

Rensning af overfladevand ved langsom sandfiltrering, med fokus på fjernelse af patogener

Udarbejdet af:

Trine Johanne Skov Jepsen, s062301

Nanna Sophia Mucha Munck, s061696

Sally Kornholt, s062300

Fagprojekt 12203

19. maj 2008

Indholdsfortegnelse

| | |
|--|----|
| Abstract | 3 |
| Abstract | 4 |
| Forord..... | 5 |
| 1. Indledning | 6 |
| 2. Teori..... | 8 |
| 2.1. Drikkevand..... | 8 |
| 2.2. Arrenæs | 8 |
| 2.3. Mikroorganismer og orme | 9 |
| 2.3.1. Bakterier..... | 9 |
| 2.3.2. Coliforme bakterier - indikatororganismer | 9 |
| 2.3.3. Protozoer | 10 |
| 2.3.4. Helminthæg..... | 10 |
| 2.4. Filtreringsprocesser | 11 |
| 2.4.1. Mekanisk fjernelse | 11 |
| 2.4.2. Biologisk fjernelse | 12 |
| 2.5. Clogging og flow | 13 |
| 2.6. Modning | 14 |
| 3. Metode | 15 |
| 3.1. Prøvetagning | 15 |
| 3.2. Forsøgsopstilling..... | 15 |
| 3.2.1. Fysisk opstilling | 15 |
| 3.2.2. Opbygning af kolonne..... | 16 |
| 3.2.3. Opsamling af prøver..... | 17 |
| 3.3. Målemetoder | 17 |
| 3.3.1. Sand..... | 17 |
| 3.3.2. Vand | 18 |
| 4. Resultater og diskussion..... | 19 |
| 4.1. Karakteristik af sediment | 19 |
| 4.2. Gennemstrømning | 20 |
| 4.3. Indløbsvand | 22 |
| 4.4. Partikelreduktion | 23 |
| 4.5. Modning | 24 |
| 4.6. Organisk materiale | 26 |
| 4.6.1. Schmutzdecke | 27 |
| 4.6.2. Organisk materiale i sandkolonnerne..... | 28 |
| 4.7. Helminthæg..... | 30 |
| 4.8. Vandkvalitet | 32 |
| 4.8.1. Danmark..... | 32 |
| 4.8.2. Indien | 32 |
| 4.9. Problematikker ved sandfiltrering..... | 33 |
| 5. Konklusion | 34 |
| 6. Referenceliste..... | 36 |
| Appendiksoversigt | 38 |

Abstract

Hvor grundvand ikke er en tilgængelig drikkevandsressource, benyttes overfladevand, som ofte er forurenet og derfor sundhedsskadeligt. Effektiviteten af langsom sandfiltrering undersøges gennem afhandlingen. Fokus er parametre, der har indflydelse, på reduktionen af bakterier i fækalt forurenet overfladevand.

Eksperimenter udføres med udgangspunkt i fem forsøgskolonner, hver med forskellige karakteristika. Målinger i ind- og udløbsvand danner baggrund for resultater og diskussion. Colilert gennemføres for at opgøre koncentrationen af coliforme bakterier og *Eschericia coli*. Det totale bakterieindhold tælles ved pladespredning. Kolonnerne opbygges af sand fra Arrenæs forsøgsanlæg. Sining af sandet viser, at kornstørrelsen er 0,11 mm. Den lille kornstørrelse medfører at effektiviteten af den mekaniske fjernelse er stor. Processen fjerner omkring 60 % af det totale bakterieindhold fra vandet. De 0,7 % organisk materiale i sandkolonnerne er essentielt. Dette ophobes mellem sandkornene og er betydende for gennemstrømningen, der over tid fører til clogging af filteret. Filterevnen afhænger af kolonnernes modningsprocesser, hvor sandets mikrobielle økosystemer opbygges. Effektiviteten af langsomme sandfiltre bestemmes af perioden mellem modning og clogging. Filtrene bygget for at fjerne coliforme indikatororganismer havde en effektivitet på mere end 99 %.

Abstract

Where groundwater is not available surface water is used as a drinking water resource. Surface water is often polluted and therefore offers a potential risk to ones health. During this report the efficiency of a slow sand filter is investigated. The focus in the report is on parameters that influence on the reduction of bacteria in fecal polluted surface water.

Five columns with different characteristics are set up, and starting from these the experiments are accomplished. Different measurements on the in – and outlet water provide the background for both results and discussion. In order to measure the concentration of *E. coli* and other organisms within the coliform group Colilert is performed. The total number of colony forming units is measured by plate spread. The columns are built up of sand collected at Arrenæs Trial Plant. Sieving of the sand revealed that the grain size is 0,11 mm. Due to this small size the mechanical removal process has a high effectiveness and removes approximately 60 % of the bacterial content in the water. The measured 0,7 % of organic matter within the columns is essential. This accumulates in between the grains and influence greatly on the water flow which with time leads to clogging. The efficiency of the filters depends on different ripening processes in which microbial cultures develop. The time period between ripening and clogging determines the effectiveness of slow sand filters. The efficiency of the filters built with the purpose of removing coliform bacteria was more than 99 %.

Forord

Denne rapport afhandler tre måneders projektarbejde omhandlende reduktion af bakterier ved langsom sandfiltrering. Projektet er udarbejdet af de tre studerende Trine Johanne Skov Jepsen, Nanna Sophia Mucha Munck og Sally Kornholt. Fagprojekt 12203 er en del af bacheloren i civilingeniørstudiet Miljøteknologi ved Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Institut for Vand og Miljøteknologi, og det gælder 10 ECTS point.

| | | |
|-------------------|---------|-------|
| Trine Skov Jepsen | s062301 | Dato: |
|-------------------|---------|-------|

| | | |
|----------------|---------|-------|
| Sally Kornholt | s062300 | Dato: |
|----------------|---------|-------|

| | | |
|--------------------|---------|-------|
| Nanna Sophia Munck | s061696 | Dato: |
|--------------------|---------|-------|

Vi vil gerne takke vores primære vejleder Hans-Jørgen Albrechtsen for råd og vejledning gennem hele projektet. En tak skal også lyde til Laure Rose Lopato, Ph.D. studerende på DTU, og Henrik Bregnhøj som begge har fungeret som medvejledere.

Tak til vores tekniske vejleder, Birthe Ebert, som har været behjælpelig og en god formidler af kontakt til øvrige laboratorieansvarlige. Da vores projekt har krævet en bred vifte af forskelligt laboratoriearbejde har mange ansatte på Institut for Vand og Miljøteknologi været involverede. Af alle øvrige indblandede vil vi særligt takke Mona Refstrup for vejledning til udførelse af arbejde i mikrobiologilaboratoriet.

Ganesh Sengupta Kolkata skal have en stor tak for hjælpen med importen af en vandprøve fra Vestbengalen, Indien, samt til Lundtofte Rensningsanlæg der har leveret spildevand.

En speciel tak til Københavns Energi ved Jens Rasmussen, Michelle Kappel og Allan for samarbejdet og muligheden for prøvetagninger fra anlægget på Arrenæs.

1. Indledning

1 million af verdens befolkning lever uden adgang til rent drikkevand [Dansk Røde Kors, 2006]. Størstedelen af disse lever i 3. verdenslande, hvor ressourcerne er knappe, goderne skævt fordelt og sundhedsproblemerne store. Vandbårne sygdomme er talrige, så ved at forbedre adgangen til rent drikkevand øges menneskers helbred og livskvalitet.

I Danmark pumper vi rent drikkevand direkte op fra undergrunden, hvilket ikke er en mulighed i størstedelen af verden. På grund af forurening eller fattigdom er det ikke muligt at udnytte grundvandet, og i stedet bruges overfladevand.

I mange fattige samfund benyttes vandet til alt fra drikkevandsressource til badning af køer og toiletbesøg. Omgangen med og behandlingen af vand er en af årsagerne til den høje sygdomsforekomst og lave levestandard. Typisk overfladevand i udviklingslande har et højt indhold af bakterier, herunder coliforme som indikerer fækal forurening. Vandet indeholder cyster af f.eks. *guardia*, *cryptosporidium* samt af helminthorme.

Denne rapport er baseret på personlig interesse for ulandenes udvikling med henblik på sundhedssituationen. Rapporten fokuserer derfor på produktionen af sikkert drikkevand ved fjernelse af bakterier fra overfladevand.

Langsom sandfiltrering er en gammel og meget benyttet vandrensningmetode. Den er let anvendelig og primitiv, men tilsyneladende effektiv. Overfladevand kan efter en sådan behandling udnyttes på en fornuftig og bæredygtig måde.

For at optimere udnyttelsen af langsom sandfiltrering undersøges gennem en række eksperimenter, hvilke parametre der har indflydelse på systemets effektivitet.

Inspiration til opbygning af eksperimenterne er hentet fra Arresnæs forsøgsanlæg. Her filtreres overfladevand fra Arresø, ved at lade det sive gennem jordens egne sandlag, så der dannes kunstigt grundvand, der overholder alle danske krav til drikkevandskvalitet.

Ved at efterligne dette system ønsker vi at undersøge, hvilke faktorer der er vigtige for rensningsprocessen af overfladevand til drikkevand.

Forsøgsopstillingen består af fem søjler med forskellige karakteristika, alle bygget af sand fra Arrenæs:

- Uden organisk materiale
- Uden schmutzdecke
- Lidt schmutzdecke
- Meget schmutzdecke
- Indisk

Vores projekt er relateret til problematikken omkring vandforsyningen i tredje verdens lande ved også at medtage filtrering af en vandprøve fra et drikkevandsreservoir i Vestbengalen.

Til undersøgelse af effektiviteten af hver af søjlerne bliver en række målinger udført på henholdsvis indløbs- og udløbsvand. Resultaterne vil efterfølgende sammenlignes. Der lægges specielt vægt på tilstedeværelsen af bakterier og specifikt coliforme og *Eschericia coli*.

Det totale bakterieindhold opgøres ved at tælle antallet af Colony Forming Units, CFU, mens antallet af coliforme bakterier samt *E. coli* bestemmes ved Colilert metoden.

Eksperimenterne er opbygget og resultatbearbejdningen er udført med henblik på at besvare følgende spørgsmål:

- Hvordan har parametrene kornstørrelse, schmutzdecke og mængden af organisk materiale indvirkning på filterets effektivitet?
- Hvilken indflydelse har vands strømning gennem kolonnen på filtreringsprocessen?
- Hvor effektiv er fjernelsen af bakterier og ormeæg fra indisk vand?

På denne måde opnås en dybere forståelse af effektiviteten i et langsomt sandfilter med udgangspunkt i reduktion af bakterier, når overfladevand renses til drikkevand

2. Teori

2.1. Drikkevand

I Danmark er der lovfæstede krav til distribution og drikkevandskvalitet i form af ”Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg” [Miljøstyrelsen, 2001]. 99 % af drikkevandet i Danmark pumpes op fra grundvandet, hvor kun en grov filtrering samt luftning er nødvendig, før det pumpes videre til forbrugerne.

I Indien er der ikke nogen centraliseret lovgivning, der sikrer drikkevandskvaliteten, og et nationalt distributionsnet er ikke eksisterende. Kravene er derfor lokalt bestemt og defineres ud fra den tilgængelige vandressource. Pga. disse ofte dårlige forhold og forurenede vandressourcer accepteres en vis forurening og blandt andet et *E. coli* indhold på 10 bakterier per 100 ml [Bregnhøj pers. com].

I det fugtige område Vestbengalen i Indien er det ikke muligt at udnytte grundvandsressourcen til drikkevandsproduktion på grund af for højt arsenindhold. Derfor benyttes overfladevand fra damme. De fleste steder har man flere damme, hvor én eksempelvis bruges til badning og tøjvask og en anden til drikkevand og madlavning [Kolkata G. S.]. Da dammene ikke er indhegnede, er det ikke altid opdelingen overholdes, hvorved drikkevandet bliver inficeret med blandt andet *E. coli* og andre fækale bakterier, men også parasitter så som helminthorme [Kolkata G. S.]. Det er derfor nødvendigt at rense overfladevandet, før man er sikret en vandkvalitet, som ikke er sundhedsskadelig. Af mikrobiologiske rensemetoder kan nævnes filtrering, klorering, kogning samt at udsætte vandet for solens UV-stråler.

2.2. Arrenæs

I 1994 etablerede Københavns Energi et forsøgsanlæg med kunstig infiltration af vand fra Arresø. Formålet med anlægget er at skabe kunstig grundvandsdannelse ved at nedsive søvand gennem sediment. Vandet der filtreres ved Arrenæs er søvand fra Arresø, som typisk indeholder et bredt spektrum af organismer: bakterier, alger, protozoer, etc. Mængden af de bakterier varierer med årstiden, se appendiks 9.

