

## Zonering

Detalkortlægning af arealer til beskyttelse af grundvandsressourcen

# Indholdsfortegnelse

## FORORD 5

### 1 INDLEDNING 7

- 1.1 BAGGRUND 7
- 1.2 FORMÅL MED VEJLEDNINGEN 8

### 2 DEN FREMTIDIGE GRUNDVANDSBESKYTTELSE 11

- 2.1 INTRODUKTION 11
- 2.2 DEFINITIONER 12
  - 2.2.1 *Generelt* 12
  - 2.2.2 *Følsomme indvindingsområder* 13
  - 2.2.3 *Indsatsområder generelt* 14
  - 2.2.4 *Indsatsområde som ramme for planlægningen* 15
  - 2.2.5 *Indsatsområde med hensyn til nitrat* 16
  - 2.2.6 *Detailkortlægning* 17
  - 2.2.7 *Indsatsplaner* 17
  - 2.2.8 *Kildepladszone* 18
  - 2.2.9 *Fysisk sikringszone* 19
- 2.3 ILLUSTRATION AF OMRÅDER 19

### 3 HYDROGEOLOGISK RAMME 23

- 3.1 GRUNDLÆGGENDE HYDROGEOLOGISKE BEGREBER 23
- 3.2 GEOLOGISK MODEL 24
- 3.3 HYDROGEOLOGISK TOLKNINGSMODEL 25

### 4 UDPEGNING AF FØLSOMME INDVINDINGSOMRÅDER 29

- 4.1 FØLSOMME INDVINDINGSOMRÅDER 29
  - 4.1.1 *Generelt* 29
  - 4.1.2 *Grundvandets beskyttelse* 29
  - 4.1.3 *Datagrundlag* 30
- 4.2 NITRATFØLSOMME INDVINDINGSOMRÅDER 31

### 5 MODELLERING OG DETAILKORTLÆGNING 33

- 5.1 RAMMER OG METODER 33
  - 5.1.1 *Rammer for detailkortlægningen* 33
  - 5.1.2 *Kortlægningsmetoder* 34
  - 5.1.3 *Indberetning af resultater* 35
- 5.2 VALG AF TEMAER FOR KORTLÆGNING OG MODELLERING 36
  - 5.2.1 *Følsomhed over for forurening* 36
  - 5.2.2 *Grundvandsdannelse* 37
  - 5.2.3 *Vandtype som indikator* 38
  - 5.2.4 *Sårbarhed over for nitrat* 39
  - 5.2.5 *Kortlægning i kildepladszonen* 41
- 5.3 VIGTIGE HYDROGEOLOGISKE PARAMETRE 41
  - 5.3.1 *Magasinerne og deres dæklag* 41
  - 5.3.2 *Potentialeforhold* 43

5.3.3	<i>Grundvandskvalitet og fortolkning af vandanalyser</i>	44
5.3.4	<i>Aldersdatering af grundvand</i>	45
5.4	NUMERISK GRUNDVANDSMODEL	47

## **6 REFERENCER 51**

### **Appendix 53**

Appendix a	Geologiske modeller	57
Appendix b	Geofysisk kortlægning	71
Appendix c	Øvrige kortlægningsmetoder	109
Appendix d	Anvendelse af grundvandsmodeller i zoneringsen	129
Appendix e	Klassifikation af vandanalyser ud fra sårbarhedskriterier	143
Appendix f	Nitratsårbarhed	149

# Forord

Arbejdet med denne vejledning om zonerings blev indledt i maj 1997 og er blevet fulgt af en styregruppe, som har taget aktivt del i redigering og udarbejdelse af vejledningen. Styregruppen har haft følgende deltagere:

Bente Villumsen, Miljøstyrelsen (formand)  
Christian Ammitsøe, Miljøstyrelsen  
Peter Østergaard, Fyns Amt (Amtsrådsforeningen)  
Richard Thomsen, Århus Amt (Amtsrådsforeningen)  
Gyrite Brandt, Københavns Vand (Københavns Kommune)  
Bjørn Michael Nielsen, Frederiksberg kommune  
Jens F. Bastrup, Danske Vandværkers Forening,  
Hans Jørgen Henriksen, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS)

Kemp & Lauritzen Vand og Miljø A/S (senere HOH Vand og Miljø) var konsulent for styregruppen og stod for redigeringen af vejledningen frem til der forelå et udkast i december 1997.

Miljøstyrelsen overtog herefter redigeringen af vejledningen med assistance af GEUS, med henblik på at omredigere vejledningen så den stemmer overens med drikkevandsudvalgets betænkning (Miljøstyrelsen, Betænkning nr. 1, 1998), lovgivningen om beskyttelse af drikkevandsressourcer og vandforsyning og den statslige udmelding til regionplan 2001.

Styregruppens arbejde er afsluttet i februar 1999.

Miljøstyrelsen har efterfølgende justeret kriterierne for udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder. Desuden har høringssvarene efter den offentlige høring i perioden fra juni til august 1999 givet anledning til en redigering.

Vejledningens appendix beskriver en lang række metoder til kortlægning, som kan finde anvendelse ved zonerings.

Appendixet om geofysisk kortlægning er skrevet af geofysiker Kurt Sørensen og geolog Verner Søndergaard, Århus Amt. GEUS har bidraget med to appendixer: Geologiske modeller ved statsgeolog Peter Gravesen, grundvandsmodeller ved seniorkonsulent Hans Jørgen Henriksen. Herudover har seniorforsker Klaus Hinsby og seniorforsker, Ph.D. Vibeke Ernstsén, begge GEUS, bidraget omkring henholdsvis aldersdatering af grundvand og klassifikation af vandanalyser.



# 1 Indledning

## 1.1 Baggrund

Regeringens 10-punktsprogram for beskyttelse af grundvand og drikkevand i Danmark blev fremlagt i december 1994. Af 10-punktsprogrammet fremgår det at ministeren i 1995 ville bede amterne udpege de grundvandsressourcer som i særlig grad skal sikre en fortsat grundvandsbaseret drikkevandsforsyning.

I forlængelse heraf udgav Miljøstyrelsen i 1995 vejledningen om udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser (Miljøstyrelsen, 1995). Udpegningsen af områder med særlige drikkevandsinteresser er gennemført ved 1997-revisionen af regionplanerne.

Det er forudsat at der efterfølgende skal ske en zonerings af områder med særlige drikkevandsinteresser, dvs. en kortlægning og afgrænsning af de områder hvor der er behov for en supplerende beskyttelse. Formålet med beskyttelsen er at opretholde en grundvandskvalitet der er egnet som drikkevand efter en simpel vandbehandling.

I marts 1996 bad Miljø- og Energiministeren Miljøstyrelsen om at iværksætte et udredningsarbejde på drikkevandsområdet og om at nedsætte et drikkevandsudvalg til at følge dette arbejde. Drikkevandsudvalget afgav betænkning den 17. december 1997 (Miljøstyrelsen, Betænkning nr. 1, 1998).

Den 17. februar 1998 indgik regeringen forlig med Venstre, Det Konservative Folkeparti, Socialistisk Folkeparti og Centrum-Demokraterne om Vandmiljøplan II, som blandt andet har til formål at reducere påvirkning af grundvandet med nitrat. Forliget er et led i gennemførelsen af Rådets direktiv 91/676/EØF om beskyttelse af vand imod forurening forårsaget af nitrater fra landbruget.

Drikkevandsudvalgets anbefalinger blev sammen med grundvandsdelen af Vandmiljøplan II udmøntet i et lovforslag (L56). På baggrund af lovforslaget blev lov nr. 479 af 1. juli 1998 om ændring af lov om vandforsyning m.v., lov om miljøbeskyttelse og lov om planlægning (Beskyttelse af drikkevandsressourcer og vandforsyning) vedtaget. Loven trådte i kraft den 1. august 1998.

Kravene til vandressourceplanlægningen er beskrevet i vandforsyningsloven, jf. lovbekendtgørelse nr. 130 af 26. februar 1999 om vandforsyning m.v. med efterfølgende ændringer ved lov nr. 355 af og 374 af 2. juni 1999. Efter ændringen af vandforsyningsloven har

amterne ifølge lovens § 11 nu en forpligtelse til at gennemføre vandressourceplanlægning som blandt andet omfatter

- 1) en udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser,
- 2) en udpegning af områder med drikkevandsinteresser,
- 3) en udpegning af områder med begrænsede drikkevandsinteresser og
- 4) en afgrænsning af de dele af områder med særlige drikkevandsinteresser og af indvindingsoplande til almene vandforsyninger uden for disse som er særligt følsomme over for en eller flere typer af forurening (følsomme indvindingsområder), med angivelse af hvilken eller hvilke typer forurening de anses for følsomme over for,
- 5) en afgrænsning af områder hvor amtsrådet finder at en særlig indsats til beskyttelse af vandressourcerne er nødvendig til sikring af drikkevandsinteresserne (indsatsområder) og en prioritering af disse indsatsområder, samt
- 6) en tidsplan for udarbejdelse og iværksættelse af indsatsplaner.

Det fremgår af vandforsyningslovens § 10, at vandressourceplanlægningen skal ske på grundlag af blandt andet en kortlægning af vandressourcernes naturlige beskyttelse mod forurening. Vejledningen om zonerings beskriver hvordan denne kortlægning gennemføres.

Som led i gennemførelsen af den nye lovgivning er der i statens udmelding til regionplan 2001 (Miljø- og Energiministeriet 1999a) stillet krav om at amterne udpeger indsatsområder og nitratfølsomme indvindingsområder. Det fremgår her at kriterierne for nitratfølsomme indvindingsområder vil fremgå af Miljøstyrelsens vejledning om zonerings.

Amternes zonerings finansieres ved gebyrer, jf. vandforsyningslovens § 52 c.

## 1.2 Formål med vejledningen

Formålet med at Miljøstyrelsen udgiver denne vejledning er at sikre

- at udpegningen af følsomme indvindingsområder, specielt nitratfølsomme indvindingsområder, sker på et fagligt og ensartet grundlag og efter ensartede kriterier i hele landet, og
- at detailkortlægningen af grundvandsressourcen og dens beskyttelse sker med egnede metoder, så resultaterne kan skabe det bedst mulige grundlag for den fremtidige planlægning af grundvandsbeskyttelsen.

For at opfylde disse formål skal vejledningen om zonerings

- beskrive arbejdsgangen og fremgangsmåden ved udpegning af indsatsområder og følsomme indvindingsområder,
- beskrive præcise og konsistente kriterier for udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder,
- beskrive indholdet af og kravene til den detaljerede kortlægning af grundvandsressourcen og dens beskyttelse, som skal ligge til

- grund for udarbejdelsen af indsatsplaner, under hensyntagen til forskelle i indvindingsstruktur, grundvandsdannelse, geologi m.v.,
- beskrive og vurdere udvalgte metoder til detailkortlægning af grundvandsressourcen og dennes sårbarhed over for forurening.

Vejledningen beskæftiger sig således kun med kortlægning og udpegning af arealer og ikke med hvilke tiltag for beskyttelse af grundvandet der er nødvendige eller hensigtsmæssige på disse arealer.

Indsatsen i indsatsområder beskrives i en indsatsplan, som udarbejdes efter retningslinierne i bekendtgørelse nr. 494 af 28. maj 2000 om indsatsplaner. Indsats over for punktforureninger er beskrevet i Miljøstyrelsens vejledninger om oprydning af forurenede lokaliteter (Miljøstyrelsens vejledning nr. 6-11, 1998).

Indsatsen over for nitrat vil blive beskrevet i en kommende vejledning. Denne vejledning udarbejdes af Miljøstyrelsen i samarbejde med Skov- og Naturstyrelsen. Vejledningen vil omfatte metoder til beregning af udvaskningen af nitrat fra landbrugsjord ved forskellig dyrkningspraksis og metoder til opgørelse af nitratreduktionen under rodzonen. Derudover vil vejledningen indeholde afsnit om udarbejdelse og gennemførelse af disse indsatsplaner.

Zoneringen og detailkortlægningen er amternes opgave, hvorfor vejledningen primært er udarbejdet som en teknisk vejledning for amterne. Arbejdet skal foregå i samarbejde med kommuner og vandværker og kan tages op i det koordinationsforum som er oprettet efter vandforsyningslovens § 12. Herudover er det vigtigt at informere de berørte lodsejere på et tidligt tidspunkt.

Inden for amtet skal blandt andet planlægning af skovrejsning og indsatsen efter lov nr. 370 af 2. juni 1999 om forurenede jord (jordforureningsloven) ske i overensstemmelse med planlægningen af grundvandsbeskyttelsen. Udpegningen af skovrejsningsområder er beskrevet i vejledningen "Planlægning af skovrejsning" (Skov- og Naturstyrelsen, 1999). Prioritering af indsatsen efter jordforureningsloven beskrives i en kommende vejledning om kortlægning.

Efter vandforsyningslovens § 13 a kan en kommune eller et vandværk selv udarbejde en indsatsplan for et område hvis de finder at retningslinierne eller prioriteringen i vandressourceplanlægningen og regionplanen ikke er tilstrækkelige til at sikre vandforsyningsinteresser. Vejledningen kan derfor også anvendes af kommuner og vandværker.





## 2 Den fremtidige grundvandsbeskyttelse

### 2.1 Introduktion

I regionplan '97 er der i alt udpeget ca. 15.000 km<sup>2</sup> områder med særlige drikkevandsinteresser. Der er således allerede foretaget en overordnet regional kortlægning og en udpegning af områder efter indvindingsinteresser.

I denne vejledning forudsættes det at udpegningen af områder med særlige drikkevandsinteresser efter Miljøstyrelsens vejledning (Miljøstyrelsens vejledning nr. 4, 1995) er gennemført, herunder at det kortmateriale som skal udarbejdes i denne forbindelse, foreligger.

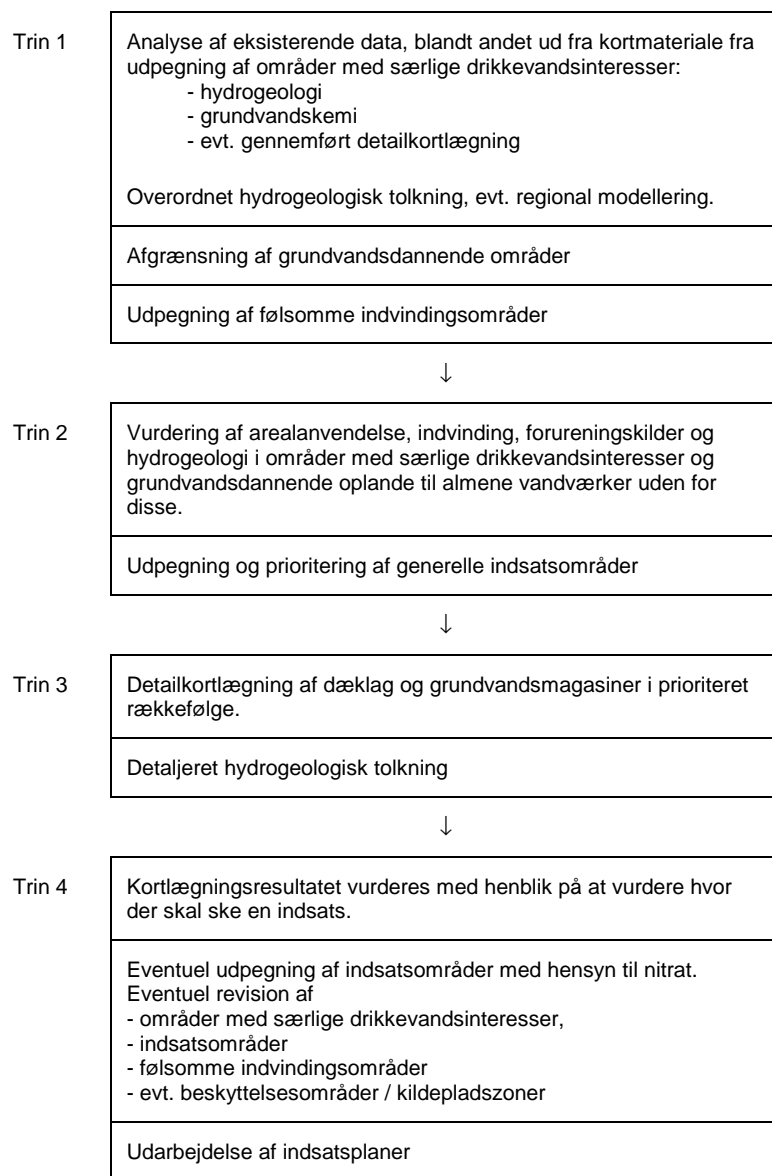
Som nævnt i afsnit 1.1 skal der udpeges følsomme indvindingsområder og indsatsområder i de fremtidige regionplaner. Der skal desuden udarbejdes indsatsplaner for indsatsområderne. Som grundlag for indsatsplanerne skal indsatsområderne detailkortlægges.

Af praktiske grunde er det nødvendigt at tilrettelægge detailkortlægningen og udarbejdelsen af indsatsplaner over en længere periode.

Den proces som skal gennemløbes kan beskrives i fire trin. Hvert indsatsområde vil gennemløbe processen fra trin 1 til trin 4 som er skitseret i figur 2.1. Processen vil forløbe i forskellige tempi for forskellige områder inden for et amt, idet undersøgelserne og indsatsplaner sker i prioriteret rækkefølge.

Amtets prioritering af indsatsområderne, dvs. rækkefølgen for kortlægning og udarbejdelse af indsatsplaner, skal fremgå af regionplanen.

Arbejdet med at tilvejebringe grundlaget for indsatsplanerne indledes allerede når indsatsområderne er udpeget, men indsatsplanen kan først gøres færdig når det nødvendige hydrogeologiske grundlag for planen foreligger.



**Figur 2.1 Flowdiagram for zonerings**

## 2.2 Definitioner

### 2.2.1 Generelt

I det følgende er de nye områdebetegnelser inden for grundvandsbeskyttelsen defineret. For fuldstændighedens skyld beskrives også den fysiske sikringszone, som allerede er etableret i medfør af lovbe- kendtgørelse nr. 698 af 22. september 1998 om miljøbeskyttelse

(Miljøbeskyttelsesloven), som ændret ved lov nr. 907 og 908 af 16. december 1998, lov nr. 355, 369, 370 og 373 af 2. juni 1999 og lov nr. 447 af 31. maj 2000. Den fysiske sikringszone etableres i medfør af lovens § 24. Desuden omtales kildepladszonen, som er en begrebsmæssig udvidelse af det beskyttelsesområde som fastlægges med hjemmel i miljøbeskyttelseslovens § 22.

Af hensyn til overskueligheden beskrives også detailkortlægningens rolle og indsatsplanlægningen. Zonerne er beskrevet overordnet i tabel 2.1 og beskrives nærmere i det følgende.

**Tabel 2.1 Overordnet beskrivelse af zoner**

Zone	Overordnet beskrivelse	Udpeges hvor?
Følsomt indvindingsområde	Område hvor den naturlige beskyttelse over for en eller flere typer af forurening er lille.	I områder med særlige drikkevandsinteresser og ved almene vandværker
Indsatsområde	Område hvor det er nødvendigt at iværksætte en indsats over for forureningskilderne for at sikre den fremtidige drikkevandsforsyning.	I områder med særlige drikkevandsinteresser og ved almene vandværker
Indsatsområde med hensyn til nitrat	Områder hvor der er et dokumenteret behov for en indsats med henblik på at begrænse nitratudvaskningen.	I indsatsområder
Kildepladszone	Beskyttelsesområde med radius mindst 300 m omkring indvindingsboringer.	Kan udpeges ved almene vandværker
Fysisk sikringszone	Beskyttelsesområde med radius mindst 10 m omkring indvindingsboringer.	Fastsættes for alle vandforsyningsboringer

Udpegning af følsomme indvindingsområder eller indsatsområder i områder hvor der ikke i dag foregår vandindvinding, forudsætter at der er knyttet indvindingsinteresser til det magasin som er betragtet ved udpegningen. Der skal altså være tale om et primært magasin eller et betydende sekundært magasin som med en vis sandsynlighed kan forventes udnyttet til indvinding af drikkevand.

### 2.2.2 Følsomme indvindingsområder

Et følsomt indvindingsområde er et område hvor grundvandet er særlig følsomt over for en eller flere typer forurening. Følsomme indvindingsområder kan udpeges såvel i nuværende indvindingsområder som i områder med særlige drikkevandsinteresser hvor der ikke sker vandindvinding i dag.

Udpegningen er uafhængig af arealanvendelsen, idet den sker på baggrund af hydrogeologiske kriterier, sammenholdt med stofspecifikke forhold og grundvandets aktuelle forureningstilstand.

Lovgivningen tager udgangspunkt i at afgrænsningen af områder som er følsomme over for forurening, skal ske stofs specifikt. Herved er der skabt rammer for en fleksibel grundvandsbeskyttelse, tilpasset den til enhver tid eksisterende viden om forureningspotentialer fra specifikke stoffer.

Imidlertid er det nuværende vidensgrundlag ikke tilstrækkeligt til at gennemføre en egentlig stofs specifik grundvandsbeskyttelse over for alle mulige forureninger. Kun for nitrat eksisterer der tilstrækkelig viden til at en stofs specifik tilgang kan anvendes. Det er dog en generel erfaring at de geologiske forhold som beskytter et grundvandsmagasin mod nitratforurening, også kan yde en vis beskyttelse over for visse andre typer af forurening, eksempelvis tungmetaller og visse olieforbindelser.

For pesticider kan man ikke med samme sikkerhed som for nitrat identificere områder som er særligt følsomme. Eventuelle aftaler om pesticidanvendelsen må derfor, i modsætning til fremgangsmåden for nitrat, tage udgangspunkt i hele det grundvandsdannende område for en indvinding eller et grundvandsmagasin. Det samme gør sig gældende for flere andre typer af forurening, eksempelvis klorerede opløsningsmidler og MTBE.

Udpegningen af følsomme indvindingsområder er nærmere beskrevet i kapitel 4.

I den statslige udmelding til regionplan 2001 (Miljø- og Energiministeriet, 1999 a) er der stillet krav om udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder. Det fremgår af udmeldingen at kriterierne for udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder beskrives i Miljøstyrelsens zoneringsvejledning. Disse kriterier er beskrevet i afsnit 4.2.

Nitratfølsomme indvindingsområder udpeges i områder med særlige drikkevandsinteresser og i indvindingsoplande til almen vandforsyning uden for disse. Områderne udpeges ud fra en vurdering af eksisterende data.

### **2.2.3 Indsatsområder generelt**

Den fremtidige indsats for grundvandsbeskyttelsen, ud over den generelle beskyttelse, beskrives i indsatsplaner. Indsatsplaner udarbejdes for indsatsområder. Disse områder udpeges ved regionplanrevision 2001.

Indsatsområderne udpeges i områder med særlige drikkevandsinteresser og uden for disse i grundvandsdannende oplande til almene vandværker som skal indgå i den fremtidige vandforsyningsstruktur. Indsatsområderne skal prioriteres indbyrdes i regionplanen.

Indsatsområderne er de områder hvor der er behov for en supplerende indsats ud over den generelle grundvandsbeskyttelse for at opretholde en tilfredsstillende vandkvalitet som er egnet til produktion af drikkevand. Indsatsområderne udpeges og prioriteres ud fra en vurdering af arealanvendelsen og grundvandets sårbarhed, sammenholdt med målsætningen for grundvandets kvalitet.

Der skelnes mellem to typer af indsatsområder. De indsatsområder som udpeges i første omgang, såkaldt "generelle indsatsområder", omfatter hydrologisk eller administrativt afgrænsede områder som fungerer som ramme for den koordinerede indsats for over for alle forureningskilder.

I områder hvor der er dokumenterede nitratproblemer, kan der udpeges indsatsområder med hensyn til nitrat hvor der skal foregå en specifik indsats for at stabilisere eller nedbringe belastningen af grundvandet med nitrat.

De to typer af indsatsområder beskrives nedenfor.

#### **2.2.4 Indsatsområde som ramme for planlægningen**

Indsatsområder udpeges som ramme for den koordinerede indsats over for alle forureningskilder i områder hvor der er behov for aktiv grundvandsbeskyttelse. Indsatsområdet kan for eksempel være et område med særlige drikkevandsinteresser eller en hydrologisk afgrænset del heraf eller det grundvandsdannende opland til en vandforsyning, men også f.eks. administrative grænser kan indgå i afgrænsningen.

I nogle områder kan det grundvandsdannende opland til vandforsyningsanlæg ikke afgrænses uden forudgående detailkortlægning. Især i områder med spredt vandforsyning inden for områder med drikkevandsinteresser kan det derfor være nødvendigt at udpege indsatsområder som dækker større arealer, eventuelt samlet for flere vandforsyningsanlæg. Disse indsatsområder justeres efterfølgende, senest samtidig med behandlingen af en indsatsplan for området.

Den konkrete indsats over for forurening i indsatsområder som er udpeget som ramme for planlægningen, sker inden for nærmere afgrænsede områder hvor kortlægningen har dokumenteret at en indsats er nødvendig, enten på grund af særlige forureningskilder eller fordi grundvandet er særlig sårbart over for forurening. Selve indsatsen er altså begrænset til de arealer inden for indsatsområdet hvor den er nødvendig, og der kan være store arealer i indsatsområdet hvor en indsats ikke er nødvendig.

Udpegningen af disse indsatsområder forudsætter ikke i sig selv nogen supplerende kortlægning eller indsamling af data.

## 2.2.5 Indsatsområde med hensyn til nitrat

Indsatsområder med hensyn til nitrat er områder hvor der er et dokumenteret behov for en indsats med henblik på at begrænse nitratudvaskningen.

Kriterierne for udpegning af indsatsområder med hensyn til nitrat er de samme som for udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder, jf. afsnit 4.2. For at et område kan udpeges som indsatsområde med hensyn til nitrat kræves der imidlertid en mere omfattende dokumentation for at området er sårbart over for nitrat.

Grundvandets sårbarhed over for nitratforurening er afhængig af de geologiske, hydrologiske og geokemiske forhold. De fleste steder er det ikke muligt at udpege indsatsområder med hensyn til nitrat uden forudgående detailkortlægning.

Den dokumentation som ligger til grund for udpegningen af et indsatsområde med hensyn til nitrat, skal omfatte såvel afgrænsning af det grundvandsdannende område som oplysninger om den geologiske lagserie som vandet passerer under nedsivningen til grundvandet.

Der vil være enkelte områder hvor indsatsområder med hensyn til nitrat kan udpeges på grundlag af eksisterende data. Det drejer sig om områder hvor alle de følgende tre kriterier er opfyldt:

- grundvandsmagasinet findes i kalk, kridt eller oxideret sand,
- ud fra kendskab til geologien kan det fastslås at der ikke er beskyttende dæklag med reduktionspotentiale, og
- grundvandsstrømmen er kendt.

Er der forhøjet indhold af nitrat i grundvandet i sådan et område, kan et indsatsområde med hensyn til nitrat fastlægges som det grundvandsdannende opland for det magasin eller det vandværk som ønskes beskyttet, uden supplerende kortlægning.

I alle andre tilfælde kræver udpegning af indsatsområder med hensyn til nitrat en detailkortlægning for at fremskaffe dokumentation svarende til beskrivelsen i afsnit 5.2.4.

Uanset grundlaget for udpegningen af indsatsområder med hensyn til nitrat kan det være nødvendigt at gennemføre supplerende detailkortlægning som grundlag for en indsatsplan for nitrat.

Efter miljøbeskyttelseslovens § 19, stk. 6 og 7 kan ministeren fastsætte regler til beskyttelse af indsatsområder med hensyn til nitrat som er udpeget i regionplanen. En eventuel regulering vil ske uden erstatning.

Efter § 19, stk. 6 kan der fastsættes regler om godkendelsesordninger for etablering eller udvidelser af husdyrhold som kan medføre en forøgelse af risikoen for forurening af grundvand eller overfladevand. Efter stk. 7 kan der fastsættes regler til begrænsning af eller forbud mod tilførsel af husdyrgødning og affaldsprodukter til jordbrugsformål til indsatsområder med hensyn til nitrat.

### **2.2.6 Detailkortlægning**

Når der er udpeget følsomme indvindingsområder og indsatsområder, skal der ske en detaljeret kortlægning. Kortlægningen sker med udgangspunkt i indsatsområderne og omfatter alle områder med særlige drikkevandsinteresser og i fornødent omfang grundvandsdannende oplande til almen vandforsyning uden for disse.

Den detaljerede kortlægning skal identificere de områder som er særligt følsomme over for forurening, for eksempel fordi den naturlige beskyttelse over for en eller flere typer af forurening er dårlig. Områder hvor den naturlige beskyttelse over for forurening er ringe, kaldes også sårbare områder eller sårbare zoner.

I områder med stor grundvandsdannelse er grundvandsmagasinet generelt mere sårbart over for forurening end i områder med lille eller ingen grundvandsdannelse. Sårbarheden over for forurening er derudover afhængig af hydrogeologi, geo- og grundvandskemi samt stofspecifikke forhold. Detailkortlægningen, som er beskrevet i afsnit 5, tager udgangspunkt i disse forhold.

### **2.2.7 Indsatsplaner**

I prioriteret rækkefølge skal der derefter udarbejdes indsatsplaner for de enkelte indsatsområder. Indsatsplanen skal rumme en samlet, detaljeret plan for indsatsen mod alle forureningskilder i området. Her tænkes på alle typer af forureningskilder, f.eks. nitratforurening eller jordforurening.

En detaljeret kortlægning af de hydrogeologiske forhold og grundvandsdannelsen i indsatsområdet er en forudsætning for udarbejdelse af en indsatsplan.

Indsatsplanen skal beskrive alle de forureningskilder der er og de grundvandsbeskyttende tiltag som er nødvendige for at opnå den tilsluttede forbedring af grundvandsbeskyttelsen. Indholdet af og proceduren for udarbejdelse af indsatsplaner beskrives i bekendtgørelse nr. 494 af 28. maj 2000 om indsatsplaner. Indsats over for jordforurening følger retningslinierne i jordforureningsloven og de tilhørende vejledninger (Miljøstyrelsen, 1998 b).

Regulering af belastningen med nitrat og pesticider forudsættes primært at ske gennem frivillige aftaler i henhold til indsatsplanen. For



nitrat vil det i tilfælde hvor det ikke er muligt at opnå en aftale på rimelige vilkår, være mulighed for pålæg mod erstatning, jf. miljøbeskyttelseslovens § 26 a. En vejledning om indsatsplaner for nitrat er under udarbejdelse.

I forbindelse med udarbejdelsen af en indsatsplan vil der ofte være behov for at opstille et særligt overvågningsprogram. Sammensætningen af analyseprogrammer er beskrevet i Miljøstyrelsens vejledning om boringskontrol (Miljøstyrelsens vejledning nr. 2, 1997).

### **2.2.8 Kildepladszone**

Kildepladszonen har til formål at beskytte indvindinger mod forurening fra de nærmeste omgivelser.

Kildepladszonen tager sit udgangspunkt i det beskyttelsesområde som kan fastsættes af amtsrådet når der gives tilladelse til et vandindvindingsanlæg til indvinding af grundvand, jf. miljøbeskyttelseslovens § 22. I beskyttelsesområdet tillades anlæg der afleder spildevand til undergrunden, normalt ikke. Amtsrådet kan tilsvarende nedlægge forbud mod andre forhold som kræver tilladelse efter miljøbeskyttelseslovens § 19.

Regler om afledning af spildevand til jorden er i øvrigt fastsat i bekendtgørelse nr. 501 af 21. juni 1999 om spildevandstilladelser m.v. efter miljøbeskyttelseslovens kapitel 3 og 4. Disse regler er fastsat med henblik på beskyttelse af indvindingerne mod bakterie- og virusforurenende aktiviteter, og beskyttelsesområdet benævnes ofte den hygiejniske sikkerhedszone. En eventuel ændring af beskyttelsesområdet kræver en ændring af vandindvindingstilladelsen.

Beskyttelsesområderne kan angives som kildepladszone i regionplanens kortmateriale når amtsrådet finder det hensigtsmæssigt. Kildepladszonen som planlægningsmæssig kategori giver dog ikke særlige muligheder for regulering.

Som udgangspunkt udgøres kildepladszonen af samme område som beskyttelsesområdet, sædvanligvis 300 m fra indvindingsboringerne. Afhængigt af konkrete, lokale, geologiske og forureningsmæssige forhold kan udstrækningen af kildepladszonen ændres. Ændringer af kildepladszonens udstrækning bør dog kun foretages på grundlag af detailkortlægning.

Kildepladszoner er et begreb der især er relevant i byområder. Når indvindingen sker i byområder, kan detailkortlægning være meget vanskelig, hvorfor kildepladszonen ud fra et forsigtighedsprincip kan udlægges som beskyttelsesområde, også over for andre typer forurening end spildevand.

Særlig beskyttelse af kildepladszoner kan desuden begrundes med at store sænkninger af grundvandsspejlet tæt på en kildeplads kan medføre en øget grundvandsdannelse og dermed øget risiko for forurening. Kort afstand og transporttid til indvindingsboringerne medfører at mulighederne for at udføre eventuelle afværgeforanstaltninger er ringere. Derfor bør kildepladszonen også gennem regionplanlægningen så vidt muligt friholdes for aktiviteter der kan indebære en risiko for grundvandet.

### **2.2.9 Fysisk sikringszone**

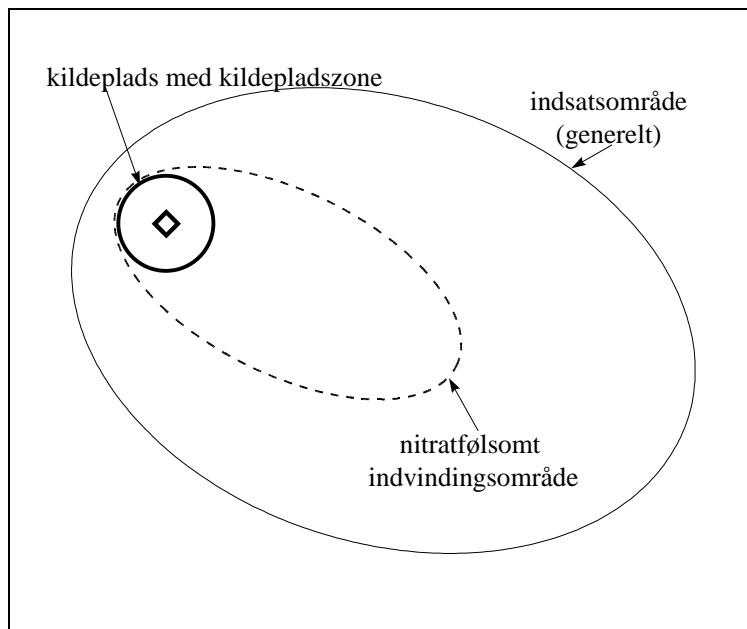
Den fysiske sikringszone, som også benævnes "fredningsbæltet", fastsættes i indvindingsstilladelse for alle indvindingsboringer til almen vandforsyning i henhold til miljøbeskyttelseslovens § 24.

Fredningsbæltet skal i henhold til cirkulære om udførelse af boringer efter grundvand m.v. af 28. februar 1980 og DS 442 udgøres af et område med radius mindst 10 m omkring indvindingsanlægget, og skal normalt være indhegnet. I området må der ikke gødes, bruges gifte eller bekæmpelsesmidler eller i øvrigt anbringes eller bruges stoffer der kan udsætte boringen for forurening. Da der ikke er nye regler for fastsættelsen af fysisk sikringszone, beskrives dette ikke nærmere i denne vejledning.

## **2.3 Illustration af områder**

Da de geografiske og geologiske forhold er forskellige i forskellige dele af landet, vil udseendet af områderne i praksis variere fra det ene amt til det andet. I det følgende illustreres brugen af områdebetegnelserne i et tænkt eksempel med udgangspunkt i figurene 2.2, 2.3 og 2.4.

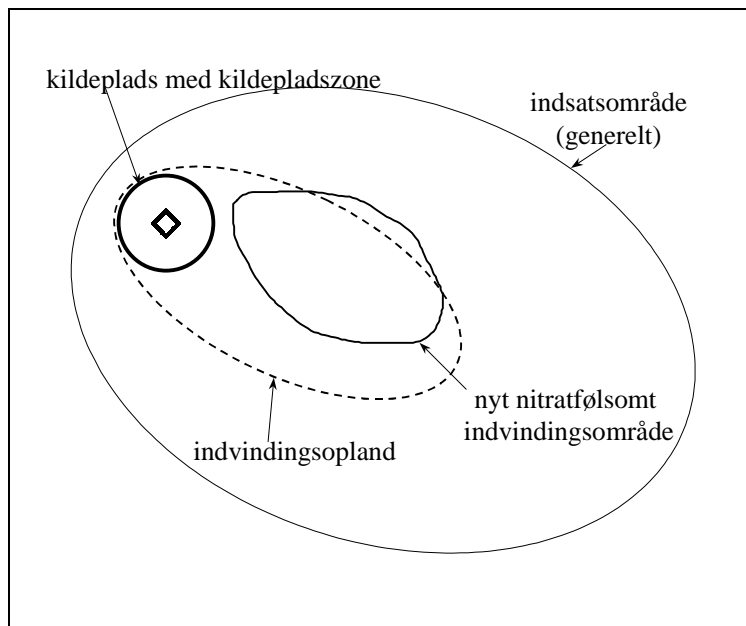
Figurene viser et indsatsområde henholdsvis før og efter detailkortlægningen og illustrerer begreberne indsatsområde, indsatsområde med hensyn til nitrat, nitratfølsomt indvindingsområde og kildepladszone.



**Figur 2.2**  
**Principskitse til illustration af anvendte**  
**områdebetegnelser før detailkortlægning.**  
**Indsatsområdet er her en ramme for koordi-**  
**neringen af indsatsen over for alle**  
**forureningskilder.**

Figur 2.2 viser indsatsområdet før detailkortlægningen. Indsatsområdet er i dette tilfælde det grundvandsdannende område for et magasin, hvorfra der indvindes på den viste kildeplads. Omkring kildepladsen er beskyttelsesområdet indtegnet som en kildepladszone med en radius på 300 meter.

Indvindingsoplandet til kildepladsen er udpeget som nitratfølsomt indvindingsområde på grundlag af vandkvaliteten og en indledende vurdering af grundvandsdannelsen. Området er alene afgrænset ved vurdering af eksisterende oplysninger, herunder de kort som er udarbejdet i forbindelse med udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser.



