



Miljø- og  
Fødevareministeriet  
Naturstyrelsen

# Optimering af teknologi til blødgøring af drikkevand

Udvikling af kalkpille teknologien for  
anvendelse i dansk vandforsyning

November 2015



**Titel:**

Optimering af teknologi til blødgøring af drikkevand

**Projektgruppe:**

Henrik Juul, Vand Center Syd A/S  
Jesper Elkjær, HOFOR A/S  
Kaare Klit Johansen, HOFOR A/S  
Peter Borch Nielsen, Krüger A/S  
Sonsoles Quinzanos, Krüger A/S  
Erling V. Fischer, Krüger A/S

**Udgiver:**

Naturstyrelsen  
Haraldsgade 53  
2100 København Ø

**Forfattere:**

Erling V. Fischer, Sonsoles Quinzanos,  
Charlotte Løwe Jensen, Niels Dam, Krüger A/S

[www.nst.dk](http://www.nst.dk)

**År:**

2015

**ISBN nr.**

978-87-7175-593-0

**Ansvarsfraskrivelse:**

Naturstyrelsen offentliggør rapporter inden for vandteknologi, medfinansieret af Miljø- og Fødevareministeriet. Offentliggørelsen betyder, at Naturstyrelsen finder indholdet af væsentlig betydning for en bredere kreds. Naturstyrelsen deler dog ikke nødvendigvis de synspunkter, der kommer til udtryk i rapporterne.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>Forord</b> .....	<b>5</b>
<b>Sammenfatning</b> .....	<b>6</b>
<b>Summary</b> .....	<b>8</b>
<b>1. Indledning</b> .....	<b>10</b>
<b>2. Formål og succeskriterier</b> .....	<b>11</b>
2.1 Formål .....	11
2.2 Succeskriterier .....	11
<b>3. Omfang</b> .....	<b>12</b>
3.1 Arbejdspakke 1 – Hygiejnisk Drift .....	12
3.2 Arbejdspakke 2: Sikker drift.....	12
<b>4. Arbejdspakke 1 – Hygiejnisk design</b> .....	<b>14</b>
4.1 Litteraturstudium .....	14
4.2 Risikovurdering .....	15
4.2.1 Risikofaktorer.....	15
4.2.2 Prioritering.....	17
4.3 Erfaringsopsamling .....	18
4.3.1 Sydvatten, Sverige.....	18
4.3.2 Oasen / Delft TU, Holland.....	19
4.4 Forbedret design af pellet-anlæg.....	21
<b>5. Arbejdspakke 2 – Sikker drift</b> .....	<b>22</b>
5.1 Laboratorieforsøg med desinfektion af sand .....	22
5.1.1 Forsøgsopstilling.....	22
5.1.2 Procedure .....	22
5.1.3 Laboratorieforsøgsplan.....	22
5.1.4 Resultater .....	24
5.2 Udvikling af sandvasker prototype .....	25
5.2.1 Design og konstruktion af prototype.....	25
5.2.2 Test af prototype – udvaskning af fines .....	28
5.2.3 Test af prototype – desinfektion.....	30
5.2.4 Vurdering af demonstration med prototypen.....	31
5.3 Test på pilotanlæg.....	32
5.3.1 Formål .....	32
5.3.2 Test med vasket sand i pellet pilotanlægget.....	32
5.3.3 Test af pelletkolonne i pilotanlæg som mikrobiologisk barriere.....	33
5.3.4 Rengøring af pilotanlægs pelletkolonne med citronsyre.....	33
5.3.5 Overfladers modstandsdygtighed over for kalkbelægning.....	36
<b>6. Konklusion</b> .....	<b>38</b>
<b>Litteratur</b> .....	<b>39</b>
<b>Bilag</b> .....	<b>40</b>
6.1 Bilag 1: Laboratorieforsøg, Desinfektion af sand, Resultater / forsøgsplan.....	41



# Forord

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af projektet ”Optimering af teknologi til blødgøring af drikkevand”, der er gennemført med tilskud fra Miljø- og fødevareministeriet i 2015.

Projektgruppen har bestået af:

Henrik Juul, Vand Center Syd A/S

Jesper Elkjær, HOFOR A/S

Kaare Klit Johansen, HOFOR A/S

Peter Borch Nielsen, Krüger A/S

Sonsoles Quinzanos, Krüger A/S

Erling V. Fischer, Krüger A/S

I følgegruppen har, udover projektgruppen, også Naturstyrelsen deltaget v/Tina Pedersen og Sanne Hjort Henriksen.

Følgegruppen har løbende været orienteret om projektets forløb. Tina Pedersen har været Naturstyrelsens kontaktperson for projektet.