Anlægget er som nævnt kun på forsøgsbasis, men det oppumpede vand overholder alle krav til drikkevandskvalitet. Den langsomme sandfiltrering på Arrenæs er derfor yderst anvendelig til produktionen af drikkevand [Københavns Energi], [Bennedsen L., m.fl. 2008].

Anlægget på Arrenæs er en kombination af et sprinklersystem og bassiner. Sprinklerne simulerer regnvejr, og kan tilføre 55 mm vand per døgn. Princippet er, at græssets rodzone og jordens muld frafiltrerer vandets partikler. Nedsivningen af det sprinklede vand skal derfor ske gennem et græs-areal, så metoden er kun anvendelig i sommerhalvåret.

Af bassiner er der installeret et sedimentationsbassin og 4 infiltrationsbassiner. Søvandet bliver først pumpet op til sedimentationsbassinet, hvor sand, ler og organisk materiale bundfældes i løbet af 24 timer. Herefter ledes vandet videre til et af de 4 infiltrationsbassiner, hvor infiltrationen gennem

jordens forskellige sandlag starter. Infiltrationsbassinerne er bygget ved at grave den øverste muld af, til den ønskede sandoverflade fremkommer. I begyndelsen af en cyklus tilføres der dagligt 360 mm vand, hvorefter tilførslen reguleres i takt med at infiltrationen hæmmes, da bunden efterhånden dækkes med bl.a. alger. Infiltrationsraten er gennemsnitligt 0,25 meter per time. Når denne bliver for lille på grund af clogging, typisk efter 3 måneder, stoppes vandtilførslen. Når vandtilførslen stopper, står bassinet tørlagt en måned. Herefter fræses den dræned bund, hvorved algelaget blandes med de øverste 15 cm af sandet. Optimalt set skulle de øverste centimeter af filteret fjernes og vaskes, men det har man vurderet har for høje omkostninger for et forsøgsanlæg. Når bunden er fræset kan en ny cyklus begynde. Pga. hvileperioderne opererer man med bassiner i par, således at der, når det ene bassin clogger, er et andet bassin klar til at begynde en ny cyklus, se Billede 1 [Allan pers. com.] [Københavns energi].



Billede 1 – Infiltrationsbassin, Arrenæs

2.3. Mikroorganismer og orme

2.3.1. Bakterier

Ved omdannelse af overfladevand til drikkevand er det essentielt at fjerne de patogene bakterier, da de er sygdomsfremkaldende. Patogene bakterier kan elimineres ved bl.a. filtrering eller ved at ændre deres levevilkår. Bakterier er typisk 0,2-2 μm lange og lever i habitater under bestemte forhold. Ændres eventuelt temperatur, pH, ilt mængde, sammensætning og mængde af tilgængeligt næring eller mængden af gift såsom klor, kan det medføre, at bakterierne dør.

2.3.2. Coliforme bakterier - indikatororganismer

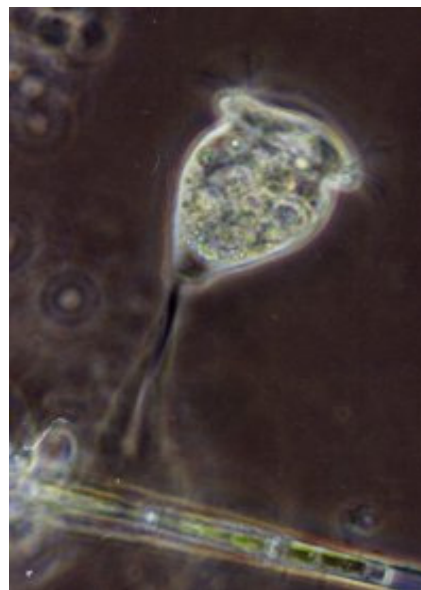
Coliforme bakterier er fakultativt aerobe og tilhører den gram-negative gruppe. Nogle er patogener og kan være toksiske for dyr og mennesker.

De coliforme bakterier findes mange steder men netop *E. Coli* stammer fra tarmmiljøet, og kan dermed indikere fækal forurening i vandige miljøer [Medigan, M. T., m.fl., 2008 s.907-8]. En indikatororganisme er dannet i et specifikt habitat, og når de er fundet uden for dette, kan de indikere, at andre stoffer fra deres oprindelige miljø vil være til stede.

E. Coli's tilstedeværelse er lettere at påvise end tilstedeværelsen af de patogener, den indikerer, hvilket gør den til en god og hyppigt brugt indikatororganisme. Siden *E. Coli* ikke naturligt forekommer udenfor tarmmiljøer, har den begrænsede vækstmuligheder og lever kun i en begrænset periode. Ulempen ved *E. Coli* kan derfor være, hvis patogener, for hvilke den er indikator, har en længere levetid i det undersøgte miljø [MTU, 2003].

2.3.3. Protozoer

Protozoer er encellede eukaryote mikroorganismer uden cellevæg, men med en fleksibel cellemembran. De er sygdomsfremkaldende og lever bl.a. i ferskvand, i marine miljøer og i jord, samt som parasitter i dyr og mennesker. De fleste protozoer får næring ved at optage partikulært stof, ofte andre celler, ved at omringe ”madpartiklen” med en del af den fleksible cellemembran [Medigan, M. T., m.fl., 2006 s.463-64]. Denne græsning kan være medvirkende til at bakterieantallet holdes nede. De fleste protozoer er mobile, hvilket er nødvendigt, da de lever af at fange føde. På Billede 2 ses Vorticella, som bevæger sig ved brug af sin hale.

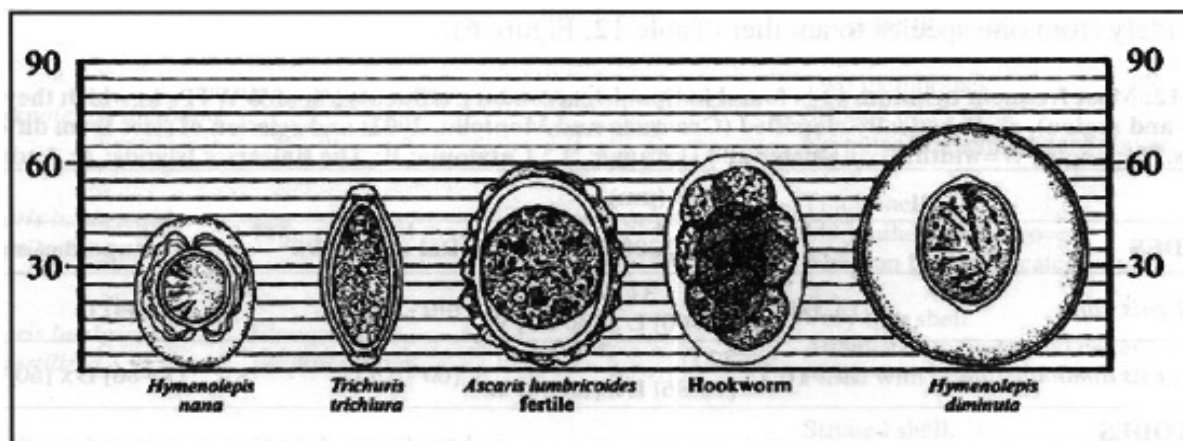


Billede 2 - Foto af Vorticella, en protozo med størrelse 20-150 μm uden stilk [Århus akademi, 2008]

Der findes mange vandbårne protozoer hvoraf *Giardia* og *Cryptosporidium* er særligt problematiske da de begge danner cyster, er sygdomsfremkaldende, og samtidigt resistente overfor klor. *Giardia* forårsager diarré, tarmkrampes, ubehag, vægttab samt akutte eller kroniske symptomer hvor *Cryptosporidium* medfører mild diaré. Deres resistens gør at det ikke er muligt at behandle dem kemisk, det er derfor nødvendigt at bruge andre metoder f.eks. filtrering [Medigan, M. T., m.fl., 2006 s.917-919].

2.3.4. Helminthæg

Ordet helminth kommer fra græsk og hentyder til ordet orm. Ofte dækker betegnelsen helminthorme kun parasitter som eksempelvis bruger mennesker som vært og derved medfører sygdom. Der findes 150 kendte arter, som kan inficere mennesker [Lobo M. Q., 2006, s.6-11]. Helminthorme forårsager især tarmsygdomme, men nogle arter inficerer også blod og lever. Specielt børn er modtagelige og sårbare overfor infektionerne. Helminthæg har en evne til at overleve længe uden for sit miljø inden de finder en ny vært [Lobo M. Q., 2006, s. 3-12]. For at give en ide om størrelsesforholdet ses i Figur 1 fem udvalgte æg.



Figur 1 - Relativ størrelse af udvalgte helminthæg [Lobo M. Q. 2006]

2.4. Filtreringsprocesser

Som tidligere nævnt er det nødvendigt at rense overfladevand, før det er sundhedsmæssigt forsvarligt at bruge det til drikkevand og i husholdningen. Dette kan ske ved en filtreringsproces. To forholdsvis primitive filtreringsprocesser er langsom sandfiltrering og riverbank filtration. I begge tilfælde strømmer vandet gennem sedimenter, der kan variere fra filter til filter. Ved langsom sandfiltrering sker infiltreringen oppefra og ned og styres af tyngdekraftens påvirkning. Ved riverbank filtration strømmer vandet horisontalt gennem brinken eller søbredden til en installeret brønd. Infiltrationsraten bestemmes da af det undertryk, pumpen skaber [Ray C., 2002]. Riverbank filtre er naturligt opbyggede, da filtreringsprocessen sker direkte i brinken eller søbredden, hvorimod langsom sandfiltrering oftest sker i kunstigt opbyggede filtre, hvorved specifikke krav til vandkvaliteten kan opnås. Langsomme sandfiltre er derfor mere fleksible og kan bygges i stor skala eller til hver enkelt husholdning, og der kan renses vand fra alle former for reservoirs [Wotton, R. S., 2001], [Stauber, C. E. et al, 2006].

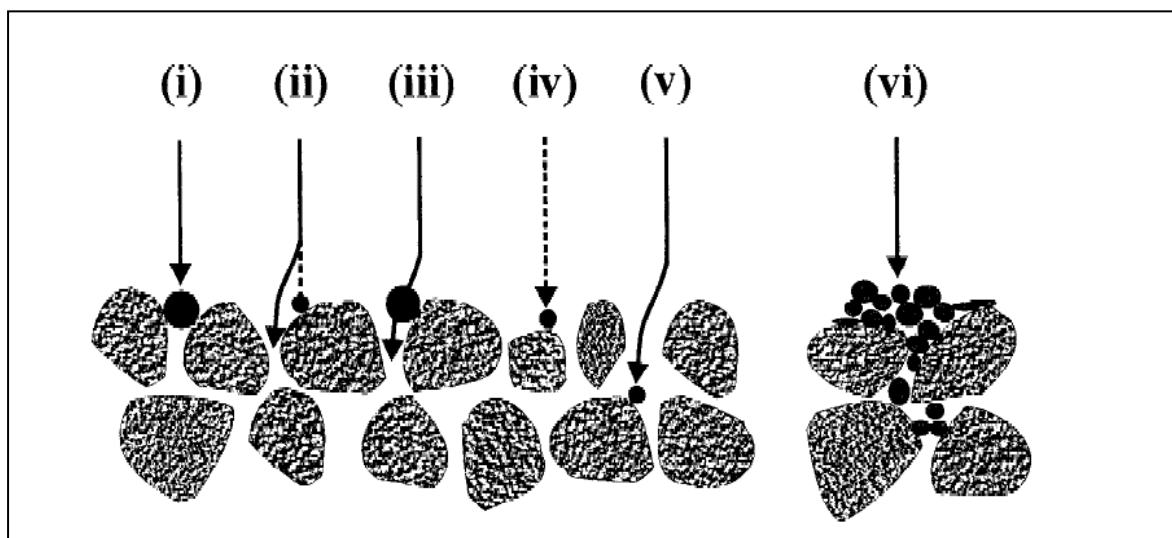
Vi vil videre beskæftige os med processer forbundet med langsom sandfiltrering.

2.4.1. Mekanisk fjernelse

Sandfilterets kornstørrelse har stor betydning for filterets effektivitet, fordi kornene er en vigtig parameter i den mekaniske del af filtreringsprocessen. Den omtalte proces består i en fysisk fjernelse af partikler, inklusiv bakterier og protozoer, ved indfangning i porerne.

Generelt har filtrene korn af størrelsen 0,1-0,3 mm [Campos, L. C. et al, 2001]. Filtrene består derved af sand, da dette har størrelsen 0,06 til 2 mm [Grotzinger, J., 2007]. Filtreringen af partikler sker primært ved adsorption til sandkornenes overflade gennem forskellige processer, som vist i Figur 2. Derfor er sandkornenes overfladeareal en afgørende faktor i filtreringsprocessen.