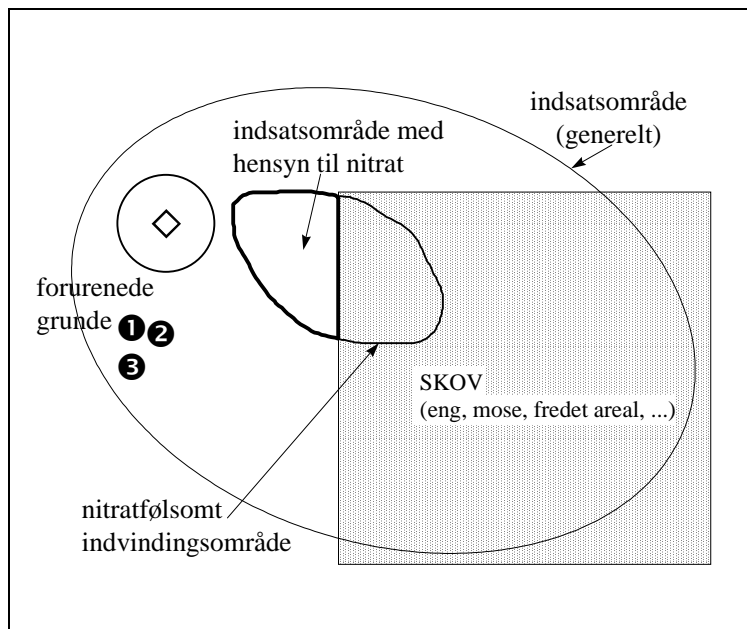
**Figur 2.3**  
**Resultatet af detailkortlægningen.**  
**Principskitse til illustration af anvendte zoner. Der skal nu tages stilling til hvor den konkrete indsats skal ske.**

Figur 2.3 viser indsatsområdet efter detailkortlægningen. Kildepladszonen er ikke ændret i dette eksempel.

Detailkortlægningen har vist at det sårbare område kun udgør en mindre del af det udpegede følsomme indvindingsområde. Derfor er det følsomme indvindingsområde ændret.

Afgrænsningen af det generelle indsatsområde er ikke ændret i dette eksempel. I andre tilfælde kan detailkortlægningen vise at grundvandsdannelsen sker andre steder end forudsat, hvilket kan få indflydelse på både afgrænsningen af områder med særlige drikkevandsinteresser og indsatsområder.

Ud fra en vurdering af hvorvidt det er nødvendigt at reducere nitratbelastningen i det sårbare område, træffes der beslutning om hvorvidt der skal udpeges et indsatsområde af hensyn til nitrat. Eventuelle begrænsninger af nitratbelastningen beskrives i en indsatsplan.



**Figur 2.4**

**Eksempel på grundlaget for en indsatsplan. Det store, generelle indsatsområde er stadig ramme for amtets planlægning. Samtidig er der udpeget et indsatsområde med hensyn til nitrat for at reducere nitratbelastningen af grundvandet i dette område.**

I figur 2.4 er det vist hvordan grundlaget for indsatsplanen kan se ud. Da en betydelig del af det sårbare område er dækket af skov, er der kun brug for at udpege en del af området som indsatsområde med hensyn til nitrat. Det samme ville være tilfældet, hvis der var tale om f.eks. eng, mose, fredet areal eller andre anvendelser, hvor nitratudvaskningen er minimal.

Indsatsplanen vil herefter beskrive hvilken indsats der skal foretages i indsatsområdet med hensyn til nitrat. Også her kan der være dele af indsatsområdet hvor der ikke er behov for nogen indsats, for eksempel fordi en indsats i en del af området er tilstrækkelig.

Indsatsplanen for det samlede indsatsområde skal indeholde en beskrivelse af indsatsen over for alle forureningskilder i området, herunder blandt andet opfyldte grusgrave og forurenede grunde.

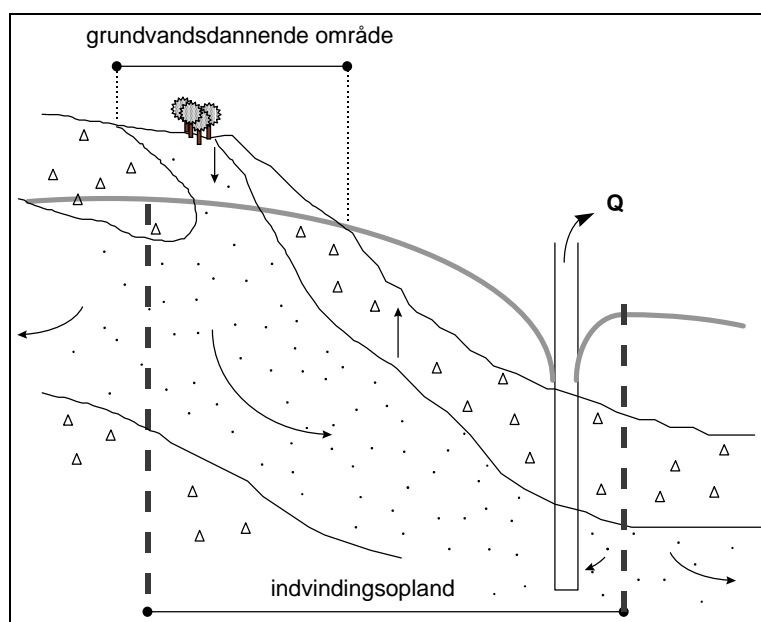
### 3 Hydrogeologisk ramme

Såvel udpegningen af områder som detailkortlægningen bygger på en samlet geologisk og hydrogeologisk forståelse. Dette afsnit beskriver de grundlæggende begreber og modeller som må være på plads inden zonerings indledes.

#### 3.1 Grundlæggende hydrogeologiske begreber

For at opnå en ensartet udpegning af de beskrevne zoner er det afgørende at de grundlæggende begreber vedrørende indvindingsopland, grundvandsdannende område og infiltration ligger fast.

Et *indvindingsopland* for en boring omfatter det område i det magasin der indvindes fra, hvor vandet strømmer mod indvindingsboringen. Dette er illustreret i figur 3.1. Indvindingsoplandet kan for eksempel bestemmes på grundlag af indvindingsmængde, grundvandspotentiale og transmissivitet (Vejle Amt et al, 1995).



**Figur 3.1**  
*Illustration af indvindingsopland og grundvandsdannende område.*

Indvindingsoplandet er et særlig centralt begreb i forbindelse med kortlægning af en forurening der er konstateret i indvindingsmagasinet. En forurening i indvindingsoplandet vil nemlig før eller siden kunne genfindes i indvindingsboringerne.

Betegnelsen indvindingsopland har i andre sammenhænge ofte været anvendt om det område, hvor grundvandet til et vandværk dannes. Dette er blandt andet tilfældet i Drikkevandsudvalgets betænkning.

*Det grundvandsdannende område* for et grundvandsmagasin omfatter hele det areal på jordoverfladen, hvor nedbør infiltrerer, tilgår grundvandsmagasinet. Dette er ligeledes illustreret i figur 3.1. Det grundvandsdannende område for indvindingsboringer kaldes også det grundvandsdannende opland.

Indvindingsoplande kan som regel afgrænses mere sikkert end grundvandsdannende områder.

Størrelsen af *infiltrationen* inden for det grundvandsdannende område er meget afhængig af blandt andet nedbør, potentiel fordampning, bevoksning, karakteren af de øverste jordlag og eventuel dræning.

I nogle situationer dannes en meget stor del af grundvandet således i begrænsede områder med stor infiltration (GEUS 1997). Dette er for eksempel tilfældet gennem sandlaget ved skovområdet i figur 3.1. I andre situationer dannes grundvandet mere jævnt fordelt i det grundvandsdannende opland.

## 3.2 Geologisk model

Grundvandsmagasinerne er i Danmark opbygget af løse sand-grus aflejringer eller kalkbjergarter. Undtaget herfra er Bornholm, hvor grundvandsmagasiner primært findes i sandsten, skifre, granit og gnejs. Den geologiske beskrivelse af magasinernes opbygning er fundamentet for at forstå både fysiske og kemiske processer der foregår når vandet bevæger sig gennem dæklag til magasinerne og ved transport i selve magasinerne.

Viden om de enkelte lags mulige udbredelse kan fås ved at opstille geologiske modeller. Opstillingen af en geologisk model er derfor en forudsætning for opbygningen af en hydrogeologisk tolkningsmodel. Opstillingen af en geologisk model er beskrevet i appendix a. Valget af metoder til den efterfølgende detailkortlægning vil afhænge af hvilke oplysninger der er brug for, og det vil derfor være afhængigt af den geologiske situation i de områder der skal detailkortlægges.

Ved planlægningen af detailkortlægningen kan der med fordel tages udgangspunkt i de geologiske hovedtyper som er skitseret af GEUS (Rasmussen, P. et al, 1995a), og som fremgår af tabel 3.1. En nærmere beskrivelse af hovedtyperne findes i appendix b, hvor der findes

anbefalinger for tilrettelæggelsen af undersøgelserne i de 4 første hovedtyper, som vurderes at dække mere end 90 % af områderne med særlige drikkevandsinteresser.

**Tabel 3.1**  
**Beskrivelse af de geologiske hovedtyper**

Type	Beskrivelse af geologisk hovedtype
1.	Hedeslette med frit og/eller spændt grundvandsmagasin i smeltevandsaflejringer (Vestjylland).
2.	Morænelandskab med frit og/eller spændt grundvandsmagasin i smeltevandsaflejringer (Østdanmark).
3.	Morænelandskab med frit og/eller spændt grundvandsmagasin i kalkaflejringer (Limfjordsområdet/Østdanmark).
4.	Morænelandskab/hedesletteaflejringer med frit og/eller spændt grundvandsmagasin i tertiære sandaflejringer (Midt- og Sønderjylland).
5.	Israndsområder med isforstyrrede grundvandsmagasiner i smeltevandsaflejringer.
6.	Områder der består af grundfjeld eller hærdede sedimenter med grundvandsmagasiner knyttet til sprækker.

I nogle områder af landet forventes det at tredimensionale modelteknikker fra oliegeologien kan være et værdifuldt supplerende redskab i den geologiske kortlægning. GEUS har indledt undersøgelser af hvordan disse teknikker kan bruges i miljøgeologi (Knudsen et al., 1999). Disse metoder er nærmere beskrevet i appendix a.

### 3.3 Hydrogeologisk tolkningsmodel

Som ramme for zoneringsen udbygges den geologiske model med en hydrogeologisk tolkning. Tolkningen omfatter en hypotese for hvordan det hydrogeologiske system er opbygget og hvordan de hydrogeologiske og geokemiske processer forløber og samvirker.

En sådan beskrivelse kaldes i det følgende en hydrogeologisk tolkningsmodel (GEUS, 1997). En hydrogeologisk tolkningsmodel beskrives i tekst, suppleret med kort og profiler. I andre sammenhænge kan man møde begrebet konceptuel model, som er det samme som en hydrogeologisk tolkningsmodel.

Den hydrogeologiske tolkningsmodel er et værktøj til forståelse af grundvandets strømningsforhold og jordlagenes forureningsbegrænsende egenskaber i området.



Den hydrogeologiske tolkningsmodel som er opstillet på grundlag af eksisterende data, bruges til afgrænsning af følsomme indvindingsområder og til prioritering af detailkortlægningen. Herved danner den hydrogeologiske tolkningsmodel grundlag for vurdering af hvilken detaljeringsgrad der er nødvendig i detailkortlægningen og for valget af kortlægningsmetoder. Desuden udgør den grundlaget for at fastlægge omfanget af den numeriske grundvandsmodellering og for beskrivelse af grundvandets strømning.

Under detailkortlægningen sker der en løbende udbygning af den hydrogeologiske tolkningsmodel, og detailkortlægningen justeres i overensstemmelse hermed. På baggrund af detailkortlægningen udarbejdes den endelige detaljerede hydrogeologiske tolkningsmodel der skal danne grundlaget for at afgrænse sårbare zoner og eventuelt udpegede områder med drikkevandsinteresser, indsatsområder eller nitratfølsomme indvindingsområder.

Det er den geologiske ramme, grundvandets tryk- og strømningsforhold samt vandbalancen der er de overordnede elementer i en hydrogeologisk tolkningsmodel. Tværprofiler gennem området er det vigtigste redskab til forståelse og illustration af områdets hydrogeologi, så vidt muligt suppleret med vertikale grundvandskemiske profiler.

Den hydrogeologiske tolkningsmodel indeholder en redegørelse for antagelser om de forhold som er styrende for de processer man ønsker at analysere, dvs. redegørelse for:

- er der opstillet en tilstrækkelig detaljeret geologisk model for området?
- er der udbredte lavpermeable dæklag over/mellem magasiner?
- er der strukturelle forhold som der skal tages hensyn til, f.eks. 'vinduer', isforstyrrelser, sprækkezoner osv.?
- hvordan varierer det geokemiske miljø og vandkvaliteten ned gennem lagfølgen?
- er der tale om frie eller artesiske magasiner?
- hvor foregår nedsivningen og grundvandsdannelsen?
- hvordan er vandudvekslingen mellem forskellige magasiner?
- hvordan er udvekslingen mellem grundvand og overfladevand?  
- herunder: hvor sker der grundvandsafstrømning fra sekundære og primære grundvandsmagasiner til vandløb? - og er der evt. vandløbsstrækninger med væsentlig udsivning til grundvand?
- stemmer vandbalancen?

Ved udpegningen af følsomme indvindingsområder vil det oftest være nyttigt at opstille en overordnet numerisk grundvandsmodel til beregning af grundvandsdannende områder m.v. En sådan overordnet numerisk grundvandsmodel vil resultere i en mere helhedsorienteret udpegning med vægt på analyse og illustration af grundvandets strømningsmønstre.

Gevinsten ved at opstille en numerisk grundvandsmodel er afhængig af mængden af data og af kompleksiteten af den geologiske situation. Ofte vil opstilling af en model med celledimension 200 m til 500 m være relevant i denne fase. Ved denne form for modelarbejde udnyttes eksisterende data, forståelsen af strømningsmæssige forhold øges og arbejdet kan danne baggrund for beslutning om ekstra dataindsamling i visse områder, allerede inden der træffes beslutning om hvordan detailkortlægningen i øvrigt skal tilrettelægges.



## 4 Udpegning af følsomme indvindingsområder

### 4.1 Følsomme indvindingsområder

#### 4.1.1 Generelt

De følsomme indvindingsområder skal fremgå af regionplanen. Som element i den amtslige planlægning anvendes de følsomme indvindingsområder desuden sammen med områder med særlige drikkevandsinteresser til den løbende prioritering af de forurenede lokaliteter som ryddes op af hensyn til grundvandet.

Ved udpegning af følsomme indvindingsområder i regionplanen er der kun behov for kort i målestok 1:100.000 da områderne skal ses som et led i planlægningen og bruges som regulering af fremtidig arealanvendelse, udgangspunkt for udpegning af skovrejsningsområder, prioritering af indsatsområder og oprydning af forurenede lokaliteter.

Inden for områder med særlige drikkevandsinteresser udpeges følsomme indvindingsområder i det grundvandsdannende område til en vandindvinding eller til et magasin med væsentlige vandindvindingsinteresser. Uden for områder med særlige drikkevandsinteresser udpeges følsomme indvindingsområder i det grundvandsdannende opland til de almene vandværker som skal indgå i den fremtidige vandforsyningsstruktur. Dette forudsætter naturligvis at man ved hvor det grundvandsdannende opland ligger.

Udpegningen af følsomme indvindingsområder forudsætter altså et vist kendskab til hvor grundvandsdannelsen til indvindingsanlæg og vigtige grundvandsmagasinier sker.

#### 4.1.2 Grundvandets beskyttelse

Vurderingen af grundvandets generelle følsomhed bygger videre på klassificeringen af grundvandets beskyttelse, som er anvendt ved udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser (Miljøstyrelsens vejledning nr. 4, 1995). I denne forbindelse blev der anvendt en klassificering i god, nogen og ringe eller ingen beskyttelse.

Udpegningen af områder med særlige drikkevandsinteresser var baseret på en vurdering af grundvandets generelle følsomhed over for mange forskellige forurenende stoffer. Derfor er den defineret ud fra

strengere kriterier end grundvandets følsomhed over for nitrat alene. For nitrat henvises til afsnit 5.2.4.

God beskyttelse er defineret ved at der er en meget ringe nedsivning til magasinet, enten som følge af lavpermeable dæklag, det vil sige mindst 10 meter marint ler eller smeltevandsler eller 30 meter moræneler, eller på grund af opadrettet gradient i magasinet, eventuelt med trykniveau over terræn.

Disse områder udgør en relativt lille del af områder med særlige drikkevandsinteresser.

Nogen beskyttelse defineres ved at der forekommer sammenhængende lavpermeable dæklag af for eksempel smeltevandsler eller marint ler på 5 til 10 meters tykkelse eller morænelerslag på 15 til 30 meters tykkelse, samtidig med at trykforholdene i magasinet heller ikke berettiger til at definere den naturlige beskyttelse som god. Grundvandsdannelsen i disse områder er ofte begrænset.

Ring eller ingen beskyttelse forekommer i områder hvor der er dæklag på mindre end 15 meter moræneler eller 5 meter smeltevandsler eller marint ler, og hvor grundvandets trykniveau ikke yder nogen beskyttelse af grundvandet.

### **4.1.3 Datagrundlag**

Udpegningen af følsomme indvindingsområder sker på grundlag af en geologisk model og en hydrogeologisk tolkningsmodel som med fordel kan suppleres med numerisk grundvandsmodellering. På dette trin udnyttes eksisterende data som er sammenstillet i forbindelse med udpegningen af områder med særlige drikkevandsinteresser, eventuelt suppleret med nyere data og data fra råstoftkortlægningen.

Ved udpegningen af følsomme indvindingsområder kan følgende data udnyttes:

- Grundvandskemiske data og grundvandsdateringer for såvel dybtliggende som højtliggende grundvandsmagasiner.
- Geologiske data, herunder især data om udbredelse af vandførende lag (grundvandsmagasiner) og dækkende lerlag.
- Potentialedata og hydrauliske data for såvel dybtliggende som højtliggende grundvandsmagasiner.
- Oppumpningsdata.
- Afstrømningsmålinger og medianminimumvandføringer i vandløb.
- Eventuelle gennemførte detailundersøgelser, herunder geofysisk kortlægning.

## 4.2 Nitratfølsomme indvindingsområder

Til regionplan 2001 er der stillet krav om udpegning af nitratfølsomme indvindingsområder. Det fremgår af den statslige udmelding at der kan udpeges andre følsomme indvindingsområder, hvor det imidlertid (jf. vandforsyningsloven) skal angives hvilke typer af forurening de anses for følsomme over for.

I det følgende beskrives kravene til udpegningen af nitratfølsomme indvindingsområder i regionplan 2001.

Dyrkning af jorden medfører i områder hvor der ikke findes reduktionskapacitet over for nitrat i dæklagene eller i grundvandsmagasinet, at grundvandets indhold af nitrat i disse områder er højt eller stigende og stedvis overskrider grænseværdien for nitrat. Disse områder udpeges som nitratfølsomme indvindingsområder som beskrevet i dette afsnit.

Udpegningen indledes med at afgrænse områder med:

- stor eller nogen grundvandsdannelse
- ringe / ingen grundvandsdannelse

Den absolutte størrelse af henholdsvis stor, nogen og ringe grundvandsdannelse varierer efter hvor stor den samlede grundvandsdannelse er i det pågældende område. Set på landsplan forventes områder med stor og nogen grundvandsdannelse gennemsnitlig at udgøre omkring halvdelen af arealet, men i de enkelte amter vil der formentlig forekomme betydelige afvigelser herfra. De grundvandsdannende områder afgrænses på baggrund af den hydrogeologiske tolkningsmodel som beskrevet i afsnit 3.3.

Der udpeges ikke nitratfølsomme indvindingsområder i områder med ringe eller ingen grundvandsdannelse.

I områder med stor eller nogen grundvandsdannelse udpeges de nitratfølsomme indvindingsområder som de områder hvor et af de følgende tre kriterier er opfyldt:

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• nitratkoncentrationer over 25 mg/l i en eller flere indvindingsboringer eller i grundvandsmagasinet, eller</li><li>• nitratkoncentrationer over 5 mg/l med stigende tendens over en årrække i en eller flere indvindingsboringer eller i grundvandsmagasinet eller</li><li>• ringe geologisk beskyttelse over for nitrat.</li></ul> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Ved ringe geologisk beskyttelse over for nitrat forstås områder som er sårbare over for nitrat, jf. tabel 5.1.

I nogle områder af landet er nitratindholdet højt i øvre grundvand, men lavt i dybere magasiner. Her udpeges nitratfølsomme indvindingsområder ud fra nitratindholdet eller sårbarheden af det eller de grundvandsmagasin(er) som udgør grundlaget for den fremtidige vandforsyning.

De nitratfølsomme indvindingsområder udpeges altså som de områder hvor grundvandet allerede er nitratbelastet samt de områder hvor den geologiske beskyttelse over for nitrat er tilsvarende ringe. Der kan være tale om områder hvor vandkvaliteten ikke er kendt, eller hvor kvælstofanvendelsen har været så lille at den hidtil ikke har givet anledning til forøget nitratindhold i grundvandet.

Generelt må det anbefales at detailkortlægning og indsatsplaner gives en højere prioritet i nitratfølsomme indvindingsområder som er udpeget på baggrund af faktisk konstaterede indhold af nitrat, end områder som er udpeget alene på baggrund af en vurdering af reduktionskapaciteten i dæklagene. Desuden bør grundvandsmagasiner med stor grundvandsdannelse eller stor ressource gives høj prioritet.

I forbindelse med NPo-projektet (Dyhr-Nielsen et al., 1991) blev der opstillet en regional oversigt over forskellige dæklag og reservoirtyper, alt efter nitratreduktionsforholdene. Selv om der er tale om en stærkt forenklet og generaliseret opdeling, er den anvendelig som udgangspunkt i denne indledende fase.

NPo-rapportens regionale opdeling på typer af grundvandsmagasiner i typerne I - IX er derfor gengivet i appendix f. Her gives desuden en beskrivelse af de enkelte typer af grundvandsmagasiner, hvor de forekommer og den tilknyttede følsomhed over for nitrat på grundlag af NPo-projektets resultater.

# 5 Modellering og detailkortlægning

## 5.1 Rammer og metoder

### 5.1.1 Rammer for detailkortlægningen

Formålet med detailkortlægningen er at tilvejebringe det hydrogeologiske grundlag for indsatsplanerne.

Samtlige områder med særlige drikkevandsinteresser skal kortlægges. Desuden skal grundvandsdannende oplande til eksisterende almen vandindvinding uden for områder med særlige drikkevandsinteresser kortlægges, hvis de anses for vigtige i den samlede forsyningsstruktur.

Kortlægningsopgaven er af en sådan størrelse at gennemførelsen vil strække sig over en årrække. Derfor vil der være behov for en geografisk prioritering af kortlægningsindsatsen. Udpegning af følsomme indvindingsområder og indsatsområder på grundlag af eksisterende data, jf. afsnit 2.2 og 4, skal danne grundlag for denne prioritering.

Kortlægningen skal etablere et så detaljeret kendskab til den rumlige udbredelse af grundvandsmagasinerne, grundvandsdannelsens størrelse og fordeling samt dæklagenes beskyttende egenskaber at det område hvor der skal gennemføres en indsats efterfølgende, kan afgrænses på et rimeligt grundlag.

Afgrænsningen af de områder hvor der er behov for at gennemføre en indsats for at beskytte grundvandet, vil som regel følge brugsgrænser, ejendoms- eller matrikelgrænser. Da afgrænsningen af de følsomme områder næppe vil følge disse grænser, vil det være nødvendigt at tage lidt større eller lidt mindre arealer med når indsatsen fastlægges. Dette fastlægges i indsatsplanen.

Valget af kortlægningsmetoder vil være afhængigt af de geologiske, hydrogeologiske og geokemiske forhold der søges kortlagt, og tætheden vil afhænge af den geologiske variabilitet.

Ved fastlæggelse af detaljeringsgraden for detailkortlægningen er det vigtigt at gøre sig klart at ingen kortlægningsmetoder kan give eksakt viden om de geologiske forhold, og at væsentlige inhomogeniteter kan blive overset. Der bør derfor indgå overvejelser om hvilken størrelsesorden af inhomogeniteter der kan forventes at forekomme, og hvor store inhomogeniteter det er acceptabelt at "overse".



Generelle anvisninger for den normalt anvendte datatæthed findes i forbindelse med beskrivelse af kortlægningsmetoderne i appendix b. Generelt vil kortlægningen i de øverste lag være mest detaljeret, mens detaljeringsgraden falder med dybden.

### 5.1.2 Kortlægningsmetoder

Den detaljerede kortlægning gennemføres ved en kombination af forskellige delelementer, således at der opnås en sammenhængende beskrivelse af det kortlagte område. Kortlægningen vil bestå af en kombination af flere af følgende elementer:

- Geologisk kortlægning
- Geofysisk kortlægning
- Kortlægning af grundvandspotentialer
- Kortlægning af grundvandskemi
- Kortlægning af hydrauliske parametre
- Grundvandsmodellering, anvendt med resultaterne af detailkortlægningen til at opnå en bedre forståelse af grundvandsdannelsen og 3-dimensionale strømningsmønstre

Valg af kortlægningsmetoder og kortlægningsintensitet vil afhænge af den geologiske og hydrogeologiske situation i det område som skal kortlægges, af dybden til magasinet og af den eksisterende viden. Generelt gælder det at jo større dybden er, jo mindre intensitet anvendes.

De metoder som anvendes i dag, er beskrevet og vurderet i de tre appendix: b, c og d. Der skelnes mellem indirekte metoder, som er velegnede til kortlægning af den rumlige udbredelse af dæklag og grundvandsmagasiner, og direkte metoder, som kan give oplysninger om geologi, hydrogeologi, grundvandskvalitet og geokemi.

For at opnå den bedst mulige kortlægning er det meget væsentligt at metoderne anvendes i kombination. Når kortlægningen planlægges, er det derfor vigtigt at studere styrker og svagheder ved de enkelte kortlægningsmetoder og udvælge metoder som supplerer hinanden fornuftigt. Kortlægning med indirekte metoder bør altid verificeres ved direkte metoder.

I det følgende er der angivet en kortfattet oversigt over kortlægningsmetoderne.

Følgende indirekte metoder kan anvendes til geofysisk kortlægning af den rumlige udbredelse af dæklag og grundvandsmagasiner (se appendix b):

- Elektromagnetiske metoder (herunder TEM, Stang-slingram)
- Elektriske metoder (herunder Slæbegeol, Multi Elektrode Profilering (MEP), Linieprofilering og Punktsondering)

- Seismiske metoder (herunder Refraktionsseismik og Reflektionsseismik)
- Gravimetrisk metode
- Borehulslogging (herunder Elektriske logs, Gammaloge, Induktionslogs, Flowlogs, Kaliberlogs og Ledningsevnelogs).

Følgende direkte metoder kan anvendes til kortlægning af hydrogeologi og grundvandskemi (se appendix c):

- Nye borer (herunder traditionelle borer og Ellogboringer) og undersøgelse af jordprøver
- Lokalisering, pejling og (GPS-) kotesætning af eksisterende borer
- Test af hydrauliske parametre i borer
- Analyse af vandprøver til bestemmelse af vandtype, vandkvalitet og aldersdatering. Der kan udtages volumen-, linie- og punktprøver samt niveaubestemte prøver.

Der udvikles løbende nye metoder som kan vise sig at være nyttige i kortlægningen af grundvandsmagasinerne og deres beskyttelse. Vejledningens gennemgang af metoder skal derfor ikke ses som en eksklusiv liste, men som et udgangspunkt. Når en ny metode tages i anvendelse i kortlægningen, er det imidlertid vigtigt at holde sig for øje at metodens resultater er veldokumenterede, og at metodens usikkerhed kan kvantificeres.

Grundvandsmodellering anvendes med resultaterne af detailkortlægningen til at opnå en bedre forståelse af vandbalanceforhold, grundvandsdannelse og 3-dimensionale strømningsmønstre, partikelbaner og opholdstider (se appendix d). Modellering giver samtidig grundlag for en mere sikker fastlæggelse af det grundvandsdannende område.

Den numeriske grundvandsmodel kan desuden bruges til at gennemregne, analysere og visualisere forskellige løsninger i forbindelse med indsatsplan og overvågning. Der kan altså være grund til at inddrage grundvandsmodellering både i en indledende og en afsluttende fase af kortlægningen.

### 5.1.3 Indberetning af resultater

Ved udførelse af den fremtidige vandressourcekortlægning vil der fremkomme meget store mængder nye data for geologi og grundvand. I vandforsyningslovens § 69 stilles der krav om at den der erhvervs-mæssigt udfører en grundvandsundersøgelse og udarbejder en redegørelse om undersøgelsen, skal indsende redegørelsen med bilag til GEUS og til amtsrådet. Alle resultater skal altså indberettes. Disse resultater findes i rapportarkivet på GEUS.

Derudover er der krav om indberetning af borer, vandanalyser og oppumpninger. Disse oplysninger findes i databaser på GEUS, hvor-

fra de også kan hentes. Desuden findes der på GEUS en database med grundvandsmodeller, som dog endnu ikke er landsdækkende. Indberetningen til denne database er frivillig.

Ved zonerings forventes det at geofysik vil blive anvendt i et omfang der ikke tidligere er set i Danmark. GEUS har derfor i samarbejde Skov- og Naturstyrelsen, Århus Amt og Århus Universitet samt 2 rådgivende firmaer oprettet en geofysikdatabase, kaldet GERDA.

Formålet med geofysikdatabasen er at sikre at alle geofysikdata lagres i et fælles format der dels indeholder alle nødvendige oplysninger, og dels sikrer at geofysiske data kan udnyttes optimalt i flere sammenhænge.

GERDA er opbygget så det er let at indberette og hente data i et fastlagt udvekslingsformat. Data kan overføres direkte over Internettet. Der kan oprettes abonnementsordninger med løbende opdatering for et amt eller et større område. Der vil også blive mulighed for at udtrække geofysikdata uden at have et fast abonnement.

Der findes ikke i dag nogen lovhjemmel der påbyder at alle geofysiske data skal indberettes til GEUS på digital form. Det er imidlertid vigtigt at de geofysiske målinger kan udnyttes optimalt i flere sammenhænge og ikke går tabt. Desuden bør alle der frembringer og bruger geofysiske data, arbejde under samme betingelser. Derfor er det meget vigtigt at alle geofysiske data der frembringes, bliver lagret i GERDA.

Det anbefales derfor at alle amter, kommuner og vandværker som betaler for at få udført geofysiske målinger, stiller krav til deres rådgivere om at de geofysiske data som fast rutine skal indberettes til GERDA i det fastlagte udvekslingsformat samtidig med afrapportering af undersøgelserne.

GEUS udsender en nærmere introduktion om brugen af GERDA. Der forventes løbende at blive udviklet programmer der kan udnytte og udtegne tolkninger af de geofysiske data, dels centralt ved GEUS, dels hos rådgivere.

## **5.2 Valg af temaer for kortlægning og modellering**

### **5.2.1 Følsomhed over for forurening**

Detalkortlægningen tilrettelægges som nævnt efter opstilling af geologisk model og hydrogeologisk tolkningsmodel med henblik på at tilvejebringe de oplysninger som er nødvendige for at afgrænse de grundvandsdannende områder, herunder områder der er særlig følsomme over for forurening (sårbare zoner).

I de følgende afsnit beskrives hvilke parametre der bruges til at vurdere et områdes sårbarhed over for forurening.

Områder som er følsomme over for forurening afgrænses på grundlag af en vurdering af grundvandsdannelsen fra terræn til det primære grundvandsmagasin. Denne kortlægning af grundvandsdannelsen er nyttig ved vurderingen af grundvandets sårbarhed over for alle typer af forureninger.

Derudover beskæftiger denne vejledning sig først og fremmest med grundvandsmagasinernes sårbarhed over for nitrat. Når denne parameter er valgt, er det dels fordi den er vigtig i forhold til beslutninger om regulering af nitratbelastningen, og dels fordi den i en vis udstrækning kan bruges til at vurdere grundvandets sårbarhed over for visse andre forurenende stoffer, jf. afsnit 2.2.2. Dertil kommer at vi i dag har en betydelig viden om hvilke geologiske og kemiske forhold der betinger grundvandets sårbarhed over for nitrat.

### **5.2.2 Grundvandsdannelse**

Afgrænsningen af sårbare zoner tager udgangspunkt i grundvandsdannelsen. Størrelsen og den arealmæssige fordeling af grundvandsdannelsen vurderes ud fra den opstillede detaljerede hydrogeologiske tolkningsmodel samt en numerisk grundvandsmodel.

Grundvandsdannelsen til et magasin afhænger dels af infiltrationens størrelse, dels af hvor stor en del af det infiltrerede vand der faktisk tilgår magasinet. Infiltrationens størrelse afhænger af blandt andet nedbør, potentiel fordampning, bevoksning, karakteren af de øverste jordlag og eventuel dræning.

I en overordnet undersøgelse vil nedbør og fordampning indgå som midlede værdier. I forbindelse med vurdering af infiltrationen bør karakteren af de øverste jordlag altid inddrages, ligesom det bør undersøges om der er etableret dræn i større omfang.

Ved mere detaljerede undersøgelser er der grund til at undersøge hvilke arealer der faktisk er drænet, og der kan gennemføres beregninger af den aktuelle fordampning på basis af oplysninger om bevoksningen.

Om det infiltrerede vand tilgår magasinet eller strømmer af til vandløb, afhænger af de geologiske forhold under rodzonen. Her er det primært potentialeforholdene og forekomsten af lerlag der spiller en rolle. Dette afklares bedst ved hjælp af en numerisk model, jf. afsnit 5.4.

### 5.2.3 Vandtype som indikator

Udgangspunktet for vurderingen af et grundvandsmagasins sårbarhed er den kemiske sammensætning af grundvandet - den vandtype - der kan konstateres i magasinet. Vandtypen er et resultat af de processer der har fundet sted i forbindelse med vandets transport fra terræn til boringen. Vandtypen kan anvendes til at vurdere grundvandets alder, beskyttende lerlag, grundvandets strømningsmønster og de geokemiske forhold. Vandtypen vil derfor være afgørende for vurderingen af grundvandets sårbarhed.

I appendiks e er der udarbejdet et system til klassifikation af vandtyper baseret på grundvandets indhold af en række parametre der dels afspejler grundvandets redoxforhold, dels dets forvitningsgrad, og som bl.a. kan anvendes som et udtryk for grundvandets sårbarhed og alder. Grundvandet kan på baggrund heraf inddeles i følgende vandtyper:

Grundvand fra iltzonen  
Grundvand fra nitratzonen  
Grundvand fra jern- og sulfatzonen  
Grundvand fra methanzonen

Kan der i magasinet påvises en stærkt oxideret vandtype med deraf følgende indhold af nitrat (jf. appendiks e), er større eller mindre dele af det grundvandsdannende område til magasinet sårbart. Dette må vurderes at gælde uanset hvilke informationer der i øvrigt foreligger om dæklagenes art, tykkelse eller oxidationsforhold. I forbindelse med den nærmere kortlægning må det da afklares fra hvilket område der tilføres nitratholdigt vand til magasinet.

Tilsvarende gælder, at er et magasin på baggrund af dæklagenes egenskaber vurderet som sårbart, hvorimod vandtypen i (hele) grundvandsmagasinet under dæklagene er reduceret, er dette tegn på at den detaljerede hydrogeologiske tolkningsmodel ikke beskriver forholdene korrekt.

Vandtypen afspejler i sagens natur den påvirkning som grundvandet *har* været udsat for. Til vurdering af hvor sårbart grundvandet er over for den forurening som endnu ikke er nået ned til magasinet, kræves også kendskab til grundvandets strømningsforhold samt redoxforholdene i dæklagene.

Som supplement til bestemmelse af vandtypen kan en egentlig aldersdatering ofte være værdifuld. Aldersdatering er omtalt i afsnit 5.3.4.

## 5.2.4 Sårbarhed over for nitrat

Det centrale led i vurderingen af grundvandets sårbarhed over for nitrat er en sammenkædning af vandtypen med geologiske og hydrogeologiske forhold.

I tabel 5.1 er der opstillet overordnede kriterier for grundvandets sårbarhed over for nitrat. Der er taget udgangspunkt i Miljøstyrelsens rapport om klassificering af grundvandet (Rasmussen, P. et al, 1995b). Kriterierne bruges som udgangspunkt for vurderingen af hvor grundvandsmagasinerne er sårbare over for nitrat.

**Tabel 5.1 Princip for fastlæggelse af nitratsårbarhed .**

Vandtype	Egenskaber for dæklag og grundvandsmagasin	Nitrat-sårbarhed	Regulering af nitratbelastning
Grundvand fra methanzonen og fra jern- og sulfatzonen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dæklag af fed, grå ler eller glimmerler <i>eller</i></li> <li>Dæklag med højt organisk indhold, evt. brunkul <i>eller</i></li> <li>Tykkelse af reducerede (grå), sammenhængende lerdæklag er &gt; 15 m <i>eller</i></li> <li>Reduceret magasinbjergart med indhold af organisk materiale, pyrit og evt. brunkul.</li> </ul>	lille	Generel regulering
Grundvand fra jern- og sulfatzonen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dæklag af oxideret sand med slirer af silt og ler <i>eller</i></li> <li>Dæklag af reduceret, gråt sand eller gråt / gråsort sand med lignit eller pyrit <i>eller</i></li> <li>Tykkelse af reducerede (grå), sammenhængende lerdæklag er 5 - 15 m <i>eller</i></li> <li>Reduceret magasinbjergart.</li> </ul>	nogen	Supplerende regulering overvejes
Grundvand fra ilt- og nitratzonerne	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kun dæklag af oxideret, gulligt-gulbrunt sand og / eller ler <i>eller</i></li> <li>Tykkelse af reducerede, sammenhængende lerdæklag er &lt; 5 m</li> </ul> <p><i>og</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Magasinbjergart uden større reduktionspotentiale.</li> </ul>	Stor	Supplerende indsats er nødvendig hvis området er belastet med nitrat

Tabellen bygger videre på klassificeringen af grundvandets beskyttelse, som er beskrevet i afsnit 4.1.2, således at områder med stor eller nogen sårbarhed typisk findes i områder med ringe eller ingen beskyttelse, jf. ovenfor. Tilsvarende vil der næppe findes nitratsårbare zoner i områder med god eller nogen beskyttelse.

Den ringe tykkelse af dæklagene i de sårbare zoner vil normalt give mulighed for en stor grundvandsdannelse. En stor grundvandsdannelse medfører også et hurtigere forbrug af reducerende stoffer i dæklag og magasin. Tilstedeværelsen af sprækker og makroporer i lerlagene (som oftest kun kan ses i udgravninger og daglokaliteter) medfører også en større grundvandsdannelse og større sårbarhed. Disse forhold skal vurderes i sammenhæng med den hydrogeologiske tolkningsmodel som udgør grundlaget for den numeriske model og afgrænsningen af områder der er særlig følsomme over for forurening.

