

## **DESINFEKTION AF VAND MED UV**



# **Aqua System A/S**

<b>1</b>	<b>INDLEDNING</b> .....	<b>3</b>
1.1	NATURENS MÅDE .....	3
1.2	HVAD ER ULTRAVIOLET LYS .....	3
1.3	HVAD ER ULTRAVIOLET ENERGI.....	3
<b>2</b>	<b>TEORI</b> .....	<b>4</b>
2.1	HVORDAN DRÆBES MIKROORGANISMER MED UV .....	4
2.2	HVAD KAN MIKROORGANISMERNE TÅLE .....	4
2.3	HVORDAN DIMENSIONERES ET UV-ANLÆG .....	7
2.4	UV-METODENS EFFEKTIVITET .....	8
<b>3.</b>	<b>UV-ANLÆGS UDFORMNING</b> .....	<b>9</b>
3.1	RUMBESTRÅLING .....	9
3.2	STRØMNINGSPROFILENS BETYDNING MINIMUMSMODELLEN/GENNEMSNITSMODELLEN.....	10
3.3	SERIEKOBLEDE REAKTORER.....	12
<b>4.</b>	<b>KONTROL</b> .....	<b>13</b>

# 1 Indledning

Vand er liv, og vand af høj kvalitet er nødvendig for vores livskvalitet. Set i et globalt perspektiv, hvor dette gode sættes under konstant pres, er det helt nødvendigt at finde de optimale løsninger på vores vandproblem. Vand er essentielt for mennesket.

Effekten af sollys som desinfektion har været kendt i århundreder, og tekniske udformninger af UV-bestrålingsanlæg har været kendt og anvendt i ca. 100 år. I starten var det især en bestråling med UV lys placeret ovenover vandet, der løb i smalle flade rønder. Senere fandt man på at sætte UV-strålingsskilden ind i kvartsrør i en beholder, hvor vandet bestråles, mens det passerer kvartsrøret.

Gennem de senere år er der opstået en større offentlig bevågenhed om forurening af vand, hvilket har givet anledning til at fokusere på alternative metoder for behandling af vand. Klor har været almindeligt brugt siden 1847 grundet dets desinfektionspotentiale ved lave koncentrationer samt dets konserverende virkning. Imidlertid går klor også i forbindelse med opløste organiske stoffer i vandet og danner klorforbindelser, hvoraf nogle er direkte giftige selv i små mængder. I mange applikationer vil et UV-desinfektionssystem være den rigtige løsning.

## 1.1 *Naturens måde*

Siden tidernes morgen har sollys været et naturligt desinfektionsmiddel. De ultraviolette stråler kan i en koncentreret dosis ødelægge en lang række mikro-organismer, idet de ændrer det genetiske materiale (DNA) i cellerne, således at bakterier, vira og andre mikro-organismer ikke længere kan reproducere.

## 1.2 *Hvad er ultraviolet lys*

Ultraviolet lys er de korte bølgelængder i et elektromagnetisk spektrum under det violette synlige spektrum med en bølgelængde på mellem 200 og 400 nm.

## 1.3 *Hvad er ultraviolet energi*

Ultraviolet energi fremkaldes ved hjælp af kviksølv lamper. Disse lamper er fremstillet af specielt hårdt glas, som tillader transmittans af kortbølget ultraviolet energi, overvejende ved en bølgelængde på 254nm. Disse lysstråler har den unikke egenskab at dræbe de mikro-organismer, de kommer i kontakt med.

## 2 Teori

### 2.1 *Hvordan dræbes mikroorganismer med UV*

Hvis man vil opnå en bestemt inaktiveringsgrad eller drabseffekt for mikroorganismer i vand, skal man have styr på en række faktorer, som tilsammen bestemmer inaktiveringsgraden.

Desinfektion med UV sker ved, at fotoner i UV-strålerne med en bølgelængde på 253,7 nm rammer følsomme organiske stoffer, f.eks. RNA og DNA molekyler, som er livsnødvendige for mikroorganismen. Når fotonerne rammer "rigtigt", kan desinfektion slå molekyler i stykker eller kan få dem til at omløjres. Det er for eksempel kendt, at UV-absorptionsspektret for DNA-molekyler udviser et maksimum i området 250-270 nm, og at den tilhørende absorption af fotoner fører til en række komplicerede reaktioner og omløjringer bestemte steder i DNA-molekylet.

