at fungere tilfredsstillende.

Vandet pumpes normalt væk gennem brandslanger. Vær opmærksom på, at vandgennemstrømningen fra en pumpe-sump ikke nødvendigvis er tilstrækkelig til at holde afgangsslangen frostfri, et problem, som dog kan klares ved at tildække slangerne med vintermåtter.

Grundvandssenkning ved dræn og pumpe-sumpe er en økonomisk fremgangsmåde, som kan anvendes ved udgravning til moderat dybde under grundvandsspejlet i frie reservoirer, hvor de vandførende lag består af sand og grus. Desuden kan metoden anvendes ved udgravning under grundvandsspejlet i fx moræneler, hvor der ofte træffes vandførende lag af sand og grus.

Fordele

Endelig har metoden vist sig særdeles hensigtsmæssig ved udgravninger i kalk, der som oftest er erosionsstabil selv ved kraftig vandtilstrømning.

Derimod er metoden mindre egnet, såfremt de vandførende lag består af silt.

Metoden kan ikke anvendes til sikring mod grundbrud eller potentialaflastning af byggegrubeindfatninger.

## 2.5 Afsenkning med sugespidsanlæg

Sugespidsanlæg etableres ved at spule (eventuelt bore) sugespids ned til de vandførende lag og efterfølgende at pumpe på sugespidserne.

Sugespids

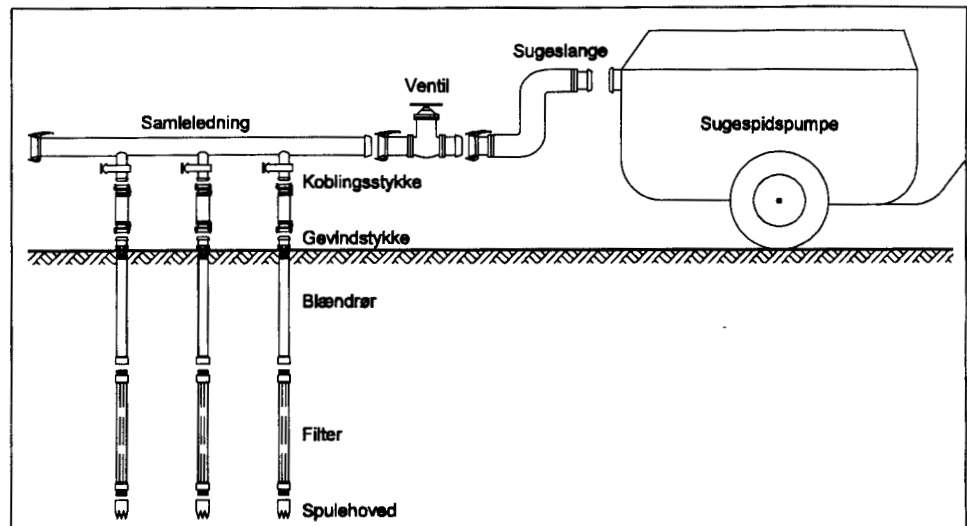
En *sugespids* er typisk et 2" rør, som på nederste 1-2 m er forsynet med slidser og med en bundventil, som muliggør dels nedspuling dels pumpning uden at trække materiale ind gennem bunden.

Sugespidserne kobles med lufttætte, fleksible slanger til stamrør, som atter tilsluttes specielle sugespidspumper. En sugespidspumpe er en sammenbygget enhed bestående af en vacuumpumpe i en vandbeholder samt en lænsepumpe (normalt indbygget i vandbeholderen), se **Figur 5**.

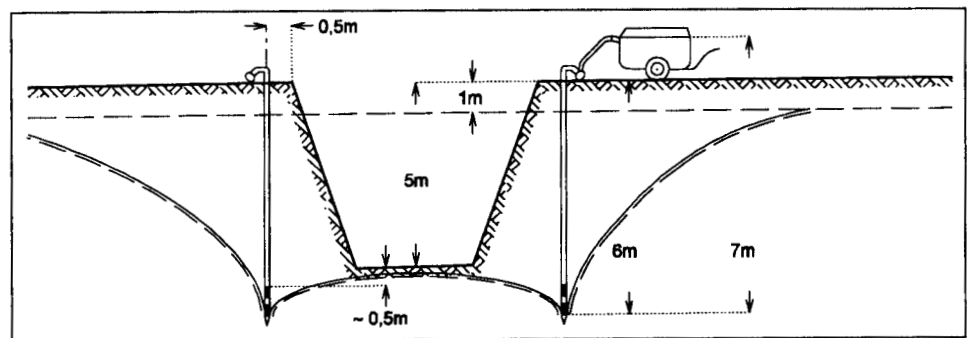
Sugespidspumpe

Sugespidspumper virker ved, at undertrykket i vandbeholderen suger vand op fra sugespidserne. Da det maksimale undertryk, som kan etableres, svarer til 1 atmosfære-

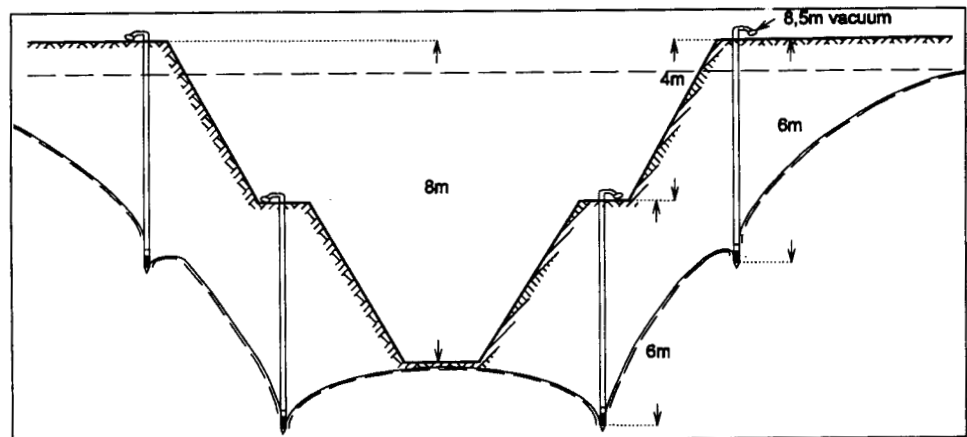
Figur 5  
Komponenter i sugespidsanlæg



Figur 6  
Afsækning ved filterbrøndsanlæg



Figur 7  
Sugespidsanlæg i 2 niveauer



res tryk (~10 m vandsøjle), kan sugespidspumpen maksimalt etablere 10 m undertryk (i praksis ca. 9 m svarende til 0,9 bars undertryk). Når der yderligere tages hensyn til tryktab i rør, slanger og sugespids, er det maksimale undertryk ved sugespids af størrelsesordenen 0,7 bar (7 m vandsøjle). Det er grunden til, at sugespidsanlæg har en begrænset afsænkingskapacitet med et maksimum omkring 5-6 m under pumpens niveau.

Såfremt der er behov for at etablere større afsænkning, må pumpen placeres lavere, fx ved at etablere to (eller flere) anlæg i takt med, at udgravningen etableres, se **Figur 7**.

Normalt kan en sugespidspumpe betjene 15 til 25 spidseser.

## 2.6 Afsænkning ved filterbrønds anlæg

### 2.6.1 Filterbrønds anlæg

Grundvandssænkning ved filterbrønds anlæg består i, at der etableres et antal filterbrønde omkring (og måske inden for) den planlagte byggegrube. Ved at pumpe på filterbrøndene sænkes grundvandsspejlet, og opgaven er således at sænke grundvandsspejlet inden for byggegruben tilstrækkeligt til, at udgravningsarbejdet kan foregå tørt.

Filterbrøndene udføres i princippet som vandforsyningsboringer, men også kun i princippet. Dybden bestemmes primært af behovet for grundvandssænkning og kun sekundært af behovet for at anbere stærkt vandførende lag (som måske ligger dybere end kritisk niveau).

Filterkastning og slidserør dimensioneres ud fra hensynet til, at brønden kan levere materialefrit vand, men filterkastningen optimeres sjældent med baggrund i detaljeret bestemmelse af kornfordelingskurven for de gennemborede lag – ofte vælges konservativt på basis af et kvalificeret skøn. Dette kan være acceptabelt, eftersom filterbrøndens levetid oftest ligger mellem nogle få måneder op til sjældent mere end 1 år.

*Boringsforsegling* udføres som ved vandforsyningsboringer, mens *boringsafslutningen* oftest er mere primitivt og primært rettet mod den risiko for overlast, som er en naturlig ingrediens på en entreprenørarbejdsplads.

Vandet pumpes op med elektrisk drevne dykkede *centrifugalpumper*. Disse findes i kapacitetsintervallet fra 0,5 til 250 m<sup>3</sup>/h og dækker således alle praktiske formål. Tidligere anvendte man *ejektorpumper* i intervallet 0,5 - 5 m<sup>3</sup>/h, men disse er på grund af dårlig energiøkonomi blevet overflødiggjort af de små *dykpumper*.

Vandet fra pumperne ledes til recipient gennem PEH eller PEL slanger.

Det anbefales at anbringe en *vandmåler* for hver pumpe, således at man på denne måde kan kontrollere de enkelte boringers funktion.

Ud over filterbrøndene hører der til et filterbrønds anlæg et passende antal *pejlebrønde*, således at der opnås et tilstrækkeligt grundlag for vurdering af grundvandssænkingsanlæggets funktion.

Svigt af et grundvandssænkingsanlæg kan have ubehagelige konsekvenser for et bygge-/anlægsarbejde omfattende oversvømmelse af materiel og delvist færdige anlægsdele samt risiko for ødelæggelse af funderingsforholdene.

Det er derfor sædvanligt efter en risikoanalyse at udstyre et grundvandssænkingsanlæg med et *overvågnings- og nødstrømsanlæg*. *Overvågningsanlægget* skal sikre hurtigst mulig alarm i tilfælde af svigt så som strømsvigt, pumpevigt, høj vandstand, blokering af afløb etc., således at udbedrende foranstaltninger kan iværksættes hur-

Filterbrønd

Centrifugalpumpe

Svigt af anlæg

tigst muligt, medens nødstrømsanlæg er en forebyggelse mod det totalsvigt, som kan indtræffe, hvis hovedstrømforsyningen bliver afbrudt.

## 2.6.2 Dimensionering af filterbrønds anlæg

### Minimumsdesign

Et grundvandssænkingsanlæg dimensioneres på grundlag af resultaterne fra forundersøgelserne, primært kendskab til jordbundsforhold, resultater fra pumpeforsøg samt kendskab til geometrien af den aktuelle udgravning.

Det kan være en fordel at starte med et minimumsdesign, som løbende udbygges på basis af en vurdering af effekten af de først etablerede brønde. Herved kan opnås et optimalt design efter et princip, som i udlandet kendes under betegnelsen “Observational approach” – på dansk “Observationsmetoden”.

Dimensionering af et grundvandssænkingsanlæg følger normalt følgende skridt.

På basis af foreliggende pumpeforsøgsresultater beregnes de aktuelle vandførende lags permeabilitetskoefficient/transmissivitet, og grundvandssænkningens rækkevidde skønnes/beregnes.

Den nødvendige grundvandssænkning beregnes som afstanden fra det usænkede grundvandsspejl til det sænkede grundvandsspejl under udgravningen. Det usænkede vandspejl kendes fra de geotekniske undersøgelser, men skal justeres for at tage højde for naturlige, forventelige vandspejlsstigninger i byggeperioden.

### Nødvendig sænkning

Det afsænkede vandspejl skal ligge i en passende dybde under udgravningsniveauet. Normalt vælges 0,5 m, men i særlige tilfælde øges den dybde op til 2,0 m for bl.a. at skabe yderligere sikkerhed mod skader ved svigt af anlæg (længere reaktionstid). Husk ved fastlæggelse af udgravningsniveau at tage højde for de dybeste konstruktioner så som fundamenter, pumpe-sumpe, elevatorskakte mv.

Det er herefter muligt at få et første skøn over den nødvendige oppumpede vandmængde ved at anvende en af de to formler, som er anført i afsnit 4.1.

Herved antager man, at grundvandssænkningen løses ved hjælp af en filterbrønd, som er placeret midt i udgravningsfeltet, og som er i stand til at sænke vandspejlet  $s_x$  m i en afstand af  $x$  m fra brønden. Afstanden  $x$  vælges som radius i den cirkel, som har samme areal som udgravningen.

### Skønnede værdier

Såfremt der ikke foreligger tilstrækkelige oplysninger så som pumpeforsøgsresultater mv., kan dimensioneringen gennemføres med skønnede værdier.

Permeabilitetskoefficienten,  $k$ , kan i så fald beregnes empirisk ud fra udtrykket  $k = 0,01 \times d_{10}^2$ , hvor  $d_{10}$  er kornstørrelsen svarende til 10% gennemfald, målt i mm.  $k$  bestemmes herved i m/sek.

Hvis der foreligger en geologisk bedømmelse af de gennemborede lag, kan permeabilitetskoefficienten skønnes ud fra følgende erfaringstal:

Grus	: $5 \cdot 10^{-3}$	m/sek.
Groft Sand	: $10^{-3}$	m/sek.
Mellemkornet Sand	: $5 \cdot 10^{-4}$	m/sek.
Ret fint Sand	: $10^{-4}$	m/sek.
Fint Sand	: $5 \cdot 10^{-5}$	m/sek.
Finsand	: $2 \cdot 10^{-5}$	m/sek.
Grovsilt	: $10^{-5}$	m/sek.
Silt	: $10^{-6}$	m/sek.
Moræneler	: $10^{-5}$ til $10^{-7}$	m/sek.
Kalk	: $10^{-3}$ til $10^{-5}$	m/sek.

Hvor der er flere permeable lag, erstattes  $k \cdot t$  i formel (1) med summen af  $k \cdot t$  for de aktuelle lag.

*Rækkevidden*,  $R$ , kan ligeledes skønnes ud fra den geologiske beskrivelse. Til overlagsmæssige beregninger anbefales anvendt:

Formation	Frit reservoir	Artesisk reservoir
Kalk	300 - 500 m	1000 - 2000 m
Grus	250 - 500 m	1000 - 2000 m
Sand	200 - 400 m	500 - 1500 m
Ler og silt	50 - 150 m	100 - 300 m

Bemærk, at det i praksis er det groveste gennemgående lag, som betyder mest for skønnet af rækkevidden.

Brøndplacering

Når den samlede vandmængde er bestemt, fordeles denne på et passende antal brønde placeret hensigtsmæssigt langs udgravningens omkreds.

Afstanden mellem brøndene afhænger af jordbundsforholdene (rækkevidden) med kort afstand (15-20 m) i finkornet materiale voksende til 25-30 m i groft materiale og 40-60 m i kalk.

Placeringen skal være til mindst mulig gene for øvrige entreprenørers arbejde, herunder mindst mulig risiko for uagtsom beskadigelse af anlægget.

Når der således er udarbejdet et første udkast til brøndplacering og ydelse pr. brønd, kan den samlede effekt(sænkning) af anlægget beregnes. Igen anvender vi standardformlen, idet vi for hvert enkelt punkt i byggegruben beregner den samlede effekt(sænkning) som summen af effekten fra de enkelte brønde.

I praksis gøres dette med edb-programmer, men det kan også gøres mere traditionelt ved at udvælge nogle særligt udsatte punkter og gennemføre beregningen manuelt. Vær opmærksom på, at de enkelte brønde vil interferere, således at der ud over egensænkningen vil komme bidrag til sænkningen fra de øvrige brønde. Disse bidrag skal der korrigeres for ved valg af ydelse fra den enkelte boring.

## 2.7 Filterbrønds anlæg med *vacuum*

Ved grundvandssænkingsanlæg kan man være i den situation, at vandbevægelsen er langsom og processen derfor tidskrævende, på grund af en lav permeabilitet.

Lav permeabilitet

Dette kan man hjælpe på ved at sætte vacuum på filterbrøndene. Udnyttelse af vacuum forudsætter, at boringen er lufttæt afsluttet foroven, at borehullet uden for filterrøret forsegles mellem filterstrækningen og terræn i et lavt permeabelt lag.

