

20

Mikrobiel kvalitet og desinfektion

Grundvand og overfladevand, der anvendes som råvand på vandværker, indeholder altid mikroorganismer i forskellige koncentrationer. Drikkevand indeholder således som udgangspunkt altid levende mikroorganismer i små koncentrationer, når vandet forlader vandværket efter normal vandbehandling. De fleste mikroorganismer stammer fra grundvandet samt de forskellige trin i vandbehandlingen. Disse mikroorganismer omfatter ofte en blanding af virus, bakterier, svampe, protozoer og eventuelt alger. Disse naturlige mikroorganismer repræsenterer sjældent en sundhedsrisiko. Mange organismer herunder bakterier er endda involveret i nyttige bio-geo-kemiske renseprocesser på vandværker. Problemer opstår først, når koncentrationerne af mikroorganismer er forhøjet, eller når fremmede mikroorganismer forurener drikkevandet. I dette kapitel beskrives forhold der kan føre til forekomst af uønskede mikroorganismer i drikkevand, samt metoder, der kan bruges til desinfektion.

- Råvand og drikkevand er yderst sjældent sterilt og indeholder næsten altid en blanding af forskellige mikroorganismer i lave koncentrationer (bakterier, svampe, protozoer, alger og virus).
- Drikkevand er et af vores vigtigste levnedsmidler og hver dansker drikker i gennemsnit 1-2 L vand om dagen.
- I Danmark undersøges råvand og drikkevand for mere end 50 fysiske og kemiske parametre, mens der kun undersøges regelmæssigt for 4 mikrobiologiske indikatorparametre: kimtal ved 22 °C og 36 °C samt coliforme bakterier og *E. coli*.

20.1 Naturlige mikroorganismer i drikkevand

20.1.1 Kimtal

Kim er en dansk fællesbetegnelse for mikroorganismer i en prøve og omfatter blandt andet forskellige bakterier og svampe. I praksis bestemmes kimtallet som de mikroorganismer, der kan vokse og danne synlige kolonier i et næringsrigt vækstmedium ved enten 22 °C eller 36 °C (figur 20.1). Kimtallet er således en indikator for antallet af dyrkbare mikroorganismer i prøven. Størstedelen af de kim, der måles i dansk drikkevand med den officielle standardmetode DS/EN ISO 6222 /20.1/, er aerobe heterotrofe bakterier (ånder med ilt og udnytter organisk stof som kulstofkilde). Disse bakterier repræsenterer imidlertid kun en delmængde af det totale antal mikroorganismer i prøven. Det er således helt normalt, at det totale antal mikroorganismer i drikkevand er 10-1000 gange højere end kimtallet. Det antages dog, at der er en vis proportionalitet mellem kimtallet (f.eks. 1-100 pr. mL) og det totale antal mikroorganismer i drikkevandet (f.eks. 10^3 - 10^5 pr. mL).

Figur 20. 1. Vandkvalitetskrav for kimtalt i drikkevand /20.2/.

Indikator	Vandkvalitetskrav pr. mL		Metode	Information
	Afgang vandværk	Indgang ejendom		
Kim (22 °C)	50 (10) ¹⁾	200	DS/EN ISO 6222 eller ækvivalent metode /20.1/	Indikator for antallet af naturligt forekommende aerobe mikroorganismer. Et forhøjet antal kim tyder på nedsat vandkvalitet og eventuelt vækst. Forekomst kan skyldes interne eller eksterne kilder.
Kim (36 °C)	5	20	DS/EN ISO 6222 eller ækvivalent metode	Indikator for antallet af aerobe mikroorganismer, der kan vokse ved legemstemperatur. Et forhøjet antal kim (36 °C) tyder på nedsat vandkvalitet og indikerer, at sygdomsfremkaldende mikroorganismer kan være til stede. Forekomst kan skyldes interne eller eksterne kilder.

1) Gælder for vand hvor der anvendes desinfektion.

Kimtallet opgives ofte som CFU pr. mL, hvor CFU står for *Colony Forming Units (kolonidannende enheder)*. I Danmark anvendes kimtallet målt ved 22 °C som et udtryk for antallet af naturlige mikroorganismer i vandet, mens kimtallet målt ved 36 °C anvendes som et mål for antallet af mikroorganismer, der kan vokse ved legemstemperatur. Forhøjede værdier for kimtalt (36 °C) er generelt mere problematiske end kimtalt (22 °C), fordi den førstnævnte gruppe har større sandsynlighed for at kunne formere sig i mennesker (figur 20.1).

Ved koncentrationer for kimtal (36 °C) på >50 CFU pr. mL for afgang vandværk og >200 CFU pr. mL i ledningsnettet tilrådes koge anbefaling /20.3/. Tilsvarende tilrådes koge anbefaling, hvis koncentrationer for kimtal (22 °C) er >500 CFU pr. mL for afgang fra vandværk og >2000 CFU pr. mL i ledningsnettet. Ved alle værdier der overskrider vandkvalitetskravene for kimtal (figur 20.1), anbefales generelt et teknisk tilsyn og udtagning af nye prøver /20.3/.

20.1.2 Årsager til forhøjet kimtal

Det bedste værn mod høje kimtal i drikkevand er at eliminere eller begrænse de faktorer, der fører til mikrobiel vækst. Eksempler på sådanne faktorer er:

- Lange hydrauliske opholdstider.
- Forhøjet vandtemperatur.
- Forekomst af organiske forbindelser (fx humus, metan m.m.).
- Forekomst af uorganiske forbindelser (Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2 , H_2S , NH_4^+ , PO_4^{3-}).
- Rørmaterialer som afgiver letomsættelige stoffer (fx organiske additiver).
- Forekomst af overskydende materiale fra anlægs- og reparationsarbejde.

Normalt vil det være muligt at identificere den eller de parametre, der er de begrænsende faktorer for vækst på vandværket eller i ledningsnettet. Eksempelvis vil der ske vækst af kim ved alle normale drikkevandstemperaturer, men væksthastigheden vil være 2-3 gange større ved 20 °C sammenlignet med 10 °C. Ved 15 °C kan fordoblingstider for kim i dansk drikkevand nærme sig 12-24 timer under optimale forhold /20.4/ og /20.5/. I praksis betyder det, at lange opholdstider og forekomst af vandtemperaturer over de anbefalede 12 °C skal begrænses, hvis det er muligt /20.2/.

Forekomst af naturlige og syntetiske organiske stoffer i vandet kan føre til vækst af mikroorganismer på vandværker og eftervækst på ledningsnettet /20.4/. For disse stoffer er det hovedsageligt den bioomsættelige del af det organiske kulstof, som kan udgøre et problem. Denne fraktion kaldes *assimilerbart organisk kulstof* (AOC) og udgør kun en delmængde af NVOC (*non-volatile organic carbon*). Eksempelvis vil kun en lille del af det organiske indhold i humus umiddelbart kunne omsættes af bakterier og andre mikroorganismer. I visse situationer kan frigivelse af AOC fra nyere rør lavet af polymermaterialer som PE og PVC også spille en rolle for eftervækst af kim i drikkevand /20.6/.

Forekomst af forbindelser som CH_4 , Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2 , H_2S medfører ikke direkte en stigning i kimtallet. Imidlertid kan disse stoffer udnyttes som energikilde af andre typer mikroorganismer i drikkevand, og således indirekte føre til en stigning i kimtallet via overførsel af næringsstoffer mellem bakteriegrupper. NH_4^+ og PO_4^{3-} er uorganiske næringsstoffer, som kan udnyttes som kvælstof- og fosforkilde af mange mikroorganismer i drikkevand og dermed bidrage til forhøjet kimtal.

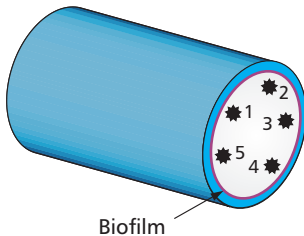
20.2 Biofilm i drikkevand

20.2.1 Drikkevandsbiofilm

Biofilm optræder ofte som slimede belægninger på vandrør, ventiler og andet materiale, der er i kontakt med drikkevand. Biofilm består af en blanding af levende og døde mikroorganismer indlejret i en bakterieslim af organiske polymerer og forskellige uorganiske forbindelser (figur 20.2 og figur 20.3). Biofilm indeholder ofte flere næringsstoffer end det omgivende vand, og det er ikke ualmindeligt at biofilm i drikkevandssystemer indeholder mere end 10^6 bakterier pr. cm^2 . Det betyder i praksis, at for langt de fleste rørtyper der bruges i dansk vandforsyninger, vil over 90 % af de mikroorganismer der findes på en given ledningsstrækning, befinde sig i biofilm på røroverfladerne og ikke i selve drikkevandet.

