

Undersøglesprogram for grundvandsforurening

Vurdering af udbredelse/overskridelse af skel

Lizzi Andersen, DHI

Jesper Holm, DHI

Kim Broholm, DHI

Adam Brun, DHI

Hans Peter Dybdahl, DHI

Christian Grøn, DHI

Anders G. Christensen, NIRAS A/S

Charlotte Riis, NIRAS A/S

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

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

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

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	11
2 UNDERSØGELSESTRATEGI	12
2.1 STRATEGIPRINCIPPER	12
2.2 RELEVANTE SCENARIER	13
2.2.1 <i>Kildetyper</i>	13
2.2.2 <i>Hydrogeologityper</i>	13
2.3 OPSTILLEDE SCENARIER	14
2.3.1 <i>Scenarie I "kortvarigt større spild"</i>	14
2.3.2 <i>Scenarie II "længerevarende mindre spild"</i>	15
2.4 STATISTISK GRUNDLAG FOR VURDERING AF BORINGSANTAL, - PLACERING OG-FILTERSÆTNING	15
3 UNDERSØGELSESPROGRAM	19
3.1 FORARBEJDE	19
3.2 TILSTEDEVÆRELSE AF FORURENINGSKILDER	20
3.3 VURDERING AF UDBREDELSE/OVERSKRIDELSE AF SKEL	21
3.3.1 <i>Scenarie I, "kortvarigt større spild"</i>	22
3.3.2 <i>Scenarie II, længerevarende mindre spild"</i>	24
3.3.3 <i>Oversigt</i>	27
4 UNDERSØGELSESMETODER	30
4.1 BORINGER	30
4.2 FASTLÆGGELSE AF VANDBEVÆGELSE	31
4.2.1 <i>Strømningsretning</i>	31
4.2.2 <i>Hydraulisk ledningsevne og strømningshastighed</i>	32
4.3 PRØVETAGNING	32
4.3.1 <i>Jordprøver</i>	33
4.3.2 <i>Vandprøver</i>	33
4.3.3 <i>Poreluftmålinger</i>	34
4.3.4 <i>On-line metoder</i>	35
4.4 ANALYSEPROGRAM	35
4.4.1 <i>MTBE</i>	35
4.4.2 <i>Forslag til analyseprogram</i>	36
4.4.3 <i>Feltanalyser</i>	37
5 REFERENCER	39
BILAG 1. ERFARINGSOPSAMLING FRA FYNS AMT VEDR. MTBE43	
BILAG 2. MODELLERING AF SCENARIER	49
BILAG 3. STATISTISK GRUNDLAG	59
BORINGER PÅ BENZINSTATIONENS AREAL	60
BORINGER I OG UDEN FOR SKEL	62
SAMMENHÆNG MELLEM ØKONOMI OG SPORINGSSANDSYNLIGHED	65

Forord

Miljøstyrelsen har i samarbejde med Fyns Amt iværksat en række projekter med fokus på grundvandsforurening med MTBE, primært som følge af, at der er observeret forurening med MTBE ved en meget stor procentdel af de benzinstationer på Fyn, der er undersøgt i større eller mindre omfang. Et af projekterne har til formål at opstille et forslag til undersøgelsesprogram til lokalisering af grundvandsforureninger, som strækker sig uden for den forurenede lokalitet, eksemplificeret ved forureninger ved benzinstationer.

Dette projekt er efter aftale med Miljøstyrelsen og Fyns Amt udført af DHI – Institut for Vand og Miljø med NIRAS A/S som samarbejdspartner. Både Oliebranchens Miljøpulje og Fyns Amt har bidraget med erfaringsdata.

Projektet er gennemført i perioden juli til oktober 2001. Efterfølgende er det foreslåede koncept blevet afprøvet ved en række benzinstationer, og programmet er herefter tilrettet på baggrund af de indvundne erfaringer fra denne afprøvning. Metodebeskrivelser for feltmetoder og analyser er i mellemtiden publiceret i andre udgivelser og er derfor til dels slettet fra denne rapport, og der er i stedet henvist til disse udgivelser. Kapitel 4 indeholder dog stadig en oversigt over relevante undersøgelsesmetoder, men denne er ikke opdateret siden 2001.

Lizzi Andersen har været projektleder og har fået støtte af følgende medarbejdere fra DHI – Institut for Vand og Miljø: Jesper Holm, Kim Broholm, Adam Brun, Hans Peter Dybdahl og Christian Grøn. Fra NIRAS A/S har medvirket Anders G. Christensen og Charlotte Riis. Afprøvningen af konceptet er udført af GEO ved blandt andre Jes Holm, Morten Kjærgaard, Henrik Steffensen og Jens Baumann. Undersøgelserne er igangsat i 2002 og rapporteret i 2006. Afprøvningsprojektet omfattede udførelse af grundvandet nedstrøms 11 benzinstationer, med henblik på opsamling af erfaringer og resultater for den praktiske gennemførelse af undersøgelseskonceptet.

Til at følge arbejdet har været nedsat en gruppe bestående af: Michael Mücke Jensen / Anders Riiber Høj, Oliebranchens Miljøpulje; Kim Dahlstrøm og Arne Rokkjær (fra 1. september 2005), Miljøstyrelsen., Leif B. Jespersen, Miljøcenter Fyn og Steen Kofoed Munch / Lone Frederiksen (fra 1. april 2003), Fyns Amt.

Sammenfatning og konklusioner

I nærværende rapport er opstillet et forslag til et undersøgelseskoncept til vurdering af udbredelsen af forureningsfaner, specielt uden for en lokalitets grundgrænser. Konceptet er eksemplificeret ved forurening med MTBE og BTEX fra benzinstationer. Det statistiske grundlag for det foreslåede koncept er baseret på en større erfaringsindsamling foretaget af Fyns Amtskommune på i alt 72 benzinstationer.

Konceptet opdeler forureningssituationerne i to typer af spild:

- kortvarigt større spild
- længerevarende mindre spild,

idet det har vist sig, at intensiteten og varigheden af spildet har betydning for længde og bredde af forureningsfanen. I rapporten gives der anvisninger på, hvorledes man skelner mellem de to typer af spild bl.a. afhængigt af de koncentrationer, man måler i grundvandet.

Der er dels skitseret et program for en forundersøgelse, hvis formål dels er at konstatere tilstedeværelsen af en forurening, dels at fastlægge den overordnede strømningsretning på lokaliteten, idet der fokuseres på afstrømning i det sekundære terrænnære grundvand. Derudover er der afhængigt af typen af spild, som bl.a. skal estimeres på grundlag af forundersøgelsen, foreslået en hovedundersøgelse, som skal undersøge forureningens eventuelle udstrækning udenfor grundgrænsen. Det statistiske grundlag for fremgangsmåden er beskrevet i en række bilag.

Efter opstillingen af programmet er dette afprøvet på i alt 11 lokaliteter. Resultatet af denne afprøvning er afrapporteret i et særskilt miljøprojekt. På baggrund af de erfaringer, der blev indhøstet ved afprøvningen, er der foretaget mindre justeringer af konceptet. En samlet oversigt over konceptet kan ses i Tabel 3.3. Det er i forbindelse med afprøvningen påpeget, at konceptet er afhængigt af, at der er et relativt sammenhængende sekundært grundvandsmagasin på lokaliteten for at kunne give retvisende resultater. Det skal bemærkes, at der ved afprøvning stort set alene blev boret uden for lokalitetsgrænserne, hvilket ville skærpe nødvendigheden af ovennævnte forudsætning.

Rapporten indeholder et afsnit (kapitel 4) om relevante undersøgelses- og analysemetoder. På grund af afprøvningsperioden er detaljerne i disse beskrivelse i mellemtiden afrapporteret i andre sammenhænge, hvorfor dette afsnit ikke er opdateret i den endelige udgave af nærværende rapport.

Summary and conclusions

In this report a concept is set up regarding the investigation of the extension of contaminant plumes beyond the site boundary. The concept is exemplified by contamination by MTBE and BTEX at gasoline stations. The statistical basis for the concept is comprised of data from an extensive survey carried out on 72 gasoline stations by the County of Funen.

The concept divides the contamination situations into two types of spills:

- short larger spills
- small spills of long duration,

since it has been shown that the intensity and the duration of the spill influences the length and width of the plume. In the report, directions are given on how to distinguish between the two types of spill, dependent on the measured contaminant concentration for instance.

A program is set up for a primary investigation, which has two goals. The first is to register if contamination is present or not, the other is to determine the main run of direction in the secondary groundwater. The type of spill is also estimated based on the primary investigation. A program is also described for the main investigation dependent of the type of spill. The aim of this investigation is to determine the presence of contamination beyond the site border. The statistical basis for the procedures are described in a set of annexes.

After the concept was first developed it was tested on 11 sites. The results of this test is reported in a separate report from the Danish Environmental Protection Agency. Based the experiences gained from the testing, minor adjustment were done to the concept and procedure. An overview of the concept is given in Table 3.3. In connection with the testing it has been pointed out that it is dependent on the existence of a relatively continuous secondary groundwater aquifer, if sufficiently reliable results are to be obtained. It should be noted that during the test, borings were almost exclusively carried out outside the site boundaries. This will increase the necessity of a continuous aquifer in order for the concept to be meaningful.

The report contains a chapter (chapter 4) about relevant investigation and analysis methods. Due to the testing period, the details in these descriptions has meanwhile been reported in other reports, and it has thus been decide not to update the chapter in this report, since it was first written.

1 Indledning

I juni 2001 har Miljøstyrelsen i samarbejde med Fyns Amt på ovennævnte baggrund iværksat en række projekter vedrørende MTBE-forureninger. Nærværende projekt er et af disse projekter og har til formål at opstille forslag til et repræsentativt undersøgelsesprogram for identifikation af en grundvandsforurening, som strækker sig uden for den forurenede lokalitet, i forhold til forskellige forureningsmæssige og geologiske forhold, eksemplificeret ved forureninger ved benzinstationer. Det er ønsket, at undersøgelsesprogrammet skal give en principiel sikkerhed svarende til, at 95 % af grundvandsforureningerne opdages udenfor grunden.

Samtidig er det udtrykt, at der ikke kun ønskes identifikation af en evt. forurening indenfor virksomhedens areal, men også en indikation af, om forureningen findes uden for grunden eller ej.

Løsningen af opgaven har taget udgangspunkt i en analyse af det foreliggende datamateriale med hensyn til mulige sammenhænge mellem forureningsidentifikation og -omfang samt diverse potentielt relevante informationer, såsom tankantal og -størrelse, geologi, dybde til grundvandsspejl, afstand til identifikationsboring etc. Endvidere er der opstillet spredningsmodeller for et antal potentielle spredningsscenerier ved brug af MIKE SHE. Ved variation af diverse relevante parametre er mulig udstrækning m.h.t. længde og bredde vurderet. Endelig er diverse statistiske værktøjer anvendt for at fastlægge nødvendigt antal boringer/-boringsafstand samt de tilhørende omkostninger med henblik på at fastslå sammenhænge mellem de forskellige scenarier, grad af sikkerhed ved undersøgelsen og den tilhørende økonomi.

På baggrund heraf og den af GEO gennemførte afprøvning af den foreslåede undersøgelsesmetode (Miljøstyrelsen og Fyns Amt, 2006) er der i kapitel 2 og 3 i nærværende rapport opstillet forslag til undersøgelsesprogram og dets sammenhæng med de forskellige scenarieparametre. I kapitel 4 er de undersøgelsesmetoder, som er relevante for undersøgelser af grundvandsforureninger primært forårsaget af tankanlæg med olieprodukter beskrevet, omfattende bore- og prøvetagningsmetoder samt forslag til analyseprogram. I denne sammenhæng er metoder til kildefastlæggelse medtaget i det omfang, dette har direkte betydning for en eventuel grundvandsforurening. Kapitel 4 er som nævnt ikke opdateret siden 2001.

I bilagene til rapporten er beskrevet dels lidt baggrundsinformation om brugen af MTBE og dette stofs egenskaber, den nærmere gennemgang af erfaringsmaterialet og konklusionerne fra denne gennemgang, dels de modelberegninger, der er udført, og de deraf udledte konklusioner (bilag 1 og 2). Bilag 3 indeholder en beskrivelse af de anvendte statistiske hjælpeværktøjer m.m.

Undersøgelsesprogrammet er af GEO afprøvet på i alt 11 benzinstationer, seks benzinstationer med en driftsperiode efter 1985, hvor Oliebranchens Miljøpulje (OM) har konstateret benzinformening (heraf er der udført hel eller delvis oprensning på de fem), og fem idriftværende benzinstationer etableret efter 1972 (GEO, 2006).

2 Undersøgellesstrategi

I nærværende kapitel er det søgt at beskrive principperne bag de opstillede undersøgelsesstrategier. Principperne er baseret dels på erfaringsopsamlingen ud fra eksisterende kortlægnings- og forureningsundersøgelser på en lang række benzinstationer (se beskrivelse i bilag 1), dels på de foretagne modelsimuleringer (se beskrivelse af forudsætninger i bilag 2), samt endelig på statistisk baserede beregninger af sandsynligheder for at finde faner af givne udstrækninger, givet en række forudsætninger og den generelle viden om benzinstationers indretning og logistik i øvrigt. Man kan sige, at det for en stor del drejer sig om almindelig sund fornuft baseret på en systematisk bearbejdning af foreliggende viden om forureningsituationer, stofegenskaber, geologisk variation m.v. En gennemgang af principperne bag undersøgelsesprogrammerne foretages i dette kapitel, mens en mere kagebogsagtig beskrivelse af selve fremgangsmåden gives i næste kapitel (kapitel 3).

2.1 Strategiprincipper

Formålet med undersøgelsesprogrammet er at kunne identificere grundvandsforurening på og omkring en lokalitet med stor sandsynlighed, eksemplificeret ved forureninger ved benzinstationer. Indsamling af viden om forureningsniveauet i et evt. kildeområde sker således alene med henblik på at kunne vurdere, om der forekommer en grundvandsforurening, og det er ikke formålet med sikkerhed at fastslå, hvad der er den præcise kilde til forureningen. Endvidere er det formålet at kunne afgøre, om forureningen har spredt sig uden for grundgrænsen, hvor og ca. i hvilket omfang.

Der er lagt vægt på, at undersøgelserne af tilstedeværelsen af en grundvandsforurening kan udføres udenfor lokaliteternes, i dette tilfælde benzinstationernes, areal. Dette er betinget af, at der kan være flere situationer, hvor det ikke er muligt at foretage undersøgelser tæt på forureningskilderne, f.eks.

- hvis virksomheden er nedlagt, og der er opført nye bygninger, som umuliggør kildenære undersøgelser
- hvis der er udført begrænsede undersøgelser på virksomheden omkring mulige kilder, og disse undersøgelser ønskes suppleret med nedstrøms observationsboringer
- køb/salg af virksomheder, hvor køber eller sælger ønsker at få et overordnet indtryk af forureningsituationen uden at gå tæt på eksisterende installationer
- et undersøgelsespåbud, hvor der ønskes gennemført undersøgelser for at belyse, om der findes en nedstrøms forurening.

Det foreslåede undersøgelsesprogram er eksemplificeret ved forureninger ved benzinstationer og er bygget op omkring identifikation af grundvandsforureninger med MTBE, da disse ikke nødvendigvis vil blive identificeret i forbindelse med undersøgelser, der fokuserer på identifikation og afgrænsning af forureninger med kulbrinter på en benzinstation. Endvidere vil sådanne grundvandsforureninger p.g.a. MTBE's egenskaber ofte nå en udbredelse i

grundvandet, der er større end en grundvandsforurening med BTEX/totalkulbrinter, inden de opdages (se f.eks. API, 1998). Men undersøgelseskonceptet kan principielt bruges til at vurdere andre typer af forureninger; blot vil dette kræve et kendskab til den forventelige størrelse af en forureningsfane med den pågældende spildtype og forureningskomponent samt forholdet mellem grænseværdien for det pågældende stof og den forventelige (eller målte) koncentration i kildeområdet.

Det er ikke formålet at foretage en afgrænsning af hverken jord- eller grundvandsforureninger med henblik på f.eks. design af evt. afværgeforanstaltninger.

2.2 Relevante scenarier

Opstillingen af scenarier for grundvandsforurening baserer sig på variationer af to hovedelementer:

- kilde/spild-type
- hydrogeologiske forhold.

2.2.1 Kildetyper

Fra gennemgangen af erfaringsopsamlingen fra Fyns Amt fremgår det, at der er væsentlig forskel på grundvandsforureningens karakteristika afhængigt af, om det drejer sig om:

- en forurening forårsaget af en egentlig lækage (et brud eller en væsentlig utæthed i tank, rørføring, udskiller eller stander), eller
- et spild, der har karakter af en langsom, mindre udsivning, typisk fra afløbssystemet, der skal opsamle overfladevand.

Disse 2 typer af spild er i det følgende benævnt "kortvarigt større spild" og "længerevarende mindre spild". En konkret undersøgelse vil typisk tage udgangspunkt i én af to følgende situationer:

- 1) Viden om forekomsten af en potentiel lækage baseret på f.eks. oplysninger om væsentlige mankoer mellem leveret og solgt benzinmængde. I dette tilfælde vil man kunne tage udgangspunkt direkte i det scenarium, der vedrører lækage.
- 2) Der foreligger ingen viden om konkrete spild, men undersøgelsen kan være en del af en generel kortlægningsindsats eller en på anden måde prioriteret undersøgelsesindsats.

2.2.2 Hydrogeologityper

Spredningen af en opstået grundvandsforurening afhænger af strømningsforholdene i det overfladenære sekundære grundvandsmagasin, såfremt sådanne forefindes, og af udvekslingen mellem det sekundære og det primære grundvandsmagasin. Strømningsforholdene bestemmes af den geologiske sammensætning af materialet og af den hydrauliske gradient. Endvidere vil transporten af forskellige forureningskomponenter påvirkes af de geokemiske og biologiske forhold i akviferen.