Ved stigende kornstørrelse stiger den hydrauliske konduktivitet samt permabiliteten [Nazaroff, W. W., 2001, p. 194 og figur 4.D.2] og det fastslås derved, at filtereffektivitet stiger med faldende kornstørrelse [Wotton, R. S., 2002].

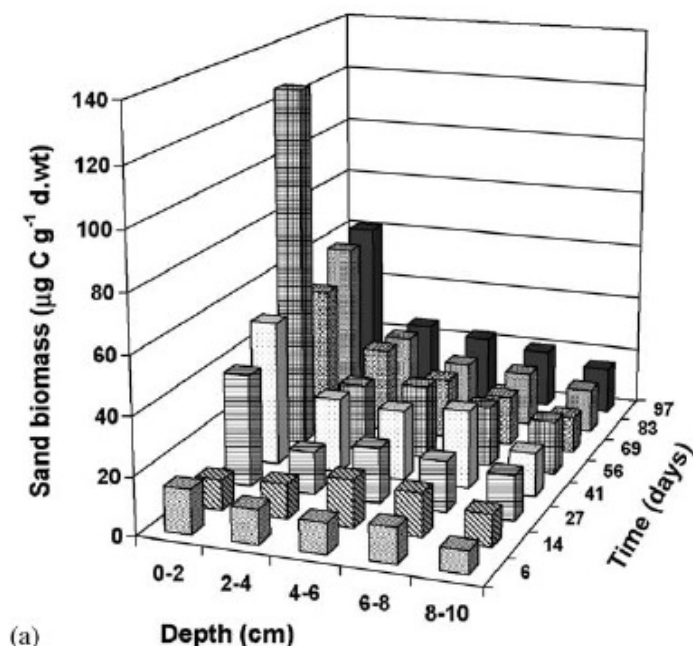


Figur 2 - Oversigt over de processer som bidrager til filtreringen af partikler. (i): sining, partikler fanget i porerne, (ii): partikel fragtet til sandkorn vha. dets impuls, (iii): partikel ledt til porer af strømmen, (iv): sedimentation/bundfældning/aflejring af partikel vha. Tyngdekraften, (v): partikel trænger gennem mellemliggende porer før sedimentation sker, (vi): schmutzdecke partikler (sort) reducerer porestørrelsen og indfanger dermed indkomne partikler [Wotton, R. S., 2002].

2.4.2. Biologisk fjernelse

Filterets biologiske aktivitet er endnu et vigtigt parameter for filterets effektivitet. Den biologiske aktivitet dækker over opbygningen og virkningen af økosystemer, som indeholder kulturer af både mikro – og makroorganismer [Mauclaire, L. et al, 2005]. Organismerne optimerer deres forhold ved at danne biofilm på kornoverfladerne. Den biologiske rensningsproces består i, at partikler fra råvandet adsorberes til biofilmen, der indeholder Extracellular Polymeric Substances, EPS. Denne matrix bidrager både til indfangning og medvirker til, at partiklerne bliver siddende [Jellison, K. L., 2000]. Altså er biofilm, dannelsen og virkningen af denne en vigtig parameter i fjernelsen af bakterier.

Reduktion af den hydrauliske konduktivitet øger kontakttiden mellem vand og de dannede mikrobiologiske kulturer, således at inkorporeringen af næringsstoffer, der føres med vandet gennem filteret, stimuleres. Biomassen akkumuleres derfor med tiden [Mauclaire, L. et al, 2005]. Ned gennem filteret er der forskel på mængden af akkumuleret organisk materiale, og det ses af Figur 3, at koncentrationen er størst i de øverste 2 cm.



Figur 3 - Koncentration af biomasse som funktion af tid og dybde. [Campos, L. C. et al 2001]

De øverste 0-3 cm af sandfilteret indeholder mest organisk materiale, blandt andet filterets schmutzdecke. Schmutzdecket har stor medvirken på frasortering af bakterier, da mange af de organiske partikler opfanges og dermed frafiltreres her [Wotton, R. S., 2002] [Campos, L. C. et al, 2001] [Hijnen, W.A.M., 2004].

Såfremt sollys kan trænge gennem vandet over filteret sker der fotosyntese i schmutzdecket. Det herved frigivne carbon bliver videreført til sandet, hvori det tjener som næring for mikroorganismene, der opbygger økosystemer og biofilm. [Campos, L. C. et al 2001]. Biologisk filtrering forekommer derfor gennem hele filteret, men det fastslås at effektiviteten af denne er størst i schmutzdecket og aftager med filterets dybde.

Opsamlende kan det siges, at der finder forskellige mekaniske såvel som biologiske filtreringsprocesser sted i filteret, og at f.eks. fjernelsen af bakterier er knyttet til flere af disse på en gang.

2.5. Clogging og flow

Når et filter clogger er der tale om en tilstopning, hvorved infiltrering hæmmes eller ikke er mulig. Flowraten aftager, når dette fænomen indtræffer.

Flowraten gennem et sandfilter er typisk mellem 0,1 og 0,3 meter per time [Wotton, R. S., 2002].

Flowraten aftager med tiden, samtidig med at den hydrauliske modstand øges, hvilket manifesteres i

et tryktab ned gennem kolonnen. Dette sker pga. ophobninger af partikler samt økosystemerne, som udvikles med tiden [Campos, L. C. et al 2001].

Både akkumulering af biomasse i porerne og partikeludfældning er faktorer, der medfører clogging af filteret [Mauclaire, L. et al, 2005]. Mængden af biomasse og partikler, der primært bidrager til tilstopningen, akkumuleres i schmutzdecket, se Figur 3 [Campos, L. C. et al 2001].

Når filterets gennemløb bliver for lavt, skal filteret renses for at opnå en tilfredsstillende effektivitet. Det vil sige, at filteret skal drænes og de øverste få centimeter fjernes, før filteret sættes i brug igen [Wotton, R. S., 2001], [J. Rasmussen pers. com].

2.6. Modning

Mikrobielle økosystemer er essentielle for filterets effektivitet. Disse økosystemer skabes ved forskellige modningsprocesser. Opbygning af biofilm, akkumulering af partikler i porerne samt kolonier af protozoer både på og i schmutzdecket er alle modningsprocesser, som skal gennemføres før filteret virker optimalt [Jellison, K. L., 2000].

Filteret modnes ved at lede tilstrækkeligt vand igennem, således at kolonierne får tilstrækkeligt tid til at dannes. Modningen er især vigtig for schmutzdecket, da dette gennemgår en "lag-phase", på typisk 10 dage, før schmutzdecket er udviklet og filtreringen effektiv [Campos, L. C, 2006].

Modning er et komplekst fænomen og har indflydelse på mange parametre i et langsomt sandfilter.

3. Metode



Billede 3- Sally og fire kolonner

I undersøgelsen af langsomme sandfiltre gennemføres eksperimenter med henblik på at bestemme indflydelsen af henholdsvis det organiske materiale i sandkolonnen, schmutzdecket og kornstørrelsen på effektiviteten. Samtidig undersøges, hvorvidt indisk vand kan filtreres på samme måde. Forsøgsopstillingen består af fem søjler, se Billede 3, med forskellige karakteristika, hvilket vil fremgå af den videre gennemgang.

- Uden Organisk materiale
- Uden Schmutzdecke
- Lidt Schmutzdecke
- Meget Schmutzdecke
- Indisk

3.1. Prøvetagning

Som grundlag for forsøgsopstilling og eksperimenter opsamles sand- og vandprøver på infiltrationsanlægget ved Arrenæs. Dette besøges i starten af marts og midt april.

Sandet graves op, mens dette stadig er fugtigt, og opbevares i 10 liters plastikspande med tætsluttende låg. Der graves i de øverste 30 cm, der opdeles i to lag på henholdsvis 0-15 cm og 15-30 cm. Ved det første besøg tages prøver af begge lag, ved andet besøg kun af det nederste. Sandet opbevares i mørke, først ved 2 °C, senere ved 10 °C.

Vandet opsamles i 25 liters dunke via en 2 liters dunk og en tragt. Det opsamles fra indløbet til nedsivningsbassinet. Vandet opbevares ved 2 °C i mørke indtil forsøgets start. Herefter opbevares det ved siden af forsøgsopstillingen i 10 °C.

Ud over vand og sand opsamles schmutzdecke. Dette er en slimet brungrøn masse mellem algelaget og sandet, der opsamles med en mindre haveskovl. Prøven opbevares i gennemsigtige plastposer en uges tid ved 2 °C i mørke.

3.2. Forsøgsopstilling

3.2.1. Fysisk opstilling

De første fire kolonner bygges i stålrør med en diameter på 10 cm. Stålrørene er 49 cm høje, men forlænges efter pakning til en totalhøjde på 129 cm. Der er udtag i bunden, hvortil en plastslange sluttes for derefter at ende i en opsamlingsbeholder. Udtaget sidder i bundens centrum, hvilket ikke gør det muligt at stille kolonnerne på gulvet. Disse placeres derfor på en trefod med hul i midten. Stålrørene holdes endvidere fast i et stativ.

Den indiske søjle afviger fra de andre ved at være af transparent plast med en diameter på 3,5 cm og have udtaget på siden.

Kolonnerne står i mørke ved 10 °C.

3.2.2. Opbygning af kolonne



Billede 4 – Den indiske søjle

I bunden af stålkolonnerne lægges et filter for at undgå, at sandet tilstopper udløbet, hvorved kolonnen ville være ubrugelig. Derefter lægges omkring 1,5 cm dansand nr. 6 og derefter 1,5 cm dansand nr. 4. Disse to lag har en større porøsitet end selve sandkolonnen og gør det derved muligt for vandet at fordeles ligeligt før udtagningen i bunden.

Stålsøjlen fyldes med søvand til en vandstand på omkring 10 cm. Herefter tilføres en håndfuld sand ved at en hånd dyppes under vandet, der så skyller sandkornene ud mellem fingrene. Denne metode tillader sandet at pakke sig selv, hvorfor det ligger som i et naturligt vandmiljø. Efter tilførsel af nogle håndfulde vil de mindste sandpartikler befinde sig i vandfasen og der holdes en pause, hvor disse får ro til at falde til bunds. Efter nogle centimeter trykkes søjlen let sammen for at undgå strømning langs rørets kant. At sandet tilføres med hånden gør det ligeledes muligt at frasortere sten og klumper af ler og organisk materiale.

Diameteren på den indiske søjle er for lille til, at man kan få hånden derned, se billede 4. Denne er derfor bygget ved at sortere sten fra før tilsætning og derefter drysses sandet ned.

Der er dog stadig vand over kolonnen.

Det er vigtigt, at der ikke sker rystelser i kolonnerne, hverken under opbygning eller efterfølgende.

Kolonnerne opbygges med sand fra Arrenæs. Først pakkes to pilotkolonner. Den ene er delt i to lag, øverst sandet fra 0-15 cm nederst sandet fra 15-30 cm se Billede 5. På grund af flydende konsistens skræbes ca. 2 cm af kolonnens top før tilsætning af vand til prøvetagning. Den anden pilot kolonne består kun af sand fra 15-30 cm. Højden af kolonnerne er ca. 30 cm.

Efter opmåling af flowrate og prøvetagning til udførelse af CFU bygges de endelige kolonner, til de er omkring 30 cm høje, se Tabel 1. Disse indeholder kun sand fra laget 15-30 cm.



Billede 5: Opdelingen af sandlag ved Arrenæs

Tabel 1 - Sandkolonnernes højde*

| | Uden Organisk | Uden schmutzdecke | Lidt schmutzdecke | Meget schmutzdecke | Indisk |
|------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------|
| Højde / cm | 30 | 33 | 32,1 | 32,2 | 29 |

* Kolonne defineres som sandet fra Arrenæs. Dansandet er derfor ikke medregnet.

Kolonnen uden organisk materiale bygges med det samme sand som de andre. Dette er dog brændt af ved 550 °C i et døgn, hvor organisk materiale fraskilles.

Til tre af kolonnerne tilsættes et schmutzdecke. Vægten af dette registreres Tabel 2 og det tilføres ved at blive hældt ned i midten af søjlen.

Tabel 2 - Mængden af schmutzdecke på de tre kolonner

| | Meget Schmutzdecke | Lidt Schmutzdecke | Indisk |
|---------|--------------------|-------------------|--------|
| Vægt /g | 38,67 | 14,21 | 6,4 |

Vandet, der behandles i kolonnerne er fra Arresø, tilføres gennem en slange, for at undgå forstyrrelser af søjlerne. Kolonnerne bygges med vand der har stået i ca. en måned og modnes herefter med nyhentet vand. Efter modning tilføres 7 ml råspildevand til 25 L Arresøvand, og vandet i kolonnernes indløb skiftes ud med dette. Dog er den indiske kolonne her en undtagelse, da den efter modning tilføres vand fra et drikkevandsreservoir i Indien.

Det skal bemærkes, at vandstanden i de fem kolonner under hele projektet er forskellig.