Anvendelsen af kriterierne for nitratsårbarhed forudsætter at kortlægningen er gennemført på et passende niveau. Af hensyn til en eventuel senere indsats over for nitratbelastningen er det nødvendigt at der foreligger følgende:

- Kort over fordelingen af grundvandsdannelsen inden for det grundvandsdannende område.
- Kort over tykkelse af sammenhængende dæklag i 5 meters intervaller som beskrevet i afsnit 5.3.1.
- Kort over dæklagenes og grundvandsmagasinerne evne til at reducere nitrat.
- Afgrænsning af nitratsårbare zoner som beskrevet ovenfor.

Afhængigt af de aktuelle hydrogeologiske forhold kan vægten lægges på enten tykkelsen af lerdæklag eller dæklagenes og grundvandsmagasinerne evne til at reducere nitrat.

Når de sårbare zoner er identificeret, skal der foretages en vurdering af behovet for supplerende beskyttelsesforanstaltninger. Denne vurdering skal tage udgangspunkt i målsætningen for magasinet, kort over sårbarhed og grundvandsdannelse, sammenholdt med aktuelle forureningsproblemer i grundvandsmagasinet og den aktuelle forureningsbelastning.

Hvis den eksisterende nitratbelastning medfører at grundvandskvaliteten er eller vil blive utilfredsstillende, udpeges de nitratsårbare zoner som indsatsområde med hensyn til nitrat. Et indsatsområde med hensyn til nitrat kan ligeledes udpeges hvis det vurderes at en fremtidig nitratbelastning vil kunne medføre at grundvandskvaliteten bliver utilfredsstillende.

Indsatsen over for nitrat planlægges i sammenhæng med indsatsen for indsatsområdet som helhed. Hvis nitratproblemet er akut, kan der dog udarbejdes en foreløbig del-indsatsplan, indtil grundlaget for indsatsen for hele indsatsområdet foreligger. Der kan være grund til at opprioritere indsatsen over for visse typer af forurenede grunde i hele den sårbare zone, samtidig med at der tilrettelægges en indsats over for nitratudvaskningen. Hvordan indsatsen over for nitrat fastsættes, vil blive beskrevet i Miljøstyrelsens vejledning om indsatsplaner for nitrat.

### 5.2.5 Kortlægning i kildepladszonen

I kildepladszonen skal detailkortlægningen give mulighed for at vurdere om området inden for kildepladszonen reelt bidrager til grundvandsdannelsen til det eller de grundvandsmagasiner hvorfra de enkelte borer indvinder. Desuden er en vurdering af transporttiden inden for de nærmeste omgivelser til en indvinding væsentlig af hensyn til eventuel regulering af kildepladszonens størrelse.

En grund til at gøre kildepladszonen større kan eksempelvis være at transporttiden i grundvandsmagasinet fra 300 meter grænsen til indvindingsboringerne er mindre end de 60 dage, der danner baggrund for fastlæggelsen af den hygiejniske zone. En lille transporttid vil ofte være forårsaget af stor indvinding som medfører store gradienter på grundvandspotentialet og dermed høje transporthastigheder.

## 5.3 Vigtige hydrogeologiske parametre

I forbindelse med opstilling af den detaljerede hydrogeologiske tolkningsmodel til afgrænsning af områder med stor grundvandsdannelse er en række hydrogeologiske parametre og metoder centrale, idet det ikke er muligt at vurdere grundvandsdannelsens størrelse ved en enkelt direkte metode.

Som grundlag for den detaljerede hydrogeologiske tolkningsmodel som er udgangspunkt for afgrænsningen af sårbare zoner, er det vigtigt at tilvejebringe et kendskab til følgende parametre:

- udbredelsen af sammenhængende lavpermeable dæklag
- tykkelsen og karakteren af dækkende lerlag
- lithologisk variabilitet af dæklag
- geologiske vinduer i dækkende lerlag
- sprækker i dækkende lerlag
- glacialtektonisk variabilitet af dæklag
- grundvandets gradient- og strømningsforhold
- geokemiske forhold i dæklag og grundvandsmagasin
- grundvandskemiske forhold i primært og sekundært magasin.
- alder af grundvand i primært og sekundært magasin

I de følgende afsnit beskrives hvordan kendskabet til disse parametre tilvejebringes gennem kortlægning af magasinerne og deres dæklag, potentialeforhold, grundvandskvalitet og fortolkning af vandanalyser samt aldersdatering af grundvand.

### 5.3.1 Magasinerne og deres dæklag

Kortlægningen af magasinerne og deres dæklag er central i detailkortlægningen. De geologiske forhold som kortlægges, er en statisk



parameter som er robust over for ændringer i vandbalancen. En god kortlægning af magasinerne og deres dæklag vil derfor have blivende værdi som grundlag for grundvandsbeskyttelsen.

Kortlægningen skal give oplysninger om afgrænsningen af grundvandsmagasiner med indvindingsinteresse, såvel med hensyn til magasinerne horisontale udstrækning som deres øvre og nedre afgrænsning. Desuden skal magasinbjergarten beskrives.

Kortlægningen bør ligeledes give oplysninger om grundvandsmagasinernes hydrauliske egenskaber. I en indledende fase kan de hydrauliske egenskaber vurderes ud fra magasinbjergarten, men direkte undersøgelser, specielt ved længerevarende prøvepumpninger med observationsboringer, kan give værdifuld information til anvendelse i forbindelse med modellering.

Den rumlige geologiske opbygning af dæklagene over grundvandsmagasinet er af afgørende betydning for grundvandsdannelsens arealmæssige fordeling, specielt er sandvinduer og sprækker af stor betydning. Det er dog vigtigt at skelne mellem sprækkeproblematikken og problematikken vedrørende sandvinduer, da den geologiske baggrund er vidt forskellig. Desuden er grundvandets strømningsmønstre i lagene over grundvandsmagasinet afgørende.

Kortlægningen skal give viden om tykkelse, art og opbygning af dæklag over grundvandsmagasiner med indvindingsinteresser. Såvel højpermeable som lavpermeable lag kortlægges, og sekundære grundvandsmagasiner afgrænses.

Graden af sammenhæng, tykkelsen og karakteren af dækkende lerlag over et grundvandsmagasin spiller en afgørende rolle for størrelsen af grundvandsdannelsen og dermed for grundvandsmagasinernes sårbarhed. Oplysningerne om lerlag hentes fra eksisterende og nye boringer, kombineret med geofysik til at supplere og sammenkæde boringsoplysningerne.

Den beskyttelse der ligger i de lavpermeable dæklag, kan endvidere vurderes på baggrund af viden om eksempelvis:

- forekomst af sprækker
- forekomst af glacialtektonik
- forekomst af hyppige lithologiske skift.

Der er risiko for sprækker, vinduer og større eller mindre sandlinser i de dækkende lerlag. En analyse af denne risiko kan medføre at der vurderes at være en større sårbarhed end vurderet udelukkende på baggrund af resultaterne af dæklagskortlægningen.

I udgravninger eller andre daglokaliteter vil man kunne se sprækker og makroporer. Dækkende lerlag vil ofte være mere permeable som

følge af gravegange, rodhuller m.v. i de øverste ca. 1,5 m fra terræn, samt udtørringssprækker og tektoniske sprækker herunder. Betydningen af sprækker på større dybde er dog usikker, men forureninger er i nyere undersøgelser fundet i sprækker ned til 8 meters dybde.

Risikoen for sprækker i dækkende lerlag kan i dag ikke vurderes nærmere på et overordnet niveau. Det antages sædvanligvis at områder med randmoræner samt dødisområder må forventes at være stærkt præget af sprækker og vinduer, men nye undersøgelser tyder på at moræneler på flader er lige så stærkt opsprækket.

Kortlægningen i områder hvor der findes lerdæklag, og hvor tykkelsen af disse er mindre end 15 meter, tilrettelægges med henblik på at der kan tegnes kort med dæklagstykkelsen inddelt i 5 meters intervaller.

Akkumuleringen af lerlagenes tykkelse tager udgangspunkt i den opstillede hydrogeologiske tolkningsmodel. Når der tegnes kort over akkumulerede lertykkelser, er det af meget stor betydning at grundvandsdannelsen til magasinet faktisk sker igennem de lerlag som indgår. Lerlag som ikke passerer af nedsivende vand, regnes ikke med i den akkumulerede lertykkelse. Eventuelle lerlag som er af så dårlig kvalitet at de i realiteten ikke yder nogen beskyttelse af grundvandet, udelades ligeledes.

### **5.3.2 Potentialeforhold**

Fastlæggelsen af potentialeforhold i primære og sekundære magasiner er et væsentligt element, såvel ved fastlæggelse af grundvandsdannende område og indvindingsopland som ved vurdering af grundvands sårbarhed. En god beskrivelse af potentialeforholdene er helt afgørende for opfattelsen af grundvandsdannelse og strømningsmønstre, og den er derfor en vigtig del af grundlaget når der opstilles numeriske modeller.

Potentialeforholdene i grundvandsmagasiner varierer med tiden som følge af variationer i klimatiske forhold og oppumpning, og potentialeforholdene betegnes derfor som en dynamisk parameter. I mange magasiner forekommer årstidsvariationer, og barometereffekt kan nogle steder medføre væsentlige udsving i potentialet. Et potentialekort bør derfor altid udtegnes for samtidige pejlinger. Hvis pejlingerne af praktiske grunde må foretages over flere dage, bør indflydelsen af barometereffekt inddrages i overvejelserne, f.eks. ved at vælge et tidspunkt med stabile vejrforhold.

Derudover kan jævnlige pejlinger af enkelte borer, evt. kontinuerlige målinger ved datalogger, give værdifulde oplysninger om årstidsvariationer, sammenhæng med nedbør og eventuel påvirkning fra varierende indvinding. Dette kan specielt være vigtigt i områder hvor markvanding udgør en væsentlig del af indvindingen.

Længere pejleserier kan desuden bidrage med oplysninger om grundvandsdannelse og grundvandsstrømninger. Eksempelvis kan et vandskel som bliver liggende trods ændringer i indvindingen være tegn på stor infiltration. Store årstidsvariationer kan være et tegn på stor infiltration.

Trykgradienten mellem øvre og dybe grundvandsmagasiner bør indtages i kortlægningen. Trykgradienten kan ses som indikator for kvaliteten af mellemliggende lerlag, og den indgår i vurderingen af grundvandsdannelsen til det dybe magasin. En korrekt beskrivelse af disse forhold er afgørende i forbindelse med grundvandsmodellering.

### **5.3.3 Grundvandskvalitet og fortolkning af vandanalyser**

En vurdering af grundvandskvaliteten og det geokemiske miljø giver supplerende viden om grundvandsdannelsen og skal benyttes til at kontrollere den detaljerede hydrogeologiske tolkningsmodel. Hvis grundvandskvaliteten ikke er som det kunne forventes ud fra den hydrogeologiske tolkningsmodel, er det tegn på at denne ikke beskriver situationen korrekt.

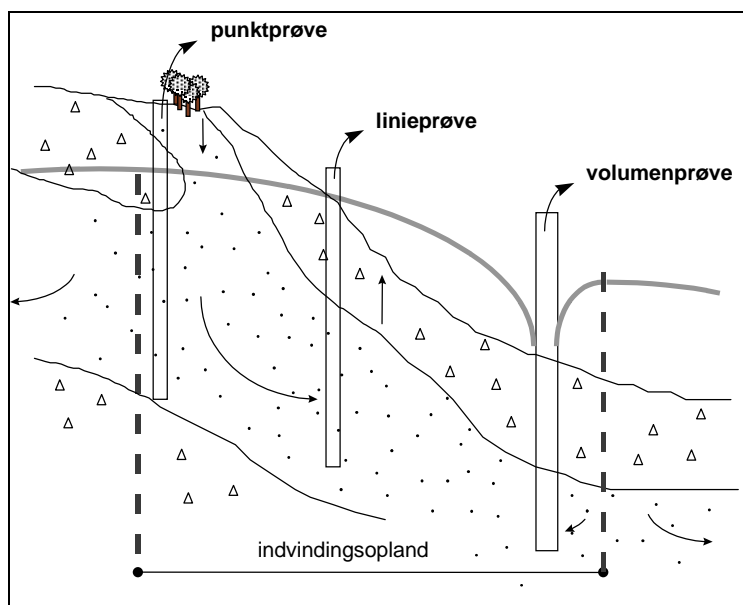
En vandprøve kan repræsentere meget forskellige dele af det volumen som vandpartiklerne gennemløber. Ideelt set kan vandprøver opdeles som følger:

En vandprøve fra en indvindingsboring repræsenterer hele oplandet til indvindingsboringen, men dæmpet og med stor forsinkelse (volumenprøve).

En vandprøve fra en boring der ikke er en indvindingsboring, repræsenterer den del af vandpartiklerne der har gennemløbet området langs en strømningslinie opstrøms for boringen (linieprøve). Ved niveaubestemt linieprøvetagning kan kemisk lagdeling i grundvandsmagasinet afklares.

En vandprøve fra en boring der ikke er en indvindingsboring, og som er placeret i et grundvandsdannende område på et vandskel eller langs en hydraulisk grænse for et indvindingsopland, repræsenterer den del af vandpartiklerne der er infiltreret i området umiddelbart over boringen (punktprøve). Ved niveaubestemt punktprøvetagning kan der udtages vandprøver der med dybden repræsenterer ældre og ældre nedsivningsvand og dermed afspejler nedsivningshistorien over en længere årrække.

Ved valg af prøvetagningssteder og -metodik er det derfor vigtigt at overveje hvad vandprøverne repræsenterer. I praksis er der desuden en betydelig usikkerhed forbundet med såvel prøvetagningen som fastlæggelsen af hvad vandprøven repræsenterer.



**Figur 5.1**  
**Typen af vandprøver, udtaget forskellige steder**

Ved tolkning af vandtypedata bør man i øvrigt være opmærksom på boringer filtersat gennem flere vandtyper og boringer med uhensigtsmæssig konstruktion med deraf følgende risiko for sammenblanding af vandtyper (kortsluttede boringer).

#### 5.3.4 Aldersdatering af grundvand

Bestemmelse af grundvandets alder, ved f.eks. kulstof-14 eller CFC-datering, er et værdifuldt supplement til vandtypebestemmelsen. Aldersbestemmelsen kan anvendes ved vurderinger af den hydrogeologiske tolkningsmodel og kalibreringen af den numeriske model, og den giver mere præcise oplysninger om grundvandets transporttid fra terræn og til grundvandsboring end en vandtypebestemmelse.

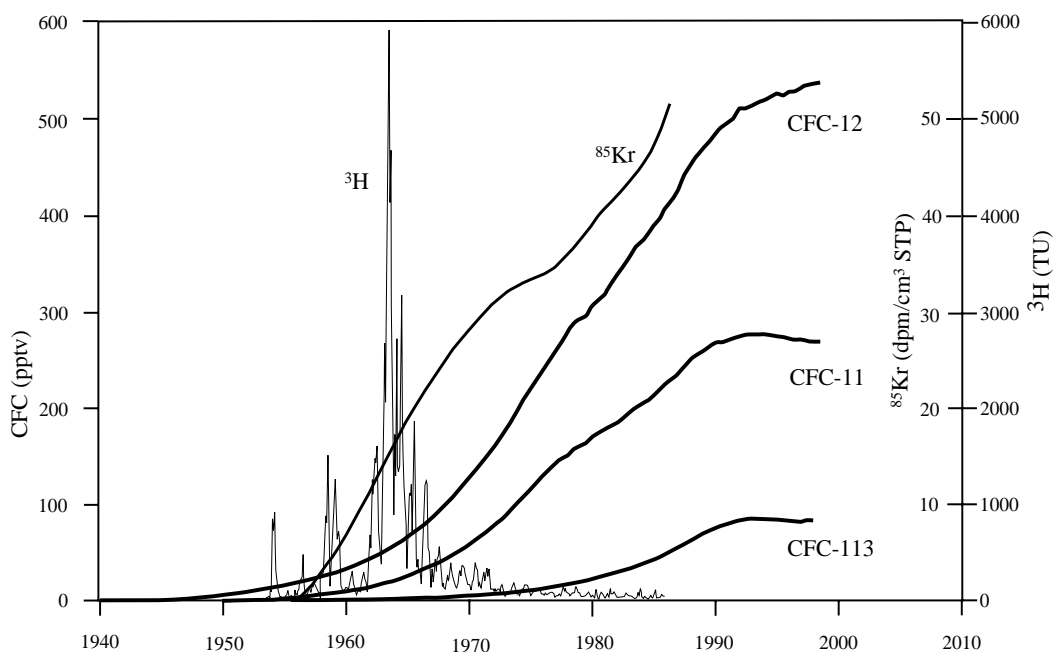
Der findes en lang række dateringsteknikker, hvoraf de fleste udnytter radioaktive isotoper, men eksempelvis CFC-gasser (CFC-11, CFC-12 og CFC-113) og visse stabile isotoper er også væsentlige sporstoffer og dateringsredskaber (Hinsby et al. 1998).

Dateringsteknikker og grundvandsaldre inddeles normalt i grupper efter de perioder hvori man har sporstoffer der kan datere vandet. Grundvand hvori der kan registreres menneskelig påvirkning betegnes generelt som ungt grundvand (på engelsk ofte "modern groundwater"). En almindeligt anvendt inddeling af grundvandsaldre samt potentielle relative og absolutte dateringsteknikker er gengivet i tabel 5.2.

**Tabel 5.2 Potentielle relative og absolutte dateringsteknikker til grundvand**

Grundvandets alder	Dateringsteknikker
Ungt grundvand (0-50 år)	$^3\text{H}$ (tritium), $^3\text{H}/^3\text{He}$ , $^4\text{He}$ , CFC-gasser (CFC-11, CFC-12 og CFC-113), $\text{SF}_6$ , $^{85}\text{Kr}$ , diverse kontaminanter
Gammelt grundvand (50-35.000 år)	$^3\text{H}$ med lav detektionsgrænse (0.04 TU), $^{14}\text{C}$ , $^{39}\text{Ar}$ , $^{32}\text{Si}$ , $^{226}\text{Ra}$
Meget gammelt grundvand (> 35.000 år)	$^{36}\text{Cl}$ , $^{81}\text{Kr}$ , $^4\text{He}$ .

I figur 5.2 vises atmosfærens indhold af tritium ( $^3\text{H}$ ), Krypton 85 ( $^{85}\text{Kr}$ ) og tre CFC-gasser på den nordlige halvkugle siden 1940. De her viste stoffer udgør de vigtigste sporstoffer og dateringsredskaber for ungt grundvand, der er infiltreret til grundvandsmagasinerne inden for de sidste ca. 50 år.  $^3\text{H}$  indbygges som brint i vandmolekylet, mens  $^{85}\text{Kr}$  og CFC (ChloroFluoroCarbons) er gasser der opløses i vandet og som sporstof følger vandet under strømmingen i grundvandsmagasinerne.



**Figur 5.2 Målte koncentrationer af  $^3\text{H}$  i nedbør samt målte og rekonstruerede koncentrationer af  $^{85}\text{Kr}$  og CFC-11, -12 og -113 i atmosfæren på den nordlige halvkugle.**

Sporstoffer der anvendes til relativ datering, angiver blot om grundvandet er ældre eller yngre end en bestemt hændelse - eksempelvis om vandet er infiltreret før eller efter atomprøvesprængningerne i atmosfæren i 50'erne og 60'erne, eller om vandet er infiltreret før eller efter slutningen af sidste istid.

Absolutte dateringer derimod kan under optimale betingelser give en relativ præcis alder af grundvandet, eksempelvis vil CFC-12 i et tænkt eksempel kunne fastlægge at en vandprøve er sivet ned til grundvandsspejlet i 1977 (med en usikkerhed på få år), mens  $^{14}\text{C}$  vil kunne fastlægge at en vandprøve er sivet ned til grundvandsspejlet for ca. 3000 år siden (med en usikkerhed på få hundrede år).

Grundvandsprøver vil i nogle tilfælde være en blanding af flere forskellige vandtyper med forskellige aldre. Dette vil ofte forekomme i prøver udtaget i borer med lange filtre eller i sprækkede grundvandsmagasiner. I sådanne tilfælde er det nødvendigt at bruge mindst to forskellige sporstoffer for at konstatere og vurdere blandingen af forskellige vandtyper. Anvendelsen af flere sporstoffer samtidigt giver mulighed for at vurdere transportmekanismer og eventuelt fastslå om sprækkestrømning eller anden præferentiel strømning synes at have afgørende betydning (Hinsby et al., 1999a).

Usikkerheden på de estimerede aldre stiger generelt med alderen, for eksempel bliver usikkerhederne på  $^{14}\text{C}$  aldre ofte meget store når grundvandets alder overstiger ca. 10.000 år og dermed er fra sidste istid. Her vil dog en kombineret anvendelse af  $^{14}\text{C}$ , stabile isotoper og ædelgasser med stor sikkerhed kunne afgøre om grundvandet er infiltreret under et koldere klima i sidste istid.

Forekomster af gammelt grundvand indikerer at grundvandet er godt beskyttet mod nedsvivende forurening, såfremt borerne til grundvandsmagasinet er udbygget forsvarligt. Det viser dog også at grundvandsmagasinet kan være sårbart over for kraftig udnyttelse.

## 5.4 Numerisk grundvandsmodel

Når den geologiske model for området ved hjælp af detailkortlægningen er udbygget til en tilstrækkelig detaljeringsgrad, skaber den grundlag for opstilling af en hydrogeologisk tolkningsmodel med hypoteser for:

- dæklagenes sammensætning, opbygning og vandledende egenskaber,
- grundvandsmagasinerens udstrækning vertikalt og horisontalt
- geokemiske forhold i dæklag og magasin, primært redox og pH, kan eventuelt beskrives ud fra andre vandkemiske parametre,
- grundvandets dannelse og udveksling med overfladevand.

Den hydrogeologiske tolkningsmodel udbygges med data om grundvandspotentialer i forskellige geologiske lag, oppumpninger og minimumsafstrømninger.

Resultater af detailkortlægningen og supplerende data tolkes og sammenstilles specielt med henblik på en afgrænsning af de grundvandsdannende områder til de betydende grundvandsmagasiner. Supplerende data kan være grundvandskemiske data fra grundvandsovervågningen eller boringskontrollen, grundvandspejlinger, dræn- og vandløbsafstrømninger mm.

Ved den endelige sammenstilling af data i en overordnet numerisk grundvandsmodel bør følgende forhold som minimum inddrages:

- dæklagenes sammensætning, høj- eller lavpermeable linser, sprækker, isforstyrrelser mm, herunder udbredelsen og tykkelsen af sammenhængende lavpermeable dæklag,
- effektive hydrauliske parametre i magasiner og dæklag,
- områder hvor de primære grundvandsmagasiner går i dagen,
- geokemiske forhold, opdeling på vandtyper (se tidligere afsnit)
- fortolkning af vandanalyser og aldersbestemmelse af grundvand, der gennemføres en opdeling i forskellige vandtyper (f.eks. opdeling på ungt og gammelt grundvand),
- sammenstilling af pejlinger til kort over grundvandets potentialer for øvre og nedre grundvandsmagasiner,
- vandbalance for grundvandsmagasinet: grundvandsdannelse, oppumpning, udveksling med vandløb og underjordisk afstrømning til hav eller udveksling med dybere magasiner
- Randbetingelser. Disse kan evt. tage udgangspunkt i den Nationale Vandressource Model (DK-modellen)

Det er et krav til den overordnede numeriske grundvandsmodel at den kvantitativt kan gøre rede for grundvandsdannelsen - den skal forklare hvordan grundvandsdannelsen sker og hvor stor den er.

Dette kontrolleres på et indledende niveau ved at opstille en overordnet vandbalance for et hydrologisk afgrænset opland. I forbindelse med den numeriske grundvandsmodellering bør det kontrolleres at modellen er i stand til at reproducere acceptable grundvandspotentialer og eventuel vandføring i vandløb over en længere periode.

Det er væsentligt at den numeriske grundvandsmodel kalibreres, så den kan beskrive såvel rumlige som tidslige variation i grundvandsafstrømning til vandløb, dvs. minimumsafstrømningen i vandløb, men også grundvandsafstrømningen til de enkelte delstrækninger eller deloplande.

Disse beregninger kan gennemføres for nuværende indvindings- og klimasituationer, men kan også gennemføres som konsekvensanalyser af ændringer i indvindings- og klimasituationer. Dette indebærer at

der skal opstilles en overordnet numerisk grundvandsmodel inklusive overflademoduler (overfladisk afstrømning, nedsivning, drænvandsafstrømning, udveksling mellem grundvand og vandløb og afstrømning i vandløb), og at den overordnede numeriske grundvandsmodel skal være dynamisk (dvs. baseres på f.eks. daglige inputdata for nedbør og fordampning).

Endvidere er det et krav at den hydrogeologiske tolkningsmodel kan gøre rede for grundvandskvaliteten, og at der er sammenhæng mellem den fysiske forståelse af processerne og den resulterende vandkvalitet i magasinerne.

Der bør således kunne gøres rede for grundvandsdannelsen såvel kvalitativt som kvantitativt inden for en rimelig usikkerhed. Hvis dette ikke er tilfældet, er det et tegn på at der er afgørende fejl eller mangler i den numeriske grundvandsmodel, som forudsætter yderligere kortlægning, undersøgelser eller numerisk modellering.

Med detailkortlægningen er der tilvejebragt et stort datamateriale med henblik på nærmere at afgrænse den arealdistribuerede grundvandsdannelses geografiske eller tidslige variation. Med udgangspunkt i den detaljerede hydrogeologiske tolkningsmodel kan man opstille en detaljeret numerisk grundvandsmodel, f.eks. for et kildepladsopland eller et indsatsområde.

Den detaljerede numeriske grundvandsmodel kan anvendes til at beregne grundvandsdannende områder, partikelbaner og opholdstider, jf. appendix d. Den detaljerede numeriske grundvandsmodel kan være en stationær, evt. dynamisk strømnings- og partikelbanemodellering, som benyttes til en detaljering af den arealdistribuerede fordeling af grundvandsdannelsen og en vurdering af partikelbaner og opholdstider i grundvandet fra nedsivning til kildeplads.

På grundlag af tolkningen suppleret med grundvandsmodellering bestemmes den arealmæssige fordeling af grundvandsdannelse til de enkelte magasiner.





## 6 Referencer

*Danmarks Geologiske Undersøgelse, 1993: Grundvandsovervågning 1993*

*Dansk Ingeniør Forening, 1988: Norm for almene vandforsyningsanlæg. DS 442.*

*Dyhr-Nielsen, M., Hansen, E., Holter, V., Krag-Andersen, K., Gravesen, P., og Iversen, T.M.: Kvælstof og fosfor i jord og vand. Samlerapport. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, 1991.*

*GEUS, 1997 Afprøvning af zoneringsmetoder. GEUS, maj 1997. Udgives af Miljøstyrelsen 2000.*

*Gravesen, P., Kristiansen, H., Kelstrup, N., Petersen, K.S., 1990: Kortlægning af potentialet for nitratreduktion. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, nr. B 16.*

*Hinsby, K.; Larsen, F.; Nielsen, O.J. og Laier, T. Grundvandets alder. Naturens Verden, 2, 1998.*

*Hinsby, K. Aldersbestemmelse af grundvand - et vigtigt redskab i forvaltning af vandressourcen. Vandforsyningsteknik, nr. 48, 1999.*

*Knudsen, C.; Skovbjerg, E.S. og Hinsby, K. Det miocæne sand – Danmarks største grundvandsmagasin: 3D metoder fra oliegeologien anvendt i miljøgeologisk kortlægning – et regionalt studie på tværs af programområder. Projektnotat, GEUS, februar, 1999.*

*Miljø- og Energiministeriet 1999 a: Den statslige udmelding til regionplanrevision 2001. Findes på <http://www.mem.dk/lpa>*

*Miljø- og Energiministeriet 1999 b: Planlægning af skovrejsning. En vejledning til amternes regionplanlægning. Skov- og Naturstyrelsen og Landsplanafdelingen,*

*Miljøstyrelsen, 1995: Udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser, vejledning fra Miljøstyrelsen, nr. 4, 1995.*

*Miljøstyrelsen, 1997: Boringskontrol på vandværker, Vejledning nr. 2, 1997.*

*Miljøstyrelsen, 1998 a: Drikkevandsudvalgets betænkning. Betænkning nr. 1, 1998.*

*Miljøstyrelsen, 1998 b: Oprydning på forurenede lokaliteter. Hovedbind, appendikser og 4 branchevejledninger. Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 6-11/1998.*

*Rasmussen, P., Henriksen, H.J., Niegaard, P., Hundahl, M., Thomsen, R., Brandt, G., Landt, M., Mogensen, A. og Kaalby, S. 1995 a. Zoneopdelt grundvandsbeskyttelse. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. nr. 14 - 1995.*

*Rasmussen, P., Henriksen, H.J., Nyegaard, P., Kelstrup, N., Søndergaard, V., Hundahl, M. og Thomsen, R., 1995 b. Klassificering af grundvandsressourcen. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 6 - 1995.*

*Skov- og Naturstyrelsen, 1999. Planlægning af skovrejsning. En vejledning til amternes regionplanlægning. Miljø- og Energiministeriet, Skov- og Naturstyrelsen og Landsplanafdelingen.  
Findes på: <http://www.sns.dk/skov/vejlplanl.htm>*

*Sørensen, K., Søndergaard, V., Thomsen, R., 1995. Overvågning af grundvandet baseret på nye geofysiske målemetoder. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 11 - 1995.*

*Vejle Amt, Sønderjyllands Amt og Rambøll, Hannemann & Højlund A/S: Metoder til udpegning af indvindingsoplande. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 8 - 1995.*

## APPENDIX A GEOLOGISKE MODELLER 57

- 1 INDLEDNING 57
- 2 GEOLOGISKE MODELLER: HETEROGENITET OG NØJAGTIGHED 57
- 3 MODELLERNES NØJAGTIGHED 58
- 4 GEOFYSISKE MÅLINGER OG KORTLÆGNING 59
- 5 DATATYPER 59
- 6 PROCEDURE FOR MODELOPSTILLING 60
  - 6.1 *Information fra boringer og daglokaliteter* 61
  - 6.2 *Geofysiske data* 62
  - 6.3 *Integration af data* 62
  - 6.4 *Hydrogeologiske enheder* 62
  - 6.5 *Afsluttende bemærkning* 63
- 7 EKSEMPEL: MODEL I ET KOMPLEKST GEOLOGISK OMRÅDE 63
- 8 OLIEGEOLOGISKE KORTLÆGNINGSMETODER TIL REGIONALE GRUNDEVANDSMAGASINER 66
- 9 LITTERATUR 67

## APPENDIX B GEOFYSISK KORTLÆGNING 71

- 1 BAGGRUND 71
  - 1.1 *Læsevejledning* 71
  - 1.2 *Anvendelse af geofysiske metoder* 71
  - 1.3 *Baggrund for at bruge geofysiske metoder* 72
- 2 VÆSENTLIGE FORUDSÆTNINGER 73
- 3 KORTLÆGNING I DE GEOLOGISKE HOVEDTYPER 76
  - 3.1 *Kortlægning af dæklag over grundvandsmagasiner* 76
  - 3.2 *Kortlægning af grundvandsmagasiner* 77
  - 3.3 *Geologiske hovedtyper* 79
  - 3.4 *Geologisk hovedtype 1, Hedesletten* 80
  - 3.5 *Geologisk hovedtype 2, Øst Danmark* 83
  - 3.6 *Geologisk hovedtype 3, Kalk og kridt* 84
  - 3.7 *Geologisk hovedtype 4, østlige del af Midt- og Sønderjylland* 86
- 4 SLÆBEGEOELEKTRIK 88
- 5 MEP (MULTI ELEKTRODE PROFILERING) 90
- 6 TEM-SONDERING (TRANSIENT ELEKTROMAGNETISK SONDERING) 92
- 7 SLÆBETRANSIENT SONDERING 94
- 8 PUNKTPROFIL 96
- 9 LINEPROFILERING 98
- 10 GRAVIMETRI 100
- 11 REFLEKSIONSSEISMIK MED HØJ OPLØSELIGHED 102
- 12 ANDRE GEOFYSISKE OVERFLADEMETODER 104
  - 12.1 *Georadar* 104
  - 12.2 *Stang-slingram* 104
- 13 GEOFYSISKE BOREHULSMETODER 105
  - 13.1 *Anvendelse* 105
  - 13.2 *Ellogboring* 105
  - 13.3 *Gammalog* 105
  - 13.4 *Resistivitetslog* 106

- 13.5 *Induktionslog 106*
- 13.6 *Ledningsevnelog 106*
- 13.7 *flowlog 107*
- 13.8 *Kaliberlog 108*
- 13.9 *Korrelation 108*
- 13.10 *Referencer 108*

## **APPENDIX C ØVRIGE KORTLÆGNINGSMETODER 109**

- 1 TØRBORING 109
- 2 ROTATIONSSKYLLEBORING 111
- 3 ELLOGBORING 113
- 4 GEOPROBE 115
- 5 LOKALISERING, PEJLING OG KOTESÆTNING AF BORINGER 117
- 6 TEST AF HYDRAULISKE PARAMETRE 119
- 7 VANDPRØVETAGNING 121
- 8 VANDANALYSE 123
- 9 ALDERSDATERING AF GRUNDVAND 124

## **APPENDIX D ANVENDELSE AF GRUNDVANDSMODELLER I ZONERINGEN 129**

- 1 ANVENDELSE AF GRUNDVANDSMODELLER 129
- 2 NUMERISK GRUNDVANDSMODEL OG HYDROLOGISK MODEL 130
- 3 ANTAGELSER OG FORUDSÆTNINGER 132
- 4 OPSTILLING AF MODEL 134
- 5 VALG AF MODELTYPE 136
- 6 BRUGEN AF MODELLEN SOM ET ANALYSEVÆRKTØJ 138
- 7 RESSOURCEFORBRUG VED OPSTILLING OG ANVENDELSE AF MODELLER 139
- 8 REFERENCER 140

## **APPENDIX E KLASSIFIKATION AF VANDANALYSER UD FRA SÅRBARHEDSKRITERIER 143**

- 1 SYSTEM TIL KLASSIFIKATION AF VANDANALYSER 143
- 2 DE ENKELTE VANDTYPER 146
  - 2.1 *Grundvand fra iltzonen 146*
  - 2.2 *Grundvand fra nitratzonen 146*
  - 2.3 *Grundvand fra jern- og sulfatzonen 146*
  - 2.4 *Grundvand fra methanzonen 147*
  - 2.5 *Referencer 147*

## **APPENDIX F REGIONAL FORDELING AF NITRATSÅRBARHED 149**

- 1 FAKTORER DER BESTEMMER NITRATSÅRBARHEDEN 149
- 2 LERJORDSOMRÅDER 149
  - 2.1 *Type I, Relativt tykke uforstyrrede lerlag 150*
  - 2.2 *Type II, Lerlag af varierende tykkelse over umættede magasiner 151*
  - 2.3 *Type III, Restgruppe 151*
- 3 SANDEDE BAKKER OG HEDESLETTER 152
  - 3.1 *Type IV, Hedesletter 152*

3.2	<i>Type V, Bakkeøer</i>	152
4	ANDRE OMRÅDER	153
4.1	<i>Type VI, Områder nord for Limfjorden</i>	153
4.2	<i>Type VII og VIII, Himmerland og Djursland</i>	153
4.3	<i>Type IX, Bornholm</i>	153
5	REFERENCER	154



# Appendix a Geologiske modeller

## 1 Indledning

Grundvandsmagasinerne i Danmark er opbygget af løse sand-grus aflejringer fra Kvartær, Tertiær, Jura og Kridt tidsafsnittene, kalkbjergarter fra Tertiær og Kridt, sandsten, skifre og kalksten fra Palæozoikum og granit og gnejs fra Prækambrium. Den geologiske beskrivelse af disse magasiners opbygning er fundamentet for at forstå både fysiske og kemiske processer, der foregår, når vandet bevæger sig gennem dæklag til magasinerne og ved transport i selve magasinerne.

Oplysningerne om lagenes udbredelse, sammensætning og alder baseres især på analyse af boreprøver og deres placering i boringer, men også geofysiske logs og overfladegeofysik indgår ved geologisk modellering (Hansen & Gravesen, 1996). Viden om de enkelte lags mulige udbredelse kan fås ved at opstille geologiske modeller, der er udviklet inden for den sedimentologiske videnskab (Walker, 1984).

Dette appendix anviser en metode til fremstilling af en geologisk model. Metoden kan følges uanset hvor stor en datamængde der foreligger ved en konkret undersøgelse. Selvfølgelig vil modellens gyldighed øges, jo flere data der foreligger, og jo større tæthed disse har. Det beskrevne eksempel fra Grundfør er baseret på mange boringer og tætliggende geofysiske linier, men geologiske konklusioner kan også drages på et datamæssigt mindre grundlag.

## 2 Geologiske modeller: heterogenitet og nøjagtighed

De geologiske modeller bliver helt overvejende etableret på grundlag af daglokaliteter, hvor lagenes vertikale og horisontale udbredelser og variationer kan iagttages. Centrale parametre er laggrænser, kornstørrelser og sedimentstrukturer. Ud fra disse parametre er der blevet beskrevet en række teoretisk mulige modeller, der dog næsten aldrig genfindes komplette i naturen. Et eksempel på en model for løse sand-grus flodaflejringer er den type af de flettede flodsystemer, der opbygger de danske hedesletter fra Weichsel tidsafsnittet.

De sedimentologiske modeller har især været beskrevet på basis af borings- og geofysiske data i forbindelse med olie- og gasefterforskning. Ved disse undersøgelser er der ofte relativ stor afstand mellem boringsdata, men de støttes af data fra især seismiske undersøgelser.



De vertikale og horisontale variationer i aflejringerne karakterer forudsagt ud fra de sedimentologiske modeller kan også anvendes ved storskala modellering af grundvandsmagasinerne, men i forbindelse med beskrivelse af vandstrømning og forureningstransport i grundvandet er der brug for flere detaljer og præcise rumlige beskrivelser til vurdering af den hydrauliske ledningsevne i lagene. Magasinernes hydrauliske ledningsevne kan variere inden for selv tynde lag fra samme slags aflejring.

Modellerne har følgende funktioner:

1. Der etableres en norm som kan bruges ved sammenligninger.
2. De er ramme for fremtidige observationer.
3. De kan hjælpe til at forudsige hvilke sedimentkarakterer der optræder i nye geologiske situationer, hvor feltinformationer er sparsomme.
4. De kan hjælpe til at tolke de processer der optræder i et givet aflejringsystem.

Ud fra dette kan man sige at modellerne kan hjælpe ved kvantificering af heterogenitetsforholdene i grundvandsmagasiner, idet:

- A. Der kan findes forudsigelige aflejringsfølger på en regional skala.
- B. De geologiske enheder der er identificeret på lokal skala, kan være udgangspunkt for at klassificere heterogenitet.
- C. Forbindelser (interconnection) mellem enheder med høj hydraulisk ledningsevne er vigtige heterogenitetsparametre (Anderson, 1989, 1990).

