

# Chloroform i grundvand

En kogebog for vandværker for indsatsen  
overfor chloroform fra naturlige kilder

Christian Grøn

DHI Vand, Miljø og Sundhed

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

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for By- og Landskabsstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at By- og Landskabsstyrelsen 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 CHLOROFORM SOM DRILLEKVVANDSPROBLEM	11
2 CHLOROFORM	13
2.1 KEMISKE EGENSKABER	13
2.2 MILJØMÆSSIGE EGENSKABER	14
2.3 SUNDHEDSMÆSSIGE EGENSKABER	15
2.4 KILDER TIL CHLOROFORM	15
2.4.1 <i>Chloroform som forurening</i>	<b>16</b>
2.4.2 <i>Chlorbehandling</i>	<b>17</b>
2.4.3 <i>Chloroform fra atmosfæren</i>	<b>18</b>
2.4.4 <i>Naturlig produktion af chloroform</i>	<b>19</b>
2.4.5 <i>Naturlig chloroform i grundvandet</i>	<b>21</b>
3 KVALITETSKRAV TIL CHLOROFORM I DRILLEKVAND	24
4 UDREDNING AF FORURENINGSBESTEMTE OG NATURLIGE KILDER	27
5 FORURENINGSBESTEMT CHLOROFORM I GRUNDEVAND	29
5.1 FOREKOMST AF ANDRE FORURENINGSKOMponenter I RÅVANDET	30
5.1.1 <i>Begrundelse for analyseprogram</i>	<b>30</b>
5.1.2 <i>Beskrivelse af analyseudredning</i>	<b>32</b>
5.1.3 <i>Beslutningsregel for forekomst af andre forureningskomponenter</i>	<b>33</b>
5.2 FORURENINGSKILDER I OPLANDET	33
5.2.1 <i>Afgrænsning af indvindingens opland</i>	<b>33</b>
5.2.2 <i>Kilder til forureningsbestemt chloroform</i>	<b>35</b>
5.2.3 <i>Information om kilder til forureningsbestemt chloroform</i>	<b>35</b>
5.2.4 <i>Beslutningsregel for forureningskilder i oplandet</i>	<b>37</b>
5.3 SUPPLERENDE UDREDNING AF FORURENINGSBESTEMT CHLOROFORM	37
5.3.1 <i>Analyser for stabile isotoper i chloroform</i>	<b>37</b>
5.3.2 <i>Beslutningsregel for supplerende udredning af forureningsbestemt chloroform</i>	<b>39</b>
6 NATURLIGE KILDER TIL CHLOROFORM I GRUNDEVAND	41
6.1 GEOLOGI OG GENEREL GRUNDEVANDSKEMI	42
6.2 EFFEKT AF REDOXFORHOLD	43
6.3 AREALANVENDELSE OG NATURLIG CHLOROFORM PRODUKTION	43

6.4	BESLUTNINGSREGEL FOR VURDERING AF NATURLIG KILDE TIL CHLOROFORM	45
6.5	SUPPLERENDE UDREDNING AF NATURLIG KILDE TIL CHLOROFORM	46
6.5.1	<b>Analyser for stabile isotoper i chloroform fra grundvandet</b>	<b>47</b>
6.5.2	<b>Koncentrationsprofil af chloroform i umættet zone</b>	<b>47</b>
6.5.3	<b>Måling af jordbundens chloroform produktion</b>	<b>49</b>
6.5.4	<b>Chloroform produktion og jordbundskemi</b>	<b>51</b>
6.6	BESLUTNINGSREGEL FOR SUPPLERENDE UDREDNING AF NATURLIG KILDE TIL CHLOROFORM	53
7	DOKUMENTATION AF NATURLIG KILDE TIL CHLOROFORM I GRUNDVANDET	55
8	OVERVÅGNING AF UDVIKLING I CHLOROFORM KONCENTRATION	57
9	RENSNING AF RÅVAND FOR CHLOROFORM	59
9.1	BEHANDLINGSPRINCIPPER	60
9.2	BELUFTNING OG STRIPNING	61
9.2.1	<b>Almindelig dansk vandbehandling</b>	<b>61</b>
9.2.2	<b>Stripning</b>	<b>62</b>
9.3	AKTIV KUL FILTRERING	64
9.4	GODKENDELSE AF VANDBEHANDLING FOR CHLOROFORM	64
9.5	ØKONOMI FOR BEHANDLINGSMETODER	65
9.6	VALG AF BEHANDLINGSMETODE	66
10	ORDLISTE	67
11	REFERENCER	69
12	SUPPLERENDE LÆSNING	75

## **Bilag A**

Data og baggrundsoplysninger

## **Bilag B**

Data og metoder benyttet til figurer og tabeller

# Forord

Miljøministeriet har med drikkevandsbekendtgørelsen fra 2006 lempet kvalitetskravet til drikkevand for indhold af chloroform. Kravet er sat op fra 1 til 10 µg/L, hvis kilden til chloroform er naturlig. Miljøministeriets beslutning skyldes, at en række undersøgelser har vist, at kloroform i grundvandet kan skyldes naturlig produktion af stoffet under nåleskov i oplandet.

Lempelsen af grænseværdien for chloroform gælder som nævnt kun, når chloroform stammer fra en naturlig kilde. Miljøstyrelsen udsender derfor denne kagebog som en praktisk hjælp til de vandværker, der indvinder grundvand muligvis påvirket af naturlige kilder til chloroform.

Kagebogen er baseret på resultaterne af projektet CHLONAT udført for Miljøstyrelsen af GEUS, Rambøll, DHI og Linköping Universitet, suppleret med oplysninger fra andre kilder i nødvendigt omfang.

Kagebogen er udarbejdet for Miljøstyrelsen af Christian Grøn, DHI Vand • Miljø • Sundhed, og arbejdet har været fulgt af en følgegruppe med deltagelse af:

Susanne Rasmussen, Miljøstyrelsen  
Ann-Katrin Pedersen, Københavns Energi  
Solveg Nilsson, Foreningen af Vandværker i Danmark  
Palle Fløe Holm, Energi Viborg  
Jan Pedersen, Thisted Kommune  
Jeppe Bender Jørgensen, Miljøcenter Aalborg  
Ole Stig Jacobsen, GEUS

De første 3 kapitler giver baggrunden for chloroform som drikkevandsproblem og samtidig som et stof, der findes naturligt i vore omgivelser, og dermed også i grundvandet.

Kapitel 4 beskriver det overordnede forløb i de nødvendige udredninger af kilder til chloroform i et grundvandsmagasin i forhold til dokumentation af en naturlig oprindelse.

Kapitel 5 og 6 giver nærmere beskrivelser af indholdet i de enkelte udredninger og de tilknyttede beslutningsregler. Hvert kapitel indeholder først de nødvendige udredninger og derefter de supplerende udredninger, som kan blive nødvendige, hvis de nødvendige ikke giver fyldestgørende eller tilfredsstillende svar.

Kapitel 7 indeholder et forslag til disposition for dokumentation af naturlig oprindelse af grundvand i et grundvandsmagasin, der skal benyttes til indvinding af drikkevand.

Kapitel 8 og 9 giver nærmere beskrivelser af overvågning af en eventuel udvikling i chloroform indholdet i grundvand og drikkevand, samt af rensningsmulighederne for chloroform.

Kogebogen kan læses i sort hvid udskrift, men figurer er mere illustrative på skærmen eller i farveudskrift.

Kapitlerne indledes med en "hvad står der her boks" og afsluttes med en "hvad er budskabet boks".

Figurer og tabeller er som hovedregel udarbejdet som illustrationer uden detaljerede data, men med udgangspunkt i tidligere gennemførte undersøgelser, modelkørsler mv..

Baggrundsoplysninger, som f.eks. kemisk-fysiske data for chloroform, er samlet i Bilag A. Oplysninger om data, metoder og referencer benyttet til fremstilling af figurer og tabeller kan findes i Bilag B.

Referencerne til kogebogens tekniske indhold er angivet på sædvanlig vis i teksten og samlet til sidst i rapporten. Her er desuden givet nogle få forslag til supplerende læsning for den særligt interesserede.

En ordliste er til sidst givet, som giver mulighed for at slå tilbage efter nøgleord, hvor de forklares første gang.

# Sammenfatning og konklusioner

Chloroform i grundvand kan skyldes naturlige kilder, primært processer i jordbunden, eller forurening. Kravet for indhold af chloroform i drikkevand er 1 µg/L for forureningsbetinget chloroform og 10 µg/L for chloroform fra naturlige kilder.

Vandværker med 1-10 µg/L chloroform i det grundvand, der benyttes til drikkevandsfremstilling, har derfor brug for metoder til at vise kilden til chloroform i grundvandet.

Denne kogebog beskriver en trinvis metode til at undersøge, om chloroform i grundvandet er naturligt eller forureningsbetinget. Første trin er en afklaring af mulig forureningspåvirkning, mens andet trin er en afklaring af mulig naturlig kilde.

Supplerende indeholder kogebogen en hjælp til vurdering af mulighederne for at fjerne chloroform ved rensning.

Kogebogens princip er at nå så langt som muligt med eksisterende viden, samt at gennemføre supplerende undersøgelser i takt med behovet for yderligere viden og efter overvejelse af omkostningerne ved supplerende undersøgelser overfor andre indsatser.





# Summary and conclusions

Chloroform in groundwater can originate from natural processes in e.g. soil, or be caused by pollution. The Danish limit value for chloroform in drinking water is 1 µg/L for chloroform from pollution and 10 µg/L for chloroform from natural production.

Water works exploiting groundwater with 1-10 µg/L chloroform will accordingly need a methodology for demonstrating the source(s) of chloroform in their raw water.

This guidance document provides a tiered, research based methodology for investigation the source(s) of chloroform in groundwater. The first step is a series of investigations on potential sources of groundwater pollution, and the second step a series of investigations on natural chloroform sources.

Additionally, the document provides assistance in evaluating the perspectives of introducing additional treatment steps at the water works.

The basic principle of the guidance document has been to provide the basis for safe decisions, while requiring the information strictly needed only. When further investigations are required in response to a lack of needed knowledge and insufficient certainty of decision, analysis of the costs of these investigations against other measures is always suggested.



# 1 Chloroform som drikkevandsproblem

Chloroform er et chloreret organisk stof, der hører til gruppen af organiske opløsningsmidler, og tidligere blev benyttet i vidt omfang til industrielle formål. Chloroform dannes også ved chlor desinfektion af drikkevand. Der er sat grænseværdier for indholdet af chloroform i drikkevand, dels på grund af den sundhedsmæssige risiko ved at indtage store mængder af stoffer, dels fordi chlorerede organiske stoffer som sådan betragtes som indikatorer på forurening.

Med erkendelsen af, at chloroform også kan dannes naturligt i f.eks. skovbund, er der givet mulighed for at acceptere et højere indhold af chloroform i drikkevand hvis en naturlig og ikke forureningsbetinget oprindelse kan dokumenteres. Denne mulighed kan begrundes med, at selvom chloroforms sundhedsskadelige effekter er de samme uanset oprindelse, så er naturlig chloroform i grundvandet ikke en indikator på forurening.

Naturlig chloroform produktion kan særligt i nåleskove på kalkudvaskede sandede jorder give chloroform koncentrationer i grundvandet over det danske drikkevandskrav. Erkendelsen af dette er af betydning for vandværkernes planlægning af ny kildepladser og for samfundets indsats for skovrejsning som middel til "grundvandsdyrkning".

Chloroform i grundvandet kan altså være et væsentligt og dyrt drikkevandsproblem, men rigtigt håndteret kan gener og omkostninger minimeres.



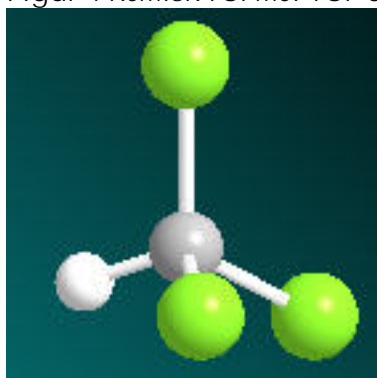
## 2 Chloroform

I dette kapitel gives en beskrivelse af stoffet chloroform, dets egenskaber og kilder til chloroform i grundvandet.

### 2.1 Kemiske egenskaber

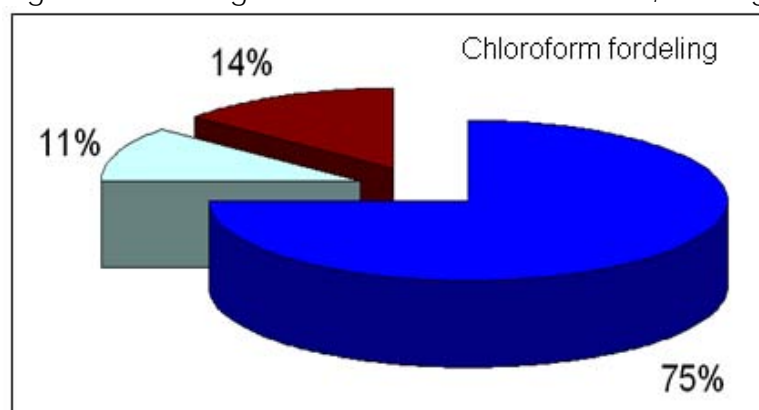
Chloroform er, som navnet siger, et chlorholdigt organisk stof med kemisk formel som vist i Figur 1 og sammensat af et kulstofatom (gråt), et brintatom (hvidt) og 3 chloratomer (grønne). Sammensætningen kan beskrives som  $\text{CHCl}_3$ , og kemisk kaldes stoffet trichlormethan.

Figur 1 Kemisk formel for chloroform



De almindelige fysisk kemiske egenskaber er vist i Tabel A, Bilag A for chloroform sammen med de tilsvarende egenskaber for vand og for et typisk benzinstof: benzen. Tabellens tal kan benyttes, hvis man vil beregne f.eks. transport af chloroform i et grundvandsmagasin, men er i øvrigt først og fremmest vist for at give et indtryk af stoffets egenskaber.

Figur 2 Fordeling af chloroform imellem vand, luft og sediment



Chloroform er et organisk opløsningsmiddel. Chloroform er ikke blandbart med vand, men vil danne en separat fase, hvis vand og chloroform hældes sammen. Da chloroform er tungere end vand, vil en chloroform fase ligge under vandet, mens f.eks. en benzen fase vil ligge ovenpå vandet. En del chloroform vil kunne opløses i vand. Chloroform er flygtigt stof, der let

fordamper fra både vand og jord. Chloroform bindes ikke særligt godt til jord, slam eller sediment. Figur 2 viser, at i en blanding af vand, luft og slam, vil hovedparten af chloroform befinde sig i vandet.

Chloroform er et flygtigt og vandopløseligt organisk stof, der i et almindeligt system af vand, luft og partikler primært vil findes opløst i vand. Chloroform vil dog kunne fordampe.

## 2.2 Miljømæssige egenskaber

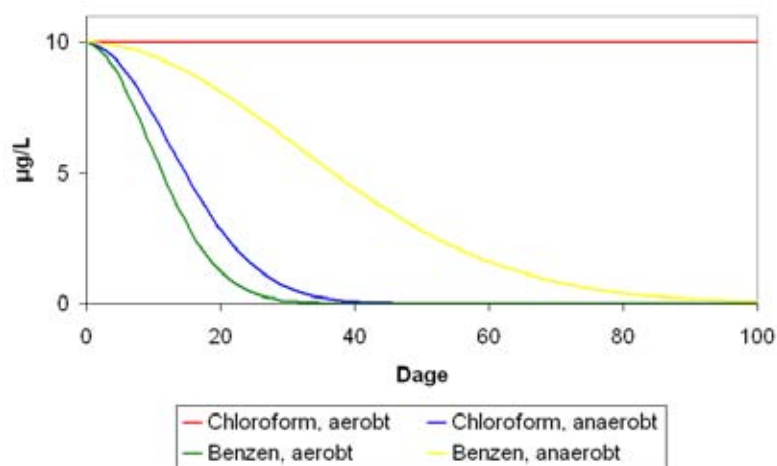
Den officielle klassifikation af miljøegenskaberne af chloroform angiver ikke særlige risici for vandmiljøet /1/. Chloroform hører til de såkaldte "prioriterede stoffer", som den Europæiske Union (EU) giver særlig opmærksomhed /2-4/, og begge stoffer er på Miljøstyrelsens liste over farlige stoffer /5/.

Tabel 1 Miljømæssige egenskaber af chloroform

	EU kvalitetskrav til fersk overfladevand	Dansk kvalitetskrav til fersk overfladevand	Miljøklassificeringer
Chloroform	2,5 µg/L	10 µg/L	Ingen

Der er sat grænser for indholdet af chloroform i overfladevand, se Tabel 1, som ligger på samme niveau som de højere koncentrationer af stoffet fundet i grundvand.

Figur 3 Nedbrydningsforløb for chloroform og til sammenligning for benzen



Chloroform nedbrydes langsomt under iltfrie (anaerobe) betingelser, se Figur 3, og meget langsomt eller slet ikke, hvor der er ilt tilstede (aerobe betingelser). Derimod nedbrydes benzen langsomt, hvor der er ilt tilstede, men meget langsomt under iltfrie betingelser.

Chloroform vil altså nedbrydes naturligt i et grundvandsmagasin uden ilt, men stort set ikke i et magasin med ilt. Nedbrydningshastigheden for chloroform uden ilt er af samme størrelsesorden som for en typisk benzinfurening (benzen) med ilt tilstede.

Chloroform er ikke særligt farligt for vandmiljøet, men det er på Miljøstyrelsens liste over farlige stoffer og på EU's liste over prioriterede stoffer. Grundvand med højt indhold af chloroform kan ikke uden videre

udledes i store mængder til vandløb og søer. Chloroform nedbrydes vanskeligt eller slet ikke, når der er ilt til stede, men lettere under iltfrie forhold.

### 2.3 Sundhedsmæssige egenskaber

Chloroform er som rent kemikalie et stof, der er klassificeret som sundhedsskadeligt /1/. Der er mistanke om risiko for kræft ved udsættelse for stoffet /1/. Produkter indeholdende chloroform skal færemærkes ned til et indhold på 1% chloroform i produktet. Risikoen for kræft ligger bag forslaget til grænseværdi for indhold af chloroform i drikkevand på 300 µg/L, som er fremsat af World Health Organization /6/. Der er tidligere beregnet en risiko for skader på lever og nyrer ved livslang indtagelse af drikkevand med ned til 33 µg/L /7/.

Figur 4 Koncentrationer af chloroform i produkter med krav om risikomærkning eller sundhedsbaseret grænseværdi i drikkevand

Lokal-irriterende										
Skadelig ved længere tids udsættelse										
Skadelig ved indtagelse										
Mistanke om kræft risiko										
Risiko for kræft ved indtagelse i drikkevand										
Ingen klassificeret risiko										
Koncentration	0,001 - 0,01 ppm	0,01 - 0,1 ppm	0,1 - 1 ppm	1 - 10 ppm	10 - 100 ppm	100 - 1000 ppm	0,1 - 1 %	1 - 10 %	10 - 100 %	

I Figur 4 er vist de koncentrationer af chloroform, hvor produkter skal mærkes med angivelse af risiko, samt WHO's grænseværdi for indhold i drikkevand. Bemærk, at koncentrationsskalaen er logaritmisk. F.eks. er WHO's grænseværdi (0,3 ppm = 300 µg/L) baseret på risiko for kræft 30 gange højere end figurens koncentration på 0,01 ppm (10 µg/L), og grænsen for deklARATION af kræft risiko i produkter er 1 million gange denne koncentration.

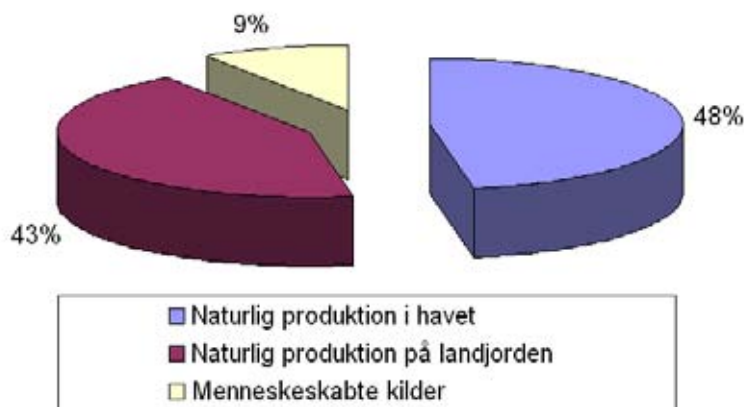
Chloroform udgør i høje koncentrationer en risiko for menneskers helbred, men chloroform er i de koncentrationer, der er set i ikke-forurenede grundvand, formodentlig uden sundhedsskadelige effekter.

### 2.4 Kilder til chloroform

De væsentligste kilder til chloroform i atmosfæren er naturlig produktion i havet og på landjorden /8/, se Figur 5, og dette beskriver rimeligt også den globale produktion af chloroform.

For chloroform i drikke- og grundvand er de væsentligste kilder punktforurening, chlorbehandling og den naturlige produktion i jordbunden.

Figur 5 Kilder til chloroform i atmosfæren



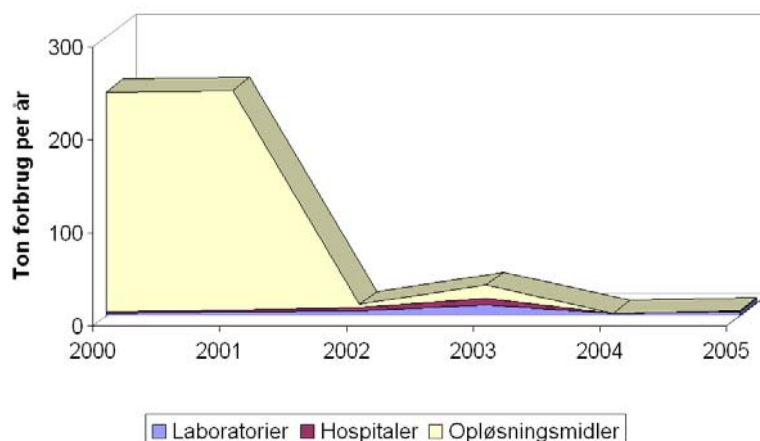
Chloroform dannes først og fremmest ved naturlige processer i havet og på landjorden, men der er også en betydelig industriel produktion.