Kolonnerne uden, med lidt og med meget schmutzdecke står i 9 dage med konstant gennembløb. De sidste 4 dage med det forurenede vand. Kolonnen uden organisk materiale gennembløbes tre gange, hvoraf de to sidste er med forurenede vand. Den indiske er gennembløbet et døgn med Arresøvand og efterfølgende to døgn med vand fra Indien.

3.2.3. Opsamling af prøver

Opsamlingen af vand til videre analyser sker ved at lede udløbsvandet ned i glasflasker, der er varmebehandlet ved 220 °C i et døgn. Analyse vandet fra indløbet i søjlen uden organisk materiale og den indiske er taget direkte fra de respektive og rystede opsamlingsbeholdere. For de tre resterende kolonner er opsamlingen sket fra vandet over kolonnerne.

3.3. Målemetoder

3.3.1. Sand

Ved sining karakteriseres sandets kornstørrelse og fordeling. Indholdet af organisk materiale i sandet findes ved glødetab.

Flowet i kolonnerne opgøres ved at måle mængden af vand, der er løbet igennem, og sammenholde det med tiden for gennemløbet, hvorved resultatet gives i ml/time.

Dette omregnes endvidere til opholdstid i kolonnen ved at dividere porevolumenet af sandkolonnen med flowet.

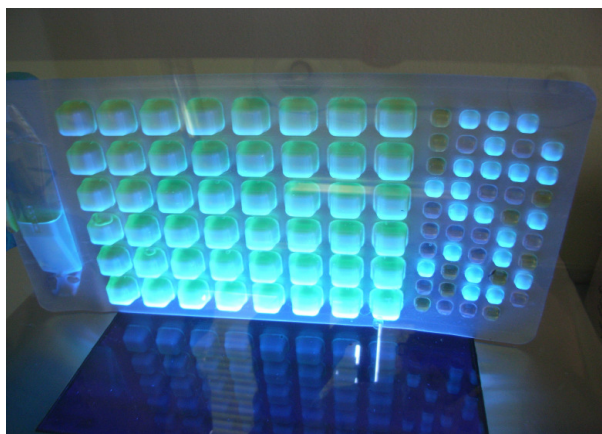
3.3.2. Vand

På vandprøverne måles pH med en elektrode, temperatur- og iltindholdet ligeledes med en elektrode.

Absorbans måles via et spectrophotometer ved 600 nm for at vise forskellen i turbiditet [Intritus for Vand og Miljøteknologi, DTU, 2008].

Der laves pladespredning for at opgøre Colony Forming Units (CFU). Denne er en kvalitativ metode til at optælle alle levende bakterier, hvorved det er muligt at opgøre den mikrobielle densitet i vandprøven. Der bruges en R2A agar og inkubationen forgår ved 22 °C i 14 dage.

R2A agar er designet til drikkevandsundersøgelser og har et lavt næringsindhold, men mange forskellige carbonkilder. Den lange inkubationstid og de forskellige carbonkilder gør det muligt for mere resistente og langsomt groende bakterier at vokse, og der opnås derfor et mere dækkende billede af den totale bakteriemængde [Becton, Dickinson and Company, 2008].



Billede 6 – Optælling af *E. coli* ved colilert metoden

Colilert® med IDEXX Quanti-Tray/2000 tester for coliforme indikatororganismer, inklusive *E. coli*. Reagenset Defined Substrate Technology® nutrient indikator tilsættes vandprøven. Efter incubering i 24 timer ved 37 °C kan produktet fra en metabolisk proces fremkaldt af reagenset ses som gul, henholdsvis fluorescerende farve, se Billede 6. Antallet af coliforme bakterier samt *E. coli*, kan herefter opgøres. Det er med denne metode muligt, i den rene prøve, at måle fra 1 til 2419 bakterier per 100 ml. Der laves endvidere fortyndinger for at måle et højere antal af bakterier [IDEXX Laboratories, Inc., 2008].

Ormeæg ses ved mikroskopering med en 100 gange forstørrelse. Det benyttede Zeiss-mikroskop er tilknyttet et kamera der overfører billeder til en computer. På denne kan størrelsen af objekterne måles.

4. Resultater og diskussion

Opnåede resultater vil gennem dette afsnit blive præsenteret og diskuteret for at danne baggrund for senere konklusioner omkring sandfiltrering. Rådata fra karakteriseringerne kan findes i appendiks 1-7.

4.1. Karakteristik af sediment

Sandet i kolonnerne har betydning for filtreringsevne og hastighed. I de øverste 30 centimeter af sandet fra infiltreringsbassinerne ved Arrenæs, er der to slags sediment. De øverste 15 cm er, som det ses af

Tabel 3, mørkere i farven end laget fra 15-30 cm. Dette tyder på et højere indhold af organisk materiale, hvilket stemmer overens med den gentagne fræsning, hvor schmutzdecket og det øverste sand blandes.

Tabel 3 - Karakteristik af de to lag sand i infiltrationsbassinerne ved Arrenæs

| | Farve | Sorteringsgrad | Middelkornstørrelse | D60 | D10 | Glødetab / % org. |
|----------|---------|----------------|---------------------|------|------|-------------------|
| 0-15 cm | Mørkt | NM | NM | NM | NM | NM |
| 15-30 cm | Lys rød | 1,2 | 0,11 | 0,12 | 0,08 | 0,7 |

NM: Not Measured

Den første af de to pilotkolonner indeholder sand fra 0-15 cm. Fordi infiltrationen var meget lav blev den anden pilotkolonne efterfølgende bygget udelukkende af sand fra 15-30 cm.

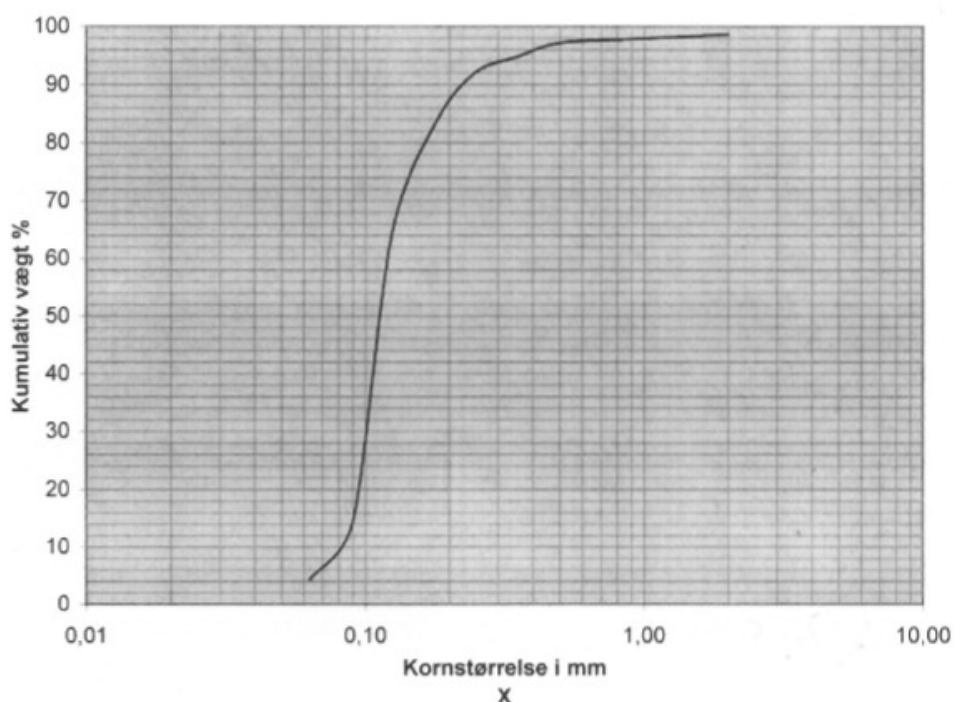
Tabel 4 – Opholdstiden i pilotkolonnerne

| | Pilotkolonne 1 | Pilotkolonne 2 |
|--------------------|----------------|----------------|
| Opholdstid / timer | 118 | 24 |

Efter en hydraulisk analyse af de to pilotkolonner udregnes opholdstiden, se

Tabel 4. På baggrund af de disse, bygges kolonnerne i den endelige forsøgsopstilling, som pilotkolonne to, kun af det sand fra 15-30 cm. Sandet analyseres yderligere.

Ved sining konstateres det, at kornstørrelsen varierer fra ca. 0,06 mm til 1 mm. Det ses af grafen i Figur 4 hvordan størstedelen af kornene ligger i intervallet fra 0,1 mm til 0,2 mm. Der er dog en dårlig sortering af de 15 %, der har den største kornstørrelse.



Figur 4. Graf over kornstørrelsesfordelingen for sand fra 15-30 cm, brugt i forsøgsopstillingen

Kolonnerne består af sand, der defineres som partikler fra 0,062 mm til 2 mm. Størstedelen af partiklerne i forsøgsopstillingen ligger i den lave ende af denne skala. Kolonnernes permeabilitet er derfor forholdsvis lav. De lidt større sten og sandkorn bidrager til øget permeabilitet, men den lille procentdel taget i betragtning har det ikke voldsom betydning. Den fineste si kan ikke angive størrelsen af korn, der er under 0,06 mm. Grafen i Figur 4 informerer ikke om de mindste 4 % af kornene. Dette kan betyde, at der også er silt i kolonnerne. Hvilket vil have stor betydning for permeabiliteten, da disse kan pakke sig mellem de andre større korn. Dette sammen med de små korns store overflade gør den mekaniske fjernelse meget effektiv.

4.2. Gennemstrømning

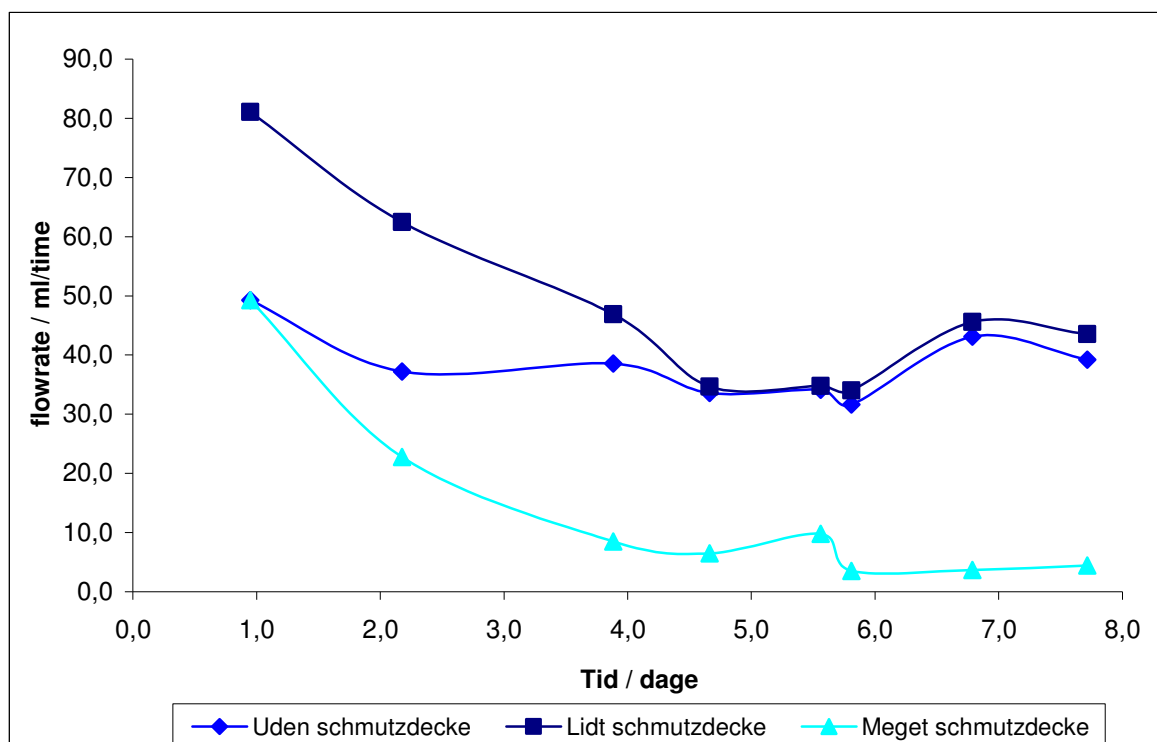
Gennemstrømningen af kolonnerne er høj grad styret af indholdet af organisk materiale i kolonnerne, som det ses af opholdstiden i Tabel 5.

Tabel 5 - Opholdstid ved prøveudtagning, efter 8 dage

| | Uden org. | Uden schmutzdecke | Lidt schmutzdecke | Meget schmutzdecke | Indisk |
|--------------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|--------|
| Opholdstid / time | 0,03 | 20 | 17 | 171 | 3 |
| Flowrate / mm/time | 879 | 1,7 | 1,8 | 0,19 | 1,2 |

Kolonnen uden organisk materiale lader vandet strømme næsten uhindret igennem, hvorimod flowet hindres, hvis der er tilført organisk materiale mellem sandkornene og i form af schmutzdecke. Det kan derfor konkluderes at indholdet af organisk materiale i kolonnerne har betydning for den mekaniske fjernelse og dermed opholdstid og strømmingen gennem kolonnerne.