På en benzinstation vil geologien i de øverste meter typisk være præget af fyldmaterialer af varierende art og, bortset fra hedeslette områder, som fx

Vestjylland, af varierende lag af moræne med større eller mindre indhold af sand, grus og sten med indlejrede striber af smeltevandssand af større eller mindre mægtighed. Ud fra de indsamlede erfaringer (primært fra Fyns Amt) synes geologiske variationer i de overfladenære lag ikke at have nogen væsentlig indflydelse på sandsynligheden for registrering af forurening nær relevante tanke.

Faneudbredelsen synes heller ikke at afhænge væsentligt af den geologiske sammensætning i de vandførende lag (hvilket skulle forventes). Dette skyldes til dels, at jordlagenes sammensætning ikke varierer meget i de foreliggende sager, dels at der ikke altid er oplysninger om total faneudbredelse (i længderetningen), og endelig at det samlede antal sager er begrænset.

Generelt vil et koncept, der baserer sig på skøn over forventelige længder og bredder af en forureningsfane, som udbreder sig i en relativt entydig retning, kræve at forureningsfanen er forholdsvist sammenhængende, og udbredelsesretningen forholdsvist ens over tid. Dette vil igen afhænge af, at der findes et rimeligt sammenhængende grundvandsmagasin, samt at gradienten på grundvandsspejlet ikke er alt for lille eller meget påvirket af tidsmæssigt varierende hændelser (f.eks. varierende pumperater i nærliggende pumpeboringer).

De geologiske scenarier, som er opstillet i modelsimuleringerne spænder over hydrauliske ledningsevner fra 10^{-5} – 10^{-3} (m/s) og hydrauliske gradienter fra 1 ‰ til 5 ‰. Når der tages højde for, hvilke kombinationer af ovenstående, der er realistisk, svarer dette til porevandshastigheder mellem 1 og knap 300 m pr. år med en porøsitet på 0,3. Anbefalingerne omkring inddragelse af den potentielle geologiske variation i de øvre jordlag i undersøgelserne er baseret på en kombination af resultaterne af de foretagne modelsimuleringer og erfaringsopsamlingens oplysninger.

I konceptafprøvningen i (GEO, 2006) er der konstateret moræneler over det øvre sammenhængende grundvandsspejl i flere af sagerne. Der er derfor i bilag H.1 til GEO's rapport resumeret foreliggende viden om forureningstransport i moræneler.

2.3 Opstillede scenarier

I dette afsnit er givet en sammenfatning af de typiske data for de 2 kildescenarier: "kortvarigt større spild" (Scenarie I) og "længerevarende mindre spild" (Scenarie II) baseret på erfaringsdata samt de beregninger, der er foretaget af kildestørrelser og varighed i forbindelse med de udførte modelsimuleringer. Nærmere beskrivelser fremgår af bilag 1 og 2.

Der er generelt et større erfaringsmateriale til rådighed for vurdering af faneudbredelse ved "kortvarigt større spild" end ved "længerevarende mindre spild", og disse kan derfor inddrages i de i kapitel 3 opstillede anbefalinger. Erfaringsgrundlaget for "længerevarende mindre spild" omfatter ofte kun data for én boring, hvorfor de skønnede faneudbredelser i højere grad er baseret på modelberegningerne.

2.3.1 Scenarie I "kortvarigt større spild"

Et "kortvarigt større spild" er defineret som et væsentligt udslip forårsaget af et brud i rørføringer m.m. tilknyttet tanksystemet, standerne m.m. Et sådant udslip vurderes kun at kunne forløbe over en vis tid, inden det opdages, f.eks. via den løbende opgørelse af påfyldt contra solgt mængde. I bilag 1 er

gengivet de beregninger og forudsætninger, der er anvendt for at opgøre størrelse og varighed af et sådant spild afhængigt af det konkrete omfang af benzinsalget (antal og størrelse af tankene). I de udførte modelberegninger (se bilag 2) er det på denne baggrund forudsat, at et spildet kan forløbe i ca. 15 uger, før det opdages og standses, mens der kan gå yderligere i størrelsesordenen et år, før undersøgelse og ikke mindst oprensning af fanen påbegyndes.

Erfaringsopsamlingens data (hvor der ikke foreligger oplysninger om, hvor længe spildet kan have været) viser, at en fane fra et "kortvarigt større spild" kan blive op til 70 m lang og op til 30 – 40 m bred (se bilag 1), og at dette ikke, inden for den variation der er i jordart og gradient, varierer entydigt med nogen af disse parametre. Dog synes længdeudbredelsen at blive større, såfremt det drejer sig om udbredelse i mere usammenhængende magasiner (koncentrationsforskellene er så tilsvarende større og mindre entydigt aftagende i en given retning).

2.3.2 Scenarie II "længerevarende mindre spild"

Et "længerevarende mindre spild" vil typisk fremkomme ved mindre utætheder i det afløbssystem, der opsamler overfladevand fra de befæstede arealer omkring stander- og påfyldningsarealer. I bilag 2 er foretaget beregninger af det typiske omfang på årsbasis.

Der foreligger som nævnt ikke data i erfaringsopsamlingen for egentlig afgrænsede "længerevarende mindre spild", men kun mere spredte boringer eller kun én karakteriseringsboring. De sager, hvor de observerede koncentrationer ikke overskrider 100 – 200 µg/l, vurderes som sager, hvor forureningen med stor sandsynlighed er forårsaget af udsivning fra afløbssystemet, altså et såkaldt "længerevarende mindre spild".

I bilag 2 er foretaget en beregning af sandsynlig størrelsesorden for et sådant "længerevarende mindre spild". Det må forventes, at et "længerevarende mindre spild" kan forløbe i ganske mange år uden at blive opdaget. Da MTBE er væsentlig i vurderingen af grundvandsforureningerne i denne sammenhæng, er det i modelberegningerne forudsat, at spildet har forløbet i 15 år svarende til indførelsen af MTBE. De udførte modelberegninger viser, at forureningen med MTBE teoretisk kan have spredt sig fra 30 til over 100 m afhængigt af jordart og gradient, mens en BTEX-fane vil kunne have spredt sig mellem 10 og 70 m og en fane af højere kulbrinter mellem 10 og 30 m. Disse spredninger harmonerer med de spredninger, der er konstateret ved en række større amerikanske undersøgelser (bl.a. Newell & Connor, 1998; Lavis & Rehman, 2000).

En nærmere beskrivelse af de udførte modelberegninger samt de afprøvninger, der er foretaget af variationen i forskellige parametre er gengivet i bilag 2.

2.4 Statistisk grundlag for vurdering af boringsantal, -placering og filteretsætning

Ud fra erfaringsopsamlingen (se bilag 1) ses det, at der er stor sandsynlighed for at finde et MTBE-indhold på over 5 µg/l på en benzinstation (65 %). Samtidig kan man af de foretagne afgrænsningsundersøgelser se, at de fundne MTBE-faner dækker mellem 15 og 45 % af benzinstationsarealet (se bilag 1). Dette medfører, at der – i modsætning til mange andre typer af forureninger –

ikke skal et meget stort antal boringer til for at finde en MTBE-forurening (defineret som en koncentration af MTBE på over 5 µg/l).

Vurdering af tilstrækkeligt boringsantal på benzinstationen.

Ved anvendelse af "hot-spot" statistik (se bilag 3) kan man ud fra erfaringsopsamlingens oplysninger udregne, at der inden for et areal, der dækker et typisk tankgravsområde samt en bræmme på 1,5 m omkring denne, skal 1 til 2 boringer til for at finde en forurening med MTBE med over 95 % sandsynlighed, såfremt der er en forurening.

Her er der ikke taget stilling til, om den fundne forurening er forårsaget af "kortvarigt større spild" eller af et "længerevarende mindre spild", idet de sandsynligheder, der kan beregnes ud fra erfaringsopsamlingen ikke giver grundlag for dette. En nærmere beskrivelse af den anvendte statistik fås f.eks. i Kjeldsen et al (1991) eller Centre for Research into the Built Environment (1994).

For at indhente yderligere oplysninger til brug for vurderingen af kildetypen, samt for at opnå viden om afstrømningsretningen af en evt. fane, er det nødvendigt at placere endnu et antal boringer på grunden. Det kan udregnes (se bilag 3), at der skal 5 til 6 boringer i en omkreds på 5 m fra en tank til for at finde en forurening med en sandsynlighed på over 90 %, såfremt der er en forurening. Dette antal (5-6) er fastsat under forudsætning af, at der er lige stor sandsynlighed for, at forureningen findes i alle retninger fra tanken. Hvis man har kendskab til afstrømningsretningen, kan antallet af boringer indsnævres væsentligt, da dette jo vil have betydning for sandsynligheden for at finde forurening i de forskellige retninger.

Hvis det forudsættes, at fanen med meget stor sandsynlighed vil bevæge sig i en bestemt retning, der udgør 25 % af omkredsen eller mindre, vil boringsantallet kunne reduceres til 1 til 3 i denne retning.

Som nævnt er der i erfaringsmaterialets sandsynligheder for fund ikke grundlag for at skelne mellem forureninger forårsaget af egentlige "kortvarigt større spild" eller af "længerevarende mindre spild". Datamaterialet indikerer dog, at der er væsentlig forskel på de fundne forureningsniveauer i de 2 tilfælde. Dette må derfor benyttes som grundlag for en beslutning om den videre fremgangsmåde for undersøgelsen. Placeres en boring opstrøms fra tankene, vil en forurening i denne pege på én af to muligheder:

- forureningen er forårsaget af tankene (kortvarigt større spild) med efterfølgende opstuvning på grundvandsspejlet og en spredning herfra
- forureningen har en anden kilde (længerevarende mindre spild).

Hvilken der er relevant, må ses ud af den konkrete situation. Ved at placere en opstrøms boring, opnås endvidere en nærmere bestemmelse af afstrømningsretningen.

Ved vurdering af muligheden for skeloverskridende forurening kan statistiske betragtninger vedrørende sporingssandsynlighed som funktion af mulig fanebredde, afstand til kilden og forholdet mellem den ønskede sporingegrænse og kildekonzentration (kontrasten) anvendes. Tilsvarende betragtninger er f.eks. foretaget i Amternes Videncenter for Jordforurening (1999) vedr. design af grundvandsmonitoring ved lossepladser.

For benzinstationer vil forholdet mellem den ønskede sporingsgrænse, f.eks. grænseværdien, og kildekonzentration, også kaldet kontrasten, typisk være som angivet i tabel 2.1. Dette forhold vil afhænge af kildetyper.

Tabel 2.1.

Typiske kontraster for de forskellige kildetyper og stofgrupper.

Kontrast = grænseværdien af en forureningskomponent divideret med den forventelige koncentration målt i kildeområdet

	Kortvarigt større spild	Længerevarende mindre spild
MTBE	0,002 (0,0001)	0,015 (0,0001)
BTEX	0,0015 (0,0001)	0,001 (0,0001)
C6 ⁺	0,01 (0,001)	0,1 (0,001)

Tallene i parentes angiver kontrasten i forhold til almindeligt forekommende detektionsgrænser.

Sandsynligheden for at opdage en forurening falder meget hurtigt med stigende kontrast. Der vil derfor være væsentligt større sandsynlighed – alt andet lige – for at opdage en MTBE- og/eller BTEX-fane end en fane af højere kulbrinter. Samtidigt vil sandsynligheden, for at fanen har overskredet skel, falde fra MTBE mod de højere kulbrinter, da nedbrydning og sorption vil reducere fanens udbredelse meget væsentligt. Af modelberegningerne ses det, at med en typisk grundstørrelse på 50 x 60 m, vil der såfremt tankene eller en anden væsentlig forureningskilde er placeret blot nogenlunde centralt på grunden i forhold til afstrømningsretningen, være begrænset sandsynlighed for at en fane af højere kulbrinter ($C \geq 6$) når udenfor skel.

Anvendes de i modellerne anvendte stofsprednings- og strømningsscenarier (se bilag 2 for forudsætninger vedr. nedbrydning) som input til en statistisk beregning, vil sandsynligheden for at finde en fane ved skel (defineret som en koncentration over detektionsgrænsen) kunne beregnes, såfremt man kender den overordnede strømningssretning. Sandsynligheden vil være en funktion af boringsafstanden og afstanden til skel fra den formodede kilde.

Det kan således beregnes, at sandsynligheden for at finde fanen ved skel vil variere mellem 80 og 100 % ved en boringsafstand på 10 m og en afstand fra kilden til skel på 20 til 30 m. Øges boringsafstand til 20 m, vil sandsynligheden falde til under 50 %.

Hvis boringsafstanden bibeholdes på 10 m, og man i stedet ønsker at finde en fane, hvor koncentrationen er over 2 µg/l (svarende til det niveau MTBE så vidt muligt bør holdes under), ligger sporings sandsynligheden mellem 70 og 80 %. Da sandsynligheden for at fange fanen stiger med faldende kontrast, kan det altså være en fordel, at have som sit mål, når man skal lokalisere fanen i og uden for skel, at definere denne som koncentrationer, der overstiger detektionsgrænsen. Dette vil således være relevant i nærværende undersøgelsessammenhæng, hvor formålet primært er, at få fastlagt om der er en fane uden for selve benzinstationsgrunden.

Sporings sandsynligheden vil alt andet lige øges med afstanden fra kilden. Hvis boringen f.eks. placeres 40 m fra kilden, vil sandsynligheden med en boringsafstand på 10 m i stedet være over 90 % og med en afstand på 20 ca. 60 %. Dette forudsætter selvfølgelig, at borerne er placeret fornuftigt i forhold til strømningssretningen og filtersat, således at filteret fanger fanen.

Placeringen af filteret har især betydning ved placering af borerne uden for grunden og i skel, altså i større afstand fra en kilde. Dette skyldes, at

infiltrationen medføre en dykning af fanen. Hvor meget fanen dykker vil afhænge af forholdet mellem strømningshastigheden og nettoinfiltrationen og være størst, hvor der er stor nedsvivning og lille horisontal strømningshastighed. Størrelsen af nettoinfiltrationen vil afhænge af overfladens beskaffenhed, f.eks. vil der være meget lille infiltration ved asfaltbelægning, mens infiltrationen kan øges betragteligt, hvis fanen kommer ind under en græsoverflade. I (GEO, 2006) er i bilag H.2 givet et forslag til vurdering af en eventuel fanetrykning.

Hertil kommer betydningen af inhomogeniteter i de jordlag, hvorigennem grundvandet (og forureningen) strømmer, hvilket kan øge spredningen af stof også i vertikal retning. Hvis der med sikkerhed kan konstateres adskilte grundvandsførende lag, kan det være hensigtsmæssigt at placere adskilte filtre (og boringer) i hvert lag for at kunne bestemme, hvor den faktiske afstrømning foregår.

Hvis kontrasten, som i dette tilfælde numerisk er relativt lille (stor forskel på forventelig kildekonzentration og grænseværdien), øger det sandsynligheden for at fange en fane. En øgning af filterlængden (hvis muligt) giver alt andet lige en større sporingssandsynlighed end et mindre filter placeret i yderkanten af fanens vertikale udbredelse.

Det er således af væsentlig betydning for sandsynligheden for at fange fanen både vertikalt og horisontalt at have viden om geologi, hydrogeologi og kildestørrelse, inden boringer i skel og uden for grunden placeres og filtersættes. Som tidligere nævnt vil en anvendelse af det beskrevne koncept ikke være meningsfyldt, medmindre der findes et forholdsvist sammenhængende grundvandsmagasin og en relativt entydig afstrømningsretning.

3 Undersøgelserprogram

Der er i det følgende opstillet et forslag til et undersøgelsesprogram. Ud fra de i kapitel 2 beskrevne principper, der igen er baseret på erfaringsopsamlingens fakta og sandsynligheder samt de foretagne modelkørsler. Programmet indledes med en kort beskrivelse af det nødvendige forarbejde, der skal udføres, for at opnå tilstrækkelig information til at sikre en målrettet placering af borerne. Dette er væsentligt for at opnå de ønskede sandsynligheder med det mindst mulige antal borer.

Herefter beskrives det indledende boreprogram, som skal fremskaffe viden om eksistensen og arten af en evt. kilde til grundvandsforurening. Der er her taget udgangspunkt i identifikationen af en forurening med benzin indeholdende MTBE. De opstillede forslag og betragtninger kan dog benyttes tilsvarende for en forurening med andre typer af benzin og olieprodukter. De forudsatte sandsynligheder for disse typer af forureninger er dog ikke beregnet, og generelt må det forventes, at sporingssandsynligheden er mindre.

Såfremt der konstateres en forurening, og man ønsker information om, hvorvidt denne forurening overskrider skel til naboen, kan programmet, så snart analyseresultater m.m. foreligger, suppleres med en boringsrunde baseret på de informationer om koncentrationsniveauer og afstrømningsretning, der er indhentet. En opdeling af informationsindhentningen er nødvendig for at kunne målrette denne, således at antallet af borer, prøvetagninger og analyser reduceres til et realistisk omfang, samtidigt med at der opnås størst mulig sandsynlighed for sporing af en evt. skeloverskridende forurening.

3.1 Forarbejde

Som optakt til iværksættelse af feltarbejde på en given lokalitet bør følgende informationer indsamles:

- Placering, alder og indhold af tanke
- Placering af olieudskillere og væsentlige kloakker og afløbsbrønde
- Terrænhældning eller/og skønnet afstrømning i sekundære magasiner
- Vurdering af evt. drænende effekt af kloakering og andre ledninger, som kan ændre væsentligt på afstrømningsbilledet.
- Basisdatakort og potentialekort
- Information om vandindvinding, grundvandssænkninger og recipienter.

Der kan endvidere fra tidligere undersøgelser i området eksistere data omkring strømmingen i det øvre sekundære magasin. Den grundlæggende informationsindhentning er beskrevet i Miljøstyrelsen (1998a).