# Sammenfatning

Dette projekt har været støttet af Miljø- og Fødevareministeriet under Tilskudsordning for Miljøeffektiv Teknologi. Projektet har haft til formål at udpege de væsentligste risici i forhold til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet, der introduceres ved blødgøring af drikkevand, at skitsere mulige løsninger på de væsentligste risici, samt at udvikle og demonstrere en teknologi, der løser den eller de risici, der under projektet vurderes at være størst.

Baggrunden for projektet er, at efterspørgslen efter teknologi til central blødgøring i dansk vandforsyning er stigende. En af de teknisk-økonomisk mest interessante metoder er pellet-teknologi der internationalt har stor udbredelse. Der findes ikke anlæg til central drikkevandsbehandling i fuldskala i Danmark, men teknologien forventes at få stor udbredelse i de kommende år, og installation af det første anlæg i hovedstadsområdet er påbegyndt.

En af de store udfordringer ved anvendelse af pellet-teknologien er, at den primært anvendes i forsyninger, hvor der i forvejen anvendes kloring og andre hygiejniske barrierer. Design og drift af pellet-anlæg er derfor typisk indrettet med mindre fokus på drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet.

I Danmark er der behov for, at pellet-teknologien kan anvendes uden indbygning af ekstra hygiejniske barrierer, herunder efterkloring. Ovennævnte udfordringer kan løses ved optimeret design og ændrede driftsrutiner. Dette kalder på, at der udvikles en ny og optimeret generation af pellet-teknologi, der kan give tilfredsstillende drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet.

Projektet har omfattet et indledende litteraturstudium med fokus på drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet i relation til pellet-teknologi til blødgøring af drikkevand. Dette studium har afdækket, at der i begrænset omfang er publiceret viden om emnet, primært af Delft Tekniske Universitet i Holland.

Projektet har i forlængelse heraf omfattet erfaringsopsamling internationalt med fokus på Sverige og Holland. Denne erfaringsopsamling har været nyttig og har givet en yderligere viden om hvilke forhold, der udgør en risiko i relation til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet, samt yderligere viden om hvilke forhold, der skal være særlig fokus på ved design og drift i relation til anvendelse af pellet-teknologi til blødgøring af drikkevand. Opsamlingen har dog også vist, at den primære viden om design og drift under hensyntagen til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet er opnået på Delft Tekniske Universitet i samarbejde med vandforsyningen Oasen. Som led i projektet er der indgået samarbejde med ovennævnte parter for adgang til denne viden. Dette har givet viden om en række udfordringer, der skal løses.

Baseret på litteraturstudiet og erfaringsopsamlingen er der identificeret en række risikofaktorer, og der er herefter gennemført en samlet risikovurdering i relation til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet. Denne risikovurdering peger på et begrænset antal risikofaktorer, der i prioriteret række udgør de væsentligste risici:

- Tilførsel af sand under blødgøringsprocessen (risiko for mikrobiologisk forurening)
- overløbssystem (risiko for mikrobiologisk forurening ved tilbageløb fra kloak),
- mikrobiologisk vækst i spædevand (risiko for mikrobiologisk forurening)
- kemiske urenheder i basisk kemikalie (risiko for forurening med tungemetaller)
- forkert pH-justering (risiko for surt eller basisk vand)

- kimvækst i kolonne (risiko for mikrobiologisk forurening som følge af bakterie dannelse ved blødgøringsprocessen)
- åben væskeoverflade (risiko for mikrobiologisk forurening).

Af disse risici udgør den løbende tilførsel af sand i pellet-teknologien den største risiko. Det er derfor valgt at fokusere på at udvikle og demonstrere en prototype af en sandvasker, som kan reducere denne risiko. Udvikling og demonstration har været succesfuld, idet funktion og effektivitet af sandvasker og desinfektion af sand er dokumenteret.

Det er således lykkedes at udvikle en prototype af sandvasker teknologi til blødgøring med pellet-teknologi, der nedbringer risikoen for mikrobiologisk forurening til et acceptabelt lavt niveau. Projektet har også vist at det er vigtigt at forsyninger / vandværker fastsætter præcise krav til kvaliteten af det sand der anvendes i processen herunder udfører grundig modtagekontrol, som supplement til ovennævnte tiltag, således at risikoen for tilførsel af mikrobiologisk forurening via tilsætning af sand minimeres.