For hver mikroorganisme er der nogle få "målområder", der skal rammes af en foton, for at organismen dør. Med denne sterilisations-mekanisme er der derfor tale om, at jo større stråledosis er, desto større er sandsynligheden for at ramme desinfektionsfølsomme områder i den enkelte mikroorganisme med fotoner. Den samlede desinfektion eller drabseffekt afhænger derfor af den samlede bestrålingsenergi (bestrålingsdosis).

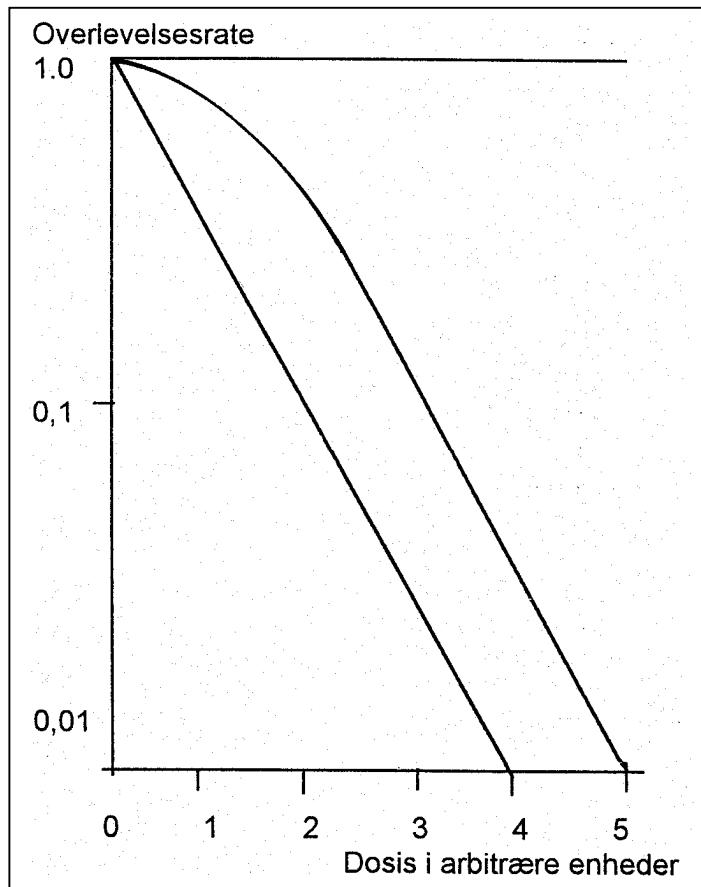
Bestrålingsdosis måles således som UV-intensiteten på belysningsstedet ( $W/m^2$ ) multipliceret med bestrålingstiden. Dette giver den samlede strålingsenergimængde ( $J/m^2$ ).

### 2.2 *Hvad kan mikroorganismerne tåle*

For at ødelægge en mikroorganisme skal UV-strålerne ramme et eller flere målområder såsom RNA, DNA eller enzymer inde i mikroorganismen.

Den nødvendige dosis inde i mikroorganismen afhænger af den pågældende organismes morfologi. Generelt er grampositive bakterier med en tyk indkapsling af murein sværere at ødelægge end gramnegative bakterier med en tynd kapsel. Sporer er i almindelighed sværere at inaktivere end bakterier, og alger i endnu højere grad, idet de typisk kræver hundrede gange mere bestrålingsenergi end bakterier.

Når mikroorganismer udsættes for UV-bestråling, bliver de ikke alle inaktiverede på én gang. En bestemt brøkdelen af de til enhver tid tiloversblevne levende celler dræbes for hver tidsenhed. Overlevelsesraten er den brøkdelen af de oprindeligt levende mikroorganismer, der til enhver tid stadig er levende. Overlevelsesraten kan tilnærmelsesvist udtrykkes som en eksponentialfunktion af bestrålingstiden multipliceret med UV-bestrålingsintensiteten. Dette betyder, at der er proportionalitet mellem stråledosis og logaritmen til drabseffekten eller overlevelsesraten (se figur 1).



Figur 1

For en given art eller stamme taler man derfor om, hvilken dosis,  $D_{10}$ , der skal til for at reducere antallet af denne type mikroorganismer med en faktor 10. Det er det samme som at tale om, hvilken dosis der skal til for at dræbe 90% af en population af mikroorganismer.

Hvis man bestemmer den dosis, der skal til for at dræbe 90% af en population, skal der bruges dobbelt så meget for at dræbe 99%, tre gange så meget for at dræbe 99,9% af populationen og så videre. Forskellige typer mikroorganismer er forskellige hvad angår følsomhed overfor lys. For at opnå den samme drabssandsynlighed, skal forskellige typer mikroorganismer derfor udsættes for vidt forskellige strålingsdoser.