Vacuum opnås ved at tilslutte en luftpumpe til toppen af filterrøret. Herved kan opnås et undertryk over vandspejlet i boringen på op til næsten 10 m vandsøjle. Når lufttrykket over vandspejlet reduceres, reduceres vandtrykket i vandsøjlen tilsvarende, hvorved gradienten mod boringen og vandbevægelsen accelereres.

Anvendelse af vacuum ved grundvandssænkning med filterbrønde er specielt effektivt i lavpermeable, finkornede jordarter som silt og meget fint sand.

Man skal være opmærksom på, at muligheden for at anvende vacuum skal være forberedt ved anlæggets etablering, således at den fornødne forsegling findes.

Ved anvendelse af vacuum øges trykhøjden svarende til det etablerede vacuum, et forhold, som skal inddrages ved valg af pumpe med tilstrækkelig løftehøjde.

## 2.8 Sikringsanlæg

### Mulige defekter

Det er et krav til et grundvandssænkingsanlæg, at det fungerer uden afbrydelse i hele den del af bygge-/anlægsperioden, hvor der er behov for grundvandssænkning.

Som ethvert andet teknisk anlæg er det udsat for defekter, som kan reducere anlæggets effekt. De oftest forekommende er:

- reduceret ydelse af en eller flere pumper (tilstopning af filter, pumpe eller afgangssystem),
- stop af pumpe (fejl i el-tilslutning, defekt i pumpe),
- stop af gruppe af pumper (fejl i el-tilslutning til gruppen),
- stop af hele anlæg (udfald af strømforsyning)
- defekt i sugeledninger ved et sugespidsanlæg.

### Reduktion af risiko

For at reducere risikoen for defekter og de deraf følgende konsekvenser er det vigtigt:

- at anlægget består af kvalitetsprodukter (brønde, pumper, el-system, afgangsledninger), som er etableret professionelt,
- at anlægget overvåges jævnlige med kontrol af vandstand og pumpeydelse, tilsyn med afgangsvand etc.,
- at anlægget forsynes med et antal automatiske alarmpunkter såsom alarm for høj vandstand, pumpestop, el-udfald etc.,
- at der i passende omfang er reserve, såsom ekstra brønde, reservepumper og vel mest vigtigt reservestrømforsyning.

Omfanget af sikringsanlæg skal vurderes i hvert enkelt tilfælde som resultat af en risikoanalyse, hvori sandsynligheden for defekter samt konsekvenserne af defekter vurderes.

Konsekvenserne ved hel eller delvis svigt af et grundvandssænkingsanlæg er:

- ødelæggelse af byggegrubens bund på grund af opdrift,
- ødelæggelse af byggegrubens sider/skråninger på grund af erosion, vandtryk på indfatningsvægge mv.,
- ødelæggelse af helt eller delvist færdige bygningsdele på grund af opdrift,
- ødelæggelse af materiel,
- risiko for mandskab.

## 2.9 Metodevalg

### Billigste alternativ

Den tekniske/økonomiske løsning af et tørholdelsesproblem vil oftest være en midlertidig grundvandssænkning. Alternative metoder i form af afskærende vægge, injicering/frysning eller trykluft kommer som regel kun på tale, såfremt der er forhold, som umuliggør grundvandssænkning, fx risiko for følgeskader på naboejendomme, hensyn til drikkevandsindvinding og lign.

Ved valg mellem de forskellige grundvandssækningsmetoder vil tørholdelse med dræn og pumpe-sumpe være det billigste alternativ og vælges derfor konsekvent, såfremt metoden vurderes fremkommelig.

### Filterbrønde versus sugespids

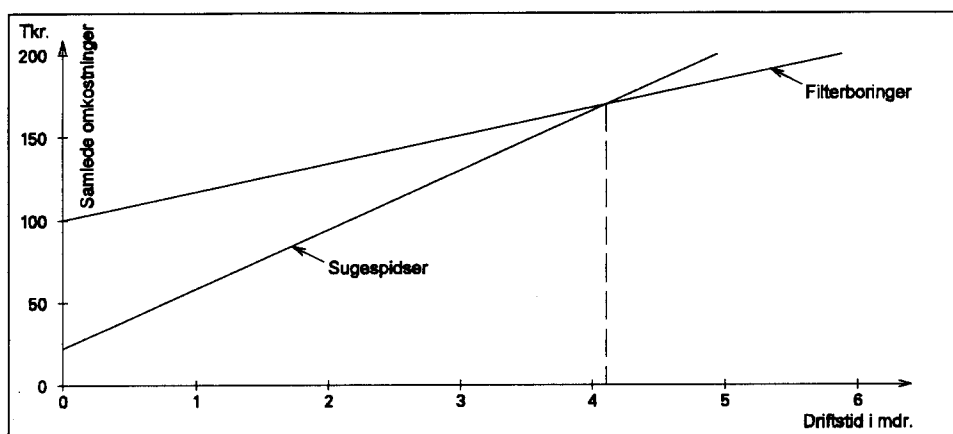
Efter således at have valgt de nemme og de vanskelige løsninger fra på objektive kriterier, tilbagestår valget mellem anlæg baseret på filterbrønde henholdsvis sugespids.

Der findes ingen faste kriterier for valget, men af **Figur 8** fremgår en række af de forhold, som har betydning for dette valg.



Kriterium	Filterbrønde	Sugespidser
Afsækning		mindre end 5 m
Driftsperiode	mere end 3-6 måneder	mindre end 3-6 måneder
Jordbundsforhold	Hård, stenet (Moræneler), kalk	Enskornet Sand
Lagdeling	Lagdelt	Homogen
Kornstørrelse	Ingen begrænsning	$d_{50} > 0,2$ mm
Vandmængder	1-500 m <sup>3</sup> /h pr. brønd	< 1 m <sup>3</sup> /h pr. spids
Entreprenørgener	Små	Større
Sikkerhedsniveau	Højt	Moderat

Figur 8  
Kriterier for valg  
af anlægstype



Figur 9  
Sammenligning mellem  
sugespidsanlæg og  
filterbrøndsanlæg

Grundlaget er primært økonomiske betragtninger, men økonomien er jo et udtryk for teknikkens effektivitet.

Sugespidsanlæg er normalt begrænset til afsækninger svarende til ca. 5 m under pumpeanlæggets niveau (sugepumper). Ved større afsækninger kan placeres sugespidsanlæg i flere niveauer, hvilket imidlertid stiller større pladskrav. Filterbrønde kan anvendes til afsækninger uden begrænsning (dykpumper).

Sugespidser er normalt økonomiske ved korte driftsperioder (< 3-6 måneder), medens filterbrønde er økonomiske ved længere driftsperioder (> 3-6 måneder). Dette skyldes primært forskelle i etablerings- og driftsomkostninger, hvilket er anskueliggjort på **Figur 9**.

Sugespidser er velegnede til anvendelse i homogent, enskornet sand. Hård, stenet jord (moræneler, kalk) kan vanskeliggøre nedskylning af sugespids, medens det ikke er hindrende for nedboring af filterbrønde.

Ved lagdelt jord er der mulighed for tilpasning af filteret ved filterbrønde, medens en tilsvarende mulighed ikke findes ved sugespids.

I finsand og silt kan tilbageholdelsen af materialet være vanskeligt at sikre ved sugespids, medens der ved filterbrønde kan foretages en kontrolleret gruskastning.

I grove sand- og gruslag vil vandtilstrømningen overstige kapaciteten på et sugespidsanlæg, hvorimod filterbrøndens kapacitetsgrænse ligger meget højt (over 500 m<sup>3</sup>/h).

Filterbrøndsanlæg kan for en ringe del af etableringsomkostningerne udformes således, at de faktiske entreprenørgener bliver minimale. Ved sugespidsanlæg må en-

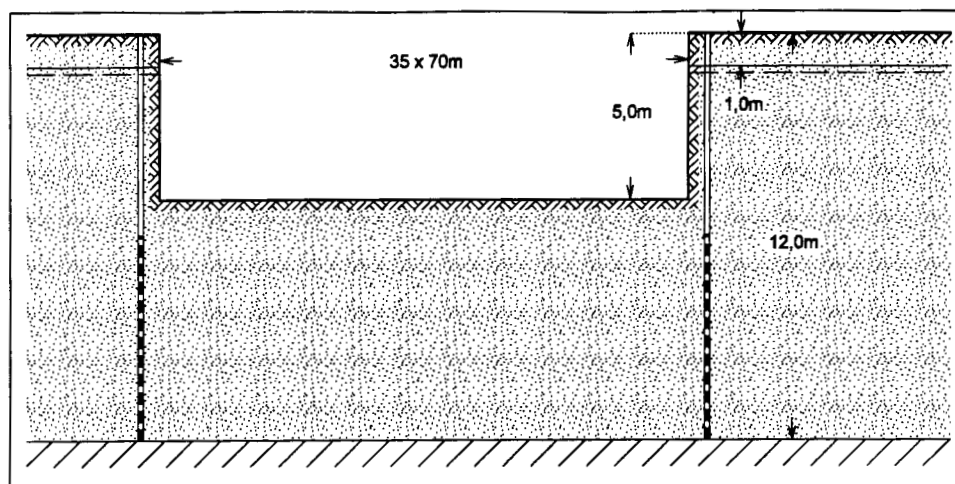
Afsækning

Driftsperiode

Jordbundsforhold

Entreprenørgener

Figur 10  
Byggegrube i frit reservoir  
(Eksempel 2.10.1)



treprenøren sædvanligvis acceptere sugespids og stamrør (i og) omkring byggegruben.

Sikkerhedsniveau

Ved filterbrønds anlæg vil det være muligt at opnå et meget højt sikkerhedsniveau (ved automatisk overvågning, nødstrømsanlæg, pumpestandsreserver mv.), hvorimod det ved sugespids anlæg, selv med ovennævnte tiltag, kan være vanskeligt at sikre, at anlægget ikke lider overlast og derved bringes ud af funktion. (Et brud på sugeledningen indebærer, at anlægget træder ud af funktion).

## 2.10 Eksempler

### 2.10.1 Byggegrube i frit reservoir

Problem

Der skal udføres en byggegrube med lodret indfatningsvæg og med et grundareal på  $35 \cdot 70 \text{ m}^2$ .

Jordbundsforholdene består af mellemkornet sand fra terræn til 12 m under terræn, hvor der træffes ler. Grundvandsspejlet ligger 1 m under terræn, jf. **Figur 10**.

Udgravningen skal føres 5 m under terræn, dvs. 4 m under grundvandsspejlet.

Prøvepumpninger har vist, at sandet har en permeabilitetskoefficient på  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ , og at rækkevidden er 350 m. Lerets permeabilitet skønnes til  $\leq 10^{-7} \text{ m/s}$ .

Metodevalg

Der er intet i de foreliggende informationer (eks. nabohensyn), som motiverer alternative løsninger til grundvandssenkning.

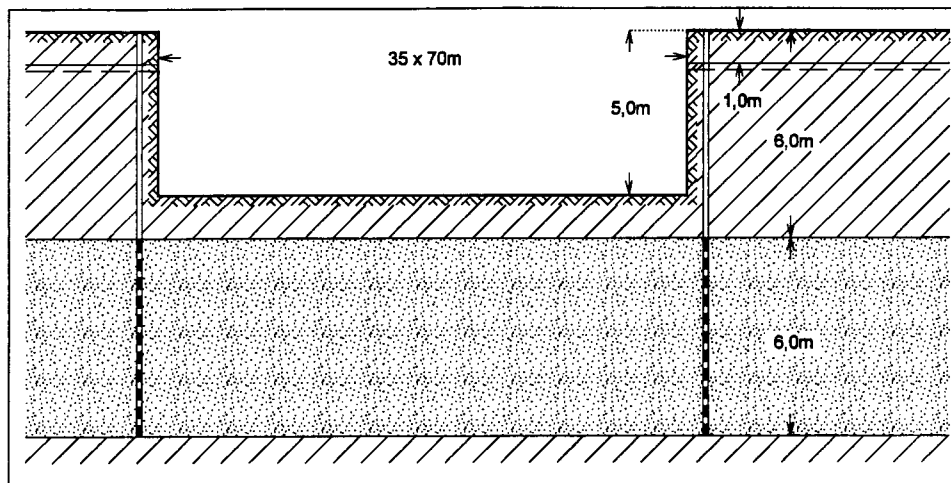
Desuden vil det erfaringsmæssigt være umuligt at håndtere en grundvandssenkning under de givne forhold med dræn og lænsugning.

Valget står således mellem et anlæg baseret på filterbrønde eller et anlæg baseret på sugespids.

Til dette valg skal vi blandt andet have en vurdering af den nødvendige oppumpningsmængde.

Den nødvendige grundvandssenkning er afstanden fra grundvandsspejlet til byggegrubens bund plus en sikkerhedsmargin, som vælges til 0,5 m, i alt 4,5 m.

Vi planlægger at placere grundvandssænkingsanlægget i en afstand af 2 m uden for byggegrubens indfatningsvægge, dvs. i en firkant med dimensionerne  $39 \cdot 74 \text{ m}^2$ . Arealet af firkanten er  $2.886 \text{ m}^2$ , og radius i en cirkel med samme areal er 30 m.



Figur 11  
Byggegrube over artesiske  
reservoir  
(Eksempel 2.10.2)

Der er tale om strømning i et frit reservoir, og vi kan derfor få en første vurdering af den nødvendige oppumpning ved at anvende udtryk (2).

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - y_x^2)}{\ln R/x}$$

hvor

$$k = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$H = 11 \text{ m}$$

$$y = 11 - 4,5 = 6,5 \text{ m}$$

$$R = 350 \text{ m}$$

$$x = 30 \text{ m}$$

hvilket giver

$$Q = 0,050 \text{ m}^3/\text{s} = 181 \text{ m}^3/\text{h}$$

Valget falder ud til fordel for et anlæg baseret på filterbrønde, bl.a. fordi:

- en vandmængde svarende til 0,8 m<sup>3</sup>/h pr. løbende meter af udgravningens omkreds er stor for sugespidsanlæg,
- afsænkningen på 5,5 m under terræn er dyb for et sugespidsanlæg,
- det skønnes, at byggeperioden er så lang, at filterbrøndsløsningen er økonomisk optimal.

Filterbrønde

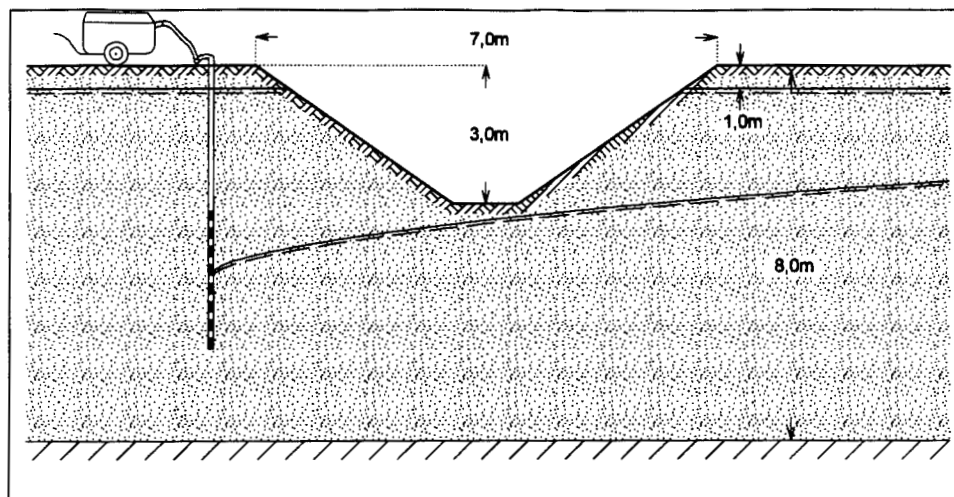
Med baggrund i pumpeforsøgsresultaterne skønnes, at der fra hver enkelt brønd kan pumpes 25 m<sup>3</sup>/h svarende til, at et anlæg baseret på 7,3 brønde er tilstrækkelig.

For kontrol af skønnet, placeres derefter 8 brønde omkring byggegruben, og effekten af disse 8 brønde beregnes for hvert enkelt punkt af udgravningen, idet kravet er, at afsænkningen overalt skal være større end eller lig med 4,5 m.

Er kravet ikke opfyldt, må beregningen gentages med et større antal brønde; omvendt kan en for stor afsænkning motivere, at antallet af brønde reduceres.