For de øvrige prioriterede væsentligste risici angiver rapporten en række løsningsmuligheder baseret på litteraturstudiet og erfaringsopsamlingen. Disse løsninger vil i de fleste tilfælde kunne reducere risikoen til et acceptabelt niveau. Endelig angiver rapporten overordnet design for en ny generation af selve pellet-kolonnen, hvori selve blødgøringsprocessen foregår. Der er som led heri fokuseret på at eliminere de primære risikofaktorer der er identificeret som led i projektet.

Pilotforsøg har endvidere givet vigtigt ny viden herunder at blødgøring med pelletteknologi giver mere biostabilt vand men også viden om at pelletkolonnen ikke udgør en effektiv hygiejnisk barriere. Der er således behov for de tiltag der er beskrevet og udviklet i projektet for at sikre drikkevandssikkerheden.

Endvidere har pilotforsøg vist at der kan udvikles effektive systemer til CIP-rensning (Cleaning In Place) bl.a. ved anvendelse af citronsyre. Endvidere viser pilottest at frekvensen for denne rengøring kan nedsættes, bl.a. ved at anvende særlige materialer og/eller coatinger der kan give en væsentligt reduktion i kalkudfældninger på de indvendige dele af pellet kolonnerne.

Den ny generation af pellet-teknologi vurderes at have potentiale til eksport internationalt. En række lande bevæger sig disse år mod udfasning af anvendelse af klor på anlæg hvor der produceres grundvand. En bevægelse der kan tænkes at få større udredelse på sigt. Denne ændring medfører, at de teknologier, der anvendes til vandbehandlingen, skal opfylde skærpede krav til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet.

Den nye generation af pellet-kolonne og den tilhørende sandvasker er beskyttet iht. regler for Brugsmodelbeskyttelse hos Patent- og Varemærkestyrelsen i forbindelse med publicering af denne rapport, og de opstillede succeskriterier for projektet er dermed opfyldt. Teknologien forventes installeret og demonstreret i fuld skala i 2016.

# Summary

This project has been granted by the Danish Ministry of Environment and Food under the program of Eco-efficient technology. The project's main goal was identifying the most significant risks related to pellet softening in relation to drinking water safety and microbiological water quality. Moreover, the project aimed to provide solutions to the most important risks and to develop and prove a technology which could solve the risks that the project considers to be the greatest.

The background for the project is the increasing demand for central softening in Denmark. One of the most interesting methods for water softening, both technically and economically, is the internationally renowned pellet technology. Softening of the drinking water is not applied in Denmark yet, but it is expected to be widely adopted in the coming years, with the first full scale installation in Copenhagen planned to start next year.

Pellet technology is usually applied in systems with post chlorination and other hygienic barriers. Therefore, the design and operation of the existing pellet technology usually has a small focus on drinking water safety and microbiological water quality in the process, as disinfection is secured after the softening.

One of the great challenges of using pellet technology in Denmark is the design of the process with focus on the safety of drinking water and microbiological water quality, in a system where disinfection is not applied. Therefore, for the success of the softening in Denmark, the pellet technology must be used without installation of additional hygienic barriers, including post-chlorination. The above challenges can be solved by an optimized design and different operating routines. This calls for the development of a new generation of pellet softeners that can provide satisfactory drinking water safety and microbiological water quality.

The project started with an initial study which focused on finding literature about drinking water safety and micro-biological water quality in pellet softening. This study revealed that there are a limited number of articles on the subject, almost all knowledge coming from the Delft University of Technology in the Netherlands.

The project then focused on gathering experience internationally with focus on Sweden and the Netherlands. This provided further knowledge of the conditions that pose a risk in relation to drinking water safety and microbiological water quality in pellet softening, as well as additional information about the design and operation of the process of pellet softening itself. It was found that the greatest knowledge about the design and operation of the pellet softening process, taking into account drinking water safety and microbiological water quality, comes from the Delft University of Technology in cooperation and the Dutch water supplier Oasen. A collaboration agreement with these two partners was established and this provided a great opportunity to access relevant knowledge. This partnership has also highlighted a number of challenges which have to be solved.

Based on both the literature study and the gathering of experience, a variety of risk factors were identified and a risk assessment in relation to drinking water safety and microbiological water quality was carried out. This risk assessment pointed to a number of risk factors, which are listed in order of priority below:

- The supply of sand under the softening process (risk of microbiological contamination)
- The overflow system (risk of microbiological contamination by backflow from the sewer)
- Microbiological growth in service water (risk of microbiological contamination)
- Chemical impurities in the base used for softening (risk for contamination with heavy metals)
- An incorrect pH adjustment (risk of acid or basic water)



- Bacteriological growth in the pellet column (risk of microbiological contamination as a result of bacteria formation under the softening process)
- The open liquid surface at the top of the reactor (risk of microbiological contamination)

The factor which is considered to pose the most significant risk is the supply of sand to the pellet reactor. Pellet softening plants usually have a sand washer for the removal of fines (the smallest fraction of sand), but disinfection of the sand is not always applied. It was therefore decided to develop and demonstrate a sand washer prototype which could both remove the fines and disinfect at the same time, thus reducing the microbiological risk considerably.