Mikroorganisme	90% drab	99,9% drab	Mikroorganisme	90% drab	99,9% drab
<b>Bakterier</b>			<b>Gærceller</b>		
Bacillus anthracis	45	137	Almindeligt gær	60	132
Bacillus megatherium (veg)	11	34	Bagergær	39	117
Bacillus megatherium (sporer)	27	80	Saccharomyces cerevisiae	60	180
Bacillus Paratyposus	32	96	Saccharomyces ellipsoideus	60	180
Bacillus Subtilis (sporer)	120	360	Saccharomyces sporer	80	240
Clostridium Tetani	120	220	Torula sphaerica (i mælk/fløde)	23	69
Corynebacterium diphtheriae	33	100	Ølgær	33	99
Ebertheila typhosa	21	63	<b>Svampesporer</b>		
Eschericia coli	30	90	Aspergillus amstelodami (kød)	660	2000
Legipheila pneumophilla	25	70	Aspergillus flavus	600	1800
Leptospira canicola (smitsom leverbetænd.)	31	60	Aspergillus giaucus	440	1320
Micrococcus candidus	60	190	Aspergillus niger (bagerier)	1320	3960
Micrococcus piltonensis	81	150	Cladosporium herbarum (kø- lelagre)	600	1800
Micrococcus sphaeroides	100	300	Muco mucedo	650	1950
Mycobacterium tuberculosis	54	100	Muco racemosus	170	510
Neisseria catarrhalis	44	130	Oospora lactis	50	150
Phytomonas tumefaciens	44	130	Penicillium digitatum	440	1320
Proteus vulgaris	26	78	Penicillium expansum	130	390
Pseudomonas aeruginosa	55	165	Penicillium chrysogenum (frugt)	500	1500
Pseudomonas fluorescens	35	105	Penicillium roqueforti	130	390
Salmonella enteritidis	40	76	Phizopus nigricans	1110	3300
Salmonella typhosa (tyfus)	21	41	Scopulriopsis brevicaulis	800	2400
Salmonella paratyphi (paratyfus)	32	61	<b>Virus</b>		
Salmonella typhimurium	80	240	Bacteriofag	30	90
Sarcina lutea	197	590	Tobakmosaikvirus	2400	4400
Serratia marcescens	24	72	Leverbetændelse (B)	58	80
Shigella dysenteriae (dysenteri)	22	42	Influenza	34	66
Shigella flexneri (dysenteri)	17	34	Poliomyelitis	31	60
Shigella paradysenteriae	17	52	<b>Diverse</b>		
Spirillum rubrum	44	130	Chlorella vulgaris (alge)	140	220
Staphylococcus albus	18	54	Nematode (æg)	510	920
Staphylococcus aureus	26	78	Paracium (protozo)	1100	2000
Streptococcus hemolyticus	21	66			
Streptococcus lactis	61	180			
Streptococcus viridans	20	60			
Vibrio comma (kolera)	33	65			

Tabel 1. Omtrentlige værdier for den strålingsdosis i ( $J/m^2$ ) der skal til for at opnå forskellige drabssandsynligheder for forskellige mikroorganismer.

Det er derfor vigtigt at erkende, at der som regel er tale om en desinfektionsgrad og ikke om en fuldstændig sterilisation (drab) af alle mikroorganismene. Hvis der oprindeligt er 1000 bakterier af en bestemt slags i vandet, vil der efter en stråledosis på D10 være ca. 100 bakterier tilbage. Efter den dobbelte stråledosis vil der være ca. 10 bakterier tilbage. Efter den tredobbelte dosis vil der med størst sandsynlighed være cirka én levende bakterie tilbage. Efter den firedobbelte dosis vil der med 90% sandsynlighed ikke være nogen levende bakterie tilbage. Efter den femdobbelte dosis vil sandsynligheden for at der ikke er nogen levende bakterie tilbage være steget til 99% og så videre. Nogle værdier for drabseffekter er givet i Tabel 1.

Reglen om den direkte proportionalitet mellem dosis og logaritmen til drabseffekten gælder ofte for overlevelseshoris-forholdet for virus, hvor der kun skal ødelægges en enkelt streng af DNA eller RNA. Når bakterier udsættes for UV-bestråling, udviser de ofte en anden opførsel: den såkaldte skulder-overlevelseshoris som vist på figur 1. Denne kurvefacon er en antydning af, at der skal rammes mere end ét målområde for at inaktivere bakterien. Det kan dog i nogle tilfælde også være en indikation af, at en genoplivnings-mekanisme modarbejder UV-inaktiveringen. Se for eksempel stråledosis for *Micrococcus Piltonensis* eller *Shigella dysenteriae* i Tabel 1.