#### 2.4.1 Chloroform som forurening

Industrielt fremstilles chloroform i Europa primært ved chlorering af methan, men i USA også ved hydrochlorering af methanol /9/. Råmaterialet til industrielt fremstillet chloroform er altså i udgangspunkt råolie eller naturgas.

Tidligere blev chloroform anvendt som bedøvelsesmiddel på hospitaler, hos læger mm, men også i produkter som tandpasta og hostemidler /10/. I dag anvendes chloroform som opløsningsmiddel og til fremstilling af andre kemikalier /10/, altså i laboratorier, kemisk industri, medicinalindustri, men også i fremstilling af pesticidprodukter /1;9/.

Figur 6 Forbrug i Danmark af chloroform fordelt på forskellige anvendelser



I Danmark benyttes chloroform i dag først og fremmest på laboratorier og hospitaler, se Figur 6, og forbruget er faldet siden 2001, hvor anvendelsen som opløsningsmiddel reduceredes væsentligt.

Som mulige forureninger på forurenede grunde er chloroform nævnt for følgende brancher:

- Garverier /11-13/
- Metalforarbejdende virksomheder /12;14/



- Jern- og metalstøberier /15/
- Metaliseringsvirksomheder (f.eks. forchromnings- og galvaniseringsanstalter) /16/
- Transformatorstationer /17/
- Renserier (/18/, ikke nævnt for grundvand)
- Autoværksteder (/19/, ikke nævnt for grundvand)

For disse brancher er chloroform særligt benyttet som affedtningsmiddel.

Derudover er chlorerede opløsningsmidler nævnt som mulige forureninger af grundvandet for en række brancher, uden at chloroform specifikt er nævnt.

Endelig skal nævnes, at chloroform hyppigt findes i perkolat fra lossepladser /20;21/.

Der er først og fremmest risiko for at finde chloroform som forurening i grundvandet i nærheden af kemisk og farmaceutisk industri, af virksomheder med behov for affedtning af f.eks. metalemner, samt ved losse- og fyldpladser, hvor affald fra denne type virksomheder, samt muligvis hospitalsaffald, kan være deponeret. Risikoen er størst ved aktiviteter, der har været i gang før 2001.

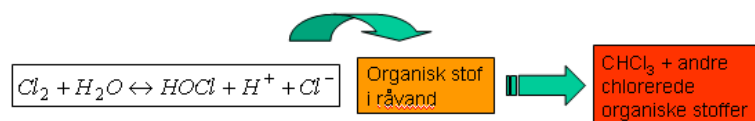
#### 2.4.2 Chlorbehandling

Chlor bruges til desinfektion af drikke-, spilde-, køle- og svømmebadsvand, samt til blegning, f.eks. under fremstilling af papirmasse eller i rengørings- og maskinopvaskemidler.

Uanset anvendelse virker chlor ved delvis nedbrydning af organisk stof. Chlorbehandling kan foretages ved tilsætning af chlogas, af fast hypochlorit eller af en opløsning af hypochlorit, men de kemiske reaktioner er nogenlunde de samme.

Ved chloreringen dannes dels kuldioxid, vand og chlorid, dels nogle såkaldte chloreringsbiprodukter, som er ikke helt nedbrudt organisk stof, se Figur 7.

Figur 7 Dannelsen af chloroform ved chlorbehandling af vand med chlogas



Chloroform er et af disse chloreringsbiprodukter. Foruden chloroform dannes i mindre omfang andre såkaldte trihalomethaner: dichlorbrommethan, chlordibrommethan og bromoform, samt en række mere komplicerede chlorholdige organiske stoffer som for eksempel chlorerede organiske syrer og fenoler. En oversigt over dannelsen af chloreringsbiprodukter kan findes f.eks. i /22/.

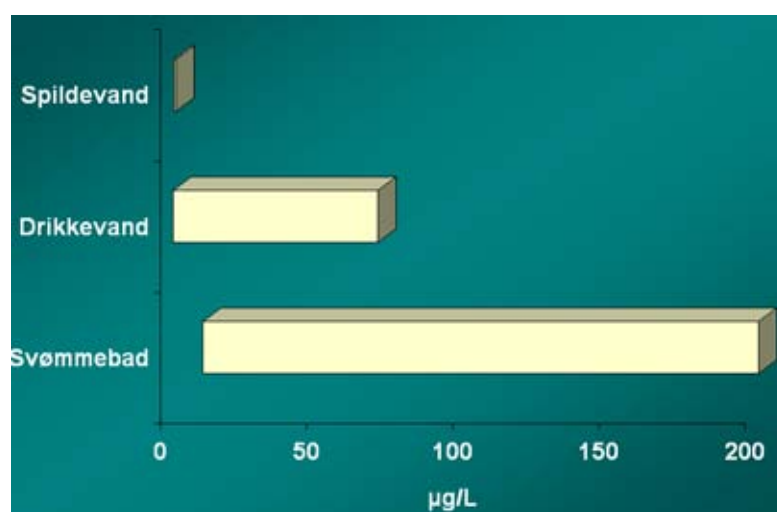
Ved desinfektion af drikkevand er man i de senere år gradvist gået over til at bruge chloramin, fordi chloraminering danner mindre chloreringsbiprodukter, herunder chloroform. Det skal bemærkes, at chlorering og chloraminering i Danmark kun benyttes på enkelte vandværker, hvor overfladevand benyttes helt eller delvist som råvand.

I spildevand findes som regel lave koncentrationer af chloroform, se /23/, der formodentlig skyldes brug af chlorholdige vaske, opvaske og rengøringsmidler i husholdningerne. Der er i udlandet fundet højere koncentrationer af chloroform i spildevand (se f.eks. /24/, men dette kan i hvert tilfælde delvis forklares af det relativt høje indhold af chloroform i chlorbehandlet drikkevand, der jo ender som spildevand.

Industriell brug af chlorbehandling ses i Danmark først og fremmest i forbindelse med industrivaskerier, men også ved industrier med forarbejdning og genbrug af papirmasse.

Eksempler på koncentrationer af chloroform i chlorbehandlet vand er vist i Figur 8. I Danmark må der højst være 100 µg chloroform/L i vand i svømmebade /25/.

Figur 8 Eksempler på chloroform koncentrationer i chlorbehandlet vand



Udbredt forekomst af chloroform i grundvand har været tilskrevet tilbageløb af chloreret drikkevand, udsivning af chloreret drikkevand fra vandforsyningsledninger og udsivning af spildevand indeholdende chloroform, se f.eks. referencer i /8/. Der er endvidere fundet eksempler på, at chlorering af indvindingsboringer med henblik på desinfektion har givet indhold af chloroform i senere oppumpet vand på 1-2 µg/L.

I Danmark forventes først og fremmest risiko for påvirkning af grundvandet fra chlorbehandling via udsivning fra svømmebade, udsivning af spildevand fra kloaker fra industrivaskerier og papirindustri, samt i forbindelse med chlor desinfektion af boringer.

#### 2.4.3 Chloroform fra atmosfæren

De omtalte naturlige og industrielle kilder til chloroform i atmosfæren, se Afsnit 2.4, betyder, at der som baggrund er lave koncentrationer af chloroform i luften, også udenfor områder med punktkilder.

Der findes ikke en kortlægning af chloroform i luften i Danmark, men i forbindelse med dette projekt er fundet 0,00001-0,0002 µg/L i luften i Viborg Hedeplantage /26;27/. Samme niveau er fundet tidligere i luftprøver udtaget over havet udenfor industriel påvirkning, mens niveauet i Sydtykland blev

fundet 3-6 gange højere /28/. Koncentrationer på 0,0002-0,0006 µg/L chloroform er ligeledes tidligere fundet i luften både på landet og i byer i Tyskland /29;30/. Der er oplyst koncentrationer i byområder op til cirka 0,01 µg/L, mens der i områder med en identificeret punktkilde er oplyst koncentrationer på op til 0,1 µg/L /9/.

I Tabel 2 er vist de koncentrationer af chloroform i grundvandet, som de nævnte luftkoncentrationer ville give anledning til, hvis der ikke var andre kilder.

Tabel 2 Chloroform koncentrationer i grundvandet beregnet ud fra luftkoncentrationer for forskellig arealanvendelse

Arealanvendelse	Luftkoncentration	Grundvandskoncentration
Natur	0,00005-0,0002 µg/L	0,0005-0,003 µg/L
By	0,0002-0,01 µg/L	0,003-0,1 µg/L
Punktkilder	0,01-0,1 µg/L	0,1-1 µg/L

Bidraget til grundvandets indhold af chloroform fra den omgivende luft vil altså under de fleste omstændigheder være mindre end 0,1 µg/L. I områder med en punktkilde til luftforurening med chloroform er der fundet så høje luftkoncentrationer, at det afledede niveau i grundvand kunne give anledning til bekymring.

Blandt punktkilderne kan nævnes emission fra virksomheder, der benytter chloroform, samt afbrænding af både chloroformholdigt affald, dvs. sige i dag primært hospitalsaffald, og af almindeligt affald. Der findes ikke dokumentation for betydningen af afbrænding som kilde til luftforurening med chloroform, men tilsyneladende dannes chloroform ved selve afbrændingen af bestemte typer af affald, f.eks. glasfiberaffald, og i den efterfølgende våde røggasrensning, men de oplyste koncentrationer i afkastet varierer fra 0,002 µg/L til 0,5 µg/L /31-33/.

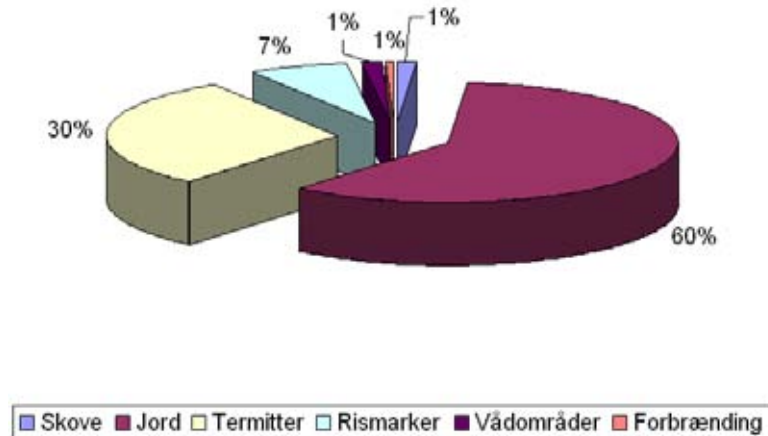
Chloroform findes i atmosfæren, men tages den nuværende begrænsede danske brug af chloroform i betragtning, må en luftforurening, der vil give væsentlige chloroform koncentrationer i grundvandet, anses for at være usandsynlig.

#### 2.4.4 Naturlig produktion af chloroform

I havet foregår en naturlig produktion af chloroform, se Figur 5 nogenlunde lige så stor som produktionen på land. I havet dannes chloroform formodentlig primært af alger /8/, men produktionen synes ikke at være så stor, at luften over havet har et højt indhold af chloroform, se Afsnit 2.4.3. Der er derfor ikke grund til at forvente, at kystnære områder vil have særligt høje koncentrationer af chloroform i grundvandet på grund af direkte påvirkning med chloroform.

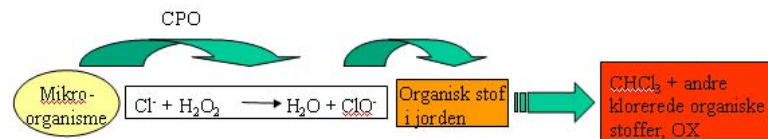
Produktionen på land foregår, for danske forhold, først og fremmest i jordbunden, se Figur 9.

Figur 9 Naturlige kilder til chloroform i atmosfæren på landjorden



Chloroform produktionen i jorden skyldes, med den viden vi har i dag, enzymer, der udskilles af mikroorganismer og svampe i jordbunden, se Figur 10. Enzymerne, der kaldes chlorperoxidaser, kan ud fra nedbørens chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) og luftens brintperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) danne hypochlorit. Hypochlorit er et chloreringsreagens, der oxiderer det organiske stof i jorden, ved processer der ligner chlorbehandling af vand, se Figur 7. Ved oxidationen af organisk stof dannes blandt andet chloroform, men også andre chlorerede organiske stoffer (OX) som for eksempel trichloreddikesyre, chlorfenoler, chlorerede benzosyrer og chlorerede humusstoffer.

Figur 10 Dannelsen af chloroform ved enzymatisk nedbrydning af organisk stof i jorden



Chlorperoxidaserne (CPO) findes i f.eks. nåleskovbund først og fremmest i de øverste lag af delvist omdannede nåle /34/.

I figur 11 er vist et eksempel på en skovbund i granskov, hvor svampenes frugtleger ses tydeligt, men dette behøver ikke være tilfældet i en chlorperoxidaseaktiv jordbund. Dels udskilles chlorperoxidaser af svampenes underjordiske mycelier, der ofte ses som hvide tråde i jorden, dels kan chlorperoxidaser også udskilles af svampe, der ikke kan ses med det blotte øje. Der er også fundet svampe, der producerede organiske chlorforbindelser under nedbrydning af birketræ /35/.

Figur 11 Skovbund i granskov med tæt bevoksning med svampe



Der er foreslået flere forklaringer på, at svampe og mikroorganismer udskiller chlorperoxidaser til jorden. En forklaring er, at chlorperoxidaserne direkte kan opløse nålelagets organiske stof og derved give adgang til næringsstoffer, som ellers er svært tilgængelige. Alternative forklaringer er, at hypochlorit bruges til at bekæmpe bakterier i jorden, som konkurrerer om næringsstofferne, eller at hypochlorit angriber nålenes strukturstoffer (lignin), således at svampe og mikroorganismer som et led i forrådnelses- og nedbrydningsprocesserne kan få lettere adgang til at nedbryde strukturen af for eksempel grannåle og træ.

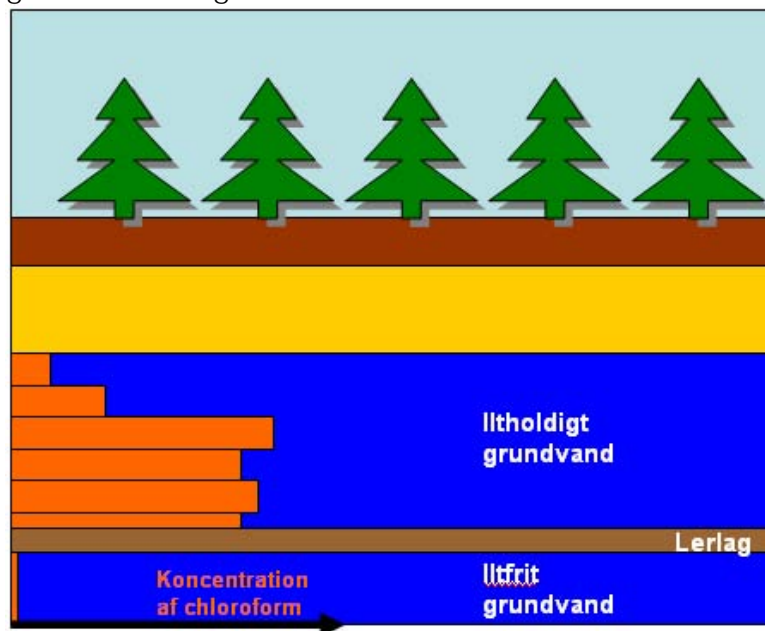
Dannelsen af chloroform ser ud til at være et led i det økologiske kredsløb i skovbunden, hvor processen er en del af det organiske stofs omsætning, mens dannelsen af chloroform formodentlig er en "utilsigtet" sideeffekt.

#### 2.4.5 Naturlig chloroform i grundvandet

Chloroform dannet i jordlagene vil transporteres til grundvandet opløst i infiltrerende regnvand og ved diffusion igennem den umættede zone. Chloroform vil også transporteres op i luften ved diffusion. I grundvandet vil chloroform opløses/fordeles og transporteres ned i de dybere lag ved diffusion og nedadrettet vandbevægelse.

En undersøgelse af forekomsten af chloroform i et grundvandsmagasin i hedesletteaflejringer under Klosterhede Plantage viste, at indholdet af chloroform var 0,1-1  $\mu\text{g/L}$  lige under grundvandsspejlet, for så at stige til 1-2  $\mu\text{g/L}$  nogle meter nede i magasinet, se /36/.

Figur 12 Koncentrationer af chloroform i et terrænnært grundvandsmagasin



Ved mere komplicerede strømningsforhold for grundvandet, som det f.eks. er set i Viborg Hedeplantage /27/, er sammenhængen mindre tydelig.

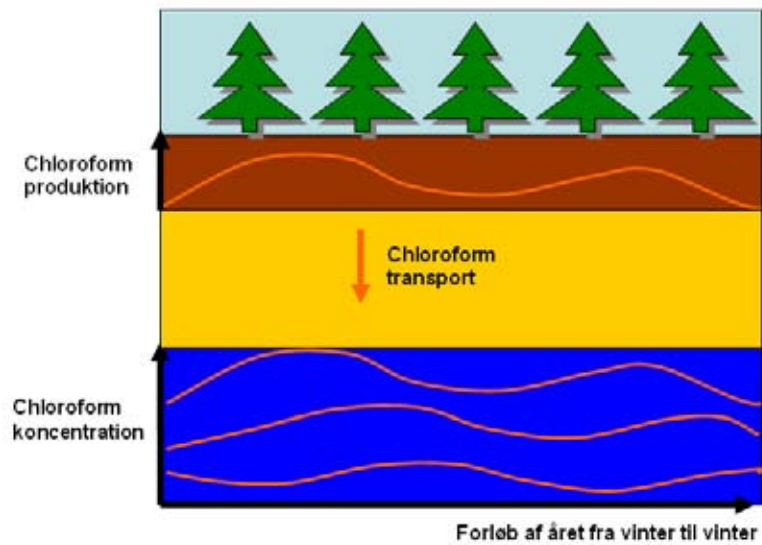
Datering af grundvandets alder ved analyse for freon viste ikke en klar sammenhæng imellem grundvandsalder og chloroform koncentration, hverken i Viborg Hedeplantage eller i Tved Plantage /27/.

Indholdet af chloroform i terrænnært grundvand varierer betydeligt over året, og op til faktor 5 forskel over 2 måneder er set for indholdet i vand fra samme boring /27/.

Variationen skyldes formodentlig, at chloroform produceres naturligt af mikroorganismer og svampe, der er mest aktive ved kombineret høj temperatur og jordfugtighed /36;37/, dvs. om foråret og om efteråret, se Figur 13. Figuren viser chloroform produktion og transport i den umættede zone (brune farver) i den biologisk aktive periode, samt årstidsvariation af chloroform koncentrationen i poreluften og i grundvandet (blå farve) i forskellige dybder.

Sæsonvariationen i grundvandets chloroform (røde linier i grundvandsdelen af Figur 13) koncentration vil altså mest ligne variationen i jordbundens produktion (rød linie i den øverste umættede del af (Figur 13) i den aller-øverste del af grundvandet. Længere nede vil sæsonvariationen gradvist udjævnes på grund af diffusion og dispersion, og variationsmønstret vil forskydes i tid på grund af grundvandets lodrette transporttid og den deraf kommende forsinkelse.

Figur 13 Principskitse for produktion af transport i skovbund, transport til grundvandet og variation i produktion og transport over året



Naturlige processer i jordbunden kan producere chloroform, der kan transporteres ned til grundvandet og dermed give et naturligt indhold af chloroform. Chloroform fra naturlige kilder vil i reglen vise de højeste koncentrationer i de øverste meter af grundvandsmagasinet. Den naturlige chloroform produktion i jordbunden er størst om foråret og efteråret. Variationen kan også ses i grundvandet, men mest i den allerøverste del af magasinet.

## 3 Kvalitetskrav til chloroform i drikkevand

I dette kapitel beskrives kravene til indhold af chloroform i drikkevand i Danmark, kontrollen med chloroform i råvand og drikkevand og reglerne for naturlig eller forureningsbestemt chloroform i drikkevandet.

Den danske bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg /38/ stiller krav om, at indholdet af chloroform i drikkevand ved alle kontrolpunkter (afgang vandværk, indgang ejendom og forbrugers taphane) ikke må overstige 1 µg/L. Det bemærkes dog, at hvis indholdet af chloroform i råvandet er større end 1 µg/L, skal det udredes, om kilden er naturlig eller forureningsbestemt. Hvis indholdet er naturligt, kan der tillades en højere værdi, dog maksimalt 10 µg/L. Endelig skal indholdet af chloroform og andre flygtige, organiske chlorforbindelser (dichlormethan, dichlorethener, 1,2-dichlorethan, trichlorethen, tetrachlorethen, trichlorethener og tetrachlorethener) samlet være under 3 µg/L.

Drikkevandkvalitetskravet på 1 µg/L for chloroform uanset kilde er begrundet i ønsket om at sikre drikkevand, der ikke er forurenat. Kravet på 10 µg/L for chloroform fra naturlige kilder er begrundet i det erfaringsbestemte niveau for indhold af chloroform i grundvandet stammende alene fra naturlige kilder.

Indgår chlorbehandling som en del af vandbehandlingen, tillades op til 25 µg/L af summen af trihalomethaner ved alle kontrolpunkter. Trihalomethaner omfatter foruden chloroform også dichlorbrommethan, chlordibrommethan og tribrommethan, men chloroform dannes som hovedregel i højest koncentration ved almindelig chlorbehandling af drikkevand, se Afsnit 2.4.2. Der er samtidig krav om at foretage chlorbehandling således, at trihalomethan indholdet er lavest muligt. Dermed vil dette kvalitetskrav i Danmark kun finde anvendelse, hvor der på grund af råvandets kvalitet er behov for chlorbehandling til desinfektion og fjernelse af organisk stof, dvs. for overfladevand.

Der skal foretages kontrol af indhold af chloroform på vandværket med en hyppighed, der afhænger af den producerede vandmængde, se "Kontrol" i Tabel 3. Hvis der er fundet chloroform på et stabilt niveau væsentligt under kvalitetskravet på 1 µg/L, kan kontrolhyppigheden nedsættes, se reduceret kontrol i Tabel 3.

Hvis der er fundet kilder til forurening med chloroform, skal desuden foretages boringskontrol med den hyppighed, der er givet i Tabel 3.