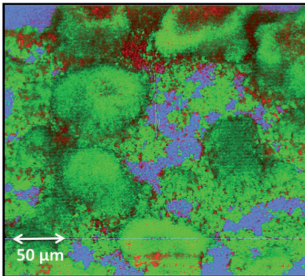
Mikroorganismer herunder bakterier optages og frigives løbende fra biofilm i ledningsnettet og afrivning af bakterier ved f.eks. trykstød kan føre til tilstopninger og forhøjede kimtal. Derudover kan drikkevandsbiofilm være levested for forskellige sygdomsfremkaldende mikroorganismer (se også afsnit 20.8).

Figur 20.2.
Eksempler på
komponenter
i en drikke-
vandsbiofilm



- 1 Uorganiske udfældninger (f.eks. kalk, jern, mangan)
- 2 Organiske udfældninger (f.eks. humus)
- 3 Naturlige mikroorganismer
- 4 Biologiske slimstoffer (expolymerer)
- 5 Evt. fremmede mikroorganismer

Figur 20.3.
Nærbillede
af en bakte-
riebiofilm.



20.2.2 Faktorer der påvirker biofilmdannelse

Biofilm i vandforsyninger kan sjældent undgås, men væksten kan begrænses ved at eliminere eller begrænse nogle af de samme faktorer som påvirker kimtallet i vandet herunder lang hydraulisk opholdstid, forhøjet vandtemperatur, forekomst af organiske og uorganiske forbindelser og rørmaterialer som afgiver letomsættelige stoffer (se også afsnit 20.1.2).

Nogle materialer vil i højere grad end andre fremme dannelse af biofilm på overflader. I figur 20.4 er vist en forenklet oversigt over potentialet for dannelse af drikkevandsbiofilm på forskellige typer materialer. Forskellene i biofilmpotentiale vil være størst for nye materialer, mens mængden af biofilm efterhånden vil blive mere sammenlignelig efter længere tids kontakt med drikkevand (>12 måneder). Derudover vil der naturligt være nogle variationer afhængig af den nøjagtige fysiske og kemiske sammensætning af materialerne /20.7/.

Figur 20.4.
Potentialet
for dannelse af drikkevandsbiofilm på forskellige materialer.

Materiale	Biofilmpotentiale
Beton	+
Rustfrit stål	++
Støbejern	+++
Polyethylen (PE)	++++
Polyvinylchlorid (PVC)	++++
Gummi	+++++

20.3 Mikrobielle forureninger

Mikrobielle forureninger i drikkevand består oftest af fremmede mikroorganismer, der ikke naturligt forekommer i råvandet og er tilført udefra. I visse tilfælde kan der også være tale om mikroorganismer, der normalt forekommer i meget lave koncentrationer i drikkevandet (under detektionsgrænsen) og som pludselig forekommer i forhøjede koncentrationer (f.eks. nogle typer coliforme bakterier). I det følgende beskrives kort nogle eksempler på mikroorganismer, der kan forekomme i drikkevand i forbindelse med mikrobielle forureninger.

20.3.1 Fækale bakterier

Sygdomsfremkaldende (patogene) fækale bakterier kan forekomme i drikkevand, hvis der er sket forurening med afføring fra dyr eller mennesker. De mest kendte sygdomsfremkaldende, fækale bakterieslægter omfatter *Campylobacter*, *Helicobacter*, *Salmonella*, *Shigella*, *Vibrio* og *Yersinia*. Det skal dog bemærkes, at det ikke altid er muligt skarpt at adskille patogene og ikke-patogene slægter, og nogle arter og stammer kan være harmløse, mens andre kan forårsage alvorlig sygdom. Eksempelvis findes der en række tarmpatogene *E. coli*-stammer, selvom denne bakterie normalt betragtes som en ikke-patogen indikatorbakterie. I de fleste tilfælde vil vandbårne, fækale, patogene bakterier i første omgang give anledning til hovedpine, feber, diarré og eventuelt opkast. Inkubationstiden er normalt nogle timer til få dage. I sjældne tilfælde kan infektioner med fækale bakterier føre til mere alvorlige komplikationer

som blodforgiftning og meningitis. Den mængde af bakterier, der vil medføre en infektion hos mennesker (infektiv dosis), afhænger af bakterietypen, men ligger typisk i området 100 til 10^6 levende celler for fækale bakterier. Nogle bakterier som *Campylobacter* inaktiveres relativt hurtigt i vand (timer-dage), mens andre som Salmonella og patogene *E. coli*-stammer kan overleve i flere uger. Det kan imidlertid være vanskeligt nøjagtigt at fastsætte overlevelse af fækale bakterier i drikkevand, da bakterierne ofte er stressede og derfor vil befinde sig i en dvaletilstand, hvor de er levende, men ikke umiddelbart kan påvises med traditionelle målemetoder.

20.3.2 Legionella

Bakteriegruppen *Legionella* består af mindst 40 sygdomsfremkaldende arter, hvoraf *Legionella pneumophila* er den mest kendte. *Legionella pneumophila* kan forårsage Pontiac-feber (influenzalignende sygdom) og legionærsyge (kraftig lungebetændelse). *Legionella* smitter hovedsageligt via inhalering af vandaerosoler (små vanddråber). Den infektiøse dosis for *Legionella* kan være forholdsvis lille (<1000 bakterieceller). Der er over 100 tilfælde af Legionærsyge i Danmark hvert år, hvoraf 15-20 % har dødelig udgang. Yderst få af disse tilfælde kan dog spores tilbage til dansk drikkevand og skyldes andre årsager. *Legionella* kan imidlertid forekomme i vandforsyninger i meget lave koncentrationer i forbindelse med biofilm og sedimenteret materiale i rør og tanke. *Legionella* vil normalt ikke formere sig ved vandtemperaturer under 20 °C, men kan være et stort problem i varmtvandssystemer med vandtemperaturer mellem 20 og 50 °C. *Legionella* kan endda overleve kortvarig opvarmning til temperaturer over 50 °C, mens temperaturer over 60 °C normalt er dødelig. På grund af *Legionellas* sygdomsfremkaldende egenskaber er det vigtigt at være opmærksom på utilsigtet opvarmning af råvand og drikkevand. Derudover kan forurening med overfladevand introducere *Legionella* i rentvandssystemer, som efterfølgende kan forårsage problemer, hvis vandet opvarmes.

20.3.3 Virus

Virus er små intracellulære parasitter, hvilket betyder, at de ikke kan formere sig alene, men kræver en værtsorganisme for at kunne vokse. Virus har ikke noget stofskifte og kan i visse sammenhænge betragtes som meget små partikler med en længde i størrelsesordenen nm- μ m (10^{-9} - 10^{-6} m). Vandbårne virus omfatter grupper som *Enterovirus*, *Hepatitis virus*, *Reovirus*, *Rotavirus*, *Adenovirus*, *Astrovirus*, *Torovirus*, *Calicivirus* og *Picobirnavirus*. Vandbårne fækale virus kan forårsage en række sygdomme hos mennesker herunder hovedpine, feber, diarré og opkast (f.eks. Roskildesyge), men også mere alvorlige sygdomme som leverbetændelse og meningitis. Den infektiøse dosis for vandbårne fækale virus er ofte lav (<100 viruspartikler). Inkubationstiden i forbindelse med forekomst af feber, diarré og opkast er normalt få timer til få

dage. Fækale virus findes hovedsageligt i afføring fra dyr og mennesker og kan finde vej til vandforsyninger i forbindelse med forskellige typer fækal forurening. Fækale virus overlever formentlig længere end fækale bakterier i dansk drikkevand og kan blandt andet indlejres i eksisterende drikkevandsbiofilm (se også figur 20.10).

20.3.4 Protozoer

Protozoer er store, encellede mikroorganismer og omfatter organismer med danske navne som flagellater, amøber, infusionsdyr, slimdyr og sporedyr. Protozoer er generelt større (μm til mm) end bakterier og findes i visse typer afføring, men også i jord, overfladevand og i forbindelse med planter. Nogle protozoer er i stand til at danne cyster (hvilestadier) som er meget modstandsdygtige over for stress og forskellige typer desinfektion. De fleste protozoer er harmløse, men enkelte vandbårne typer som *Giardia* og *Cryptosporidium* kan forårsage alvorlig sygdom hos mennesker med kraftig diarré og opkast (eksempelvis *Giardia lamblia* og *Cryptosporidium parvum*). Den infektiøse dosis for *Giardia* og *Cryptosporidium* er ofte lav (<100 cyster). Inkubationstiden kan være flere dage, før sygdommen bryder ud. Husdyr og vilde dyr uden tegn på sygdom kan være bærere af og udskille cyster af *Giardia lamblia* og *Cryptosporidium parvum*. I udlandet har *Giardia* og *Cryptosporidium* været en væsentlig kilde til alvorlig vandbåren sygdom som følge af forurenede råvand. I udviklingslande med nedsat vandkvalitet er amøbedysenteri også udbredt. Denne sygdom skyldes hovedsageligt protozoen *Entamoeba histolytica*. Protozoer overlever formentlig længere end fækale bakterier i drikkevand, men dette er ikke undersøgt for danske forhold. Udenlandske undersøgelser har vist, at cyster af *Giardia* og *Cryptosporidium* kan overleve i uger til måneder i koldt vand [20.8].