Figur 5 illustrerer hvorledes gennemstrømningen i vores eksperiment ændres over tid.



Figur 5 – Udvikling af flowraten for kolonnerne uden, med lidt og med meget schmutzdecke

Det ses, at ændringen i gennemstrømningen afviger fra det jævne fald efter ca. 6 dage. Dette skyldes, at der for kolonnerne uden og med lidt schmutzdecke tilføres mere vand i indløbet, hvorved vandsøjlen over kolonnerne bliver højere. Dette skaber et højere tryk og derved øget gennemstrømning.

Samme dag tilsluttes kolonnen med meget schmutzdecke en pumpe for at trække vandet hurtigere gennem søjlen i forsøget på at modne søjlen tilfredsstillende inden de endelige udtag. Pumpen har tilsyneladende ikke den ønskede virkning, som det ses af Figur 5. Forklaringen kan være, at pumpen i stedet for vand trækker luft ind fra utætheder ved samlingen mellem stål-røret og slangen. Hvorfor vandet har svært ved at komme ud og gennemstrømningen hæmmes i stedet for at bedres.

Flowraten i vores kolonner er meget lav sammenholdt med litteraturen, der angiver en typisk flowrate på 0,1-0,3 meter per time. Ved Arrenæs er flowraten omkring 0,25 meter per time. Den store afvigelse i vores eksperiment kan skyldes, at vandsøjlen over filteret er lav.

Flowraten aftager som funktion af tiden, se Figur 5. Der må derfor blive ophobet mere og mere organisk materiale i kolonnerne og schmutzdecket, da dette er skyld i tilbageholdelse af vandet. Det kan derfor konkluderes, at der sker en betydelig akkumulering af organisk materiale i vores kolonner grundet mekanisk filtrering. Denne stiger med tiden for til sidst at clogge filteret fuldstændigt, hvorved selv vandmolekyler tilbageholdes.

Cloggingprocessen sker meget hurtigt og allerede efter 4 til 5 dage er gennemløbet reduceret voldsomt. Dette skyldes sandsynligvis, at middelstørrelsen på sandkornene i kolonnerne er 0,11 mm, se

Tabel 3. Sammenlignet med kornstørrelsen i andre langsomme sandfiltre, der ligger på 0,1-0,3 mm, er dette meget lavt. Hvilket kan være grunden til den hurtige tilstopning.

Ved Arrenæs, hvor sandet er hentet, indtræffer clogging efter i gennemsnit 3 måneder. Der må derfor være andre forskelle end sandstørrelsen, der har indflydelse på, hvor hurtigt infiltreringen i filteret bliver for lav. En forklaring kan være, at der på Arrenæs, hvor det er et naturligt opbygget system, er gange eller sprækker som vandet kan løbe i, og permeabiliteten derfor er uden betydning. En anden mulighed er at vandtrykket over filteret er højere ved Arrenæs end i vores opstilling. Som det ses af Figur 5 – Udvikling af flowrate, tyder det på, at dette er en betydende faktor for infiltrationsraten.

4.3. Indløbsvand



Billede 7 – Trine opsamlar vandprøve ved Arrenæs

Da fokus i opgaven er fjernelse af bakterier fra vand, er det vigtigt at karakterisere det benyttede overfladevand.

For at forsøget kunne udføres optimalt, var det nødvendigt at hente prøver ved Arrenæs to gange, se billede 6 og tidsplanen i appendiks 10.

Vandet fra den 11. marts stod opbevaret omkring en måned, før det blev taget i brug. Dette afspejles i det lave bakterieindhold, se 7. Da den endelige forsøgsopstilling skulle laves blev der hentet nyt vand, da det var vigtigt at søvandet var friskt.

Analyser af de to vandprøver viser, at pH er neutral og iltindhold ikke er unormalt. Se Tabel 6.

Colilert resultater af indløbsvandet hentet i april viste, at der hverken var coliforme bakterier eller *E. coli* tilstede. Derfor tilsatte vi råspildevand for at opnå en tællelig koncentration

af både coliforme bakterier, *E. coli* samt af kimtal.

Tabel 6 - Analyse af vand hentet ved Arrenæs henholdsvis den 11. marts og 15 april 2008

| Vand hentet 2008 | Kolonne | CFU / ml | Tuibiditet / abs | pH | O ₂ | Temperatur / °C |
|------------------|--------------------|----------|------------------|------|----------------|-----------------|
| 11.03 | Pilot kolonne 1 | 4024 | 0,005 | NM | NM | NM |
| | Pilot kolonne 2 | 4024 | 0,003 | NM | NM | NM |
| 15.04* | Uden org. | 154.215 | 0,044 | 7,61 | 10,3 | 19,3 |
| | Uden schmutzdecke | 69.007 | 0,014 | 7,6 | 9,9 | 20,6 |
| | Lidt schmutzdecke | 66.007 | 0,014 | 7,54 | 9,9 | 20,2 |
| | Meget schmutzdecke | 78.008 | 0,012 | 7,55 | 9,8 | 21,6 |

*Forurennet med spildevand. NM: Not measured

Tabel 6 viser også, at kolonnen uden organisk materiale har et bemærkelsesværdigt højt bakterieantal samt absorptionsværdi. Indløbsvandet til denne kolonne blev udtaget direkte fra den vandbeholder, hvori vi opsamlede vand fra Arrenæs. Derimod blev indløbsvandet fra de resterende kolonner udtaget fra vandsøjlen over de respektive kolonner, og vandet havde dermed ligget ovenpå kolonnerne i 8 dage.

Iagttagelserne tyder på, at der sker nedbrydning af bakterier samt reduktion af absorptions i vandsøjlen. Reduktionen kan være en fysisk proces, hvorved bakterier samt partikler drives til bunds af tyngdekraften. Da forsøget har stået i mørke, kunne man tænke sig, at algerne er faldet til bunds, fordi de er døde af iltmangel. Søvandets eventuelle indhold af protozoer og andre levende organismer, såsom orme og myggelarver kan medvirke til en biologisk fjernelse, hvorved bakterier samt partikler spises. Denne teori underbygges ved observation af den indiske søjle. Denne indeholdt til trods for opbevaringen i mørke en del dyr, der svømmede rundt.

Den fysiske fjernelse vil, pga. tyngdekraften, altid finde sted, når partiklerne har en større massefylde en vand. Men det kan ikke med sikkerhed fastslås, om de nævnte biologiske fjernelsesprocesser finder sted.

Resultaterne viser, at der sker en fjernelsesproces af bakterier såvel som af partikler i vandsøjlen.

Målet med eksperimenterne er at undersøge fjernelse af bakterier fra søen, dammen eller andet overfladevand. Derfor vil indløbsvandet til alle kolonnerne i resultater og diskussion blive opfattet og analyseret som værende det vand, der tages direkte fra vandbeholderen. Dermed har alle kolonner, bortset fra den indiske, ens indløbsvand.

4.4. Partikelreduktion

Absorptionsværdien i kolonnernes udløb er alle lavere end værdierne i indløb, se Tabel 7. Dette betyder, at der sker en turbiditetsreduktion fra indløb til udløb. For alle kolonnerne gælder, at de reducerer turbiditeten betydeligt, da absorptionen i alle udløb er lav.

Tabel 7 - Turbiditet for indløb, vandsøjle og udløb målt ved absorbans - abs

| | Uden org. | Uden schmutzdecke | Lidt schmutzdecke | Meget schmutzdecke | Indien |
|-----------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|--------|
| Indløb | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,046 |
| Vandsøjle | NM | 0,014 | 0,014 | 0,012 | NM |
| Udløb | 0,002 | 0,007 | 0,005 | 0,010 | 0,003 |

NM: Not Measured

Af Tabel 7 ses det, at den relative forskel mellem indløb og vandsøjle er større end den relative forskel mellem vandsøjle og udløb. Denne observation viser, at turbiditetsreduceringen er størst i selve vandsøjlen.

Tyngdekraften bidrager til, at partiklerne lægger sig på toppen af sandkolonnen. Protozoerne kunne også bidrage og dermed eliminere partiklerne.

Opsamlende sker turbiditetsreduktionen primært i vandsøjlen under indflydelse af både tyngdekraften og protozoer. I sandkolonne sker der kun mekanisk fjernelse, da kolonnen uden organisk materiale reducerer turbiditet lige så effektivt som de resterende.

4.5. Modning

Modning af sandet i kolonnerne er nødvendig, for at det mikrobiologiske økosystem i sandet i hver af søjlerne kan stabilisere sig, så den rensende effekt indtræffer.

Tabel 8 viser mængden af vand, der er løbet gennem kolonnerne, før der blev udtaget vand til videre analyser.

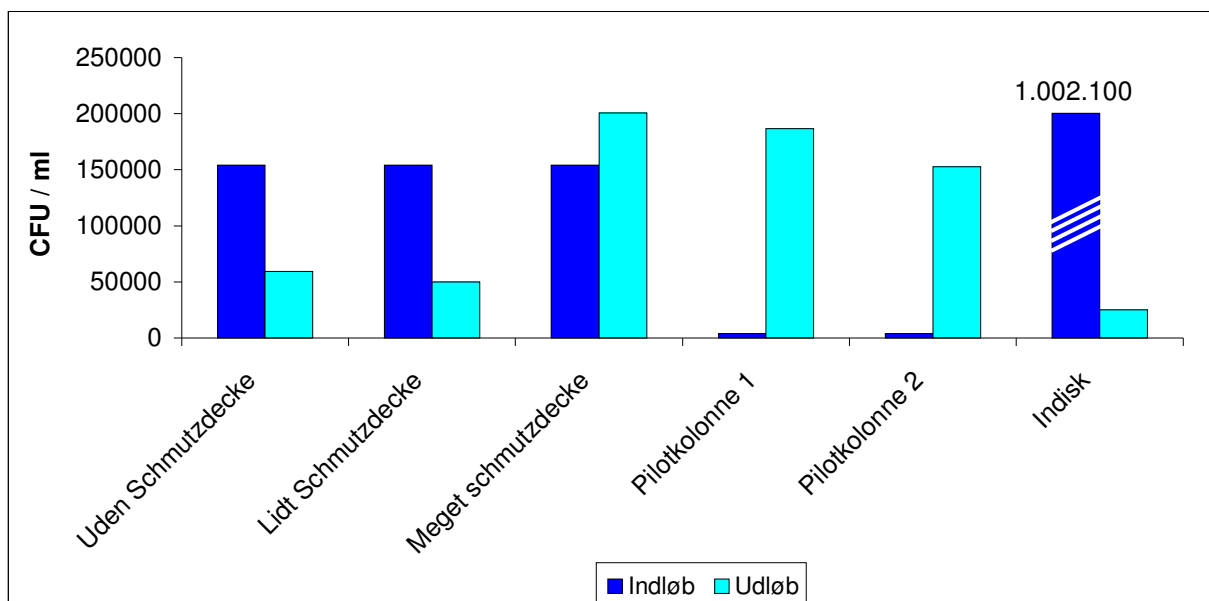
Tabel 8 - Gennemløbet vand inden prøvetagningen i volumen, samt ændring i vandstand over kolonnerne

| | Uden schmutzdecke | Lidt schmutzdecke | Meget schmutzdecke | Pilotkolonne 1 | Pilotkolonne 2 | Indien |
|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|--------|
| Vandmængde / ml | 7229 | 7907 | 1708 | 1000-3000* | 1000-3000* | 1493 |
| Δ vandstand / cm | 92 | 101 | 22 | 13-38* | 13-38* | 39 |

* Vurderet

Der er ikke opsamlet data om mængden af gennemstrømmet vand for pilotkolonnerne, men opstillingen stod kun få dage, inden vand blev udtaget til pladespredning. Vi vurderer, at der er løbet mellem 1 og 3 liter søvand gennem.

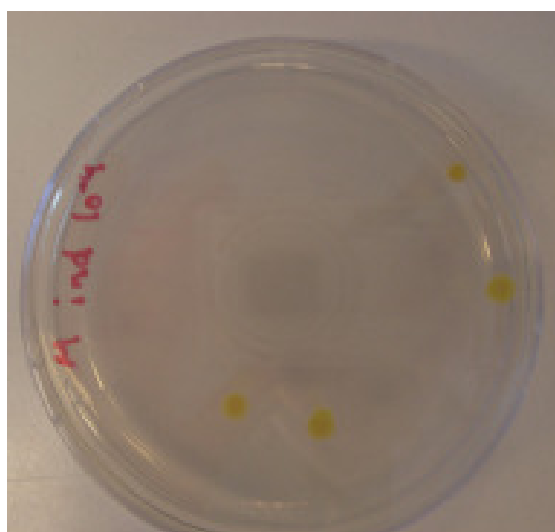
Figur 6 viser resultaterne for CFU analysen af alle kolonner. Her ses det, at antallet af bakterier i udløbet af kolonnen med meget schmutzdecke, samt de to pilotkolonner, er større end antallet i indløbet.