### 3 Modellernes nøjagtighed

Når der beskrives en model for et grundvandsmagasin på basis af boreprøver, kan data fra prøverne sammenholdes med data fra daglokaliteter hvor det er lettere at indpasse aflejringerne i en etableret model. Dette er så baggrunden for at korrelere mellem de enkelte borer og de enkelte lag. Hvis det er muligt at aldersdatere lagene, er dette den mest sikre metode til at sammenholde jævnaldrende lag.

Når oplysningerne skal bruges ved en videre vurdering af magasinets egenskaber, er tilstedeværelsen af heterogeniteter i i øvrigt homogene aflejringer meget væsentlige. Den præcise rumlige placering af heterogeniteterne kan kun ske hvis der er en stor datatæthed fra f.eks. borer, men en tilstrækkelig datatæthed er normalt ikke tilstede.

Etablerede modeller giver derfor nogle overordnede retningslinier for hvordan forholdene kan være nede i magasinet, men kun på en "regional" skala, som går ud over en mere specifik lokalitet. Foruden de primære heterogeniteter dannet ved lagenes aflejring er især de tektoniske forstyrrelser af magasinbjergarterne en parameter der forøger den samlede mængde af heterogeniteter i magasinet og som gør dem mere uforudsigelige.

## 4 Geofysiske målinger og kortlægning

Geofysik har været anvendt ved grundvandsundersøgelser igennem længere tid. Borehulslogs, især gammalog, resistivitetslog og induktionslogs, er vigtige hjælpemidler når detaljer om lagfølgerne skal fastsættes i de enkelte borer. Den usikkerhed der er ved fastsættelse af laggrænser på basis af de udtagne boreprøver, kan elimineres ved at optage geofysiske logs i borehullet. Derudover kan de geofysiske logs påvise og placere heterogeniteter i lagfølgen og kombineret med boreprøver give gode muligheder for at beskrive så præcis en lagfølge som mulig.

Det mest problematiske ved opstilling af modeller i relation til grundvandsmagasinerne er at bestemme beliggenhed af grænser mellem de enkelte enheder og enhedernes præcise udbredelse. Overfladegeofysik kan give informationer til at kunne vurdere og fastsætte forbindelserne mellem de større enheder. Seismik, georadar, slæbegeoelektrik og transiente elektromagnetiske målinger er de metoder der især giver bud på de overordnede strukturer (Olsen et al., 1993) (se Appendix b om geofysik).

## 5 Datatyper

De geologiske modeller udarbejdes på grundlag af "hårde data": Direkte feltdata fra daglokaliteter eller borer og "bløde data": Geofysiske data og geologisk erfaring.

De hårde geologiske data er ofte allerede eksisterende data som f.eks. boringsdata fra GEUS boringsdatabase og Borearkiv (Gravesen & Fredericia, 1984). Der findes ca. 270.000 borer i borearkivet, hvoraf de ca. 196.000 er lagret i databasen. Boringsformål fordeler sig med 61 % vandforsyningsboringer, 20 % geotekniske boringer, 9 % råstofboringer, 7 % geofysiske shot holes og 3 % grundvandsovervågningsboringer.

De forskellige boringstyper indeholder information som er relevant ved både manuel og computerbaseret geologisk modellering. Den geologiske information er primært baseret på undersøgelser af boreprøver og oplysninger fra borefirmaet (f.eks. laggrænser). Boreprøverne undersøges med hensyn til bjergarts/jordartstype, hærtningsgrad, kornstørrelse, farve, bikomponenter, mineralogi, fossilindhold, kalkholdighed, og almindeligvis er dannelsesmiljø og alder også bestemt (Larsen et al., 1995).

De første boringsdata er indsamlet helt tilbage i 1850erne. Boringernes alder og de forskellige formål resulterer i forskellig opløsning med hensyn til indsamlingstæthed i borerne (antal prøver) og information fra hver prøve (antal undersøgte parametre). Derudover er tæthed af boringernes beliggenhed og deres dybde af betydning ved opstilling af modellerne. Disse forhold som varierer fra sted til sted,

må vurderes i hvert enkelt tilfælde, bl.a. af hensyn til den mængde af yderligere data der skal indhentes.

De "hårde" boringsdata kan relativt let indarbejdes i modellen på det sted hvor de er indsamlet (borestedet), men det er vanskeligt at illustrere nøjagtigheden ved deres rumlige fordeling og variabilitet.

De geofysiske data, som indsamles (logs og overfladegeofysik) anvendes efter tolkning af deres geologiske betydning (lagenes sammensætning og udbredelse, laggrænsernes beliggenhed). Logs kan desuden anvendes til direkte korrelation af lagmønstre mellem boringer.

## 6 Procedure for modelopstilling

Skalaen og datagrundlaget er centrale kriterier for måden at opstille en geologisk model på. Datamængde og -kvalitet varierer meget i de forskellige dele af landet. I områder hvor der har været intens boringsaktivitet i forbindelse med etablering af kildeområder til vandværker eller ved forskningsprojekter, vil boringstæthed og datakvalitet være væsentlig større end i områder med spredte husholdnings- og markvandingsboringer.

En geologisk model kan selvfølgelig opstilles ud fra både få og mange data. Mange data er nødvendige når der skal bruges detaljer omkring de væsentligste parametre: Grundvandsmagasinet og dæklagenes sammensætning og interne strukturer, herunder interne heterogeniteter, udbredelse og afgrænsninger, herunder laggrænser, tektoniske forstyrrelser og andre barrierer. Der vil i de fleste tilfælde i forbindelse med zoneringszoner være behov for indsamling af supplerende geologiske data.

Databehovet for en manuelt opstillet geologisk model er stort, men datamængden kan dog også blive så stor at overskueligheden tabes. Til gengæld vil de fleste computerfremstillede modeller (konturerede modeller, statistiske modeller, Hansen & Gravesen, 1996), have et stort krav til datamængden, men vil altid være forsimplede udgaver af de geologiske forhold.

Opstillingen af den geologiske model med udgangspunkt i boringsdata er i al simpeltid et spørgsmål om at korrelere lag af samme alder fra boring til boring. Det er sjældent at alle lag i en boring er aldersdateret på en måde så korrelationen kan foregå entydigt. Derfor kommer de etablerede modeller ind i billedet, som giver forslag til hvordan de faktiske lag i boringerne kan være dannet og placeret i forhold til hinanden.

Konstruktion af to- og tredimensionelle geologiske modeller indeholder et væsentligt element af tolkning, som må baseres på kendskab og erfaring fra kendte modeller (Anderson, 1989, Walker, 1984). Når først den geologiske model er etableret, kan denne anvendes til videre

udarbejdelse af en hydrogeologisk model altså f.eks. en "hydrostratigrafisk lagkagemodel".

De geologiske modeller vises oftest som tværprofiler, der sammenstilles i fence-diagrammer eller som blokdiagrammer. Nedenfor gennemgås et forslag til fremgangsmåde (Hansen & Gravesen, 1996).

## 6.1 Information fra boringer og daglokaliteter

Første trin i processen er at anvende information fra boreprøvebeskrivelserne, tolkning af borehulslogs og information fra daglokalitetsbeskrivelser og modeltolkninger herfra.

Korrelation af de sammenhængende og jævndrengende lag foregår lettest hvis de aldersbestemte. Dette forgår ud fra dyre- og plantefossiler, som især findes i aflejringer dannet i havet. Eksempler herpå er interglaciale aflejringer fra Eem (Cyprina-aflejringer) og Holstein havene, som har stor udbredelse i Danmark. De marine lag fra Øvre Kridt (skrivekridtaflejringer) til øvre Tertiær (Miocæn: Gram, Hodde og Arnum Formationerne) er andre eksempler på aflejringer der kan aldersdateres ud fra fossiler.

Ikke-marine lag fra søer og moser kan dateres på plantefossiler, og dermed korreleres, men de har sjældent større horisontal udbredelse. Når det drejer sig om istidsaflejringerne, smeltevandsaflejringer og moræneaflejringer som dominerer de øvre jordlag i Danmark, kan korrelationen være vanskelig på grund af manglen på fossiler. Her må lagene korreleres ud fra deres sammensætning og strukturer, og da vil de sedimentologiske modeller give muligheder med hensyn til jordartsvariation og de sedimentære og tektoniske strukturers karakter og skala.

Daglokaliteterne giver også informationer om de interne heterogeniteter og forbindelsesmuligheder mellem aflejringer som kan optræde som grundvandsmagasiner.

Ud fra den kombinerede tolkning af dannelsesmiljø for aflejringerne og fastsættelse af laggrænser konstrueres geologiske tværprofiler, vel vidende at områderne mellem boringerne kun kan tolkes ud fra kvalificerede vurderinger og ekspertise. I områder med tætliggende boringer med den nødvendige dybde og få forskellige lag vil denne geologiske model være tilstrækkelig (f.eks. områder med tyndt kvartært dække på kalkaflejringer).

Hvis data tætheden er for ringe vil det være nødvendigt at supplere med flere boringer og/eller overfladegeofysik. Hvilke metoder der skal anvendes, afhænger f.eks. af forskelle i aflejringstyper, forventninger til strukturelle forhold og skalaforholdene. Under danske forhold har især de geoelektriske og elektromagnetiske metoder vist sig

at være anvendelige, men også seismik, gravimetri og georadar kan anvendes med fordel.

## **6.2 Geofysiske data**

Næste trin er derefter at forberede de geofysiske data til den geologiske model.

De geofysiske metoder bidrager til beskrivelse af storskala heterogeniteter i magasinerne og de mulige forbindelser mellem flere magasinerheder. Derudover bidrager de geofysiske data til fastsættelse af laggrænserne mellem enhederne i områderne mellem borerne og til vurdering af hovedjordartstypernes fordeling (ler, sand, grus).

De geofysiske data skal tolkes og udtegnes på papir enten som profiler eller som kort. Det er hensigtsmæssigt at udtegne de geofysiske data i profiler med samme beliggenhed og målestok som de geologiske. Hvis udtegningen foregår på kort, vil det være nødvendigt at omsætte disse horisontale data til vertikale profiler.

Tolkning og omsætning af f.eks. elektriske modstandsværdier til sedimenttyper understøtter beskrivelsen af de vigtigste sedimentenheder og fastlæggelsen af deres udbredelse. Dette sker ved sammenligning med kendte modstandsværdier for danske sedimenter. Derefter kan områder med samme sammensætning afgrænses, respekterende de allerede registrerede grænser mellem aflejringerne.

## **6.3 Integration af data**

Det tredje trin er at sammenarbejde de to profiltyper således at alle data anvendes til at konstruere det endelige geologiske profil. Det er væsentligt at markere hvor profilet er baseret på borer og geofysik, og hvor det alene er konstrueret ud fra en geofysisk tolkning. Det gøres bedst ved at vise boringernes beliggenhed og dybde.

De rumlige relationer kan nu vises ved at flere krydsende profiler sammenstilles som et fence-diagram eller blokdiagram, der viser lagernes udbredelse i tre dimensioner. Arbejdet med at sammenstille disse diagrammer involverer ofte endnu en vurdering af lagernes vertikale og horisontale udbredelse, specielt i de punkter hvor profilerne krydser hinanden.

## **6.4 Hydrogeologiske enheder**

Det vil ofte være hensigtsmæssigt at bruge et fjerde trin, hvor de sedimentære enheder (lithofacies) vurderes og transformeres til hydrogeologiske enheder (hydrostratigrafisk facies)(Poeter & Gaylord, 1990).

Dette sker typisk ved en simplificering af de geologiske profiler og med understregning af de forbindelser der kan være mellem aquiferer over hinanden eller ved siden af hinanden (interconnectedness). Disse forbindelser er især transport korridorer for vand og opløste stoffer (forurening) Et eksempel på en simplificering er at give ”sammenhængende” morænelers- og smeltevandslerlag en værdi eller vise dem som et legeme.

Denne type model er et velegnet grundlag for matematisk hydrogeologisk modellering, bl.a. som skelettet i modelopsætningen og som grundlag for vurdering af de hydrauliske parametre.

## **6.5 Afsluttende bemærkning**

Den geologiske model kan hensigtsmæssigt udarbejdes og beskrives i de 4 trin (Hansen & Gravesen, 1996), baseret på geologiske og geofysiske data. Detailrigdommen i modellen afhænger af datagrundlaget, men integrationen af geologiske (boringer) og geofysiske data er et vigtigt grundlag. Den geologiske model bliver normalt kun udarbejdet som et forslag til en endelig model, og den ændres kun, hvis der indhentes flere nye data. Hvis det er nødvendigt at have flere forskellige modeller at vælge imellem, som er baseret på samme datamateriale, udføres de bedst ved computerbaseret geostatistisk modellering f.eks. stokastisk modellering.

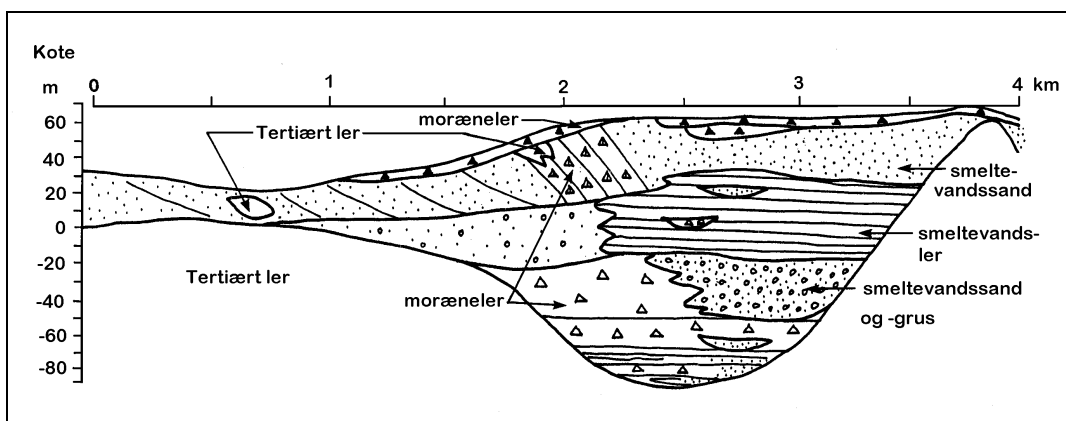
## **7 Eksempel: Model i et komplekst geologisk område**

I forbindelse med det Strategiske Miljøforskningsprogram SMP 1 under Grundvandsgruppen er et område omkring Grundfør i Østjylland, lige vest for Århus, blevet undersøgt ved hjælp af en række af de metoder, der er omtalt ovenfor. Området ligger i den sydlige del af ”nitratbæltet”, og den geologiske opbygning er kompleks med deraf følgende problemer med grundvandsdannelse og kvalitet (Gravesen & Hansen, 1997).

Det datagrundlag som er anvendt, er en kombination af de data som er omtalt ovenfor, men i en mængde som ofte ikke er til stede i andre områder. Beskrivelse er imidlertid et eksempel på hvordan data kan tolkes. I øvrigt afhænger detaljer i en tolkning selvfølgelig af den datamængde som er til stede.

Området er komplekst på flere måder. Det er beliggende øst for opholdslinien fra hovedfremstødet i Weichsel men vest for den østjyske israndslinie. Under den plane terrænoverflade øst for Lilleådalene findes en begravet kvartær dal, som er eroderet ned i Tertiært ler til en dybde af 160 meter under jordoverfladen. Den kvartære lagfølge er opbygget af et overfladenært hedeslette grundvandsmagasin, delvis dækket af moræneler og et dybereliggende kanalgrundvandsmagasin

dækket af issø-smeltevandssler. Mellem og under magasinerne findes desuden lag af moræneler (figur a1).



**Figur a.1**  
*Profil fra Grundfør, der viser de geologiske enheder, som findes i den begravede dal og dem der ligger hen over daludfyldningerne.*

Selve dalsystemet og dets begrænsninger er kortlagt med transiente elektromagnetiske målinger, mens den nærmere bestemmelse af de tertiære lere er sket ud fra boreprøver fra to dybe borer lige øst for Grundfør. Seismiske undersøgelser i området tyder kun på begrænsede tektoniske bevægelser, mens kanalstrukturerne og sedimentindholdet tyder på at dalen er dannet ved erosion. Dalsystemet antages at indgå i det system, som kendes fra det østlige og nordlige Jylland. Selve erosionen ned til de 160 meters dybde er foregået i Elster istiden, ligesom i det store Nordtyske dalsystem.

Bunden af dalen er dækket af smeltevandssand og -ler samt omlejret tertiært ler, og derafter følger moræneler, i alt 60 m tykt. Moræneleret udgør bunden for kanalmagasinet. Selve kanalen følger dalens udbredelse og er fyldt med 25 m tykke lag af grovkornet smeltevandsmateriale. Kanalens sedimentindhold kendes selvfølgelig kun præcist hvor der er borer, men tolkning af modstandsværdier (geoelektriske og elektromagnetiske metoder) viser at grovkornet materiale er udbredt i hele kanalsystemet, bortset fra enkelte steder hvor mere finkornet materiale er opblandet. Dette har stor betydning for magasinets egenskaber. Prøvepumpning i borerne giver en T-værdi på  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , men magasinet har begrænset ydeevne på grund af de førnævnte kornstørrelsesforhold, begrænsninger til dalsiderne samt ringe forbindelse til nedsivningsområder fra jordoverfladen.

Vandet er dateret til at være omkring 2000 år gammelt (kulstof-14-metoden, Klaus Hinsby personlig meddelelse) og det bekræfter de vanskelige forhold for nedsivning og fornyelse af det grundvand som

er i aflejringerne. Alle de aflejringer der har fyldt dalen op, antages at være af Elster alder.

Ved slutningen af Elster istiden foregik en omfattende smeltning af gletscheris, og over store dele af Jylland og Nordtyskland blev der aflejret smeltevandsler, som f.eks. i Limfjordsegnene har tykkelser på over 100 m. I Grundfør-dalen blev aflejret op til 55 m ler med mindre indslag af silt, diamicton og sand. Udbredelsen af dette legeme af smeltevandsler er påvist ved en kombination af boreprøver og modstandsværdier målt ved overfladegeofysik.

Lateralt for issøen blev aflejret deltasand og -grus og hedeslette-sand. Disse lag er udelukkende tolket ud fra modstandsværdier ligesom deres afgrænsninger er det. Lerlagene har en anslået hydraulisk ledningsevne på  $10^{-10}$  m/s, dvs. meget lav, og grundvandet i leret er mellem 1500 og 6000 år gammelt (Klaus Hinsby, personlig meddelelse).

På toppen af issø-delta-hedesletteaflejringerne findes et nyt hedeslette-system fra Weichsel, Haldum Formationen. Dette pladeformede, 2-15 m tykke sand-gruslegeme kendes fra flere sand-grusgrave, hvor sedimentbeskrivelser og modeller er etableret. Hedeslette-modeller forudsiger generelt at kornstørrelsen i flodsystemerne aftager i retning væk fra gletscheren, men mange steder er der, ligesom ved Grundfør, også en stor kornstørrelsesvariation inden for korte afstande mellem aflejringer i kanaler og aflejringer på bredderne. Aflejringerne er også blevet tektonisk forstyrrede af en senere overskridende is.

Ovenpå er aflejret et 2-5 m tykt dække af moræneler. Sandvinduer i dette morænelersdække er vigtige for nedsivning til grundvandet, men er samtidig også grundlag for passager for forurening som nitrat.

Sandvinduerne kan påvises ud fra geologiske og geofysiske kort. De kvartærgeologiske kort kan vise sammensætningen ned til 1 meters dybde, mens slæbegeoelektriske kort kan vise sand-lerfordelingen længere nedad samt forbindelsen til hedeslette-magasinet. Lokaliseringen af sandvinduerne på jordoverfladen kan derfor gøres relativt præcist, mens forbindelsen nedad til grundvandsmagasinet (interconnection) er mere kritisk at placere.

Slug tests i borerne viser, at sand-gruslagene har en gennemsnitlig hydraulisk ledningsevne på  $K=0,1-3 \times 10^{-4}$  m/s. CFC-dateringer af grundvandet i sandmagasinet viser, at det er fra mellem årene 1950 og 1980; det vil sige, det er meget ungt vand. De meget heterogene rumlige forhold i magasinet er årsag til en vertikal og horisontal opdeling ("geokemisk" zoner) af grundvandet og præferentiel strømning i sandlag mellem lertunger fra lerlegemet. Denne opdeling afspejles bl.a. af fordelingen af kemiske komponenter i grundvandet (Ernstsen & Thorling, 1997).



## 8 Oliegeologiske kortlægningsmetoder til regionale grundvandsmagasiner

Oliegeologiske kortlægningsmetoder er især velegnet til overordnet regional kortlægning af grundvandsmagasiner, i f.eks. sand og kalkbjergarter. Regional kortlægning forbedrer imidlertid forudsætningerne for korrekt tolkning af lokale geologiske modeller, da de fastlægger den overordnede geologiske ramme og dermed begrænser tolkningsmulighederne i lokale modeller.

De oliegeologiske kortlægningsmetoder blev primært udviklet i 1970'erne og 80'erne, hvor olie-efterforskningen for alvor tog fart. I denne periode blev en række nye teknikker introduceret, i takt med udviklingen af forbedrede målemetoder og store computere, til integrering af alle måledata og observationer i de geologiske modeller (Dybkjær & Rasmussen, 1998).

De oliegeologiske kortlægningsmetoder finder nu i stigende grad anvendelse ved kortlægning af større regionale grundvandsreservoir-/magasiner, idet formålet og de grundlæggende principper i reservoirundersøgelserne i store træk er de samme. Det centrale problem ved kortlægning af grundvands- såvel som oliereservoir er således at beskrive fordelingen af porøsitet og permeabilitet i undergrunden (f.eks. udbredelsen af sand og ler), så præcist som muligt.

En central metode i den oliegeologiske kortlægning er sekvensstratigrafi (stratigrafi er læren om bjerg- og jordarternes lagdeling, aflejningsforhold og alder). Sekvensstratigrafi er en form for stratigrafi hvor jordarternes lagfølge opdeles i nogle rumlige enheder, afgrænset af genkendelige flader. Disse flader kan følges og korreleres over store afstande på f.eks. seismogrammer og geofysiske log i borehuller og dokumenteres at være samtidige gennem biostratigrafiske undersøgelser (Piasecki, 1980; Clausen, 1996; Emery & Myers, 1996; Dybkjær & Rasmussen, 1998).

Sekvensstratigrafiens store styrke er dens velegnethed til at sammenkoble mange forskellige typer data, f.eks. seismiske målinger, geofysiske logs, biostratigrafi og sedimentologi, i en fælles overordnet ramme der forbedrer mulighederne for at opstille regionale geologiske modeller (Rasmussen, 1994; Dybkjær & Rasmussen, 1998; Knudsen, 1998). Regionale geologiske modeller der er opstillet på baggrund af sekvensstratigrafi og de tilknyttede metoder, er mere robuste og giver bedre mulighed for at forudsige geologien i områder hvor de geologiske informationer er begrænsede.

Der er således specielt to årsager til at sekvensstratigrafien er et væsentligt redskab i geologisk kortlægning, og at den er så udbredt som den er i dag:

- 1) Metoden er velegnet til at kombinere mange forskellige typer data.
- 2) Metoden beskriver aflejringsbassiners udvikling både dynamisk (til en given tid) og rumligt (fra de kystnære aflejringer til de dybmarine), og den giver dermed mulighed for at kunne forudsige lithologier, dvs. forudsige hvordan f.eks. ler og sand er fordelt i det oprindelige aflejringsbassin.

Oliegeologisk kortlægning er som nævnt regional og er derfor især velegnet til at kortlægge den overordnede geologiske ramme, der arealmæssigt dækker flere amter. Et eksempel kunne være regional kortlægning af tertiære sandmagasiner (geologisk hovedtype 4, se vejledningens afsnit 3.2), der ville dække adskillige syd og midtjyske amter. Et andet eksempel kunne være regional kortlægning af kalkmagasiner på Sjælland (geologisk hovedtype 3), der kunne dække alle sjællandske amter.

De regionale grundvandsmagasiner kan både indeholde grundvand der er mange tusind år gammelt og dermed fri for menneskelig påvirkning, og grundvand der er yngre end 50 år og dermed potentielt forurenat (Buckley et al., 1999; Hinsby, 1999; Hinsby et al., 1999a,b,c). Den regionale geologiske kortlægning vil derfor med fordel kunne suppleres med aldersbestemmelse af grundvand (se afsnit 5.3.4. og appendix c-9) på udvalgte strategiske steder, i grundvandsmagasiner med væsentlige vandforsyningsinteresser. Således kan udbredelsen af ungt forurenat og gammelt uforurenat grundvand bestemmes og anvendes til vurdering af sårbare nedsivningsområder. Endelig vil aldersbestemmelserne kunne suppleres med bestemmelse af saltholdighed, sporelementer og andre organiske og uorganiske parametre, der er relevante for vurdering af grundvandskvaliteten i både det naturlige og det forurenede grundvand, og for forståelsen for stoftransporten i grundvandsmagasinerne (Christensen et al., 1994; Appelo & Postma, 1996).

## 9 Litteratur

*Anderson, M.P. (1990):* Aquifer Heterogeneity- A geological Perspective. Proceedings Fifth Canadian-American Conference on Hydrology, Calgary, Canada. 1990, 3-21.

*Anderson, M.P. (1989):* Hydrogeologic facies models to delineate large-scalespatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. Bulletin Geological Society of America, vol. 101, 501-511.

*Appelo, C.A.J. & Postma, D. Geochemistry, groundwater and pollution.* Balkema, Rotterdam, 1996, 536 s.

Buckley, D.K., Custodio, E., Manzano, M. & Hinsby, K. Investigation of aquifer and groundwater stratification. In: Edmunds and Milne (Eds.), 1999.

*Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Albrechtsen, H., Heron, G., Nielsen, P.H., Bjerg, P.L., & Holm, P.E.* Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 24, 119-202, 1994.

*Clausen, S.W.* Sekvensstratigrafi - en geologisk tolkningsramme. *Geologisk Nyt* 1/1996.

*Dybkjær, K. & Rasmussen, E.S.* Sekvensstratigrafi - En god metode til efterforskning af råstoffer. *Geologi - Nyt fra GEUS*, 1, 1998.

*Edmunds and Milne (Eds.): PALAEAUX - MANAGEMENT OF COASTAL AQUIFERS IN EUROPE - Palaeowaters, natural controls and human influence. Final report for the EU project PALAEAUX (ENV4-CT95-0156), British Geological Survey, BGS Technical Report, Hydrogeology Series, WD/99/35, 1999. (Bemærk! en udvidet udgave af EU-rapporten udgives som bog med titlen: "Palaeowaters in the Coastal Aquifers of Europe" i serien "Geological Society Special Publication", Geological Society, London, i begyndelsen af 2000.)*

*Emery, D. & Myers, K.J.* Sequence Stratigraphy. Blackwell Science, London, 297 pp., 1996.

*Ernstsen, V. & Thorling, L., 1997:* Geokemiske miljøer og nitrat i et komplekst opbygget grundvandsmagasin ved Grundfør.- ATV møde. Grundvandsforskning i Danmark 1992-96. side 29-39.

*Gravesen, P. & Fredericia, J., (red.) 1984:* ZEUS-geodatabase system. Borearkivet.- Danmarks Geologiske Undersøgelse, Ser. D nr. 3, 259 sider.

*Gravesen, P. & Hansen, M., 1997:* Usikkerheder ved geologiske modeller- Beskrivelse af grundvandsmagasiner i komplekse geologiske områder.- ATV møde. Grundvandsforskning i Danmark 1992-96, side 15-28.

*Hansen, M. & Gravesen, P. (1996):* Chapter 10. Geological modeling. I: Abbott, M.B. & Refsgaard, J.C. (red.): Distributed Hydrological Models. Kluwer Academic Publishers, 193-214.

*Hinsby, K.* Aldersdatering af grundvand - Et vigtigt redskab i forvaltning af vandressourcen. *Vandforsyningsteknik* nr. 48, 65-86, 1999.

*Hinsby, K.; Harrar, W.G.; Laier, T.; Højberg, A.; Engesgaard, P.; Jensen, K.H.; Larsen, F.; Boaretto, E. & Heinemeier, J.* Use of iso-

topes ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) and CFC's for the analyses of groundwater flow and transport dynamics: selected case and modeling studies from sand aquifers and a deep clay aquitard in Denmark. International Atomic Energy Agency, TECDOC no. ?, in press, (kort version er sendt til Journal of Hydrology), 1999a.

*Hinsby, K., Harrar, B., Nyegaard, P., Konradi, P., Rasmussen, E.S., Bidstrup, T., Gregersen, U. & Boaretto, E.* The Ribe Formation in SW Jylland, Denmark: Holocene and Pleistocene groundwaters in a coastal Miocene sand aquifer. In: *Edmunds and Milne (Eds.)*, Palaeaux - management of coastal Aquifers in Europe - Palaeowaters, natural controls and human influence. Final report for the EU project PALAEAUX (ENV4-CT95-0156), British Geological Survey, BGS Technical Report, Hydrogeology Series, WD/99/35, 1999.

*Hinsby, K., Edmunds, W.M., Loosli, H.H. & Barbecot, F.* Modern groundwater advance in European coastal aquifers. In: Edmunds and Milne (Eds), 1999b.

Hinsby, K., Harrar, B., Nyegaard, P., Konradi, P., Rasmussen, E.S., Bidstrup, T., Gregersen, U. & Boaretto, E. The Ribe Formation in SW Jylland, Denmark: Holocene and Pleistocene groundwaters in a coastal Miocene sand aquifer. In: Edmunds and Milne (Eds.), 1999c.

*Knudsen, C.* Muligt nyt råstof i Danmark. Geologi - nyt fra GEUS, 3, 1998.

*Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Gravesen, P., Foged, N., Knudsen, B. & Baumann, J., 1995:* Vejledning i Inge-niørgeologisk prøvebeskrivelse. Dansk Geoteknisk Forening, Bulletin 1, 135 sider.

*Olsen, H.; Ploug, C.; Nielsen, U. & Sørensen, K. (1993):* Reservoir Characterization Applying High-resolution Seismic Profiling. Rabis Creek, Denmark. Ground Water, vol. 31, no. 1, 84-90.

*Piasecki, S.* Dinoflagellate cyst stratigraphy of the Miocene Hodde and Gram Formations, Denmark. Bull. Geol. Soc., Denmark, 29, 53-76, 1980.

*Poeter, E. & Gaylord, D.R. (1990):* Influence of Aquifer Heterogeneity on Contaminant Transport at the Hanford Site. Ground Water, Vol. 28, 900-909.

*Rasmussen, E.S.* Sequence stratigraphic aspects of the Tertiary successions from offshore Gabon, Southern Denmark, and the south-central Pyrenees. Ph.D. afhandling, Danmarks Geologiske Undersøgelse og Århus Universitet, 1994.

*Walker, R.G. (1984): Facies Models. Geoscience Canada, Reprint Series 1, 317 sider.*

# Appendix b Geofysisk kortlægning

## 1 Baggrund

### 1.1 Læsevejledning

I dette appendix beskrives de geofysiske metoder der oftest kan finde anvendelse, når der skal indsamles supplerende oplysninger om geologien for at fastlægge dæklagstykkelse og -sammensætning samt oplysninger om den rumlige opbygning af grundvandsmagasinerne.

I afsnit 2 gives først en kort introduktion af de generelle forhold der skal tages hensyn til når geofysiske metoder anvendes til kortlægning af lerdæklag og grundvandsmagasiner beskrives. Derudover beskrives nogle af de generelle forudsætninger og begrænsninger der er vigtige at forstå i forhold til at gennemføre og tolke geofysiske målinger. Afsnittet tager specielt udgangspunkt i de elektriske og elektromagnetiske metoder der hyppigst anvendes til kortlægning af dæklag og grundvandsmagasiner.

I afsnit 3 beskrives de geofysiske metoders muligheder i forhold til kortlægningstemaerne i 4 geologiske hovedtyper. Disse 4 geologiske hovedtyper belyser i grove træk de geologiske forhold i relation til vandindvinding i Danmark.

De relevante geofysiske metoder er beskrevet mere detaljeret i de efterfølgende afsnit, som er løbende nummereret af hensyn til overskueligheden. Afsnit 5-11 indeholder beskrivelser af de metoder der oftest finder anvendelse ved kortlægning af lerdæklag og grundvandsmagasiner. I afsnit 12 beskrives kort metoder der er egnede i specielle tilfælde, og i afsnit 13 beskrives kort en række geofysiske borehulsmetoder der kan bruges ved grundvandsproblemstillinger.

### 1.2 Anvendelse af geofysiske metoder

Når der er opstillet en foreløbig hydrogeologisk model for et interesseområde ud fra eksisterende data (boringsoplysninger, pejlinger, vandkemi o. lign.), kan der på denne baggrund udpeges områder hvor der er behov for at tilvejebringe yderligere oplysninger. I disse områder gennemføres herefter undersøgelser i form af en detailkortlægning.

Formålet med detailkortlægningen kan være dels at afklare de hydrogeologiske forhold i områder, hvor det eksisterende datagrundlag er

for ringe, dels at gennemføre undersøgelser i områder, som vurderes at være af afgørende betydning for områdets vandforsyning.

Som beskrevet i kapitel 5 i vejledningen vil detailkortlægningen ofte bestå af en geofysisk kortlægning, der har til formål at beskrive den rumlige udbredelse af grundvandsmagasinerne og opbygningen af dæklag, samt af en supplerende kortlægning af hydrogeologi og grundvandskemi.

Der foregår løbende udvikling af de eksisterende geofysiske metoder, ligesom nye metoder af og til bliver introduceret. På længere sigt er det derfor muligt at andre metoder end de her beskrevne kan komme på tale til kortlægningsopgaver i grundvandssammenhænge.

### **1.3 Baggrund for at bruge geofysiske metoder**

Selv om der i Danmark findes et stort antal boringer (i gennemsnit 3 boringer pr. km<sup>2</sup>), giver boringsoplysningerne højst et brugbart billede af et områdes geologi når det drejer sig om de mere terrænnære dele af geologien, mens en nøjere beskrivelse af den dybereliggende geologi vanskeliggøres af at boringstætheden aftager med dybden. En bedre beskrivelse af de geologiske forhold, såvel overfladenære som dybereliggende, kan derimod opnås ved at kombinere geofysiske kortlægningsresultater med boringsoplysninger.

Det er de elektriske og elektromagnetiske geofysiske metoder, der anvendes hyppigst i forbindelse med kortlægningen af dæklag og grundvandsmagasiner. Herved bestemmes i første omgang den tilsyneladende elektriske modstand af jordlagene.

Den geofysiske tolkning består af en tolkning af de målte data i form af en elektrisk model. Denne model skal derefter omsættes til en model, der kan relateres til geologien. Det er her vigtigt at inddrage andre typer information i form af eksempelvis boringsoplysninger for at kontrollere og sikre de geologiske tolkninger af de geofysiske informationer.

Den geofysik-baserede model repræsenterer en opbygning tolket på baggrund af opmålinger, hvor et betydeligt jordvolumen er inddraget. En boringsoplysning er derimod en lodret, liniebaseret oplysning, som i planen kun repræsenterer lige præcis et enkelt punkt. Derfor kan det til tider være forbundet med betydelig vanskelighed at relatere geofysiske observationer til enkeltstående boringsoplysninger, uden at man af den grund behøver at forkaste nogen af disse informationer.

Uoverensstemmelser mellem boringer og geofysikdata kan enten skyldes at de boringsoplysninger der er til rådighed, er utilstrækkelige, eller kun er repræsentative for den meget lokale geologi omkring boringen, eller der kan være tale om at det med den valgte geofysiske

metode ikke har været muligt at kortlægge de geologiske variationer som boringsoplysningerne viser.

De elektriske metoders opløsning af horisontal og vertikal lagfølge aftager som hovedregel med dybden. Derfor er det muligt at opnå en mere detaljeret beskrivelse af dæklagene end af de dybereliggende magasinlag. Den detaljerede opløsning af de øvre lag er vigtig, for at der kan opnås en pålidelig tolkning af de dybereliggende lag.

For en elektromagnetisk metode som TEM forholder det sig lidt anderledes, idet denne metode ofte er i stand til at bestemme overfladen af et tykkere lerlag meget præcist indtil dybder på ca. 150 m u.t. En metode som seismik har også sin styrke på de lidt større dybder.

## 2 Væsentlige forudsætninger

I det følgende beskrives en række forudsætninger for anvendelse af geofysiske metoder. Beskrivelsen tager udgangspunkt i de forhold der skal tages hensyn til ved anvendelse af elektriske og elektromagnetiske metoder, der er de metoder der oftest anvendes i forbindelse med kortlægning af lerdæklag og grundvandsmagasiner.

En geofysisk metodes mulighed for at opløse de geologiske strukturer afhænger af mange forhold. For de elektriske og elektromagnetiske metoders vedkommende skal den geologiske struktur der ønskes kortlagt, være karakteriseret af en elektrisk formationsmodstand der adskiller sig tydeligt fra de omkringliggende lags formationsmodstande. Dernæst skal metodens følsomhed over for denne formationsmodstand være stor nok til at en variation i modstanden afspejler sig tydeligt i de målte data. Endelig er det vigtigt at de målte data er behæftet med så små fejl som muligt, så en tolkning af formationsmodstandene bliver så lidt fejlbehæftet som muligt.

Er den geologiske struktur der ønskes kortlagt, karakteriseret af formationsmodstande som tydeligt adskiller sig fra omgivelsernes, vil metodens evne til at kortlægge denne struktur generelt betraget være bestemt af produktet mellem metodens følsomhed over for disse modstande og den usikkerhed der må tillægges de målte data.

### *Ækvivalens*

Det er vigtigt, at tolkningen giver mulighed for at estimere hvor store usikkerhederne der er på den jordmodel, tolkningen har resulteret i. De målte geofysiske data er alle behæftet med en vis fejl, og der vil være en række forskellige jordmodeller (der kan være meget forskellige fra hinanden), som tilpasser data inden for den fejl der er på data. Disse modeller kaldes ækvivalente modeller.

Det er naturligvis vigtigt at begrænse mængden af ækvivalente modeller. Dette kan gøres på flere måder. Man kan anvende viden om



geologien fra anden side (a priori viden), det være sig boringer eller generelle grænser for, hvilke værdier de tolkede jordmodstande kan have i de enkelte dele af modellen. Man kan desuden benytte en anden elektrisk eller elektromagnetisk metode, hvis følsomhed over for de i modellen indgåede formationsmodstande er anderledes, og igennem en sammentolkning begrænse antallet af ækvivalente modeller. Endelig kan man forsøge at nedbringe sine målefejl, så de derved reducerede fejlgrænser for modelparametrene indskrænker antallet af ækvivalente modeller.

#### *Suppression*

Idet ækvivalente modeller betyder forskellige lagfølger som giver samme datarespons inden for måleusikkerheden, kan problemet "lagundertrykkelse" opfattes som en speciel form for ækvivalens. Med lagundertrykkelse menes, at det er umuligt på baggrund af måledata alene at afgøre, om et givet lag er til stede eller ej. Man taler om at et givet lag skal have en kritisk tykkelse for at kunne identificeres ved måledata, og størrelsen af den kritiske tykkelse vil afhænge dels af modstandsforholdene til de omgivende lag, dels af dybden til laget.