Figur 20.5.
Forskelle på virus, bakterier, svampe og protozoer i grundvand og drikkevand.

	Virus	Bakterier	Svampe (gær og skimmel)	Protozoer
Størrelse	nm	μm	μm -mm	μm -mm
Cellekerne og membranbundne organeller	÷	÷	+	+
Stofskifte	÷	+	+	+
Værtsorganisme nødvendig for formering	+	÷	÷	÷
Aktiv rolle i omsætning af naturlige og miljøfremmede forbindelser	÷	+	+	+
Naturlig forekomst i grundvand	+	+	+	+
Forekomst af patogene arter ved fækal forurening	+	+	+	+

20.3.5 Mikrobielle forureningskilder

Flere undersøgelser tyder på, at mikrobielle forureninger optræder hyppigere i danske vandforsyninger end tidligere antaget /20.9/. Problemet synes størst for små og ældre vandforsyninger. Mikroorganismer kan forurene råvand og vandforsyninger på en række forskellige måder:

- Nedsivning fra septitanke og utætte kloakrør
- Nedsivning fra opbevaringspladser for husdyrgødning (f.eks. møddinger)
- Oversvømmelse af kildepladser
- Luftbåren forurening ved vandbehandling (f.eks. i forbindelse med iltning og filterskylning)
- Indsivning ved ledningsbrud og reparationsarbejde
- Utætte beholderanlæg
- Fejlkoblinger på ledningsnettet og i husinstallationer herunder tilbagesugning og forekomst af defekte kontraventiler.

20.4 Indikatorbakterier i drikkevand

Coliforme bakterier, *E. coli* og enterokokker blev introduceret som fækale indikatorbakterier i forrige århundrede /20.10/. Disse bakterier regnes normalt ikke for sygdomsfremkaldende, men indikerer, at patogene mikroorganismer kan være til stede i drikkevandet (figur 20.6). Selvom der er sket store fremskridt inden for det mikrobiologiske område, herunder udvikling af nye metoder til hurtig og præcis påvisning af egentlige sygdomsfremkaldende mikroorganismer, må det forventes, at *E. coli*, enterokokker og eventuelt coliforme bakterier vil vedblive at være en del af den obligatoriske overvågning af vandkvalitet i de kommende år.

20.4.1 Coliforme bakterier og *E. coli*

Coliforme bakterier er en fællesbetegnelse for en gruppe af beslægtede bakterier, som findes i afføring fra dyr og mennesker. Nogle coliforme bakterier forekommer dog også i visse typer jord og overfladevand samt i forbindelse med planterester. Gruppen af coliforme bakterier omfatter blandt andet medlemmer fra bakterieslægterne *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Escherichia*, *Klebsiella* og *Serratia*. Forekomst af coliforme bakterier i råvand og drikkevand bruges som indikator for forurening med fremmede bakterier. Nye undersøgelser tyder dog på, at nogle coliforme bakterier kan forekomme i lave baggrunds niveauer i visse typer råvand (<1 pr. 100 mL). *E. coli* er derimod en coliform bakterie som næsten udelukkende lever i tarmen på mennesker og varmblodede dyr. *E. coli* findes ikke naturligt i dansk grundvand, og forekomst af denne tarmbakterie i råvand og drikkevand indikerer en forurening med en kilde, der indeholder afføring fra enten dyr eller mennesker (fækal forurening). Forekomst af *E. coli* i koncentration

≥1 pr. 100 mL bør føre til udstedelse af en koge anbefaling eller kogepåbud, samt teknisk tilsyn og kildesopsporing /20.3/. Forekomst af coliforme bakterier i koncentrationer på 1-20 pr. 100 mL (men ingen *E. coli*) bør føre til teknisk tilsyn og udtagning af nye prøver, mens der ved koncentrationer >20 pr. 100 mL tilrådes koge anbefaling /20.3/.

Indikator	Vandkvalitetskrav pr. 100 mL		Metode	Information
	Afgang vandværk	Indgang ejendom		
Coliforme bakterier	< 1	< 1	DS/EN ISO 9308-1 eller ækvivalent metode /20.11/	Indikator for forekomst af fremmede bakterier. Målbare forekomst af coliforme bakterier tyder på nedsat vandkvalitet og mulig forurening med bakterier som ikke normalt findes i drikkevandet. Indikerer at sygdomsfremkaldende mikroorganismer kan være til stede. Forekomst skyldes ofte eksterne forureningskilder som jord, overfladevand eller fækalier.
<i>E. coli</i>	< 1	< 1	DS/EN ISO 9308-1 eller ækvivalent metode /20.11/	Indikator for forekomst af fækale bakterier. Målbare forekomst af <i>E. coli</i> tyder på nedsat vandkvalitet og forurening med fækalier. Indikerer at sygdomsfremkaldende mikroorganismer sandsynligvis er til stede. Forekomst skyldes eksterne forureningskilder (kilder med afføring fra dyr eller mennesker).
Enterokokker	< 1	< 1	DS/EN ISO 7899-2 eller ækvivalent metode/20.12/	Indikator for forekomst af fækale bakterier. Målbare forekomst af enterokokker tyder på nedsat vandkvalitet og forurening med fækalier. Indikerer at sygdomsfremkaldende mikroorganismer sandsynligvis er til stede. Kan supplere målinger for <i>E. coli</i> . Forekomst skyldes eksterne forureningskilder (kilder med afføring fra dyr eller mennesker).
<i>Clostridium perfringens</i> herunder sporer*	< 1	< 1	DS 2256 eller ækvivalent metode /20.13/	Indikator for forekomst af fremmede anaerobe bakterier. <i>C. perfringens</i> danner modstandsdygtige sporer (hvilestadium). Målbare forekomst af <i>C. perfringens</i> tyder på nedsat vandkvalitet og sandsynlig forurening med bakterier som ikke bør forekomme i drikkevandet. Indikerer at sygdomsfremkaldende mikroorganismer kan være til stede.

* *C. perfringens* måles kun hvis der anvendes overfladevand eller hvis drikkevandet påvirkes af overfladevand.

Figur 20.6. Vandkvalitetskrav for fækale indikatorbakterier i drikkevand /20.2/.

20.4.2 Enterokokker

Enterokokker er en fællesbetegnelse for en gruppe af nært beslægtede indikatorbakterier. Gruppen af enterokokker indeholder mere end 30 forskellige arter, hvoraf mange overvejende findes i tarmen på mennesker og dyr (intestinale enterokokker). De mest almindelige enterokokker i afføring fra mennesker er *Enterococcus faecalis* og *Enterococcus faecium*. Enterokokker er generelt ikke sygdomsfremkaldende. Enterokokker kan være mere robuste end *E. coli*, men deres overlevelse i dansk drikkevand er ret sammenlignelig. Enterokokker kan dog være mere modstandsdygtige over for desinfektion end *E. coli*. Intestinale enterokokker findes ikke naturligt i dansk grundvand, og forekomst af disse bakterier i råvand og drikkevand indikerer en forurening med en kilde, der indeholder afføring fra enten dyr eller mennesker. Frisk afføring fra mennesker indeholder ofte flere *E. coli* end enterokokker, hvorimod afføring fra nogle dyr domineres af bestemte enterokokker. Nuværende praksis anbefaler, at der kun måles for enterokokker i drikkevand, hvis der i forvejen er påvist *E. coli* /20.2/. Ved forekomst af enterokokker i koncentration >1 pr. 100 mL tilrådes kogeanbefaling, teknisk tilsyn og kildesopsporing /20.3/.