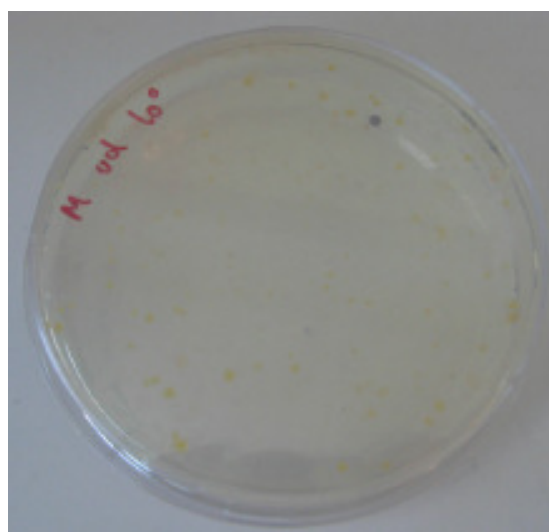
Figur 6 - CFU per ml i ind- og udløbsvand for samtlige kolonner i eksperimentet

Årsagen til at det kan lade sig gøre at have flere bakterier i udløbet end i indløbet må være, at sandet indeholder bakterier, som udvaskes. Der er blevet rodet op i sandets veletablerede økosystemer, da kolonnerne blev bygget. Nogle af de bakterier, som før sad fast på sandkornene, er formentlig blevet rystet af og skyllet med vandet ud. En del af denne problematik kan løses ved at tage uforstyrrede kolonneprøver.

Ved CFU analysen lignede kolonidannelserne hinanden på alle indløbspladerne. Det ses, at dannelsen af bakterier på udløbspladerne ser anderledes ud end indløbet, se billede 8 og 9. Da indløbs- og udløbspladerne har været udsat for samme forhold, kunne det tyde på, at bakteriesammensætningen er forskellig i ind- og udløb. Denne iagttagelse underbygger, at nogle af bakterierne i kolonnernes udløb stammer fra sandet.



Billede 8 – Pladespredning for indløbsvandet fra kolonnen med meget schmutzdecke



Billede 9 – Pladespredning for udløbsvandet fra kolonnen med meget schmutzdecke

Kolonnen uden schmutzdecke og kolonnen med lidt schmutzdecke har den bedste rensningseffekt i forhold til det totale bakterieindhold, se Figur 6. Disse to kolonner har haft den største gennemstrømning, se Tabel 8, og derfor er deres modningsproces nået længere end de øvrige kolonner. Det ser dog ikke ud til, at modningen af økosystemet i sandet er fuldent, da bakterieindholdet stadig vurderes værende højt.

Kolonnen, der blev brugt til at rense det indiske vand, havde ikke været udsat for samme kontinuerlige gennemstrømning af søvand som de øvrige kolonner. Der løb vand igennem kolonnen det første døgn. Herefter stod søjlen uforstyrret i syv dage. Dagen op til opsamlingen i steriliserede beholdere blev vandgennemstrømningen genoptaget med indisk vand.

Resultaterne fra CFU, se den indiske kolonne på Figur 6, viser, at der sker en effektiv rensning fra 1.002.100 til 25.165 CFU/ ml. Det ser derfor ud til, at denne modningsproces har fungeret bedst.

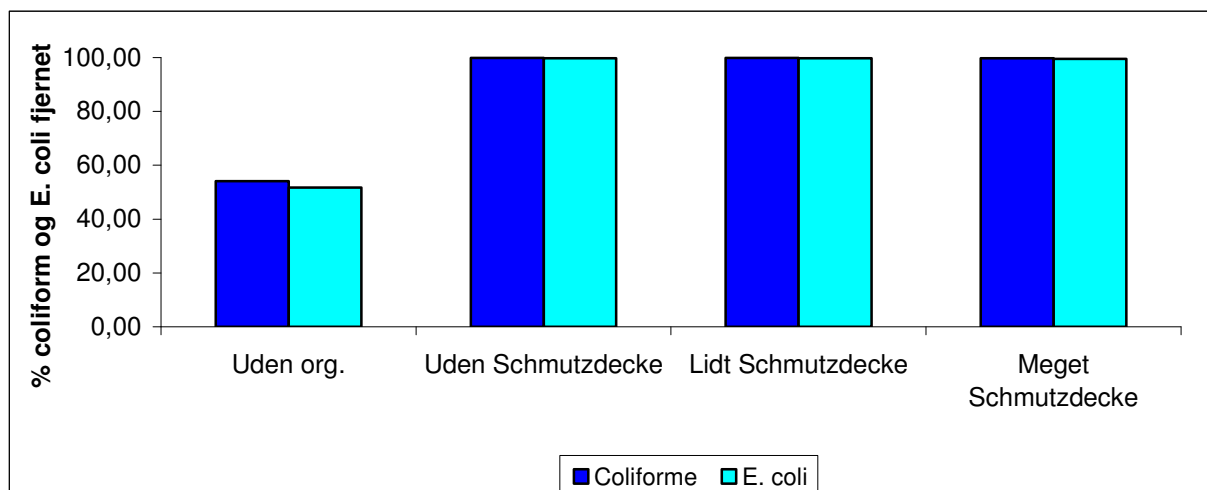
Ud fra pilotkolonnernes dårlige rensning kan vi konkludere, at det er vigtigt for bakteriereduktionen, at modning har fundet sted.

Det viste sig, at vandgennemstrømningen havde en positiv effekt, men at en kombination mellem gennemstrømning og hvile gav endnu bedre resultater. Det vil sige, at den vigtigste faktor i modningsprocessen er tid.

4.6. Organisk materiale

Søjlerne i dette eksperiment er bygget på forskellige måder, således at undersøgelsen af det organiske materiale kan opdeles i to afsnit. Det første omhandler schmutzdecket og det andet effekten af det organiske materiale i sandkolonnen.

Figur 7 viser den procentvise fjernelse af coliforme samt *E. coli* fra ind- og udløb. Det ses, at kolonnen uden, med lidt og med meget schmutzdecke fjerner næsten 100 %. Langsom sandfiltrering er altså en anvendelig metode til at rense vand for fækal forurening.



Figur 7 – Den procentvise fjernelse af coliforme bakterier samt *E. Coli*

Vigtigt at bemærke ved Colilert resultaterne er, at der er et problem med anvendelsen af resultatet for kolonnen med meget schmutzdecke. Den lave infiltreringsrate medførte, at det forurene vand ikke nåede et fuldt gennemløb, se appendiks 3. Opsamlingen til analyserne udtages 3 døgn efter det forurene søvand blev hældt i, og på dette tidspunkt var der kun gennemløbet 417 ml, hvor porevolumenet i kolonnen er 759 ml, se appendiks 3. Derfor er der ikke sikkerhed for, at Colilert resultaterne giver et retvisende billede. Der var dog en tællelig kapsel i Colilert testen, da fronten af indløbsvandet på grund af dispersion nåede igennem kolonnen. De opnåede resultater for kolonnen med meget schmutzdecke benyttes ikke videre i denne diskussion.

4.6.1. Schmutzdecke

Schmutzdeckets betydning undersøges ud fra kolonnen uden schmutzdecke og kolonnen med lidt schmutzdecke. Det ses i Figur 7 at begge kolonner fjerner næsten 100 % af coliforme og *E. coli* bakterier.

Forklaringen på, at kolonnerne har lige stor effekt kan enten være, at schmutzdecket ikke virker optimalt, at der undervejs er dannet et schmutzdecke på begge sandkolonner, eller at mængden af coliforme bakterier er for lille til, at det er muligt at vurdere forskellen i udløb.



Billede 10 – Schmutzdecke ved Arrenæs

Ved Arrenæs opsamlede vi schmutzdecket fra et næsten drænet bassin, se Billede 10, og laget befandt sig derfor ikke under optimale forhold. Under opbevaringen trængte der ikke sollys ned til laget, og fotosyntese fandt da ikke sted i de klorofylholdige dele af schmutzdecket. Dermed blev der



Billede 11 – Nanna samler sedimentprøver

ikke frigivet ilt til mikroorganismene i selve laget og i den øverste del af kolonnen. En sidste faktor, der kunne have medvirket til schmutzdeckets ikke aktive bakteriekulturer, er opbevaringstemperaturen. Før laget blev tilsat ved 10°C stod det opbevaret ved 2°C. Taget Danmarks temperaturer i betragtning, burde dette ikke have negativ effekt se Billede 11.

Laget blev opbevaret i en lukket pose med luft og tilsat ved forsigtigt at hælde det fra en lille plasticpose. Disse metoder kan have ødelagt økosystemerne.

Ved tilsætning af schmutzdecket er det ikke sikkert, at laget blev fordelt jævnt over søjlens overflade. Der kan derfor være steder, hvor vandet ikke trængte ned gennem schmutzdecket. På den anden side observeredes det, i den indiske søjle, at schmutzdecket lagde sig i et pænt lag, så den benyttede tilsætningsmetode burde være anvendelig.

Schmutzdeckets ”lag-fase” er kun omkring 10 dage. Kolonnerne har stået 8 dage med søvand indeholdende bakterier, alger, protozoer etc. Det er derfor sandsynligt at der gennem denne periode er opbygget et nyt schmutzdecke. Dette kan dog ikke verificeres, da kolonnerne ikke var transparente.

Hvis indholdet af coliforme bakterier og *E. coli* var større, kunne gennembrud muligvis være forekommet, da det ikke vil være muligt at tilbageholde dem alle i søjlen.

Ved længere tids gennemstrømning kan der ligeledes ske gennembrud grundet udvaskning.

Det vil sige, at ved filtrering over længere tid eller med en højere indløbskoncentration er det muligt at se en forskel i kolonnernes effektivitet.

Tiden og teorien taget i betragtning virker det mest sandsynligt, at der er opbygget et nyt schmutzdecke af det organiske materiale fra vandet.

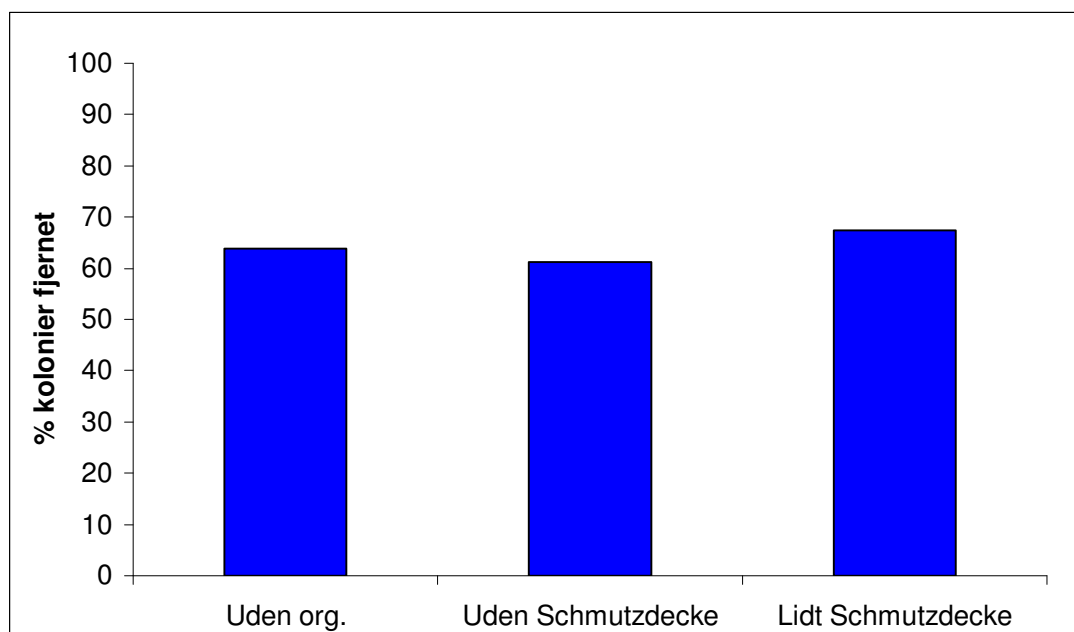
Hvordan kolonnerne ville have opført sig efter en længere gennemstrømningsperiode er det ud fra vores eksperimenter ikke muligt at udtale sig om.

4.6.2. Organisk materiale i sandkolonnerne

Fra kolonnen uden organisk materiale kan vi udlede, hvorvidt det organiske materiale i sandkolonnen har indflydelse på rensningsprocessen. I Figur 7 ses det, at de tre kolonner uden schmutzdecke, med lidt schmutzdecke og med meget schmutzdecke er tæt på en 100 % fjernelse af coliforme bakterier og *E. coli*. Kolonnen uden organisk skiller sig ud fra dette ved kun at tilbageholde halvdelen af de coliforme bakterier og *E. coli*.