Med en forventet ydelse på 25 m<sup>3</sup>/h vælges en dykpumpe, fx Grundfos SP 27-5 (q = 13-36 m<sup>3</sup>/h), som har en udvendig diameter på 137 mm og således kan monteres i et 165 mm PVC-filter-rør placeret i en 10" boring.

Figur 12  
Kloakudgravning  
i frit reservoir  
(Eksempel 2.10.3)



## 2.10.2 Byggegrube over artesisk reservoir

### Problem

Jordbundsforholdene fra eksempel 2.10.1 ændres, således at de øverste 6 m består af ler med  $k < 10^{-7}$  m/sek.

Byggegruben og grundvandsforholdene i øvrigt er uændrede, dvs. at potentialet i sandet svarer til et vandtryk 1 m under terræn, jf. **Figur 11**.

På trods af at hele byggegruben skal udgraves i ler med relativ lav permeabilitet, er det nødvendigt at forebygge problemerne som følge af risikoen for opskydning af byggegrubens bund (grundbrud).

Som i eksempel 4.10.1 kan vi indledningsvis bortvælge alternative metoder og lænspumpning, og valget står atter mellem et anlæg med filterbrønde eller et anlæg med sugespidsler.

Da vandtilstrømningen foregår i det artesiske reservoir beliggende 6 til 12 m under terræn, benyttes formel (1):

$$Q = \frac{2\pi kts_x}{\ln R/x}$$

som med  $t = 6$  m og  $s = 4,5$  m samt med en skønnet rækkevidde  $R = 600$  m og øvrige værdier som i eksempel 4.10.1 giver:

$$Q = 0,028 \text{ m}^3/\text{s} = 102 \text{ m}^3/\text{h}.$$

### Filterbrønde

Med samme argumentation som i eksempel 2.10.1 vælges et anlæg på filterbrønde.

Den enkelte brønds ydelse vurderes ud fra prøvepumpningerne til  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  og dermed et samlet behov på 6,8 brønde. Der vælges et anlæg med 8 brønde, som efter behov øges eller reduceres. Det kontrolleres, at disse 8 pumper giver en tilstrækkelig effekt (sænkning i ethvert punkt indenfor byggegruppen).

Med en forventet ydelse på  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  vælges en dykpumpe, fx Grundfos SP 16-5 ( $q = 10-22 \text{ m}^3/\text{h}$ ), som har en udvendig diameter på 131 mm og således kan monteres i et 165 mm PVC-filterør placeret i en 10" boring.

### 2.10.3 Kloakudgravning i frit reservoir

Der skal udføres en kloakudgravning til 3 m under terræn. Udgravningen skal have en bundbredde på 1 m og et skråningsanlæg på 1 svarende til en bredde i terræn på 7 m.

Problem

Jordbundsforholdene består af ret fint sand fra terræn til 8 m under terræn, hvor der træffes ler. Grundvandsspejlet ligger 1 m under terræn, jf. **Figur 12**.

Som i eksempel 2.10.1 kan vi bortvælge alternative metoder samt lænspumpning og vælge mellem sugespidsler og filterbrønde.

Placeres anlægget 1 m uden for udgravningen, og regnes der med, at der skal tørholdes en strækning på 30 m, har det tørholdte område et areal på  $9 \cdot 30 \text{ m} = 270 \text{ m}^2$  svarende til en cirkel med radius på 9 m.

Da det er frit reservoir, anvendes formel (2):

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - y_x^2)}{\ln R/x}$$

hvor

$$k = 10^{-4} \text{ m/sek. (skøn)}$$

$$H = 8 \text{ m}$$

$$y = 8 - 2,5 = 5,5 \text{ m}$$

$$R = 200 \text{ m (skøn)}$$

$$x = 9 \text{ m}$$

Hvilket giver:

$$Q = 0,003 \text{ m}^3/\text{s} = 12 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Til den aktuelle opgave vælges sugespidsanlæg, bl.a. fordi:

Sugespidsanlæg

- vandmængden er moderat svarende til  $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$  pr. meter udgravning,
- afsenkningen er moderat svarende til 3,5 m under terræn,
- anlægstiden er kort, sædvanligvis kun nogle få uger.

Af hensyn til entreprenørarbejdet monteres kun sugespidsler på den ene side af udgravningen, hvor de sættes med en indbyrdes afstand på 2 m, i alt 15 spidsler med en gennemsnitlig ydelse på  $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Sugespidserne spules ned til 6 m under terræn og gruskastes over de nederste 2-4 m.

## 2.11 Litteratur

Driscoll, F.G.: Groundwater and Wells. Johnson Division. 1986 (second edition).

Powers, J.P.: Construction Dewatering. John Wiley & Sons, Inc. 1992 (second edition).

Herth, N. and Arndts E.: Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung, Wilhelm Ernst & Sohn, 1973.

Hansen, A.: Grundvandssænkning. Fundering. Teknisk Forlag, 1960.

Norm for fundering, DS 415. Teknisk Forlag 1984 (3. udgave).

Ballisager, C.C. et al.: Tørholdelse af byggegruber. Geoteknisk Institut. Technical Report 14, 1983.

# 3. Geofysiske metoder og borehulsmålinger

**Formål** Hensigten med dette modul er at give en oversigt over de vigtigste geofysiske kortlægningsmetoder, der især anvendes ved grundvandsrelaterede undersøgelser (hydrogeologiske) i Danmark fx i forbindelse med udvælgelse af nye borelokaliteter, bestemmelse af maksimal boreddybde, kortlægning af forurening, beskyttelsesforanstaltninger osv. Endvidere at give en lidt mere detaljeret beskrivelse af de vigtigste metoder til geofysiske undersøgelser i borer (borehuls-logging). Sidstnævnte er især relevante forud for færdigudbygning af en boring eller i forbindelse med planlægning af renovering af ældre borer.

## 3.1 Geofysiske kortlægningsmetoder

**Geofysiske metoder** For ikke mere end ca. 10 år siden var der kun een metode på tale, når der blev diskuteret behov og mulighed for at lade udføre kortlægning af grundvandsmagasiners optræden og udbredelse ved hjælp af geofysiske målinger på terrænoverfladen, og denne metode var kendt under navnet “*geoelektrik*”. Nu er situationen en ganske anden, idet det svirrer i luften med mange andre metodebetegnelser: *Gravimetri, elektromagnetiske sonderinger, slæbegeoelektrik, refleksionsseismik, multi elektrode profilering, elektromagnetisk profilering, proton magnetiske profiler, georadar* osv.

**Anvendelsesområder** Geofysiske metoder anvendes ikke alene for at kortlægge forekomsten af grundvandsmagasinerne, men også med henblik på at vurdere deres sårbarhed mod forurening fra overfladen, dvs. vurdere den overliggende lagseries mulighed for at yde beskyttelse mod nedsivning af uønskede stoffer. I specielle tilfælde kan geofysik også anvendes til lokalisering af forureningskilder og til kortlægning af visse typer forureninger. Desuden anvendes geofysiske metoder ved kortlægning af råstoffer samt ved større geotekniske undersøgelser.

**Tolkning** Det er næppe sandsynligt, at en brøndborer vil skulle foretage en vurdering af resultatet af en geofysisk undersøgelse, men det synes relevant for en brøndborer at have en overordnet ide om de forskellige metoders principgrundlag, hvordan de udføres, hvilken information de giver, og hvad de ikke kan fortælle, dvs. hvilke begrænsninger de har. Netop disse forskellige forhold ved metoderne er forsøgt sammenstillet i nedenstående **Tabel 1**.

## 3.2 Borehulslogging

**Formål med borehulslogging** Borehulslogging er fællesbetegnelse for geofysiske undersøgelser i en boring ved hjælp af en målesonde, som nedsænkes i boringen under samtidig måling af en fysisk parameter. Der findes en række forskellige fysiske parametre, som er af interesse at måle. Med moderne udstyr udføres målingerne som regel med kombinerede sonder, der kan måle to-tre parametre samtidig. Målesignalet registreres og optages digitalt sammen med dybdeplaceringen af målesonden således, at der efterfølgende via computer kan foretages databehandling og data udtegning af log-kurven mod dybden.

**To hovedtyper** Til de forskellige parametre knytter der sig forskellige målemetoder eller logmetoder. Disse kan inddeles i to grupper efter hovedtypen af den information, der kan udledes fra de enkelte logmetoder:

- Logmetoder, som giver geologisk information, dvs. laggrænser, lagtype og lagsekvenser.
- Logmetoder, som giver teknisk information, dvs. diameter, forerørslængde, filterinterval, utætheder i forerør, indstrømningsfordeling i filterinterval/åbent interval under pumpning, vertikal strømning i boring uden pumpning (kortslutning), indstrømningszoner med forskellig ledningsevne (forskellig vandkemi) i driftssituation, lokalisering af saltvand, temperaturforhold.

Nedenstående **Tabel 2** viser de mest gængse logmetoder med tilhørende fysisk måleparameter, samt hvilken information man kan opnå. Som det fremgår, giver flere af metoderne mere end blot een type information.

I forbindelse med beskrivelsen af logging metoderne vil der blive givet særlig vejledning omkring de metoder, som en brøndborer med fordel selv ville kunne udføre dels som et led i kvalitetskontrollen af eget arbejde, men også med hensyn til at få flere og bedre informationer om den gennemborede lagfølge.

For de enkelte metoder vil der blive fokuseret på:

- Hvad er princippet i metoden (måleparameter, måleprincip, tolkning)?
- Til hvilken nytte, dvs. hvilke informationer kan metoden give?
- Hvilke begrænsninger har metoden, dvs. hvilke informationer kan ikke opnås?
- Hvordan ser et optimalt undersøgelsesprogram ud for en enkelt boring?
- Hvad koster logging undersøgelser?
- Hvem kan udføre underborehulslogging i dagens Danmark?

### 3.2.1 Logmetoder, som giver geologisk information

De vigtigste og mest anvendte metoder er *gamma-log* og *resistivitets-log*. Den første måler *jordlagenes naturlige radioaktivitet*, og den anden måler deres *specifikke elektriske modstand* (populært sagt: ohmsk modstand per volumen enhed).

*Gamma-log:*

Måleprincippet ved gamma-log er, at der i målesonden anvendes en krystaldetektor, som er følsom overfor *gamma-stråling*. Strålingen omsættes i målesonden til elektriske impulser, hvis antal per tidsenhed (min. eller sek.) giver et mål for strålingsintensiteten. Variationen af denne ned gennem boringen giver et billede af lagfølgen, idet lerlag typisk vil have højere stråling end silt, som igen vil have højere stråling end sand og grus. Sagt på en anden måde, jo større indholdet er af finkornet materiale, jo højere er gamma-strålingen. For strålingsintensiteten i kalkaflejringer gælder, at København Kalk (kalksandskalk) har højere stråling end bryozokalk og skrivekridt, men at de to sidstnævnte generelt viser samme strålingsniveau.

Årsagen til, at der overhovedet forekommer gamma-stråling fra jordlagene, er de tre i naturen optrædende *radioaktive grundstoffer* Uran, Thorium og Kalium (for sidstnævnte er det i virkeligheden den medfølgende isotop Kalium<sup>40</sup>, som giver stråling). De tre stoffer optræder med forskellig koncentration i de forskellige lagtyper. Der kan ikke gives absolutte tal for strålingsintensiteten i de forskellige typiske danske aflejringer, idet denne vil afhænge af størrelsen af målekrystal i detektor samt af boringens diameter, forerør, type af eventuel boremudder, idet vand- eller boremudder volumet samt rørmaterialet vil dæmpe strålingsniveauet. Typiske værdier optaget med en 25x50 mm detektor krystal fra en 6-8” boring med forerør til kalken er: 800-2000 impulser/min i moræneler, 400-800 i sand, 400-800 i København kalk og

Logmetoder

Beskrivelse af metoderne

Principperne

Strålingsforhold

Typiske værdier

Tabel 1  
Geofysiske  
kortlægningsmetoder.

Metode/synonym	Parameter (enhed)	Udstyr/udførelse	Bemanding
<b>Geol. sondering (VES)</b>	Resistivitet som funktion af elektrodeafstand (ohmmeter)	Måleinstr.-kabler på tromler- elektroder	1 + 2 assist
<b>Geol. profilering (HEP)</b>	Resistivitet som funktion af elektrodeafstand (ohmmeter)	Måleinstr.-målfaste kabelsæt- elektroder m. koblinger	1 + 2 assist
<b>Slæbegeol (CEP)</b>	Resistivitet som funktion af elektrodeafstand (ohmmeter)	Computer/måleinstr. påmont. specialkøretøj m. multielektrode slæbekabel	1 + 1 assist
<b>Multi elektrode profilering (MEP)</b>	Resistivitet som funktion af elektrodeafstand (ohmmeter)	Computer/måleinstr. m. flere sæt multielektrodekabler m. elektroder & koblinger	1 + 1 assist
<b>Elektro-magnetisk sondering (TEM)</b>	Resistivitet som funktion af måletid (ohmmeter)	Måleinstr. – senderkabe – modtagerspole	1 + 1 assist
<b>Elektro-magnetisk profilering (EMP)</b>	Konduktivitet som funktion af sender- modtagerafstand (mS/m)	Måleinstr.-senderspole & modtagerspole (begge bærbare)	1 + 1 assist
<b>Stangslin-gram (SEMP)</b>	Konduktivitet ved fast sender- modt. afstand (mS/m)	Måleinstr. m. sender- & modtagerspole monteret på ca. 5,5 m lang stang	1
<b>Georadar (GER)</b>	Radar bølgehastighed (m/sek) og refleksionskoefficienter	Måleinstr. mont. i terræn- gående bil -senderantenne & modtagerantenne	1 + 1 assist
<b>Gravimetri (GVY)</b>	Jordens tyngdefelt (milligal)	Måleinstr. & nøjagtig nivellering af målestationer	1 + 1 assist
<b>Proton magnetometri (PRM)</b>	Jordens vertikale magnetfelt (Ørsted)	Måleinstr.	1
<b>Refleksions-seismik (REFL)</b>	Lydhastighed (m/sek) & refleksionskoefficienter	Måleinstr. – geofonkabel – geofoner – dynamit/ elektr. detonatorer	1 + 2 assist

<400 i bryozokalk. Andre eksempler på strålingsniveauer i forskellige lagfølgesituationer er illustreret på **Figur 1**.

Forskelle mellem  
aflejringer

Ud over de generelle forskelle i gamma-stråling imellem de enkelte lagtyper kan der indenfor de enkelte lagtyper, eksempelvis i moræneler, smeltevandssand, marint sand, København Kalk, bryozokalk og i skrivekridt, ses karakteristiske forskelle i såvel strålingsniveau som i strålingsmønster (dvs. detailvariation) fra et dybdeinterval til det følgende. Sådanne forskelle indikerer karakteristiske forskelle i fx sammensætning (indhold af ler, kornfordeling), i porøsitet eller i cementering. Indenfor især tertiære aflejringer af sand, ler og kalk samt i kridtaflejringerne kan der optræde enkelte



Resultat output	Information & begrænsninger	Anvendelse
Sonderingskurve på dobbeltlogaritmisk papir: Resistivitet versus strømeelektrode-afstand	Overordnede lagfølge med opdeling i max 6-7 lag ned til ca. 100 i områder med ler øverst. Under evt. tørt sand fås kun lille lagopløsning.	Sammensætningen af den øvre del af lagfølgen ned til ca. 25 m, derunder identifikation af evt. store sandlag samt af underliggende begrænsning i form af fedt ler eller saltvand.
Resistivetsprofil langs målelinie eller resistivetskort med iso-ohmmeter kurver		Overordnet kortlægning af karakter af dæklagene over sand- eller kalk/kridt grundvandsmagasiner som alternativ til slæbegeol, hvor denne ikke kan udføres.
Resistivetsprofil langs målelinie eller resistivetskort med iso-ohmmeter kurvers		Detailkortlægning ned til ca. 25 m af karakter af dæklagene over sand- eller kalk/kridt grundvandsmagasiner.
Resistivets tværsnit langsmålelinie med iso-ohmmeter kurver		Detailkortlægning af sandreservoirer ned til max. 60 m samt af dæklagenes karakter.
Sonderingskurve på dobbeltlogaritmisk papir: Resistivitet versus måletid op til 1 msek	Bestemmelse af dybden til fedt ler eller saltvand og en overordnet opdeling af lagserien ovenover i ned til maksimum 125 m dybde i 3-4 lagenheder	Kortlægning af store sandlag i dybder under 20 m, af "begravede" dale i den tertiære leroverflade samt af dybden til saltvand i sand eller kalk/kridt
Konduktivetsprofil langs målelinie eller konduktivetskort med iso-mS/meter kurver		Kortlægning af fordelingen af ler og sand ned til 25-30 m.
Konduktivetsprofil langs målelinie eller konduktivetskort med iso-mS/meter kurver		Terrænnær (til 5-7 m dybde) kortlægning af fordelingen af ler og sand, samt til lokalisering af nedgravede metal-tønder/ beholdere.
Radargram langs målelinie med reflekterede radarbølger til forskellig tid		Terrænnær kortlægning af laggrænser og lagstrukturer i sandområder og af sandvinduer i lerområder.
Residual tyngdevariation langs målelinie eller som kort med iso-milligal kurver		Kortlægning af "begravede" dale i miocæn overfladen.
Relativ magnetfelt variation langs målelinie eller som kort med iso-Ørsted kurver		Lokalisering af nedgravede metal-tønder/ beholdere samt af tungmetal forurening.
Seismogram langs målelinie med reflekterede lydbølger til forskellig tid		Kortlægning af laggrænser og storskala lagstrukturer i dybder større end 50-75 m

markante horisonter med høj gamma stråling, som betegnes som *marker horisonter*. Sådanne horisonter har stor betydning ved sammenligning af logs fra boring til boring (korrelation) med henblik på at bestemme lagenes udstrækning imellem boringerne.