As a result, a sand washer prototype was developed and its efficiency in removing fines and microbiological contamination (previously added to the water) was successfully tested. Moreover, the project also showed that it is important that the water suppliers together with the waterworks, set precise requirements for the quality of the sand to be used in the process, as well as the performance of a thorough control after delivery.

With regards to the other significant risks, a number of solutions based on the literature study and experience, are proposed in this report. These solutions will, in most cases, reduce the risk of microbiological contamination to an acceptable level.

Moreover, pilot tests within the project have shown that the pellet column gives a higher bio stability to the treated water, but it doesn't act as a microbiological barrier. This confirms that there is a need for the initiatives described and developed in the project to ensure drinking water safety.

Furthermore, pilot tests have also shown that effective CIP (Cleaning In Place) systems can be developed, and that citric acid is a suitable chemical to be used. Additionally, these tests have also shown that the frequency of CIP cleaning can be reduced by using appropriate material or special coatings that can reduce the lime precipitation in the lowest part of the pellet column. This area needs to be investigated further.

The combination of the traditional pellet technology and the associated sand washer creates a new generation of pellet softeners that will be used in Denmark. This new generation of pellet softeners also has the potential to be used internationally, particularly in countries looking to reduce reliance on chlorination as a method of disinfection.

The new generation of pellet softeners are registered at the Patent Office in connection with the publication of this report, therefore fulfilling the success criteria for the project. The technology is expected to be installed and demonstrated in full scale in the first Danish softening plant in 2016.

# 1. Indledning

Efterspørgslen efter teknologi til central blødgøring i dansk vandforsyning er stigende. En af de teknisk-økonomisk mest interessante metoder er pellet-teknologien, der internationalt har stor udbredelse. Der findes ikke anlæg i fuld skala i Danmark, men teknologien forventes at få stor udbredelse over de kommende år, og installation af det første anlæg til central blødgøring er påbegyndt på Brøndbyvester Vandværk for HOFOR A/S.

Ved introduktion af blødgøring med den traditionelle pellet-teknologi introduceres der en række risici, der kan påvirke drikkevandssikkerheden herunder den resulterende mikrobiologiske vandkvalitet. Dette skyldes, at pellet-teknologien overvejende anvendes på anlæg, hvor der traditionelt anvendes hygiejniske barrierer efter blødgøringsprocessen i form af bl.a. klorning af det behandlede drikkevand. Dermed er der kun mindre fokus på den mikrobiologiske vandkvalitet i design og drift af de anlæg der drives i dag.

Der er derfor behov for, at den traditionelt anvendte pellet-teknologi videreudvikles til en ny drikkevands-sikker generation i forbindelse med anvendelsen i dansk vandforsyning. Den nye generation af teknologien vil kunne anvendes i dansk vandforsyning samtidigt med at der også vurderes at være et potentiale for anvendelse internationalt i takt med den stigende udfasning af anvendelse af klor på grundvandsværker og heraf følgende fokus på drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet.

# 2. Formål og succeskriterier

## 2.1 Formål

Hovedformålet med projektet er, at sikre at central blødgøring med pellet-teknologi kan implementeres, således at de danske krav til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet kan overholdes.

Projektet har endvidere følgende delformål:

- Risikovurdering og prioritering af risikofaktorer:
  - o Udpegning af de potentielle risici (risikofaktorer) i relation til drikkevandssikkerhed forbundet med blødgøring ved pellet-teknologi
  - o Risikovurdering (sandsynlighed x konsekvens) af de udpegede risikofaktorer
  - o Prioriteret liste af risikofaktorer ud fra størrelsen af risici
- Skitsering af løsningsmuligheder:
  - o Skitsering af overordnede løsninger for reduktion af de udpegede risikofaktorer
- Udvikling af ny teknologi:
  - o Udvikling og demonstration af ny teknologi, der eliminerer den eller de største af de udpegede risikofaktorer
  - o Udvikling af en ny generation af pellet-kolonner med fokus på drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet

Projektet har været støttet af Miljø- og Fødevareministeriet under Tilskudsordning for Miljøeffektiv Teknologi.