Derudover vil den specifikke undersøgelse kunne have mange forskellige formål og udgangspunkter. Det vil i hvert enkelt konkret tilfælde være vigtigt at gøre sig klart, hvad dette formål er, da det vil have indflydelse på både boringsplacering, -type og -omfang, prøvetagning og ønsket analysekvalitet. Endelig er det også vigtigt på forhånd at gøre sig klart, hvordan man vil sikre

sig, at man får alle de ønskede svar ud af sin undersøgelse samt opnår den ønskede kvalitet.

3.2 Tilstedeværelse af forureningskilder

Kildenære boringer

Når antal og placering af tanke er kendt, placeres 1 boring $< 1,5$ m fra den/de tanke, der potentielt har kunnet give anledning til lækage/spild.

Såfremt der er stor afstand mellem tankene, dvs. ved decideret adskilte tankgrave, vil det være nødvendigt med én boring pr. tankgrav, med mindre historiske oplysninger taler for, at man kan reducere dette antal.

Det er ikke afgørende, at boringen med sikkerhed placeres i den formodede nedstrøms retning, hvis dette ikke er praktisk muligt, når blot den placeres tilstrækkelig tæt på tankene (dvs. $< 1,5$ m).

Såfremt det samlede antal kildenære boringer ønskes reduceret, bør højeste prioritet gives til boringer nær tanke, der er nedgravet før 1990.

Boringer i faneområde på grunden

Dernæst placeres 1-2 boringer 4-8 m fra disse tanke i den skønnede afstrømningsretning. Om der placeres én eller 2 boringer i alt bør afhænge af antal tanke/-tankområder (se kommentar vedr. kildenære boringer) samt den formodede/kendte afstrømningsretning.

Opstrøms boring

Endelig placeres 1 boring ca. 2 m opstrøms for tankgraven/den væsentligste tankgrav. Dette er for at vurdere evt. spredning opstrøms p.g.a. opstuvning på grundvandsspejlet af fri fase samt for at give oplysninger til brug for vurdering af afstrømningsretningen.

Evt. supplerende boringer for at sikre bestemmelse af afstrømningsretning

Såfremt der i alt kun er placeret 3 boringer, og disse er beliggende tilnærmelsesvis parallelt med den skønnede strømningsretning i det sekundære grundvandsspejl, placeres yderligere minimum én boring til sikring af en tilstrækkelig god vurdering af afstrømningsretningen. Denne kan evt. placeres ved en olieudskiller eller en væsentligt kloak, der håndterer overfladeafstrømning fra pladsen. Et evt. indhold af forureningskomponenter i denne boring skal dog ses i dette lys og ikke nødvendigvis som en del af en fane fra en tankrelateret lækage (se også under Opstrøms boring). Endelig skal man huske, at potentialet i denne boring kan være forstyrret af en evt. potentialesænkning langs kloakken. Det konkrete valg af placering må bero på, hvad der i den givne sag har højest prioritet: behov for viden om forurening fra andre kilder eller behov for fastlæggelse af afstrømningsretningen.

Det skal igen understreges, at det er vigtigt i denne første del af undersøgelserne, dels at få fastlagt tilstedeværelse og type af kilden, dels at få beskrevet de hydrogeologiske forhold tilstrækkeligt, til at det kan fastlægges, at der er tale om et rimeligt sammenhængende grundvandsmagasin, hvori afstrømningen kan foregå, og at strømningsretningen kan vurderes tilstrækkeligt entydigt (og ikke synes at variere væsentligt over tid).

Filtersætning af boringer

Boringerne filtersættes i det formodede væsentligste sekundære grundvandsmagasin, således som dette skønnes i forbindelse med borearbejdet eller er kendt på forhånd. Med hensyn til udførelse og filtersætning af boringerne i øvrigt henvises til kapitel 4 samt til betragtningerne herom i kapitel 2.4. I (GEO, 2006) er der i bilag H.4 også beskrevet principper for relevant filtersætning.

Pejling og prøvetagning

Alle boringer pejles samt prøvetages, og vandprøver analyseres for indhold af MTBE, BTEX, totalkulbrinter samt redox-parametre. I boringerne 4 – 8 m fra tanke analyseres tillige for nedbrydningsprodukter af MTBE. I forbindelse med udførelsen af boringerne udtages jordprøver, som beskrives og vurderes ved PID-måling på sædvanlig vis. Analyser bør omfatte BTEX og totalkulbrinter.

Vurderinger

Såfremt MTBE konstateres i koncentrationer større end 1.000 µg/l, er forureningen med overvejende sandsynlighed forårsaget af en egentlige lækage i benzinfordelingssystemet og den fortsatte undersøgelse bør følge Scenarie I. Såfremt MTBE konstateres i en koncentration mellem 30 og 200 µg/l, er der snarere tale om et "længerevarende mindre spild", og undersøgelsen fortsættes efter Scenarie II. Hvor disse koncentrationer måles i forhold til de mulige kilder, skal selvfølgelig inddrages i denne vurdering.

Såfremt der ikke i nogen af boringerne konstateres MTBE-koncentrationer over 5 µg/l, er der såfremt det ovenfor skitserede program er fulgt, under 5 % sandsynlighed for, at der alligevel findes en forurening med MTBE på den pågældende lokalitet.

Såfremt der konstateres forurening med BTEX og/eller kulbrinter i væsentligt omfang i de analyserede prøver uden et væsentligt indhold af MTBE, er forureningen med stor sandsynlighed forårsaget af lækager i den del af tank/-distributionssystemet, som indeholder produkter uden indhold af MTBE. En fortsat undersøgelse af sådanne forureninger kan fortsættes efter tilsvarende linjer, som de her beskrevne, blot med udgangspunkt i de tanke m.m. som indeholder disse produkter.

Såfremt forundersøgelserne viser, at der ikke er et egentligt grundvandsmagasin eller en rimeligt entydig afstrømningsretning, vil det i det følgende skitserede undersøgelseskoncept ikke give meget mening.

3.3 Vurdering af udbredelse/overskridelse af skel

Grundvandsforureninger på benzinstationer kan som tidligere nævnt have mange forskellige kilder. Opdelingen i de 2 scenarier dækker over 2 grundlæggende forskellige typer af hændelser. Et "kortvarigt større spild" er udtryk for et spild forårsaget af et større brud i benzinfordelingssystemet, mens et "længerevarende mindre spild" er udtryk for et spild forårsaget af en mindre læk i kloakker eller olieudskillere.

Et brud af omfang som et "kortvarigt større spild" er ofte set i tilknytning til standerarealet eller benzintilførselen hertil. Erfaringsopsamling både hos Fyns Amt og Oliebranchens Miljøpulje viser, at denne type lækager med stor sandsynlighed opdages, såfremt der bores nær tankene, uanset om selve bruddet evt. er sket i en vis afstand fra disse. Dette skyldes formentlig, at

koncentrationsniveauerne i disse tilfælde er meget høje, samt at opstuvning af fri fase nemt kan ske i gruskastningerne omkring benzintilførselssystemet, herunder tankgravene.

I den konkrete undersøgelse vil den del af undersøgelsen, der fastlægger den mulige tilstedeværelse af en kilde, give et tilstrækkeligt fingerpeg med hensyn til, hvilket område der indeholder de højeste koncentrationer. Dette område er det område, der i det følgende betegnes som kilden eller kildeområdet, uanset om det udgøres af en tankgrav eller ej, når talen er om et "kortvarigt større spild".

Forskellen mellem de 2 scenarier er primært den forventede kildekonzentration og den deraf følgende udbredelse af selve kildeområdet. Det er dette samt den periode, spildet kan forventes at have foregået, som har betydning for den forventede bredde af forureningsfanen.

Da det er meget væsentligt for vurderingen af det nødvendige antal boringer, at afstrømningsretningen er kendt med rimelig sikkerhed, foreslås det at foretage endnu en pejlerunde, inden der placeres yderligere boringer. Dette gøres for at sikre mod evt. opståede fejl samt mulige variationer i afstrømningen. Dette er selvfølgelig især vigtigt, hvis gradienterne er små, og strømningsretningen generelt er vanskeligt at fastlægge. Såfremt der er stor usikkerhed om en evt. fanes retning, kan undersøgelsen suppleres med poreluftundersøgelser i et antal nedrammede boringer samt udtagning af poreluftprøver i de allerede etablerede boringer. Man skal her være opmærksom på, at spredningen i poreluften kan foregå anderledes end spredningen i grundvandet. En poreluftundersøgelse bør således ikke være det eneste grundlag for at fastsætte afstrømningsretningen.

Ved udtagningen af prøver fra de etablerede boringer, skal man huske, at luftvolumenet i disse er væsentligt større end i de nedrammede boringer, hvilket vil influere på koncentrationsniveauet.

Ud fra de skønnede (og nu observerede) afstrømningsretninger skønnes, hvor fanen kan forventes at skære skel. Afhængigt af spildets art ("kortvarigt større spild" eller "længerevarende mindre spil") samt kendskabet til geologien vurderes faneudbredelsen efter nedenstående retningslinjer.

3.3.1 Scenarie I, "kortvarigt større spild"

Boringer i skel

Forureningsfanens længde og bredde kan vurderes ud fra erfaringsopsamlingen og modelberegningerne (se bilag 1 og 2 for datagrundlag) og fremgår af tabel 3.1.

Tabel 3.1.
Længde og bredde af forureningsfaner for "kortvarigt større spild"

	Fanelængde, m	Fanebredde, m
Erfaringsopsamling	op til 70 m	30 - 40
Modelberegninger	25 - 75	15 - 35

Bredden svarer ofte til ca. ½-delen af længden. Fanelængder for MTBE vil i en sammensat geologi sjældent overstige 45 m. Ved udbredelse i usammenhængende sandstriber, som er svære at kortlægge nøjagtigt er der dog konstateret fanelængder på op til 75 m. Dette skyldes formentlig den større heterogenitet. Det er ikke muligt at påpege sammenhænge mellem

tankstørrelse, tankantal, gradient, afstand til grundvandsspejl eller andet og fanens størrelse.

Bredden ved skel vil primært afhænge af den vinkel, hvorunder fanen skærer skelgrænsen og vil ligeledes ligge mellem 15 og 35 m, uafhængigt af den formodede kildes afstand til skel.

Med de registrerede og modelberegnedes fanebredder vil sandsynligheden for at spore en forureningsfane ved placering af 3 boringer i skel i den retning, hvor fanen kan formodes at skære dette, være tæt ved 90 til 100 % ved en afstand mellem boringerne på 10 m (se bilag 3). Placeres 2 boringer med 20 m's mellemrum ligger sandsynligheden på mellem 50 og 60 %.

Det foreslås på denne baggrund, at der placeres 2 boringer i skel med 15 m's afstand ved skelgrænsen, se fig. 3.1 og 3.2.

Boringer uden for skel

Hvis afstanden til skel er væsentligt mindre end halvdelen af den skønnede fanelængde fra kilden (i størrelsesordenen ca. 25 m), placeres desuden en boring udenfor skel og i en halv fanelængdes afstand fra kilden, se fig. 3.1.

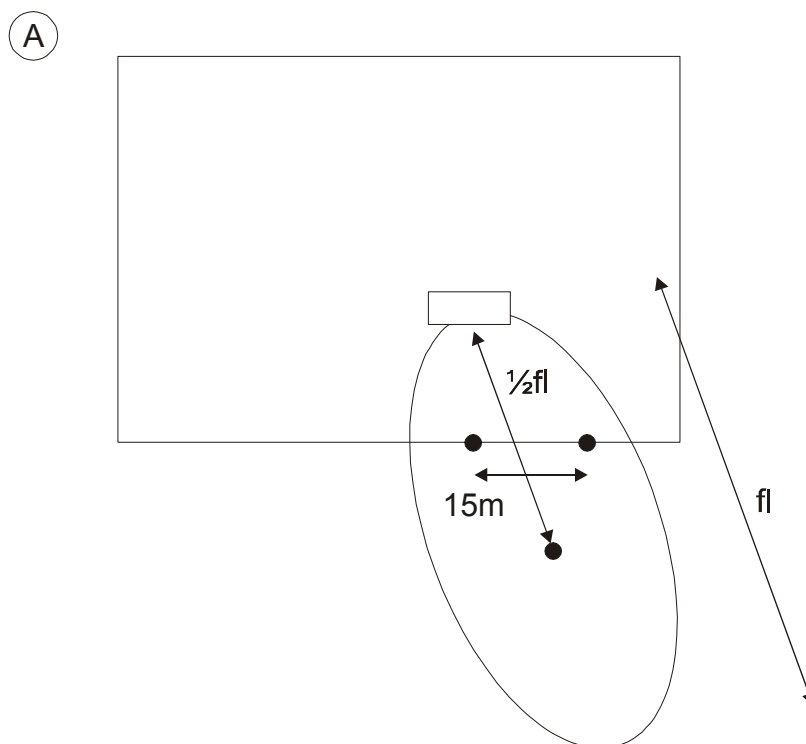


Fig. 3.1.
Placering af boringer, såfremt afstanden til skel er mindre end $\frac{1}{2}$ fanelængde.

Hvis afstanden til skel er større, placeres boringen længere fra kilden. Dog ikke mere end til hvad der svarer til $\frac{3}{4}$ af skønnet fanelængde (ca. 45 m), se fig. 3.2.

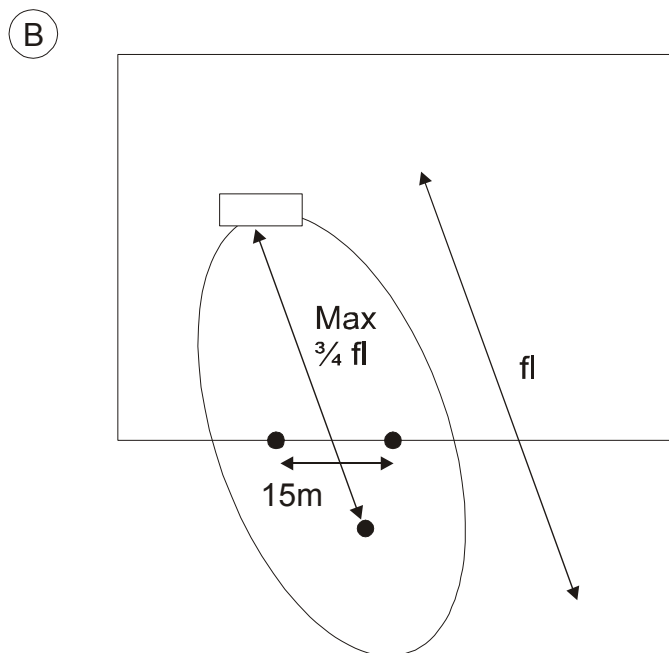


Fig. 3.2.
Placering af boring, såfremt afstanden til skel er større end $\frac{1}{2}$ fanelængde.

Ideen er, at denne boring skal være placeret uden for skel i en større afstand fra kilden. Dette øger sandsynligheden for at finde fanen, såfremt strømningsretningen er rigtigt vurderet. Denne boring vil samtidigt øge antallet af boringer i fanens tværsnit, hvilket også øger sporingssandsynligheden. Yderligere information om faneudbredelsen opnås ved samme lejlighed.

Filtersætninger af boringer

Boringer i og uden for skel filtersættes også i det skønnede væsentligste vandførende lag. Filterintervallet øges om muligt for at sikre indfangning af en dykket fane (se kapitel 2.4 for yderligere kommentarer samt kapitel 4). Ved et "kortvarigt større spild" kan der forventes en god kontrast mellem forureningsniveau og grænseværdi, hvorfor et større filterinterval bedre kan benyttes.

Analyseprogram

Boringerne pejles og prøvetages. Vandprøverne fra skel analyseres for MTBE, BTEX og totalkulbrinter, og prøven fra den ene af disse boringer analyseres tillige for nedbrydningsprodukter for MTBE samt redox-parametre. Vandprøven fra "faneboringen" analyseres for MTBE, nedbrydningsprodukter og redox-parametre. I forbindelse med udførelsen af boringerne udtages, vurderes og analyseres jordprøver på sædvanlig vis: Jordprøver fra skel analyseres i givet fald for BTEX og totalkulbrinter. Jordprøver fra faneboringen analyseres i givet fald for BTEX.

3.3.2 Scenarie II, længerevarende mindre spild"

Et "længerevarende mindre spild" vil kunne have strakt sig over længere tid (potentielt i op til 15 år for MTBE), inden de opdages. Kontrasten (forholdet mellem f.eks. grænseværdien og kildestyrken/faktisk koncentration) vil generelt være mindre, og fanen er potentielt længere og smallere, fordi der ikke sker opstuvning af fri fase på grundvandsspejlet. De udførte

modelberegninger (se bilag 1 og 2 for datagrundlag) viser, at forureningen med MTBE teoretisk kan have spredt sig fra 30 til langt over 100 m afhængigt af jordart og gradient, mens bredden kan ligge mellem 10 og 15 m.

En BTEX-fane og en fane af højere kulbrinter tilsvarende vil kunne have spredt sig henholdsvis mellem 10 og 70 m og mellem 10 og 30 m. Fanebredderne vil være lidt mindre end MTBE-fanernes. Dette er sammenfattet i Tabel 3.2.

Tabel 3.2.
Længde og bredde af forureningsfaner for "længerevarende mindre spild"

	Fanelængde, m	Fanebredde, m
MTBE	30 - >100	10 - 15
BTEX	10 - 70	10 - 30

Sandsynligheden for at spore en forureningsfane ved placering af 3 boringer i skel i den retning, hvor fanen kan formodes at skære dette, vil være 75 til godt 90 % ved en afstand mellem boringerne på 10 m (se bilag 3). Placeres 2 boringer med 20 m's mellemrum ligger sandsynligheden på omkring 50 %.

Det foreslås også her, at der placeres 2 boringer i skel; denne gang med 12 m's afstand.

Boringer uden for skel

Desuden placeres 2 boringer i halvdelen af den skønnede fanelængde fra kilden, hvis dette giver en afstand, der er et stykke uden for skel (ca. 25 m), se fig. 3.3. Den konkrete fanelængde fastlægges ud fra den opnåede viden om forventelig jordart i det grundvandsførende lag samt gradienten.