Det kan derfor konstateres, at det organiske materiale i sandkolonnen har en stor betydning for tilbageholdelse af coliforme bakterier. Dette til trods for, at det ved glødetab er konstateret, at kolonnen kun indeholdt 0,7 % organisk materiale.

Ved optælling af den totale mængde levende bakterier i ind- og udløbsvand, se Figur 8, ser vi, at den generelle bakteriefjernelse er omtrent ens for alle søjler, og kolonnen uden organisk materiale skiller sig ikke ud.



Figur 8 – Den procentvise fjernelse af totalt antal bakterier (CFU)

Sammenholdes resultaterne i Figur 7 og Figur 8 ses en forskel mellem rensningseffekten for det totale antal bakterier sammenholdt med rensningseffekten for coliforme bakterier og *E. coli*.

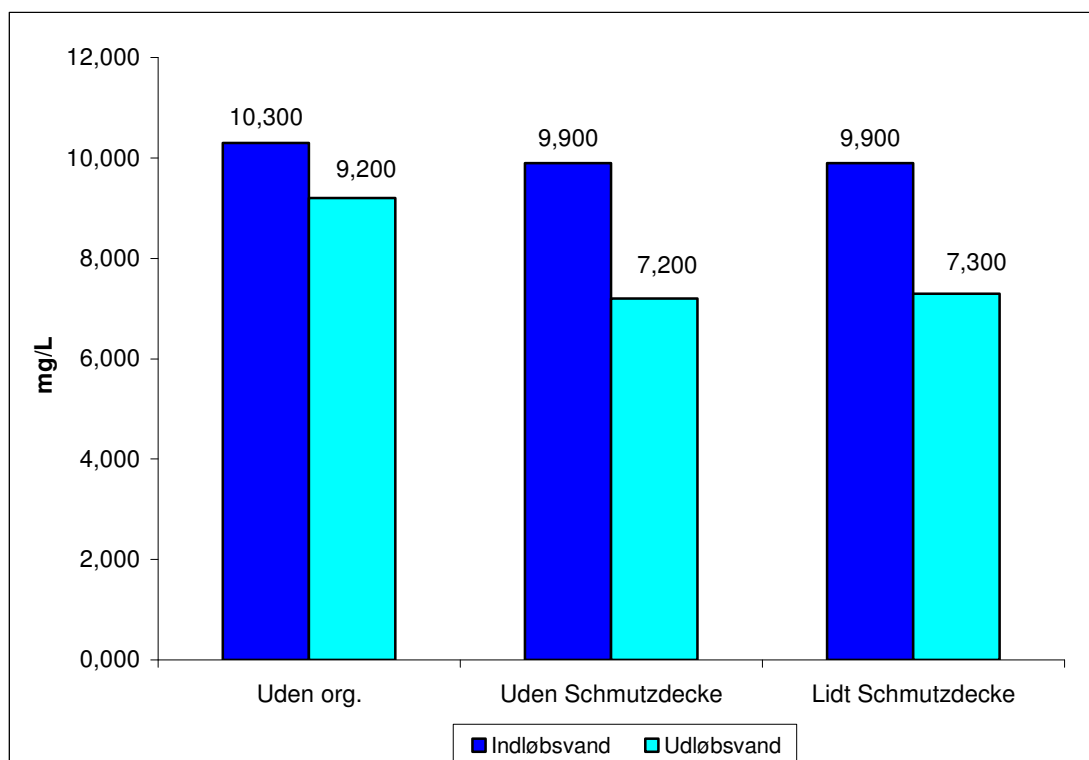
En forklaring på dette kan være, at de bakterier der måles i udløbsvandet fra søjlerne uden schmutzdecke og med lidt schmutzdecke kommer fra sandet i kolonnerne. I den søjle uden organisk materiale er det helt sikkert, at alle bakterier i udløbet kommer fra det tilførte vand, da der til at starte med ikke er nogen kulturer i kolonnen. Der kan altså godt være tale om en forholdsvis god filtrering af bakterier fra vandet i de to søjler med schmutzdecke, samtidig med at kulturer fra sandkornene udvaskes.

Hvis dette er tilfældet, må det være et sammenfald, at det totale antal bakterier, der måles i udløbsvandet for henholdsvis kolonnen uden organisk materiale og de andre kolonner er omtrent det samme.

En anden forklaring på uoverensstemmelsen kan være, at de coliforme bakterier opfanges af noget specifikt i søjlerne med organisk materiale. Det kunne f.eks. være en bestemt form for biofilm, i hvilke de biologiske forhold kun opfylder coliforme bakteriers krav.

Som en del af refleksionerne over betydningen af organisk materiale i kolonnerne inddrages overvejelser omkring iltindholdet i udløbsvandet.

Som det ses af Figur 9 bliver der forbrugt mindst ilt i kolonnen uden organisk materiale. Dette viser, som forventet, at der er en lavere biologisk aktivitet under dette gennemløb.



Figur 9 - Iltindhold i vandprøver efter 8 dage for ind- og udløb

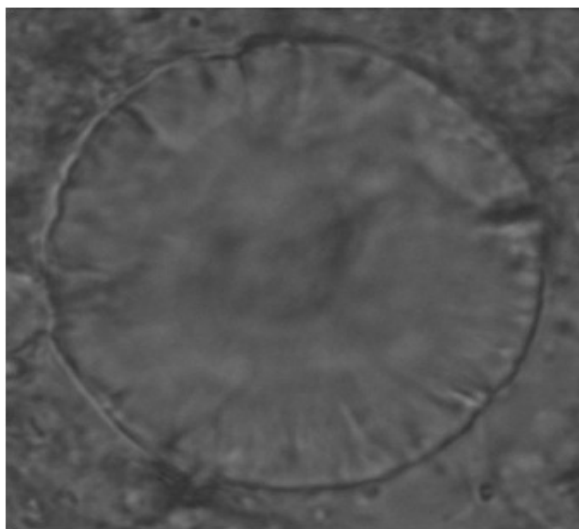
Det kan altså konkluderes, at der som forventet er biologisk aktivitet i sandet hentet på Arrenæs.

Der er ikke nogen biologisk aktivitet i sandkolonnen uden organisk materiale, men der har været en reduktion i bakteriemængden. Reduktionen er derfor forårsaget af mekanisk fjernelse. Samtidig tyder resultaterne i Figur 7 ikke på, at coliforme bakterier fjernes ved denne proces.

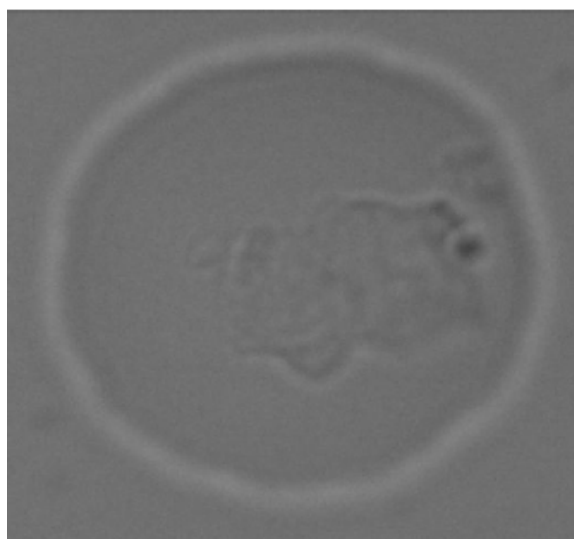
4.7. Helminthæg

Mikroskoperingen bruges til at undersøge tilstedeværelsen af helminthæg i den indiske vandprøve. Billede 12 og Billede 15 viser begge runde partikler med en diameter på 53µm. Overflademæssigt ligner de ikke hinanden, og intet tyder derfor på, at de er af samme art. Partiklen på Billede 15 indeholder noget, der ligner en cellekerne, hvilket taler for, at dette er en organisme. Kanten på partiklen fra Billede 12 er meget afgrænset og kunne godt være en cellevæg. Partiklen på Billede 14 har også en meget afgrænset kant, men er nærmest delt i to, og sandsynligheden for, at dette er et ormeæg, er derfor meget lille. Derimod indeholder Billede 13 noget, der kunne være cellekerne og

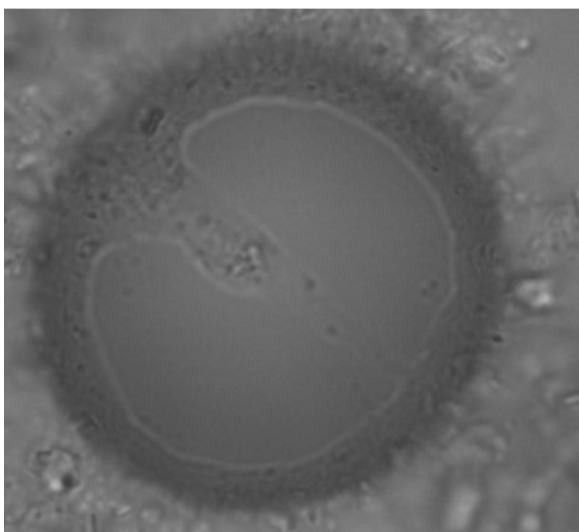
har samtidig en meget afgrænset kant. For flere billeder af mulige æg fra indløbsvandet se appendiks 8.



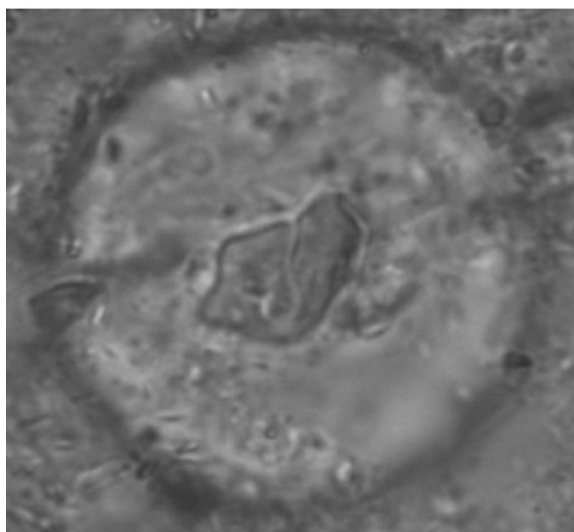
Billeder 12 - Indisk indløbsvand, 53 µm



Billede 13 - Indløbsvand 30,6 µm



Billede 14 - Indisk indløbsvand, 59 µm



Billed 15 - Indisk indløbsvand 53 µm

Hvis kun størrelsen tages i betragtning, kan billede 12 og Billede 15, ved sammenligning med Figur 2, være ormeæg af arten *Trichuris trichiura*. Formen er dog forkert.

Hvad angår Billede 13 passer denne partikel i størrelse og facon med arten *Hymenolepis nana*, hvis man forestiller sig at ægget ses fra toppen.

Ved mikroskopiel undersøgelse af udløbsvandet, fandtes der ingen partikler i denne størrelsesorden. I størstedelen af dråben kunne der ikke ses noget ved en 100 gange forstørrelse, og hvor der alligevel var partikler, var disse meget små.

Da der sker en mekanisk fjernelse af ca. halvdelen af bakterierne, kan det med sikkerhed fastslås, at æggene frafiltreres, da disse er meget større end bakterier og dermed lettere indfanges i sandkolonnernes porer

Det kan ikke med sikkerhed slås fast, om de fire partikler er æg. Der er argumenter for, at billede 2 kunne være det, men det er svært at sige med sikkerhed. Samtidig har vi kun 5 eksempler på helminthæg at sammenligne med, men der findes i alt 150 sygdomsfremkaldende arter. I indløbsvandet fandt vi partikler med samme størrelse som helminthæg. Da disse partikler ikke var at finde i udløbsvandet fjerner filteret eventuelle æg.

4.8. Vandkvalitet

4.8.1. Danmark

Det totale antal bakterier samt antallet af coliforme og *E. coli* i udløbsvandet er faktorer, der er betydende for, om det filtrerede vand er egnet til drikkevand i Danmark. Tabel 9 viser antallet af CFU per ml målt i udløbsvandet fra vores forsøgssopstilling.

Tabel 9 – CFU /ml for kolonner med indløbsvand af forurennet arresøvand

| | Uden org. | Uden schmutzdecke | Lidt schmutzdecke | Meget schmutzdecke | Pilotkolonne 1 | Pilotkolonne 2 |
|------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------|----------------|
| CFU / ml i udløb | 55.856 | 59.605 | 51.605 | 206.006 | 186.666 | 152.666 |

Fra miljøstyrelsen er det givet, at kimtallet ved 22 °C for Dansk drikkevand må være 50, når det forlader vandværket og 200 ved indgang til ejendom [Miljøstyrelsen, 2001].