Eksempelvis vil et vandmættet sandlag mellem en overliggende moræne og en underliggende kalk formodentlig have en resistivitet imellem morænelerets lave og kalkens høje resistivitet, og identifikation af sandlaget vil afhænge af lagets tykkelse, men også af dets resistivitet i forhold til morænelerets og til kalkens. Endvidere vil den kritiske tykkelse som generel regel stige med øget dybde til laget.

#### *Målefejl og støj*

I dag er det oftest muligt at nedbringe de fejl som stammer fra selve målingen - de elektroniske fejl - til et negligerbart minimum. Dette betyder ikke at den samlede målefejl er negligerbart, fordi der ud over elektroniske fejl også er geometriske fejl og såkaldt geologisk støj, samt specielt for de elektromagnetiske metoder elektrisk/kulturel støj.

#### *Geometrisk fejl*

Den geometriske fejl opstår ved at elektroderne ikke er anbragt med de for måleopstillingen foreskrevne afstande, eller at strømkredsene ikke er udlagt i den foreskrevne geometri. Disse fejl kan reduceres ved omhyggelighed ved måleproceduren eller ved anvendelse af fast forudmålte opstillinger.

#### *Geologisk støj*

Den geologiske støj er ikke en målefejl i gængs forstand. Den opstår ved at den målemetode der anvendes, ikke opløser alle dele af jordmodellen tilstrækkeligt. For eksempel vil der ved anvendelse af en elektrisk profileringsmetode hvor der bruges jordspyd, være en prak-

tisk grænse for hvor tæt data kan opmåles. Derfor vil variationerne i de allerøverste dele af jordmodellen give variationer i de målte data, som ikke kan ses i eller adskilles fra måledata, og som derfor må betragtes som værende en støj - kaldet den geologiske støj.

Den geologiske støj er den dominerende støj ved elektriske opmålinger, og derfor vil en reduktion af denne støj forbedre bestemmelsen af jordmodellen med samme faktor.

Den geologiske støj kan ikke fjernes ved at måle mere nøjagtigt i det enkelte målepunkt, fordi støjen kun er afhængig af måleopstillingens position. Den geologiske støj kan kun reduceres ved at foretage tætte opmålinger langs et profil eller på en flade og foretage en midling af disse over et givet længde- eller fladeinterval.

Igennem de senere år er der både nationalt og internationalt med held forsøgt at udvikle metoder som giver mulighed for tætte opmålinger langs profiler. Metoderne anvender en mere eller mindre kontinuert opmålingsteknik. Gennem midling af disse meget tæt opmålte data formindskes den geologiske støj i det derved reducerede datasæt.

Tætte målinger og midling af data vil dog ikke altid være tilstrækkeligt, hvis en detaljeret opløsning af jordmodellen ønskes. Det forhold sig således, at jo mere de øvre dele af modellen kan opløses, jo bedre vil opløsningen af de dybe dele af modellen blive.

Ved en geoelektrisk profilering/sondering er det derfor lige så nødvendigt at udføre målinger med korte som med lange elektrodeafstande for at opløse de dybere dele af modellen, da der ellers fås en dårligere bestemt model. Den optimale fremgangsmåde må derfor være at foretage tætte opmålinger med både korte og lange elektrodeafstande og midle disse opmålinger til et reduceret datasæt.

#### *Elektrisk støj og kulturelle ledere*

Elektromagnetiske metoder har en stor følsomhed over for tilstedeværelsen af elektrisk støj og "kulturelle elektriske ledere" såsom højspændingskabler, jordkabler, elektriske hegn etc. Derfor er det vigtigt at man udvælger sine sonderingslokaliteter omhyggeligt og undersøger om sonderingsresultaterne indeholder forvrængningseffekter fra støj eller kobling til kulturelle ledere. Den bedste måde at gøre dette på er at foretage tæt opmåling og sammenholde resultaterne.

#### *Tolkningsprogrammel*

Til tolkning af de elektriske og elektromagnetiske måleresultater er der en vifte af programmer på markedet i dag. Der er en lang række programmer der forudsætter at den jordmodel, der anvendes som baggrund for tolkningen, ikke ændrer sig væsentligt inden for den horisontale udstrækning som måleopstillingen har - de såkaldte 1-

dimensionelle programmer. I disse kan a priori viden om geologien indbygges. 1-dimensionelle programmer har en automatisk tilpasning til data, men også, hvad der er essentielt, en angivelse af hvor nøjagtigt de enkelte formationsmodstande og lagtykkelser er bestemt.

Inden for de sidste år er der fremkommet programmer, hvormed man langs profiler kan tolke de målte data ud fra en jordmodel der er inddelt i lag, og det enkelte lag inddelt i sektioner med forskellige modstande - de såkaldte 2-dimensionelle programmer. Med dette program tolker man hele profilet på samme tid. Nogle programmer giver også her mulighed for at indbygge a priori viden.

Til tolkning af TEM-sonderinger er der indtil i dag kun 1-dimensionelle programmer til rådighed med analyse af fejl på de tolkede formationsmodstande og lagtykkelser. Den enkelte transiente elektromagnetiske sondering er imidlertid mere begrænset i sin udstrækning i forhold til sin indtrængningsdybde end de geoelektriske sonderingsmetoder er, hvilket har været medvirkende årsag til at man har opnået udmærkede resultater ved 1-dimensionel tolkning af transiente data.

### **3 Kortlægning i de geologiske hovedtyper**

I dette afsnit gennemgås først en række generelle forhold omkring kortlægning af lerdæklag og grundvandsmagasiner med geofysiske metoder.

Med udgangspunkt i 4 geologiske hovedtyper gennemgås dernæst, hvilke muligheder der er for at kortlægge disse 2 temaer. De 4 geologiske hovedtyper er i grove træk beskrivende for forholdene omkring grundvandsmagasinerne i det meste af Danmark. Typerne er vist i figur b.1, hvor der endvidere er vist varianter af hovedtyperne.

#### **3.1 Kortlægning af dæklag over grundvandsmagasiner**

Som beskrevet i vejledningens kapitel 5 er kortlægningen af dæklagenes sammensætning et væsentligt led i zoneringsen. Med geofysiske metoder er det muligt at kortlægge dæklagenes indhold af sand og ler, mens der på nuværende tidspunkt ikke metoder til rådighed som kan give oplysninger om sprækker i lerlag, som ligeledes har betydning for grundvandsbeskyttelsen.

Af de fysiske parametre er formationsmodstanden formentlig den der bedst adskiller sandede lag fra lerede. Derfor er de elektriske og elektromagnetiske metoder, som anvendes til at kortlægge formationsmodstanden med, de bedst egnede til denne form for kortlægning.

Den slæbegeoelektriske profileringsmetode, Slæbegeoelektrode Profileringsmetoden, MEP, hvor der anvendes såvel korte afstande (5 meter eller mindre) som længere afstande (30 - 40 meter eller mere), er i denne forbindelse velegnede metoder, hvorimod den

Transiente Elektromagnetiske Metode, TEM, i sin nuværende form er uegnet til formålet. TEM-metoden kan derimod komme på tale som en egnet metode, når det drejer sig om dybereliggende beskyttelse, hvor lerlagene ikke findes i de øverste 30 m u.t.

### 3.2 Kortlægning af grundvandsmagasiner

Hovedparten af alle grundvandsmagasiner i Danmark er enten sandmagasiner eller kalkmagasiner.

Geofysisk kortlægning af sandede magasiner inden for de øverste 150 meters dybde kan mest hensigtsmæssigt foretages med de elektriske og elektromagnetiske metoder, jf. betragtningerne i afsnittet foran.

Den elektriske formationsmodstand af kalk adskiller sig ofte ikke væsentligt fra sandede formationer, og derfor kan sandede formationer og kalkformationer ofte ikke adskilles ved anvendelse af elektriske metoder. I denne sammenhæng kan seismiske metoder komme i anvendelse, idet lyd hastighederne adskiller sig væsentligt mellem sand, ler og kalk.

For de meget dybtliggende grundvandsmagasiner (dybde større end 150 meter) er seismiske og gravimetrisk metode, eventuelt i kombination, på nuværende tidspunkt det bedste bud på et geofysisk bidrag i kortlægningen.

#### *Borehulslogging*

For grundvandsmagasiner i alle dybdeintervaller er borehulslogging et glimrende supplement til de øvrige kortlægningsmetoder, såvel i sandede og lerede magasiner som i kalkmagasiner. I sandmagasiner i dybdeintervallet ned til 60 - 90 meter kan man ligeledes anvende ellog-/gammalog-boremeteren med niveaubestemt vand- eller gasprøvetagning til samtidig kortlægning af lithologi og grundvandskemi.

#### *Transient elektromagnetisk metode (TEM)*

Den transient elektromagnetiske metode TEM, udført som sonderinger, er i de seneste par år blevet den hyppigst anvendte geofysiske metode for kortlægning af især grundvandsmagasiner i kvartære eller miocæne sandlag. Metoden ses dog også i stigende grad anvendt ved kortlægning af dybden til saltholdigt grundvand i kalk/kridt formationer.

Årsagen til denne stigende anvendelse af TEM på bekostning af de traditionelle geoelektriske undersøgelsesmetoder er først og fremmest, at TEM sonderinger er nemmere at udføre og TEM-undersøgelser er derfor billigere per arealenhed, men også TEM sonderingers mere entydige fastlæggelse af dybden til en god leder som f.eks. fedt tertiært ler eller saltholdigt porevand, har bidraget til dens popularitet.

Netop disse to forhold, tertiært ler og saltvand, er de begrænsende faktorer for hvor dybt de udnyttelige grundvandsmagasiner optræder.

TEM metodens svaghed er dens forholdsvis begrænsede opløsnings-evne over for lagfølgen ovenover den gode leder, samt dens følsomhed overfor tilstedeværelsen af højspændingskabler, diverse luftledninger, elektriske hegn, jordkabler m.m. For at undgå forstyrrende støj på måledata er det nødvendigt at holde mindst 100 meters afstand til sådanne installationer.

#### *Multielektrode profilering (MEP)*

Ved anvendelsen af den elektriske metode, MEP, hvor der benyttes såvel korte elektrodeafstande (5 meter eller mindre) som lange elektrodeafstande (120 - 240 meter), fås der informationer om lagserien ned til 60-80 m. MEP er følsom over for variationer i såvel højmodstands-lag som lavmodstands-lag og er derfor god til at kortlægge variationer både i magasinet og i dets afgrænsning - forudsat at magasinets tykkelse er af samme størrelsesorden som dybden til dette.

Da MEP-metoden er en profileringsmetode, giver denne metode endvidere en god beskrivelse af de horisontale variationer. Anvendelse af både korte og lange elektrodeafstande gør det muligt i nogle situationer at kortlægge både grundvandsmagasinet og sårbarheden. Det er her en fordel at inddrage andre informationer i tolkningen. Der kan eksempelvis inddrages boreoplysninger, eller enkelte TEM-sonderinger udført langs profilet.

#### *Sammenligning af TEM og MEP*

Variationer i dårligt ledende lag som tørre, sandede og grusede lag registreres ikke af TEM-metoden, hvorimod lerede lag og saltvand med høj ledningsevne let observeres. Da TEM-metodens følsomhed over for tilstedeværelsen af dårligt ledende lag er lille, er metodens følsomhed over for overfladenære variationer i høj- og middelmodstands-lag lille. Dette betyder, at det selv i områder med en meget inhomogen geologi i de overfladenære lag stadig er muligt at opnå gode resultater, når det drejer sig om beskrivelsen af den dybereliggende geologi.

Med TEM-metoden har man bedre mulighed for at kortlægge de dybere grundvandsmagasiners undergrænse (ler eller saltvand) (100 - 200 meter) end med MEP-metoden (60 - 100 meter). Især er TEM-metoden god til at kortlægge en leret bund eller afgrænsning af et grundvandsmagasin, et salt grundvandsspejl eller et lerlag af samme eller større mægtighed end dybden til det. Til gengæld vil TEM-metoden i disse tilfælde ikke give megen information om de overliggende lag.

Endelig er geometrien af det jordvolumen TEM-metoden inddrager i sin opmåling er anderledes end det jordvolumen som inddrages af MEP-målinger. Det skal man være opmærksom på ved design og tolkning af disse målinger.

#### *Kombination af metoder*

Ved kortlægning af grundvandsmagasiner er det vigtigt at kombinere flere typer oplysninger for at få sikkerhed for det optimale kortlægningsresultat. Der kan være tale om kombination af en geoelektrisk metode (MEP eller Slæbegeoelektrik) og en elektromagnetisk metode som f.eks. TEM-metoden. Da de elektriske metoder giver bedre opløsning af de øvre dele af modellen end TEM metoden gør, vil den kombinerede anvendelse af metoderne kunne give bedre opløsning af parametrene i hele modellen.

Eventuelle foreliggende boringsoplysninger skal altid inddrages i tolkningen af de fysiske data, og er der tale om dybtliggende grundvandsmagasiner, kan metoder som gravimetri og seismik indgå i kombination med andre metoder.

### **3.3 Geologiske hovedtyper**

De geologiske hovedtyper i Danmark er skitseret af GEUS (Miljøstyrelsen, 1995b og GEUS, 1997) og gengivet i figur b.1 med beskrivelse i tabel b.1.

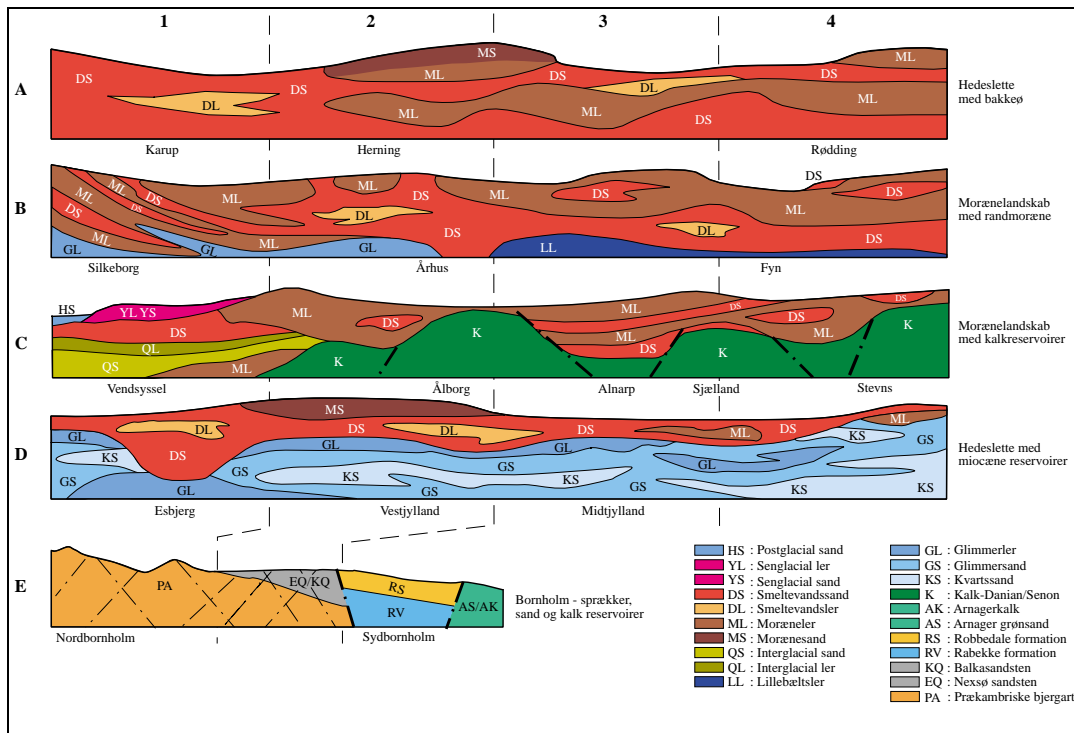
**Tabel b.1**

#### **Beskrivelse af de geologiske hovedtyper**

Type	Beskrivelse af geologisk hovedtype
1.	Hedeslette med frit og/eller spændt grundvandsmagasin i smeltevandsaflejringer (Vestjylland).
2.	Morænelandskab med frit og/eller spændt grundvandsmagasin i smeltevandsaflejringer (Østdanmark).
3.	Morænelandskab med frit og/eller spændt grundvandsmagasin i kalkaflejringer (Limfjordsområdet/Østdanmark).
4.	Morænelandskab/hedesletteaflejringer med frit og/eller spændt grundvandsmagasin i tertiære sandaflejringer (Midt- og Sønderjylland).
5.	Israndsområder med isforstyrrede grundvandsmagasiner i smeltevandsaflejringer.
6.	Områder, der består af grundfjeld eller hærdede sedimentter, med grundvandsmagasiner knyttet til sprækker.

Der er identificeret 6 geologiske hovedtyper, som videre er opdelt på grundlag af, om der er tale om frit/spændt magasin, om der er et eller flere magasiner m.v. (Miljøstyrelsen, 1995b). Af de 6 hovedtyper er

1, 2, 3 og 4 langt de mest geografisk udbredte. Det skønnes, at disse 4 hovedtyper arealmæssigt dækker mere end 90% af samtlige områder med særlige drikkevandsinteresser.



**Figur b.1**  
**Geologiske hovedtyper i Danmark**  
(Miljøstyrelsen, 1995b).

Med udgangspunkt i de 4 første geologiske hovedtyper gennemgås nedenfor, hvilke muligheder der er for at kortlægge lerdæklag og grundvandsmagasiner med geofysiske metoder

### 3.4 Geologisk hovedtype 1, Hedesletten

Hedesletten er geologisk karakteriseret ved udstrakte sandlag, der ofte har stor tykkelse. Afgrænsningerne af grundvandsmagasinerne kan udgøres af glimmerler, moræneler eller smeltevandssler. På hedesletten er der de fleste steder gode muligheder for vandindvinding på grund af de udstrakte sandlag.

Der kan dog være problemer med vandkvaliteten, da der mange steder ikke træffes lerlag af betydning, der kan beskytte ressourcen. Højt nitratindhold af vandet kan derfor forekomme i stor dybde. Beskyttende lerlag over grundvandsmagasinerne på hedesletten kan være dybtliggende, og det er derfor væsentligt at kortlægge denne dybere-liggende beskyttelse. Er der tale om dybe borer, kan brunt vand

endvidere udgøre en kvalitetstrussel mod grundvandet. På hedesletten ses et fladt terræn, der dog brydes af bakkeøerne, der ofte har en anderledes geologisk opbygning.

Hedesletten er den dominerende geologiske hovedtype i Jylland vest for hovedopholdslinien, men kan også findes andre steder i landet.

#### *Kortlægning af lerdæklag*

Kortlægning af lerdæklag på hedesletten vil ofte kræve geofysiske metoder der kan give informationer fra større dybder. Lerdæklagene på hedesletten kan geologisk bestå af smeltevandsler, moræneler eller glimmerler (i Vestjylland). Valget af geofysisk metode til kortlægning af lerdæklag bør bero på en forudgående vurdering af de geologiske forhold, eksempelvis ud fra boreoplysninger. Ud fra dette kan det afgøres, hvilken type lerdæklag der kan være tale om, samt i hvilke tykkelser og dybder lerlagene kan forventes.

#### ***Elektriske og elektromagnetiske metoder***

Når det drejer sig om kortlægning af lerdæklag på hedesletten, vil det være de elektriske og elektromagnetiske metoder der er de mest egnede. Det er her en forudsætning at lagene kan detekteres med disse metoder. I denne henseende gælder på hedesletten to forudsætninger:

- 1) den generelle forudsætning, at lagene skal have en tykkelse af samme størrelse som det overdække der findes over laget.
- 2) den geologiske forudsætning, at det beskyttende lerlag skal have en modstandskontrast til de omkringliggende sedimenter for at kunne adskilles herfra. Dette er specielt et problem hvor det beskyttende lerlag udgøres af glimmerler, idet glimmerleret (der ofte er kendetegnet ved et højt siltindhold), kan have en høj modstand, der stedvis ikke kan skelnes fra sand.

#### ***dybde < 30 m***

Er området præget af overfladenære (indtil 30 m u.t.) lerdæklag, kan slæbegeoelektrik og MEP udgøre egnede metoder til kortlægning af lagene.

#### ***dybde 30 - 60 m***

Findes de beskyttende lerlag dybere (fra 30 til 60 m u.t.), kan MEP og TEM være egnede metoder. TEM-metoden kan her have en fordel, da den er relativt ufølsom over for variationer i de mest terrænnære dele af geologien.

#### ***dybde > 60 m***

Er området præget af at beskyttende lerlag findes i intervallet fra 60 til 150 m u.t., kan TEM være en egnet metode til sårbarhedskortlægning, dog gælder ovennævnte to forhold også for anvendelse af TEM-metoden.



## *Kortlægning af grundvandsmagasiner*

Som beskrevet i det foregående, kan grundvandsmagasinerne på hedesletten være dybtliggende. Geofysiske metoder til kortlægning på hedesletten skal derfor kunne beskrive forholdene i større dybder, op til ca. 200 m u.t.

### ***Med TEM***

TEM-metoden vil i nogle tilfælde være egnet til kortlægning af grundvandsmagasiner på hedesletten. Ovennævnte forudsætninger skal i denne henseende være opfyldt. På hedesletten vil der ofte ikke findes lag med lav modstand (gode elektriske ledere), som er det ideelle for at opnå gode data med TEM-metoden. Dette giver en øget risiko for støjpåvirkede data. Da bunden af magasinet kan være dybtliggende, kan det i nogle tilfælde være gavnligt at anvende TEM-metoden i en version med større sendermoment, hvilket ved traditionel TEM vil sige en større loop-størrelse end 40x40 meter, eller større strøm i loopet.

### ***Elektriske metoder***

Hvis der er tale om magasiner inden for de øverste 60-100 m u.t., kan MEP komme på tale som en metode hvor både sårbarheden og udstrækningen af magasinet kan belyses. Her kan det være hensigtsmæssigt at underbygge resultaterne med enkelte TEM-målinger langs profilet.

Hvis det drejer sig om kortlægning af grundvandsmagasiner i bebyggede områder, hvor der ikke kan måles med TEM, må kortlægningen ske med elektriske metoder som MEP eller med konventionel VES (vertikal elektrisk sondering, punktprofil), sidstnævnte helst som ortogonal måling med stort elektrodeudlæg. Ortogonal måling betyder at der udføres to sonderinger i samme punkt, men med udlæg vinkelret på hinanden, hvilket giver mulighed for at kvalitetsvurdere den information der kan udtolkes fra en VES. Ortogonale VES som supplement til geoelektriske linieprofiler eller MEP profiler kan desuden anbefales som kvalitetskontrol af disse.

### ***Gravimetri og seismik***

Til regional kortlægning af dybtliggende grundvandsmagasiner på hedesletten er gravimetri kombineret med seismik anvendt med succes i den sydvestlige del af Jylland. Disse metoder i kombination giver mulighed for kortlægning af dybtliggende strukturer, som ofte vil være vanskeligt detekterbare med elektriske og elektromagnetiske metoder. Da seismikken er bedst til at afspejle forholdene i de dybere liggende strukturer, må det betragtes som en fordel at kombinere seismiske målinger med en metode, der kan opløse den overfladenære geologi. Her kan Slæbegeoelektrik eller MEP komme på tale.

### ***Nødvendig kortlægning***

Det ideelle er at vide alt om geologien hele vejen ned til de dybtliggende magasiner - men hvis et dybtliggende magasin ligger godt beskyttet af en kompleks geologi med mange lerlag (eksisterende viden fra boringer eller i øvrigt sandsynligt) er det ikke altid strengt nødvendigt med en detaljeret kortlægning af de øvre 30-50 m.

## **3.5 Geologisk hovedtype 2, Øst Danmark**

Den geologiske hovedtype "Øst Danmark" er karakteriseret ved at lerdæklagen overvejende består af moræneler, og grundvandsmagasinet består af smeltevandssand. De nedre afgrænsninger af grundvandsmagasinerne er typisk fedt ler i form af tertiært ler, moræneler eller smeltevandssler. Den nedre afgrænsning af grundvandsmagasinerne træffes typisk fra 50 til 150 meter under terræn, og derfor har lagsammensætningen i de mere terrænnære dele af geologien ofte afgørende betydning for grundvandsmagasinet beskyttelsesgrad.

Grundvandsmagasinerne i denne hovedtype er ofte knyttet til "begravede dale", som er dalførøb i landskabet fra før istiderne, der under istiderne er udfyldt med materialer der i dag gør de begravede dale til egnede grundvandsmagasiner. Denne hovedtype er dominerende i området fra hovedopholdslinien og mod øst.

### *Kortlægning af lerdæklag*

Da de beskyttende lerdæklag ofte findes i de mere terrænnære dele af geologien, vil metoder, der beskriver forholdene indtil ca. 30 meter under terræn, være velegnede til kortlægning af disse lag. Til dette formål er slæbegeoelektrik og MEP derfor velegnede. I de tilfælde, hvor de beskyttende lerlag træffes dybere, kan TEM endvidere i nogle tilfælde bidrage med oplysninger. Den større indtrængningsdybde ved MEP kan også give mulighed for kortlægning af dybereliggende beskyttende lag (indtil ca. 60 m u.t.).

### *Kortlægning af grundvandsmagasiner*

I denne hovedtype er det i særdeleshed TEM, der er velegnet til kortlægning af grundvandsmagasinerne. Grundvandsmagasinerne ligger i passende dybde i forhold til TEM-metodens indtrængningsdybde (op til ca. 150 meter), og det at den nedre afgrænsning af grundvandsmagasinerne som regel udgøres af fedt ler, som er en god elektrisk leder, medvirker til at TEM-metoden er et stærkt værktøj her. Gravimetri har tidligere været anvendt til at kortlægge de overordnede forløb af grundvandsmagasinerne i denne hovedtype.

I de tilfælde hvor den nedre afgrænsning af grundvandsmagasinerne træffes indtil ca. 60 m u.t., er det muligt med MEP-metoden både at

kortlægge grundvandsmagasinet og lerdæklagen over grundvandsmagasinet.

### **3.6 Geologisk hovedtype 3, Kalk og kridt**

Denne hovedtype er karakteriseret ved, at vandindvindingen enten foregår fra kalk- og kridtmagasiner eller fra sandlag i niveauet over kalk- og kridtmagasinerne. Kalk- og kridtoverfladen træffes i dybder fra ca. 20 til ca. 70 m u.t. Hvor grundvandsmagasinerne er knyttet til sandlag over kalk eller kridt, kan disse være afgrænset af områder med moræneler eller smeltevandsler. Egentlige afgrænsninger i kalk- og kridtmagasinerne kan være vanskelige at fastlægge, men de kan være knyttet til eksempelvis mindre porøse zoner eller forkastninger. Lerdæklagen findes i niveauet over kalk og kridt. Hovedtypen findes i områder på Sjælland, Djursland, Himmerland, Nordjylland, Lolland, Langeland m.m.

#### *Kortlægning af lerdæklag*

Kortlægning af lerdæklag i hovedtype 3 er i stor udstrækning sammenlignelig med forløbet i hovedtype 2. Da de beskyttende lerdæklag ofte findes i de mere terrænnære dele af geologien, vil metoder der beskriver forholdene indtil ca. 30 meter under terræn være velegnede til kortlægning af disse lag. Til dette formål er slæbegeoelektrik og MEP derfor velegnede. I de tilfælde hvor de beskyttende lerlag træffes dybere, kan TEM endvidere i nogle tilfælde bidrage med oplysninger. Den større indtrængningsdybde ved MEP kan også give mulighed for kortlægning af dybereliggende beskyttende lag (indtil ca. 60 m u.t.).

#### *Kortlægning af grundvandsmagasiner*

I denne hovedtype vil det være af betydning for tilrettelæggelsen af kortlægningen om grundvandsmagasinerne er knyttet til sandlag i geologien over kalk/kridt eller til selve kalk- eller kridtmagasinet.

#### *Magasiner i sand over kalk/kridt*

Er magasinerne knyttet til sandlage over kalk eller kridt, som er hydraulisk adskilt fra denne, vil de normalt være meget vanskelige at kortlægge. Dette skyldes dels den manglende kontakt til kalk/kridt, hvor de adskillende lerlag ikke er tykke nok til at de kan identificeres, og dels at sandmagasinerne skal være mindst lige så tykke som dybden til dem for at de kan kortlægges. Egnede metoder til kortlægning kan her være TEM, MEP og måske i nogle tilfælde slæbegeoelektrik, hvis magasinerne er meget overfladenære.

#### *Vandførende horisonter*

I såvel kalk (Selandien og Danien) som skrivekridt (Maastrichtien) vides det, at vandføringsevnen især er knyttet til lagparallelle spræk-

ker i hærdnede lag, eller endnu oftere i overgangen mellem hærdnede og uhærdnede lag. Ofte er der tale om meget få vandførende horisonter i en boring, og ingen terræn-geofysisk metode kan anvendes til at forudsige eller kortlægge disse horisonter.

Derimod har det vist sig at de vandførende horisonter i de enkelte lokaliteter/områder ofte er knyttet til bestemte lithostratigrafiske enheder i såvel Selandien og Danien kalk som i skrivekridt. Kendskabet til disse lithostratigrafiske enheder kan normalt ikke opnås ud fra de prøver som normalt udtages af brøndborere, og fremgår derfor i reglen ikke i boreprofiler af eksisterende borer. Geofysisk borehulslogging har vist sig endog særdeles nyttig ved lithostratigrafiske beskrivelser af kalk- og kridtlagfølger i ny og i gamle borer, samt ved undersøgelse af de lithostratigrafiske enheders vandføringsevne og porevandsalinitet. Tilstedeværelse af og udbredelse af sådanne lithostratigrafiske enheder med særlig hyppig eller særlig stor vandføringsevne i kalk og kridt vil i reglen skulle kortlægges ved en kombination af log-stratigrafiske og strukturgeologiske undersøgelser – sidstnævnte i visse tilfælde understøttet af gammel eller ny seismik.

### ***Forkastninger***

Kun i forholdsvis få tilfælde vil en særlig stor vandføringsevne i kalk eller kridt være knyttet til en vertikal tektonisk knusningszone (forkastningszone), hvor de hærdnede lag (kompetente lag) da vil være generelt opsprækkede. Hvor indikationer på en forkastningszone optræder, for eksempel fra korrelationen af borehulslogs i flere borer, vil i visse tilfælde refraktionsseismik, i andre tilfælde refleksionsseismik kunne anvendes til at verificere og kortlægge eksistensen og forløbet af en sådan forkastningszone. Begge disse seismiske metoder er imidlertid relativt dyre.

### ***Dybden til saltvand***

I kalk og kridt vil den nedadtil begrænsende faktor for muligheden for indvinding som nævnt være saltholdigt grundvand. Dybden til dette kan som også allerede nævnt fastlægges fra terræn med enten MEP eller TEM. Hvilken af disse metoder der bør vælges, vil bl.a. afhænge af den forventede dybde: Ned til 60 m bør MEP foretrækkes, og ved større dybde vil TEM være at foretrække. Hvis det ferske grundvand når dybere end 125-150 m, vil TEM ikke kunne give et bud på dybden til saltvandet. Hvor Grønsandskalk (Selandien kalk) er overlejret af Kertemindeler, vil kortlægning af dybden til saltholdigt grundvand formodentlig ligeledes være vanskelig med TEM, på grund af lerets lave resistivitet, 15-20 ohmm. En størrelsesorden på dybden til saltvandet vil i dette tilfælde antagelig bedre kunne opnås ved traditionel geoelektrisk sondering (VES).

### 3.7 Geologisk hovedtype 4, østlige del af Midt- og Sønderjylland

Hovedtypen består af glacialt præget morænelandskab, ofte med en kompliceret geologisk opbygning. I denne geologiske hovedtype foregår vandindvindingen fra sandaflejringer. Der kan være tale om både kvartære og tertiære sandaflejringer. Lerdæklagene over grundvandsmagasinerne kan være både smeltevandsler, moræneler og glimmerler. Grundvandsmagasinerne og den nedre afgrænsning af grundvandsmagasinerne kan være dybtliggende (op til ca. 150 m u.t.). Den nedre afgrænsning kan bestå af glimmerler eller fedt ler. Beskyttende lerdæklag over magasinerne kan være beliggende i området fra terræn og ned til over 100 m u.t.

#### *Kortlægning af lerdæklag*

Forud for kortlægning af lerdæklag i denne hovedtype er det vigtigt at få et overblik over, i hvilket dybdeniveau og i hvilken tykkelse lerlagene kan forventes. Ud fra denne viden kan der tages stilling til om det er muligt at kortlægge lerlagene, samt hvilken metode der er egnet til kortlægningen.

For at kunne kortlægge lerlagene er det generelt en forudsætning, at de har egenskaber og optræder i en tykkelse så kortlægning er mulig, jf. forudsætningerne omtalt under kortlægning på hedesletten.

#### *dybde < 30 m*

Hvis det vurderes at lerlag indtil 30 m u.t. er afgørende for beskyttelsen af grundvandsmagasinet, kan slæbegeoelektrik og MEP være egnede metoder.

#### *dybde 30-60 m*

For lerlag i intervallet fra 30 m u.t. og til 60 m u.t. kan MEP og TEM være egnede metoder.

#### *dybde > 60 m*

For dybereliggende lerlag vil TEM være den mest egnede metode, dog vil MEP med lange elektrodeudlæg også i nogle tilfælde kunne anvendes her.

#### *Kortlægning af grundvandsmagasiner*

Forud for kortlægning af grundvandsmagasiner i denne geologiske hovedtype er det vigtigt, ud fra eksisterende data et skabe et overblik over om kortlægning af magasinerne er mulig. På grund af den komplicerede geologiske opbygning kan kortlægning af magasinerne være vanskelig, dels som følge af at de vandførende lag er tynde, dels fordi modstandskontrasten til de omkringliggende aflejringer kan være beskeden (glimmerler i forhold til vandmættet sand).

Vurderes det at forudsætningerne for at kortlægge grundvandsmagasinerne er opfyldte, kan TEM og MEP komme på tale i det omfang magasinerne ikke er dybtliggende (indtil 60 m u.t.). For dybereliggende magasiner vil TEM være den mest oplagte metode. Sidstnævnte tilrådes belyst ved borehulslogging med induktionslog i mindst én eksisterende PVC-filterudbygget boring, som gennemborer lagserien ned til den ønskede undersøgelsesdybde, eller endnu bedre ved resistivitetslog i en ny undersøgelsesboring forinden denne udbygges med filtterrør.

## 4 Slæbegeoelektrik

### *Andre betegnelser*

PACES (Pulled Array Continuous Electrical Sounding)

### *Anvendt siden*

Ca. 1988

### *Udbredelse*

Meget anvendt.

Udstyret er ikke til salg, men kan leases hos visse firmaer.

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af lerdæklagstykkelse og -sammensætning indtil ca. 30 meters dybde.

### *Metodebeskrivelse*

Slæbegeoelektrik er en videreudvikling af elektrisk linieprofilering med elektrodespyd. Der opmåles med et elektrodeslæb, hvorpå elektroderne er fastmonteret i form af stålcyindre på en slæbeslange. I elektroderne er indbygget præprocesseringselektronik. Gennem slæbeslangen sendes de præprocesserede signaler videre til måleinstrumentellet. Elektrodeslæbet trækkes af et lille bæltekøretøj, hvorpå måleinstrumentellet er placeret.

Ved metoden opnås stor datatæthed og stor produktivitet i felten sammenlignet med traditionelle elektriske metoder.

Slæbegeoelektrik opmåles typisk med 8 elektrodeafstande på samme elektrodeslæb fra  $a = 2$  meter til  $a = 30$  meter.

Der opmåles kontinuert og simultant i alle elektrodeopstillinger, mens elektrodeslæbet trækkes gennem terrænet. Data processeres løbende, og der lagres en måleværdi for hver elektrodeopstilling, omtrentlig pr. én meter. De tætte målinger giver en stor datasikkerhed og en bedre mulighed for støjundertrykkelse, herunder undertrykkelse af geologisk støj.

### *Fordele*

Med metoden er det muligt hurtigt at kortlægge store områder. Den store datatæthed i forhold til traditionelle elektriske metoder giver mulighed for bedre kvalitetsvurdering.

### *Ulemper*

Problemer med elektrisk kontakt i tørke- og frostperioder. Anvendelse begrænset til det åbne land. Begrænset indtrængningsdybde.

### *Dagsproduktivitet*

7-15 km profillinie

### *Undersøgelsesdesign*

Slæbegeoelektrik udføres som en række profillinier inden for det område, der ønskes kortlagt. Når det drejer sig om sårbarhedskortlægning, vil det ofte være hensigtsmæssigt at differentiere tætheden af profillinierne, afhængigt af afstanden til kildepladsen. Hvor linierne ligger tættest, kan afstanden mellem linierne være 100-200 meter, mens den længere ude i oplandet kan være 300-500 meter.

### *Datapræsentation*

Data præsenteres som modstandsprofiler, der viser de tolkede resultater af et opmålt profil, og som isoohmmer fladekort på baggrund af de tolkede målinger. Isoohmmeterkortet vil afspejle modstandsvariationen i et bestemt dybdeinterval.

### *Referencer*

*Sørensen, K. I. & Pedersen, F. F., 1991: Den slæbegeoelektriske metode. Miljøministeriet, Skov- og Naturstyrelsen, Kortlægningsserien 9, 55pp.*

*Vandteknik, 1993, no. 2: Temanummer: Nye metoder til kortlægning af grundvandet.*

*Kurt Sørensen, Verner Søndergård og Richard Thomsen, 1995: Overvågning af grundvandsressourcen baseret på nye geofysiske målemetoder. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, nr. 11, 1995.*



## 5 MEP (Multi Elektrode Profilering)

### *Andre betegnelser*

CVES (Continuous Vertical Electrical Sounding), 2D-geoelektrik

### *Anvendt siden*

1995

### *Udbredelse*

Ny metode, vinder mere og mere udbredelse.

Udstyr kan købes hos flere fabrikanter.

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af dæklagstykkelse og -sammensætning, kortlægning af udstrækning af grundvandsmagasin.

### *Metodebeskrivelse*

Metoden er en videreudvikling af de traditionelle DC-geoelektriske metoder (se under punktprofil). Metoden svarer princippet til mange punktprofiler langs en profillinie. Der arbejdes med en række elektrodespyd forbundet via et multilederkabel til en omskifterboks og et måleinstrument med computer. Fra måleinstrumentet kan adresseres en bestemt elektrodeopstilling. Typisk måles 10 forskellige opstillinger i Wenner-konfiguration med elektrodeafstande  $a$  fra 5 til 120 meter. Opstillingen er opbygget af 4 kabelsekvenser, og der kan "rulles" langs et profil af større længde ved at flytte bageste kabelsekvens til forreste ende af opstillingen. Langs en kilometer kan være ca. 1000 målinger fordelt på de 10 opstillinger.