Fanelængden vil øges med stigende forventet grundvandshastighed. Resultaterne af de foretagne modelsimuleringer kan anvendes som hjælpemiddel ved dette skøn.

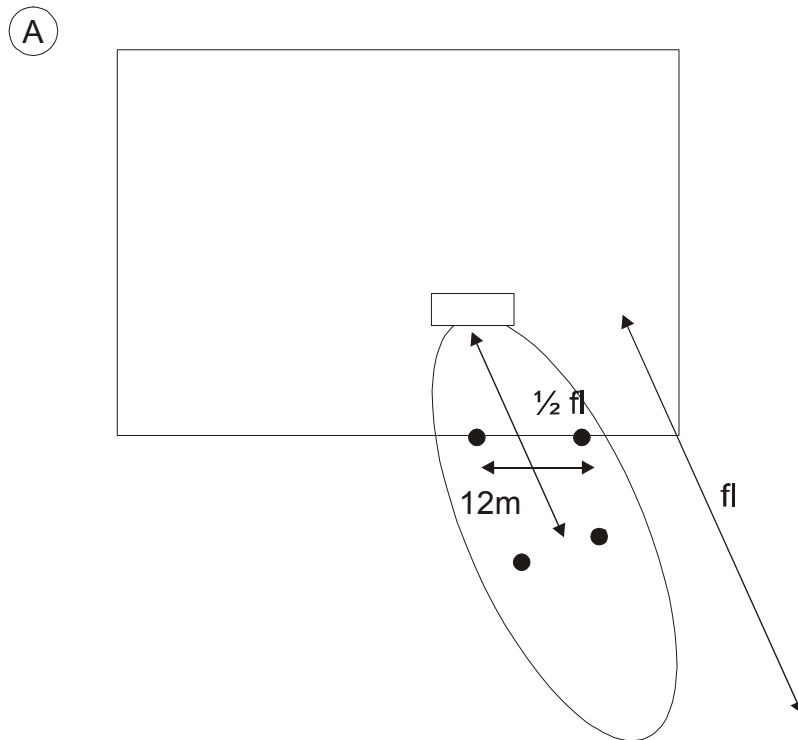


Fig.3.3.
Placering af borer, såfremt afstanden til skel er mindre end $\frac{1}{2}$ fanelængde.

Hvis borerne ikke efter ovenstående vurdering placeres udenfor skel, øges afstanden fra kilden. Dog ikke mere end til hvad der svarer til $\frac{3}{4}$ af den skønnede fanelængde, se fig. 3.4.

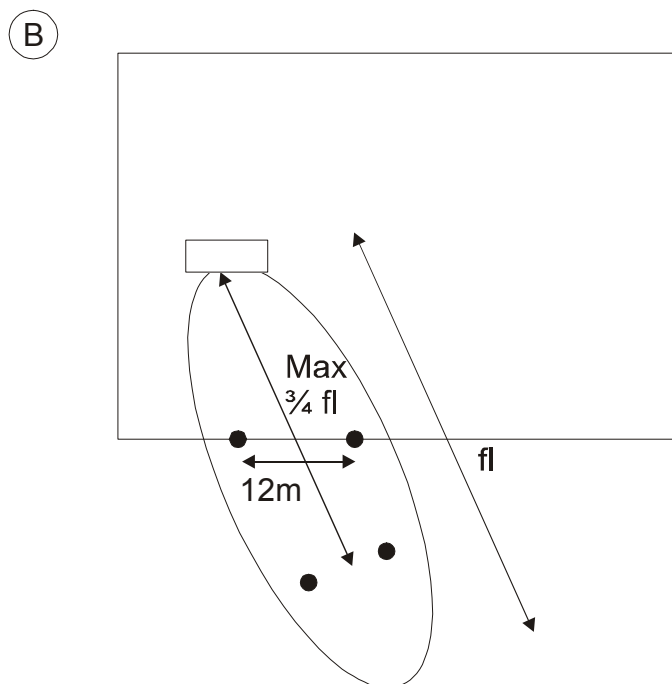


Fig. 3.4.
Placering af borer, såfremt afstanden til skel er større end $\frac{1}{2}$ fanelængde.

Ideen er som ved et "kortvarigt større spild", at boringerne skal være placeret uden for skel i en større afstand fra kilden, hvilket øger sporings-sandsynligheden (såfremt strømningsretningen er rigtigt vurderet). Samtidigt vil antallet af boring i fanens tværsnit blive forøget, hvilket vil øge sandsynligheden for at finde fanen.

På grund af den forventelige mindre bredde af fanen for et "længerevarende mindre spild" end for et "kortvarigt større spild" er antallet af boringer øget. Boringerne placeres principielt vinkelret på fanens forventede udbredelsesretning og ligeledes med ca. 12 m i mellem. Yderligere information om faneudbredelsen opnås ved samme lejlighed.

Filtersætning

Disse boringer filtersættes også i det skønnede væsentligste vandførende lag. Filterintervallet øges om muligt for at sikre indfangning af en dykket fane (se kapitel 2.4 for yderligere kommentarer samt kapitel 4). Ved et "længerevarende mindre spild" skal det vurderes om kontrasten mellem muligt forureningsniveau og grænseværdi er tilstrækkelig stor, inden et større filterinterval vælges, hvilket alt andet lige vil medføre en lavere koncentration i en udtagne prøve.

Analyseprogram

Boringerne pejles og prøvetages. Vandprøverne fra skel analyseres for MTBE, BTEX og totalkulbrinter, og prøven fra den ene af disse boringer analyseres tillige for nedbrydningsprodukter for MTBE samt redox-parametre. Vandprøven fra "faneboringen" analyseres for MTBE, nedbrydningsprodukter og redox-parametre. I forbindelse med udførelsen af boringerne udtages, vurderes og analyseres jordprøver på sædvanlig vis. Jordprøver fra skel analyseres i givet fald for BTEX og totalkulbrinter. Jordprøver fra faneboringerne analyseres i givet fald for BTEX.

3.3.3 Oversigt

Det samlede undersøgelseskoncept er i GEO (2006) sammenfattet i Tabel 2.2, som gengives her som tabel 3.3, idet de af GEO i forbindelse med afprøvningen foreslåede ændringer er indføjjet. Det skal bemærkes, at der ved afprøvningen alene blev udført boringer uden for skel, hvilket stiller større krav om tilstedeværelse af et sammenhængende sekundært magasin for at kunne vurdere konceptets egnethed.

Tabel 3.3.
Undersøgelseskoncept

Overordnet formål		Det er ønsket, at der ved gennemførelse af undersøgelsen opnås en sikkerhed på mere end 95 % for at en MTBE forurening på lokaliteten opdages.
Forundersøgelse	Formål	Lokalisering af terrænnært grundvandsmagasin og bestemmelse af strømningsretning og hydrauliske parametre i øverste grundvand. Skøn af længde og bredde af forureningsfane.
	Kilder, mv.	De potentielle forureningskilder i form af tanke, benzin- og olieudskillere, påfyldningsplads, standerø og diverse rørforbindelser identificeres og lokaliseres, og der indsamles viden om evt. spild. Den forventede strømningsretning af det øverste grundvand skønnes, fx. på baggrund af terrænhældning.
	Boringer	3-4 stk på lokaliteten, heraf mindst 2 stk. i skønnet nedstrøms retning og mindst én boring < 1,5 m fra den væsentligste potentielle kilde.
	Magasin	Det vurderes om magasinet er sammenhængende.
	Strømningsretning	Strømningsretningen vurderes på baggrund af tre pejlerunder.
	Gradient	Gradienten vurderes på baggrund af tre pejlerunder.
	Hydraulisk ledningsevne	Skønnes på baggrund af prøvebeskrivelsen og fx d_{10} fra kornkurver fra udvalgte prøver.
	Analysér	Der analyseres for MTBE, BTEX, totalkulbrinter og redox-parametre i vandprøver fra hver boring.
Fane	Den eventuelle forureningsfanens bredde, længde og placering vurderes på baggrund af kildetyper, alder på muligt udslip, magasinets hydrauliske parametre samt strømningsretningen. Kildetyperne kan dels vurderes ud fra de målte koncentrationer og dels ud fra de faneproportioner, som forundersøgelsen har givet indtryk af. Såfremt der ikke er påtruffet et rimeligt sammenhængende magasin, bør undersøgelseskonceptet evt. suppleres for at give et retvisende grundlag, og de videre undersøgelser må i højere grad tilrettelægges efter de specifikke forhold.	
Hovedundersøgelse	Formål	Bestemmelse af faneplacering samt verifikation af de hydrauliske parametre, som er skønnet i forundersøgelse.
	Boringer	2 stk. med 12 m afstand nær skel i formodet fane, samt 2 stk. med 12 m afstand uden for grund i formodet fane i en afstand fra kilder på 0,5 til 0,75 gange fanelængde.
	Analysér	Analyse for MTBE, BTEX, totalkulbrinter og redoxparametre i vandprøver fra alle nye boringer.
	Magasin	Det vurderes om magasinet er sammenhængende.
	Strømningsretning	Strømningsretningen vurderes på baggrund af to pejlerunder.
	Hydrauliske parametre	Parametrene fra forundersøgelsen verificeres.

	Fane	På baggrund af den samlede undersøgelse vurderes det om der er fundet en forureningsfane, primært med MTBE og på grundlag heraf om der er risiko for, at der findes en grundvandsforurening med MTBE under lokaliteten.
--	------	---

4 Undersøgellesmetoder

Som nævnt i de tidligere kapitler er det sigtet med nærværende rapport at beskrive undersøgelser af grundvandsforureninger, eksemplificeret ved forureninger fra benzinstationer og hovedsageligt at fokusere på MTBE, som i denne sammenhæng er den mest mobile komponent i grundvandet. Information om jordforureninger indsamles i denne sammenhæng primært for at give input til vurderingen af en evt. grundvandsforurening. Undersøgelser for MTBE-forurening i jord og grundvand er som for andre stoffer forbundet med væsentlige metodiske usikkerheder. I de følgende afsnit beskrives og diskuteres kort de væsentligste metoder, der bør anvendes i en hydrogeologisk og geokemisk kortlægning til verifikation og forfining af en "model" for en evt. forurening på den aktuelle lokalitet.

Der foreligger endnu relativt få danske erfaringer med MTBE, og det må forventes, at der vil ske en rivende udvikling af mere specifikke metoder rettet mod MTBE som følge af det specielle fokus, der er på dette stof i bl.a. Danmark og USA. Der er her kun medtaget metoder som er velafprøvede, mens der henvises til f.eks. Amternes Videntcenter for Jordforurening (2000) for nyere metoder. Overordnet for undersøgelser af MTBE-holdige benzinformureninger henvises til American Petroleum Institute (2000). En oversigt over de beskrevne feltmetoder og disses styrker og svagheder findes bl.a. i AVJ (2001 & 2003).

Det skal bemærkes at nærværende kapitel ikke er opdateret i 2007 i forbindelse med indarbejdelse af erfaringerne fra de gennemførte undersøgelser af 11 benzinstationer, rapporteret af GEO i 2006.

4.1 Boringer

I det følgende diskuteres overordnet forskellige boremetoder, der er relevante i forbindelse med forureningsundersøgelser af grundvand på benzinstationer. Metodiske specifikationer og væsentlige aspekter vedr. den konkrete udførelse af boringer er beskrevet i bl.a. Miljøstyrelsen (1998), Vedby & Nielsen (1990), Kjeldsen et al. (1989), McCall (1999) og Lauritzen & Nielsen (1999).

Der findes overordnet set følgende 2 boremetoder: rammeboringer og traditionelle snegleboringer. Valget mellem metoderne vil afhænge af den aktuelle geologi, af den ønskede boreddybde og dermed omkostningerne, behovet for udtagning af jordprøver samt behovet for efterfølgende pejledata.

Rammeboringer har en begrænsning i dybden, der vil afhænge af den aktuelle geologi, idet de har en maksimal rækkevidde på 15-25 m, i modsætning til snegleboringer, der har en – i forureningsundersøgelles-sammenhæng – ubegrænset rækkevidde i dybden.

Omkostningerne ved de to metoder afhænger i høj grad af den ønskede boreddybde, idet snegleboringer er billigst for korte boringer (ned til ca. 10 m.u.t.), mens rammeboringer er billigst og hurtigst for boringer fra 10-25 m u.t. (eller maksimal mulig boreddybde).

Ved udførelse af snegleboringer er der mulighed for udtagning af jordprøver over hele boreddybden, mens der ikke genereres jordprøver ved udførelsen af rammeboringer.

Det er muligt at udtage jordprøver fra rammeboringer, men oftest står udbyttet ikke mål med omkostningerne. Der kan udtages intakte kerneprøver vha. begge boremetoder.

Som det diskuteres i afsnit 4.2.1, er der større usikkerheder forbundet med pejling fra nedrammede filtre end fra filtre sat i snegleboringer. Hvis der er usikkerhed omkring strømningsretningen, bør det således overvejes, at der ikke udelukkende etableres filtre vha. rammeboringer, men at metoderne som minimum kombineres.

Idet der ofte ses en niveaudeling af forureningen i grundvandsmagasinet, er niveauspecifikke vandprøver velegnede til kortlægning af forureningsfanen, ikke alene i det horisontale plan, men også i det vertikale plan.

Såfremt vandprøverne udtages med henblik på en kortlægning af fanen, kan det være relevant at sætte midlertidige filtre, mens permanente filtre er mere egnede, hvis de efterfølgende ønskes anvendt til monitoring.

De lange, permanente filtre (3-5 m) kan anvendes til monitoring i tilfælde, hvor fanens vertikale udbredelse er kortlagt vha. niveauspecifikke filtre, og det lange monitoringsfilter er placeret hen over den forurenede dybde. Ved anvendelse af korte filtre til lokalisering af fanen, kan antallet af permanente monitoringsfiltre minimeres, og det kan sikres, at boringerne filtersættes i den rigtige dybde.

Ved valg af boringstype og -dimension bør det endvidere medtages i overvejelserne, hvilke eventuelle pumpeforsøg, der ønskes foretaget. Ved valg af filterlængder og -diameter bør det overvejes hvilke typer af prøver, der ønskes udtaget, eksempelvis om der ønskes udtaget både vand- og evt. poreluftprøver.

4.2 Fastlæggelse af vandbevægelse

4.2.1 Strømningsretning

Strømningsretningen kan kortlægges ved udarbejdelse af potentialekort ud fra samtidige pejlinger på lokaliteten. Udarbejdelse af potentialekort forudsætter, at der på henholdsvis ved lokaliteten er etableret et tilstrækkeligt stort antal filtersatte boringer (minimum 3). Det nødvendige boringsantal samt afstanden imellem dem afhænger af gradienten i området.

Der er en række måletekniske usikkerheder forbundet med vurdering af koten til grundvandet i et specifikt filter. Den samlede usikkerhed på koten er summen af de enkelte måleusikkerheder, der for de væsentligste metoder er skønnet og sammenfattet i tabel 2.1

Tabel 2.1.
Måleusikkerheder ved pejling (findes også i AVJ, 2001).

Måleaktivitet	Usikkerhed (cm)
Almindeligt nivellement	+/- 0,2-1
Pejleusikkerhed for alm. håndpejl	+/- 1
Skæv afskæring af pejlerør	+/- 1
Skævt ø63 mm filter sat med uforet boring (13 m langt, 4 grader fra lodret)	- 3
Skævt ø25 mm filter sat med Geoprobe (13 m langt, 8 grader)	-13
Vægt af vandsøjle over elektronisk tryktransducer tilkoblet datalogger	+/- 1

En målenøjagtighed på ca. 1 cm kan således kun opnås under optimale forhold, og der er god grund til at være meget opmærksom på, hvordan pejlefiltre etableres for at undgå fejlagtige koter. Specielt hvis gradienterne i et område er meget små, og trykniveauet inden for undersøgelsesområdet således kun varierer 1-5 cm, kan det være meget vanskeligt at fastlægge strømningsretningen. For at kunne dokumentere en sådan lille gradient, kan det derfor være nødvendigt at placere boringer i en større afstand. Problemet med skæve filtre er specielt vigtigt at være opmærksom på i områder med små gradienter, idet der er eksempler på, at skæve filtre fejlagtigt har indikeret lokale sænkninger/huller i potentialebilledet.

Udover måleusikkerheden knyttet til selve målingen, kan selve vandstanden i filtret være påvirket af variationer i atmosfæretrykket, som der i nødvendigt omfang bør korrigeres for.

Strømningsretningen (og -hastigheden) kan endvidere måles direkte med et flowmeter (Ballard, 1996), hvorved der principielt kun behøves en enkelt boring til at udføre målingen og derved opnå et skøn over grundvandets strømningsretning. Instrumentet kan dog kun benyttes ved høje strømningshastigheder og angiver strømningshastigheden og -retningen helt lokalt omkring filtret, hvilke ikke nødvendigvis stemmer overens med det generelle billede for lokaliteten henholdsvis området.

4.2.2 Hydraulisk ledningsevne og strømningshastighed

Grundvandets strømningshastighed kan bestemmes ved beregning ud fra magasinets hydrauliske ledningsevne og en målt gradient. Den hydrauliske ledningsevne kan bestemmes indirekte ud fra kornstørrelseskurver eller direkte vha. prøvepumpning eller slugtest. Det vil ofte være muligt at estimere ledningsevnen ud fra registreringer foretaget under vandprøvetagning, såfremt denne planlægges omhyggeligt med henblik på at registrere informationer om flow, vandstand mv.

De forskellige metoder har en række fordele og ulemper, som også er beskrevet i AVJ (2001 & 2003). Ofte vil en kombination af metoder være velegnet til at beskrive den vertikale og horisontale variation i ledningsevnen.