## 2.2 Succeskriterier

Der er opstillet følgende succeskriterier for projektet:

- Teknologi til hygiejnering af sand udvikles og demonstreres på et demoanlæg
- Der udvikles et design for en ny generation af pellet-anlæg, som lever op til kravene iht. Dokumenteret Drikkevands Sikkerhed (DDS)

# 3. Omfang

Projektet har omfattet 2 arbejdsplaner med et omfang som beskrevet herunder.

## 3.1 Arbejdsplan 1 – Hygiejnisk Drift

Arbejdsplanen har omfattet følgende hovedaktiviteter:

- Litteraturstudium og erfaringsopsamling:  
Litteraturstudie samt indsamling af erfaringer fra andre lande, herunder lande hvor pellet-teknologien anvendes uden efterfølgende kloring. Der er ved erfaringsopsamlingen fokuseret på Sverige og Holland. Ved såvel litteraturstudium som erfaringsopsamling har der været fokuseret på erfaringer med drikkevandssikkerhed og forholdet mellem hygiejnisk design og vandets mikrobiologiske vandkvalitet.

Resultat: Der dannes overblik over erfaringer med hygiejnisk design og sikker drift.

- Risikovurdering:  
Vurdering af risiko for tilførsel af forurening (mikrobiologisk/ kemisk) i et pellet-anlæg samt udarbejdelse af en prioriteret liste over, hvilke risici der er de væsentligste, og som skal håndteres.

Resultat: Der udarbejdes en prioriteret liste over risici for i relation til drikkevandssikkerhed herunder mikrobiologisk forurening i et pellet-anlæg.

- Forbedret design:  
Der er gennemført skitsering af overordnede løsninger der kan anvendes til reduktion af de opstillede risikofaktorer.

Resultat: Der udarbejdes retningslinjer for overordnet design for et pellet-anlæg, der opfylder danske krav til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet.

## 3.2 Arbejdsplan 2: Sikker drift

Arbejdsplan 2 omfatter udvikling og demonstration af den eller de væsentligste risikofaktorer, der er udpeget under arbejdsplan 1. Under projektets arbejdsplan 1 er der peget på, at den væsentligste risikofaktor vedrører den løbende tilsætning af sand i forbindelse med blødgøringsprocessen. Det er derfor valgt, at arbejdsplan 2 omfatter udvikling og demonstration af teknologi til vask og hygiejning af sand forud for tilførsel i vandbanen.

Arbejdsplanen har omfattet følgende hovedaktiviteter:

- Laboratorieforsøg:  
Der er gennemført laboratorieforsøg med metoder til hygiejning af det sand, der anvendes i pellet-anlægget. Sandet er tilført en kontrolleret mikrobiologisk forurening, og der er gennemført test af, hvor hurtigt en effektiv desinfektion med de mest almindelige midler såsom natriumhypoklorit, hydrogenperoxid og natriumhydroxid kan gennemføres.

Resultat: Udarbejdelse af procedure for effektiv hygiejning er udarbejdet i form af valg af

desinfektionsmiddel samt nødvendig kontakttid for effektiv desinfektion.

- Udvikling af demo-model til sandvask:  
Der er udviklet en demo-model, der kan vaske sandet rent for ”fines” (der er uønsket i processen da det kan tilstoppe den efterfølgende filtreringsproces samt da der kan blive tilført organisk forurening). Herudover skal sandvaskeren sikre hygiejnering af sandet. Modellen er opbygget og udviklet på Krügers montageværksted.
- Forsøg og optimering af demo-model af sandvasker:  
Der er gennemført test af den udviklede og optimerede demo-model til sandvask.  
Der er gennemført følgende kontrollerede forsøg:
  - a) Test for udvaskning af fines:  
Sandvaskeren er testet mht. effektiviteten og dokumenteret ved udtagning af sandprøver, der sendes til sigteprøveanalyse før og efter skylning.
  - b) Test af hygiejnering:  
Baseret på laboratorietest af hvilket desinfektionsmiddel, der virker mest effektivt, er der gennemført demonstration af hygiejnering med det valgte desinfektionsmiddel på demoanlægget. Denne test er gennemført ved kontrolleret mikrobiologisk forurening af sand og efterfølgende først returskylning og herefter hygiejnering til tilsætning af desinfektionsmiddel, omrøring i demo-model og afsluttende evt. neutralisering.

Leverancer: Der udvikles teknologi til vask og hygiejnering af sand der anvendes i blødgøringsprocessen. Målet er at risiko for mikrobiologisk forurening minimeres.

Resultat: Når arbejdsplan 2 er afsluttet, er der udviklet ny teknologi til pellet-teknologi som indeholder hygiejnering og vask af sand, således at krav til høj drikkevandssikkerhed kan overholdes.