20.5 Overlevelse af mikrobielle forureninger i drikkevand

Alle fækale mikroorganismer kan overleve en vis periode i dansk drikkevand, men egentlig vækst vil ikke forekomme under normale driftsforhold. Protozoer og fækale virus er generelt bedre overlevende i næringsfattige miljøer end fækale bakterier. Mange fækale bakterier kan dog tilpasse sig de næringsfattige forhold i drikkevand ved at nedsætte deres stofskifte og overgå til en slags dvaletilstand, hvorved de kan forblive levende i mange dage /20.4/. Fækale bakterier kan dog ikke formere sig i traditionelle, danske vandforsyninger som følge af den lave vandtemperatur og de lave koncentrationer af organiske næringsstoffer. Generelt vil overlevelsen af fækale mikroorganismer i drikkevand øges med følgende faktorer:

- Tilstedeværelse af letomsætteligt organisk kulstof.
- Tilstedeværelse af overflader og biofilm.
- Lave koncentrationer af konkurrerende mikroorganismer.
- pH >6 og pH <8 .
- Lave iltkoncentrationer.
- Lave vandtemperaturer.

Vandtemperaturens betydning for overlevelse af *E. coli* i drikkevand er illustreret i figur 20.7. Ændring i væksten af kim ved tilsvarende vandtemperaturer er ligeledes angivet. Bemærk, at vandtemperaturer mellem 8 og 20 °C

generelt har modsat rettede effekter på henholdsvis overlevelse af *E. coli* og vækst af kim. Sammenhængen mellem overlevelse (henfald) af fækale bakterier og temperatur kan beskrives som

$$C = C_0 \cdot e^{(K_h \cdot t)} \quad (20.1)$$

hvor

C er den aktuelle bakteriekoncentration [antal L^{-1}]

C_0 er startkoncentrationen [antal L^{-1}]

K_h er en temperaturafhængig henfaldskonstant

t er tiden [h].

K_h kan beskrives som

$$K_h = -\alpha_T \cdot T - K_0 \quad (20.2)$$

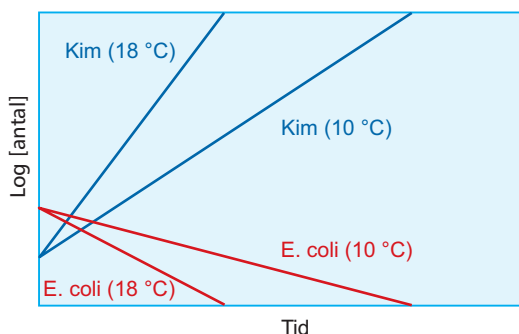
hvor

K_0 er henfaldskonstanten ved $T = 0^\circ C$ [h^{-1}]

α_T er en aktivitetskonstant [$h^{-1} \cdot K^{-1}$]

T er vandtemperaturen [$^\circ C$].

Figur 20.7. Betydning af vandtemperaturen for vækst af kim og overlevelse af *E. coli* i drikkevand.

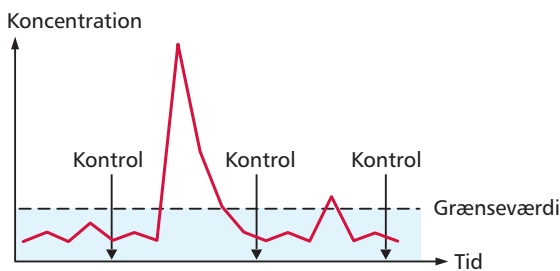


20.6 Prøvetagningshyppigheder

Monitering af mikrobiologisk drikkevandskvalitet er baseret på periodiske stikprøvekontrol og prøvetagningshyppigheder afhænger af den producerede vandmængde /20.2/. Små og mellemstore vandforsyninger kontrollerer således vandkvaliteten med en hyppighed på én gang pr. måned eller mindre, mens store vandforsyninger udtager prøver hyppigere /20.2/ og /20.15/. Det betyder i praksis, at kun relativt langvarige forureninger med en tilpas høj intensitet vil blive påvist med de gældende kontrolhyppigheder /20.15/ og /20.16/. I figur 20.8 er vist et teoretisk forløb af en drikkevandsforurening med

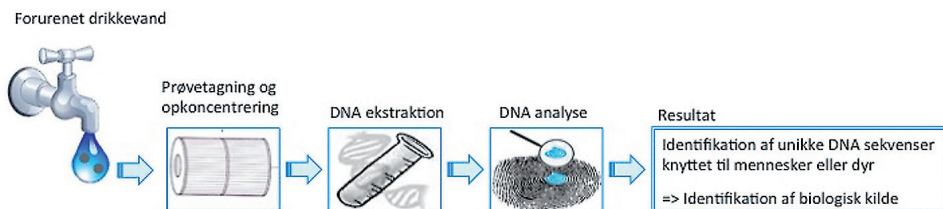
tilhørende lovpligtige prøvetagninger for en mellemstor vandforsyning. Figuren illustrerer, at kortvarige forureningsepisoder ikke nødvendigvis registreres med gældende lovpligtig stikprøvekontrol og prøvetagningshyppigheder.

Figur 20.8. Lovpligtig prøvetagning med en fækal forurening i en mellemstor vandforsyning delvist efter /20.16/.



20.7 Karakterisering og sporing af bakterielle forureningskilder

Påvisning af fækale indikatorbakterier som *E. coli* og enterokokker i drikkevand tyder på en bakteriel forurening, men forekomst af disse parametre siger imidlertid ikke noget om kilden til forureningen. Det skyldes, at disse indikatorbakterier kan forekomme i mange forskellige typer fækale forureninger. En forureningssituation kan imidlertid håndteres mere effektivt, både teknisk og sundhedsmæssigt, hvis man kender forureningstypen. I den forbindelse kan forskellige molekylærbiologiske metoder med fordel bruges til karakterisering af drikkevandsforureninger /20.18/ og /20.19/. De fleste metoder er baseret på analyse af DNA i det forurenede vand (figur 20.9) for derigennem at identificere den mest sandsynlige forureningstype (spildevand, overfladevand m.m.). Hvis man kender den mest sandsynlige forureningstype, er det ofte nemmere at lokalisere det sted i vandforsyningen, hvor forureningen er opstået.



Figur 20.9. Principper bag molekylær kildesporing af fækale forureninger.

20.7.1 Forureningsmarkører

I dag findes der forureningsmarkører for mennesker (spildevand) og en række husdyr og vilde dyr /20.19/. Disse molekylære markører er ofte baseret på unikke DNA- eller RNA-sekvenser i mikroorganismer knyttet til bestemte

værtsorganismer men kan også bestå af arvemateriale, der stammer direkte fra dyr eller mennesker. For de fleste metoder gælder det, at analyserne kan foretages i løbet af få timer eller dage. Denne service tilbydes af flere laboratorier og rådgivere i Danmark. For at forureningsmarkørerne kan bruges i praksis, er det dog vigtigt, at der gemmes bevismateriale i forbindelse med forureningsager i form af vandprøver og relevant biologisk materiale. Disse prøver vil efterfølgende kunne bruges i sammenligning med formodede forureningskilder og til sammenligning med mikroorganismer, der måtte forekomme i forbindelse med sygdomsudbrud. Da nogle kilde-specifikke forureningsmarkører kan optræde i forholdsvis lave koncentrationer i forurennet drikkevand, kan det være nødvendigt at opkoncentrere biologisk materiale ved at filtrere større mængder drikkevand (>1 L) og derefter gemme materialet.

Molekylære kildeporingsmetoder er først og fremmest kvalitative, men i nogle tilfælde fås også en kvantitativ information om mængden af de forskellige forureningsmarkører.

Kildeporingsmetoderne vil ofte kunne identificere:

- Fækale forureninger, der stammer fra mennesker (spildevand, septiktanke og lignende).
- Fækale forureninger, der stammer fra dyr (fugle, snegle, rotter, møddinger, og lignende).
- Relativ koncentration af forureningen i forskellige dele af ledningsnettet.
- Verifikation af forureningens oprindelse ved direkte sammenligning med potentielle forureningskilder i nærområdet.

Molekylære kildeporingsmetoder kan supplere traditionelle metoder til opsporing af forureningskilder. Disse metoder omfatter blandt andet intensiveret prøvetagning i udvalgte dele af vandforsyningen kombineret med analyse for coliforme bakterier og *E. coli* /20.3/. Vandprøver udtaget til den traditionelle form for kildeopsporing kan med fordel analyseres med forskellige hurtigmetoder for at få et hurtigere svar, end hvad der kan opnås med standardmetoderne for indikatorbakterier. Ved overskridelser for fækale bakterier anbefales generelt udtagning af vandprøver i forbindelse med:

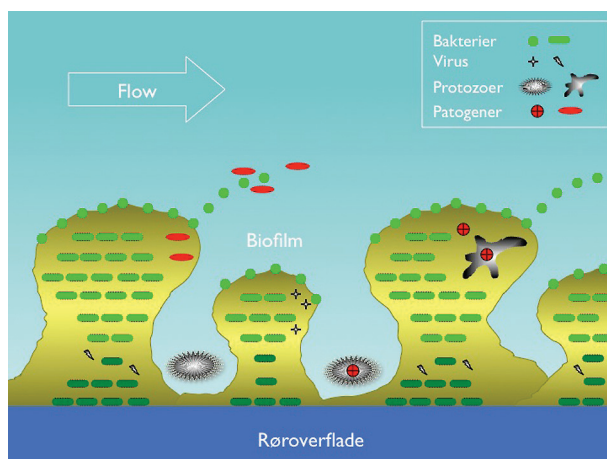
- Relevante borer
- Fælles råvand
- Trin i vandbehandlingen på vandværket
- Rentvandsbeholdere
- Afgang fra vandværket
- Højdebeholdere eller andre magasintyper på ledningsnettet
- Vand fra repræsentative taphaner på ledningsnettet.