I en række tilfælde har man således målt afvigelser fra reglen om proportionalitet. I mange tilfælde har man dog kun målt ét tal for drabseffekten og må så selv skønne sig til effekten ved andre strålingsdoser. I disse tilfælde udgør proportionalitetsreglen det bedste skøn for, hvad der sker. Hvis en mikroorganisme reagerer på UV-bestråling som illustreret ved skulderkurven, så vil en måling af D10 baseret på den første del af kurven automatisk føre til en overvurdering af den stråledosis, der er nødvendig for at opnå en tilfredsstillende inaktivering på adskillige dekader. Det betyder, at en eventuel usikkerhed i kendskabet til dosis-respons kurven normalt vil føre til en apparatdimensionering, som ligger på den sikre side.

En yderligere komplikation består i, at mange mikroorganismer er i stand til at danne sporer enten som hvilestadier under ugunstige miljøforhold eller som formerings- og spredningsenheder. Karakteristisk for sporerne er, at de er mere modstandsdygtige over for ekstreme miljøforhold end de vegetative celler. I disse tilfælde er det derfor sporeformens resistens, der er bestemmende for, hvor stor en drabseffekt der i praksis opnås med en bestemt strålingsdosis. Hertil kommer at bakterier, som under normale omstændigheder ikke danner sporer, nogle gange kan finde på at danne sporer alligevel. Sandsynligheden er ikke stor, men det kan ske.

### **2.3            *Hvordan dimensioneres et UV-anlæg***

Den korrekte fremgangsmåde ved dimensionering af et UV-anlæg sker i følgende trin:

1. Først fastlægges hvilken drabseffekt man vil opnå og for hvilke mikroorganismer. Dette bestemmer den ønskede strålingsdosis.
2. Vandets gennemskinnelighed for UV-lys ved bølgelængden 254 nm bestemmes.
3. Herefter kan man ved at gå ind på en kurve over forskellige apparaters kapacitet bestemme, hvilket apparat der skal vælges.

Princippet er enkelt, men i praksis er det ikke så nemt, fordi man ofte ikke ved præcist, hvilke mikroorganismer man skal fjerne fra vandet. Som regel vil man derfor slå sig til

tåls med vedtagne retningslinier for, hvilket niveau der giver en tilfredsstillende desinfektion af vandet.

Krav til bestråling af drikkevand ligger typisk mellem 160 og 400 [J/m<sup>2</sup>]. De mere moderne normer kræver 400 [J/m<sup>2</sup>]. Som et ekstremt eksempel kan nævnes, at kravene til farmaceutisk sterilt vand er anderledes strenge. Her taler man om værdier på nogle tusinde og helt op til 20000 [J/m<sup>2</sup>].

Drabssandsynlighed %	90	99	99,9	99,99	99,999
Eschericia coli	30	60	90	120	150
Leptospira canicola (smitsom leverbetændelse)	31	45	60	70	90
Mycobacterium tuberculosis	54	77	100	120	150
Pseudomonas aeruginosa	55	110	165	220	270
Salmonella paratyphi (paratyfus)	32	45	61	80	100
Vibrio comma (kolera)	33	49	65	80	100

Tabel 2. Bestrålingsdosis [J/m<sup>2</sup>] for at opnå 5 forskellige drabssandsynligheder for forskellige typer af bakterier.

Man kan således ikke forvente sikkerhed for fuldstændig fjernelse af mikroorganismer, med mindre man anvender ekstremt høje strålingsniveauer, der oftest vil være økonomisk urealistiske.

Hvis ikke brugeren har særlige krav til stråledosis, kan en dosis på 400 [J/m<sup>2</sup>] anbefales for drikkevand. Denne værdi vil i langt de fleste tilfælde ligge på den sikre side. For at anskueliggøre effekten af en sådan dosis har vi regnet sammenhæng mellem dosis og drabseffekt ud for nogle typiske sygdomsfremkaldende bakterier, som kan forekomme i drikkevand. Disse resultater ses i Tabel 2.

## 2.4 UV-metodens effektivitet

Ud over strålingsdosis og typen af mikroorganisme er desinfektionsgraden bestemt af vandkvaliteten.