# 4. Arbejdspakke 1 – Hygiejnisk design

## 4.1 Litteraturstudium

Der er gennemført et litteraturstudium baseret på opsamling af artikler relateret om pellet teknologi, med specielt fokus på drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet i teknologien.

For litteraturstudiet er der søgt via diverse søgemaskiner (Google Scholar, Danmarks Tekniske Universitets hjemmeside, osv.) de tilgængelig international litteratur om emnet. Via denne søgning er der indsamlet en række artikler og undervisningsmateriale om pellet-teknologi, se afsnit ”Litteratur” (/ref. 1 – 12/).

Gennemgangen viser, at der er publiceret meget materiale om blødgøring med pellet-teknologien, og at teknologien er blandt de mest anvendte processer til blødgøring af drikkevand internationalt. Holland er med høj sandsynlighed landet med mest erfaring i blødgøring med pellet metoden. Det første pellet anlæg til blødgøring af drikkevand nogensinde blev startet op i Holland i 1970. I dag er ca. 50% af drikkevandet i Holland blødgjort, og pellet teknologien finder anvendelse på ca. 20 vandværker med en produktion af drikkevand på tilsammen ca. 200 mill. m<sup>3</sup>/år.

Dog viser litteraturgennemgangen også, at mængden af litteratur der berører aspektet omkring drikkevandssikkerhed og herunder særligt mikrobiologisk vandkvalitet er meget begrænset. De fleste internationale vandværker desinficerer drikkevand før distribution til forbrugerne, hvilket medfører, at der ikke ligges så stor vægt på drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet i selve pellet-processen.

En af de mest interessante artikler er ”*Bacterial colonization of pellet softening reactors used during drinking water treatment*” fra 2011, i samarbejde mellem det Schweiziske Institut for Akvatisk Videnskab og Teknologi (Schweiz), Ghent Universitet (Belgien) og Delft Tekniske Universitet (Holland). I artiklen undersøges den bakteriologiske kolonisering af pellet kolonner og bidraget af bakterier til drikkevandsbehandlingsprocessen for første gang siden udvikling af pellet processen. Konklusionen af artiklen viser, at biodiversiteten af bakterier, som koloniserer pellet reaktorer, er høj, og at de har en vigtig rolle i den biologiske stabilisering af drikkevandet. Dog er de fleste bakterier fanget i de pellets der dannes, hvorfor dette ikke påvirker det blødgjorte vand. Undersøgelsen lavet på et vandværk som bruger ozonering før selve pellet-anlæg, hvilket gør, at resultaterne ikke direkte kan sammenlignes med andre vandværker uden ozonering inden pellet processen.

Litteraturstudiet har vist at blødgøring med pellet-teknologien er en udbredt proces, og at der er mange referencer i den internationale litteratur. Dog er det hygiejniske aspekt af processen ikke nævnt i litteraturen. Det gør det vanskeligt at finde ud af hvilke tiltag, der evt. gøres internationalt for at sikre drikkevandssikkerheden og den mikrobiologiske vandkvalitet ved anvendelse af pellet-teknologien, ud over den traditionelle desinficering med f.eks. klor.

## 4.2 Risikovurdering

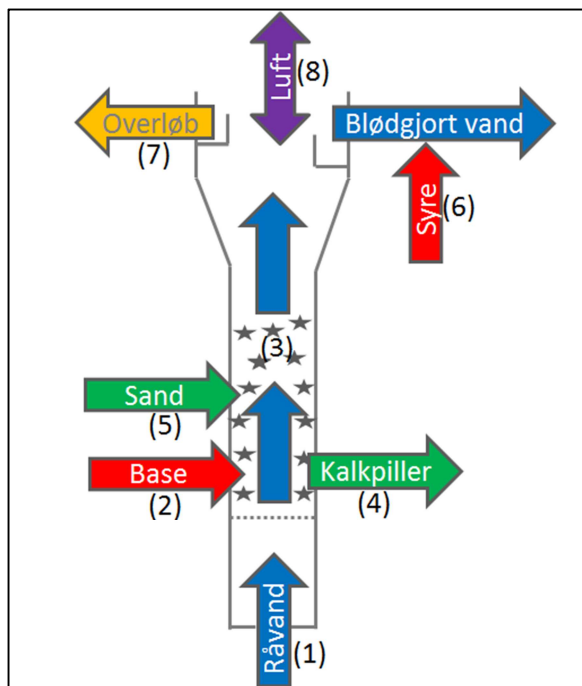
### 4.2.1 Risikofaktorer

Princippet for blødgøring med pellet-teknologi fremgår af Figur 4.1, og processen er herudover forklaret herunder med henvisning til numrene på figuren.