4.3 Prøvetagning

Kravene til prøveudtagning og opbevaring afhænger i høj grad af hvilke stoffer, der skal måles for. Jord- og vandprøver, der udtages til analyse for olie og benzin, skal håndteres, så der er mulighed for at bestemme det oprindelige indhold, når analysen foretages. Foruden generelle forhold som risiko for

forurening af prøven er der to specielle forhold, der skal tages højde for. De flygtige forbindelser vil kunne mistes ved fordampning, og mikrobiologisk omsætning vil kunne finde sted. Specielt for boreprøver og vandprøver kan en ændring i mængden af den tilstedeværende ilt/luft betyde, at der sker en hurtig afdampning og/eller omsætning. For andre prøver, som f.eks. overfladejord, vil ikke der ikke ske hurtige ændringer.

4.3.1 Jordprøver

Udtagning af jordprøver til undersøgelse for indhold af oliekomponenter kan være forbundet med væsentlige usikkerheder. Faktorer som friktionsvarme fra boregrejset, prøvehåndtering og prøveemballering er afgørende for stoftabet undervejs til analyselaboratoriet.

Ved udtagning af jordprøver fra snegleboringer udført under grundvandsspejlet bør der stilles store krav til prøvetagerens dokumentation. Som minimum bør undersøgelsen indeholde detaljeret dokumentation af anvendte metoder, emballage, transporttid mv.

4.3.2 Vandprøver

4.3.2.1 Borings- og filtertyper

Metoden, hvormed en vandprøve opsamles, afhænger primært af magasinets ydeevne. I det følgende forudsættes det, at vandprøven kan udtages under gravitativ tilstrømning, således at brug af sugeceller og lignende ikke er nødvendig.

Grundvand kan opsamles fra midlertidige eller permanente filtre vha. pumper eller bailere/vandhentere af forskellig art. Metoder til udtagning af niveauspecifikke vandprøver samt til udførelse af traditionelle boringer med længere filtre er beskrevet i McCall (1999), Miljøstyrelsen (1998a & b) samt Vedby & Nielsen (1990).

Valg af vandprøvetagningsmetode bør afhænge af formålet med den aktuelle vandprøvetagning.

Prøveudtagning kan foretages fra korte filtre, hvorved der fås en niveauspecifik vandprøve, eller fra lange filtre, der integrerer over flere forskellige forureningsniveauer og muligvis vandtyper.

Af metoder til udtagning af niveauspecifikke vandprøver kan nævnes; etablering af én boring, filtersat i flere niveauer, afpropning af et langt filter i en boring, etablering af flere boringer ved siden af hinanden med filtre i forskellige niveauer samt nedramning af midlertidige eller permanente filtre vha. f.eks. Geoprobe-systemet.

4.3.2.2 Vandprøvetagning

Generelt for vandprøvetagning henvises til Kjeldsen et al (1989). Der bør tages højde for, at BTEX-komponenter er flygtige stoffer, hvorimod MTBE har en mindre flygtighed og sorberer svagere. Der bør pumpes med så højt flow, at afsmitningen fra slanger og fittings minimeres, men dog således at suspension af finkornede partikler med adsorberet stof undgås. Pumpning med for højt flow i lavtydende filtre kan resultere i en tømning af filtret, hvorved der kan opstå en risleeffekt ved indstrømningen gennem filtret. Herved iltes vandet. Feltnalinger udført vha. flowcelle er et godt redskab til at

vurdere, hvornår der er forpumpet tilstrækkeligt vand. Ilt, pH, ledningsevne, temperatur og redox-potentiale skal således måles i felten og prøver til bestemmelse af jern og mangan skal filtreres i felten. Som hovedregel kan forpumpningen indstilles, når ledningsevnen er konstant.

Derudover bør vandflowet ned i prøveflaskerne være lavt, så afdampningen minimeres, prøveflasker til analyselaboratorium bør fyldes helt op, flaskerne bør opbevares mørkt og køligt, og prøverne analyseres inden for max. 24 timer efter prøveudtagning. Med hensyn til valget af pumper er forskellige typer beskrevet og diskuteret i American Petroleum Institute (1997a & b), Kjeldsen et al. (1989) og Miljøstyrelsen (1998a & b).

4.3.3 Poreluftmålinger

Poreluftundersøgelser er almindeligt anvendt som en omkostningseffektiv metode til både kildeopsporing og til kortlægning af forureningens udbredelse i den umættede zone. De forholdsvis høje diffusionshastigheder i den umættede zone betyder, at dampformig forurening, herunder MTBE, vil fordele sig kontinuert, selv i relativt lavpermeable aflejringer.

4.3.3.1 Udtagning af poreluftprøver

Forudsætningerne for at opnå troværdige og reproducerbare resultater af poreluftundersøgelser er i særdeleshed knyttet til geologien i den umættede zone.

På lokaliteter, hvor geologien er domineret af lavpermeable aflejringer af ler eller vandholdig tørv og gytje, vil brugbare poreluftprøver være svære at udtage (Pankow & Cherry, 1995). Informationer om kilde og udbredelse kan dog stadig opnås ved at udtage prøver fra "vinduer" i form af mere porøse fyldlag omkring tanke, produktør, olieudskillere, brønde og kloakledninger. Hermed fokuseres der på mulige kilder og spredningsveje i jordtyper, som typisk giver gode og sammenhængende resultater ved poreluftundersøgelse.

Udtagning af niveauspecifikke poreluftprøver sker fra nedrammede sonder eller fra snegleboringer, som filtersættes i den umættede zone. Ved sondering kan flere prøver udtages fra samme sondering i løbet af nedramningen. Etablering af filtersatte snegleboringer åbner mulighed for at vælge filterintervallet ud fra en konkret vurdering af porøsitet og vand-spejlsbeliggenhed og kan anvendes til gentagne prøveudtagninger.

Filtersatte snegleboringer kan indrettes til udtagning af både poreluft- og vandprøver. For yderligere detaljer omkring udtagning henvises til Amternes Videncenter for Jordforurening (1998).

Forpumpning af filter eller sonde har til hensigt at rense systemet for atmosfærisk luft og strækker sig almindeligvis over få minutter. Efter forpumpning udtages prøven med en vakuumpumpe. Prøven kan enten opsamles i Rilsan- eller Tedlarpose, på absorptionsrør eller udtages med injektionssprøjte til analyse på stedet. Metodevalg ved prøveudtagningen afgøres ofte af den ønskede detektionsgrænse.

Som alternativ til traditionel prøveudtagning og analyse er udviklet undersøgelseskoncepter til passiv opsamling af dampe i poreluften. Da passiv prøveudtagning typisk kan have en varighed på flere dage eller måske uger,

imødegås herved problemet med langsomme diffusionshastigheder i lavpermeable jordlag (Hansen, 2000).

4.3.4 On-line metoder

On-line måling af MTBE udføres i dag med MIMS (Membrane Inlet Mass Spectrometry) teknologi. On-line målingen svarer til at flytte laboratoriet ud i feltet. Grundvandet skal før udførsel af målingen føres til en målekasse (ca. $\frac{1}{2}$ m³) placeret på overfladen og strømforsynet. Et sådant system koster i 2001 ca. 400.000 dkr. og skal bygges til lejligheden. Alternativer til den eksisterende teknologi er foto-akustisk baserede målestationer, der i dag er under udvikling. Denne metodik kræver også en placering af måleenheden over jorden og vil forventelig have det samme prisniveau som MIMS-baserede løsninger. Metoderne tilstræber en detektionsgrænse i størrelsesorden 1 µg/l. On-line målinger af følgestoffer fra benzinforureninger, eksempelvis BTEX, eksisterer, men er i dag ikke så udviklede, at man kan angive en præcis detektionsgrænse for grundvandets indhold.

4.4 Analyseprogram

Et måleprogram til undersøgelse af en benzinforurennet grund skal indeholde analyseparametre til karakterisering af selve olie- og benzinforureningen tilpasset den konkrete forureningssituation (for eksempel forureningens alder, olieprodukter spildt, tilstedeværelse af grund, afstand til drikkevandsboringer) og et forslag hertil er givet i afsnit 4.4.2. Da MTBE er en af de væsentligste komponenter i en vurdering af en potentiel grundvandsforurening ved en benzinstation og derfor et fokuspunkt i nærværende rapport, er i det følgende givet en mere uddybende beskrivelse vedrørende undersøgelse for MTBE og dets nedbrydningsprodukter.

4.4.1 MTBE

Ved nyere forureninger med blyfri benzin er der med meget stor sandsynlighed forurennet med MTBE. Derfor skal også MTBE medtages i et analyseprogram. MTBE kan nedbrydes under aerobe forhold, og på baggrund af den indsamlede viden om nedbrydning af MTBE (som er beskrevet i Miljøprojekt 740 fra 2003)) og de foreslåede veje for nedbrydningen af MTBE, bør et analyseprogram til en MTBE forurennet grund, som minimum indeholde:

MTBE
TBA (tert-butyl alkohol)
TBF (tert-butyl formiat)

Desuden kan de mindre alkoholer og aldehyder også medtages, da de er en del af nedbrydningsvejen for MTBE, jævnfør Miljøprojekt 740 fra 2003. Formaldehyd frigives ved et af de første trin i nedbrydningen af MTBE, så den kan også bruges som indikator for nedbrydningen af MTBE. Her er er nævnt et par eksempler:

iso-propanol
formaldehyd
acetone

Der er imidlertid et problem i at benytte små alkoholer og aldehyder (f.eks. iso-propanol, HIBA) i en forureningsundersøgelse, idet de kan stamme fra

andre stoffer end MTBE. Af ovenstående er det sandsynligvis kun HIBA, der er rigtig egnet, da det p.t. er det eneste af disse stoffer, der er vist at blive ophobet i forsøg.

Afhængig af formålet med prøvetagningen på grunden og redox-forholdene i fanen, kan programmet tilpasses. Skal man bare finde ud af, om der er forurennet med MTBE på en grund, er der sandsynligvis tilstrækkeligt at måle for MTBE, med mindre alt MTBE er omsat til TBF og TBA, hvilket ikke er sandsynligt. Skal man kun finde ud af, om der overhovedet er sket en nedbrydning i fanen eller i kilden uden at kvantificere den, er det tilstrækkeligt at måle for TBA. Skal nedbrydningen kvantificeres, afhænger analyseprogrammet af hvilke metoder, der bruges til kvantificering af nedbrydningens størrelse. Ofte kræver dette analyse af både MTBE og TBF/TBA.

Den bedste metode til **samtidig** bestemmelse af MTBE og nedbrydningsprodukterne TBA og TBF i vand er P&T GC-MS: "purge and trap" opkoncentrering med analyse ved gaskromatografi og detektion ved massespektrometri.

Princippet i analysen er, at en vandprøve udtages direkte i 40 mL prøveglas. En delmængde overføres i et lukket system til et genemboblingskammer, hvor de flygtige forbindelser blæses af med helium ved stuetemperatur. De afblæste flygtige forbindelser fanges i en fælde med en adsorbent og opkoncentreres yderligere i en frysefælde, inden stofferne direkte på GC-MS ved måling på ioner, der er karakteristiske for de enkelte stoffer: selected ion monitoring, SIM.

Metoden har den fordel, som det fremgår af det nedenstående, at den er begrænset arbejdskrævende, kræver et lille volumen prøve, ingen brug af opløsningsmidler til ekstraktion, en meget lav detektionsgrænse, og så medtager den en stor vifte af andre flygtige organiske stoffer. Som standard medtager analysen klorerede opløsningsmidler og trihalomethaner, nedbrydningsprodukter af klorerede opløsningsmidler, BTEXN, MTBE, alkylbenzener.

P&T GC-MS analysemetoden har følgende detektionsgrænse (DL): 0,1-0,2 µg/l for methylchlorid, 0,03 µg/l for vinylchlorid og 0,01 µg/l for øvrige forbindelser, herunder MTBE.

Metoden giver med den nuværende opsætning også mulighed for at påvise nedbrydningsprodukterne fra MTBE: TBF (DL: 0,1 µg/L), TBA (DL: 0,2 µg/L), iso-propanol (DL: 0,3 µg/L) og acetone (DL: 5 µg/L).

4.4.2 Forslag til analyseprogram

Med udgangspunkt i eksisterende anbefalinger, praksis og kravværdier foreslås følgende opdelte analyseprogram.

Tabel 4.1. Analyseprogram for Alle benzinstationer (obligatorisk program).

Jord	Grundvand	Poreluft
Sum af kulbrinter BTEX	Sum af kulbrinter Alkylbenzener BTEXN MTBE TBA TBF	Sum af kulbrinter BTEX

Analyse for sum af kulbrinter i jord vil tillige give en screening for BTEXN og udvalgte PAH.

MTBE er medtaget for alle benzinstationer, idet selv et mindre spild kan forårsage betydelig forurening af grundvandet på grund af stoffets mobilitet og persistens. Naphthalen (N) og alkylbenzener er inddraget, da en kontrol af drikkevandskrav dermed opnås, og da meromkostningen for flere analysemetoder vil være begrænsede, idet alkylbenzener, BTEXN, MTBE og nedbrydningsprodukter kan analyseres i én analysegang (se afsnit 4.4.1).

Tabel 4.2.
Supplerende analyser for benzinstationer med spild af diesel eller andre olieprodukter tungere end benzin.

Jord	Grundvand	Poreluft
Sum af PAH	Sum af PAH	-

Tabel 4.3.
Supplerende analyser for Benzinstationer med spild af benzin med tilsat bly.

Jord	Grundvand	Poreluft
Bly	1,2-dibromethan 1,2-dichlorethan	-

Såfremt der ønskes en vurdering af nedbrydningspotentialen for MTBE i jorden, kan analyse for TBA og TBF i jordprøver inddrages. En igangværende nedbrydning af MTBE kan hermed registreres.

Til vurdering af det geokemiske miljø i jorden kan poreluftprøver analyseres for ilt, kuldioxid og methan. En igangværende aerob respiration vil herved kunne registreres.

Geokemiske parametre (f.eks. ilt, nitrat, jern, mangan, sulfat, methan samt pH, ledningsevne, temperatur, alkalinitet) kan for grundvand inddrages i det omfang, hvor data herfra belyser grundvandets strømningsforhold (kildeidentifikation) eller hydrogeokemi (mulighed for nedbrydning af oliekomponenter).

4.4.3 Feltanalyser

Feltanalyser kan benyttes som et hjælpemiddel i felten til afgrænsning af forurening under kortlægning og bortgravning. Feltanalyser er ikke akkrediterede. Der foreligger en gennemgang af egnede feltanalysemetoder for jord (Amternes Videncenter for Jordforurening, 2001), samt en afprøvning af udvalgte feltanalysemetoder til jordanalyser (Amternes Videncenter for Jordforurening, 1999). Feltanalyser er som hovedregel ikke underlagt egentlig kvalitetskontrol, og der findes ikke retningslinier for gennemførelse heraf. Såfremt der i stor udstrækning anvendes feltanalyser er det nødvendigt at etablere et veldokumenteret kvalitetssikringssystem til dokumentation af kvaliteten. En gennemgang af anvendelige feltanalyser er beskrevet i AVJ nr. 3, 2001

5 Referencer

- American Petroleum Institute (1998): Delineation and Characterization of the Borden MTBE plume: An Evaluation of Eight Years of Natural Attenuation processes, Publication no. 4668, June 1988.
- American Petroleum Institute (1997a): Effects of sampling and analytical procedures on the measurement of geochemical indicators of intrinsic bioremediation: Lab and field studies. Health and Environmental Sciences Department. Publication no. 4657, November 1997.
- American Petroleum Institute (1997b): Methods for measuring indicators of intrinsic bioremediation: Guidance manual. Health and Environmental Sciences Department. Publication no. 4658. November 1997.
- Amternes Videncenter for Jordforurening (2001): Indeklimapåvirkning fra forurenede grunde. Erfaringsopsamling og anbefalinger. Foreløbig udgave.
- Amternes Videnscenter for Jordforurening (2000):. Håndbog om feltmetoder til analyse af forurennet jord.
- Amternes Videncenter for Jordforurening (1999): Grundvandsmonitoring ved ukontrollerede fyld- og lossepladser. Teknik og Administration, nr. 8. Udarbejdet af Rambøll, Bjerg, P.L. & Kjeldsen, P, DTU.
- Amternes Videncenter for Jordforurening (1998a): Håndbog for poreluftundersøgelser. Teknik og Administration nr. 7.
- Amternes Videnscenter for Jordforurening (1998b): Intern Rensning af benzinfureninger i grundvand. Teknik og Administration. Nr. 6, 1998.
- Ballard, S. (1996): The In Situ Permeable Flow Sensor: A Ground-Water Flow Velocity Meter. Ground Water. Vol. 34, No. 2, pp. 231-240.
- Department of the Environment (1994): Sampling Strategies for Contaminated Land. Contaminated Land Research Report No. 4, Udarbejdet af The Centre for Research into the Built Environment, The Nottingham Trent University, UK.
- Hansen, B. (2000): Passiv poreluftundersøgelse med GoreSorber Screening Survey. Ny Viden fra Miljøstyrelsen, no. 3, 2000.
<http://www.mst.dk/200003publikat/87-7909-877-0/default.htm>.
- <http://www.hnu.com>.
- Kjeldsen, P., L.J. Andersen, Christiansen, K.; Grøn, C.; Kirkegaard, C.; Lund, U.; Olsen, A.N.; Segato, H. & Wium, M. (1989): Grundvandsprøvetagning og feltmåling. Udredningsrapport U3. Lossepladsprojektet, april 1989.