Tabel 3 Hyppighed af kontrol med indhold af chloroform i drikkevand

Produceret vandmængde m <sup>3</sup> pr. år	Undersøgelser pr. år		
	Kontrol med organiske mikroforurenin ger	Reduceret kontrol med organiske mikroforurenin ger	Boringskontrol med organiske mikroforurenin ger
3.000-10.000	1/2	1/4	1/5
10.000-35.000	1/2	1/4	1/5
35.000-350.000	1	1/2	1/4
350.000-1.500.000	2	1	1/4
1.500.000-2.660.000	3	3/2	1/3
2.660.000-3.500.000	4	2	1/3
3.500.000-7.000.000	5	5/2	1/3
7.000.000-10.500.000	6	3	1/3
10.500.000-14.000.000	7	7/2	1/3

Bekendtgørelsens krav om udredning af naturlige eller forureningsbestemte kilder til chloroform i drikkevand på niveau 1-10 µg/L skal ikke forstås som et krav om dispensation fra vandkvalitetskravet, men som et krav om indsendelse af tilstrækkelig dokumentation for udredningen. Denne kagebog giver forslag til, hvordan en tilstrækkelig udredning kan foretages og dokumenteres. Forløbet i udredningen er skitseret i Kapitel 4, mens de enkelte trin er nærmere begrundet og beskrevet i de efterfølgende kapitler 5 og 6.

Dokumentationen indsendes af vandværket til kommunalbestyrelsen som myndighed for vandforsyningssystemer, som skal vurdere og godkende dokumentationen, samt meddele vandværket resultatet heraf. Da godkendelsen ikke er en dispensation, gælder reglen om 3-årig maksimal varighed ikke. Det foreslås dog, at kommunalbestyrelsen og vandværket foretager en periodisk revurdering af, om grundlaget for godkendelsen stadig er gyldigt, for eksempel hvert 3. til 5. år afhængig af de lokale forhold.

Overskrides vandkvalitetskravet for chloroform fra naturlige kilder i drikkevandet på 10 µg/L, kan der søges dispensation efter de sædvanlige regler /38/ i op til 3 år med henblik på afhjælpning af problemet.

Vandkvalitetskravet for chloroform i drikkevand er 1 µg/L generelt, men 10 µg/L for chloroform af dokumenteret naturlig oprindelse. Indholdet af chloroform i drikkevand skal kontrolleres regelmæssigt.



## 4 Udredning af forureningsbestemte og naturlige kilder

I dette kapitel gives forslag til, hvordan udredning og dokumentation af naturlig eller forureningsbestemte kilder til chloroform i grundvand, råvand eller drikkevand kan tilrettelægges.

Kravet om udredning og dokumentation for naturlige og forureningsbestemte kilder til chloroform i grundvandet aktiveres, når drikkevandet overskrider 1  $\mu\text{g/L}$  i ét eller flere af kontrolpunkterne, se Kapitel 3.

Hvis der findes chloroform i grundvand, råvand eller drikkevand i intervallet 0,1-1  $\mu\text{g/L}$ , kan der opstå bekymring for, om vandkvalitetskravet på langt sigt kan blive svært at overholde. Det kan i den situation foreslås at følge indholdet af chloroform i en særligt udsat boring eller i råvandet løbende, for eksempel ved hjælp af fremgangsmåden beskrevet i Kapitel 8.

Analyse for chloroform i drikkevand foretages sædvanligvis med en detektionsgrænse på 0,02  $\mu\text{g/L}$ , se Afsnit 5.1.2. For chloroform i grundvand i intervallet 0,02-0,1  $\mu\text{g/L}$  kan det ikke afvises, at kilden kan være luftens generelle indhold af chloroform, se Afsnit 2.4.3. Det foreslås derfor at benytte 0,1  $\mu\text{g/L}$  som en bagatelgrænse for chloroform i grundvand og drikkevand.

Hvis indholdet af chloroform i drikkevandet i ét eller flere kontrolpunkter overskrider 10  $\mu\text{g/L}$ , kan en udredning af naturlige eller forureningsbestemte kilder være en hjælp, hvis problemet søges afhjulpet ved vandbehandling. For chloroform fra naturlige kilder vil rensningsmålet være 10  $\mu\text{g/L}$ , mens det for forureningsbestemt chloroform vil være 1  $\mu\text{g/L}$ , se Kapitel 9.




Udredning af naturlige eller forureningsbestemte kilder foreslås at foregå efter en trinvis strategi for at nå en beslutning om, hvordan overskridelser bedst angribes:

- Udredning af risiko for forureningsbestemt chloroform
- Udredning af, om en naturlig kilde er sandsynlig

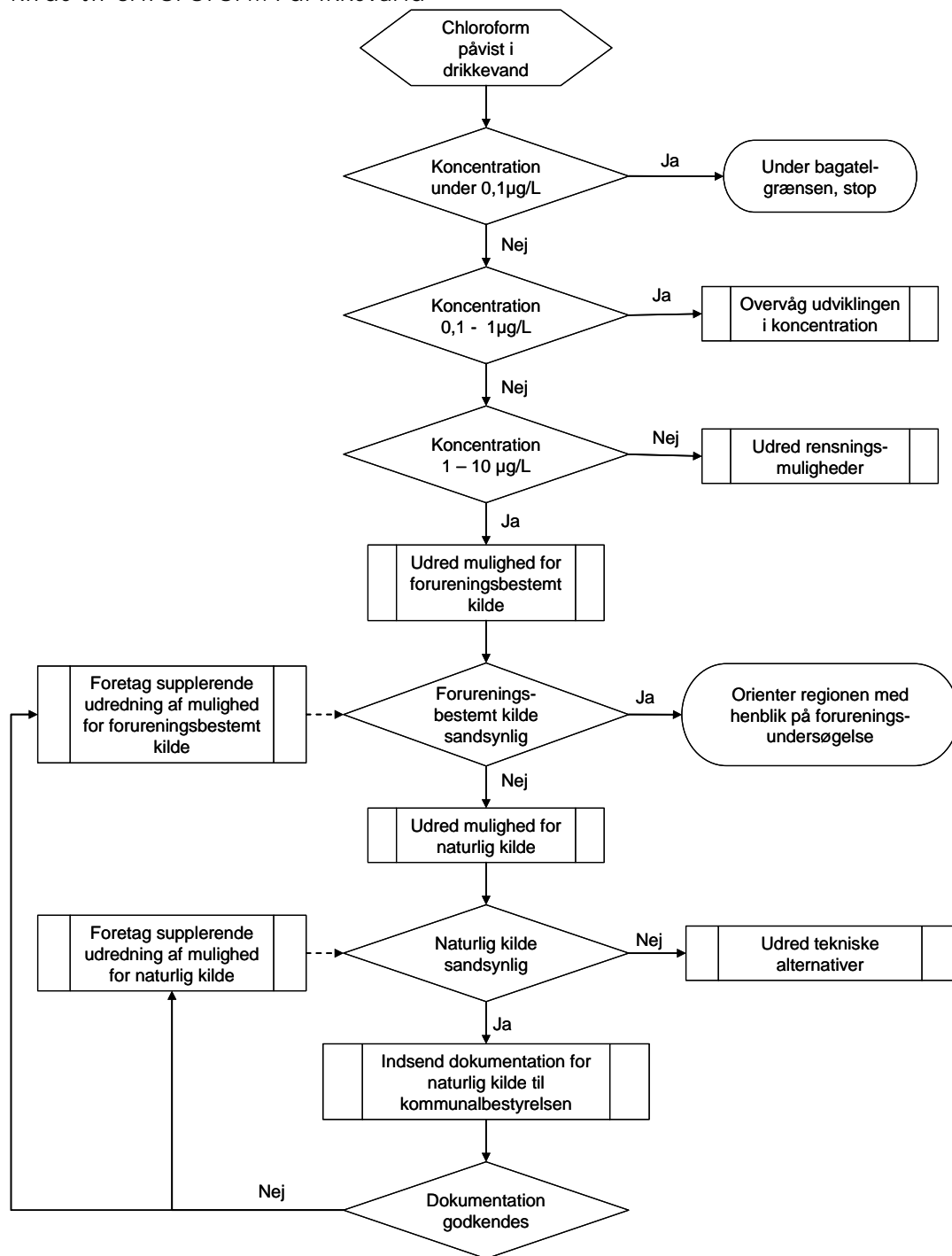
For begge trin kan gennemføres supplerende udredninger, hvis resultaterne af første udredninger ikke er klare eller tilfredsstillende.

En eventuel indsats kan tillige indeholde udredning vedrørende:

- Tekniske alternativer

Forløbet i udredningerne er skitseret i Figur 14. Hver proces i forløbet (angivet som i  Figur 14) trin er nærmere begrundet og beskrevet i de efterfølgende kapitler. En beslutning tages ved hver  . Ved ja, følges , ved nej, en anden.

Figur 14 Forløb i udredning om naturlig eller forureningsbestemt kilde til chloroform i drikkevand



Forslag til forløb af udredning af naturlige eller forureningsbestemte kilder til chloroform i grundvand er vist i Figur 14 og nærmere beskrevet i de efterfølgende kapitler.

# 5 Forureningsbestemt chloroform i grundvand

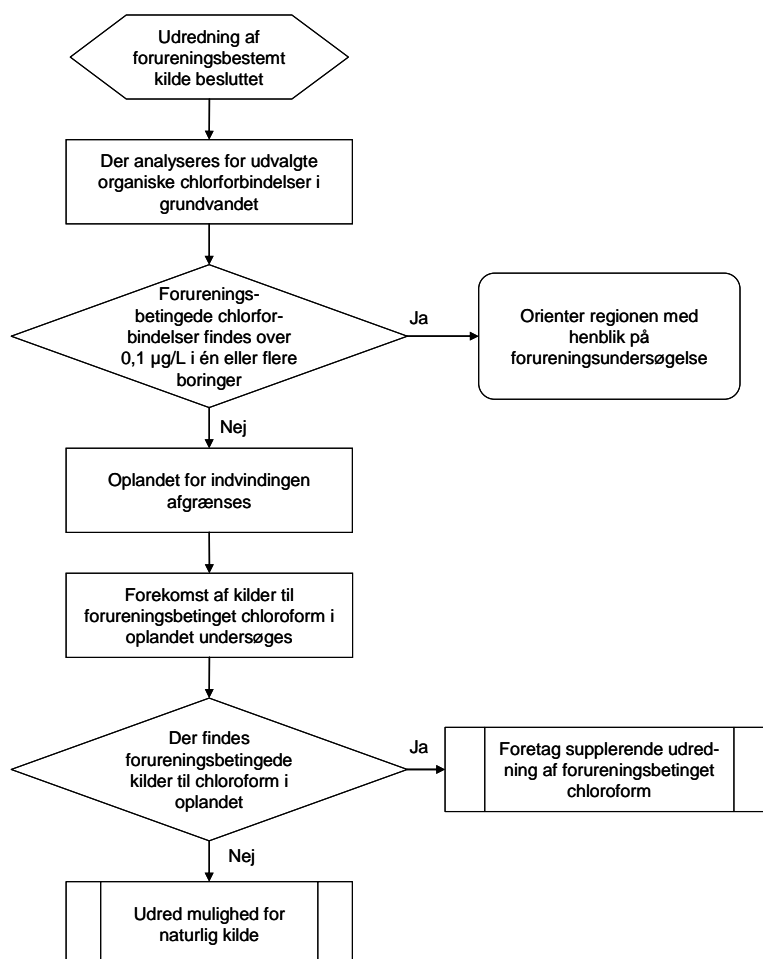
Dette kapitel begrundet og beskriver de nødvendige udredninger for forureningsbestemt chloroform påvirkning.

I den nødvendige udredning for muligheden for forureningsbestemt chloroform indgår 2 deludredninger for:

- Forekomst af andre forureningskomponenter i råvandet
- Forekomst af forureningskilder til chloroform i oplandet

Forløbet i deludredningerne er beskrevet i Figur 15.

Figur 15 Forløb i deludredninger af muligheden for forureningsbestemt chloroform



## 5.1 Forekomst af andre forureningskomponenter i råvandet

Forudsætningen for at acceptere et vandkvalitetskrav på 10 µg chloroform/L er, at indholdet er naturligt og ikke forureningsbetinget. En væsentlig indikation af en forureningspåvirkning vil være forekomst af andre hyppige grundvandsforureninger. Derfor indgår analyse heraf som en del af udredning for forureningsbestemt chloroform.

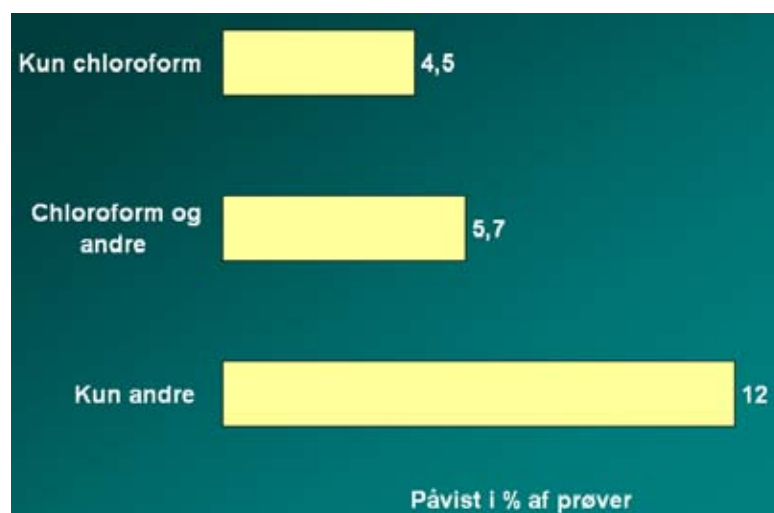
### 5.1.1 Begrundelse for analyseprogram

En gennemgribende undersøgelse af, om grundvand er forurennet, kræver et omfattende undersøgelses- og analyseprogram. Da formålet her alene er at udrede, om chloroform påvist i grundvandet skyldes forurening, kan deludredningen målrettes dette formål.

I en analyse af chloroform påvist under det danske grundvandsmoniteringsprogram blev chloroform fundet alene eller sammen med andre organiske chlorforbindelser med nogenlunde samme hyppighed /27/, se Figur 16. De andre organiske chlorforbindelser er en bred vifte af chlorerede metaner, ethaner, ethener og phenoler, samt samleparametre for organiske chlorforbindelser.

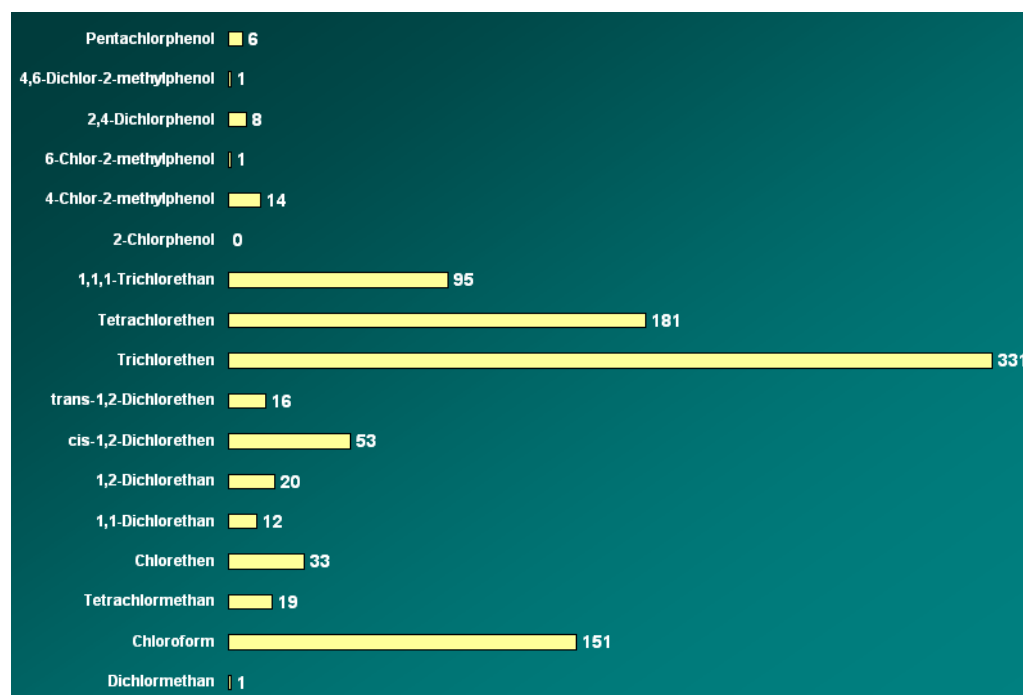
I en større undersøgelse af flygtige organiske forbindelser i grundvandet i USA omfattende 3.500 vandprøver fra 100 grundvandsmagasiner sås det, at chloroform var det hyppigst påviste stof (21% af prøverne med indhold over 0,02 µg/L) /39/. Chloroform forekom mest hyppigt sammen med trichlorethen, tetrachlorethen, 1,1,1-trichlorethan og chlordibrommethan. Den sidste forbindelse er ikke et egentlig forureningsstof, men dannes ved chlorbehandling af vand, se Afsnit 2.4.2.

Figur 16 Hyppighed af påvisning af chloroform og udvalgte andre organiske chlorforbindelser i det danske grundvandsmoniteringsprogram



Blandt de organiske chlorforbindelser er det de flygtige, chlorerede metaner, ethaner og ethener, der er fundet hyppigst i indvindingsboringer for mindre danske vandværker /40/, se Figur 17. Figuren viser antal prøver med fund, men det skal bemærkes, at organiske chlorforbindelser samlet er fundet i 57 af de 5154 indgående boringer.

Figur 17 Påvisninger af organiske chlorforbindelser i danske indvindingsboringer 2000-2004



De helt dominerende organiske chlorforbindelser er trichlorethen, tetrachlorethen, chloroform og 1,1,1-trichlorethan, hvor alle undtagen chloroform udelukkende skyldes forurening. Kun olie- og benzinstoffer (benzen, toluen, ethylbenzen, xylener, MTBE og sum af kulbrinter) er påvist lige så hyppigt påvist i dansk grundvand. Chlorphenoler blev påvist sjældnere.

En undersøgelse af et grundvandsmagasin i Klosterhede uden identificerede punktkilder til grundvandsforurening viste /36/, at foruden chloroform blev kun trichlorethen og tetrachlorethen fundet generelt i grundvandet, og at koncentrationerne var som hovedregel under 0,005 µg/L. Generel luftforurening giver altså ikke anledning til væsentlige koncentrationer af de forureningsbestemte organiske chlorforbindelser.

Vandkvalitetskravet for indhold af flygtige organiske chlorforbindelser i drikkevand gælder dichlormethan, dichlorethener, 1,2-dichlorethan, trichlorethen, tetrachlorethen, trichlorethaner og tetrachlorethaner.

Analyseprogrammet for udredning af muligheden for forureningsbestemt chloroform foreslås derfor at omfatte de udvalgte organiske chlorforbindelser:

- Chloroform
- Trichlorethen
- Tetrachlorethen
- 1,1,1-Trichlorethan

Med dette program påvises de organiske chlorforbindelser, der forekommer hyppigst i dansk grundvand, og samtidig de forureningsbestemte organiske chlorforbindelser, der hyppigst forekommer sammen med chloroform. Det bør overvejes at medtage nedbrydningsprodukterne af trichlor- og tetrachlorethylen (dvs. dichlorethylener og chlorethylen) i analyseprogrammet, idet disse kan forekomme sammen med og i nogen tilfælde endda i højere koncentrationer end moderstofferne.

Såfremt der ønskes en bredere sikkerhed for fravær af forureningspåvirkning, kan analyseres for de udvalgte olie- og benzinstoffer:

- Benzen
- Toluen
- Ethylbenzen
- Xylener
- MTBE

Det skal bemærkes, at denne udvidelse af analyseprogrammet kan gennemføres med en rimelig ekstra omkostning, se Tabel 4, idet stofferne kan medtages i samme analyse. Dette gælder i øvrigt også de øvrige flygtige organiske chlorforbindelser, som er nævnt i drikkevandsbekendtgørelsen /38/. Derimod vil inddragelse af f.eks. chlorphenoler kræve anvendelse af en ekstra analysemetode og dermed medføre betydelige ekstra omkostninger, uden at dette medfører en proportional øget sikkerhed i udredningen.

I analyse af andre hyppige grundvandsforureninger skal som minimum indgå de udvalgte organiske chlorforbindelser trichlorethen, tetrachlorethen og 1,1,1-trichlorethan. Nyttig yderligere information kan fås med rimelige omkostninger ved at medtage olie- og benzinstofferne benzen, toluen, ethylbenzen, xylener og MTBE i analyse programmet.
--

### 5.1.2 Beskrivelse af analyseudredning

Der udtages vandprøver fra alle boringer, hvor der tidligere er fundet chloroform over 0,1 µg/L. Hvis der er boringer i drift eller planlagt til at sættes i drift, hvor der ikke foreligger analyseresultater, udtages også vandprøver fra disse.

Prøvetagning gennemføres bedst af det analyselaboratorium eller lignende, som normalt udtager prøver i forbindelse med vandværkets rutinemæssige kontrol. Som minimum skal der benyttes en prøvetagningsmetode, der er i overensstemmelse med de internationale standarder om prøvetagning af drikkevand /41/, grundvand /42/ og grundvand på forurenede grunde /43/. Der skal særligt tages hensyn til, at chloroform er et flygtigt stof, som let forsvinder under prøvetagning og prøvehåndtering. Det anbefales at gennemføre kvalitetssikring af prøvetagning og prøvehåndtering som beskrevet i /44/.

Den kemiske analyse for de udvalgte organiske chlorforbindelser tilstræbes udført med en analysedetektningsgrænse på 0,01 µg/L svarende til 1/10 af den værdi, der ønskes kontrolleret (0,1 µg/L) /45/, men nogle laboratorier tilbyder en analysedetektningsgrænse på 0,02 µg/L som standard. Analyserne skal i øvrigt overholde kravene til kvalitetsklasse 2 for miljømålinger: præcisionen skal være bedre end 5% relativ standardafvigelse, genfindingen af kontrolmateriale sande værdi indenfor 95-105% og resultatet fra laboratoriets præstationsprøvninger indenfor 80-120% af den sande værdi /46/.

Med den nuværende teknologi (2007) indenfor analyser for de udvalgte organiske chlorforbindelser og olie- og benzinstoffer er den mest egnede analysemetode purge and trap gaskromatografi med detektion ved massespektrometri (P&T GC-MS), se Tabel 4 for pris per 30. maj 2007. Hvis en anden metode ønskes anvendt, skal mindst samme analysekvalitet



(detektionsgrænse, præcision og genfindning af sand værdi) og omkostningseffektivitet (pris per stof) dokumenteres.