Som det fremgår af Figur 4.1, består blødgøring med pellet-teknologi af følgende processer:

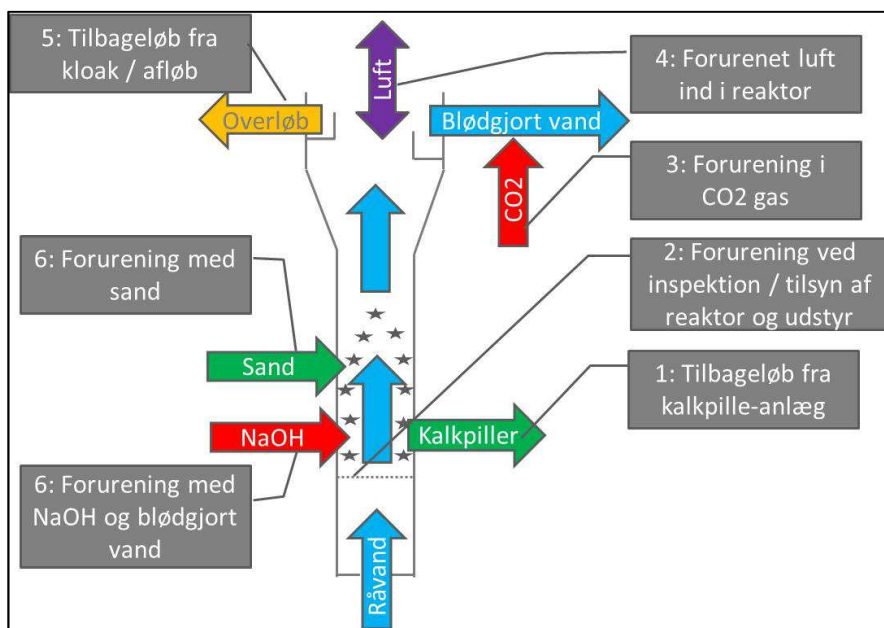
- 1) En pellet reaktor er typisk en cylindrisk kolonne indeholdende kvarts sand, som virker som bæremateriale, hvorpå kalk udfældes og der dannes kalkpiller
- 2) Råvand tilføres i bundkammeret af pellet-kolonnen (1) og fordeles herfra via en dysebund til den øvre del af pellet-kolonnen for at sikre en ligelig vandhastighed over kolonnens areal
- 3) Et basisk kemikalie eller base (2), typisk i form af natriumhydroxid (NaOH), tilsættes med særlige injektionsdyser lige over dysebunden eventuelt sammen med blødgjort spædevand
- 4) pH stiger, vandet bliver kalkfældende og kalken udfælder på sandkorn, som bliver til kalkpiller. Sand/kalkpiller fluidiseres i den opadrettede vandstrøm i pellet-kolonnen
- 5) De største kalkpiller udtages fra bunden af reaktor med jævne mellemrum (4), idet kalkpillerne fordeler sig efter størrelse med de største nederst, tæt på dysebunden
- 6) Nyt sand tilføres med jævne mellemrum (5), i takt med bortskaffelse af kalkpiller
- 7) Det blødgjorte vand pH-reguleres til drikkevandskvalitet ved tilsætning af en syre (6), typisk i form af kuldioxid (CO<sub>2</sub>), der opløses til kulsyre og tilsættes det blødgjorte vand

Af figuren fremgår det endvidere, at pellet-kolonnen typisk indeholder overløb til kloak (7) samt udveksling af luft via vandoverfladen (8).



Figur 4.1 Princip for blødgøring med pellet-teknologi

Baseret på ovennævnte gennemgang af den overordnede proces er der udarbejdet en bruttoliste over de væsentligste risikofaktorer med relation til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet. Nedenstående Figur 4.2 viser en skitse af en pellet-kolonne, hvor de væsentligste risikofaktorer er angivet.



Figur 4.2 Oversigt over væsentligste risikofaktorer ved pellet-teknologien

Risikofaktorerne er nærmere specificeret og er opstillet i nedenstående Tabel 4.1, hvor mulige løsninger til reduktion af risici endvidere er angivet.