- Kjeldsen, P., Holst, H., Kaalund, L. Simonsen, Y. & Vendelboe, N. (1991): Jordprøvetagning på forurenede grunde. Strategier, metoder og håndtering. Lossepladsprojektet. Udredningsrapport U8.
- Kjeldsen, P. & B. Skov (1994): A simple method for measuring the verticality of small driven wells. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 14 (3), 107-110.
- K-V Associates, INC: Groundwater systems. Direct Groundwater Flow Measurement and Subsurface Engineering Applications.
- Lauritzen, M. & Nielsen, J.P. (1999): GeoProben – nyt koncept ved forureningsundersøgelser, *Geologisk Nyt* 2/1999.
- Lavis, M.A. & Rehmann, L.C. (2000): Simulation of Transport of Methyl Tert-Butyl Ether (MTBE) to Groundwater from Small-Volume Releases of Gasoline in the Vadose Zone, American Petroleum Institute, June 2000.
- Mace, R.E. & Choi, W.-J. (1998): The Size and Behaviour of MTBE Plumes in Texas, in: American Petroleum Institute: proceedings of the 1998 petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water.
- Mahar, P.S. & Datta, B. (2001): Optimal Identification of Ground-Water Pollution Sources and Parameter Estimation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, no. 1, pp. 20.29.
- McCall, W. (1999): Field Comparison of Paired Direct Push and HSA Wells. In: Natural Attenuation of Chlorinated Solvents, Petroleum Hydrocarbons and Other Organic Compounds. Proceedings from The Fifth International In Situ and On Site Bioremediation Symposium, San Diego, California, April 19-22, 1999, pp. 337-342.
- Miljøstyrelsen (2000): JAGG-model til risikovurdering, <http://www.mst.dk>.
- Miljøstyrelsen (1999). Miljøprojekt 483.
- Miljøstyrelsen (1998a): Oprydning på forurenede lokaliteter – Hovedbind. Vejledning nr. 6.
- Miljøstyrelsen (1998b): Oprydning på forurenede lokaliteter – Appendikser. Vejledning nr. 7.
- Miljøstyrelsen & Fyns Amt (2006): MTBE. Undersøgelse af grundvandet nedstrøms idriftværende og tidligere benzinstationer. Udarbejdet af GEO. Miljøstyrelsens Teknologiuudviklingsprojekt.
- Newell, C.J. & Connor, J.A. (1998): Characteristics of Dissolved Petroleum Hydrocarbon Plumes, American Petroleum Institute, December 1998, Vers. 1.1.

- Nichols, E.M., Einarson, M.D. Beadle, S.C. (2000): Strategies for Characterizing Subsurface Releases of Gasoline Containing MTBE. American Petroleum Institute, API Publication nr. 4669. February 2000.
- Pankow, F.P. & Cherry, J.A. (1995): Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater, Waterloo Press.
- Postma, D., E.Z. Hansen & J. Lyngkilde (1990): Evaluering og udvikling af metoder til prøvetagning og feltanalyse af anoxisk grundvand. Rapport H8. Lossepladsprojektet, oktober 1990.
- Naval Facilities Engineering Service Center (2000): Guide to Optimal Groundwater Monitoring. Udarbejdet af Radian International, NM, USA.
- Newell, C.J. & Connor, J.A. (1998): Characteristics of Dissolved Petroleum Hydrocarbon Plumes. Results from Four Studies. American Petroleum Institute Bulletin no. 8. December 1998.
- Rixey, W.G. & Joshi, S. (2000): Dissolution of MTBE from a Residually Trapped Gasoline Source. A Summary of Research Results. American Petroleum Institute, September 2000.
- Vedby, S. & Nielsen, A.-M. (1990): Undersøgelser ved Vejen Losseplads: Lagfølgeboringer. Lossepladsprojektet. Rapport H1, juli 1990.
- Århus Amt, Miljøkontoret (1991): Grundvandsboringer. Teknisk rapport. Oktober 1991.

Bilag 1. Erfaringsopsamling fra Fyns Amt vedr. MTBE

Som første skridt i udformningen af undersøgelsesprogrammet for MTBE (og andre benzin/dieselstoffer) er foretaget en gennemgang af registrerings- og forureningsundersøgelser fra Fyns Amt samt en række forureningsundersøgelser primært i Fyns Amt, men udført i regi af Oliebranchens Miljøpulje. Formålet med gennemgangen var dels at undersøge om den nuværende undersøgelsesform gav anledning til spørgsmål og overvejelser, som skulle besvares i den nye undersøgelsesstrategi, dels om der kunne fastlægges forskellige relevante sammenhænge mellem de specifikke forhold på en given lokalitet, herunder fremgangsmåden ved den udførte undersøgelse, og den konstaterede forurening. Mere specifikt undersøgt bl.a.:

- de mest typiske kilder til forureninger
- evt. korrelation mellem tankantal, -størrelse samt -alder og forureningsfund
- om geologien/hydrogeologien på lokaliteten kunne korreleres til fundstørrelsen
- sammenhæng mellem filtersætning og fund
- sammenhænge mellem forekomst af MTBE og forekomst af andre benzinkomponenter
- om variationer i fund og koncentration kunne skyldes udformningen af undersøgelserne.

Frekvensen af fund af MTBE på de undersøgte lokaliteter er meget høj: 62 ud af 72 undersøgte servicestationer (86 %). Dette selvom ca. halvdelen (38) af undersøgelserne kun er begrænsede kortlægningsopgaver, hvor der som oftest kun er én filtersat boring i det sekundære magasin.

Til sammenligning blev ved undersøgelse af 609 servicestationer med erkendte lækager, i Texas, USA, fundet MTBE i 93 % af tilfældene (API, 1998).

På de 60 af stationerne i Fyns Amt er der målt i sekundært grundvand, og for disse er der på de 5 også målt i primært grundvand. På de 2 stationer er der kun målt i primært grundvand. Ud af de 60 stationer er der på:

- de 17 målt mere end 1.000 µg/l (24 % ud af det totale antal stationer)
- de 29 målt mere end 100 µg/l (40 % ud af det totale antal stationer)
- de 36 målt mere end 30 µg/l (50 % ud af det totale antal stationer)
- de 45 målt mere end 5 µg/l (63 % ud af det totale antal stationer)
- de 49 målt mere end 2 µg/l (68 % ud af det totale antal stationer).

Af de 72 undersøgelser er de 38 som nævnt kortlægninger af et begrænset omfang. De øvrige undersøgelser er primært undersøgelser foretaget i OM programmet, og ofte er der først målt for MTBE som et led i afrapportering og opfølgning på en oprensning. Sidstnævnte undersøgelser kan derfor i denne sammenhæng primært bruges i en vurdering af faneudbredelser m.m.

Ud af de 38 begrænsede kortlægninger er de 30 udført direkte for Fyns Amt, og omfang og fremgangsmåde er således meget ensartet. De er derfor i det følgende anvendt som udgangspunkt for en nærmere vurdering af potentielle sammenhænge mellem tankrelaterede forhold m.m. og den konstaterede forurening.

Boringen i 5 ud af disse undersøgelser er dog placeret ved tanke, der ikke har indeholdt MTBE-holdig benzin, hvorfor de målte MTBE-indhold næppe er repræsentative for en undersøgelse af en kildenær grundvandsforurening med MTBE. Man kan ud af datamaterialet se, at MTBE er konstateret ($>2 \mu\text{g/l}$):

- i 14 ud af 18 boringer (78 %), der er placeret i en afstand på mindre end 2 m fra en tank indeholdende MTBE-holdig benzin, og i 4 ud af 8 boringer (50 %), der er placeret mellem 2 og 8 m fra en relevant tank. Der er over $30 \mu\text{g/l}$ MTBE i 60 % af de boringer, der ligger tæt ved tankene og i alle 50 % af de boringer, der er placeret 2 til 8 m fra tankene
- i 15 ud af 19 tilfælde (79 %), hvor de pågældende tanke er taget i brug før 1990, men til gengæld i 0 tilfælde, hvor tankene er taget i brug efter 1990.
- i 10 ud af 15 tilfælde (67 %), hvor der er 3 tanke eller flere med MTBE-holdig benzin på den pågældende lokalitet.

På de ud af de 72 lokaliteter, hvor der ikke er fundet MTBE i grundvandet, har der ikke i undersøgelserne været andre indikationer af benzinforurening. Kun i ét enkelt tilfælde er der fundet benzen på en grund, hvor der ikke er fundet MTBE, og da kun i en koncentration tæt på detektionsgrænsen ($0,2 \mu\text{g/l}$ benzen). MTBE findes i mange tilfælde (21), hvor ingen andre benzinstoffer optræder i grundvandet. Dette er formentlig betinget af stoffets høje opløselighed, svage binding til jorden og ringe nedbrydning.

I 10 ud af de 17 tilfælde, hvor der er målt mere end $1.000 \mu\text{g/l}$ MTBE, er der også målt mere end $1.000 \mu\text{g/l}$ benzen. Der er kun fundet 4 sager, hvor benzen er fundet i koncentrationer over $1.000 \mu\text{g/l}$ samtidig med, at MTBE-indholdet er under $1.000 \mu\text{g/l}$ (MTBE er fundet i alle fire tilfælde). Benzenindholdet er meget varierende, når MTBE-indholdet er under $1.000 \mu\text{g/l}$.

Fig.1.A viser fordelingen af de konstaterede koncentrationer i de 38 sager, hvor der er konstateret indhold af MTBE over $30 \mu\text{g/l}$.

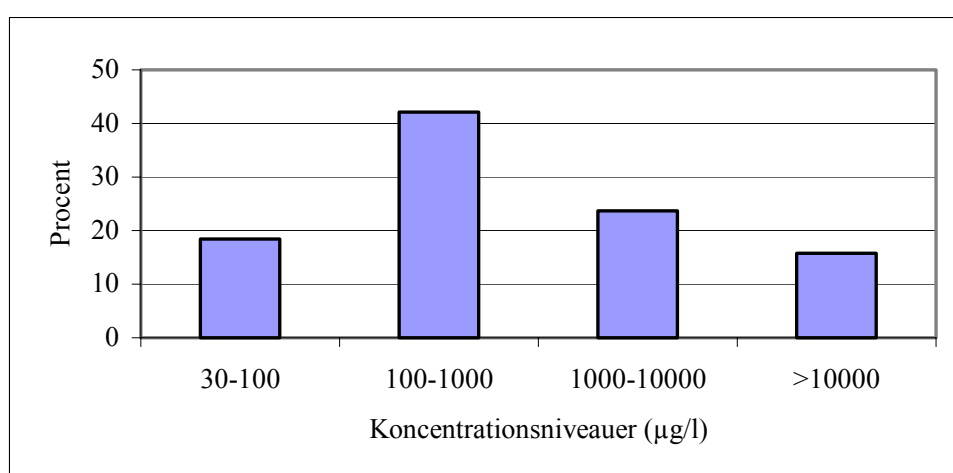


Fig.1.A.
Procentvis fordeling af koncentrationer af MTBE i grundvand under 38 benzinstationer, hvor der er konstateret MTBE over $30 \mu\text{g/l}$.

I kortlægningsundersøgelser (med kun én filtersat boring) er benzen-indholdet kun meget sjældent højere end MTBE-indholdet. Ved gennemgang af de

egentlige forureningssager, hvor man bl.a. har søgt at foretage afgrænsning af forureningen, ses det dog, at der i flere tilfælde kan forekomme meget høje koncentrationer af BTEX (og typisk også totalkulbrinter) uden at MTBE-koncentrationen er særlig stor.

I disse tilfælde er der sandsynligvis tale om forureninger forårsaget af benzin-/olieprodukter uden indhold af MTBE. Ved samtidigt forekommende forureninger er udbredelsen af MTBE som oftest større end udbredelsen af de øvrige benzinkomponenter.

Mange forskellige mulige kilder nævnes i undersøgelserne, bl.a.:

- utætheder i forbindelse med tank og rørføring
- benzin/olieudskillere
- uheld i forbindelse med påfyldning
- overfladespild
- dårlig afledning af overfladevand til kloak mm.

I de tilfælde hvor der er målt over 1.000 µg/l MTBE, er det næsten altid henført til en konkrete lækage (utætheder i rør, tank, olieudskillere eller stander). MTBE findes ofte i tilfælde, hvor der ikke i forbindelse med undersøgelsen er konstateret andre kilder til forurening end "længerevarende mindre spild". Det er i den forbindelse interessant at selv små spild af MTBE-holdig benzin kan føre til betydelig forurening af det underliggende grundvandsmagasin. Ved et antaget indhold af MTBE i benzin på ca. 10 % (oktan 98) kræves der kun et spild på ca. 1 l benzin for at forurene et grundvandsmagasin i en udstrækning på 100x100 m² til 5 meter under grundvandspejlet med en koncentration på 5 µg/l.

De øvre jordlag på de undersøgte lokaliteter varierer mellem sand, grus, sandet ler, moræneler med og uden sandstriber. Fundene af MTBE i det sekundære magasin gøres både i tilfælde, hvor filteret er overlejret af moræneler, og hvor der kun er fyld- og sandlag over filteret. Der er ikke tegn på, at der er mindre forekomster af MTBE i det øvre grundvand ved de mere afskærmende morænelerslag over filtrene end ved øvrige sammensætninger af det øvre lag. Tilsvarende er der ingen sammenhæng mellem MTBE-fund og jordart i det vandførende lag, uanset om boringen er placeret i umiddelbar nærhed af tanken eller 2 til 8 m fra denne.

I alle tilfælde hvor der er konstateret MTBE-koncentrationer større end 100 µg/l, og hvor fanen er afgrænset, har fanen strakt sig uden for skel, uanset om det sekundære grundvandsmagasin har bestået af et mere sammenhængende lag af smeltevandssand af varierende finhed eller af sandstriber i moræneleren. De overvejende antal tilfælde af forureninger er dog beskrevet for sammenhængende lag af smeltevandssand. I de sammenhængende magasiner har gradienten varieret mellem 2,5 og 3,75 ‰. Hvor meget fanen strækker sig ud over skel, afhænger selvfølgelig af, hvor tankene er placeret i forhold til denne (samt strømningsretningen). I det overvejende antal tilfælde, hvor faneudbredelsen er opgjort, strækker den sig i mellem 8 og 15 m uden for skel (fanegrænsen er her sat til ca. 5 µg/l). I det eneste tilfælde, hvor fanens længde er opgjort, estimeres den til ca. 75 m, hvoraf de 60 m er beliggende uden for skel. Udbredelsen er i dette tilfælde ikke sket i et tykkere (>2 m) sammenhængende sandlag, men i sandstriber med større eller mindre sammenhæng i en moræneler. Til sammenligning er ved førnævnte undersøgelse i Texas, USA foretaget i perioden 1995-1997 fundet en middelfanelængde for MTBE på 60 m med en 90 % konfidens-interval på 130 m (fanelængde estimeret ved 10 µg MTBE/l).

I 1997 udsendte Miljøstyrelsen en ny vejledning om boringskontrol på vandværker. I vejledningen er MTBE medtaget som et stof, vandværkerne bør analysere for, hvis der kan være risiko for forurening af boringer.

Fyns Amt opfordrede på dette grundlag vandværkerne i amtet til at analysere for MTBE, hvis der inden for deres indvindingsopland var placeret virksomheder, der potentielt kunne forurene grundvandet med MTBE. På den baggrund har Fyns Amt fået indberetning om MTBE-analyser i grundvand eller drikkevand fra 20 vandværker.

I 14 boringer på i alt 7 vandværker er der i Fyns Amts oversigt konstateret MTBE i grundvandet i koncentrationer mellem 0,1 µg/l og 56 µg/l. To af disse boringer har MTBE-indhold over 30 µg/l. Det forurenede grundvand kommer i alle tilfælde fra områder, hvor der er konstateret forurening med benzinstoffer. Derudover er der konstateret MTBE i drikkevandet på 2 af de 7 vandværker, der har konstateret MTBE i grundvandet. Koncentrationerne er mellem 0,6 og 9,4 µg/l.

Endelig har amtet analyseret for MTBE i 9 boringer, der indgår i det nationale overvågningsprogram, NOVA 2003. I denne forbindelse er der konstateret 1,4 µg/l MTBE i én af de 9 undersøgte boringer.

Bilag 2. Modelling af scenarier

Opstillingen af retningslinier for undersøgelsen af grundvandsforureninger ved servicestationer understøttes af modelsimuleringer. Ideen med disse simuleringer er at belyse spredningen af grundvandsforurening i en række situationer. Modelsimuleringerne skal afdække en række kombinationer af:

- Spildformer – og varighed
- Forskellige geologiske forhold (scenarier)
- Forskellige transportscenarier (variation af parametre – dispersivitet, sorption og nedbrydning) til belysning af indvirkning af variation i geologiske og geokemiske forhold.

Der er udvalgt en række simuleringer, som menes at afdække de mest sandsynlige variationer i ovennævnte parametre. De spredninger, som opnås ved de forskellige simuleringer, kan benyttes til at støtte ved anbefaling af placeringen og filtersætningen af boringer ved undersøgelser og til at belyse konsekvensen af ændringerne i ovennævnte forhold.

Scenarier

Der er gennemført simuleringer for forskellige geologiske scenarier som gengivet i Tabel 2A. Simuleringen i grus med gradient 5 ‰ (sim. no. 6) er dog udeladt, da grundvandshastigheden i dette scenarium ikke anses for realistisk. De hydrauliske ledningsevner, som er listet i tabellen, skønnes at afdække et rimeligt udsnit af de geologiske forhold, som vil kunne påtræffes i undersøgelser af øvre magasiner i Danmark. Spredninger for øvrige geologiske konfigurationer vil kunne interpoleres (evt. ekstrapoleres) fra resultaterne af de valgte scenarier. Det antages ved simuleringerne, at de geologiske formationer er homogene. Inhomogeniteter i geologien belyses ved variation af dispersiviteten i transportsimuleringer og ved angivelse af, hvilken indflydelse givne inhomogeniteter kan tænkes at have på spredningen.

Tabel 2A.

Flowsценарier. Den formodede hastighed i x-retningen er estimeret ud fra gradient, Kx og en porøsitet på 0,35. Spredningen på 15 år er udregnet for sammenligning med den spredning, som findes ved simuleringerne.