- Vandets indhold af suspenderet stof
- Eventuel sammenklumpning af mikroorganismer
- Vandets indhold af organisk materiale samt af visse uorganiske ioner

Suspenderet stof i vandet kan absorbere UV-lys og derved nedsætte den effektive dosis, en given organisme kan blive udsat for. Hvis der forekommer klumper med mikroorganismer, vil organismernes inderst i klumpen ikke i tilstrækkelig grad kunne nås af fotonerne. Af disse årsager kan det i nogle tilfælde være nødvendigt med en forfiltrering af vandet inden UV-behandling. Dette er især tilfældet, hvis man ønsker at sikre sig en næsten fuldstændig drabseffekt.

De fleste organiske forbindelser absorberer UV-lys, og det samme er tilfældet med visse uorganiske salte. Den absorberende virkning kan måles som vandets gennemskinnelighed (transmittans) for UV-stråling ved 254 nm dvs. forholdet mellem antallet af fotoner ud af og ind i et vandlag på 10 mm. Jo mere organisk materiale der er i vand, de-

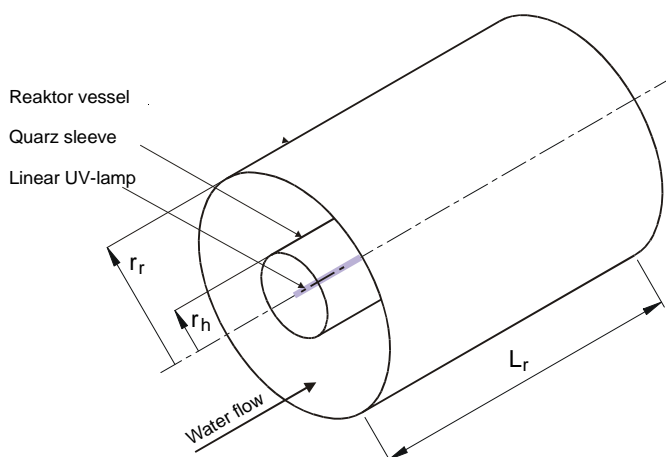


sto mindre vand målt i m<sup>3</sup>/h kan et givent apparat desinficere pr. tidsenhed. Hvis gennemskinneligheden når under et vist niveau, kan kun specialbyggede apparater anvendes til formålet.

### 3. UV-anlægs udformning

Den mest almindelige reaktor til UV-desinfektion er opbygget som vist på **Fejl! Ukendt argument for parameter.2:**

- En UV-lampe er placeret i et dyrør af kvarts, der tillader lampens kortbølgede UV-C stråling af passere.
- Dyrøret er placeret koncentrisk i et reaktorrør.
- Vandet, der skal behandles, strømmer igennem reaktoren i det ringformede tværsnit mellem dyrør og reaktorvæg.



Figur 2: Simplificeret model af fotoreaktor

#### 3.1 Rumbestråling

Forudsætningen for at desinfektionen bliver tilstrækkelig effektiv er at alt vandet udsættes for den nødvendige rumbestråling. Rumbestrålingen  $H$  måles i  $J/m^2$ , og den beregnes af ligningen