Tabel 4 Priser for analyseprogrammer som kr per prøve eksklusive moms gældende d. 30. maj 2007

	1 prøve	5 prøver
Udvalgte organiske chlorforbindelser	400-500	400-500
Udvalgte olie- og benzinstoffer	500-600	500-600

Der skal udtages prøver fra alle boringer med chloroform fund over 0,1 µg/L. Analyserne skal tilstræbes udført med en detektionsgrænse på 0,01 µg/L, men en detektionsgrænse på 0,02 µg/L kan accepteres. Analyserne skal i øvrigt udføres svarende til analysekvalitetsklasse 2.

### 5.1.3 Beslutningsregel for forekomst af andre forureningskomponenter

Hvis der sammen med chloroform findes forureningsbetingede organiske chlorforbindelser (trichlorethen, tetrachlorethen eller 1,1,1-trichlorethan) over 0,1 µg/L i én eller flere boringer, kan påvist chloroform ikke alene tilskrives naturlige kilder, og regionen skal orienteres med henblik på gennemførelse af en forureningsundersøgelse.

## 5.2 Forureningskilder i oplandet

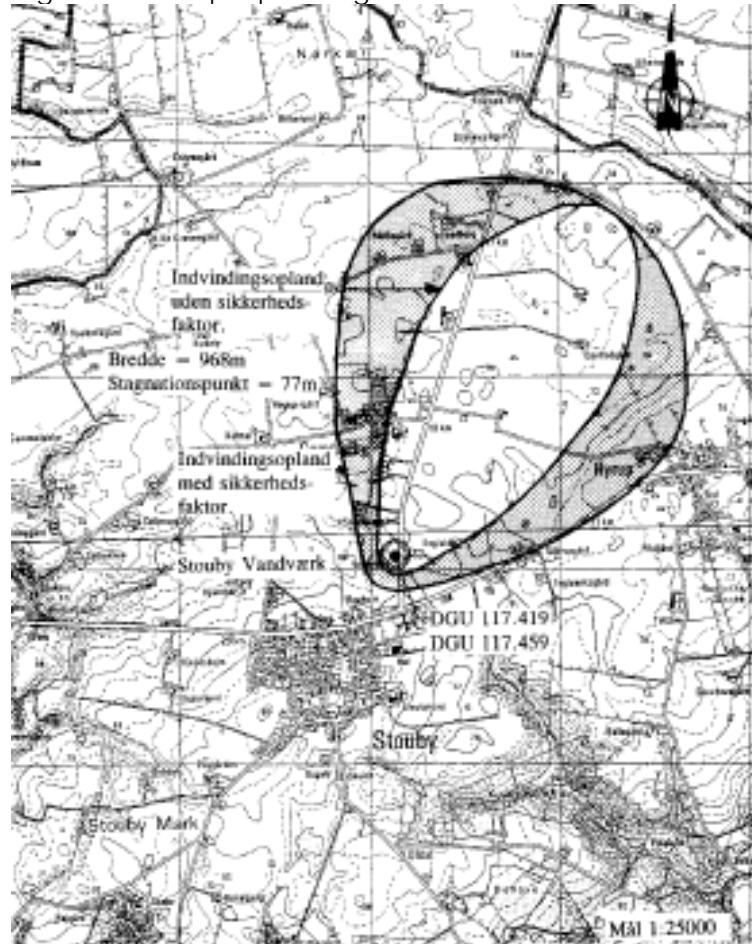
Forudsætningen for at acceptere et vandkvalitetskrav på 10 µg chloroform/L er som nævnt, at indholdet er naturligt og ikke forureningsbetinget. Derfor indgår undersøgelse af mulige kilder til forureningsbestemt chloroform i indvindingens opland som en del af udredning for forureningsbestemt chloroform. Der gives en beskrivelse af de kilder til information, som skal søges, for at sikre, at det ikke i oplandet ligger virksomheder eller anlæg, der kan forurene grundvandet.

### 5.2.1 Afgrænsning af indvindingens opland

For mange vandværker vil der i forbindelse med kortlægningen af områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD områder) være foretaget en afgrænsning af indvindingens opland /47/. I den efterfølgende udpegning af indsatsområder og udarbejdelse af indsatsplaner kan der tillige være foretaget en afgrænsning af indvindingens opland ("indvindingsområdet") /48/. Dette arbejde blev påbegyndt af amterne og forsattes efter strukturreformen i de statslige miljøcentre. For vandværker uden for OSD områderne er det kommunerne, der skal udpege indvindingsoplandene. Oplysninger om en indvindings opland vil altså ofte kunne indhentes fra kommunen eller fra det lokale, statslige miljøcenter.

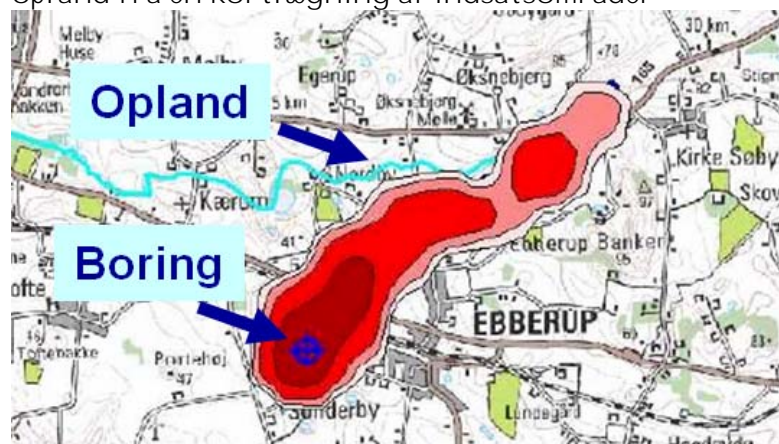
Hvis der ikke tidligere er foretaget en afgrænsning af indvindingens opland, skal dette gøres. En forenklet afgrænsning kan for eksempel foretages ved beregning som beskrevet i /49/, og et eksempel på afgrænsning af en indvindings opland er vist i Figur 18.

Figur 18 Eksempel på beregnet beskrivelse af en indvindings opland



Alternativt kan afgrænsningen baseres på en grundvandsmodellering med partikelbanesimulering. I Figur 19 er vist et eksempel på en modelbaseret afgrænsning af en indvindings opland.

Figur 19 Eksempel på modelbaseret afgrænsning af en indvindings opland fra en kortlægning af indsatsområder



Det skal bemærkes, at konklusionen fra en afprøvning af metoder til afgrænsning af indvindingsoplande var, at en 3D grundvandsmodel med partikelbanesimulering er den eneste brugbare metode til at afgrænse indvindingsoplandet til et vandværk, er /50/.

Hvis der benyttes modelbaserede afgrænsningsmetoder med beregning af afgrænsningsusikkerheden, vælges en afgrænsning svarende til en 95% sikkerhed for at indeholde hele oplandet. Hvis der benyttes beregningsbaserede afgrænsningsmetoder, indarbejdes en sikkerhedsfaktor på 2 som foreslået i /49/.

Afgrænsningen af oplandet til indvindingsområdet skal være kendt og indtegnet på et kort, enten fra amternes, kommunernes eller miljøcentrenes kortlægning eller fra en afgrænsning foretaget i forbindelse med udredningen af muligheden for forureningsbestemt chloroform.

### 5.2.2 Kilder til forureningsbestemt chloroform

I Afsnit 2.4.1 er listet de typer af forurenende aktiviteter, hvor der er særlig risiko for at finde chloroform som forurening i grundvandet. I Afsnit 2.4.2 er desuden listet de aktiviteter, hvor chlorbehandling af vand i særlig grad kan medføre en forurening af grundvandet med chloroform.

Som led i en udredning om forureningsbestemt chloroform bør det udredes, om der i indvindingens opland er eller har været én eller flere af følgende aktiviteter:

- Kemisk industri
- Pharmaceutisk Industri
- Virksomheder med behov for affedtning af metalemner, se Afsnit 2.4.1
- Svømmebade
- Losse- og fyldpladser
- Spildevandsledninger fra industrivaskerier og papirindustri

De mest sandsynlige kilder til forureningsbetinget chloroform i grundvand kan begrænses til 6 kildetyper.

### 5.2.3 Information om kilder til forureningsbestemt chloroform

Indhentningen af oplysninger om aktiviteterernes forekomst i indvindingens opland baseres på en kombination af kilder.

I forbindelse med kortlægningen af forurenede grunde har amterne samlet viden om grunde, hvor der kan være foregået forurenende aktiviteter. I de fleste amter har kortlægningen haft form af en indledende registrering af mulige forurenede grunde (såkaldt V0 registrering), en mere omfattende samling af oplysninger om hver enkelt grund (kortlægning til vidensniveau 1, V1 kortlægning) og egentlige undersøgelser af forurenede grunde for at afdække en eventuel risiko for blandt andet grundvandsforurening (kortlægning til vidensniveau 2, V2 kortlægning) /51/.

I forbindelse med kortlægningen tages stilling til, om en grund fortsat skal være registreret som muligt forurenede på det angivne niveau (V0, V1 eller V2), og efter eventuel oprydning kan en grund udtages af registreringen, fordi forureningen er fjernet eller ikke længere udgør en risiko.

Jo mere fremskredent forløbet er (V0→V1→V2→oprydning), jo mere sikker er informationen om kildens mulige påvirkning med chloroform af grundvandet. En V0 registrering af et renseri i oplandet i perioden 1960-1985 vil således alene vise en risiko for chloroform forurening. V1 kortlægningen kan ofte vise om chloroform har været benyttet eller ej, mens V2

kortlægningen vil vise, om jord og/eller grundvand faktisk er forurenet med chloroform. Inden oprydning skal forureningen afgrænses, og efter oprydning er en eventuel grundvandsforurening med chloroform i princippet reduceret til ikke at udgøre en væsentlig risiko for indvindingsboringer i oplandet.

Amternes registre er nu overtaget af regionerne, og der kan ved henvendelse til regionen indhentes oplysninger om de kilder til grundvandsforurening, der er kendt. Oplysningerne kan ligeledes findes i Matrikelregistret. Det skal bemærkes, at oplysninger om registrering på vidensniveau 0 i reglen ikke er offentligt tilgængelige, men betragtes som interne arbejdsdokumenter. Oplysningerne bør dog kunne benyttes af et vandværk i forbindelse med udredning af mulighederne for forureningsbestemt chloroform.

Forurenende virksomheder skal godkendes af kommunen og særligt forurenende virksomheder af staten, det vil sige af de statslige miljøcentre. Kommunen vil også have kendskab til forholdene på de særligt forurenende virksomheder. Der kan altså ved henvendelse til kommunen fås oplysninger om de i gangværende virksomheder, der kan være en kilde til grundvandsforurening.

Ansvar for losse- og fyldpladser ligger efter strukturreformen hos regionerne, og oplysninger om placering, deponering og grundvandsrisiko kan søges dér.

Oplysninger om tidligere anvendelse af grunde til muligt forurenende formål kan også indhentes fra tingbogen, der er offentligt tilgængelig på de kommunale tinglysningskontorer. Det skal dog bemærkes, at indhentning af oplysninger fra tingbogen er tidskrævende, idet oplysningerne skal trækkes frem for hver enkelt matrikel.

Statens Miljøcentre, der udarbejder indsatsplaner for grundvandsbeskyttelse, kan også give nyttige informationer om mulige forureningskilder. Miljøcentrene har ofte et samlet overblik over indsatsområderne og indhenter i nogle tilfælde lokale oplysninger ind, f.eks. i form af interviews med lokalkendte om kendte kilder og ikke registrerede kilder.

Endelig vil oplysninger om mulige forurenede grunde med fordel kunne fås fra lokalsamfundet, dvs. fra borgere i området med viden om aktiviteter i området.

Indsamlingen af oplysninger om mulige kilder til forureningsbestemt chloroform i oplandet er opsummeret i Tabel 5.

Tabel 5 Kilder til oplysninger om forureningsbestemt chloroform i et opland

	<b>Nødvendige kilder</b>	<b>Mulige kilder</b>
Forurenede grunde	Regionen Matrikelregistret	Tinglysningskontoret Lokalsamfundet Statens Miljøcentre
Igangværende virksomheder	Kommunen	Lokalsamfundet Statens Miljøcentre
Losse- og fyldpladser	Regionen	Lokalsamfundet Statens Miljøcentre

Information om eventuel chlorbehandling af en boring, hvor der er fundet chloroform, vil normalt kunne findes i vandværkets optegnelser.

Oplysninger om de mest sandsynlige kilder til forureningsbestemt chloroform i et opland kan i reglen findes hos kommunen og regionen.

#### 5.2.4 Beslutningsregel for forureningskilder i oplandet

Hvis der i indvindingens opland findes sandsynlige kilder til forureningsbestemt chloroform, kan påvist chloroform i oplandets grundvand ikke alene tilskrives naturlige kilder.

#### 5.3 Supplerende udredning af forureningsbestemt chloroform

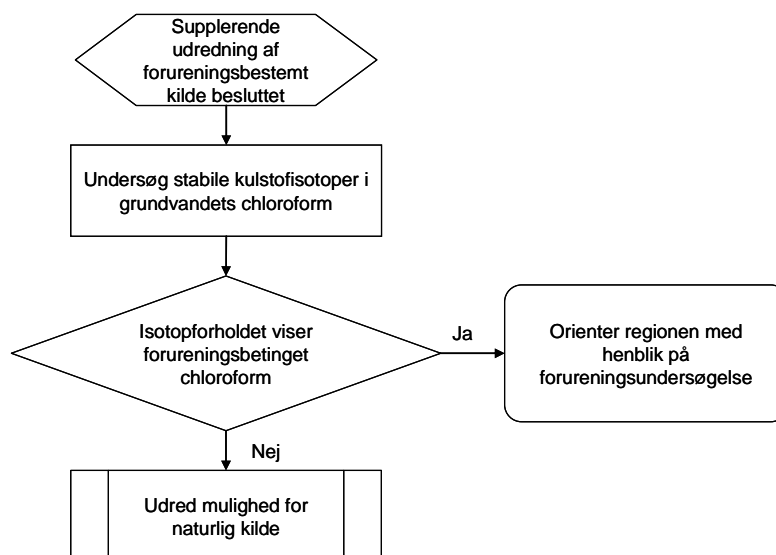
Hvis én eller begge forudsætninger for forureningsbetingede kilder til chloroform i grundvandet er opfyldt, kan man vælge at foretage en supplerende udredning af, om en forureningsbetinget kilde alligevel ikke er sandsynlig. Hvis man ikke vælger at foretage supplerende udredning af forureningsbestemt chloroform, bør regionen underrettes om en mulig forurening af grundvandet.

Den supplerende udredning af forureningsbestemt chloroform omfatter som hovedpunkt:

- Måling af stabil isotopsammensætning af chloroform

Forløbet i den supplerende udredning er vist i Figur 20.

Figur 20 Forløb i supplerende udredning af forureningsbestemt chloroform



#### 5.3.1 Analyser for stabile isotoper i chloroform

Kulstofatomet i chloroform, se Afsnit 2.1, findes i naturen med forskellig atomvægte, men i øvrigt med næsten samme egenskaber. Man siger, at kulstof findes som forskellige isotoper. Der findes mest kulstof-12 (cirka 99%), mindre af det lidt tungere kulstof-13 (cirka 1%) og meget lidt af det tungeste

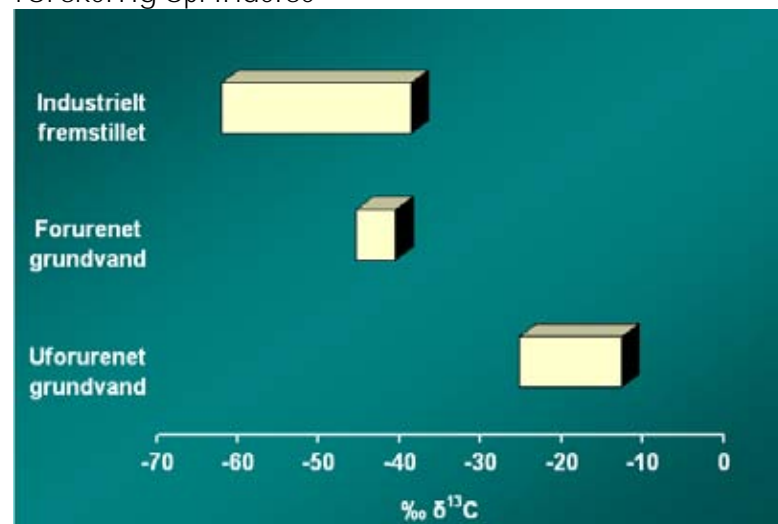
kulstof-14. Kulstof-12 og kulstof-13 er stabile atomer, mens kulstof-14 er radioaktivt og f.eks. benyttes til datering af arkæologiske fund. Forholdet imellem kulstof-13 og kulstof-12 er forskelligt for organiske stoffer i f.eks. havet og på landjorden, og har i øvrigt ændret sig over tiden. Disse forskelle kan man måle og bruge til at sige noget om oprindelsen af f.eks. chloroform i grundvand.

Forholdet kulstof-13 til kulstof-12 udtrykkes i forhold til en fælles reference som  $\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$ . Forholdet er fundet til  $-45 \text{‰ } \delta^{13}\text{C}$  til  $-65 \text{‰ } \delta^{13}\text{C}$  for chloroform fra en kemikalieflaske (industrielt fremstillet chloroform). Undersøgelserne i Viborg Hedeplantage og Tved Plantage tyder på forhold i intervallet  $-15 \text{‰ } \delta^{13}\text{C}$  til  $-25 \text{‰ } \delta^{13}\text{C}$  for chloroform i grundvand, der ikke er forurenede /27/. Grundvand forurenede af en losseplads viste et forhold på  $-45 \text{‰ } \delta^{13}\text{C}$ , altså svarende til industrielt chloroform, se Figur 21.

Der er altså, vurderet med det nuværende datagrundlag, betydelig forskel på kulstof-13 til kulstof-12 forholdet i chloroform i grundvand fra naturlige processer og fra industrielt fremstillet chloroform og chloroform fra grundvandsforurening.

Understøttelse af, at denne forskel er reel og dermed kan bruges til at skelne imellem chloroform fra naturlig og forureningsbetinget kilde, kan fås ved at se på isotopforholdene under dannelsen af chloroform fra jordens organiske stof. Det er vist, at nedbrydning af organisk materiale i naturen danner kuldioxid med op til  $3 \text{‰ } \delta^{13}\text{C}$  lavere på kulstof-13 til kulstof-12 forhold end det organiske materiale, som nedbrydes /52/. De laveste kulstof-13 til kulstof-12 forhold målt for organisk stof i dansk jordbund omkring  $-31 \text{‰ } \delta^{13}\text{C}$ . Er ændringen i kulstof-13 til kulstof-12 forholdet ved kuldioxid dannelse og chloroform dannelse nogenlunde den samme, så vil en undergrænse for naturligt dannet chloroform i jordbunden være ca.  $-34 \text{‰ } \delta^{13}\text{C}$ . Dette understøtter, at der næppe er overlap mellem kulstof-13 til kulstof-12 forhold for naturligt dannet og industrielt fremstillet chloroform.

Figur 21 Forholdet kulstof-13 til kulstof-12 i chloroform med forskellig oprindelse



Foruden en klar forskel på industriel og naturlig chloroforms isotop indhold, forudsætter en anvendelse af metoden, at isotop indholdet ikke ændres ved processer som nedbrydning, binding, diffusion og fordampning. Chloroform nedbrydes kun langsomt, når der er ilt tilstede, se Afsnit 2.2, så i aerobe

magasiner kan nedbrydning ikke forventes at påvirke isotop sammensætningen. En undersøgelse har vist, at for det chlorerede opløsningsmiddel tetrachlorethylen (PCE), der har egenskaber svarende til chloroforms egenskaber, var ændringen i isotop egenskaber begrænset igennem en fane af grundvandsforurening/53/.

Kulstofisotoper i chloroform kan analyseres ned til cirka 0,3 µg/L på udenlandske laboratorier med en angivelse af forventelig pris i Tabel 6.

Tabel 6 Priser for analyse for kulstofisotoper i chloroform som kr per prøve eksklusiv moms gældende d. 30. maj 2007

	1 prøve	3 prøver
Kulstof-13 til kulstof-12 forhold i chloroform	2000-3800	2000-2600

Som kvalitetskontrol af isotopanalyserne anbefales det at lade vandværkets normale laboratorium fremstille en vandig opløsning af industriel chloroform (almindelig laboratoriestandard) på koncentrationsniveau 1 µg/L, som medsendes prøverne til analyse. Forholdet for denne prøve skal ligge i intervallet -45 ‰ δ<sup>13</sup>C til -65 ‰ δ<sup>13</sup>C.

Hvis forholdet kulstof-13 til kulstof-12 ligger i intervallet for chloroform i grundvand fra naturlige kilder, -15 ‰ δ<sup>13</sup>C til -25 ‰ δ<sup>13</sup>C, er et væsentligt forureningsbestemt bidrag til chloroform indholdet usandsynligt. Metoden bør kun benyttes i aerobt grundvand.

### 5.3.2 Beslutningsregel for supplerende udredning af forureningsbestemt chloroform

Hvis analyser for stabile isotoper i chloroform fra grundvandet gør en forureningspåvirkning usandsynlig, kan muligheden for forureningsbetinget chloroform afvises. Hvis ikke skal regionen orienteres med henblik på gennemførelse af en forureningsundersøgelse, og resultaterne af forureningsundersøgelser afventes.





## 6 Naturlige kilder til chloroform i grundvand

Dette kapitel begrundes og beskriver de overvejelser og udredninger, som er nødvendige for at understøtte en naturlig kilde til chloroform i et grundvandsmagasin.