De mange data muliggør "inversion" af data, som betyder, at data kan tolkes til en modstandsmodel. Modstandsmodellen giver mulighed for en mere eksakt vurdering af lagtykkelser og modstande. Metoden kan anvendes i en række konfigurationer afhængigt af opgaven. Der kan således måles med elektrodeafstande på op til  $a=240$  meter.

### *Fordele*

Stor datatæthed, rimelig stor indtrængningsdybde. Mulighed for inversion af data. Mulighed for kortlægning i byområder.

### *Ulemper*

Moderat dagsproduktivitet med  $a=5$  til  $a=120$ . Feltarbejde ikke muligt i perioder med hård frost. Ækvivalens- og suppressionsproblematik ved inversion af data.

### *Dagsproduktivitet*

Med en opstilling som oven for nævnt fra  $a=5$  m til  $a=120$  meter er dagsproduktiviteten ca. 1 km. Andre opstillingstyper kan forøge eller formindske produktiviteten. Hurtigere udstyr er under udvikling.

### *Undersøgelhedsdesign*

Ved sårbarhedskortlægning anvendes afstande mellem profillinierne, svarende til hvad man bruger ved slæbegeoelektrik, det vil sige at det ofte vil være hensigtsmæssigt at differentiere tætheden af profillinierne, afhængigt af afstanden til kildepladsen. Hvor linierne ligger tættest, kan afstanden mellem linierne være 100-200 meter, mens den længere ude i oplandet kan være 300-500 meter. På grund af den større indtrængningsdybde vil metoden også bidrage med oplysninger om udstrækning af grundvandsmagasinet.

### *Datapræsentation*

Data kan præsenteres som modstandsprofiler, der viser de tolkede resultater af et opmålt profil, og som isoohmmeterkort på baggrund af de tolkede målinger. Isoohmmeterkortet vil afspejle modstandsvariationerne i en bestemt dybde.

### *Referencer*

Halkjær, M. & Pedersen, F. F.: MEP - en ny metode til geologisk detailkortlægning. Vandteknik nr. 8, oktober 1996.

## 6 TEM-sondering (Transient ElektroMagnetisk sondering)

### *Andre betegnelser*

TDEM-sondering (TidsDomæne ElektroMagnetisk sondering).

### *Anvendt siden*

1989 i Danmark.

### *Udbredelse*

Meget anvendt.

Udstyr kan købes hos flere fabrikanter.

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af udstrækning og dybde af grundvandsmagasiner.

Dybden til lag med lav modstand kan bestemmes meget præcist. Metoden er ikke særlig følsom i den terrænnære geologi, så TEM er ikke god til kortlægning af grundvandsmagasinet's sårbarhed. Metoden er under videreudvikling til en "slæbe-metode" i lighed med geoelektrik.

### *Metodebeskrivelse*

TEM er en elektromagnetisk metode. I en kvadratisk spole af tynd ledning på jordoverfladen (typisk 40X40 meter) udsendes en strøm (1-3 A). Denne strøm afbrydes momentant, og derved induceres en hvirvelstrøm i de øverste jordlag under spolen. Hvirvelstrømmen udbreder sig ned gennem jordlagene, og i en modtagerspole placeres midt i senderspølen på jordoverfladen, måles det magnetiske felt hidrørende fra denne. Hvirvelstrømmen vil bevæge sig hurtigt gennem elektrisk dårligt ledende lag som sand og grus, og bremses af gode elektriske ledere som ler. Det målte magnetfelts forløb som funktion af tiden tolkes efterfølgende, og ud fra dette kan modstandsfordelingen i jorden bestemmes.

### *Fordele*

Stor indtrængningsdybde, rimelig høj dagsproduktivitet. Feltarbejde muligt hele året.

### *Ulemper*

Ikke egnet til kortlægning af geologi tæt under terræn (30 m), meget påvirkelig af elektriske installationer og metalgenstande i jorden, derfor ofte uanvendelig i og ved byområder. Begrænset information om ikke ledende lag.

Metoden kræver at der findes en god leder. Hvis dette ikke er opfyldt, kan målinger i værste fald være ubrugelige.

### *Dagsproduktivitet*

Ca. 16 sonderinger, svarende til 1 km<sup>2</sup>.

### *Undersøgelsesdesign*

TEM-kortlægning gennemføres typisk som en fladedækkende kortlægning, hvor målepunkterne fordeles ækvidistant ud over kortlægningsområdet. Målepunkterne lægges typisk med en gennemsnitlig tæthed på 16-18 sonderinger pr. km<sup>2</sup>.

### *Datapræsentation*

Data præsenteres typisk i form af en række kort, der på forskellig vis illustrerer de fremkomne modstandsmodeller ved tolkningen af de enkelte sonderinger. Middelmodstandskort illustrerer fordelingen af modstande i et bestemt koteinterval, kort over koten til den dybeste gode leder vil ofte kunne illustrere bunden af grundvandsmagasinet, og middelmodstandsprofiler viser, hvorledes modstanden varierer langs udvalgte profilsnit gennem kortlægningsområdet.

### *Referencer*

*Auken, E., Effersø, F., Christensen, N. B.:* Transient sondering - en ny og effektiv metode til kortlægning af undergrunden. *Geologisk Nyt* nr. 4. 1993.

*Sørensen, K. & Søndergaard, V.:* Kortlægning af Bedermagasinet - en ny måde at gøre det på. *Vandteknik*, nr. 2, 1993.

*Kurt Sørensen, Verner Søndergård og Richard Thomsen, 1995:* Overvågning af grundvandsressourcen baseret på nye geofysiske målemetoder. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, nr. 11, 1995.

## 7 Slæbetransient sondering

### *Andre betegnelser*

PATEM (Pulled Array Transient Electromagnetic Method)

### *Anvendt siden*

1997

### *Udbredelse*

Ny metode, ikke udbredt.

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af udstrækning af grundvandsmagasiner samt kortlægning af lerdæklagstykkelser.

### *Metodebeskrivelse*

Metoden er en videreudvikling af TEM sonderingsmetoden. Der anvendes små senderspoler (fra 2x2 til 3x5 meter), hvori der udsendes stor strøm (op til 50 A). Senderspolen er udformet som et tæppe, der sammen med modtagerspolen (anbragt på en slæde), trækkes hen over jordoverfladen af et lille trækkøretøj. Sender og modtager er anbragt på trækkøretøjet sammen med strømforsyningen. Instrumentellet styres af PC, der er indbygget i modtageren. Måleprocessen, dataopsamlingen og datalagringen foregår automatisk, samtidig med at spolerne slæbes gennem terrænet.

Metoden har hovedsagelig de samme kortlægningsfordele og begrænsninger som den traditionelle TEM sondering.

Med den slæbetransiente metode opmåles kontinuert og derfor erhverves et meget stort antal sonderinger tæt placeret langs med profilet. Gennem en midling af disse tæt opmålte sonderinger kan man reducere den datastøj fra omgivelserne, som alle transiente opmålinger har. Derved opnås en meget høj datakvalitet og reproducerbarhed.

En væsentlig fordel ved metoden er at man gennem de kontinuerte opmålinger langs profilet betydelig lettere end ved traditionel TEM sondering kan klarlægge hvornår der er koblinger til kulturelle ledere, det være sig højspændingsledninger, elektriske hegn o.lign., eller anormal stor støj fra elektriske installationer. Herved kan disse fejlbehæftede sonderinger fjernes fra datamaterialet. Dette mindsker risikoen for fejltolkninger og derved opnås en betydelig større tolkningsikkerhed.

Metoden er i modsætning til TEM sondering også følsom i den overfladenære geologi.

#### *Fordele*

Høj datatæthed, stor indtrængningsdybde og høj dagsproduktion. Feltarbejdet kan foretages hele året.

#### *Ulemper*

Kan ikke anvendes i tætbebyggede områder. Samme begrænsninger som TEM-metoden, men på grund af større datatæthed vil kasserede målinger på grund af støj ikke betyde lige så meget.

#### *Dagsproduktivitet*

10 – 16 profilkilometer, svarende til 2.5 til 4 km<sup>2</sup> fladekortlægning ved 250 meter mellem profillinierne.

#### *Undersøgelsesdesign*

Slæbetransient kortlægning udføres som en række profillinier inden for det område, der ønskes kortlagt. Det kan være hensigtsmæssigt at differentiere tætheden af profillinierne i forhold til geologiens variation. Typisk anvendes en profillinie tæthed på 250 meter. På grund af metodens følsomhed overfor den overfladenære geologi kan den suppleres geoelektriske opmålinger foretaget til bestemmelse af lerdæklagstykkelse og dermed øge tolkningssikkerheden betragteligt.

#### *Datapresentation*

Data kan præsenteres som modstandsprofiler, der viser de tolkede resultater af et opmålt profil eller som middelmodstandskort som ved den traditionelle TEM sondering.

#### *Referencer*

ATV- Komiteen vedrørende grundvandsforurening, 1997. Grundvandsforskningen i Danmark 1992 – 96.

## 8 Punktprofil

### *Andre betegnelser*

DC-sondering, Schlumberger-sondering, VES (vertikal elektrisk sondering)

### *Anvendt siden*

1960'erne.

### *Udbredelse*

Tidligere den mest anvendte metode til kortlægning af grundvandsmagasiner, anvendes nu kun sjældent.

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af dæklagstykkelse og -sammensætning, kortlægning af udstrækning af grundvandsmagasin.

### *Metodebeskrivelse*

Punktprofil er en DC-geoelektrisk metode. Der anvendes 4 elektrodespyd, hvoraf de 2 er måleelektroder og de 2 andre er strømoelektroder. Måleelektroder opstilles med en bestemt afstand, og der foretages målinger af spændingsfaldet over disse, mens strømoelektroderne flyttes successivt længere væk. Målingerne vil afspejle modstandsforholdene i stigende dybde med stigende afstand ud til strømoelektroderne.

De målte modstande kan efterfølgende tolkes, og omsættes til en modstandsmodel, der viser modstandsvariationerne indtil ca. 100 meters dybde (ved udlægslængde  $L/2$  på 400 meter).

### *Fordele*

Mulighed for detaljeret belysning af geologien i de mere terrænnære dele.

### *Ulemper*

Kræver 3 personer til feltarbejde, moderat produktivitet, risiko for fejltolkninger i geologisk heterogene områder. Feltarbejde ikke muligt i perioder med hård frost. Ækvivalens- og suppressionsproblematik ved tolkning.

### *Dagsproduktivitet*

Afhænger af afstanden mellem de enkelte målepunkter. Typisk dagsproduktivitet ca. 8 sonderinger.

### *Undersøgellesdesign*

Metoden er meget følsom over for inhomogeniteter og afvigelser fra en planparallel geologisk model i kortlægningsområdet, idet dette kan lede til fejlagtige tolkninger. Eksisterer der et overordnet kendskab til forløb af de geologiske strukturer, er der mulighed for at anvende denne viden til at placere målingerne mest optimalt. Forudgående geoelektrikprofilering kan også medvirke til at sikre placering i områder, hvor geologien er mest homogen. Tætheden af sonderingerne ligger ofte i størrelsesordenen 8 pr. km<sup>2</sup>, men kan også være større.

Ortogonal sonderinger, dvs. to sonderinger i samme punkt, vinkelret på hinanden, reducerer den fejl som opstår på grund af afvigelser fra den planparallelle geologiske model. Ortogonale sonderinger er velegnede som kvalitetssikring af geoelektriske linieprofiler og MEP profiler.

### *Datapræsentation*

Data præsenteres oftest som tolkede modeller, enten på tabelform, eller som plot, der viser de målte data, og den model, der tilpasser data.

### *Referencer*

*Skov- og Naturstyrelsen: Geofysik og råstofkortlægning. Råstofkontorets kortlægningsserie nr. 5, 1987.*



## 9 Linieprofilering

### *Andre betegnelser*

Wenner-profilering, geoelektrisk profilering

### *Anvendt siden*

1960'erne.

### *Udbredelse*

Tidligere meget udbredt, dog mest inden for råstofkortlægning og ingeniørgeologisk "blødbunds" kortlægning. I dag i stor udstrækning erstattet af videreudviklede metoder, der benytter sig af samme måleprincip (slæbegeoelektrik og MEP).

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af dæklagstykkelse og sammensætning.

### *Metodebeskrivelse*

Linieprofilering er en DC-geoelektrisk metode. Der anvendes 4 jordspyd med lige stor afstand imellem, hvor der sendes strøm ud over de to yderste, og måles spændingsfald over de to inderste (eller omvendt). Opstillingen flyttes langs en forudbestemt linie gennem måleområdet. Ved at anvende forskellige afstande mellem elektroderne, kan der tilvejebringes information om modstandsforholdene i forskellige dybder. Der kan eksempelvis anvendes elektrodeafstande på  $a=10, 20$  og  $30$  meter.

### *Fordele*

Nem metode at arbejde med, måleresultater direkte tolkelige.

### *Ulemper*

Der kræves 3 personer til feltarbejde. Moderat dagsproduktivitet. Feltarbejde ikke muligt i perioder med hård frost.

### *Dagsproduktivitet*

Afhænger af hvilken elektrodeafstand og afstand mellem målepunkter der anvendes. Anvendes eksempelvis 30 meter mellem elektroderne og 60 meter mellem målepunkterne skønnes dagsproduktiviteten at ligge på 2-4 km profillinie, afhængigt af områdets tilgængelighed.

### *Undersøgellesdesign*

Som ved slæbegeoelektrik og MEP.

### *Datapræsentation*

Data præsenteres typisk som isoohmmeter kort, der illustrerer modstanden inden for det kortlagte område for en af elektrodeafstandene. Eksempelvis et kort, der illustrerer, hvorledes modstanden på elektrodeafstanden  $a=30$  meter varierer geografisk. Disse kort kan, efter en geologisk tolkning, bruges til at vurdere, hvorvidt der er tale om sand eller ler i dæklagene, og dermed bruges til at udpege de sårbare områder.

### *Referencer*

*Skov- og Naturstyrelsen: Geofysik og råstofkortlægning. Råstofkontorets kortlægningsserie nr. 5, 1987.*

## 10 Gravimetri

### *Andre betegnelser*

Tyngdemålinger

### *Anvendt siden*

Slutningen af 1950'erne i grundvandssammenhæng.

### *Udbredelse*

Ikke særlig udbredt. Der foreligger dog et omfattende datamateriale, hvor hele Danmark er kortlagt i et regionalt net med 1 km mellem målepunkterne. Dette materiale kan i nogen tilfælde afsløre overordnede strukturer med vandindvindingsmæssig interesse.

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af overordnede geologiske strukturer, såsom begravede dalsystemer. Anvendt i forbindelse med kortlægning af dybtliggende grundvandsmagasiner.

### *Metodebeskrivelse*

Gravimetri baserer sig på måling af tyngdefeltet. Tyngdefeltet vil variere alt efter hvilke geologiske materialer der befinder sig i jorden, og det der kortlægges er således massefyldefordelingen i undergrunden. Variationerne skyldes, at forskellige geologiske aflejringer har forskellig massefylde.

Korrekt tolkning af en gravimetrisk kortlægning forudsætter et rimeligt forhåndskendskab til områdets geologi, eksempelvis fra borer, ligesom kombination med andre geofysiske metoder forbedrer tolkningsmulighederne. Disse oplysninger skal bruges til at opstille en generel geologisk model, der kan bruges til tolkninger i hele området.

### *Dagsproduktivitet*

Ca. 30 målepunkter pr. dag, herudover en del indledende arbejde

### *Undersøgelsesdesign*

Afstand mellem de enkelte målepunkter kan ligge i størrelsesordenen 100-300 meter. Afstanden mellem punkterne vil afhænge af størrelsen af de strukturer der ønskes kortlagt. Punkterne skal kotesættes med 2 cm nøjagtighed for en efterfølgende korrekt beregning.

### *Datapræsentation*

Data kan præsenteres som kort eller profiler der illustrerer tyngdeanomalien, som vil betegne afvigelser fra det generelle tyngdebillede for området. Kortene kan vise forløbet af overordnede strukturer inden for området. 2D og 3D modellering af datasættene er mulig. Forud for at data kan tolkes, er det ofte nødvendigt at foretage en filtrering af de målte data, ligesom det er nødvendigt at foretage en regional-residual separation.

### *Referencer*

*Torge, Wolfgang, 1989: Gravimetry. Forlaget Walter De Gruyter.*

## 11 Refleksionsseismik med høj opløselighed

### *Andre betegnelser*

Shallow seismik

### *Anvendt siden*

Seismiske undersøgelser har været anvendt i Danmark siden 1930'erne til olieefterforskning.

### *Udbredelse*

Ikke særlig udbredt. Der foreligger dog et eksisterende datamateriale med profiler udført i forbindelse med olieefterforskning. Dette materiale kan i nogen tilfælde afsløre overordnede strukturer med vandindvindingsmæssig interesse. For nylig anvendt i forbindelse med kortlægning af dybtliggende grundvandsmagasiner i Ribe formationen.

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af overordnede geologiske strukturer, såsom begravede dalsystemer og forkastningszoner. Kortlægning af dybe grundvandsmagasiner.

### *Metodebeskrivelse*

Seismik er en akustisk metode. Fra en kunstig lydkilde, typisk dynamit, udsendes en kort skarp puls som forplanter sig ned gennem jordlagene. Fraktioner af denne elastiske bølge reflekteres fra overgangen mellem jordlag med forskellige akustiske kontraster som følge af ændringer i jordlagenes densitet, porøsitet etc.

Ved hjælp af et stort antal geofoner på jordoverfladen kan man måle lydets udbredelse i jorden, og herved beregne lydets hastighed og kortlægge jordlagenes udbredelse. Lydbølgen bevæger sig hurtigt gennem faste og hårde bjergarter som grundfjeld, kalk- og kridtbjergarter og ler, mens lyd hastigheden i ukonsoliderede ikke sammenkittede jordlag som f.eks. sand og grus er langsommere. Lydhastigheden stiger typisk med dybden.

Metoden er i tilfælde med god boringsdækning egnet til bestemmelse af et områdes lithologi og stratigrafi og er suveræn til bestemmelse af overordnede strukturelle og tektoniske forhold, såsom forkastningszoner, begravede dale etc. Metoden er ikke egnet til kortlægning af de øvre jordlag ned til ca. 50 m u.t., mens der under gunstige forhold kan opnås informationer ned til minimum 500 m dybde.

Såfremt der er en tydelig forskel i lyd hastigheden mellem de enkelte lag, og at lyd hastigheden stiger nedad i lagfølgen fra lag til lag, kan den refraktionsseismiske metode anvendes. Dette er dog sjældent tilfældet i Danmark, hvor moræneler/ler med relativ høj hastighed ofte overlejrer sandmagasiner, som har lavere hastighed.

#### *Fordele*

Under gunstige forhold (øvre jordlag bestående af ler, eller lyd kilde tæt på grundvandsspejlet) kan der normalt opnås stor indtrængningsdybde. En af de få metoder, hvor det er muligt at tilvejebringe oplysninger om dybtliggende grundvandsmagasiner (200-400 m u.t.)

#### *Ulemper*

Kostbar sammenlignet med elektriske og elektromagnetiske metoder. Kræver god akustisk kontakt i jordlagene, ikke mindst i de øvre jordlag, hvor lyden hurtigt vil dæmpes og spredes i ukonsoliderede bjergarter som f.eks. sand over grundvandsspejlet. For at opnå en optimal datapræsentation kræves ofte omfattende databearbejdning.

#### *Dagsproduktivitet*

Ca. 1 km profil pr. dag

#### *Undersøgelsesdesign*

Landseismiske undersøgelser udføres langs en linie, hvor geofonerne er fordelt med lige store afstande og lyd kilden er placeret enten centralt eller for enden af kilden. Afstanden mellem linierne vil afhænge af områdets geologiske kompleksitet.

#### *Datapræsentation*

Seismiske profiler præsenteres ved datasektioner med en horisontal længdeakse og tovejstiden for refleksioner som vertikal akse. Kendes intervalhastighederne for de respektive jordlag, kan der udarbejdes sektioner med dybde som vertikal akse, ligesom der kan udarbejdes migrerede sektioner, hvor jordlagene afbildes mere rumligt korrekt på sektionerne.

#### *Referencer*

*Skov- og Naturstyrelsen, 1987: Geofysik og råstofkortlægning. Råstofkontorets kortlægningsserie nr. 5, 1987.*

## 12 Andre geofysiske overflademetoder

I specielle tilfælde finder andre metoder end de foran beskrevne metoder anvendelse i forbindelse med grundvandsproblemstillinger.

### 12.1 Georadar

En induktiv, elektromagnetisk målemetode. Metoden kan give yderst detaljerede informationer om geologien til dybder på op til ca. 10 meter, hvilket giver metoden en mulig relevans inden for kortlægning af dæklagstykkelse og -sammensætning.

Metoden har dog så vidt vides ikke været anvendt til dette formål, sandsynligvis fordi signalerne har svært ved at gennemtrænge lerlag, og indtrængningsdybden er meget begrænset i sand med højt lerindhold.

Med georadar kan der opnås en stor dagsproduktivitet, da måleudstyret sættes bag på en traktor.

### 12.2 Stang-slingram

Elektromagnetisk, induktiv metode. Metoden er en profileringsmetode, der er enmandsbetjent. Indtrængningsdybden er 5-7 meter, og metoden har svært ved at trænge igennem lag med lav elektrisk modstand.

Metoden er hurtig at arbejde med, men den lille indtrængningsdybde og metodens problemer med at gennemtrænge lerlag gør, at den ikke har opnået nogen udbredelse i forbindelse med kortlægning af dæklagstykkelse og -sammensætning i grundvandsmagasiner.

Metoden kan være velegnet til at kortlægge overfladenære geologiske inhomogeniteter, og anvendes inden for lokalisering af nedgravede tønder o. lign.

Ved anvendelse af stang-slingram skal man være opmærksom på de samme fejlkilder som ved øvrige elektromagnetiske metoder.

## 13 Geofysiske borehulsmetoder

### 13.1 Anvendelse

Borehulsmetoder/loggingmetoder kan anvendes, når der ønskes mere detaljerede informationer i dybden end den, der kan skaffes fra de geofysiske overflademetoder. Det kan dels dreje sig om at skaffe flere oplysninger om geologien i eksisterende borer, som måske er mangelfuldt beskrevet (borehulslogs), dels om logs optaget under selve borearbejdet (ellogboringer).

Logging baserer sig på en målesonde der sænkes ned i boringen. Sonden er forbundet via kabler til et måleinstrument på jordoverfladen, hvor det målte signal registreres sammen med den aktuelle dybde som sonden befinder sig i.

Logging kan anvendes til mere præcist at fastlægge laggrænser og lagegenskaber, eksempelvis i forbindelse med skylleboringer, hvor der kan være en betydelig opblanding af de opborede materiale. En del logtyper kræver direkte kontakt til formationen, hvorfor de kun kan udføres under grundvandspejlet og i uforede borer, der endnu ikke er filtersat.

### 13.2 Ellogboring

Ellogboring er en nyere metode udviklet ved Geofysisk afdeling, Århus Universitet. Ved denne metode måles der direkte under borearbejdet, idet sonden er monteret på en hul boresnegl. Denne metode giver desuden mulighed for udtagning af niveaubestemte vandprøver under borearbejdet, så eventuel vandkemisk lagdeling i grundvandsmagasinet kan klarlægges. Ellogmetoden beskrives i appendix c.

I det følgende gives en kort beskrivelse af de relevante loggingmetoder i relation til grundvandsproblemstillinger.

### 13.3 Gammalog

Den naturlige gammalog baserer sig på registrering af den naturlige gammastråling. Metoden registrerer den naturlige radioaktive gammastråling fra isotoper af visse grundstoffer i de geologiske aflejringer. Den generelle sammenhæng er således, at lerede aflejringer har en høj gammastrålingsintensitet, mens sand og kalk/kridt aflejringer har en lavere intensitet.

En afgørende fordel ved gammalogen er, der ikke stilles krav til kontakt til den geologiske formation og at den kan anvendes i såvel forede som uforede borehuller og over og under vandspejlet. Modellen er kun et værktøj i en fortsat proces, hvor det hele tiden må overvejes, om indsamling af nye data og resultater af detaljeret kortlæg-



ning bør give anledning til ændringer af den hydrogeologiske tolkningsmodel med tilhørende antagelser.

Resultaterne af en gammalog tolkes i reglen kvalitativt, idet loggen bruges som en indikator på lerindholdet i aflejringerne. Loggen er endvidere gavnlige at anvende i kombination med eksempelvis elektriske logs, idet den her vil kunne anvendes til en bedre forståelse af de målte modstandsniveauer.

#### **13.4 Resistivitetslog**

Resistivitetslogs anvendes til at måle den elektriske modstand i aflejringerne i en boring. En resistivitetslog kræver elektrisk kontakt til formationen, og kan derfor kun udføres i væskefyldte, uforede boringer. Resistivitetslogs finder derfor mest anvendelse i de situationer, hvor der ønskes yderligere informationer om en boring, inden der tages stilling til, hvorledes boringen skal filtersættes. En speciel anvendelse er kontrol af filterplacering, idet den i et PVC-forerør kun giver målerespons netop gennem slidseåbningerne i filteret.

#### **13.5 Induktionslog**

Induktionslog er en induktiv, elektromagnetisk log. Loggen kan bruges til at beregne den elektriske modstand i formationen. Loggen kræver ikke direkte kontakt til borehulsvæggen, og kan anvendes såvel over som under grundvandsspejlet. Den reagerer kraftigt på metal, den kan derfor ikke anvendes i metalforede boringer, ligesom samlinger med metalskruer på PVC-rør vil påvirke loggen.

En vigtig anvendelse af induktionslog er kontrol af de forventede resistiviteter eller resistivitetsforskelle i lagserien, i et givet undersøgelsesområde *forinden planlægningen* af de geofysiske kortlægninger. Dette kan ske i eksisterende boringer uden jernforerør i de aktuelle dybdesektioner, dvs. i boringer med PVC-forerør.

#### **13.6 Ledningsevnelog**

Ledningsevnelog er en simpel logtype, som består i måling af ledningsevnen af vandet i en boring. Loggen kan også anvendes, mens der pumpes på boringen, og kan herved bruges til undersøgelse af ledningsevnen i det vand, der strømmer ind i boringens filterstrækning. Ledningsevnen er en god parameter at have kendskab til, hvis man befinder sig i et område, hvor der er problemer med saltvand i boringerne. Loggen kan her bruges til undersøgelse af, i hvilke niveauer saltvandspåvirkningen sker.

Ledningsevnelog kan også være særdeles nyttige til undersøgelse af det indstrømmende vand i boringer, der er forureningspåvirkede. Her er det en forudsætning, at de stoffer, der er forurenede med, har en indflydelse på vandets ledningsevne. Dette kan være tilfældet med

perkolat fra lossepladser, der ofte indeholder salte som påvirker ledningsevnen af vandet.

### 13.7 flowlog

Flowlog anvendes til at måle, hvorledes indstrømningen af grundvand fordeler sig i boringen. Loggen udføres, mens der er en pumpe monteret i boringen, og vandets strømningshastighed som funktion af dybden registreres. Loggen findes i forskellige typer, bl.a. en simpel mekanisk type, med en propel forbundet til en tæller, og en mere "følsom" udgave "heat pulse flowmeter" (HPFM), der virker ved hjælp af en varmekilde og temperaturfølere over og under varmekilden. Det volumen varmt vand, der dannes, passerer temperaturfølerne, og herved kan vandets strømningshastighed og -retning bestemmes. HPFM kan anvendes til at fastlægge beliggenheden af et vandskel i boringen, når der anvendes flerpumpe-arrangementer. Dette er gavnligt, hvis der ønskes udtaget niveaubestemte prøver i eksisterende borer.

I dybe borer med lange filtersektioner eller lange åbne sektioner i kalk og kridt kan der være trykforskelle mellem den øvre og den nedre del af sådanne sektioner især i nærheden af eller på kildepladser, hvorfra der sker indvinding. Sådanne trykforskelle vil betyde, at der sker intern strømning i boringen selv uden at der pumpes på boringen, basis strømning. Det kan eksempelvis være strømning fra den øvre del af kalken i en boring til stærkt vandførende zoner i større dybde i samme boring, fordi der indvindes fra disse dybereliggende zoner fra andre borer i nærheden. Eller det kan være opadstrømmende vand, evt. saltholdigt, fra en dyb ældre boring, som nu anvendes som pejleboring, og hvor det opadstrømmende vand udstrømmer i den øvre del af kalken, fordi andre borer i nærheden netop indvinde herfra.

Sådanne situationer er ikke ualmindelige, og manglende viden herom vil medføre, at vandanalyser fra udtagne råvandsprøver eller endog fra dybdekontrollerede prøver kan blive fejltolket med hensyn til, hvad de pågældende prøver repræsenterer. Det må derfor anbefales, at et borehulslogging program ud over såvel ledningsevne-/temperaturlog som flowlog under pumpning også indeholder disse logs uden pumpning. En flowlog uden pumpning vil direkte kunne give en størrelsesorden på strømmingen, samt hvorfra og hvortil – mens ledningsevne-/temperatur-log vil verificere hvorfra og hvortil basisstrømmingen sker i boringen.

For en kvantitativ tolkning af flowlogs er det nødvendigt at kende størrelse og variation af boringens diameter. Når der logges i forede borer, har man som regel et rimeligt kendskab til diameteren, hvorimod den kan variere meget i uforede borer (eksempelvis kalkboringer). I uforede borer bør flowloggen derfor suppleres med en kaliberlog, der bestemmer boringens diameter.

### **13.8 Kaliberlog**

Kaliberlog anvendes til at bestemme boringens diameter. Kaliberlog opererer med et antal arme der ved hjælp af fjedre presses ud mod væggen i boringen. Oplysninger om diameteren kan være en forudsætning for korrekt tolkning af andre logtyper (f.eks. flowlog), og kan endvidere benyttes, hvis der er mistanke om udskridninger i uforede borer, eller defekter på forerøret i forede borer.

### **13.9 Korrelation**

Et meget vigtigt formål for borehulslogging af især borer i mio-cæne aflejringer, Selandien grønsandsaflejringer, Danien kalk eller i skrivekridt er muligheden for korrelation (sammenligning og genkendelse) af loggingmønstre fra gamma-, resistivitets- og induktionslog. Ved en sådan korrelation bestemmes udbredelsen og dybden (i kote) af de enkelte lag eller lagsekvenser i et område, som derefter kan sammenholdes med flowlogging oplysningerne om de enkelte lags eller sekvensers vandføringsevne.

### **13.10 Referencer**

*Skov- og Naturstyrelsen: Geofysik og råstofkortlægning. Råstofkontorets kortlægningsserie nr. 5, 1987.*

# Appendix c Øvrige kortlægningsmetoder

## 1 Tørboring

### *Andre betegnelser*

Snegleboring, slagboring og hulsneglsboring.

### *Anvendt siden*

Meget gammel metode, anvendt i århundrede.

### *Udbredelse*

Stor

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af lagfølge. Filtersætning i grundvandsmagasin medfører, at vandspejl kan pejles, der kan udtages vandprøve samt at der kan udføres hydrauliske tests.

### *Metodebeskrivelse*

Ved tørboring løsnes materialet i borehullet ved hjælp af en mejsel, boresnegl, sandspand eller lignende værktøj, der er ophængt i en wire eller sidder for enden af en stang.

Det løsnede materiale føres med mellemrum op til overfladen med en sandspand eller boresnegl. For at sandspanden skal kunne fungere, må materialet være blandet med vand. Hvis boringen går gennem tørre jordlag, er det derfor at tilføre vand til borehullet.

Ved tørboring over grundvandsspejlet kan forerør undværes. Under grundvandsspejlet er forerør nødvendige. Forerøret presses ned samtidig med borearbejdet for at forhindre, at borehullet skrider sammen.

I de senere år er udviklet en tørboremethode med prøvetagning indvendigt i en hulsnegl. Ved metoden kan udtages niveaubestemte vandprøver under borearbejdet og efterfølgende filtersættes i udvalgte niveauer.

### *Fordele*

God prøve kvalitet. Gode muligheder for afpropning. Anstillingsomkostningerne er små.

### *Ulemper*

Ved boreddybder > ca. 30 m er metoden meget tids- og dermed omkostningskrævende.

For borerer generelt kan det være en ulempe, at der er tale om punktobservationer af lagfølgen. Det område, som boreren repræsenterer kan således være lille.

### *Dagsproduktivitet*

Ved boreddybder mellem 10 og 30 m er dagsproduktiviteten typisk ca. 20 boremeter pr. dag inkl. tilfyldning (filtersætning og afpropning).

### *Undersøgelsesdesign*

Det nødvendige antal borerer i et område afhænger af de aktuelle geologiske forhold i området samt antal eksisterende borerer i området.

### *Datapræsentation*

Data, der består af lagfølgeoplysninger, præsenteres på borejournal. Eventuelt sammenstilles resultater fra borerer og geofysiske målinger i et snit eller fence-diagram.

Hvis der er udført borehulslogging, vises disse logs sammen med boreprofil fra prøvebeskrivelsen og et konklusivt boreprofil udarbejdes på samme figur/bilag.

### *Referencer*

*Skov- og Naturstyrelsen* Geofysik og råstofkortlægning, Råstofkontorets kortlægningsserie 5, 1987.

*Århus Amt*, Grundvandsboringer. Teknisk Rapport. Oktober 1991.

*DGU og PC*: Hulsneglsboremetoden.

## 2 Rotationsskylleboring

### *Andre betegnelser*

Lufthæveboring, luftskylleboring, omvendt skylleboring.

### *Anvendt siden*

Anvendt i årtier.

### *Udbredelse*

Stor, især til vandindvindingsboringer.

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af lagfølge. Filtersætning i grundvandsmagasin medfører, at vandspejl kan pejles, der kan udtages vandprøve, samt at der kan udføres hydrauliske tests.

### *Metodebeskrivelse*

Ved rotationsskylleboring løsnes materialet i borehullet ved hjælp af et borehoved, der roteres ned i aflejringerne.

Det løsnede materiale bringes op til overfladen med en luft- og bore-mudderstrøm inde i borestangen. Boremudderet stabiliserer borevæggen, hvorfor der ikke anvendes forerør, bortset fra et kort arbejdsrør i toppen af boringen.

### *Fordele*

God prøve kvalitet i forhold til andre skylleboringemetoder, dog ringere end ved tørboring. Ved boreddybder > ca. 30 m er metoden hurtig og dermed prisbillig.

### *Ulemper*

Anstillingsomkostninger er store. Prøvekvalitet er ringere end ved tørboring og reduceres yderligere ved større dybder.

For boringer generelt kan det være en ulempe, at der er tale om punktobservationer af lagfølgen. Det område, som boringen repræsenterer, kan således være lille.

### *Dagsproduktivitet*

Borearbejdet tager typisk 1-2 dage, men udbygning med filtre, afpropning og renpumpning kan tage flere dage.

### *Undersøgellesdesign*

Det nødvendige antal boringer i et område afhænger af de aktuelle geologiske forhold i området samt antal eksisterende boringer i området.

### *Datapræsentation*

Data, der består af lagfølgeoplysninger, præsenteres på borejournal.

Hvis borehulslogging er udført, vises disse logs sammen med boreprofil fra prøvebeskrivelsen og et konklusivt boreprofil udarbejdes på samme figur/bilag.

Eventuelt sammenstilles resultater fra boringer og geofysiske målinger i et snit eller fence-diagram.

### *Referencer*

*Skov- og Naturstyrelsen: Geofysik og råstofkortlægning, Råstofkontorets kortlægningsserie 5, 1987.*

*Århus Amt: Grundvandsboringer, Teknisk Rapport, Oktober 1991.*

### 3 Ellogboring

*Anvendt siden*

1987

*Anvendelsesområde*

Kortlægning af geologisk lagfølge samt eventuelt geokemisk lagfølge. Filtersætning i grundvandsmagasin medfører, at vandspejl kan pejles, at der kan udtages vandprøver, samt at der kan udføres enkelte hydrauliske tests (slugtest).

*Metodebeskrivelse*

Jordlagenes elektriske modstand og naturlige gammastråling måles under nedboring af en hul borestang med udvendig snegl. Sideløbende hermed kan der gennem vandindtag tæt ved borespidsen udtages vandprøver til kemisk analyse. Boringen kan maksimalt filtersættes med et Ø 63 mm filter.

*Fordele*

Der kan udtages uforstyrrede niveaubestemte vandprøver. Beliggenhed af tynde lag kan identificeres præcist.

*Ulemper*

Den maksimale boreddybde er kun 70 m. Stenlag i smeltevandsaflejringer eller i moræne kan stoppe boringen. Kalk kan ikke penetreres, formodentlig heller ikke kridt pga. flintlagene.

Udtagning af de niveaubestemte vandprøver kan ikke gentages senere, undtagen i det niveau, hvor boringen bliver filtersat. Udtagne jordprøver vil være opblandede, hvorfor geologisk beskrivelse er vanskelig. Filtersætning med filter til prøvetagning er kun mulig i et niveau. Lerforsegling kan i nogle tilfælde være vanskelig.

*Dagsproduktivitet*

Ved boreddybder mellem 30 og 70 m er dagsproduktiviteten typisk ca. 20 boremeter pr. dag inkl. tilfyldning (filtersætning og afpropning).

*Undersøgelhedsdesign*

Det nødvendige antal boringer i et område afhænger af de aktuelle geologiske forhold i området samt antal eksisterende boringer i området.



### *Datapræsentation*

Loggingdata samt de forholdsvis usikre lagfølgeoplysninger præsenteres på borejournal, hvor der gives en tolket lithologisk lagfølge. Analyseresultater af udtagne vandprøver vises sammen med den geologiske tolkning. Eventuelt sammenstilles resultater fra boringer og geofysiske målinger i et snit eller fence-diagram.

### *Referencer*

*Skov- og Naturstyrelsen, 1989*: Ellog boring. Råstofkontorets kortlægningsserie 8, 1989.

*Vandteknik (1993)*. Temanummer: Nye metoder til kortlægning af grundvandet.

*Miljøstyrelsen (1995)*: Overvågning af grundvandet baseret på nye geofysiske måle- metoder. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, nr. 11.

## 4 Geoprobe

### *Andre betegnelser*

Botesam er en tidligere og mere simpel variant

### *Anvendt siden*

Ny i Danmark, 1998

### *Udbredelse*

Tre firmaer og et universitetsinstitut

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af geologisk (lithologisk) lagfølge samt eventuelt vandkemisk lagfølge eller geokemisk, og dermed anvendes i stofs specifik sårbarhedsvurdering.

### *Metodebeskrivelse*

En vibrator/hammer presser stålrør indeholdende forskellige sensorer og vandprøvetagningsudstyr, ned gennem jordlagene samtidig med, at der kontinuert måles jordlagenes ledningsevne (mS/m) og nedpressningshastighed, samt om ønskeligt kontinuert måling af flygtige organiske stoffer (VOC).