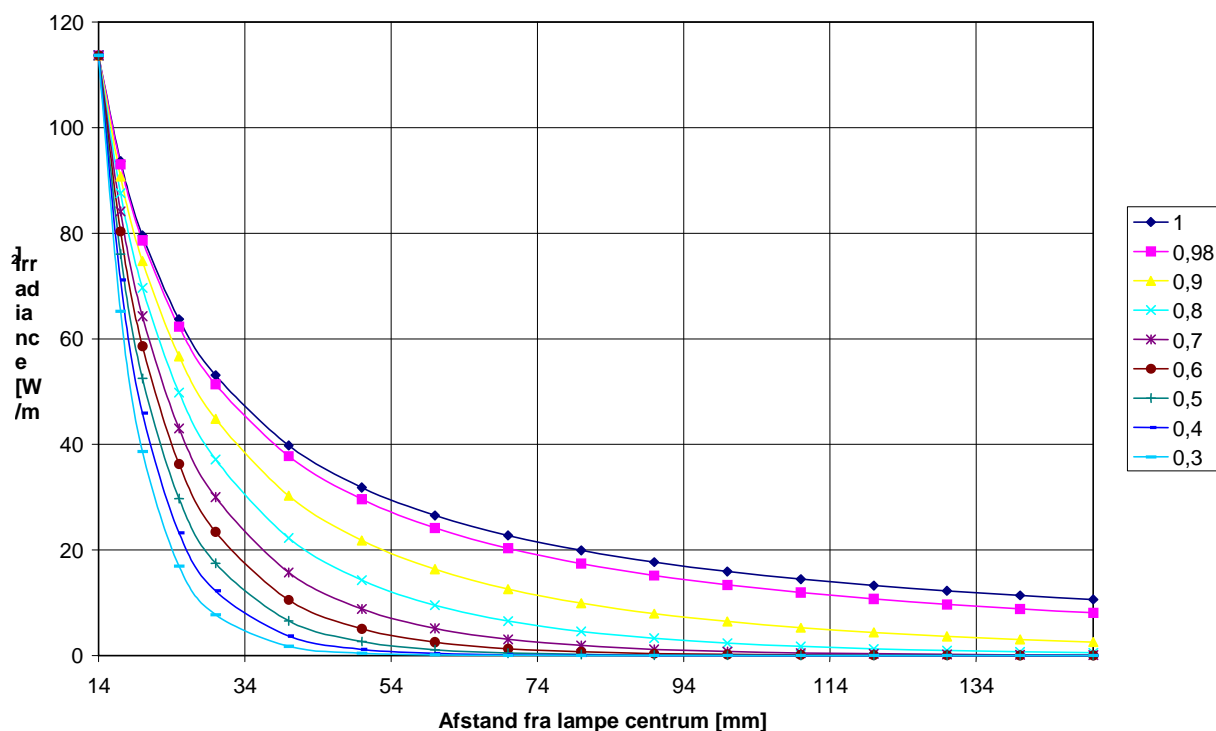
$$H = \int E \cdot dt$$

hvor  $E$  er rumbestrålingsstyrken målt i  $W/m^2$ .

Rumbestrålingsstyrken afhænger af

- den samlede UV-effekt fra UV-lampen
- afstanden fra lampen
- transmittansen af vandet i reaktoren

På Figur 3 er E vist som funktion af afstanden fra lampen ved forskellige transmittanser. (Radius af dykrøret  $r_h = 14$  mm)



Figur 3: Bestrålingsstyrke som funktion af reaktor radius og vand transmittans  $\tau(10)$

UV-transmittansen  $\tau(10)$  (målt i 10 mm kuvette) vil for drikkevand normalt være mellem 0,90 og 0,98. Transmittansen for recirkuleret procesvand med større indhold af opløste stoffer vil typisk være mindre.

Mange stoffer absorberer UV-C lys kraftigt, selv om synligt lys passerer næsten uhindret. Dette betyder, at man ikke kan skønne transmittansen for UV ved almindelig besigtigelse. Det er nødvendigt at benytte et spektrofotometer med UV-lys ved bølgelængden 254 nm.

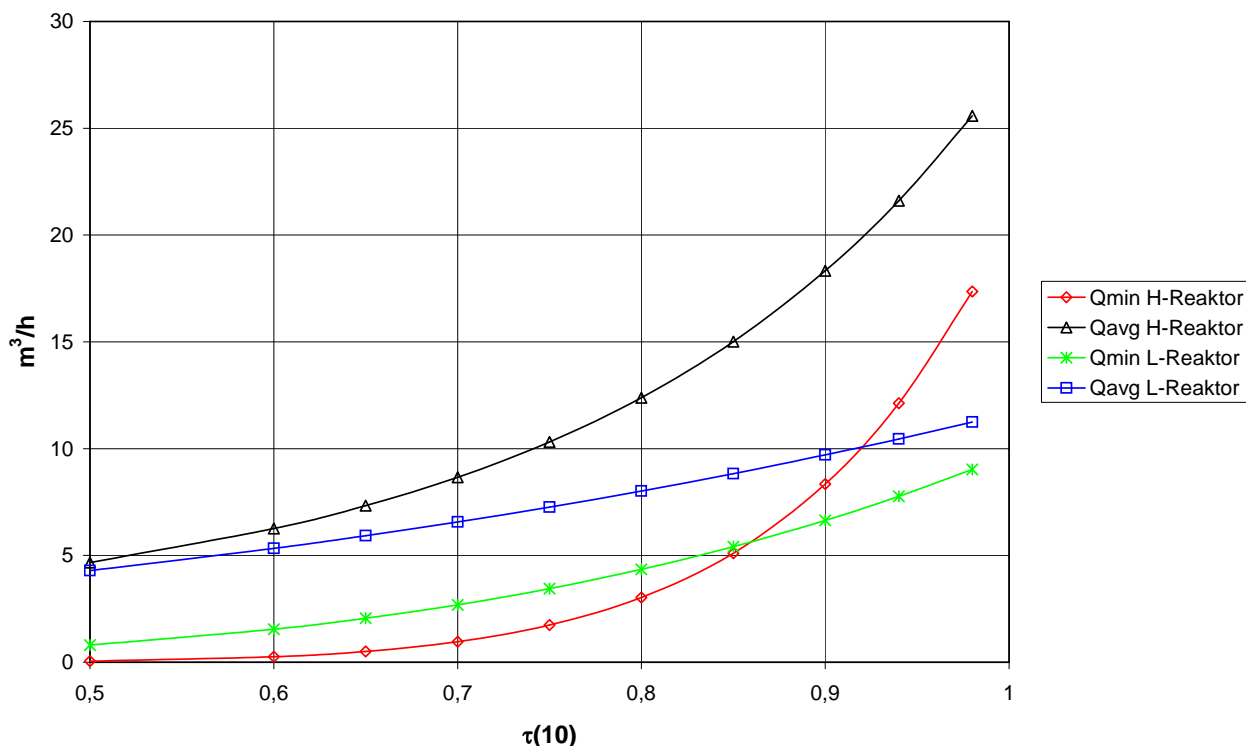
Det fremgår af kurverne, at bestrålingsstyrken falder kraftigt med afstanden, specielt når transmittanserne er lave.