I den nødvendige dokumentation for en mulig naturlig kilde til chloroform i grundvandet indgår overvejelser vedrørende:

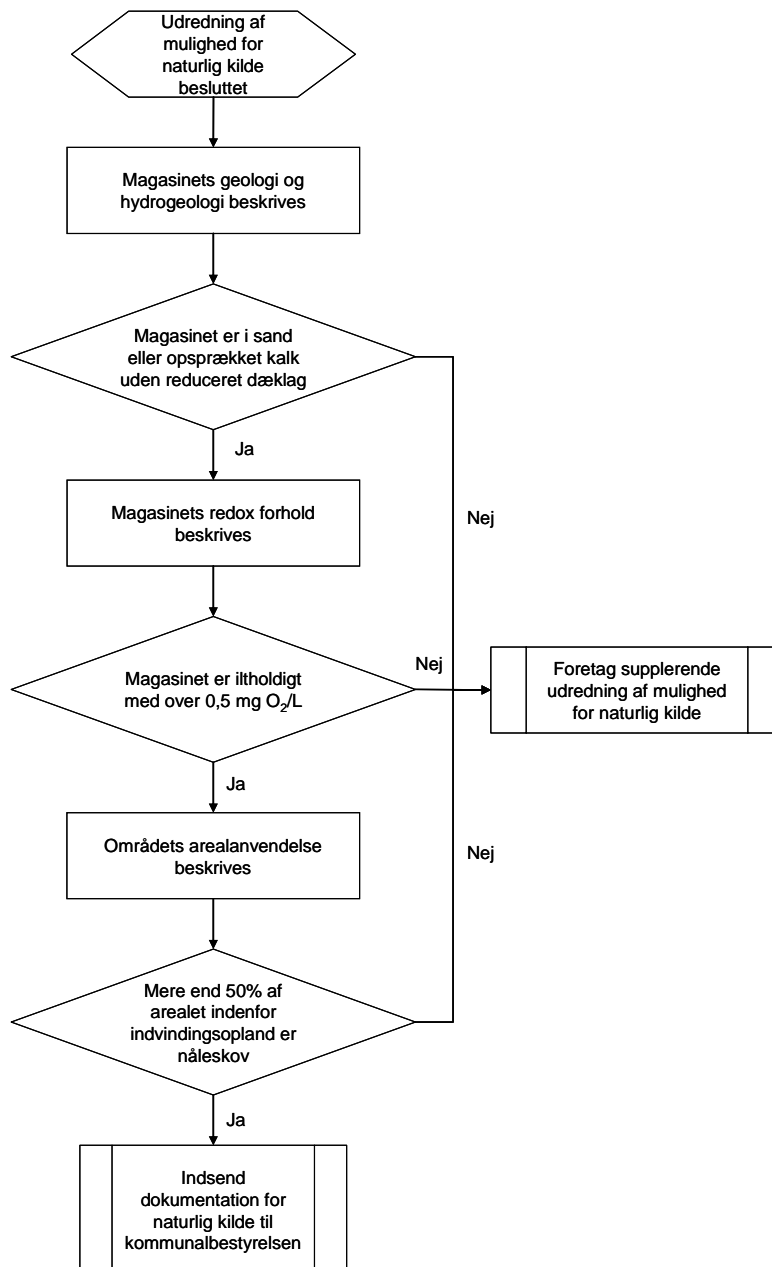
- Geologi og generel grundvandskemi
- Redoxforhold<sup>1</sup>
- Arealanvendelse

Forløbet i overvejelser fremgår af Figur 22.

---

<sup>1</sup> Redoxforhold kaldes også iltningforhold, og i denne sammenhæng menes først og fremmest, om der er ilt og nitrat i grundvandet

Figur 22 Forløb i vurdering af muligheden for naturlig chloroform



### 6.1 Geologi og generel grundvandskemi

Der er i det danske grundvandsmoniteringsprogram hyppigt fundet chloroform, mest i koncentrationer under 1 µg/L og mest i grundvandsmagasiner ned til højst 40 m under terræn (m.u.t.) /54/. En kvalitativ vurdering af chloroform fund i de første perioder af grundvandsmoniteringsprogrammet antydede, at chloroform først og fremmest blev fundet i grundvandsmagasiner i sand uden dæklag /55/.

En statistisk analyse af data fra grundvandsmoniteringsprogrammet 1992-2003 kunne ikke vise sammenhænge imellem forekomst af chloroform, af forureningsbestemte organiske chlorforbindelser og den generelle grundvandskemi /27/. Dog forekom chloroform uden andre organiske chlorforbindelser hyppigere i grundvand med lav hårdhed og høj kalkaggressivitet. Terrænnære grundvandsmagasiner i geologisk materiale med lavt kalkindhold, som f.eks. kalkudvasket smeltevandssand, synes altså at

have en større sandsynlighed for forekomst af naturlig chloroform i grundvandet. Det var ikke i denne analyse muligt at udlede en sammenhæng imellem naturligt chloroform indhold i grundvandet og f.eks. geologi, geografisk placering eller generel grundvandskemi /27/.

Der er i Tved Plantage fundet chloroform i grundvandet, der angiveligt kan tilskrives naturlig produktion i skovbund /27/. Magasinet er her i opsprækket skrivelid dækket af oxideret moræneler og flyvesand.

Undersøgelser af effekten af chlorid ("salt") på chloroform produktion i jordbund tyder ikke på, at mere chlorid i jordbunden (= mindre afstand til havet) giver større chloroform produktion /27/ og /26/.

Chloroform fra naturlige kilder synes af findes hyppigere i terrænnære, kalkudvaskede sandmagasiner end i andre typer af geologi/grundvandskemi. Der kan ikke gives andre sammenhænge på landsniveau imellem naturligt forekommende chloroform i grundvandet og geologi, geografi eller generel grundvandskemi.

## 6.2 Effekt af redoxforhold

En statistisk analyse af data fra grundvandsmoniteringsprogrammet 1992-2003 kunne ikke vise sammenhænge imellem forekomst af chloroform og redoxforholdene /27/. En kvalitativ vurdering af chloroform fund i de første perioder af grundvandsmoniteringsprogrammet antydede, at chloroform først og fremmest blev fundet i magasiner med iltholdigt grundvand /55/.

I undersøgelserne ved Klosterhede sås et betydeligt lavere indhold af chloroform, omkring 0,010 µg/L, i ilt- og nitratfrit (<0,5 mg/L, henholdsvis <0,1 mg/L) grundvand under et dæklag af ler, sammenholdt med det mere terrænnære grundvand med ilt, 0,1 - 2 µg/L, se Figur 12.

I grundvandet under Viborg Hedeplantage målt kun chloroform over cirka 0,005 µg/L i borer med ilt (>0,5 mg/L) og nitrat (>1 mg/L) /27;56/. Tilsvarende var der angiveligt ilt og/eller nitrat i grundvandet i de borer, hvor der blev fundet chloroform (>0,05 µg/L) i Tved Plantage ved Thisted /27/.

Det skal bemærkes, at målinger af iltindhold bør være foretaget som **on line** feltmålinger i gennemstrømningsbeholder efter tilstrækkelig forpumpning dokumenteret ved stabile målinger, se f.eks. Grøn et al 2003). Detektionsgrænsen skal være højst 0,5 mg O<sub>2</sub>/L, udstyret kalibreret til 100% iltmætning på stedet og dets visning for iltfrit vand korrekt (<0,2 mg O<sub>2</sub>/L).

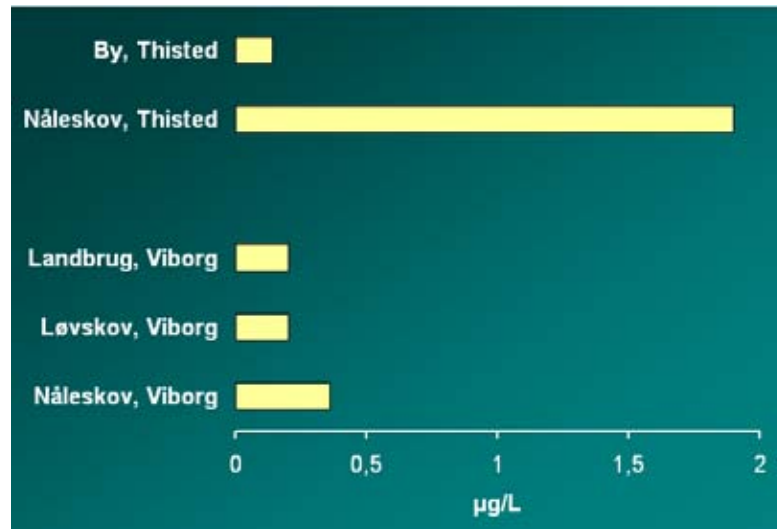
Naturligt produceret chloroform forekommer først og fremmest i grundvandsmagasiner med ilt (>0,5 mg/L) og nitrat (>1 mg/L).

## 6.3 Areal anvendelse og naturlig chloroform produktion

En statistisk analyse af data fra grundvandsmoniteringsprogrammet 1992-2003 kunne ikke vise sammenhænge imellem forekomst af chloroform og arealanvendelse /27/. En kvalitativ vurdering af chloroform fund i de første perioder af grundvandsmoniteringsprogrammet antydede, at chloroform først og fremmest blev fundet i grundvandsmagasiner under skov /55/.

Undersøgelser af chloroform i grundvandet i Viborg og Thisted antyder også, at indholdet er højere under skov end under anden arealanvendelse, og endvidere et højere indhold under nåleskov end under løvskov /27/, se Figur 23. Det skal bemærkes, at chloroform koncentrationerne i Figur 23 er for den øverste del af grundvandsmagasinet, og der er fundet højere koncentrationer af chloroform i dybere dele af magasinet.

Figur 23 Chloroform i grundvand påvirket af forskellig arealanvendelse



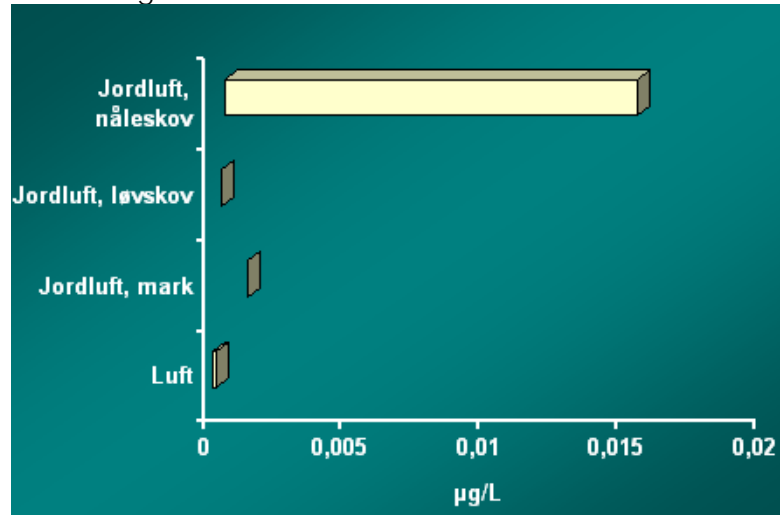
Den relativt begrænsede direkte viden om arealanvendelsens betydning for chloroform koncentrationen i grundvandet kan understøttes af jordluft målinger og målinger af chloroform produktion for forskellig arealanvendelse.

Målinger af chloroform koncentrationerne i luften og i jordluften (luft i jordens porer) har vist lave koncentrationer af chloroform i jordluften under mark og løvskov, men varierende og ofte høje koncentrationer under nåleskov /27/, se Figur 24..

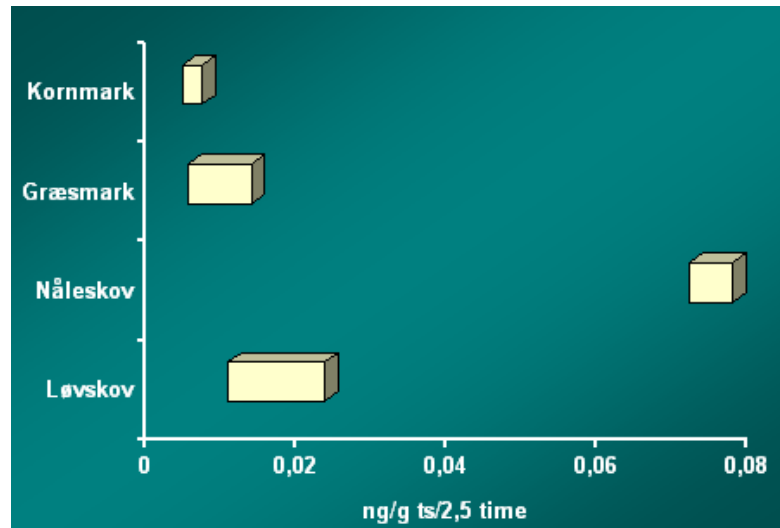
Undersøgelserne i Viborg Hedeplantage tyder på, at chloroform indholdet i jordluften er størst, når tykkelsen af det organiske lag (blade, nåle, humus med videre) kommer over 4 cm. En stor variation i jordluftens indhold af chloroform er beskrevet tidligere for et område på Sjælland /57/, hvor f.eks. tilstedeværelsen af rådrende rødder gav højere chloroform koncentrationer i jordluften.

Forskellen i jordbundens produktion af chloroform ses endnu tydeligere i laboratoriemålinger af chloroform produktionen /27/, se Figur 25. Produktionen er klart størst i jord fra nåleskov (9 cm organisk materiale), mindre fra løvskov (5 cm organisk materiale) og mindst fra marker (ikke egentlig organisk lag).

Figur 24 Koncentrationer af chloroform i luften og i jordluft under forskellig areal anvendelse



Figur 25 Produktion af chloroform fra jordprøver med forskellig areal anvendelse



Der er endnu ikke undersøgelser af den kvantitative sammenhæng imellem arealanvendelse og koncentration af chloroform i grundvandet. De fleste undersøgelser er udført i skovområder.

Det foreslås derfor at benytte 50% chloroform producerende jordbund indenfor indvindingsoplandet, se Afsnit 5.2.1, for boringer med forhøjet chloroform koncentration som indikation på naturlig kilde til chloroform.

Alle undersøgte jordtyper kan producere chloroform, men jord i nåleskove og med tykt lag af organisk materiale producerer mest. Formodentlig er påvirkningen af grundvandet også størst under nåleskov med tykt lag organisk materiale i skovbunden, dvs. i ældre, tætte skove.

#### 6.4 Beslutningsregel for vurdering af naturlig kilde til chloroform

Hvis de 3 mest almindelige forudsætninger for naturlig kilde til chloroform i grundvand er opfyldt:

- Magasinet er i sand eller opsprækket kalk uden reduceret dæklag

- Magasinet er iltholdigt med over 0,5 mg O<sub>2</sub>/L
- Arealanvendelsen over påvirkede boringer er nåleskov, mere end 50% indenfor indvindingsoplandet

da er naturlig kilde til chloroform i magasinet sandsynlig.

#### 6.5 Supplerende udredning af naturlig kilde til chloroform

Hvis én eller flere af de almene forudsætninger for naturlig chloroform ikke er opfyldt, kan man vælge at undersøge, om en naturlig kilde alligevel er sandsynlig. Undersøgelserne vil kræve felt- og/eller laboratorieundersøgelser, og vil som sådan indebære betydelige omkostninger. Derfor anbefales det at foretage en omhyggelig teknisk økonomisk vurdering, inden de sættes i gang.

Undersøgelserne indeholder som hovedpunkt:

- Måling af stabil isotopsammensætning af chloroform

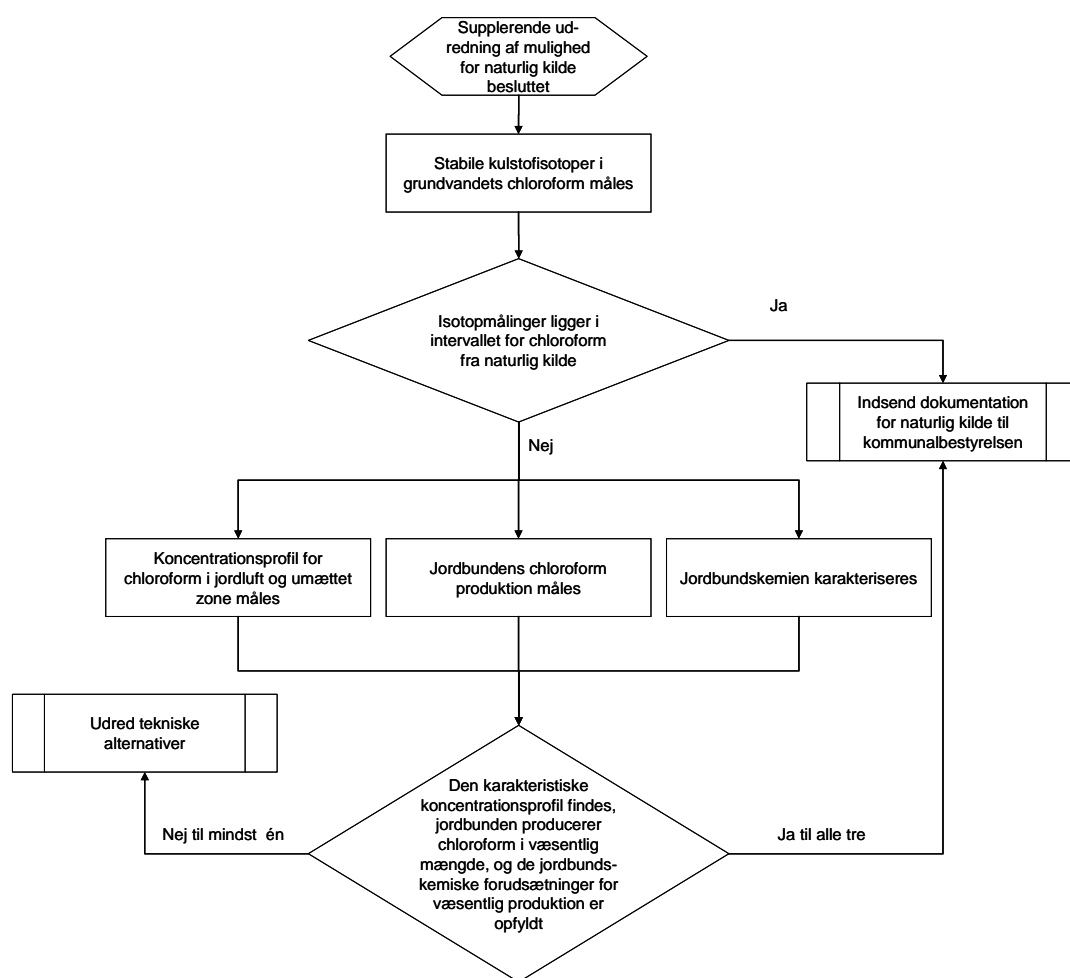
Hvis ikke isotopsammensætningen understøtter en naturlig kilde, kan yderligere inddrages detaljerede feltundersøgelser:

- Koncentrationsprofil af chloroform i den umættede zone
- Jordbundens kapacitet for naturlig chloroform produktion
- Områdets jordbundskemi

Forløbet i de supplerende udredninger er vist i Figur 26..

Årsagen til ønsket om samtidig dokumentation for alle tre typer af detaljerede feltundersøgelser er, at der endnu ikke findes undersøgelser, der viser den kvantitative sammenhæng imellem jordbundens chloroform produktion og den deraf kommende koncentration i grundvandet. Sagt på en anden måde, så ved vi ikke, hvor meget chloroform en jord skal producere, hvis det skal give grundvandskoncentrationer i det relevante område 0,1-10 µg/L.

Figur 26 Forløb i supplerende udredning af muligheden for naturlig chloroform



### 6.5.1 Analyser for stabile isotoper i chloroform fra grundvandet

Analyse for stabile kulstofisotoper er tidligere omtalt som redskab til at undersøge for forureningsbestemt bidrag til chloroform i grundvand, se Afsnit 5.2.4.

Viser chloroform fra grundvandet et kulstof-13 til kulstof-12 forhold i intervallet -15 til -25 ‰  $\delta^{13}\text{C}$ , er en naturlig kilde til chloroform sandsynliggjort.

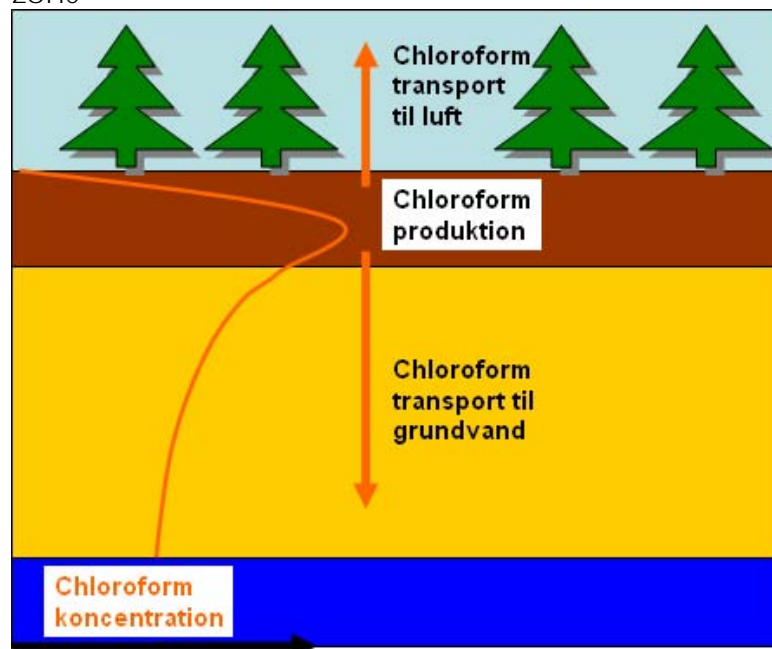
### 6.5.2 Koncentrationsprofil af chloroform i umættet zone

Produktionen af chloroform er i biologisk aktive perioder størst i de øverste jordlag med deres høje indhold af organisk stof og høje biologiske aktivitet /34;57/. Dette resulterer i en karakteristisk koncentrationsprofil af chloroform i jordluften og den umættede zone med et maksimum omkring 1 m.u.t. (m under terræn) /58/. Profilet er vist i Figur 27 baseret på målinger i Klosterhede Plantage. Samme type af profil er målt i Viborg Hedeplantage og Tved Plantage /27/.

Profilet er forklaret ved, at jordluftkoncentrationen tæt på jordoverfladen holdes lav af fri afgasning (diffusion) til luften og videre ud i atmosfæren /36/. Dermed opstår det stejle fald i koncentration fra maksimum op til

jordoverfladen. Nedad imod grundvandsspejlet transporteres chloroform langsomt for dernede at opløses i grundvandet. Hermed opstår den mindre stejle og udfladende koncentrationskurve fra maksimum og ned imod grundvandet.

Figur 27 Koncentrationsprofil af chloroform i jordluft og umættet zone



Den karakteristiske koncentrationsprofil vil kun med sikkerhed kunne genfindes i de primære produktionsperioder med samtidig relativt høj temperatur og fugtighed (forår og efterår). I foråret vil denne situation typisk opstå, når temperaturen for alvor stiger, og i efteråret, når den første rigtige efterårsregn afløser sommertørperioden.