Der kan udtages grundvandsprøver undervejs ned i ønskede dybdeniveauer. Der kan også udtages kerneprøver. Der kan efterfølgende udføres gammalog. Efter endt boring trækkes røret op under samtidig fyldning af hullet med bentonit, eller der kan etableres permanent filter.

### *Fordele*

Der kan udtages uforstyrrede niveaubestemte vandprøver og tynde lag kan identificeres i lagfølgen. Kerneprøver kan udtages.

Udstyret er forholdsvis let og meget mobilt, hvorfor der kun fås små markskader.

### *Ulemper*

Maksimal dybde kun 30-35 m. Stenlag i smeltevandsaflejringer eller i moræne kan stoppe boringen. Kalk kan ikke penetreres, formodentlig heller ikke kridt pga. flintlagene. Gentagelse af niveaubestemte vandprøver kan ikke ske undtagen i eventuelt filtersat niveau, og filtersætning kan kun ske med et filter.

### *Dagsproduktivitet*

1-3 boringer per dag til 30 m afhængig af antal test, vandprøvetagning og kerneprøvetagning undervejs.

### *Undersøgelsesdesign*

Antal boringer afhænger af kompleksitet i geologi.

### *Datapræsentation*

Ledningsevnelog, evt. gammalog, borehastighedslog samt evt. VOC-log præsenteres sammen med tolket boreprofil, hvorpå der også kan vises dybdeprofil af forskellige vandkemiske parametre fra analyser af udtagne vandprøver.

### *Referencer*

[www.geoprobesystems.com](http://www.geoprobesystems.com)

## 5 Lokalisering, pejling og kotesætning af boringer

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af potentialeforhold i filtersat grundvandsmagasin. Efter geologisk tolkning fremstilles kort over grundvandspotentiale i et eller flere grundvandsmagasiner.

### *Metodebeskrivelse*

Eksisterende og/eller nye boringer identificeres via arkiv over boringer, eksempelvis det landsdækkende PC-baserede PC-ZEUS. Eventuelle boringer som ikke tidligere er indberettet til GEUS bør lokaliseres og kotesættes inden yderligere undersøgelser sættes i gang, således at eksisterende oplysninger om geologi og grundvandspotentiale kan udnyttes optimalt.

Boringer med filtersætning i relevant niveau lokaliseres og pejles med udgangspunkt i amternes lokaliseringsskemaer. En komplikation for bestemmelse af potentialet i en boring kan opstå når der er hydraulisk kortslutning mellem forskellige magasiner eller vandførende horisonter med forskelle i vandtryk, hvilket kan forekomme i dybere boringer med flere filtre på samme rør og i åbne kalkboringer.

Såfremt pejlresultatet vurderes at være pålideligt, kotesættes boringen. Kotesætningen kan ofte med fordel udføres med GPS-udstyr, hvorved koten og plan-kordinater kan fastlægges med en nøjagtighed, der er bedre end 3 cm.

### *Fordele*

Målinger af grundvandspotentiale repræsenterer ikke kun det punkt, som målingen foretages i, men et større område omkring boringen. Interpolation mellem punkter er således mulig.

Lokalisering af boringer kan desuden bruges som udgangspunkt for eventuelle beslutninger om borehulslogs.

### *Ulemper*

Eksisterende boringer er lavet med et andet formål end pejling, hvorfor usikkerhed om lagfølger, filtersætning, installationer m. v. kan medføre usikkerhed om, hvilket grundvandsmagasin en pejling skal relateres til.

### *Dagsproduktivitet*

En miljøtekniker kan typisk lokalisere, pejle og kotesætte ca. 5 boringer pr. dag. Hertil kommer arbejdet med identificering af relevante boringer samt optegning af potentialekort.

### *Undersøgelsesdesign*

Det nødvendige antal lokaliseringer, pejlinger og kotesætninger i et område afhænger af de aktuelle geologiske forhold i området og af de boringer som er til rådighed.

### *Datapræsentation*

Data, der består af lokaliseringsdata, pejledata og resulterende grundvandspotentialer, præsenteres i kote- og pejlefortegnelse. Grundvandspotentialer sammenstilles endvidere på kort. Eventuelt optegnes kort med potentialedifferens (gradient) mellem to grundvandsmagasin-er.

### *Referencer*

Århus Amt, 1991: Grundvandsboringer. Teknisk Rapport. Oktober 1991.

## 6 Test af hydrauliske parametre

### *Anvendelsesområde*

Kortlægning af hydraulisk ledningsevne, lækageforhold og magasintal for grundvandsmagasin.

### *Metodebeskrivelse*

Eksisterende og/eller nye boringer prøvepumpes under samtidig observation af vandspejl i pumpeboring og observationsboringer. Vandspejlsobservationerne kan ofte med fordel udføres med tryktransducere og dataloggere. Indsamlede data bearbejdes med henblik på beregning af hydrauliske parametre.

Korttidsprøvepumpninger (pumpetid mellem 1 time og 1 døgn) giver udelukkende oplysninger om hydraulisk ledningsevne. Langtidsprøvepumpninger (pumpetid mere end en uge) kan desuden give oplysninger om lækageforhold og magasintal, forudsat der også observeres i andre boringer end pumpeboringen.

### *Fordele*

Målinger af hydrauliske parametre repræsenterer ikke kun det punkt, som målingen foretages i, men et større område omkring det prøvepumpede område af grundvandsmagasinet. Interpolation mellem punkter er således mulig.

### *Ulemper*

Afledning af vand fra prøvepumpning kan fysisk være besværligt. Hvis vandet desuden er forurennet, kan afledningen desuden blive besværliggjort af krav om rensning.

### *Dagsproduktivitet*

Montering og demontering af pumpe, afledning, flowmåler, eltilslutning, tryktransducere og dataloggere vil være meget afhængig af de lokale forhold.

### *Undersøgelsesdesign*

Det nødvendige antal prøvepumpninger i et område afhænger af de aktuelle geologiske forhold i området.

### *Datapræsentation*

Data, der består af indsamlede vandspejlsdata og pumpeydelse m.v. præsenteres i tabelform. Tolkingsplot af sænkings- og stigningsdata

præsenteres endvidere med henblik på beregning af de hydrauliske parametre.

#### *Referencer*

*Miljøstyrelsen (1979):* Vandforsyningsplanlægning 1. del. Planlægning af grundvandsindvinding. Vejledning nr. 1, december 1979.

*Carlson, L & Gustaffson, G. (1984):* Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. Byggeforskningsrådet, R41, Stockholm, 1984.

## 7 Vandprøvetagning

### *Anvendelsesområde*

Som beskrevet i vejledningens kapitel 5 skelnes der mellem punkt-, linie- og volumenprøver. Derudover skelnes mellem følgende 3 typer af volumenprøver:

- blandingsvand af hele indstrømningen til filteret eller til den åbne boring og som derfor kan repræsentere en eller flere vandkemiske grundvandssituationer.
- Niveauekontrolleret vand, som repræsenterer netop den vandkemiske grundvandssituation i den pågældende dybde.
- Dybdeakkumuleret vand, som repræsenterer blanding af alle indstrømninger til filteret eller den åbne boring nedenunder den pågældende prøvetagningsdybde, og som derfor kan repræsentere en eller flere vandkemiske grundvandssituationer.

### *Metodebeskrivelse*

Procedure for vandprøvetagning afhænger først og fremmest af, hvilke typer analyser der skal udføres. Procedurer og dokumentation heraf er beskrevet i nedenfor nævnte referencer.

### *Fordele*

En vandprøve integrerer (bortset fra punktprøver) de påvirkninger, herunder påvirkning fra ler, redoxmiljøer m.v., som et større volumen udøver på vandpartiklerne.

### *Ulemper*

Vandprøver (bortset fra punktprøver) repræsenterer ikke et bestemt punkt på jordoverfladen, og kan derfor kun anvendes indirekte ved fastsættelse af kriterier for zoner.

### *Dagsproduktivitet*

Afhængig af prøvetypen:

- volumenprøver: ca. 10 vandprøver pr. dag.
- linie- og punktprøver: ca. 5 vandprøver pr. dag.

### *Undersøgelsesdesign*

Det nødvendige antal vandprøver i et område afhænger af de aktuelle geologiske forhold i området samt antal eksisterende vandanalyser i området.



### *Datapræsentation*

Data, der består af dokumentation af prøvetagningsbetingelserne, præsenteres på skemaform.

### *Referencer*

*Andersen L. J.:* Grundvandsmoniteringsnet af 1. orden i Danmark  
I: ATV-møde om grundvandsmonitering, 5.-6. oktober 1987

*Miljøstyrelsen:* Lossepladsprojektet. Grundvandsprøvetagning og feltmåling. Udredningsrapport U3, April 1989.

*Århus Amt:* Grundvandsboringer. Teknisk Rapport. Oktober 1991.

## 8 Vandanalyse

### *Metodebeskrivelse*

Vandprøver analyseres for indhold af opløste stoffer, der kan afspejle vandprøvens historie og dermed sårbarheden. Følgende analysepakker og -enkeltkomponenter er relevante:

- feltanalyser
- boringskontrolpakken (eller dele deraf)
- aldersdatering med Tritium eller CFC
- udvalgte miljøfremmede organiske stoffer.

Procedure for de specifikke vandanalyser er beskrevet i standarder for laboratoriearbejde.

Resultaterne af vandanalyserne fortolkes med henblik på at opnå flest mulige informationer om sårbarhed. Til fortolkning af vandanalyser kan anvendes de fortolkningssystemer, der fremgår af referencelisten.

### *Datapræsentation*

Data, der består af analyseresultater, præsenteres på tabelform, der ofte med fordel kan suppleres med grafiske afbildninger.

### *Referencer*

*Kemp & Lauritzen Vand & Miljø*. Udviklingen i den danske vandforsyningsstruktur. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, nr. 62 1997.

*Pratt, Allan*: Hydrokemisk screening af grundvandsanalyser Vandteknik nr. 4, 1997.

*Danmarks Geologiske Undersøgelse*: Grundvandsovervågning 1993.

*Ødum, H & Christensen, W.*: Danske grundvandstyper og deres geologiske optræden. DGU III. Række, nr. 26.

## 9 Aldersdatering af grundvand

### Anvendelsesområde

Grundvandsdatering og tracerteknikker er nogle af de vigtigste redskaber til vurdering af grundvandets sårbarhed overfor nedsvivende forurening, idet tracerne (sporstofferne) der anvendes til datering, eksempelvis CFC-gasser,  $^3\text{H}$  (tritium) eller  $^{14}\text{C}$  (kulstof-14), beskriver de opløste stoffers transport og opholdstid i grundvandet, og dermed hvor hurtigt kontaminanter kan spredes i grundvandsmagasinerne (Hinsby, 1997; Hinsby, 1999; Hinsby et al., 1999a,b). I områder hvor der er kvantitative eller kvalitative problemer med vandsressourcen, er dateringsteknikker uundværlige ved fastlæggelsen af en bæredygtig forvaltning af denne.

Der kan være processer og faktorer (kemiske reaktioner, diffusion og hydrodynamisk dispersion, blanding af vandtyper ved prøvetagning i lange filtre etc.), som har en betydelig effekt på dateringerne, og som komplicerer estimeringen af grundvandets alder eller blandingsforholdet mellem forskellige vandtyper.

For at kunne beskrive stoftransporten er det generelt nødvendigt at have et grundigt kendskab til de kemiske og fysiske processer i grundvandsmagasinerne (Appelo & Postma, 1996). Effekten af disse processer kan imidlertid ofte estimeres, og aldrene på de forskellige vandtyper dermed bestemmes, gennem anvendelse af korrektioner og forskellige tracere og dateringsteknikker (f.eks. Loosli et al., 1991; Plummer et al., 1993; Clark & Fritz, 1997; Hinsby et al., 1999a). Er det alligevel ikke muligt at bestemme en egentlig/absolut alder, giver tracerne normalt en relativ alder der også har stor værdi i grundvandsundersøgelser.

Generelt er det en fordel at anvende flere forskellige tracer- og dateringsmetoder samtidigt, men især i sprækkede grundvandsmagasiner er det vigtigt at anvende flere metoder for at dokumentere eventuel blanding af forskellige vandtyper (Hinsby, 1999; Hinsby et al., 1999a). Det er vist at den gennemsnitlige stoftransport i sprækkede magasiner i stor (regional) skala bedst beskrives ved de hydrauliske parametre for bjergartens matrix (Zuber & Motyka, 1994). Vandet derimod transporteres primært i sprækkerne, og vandets transporttid ("alder") er størrelsesorden hurtigere ("yngre") end den gennemsnitlige transporttid for de opløste stoffer (Zuber & Motyka, 1994). I mindre skala er sprækketransporten stærkt afhængig af f.eks. nedbørshændelsernes tidspunkt og intensitet, og regnskyl på uheldige tidspunkter kan *meget* hurtigt transportere tracere og kontaminanter gennem sprækkesystemer i f.eks. moræner (Jørgensen & Spliid, 1998; Harrar et al., 1999). Det er ligeledes dokumenteret at ungt potentielt forurenede grundvand kan registreres i nogle relativt dybtliggende (20-60 m.u.t.) og tykke (30-40 m) lerlag på grund af præferentiel strømning for eksempel i sprækker (Hinsby, 1999; Hinsby et al.,

1999a). I andre tilfælde er det dokumenteret, eksempelvis i et 80 m tykt morænelerslag i Canada, at stoftransporten kun foregår ved diffusion i porevandet, der er ingen fysisk strømning (advektion) gennem leret (Hendry & Wassenaar, 1997). Lerlag er således generelt en barriere mod nedsivning af forurening der er opløst i grundvandet, men der er ingen garanti for at den er 100 % effektiv i alle tilfælde. Daterings- og tracerundersøgelser vil kunne afsløre hvor effektivt et konkret lerlag er som barriere.

Eksempler på anvendelse af grundvandsdatering:

- 1) Undersøgelser af grundvandsdannelsen og grundvandets strømningshastigheder
- 2) Undersøgelser af kontaminanternes transport og nedbrydning i grundvandsmagasiner
- 3) Undersøgelser af spræktransport (præferentiel strømning)
- 4) Konstatning af kortslutninger (eller "spredning af forurening") mellem grundvandsmagasiner og/eller borer
- 5) Kalibrering af numeriske grundvandsmodeller

Danske eksempler på ovenstående anvendelser kan findes i Hinsby et al. (1999a) og Buckley et al. (1999).

#### *Metodebeskrivelse*

Grundvandets alder bestemmes ud fra målte tracerkoncentrationer i vandprøven (Hinsby et al., 1998). For nogle metoders vedkommende er det nødvendigt at måle andre opløste stoffer med henblik på at korrigere for kemiske og fysiske processer der påvirker traceren i grundvandsmagasinet (Hinsby et al., 1999a,c). I Danmark anvendes i øjeblikket primært CFC-gasser og C-14 til datering af henholdsvis ungt og gammelt grundvand (se kap. 5.3.4.). De nødvendige analyser til disse dateringsteknikker foretages henholdsvis på Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse og Århus Universitet.

#### *Datapræsentation*

Resultatet præsenteres som en gennemsnitlig alder af den pågældende vandprøve.

#### *Fordele*

Grundvandsdateringer giver en god vurdering af vandets sårbarhed over for nedsivende forurening på det undersøgte sted. Grundvandsdateringer på udvalgte steder i grundvandsmagasinerne giver samtidig et godt overblik over dynamikken i grundvandsmagasinerne. Grund-

vandsdateringer kan i kombination med viden om redox-forholdene anvendes til at vurdere grundvandsmagasinet "selvrensningsevne" (den naturlige nedbrydning af kontaminanter i grundvandsmagasinet, Christensen et al., 1994), således at denne kan udnyttes optimalt, og risikoen for forurening af vandindvindingsboringer kan reduceres.

Bemærk dog at øget eller stærkt ændrede indvindinger vil, afhængigt af grundvandsmagasinerne geologi, kunne ændre den eksisterende situation og eksempelvis fremprovokere forurening af selv dybtliggende og relativt velbeskyttede grundvandsmagasiner, der indeholder flere tusind år gammelt grundvand.

### *Ulemper*

Generelt anvendes kun få dateringsmetoder kommercielt, mange af dateringsteknikkerne beherskes kun af et beskedent antal laboratorier på verdensplan og indgår normalt som led i forskningsprojekter. Enkelte metoder er stadig så kostbare (tidskrævende) at de udelukkende anvendes i forskningssammenhæng eller i store meget betydningsfulde grundvandsmagasiner. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse har imidlertid gode kontakter til nogle af verdens førende institutter inden for grundvandsdatering, og har dermed mulighed for, i tilfælde hvor det vurderes at der er væsentlige forskningsmæssige interesser, at etablere kontakt og undersøge muligheden for et konkret samarbejde.

Enkelte kendte metoder (f.eks.  $^{85}\text{Kr}$ ) kræver store vandmængder (~1000 l) for at analysen kan gennemføres, men der arbejdes i USA ihærdigt på at nedbringe prøvevolumet til ganske få liter.

Ingen dateringsmetoder kan anvendes i ethvert grundvandsmagasin, de lokale forhold må vurderes før de(n) relevante dateringsmetode(r) vælges.

Afslutningsvist skal det dog nævnes at tritium ( $^3\text{H}$ )-analyser, der stadig må anses for at være meget værdifulde til konstatering af ungt potentielt forurenat grundvand, kan købes på kommercielle vilkår. Der er p.t. ingen muligheder hverken i Danmark eller Sverige, men eksempelvis er der mulighed for at sende prøver til Institute of Geological and Nuclear Sciences i New Zealand ([www.gns.cri.nz](http://www.gns.cri.nz)), der blandt andet på grund af deres beliggenhed på den sydlige halvkugle har verdens laveste detektionsgrænse på tritium-analyser (0.03 TU). Sådanne lave detektionsgrænser giver gode muligheder for fortsat at anvende metoden selv i dag, hvor tritium-indholdet i nedbøren er tæt på at have stabiliseret sig på det naturlige relativt lave baggrunds niveau (5-10 TU) der eksisterede før atomprøvesprængningerne i atmosfæren.

## Referencer

*Appelo, C.A.J. & Postma, D.* Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, Rotterdam, 1996, 536 s.

Buckley, D.K., Custodio, E., Manzano, M. & Hinsby, K. Investigation of aquifer and groundwater stratification. In: Edmunds and Milne (Eds.), 1999.

*Clark, I. & Fritz, P.* Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton/New York, 328 pp., 1997.

*Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Albrechtsen, H., Heron, G., Nielsen, P.H., Bjerg, P.L., & Holm, P.E.* Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 24, 119-202, 1994.

*Edmunds and Milne (Eds.): PALAEAUX - MANAGEMENT OF COASTAL AQUIFERS IN EUROPE - Palaeowaters, natural controls and human influence. Final report for the EU project PALAEAUX (ENV4-CT95-0156), British Geological Survey, BGS Technical Report, Hydrogeology Series, WD/99/35, 1999. (Bemærk! en udvidet udgave af EU-rapporten udgives som bog med titlen: "Palaeowaters in the Coastal Aquifers of Europe" i serien "Geological Society Special Publication", Geological Society, London, i begyndelsen af 2000.)*

*Harrar, W.G.; Nilsson, B. & Murdoch, L.* Seasonal variations in flow and transport characteristics of a fractured glacial till. Proceedings from the workshop: "Scale and variability issues in the soil-hydrological system", Wiks Castle, Uppsala, Sweden, 25-27 august, 1999.

*Hendry, J. & Wassenaar, L.I.* Natural groundwater tracers (18O, 2H, Cl, 37Cl/36Cl) in a thick aquitard system provide information on the geologic and climatic history of southern Saskatchewan, Canada. Abstracts with Programs - Geological Society of America. 29; 6, Pages 382. 1997.

*Hinsby, K.* Aldersdatering af grundvand - Et vigtigt redskab i forvaltning af vandressourcen. Vandforsyningsteknik nr. 48, 65-86, 1999.

*Hinsby, K.* Jagten på rent vand. GEUS årsberetning 1997 (artiklen kan findes på GEUS' hjemmeside: [www.geus.dk](http://www.geus.dk)).

*Hinsby, K.; Harrar, W.G.; Laier, T.; Højberg, A.; Engesgaard, P.; Jensen, K.H.; Larsen, F.; Boaretto, E. & Heinemeier, J.* Use of isotopes (<sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C, <sup>18</sup>O) and CFC's for the analyses of groundwater flow and transport dynamics: selected case and modelling studies from sand aquifers and a deep clay aquitard in Denmark. International

Atomic Energy Agency, TECDOC no. ?, in press, (kort version er sendt til Journal of Hydrology), 1999a.

*Hinsby, K.; Edmunds, E.; Loosli, H.H. & Barbecot, F.* Modern groundwater advance in European coastal aquifers. I: Edmunds and Milne (Eds.), 1999, 1999b.

*Hinsby, K., Harrar, B., Nyegaard, P., Konradi, P., Rasmussen, E.S., Bidstrup, T., Gregersen, U. & Boaretto, E.* The Ribe Formation in SW Jylland, Denmark: Holocene and Pleistocene groundwaters in a coastal Miocene sand aquifer. In: Edmunds and Milne (Eds.), 1999c.

*Hinsby, K.; Larsen, F.; Nielsen, O.J. & Laier, T.* Grundvandets alder. Naturens Verden, 2/98, 72-80, 1998.

*Jørgensen, P.R. & Spliid, N.H.* Migration and biodegradation of pesticides in fractured clayey till. Pesticides Research no. 37, Danish Environmental Protection Agency, 1998d.

*Loosli, H.H.; Lehmann, B.E. & Däppen, G.* Dating by radionuclides. In: Pearson, F.J. Jr. et al. (Eds.) Applied Isotope Hydrogeology, Studies in Environmental Science 43, 153-174, Elsevier, 439 pp., 1991.

*Plummer, L.N.; R.L. Michel; E.M. Thurman, & P.D. Glynn.* Environmental tracers for age dating young ground water. I W.M. Alley (Red.) Regional Ground-Water Quality. Van Nostrand Reinhold, New York, 634 pp., 1993.

*Zuber, A. and Motyka, J.* Matrix porosity as the most important parameter of fissured rocks for solute transport at large scales. J. Hydrol., 158, 19-46, 1994.

# Appendix d Anvendelse af grundvandsmodeller i zoneringsen

*“The fascinating impressiveness of rigorous mathematical analysis, with its atmosphere of precision and elegance, should not blind us to the defects of the premises that condition the whole process” - T.C. Chamberlin, 1899*

## 1 Anvendelse af grundvandsmodeller

Numeriske grundvandsmodeller kan anvendes på flere niveauer i zoneringsen, gående fra at opstille en grundvandsmodel på baggrund af eksisterende geologiske/hydrogeologiske data til først at opstille modellen, når detailkortlægningen i form af geofysisk kortlægning og supplerende kortlægning er gennemført. Tilsvarende kan numeriske grundvandsmodeller omfatte større eller mindre områder, gående fra hele amter/regioner/områder med særlige drikkevandsinteresser til enkelte indvindingsoplande.

Brugen af numeriske grundvandsmodeller skal primært bidrage til en bedre forståelse af det fysiske system, i stedet for at der opbygges en blind tiltro til modelforudsigelserne. Erkend at modellen ikke er bedre end de data, der bliver lagt ind i den. Husk at modellen altid vil repræsentere en væsentlig forenkling af det fysiske system og de tilhørende hydrologiske processer.

Modellen er kun et værktøj i en fortsat proces, hvor det hele tiden må overvejes, om indsamling af nye data og resultater af detaljeret kortlægning bør give anledning til ændringer af den hydrogeologiske tolkningsmodel med tilhørende antagelser.

### *Bestemmelse af grundvandsdannelsen*

Nøjagtigheden, og dermed pålideligheden, af en afgrænsning af den arealdistribuerede grundvandsdannelses geografiske og tidslige variation til et givet grundvandsmagasin afhænger af en række faktorer.

Først og fremmest har kendskabet til udstrækning af magasiner og beskaffenhed af dæklagene sammen med kvaliteten og opløsningen på de geologiske og hydrologiske data stor betydning. Dernæst har metoden (simple metoder/numeriske modeller) til afgrænsning af grundvandszoner og sårbare zoner stor betydning.

En zoneringsen, hvor der har været anvendt en god og velkalibreret numerisk grundvandsmodel vil generelt give en mere pålidelig kvantifi-



cering af den arealdistribuerede grundvandsdannelse, i forhold til en simple metode, anvendt på det samme datagrundlag.

I tilgift kan numeriske grundvandsmodeller anvende en større del af det samlede datagrundlag og derved bidrage til en bedre helhedsforståelse af det fysiske system.

#### *Flere muligheder*

Endelig giver en numerisk grundvandsmodel nogle væsentlige sidegevinst, idet ikke kun den *arealdistribuerede grundvandsdannelse* og *infiltrationsområder* til vandværker kan vurderes men også en lang række øvrige forhold, som er centrale i forbindelse med forvaltning og beskyttelse af vandressourcen (GEUS, 1997a):

- vurdering af transporttid gennem dæklag
- vurdering af opholdstider i grundvandsmagasiner
- afgrænsning af indvindingsoplande til vandværker
- analyse af potentiale- og gradientforhold
- vurdering af vandløbspåvirkninger som følge af vandindvinding
- analyse af stoftransport fra punktkilder og diffuse kilder

For hydrologen/hydrogeologen eller forvalteren af vandressourcen udgør modeller et værktøj som kan:

- give mulighed for analyser af det fysiske system,
- benyttes som et middel til at organisere vores tænkning,
- give analyser af hvilke parametre der er de mest følsomme,
- angive hvor datagrundlaget er for spinkelt og dermed give anvisninger til videregående undersøgelser (detailkortlægning),
- hjælpe til med at formulere kritiske eksperimenter hvorved grundliggende hypoteser kan testes,
- belyse hvordan komplekse magasinsystemer reagerer på påvirkninger.

## **2 Numerisk grundvandsmodel og hydrologisk model**

Nøjagtigheden, og dermed pålideligheden, af en afgrænsning af den arealdistribuerede grundvandsdannelses geografiske og tidslige variation til et givent grundvandsmagasin afhænger af en række faktorer.

Grundvandet findes i porerummene mellem aflejringerne enkelte korn samt i revner og sprækker i såvel lerede som hårde bjergarter. Jordlagenes evne til at lede grundvandet - kaldet permeabiliteten eller den hydrauliske ledningsevne - er helt afgørende for forekomsten af grundvandsmagasiner og dermed for mulighederne for vandindvinding.

Grundvandet strømmer fra steder, hvor det står højt eller har højt tryk, mod steder med lavere grundvandsstand og tryk, f.eks. vandløb, søer eller steder, hvorfra der pumpes. Grundvandsdannelsens størrelse og de hydrogeologiske forhold er afgørende for grundvandets alder, og for hvor hurtigt en forurening fra overfladen vil udbredes i grundvandet.

Vandets (globale) kredsløb er en fortsat proces, som drives af solenergien og tyngdekraften. En stor del af nedbøren fordampes eller afstrømmer overfladenært, og kun en begrænset del bliver til grundvand, som kan udnyttes til vandforsyning.

Den sofistikerede hydrologiske model er en dynamisk og fysisk baseret numerisk model som beskriver de væsentligste strømningsprocesser i landfasen af det hydrologiske kredsløb f.eks. snesmeltning, aktuel fordampning, afstrømning på jordoverfladen, i vandløb, over og under grundvandsspejlet samt drænvandsafstrømning. Denne model kan være organiseret som et samlet integreret modelsystem bestående af en række delkomponenter (moduler).

En numerisk grundvandsmodel beskriver kun processerne i mættet zone (under grundvandsspejlet). Beskrivelsen kan være stationær eller dynamisk. I en stationær numerisk grundvandsmodel må man specificere den arealdistribuerede grundvandsdannelse med en given fordeling over modelområdet. I en dynamisk grundvandsmodel kan denne fordeling yderligere antages at være tidsafhængig. I en dynamisk hydrologisk model er input til modellen fx. daglige nedbørs-, fordampnings- og temperaturværdier. Modellen beregner så på baggrund af parameterværdier og tilstandsvariable for umættet zone, grundvand, dræn og vandløb den arealdistribuerede grundvandsdannelse i hvert beregningstidsskridt/beregningsgrid.

Om man vælger at anvende en numerisk grundvandsmodel eller en integreret hydrologisk model (der indeholder en numerisk grundvandsmodel som en delkomponent) afhænger i første omgang af hvad formålet er med modelopstillingen, men også datagrundlaget og de hydrogeologiske forhold kan spille ind. Til grundvandsmodellen er der ofte tilhørende modelkoder for partikelbane- eller stoftransportmodellering (tabel d.1).

I den numeriske grundvandsmodel beregnes hastighedskomponenter direkte sammen med beregning af trykniveau. Partikelbane- og stoftransportmodellerne anvender de beregnede hastighedsværdier fra strømningsmodellen som input sammen med stoftransportparametre (bl.a. porøsitet, dispersivitet mm.).

**Tabel d.1**  
**Modeltyper og output**

<b>Modeltype</b>	<b>Hvad beregner modellen ?</b>
Numerisk grundvands-model/ hydrologisk model	Strømningsforhold og trykniveauer i grundvandet, herunder grundvandsdannelse og afstrømning til f.eks. vandløb afhængigt af, om disse komponenter indgår i den hydrologiske model.
Partikelbanemodel	Partikelbaner og alder på partikel udsendt fra punkt på terrænoverfladen til en kildeplads eller fra kildeplads til punkt på jordoverfladen.
stoftransportmodel	Transport og koncentration af stofpartikler under hensyntagen til dispersion, nedbrydning og adsorption Transport og koncentration af stofpartikler under hensyntagen til kemiske processer.

### **3 Antagelser og forudsætninger**

De styrende fysiske, kemiske og biologiske processer som indgår i såvel grundvands- som hydrologiske modeller, beskrives som regel ved matematiske udtryk, også kaldet matematiske modeller.

For en række af de alment kendte og anvendte matematiske modeller gælder dog at de kun er gyldige under specielle forhold eller kun giver en tilnærmelsesvis korrekt procesbeskrivelse. Ved brug af matematiske modeller bør man derfor altid være opmærksom på de grundlæggende forudsætninger, da de er afgørende for om modellen kan anvendes i det konkrete tilfælde. Valget af model kan også have indflydelse på hvorledes de fremkomne resultater skal tolkes (Christensen, 1995; Anderson & Woessner, 1992 og NRC, 1990).

Ved at kombinere matematiske modeller for de styrende processer med massebalancebetragtninger kan der opstilles styrende differentialligninger til beskrivelse af grundvandsstrømning og stoftransport. Disse differentialligninger kan løses enten analytisk eller numerisk.

#### *Numerisk model*

En numerisk model er en model hvor man formulerer en numerisk tilnærmelse til de styrende ligninger. Tilnærmelsen fremkommer ved at man inddeler det betragtede område i et antal delområder, som i det følgende kaldes elementer. Inden for hvert element antager man at de betydende parametre er konstante.

I en 'finite difference' model vil disse elementer udgøres af rektangler. For hvert rektangel opstilles et udtryk for f.eks. vand- og stofbalancen ved forenkede lineære udtryk. Hvert element tilskrives desuden passende værdier for hydraulisk ledningsevne, magasintal, op-

pumpning og evt. lækage til vandløb og infiltration. Elementbalancerne udtrykker tilnærmelsesvis det samme som de styrende differentiaalligninger. Findes en løsning som tilfredsstillende alle elementbalancerne, haves en tilnærmet løsning til det virkelige strømningssystem.

Det er klart, at der er en sammenhæng mellem elementstørrelse og løsningens nøjagtighed. Ved numerisk modellering tilstræbes derfor, at elementinddelingen er detaljeret i områder med store variationer i de betydende parametre, i trykniveau eller i stofkoncentration. Detaljeringsgraden skal desuden tilpasses formålet med modelleringen.

Fordelen ved at benytte numeriske modeller er, at man med disse bedre kan beskrive komplekse fysiske forhold og processer bl.a. varierende geologiske forhold og kemisk-biologiske processer samt komplicerede rand- og begyndelsesbetingelser (Christensen, 1995). De geologiske forhold kan dog også være så komplekse, eller datagrundlaget kan være så begrænset, at brugen af en grundvandsmodel af den grund er meningsløs.

### *Antagelser*

Ved udledningen af den styrende differentiaalligning til beskrivelse af grundvandsstrømning gøres normalt følgende antagelser:

- strømningssystemet er porøst
- Darcy's lov er gyldig
- væsken er tilnærmelsesvis usammentrykkelig
- der er ingen væsentlige variationer i densitet

På trods af den række af simplificerende forudsætninger, der ligger til grund for differentiaalligningen, vil en sådan vandstrømningssystem under danske forhold være næsten generelt anvendelig. Grunden hertil er at flere af forudsætningerne i virkeligheden ikke er særligt restriktive. F.eks. vil et opsprækket medie set over større volumener opføre sig som et porøst medie. Darcy's lov er derfor tilnærmelsesvis gyldig under alle de geologiske forhold, hvor der kan forekomme grundvandsinteresser af en vis betydning. De simple lineære metoder til beskrivelse af magasinændringer og lækage er gode eller i hvert fald acceptable tilnærmelser til naturen (Christensen, 1995). Disse tilnærmelser er acceptable så længe man ved grundvandsmodellering er interesseret i at give en kvantitativ beskrivelse af vandtransport i porøse medier ved hjælp af en strømningssystem.

### *Partikelbane- og stoftransportmodeller*

Et centralt problem ved partikelbane- eller stoftransportmodellering er fastsættelsen af effektive parametre for den hydrauliske ledningsevne og porøsiteten af mediet. Dernæst kan det være nødvendigt at arbejde med et mere detaljeret beregningsgrid end ved en strømningssystemmodellering.

Hvor man har behov for at opstille en partikelbane- eller stoftransportmodel, vil det ofte være nødvendigt at foretage en mere detaljeret beskrivelse af grundvandets strømningsveje, der også inkluderer en vurdering af betydningen af transport gennem sprækker og makroporer i f.eks. kalk eller moræneler. Opsprækkede systemer kan modelleres med forskellige antagelse (Anderson og Woessner, 1991):

- (1) systemet antages at opføre sig som et porøst medium (Equal Porous Media - EPM),
- (2) transport i systemet styres af diskrete sprækker (Discrete Fracture Media - DF) eller
- (3) systemet antages at være dobbeltporøst (Dual Porosity - DP).

De parametre der har betydning for om det er muligt at anvende EPM-transport antagelser er:

- tykkelsen af det opsprækkede morænelerslag,
- størrelsen af sprækkerne,
- den hydrauliske gradient,
- diffusionskoefficienten for det undersøgte stof og
- nedbrydnings- og tilbageholdelsesparametre for det undersøgte stof.

#### 4 Opstilling af model

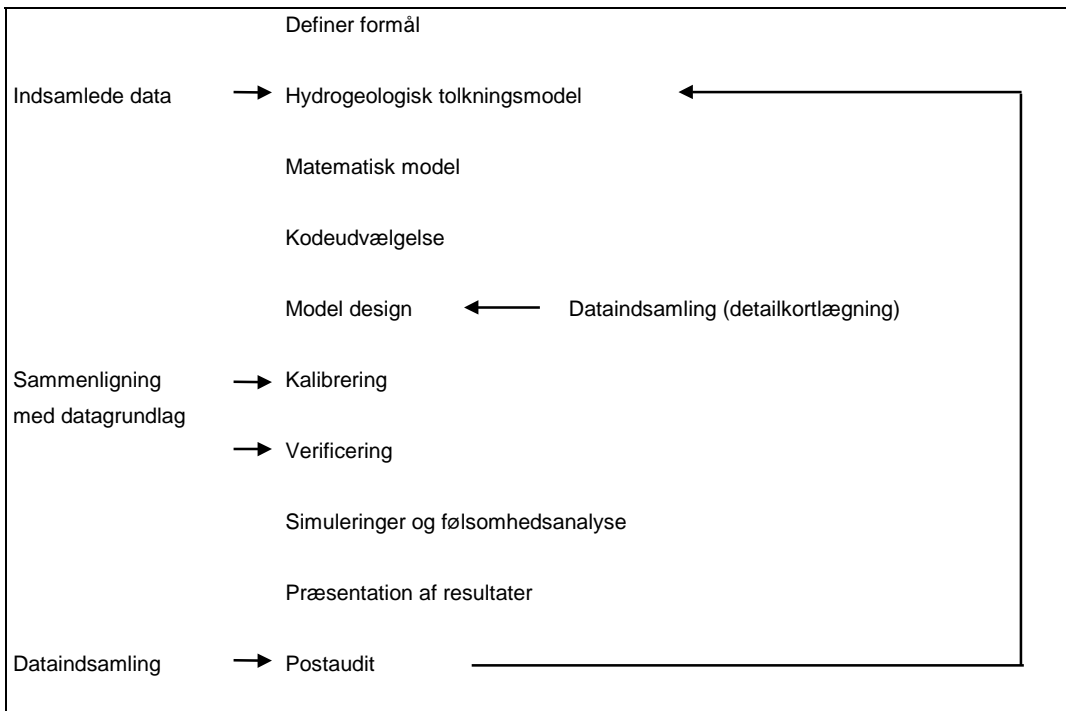
Det er den geologiske ramme, grundvandets tryk- og strømningsforhold samt vandbalancen, der er de overordnede elementer i den detaljerede hydrogeologiske tolkningsmodel, der som beskrevet i vejledningen indeholder resultater af detailkortlægningen og fortolkninger af eksisterende boringsoplysninger, geofysiske undersøgelser og hydrogeologiske undersøgelser og tests.

Den hydrogeologiske tolkningsmodel indeholder altså oplysninger om dæklagenes sammensætning, udbredelse og tykkelse af lavpermeable og vandførende lag, områder hvor primære magasiner går i dagen, akkumulerede dæklagstykker, geokemiske forhold, tolkning af vandanalyser og aldersbestemmelser, grundvandspotentialeforhold og vandbalanceforhold, og er grundlaget for den numeriske grundvandsmodel.

Da brugen af numeriske grundvandsmodeller i zoneringsområdet dermed er strategisk er det vigtigt at *formålet* med modelleringen i første omgang defineres omhyggeligt:

- formål med modelleringen
- hvordan modelleringen tænkes at indgår i den samlede zoneafgrænsning
- diskuter hvilken type modelsimuleringer som skal laves med den numeriske grundvandsmodel

De forskellige trin i forbindelse med opstilling og kalibrering af en model fremgår af figur d.1 (Anderson og Woessner, 1991).



**Figur d.1**  
**Fremgangsmåde ved opstilling af numerisk grundvandsmodel (efter Anderson og Woessner, 1991)**

Opstilling af hydrogeologisk tolkningsmodel omfatter vurdering af geologiske og hydrogeologiske forhold, vurdering af overordnede strømningsforhold i hydrostratigrafiske enheder (lavpermeable og vandførende lag) og antagelser om magasinforhold, grundvandsdannelse, afstrømning og randbetingelser (Anderson og Woessner, 1991).