### 3.2 **Strømningsprofilens betydning. Minimumsmodellen/ gennemsnitsmodellen**

En anden vigtig parameter i beregning og dimensionering af en UV-reaktor er strømningsmønsteret.

Hvis man forestiller sig en UV-reaktor med "plug-flow" altså en strømning, hvor den enkelte vanddel bevæger sig med gennemsnitshastighed langs en linie parallel med reaktoraksen, da vil de vanddele, der bevæger sig langs væggen, kun modtage en lille rumbestråling, medens vandet, der løber tæt ved lampen, modtager en langt større rumbestråling.

Det vil derfor være en fordel, dersom strømmingen i reaktoren ikke er "plug-flow" men forløber således, at hver enkelt vanddel bliver udsat for en gennemsnitlig rumbestråling dvs. noget af tiden skal vandet være tæt på lampen, noget af tiden langt fra lampen.



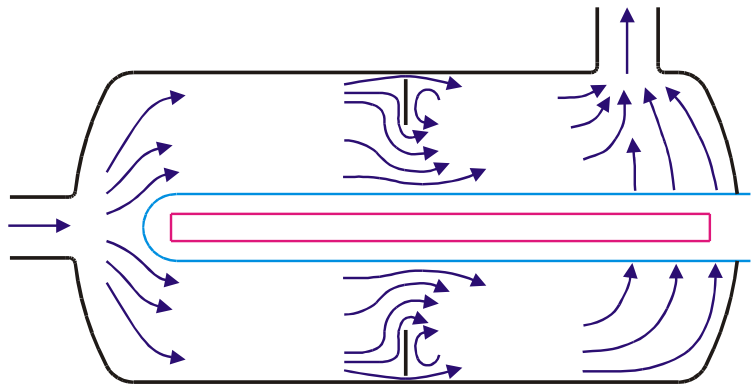
Figur 4: Sammenligning af kapaciteter efter minimums- og gennemsnitsmodellen for 2 reaktortyper

**Fejl! Ukendt argument for parameter.** 4 viser kapaciteten som funktion af transmittansen dels beregnet efter minimumsmodellen Qmin ("plug-flow") dels beregnet efter gennemsnitsmodellen Qavg. Kapaciteten er vist for to forskellige reaktorradii H-reaktor med radius 100 mm og L-reaktor med radius 50 mm.

Det ses, at forskellen mellem de to beregninger er lille ved høj transmittans, men Qmin falder meget, når transmittansen bliver mindre.

Kapaciteten efter gennemsnitsberegningen er udtryk for et teoretisk maksimum, som aldrig kan opnås, men dersom det er muligt at styre vandstrømmingen, således at forholdene nærmer sig den optimale strømning vil en kraftig kapacitetsforøgelse være mulig.

Ved at indsætte en eller flere turbulensringe i reaktoren kan dette opnås til en vis grad. Figur 5 viser princippet i en kort UV-reaktor for drikkevand.