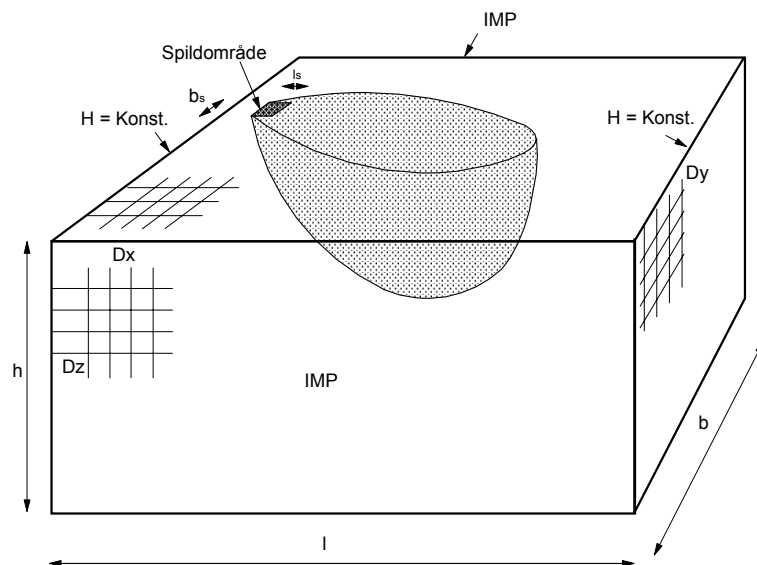
Sim no	Sim-navn	Materiale	Gradient o/oo	Kx = Ky m/s	Kz m/s	Formodet hastighed x-retn (Vp). m/år	Fanelængde efter 15 år m
1	Flow1_1	sand grov-mellem	1	1.00E-04	1.00E-05	9	135
2	Flow1_2	sand grov-mellem	3	1.00E-04	1.00E-05	27	405
3	Flow1_3	sand grov-mellem	5	1.00E-04	1.00E-05	45	676
4	Flow2_1	grus	1	1.00E-03	1.00E-05	90	1352
5	Flow2_2	grus	3	1.00E-03	1.00E-05	270	4055
6	Flow2_3	grus	5	1.00E-03	1.00E-05	451	6758
7	Flow3_1	sand fin /silt	1	1.00E-05	1.00E-04	1	14
8	Flow3_2	sand fin /silt	3	1.00E-05	1.00E-04	3	41
9	Flow3_3	sand fin /silt	5	1.00E-05	1.00E-04	5	68

Der foretages simuleringer for de givne scenarier på 2 skalaer:

- 1) Et modelområde på 2 km x 250 m (5 m dybde) til bedømmelse af spredningen af forureningen på større skala. Formålet er således primært at angive, hvor langt væk man kan formodes at finde forurening. Diskretiseringen i disse simuleringer (10 x 10 m x 0,5 m lagtykkelse) gør dem uegnede til at bedømme spredningen inden for mindre områder.

- 2) Et mindre modelområde 100 m x 25 m (5 m dybde) til bedømmelse af spredningen af forureningen på lokalitetsskala (diskretisering: 1 x 1 m x 0,5 m lagtykkelse).

Der foretages kun simuleringer af et øvre sekundært magasin. Udvekslingen til et underliggende primært magasin bør vurderes i det givne tilfælde. Opsætningen er for begge tilfælde et område med fastholdt trykrand opstrøms og nedstrøms og med impermeable sider, som angivet på nedenstående figur 2.A.



Figur 2.A.
Skitse af modelområde.

Infiltrationen i delvist befæstede områder, som servicestationerne forventes at ligge i, er formodentlig stærkt variabel og som oftest meget lav. Der regnes derfor i disse simuleringer med en infiltration lig nul. I stedet transporteres forureningen med den 'regionale' strømning, som fremkaldes af de påtrykte trykrande. Der er således kun horisontal strømning i modelområdet, og spredning over dybden foregår i kraft af dispersion (numerisk og fysisk). Stoffet tilføres i simuleringerne dog i form af en beskeden infiltration 0,001 mm/t (8 mm/år) i et enkelt felt tæt på den opstrøms rand. Dette er ikke et udtryk for opfattelsen af den fysiske situation, men blot den modelteknisk enkleste måde at tilføre stoffet på. Koncentrationen af alle komponenter i infiltrationen til kildefeltet sættes lig med 1 (for visse simuleringer lig med 1.000), således at de koncentrationer, der senere findes, kan betragtes som fortyndinger af den infiltrerende koncentration. Alt efter hvad fluxen af forurening er i det konkrete tilfælde, kan man regne sig frem til den fortynding, der måtte være relevant for at ramme en given koncentration i akviferen (f.eks. drikkevandskriteriet).

Dispersiviteterne, som i simuleringerne medvirker til spredningen og dermed også fortyndingen af fanerne, er fastsat ud fra 'observerede' værdier i felten (Miljøstyrelsen, 1998b) og under hensyntagen til at de opnåede spredninger af fanerne skal overholde værdier, som er observeret ved konkrete forureninger. På grund af diskretiseringen, i særdeleshed for simuleringerne på stor skala, sker der en del numerisk dispersion af fanen, dvs. spredning af fanen som følge af at det mindste repræsenterbare volumen er 50 m³ for simuleringerne på stor skala og 0,5 m³ for simuleringerne på lille skala. De

anvendte diskretiseringer er dog de mindst mulige set i forhold til en rimelig simuleringstid.

De langsgående (longitudinale) dispersiviteter (α_l) er valgt ud fra 'feltværdier' fra Miljøstyrelsen (1998b) (Figur 2 – Appendiks 5.8). De tværgående horisontale dispersiviteter (α_{th}) er valgt som 1/100 til 1/1.000 af værdien for den langsgående dispersivitet, ud fra hensyntagen til opnåelse af en realistisk tværgående spredning af fanen. De tværgående vertikale (dybdeblending) dispersiviteter (α_{tv}) er valgt til 1/50 til 1/200 af den tværgående horisontale dispersivitet. Disse dybdeblændende dispersiviteter giver en rimelig overensstemmelse med de opblandingsdybder, som opnås ved beregning med JAGG-modellen (Miljøstyrelsen, 1998a). De anvendte dispersiviteter kan ses i tabel 2E og 2F.

Sammensætning af spil d

Benzin er en blanding af et stort antal enkeltstoffer. For at forenkle beregningerne opdeles benzin i tre hovedgrupper:

- MTBE – simuleres som enkeltstof (antages at udgøre 6 % af gennemsnitlig benzin)
- BTEX – benzen benyttes som modelstof (antages at udgøre 25 % af gennemsnitlig benzin)
- C6⁺ – øvrige komponenter i benzin tungere komponenter end C₆ (antages at udgøre 69 % af gennemsnitlig benzin).

MTBE-indholdet varierer i mellem de forskellige oktantal og inden for de enkelte oktantal. Andelen af MTBE i benzinen er opgjort ud fra et indhold på 10 % i oktan 98 og 5 % i oktan 95 og ud fra et antaget salg af de forskellige oktantyper. Fastsættelsen af denne værdi inden for det sandsynlige spænd af værdier vil ikke have den store betydning for anbefalingerne til undersøgelsesprogrammet.

De kemiske parametre, som gælder for de tre stoffer/stofgrupper, er givet i nedenstående tabel 2B. For BTEX er benzen valgt som modelstof og for de tungere kulbringer er hexan valgt som modelstof. Da der er tale om simuleringer uden stedsspecifikke oplysninger er der som udgangspunkt valgt en værdi for f_{oc} på 0,1 %, hvilket menes at være en rimelig værdi for det organiske kulstofindhold i den øvre del af den mættede zone. Med hensyn til nedbrydningskonstanter er det for MTBE valgt at sætte denne lig 0, for BTEX (benzen) og C6⁺ (hexan) er valgt konservative værdier.

Tabel 2B. Kemiske parametre gældende for antagne stofgrupper i benzin/diesel samt f_{oc} for de foretagne simuleringer. Værdier for $\log K_{ow}$ fra Miljøstyrelsen, 1999, nedbrydningskonstant for BTEX er estimeret fra Miljøstyrelsen (1998b) ud fra nedbrydningskonstanten for benzen som et gennemsnit mellem den laveste værdi for aerob nedbrydning og raten for anaerob nedbrydning. Raten for C6⁺ er estimeret som en tiendedel af raten for benzen.

Stof	$\log K_{ow}$	$\log K_{oc}$	f_{oc}	Kd	μ (nedbr.)
	-	-	%	l/kg	d ⁻¹
MTBE	1,2	0,4	0,1	0,0025	0
BTEX (benzen)	2,1	1,3	0,1	0,022	0,005
C6 ⁺ (hexan)	4,1	3,4	0,1	2,65	0,0005

Spil dformer

Det antages, at spildet (spildene) er foregået på en af følgende to måder, eller som en kombination af disse:

- Længerevarende spild af mindre styrke – f.eks. overfladespild, utæt kloak under pladsen eller læk på olie/benzinudskillere.
- Kortere spild af større styrke – f.eks. brud på rørføringer eller tanke eller kraftige spild fra standere.

De længerevarende spild formodes p.g.a. deres beskedne styrke at kunne foregå uden at blive opdaget over en periode på adskillige år. Brud på kloak eller dårligt fungerende udskillere vil kunne opdages i forbindelse med øvrig vedligeholdelse af disse installationer. Da spredningen af MTBE er hovedproblemstillingen, formodes de undersøgte spild at kunne være begyndt i forbindelse med indførslen af MTBE som additiv omkring 1985, og at kunne være foregået op til i dag.

Varigheden og størrelsen af de kortere større spild bedømmes ud fra antagelser om opgørelser af salg og påfyldning.

Bedømmelse af spil dmængder

"Længerevarende mindre spil d"

Et simpelt skøn:

100 tankninger/dag x 1 ml spild/besøg x 365 d/år = 36,5 l benzin spildt per år.

Et rimeligt spænd for spild forårsaget af 'normal' betjening af anlægget vil således ligge på 10 – 100 l/år alt efter størrelse af stationen. For denne type spild vil den frie fase ligge på jordoverfladen, og der må derfor forventes en kraftig fordampning før en evt. nedsivning. Det forudsættes således, at 50 % af MTBE og BTEX fordamper, og at 25 % af den tungere fraktion fordamper, og at resten udvaskes gennem den umættede zone til grundvandet. Der regnes ikke med tilbageholdelse af stoffer i den umættede zone. I realiteten foregår spildene formentlig primært via udsivning via utætte kloakker m.m., men det er efter bl.a. diskussion ifølgegruppen vurderet, at størrelsesordenen af sådanne spild er realistisk. De resulterende årlige tilførsler for yderpunkterne 10 og 100 l/år er gengivet i Tabel 2C.

Beregning af flux og fortynding

Ud fra de estimerede fluxe kan beregnes, hvad indløbskoncentrationen i simuleringerne burde være, og herfra hvilken fortynding af den indkommende koncentration, der kræves, afhængigt af hvilket kriterium, der ønskes overholdt i grundvandet.

Eksempel:

spild : 2 kg MTBE per år

input i model: $0,001 \text{ mm/t infiltration over et område på } 10 \times 10 = 100 \text{ m}^2$
 $= 0,876 \text{ m}^3 / \text{år}.$

For at kunne balancere den egentlige flux skal koncentrationen i inddata for modellen være $= 2 \text{ (kg/år)} / 0,876 \text{ (m}^3/\text{år)} = 2,3 \text{ kg/m}^3$. Dette er $2,3 \cdot 10^6 / 5 = 4,6 \cdot 10^5$ gange højere end et kriterium på $5 \text{ } \mu\text{g/l}$, og derfor skal indløbskoncentrationen på 1 fortyndes til en koncentration på $1/4,6 \cdot 10^5 = 2,2 \cdot 10^{-6}$ for at overholde et kriterium på $5 \text{ } \mu\text{g/l}$.
 Man skal således finde den linie i konturplottene, som viser en fortynding til $2 \cdot 10^{-6}$ af den oprindelige inputkoncentration på 1. Resultaterne for de påkrævede fortyndinger er gengivet tabel 2C.

Tabel 2C Angivelse af resulterende flux til grundvandet af de tre stofgrupper ved årlige spild på hhv. 10 og 100 l/år (lineær udvikling) samt angivelse af den fortynding = koncentration i simuleringresultaterne, som skal opnås for overholdelse af krav. BTEX sammenlignes med grænseværdien for benzen på $1 \mu\text{g/l}$.

	Spild	Fordampning fra overflade	Krav (maksimalt tilladelig konc.)	Flux til grundvand	Påkrævet fortynding i simulering for overholdelse af krav	
					Lille skala (spild 1 m^2)	Stor skala (spild 100 m^2)
	l/år	%	$\mu\text{g/l}$	kg/år	-	-
M T B E	10	50	5	0,2	1,9E-7	1,9E-5
	100	50	5	2,2	1,9E-8	1,9E-6
B T E X	10	50	1	0,9	1E-8	1E-6
	100	50	1	9,0	1E-9	1E-7
C 6 +	10	25	9	3,7	2,1E-8	2,1E-6
	100	25	9	37	2,1E-9	2,1E-7

"Kortvarigt større spild"

Disse spild antages at forekomme i forbindelse med brud på rør og lignende. Det antages, at muligheden for at opdage sådanne brud, udover visuel inspektion er ved opgørelser over påfyldning og salg. Ved pejlinger af oliestand i tankene kan påregnes en målesikkerhed på ca. 2 cm. For en 10.000 l tank af en given udformning (diameter 1,75 m, længde 4 m) svarer dette til en usikkerhed på op til 1,4 % i aflæsningen. Usikkerhed i aflæsningen vil altså kunne dække over en lækage af en vis størrelse. Det formodes dog, at et spild vil blive opdaget inden for en periode på grund af den stigende difference mellem påfyldning og salg. På grund af den større absolutte mængde i salget på større stationer vil det her være muligt at få et større udslip, før dette bliver opdaget. Der vil således være en tendens til (alt andet lige), at større stationer vil have større sandsynlighed for udslip. Estimer på de maksimale spildstørrelser for tre størrelser af servicestationer er gengivet i tabel 2D.

Tabel 2D.
 Maksimale spildstørrelser for 3 størrelser af servicestationer.

Størrelse	Antal tanke	Spildstørrelse
Lille	2 stk. 5.000 l tanke	1.000 l over 15 uger
Mellem	2 stk. 10.000 l 1 stk. 20.000 l	4.000 l over 15 uger
Store	4 stk. 10.000 l 3 stk. 20.000 l	10.000 l over 15 uger

Ved disse kraftige spild med nedsivning af en separat benzinfase må påregnes med en vis tilbageholdelse i den umættede zone. Et typisk estimat på et residualindhold af fri fase i jorden efter infiltration af fri fase er 5 % af bulk volumen.

Det antages, at nedsivningen fra bruddet foregår over et areal på 1 m², og at der er 3 m fra spildet til grundvandsspejlet. Der vil under disse forudsætninger kunne tilbageholdes 150 l benzin i den umættede zone. De resterende mængder af fri fase fra de tre størrelser af spild vil kunne dække områder fra 8,5 til 985 m² i en tykkelse på 10 cm.

Beregning af flux og fortynding

Opløsningen af den frie fase fra de kortvarige kraftige spild i grundvandet antages at foregå ved mætning af grundvandet med benzin i de øverste 10 cm af grundvandszonen i en bredde, der modsvarer den formodede spredning af den frie fase. Med en (relativt høj) grundvandshastighed på 100 m/år, og med en indløbskoncentration på 1.000 i simuleringerne fås, at den relevante fortynding for MTBE og BTEX er 10⁻⁶-10⁻⁷ og for C₆⁺ 10⁻³ – 10⁻⁴ for spild på lille skala.

Varigheden af spildet sættes i simuleringer til ét år, da det formodes, at der vil være en vis responstid fra lækagen opdages og repareres (15 uger) og til undersøgelsen udføres. Varigheden af kilden inden for et spænd på 15 uger til 1 år er dog ikke af afgørende betydning for den arealmæssige udbredelse af kilden over en simuleringstid på 1 år (verificeret ved simulering).

Simuleringer

Inputparametrene for de forskellige transportsimuleringer på lille skala er givet i nedenstående tabel 2E og resultaterne af simuleringerne i form af konturplots er givet i slutningen af bilaget.

Der er foretaget en vurdering af effekten af påsætning af en infiltration på 100 mm/år i hele modelområdet (undtagen kildefeltet) i to af opsætningerne. Den ene opsætning er modellen benævnt ls_3_3_1 (se tabel 2E), hvor den formodede porevandshastighed i x-retningen er på kun ca. 5 m/år og hvor påsætningen af infiltration derfor må påregnes at have den største indflydelse på spredningen af fanen. Den anden opsætning er ls_1_2_1, hvor den formodede porevandshastighed i x-retningen er på ca. 27 m/år. Resultaterne viser, at for simuleringen med den lave hastighed har infiltrationen en betydelig indflydelse på udbredelsen af fanen, men allerede ved en hastighed på 27 m/år er indflydelsen på især den horisontale udbredelse ubetydelig. Ved placeringen af filtre bør indgå en overvejelse af strømningshastigheden og overfladedækket i området.

Der er foretaget en analyse af betydningen af en finere diskretisering i dybden for de to samme simuleringer, hvor der blev påsat infiltration. Simuleringerne blev gennemført med en lagdeling på 10 cm over de første 1,5 m og følgende

en lagdeling på 25 cm. Disse simuleringer viste at forskellen i diskretisering i dybden ikke havde afgørende konsekvenser for den horisontale udbredelse af fanen og dermed ikke for de anbefalinger der følger af simuleringerne.

Inputparametrene for de forskellige transportsimuleringer på stor skala er givet i nedenstående tabel 2F.

Konklusionerne på simuleringerne er givet nedenstående.

Konklusion på simuleringer

De udførte simuleringer giver følgende generelle konklusioner:

- Variationer i K_d betyder uanset jordart kun noget for gruppen $C6^+$, hvilket er af mindre betydning, da fokus er på grundvandsforurening.
- Om der finder nedbrydning sted eller ej, har betydning for BTEX-fanens udbredelse. I grove jorde (og ved mindre gradienter) kan det gøre forskellen mellem, om BTEX-fanen når uden for skel eller ej. Ved større gradienter når fanen i alle tilfælde uden for skel i grove jorde. I fine jorde når BTEX-fanen i alle tilfælde ikke udover 15 – 20 m (uanset gradient).
- Variationen i den langsgående dispersivitet betyder meget lidt for fanens længde (efter 15 år). Bredden af fanen stiger med stigende dispersivitet. Dette har mest betydning for MTBE og kun begrænset betydning for BTEX og $C6^+$. Betydningen bliver større for stigende gradient.
- I grove jorde har gradienten mindre betydning for, om MTBE-fanen kan genfindes uden for skel, da dette alt andet lige ofte vil være tilfældet. I fine jorde har det væsentlig betydning.