For den typiske profil er chloroform koncentration mindst dobbelt så høj, hvor den er højest ved omkring 0,5-1 m.u.t., i forhold til koncentrationen i dybere lag, fra 2 m.u.t og dybere.

Koncentrationsprofilerne er kun observeret på steder, hvor den umættede zone er sand, der tillader fri transport af chloroform både opad og nedad. Hvis der var tale om en koncentrationsprofil forårsaget af grundvandsforurening, så ville luft koncentrationen i den umættede zone typisk være størst i de dybeste prøver, altså lige over grundvandet /59;60/.

Metoder til prøvetagning af jordluft og luft fra den umættede zone kan f.eks. findes i /27;36/. Det anbefales at udtage prøver for hver 25 cm indtil 1 m.u.t., herfra for hver m til 5 m.u.t og derefter i givet fald for hver 2½ m indtil grundvandsspejlet nås.

Det skal bemærkes, at de almindeligt benyttede metoder til poreluft prøvetagning ved forureningsundersøgelser /61/ ikke umiddelbart er anvendelige, særligt for terrænnære prøver. Det skyldes, at den normalt benyttede forpumpning vil indebære stor risiko for at udjævne den koncentrationsprofil, som ønskes målt her.

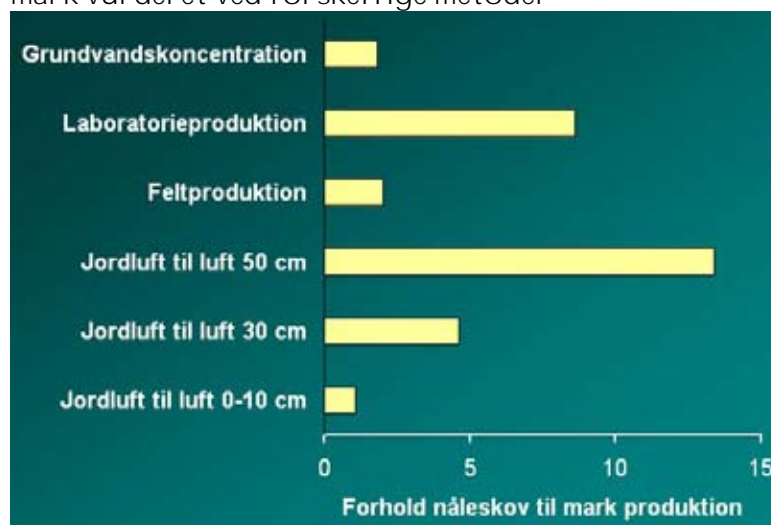


Koncentrationsprofilen for chloroform i jordluft og umættet zone viser en typisk form ved aktiv naturlig produktion i jordbunden, dvs. i foråret og efteråret. Koncentrationen i ½-1 m er typisk mindst dobbelt så høj som i de dybere lag.

### 6.5.3 Måling af jordbundens chloroform produktion

Dokumentation af jordbundens kapacitet for naturlig chloroform produktion kan gennemføres med forskellige metoder med forskellig styrke, men også med forskellig kompleksitet og derfor forskellige omkostninger. I Figur 28 er vist styrken i nogle forskellige metoder til produktionsmålinger.

Figur 28 Forhold imellem chloroform produktion for nåleskov og mark vurderet ved forskellige metoder



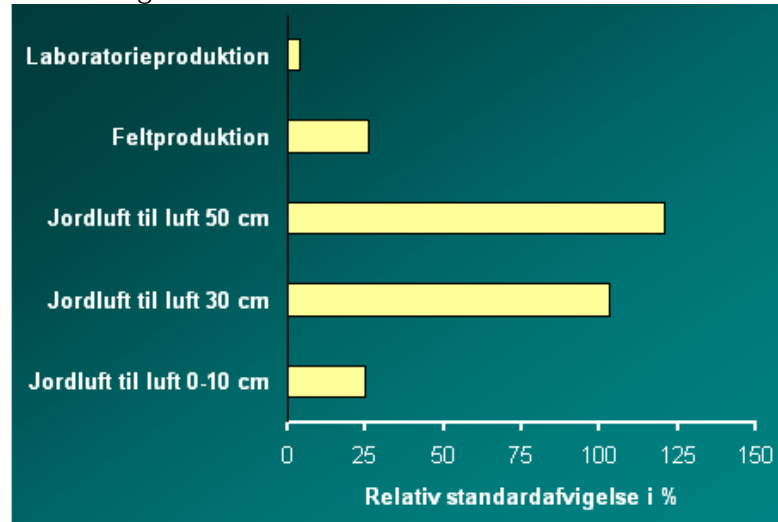
Målinger af jordens chloroform produktion i laboratoriet og målinger af koncentrationen af chloroform i jordluft i 50 cm's dybde og i luft er klart de 2 metoder, der bedst skelner imellem produktion i jord fra nåleskov og i jord fra mark.

I Figur 29 er vist variationen i resultater, som er fundet med de forskellige metoder.

Den bedste kombination af lille usikkerhed og god evne til at skelne imellem lille og stor produktion opnås ved laboratorietest for produktion fra jordprøver, og den næstbedste ved målinger af forholdet imellem koncentrationer af chloroform i jordluft i 50 cm's dybde og i luft.

En varierende grundvandskoncentration over dybde og tid, se Figur 13, og den begrænsede forskel på chloroform koncentrationen under chloroform producerende nåleskovbund og mindre producerende markjord, se Figur 28, viser, at målinger af chloroform koncentrationer i grundvandet ikke i sig selv er velegnede til at underbygge en naturlig oprindelse af chloroform.

Figur 29 Variation i resultater for chloroform produktion opnået ved forskellige metoder



En væsentlig årsag til den mindre usikkerhed ved laboratorietest er, at der her kan benyttes homogeniserede blandedjordprøver. En væsentlig årsag til den større usikkerhed set for jordluft i 30 og 50 cm's dybde er, at disse målinger er udført over et større område end jordluft til luft i 0-10 cm, feltproduktion og laboratorieproduktion.

Vi finder ikke chloroform i alle grundvandsmagasiner, der opfylder forudsætningerne med hensyn til geologi og redox forhold. Derfor må vi slutte, at nogen typer af arealanvendelse ikke giver en tilstrækkelig produktion af chloroform i jordbunden til at påvirke grundvandet væsentligt. Den laveste chloroform produktion er set for marker, se Figur 25, samt muligvis for løvskov, se Figur 24. Chloroform produktion i jordbunden for disse typer af arealanvendelse sættes derfor som det niveau, hvor grundvandet ikke påvirkes væsentligt: kontrolniveauet.

Med udgangspunkt i de gennemførte undersøgelser af chloroform i jordluft og luft, samt ud fra et ønske om at have 95% sikkerhed i vurderingen af chloroform produktionens betydning kan betingelserne for de to typer af undersøgelser skitseres som vist i Tabel 7.

Metoderne til måling af chloroform produktion er nærmere beskrevet i /27/ og /26/. Det skal bemærkes, at det nødvendige undersøgelsesomfang afhænger af variationen i chloroform produktionen i jordbunden og af dennes størrelse. Undersøgelsen afgrænses til et område med en radius på 100 m omkring påvirkede boringer som beskrevet i Afsnit 6.3.

Tabel 7 Betingelser for undersøgelser af chloroform produktion i jordbunden

	Jordluft til luft metoden	Laboratorieproduktionsmetoden
Forventet luft koncentration	0,0001 µg/L	-
Kontrol koncentration i jordluft, K	0,001 µg/L	-
Produktionsbaggrund	-	<0,002 ng/g ts/2½ time
Kontrol produktion, K	-	0,01 ng/g ts/2½ time
Beslutningsregel for vurdering af gennemsnit af målinger, $\bar{X}$	$\bar{X} > K + \frac{2 \times s}{\sqrt{n}}$	
Forventet nødvendigt antal målepunkter, n	5-15	3-5
Forventet standardafvigelse på målinger, s	0,001-0,01 µg/L	0,001-0,01 ng/g ts/2½ time
Målepunktsoplysninger	Hvert punkt er samhörrende målinger for luft og jordluft, hvor jordluft udtages i 50 cm's dybde	Hvert punkt omfatter homogeniserede blandeprøver fra 3 positioner indenfor 1 m <sup>2</sup> med jord udtaget fra 0-10 cm.

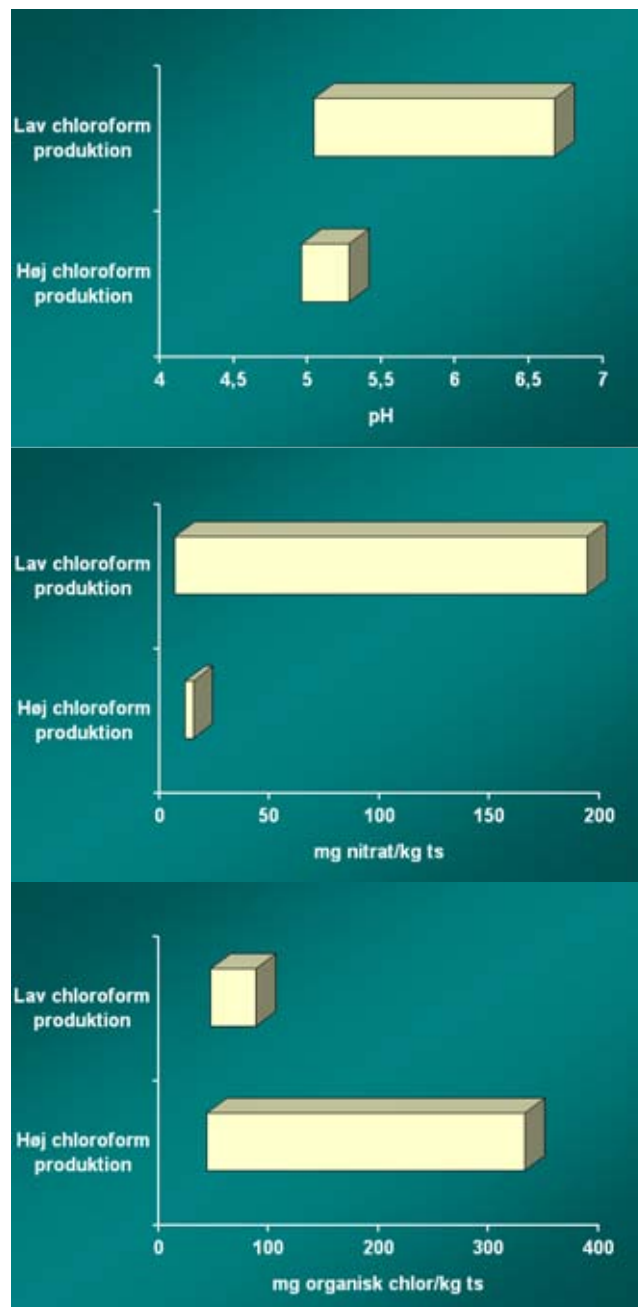
Målinger af jordbundens chloroform produktion foretages bedst ved måling af forholdet imellem chloroform koncentrationen i 50 cm's dybde og i luft, eller ved måling af chloroform produktion i jordprøver ved laboratorietests. Væsentlig chloroform produktion konstateres, når målinger med 95% sikkerhed er større end det, der ses for jordbund, der sædvanligvis ikke påvirker grundvandet væsentligt.

#### 6.5.4 Chloroform produktion og jordbundskemi

Dannelsen af organiske chlorforbindelser generelt i jord synes at være størst for sure jordtyper /62/. For jordprøver fra Viborg Hedeplantage var produktionen af chloroform størst i jord med lav pH, lavt indhold af nitrat (næringsstof) og højt indhold af organisk stof og chlorid /26/. Uorganisk chlorid ("salt") indgår i chloroform produceret i jorden /63/, men tilsætning af ekstra chlorid øger ikke jordens chloroform produktion /26/. Sammenhængen imellem jordbundskemi og jordens chloroform produktion er endnu ikke så veldokumenteret, at der kan opstilles nogle klare grænser for egenskaber, der er nødvendige for en væsentlig chloroform produktion. I Figur 30 er vist jordens pH, nitrat indhold og indhold af organisk bundet chlor (og i mindre omfang andre brom og iod) for jord med lav og høj chloroform produktion.

Forslag til jordbundskemiske analysemetoder for pH og nitrat kan findes i /64/, mens analyser for organisk chlor kan udføres som beskrevet i /65/. Jordprøverne udtages som blandeprøver fra 0 til 10 cm.

Figur 30 Udvalgte jordbundskemiske egenskaber for jorde med lav og høj chloroform produktion



Jordtyper med pH under 5,5, nitrat under 100 mg/kg ts og organisk chlor over 50 mg/kg ts har større sandsynlighed for at producere væsentlige mængder chloroform end jordtyper uden disse egenskaber.

## 6.6 Beslutningsregel for supplerende udredning af naturlig kilde til chloroform

Hvis den supplerende forudsætning for væsentlig chloroform produktion i områdets jordbund er opfyldt:

- Chloroform fra grundvandet viser et kulstof-13 til kulstof-12 forhold i intervallet -15 til -25 ‰  $\delta^{13}\text{C}$

da er en naturlig kilde til chloroform sandsynliggjort. En naturlig kilde kan eventuelt sandsynliggøres af opfyldelse af karakteristisk jordluftprofil, væsentlig chloroform produktion og af de jordbundskemiske forudsætninger:

- Chloroform koncentrationsprofilen i jordluft viser i en biologisk aktiv periode en typisk form med et maximum i ½-1 m.u.t. og et mindst ½ gange lavere koncentrationsniveau mere end 2 m.u.t.
- Målinger af jordbundens chloroform produktion viser med 95% sikkerhed en større produktion end det, der ses for jordbund, der sædvanligvis ikke påvirker grundvandet væsentligt
- Jorden har pH under 5,5, nitrat under 100 mg/kg ts og organisk chlor over 50 mg/kg ts



# 7 Dokumentation af naturlig kilde til chloroform i grundvandet

I dette kapitel gives et forslag til disposition for dokumentation af naturlig kilde til chloroform i grundvand med henvisning til beskrivelserne i kogebogen.

Hvis et vandværk ønsker accept af en koncentration af chloroform i drikkevand i intervallet 1-10 µg/L, skal der indsendes dokumentation for naturlig oprindelse af chloroform i grundvandet til kommunalbestyrelsen, se Kapitel 3. Udredningen for forureningsbestemte og naturlige kilder er overordnet beskrevet i Kapitel 4 og mere detaljeret i Kapitel 5 og 6. Et forslag til disposition for dokumentationen er vist i med henvisning til de afsnit kogebogen, hvor detaljer om den enkelte udredning og de tilhørende beslutningsregler kan findes. Dispositionen er vist for en dokumentation, hvor der ikke har været behov for supplerende udredninger.

Tabel 8 Forslag til disposition for dokumentation af naturlig/forureningsbestemt oprindelse af chloroform til kommunalbestyrelsen

Overskrift	Indhold	Afsnit i kogebogen
Beskrivelse af vandværket	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adresse</li> <li>• Kontaktoplysninger</li> <li>• Årlig produceret vandmængde</li> <li>• Behandlingsanlæg</li> </ul>	-
Chloroform i råvand og drikkevand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel med koncentrationer i råvand og drikkevand</li> <li>• Kort med placering af boringer med råvandsanalyser</li> </ul>	-
Forekomst af andre forureningskomponenter i råvandet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyseprogram, analysemetode, detektionsgrænser, analyselaboratorium, prøvetager og prøvetagningsmetode</li> </ul>	5.1.1
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prøvetagne boringer (henvisning til kort).</li> </ul>	5.1.2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabel med analyseresultater</li> </ul>	-
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konklusion</li> </ul>	5.1.3
Forureningskilder i oplandet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metode for oplandsafgrænsning</li> </ul>	5.2.1
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kort med indtegnet opland</li> </ul>	5.2.1
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kilder til oplysninger om forureningskilder benyttet</li> </ul>	5.2.2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kort med placering af evt</li> </ul>	5.2.2

Overskrift	Indhold	Afsnit i kogebogen
	kilder til chloroform forurening i opland • Konklusion	5.3.2
Naturlige kilder til chloroform i oplandet	• Profil af magasinets geologi med placering på kort • Beskrivelse af dybde til grundvand • Beskrivelse af iltforhold i magasinet • Kort med dominerende arealanvendelse omkring belastede boringer • Konklusion	6.1 6.1 6.2 6.3 6.4
Kontrol	• Kontrol program for boringer og drikkevand	8

Hvis standard udredningen har udløst behov for supplerende udredninger, for eksempel ved fund af kilder til forureningsbestemt chloroform i oplandet for vandværkets boringer, skal resultatet af disse udredninger dokumenteres derudover.



## 8 Overvågning af udvikling i chloroform koncentration

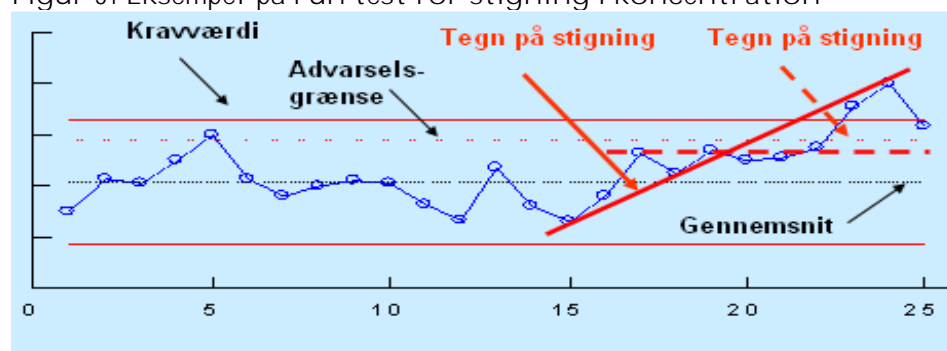
Når der er konstateret chloroform i grundvandet i et magasin, der benyttes til drikkevand, anbefales det at følge udviklingen i koncentration. Tilsvarende gælder, hvis der udføres behandling for chloroform i vandet.

Hvis drikkevandets indhold af chloroform ligger i intervallet 1-10 µg/L indgår udviklingen i chloroform koncentration i en eventuel periodisk revurdering af grundlaget for afgørelse om naturlig eller forureningsbetinget kilde til chloroform, se Kapitel 3. I disse tilfælde bør kontrollen svare til kontrol med organiske mikroforureninger, se Tabel 3, dog ikke færre undersøgelser end 1 per år. Tilsvarende bør der gennemføres boringskontrol af alle belastede boringer årligt.

Koncentrationen vil variere tilfældigt på grund af variationen i grundvandets sammensætning, se Afsnit 2.4.4, men også på grund af usikkerheden på prøvetagning og analyser. På grund af den tilfældige variation kan det være nyttigt at anvende en statistisk vurdering til at sikre, at en opadgående koncentrationsudvikling opdages, inden kvalitetskravet overskrides.

Traditionelt udføres denne type af udviklingskontrol ved såkaldte run tests, der benyttes rutinemæssigt i analyselaboratoriets kvalitetskontrol. Et eksempel på udviklingskontrol er vist i Figur 31. Run test giver mulighed for at opdage en stigende tendens (rød linie) og en tendens til gennemsnit over hidtidigt gennemsnit (stiplet rød linie). Her er run tests tegnet ind i et kontrollkort, som giver et let forståeligt billede af udviklingen.

Figur 31 Eksempel på run test for stigning i koncentration



Udviklingskontrol ved de 2 typer af run test kan gennemføres ved håndregning, f.eks. som beskrevet i /66/. Alternativt kan benyttes en række statistiske program pakker, der har denne type af funktioner. Det almindelige regneark program Excel har til og med Excel 2003 versionen ikke run test funktioner indbygget som standard, men kan udbygges eller programmeres til at foretage run tests. Excel programmets funktioner til tendensanalyse (trend analysis) kan ikke anbefales anvendt direkte pga. den uregelmæssige udvikling i data.

Når koncentrationen af chloroform i et grundvandsmagasin eller i behandlet vand overvåges, kan udviklingskontrol f.eks. som kontrolkort med run tests med fordel benyttes til at få en tidlig advarsel og stigende koncentrationer.

## 9 Rensning af råvand for chloroform

I dette kapitel beskrives reglerne og mulighederne for at rense råvand, så chloroform koncentrationen i drikkevand overholder drikkevandsbekendtgørelsens krav.

Hvis det ikke lader sig gøre at dokumentere, at chloroform i grundvand, der benyttes som råvand til drikkevand, stammer fra en naturlig kilde, må indholdet i drikkevand ikke overstige 1 µg/L /38/. Hvis chloroform kan dokumenteres at komme fra en naturlig kilde, er kravet for drikkevandet 10 µg/L.

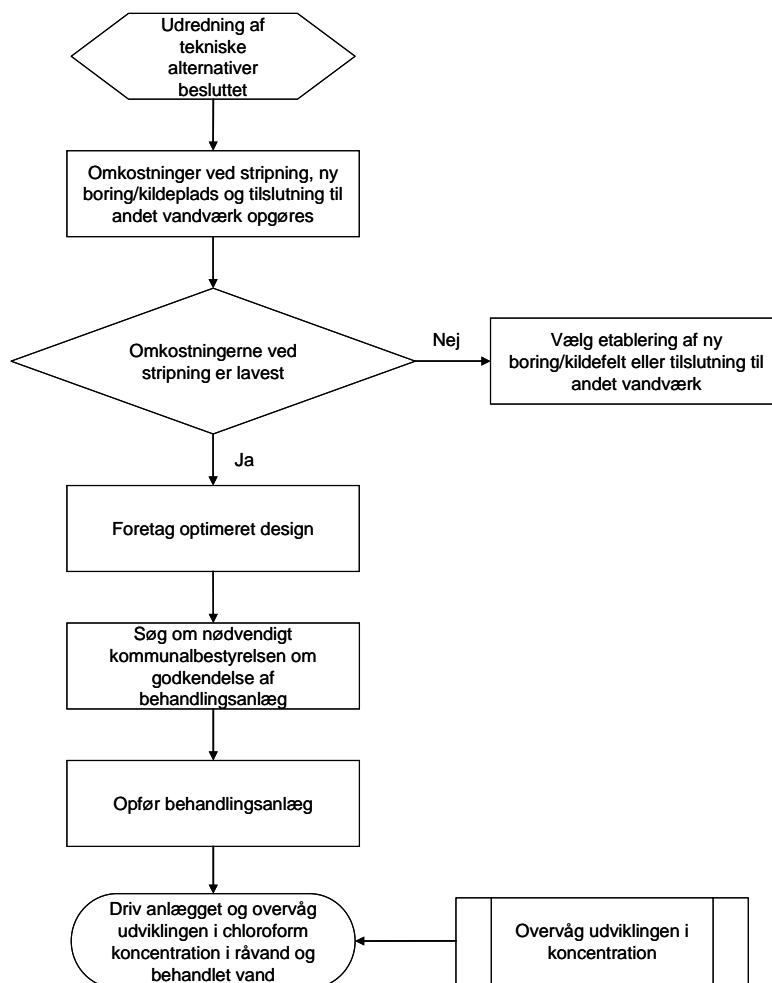
Hvis kravene ikke overholdes, vil vandværket skulle overveje tre tekniske alternativer:

- Etablering af ny boring/kildeplads
- Tilslutning til vandværk med tilfredsstillende vandkvalitet
- Rensning af vandet for chloroform

Valget af det rette alternativ kræver en omhyggelig teknisk-økonomisk vurdering. De to første alternativer vurderes og udføres normalt efter vel afprøvede principper, mens muligheden for rensning er beskrevet nærmere i dette kapitel. Den tekniske baggrund kan findes i /67/. Udgangspunktet for en række beregninger i /67/ har været råvand med 2 µg/L og en målsætning om 0,2 µg/L i behandlet vand.