#### *Resistivets-log:*

Måleprincippet ved resistivets-logging er analogt til den traditionelle geoelektriske målemetode, dvs. via en strømeelektrode på målesonden og en strømeelektrode ved jordoverfladen etableres der et elektrisk felt i jordlagene, som danner baggrund for

Principper

Tabel 2  
Logmetoder, måleparameter og information.

Logmetode	Parameter	Enhed	Information		
			Lagtype Litho- logi	Lag- grænser	Sekven- ser
Gamma	Integral gamma stråling	impulser per sek.	x	x	x
Spektral gamma	Kalium, uran og thorium	pct, ppm, ppm	x	x	x
Resistivitet	Formations resistivitet	ohm meter	x	x	x
Induktion	Formations-konduktivitet	milli Siemens/m	x	x	x
Neutron-neutron	Porøsitet	pct	x	x	x
Gamma-gamma	Vådumvægt (Densitet)	g/cm <sup>3</sup>	x	x	x
Kaliber	Diameter	mm			
Ledningsevne uden pumpning	Ledningsevne i boringsvæske	milli Siemens/m			
Temperatur uden pumpning	Temperatur i boringsvæske	°C			
Ledningsevne under pumpning	Ledningsevne i boringsvæske	milli Siemens/m			
Temperatur under pumpning	Temperatur i boringsvæske	°C			
Propel flow under pumpning	Rotation per minut	pct. af pumpeydelse			
Propel flow uden pumpning	Rotation per minut	m <sup>3</sup> /t eller liter/t			
Heat Pulse flow uden pumpning, diskret	Pulse hastighed (cm/sek) og retning (opad/nedad)	m <sup>3</sup> /t eller liter/t			

måling af jordlagenes tilsyneladende specifikke elektriske modstand (resistivitet i enhed ohm-meter). Målingen udføres enten imellem to måleelektroder på sonden (Lateral log) eller mellem een måleelektrode på sonden (Normal log) og en anden måleelektrode anbragt på jordoverfladen (afstand mellem strøm- og måleelektrode ved jordoverfladen skal være større end 25 m). Afstanden mellem strøm-elektrode og måleelektroder er afgørende for størrelsen af det jordlagsvolum, der måles på (måledybde = indtrængningsdybde og opløsningsevne = detaljeringsgrad). De hyppigst anvendte elektrodeafstande på logsonderne svarer til de i oliegeologien internationalt anerkendte standardafstande: 16” Normal, 64” Normal, 16”/48” Lateral og 32”/18’8” Lateral, som giver fra nogle få decimeters til ca. 1 m indtrængningsdybde og opløsningsevne. En videreudvikling af måleprincippet i form af symmetrisk kombination af måleelektroder og supplerende strømeelektroder omkring en central strøm-

Tekniske forhold								
Diameter	Forerørs-længde	Filter-interval	Utætheder i forerør	Indstrømningsfordeling	Indstrømningszoner	Intern strømning (kortslutning)	Forskelle i temperatur	Forskelle i vandkemi
	x	x	x					
	x (- stål)							
	x (- stål)							
	x (- stål)							
x	x		(x)					
			x			x		x
			x			x	x	
			x		x			x
			x		x		x	
				x	x			
						x		
						x		

elektrode midt på logsonden har medført, at der nu kan måles *fokuseret resistivitet* med opløsning på 10 cm og samtidig indtrængningsdybde på 1-2 m.

Jævnfør ovenstående skal der via strømelektroden udsendes en strøm, og derfor kan loggen ikke udføres ovenover vandspejlet i boringen. I en boring med forerør af PVC eller stål kan der godt udføres målinger nedenunder vandspejlet, men disse giver ingen mening. I den filtersatte del af en boring kan der derimod godt etableres strømfelt ud i jordlagene gennem slidseåbningerne, og derfor kan der udmærket opnås meningsfulde måleresultater, som dels kan angive præcist åbningsintervallerne og blænderørplaceringerne og dels give oplysninger om eventuelle variationer i lagfølgen udenfor filteret.

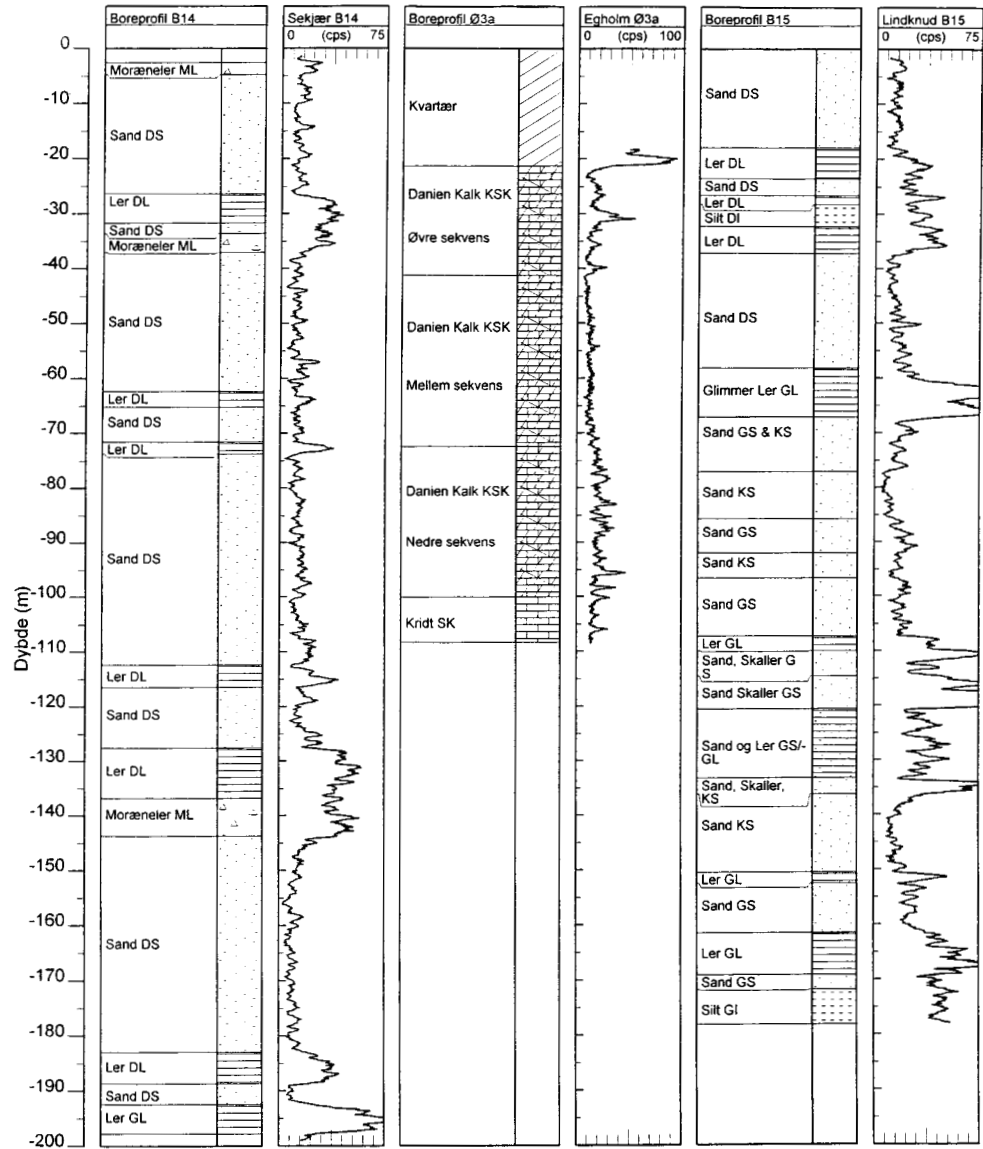
Resistivitetsvariationen ned gennem boringen giver ligesom gamma-strålingen et billede af lagfølgen, idet lerlag typisk har lavere resistivitet end silt, som igen har la-

Begrænsninger

Variation i jordlagene

Figur 1  
Gamma-logs i forskellige lagfølger. (bemærkninger i Bilag 1).

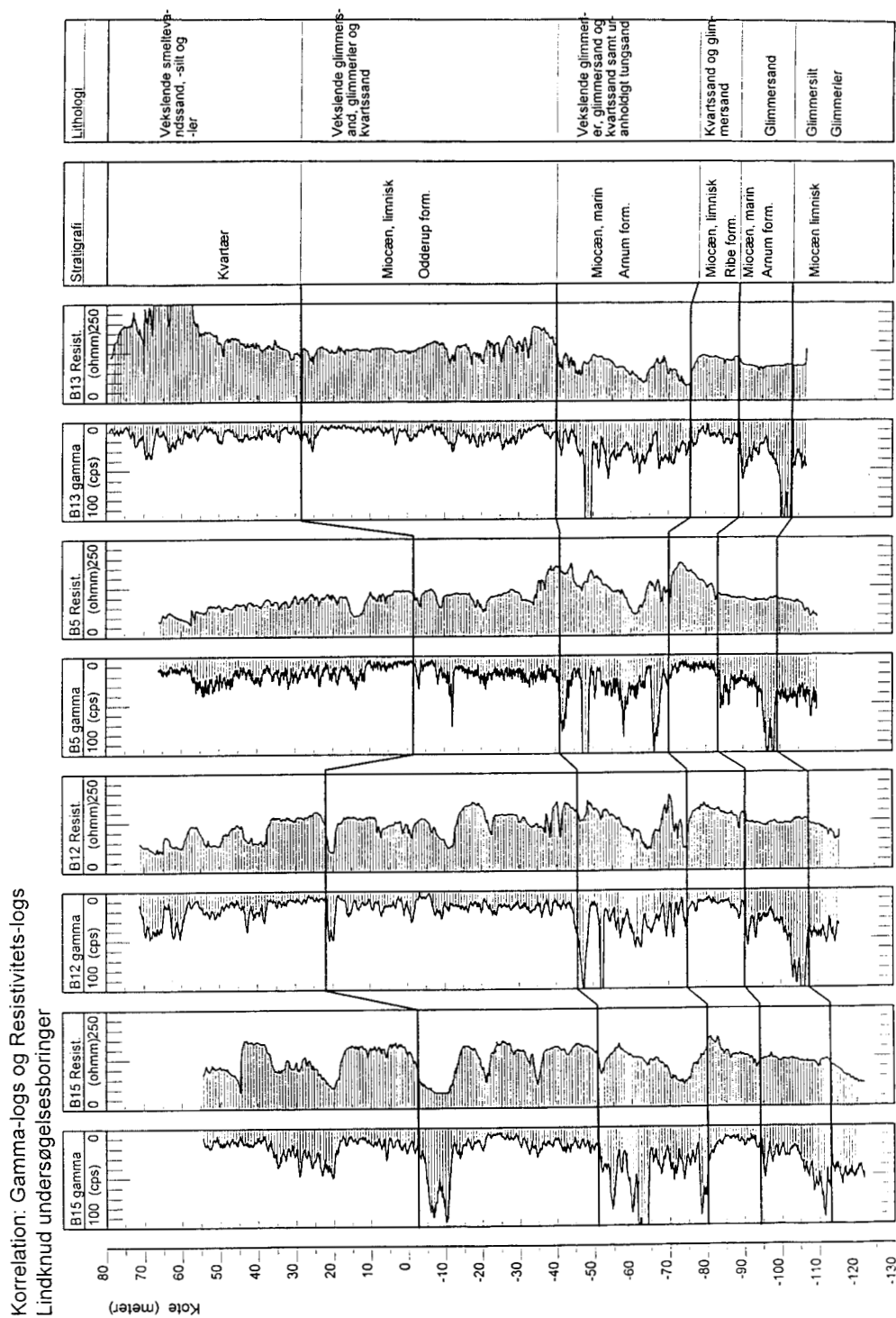
Egholm, Lindknud og Sekjær



vere resistivitet end sand og grus. Resistiviteten ned gennem en lagserie varierer således modsat gamma-strålingen, idet resistiviteten generelt er lavere, jo større indholdet er af finkornet materiale (se figur 2). Med hensyn til kalkaflejringer vil de hårde tætte kalklag i København Kalk og i bryozokalk ses som lag (typisk 10-100 cm tykke) med høje resistiviteter, medens de mere porøse kalklag samt skrivekridt har en forholdsvis lav resistivitet. Med hensyn til typiske størrelsesordener for forskellige danske aflejringer henvises til Figur 4.

Salte i porevandet

Ovennævnte forskelle i resistivitet mellem de enkelte lagtyper skyldes hovedsagelig forskelle i lerindhold eller i porøsitet. Sådanne forskelle kan imidlertid blive fuldstændig domineret af en tredje faktor, som spiller en afgørende rolle for jordlagenes resistivitet, og det er mængden af opløste salte i porevandet. I tilfælde af, at boringen har nået ned i saltholdigt grundvand, ses denne grænse i regelen tydeligt på en resistivitetslog, idet resistiviteten vil være markant lavere under grænsen.