Identifikation af de dominerende mikroorganismer i forbindelse med mikrobielle forureninger kan i nogle tilfælde også bidrage til kildesporing, da visse typer vandforurening kan resultere i forskellige karakteristiske mikrobielle forekomster /20.3/. Derudover kan analyse for egentlige patogener som for eksempel *Campylobacter*, *Salmonella*, *Shigella* og fækale virus bruges til sammenligning med eventuelle sygdomsfund i forsyningsområdet.

20.8 Rensning

I forbindelse med akutte mikrobielle forureninger af vandforsyninger kan det være nødvendig med rensning af dele af et vandforsyningsanlæg. Før en rensning og eventuel desinfektion igangsættes, er det dog nødvendigt at finde årsagen til forureningen, således at kilden afskæres før yderligere aktiviteter sættes i gang. I modsat fald kan problemet hurtigt vende tilbage, og indsatsen vil være forgæves. Rensning af vandforsyningsanlæg foregår ofte som en gennemskylning med rent vand ved almindeligt vandtryk. Denne rensning kan eventuelt kombineres med anvendelse af en mekanisk svamp eller gris (se også kapitel 25) samt eventuelt højtryksspuling /20.20/. Gennemskylning vil fjerne størstedelen af den del af den mikrobielle forurening, der findes fritlevende i vandforsyningen som planktoniske (fritsvævende) organismer i ledningsnet, beholderanlæg, husinstallationer og lignende men vil have meget begrænset effekt på den del af forureningen, der findes i biofilm de pågældende steder.

Figur 20.10. Forekomst og frigivelse af mikroorganismer fra drikkevandsbiofilm.



Som tidligere nævnt kan mikrobielle forureninger indlejres i eksisterende drikkevandsbiofilm, hvorved biofilm fungerer som et midlertidigt reservoir og dermed forsinkes udvaskning af bakterieforureninger fra beholderanlæg og ledningsnet (figur 20.10). En skylning vil således hurtigt reducere antallet af fritlevende mikroorganismer i vandet, hvorimod fremmede mikroorganis-

mer i biofilm vil være mere beskyttede og ofte først frigøres efter længere tid. På denne måde kan eksempelvis bakterier i biofilm på røroverflader forurene ledningsnettet på trods af grundig gennemskylning, og dermed føre til periodvis forekomst af indikatorbakterier, uden at der tilsyneladende er en ydre årsag. På trods af denne ulempe bør gennemskylning og spuling uden brug af kemikalier normalt forsøges, før man overvejer en egentlig desinfektion. Frigivelse fra biofilm kan i nogle tilfælde også observeres som sporadisk forekomst af indikatorbakterier ved rutinemålinger, og kan indikere en forudgående ukendt forureningshændelse (se for eksempel den sekundære top til højre i figur 20.8).

20.9 Mikroorganismer og desinfektion

Forekomst af mikrobielle forureninger eller forhøjede koncentrationer af naturlige mikroorganismer kan medføre et behov for desinfektion af drikkevand. Ved en desinfektion inaktiveres en stor del af de mikroorganismer som findes i vandet. I Danmark anvendes desinfektion forholdsvis sjældent på almindelige vandværker, mens man i udlandet traditionelt har brugt desinfektion langt hyppigere blandt andet som følge af brugen af overfladevand som råvand (se kapitel 19). Der er dog registreret en stigende interesse for anvendelse af visse typer desinfektion i danske vandforsyninger blandt andet i forbindelse med videregående vandbehandlinger.

20.9.1 Desinfektionsmetoder

Generelt kan desinfektion af drikkevand ske ved anvendelse af forskellige fysiske og kemiske metoder herunder filtrering, bestråling og tilsætning af kemiske desinfektionsmidler (biocider). Der er nogle betingelser som skal være opfyldt for at en desinfektionsmetode eller kombination af metoder kan bruges /20.7/.

Desinfektionsmetoden:

- Skal være effektiv over for alle typer mikroorganismer i drikkevandet.
- Skal være effektiv ved naturlige fluktuationer i råvandskvaliteten (fysiske-kemiske og biologiske variationer).
- Må ikke resultere i vand, der har væsentlig forringet æstetisk karakter eller er toksisk over for mennesker og dyr ved de anvendte doseringer.
- Skal være sikker og brugervenlig for de personer, der arbejder processen.
- Skal gerne være omkostningseffektiv ved etablering og drift.

I danske vandforsyninger har de mest populære desinfektionsmetoder historisk omfattet chloring og UV-behandling, mens ozon hovedsageligt har været brugt i udlandet (se også afsnit 20.9.3, 20.9.6 og 20.9.7).

20.9.2 Desinfektionskinetik

Inaktivering af mikroorganismer ved desinfektion kan generelt beskrives ud fra Chick-Watson modellen som er en simpel førsteordensreaktion /20.21/:

$$N_t = N_0 \cdot e^{(-K \cdot D \cdot t)} \quad (20.3)$$

hvor

N_0 og N_t er koncentrationen af mikroorganismer ved henholdsvis start og ved tiden t

K er en konstant

D er dosis af desinfektionsmiddel eller UV-stråling

t er tiden.

Det betyder i praksis, at effektiviteten af en desinfektion afhænger af dosis og reaktionstid. Ved normal desinfektion reduceres antallet af mikroorganismer med en faktor 10^3 til 10^5 (99,9-99,999 %). Drikkevand er således ikke nødvendigvis sterilt efter desinfektionen, men kan stadig indeholde levende bakterier og andre mikroorganismer, men nu i en væsentlig lavere koncentration end før behandlingen. Effektiviteten (E) af forskellige kemiske desinfektionsmetoder kan udtrykkes som

$$E = C \cdot t \quad (20.4)$$

hvor

C er koncentration af desinfektionsmidlet (f.eks. mg L⁻¹).

t er den tid, det tager at opnå en ønsket desinfektionsgrad ved en given koncentration af desinfektionsmiddel.

$C \cdot t$ refereres ofte blot som CT -værdier.

Tilsvarende kan effektiviteten af en UV-behandling beskrives som

$$E = I \cdot t \quad (20.5)$$

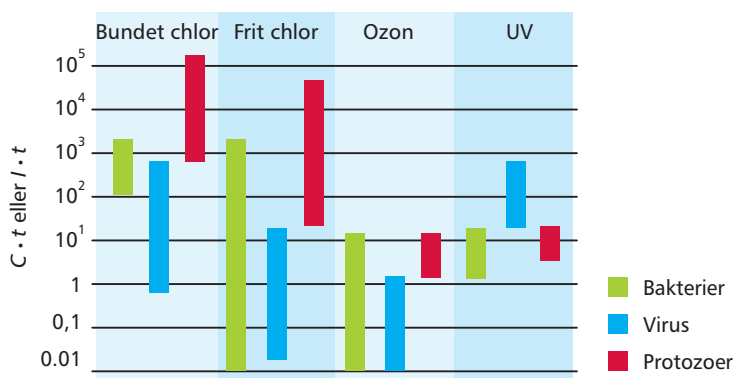
hvor

I er UV-lampens intensitet (f.eks. $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$).

t er eksponeringstiden.

Figur 20.11 viser eksempler på CT - og $I \cdot t$ -værdier for bakterier, virus og protozoer i forbindelse med chlor, ozon og UV-behandling. Det ses, at protozoer ofte er mere modstandsdygtige overfor traditionelle desinfektionsmetoder sammenlignet med bakterier (kræver højere CT - og $I \cdot t$ -værdier).