Forløbet i udredning af tekniske alternativer er vist i Figur 32.

Figur 32 Forløb i udredning af tekniske alternativer



### 9.1 Behandlingsprincipper

Chloroform er et flygtigt organisk stof, se Afsnit 2.1, der er relativt polært, se Bilag A. Chloroform nedbrydes vanskeligt, når der er ilt tilstede, men lettere under iltfrie betingelser, se Afsnit 2.2. Det betyder, at de praktisk mest anvendelige behandlingsprincipper er:

- Beluftning/stripning
- Adsorption

Filtrering vil ikke i sig selv fjerne chloroform. Da chloroform som nævnt nedbrydes langsomt med ilt tilstede, vil aerob mikrobiologisk nedbrydning formodentlig ikke i væsentligt omfang give fjernelse af chloroform. Da forholdene i drikkevandsbehandling af hensyn til funktioner som iltmætning og fjernelse af jern, mangan, svovlbrinte og/eller metan som regel er designet til at være så tæt på aerobe som muligt, vil anaerob mikrobiologisk nedbrydning som hovedregel ikke være praktisk anvendelig.

Avanceret kemisk oxidation og avanceret mikrobiel nedbrydning vurderes ikke i øjeblikket at være en praktisk og økonomisk mulighed for fjernelse af chloroform fra drikkevand /67/.

De praktisk økonomisk anvendelige metoder til behandling af drikkevand for forhøjet chloroform er beluftning/stripping og adsorption.

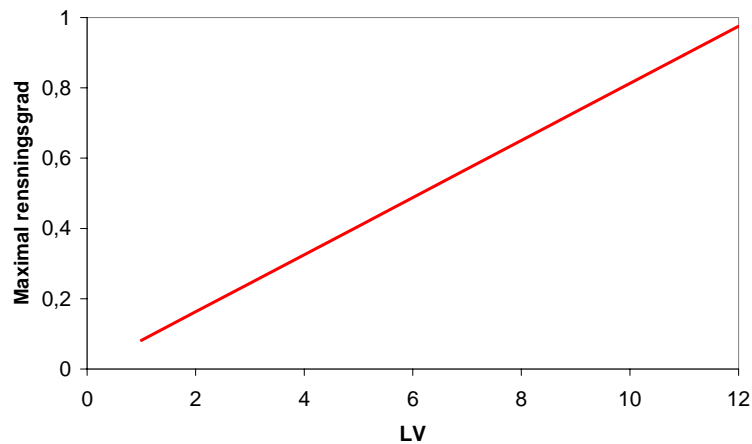
## 9.2 Beluftning og stripping

Beluftning og stripping kan fjerne flygtige organiske stoffer fra vand ved at give stofferne mulighed for at fordampe fra vandet til luften.

Effektiviteten af beluftning og stripping (udtrykt som rensningsgraden, der beskriver brøkdelen af stof fjernet) afhænger af et stofs fysisk kemiske egenskaber (Henry's lov konstanten,  $H$ , beskriver stoffets præference for luft eller vand) og beluftningsgraden (luft vand forholdet,  $LV$ , udtryk for mængden af luft i effektiv kontakt med vandet).

I Figur 33 er vist den teoretisk maksimale rensningsgrad som funktion af luft vand forholdet for chloroform.

Figur 33 Maksimal rensningsgrad som funktion af Luft vand forhold ved beluftning/stripping



I praksis er rensningsgraden væsentlig mindre, fordi der normalt ikke opnås ligevægt imellem luft og vand. Dette kan både skyldes for kort kontakttid og for lille kontaktflade, dvs. for dårlig beluftningseffektivitet, forhold som kan optimeres ved valg af beluftningsmetode.

Praktisk anvendelse af beluftning/stripping til behandling for chloroform kræver en optimering af beluftningsgrad og -effektivitet.

### 9.2.1 Almindelig dansk vandbehandling

Almindelig dansk vandbehandling omfatter beluftning og simpel filtrering, for eksempel i sandfiltre. Beluftningen foregår oftest i luftningsbakker, luftningstrapper eller ved bundbeluftning med et typisk luft vand forhold på omkring 1 /67/ /68/.

I forhold til chloroform kan forventes en mindre reduktion i koncentrationen ved beluftningen, idet chloroform ikke kan forventes tilbageholdt i sandfiltre og ikke forventes nedbrudt under de iltmættede forhold i filtrene. Antages et vand luft forhold på 1, kan rensningseffektiviteten ikke blive større end 0,08 ( $\eta_{\max}$ ), men der må forventes en væsentligt lavere fjernelse pga. en forventet lav beluftningseffektivitet.

Effekten af almindelig dansk vandbehandling på chloroform er ikke dokumenteret /67/, men indledende undersøgelser på Viborg Syd Vandværk har ikke understøttet en væsentlig effekt af normal beluftning.

Effekten af almindelige danske vandbehandlingsprocesser på chloroform er ved fjernelse under beluftning, men der er ikke dokumenteret en væsentlig effekt.

### 9.2.2 Stripning

Ved stripning forstås her beluftning designet til effektivisering af beluftningsgrad og -effektivitet. Almindeligt benyttede metoder er INKA stripper og kolonne stripning.

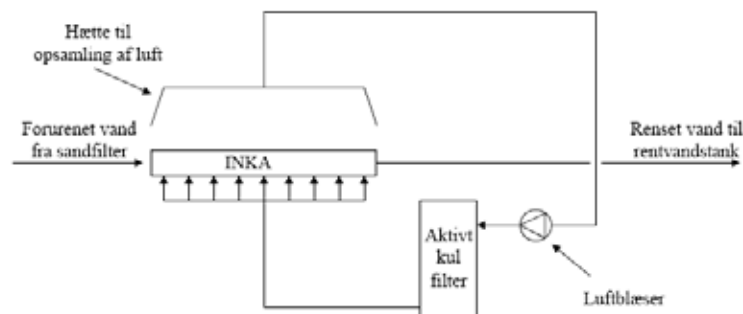
Principperne i de 2 metoder er vist i Figur 34 og Begge metoder tillader en optimering af anlægsdesign, driftsbetingelser og omkostninger ud fra nødvendig rensningsgrad. I optimering skal inddrages, at chloroform koncentrationen kan stige, således at rensningsgraden er tilstrækkelig til behandling indenfor behandlingsanlæggets forventede levetid.

Figur 35. Metoderne er vist med recirkulering af luft, der er nødvendig ved behandling af hårdt vand for at reducere kalkudfældninger under og efter stripping. Recirkulering af luft vil ikke være nødvendig for de fleste grundvandstyper med naturligt forhøjet chloroform indhold, idet disse primært udviser lav hårdhed, se Afsnit 6.1.

INKA strippere findes på en del danske vandværker, men effekten på chloroform er ikke dokumenteret /67/. Der kan forventes en rensningsgrad på mindst 0,9 med et luft vand forhold på omkring 100.

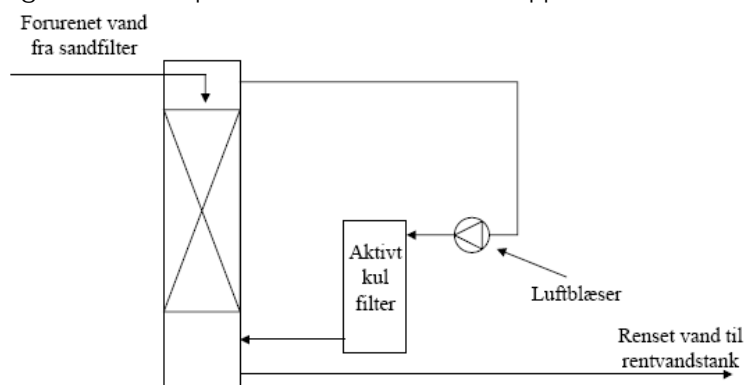
Kolonne strippere findes kun i begrænset omfang på danske vandværker, og igen er effekten på chloroform ikke dokumenteret /67/. Rensningsgraden afhænger af kolonnens design og beluftningsgraden, men mindst 90% kan forventes med et luft vand forhold på omkring 30 i en 9 m høj kolonne med 1 diameter for en produktion på 70 m<sup>3</sup>/time.

Figur 34 Principskitse for INKA stripper med recirkulering af Luft



Begge metoder tillader en optimering af anlægsdesign, driftsbetingelser og omkostninger ud fra nødvendig rensningsgrad. I optimering skal inddrages, at chloroform koncentrationen kan stige, således at rensningsgraden er tilstrækkelig til behandling indenfor behandlingsanlæggets forventede levetid.

Figur 35 Principskitse for kolonne stripper med recirkulering af luft



Vandbehandling med INKA eller kolonne stripper kan fjerne mindst 90% af råvandets chloroform. Rensningsgraden vil afhænge af beluftningsgrad og -effektivitet, dvs. af luft vand forhold og design af anlægget.

### 9.3 Aktiv kul filtrering

I aktiv kul filtrering pumpes vand igennem en kolonne indeholdende partikler af aktivt kul. Organiske stoffer som chloroform bindes til det aktive kul og fjernes dermed fra det gennemstrømmende vand. Det kan ikke forventes, at bundet chloroform nedbrydes på kullet på grund af den langsomme nedbrydelighed af stoffet under de aerobe betingelser, der tilstræbes i aktiv kul kolonner. Kullets kapacitet for fjernelse af chloroform vil derfor blive opbrugt efter et stykke tid, og kullet skal så udskiftes eller regenereres.

Under drift kan der vokse bakterier op på kul materialet, som i et vist omfang afgives til vandet. Derfor kan det være nødvendigt at efterbehandle det aktiv kul filtrerede vand med desinfektion, f.eks. ved belysning med ultraviolet lys (UV-belysning).

Aktiv kul filtrering benyttes i enkelte tilfælde på danske vandværker, primært til fjernelse af rester af sprøjtemidler, men i et enkelt tilfælde også til fjernelse af chlorerede opløsningsmidler, se Afsnit 9.4. Effekten på chloroform er ikke dokumenteret på danske vandværker /67/. En 90% rensningsgrad forventes at kunne opnås med almindelig design af filtreringsanlæg. Aktiv kul skal skiftes hyppigere, hvis grundvandet indeholder meget organisk stof (højt permanganattal eller NVOC, ikke flygtigt organisk stof).

Metoden er ikke velegnet til optimering af anlægsdesign, driftsbetingelser og omkostninger ud fra nødvendig rensningsgrad.

Vandbehandling med aktiv kul filtrering forventes at kunne fjerne mindst 90% af råvandets indhold af chloroform. Rensningsgrad kan afhænge af valg af kulmateriale og råvandets kvalitet i øvrigt.

### 9.4 Godkendelse af vandbehandling for chloroform

Hvis et vandværk beslutter at indføre behandling til fjernelse af chloroform, som kræver væsentlig ændringer af eksisterende anlæg, skal dette godkendes af kommunen /69/. Hvornår en ændring anses at være væsentlig, kan afklares ved henvendelse til kommunalbestyrelsen. Ansøgning skal indeholde



oplysninger om et behandlingsanlægs placering og udformning med begrundelse for anlæggets egnethed; teknisk (kapacitet, forventet vandkvalitet), økonomisk og miljømæssigt.

Anlæg til fjernelse af jern, mangan, methan, svovlbrinte og kuldioxid ved iltning, til fjernelse jern, svovlbrinte og ammonium ved filtrering, samt til neutralisering af aggressivt kuldioxid kræver ikke godkendelse. Disse undtagelser omfatter altså ikke eksplicit anlæg til fjernelse af chloroform. Aktiv kul filtrering er eksplicit nævnt som en metode, der kræver godkendelse.

Der er i perioden 1993 til 2006 i Danmark givet i alt 10 tilladelser til etablering af aktiv kul anlæg og 1 tilladelse til stripning med henblik på fjernelse af organiske forureninger, primært BAM (nedbrydningsprodukt af et sprøjtemiddel) og chlorerede opløsningsmidler /70/. Tilladelsen til stripning er ved godkendelsen betragtet som en simpel beluftning.

Udbygning af vandbehandling til fjernelse af chloroform kræver godkendelse hos kommunen. Udnyttelse af eksisterende vandbehandlingsanlæg til reduktion af chloroform kræver ikke godkendelse.

#### 9.5 Økonomi for behandlingsmetoder

I Tabel 9 er vist en sammenligning af omkostningerne (2004) til behandling af drikkevand for chloroform som beskrevet i /67/. Udgangspunktet for omkostningsberegningerne har været et anlæg med en årlig produktion på 500.000 m<sup>3</sup>, hvor behandlingen er installeret som ny i eksisterende bygninger. Afskrivningsperioden er sat til 15 år eller anlæggets levetid, renten til 6% per år og inflationen til 2,5%. Dimensionering og optimering ud fra nødvendig rensningsgrad er ikke inddraget.

Tabel 9 Omkostninger ved behandling af drikkevand for chloroform ved stripning og aktiv kul filtrering

	INKA stripning	Kolonne stripning	Aktiv kul filtrering
Etablering, kr	420.000	495.000	680.000
Drift per år, kr	35.000	32.000	589.000
Behandlingspris, kr/m <sup>3</sup>	0,14	0,14	1,25

Omkostningerne er vist uden anlæg til recirkulering af stripningsluft (påkrævet ved hårdt råvand) og uden hensyntagen til reduceret levetid af kul (kan forekomme med højt indhold af organisk stof i råvand).

Stripningsmetoderne fremstår klart som de økonomisk mest fordelagtige. Den meget høje pris for aktiv kulfiltrering skyldes først og fremmest de høje omkostninger til udskiftning/regenerering af kul.

### Valg af behandlingsmetode

Råvand med for højt indhold af chloroform kan økonomisk mest fordelagtigt behandles ved stripning. Traditionel vandbehandling med beluftning kan ikke forventes at give væsentlig behandlingseffekt for chloroform, og behandling med aktiv kul er væsentligt dyrere end stripning. Dimensionering af stripningsanlæg skal optimeres til at give den nødvendige rensningsgrad under hensyntagen til forventet udvikling i råvandets chloroform koncentration (fremtidssikring). Installeret stripning som et nyt behandlingstrin, skal der søges godkendelse hos kommunen.

# 10 Ordliste

Aerob .....	9	Indvindingsens opland ...	27
Aktiv kul filtrering .....	57	Indvindingsområde.....	28
Almindelig dansk vandbehandling .....	55	INKA stripper .....	56
Anaerob .....	9	Jordbundskemi.....	40
Analysedetektionsgrænse	26	Jordluft.....	38
Analyseprogram .....	26	Kilder til forureningsbestemt chloroform .....	27
Arealanvendelse .....	38	Klosterhede Plantage ...	16
Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg .....	19	Kolonne strip.....	56
Beluftning .....	55	Koncentrationsprofil.....	40
Beluftningseffektivitet ...	55	Kontrol af indhold af chloroform .....	19
Beluftningsgrad.....	55	Kortlægningen af forurenede grunde.....	30
Chlorbehandling .....	12	Matrikelregistret .....	30
Chlorering af indvindingsboringer .....	13	Miljøegenskaber.....	9
Chloreringsbiprodukter .	12	Naturlig isotopsammensætning .....	40
Chloroform .....	8	Naturlig produktion.....	10
Chloroform i atmosfæren	14	Naturlig produktion af chloroform .....	15
Chloroform produktion	38, 40	Nedbrydning .....	9
Chlorperoxidaser .....	15	Olie- og benzinstoffer ...	26
Dæklag .....	37	Perkolat fra lossepladser	12
Datering .....	17	Prøvetagning.....	26
Dispensation .....	20	Redoxforhold.....	37
Drikkevandkvalitetskrav	19	Rensningsgrad .....	55
Forbrug i Danmark af chloroform .....	11	Sæsonvariationen i grundvandets chloroform .....	17
Forurenede grunde .....	12	Stabile isotoper .....	32
Forurenende aktiviteter .	29	Stripning.....	56
Forureningsbestemt chloroform påvirkning .....	23	Sundhedsmæssige egenskaber .....	10
Fysisk kemiske egenskaber	8	Tingbog.....	31
Geologi og generel grundvandskemi .....	36	Trihalomethaner.....	13
Godkendelse af vandbehandling .....	58	V0 registrering.....	30
Grundvandmoniteringsprogram .....	24	V1 kortlægning .....	30
Grundvandsalder .....	17	V2 kortlægning .....	30
		Viborg Hedeplantage ...	17



# 11 Referencer

1. Joint Research Centre. ESIS (European chemical Substances Information System). European Chemicals Bureau . 2005.
2. Commission of the European Community. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on environmental quality standards in the field of water policy amending Directive 2000/60/C. COM(2006) 397 final. 2006.
3. Commission of the European Community. Proposal for a Directive on environmental quality standards in the field of water policy and amending Directive 2000/60/EC. COM (2006) 397. 2006.
4. EU Parlamentet og Rådet. Direktiv om fastlæggelse af en ramme for Fællesskabets vandpolitiske foranstaltninger ("Vandrammedirektivet"). 2000/60/EF. 2000.
5. Miljøstyrelsen. Listen over farlige stoffer. Miljøstyrelsen . 2005.
6. World Health Organisation: Guidelines for drinking-water quality. 2006,
7. Miljøstyrelsen. Toksikologiske kvalitetskriterier for jord og drikkevand. 12. 1995. Miljø- og Energiministeriet. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen.
8. Laternus,F, Haselmann,KF, Borch,T, Grøn,C: Terrestrial natural sources of trichloromethane (chloroform, CHCl<sub>3</sub>) - An overview. *Biogeochemistry* 60:121-139, 2002
9. World Health Organisation: Chloroform. 1994,
10. World Health Organisation: Trihalomethanes in Drinking-Water. 2005,
11. Amternes Depotenhed. Branchebeskrivelse for garverier. 5 1997. 1997.
12. Amternes Videncenter for Jordforurening. Samling af stofdatablade fra branchebeskrivelser. 7 2002. 2002.
13. Miljøstyrelsen. Branchevejledning for forurenede garverigrunde. Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 9 1998. 1998.
14. Amternes Depotenhed. Branchebeskrivelse for metalforarbejdende virksomheder. 8 1997. 1997.
15. Amternes Depotenhed. Branchebeskrivelse for jern- og metalstøberier. 6 1997. 1997.
16. Amternes Videncenter for Jordforurening. Branchebeskrivelse for metalliseringsvirksomheder. 2 1999. 1999.
17. Amternes Videncenter for Jordforurening. Branchebeskrivelse for elværker og transformstationer. 6 2002. 2002.
18. Amternes Videncenter for Jordforurening. Branchebeskrivelse for renserier. 3 1999. 1999.
19. Amternes Videncenter for Jordforurening. Branchebeskrivelse for autoværksteder. 4 1997. 1997.
20. Christensen,TH, Kjeldsen,P, Bjerg,PL, Jensen,DL, Christensen,JB, Baun,A, Albrechtsen,H-J, Heron,G: Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry* 16:659-718, 2001

21. Kjeldsen,P, Barlaz,MA, Rooker,AP, Baun,A, Ledin,A, Christensen,TH: Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. ***Critical Reviews in Environmental Science and Technology*** 32:297-336, 2002
22. Grøn, C. and Dybdahl, H. P. AOX uderedning. 2000.
23. Miljøstyrelsen. Punktkilder 2004. 9 2005. 2005. Orientering fra Miljøstyrelsen.
24. Barret,MH, Hiscock,KM, Pedley,S, Lerner,DN, Tellam,JH, French,MJ: Marker species for identifying urban groundwater recharge sources: a review and case study in Nottingham, UK. ***Water Research*** 33:3083-3097, 1999
25. Miljøministeriet. Bekendtgørelse 288. Bekendtgørelse om svømmebassiner m.v. og disses vandkvalitet. 2005.
26. Grøn, C. and Larnus, F. Chloroform produktion i jordbund. 12-4-2006.
27. Jacobsen, O. S., Laier, T., Juhler, R. K., Kristiansen, S. M., Dichmann, E., and Grøn, C. Forekomst og naturlig produktion af chloroform i grundvand. Rapport til Miljøstyrelsen. 2007.
28. Class,T, Ballschmiter,K: Chemistry of organic traces in air. ***Fresenius Zeitschrift der Analytische Chemie*** -7, 1986
29. Düzln,Jv, Lahl,U, Bätjer,K, Cetinkaya,M, Stachel,B, Thiermann,W, Gabel,B, Kozicki,R, Podbielski,A: Flüchtige Halogenkohlenwasserstoffe in Luft, Wasser und Nahrungsmitteln in der Bundesrepublik Deutschland. ***Deutsche Lebensmittel-Rundschau*** 78:352-356, 1982
30. Bruckmann,P, Kersten,W, Funcke,W, Balfanz,E, König,J, Theisen,J, Ball,M, Pöpke,O: The occurrence of chlorinated and other organic trace compounds in urban air. ***Chemosphere*** 17:2363-2380, 1988
31. Hinshaw,GD, Trenholm,AR: Hazardous waste incineration emissions in perspective. ***Waste Management*** 21:471-475, 2001
32. Jay,K, Stieglitz,L: Identification and quantification of volatile organic components in emissions of waste incineration plants. ***Chemosphere*** 30:1249-1260, 1995
33. Lemieux,PM, Lutes,CC, Santoianni,DA: Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review. ***Progress in Energy and Combustion Science*** 30:1-32, 2004
34. Larnus,F, Mehrrens,G, Grøn,C: Haloperoxidase-like activity in spruce forest soil - A source of volatile halogenated organic compounds? ***Chemosphere*** 31:3709-3719, 1995
35. Öberg,G, Brunberg,H, Hjelm,O: Production of organically bound chlorine during degradation of birch wood by common white-rot fungi. ***Soil Biology and Biochemistry*** 29:191-197, 1997
36. Larnus,F, Lauritsen,FR, Grøn,C: Chloroform in a pristine aquifer system: Toward and evidence of biogenic origin. ***Water Resources Research*** 36:2999-3009, 2000
37. Haselmann,KF, Larnus,F, Grøn,C: Formation of Chloroform in Soil - A Year-round Study at a Danish Spruce Forest Site. ***Water, Air, and Soil Pollution*** 139:35-41, 2002
38. Miljøministeriet. Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. Bekendtgørelse 1664. 2006.
39. US Geological Survey and US Department of the Interior. Volatile organic compounds in the Nation's groundwater and drinking-water supply wells. 2006.

40. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse. Grundvand 2004. 2005.
41. ISO. Guidance on sampling of drinking water and water used for food and beverage processing. 5667-5. 1991.
42. ISO. Guidance on sampling of groundwaters. 5667-11. 1993.
43. ISO. Guidance on sampling of groundwater at contaminated sites. 5667-18. 2001.
44. ISO. Guidance on Quality assurance of environmental water sampling and handling. 5667-14. 1998.
45. Stuckert, K. and Grøn, C. Håndbog i analysekvalitet for laboratoriebrugere. 2001-4. 2001. København, Denmark, Amternes Videncenter for Jordforurening. Teknik og Administration.
46. Miljøministeriet. Bekendtgørelse om kvalitetskrav til miljømålinger udført af akkrediterede laboratorier, certificerede personer m.v. Bekendtgørelse 1353. 2006.
47. Miljøstyrelsen. Udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser. Vejledning fra Miljøstyrelsen 4 1995. 1995.
48. Miljøstyrelsen. Zonering. Vejledning fra Miljøstyrelsen 3 2000. 2000.
49. Miljøstyrelsen. Metoder til udpegning af indvindingsoplande. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen 8 1995. 1995.
50. Henriksen, H. J., Rasmussen, P., and Knudby, C. Afprøvning af zoneringsmetoder. Miljøprojekt 553 2000. 2000.
51. Miljøstyrelsen. Kortlægning af forurenede arealer. 2000.
52. Kristiansen, SM, Brandt, M, Hansen, EM, Magid, J, Christensen, BT: 13C signature of CO<sub>2</sub> evolved from incubated maize residues. *Soil Biology and Biochemistry* 36:99-105, 2004
53. Beneteau, KM, Aravena, R, Frapce, SK: Isotopic characterization of chlorinated solvents - laboratory and field results. *Organic Geochemistry* 30:739-753, 1999
54. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse. Grundvandsovervågning 2002. 2003. Miljøministeriet.
55. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse. Grundvandsovervågning 1995. 1995.
56. Rambøll. Vurdering af grundvandsressourcen for Viborg Syd Værket. 2002.
57. Haselmann, KF, Ketola, RA, Laturus, F, Lauritsen, FR, Grøn, C: Occurrence and Formation of Chloroform at Danish Forest Sites. *Atmospheric Environment* 34:187-193, 2000
58. Grøn, C. AOX in Groundwater. Grimvall, A. and de Leer, E. W. B. Naturally-Produced Organohalogenes, Selected and Edited Proceedings of the First International Conference on Naturally Produced Organohalogenes, September 14-17, 1993, Delft, Holland, 49-64. 1995.
59. Christophersen, M, Broholm, M, Karapanagioti, HR, Burganos, VN, Mosbæk, H, Kjeldsen, P: Transport of hydrocarbons from an emplaced fuel source experiment in the vadose zone at Airbase Værløse, Denmark. *Journal of Contaminant Hydrology* 81:1-33, 2005
60. Rivett, MO: Soil-Gas Signatures from Volatile Chlorinated Solvents: Borden Field Experiments. *Ground Water* 33:84-98, 1995
61. Rambøll, NIRAS, and Hedeselskabet. Håndbog for poreluftundersøgelser. Teknik & Administration nr. 7. 1998. Amternes Videncenter for Jordforurening.

62. Öberg,G, Börjesson,I, Samuelsson,B: Net change in organically bound halogens in relation to soil pH. *Water, Air, and Soil Pollution* 89:351-361, 1996
63. Hoekstra,EJ, de Leer,EWB, Brinkmann,UAT: Natural formation of chloroform and brominated trihalomethanes in soil. *Environmental Science & Technology* 32:3724-3729, 1998
64. Plantedirektoratet. Fælles arbejdsmetoder for jordbundsanalyser. 1994.
65. Öberg,G, Grøn,C: Sources of Organic Halogens in Spruce Forest Soil. *Environmental Science & Technology* 32:1573-1579, 1998
66. Jensen, V. J., Andersen, K. J., and Lund, U. O. Håndbog i intern kvalitetskontrol på miljølaboratorier. 2001. Hørsholm, Denmark, DHI Water & Environment.
67. Rambøll. Rensningsmuligheder for chloroform i vand. 2004.
68. Linde-Jensen JJ, Jensen HT, Andersen EB, Winter L, Mikkelsen I: Vandforsyningsteknik. Polyteknisk Forlag, 1976,
69. Miljøministeriet. Bekendtgørelse om vandindvinding og vandforsyning. Bekendtgørelse 1609. 2006.
70. Miljøstyrelsen: Erfaringsopsamling inden for tilladelser til videregående vandbehandling. 2007,
71. Syracuse Research Corporation. SRC PhysProp Database. web . 2003.
72. Holm, J. and Kjærgaard, M. Manual for program til risikovurderinger - JAGG (Jord, Afdampning, Gas, Grundvand). Miljøprojekt no. 520. 2000. Miljøstyrelsen.
73. EU Ministerrådet. Rådets Direktiv om kvaliteten af drikkevand. Direktiv 98/83/EF. 1998.
74. Cambridgesoft. ChemFinder. 2003.
75. Miljøstyrelsen. Kemisk profil over sammensætningen af olie og benzin. Udkastrapport . 2006.
76. Miljøstyrelsen. Oprydning på forurenede lokaliteter. Miljøstyrelsens Vejledninger nr. 6 og 7 1998. 1998.
77. Nordic Council of Ministers. SPIN Substances in Preparations in Nordic Countries. Nordic Council of Ministers . 2004.
78. Grøn, C., Laturus, F., Borch, T., and Haselmann, K. F. Kloroform i vand fra skove. 34, 77-86. 2003. Skov & Landskab. Skovbrugsserien, Rapporter for fagfolk.
79. Auer,NR, Manzke,BU, Schulz-Bull,DE: Development of a purge and trap continuous flow system for the stable carbon isotope analysis of volatile halogenated organic compounds in water. *Journal of Chromatography A* 24-36, 2006
80. Hunkeler,D, Aravena,R: Determination of Compound-Specific Carbon Isotope Ratios of Chlorinated Methanes, Ethanes, and Ethenes in Aqueous Samples. *Environmental Science & Technology* 34:2839-2844, 2000
81. Jochmann,MA, Blessing,M, Haderlein,SB, Schmidt,TC: A new approach to determine method detection limits for compound-specific isotope analysis of volatile organic compounds. *Rapid Communication in Mass Spectrometry* 20:3639-3648, 2006
82. Zwank,L, Schmidt,TC, Haderlein,SB: Compound-Specific Carbon Isotope Analysis of Volatile Organic Compounds in the Low-Microgram per Liter Range. *Analytical Chemistry* 75:5575-5583, 2003



83. Holt,BD, Sturchio,NC, Abrajano,TA, Heraty,LJ: Conversion of Chlorinated Volatile Organic Compounds to Carbon Dioxide and Methyl Chloride for Isotopic Analysis of Carbon and Chlorine. *Analytical Chemistry* 69:2727-2733, 1997
84. Jendrzewski,N, Eggenkamp,HGM, Coleman,ML: Characterisation of chlorinated hydrocarbons from chlorine and carbon isotopic compositions: scope of application to environmental problems. *Applied Geochemistry* 16:1021-1031, 2001
85. Jensen, V. J. Kvalitetssikring af analyseresultater inden for det kemiske og mikrobiologiske vandanalyseområde. 9-10-1987. Hørsholm, Denmark, VKI (now DHI water & Environment).
86. Schwarzenbach RP, Gschwend PM, Imboden DM: Environmental Organic Chemistry. Wiley, 1993,
87. US EPA. EPA On-line tools for Site Assessment Calculation. 23-5-2007.
88. ISO. ISO 2854. 2007.



# 12 Supplerende læsning

## ***Udvalgte oversigtsartikler på dansk***

O.S. Jacobsen, D. Hunkeler, S.M. Kristiansen, C. Grøn & F. Laturus. Naturlig chloroform produktion og indhold i grundvand undersøgt ved monitoring, kemiske målinger og isotopteknik, Møderapport fra ATV Jord og Grundvand vintermøde, 6. – 7. marts, 2007.

Grøn, C., Laturus, F., Borch, T. & K.F. Hasselmann, Kloroform i vand fra skove, i: Grundvand fra Skove – muligheder og problemer, Skovbrugsserien 34: 77-86 (2003).

Laturus, F., Borch, T., Haselmann, K.F. & C. Grøn, Hvor naturligt er chloroform, Vand & Miljø 9 (4): 84-88 (2002).

Grøn, C., Lauritzen, M. & M.S. Poulsen, Baggrundskoncentrationer af chlorerede opløsningsmidler i luft og jordluft, møderapport fra ATV-komitéen vedrørende Jord- og Grundvandsforurening møde, 26. oktober, 1994.

Grøn, C. & U. Lund, Organisk halogen i grundvand, Vand & Miljø, 7 (7):248-253 (1990).



## Data og baggrundsoplysninger



Tabel A1 Udvalgte fysisk, kemiske og nedbrydningsmæssige egenskaber for chloroform, benzen og vand /1;71;72/

Stof	Kemisk navn/ formel	CAS nummer	Molekylvægt	Smeltepunkt
Chloroform	Trichlormethan, CHCl <sub>3</sub>	67-66-3	119 g/mol	-64°C
Benzen	Benzen, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	71-43-2	78,1 g/mol	5,5°C
Vand	Vand, H <sub>2</sub> O	7732-18-5	18,0 g/mol	0°C
Stof	Kogepunkt	Opløselighed i vand	Fordelings- koefficient, log K <sub>ow</sub>	Damptryk
Chloroform	61°C	8,0 g/L	1,97	197 mm Hg
Benzen	80°C	1,8 g/L	2,13	94,8 mm Hg
Vand	100°C	-	-1,38	23,8 mm Hg
Stof	Henry's lov konstant	Vægtfylde	Aerob nedbrydelighed	Anaerob nedbrydelighed
Chloroform	0,0037 atm m <sup>3</sup> /mol	1,48 g/mL	0 dage <sup>-1</sup>	0,006 dage <sup>-1</sup>
Benzen	0,0056 atm m <sup>3</sup> /mol	0,879 g/mL	0,01 dage <sup>-1</sup>	0,001 dage <sup>-1</sup>
Vand	<0,001 atm m <sup>3</sup> /mol	1,00 g/mL	-	-

Tabel A2 Sundhedsmæssige egenskaber af chloroform.

EU grænse /73/	WHO grænse /6/	Sundhedsklassificeringer /1/	
100 µg/L <sup>2</sup>	300 µg/L	Mulighed for kræftfremkaldende effekt	Carc3; R40
		Sundhedsskadelig Farlig ved indtagelse Farlig: alvorlig sundhedsfare ved længere tids påvirkning ved indånding og indtagelse	Xn; R22 R48/20/22
		Lokalirriterende Irriterer huden	Xi; R38

<sup>2</sup> Trihalomethaner samlet, fra 2008





Data og metoder benyttet til figurer  
og tabeller



Figur 1 Kemisk formel for chloroform  
3D fremstilling fra /74/.

Figur 2 Fordeling af chloroform imellem vand, luft og sediment  
Beregning af fasefordeling baseret på fugacitet, data fra Tabel A1, Bilag A, for et system med 10% slam, 45% vand og 45% luft. Metoden er beskrevet i /75/, men svarer principielt til den metode, der benyttes til risikovurdering af forurenede grunde /72;76/.

Figur 3 Nedbrydningsforløb for chloroform og til sammenligning for benzen  
Nedbrydningsforløb er beregnet som første ordens nedbrydning med hastighedskonstanter angivet i Tabel A1, Bilag A.

Figur 4 Koncentrationer af chloroform i produkter med krav om risikomærkning eller sundhedsbaseret grænseværdi i drikkevand  
Koncentrationsgrænser for mærkning er som angivet i /1/, og som grænse for risiko for kræft i drikkevand er benyttet WHO's forslag til grænseværdi i drikkevand /6/.

Figur 5 Kilder til chloroform i atmosfæren  
Kilder til chloroform i atmosfæren som opgjort i /8/.

Figur 6 Forbrug i Danmark af chloroform fordelt på forskellige anvendelser  
Det årlige danske forbrug af chloroform er vist som opgjort i den fælles nordiske database /77/ for årene 2000-2005 og opdelt på udvalgte anvendelser.

Figur 7 Dannelse af chloroform ved chlorbehandling af vand med chloorgas  
Principskitsen er optegnet uden afstemning af reaktionsligninger mm. og baseret på /22/.

Figur 8 Eksempler på chloroformkoncentrationer i chlorbehandlet vand  
Intervaller for indhold i spildevand er koncentrationer i indløb til danske rensesanlæg som opgjort i /23/, intervallet for indhold i drikkevand er fra 500 vandbehandlingsanlæg i USA som refereret i /10/, og intervallet for indhold i svømmebadsvand er for 30 svømmehaller og 16 friluftsbade i Japan som opsummeret i /22/.

Figur 9 Naturlige kilder til chloroform i atmosfæren på landjorden  
Kilder til chloroform i atmosfæren som opgjort i /8/.

Figur 10 Dannelse af chloroform ved enzymatisk nedbrydning af organisk stof i jorden  
Principskitse baseret på en række forskningsresultater som vist i /78/.

Figur 11 Skovbund i granskov med tæt bevoksning med svampe  
Billede fra Viborg Hedeplantage (Foto: Frank Laturus, september 2004).

Figur 36 Koncentrationer af chloroform i et terrænnært grundvandsmagasin  
Principskitse baseret på undersøgelser i Klosterhede Plantage som beskrevet i /36/.

Figur 13 Principskitse for produktion af transport i skovbund, transport til grundvandet og variation i produktion og transport over året

**Skitsen er baseret på målinger af chloroform koncentrationer i luft, jordluft og grundvand foretaget i Store Bøgeskov, Sjælland, Klosterhede Plantage og Viborg Hedeplantage /27;36;37/.**

Figur 14 Forløb i udredning om naturlig eller forureningsbestemt kilde til chloroform i drikkevand

**Ingen supplerende oplysninger.**

Figur 15 Forløb i deludredninger af muligheden for forureningsbestemt chloroform

**Ingen supplerende oplysninger.**

Figur 16 Hyppighed af påvisning af chloroform og udvalgte andre organiske chlorforbindelser i GRUMO

**Opgørelse af forekomst af chloroform og andre organiske chlorforbindelser (chlormethaner, -ethaner, -ethener og -phenoler) i GRUMO programmet 1992-2003 /27/.**

Figur 17 Påvisninger af organiske chlorforbindelser i det danske grundvandsmoniteringsprogram 2000-2005

**Opgørelse af forekomst af chloroform og andre organiske chlorforbindelser (chlormethaner, -ethaner, -ethener og -phenoler) i GRUMO programmet 2000-2005 /40/.**

Figur 18 Eksempel på beregnet beskrivelse af en indvindings opland  
**Eksempel på beregning og optegning af indvindingsopland fra /49/.**

Figur 19 Eksempel på modelbaseret afgrænsning af en indvindings opland fra en kortlægning af indsatsområder

**Afgrænsning af en indvindings opland baseret på partikelbanesimulering ved hjælp af grundvandsmodellen MIKE SHE.**

Figur 20 Forløb i supplerende udredning af forureningsbestemt chloroform

**Ingen supplerende oplysninger.**

Figur 21 Forholdet kulstof-13 til kulstof-12 i chloroform med forskellig oprindelse

**Isotopforholdet for uforurennet grundvand er fundet for 6 boringer til uforurennet grundvand under skov ved Viborg og Thisted /27/. Isotopforholdet for forurennet grundvand er fundet for en boring ved en losseplads og en boring i Thisted by, mens isotopforholdet for industrielt fremstillet chloroform blev fundet for et nyindkøbt og et gammelt produkt /27/, samt fra opgivelser i litteraturen (/79-84/.**

Figur 22 Forløb i vurdering af muligheden for naturlig chloroform  
**Ingen supplerende oplysninger.**

Figur 23 Chloroform i grundvand påvirket af forskellig areal anvendelse

**Chloroform koncentrationerne er målt i Viborg Hedeplantage, september 2004 og givet for de øverste filtre, hvor der er prøvetaget mere end ét filter**

/27/. Arealanvendelsen er registreret efter kort og flyfoto for selve boringen og for området opstrøms for boringen.

Figur 24 Koncentrationer af chloroform i luften og i jordluft under forskellig arealanvendelse

Chloroform koncentrationerne er målt i Viborg Hedeplantage og givet for 30 cm dybde for jordluft /27/. Arealanvendelsen er registreret efter kort og flyfoto.

Figur 25 Produktion af chloroform fra jordprøver med forskellig arealanvendelse

Chloroform produktionen er målt i jordprøver udtaget fra 4 forskellige arealanvendelser og med test i tripliket over 2½ time /26;27/. Resultaterne er givet som intervallet gennemsnit ± standardafvigelsen.

Figur 26 Forløb i supplerende udredning af muligheden for naturlig chloroform

Ingen supplerende oplysninger.

Figur 27 Koncentrationsprofil af chloroform i jordluft og umættet zone

Figuren viser en principskitse først og fremmest baseret på undersøgelser i Klosterhede Plantage /36;58/ og Store Bøgeskov /57/, men understøttet af undersøgelser i Viborg Hedeplantage og Tved Plantage /27/.

Figur 28 Forhold imellem chloroform produktion for nåleskov og mark vurderet ved forskellige metoder

Faktor jordluft til luft er beregnet som forholdet imellem faktoren i nåleskov og på mark. Laboratorie- og feltproduktion giver direkte produceret mængde chloroform per vægt jord inkuberet, og forholdet imellem produktion af jord fra nåleskov og græsmark er vist. Faktor baseret på grundvandskoncentration er forholdet imellem chloroform indhold primært påvirket af mark og primært påvirket af nåleskov. Data er baseret på resultater fra Viborg Hedeplantage /27/.

Figur 29 Variation i resultater for chloroform produktion opnået ved forskellige metoder

Variationen er beregnet som relativ standardafvigelse på data for forskellige metoder til vurdering af chloroform produktion i jordbunden baseret på resultater fra Viborg Hedeplantage /27/.

Figur 30 Udvalgte jordbundskemiske egenskaber for jorde med lav og høj chloroform produktion

Data fra jorde med høj chloroform produktion er fra nåleskov, mens lav produktion er for løvskov, græsmark og kornmark kombineret. Resultaterne er givet som intervallet gennemsnit ± standardafvigelsen. Data er baseret på resultater fra Viborg Hedeplantage /26/

Figur 31 Eksempel på run test for stigning i koncentration

Run test er udført som beskrevet i /85/, og illustrationen er omtegnet fra /45/.

Figur 32 Forløb i udredning af rensningsmuligheder

Ingen supplerende oplysninger.

Figur 33 Maksimal rensningsgrad som funktion af luft vand forhold ved belutning/stripping

Kurven er beregnet ud fra en ubenævnt Henry's lovkonstant på 12,3 og ligevægt imellem luft og vand som beskrevet i /67/.

Figur 34 Principskitse for INKA stripper med recirkulering af Luft  
Tegning fra /67/.

Figur 35 Principskitse for kolonne stripper med recirkulering af Luft  
Tegning fra /67/.

Tabel 1 Miljømæssige egenskaber af chl oroform  
Ingen supplerende oplysninger

Tabel 2 Chl oroform koncentrationer i grundvandet beregnet ud fra luftkoncentrationer for forskellig arealanvendelse  
Intervaller for luftkoncentrationer af chloroform for forskellig arealanvendelse er samlet fra /9;28-30;36/. Den tilsvarende koncentration af chloroform i grundvandet er beregnet efter Henry's lov /86/ under anvendelse af en dimensionsløs Henry's lov konstant beregnet på /87/

Tabel 3 Hyppighed af kontrol med indhold af chl oroform i drikkevand  
Kontrolkrav er fra /38/

Tabel 4 Priser for analyseprogrammer som kr per prøve eksklusive moms gældende d. 30. maj 2007  
Priser er indhentet fra de 3 største kommercielle danske analyselaboratorier, og priserne fra 2 af disse benyttet i tabellen. Priserne fra det sidste laboratorium var væsentligt højere.

Tabel 5 Kilder til oplysninger om forureningsbestemt chl oroform i et opland  
Ingen supplerende oplysninger.

Tabel 6 Priser for analyse for kulstofisotoper i chl oroform som kr per prøve eksklusive moms gældende d. 30. maj 2007  
Priser er søgt fra universiteterne i Toronto, Neuchatel, Oklahoma, Californien og Duisburg Essen, fra Baltic Sea Research Institute og fra firma Isodetect. Priserne fra 2 af disse er benyttet.

Tabel 7 Betingelser for undersøgelser af chl oroform produktion i jordbunden  
Forventede værdier af chloroform koncentration og produktion er baseret på undersøgelser i Viborg Hedeplantage og Tved Plantage /27/. Nødvendigt antal prøver er baseret på ønsket om 95% konfidensinterval for sammenligning af gennemsnit med fast værdi, ensidet test, som beskrevet i /88/, kombineret med behovet for tilstrækkeligt mange prøver til beregning af standardafvigelse.

Tabel 8 Forslag til disposition for dokumentation af naturlig/forureningsbestemt oprindelse af chl oroform til kommunalbestyrelsen  
Ingen supplerende oplysninger.

Tabel 9 Omkostninger ved behandling af drikkevand for chl oroform ved stripning og aktiv kul filtrering  
Beregningsforudsætninger og -metoder kan ses i /67/.