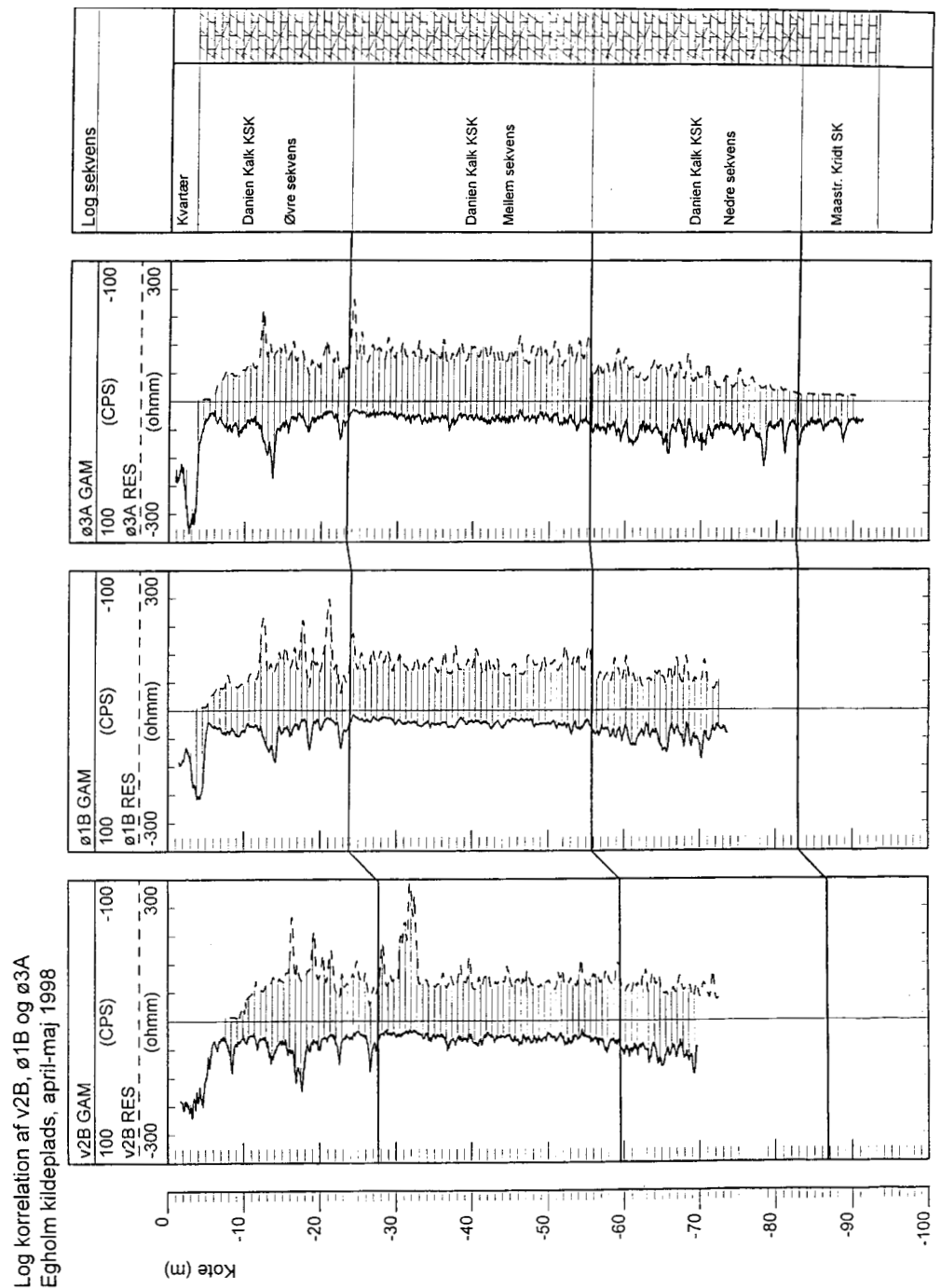
Figur 2A  
Korrelation af gamma-logs og resistivitets-log mellem forskellige boringer i samme geologi.  
(bemærkninger i Bilag 1).

### Induktionslog:

Denne logmetode måler jordlagenes *specifikke ledningsevne (konduktivitet)* i stedet for deres resistivitet. Konduktiviteten er det omvendte (reciprokke) af resistiviteten og måles oftest i enhed mmho per meter, også kaldet milli-Siemens per meter. Måleprincippet er baseret på etablering af et horisontalt strømfelt i jordlagene omkring boringen ved induktion af et vertikalt elektromagnetisk felt omkring målesonden ved hjælp af en senderspole. Dette horisontale strømfelt genererer derefter et sekundært vertikalt magnetfelt, hvis styrke måles i sonden ved hjælp af en modtagerspole.

Principper

Figur 2B  
 Korrelation af gamma-logs  
 og resistivitets-log mellem  
 forskellige borer i  
 samme geologi.  
 (bemærkninger i Bilag 1).



Log korrelation af v2B, ø1B og ø3A  
 Egholm kildeplads, april-maj 1998

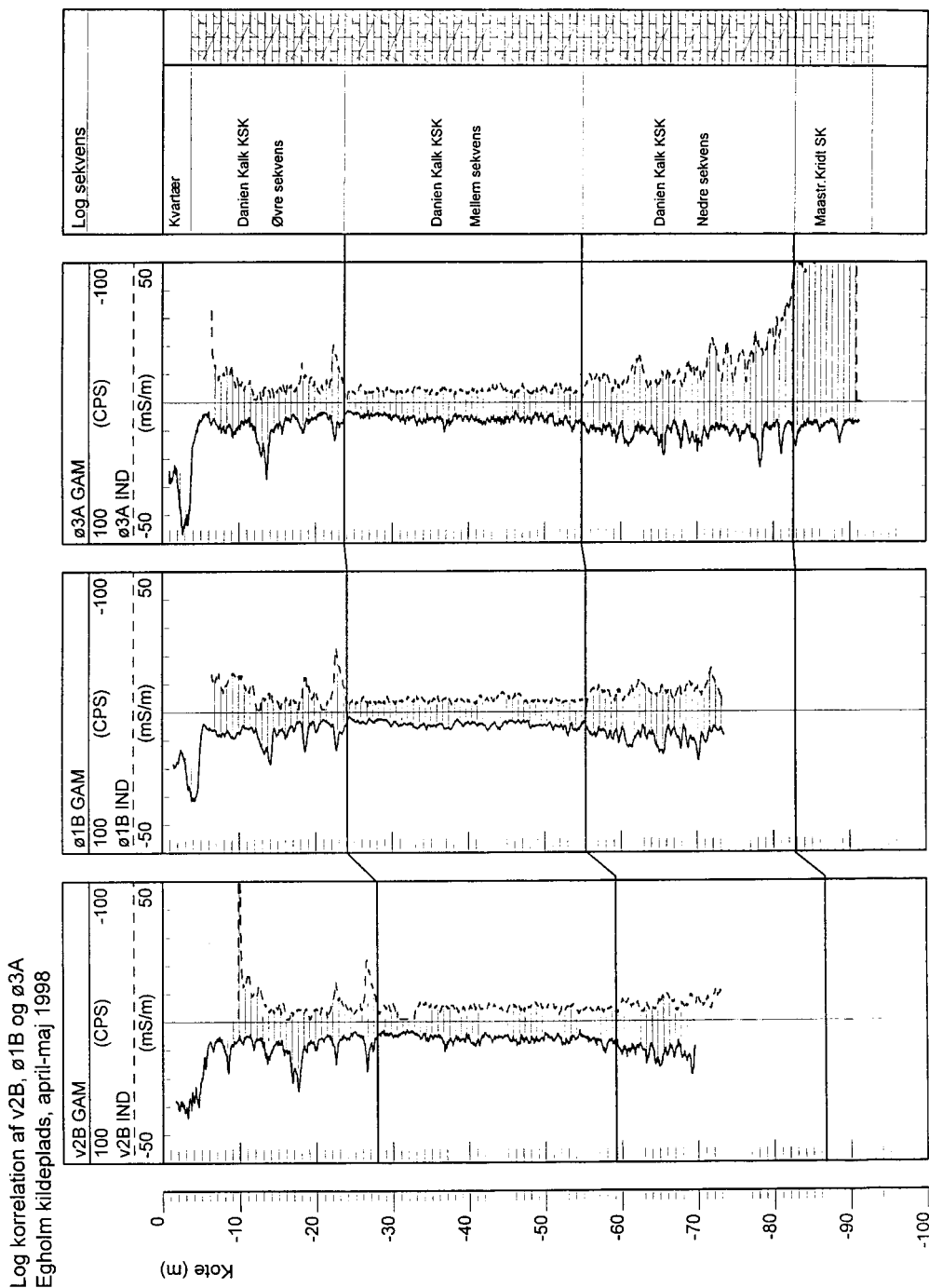
Sidstnævnte magnetfelts styrke vil være større for større ledningsevne, og en kalibrering af målesonden mod kendte ledningsevneforhold gør det muligt at foretage målingerne direkte i specifik ledningsevne (mS/m).

#### Begrænsninger

Fordelen ved denne metode i forhold til resistivitets-log er, at der ikke behøves elektrodekontakt med jordlagene via vand. Derfor kan der måles ovenover et vandspejl i boringen samt igennem ledningsevne-neutrale foringsrør af eksempelvis PVC. Foringsrør af stål vil derimod give en alt for høj ledningsevne. Målemetoden er i det hele taget meget følsom overfor metalgenstande, og derfor vil centreringsstyr af metal udenfor PVC-foringsrør og selv metalskruer ved rørsamlinger give store måleudslag.

#### Variation i jordlagene

Da konduktiviteten er det modsatte af resistiviteten vil konduktiviteten variere med



Figur 2C  
Korrelation af gamma-logs og induktions-log mellem forskellige borer i samme geologi. (bemærkninger i Bilag 1).

lagfølgen ned gennem boringen i modfase til resistivitetsvariationen, dvs. variere som gamma-loggen med høje måleværdier ved lerlag, og faldende måleværdier jo mindre lagene indholder af finkornet materiale. Ligesom resistivitetsloggen vil induktionsloggen vise et markant ændret måleniveau ved overgang fra ferskt til saltholdigt grundvand.

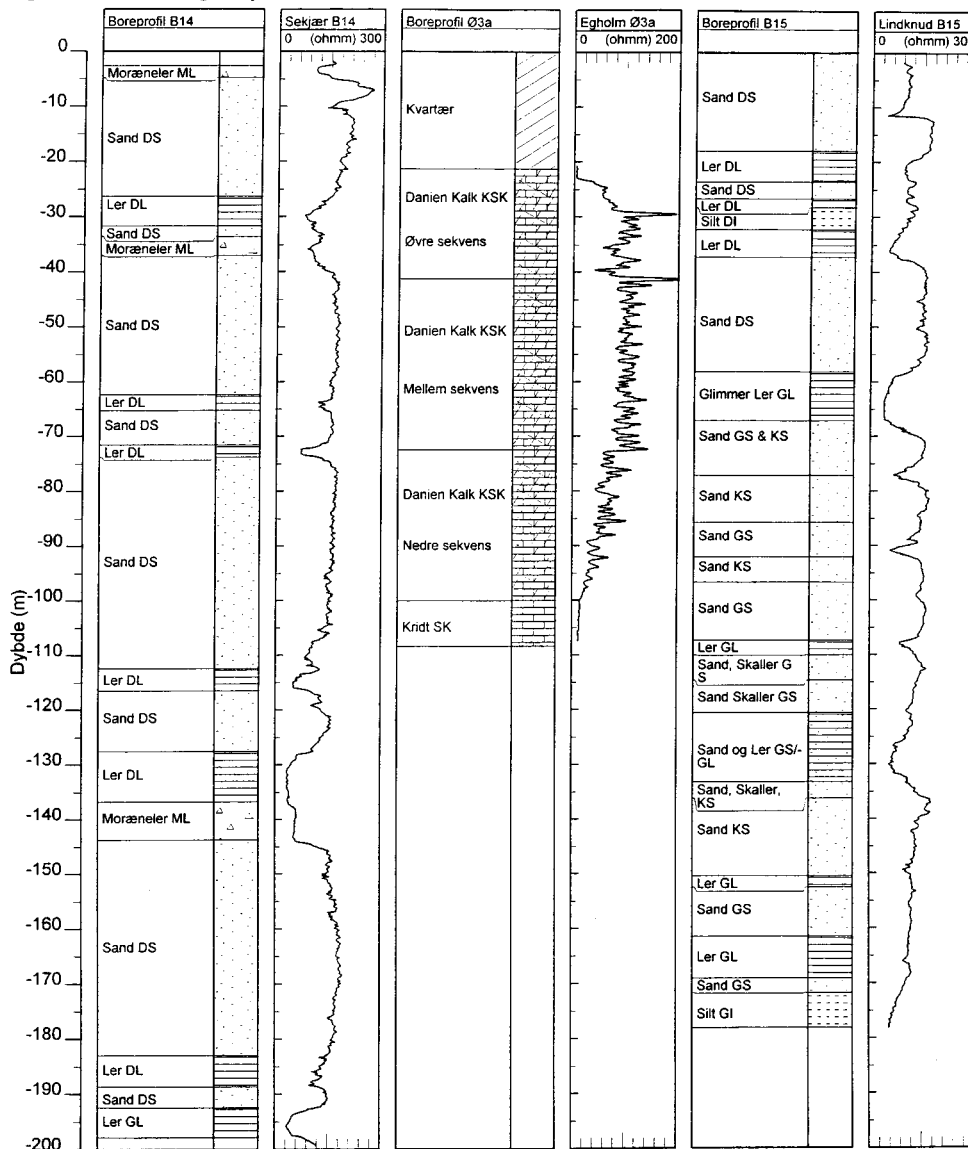
#### Andre logmetoder med geologisk information:

Af andre metoder, som giver geologisk information, skal nævnes to radioaktive logmetoder: Neutron-neutron og gamma-gamma logging. Ved begge metoder er målesonden udstyret med en radioaktiv kilde (forholdsvis svag og derfor ufarlig ved fornuftig omgang med sonden), som udsender henholdsvis neutron og gamma stråling.

Metoder og principper

Figur 3  
Restitivitieslogs i forskellige lagfølger (bemærkninger i Bilag 1).

Egholm, Lindknud og Sekjær



Den udsendte stråling dæmpes af henholdsvis ilt og af den samlede mængde stof, hvorfor en måling af den fra jordlagene tilbage reflekterede neutron og gamma stråling giver et udsagn om henholdsvis vandindholdet og rumvægten (massefylden) af jordlagene. Under vandspejlet vil vandindholdet være bestemt ved porøsitetens således, at et øget vandindhold i samme type aflejring betyder en større porøsitet og dermed en mindre rumvægt. De to typer log varierer derfor i regelen modsat hinanden ned gennem en lagserie.

Begrænsninger

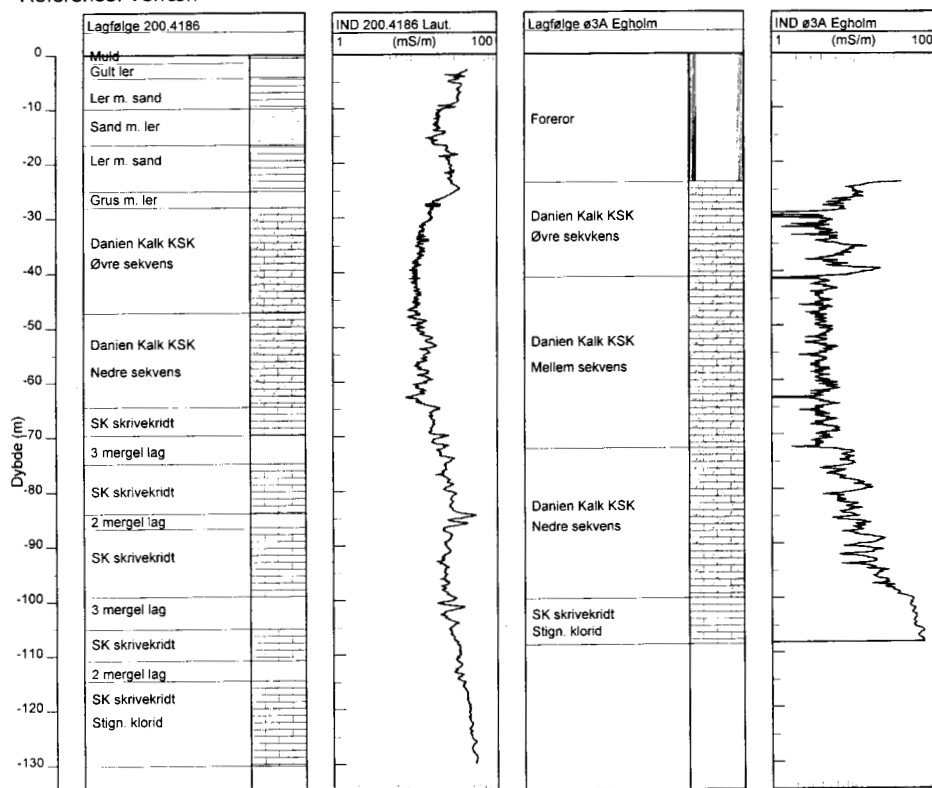
De to logmetoder giver ikke meningsfulde resultater i stålforingsrør, og i PVC-rør kræves der en forholdsvis kraftig strålingskilde til især neutron-neutron loggen for at kunne få pålidelige måleresultater. De er i øvrigt begge meget påvirkelige af diametervariationer, og må alt i alt siges at være vanskeligere at udføre og tolke end de tre forannævnte logmetoder.