En direkte sammenligning af vores resultater med kravene for vandkvalitet i Danmark, er ikke mulig, da vi benytter CFU analyse, hvorimod miljøstyrelsen opgiver grænseværdier i kimtal. Både CFU og kimtal er metoder til at give en værdi for den samlede bakteriemængde per ml, hvilket gør dem sammenlignelige..

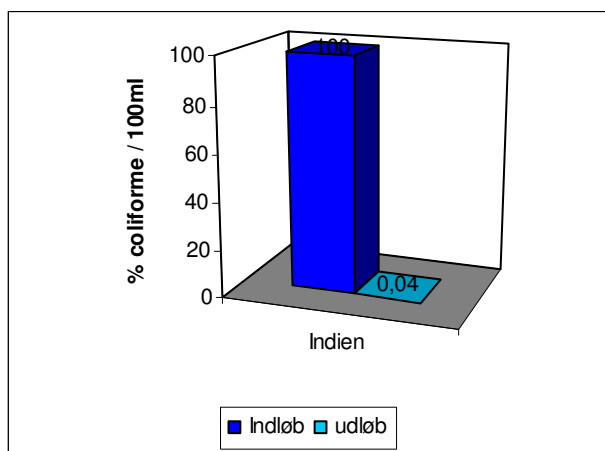
Som det ses af Tabel 9 er antallet af bakterier i udløbsvandet alt for højt, så det ses, at drikkevandskravene i Danmark ikke overholdes.

4.8.2. Indien

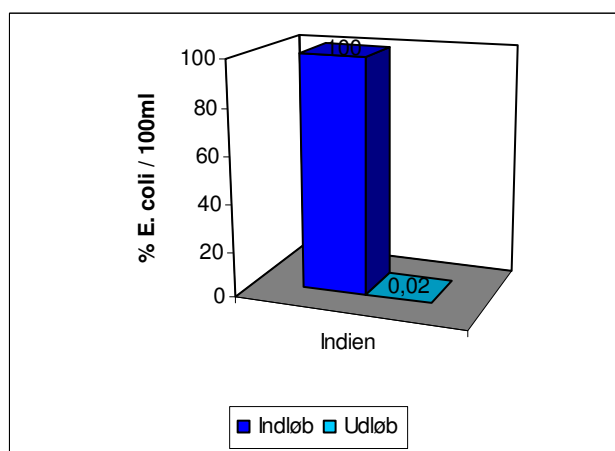
Indholdet af colifome bakterier i det indiske vand efter filtreringen var reduceret med 99,96 % og for specifikt *E. coli* var reduktionen 99,98 %, se Figur 11 og Figur 11.

Indløbskoncentrationen af coliforme og *E. coli* bakterier var meget høj for det indiske vand i forhold til indløbsvandet bestående af forurennet Arresøvand. Så selv om den procentvise fjernelse er

høj, er der stadig en tællelig mængde bakterier i udløbet. Tabel 10 viser antallet af coliforme og *E. coli* bakterier samt den accepterede værdi i Indisk drikkevand.



Figur 11 – Procentvis fjernelse af coliforme bakterier i indisk vandprøve



Figur 11 - Procentvis fjernelse af *E. coli* i indisk vandprøve

Tabel 10 – Antallet af coliforme og *E. coli* bakterier i vand fra indien

| | Coliform / 100 ml | <i>E. coli</i> / 100 ml |
|--------------------|-------------------|-------------------------|
| Indløb | 727.000 | 292.965 |
| Udløb | 297 | 66 |
| Accepteret i udløb | NK | 10 |

NK: Not Known

Den acceptable værdi af *E. coli* bakterier er 10 per 100 ml [Bregnhøj, H., pers. com.]. Derfor overholder det filtrerede vand ikke de stillede krav til vandkvaliteten. Det kunne undersøges, om en forøgelse af kolonnehøjden muligvis ville fjerne den sidste del af bakterierne.

4.9. Problematikker ved sandfiltrering

Opsamlende kan det siges, at et langsomt sandfilter effektivt renser for patogener, men at ændringer i den hydrauliske ledningsevne medfører, at effektiviteten af filteret ændres.

Når filteret er nyt, virker det ikke optimalt. Filteret virker kun, hvis det er modnet over tilstrækkelig tid. Denne proces tilfører kolonnen organisk materiale, som gør filtreringsprocessen mere effektiv. I takt med ophobning af organisk materiale falder flowraten. Efter meget kort tid løber mindre vand igennem søjlen. Da ønsket med et sandfilter formentlig er at rense så meget vand som muligt, er det vigtigt at tage højde for hydrauliske problemer. Det organiske materiale vil til sidst clogge filteret, der derfor skal tages ud af funktion for at renses. Derefter kan det modnes igen, og cyklusen startes forfra.

Det kan derfor konstateres, at tilfredsstillende resultater opnås ved sandfiltreringen, men den funktionelle periode begrænses af modning og clogging.

5. Konklusion

Gennem bearbejdning, analyse og tolkning af de opnåede resultater samt på baggrund af teorien er vi kommet frem til følgende konklusioner omkring effektiviteten af bakteriefjernelse i et langsomt sandfilter:

Kolonnernes filtereffekt er overraskende høj hvad angår indikator organismer for fækal forurening. Kolonnen med lidt schmutzdecke og kolonnen uden schmutzdecke reducerer over 99 % af de coliforme bakterier og *E. coli*.

Kolonnen uden organisk materiale frafiltrerer 54 % af de coliforme bakterier. De andre kolonner, indeholdende 0,7 % organisk materiale, frafiltrerer over 99 % af de coliforme bakterier. Det organiske materiale mellem sandkornene har derved stor betydning for fjernelsen af coliforme bakterier.

Kolonnerne uden, med lidt og med meget schmutzdecke filtrerer coliforme bakterier lige effektivt. Det er derfor ikke muligt at drage en endelig konklusion af schmutzdeckets indvirkning på filtreringseffektiviteten af bakterier

Omkring 60 % af det totale bakterieantal samt omkring 50 % af de coliforme bakterier og *E. coli* fjernes ved mekanisk renselse. Sandet fra Arresø har en middeldkornstørrelse på 0,11 mm. Jo mindre kornstørrelse er, des bedre filtreringsevne har den mekaniske rensningsproces.

Flowraterne aftager som funktion af tiden på grund af ophobning af organisk materiale i kolonnen. Clogging forekommer når gennemstrømningen er for lav.

Opbygningen af mikrobiologiske økosystemer er nødvendig for at opnå en høj filtereffektivitet. Denne modning afhænger af tiden. Den bedste modning af sandkolonnen opnås ved en kombination af gennemstrømning og hvile.

Filtrenes funktionelle periode begrænses af både modning og clogging.

Alle kolonnerne reducerer turbiditeten fra 0,44 abs. til omkring 0,007 abs. Nedbrydningsprocesserne finder primært sted i vandsøjlen og forårsages af tyngdekraften og eventuelt protozoer.

I kolonnerne uden, med lidt og med meget schmutzdecke samt i den indiske kolonne foregår biologisk aktivitet i sandet, da der forbruges ilt.

Indholdet af *E. coli* i det indiske vand blev reduceret med 99 %. Der observeredes ikke helminthæg i udløbet fra den indiske kolonne og partikler, som kunne være helminthæg, blev fjernet.

På trods af den høje filtereffektivitet overholder udløbsvandet fra kolonnerne ikke drikkevandskravene i hverken Danmark eller Indien.

Langsom sandfiltrering har en god filtreringsevne og fjerner så godt som alle coliforme bakterier, herunder *E. coli*. Implementeringen af et sådant system kan i mange tredjeverdenslande forbedre sundhedssituationen betydeligt.

6. Referenceliste

- Allan, driftsansvarlig på Arrenæs Forsøgsanlæg, møde 11. marts 2008
- Becton, Dickinson and Company, 2008, *R2A agar*, lokaliseret WWW (13-05-08):
http://www.bd.com/ds/technicalCenter/inserts/R2A_Agar.pdf
- Bennedsen L., Berg R.L., Brandt G., Nielsen T.Ø., 2008: Chapter 2: *Description of the Arrenæs Artificial Recharge Trial Plant*, Copenhagen Energy, Water Department, Section for Planning, Project and Water Quality.
- Bregnhøj, H., 2008, møde angående studietur til Indien 29. maj 2008
- Campos, L. C., Smith, S. R., Graham, N. J. D., 2006, *Deterministic-Based Model of Slow Sand Filtration. II: Model Application*”, Journal of Environmental Engineering, ASCE, August 2006, 887-894
- Campos, L. C., Su, M. F. J., Graham, N. J. D, Smith, S. R., 2001, *Biomass development in slow sand filters*, Pergamon, Water Research 36 (2002) s. 4543-4551
- Dansk Røde Kors, 2006, *En milliard uden rent drikkevand*, lokaliseret WWW (17-05.08)
<http://drk.dk/sw58670.asp>
- Grotzinger, J., Jordan, T., Press, F., Siever, R., 2007: *Understanding Earth*, fifth edition, Freeman, s.116.
- Hijnen, W.A.M., Schijven, J. F., Bonn e, P., Visser, A., Medema, G.J., 2004, *Elimination of viruses, bacteria and protozoan oocyst by slow sand filters*, Water Science and Technology, Vol 50 No 1 s. 147-154
- IDEXX Laboratories, Inc., 2008, *Colifom/E. coli Results in 24 Hours*, lokaliseret WWW (13-05-08): <http://www.idexx.com/water/colilert/>
- Institut for Vand og Miljøteknologi, DTU, 2008, *Quick manual for spectrophotometer Jenway 6405 UV/VIS*, lokaliseret WWW (09-05-08):
<http://ermanual.er.dtu.dk/10.%20Services%20-%20Servicefunktioner/04.Laboratory/Analyser%20vejledninger/02.%20Chemistry%20-%20inorganic/Spectrophotometer%20Jenway6405%20UV-VIS.doc>

Jellison, K. L., Dick, R. I., Weber-Shirk, M. L., 2000, *Enhanced ripening of slow sand filters*, Journal of environmental engineering, December 2000 s. 1153-1157

Københavns Energi, *Arrenæs Kunstig infiltration af Arresøvand*, Driftsnotat 2004, udleveret til møde marts 2008

Mauclaire, L., Scürmann, A., Mermilloud-Blondin, F., 2005, *Influence of hydraulic conductivity on communities of microorganisms and invertebrates in porous media: a case study in drinking water slow sand filters*, Eawag, Aquatic Sciences 68 (2006) s. 100-108

Medigan M. T. og Martinko J. M., 2006, *Biology of Microorganisms*, Eleventh Edition, Pearson Education Inc

Miljøstyrelsen, 2001, *Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg*, BEK nr. 871 af 21/09/2001, lokaliseret WWW (12-05-08)
http://www.milana.dk/bek/drikkevand_871.htm#Bilag%201a

(MTU) Michigan Technological University, 2003, *Indicator Organisms*, lokaliseret WWW (14-05-08), <http://techalive.mtu.edu/meec/module02/IndicatorOrganisms.htm>

Nazaroff, W. W & Alvarez-Cohen, L, 2001, *Environmental Engineering Science*, John Wiley & Sons, Inc.

Rasmussen, J., Ansat ved KE, møde 4. marts 2008.

Ray, C., 2002, *Riverbank Filtration: Understanding Contaminants Biogeochemistry and Pathogen Removal*, Kluwer Academic Publishers in cooperation with NATO Scientific Affairs Division.

Stauber, C. E., Elliott, M. A., Koksal, F., Ortiz, G. M., DiGiano, F. A., Sobsey, M. D., 2006, *Characterization of the biosand filter for E. coli reductions from household drinking water under controlled laboratory and field use conditions*, Water Science and Technology, Vol 54 No 3 s. 1-7

Wotton, R. S., 2002, *Water purification using sand*, Kluwer Academic Publishers, Hydrobiologia 469: 193-201

Århus akademi, 2008, *Protozoer: Ciliater*, lokaliseret WWW (13-05-08),
<http://fag.aarhusakademi.dk/biologi/Tema/Vestereng/Vandhul/Ciliatside.html>

Appendiksoversigt

| | |
|--|----|
| Appendiks 1 - Colilert..... | 39 |
| Appendiks 2 - CFU | 41 |
| Appendiks 3 - Flow..... | 44 |
| Appendiks 4 - Turbiditet | 46 |
| Appendiks 5 - Sining..... | 47 |
| Appendiks 6 - pH, oxygen og temperatur | 48 |
| Appendiks 7 - Glødetab | 49 |
| Appendiks 8 - Helminthæg | 50 |
| Appendiks 9 - Kimtal fra Arresø..... | 52 |
| Appendiks 10 - Tidsplan | 53 |
| Appendiks 11 - Arbejdsfordeling..... | 54 |