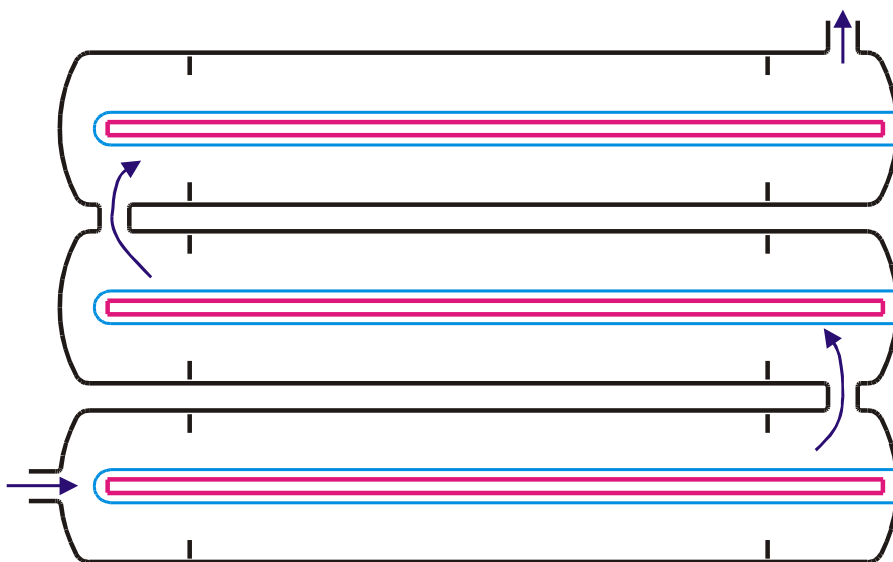


Figur 5: Kort UV-reaktor med én turbulator

### 3.3 Seriekoblede reaktorer

For at opnå en ønsket kapacitet vil det ofte være nødvendigt at bruge flere lamper. En særlig god virkning opnås imidlertid, dersom flere reaktorer seriekobles. Strømningen gennem flere reaktorer vil sikre en opblanding, således at vi kommer nærmere til den gennemsnitlige rumbestråling og dermed opnår en bedre udnyttelse af UV-lyset i hver enkelt reaktor.

Mange UV-apparater på markedet har flere lamper monteret i én reaktorbeholder, hvor strømmingen tilstræbes at være "plug-flow". Sådanne reaktorer må derfor beregnes efter minimumsmodellen, og lamperne må placeres tæt på reaktorvæggen for at sikre tilstrækkelig bestrålingsstyrke i de svagest belyste steder. Reaktoren får derfor en dårlig udnyttelse af UV-lyset specielt ved lave transmittanser. Et andet problem er, at dersom



Figur 6: Seriekoblede lange UV-reaktorer (med turbulatorer)

en af lamperne svigter, vil en tilsvarende del af vandet passere reaktoren helt ubehandlet. I et apparat med seriekoblede reaktorer vil svigt af en lampe blot resultere i en tilsvarende nedsættelse af rumbestrålingen, hvilket kun vil have mindre betydning specielt i apparater med mange reaktorer.

## 4. Kontrol

Den mest direkte metode til at verificere, at den ønskede drabseffekt opnås består i målinger af overlevende organismer i det rensede vand.

De fleste driftsproblemer kan imidlertid løses med en passende instrumentering, hvor man måler UV-intensiteten på det svageste sted i bestrålingskammeret. Forsynes processen med en målecelle til måling af det sande UV-strålingsniveau er det muligt at overvåge strålingsdosis og at styre det til det ønskede niveau for eksempel ved styring af den pumpe eller ventil, der leder vand til desinfektion.

Selve UV-målingen kræver imidlertid en vis opmærksomhed. Det fotometer, der oftest anvendes måler både UV-lys og synligt lys. Ved projekteringen af målecellernes elektronik er der derfor gjort antagelser om sammenhængen mellem mængden af synligt lys og mængden af UV-lys. Denne antagede sammenhæng gælder for et nyt og fejlfrit UV-rør, men den gælder ikke, når røret bliver gammelt eller tilsmudset; da vil der stadig være omtrent den samme mængde synligt lys tilbage. Og sammenhængen gælder slet ikke for gennemskinneligheden for UV-lyset i vand med organisk indhold, hvor synligt lys passerer praktisk talt uhindret, mens UV-lyset i højeste grad kan blive hæmmet.

Når der er behov for en UV-intensitetsmåler på et desinfektionsapparat, er det derfor vigtigt at anvende et ægte UV-fotometer, der kun er følsomt overfor UV-lys i et snævert område omkring 254 nm.