	Aflejring (jordart) uden saltvand	Resistivitet ( $\rho$ ) i ohmmeter (ohmm)		
		Over vandspejl	Under vandspejl	
Kvartær	Ferskvandstørv – dynd – gytje – ler		10 – 35	
	Marint tørv – dynd – gytje og ler, d.v.s. med saltvand	-	1 – 15	
	Smeltevandssand – grus	500 – 10.000	100 – 300	
	Moræneler	25 – 100	25 – 80	
Tertiær	Moræne sand – grus	-	70 – 100	
	Glimmerler (Gram- og Hodde formationen) fra Øvre Miocæn	-	15 – 25	
	Glimmersand fra Øvre, Mellem og Nedre Miocæn	-	100 – 200	
	Kvartssand fra Mellem (Odderup) og Nedre (Ribe) Miocæn	-	100 – 200	
	Glimmerler/ silt fra Mellem og Nedre Miocæn	-	20 – 60	
	Septarieler og glimmerler fra Oligocæn	-	5 – 10	
	Søvindler og Lillebæltler fra Eocæn	-	1 – 10	
	Kertemindemergel/ler fra Selandien (Palæocæn)	-	10 – 30	
	Lellinge grønsand/-kalk og mergel fra Selandien (Palæocæn)	-	25 – 80	
	Bryozokalk, Københavnskalk, kalksandskalk, slamkalk fra Danien (Palæocæn)	100 – 500	60 – 250	
	Kridt	Skrivekridt	100 – 150	30 – 60

Figur 4  
Oversigt over typiske resistiviteter for danske aflejringer.  
(bemærkninger i Bilag 1).

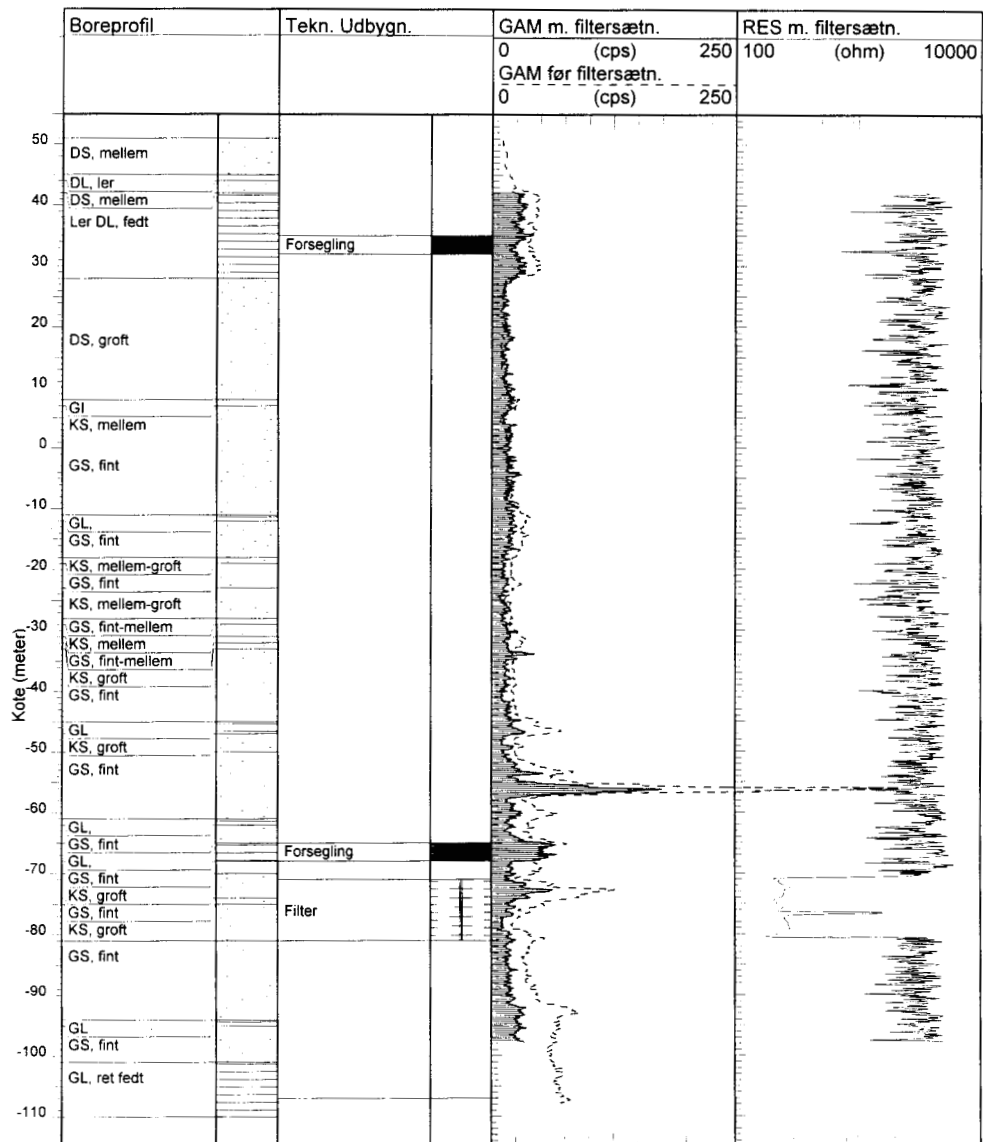
Reference: Terræn



Figur 5  
Induktionslogs i forskellige lagfølger (bemærkninger i Bilag 1).

Figur 6  
Gamma- og restivitets-  
logs ved udbygnings-  
kontrol. (bemærkninger  
i Bilag 1).

Boring B2 (DGU nr.: 123.983)  
Okslundvej 8, Klelund  
Reference: Terræn



### 3.2.2 Logmetoder, som giver teknisk information

#### *Kaliber-log:*

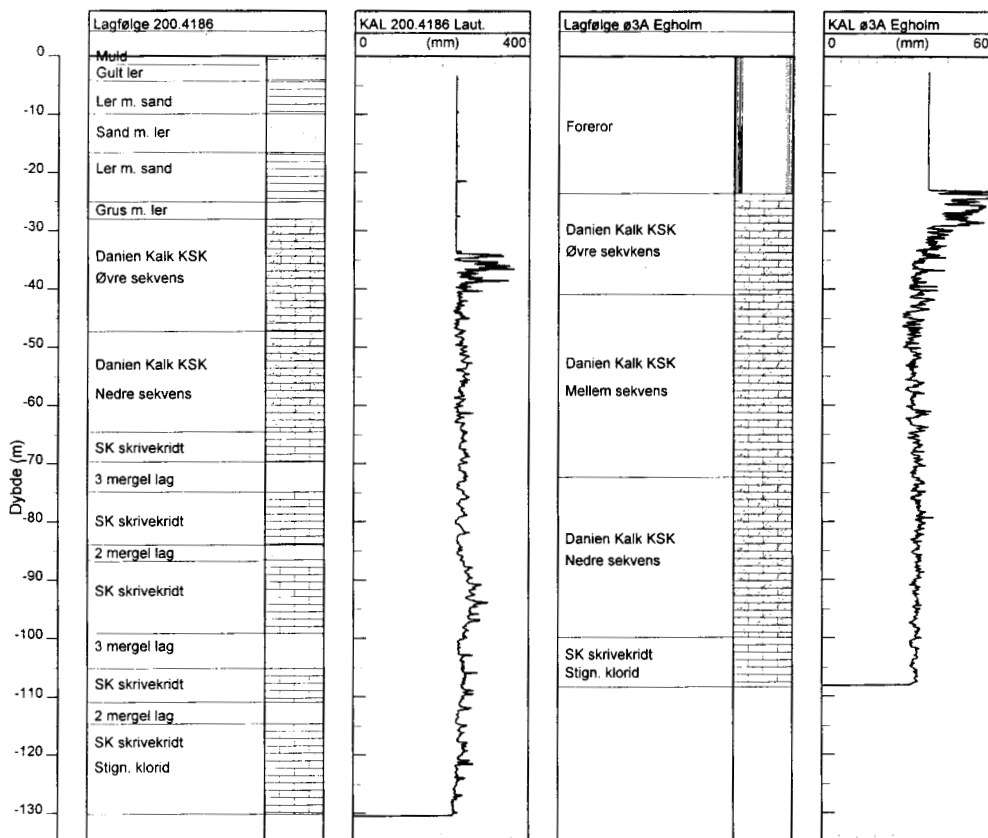
Metode

Med tre fjederpåvirkede stålarmer på en sonde måles diameteren i boringen. Dette kan have betydning i gamle boreringer som kontrol af boringsudbygningen, herunder identifikation af større utætheder som følge af tæring eller forskubbede/forsatte rørsamlinger i forerør og af eventuel diameterskifte i filter eller i åbne kalkboringer. I sidstnævnte vil dybdeintervaller med store diametre på grund af kalkudfald kunne lokaliseres. Kendskab til diametervariationer er især vigtig for tolkning af indstrømningsfordelingen ud fra flow-log se **Figur 7**.

#### *Ledningsevne-log:*

Metode og principper

Denne sonde har et specielt arrangement af mikroelektroder, hvormed der måles ledningsevnen af vandet eller borevæske/mudder i boringen. Ledningsevne måles i



Figur 7  
Kaliber-logs.

mikroSiemens/cm, milliSiemens/cm eller i milliSiemens/m, og der gælder følgende indbyrdes relation:  $1000 \mu\text{S/cm} = 1 \text{ mS/cm} = 100 \text{ mS/m}$ . Til sammenligning har normalt dansk drikkevand fra vandhanen en ledningsevne på 30-80 mS/m v 25 C°.

Ledningsevne-log og den nedenfor omtalte temperatur-log måles i regelen samtidigt og med samme sonde. Den udføres i gamle såvel som nye boringer med henblik på at vurdere, om der er væsentlige forskelle på ledningsevnen i det filtersatte dybdeinterval og til sammenligning med ledningsevnen af det oppumpede blandingsvand. Især er det en vigtig log i områder, hvor der er fare for saltholdigt grundvand.

Hvis ledningsevnen over et større filterinterval eller i en åben kalkboring viser fuldstændig konstante værdier, kan det være en indikation på lodret strømning (kortslutning) internt i boringen mellem forskellige dele af lagserien, som har forskelligt vandtryk. Det kan også være mellem en utæthed i forerøret og dele af filteret, at strømmingen sker. Hvis temperatur-loggen (se nedenfor) på samme dybdeinterval ligeledes viser konstante værdier, er det næsten 100 % sikkert, at der foregår en intern strømning i boringen (se **Figur 8**). En sådan intern strømning kan være uheldig af flere grunde, men især hvis der er tale om opstrømning af saltholdigt grundvand eller nedstrømning af forurenede grundvand eller øvre grundvand med en uønsket grundvandskemi. Hvis strømmingen har pågået længe, kan det komplicere en eventuel dybdekontrolleret udtagning af vandprøver fra boringen.

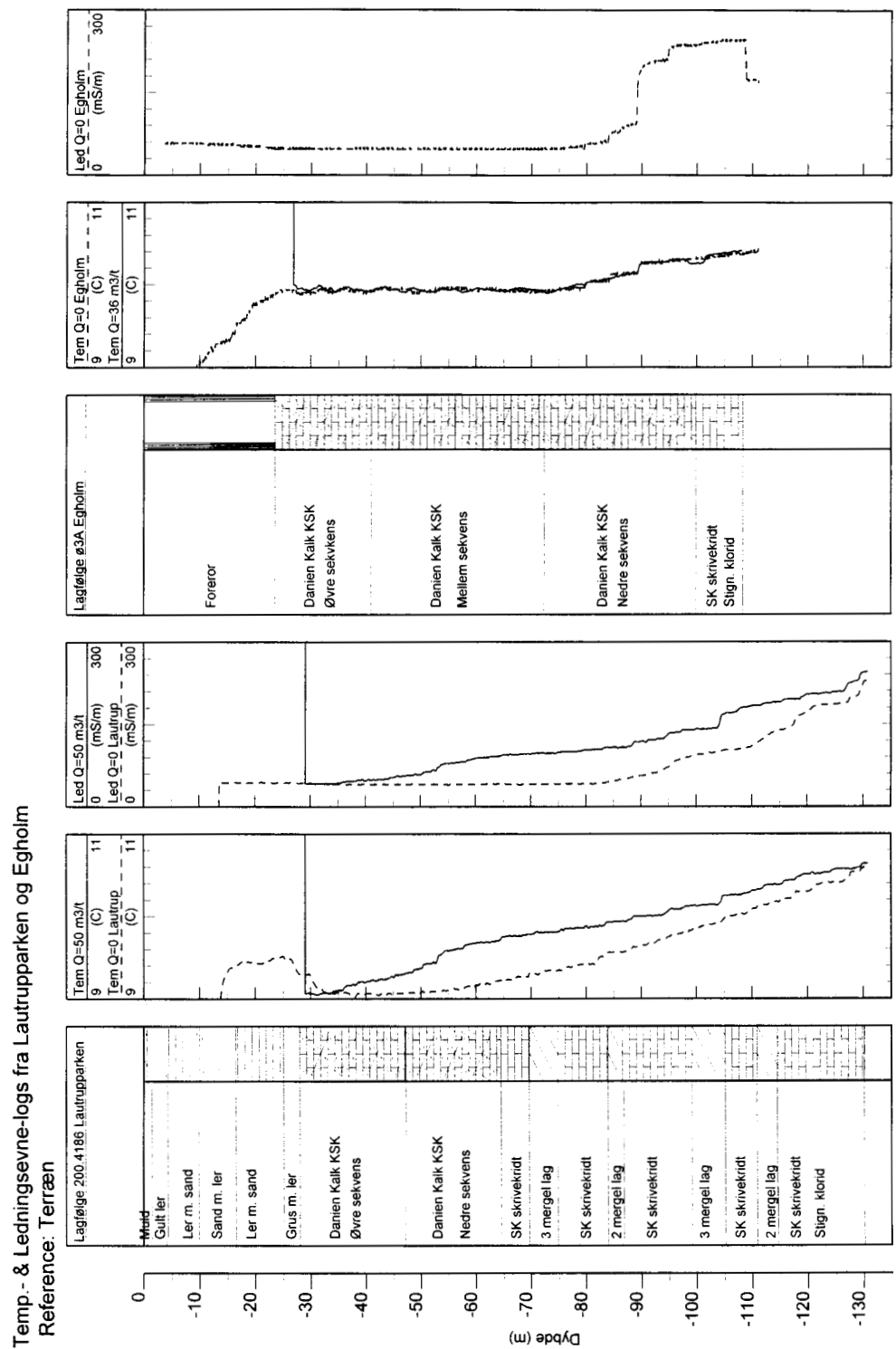
#### Temperatur-log:

Temperaturen i vandet eller i borevæske/boremudder ned gennem boringen måles med den samme sonde, som måler ledningsevnen. Sonden er dertil forsynet med en speciel følsom temperaturdetektor (termistor). I visse log-systemer er de to typer

Resultater

Metode og principper

Figur 8  
Ledningsevne- & temperatur-logs i forskellige strømningssituationer.  
(bemærkning i Bilag 1)



målinger koblet i et indbygget beregningsprogram, således at ledningsevnen er temperaturkorrigeret til 25 C°. Sædvanligt til de integrerede log-systemer med mange forskellige typer logmetoder kan i regelen måle temperatur med en nøjagtighed på 1/100 C°, hvorimod de noget billigere log-systemer til udelukkende temperatur- og ledningsevne målinger måler med en nøjagtighed på 1/10 C°.

Vandets temperaturvariation

I en boring, som ikke er i drift, og hvori der ikke foregår nogen intern strømning, vil temperaturvariationen typisk være følgende: 10-12 C° øverst (afhængig af årstid

og vandspejlets dybde under terræn), som aftager jævnt til 8-9 C° i en 10-20 m dybde, hvorefter temperaturen stiger jævnt mod dybden med ca. 0,1-0,2 C° per 10 m dybde (se **Figur 8**).

Det er oftest særdeles nyttigt også at udføre ledningsevne- og temperatur-log under pumpning fra boringen, dvs. under forhold analog til normal driftssituation, dvs. hvor strømmingen foregår opad mod pumpen. En sådan temperatur-log vil sammenlignet med tilsvarende uden pumpning indikere, om indstrømningen til boringen er jævnt fordelt over filterintervallet, eller om der sker lokal indstrømning ved specielt vandførende horisonter, idet førstnævnte situation vil ses som en logkurve med jævnt faldende temperatur op mod pumpen, hvorimod sidstnævnte indstrømningssituation vil vise sig ved trinvis lavere temperatur opad i boringen (se **Figur 8**). På tilsvarende vis vil ledningsevne-loggen under pumpning oftest afsløre karakteren af indstrømningsfordelingen, idet ledningsevnen enten vil være ens, jævnt faldende eller jævnt stigende i forskellige dybdeintervaller med jævn indstrømningsfordeling, hvorimod den kan ændre sig springvis ved enkelte indstrømningszoner i eksempelvis kalk (se **Figur 8**). Specielt i tilfælde med saltvand i bunden af en boring er det af betydning at vide, om dette saltvand vil påvirke det producerede blandingsvand og i givet fald hvor meget og op til hvilken dybde? Kun derved kan det vurderes, om en afpropning er nødvendig, og i hvilken dybde denne afpropning skal foretages. En sådan beslutning kan ikke træffes alene på basis af ledningsevne-log uden pumpning.