Figur 20.11. Eksempler på niveauer for desinfektion, der er nødvendig for at inaktivere 99% af bakterier, virus og protozoer



20.9.3 Chloring

Chlorforbindelser er oxidationsmidler og desinficerer ved at ødelægge (oxidere) ydre overflade, enzymer og strukturelle komponenter i mikroorganismer. Forskellige former af chlor kan anvendes som desinfektionsmidler herunder frit chlor (hypochlorsyre og hypochlorit) og bundet chlor (mono-, di- og trichloramin). Ved opløsning i vand danner chlor på gasform følgende ligevægt:



Hypochlorsyre (HOCl) kan herefter dissociere og danne hypochloritioner (OCl⁻):



Ligevægten mellem HOCl og OCl⁻ i drikkevand er vigtig for desinfektionsprocessen, da HOCl er et mere effektivt desinfektionsmiddel end OCl⁻.

Hydrolyse af Cl₂ og dissociering af HOCl er pH-afhængig og stiger med stigende pH. Ved pH < 2 vil det meste chlor findes som Cl₂ mens HOCl dominerer ved pH op til omkring 6. Ved pH > 9 dominerer OCl⁻. På grund af denne pH-afhængighed stiger effektiviteten af desinfektion med frit chlor med fallende pH. Ved en pH i omkring 7,5 vil der være omtrent lige meget HOCl og OCl⁻ i drikkevand.

Når chlor tilsættes drikkevand stiger koncentrationen af frit chlor ikke altid proportionalt med den tilsatte chlormængde. I starten vil en stor del af den tilsatte chlor reagere med organisk stof i vandet og eventuelt reducerede uorganiske forbindelser som Fe²⁺ og Mn²⁺. Dette chlorforbrug medfører en lav koncentration af frit chlor og deraf følgende lav desinfektionskapacitet. Ved yderligere chlortilsætning vil der opstå et chloroverskud som efterfølgende kan oxidere vandets indhold af kvælstofholdige forbindelser herunder ammoniak (NH₃). Dette resulterer i dannelse af bundet chlor i form af monochloramin (NH₂Cl):



Ved yderligere chlortilsætning vil NH_2Cl omdannes til di- og trichloramin (NHCl_2 og NCl_3):

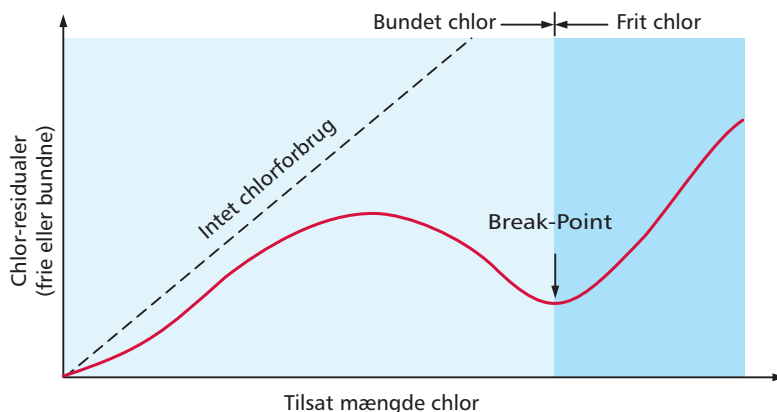


En række faktorer i drikkevandet, herunder pH, temperatur, koncentrationen af chlor og forholdet mellem ammoniak og chlor, afgør, hvilken af de bundne chlorformer der vil dominere efter chloring af kvælstofholdigt vand (ligning 20.8-20.10). Monochloramin vil ofte dominere, når forholdet mellem chlor og ammoniak er under 5. Chloraminer er dog ikke stabile og kan efterfølgende nedbrydes til nye produkter som N_2 og NO_3^- .

I forbindelse med chloring af drikkevand kan der dannes uønskede forbindelser som eksempelvis trihalomethaner (THM). THM (CHX_3) som er halogenholdige organiske stoffer, og omfatter chlorholdige forbindelser, der dannes i en reaktion mellem organiske stoffer i vandet og den tilsatte chlor. Flygtige THM omfatter chloroform (CHCl_3), som er særdeles giftig for mennesker. Flere THM er derudover mistænkt for at være kræftfremkaldende. THM, herunder chloroform, kan forekomme naturligt i visse typer råvand, og der findes således kvalitetskrav for maksimale tilladte koncentrationer af flygtige organiske chlorforbindelser i drikkevand /20.2/.

De forskellige faser under chloring af drikkevand med indhold af organiske og kvælstofholdige forbindelser er illustreret i figur 20.12. Processen kaldes Break-Point-chloring, og det nøjagtige forløb afhænger af den enkelte vandtype. I praksis drejer det sig om at finde den dosering af chlor, som resulterer i et overskud af frit chlor, der er tilstrækkelig til at sikre den ønskede desinfektionseffektivitet.

Figur 20.12.
Break-Point-
chloring.



20.9.4 Effektivitet af frit og bundet chlor

Både frit og bundet chlor kan bruges til desinfektion af drikkevand og materialer i kontakt med drikkevand (figur 20.11). Frit chlor er imidlertid et mere effektivt desinfektionsmiddel overfor fritlevende mikroorganismer hvilket ses som generelt lavere *CT*-værdier i figur 20.11. Protozoer er ofte mere modstandsdygtige overfor frit chlor end bakterier. En *CT*-værdi på $>0,02$ for frit chlor er ofte nok til at dræbe 99 % af de fleste bakterier, hvorimod inaktivering af protozoer ofte kræver større chlorkoncentrationer og/eller længere reaktionstid (figur 20.11).

Bundet chlor i form af mono-, di- og trichloramin er som nævnt mindre effektive desinfektionsmidler end frit chlor i forhold til fritlevende mikroorganismer. Tilstedeværelse af NH_3 og andre kvælstofholdige forbindelser i drikkevandet vil derfor ofte nedsætte effektiviteten af en chlorbehandling.

Eksempelvis er chloramin over 100 gange mindre effektiv over for *E. coli* end frit chlor. Protozoer er generelt mere modstandsdygtige overfor chloramin end bakterier (figur 20.11). En *CT*-værdi på >100 for frit chlor er ofte nok til at dræbe 99 % af de fleste bakterier, hvorimod inaktivering af protozoer ofte kræver større koncentrationer og/eller længere reaktionstid (*CT*-værdi >1000).

Det skal bemærkes, at chloramin kan være mere effektivt som desinfektionsmiddel overfor biofilm end frit chlor. Frit chlor reagerer således kraftigere og inaktiveres hurtigere af komponenter i overfladen af drikkevandsbiofilm, hvorimod chloraminer kan penetrere biofilmen bedre og således desinficere denne del af et systemet. Det er en af grundene til, at man i nogle vandbehandlinger foretrækker chloramin som efterdesinfektionsmiddel i kombination med en hoveddesinfektion med enten ozon eller UV (se også kapitel 19). Både frit og bundet chlor har en længerevarende (blivende) effekt ved brug som desinfektionsmiddel i vandforsyninger (residualeffekt). Det betyder, at selvom dele af den tilsatte chlor vil reagere med organiske og uorganiske forbindelser i ledningsnettet, vil der kunne opretholdes et vist desinfektionspotentiale i de yderste grene af ledningsnettet ved korrekt chlordosering på vandværket.

I Danmark har chloring tidligere været anvendt til permanent desinfektion på enkelte vandværker i forbindelse med videregående behandling af grundvand samt på vandværker, hvor overfladevand er blevet anvendt som råvand (se også kapitel 19). I dag benyttes chloring hovedsageligt til midlertidig desinfektion af dele af vandforsyninger herunder brønde, boringer, filtre, beholderanlæg og eventuelt ledningsnet i forbindelse med mikrobielle forurenninger. Chloring af drikkevand er dog stadig vidt udbredt i mange lande (se kapitel 19).

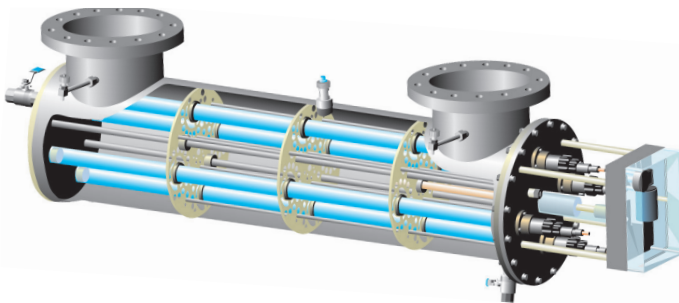
20.9.5 Chlordioxid

Chlordioxid (ClO_2) er en desinficerende gas, som er opløselig i vand. Chlordioxid har et højt oxidationspotentiale og desinficerer, ligesom de andre chlordioxidholdige desinfektionsmidler, ved irreversibelt at oxidere ydre overflade, enzymer og forskellige strukturelle komponenter i mikroorganismer. Chlordioxid kan dannes i en reaktion mellem natriumchlorit (NaClO_2) og en stærk organisk eller uorganisk syre. Det færdige chlordioxidprodukt hydrolyseres ikke i drikkevand og findes således som en opløst gas. Dannelse af trihalomethaner er begrænset ved brug af chlordioxid som desinfektionsmiddel, men andre potentielt giftige stoffer kan optræde, og der kan dannes biprodukter, der påvirker vandets lugt og smag [20.7]. Derudover har chlordioxid ikke helt samme residualeffekt som chlor. Chlordioxid er således mindre udbredt som desinfektionsmiddel sammenlignet med chlor, men har med succes været brugt til bekæmpelse af blandt andet *Legionella* i varmtvandssystemer.