Tabel 2E.

Fortegnelse over parametervalg for simuleringer på lille skala.

Navn	Kx	a_l	a_{th}	a_{tv}	Ned- brydning*.	K_d^*	Kilde varighed	Kilde-konc.
	m/s	m	m	m	-	-	-	-
1_1_1	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
1_2_1	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
1_3_1	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
2_1_1	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
2_2_1	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
2_3_1	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
3_1_1	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
3_2_1	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
3_3_1	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 år	1
1_1_1_1	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1
1_2_1_1	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1
1_3_1_1	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1
2_1_1_1	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1
2_2_1_1	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1
2_3_1_1	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1
3_1_1_1	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1
3_2_1_1	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1

3_3_1_1	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	0,5	15 år	1
1_1_3	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000
1_2_3	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000
1_3_3	1,00E-04	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000
2_1_3	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000
2_2_3	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000
2_3_3	1,00E-03	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000
3_1_3	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000
3_2_3	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000
3_3_3	1,00E-05	0,5	0,005	0,0001	1	1	15 uger	1.000

* Opgives som en faktor ganget på den Kd-værdi og værdi for nedbrydning, som er angivet i tabel 2B.

Tabel 2F.

Fortegnelse over parametervalg for simuleringer på stor skala.

Navn	Kx	a _l	a _h	a _v	Ned- brydning*.	K _d *	Kilde varighed	Kilde-konc.
	m/s	m	m	m	-	-	år	
1_1_1	1,00E-04	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
1_2_1	1,00E-04	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
1_3_1	1,00E-04	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
2_1_1	1,00E-03	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
2_2_1	1,00E-03	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
2_3_1	1,00E-03	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
3_1_1	1,00E-05	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
3_2_1	1,00E-05	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
3_3_1	1,00E-05	10	0,1	0,0005	1	1	15	1
1_1_2	1,00E-04	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
1_2_2	1,00E-04	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
1_3_2	1,00E-04	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
2_1_2	1,00E-03	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
2_2_2	1,00E-03	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
2_3_2	1,00E-03	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
3_1_2	1,00E-05	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
3_2_2	1,00E-05	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
3_3_2	1,00E-05	5	0,01	0,0001	1	1	15	1
1_1_4	1,00E-04	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
1_2_4	1,00E-04	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
1_3_4	1,00E-04	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
2_1_4	1,00E-03	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
2_2_4	1,00E-03	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
2_3_4	1,00E-03	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
3_1_4	1,00E-05	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
3_2_4	1,00E-05	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
3_3_4	1,00E-05	5	0,01	0,0001	0	1	15	1
1_1_3	1,00E-04	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1
1_2_3	1,00E-04	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1
1_3_3	1,00E-04	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1
2_1_3	1,00E-03	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1
2_2_3	1,00E-03	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1
2_3_3	1,00E-03	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1
3_1_3	1,00E-05	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1
3_2_3	1,00E-05	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1
3_3_3	1,00E-05	5	0,01	0,0001	1	0,1	15	1

* Opgives som en faktor ganget på den K_d-værdi og værdi for nedbrydning, som er angivet i Tabel B.

Bilag 3. Statistisk grundlag

Boringer på benzinstationens areal

I forbindelse med fastlæggelsen af det antal boringer inde på benzinstationens areal, som er nødvendige for med en given sandsynlighed at finde en grundvandsforurening med MTBE (eller andre benzinkomponenter) er anvendt den statistiske model, som også kan anvendes, når en ukendt jordforurenings kilde skal findes. Da der her er tale om grundvandsforurening, vil der være tale om en tilnærmelse, da man ikke på samme måde kan tale om en (stort set) immobil kilde. Spredningen med grundvandsstrømningen vil her medføre, at kilden vokser i udstrækning med tid, samt at den, såfremt årsagen til forureningen stoppes, i princippet på langt sigt også kan flytte sig og mindskes. Inden for de tidshorisonter og geografiske afstande, der her er tale om, anses sidstnævnte mulighed dog for at være uden betydning. Spredningen i grundvandet vil omvendt medføre en øget kildestørrelse, som vil medføre, at de foretagne beregninger er på den sikre side.

På baggrund af data fra de undersøgelser, der har indgået i erfaringsopsamlingen, er der ved de statistiske beregninger anvendt følgende arealstørrelser:

Benzinstationens areal:	2.500 m ²
Tankgravens areal: (inkl. en bræmme på 1,5 m)	65 m ²
Areal for overfladespild: (defineret som areal med kloakker for opsamling af overfladevand)	400 m ²

Ud fra erfaringsopsamlingens data fås, at der 85 % sandsynlighed for at finde MTBE på en benzinstation, såfremt boringen er placeret indenfor en afstand på 1,5 m fra en tankgrav. Heraf fremgår ikke, hvad sandsynligheden er, såfremt der er en fane (denne sandsynlighed må nødvendigvis være større), da denne statistik må formodes også at indeholde undersøgelser, hvor der ikke er sket nogen forurening. Men sandsynligheden er af samme størrelsesorden, som den, der er fundet ved en større amerikansk undersøgelse (her var sandsynligheden 90 %, API, 1998). Tilsvarende er der på baggrund af erfaringsopsamlingen 50 % sandsynlighed for at finde en forurening med MTBE, såfremt boringen er placeret mellem 2 og 8 m fra tanken.

Disse sandsynligheder vil derfor blive anvendt i det følgende.

Såfremt vi ikke vidste, hvor vi skulle lede efter forureningen, ville der skulle placeres i alt:

$$N = k (=1,25) \times (2500/65) = 48 \text{ boringer}$$

på benzinstationen, såfremt vi ønskede at finde en kilde på størrelse med tankgraven. Værdien for k afhænger af den ønskede sandsynlighed (her sat til 95 %) og af kildens form (her sat til en ellipse).

Da vi jo har et forhåndskendskab til, hvor stor sandsynlighed, der er for, at der er en kilde på de forskellige dele af arealet, kan vi reducere dette antal væsentligt. Indenfor selve tankgravsarealet er sandsynligheden for eksistensen af en kilde 85 %. Det nødvendige antal boringer indenfor dette areal, bliver derfor:

$$n_1 = 0,95/0,85 \times 65/2500 \times 48 \cong 1$$

Inden for et areal, der ligger omkring tankgraven og i en afstand på op til 8 m fra denne, vil det nødvendige boringsantal (såfremt sandsynligheden er lige stor i alle retninger) være:

$$n_2 = 0,5/0,85 \times 400/2500 \times 48 \cong 5$$

Såfremt man på forhånd kan reducere det sandsynlige afstrømningsområde til ca. $\frac{1}{4}$ af ovennævnte område, kan boringsantallet reduceres tilsvarende:

$$n_3 = 0,5/0,85 \times 0,25 \times 400/2500 \times 48 = 1-2.$$

En anskueliggørelse af hvorledes et forhåndskendskab til sandsynligheden for, at der findes en kilde på forskellige delområder af en grund, influerer på det nødvendige antal boringer er vist i fig. 3.A.

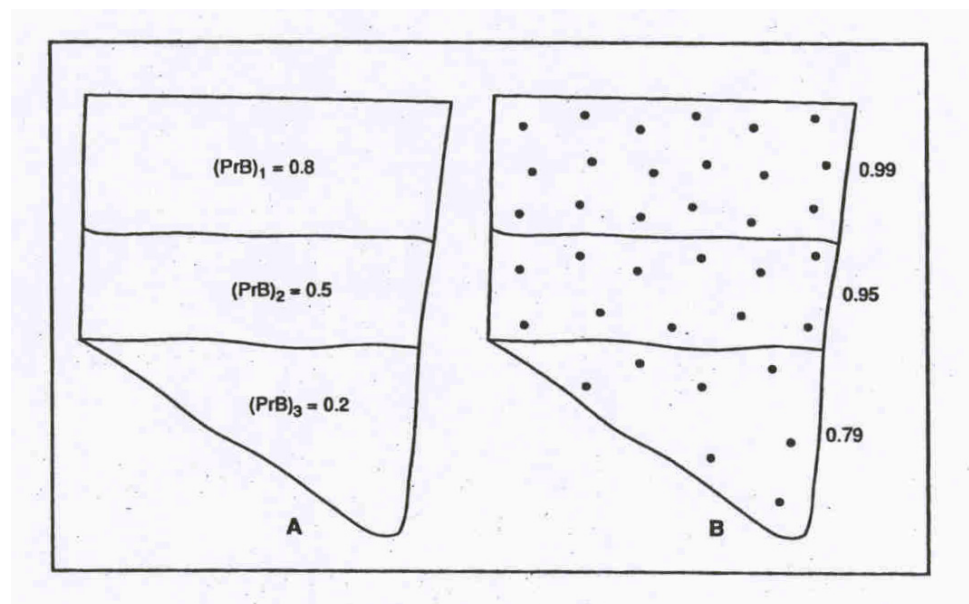


Fig. 3.A.

Sammenhæng mellem forhåndssandsynligheden (PrB) for at der findes en forureningskilde på en del af en grund, og det nødvendige antal boringer for at finde denne kilde.

Såfremt man har eftersøgt en kilde med det nødvendige antal boringer for at opnå en vis sandsynlighed for at finde den, og man ikke har fundet en kilde, kan man ved hjælp af fig. 3.B beregne sandsynligheden for, at der alligevel er en. X-aksen angiver forhåndssandsynligheden for, at der er en kilde. Y-aksen angiver den ønskede sandsynlighed, for at finde kilden, og $1 \div$ tallet på kurven angiver sandsynligheden for, at der alligevel er en kilde.

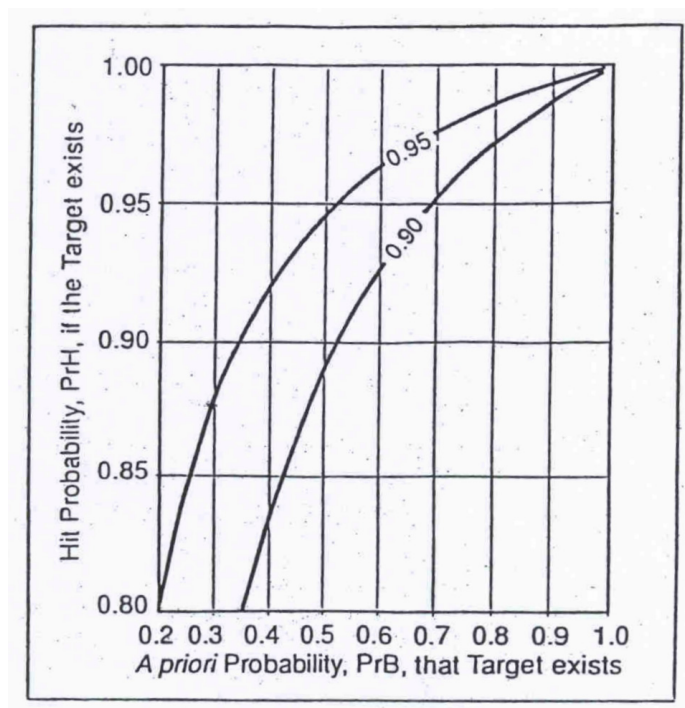


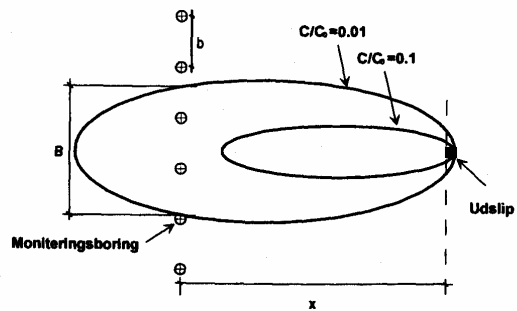
Fig. 3.B.

Sandsynligheden for at der alligevel er en kilde, såfremt den ikke er fundet. Se teksten for kurvens enkeltparametre.

Boringer i og uden for skel

Ved fastlæggelse af det nødvendige antal boringer i skel kan anvendes de i fig. 3.C anvendte sammenhænge mellem:

- den ønskede sandsynlighed for at finde fanen (givet at man ved i hvilken retning, den kan tænkes at befinde sig),
- bredden af fanen i en given afstand fra kilden,
- afstanden mellem boringerne og
- forholdet mellem den koncentration, der er i kanten af fanen (= den mindste koncentration, man ønsker at registrere, f.eks. grænseværdien eller detektionsgrænsen) og koncentrationen i kilden.



Sporingsandsynligheden er defineret som;

$$p(x, C/C_0) = \frac{B(x, C/C_0)}{b}$$

hvor

- B bredden af forureningsfanen i afstanden x fra udslip og for en given sporingsgrænse
- b afstanden mellem moniteringsboringerne
- x afstanden fra udslip til moniteringsboringerne
- C/C₀ sporingsgrænsen, hvor C₀ er udslipskoncentrationen

Beregningseksempel

$$p(10m, 0,001) = \frac{B(10m, 0,001)}{b} = \frac{12m}{5m} = 240\%$$

For det viste beregningseksempel gælder der således, at man i en afstand af 10 m fra udslip og med en boringsafstand på 5 m med garanti ville kunne måle et udslip i to borer, under forudsætning af en sporingsgrænse på 0,001.

Fig. 3C.
Beregning af springssandsynligheden., fra (AVJ, 1999).

En grafisk fremstilling på et eksempel på denne sammenhæng er givet i fig. 3D.

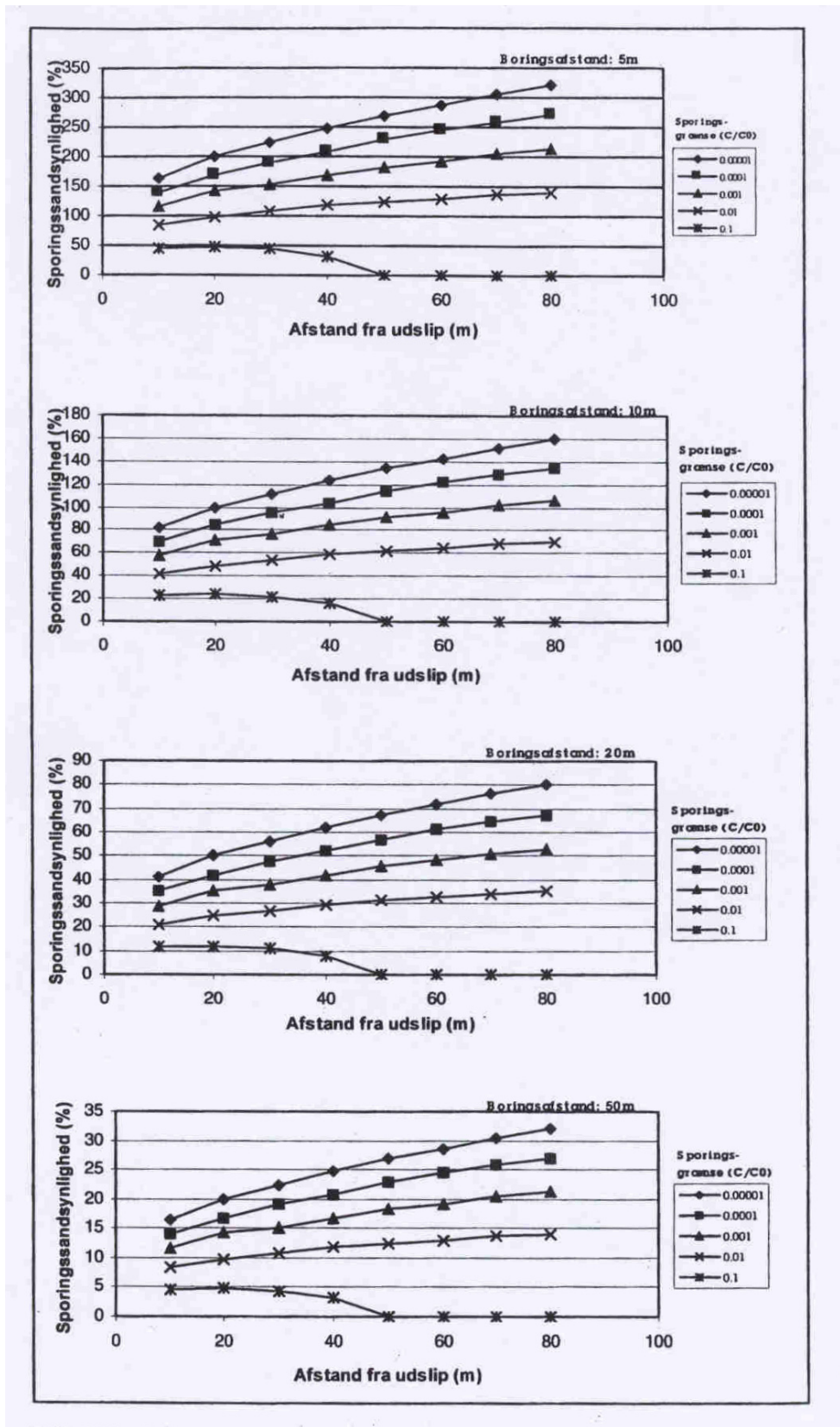


Fig. 3D. Sammenhæng mellem springssandsynlighed, springgrænse (= kontrast), afstand fra kilden og afstanden mellem borerne i fanens tværsnit, fra AVJ (1999).

Sammenhæng mellem økonomi og sporings sandsynlighed

Den ønskede sandsynlighed kan selvfølgelig øges ved at etablere flere boringer, men dette vil også øge den tilknyttede økonomi. Programmet "Visual Sample Planner", som er udarbejdet af Pacific Northwest National Laboratory i Washington, USA, <http://dgo.pnl.gov/>, har en facilitet, hvor man kan regne på sammenhænge mellem pris og undersøgelsessikkerhed.