Resultater

Saltvand

#### *Propel flow-log:*

Et mere detaljeret billede af indstrømningsfordelingen under pumpning fra en boring kan opnås ved hjælp af en propel flow-log sonde, idet propellens antal omdrejninger per minut stiger med øget hastighed på vandet, der strømmer forbi sonden. Ved integrerede logsystemer med kontinuert digital dataopsamling udføres denne log ved start fra bunden og med konstant bevægelse af sonden (typisk 5 m/min) opad. Rotationstallet som følge af denne bevægelse skal derfor fratrækkes de målte tællelister for at få et billede af den akkumulerede strømning op gennem boringen, og dermed få et billede af, hvor indstrømningerne sker, og hvor meget de bidrager med. Ved denne form for flow-logging (kontinuert) kan der måles strømningshastigheder ned til 30 cm/min. Der kan også fås et mere enkelt propel flow-log udstyr, hvor propellens omdrejningstal måles med en simpel batteridreven omdrejningstæller i et tidsrum (typisk 1 minut), som måles på med stopur. Et sådant udstyr anvendes til diskrete målinger, dvs. sonden holdes i en bestemt dybdeposition, medens målingen pågår. Intensiteten af målepositioner, typisk per halve meter, bestemmes ud fra krav til detaljeringsgrad. Ved denne form for flow-logging skal strømmingen være større end 2-3 cm/sek. = 120-180 cm/min, før propellen overhovedet drejer rundt på grund af gnidningsmodstand i lejerne.

Metode og principper

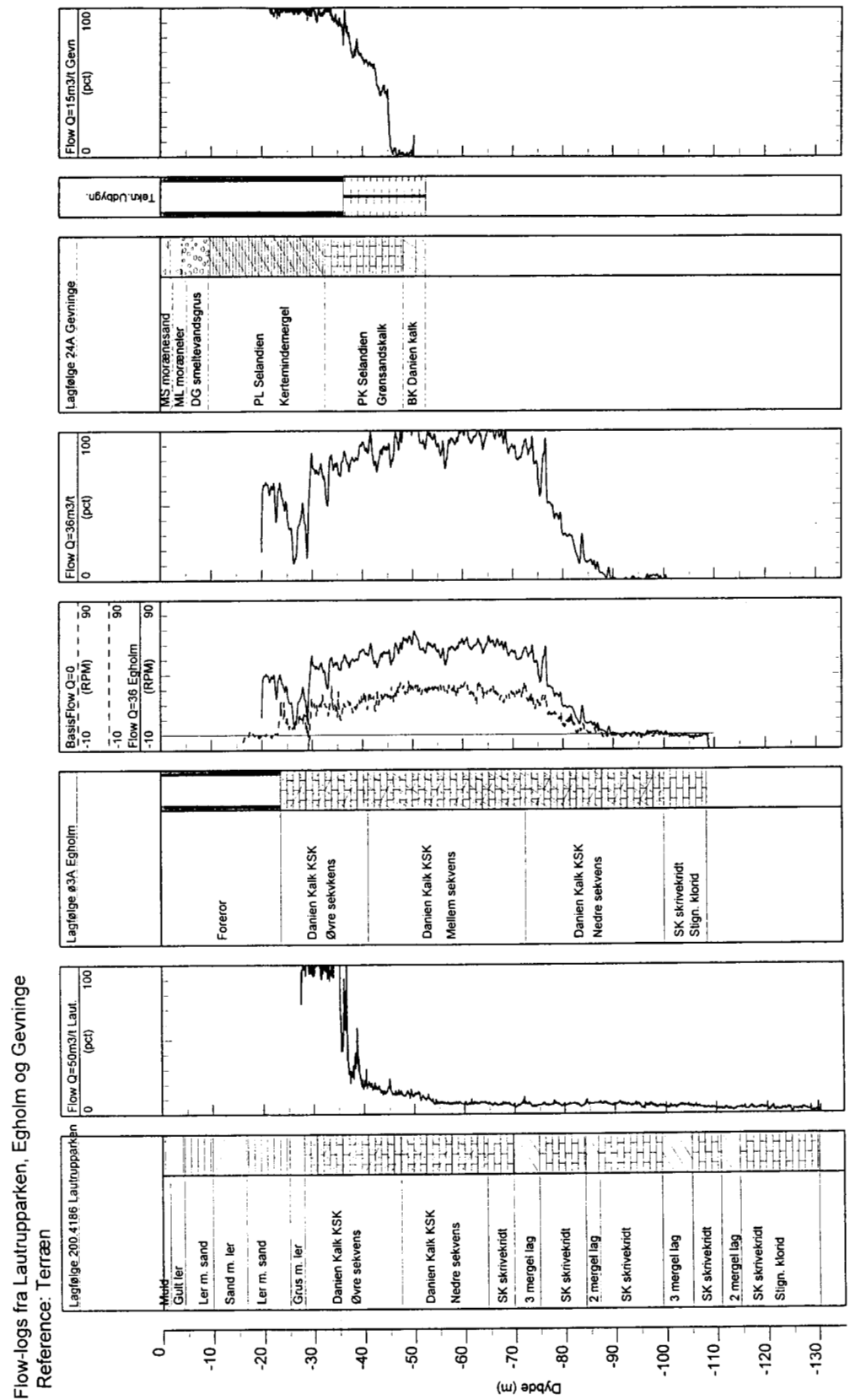
Resultatet af en flow-log vises som en log-kurve, der udtrykker den procentvise strømning i filterintervallet (**Figur 9**). Hvis pumpen sidder i forerøret ovenover filteret, vil rotationstallet her repræsentere 100 %. Da ændringer i boringens diameter vil påvirke strømningshastigheden, eksempelvis sektioner med større diameter i åbne kalkboringer, eller større diameter ved overgang fra filter til foringsrør, er det nødvendigt at kende sådanne diameter variationer for at undgå fejltolkninger af flow-loggen. Derfor er en kaliber-log nødvendig i forbindelse med en flow-log undersøgelse af en boring, hvis der er tvivl om boringens udbygning og dimensioner. Resultatet af en flow-log kan også vises som indstrømning i % per halve eller hele meter filtersektion. (**Figur 9**).

Resultat

Sammenholdes en flow-log, som viser filtersatte niveauer uden indstrømning, med

Regenerering af boring

Figur 9  
Flow-logs i åbne kalkbo-  
ringer og i filtersat boring.  
(bemærkninger i Bilag 1).



de logs, som giver geologisk information, og det deraf fremgår, at der ikke er nogen geologisk betinget grund til de manglende indstrømninger, kan det give et fingerpeg om, hvor en regenerering af boringen især skal sættes ind.

I boringer med forringet eller uacceptabel vandkvalitet kan det komme på tale at vurdere, om problemet kan afhjælpes ved en ombygning af boringen i form af afpropning af bunden eller afspærring af den øvre del af et filter eller åben boringssektion, eller eventuel ved etablering af indvinding ved separationspumpning fra boringen. I sådanne tilfælde vil det være nødvendigt som et minimum at kende indstrømningsfordelingen og vandkvaliteten af de væsentligste indstrømningszoner for at kunne vurdere, om en afhjælpning af problemet er muligt - eller om boringen/kildepladsen må opgives. I denne forbindelse vil en flow-log have betydning for vurderingen af den fremtidige transmissivitet og specifikke ydelse efter ombygningen, dvs. om der kan indvindes en tilstrækkelig vandmængde fra den resterende del af boringen. En anden vigtig forudsætning for at løse et vandkvalitetsproblem ved afspærring er, at vandkvaliteten fortsat forbliver uændret og tilfredsstillende efter ombygningen, dvs. at den problematiske vandkvalitet i de afspærrede zoner ikke spreder sig til de ikke afspærrede zoner. De geologiske logs nævnt ovenfor eventuelt suppleret med en pakkertest vil kunne anvendes til at vurdere, om denne forudsætning kan forventes opfyldt.

Ombygning af boringer

I tilfælde, hvor vand med uønsket vandkvalitet optræder i samme magasin som det uproblematiske vand, og uden at vandtyperne er adskilt ved lavpermeable lag (ler i sand, ler eller mergel i kalk og kridt, tætte kalkbænke i kalk/kridt), kan den sidste forudsætning ikke opfyldes. I sådanne tilfælde kan etablering af separationspumpning i indvindingsboringen være løsningen i stedet for afspærring, dvs. pumpning med to pumper anbragt og afbalanceret i forhold til hinanden på en sådan måde, at den ene indvinder fortrinsvis fra zonen med den uønskede vandkvalitet, medens den anden indvinder fra den resterende del af reservoiret. Også i dette tilfælde er en flow-log vigtig for at kunne forudsige ydelserne på de to pumper.

Separationspumpning

#### *Heat pulse flow test:*

Måleprincippet går ud på at måle den tid, der medgår for en udsendt varmepuls at bevæge sig enten opad eller nedad til to temperaturfølsomme sensorer, som sidder henholdsvis 5 cm over og 5 cm under en varmetråd, hvorfra pulsen udsendes. Strømningshastigheden i målepositionen kan derefter ud fra kendskab til boringens eller rørets diameter omregnes til liter/time, som strømmer enten opad eller nedad i den pågældende dybde.

Princip

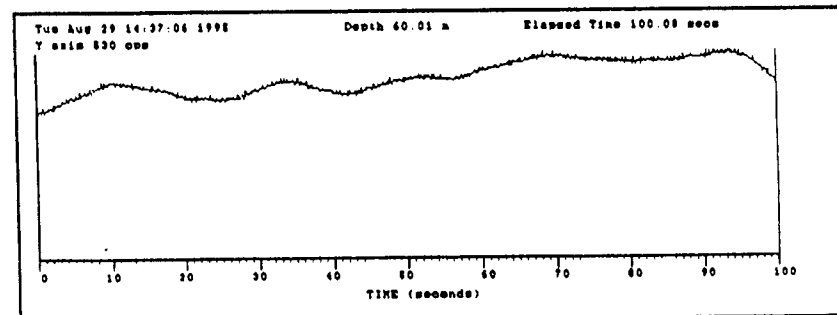
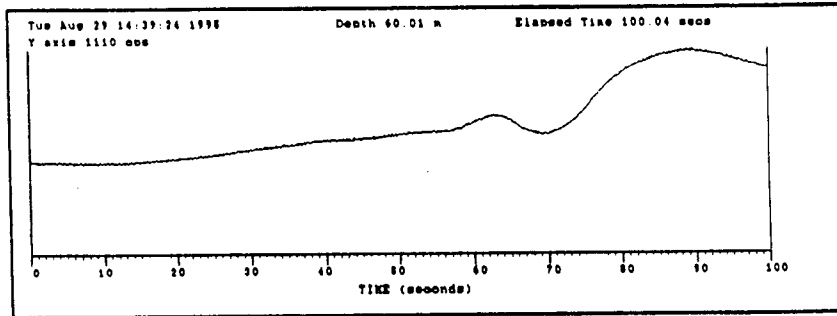
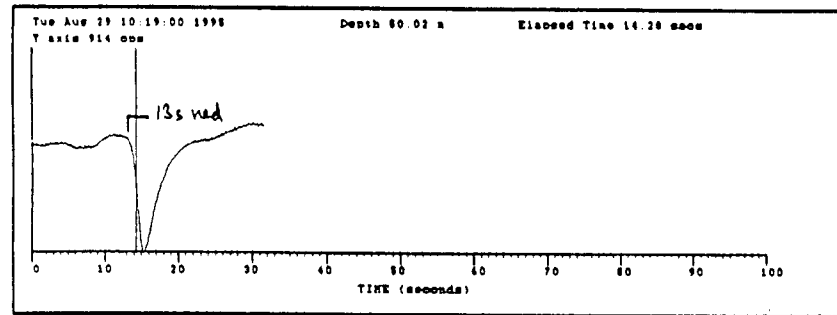
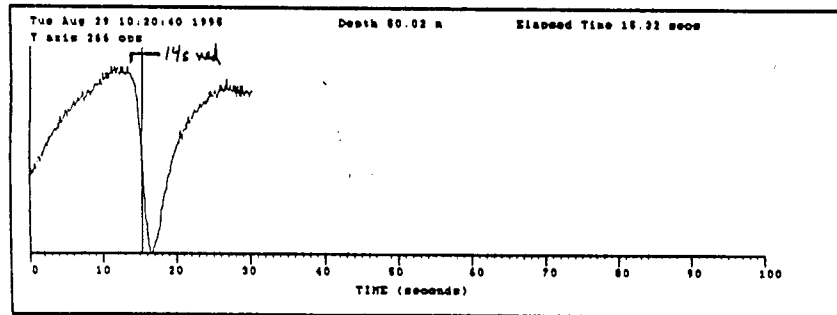
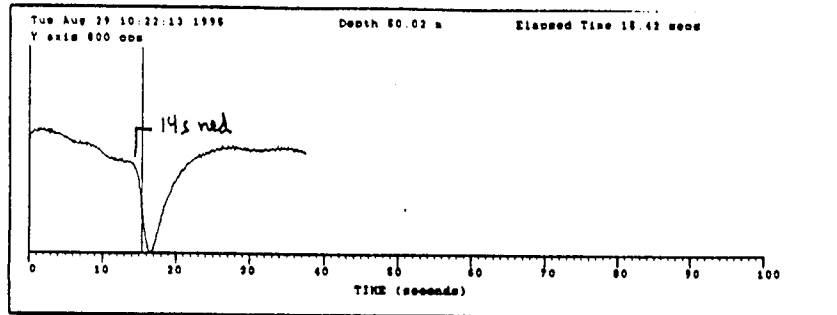
Denne specielle flow-målemetode er især egnet til diskrete målinger af eventuel intern strømning i boringen uden pumpning, idet denne sonde har en større følsomhed end propel flow-sonden, og derfor kan måle strømningshastigheder ned til 10 cm/min. Den anvendes således til undersøgelse af, om der sker lækageindstrømninger i gennemtærede foringsrør, ligesom den kan være egnet til kontrol af afspærringer eller afpropninger. Endvidere finder den anvendelse ved etablering af vandskel mellem to pumper i forbindelse med udtagning af vandprøver fra bestemte zoner i et filter (**Figur 10**).

Resultater

Figur 10  
Heat pulse flow test.  
(bemærkninger i Bilag 1).