20.9.6 UV-behandling

Bestråling af drikkevand med kortbølget ultraviolet lys (UV-C) medfører mutationer i mikroorganismers arveanlæg specielt ved brug af bølglængder omkring 250-260 nm. Mikroorganismer med beskadigede arveanlæg kan ikke længere formere sig og vil gå til grunde. UV-behandling kan også ødelægge overfladestrukturen hos nogle mikroorganismer, hvilket også medfører inaktivering. UV-behandling af drikkevand foregår normalt ved brug af anlæg med lav- eller mellemtrykslamper. Lavtrykslamper udsender stort set kun monochromatisk lys ved den ønskede bølglængde omkring 254 nm, hvorimod mellemtrykslamper generelt udsender polychromatisk lys som også omfatter andre bølglængder. Mellemtrykslamper har generelt en større intensitet men også et større energiforbrug mens lavtrykslamper er mere energieffektive. Et eksempel på opbygning af en reaktor med lavtrykslamper til UV desinfektion af drikkevand kan ses i figur 20.13.

Figur 20.13.
Eksempel på
opbygning af
en UV-reaktor
(kilde: Sil-
horko-Euro-
water A/S).



UV-behandling med lav- eller mellemtrykslamper kræver ingen opbevaring af kemikalier og medfører ikke på samme måde produktion af giftige stoffer eller dårlig smag sammenlignet med chloring. Modsat chloring er der dog in-

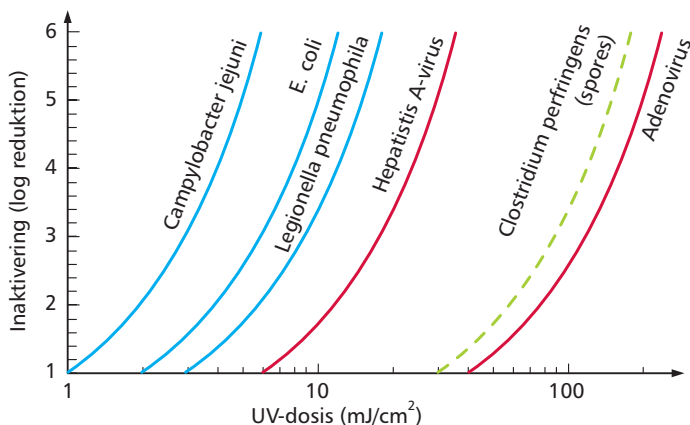
gen residualeffekt i forbindelse med traditionel UV-behandling, da effekten alene opnås ved UV-kilden. Der er således meget begrænset eller ingen effekt af UV-behandling på eksempelvis biofilm i ledningsnet og husinstallationer.

Virus er generelt mere modstandsdygtige over for UV-C-behandling end bakterier (figur 20.11 og figur 20.14). En UV-dosis på $>3 \text{ mW} \cdot \text{s pr. cm}^2$ (= mJ pr. cm^2) er nok til at inaktivere 90 % af *E. coli*, mens eksempelvis fækale virus ofte kræver doser $>10\text{-}50 \text{ mJ pr. cm}^2$. En 99,9 % inaktivering af almindelige bakterier i drikkevand, herunder eventuelle coliforme bakterier, kræver normalt en UV-dosis $>15 \text{ mJ pr. cm}^2$. I udlandet og i Danmark bruges ofte UV-C anlæg til drikkevand med en minimumseffekt omkring 40 mJ pr. cm^2 (400 J pr. m^2). I den forbindelse skal det bemærkes, at overfladevand ofte kræver større UV-doser end grundvand for at opnå samme desinfektionsgrad. Det skyldes blandt andet, at overfladevand ofte er mere uklart og indeholder mere farve, flere partikler og større koncentrationer af mikroorganismer end grundvand. Vandets transmission (transmittans) kan således påvirke effektiviteten af en UV-behandling betydeligt. Sammenhængen mellem vandets absorbans (A) og drikkevandets UV-transmission (T) kan beskrives som

$$T = 10^{-A} \quad (20.11)$$

I Danmark har der været stigende interesse for anvendelse af UV-behandling som en hygiejnisk barriere i vandforsyninger. UV-anlæg installeres blandt andet i forbindelse med afgang fra vandværker (figur 20.15), men også efter specifikke trin i vandbehandlingen som eksempelvis filtre med aktivt kul, hvor der traditionelt kan forekomme forhøjede kimtal. Derudover kan UV-anlæg installeres på selve ledningsnettet som en sikkerhedsforanstaltning i forbindelse med eventuelle forureningshændelser (sikringsanlæg). I sådanne tilfælde er det også muligt at bruge mobile UV-anlæg, der kan installeres i en periode i forbindelse med forureningshændelser. Mobile UV-anlæg kan således indgå som en del af fremtidens beredskabsplaner – enten permanent eller ved leje af driftsklare anlæg.

Figur 20.14. Eksempel på effekt af UV-C-bestråling på inaktivering af virus, bakterier og bakteriesporer i drikkevand.



Figur 20.15.
UV-anlæg
på Skagen
Vandværk II.



20.9.7 Ozon

Ozon (O_3) er et kraftigt oxidationsmiddel, der effektivt ødelægger de ydre overflader på alle typer mikroorganismer. Ozon kan også oxidere intracellulære komponenter som enzymer og DNA. Oxidationspotentialen for ozon er højt, og stoffet vil derfor oxidere mange uorganiske forbindelser i vand, herunder reduceret jern og mangan. Ozon kan også helt eller delvist oxidere organiske forbindelser, og i den forbindelse gøre puljer af ikke-assimilerbart organisk kulstof, herunder humus, mere tilgængeligt for mikrobiel vækst. Ozon kan også oxidere miljøfremmede organiske forbindelser herunder mange pesticider og tjærestoffer.

Ozon er et dyrere men også mere effektivt desinfektionsmiddel end chlor. En CT -værdi på $>0,006-0,02$ er ofte nok til at dræbe 99 % af *E. coli*, hvorimod inaktivering af virus ofte kræver større doser af ozon eller længere reaktionstid ($CT > 0,02-2,6$). Protozoer er generelt de mest hårdføre mikroorganismer i forhold til ozonbehandling, og visse former kræver CT -værdier over 1-3 for at inaktivere organismene.

Ozon bruges blandt andet i udlandet til vandbehandling, herunder hoveddesinfektion, i forbindelse med fremstilling af drikkevand med overfladevand som råvand (se kapitel 19). På grund af ozons store oxidationspotentialer, har behandlingen også den fordel, at uønskede organiske forbindelser i drikkevandet kan nedbrydes kemisk og at vandets farve, smag og lugt ofte forbedres. Modsat chlorbehandling er der ikke nogen længerevarende residual effekt ved brug af ozon til desinfektion og chlor eller chloramin tilsættes derfor ofte som efterdesinfektionsmiddel i forbindelse med ozonbehandling.

20.9.8 Andre desinfektionsmetoder

En række alternative oxidationsmidler kan bruges til desinfektion af drikkevand og materialer i kontakt med drikkevand herunder hydrogenperoxid (H_2O_2). Derudover har elektrokemisk desinfektion, hvor drikkevandet ledes gennem et spændingsfelt mellem to elektroder, vist lovende resultater. I forbindelse med den elektrokemiske proces dannes iltradikaler og andre oxide-rende forbindelser i vandet, som virker desinficerende.

Nano-, ultra- og mikrofiltrering, hvor makromolekyler og små partikler og kolloider tilbageholdes af membraner, kan endvidere bruges til desinfektion (se også kapitel 16). I filtreringsprocessen vil mikroorganismer separeres fra drikkevandet afhængig af deres størrelse og ladning. Sådanne alternative desinfektionsmetoder anvendes til desinfektion af forskellige vandtyper i udlandet, men er endnu ikke udbredt i Danmark.