Den numeriske grundvandsmodel skal nødvendigvis kalibreres. Det kan i denne fase være nødvendigt at gå tilbage til den hydrogeologiske tolkningsmodel eller den geologiske model og revurdere opfattelsen af området, opdeling og sammenhæng i lagene i den hydrostratigrafiske model, parameterfastsættelsen etc. for at opnå overensstemmelse mellem beregninger og målinger.

Opstillingen af grundvandsmodeller kan eventuelt tage udgangspunkt i Danmarksmodellens geometri og randbetingelser (GEUS, 1997b; [www.vandmodel.dk](http://www.vandmodel.dk)). Færdigkalibrerede grundvandsmodeller bør tilsvarende indberettes til GEUSs modeldatabase, således at dels

Danmarksmodellen forbedres og dels at grundvandsmodeller samles og gøres tilgængelige igennem modeldatabasen (Henriksen, 1998).

## 5 Valg af modeltype

Der er i zoneringsvejledningen lagt op til at den detaljerede afgrænsning af sårbare zoner skal baseres på den detaljerede hydrogeologiske tolkning, suppleret med grundvandsmodellering af den arealdistribuerede grundvandsdannelse geografiske og tidslige variation, samt partikelbanesimulering.

Anvendelsen af numeriske grundvandsmodeller i zoneringszonen skal afpasses såvel behov og datagrundlag som hydrogeologisk ramme. Det er altså op til myndighederne (amterne) at vurdere om der ud over en overordnet numerisk grundvandsmodel, er behov for detailmodeller, og hvilke yderligere modelanvendelser der er behov for under konkrete hydrogeologiske forhold og belastningsforhold i et givent område.

Der findes numeriske grundvandsmodeller til en meget bred vifte af problemkomplekser. En nærmere afgrænsning af formål og dermed krav til modellen er afhængig af såvel problemerne med vandressourcen i et givent område (grundvand/overfladevand, nitrat/pesticider, saltvandsindtrængning, punktkilder/diffuse kilder etc.), som den hydrogeologiske tolkningsmodel og datagrundlaget.

Et indtryk heraf kan man få ved at besøge eksempelvis Scientific Software Group's hjemmeside (<http://www.scisoftware.com>) som alene inden for kategorien grundvandsstrømningsmodeller (mættet zone) omtaler mere end 35 forskellige modelkoder som er tilgængelige (heriblandt forskellige versioner af MODFLOW). Hertil kommer modelkoder som ikke distribueres gennem denne kanal (bl.a. MIKE SHE modellen).

I Danmark anvendes generelt den integrerede hydrologiske model MIKE SHE (SHE) (Abbott et al., 1986) og (DHI, 1991) og grundvandsmodellen MODFLOW (McDonald et al., 1988). Disse modeller har været anvendt på forskellige niveauer og i forskellige forbindelser:

- regionale vandressourcemodeller
- kildeplads oplandsmodeller
- afværgeprojekter
- naturgenopretningsprojekter
- forskningsprojekter

Eksempler på anvendelse i forbindelse med detailkortlægning og zoneringszoner er derimod i sigens natur er begrænset.

**Tabel d.2**  
**Generel anvendelse af grundvandsmodeller**

<b>Eksempler</b>	<b>MIKE-SHE</b>	<b>MODFLOW fx. GMS, Visual MODFLOW, MS-VMS, AQUA3D</b>
Strømningsmodel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Overflade- og vandløbsafstrømning (2-D)</li> <li>• Strømning i umættet zone (1-D)</li> <li>• Strømning i mættet zone (3-D)</li> <li>• Infiltration beregnes via umættet zone-modul.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strømning i mættet zone (3-D)</li> <li>• Vandløbsafstrømning beregnes som tilstrømning på delstrækninger (udgør f.eks. lækage eller dræn- randbetingelse)</li> <li>• Grundvandsdannelse skal fastsættes a priori, men kan indgå i modelkalibreringsproceduren</li> </ul>
Partikelbanemodul	Partikelbanesimulering under hensyn til såvel advektion som dispersion (random walk metode) i mættet zone nedstrøms: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indvindingsoplande til vandværker</li> <li>• Infiltrationsområder</li> <li>• Stoftransport og transporttider</li> </ul>	MODPATH eller PATH3 giver mulighed for partikelbanesimulering opstrøms eller nedstrøms i såvel stationær som transient strømningfelt. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indvindingsoplande til vandværker</li> <li>• Partikelbaner i udvalgte tværprofiler</li> <li>• Transporttider</li> </ul>
Stoftransportmodel	Transport, nedbrydning og koncentration af stofpartikler under hensyntagen til advektion, dispersion, adsorption og nedbrydning: <ul style="list-style-type: none"> <li>• mættet zone</li> <li>• overflade og vandløbsafstrømning</li> <li>• umættet zone</li> <li>• dobbeltporøse medier</li> </ul>	Transport, nedbrydning og koncentration af stofpartikler under hensyntagen til advektion, dispersion, adsorption og nedbrydning i mættet zone. <ul style="list-style-type: none"> <li>• mættet zone</li> </ul> (forskelle på options og muligheder for at håndtere sorption, nedbrydning og reaktive stoffer i de forskellige koder fx.: MT3D, RT3D, MODFLOWT til AQUA3D)

I de integrerede hydrologiske modeller foretages beregninger af vandafstrømning og opmagasinering for hele landfasen af det hydrologiske kredsløb. Med disse modeller er det muligt at kalibrere og validere modellerne mod observationer af vandløbsafstrømning og grundvandsstande, samt desuden jordfugtighed, drænvandsafstrømning mv., hvis sådanne eksisterer for det pågældende opland (Refsgaard, 1998; Refsgaard, og Knudsen, 1996).

Grundvandsmodeller kalibreres og valideres som oftest i forhold til observationer af minimumsafstrømning til vandløbsdelstrækninger og grundvandsstande (Henriksen, 1998). Valideringen af den ved modellen bestemte arealdistribuerede grundvandsdannelses størrelse og tidsmæssige variation kan dermed kun ske indirekte.

De ovennævnte numeriske grundvandsmodeller (tabel d.2), som i et vist omfang har været anvendt i Danmark i forbindelse med grundvandsmodellering, er generelt relativt fleksible, idet de giver mulighed for en 3D repræsentation af grundvandssystemet, transient simulering og forskellige muligheder for håndtering af randbetingelser til bl.a. dræn og vandløb.

Ud over disse modeller findes der derudover en række mere simple modelsystemer, som kan være lettere og hurtigere at anvende, men



som til gengæld er mindre fleksible på grund af begrænsninger til f.eks. 2D strømning, stationær eller analytisk løsning.

## 6 Brugen af modellen som et analyseværktøj

I relation til anvendelse af grundvandsmodeller i forbindelse med zoner er det strømnings- og de partikelbanemodeller, der i de fleste tilfælde er relevante, jf. tabel d.1. Egentlige stoftransportmodeller til vurdering af f.eks. nitrat- eller pesticidtransport på regional skala kan formentlig være relevante i mere specielle tilfælde.

Indvindingsoplande og infiltrationsområder kan beregnes vha. partikelbanemodeller i forlængelse af strømningsmodelberegninger. Konkret sker dette ved at finde ud af, hvor partiklerne stammer fra (Refsgaard, 1998; Refsgaard et. al., 1997 og GEUS, 1997a). Tilsvarende kan partikelbanemodellerne anvendes til at beregne hastighederne af vandpartiklerne og herudfra bestemme alderen af det grundvand, som pumpes op ved kildepladserne. Endvidere kan partikelbanemodellerne anvendes til at beregne transporttider igennem f.eks. øvre dæklag i mættet zone.

Anvendes egentlige 3-dimensionelle procesorienterede stoftransportmodeller, er det muligt at lave egentlige simuleringer af f.eks. nitrattransport. Disse modeller findes i dag. Modeller til simuleringer af pesticiders opførsel i grundvandet på regional skala foreligger ikke i dag, men simplificerede metoder baseret på partikelbanemodellering, kortlægning af redoxforhold og pH, vurdering af opholdstider i aerob og anaerob zone vil formentlig kunne anvendes til vurderinger af pesticidnedbrydning/omsætning i grundvandszonen (fra grundvandspejl til primære magasin / kildeplads).

Anvendelsen af grundvandsmodellerne skal primært sikre en bedre forståelse af det hydrologiske kredsløb og konsekvenser ved indgreb heri.

Ønskes usikkerheden nærmere kvantificeret, kan det være relevant at inddrage invers modellering/parameterestimering (Peck et al., 1988). Ved invers modellering anvendes et hjælpeprogram til at justere parameterverdier i modellen og styre generering af modelsetup, afvikling af kørsler samt udtræk af resultater (f.eks. PEST98 eller U-code).

Modelløren definerer på forhånd hvilke parametre der skal estimeres, samt evt. nogle intervaller som er acceptable. Det vil herigennem være muligt dels at få estimeret de parameterkombinationer, som giver den bedste overensstemmelse i forhold til observerede tryk niveauer og afstrømninger til vandløb, dels at få beregnet usikkerheder på parametre og dermed en vurdering af hvilke parametre, som er specielt vigtige at have viden om.

Sammenfattende er der ved zonerings primært behov for følgende modelanalyser:

- Vurdering af grundvandsdannelsen til de enkelte magasiner, herunder arealdistribueringen og tidslige variationer under anvendelse af numerisk grundvandsmodel med overfladekomponenter (integreret hydrologisk model).
- Vurdering af grundvandsdannende oplande til magasiner og kildepladser eller til vurdering af opholdstider i forskellige miljøer af grundvandszonen (aerob / anaerob) under anvendelse af stationær, evt. dynamisk numerisk grundvandsmodel med partikelbanesimuleringer.

## 7 Ressourceforbrug ved opstilling og anvendelse af modeller

Det kan være svært at angive generelle tidsforbrug for opstilling og kalibrering af grundvandsmodeller, idet dette afhænger meget af formål, detaljeringsgrad, kriterier m.m.. I tabellen herunder er der imidlertid anført en række overslag for tidsforbruget til opstilling og kalibrering af grundvandsmodeller (strømnings- og konservative stoftransportmodeller opgjort i forhold til et indvindingsopland, et Område med Særlige Drikkevandsinteresser (OSD-område) og et helt amt.

**Tabel d.3**

***Overslag for tidsforbrug til opstilling og kalibrering af grundvandsmodeller***

Ambitionsniveau for numerisk grundvandsmodel	Konsulenttid, måneder
Grundvandsmodel for et indvindingsopland (overordnet)	1 - 2
Grundvandsmodel for et indvindingsopland (detaljeret)	2 - 3
Grundvandsmodel for et eller flere OSD-områder (overordnet)	4 - 5
Grundvandsmodel for et eller flere OSD-områder (detaljeret)	7 - 9
Grundvandsmodel for et helt amt (overordnet)	10 - 12
Grundvandsmodel for et helt amt (detaljeret)	20 - 24

I tabellen er det forudsat, at der er cirka 160 arbejdstimer/måned. En overordnet grundvandsmodel er ment som en model hvor der, i modsætning til en detaljeret model, kun gennemføres overordnede betragtninger, og hvor detaljeringsgraden er begrænset, bl.a. som følge

af størrelsen af beregningscellerne. I den overordnede model vil beregningscellerne være i størrelsesordenen 200 - 500 meter. I en detaljeret model vil der være områder med celledimensioner ned til cirka 50 meter.

## 8 Referencer

*Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, P. E., O'Connell and Rasmussen, J. (1986):* An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, SHE, 2: Structure of a Physically-based, Distributed Modelling System. *J. Hydrolo.*, 87, 61 - 77.

*Andersen, M. P. og W. W. Woessner (1991):* Applied Groundwater Modelling. Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press.

*Christensen, S. (1995):* Grundvandsmodellering. Fra: O. B. Larsen: Danmarks geologi fra Kridt til i dag. Århus Geokompender nr. 1. Århus Universitet. 1995.

*Danish Hydraulic Institute (1991):* the European Hydrological System SHE. Users guide.

*GEUS (1997a):* Afprøvning af zoneringsmetoder, Miljøstyrelsen. Foreløbigt tryk.

*GEUS (1997b):* Temanummer - Vandressourcer, Ferskvand - Det 21. århundredes hovedproblem ? Geologi, Nyt fra GEUS, nr. 2, oktober 1997.

*Henriksen, H. J. (1998):* Overførsel af modeldata i landsdækkende modeldatabase. Vejledning i kvalitetsdokumentation. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport nr. 1998/26.

*Kemp & Lauritzen Vand & Miljø A/S (1994):* Fase 2: Vurdering af grundvandsmodeller. Vandplan Sjælland.

*Konikow, L. F. og J.D. Bredehoeft (1992):* Groundwater models cannot be validated. *Advances in Water Resources* 15, 75-83.

*McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. (1988):* A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, USGS.

*Miljøstyrelsen (1995):* Design, indkøring og drift af afværgepumpning. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 1 - 1995.

*NRC (1990):* Groundwater Models. Scientific and Regulatory Applications. National Research Council. National Academy Press. Washington, D.C.

*Peck, A., Gorelick, S., de Marsily, G., Foster, S. og Kovalevsky, V. (1988):* Consequences of Spatial Variability in Aquifer Properties and Data Limitations for Groundwater Modelling Practice. IAHS Publication No. 175. A contribution to the International Hydrological Programme of UNESCO (IHP III; project 2.4d). # ÅRSTAL?

*Refsgaard, J.C. og Knudsen, J. (1996):* Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models. Water Resources Research. 32(7), 2189-2202.

*Refsgaard, A., Gregersen, J., Butts, M. og Kristensen, M. (1997):* Indvindingsoplande og særlige drikkevandsområder, artikel i Vand & Jord, 4. årgang, nr. 3. juni 1997.

*Refsgaard, A. (1998):* Grundvandets sårbarhed - Edb-modellering. Vandforsyningsteknik 47. Danske Vandværkers Forening.



# Appendix e Klassifikation af vandanalyser ud fra sårbarhedskriterier

## 1 System til klassifikation af vandanalyser

Den kemiske sammensætning af en grundvandsprøve kan bruges til at klassificere grundvandet i et system af vandtyper. Vandtypen kan anvendes i vurderingen af grundvandets sårbarhed over for forurening, hvor også andre faktorer som belastningen, mængden af reducerende stoffer samt de hydrogeologiske forhold spiller en betydelig rolle.

Grundvandets kemiske sammensætning afspejler alle de påvirkninger vandet har været udsat for på dets vej fra overfladen ned til grundvandsmagasinet. Grundvandets kemiske sammensætning summerer bidrag fra bl.a. geologiske, geokemiske, og strømningsmæssige forhold. Den kemiske sammensætning kan under visse situationer bruges som indikation for vandets sårbarhed, vurderet på baggrund af forekomsten af forskellige stoffer.

I rapporter om grundvandsovervågningen fra 1995 og 1996 beskrives forskellige grundvandstyper og deres indhold af redoxfølsomme stoffer (GEUS 1995 & 1996). Beskrivelsen af forskellige vandtyper er her tilpasset ønsket om at kunne anvende denne type oplysninger i relation til grundvandsbeskyttelse og en risikovurdering i forhold til en række forureningskilder. Beskrivelsen af vandtyper bygger primært på eksisterende analyseresultater.

### *Redoxforhold*

Klassifikationssystemet tager udgangspunkt i vandprøvens indhold af redoxfølsomme stoffer, ( $O_2$ ,  $NO_3$ , Fe, Mn,  $SO_4$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  og  $NH_4$ ) samt forvittringsgraden (Ca, Mg og  $HCO_3$ ).

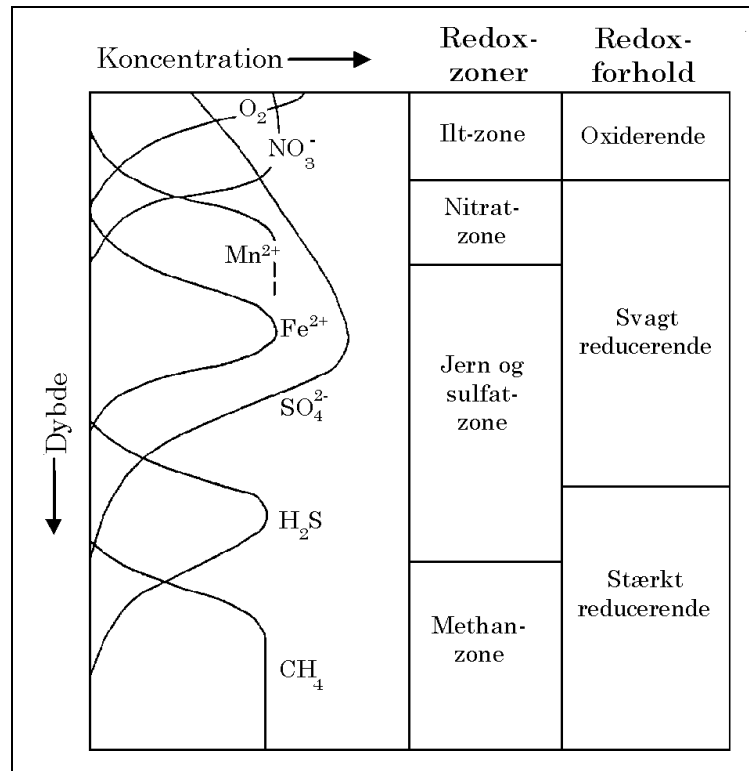
Redoxtilstanden i grundvandet har afgørende betydning for sårbarheden over for nitratforurening og for nedbrydeligheden af mange organiske forbindelser. Nogle forbindelser nedbrydes lettest under iltede forhold, mens andre nedbrydes lettest under reducerede forhold.

Redoxtilstanden kan desuden give en idé om vandets alder og dermed om risikoen for at finde forurening med svært nedbrydelige organiske forbindelser. Tilstedeværelsen af oxiderede forbindelser som ilt ( $O_2$ ) og nitrat ( $NO_3$ ) kan være en indikation for at vandet er ungt, mens

tilstedeværelsen af reducerede forbindelser som svovlbrinte ( $H_2S$ ) og methan ( $CH_4$ ) kan indikere at vandet er gammelt.

Den kemiske sammensætning af grundvandet afhænger ikke kun af vandets alder, men er i høj grad afhængig af mængden og reaktiviteten af forskellige reducerende stoffer i jordlagen, som for eksempel organisk stof, reducerede former af svovl (pyrit) og jern, opløst såvel som bundet i mineraler.

I figur e.1 ses fordelingen af forskellige redoxfølsomme stoffer ned gennem grundvandszonen, hvor forholdene gradvis ændres fra oxiderende til reducerende forhold. I praksis behøver ikke alle zoner at være tilstede i grundvandsmagasinet, ligesom zonerne kan have en meget forskellig udbredelse i forskellige geologiske aflejringer.



**Figur e.1**  
**Teoretisk fordeling af redoxkomponenter i grundvand (modificeret efter Appello og Postma, 1993)**

I tabel e.1. summeres forekomsten af redoxfølsomme stoffer samt grundvandets forvittringsgrad (forvittringsindex) i de forskellige zoner.

### Forvitningsgrad

Forvitningsgraden beskriver forholdet mellem hårdheden og alkalinitetsniveauet, her udtrykt ved bicarbonatindholdet. Forvitningsgraden beregnes som  $(Ca+Mg)/HCO_3$ , hvor stofferne indgår i milliækvivalenter pr. liter. Forholdet beskriver forsuringsprocessens fremskriden, idet calcium (Ca) og magnesium (Mg) delvis vil være knyttet til mineralsyrer, når vandet udsættes for andre syrer end kuldioxid ( $CO_2$ ).

Et forvitningsindex på 1:1 modsvarer den teoretiske sammensætning af calcium, magnesium og bicarbonat ( $HCO_3$ ) i grundvand, såfremt opløst kuldioxid er den eneste kilde til opløsning af kalkminerale. Et forvitningsindex på 1:2 er typisk såfremt mineralsyrer, som svovlsyre og salpetersyre, er eneste kilder til opløsning af kalkminerale. Forhøjede koncentrationer af calcium og magnesium i forhold til koncentrationen af bicarbonat skyldes ofte menneskeskabt forsurening.

På den baggrund er der foretaget en vandtypeinddeling som fremgår af tabel e.1.

**Tabel e.1**

**Forskellige grundvandstyper. Det for ilt anførte \*) indikerer at der kan være usikkerhed forbundet med at måle ilt, hvorfor den praktisk anvendte værdi måske skulle være 3 mg pr liter.**

Prioritet	Stoffer		Vandtype			
			Iltzonen	Nitratzonen	Jern- og Sulfatzonen	Methanzonen
1	O <sub>2</sub>	mg L <sup>-1</sup>	>1*	<1*	<1*	<1*
2	NO <sub>3</sub>		>1	>1	<1	<1
3	Fe		< 0,2	> 0,2	>0,2	>0,2
4	SO <sub>4</sub>		>20	>20	>20	<20
5	CH <sub>4</sub>		<0,1	<0,1	<0,1	>0,1
6	Ca+Mg HCO <sub>3</sub>		>1	>1	<1	<1

Ved beregning af forvitningsindexet bruges enheden milliækvivalenter pr. liter.  
Koncentrationen af Ca, Mg og HCO<sub>3</sub> kan omregnes fra mg pr. liter til milliækvivalenter pr. liter ved at multiplicere med faktorerne:  
Ca i mg pr. liter x 0,04990,  
Mg i mg pr. liter x 0,08229 og  
HCO<sub>3</sub> i mg pr. liter x 0,01639



## 2 De enkelte vandtyper

### 2.1 Grundvand fra iltzonen

Grundvand fra iltzonen er karakteriseret ved at det indeholder betydelige mængder opløst ilt samt nitrat og sulfat. Det høje redoxpotentiale tillader ikke opløst jern eller methan.

Vandtypen har normalt høj forvitningsgrad da calcium og magnesium er følgeioner til sulfat og nitrat. Desuden er denne vandtype ikke være ionbyttet. Størrelsesordnerne for de enkelte stoffer er vist i tabel e.1. Der er som oftest tale om meget ungt grundvand med en alder fra 0 til 30 år, men der findes dog eksempler på stærkt oxideret vand som har en betydeligt højere alder.

### 2.2 Grundvand fra nitratzonen

Grundvand fra nitratzonen er karakteriseret ved lavere redoxforhold end grundvand fra iltzonen. Grundvand fra denne zone indeholder ingen eller kun meget lave koncentrationer af ilt. Indholdet af nitrat er ofte lavere end for grundvand fra iltzonen. En reduktion af nitrat ses til tider ved forhøjede koncentrationer af nitrit, der er dannet i forbindelse med mikrobiel omdannelse af nitrat. Høje koncentrationer af sulfat sammenlignet med de øvrige redoxzoner tyder på forvitring af pyrit, forårsaget af ilt eller nitrat.

Denne vandtype vurderes påvirket af nitratholdigt vand, men tilstedeværelse af reducerende stoffer dæmper udbredelsen af nitrat. Udbredelsen af nitratholdigt vand sker i takt med at nitratreduktionskapaciteten opbruges, hvilket kan forceres ved kraftig vandindvinding. Vandets alder formodes generelt at ligge omkring 10 - 50 år. Forvitningsgraden vil være høj som følge af calcium og magnesium som ledsagende ioner til sulfat.

### 2.3 Grundvand fra jern- og sulfatzonen

Grundvand fra denne zone er kendetegnet ved lave indhold af ilt, nitrat og methan samt høje indhold af opløst jern.

Indholdet af sulfat kan være som i beskrevet for iltzonen og nitratzonen, ligesom en begyndende reduktion kan erkendes i nogle grundvandsmagasiner. Ved kraftig udnyttelse af grundvandsressourcen kan en samtidig iltning af pyrit resultere i forhøjede sulfatkoncentrationer i denne vandtype.

De fleste forekomster af denne vandtype vil være grundvand ældre end 50 år, og derfor ses forureningspåvirkninger kun sjældent endnu.

## 2.4 Grundvand fra methanzonen

Grundvand fra methanzonen er kendetegnet ved et stærkt reduceret kemisk miljø med forekomst af methan. Grundvand fra denne zone indeholder ikke ilt, nitrat og kun lave eller ingen indhold af sulfat. Reduktion af sulfat kan være meget fremskreden i denne zone. Grundvand fra denne zone kan være præget af ionbytning og lav forvitningsgrad, ligesom også brunt vand med forhøjede kloridkoncentrationer kan forekomme i denne vandtype.

Risiko for forurening af denne vandtype er lille. De eksempler der ses med miljøfremmede stoffer i denne vandtype, tolkes som resultat af menneskeskabte kortslutninger, enten i borerne direkte eller i jordlagene umiddelbart omkring borerne. Vandet forventes som oftest at være væsentligt ældre end 50 år, hvilket er medvirkende til at der sjældent forekommer forurening i denne vandtype.

## 2.5 Referencer

*Appello og Postma, 1993.* Geochemistry, groundwater and pollution. - 3ed. - Rotterdam: Balkema

Ernstsen, V. 1996. Reduction of nitrate by  $Fe^{2+}$  in clay minerals. *Clays and Clay Minerals* 44: 599-608.

Ernstsen, V. and Thorling, L. 1997. Geokemiske miljøer og nitrat i et komplekst opbygget grundvandsmagasin ved Grundfør. ATV møde om Grundvandsforskningen i Danmark 1992-96. pp. 29-39.

*Bådsgård Pedersen, J. og Kristensen, J.B., 1997:* Hvad er behovet for zoner. I: Kan zoner redde vandværker? ATV komiteen for grundvandsforurening, oktober 1997.

*Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse 1995):* Grundvandsovervågning 1995.

Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse 1996: Grundvandsovervågning 1996

*Jakobsen, R. & Postma, D, 1994.* In situ rates of sulfate reduction in an aquifer (Rømø, Denmark) and implications for the reactivity of organic matter. *Geology* 22: 1103-1106.

*Phelps, T.J., Murhpy, E.M., Pfiffner, S.M. & White, D.C. 1994.* Comparison between geochemical and biological estimates of subsurface microbial activities. *Microb. Ecol.* 28: 335-349.

*Thorling, L., 1994:* Sulfat som aldersindikator i grundvand. *Vand & Jord* vol. 1, nr. 3, juni 1994.



# Appendix f Regional fordeling af nitratsårbarhed

## 1 Faktorer der bestemmer nitratsårbarheden

NPo-projekterne har forøget kendskabet til og forståelsen af de processer der bestemmer nitratinholdet i grundvandet. Det er blevet helt klart at forureningsforholdene varierer fra sted til sted, helt afhængigt af de geologiske forhold der bestemmes af magasinegenskaber, de hydrauliske parametre og sammensætningen af magasinernes dæklag.

Undersøgelserne har vist at det er væsentligt at vurdere størrelsesordenen af nitratfrontens vertikale og horisontale fremtrængen samt den resulterende bevægelse. Det er ligeledes vigtigt at have kendskab til de nitratreducerende stoffers udbredelse i magasinerne samt i hvilken grad nitratreduktionskapaciteten i de øvre magasiner er opbrugt.

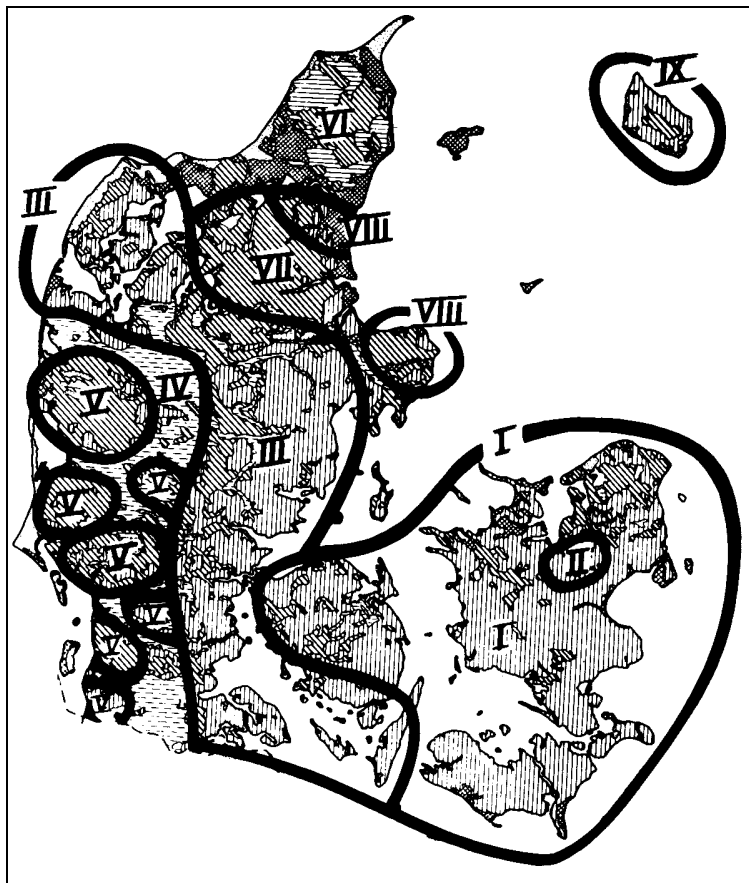
En oversigt over forskellige dæklag og magasintyper er på regionsplan forsøgt beskrevet nedenfor og indtegnet på kortet (figur f.1). Magasinerne i istidslagene er ofte underlejret af ældre magasiner i sand- eller kalklag. Disse magasiner kan hænge sammen vertikalt, som på hedesletterne (smeltevandssand-kvartssand) eller være tydeligt adskilt, som i morænelersområder. Der er tale om en stærkt forenklet og generaliseret opdeling, som er klassificeret efter dæklag.

De specielle forhold på de undersøgte lokaliteter er søgt generaliseret og regionaliseret, men alene i relation til vurdering af nitratreduktionsforholdene. Opdelingen og beskrivelsen kan dog med forsigtighed anvendes ved behandling af visse andre forureningsforhold.

## 2 Lerjordsområder

I omkring halvdelen af Danmarks areal består de øverste meter af jordlagene af moræneler, hvoraf hovedparten blev aflejret under sidste istid (Weichsel) for 10-15.000 år siden. Lerjordsområderne omfatter typeområderne I, II og III i figur f.1.

Morænelersområderne er i figur f.1 opdelt i 3 hovedtyper efter deres aflejningsforhold og sårbarhed over for nitratnedsivning. I det følgende er disse hovedtyper beskrevet.



*Figur f.1.  
Regionale typer af grundvandsmagasiner*

### 2.1 Type I, Relativt tykke uforstyrrede lerlag

Områder af type I er karakteriseret ved relativt tykke uforstyrrede lerlag, som dækker de vandførende lag. I grundvandsmagasinerne i sådanne områder vil der almindeligvis være artesiske forhold (figur f.2, Syvbæktype). Vandbevægelsen fra rodzonen til grundvandsmagasinerne sker gennem lerlagene, og kun en mindre del af det nedsvivende vand vil nå grundvandsmagasinerne. Vandstrømningen til vandløbene sker hovedsagelig gennem dræn.

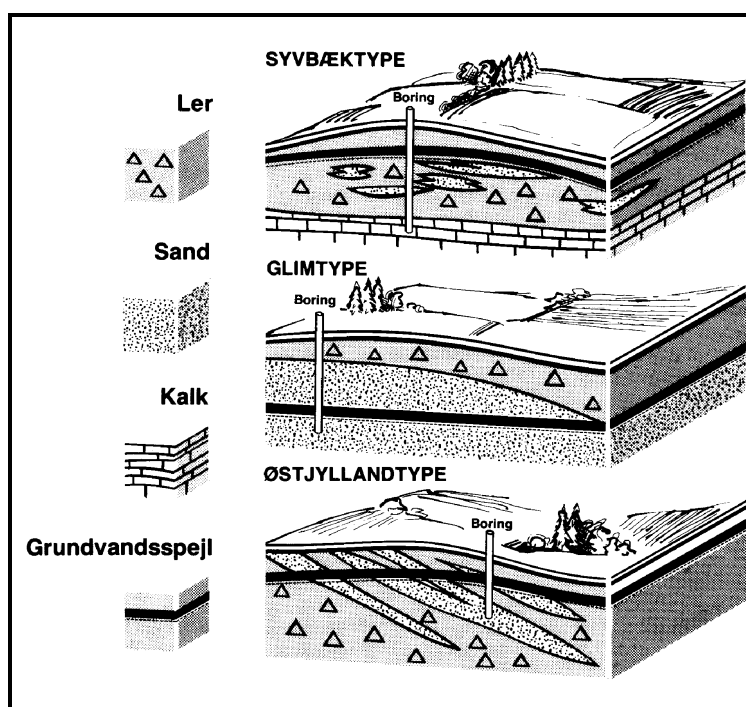
Områder af denne type findes i den overvejende del af Sjælland, på den nordlige del af Fyn (nord for en linie fra Fåborg til Svendborg) samt på Lolland, Falster og Møn. Områderne i type I skønnes at udgøre ca. 45 % af morænelersområderne.

## 2.2 Type II, Lerlag af varierende tykkelse over umættede magasiner

Områder af type II er karakteriseret ved lerlag af varierende tykkelse over umættede sand-/gruslag eller kalk-/kridtlag, således at grundvandsmagasinerne har frit vandspejl (figur f.2, Glimtype).

Vandbevægelsen fra rodzonen til grundvandsmagasinerne vil være lodret, og det nedsivende vand fra rodzonen vil passere en større eller indre del af grundvandsmagasinerne.

Områder af denne type findes i sammenhængende områder syd for Roskilde, syd for Aalborg og spredt på Nord- og Vestsjælland. Områderne i type II skønnes at udgøre ca. 5 % af morænelersområderne.



*Figur f.2  
Forskellige aflejringstyper i  
morænelersområder*

## 2.3 Type III, Restgruppe

Områder af type III udgør en restgruppe, hvor grundvandsmagasinerne er dækket af moræneler, som er forstyrrede af isens bevægelser. Sådanne områder har mindre, adskilte grundvandsmagasiner, som hovedsagelig vil være med artesiske forhold (figur f.2 Østjyllandstype). Vandets bevægelse vil i de artesiske magasiner være som beskrevet under type I og i magasiner med frit vandspejl som

beskrevet under type II. Grundvandets sårbarhed er således stærkt afhængig af placeringen af indvindingsfilteret.

Områder af den type findes i den sydlige del af Fyn og i Jylland nord og øst for hovedopholdslinien for weichselisens udbredelse. Områderne i type III skønnes at udgøre ca. 50 % af morænelersområderne.

### **3 Sandede bakker og hedesletter**

Sandjordsområderne omfatter hedesletter og sandede bakkeøer (figur f.1, områdetyperne IV og V). I disse områder vil de sand- og gruslag, som ligger over grundvandsspejlet, være iltede og derfor ikke give anledning til væsentlig reduktion af nitrat i det nedsivende vand fra rodzonen.

Nitrat i grundvand i et sandjordsområde vil derfor udbrede sig i den iltede del af grundvandsmagasinerne over redoxgrænsen uden væsentlig reduktion. Grundvandet i denne del af magasinerne har allerede nu hyppigt høje nitratkoncentrationer (50-100 mg nitrat/l.)

#### **3.1 Type IV, Hedesletter**

I området uden for hovedopholdslinien for udbredelsen af isen fra den sidste istid udgør hedesletteaflejringerne grovkornede sandmagasiner med frit vandspejl (figur f.1, IV). Der findes desuden også mindre hedesletteområder med lignende forhold andre steder i landet. Underliggende miocæne kvartssandslag indgår hyppigt i magasinerne.

Der er ofte en tyk umættet zone, hvor reduktionskapaciteten over for nitrat er opbrugt, og der optræder en lagdeling af grundvandet i øvre dele med højere koncentration af nitrat og nedre dele, hvor nitraten er omsat. I hedeslettesandet er det tilstedeværelsen af omlejret brunkul og pyrit der giver anledning til nitratreduktionen.

#### **3.2 Type V, Bakkeøer**

Vest for hovedopholdslinien i hedesletteområderne findes bakkeøerne med aflejringer der er ældre end sidste istid, og alderen er således over ca. 100.000 år (figur f.1, V). I bakkeøerne findes både frie og artesiske grundvandsmagasiner, hvor de øvre dæklag i de artesiske magasiner normalt er stærkt sandede.

Stedvis er der tykke, umættede zoner over grundvandet, og de mange års nedsivning af ilt har bevæget redoxgrænsen dybt nedad, hvorfor disse istidslag er sårbare over for nitratnedsivning. Det er imidlertid også karakteristisk, at istidslagene indeholder brunkul og pyrit, og hvor det er tilfældet (samt hvor miocæne lag af brunkul og glimmerler ligger højt), vil der være en effektiv reduktionskapacitet i mange år fremover.

I de områder hvor der er dybe, udnyttelige kvartssandslag under brunkul og glimmerler, vil der således være en beskyttelse mod nitratforurening.

## **4 Andre områder**

Disse områder er relativt uensartede og falder derfor uden for de hovedmønstre som er beskrevet i de foregående afsnit. På kortet i figur f.1 er de afmærket med romertallene VI-IX.

### **4.1 Type VI, Områder nord for Limfjorden**

I dette område forekommer der grundvandsmagasiner i skrivekridt, i istidslag og i marine sandaflejringer dannet efter sidste istid. Lagene er ofte forstyrrede og opskubbede med det resultat af magasinerne er tynde og begrænsede, men større og uforstyrrede magasiner i smeltevandssand kendes også.

Mange magasiner er artesiske, og de er derfor delvis beskyttede mod nitratforurening af tykke smeltevandslager. En del af skrivekridtmagasinerne er frie med meget tynde istidslag over, og de vil derfor være særligt udsatte for nitratforurening. I områder med marine aflejringer kan dannelse af metan reducere nitraten. Der er ikke foretaget proces- og transportundersøgelser i dette område i forbindelse med NPO-projekterne.

### **4.2 Type VII og VIII, Himmerland og Djursland**

I visse områder (type VII) som f.eks. i Himmerland, findes grundvandsmagasiner i smeltevandssand, skrivekridt og danielkalk, som kan være overdækkede med lerlag og derfor artesiske og forholdsvis velbeskyttede mod nitratforurening. Magasinerne kan være forstyrrede og lagene opskubbede, hvilket almindeligvis gør at magasinerne er af begrænset udstrækning.

På Djursland og omkring Aalborg findes mange grundvandsmagasiner med frit vandspejl i smeltevandssand uden overdækning af lerlag og i skrivekridt og danielkalk, som kun er dækket af tynde overfladelag eller umættede lag af smeltevandssand og -grus (type VIII). Disse sidste vil oftest have høje nitratkoncentrationer i de øverste grundvandslag.

### **4.3 Type IX, Bornholm**

På Bornholm er magasinerne dæklag næsten altid tynde (moræneler), men uforstyrrede. Desuden har nogle magasiner frit vandspejl. De fleste magasiner er sårbare over for nitratnedsivning.



## 5 Referencer

*Dyhr-Nielsen, M., Hansen, E., Holter, V., Krag-Andersen, K., Gravesen, P., og Iversen, T.M.:* Kvælstof og fosfor i jord og vand. Samlerapport. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, 1991.