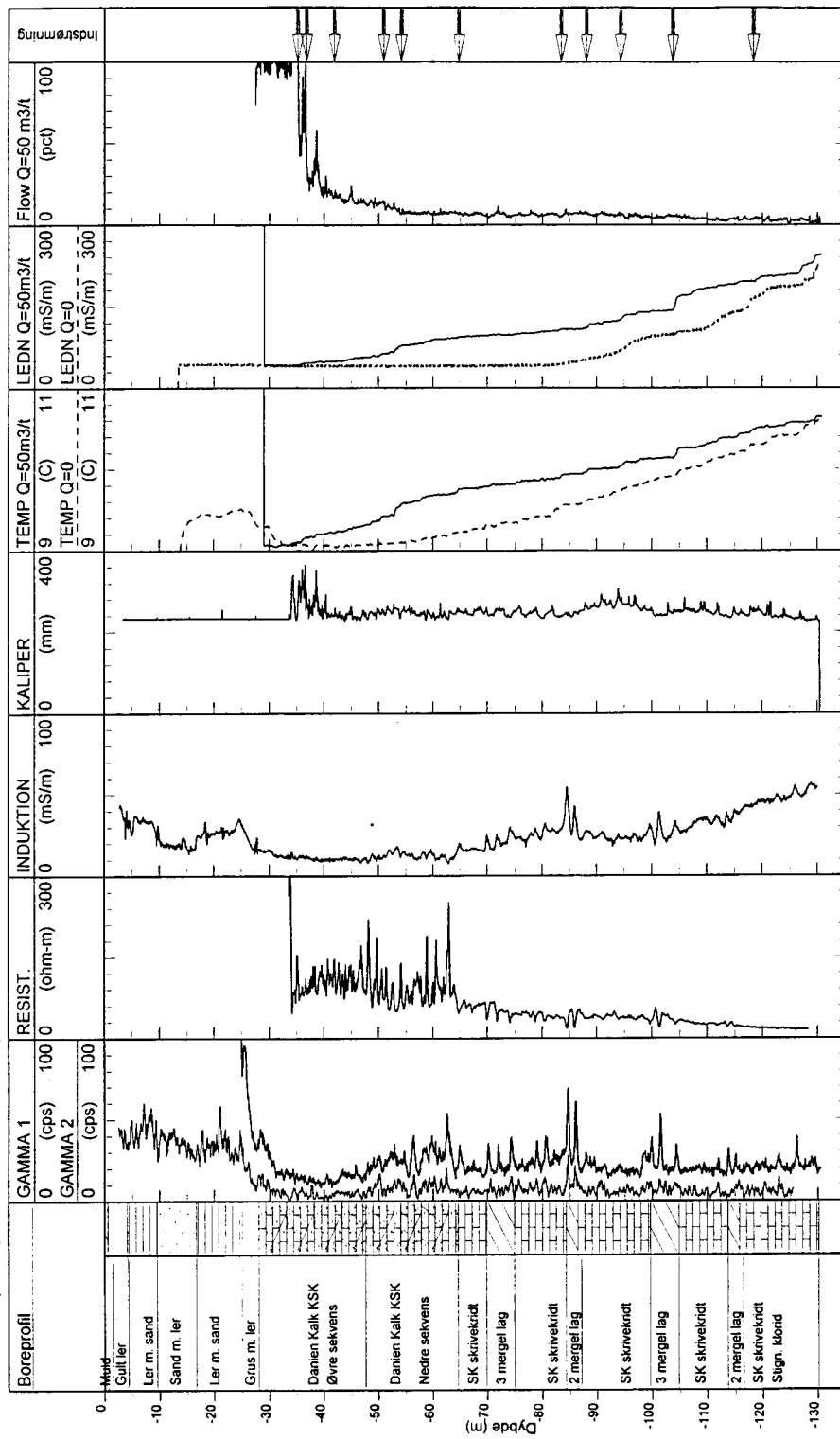
GEUS  
Hydrogeologisk Afd.

Heat Pulse Flow Test  
Boring: 192.983  
Lokalitet: Hørup  
Bilag: 3a.3





Boring DGU nr. 200.4186  
 Laurupparken, Ballerup  
 Reference: Top rør (= 0,20m over terræn)



Figur 11  
 Eksempel på komplet  
 logging-program.  
 (bemærkninger i Bilag 1).

### 3.3 Et optimalt undersøgelsesprogram for en enkelt boring?

Undersøgelsesprogram

Efter ovennævnte gennemgang af de forskellige mest gængse loggingmetoder kan det være på sin plads at diskutere, hvorledes det optimale program bør se ud for en enkelt boring, dvs. det mindst mulige loggingprogram, som kan sikre den tilstrækkelige information, der er nødvendig som beslutningsgrundlag til videre handling. Denne diskussion vil blive gennemført i samråd med kursusedtagerne efter, at disse har givet deres bud, idet udgangspunktet i de enkelte situationer er en angivelse af problemstillingen i henholdsvis gamle boringer forud for en beslutning om eventuel renovering/ombygning af boringen, og i nye boringer forud for beslutning om udbygning af disse, samt efterfølgende til kontrol af en udbygning.

### 3.4 Hvem kan udføre borehulslogging i Danmark?

Firmaer

Et fuldt moderne digitaliseret loggingudstyr og med målesonder til de fleste af de nævnte metoder haves af: RAMBØLL, Geoteknisk Institut/co United Drilling Contractors og Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS). Herudover har Dansk GeoServex A/S et lidt ældre, men også digitalt loggingudstyr med sonder til de vigtigste metoder (gamma, resistivitet, induktion, ledningsevne/temperatur og kaliber).

Ellogboring

Derudover findes der en speciel boremetode, hvor der under selve nedboringen med en hul snegleborestang samtidig måles både en resistivitets-log og en gamma-log. Metoden går under navnet "ellogboring" og er især anvendelig til undersøgelsesboringer i forholdsvis finkornede aflejringer af sand og ler. Ønskes der udført filterløsning i forbindelse med ønsket om at anvende undersøgelsesboringen til monitoringsformål, kan der ikke udføres gamma-log, idet spidsen af sneglen skal kunne bankes ud, og filterrør indsættes ned gennem den hule borestreng.

Vandprøvetagning

Ellogboring kan i stedet for gamma-log kombineres med niveaubestemt vandprøvetagning under stop på udvalgte dybdepositioner ved hjælp af et indbygget prøve- og målekammer tæt ved sneglens borespids. Ved denne kombination kan der ikke bagefter nedsættes filter gennem den hule borestreng, men ved den efterfølgende genboring efter at borespidsen med prøvetagningsaggregat er udskiftet med normal borespids. Denne form for kombination af logging og nedboring er patenteret og kan derfor kun udføres af firmaer med licens (Dansk Geofysik A/S m.fl.).

### 3.5 Hvad koster loggingundersøgelser?

Program og priser

Prisen for loggingundersøgelser fastsættes i ovennævnte firmaer/institutioner forskelligt, men vil naturligvis afhænge af loggingprogrammets omfang i den enkelte boring, af dennes dybde, af antal boringer, der skal undersøges i samme sag, samt af krav til rapporteringens omfang. Den varierer typisk mellem 10.000 kr. og 25.000 kr. per boring. Anskaffelsen af et moderne loggingudstyr koster mellem 1/2 og 1 million afhængig af antal af logtyper/metoder, som der ønskes mulighed for at kunne udføre.

## 3.6 Hvilke logtyper kunne en brøndborer med fordel selv udføre?

Det er imidlertid også muligt for et brøndboringsfirma selv at kunne udføre visse af de vigtigste logs uden at skulle foretage en så stor investering, og uden at skulle råde over specialiste-kspertise.

For en investering på ca. 20.000 kr. vil man kunne råde over et batteridrevet resistivitets måleudstyr med eksempelvis 100 m kabel på tromle med glidekontakt til udførelse af diskrete målinger i stationære dybdepositioner. Derved ville brøndboreren inden filtersætning kunne kontrollere lagfølgen og laggrænserne med henblik på valg af den bedst mulige filterplacering og for samtidig at kunne vurdere, om det ville være hensigtsmæssigt at have mere end en filterkonstruktion, dvs. mere end en slidsestørrelse.

Resistivitetsmåleudstyr

For en investering på ca. 25.000 kr. vil man kunne råde over et batteridrevet propel flow-måleudstyr med eksempelvis 100 m kabel på tromle med glidekontakt til udførelse af diskret flow-log målinger i stationære dybdepositioner. Derved ville brøndboreren eksempelvis selv kunne aflevere en dokumentation over indstrømningsfordelingen i filteret efter færdigudbygning af en ny boring. En sådan flow-log sammenholdt med dels brøndborerens egen vurdering af det filtersatte sandlags sammensætning og dels en eventuel resistivitetslog vil kunne give en vurdering af behovet for en eventuel regenerering (spuling) af hele eller specielle dele af filterintervallet.

Propel flow-måleudstyr

For en investering på ca. 20.000 kr. vil man kunne råde over et batteridrevet ledningsevne & temperatur måleudstyr med eksempelvis 100 m kabel på tromle med glidekontakt til udførelse af diskrete målinger i stationære dybdepositioner. Derved vil brøndboreren dels kunne vurdere, om en eventuel saltvandsgrænse er passeret, eller om der kan/skal bores dybere inden beslutning om filtersætning. Endvidere vil brøndboreren ved en ledningsevnelog efter filtersætning kunne få en indikation på, om der er tale om forskellig vandkvalitet i forskellige dele af filterintervallet.

Ledningsevne og temperatur måleudstyr

Det er karakteristisk for disse tre typer af udstyr, at de er forholdsvis robuste og samtidig simple at udføre.

## 3.7 Litteratur

Sørensen, K., 1989: Ellog boring.- Skov- og Naturstyrelsen, Kortlægningsserien nr. 8.

Fig. 1 Gamma-logs fra en kvartær lagserie (B14, Sekjær), en lagserie i Danien kalk over skrivekridt (Ø3a, Egholm) samt fra en Miocæn lagserie (B15, Lindknud). Bemærk, at der kan optræde stor gammastårning Miocæne sandlag, hvilket skyldes tilstedeværelse af lag med uranholdigt tungsand.

Fig. 2A Korrelation af gamma-logs og af resistivitets-logs fra borer i Miocæne aflejringer ved Lindknud. De fire borer står på en knækket linie fra sydvest mod nordøst og afstanden fra B15 til B13 er ca. 3,5 km. Gamma-strålingen i de marine miocæne sekvenser er generelt højere end i de øverste limnisk sekvenser, hvilket skyldes tilstedeværelse af dels lag af glimmerler og dels indslag af uranholdigt tungsand i de marine sekvenser. Såvel gamma-logs som resistivitets-logs kan detail korreleres fra boring til boring i de marine sekvenser, hvorimod log-sekvenserne fra Odderup formationen kun delvis kan korreleres og kun imellem et par af borerne.

Fig. 2B Korrelation af gamma-logs og af resistivitets-logs fra Danien kalk over skrivekridt (Egholm). Der ses flere gamma-marker horisonter (stor stråling) i den øvre kalk sekvens, og disse horisonter hører til lag med lav resistivitet. Ligeledes ses der i samme kalk sekvens flere resistivitets-marker horisonter (stor resistivitet), og disse optræder i laget lige ovenover de enkelte gamma-marker horisonter. Bemærk i øvrigt de generelle forskelle i såvel gamma-stråling som i resistivitetsniveau i de tre kalk sekvenser. Skrivekridtet kan skelnes fra kalken ved en mindre resistivitet.

Fig. 2C Korrelation af gamma-logs og af induktions-logs fra samme borer som i Fig. 5B. Induktions-logs viser det modsatte af resistivitets-logs, og sammenhængen mellem gamma-marker horisonterne i den øvre kalk sekvens og lag med stor ledningsevne ses tydelig, ligesom ledningsevne-niveau og -variation i den midterste kalk sekvens har tilsvarende rolige og lave forløb som gamma-strålingen i modsætning til forløbene i den øvre og i den nedre kalk sekvens.

Fig. 3 Resistivitets-logs fra en kvartær lagserie (B14, Sekjær), en lagserie i Danien kalk over skrivekridt (Ø3a, Egholm) samt fra en Miocæn lagserie (B15, Lindknud).

Fig. 4 Tabel over typiske resistiviteter for danske aflejringer.

Fig. 5 Induktions-logs fra en kvartær lagfølge over Danien kalk og skrivekridt (200.4186 Lautrupparken) og fra en Danien kalk over skrivekridt (Ø3A Egholm).

Fig. 6 Gamma-logs før og efter filtersætning, samt resistivitets-log efter filtersætning. Sidstnævnte giver kun meningsfyldte målinger ud gennem slidseintervallet, hvorved filterets nøjagtige placering kan kontrolleres. Gamma-log efter filtersætning viser generelt lavere værdier end før filtersætning, hvilket skyldes at strålingen dæmpes dels af filtermaterialet men især af bagfyldt materialet. Forseglingsintervallet lige over filteret giver sig til kende på gamma-loggen efter filtersætning ved det højere strålingsniveau, hvorimod den planlagte øvre forsegling ca. 15 m.u.t. ikke ses på gamma-loggen efter filtersætning, og derfor må formodes ikke at være blevet placeret.

- Fig. 7 Kaliper-logs fra 2 åbne kalk-boringer, Lautrupparken 200.4186 og Egholm Ø3A. Ekstra store diametre ses i den øvre del af kalken lige under forerør.
- Fig. 8 Temp.- og ledningsevne-logs før og under pumpning fra to åbne kalk-boringer, Lautrupparken 200.4186 og Egholm Ø3A. Boringen fra Lautrupparken viser højere temperaturer og ledningsevne under pumpning end før pumpning på grund af bidrag under pumpning fra indstrømninger også i den nedre del af boringen. Egholm boringen viser derimod samme temperatur og ledningsevne før og under pumpning, hvilket skyldes at der også i situationen uden pumpning sker en væsentlig opadgående strømning fra boringens nedre del til den øvre del. Bemærk ved begge boringer de trinvis ændringer i temperatur og ledningsevne under pumpning, som er karakteristisk for indstrømninger fra sprækker.
- Fig. 9 Flow-logs under pumpning fra de samme to åbne kalk-boringer som i Fig. 8, samt fra en filtersat boring ved Gevinge (24A). Sidstnævnte viser tre enkelte indstrømningszoner fra sprækker i Grønsandskalken. Boringen ved Lautrupparken viser hovedsagelig indstrømning i de øverste 5 m under forerøret (ikke vist her, men ses på Fig. 11). Egholm boringen viser at al indstrømning sker fra flere zoner i den nedre del af Danien kalken i dybdeintervallet 70-90 m. Den tilsyneladende aftagende strømning (vandmængde) ovenover 46 m skyldes en større diameter i den øvre del af boringen og i foringsrøret. Flow-loggen under pumpning i rotationstælletal per minut er sammenlignet med tilsvarende log uden pumpning, hvorved der ses et basisflow fra samme indstrømningsinterval 70-90 m og op til zonen lige under forerøret. Tællertallene er maksimalt ca. 30 Rot/min imod 60 Rot/min. under pumpning med  $36 \text{ m}^3/\text{t}$ , d.v.s. basisflowet er ca. halvdelen af vandmængden under pumpning,  $16 \text{ m}^3/\text{t}$ .
- Fig. 10 Eksempel på 3 heat pulse impuls målinger i 50 m dybde og 2 målinger i 60 m dybde i den åbne kalk-boring 192.983 Hørup uden pumpning fra boringen med henblik på at undersøge om der sker kortslutningsstrømning (basisflow) imellem forskellige zoner i boringen. Den nedadgående puls ved tidspunktet 13-14 sekunder i 50 m dybde svarer til en nedadrettet strømningshastighed på  $5 \text{ cm}/13 \text{ sek.} = 23 \text{ cm}/\text{min.} = 13,8 \text{ m}/\text{time}$ . I 60 m registreres der ingen pulse og der sker derfor ingen lodret strømning i boringen i denne dybde.
- Fig. 11 Komplet logging program for en ny boring forinden eventuel færdigudbygning. Under mergel lagene i skrivekridtet i 105 m dybde viser resistivitets- og induktions-logs at ledningsevnen i porevandet i skrivekridtet under denne dybde stiger markant, formodentlig på grund af øget klorindhold. Grænsen mellem skrivekridt og kalksandskalk i ca. 65 m dybde ses ligeledes tydeligt på disse to logs, idet skrivekridtet har en væsentlig lavere resistivitet/højere ledningsevne end kalksandskalken. Flowloggen viser, at hovedindstrømningen (80%) sker indenfor de øverste 5 m under forerøret. Den øvrige indstrømning (20%) sker fra en lang række zoner, som lettest identificeres på temperatur- og på ledningsevne-loggen under pumpning, idet der på disse logs sker bratte ændringer ved hver af indstrømningerne.



### **Udvidet geologi og grundvand**

Denne bog er en håndbog og et undervisningsmateriale. Den er en håndbog for alle der udfører boringer på land: geologer, ingeniører, brøndborere m.fl. Bogen er også undervisningsmateriale til Brøndboreruddannelsen – en uddannelse for alle der foretager boringer på land.

I serien om udførelse af boringer på land findes i alt seks bøger. Denne bog er den femte i rækken og indeholder afsnit om grundvandskemi, grundvandssænkning, geofysiske metoder og borehulsmålinger.

### **Serien om udførelse af boringer på land består af disse seks håndbøger:**

Grundlæggende geologi og grundvand

Boringer

Kort, nivellering og arbejdsmiljø

Maskinteknik

Udvidet geologi og grundvand

Vandforsyningsteknik og regler

Udgivelsen er støttet af Vandfonden

ISBN 87-7944-827-5

Pris (inkl. moms): 70 kr.

Ved køb af alle 6 håndbøger: 420 kr.

Kan købes i

Miljøbutikken

Læderstræde 1-3

1201 København K

Tlf.: 33 95 40 00

butik@mem.dk

www.mem.dk