20.9.9 Effektivitet og valg desinfektionsmetode

For de fleste desinfektionsmetoder gælder det, at forekomst af aggregater og partikler i drikkevandet generelt nedsætter effektiviteten af desinfektionsprocesserne. Dette skyldes, at mikroorganismer der befinder sig på overfladen eller inde i aggregater og partikler, er delvist beskyttet mod effekten af fysiske og kemiske behandlinger som UV eller chlor. I nogle tilfælde vil det organiske og uorganiske indhold i partiklerne også kunne forbruge kemiske desinfektionsmidler som chlor og dermed nedsætte desinfektionseffektiviteten. Dette gælder også i et vist omfang opløste forbindelser som ammonium, jern og mangan og humus. Derudover kan uklart vand med indhold af farve og partikler nedsætte effektiviteten af UV-behandling betydeligt hvis vandets transmission (transmittans) påvirkes.

Temperaturen og pH påvirker effektiviteten af de fleste typer desinfektion. Generelt stiger inaktivering af mikroorganismer med stigende temperatur, mens pH kan have betydning for effektiviteten af frit og bundet chlor som tidligere beskrevet (se afsnit 20.9.4). I praksis vil temperatureffekter være begrænsede for grundvandsbaseret drikkevand, hvorimod det kan spille en større rolle ved desinfektion af overfladevand på grund af større temperaturvariationer.

Som det fremgår af de foregående afsnit er der en række faktorer, der kan påvirke valg af desinfektionsmetode til forskellige opgaver. Desinfektionspotentialet i forhold til den pågældende vandtype er selvfølgelig en afgørende faktor, men derudover er der en række andre faktorer, der også kan spille ind. I figur 20.16 er vist en forenklet sammenligning af nogle positive og negative egenskaber ved de mest almindelige desinfektionsmetoder.

Figur 20.16. Sammenligning af forskellige desinfektionsmetoders effekter. Har effekt: "+"; har effekt i nogle situationer: "±"; har ingen effekt: "÷".

Faktor	Desinfektionsmetode			
	Frit chlor	Bundet chlor	UV	Ozon
Desinfektion af fritlevende mikroorganismer	++	+	++	++
Desinfektion af biofilm	+	++	÷	±
Negativ påvirkning af lugt og smag	++	+	÷	÷
Produktion af toksiske biprodukter	+	±	÷	±
Produktion af AOC	++	+	++	±
Residual effekt	+	+	÷	÷

20.10 Mikrobiel vandkvalitet i fremtiden

I afsnit 20.1-20.8 er der beskrevet en række muligheder for mikrobielle forringelser af drikkevandskvalitet, fra før vandet indvindes, og til det når forbrugernes taphaner. Det er derfor helt essentielt, at der sikres god hygiejne i forbindelse med både indvinding, behandling og distribution af drikkevand. Dette kan opnås ved at fokusere på hygiejniske aspekter ved indretning og vedligeholdelse af installationer, bygninger og vandforsyningsanlæg. Personer, der udfører arbejde i forbindelse med vandforsyninger, bør ligeledes have en grundlæggende viden om hygiejniske risikofaktorer. Målet bør være, at sikkerheden og kvaliteten for fremtidens vandforsyninger svarer til det, der findes for tilsvarende levnedsmiddelvirksomheder.

Prognoser viser, at fremtidens klima vil medføre nye udfordringer for danske vandforsyninger, herunder øget nedbør og højere vandtemperaturer. Disse forhold kan medføre, at nogle vandforsyninger bliver mere sårbare over for mikrobiologiske overskridelser. I den forbindelse kunne man anbefale en hyppigere prøvetagningsfrekvens for mikrobielle kvalitetsparametre samt en større grad af egenkontrol herunder implementering af relevante sensorer og nye og enkle hurtigmetoder. En øget prøvetagningsfrekvens vil uden tvivl føre til flere registrerede overskridelser af grænseværdierne for indikatorbakterier, men bør implementeres for på langt sigt at sikre tilliden hos forbrugerne. I den forbindelse skal det nævnes, at danske forbrugere generelt er villige til at betale ekstra for god drikkevandskvalitet /20.22/. Derudover vil fremtidens drikkevandsanalyser med stor sandsynlighed fokusere mindre på forekomst af traditionelle indikatorbakterier og mere på, om der rent faktisk forekommer egentlige biologiske risikofaktorer i form sygdomsfremkaldende mikroorganismer i det drikkevand, som leveres til forbrugerne. Et sådant paradigmeskift vil bidrage til en mere præcis vurdering af den mikrobiologiske kvalitet af drikkevand.

Litteraturhenvisninger

- /20.1/ DS/EN ISO 6222. 2002. *Vandundersøgelse - Bestemmelse af antal mikroorganismer i gærekstraktagar ved 22°C og 36°C – Dybdeudsæd*. Dansk Standard.
- /20.2/ BEK nr. 1024 af 31.10.2011. *Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg*. Miljøministeriet.
- /20.3/ Miljøstyrelsen. 2010. Vejledning 9243 af 27.5.2010. *Vejledning om håndtering af overskridelser af de mikrobiologiske drikkevandsparametre*. Miljøministeriet.
- /20.4/ Jørgensen, C., Albrechtsen, H-J., og Corfitzen, C.B. 2002. *Undersøgelse af bakterieantal og eftervækstpotentiale i vandværksvand*. Miljøprojekt nr. 719. Miljøstyrelsen.
- /20.5/ Ernstsens, V., og Johnsen, A.R. 2008. *NVOC og kimtal i drikkevand*. By og Landsskabsstyrelsen.
- /20.6/ Corfitzen, C.B., Albrechtsen, H-J., og Arvin, E. 2002. *Afgivelse af organisk stof fra polymere materialer – mikrobiel vækst*. Miljøprojekt nr. 719. Miljøstyrelsen.
- /20.7/ Percival, S. L., Walker, J.T., og Hunter, P.R. 2000. *Microbiological aspects of biofilms and drinking water*. CRC Press, USA.
- /20.8/ Maier, R.M, Pepper, I.L., og Gerba, C.P. 2009. *Environmental Microbiology 2nd ed*. Academic Press, USA.
- /20.9/ By- og Landskabsstyrelsen. 2009. *Kvaliteten af det danske drikkevand for perioden 2005-2007*. Rapport.
- /20.10/ Gleeson, C., og Gray, N. 1997. *The coliform index and waterborne disease*. E & FN Spon, UK.
- /20.11/ DS/EN ISO 9308-1. 2001/2006/2009. *Påvisning og bestemmelse af Escherichia coli og coliforme bakterier – Del 1: Membranfiltreringsmetode*. Dansk Standard.
- /20.12/ DS/EN ISO 7899-2. 2000/2006. *Vandundersøgelse – Påvisning og bestemmelse af enterokokker – Del 2: Membranfiltreringsmetode*. Dansk Standard.
- /20.13/ DS 2256. 1983. *Vandundersøgelse. Bestemmelse af Clostridium perfringens*. Dansk Standard
- /20.14/ Roslev, P., Bjergbæk, L.A. Petersen, A.S. 2004. *Bakterierne går i dvale i dit vandværk*. Aktuell Naturvidenskab. 5: 15-18.
- /20.15/ Arvin, E. 2012. *Danmark – et grønt demonstrationsland?* Vand og Jord nr. 1: 2.

- /20.16/ Arvin, E., Stedmon, C., Boe-Hansen, R. 2011. *AQUA fingeraftryk – Online detektion og karakterisering af fækale forureninger i vandtekniske systemer*. Rapport. Naturstyrelsen
- /20.17/ Boe-Hansen, R., Albrechtsen, H-J., Arvin, E., og Splid, H. 2003. *Mikrobielle forureninger – vi ser kun toppen af isbjerget*. DanskVand 2: 86-90.
- /20.18/ Skovhus, T.L., Wejse, P., Saunders, A. Bastholm, S., og Roslev, P. 2006. *DNA afslører synderen bag forurenede vand*. Aktuel Naturvidenskab. 1: 8-12.
- /20.19/ Roslev, P og Bukh, A.S. 2011. *State of the art molecular markers for fecal pollution source tracking in water*. Applied Microbiology and Biotechnology. 89: 1341-1355.
- /20.20/ DANVA. 1999. *Rensning og desinfektion af vandforsyningsanlæg*. DFF Vejledning nr. 4.
- /20.21/ Hijnen, W.A.M. og Medema, G.J. 2005. *Inactivation of viruses, bacteria, spores and protozoa by ultraviolet irradiation in drinking water practice: a review*. Water Science and Technology: Water Supply. 5: 93-99.
- /20.22/ Teknologirådet. 2011. *Drikkevand – rent vand men hvordan?* Debatoplæg om drikkevand og grundvand fra Teknologirådet.