Tabel 4.1 Oversigt over risikofaktorer

Nr.	Risikofaktor	Beskrivelse af risiko	Løsning
1	Daglig tilførsel af sand	Mikrobiologisk forurening på sandet	Desinfektion af sand før tilførsel
2	Løbende dosering af basisk kemikalie	Kemiske urenheder som fx tungmetaller i produktet	Krav til og kontrol af benyttede produkter
3	Løbende dosering af kuldioxid gas	Kemiske urenheder i form af uønskede gasser i produktet	Krav til og kontrol af benyttet gas
4	Løbende dosering af blødgjort spædevand til kemikaliedyser	Mikrobiologisk vækst/forurening i vandet/ionbytter	Løbende kontrol af vand og eventuelt desinfektion med UV. Basisk miljø i kolonnebund kan også virke desinficerende.
5	Daglig udtagning af kalkpiller	Tilbageløb af mikrobiologisk forurenede vand til processen	Sikring mod tilbageløb
6	Åben væskeoverflade i kolonnetop	Mikrobiologisk forurening tilføres med luft eller dyr/insekter	Afdækning af kolonnetop og tilførsel af filtreret luft
7	Overløb i kolonnetop	Mikrobiologisk/kemisk forurening tilføres ved tilbageløb/adgang for insekter og dyr	Sikring mod tilbageløb
8	Månedlig rengøring af kemikaliedyser	Mikrobiologisk forurening ved den periodiske rengøring af dyser	Desinfektion før genindsætning af udstyr
9	Månedlig rengøring af kemikaliedyser	Kemisk forurening ved den periodiske rengøring af dyser	Procedure til sikring af rengøringsmidler er fjernet inden



			genindsætning af udstyr
10	Årlig rengøring af bunddysser/kolonne	Kemisk/mikrobiologisk forurening ved den periodiske rengøring	Procedure til sikring af rengøringsmidler er fjernet og udstyr desinficeret inden genopstart
11	Uønsket biologisk vækst i kolonnen under drift	Produktion af AOC ved processen, som øger kimtallet i vandet	Driftoptimering, efterfiltrering med biologisk proces, der fjerner AOC, UV desinfektion af vand
12	Forkert pH i behandlet vand	Produktion af vand med aggressiv kuldioxid eller med pH værdi, der er over kravværdier.	Overvågning af pH med flere uafhængige on-line pH elektroder og advarsel/alarm ved overskridelser

#### 4.2.2 Prioritering

For at udvælge de væsentligste risici fra ovenstående liste, er der opstillet en sandsynlighed/konsekvens matrix, der er baseret kvalitativt på Krügers vurderinger, se Tabel 4.2

Tabel 4.2 Risikovurdering for pellet-teknologi

Forureningshændelse	Konsekvens	Konsekvens	Risikomatrix		
Skadelige mikroorganismer tilføres dagligt	Kontinuert produktion af meget sundhedsfarligt drikkevand				
Skadelige mikroorganismer tilføres periodisk	Periodisk produktion af meget sundhedsfarligt drikkevand	7			
Tungmetaller eller vand med forkert pH tilføres dagligt	Kontinuert produktion af muligt sundhedsfarligt drikkevand	2,12			
Kim tilføres dagligt	Kontinuert produktion af drikkevand der ikke overholder gældende krav	5, 6		4, 11	
Uønskede gasser tilføres dagligt	Kontinuert produktion af drikkevand der ikke overholder gældende krav	3			
Tungmetaller tilføres periodisk	Periodisk produktion af muligt sundhedsfarligt drikkevand			9, 10	
Kim tilføres periodisk	Periodisk produktion af drikkevand der ikke overholder gældende krav			8	
		lav		Sandsynlighed: lav    middel    høj	

Baseret på den gennemførte risikovurdering er der udarbejdet en prioriteret liste over de risikofaktorer, der udgør den største risiko for påvirkning af drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet, se Tabel 4.3. Følgende risici vurderes på baggrund heraf som de væsentligste.

Tabel 4.3 Prioriteret liste over risikofaktorer i relation til drikkevandssikkerhed ved pellet-teknologi

Prioritet	Risikofaktor
1	Nr. 1: Sandtilførsel
2	Nr. 7: Overløb i kolonnetop
3	Nr. 4: Spædevand
4	Nr. 2: Tungmetaller i basisk kemikalie
5	Nr. 12: Forkert pH justering
6	Nr. 11: Kimvækst i kolonne
7	Nr. 6: Åben væskeoverflade

### 4.3 Erfaringsopsamling

Som erfaringsopsamling i projektet, er der gennemført besøg på to vandværker med pellet teknologien: Vombverket i Sverige (Sydvatten Vandforsyning, februar 2015) og Rodenhuis i Holland (Oasen Vandforsyning, juni 2015).

Der er herunder givet en kort opsummering af de væsentligste dele af de indsamlede erfaringer

#### 4.3.1 Sydvatten, Sverige

Vombverket Vandværk er en del af den svenske Sydvatten, en af de største vandforsyningsselskaber i Sverige (ca. 70 mill.m<sup>3</sup>/år). Vombverket blev besøgt af dele af projektgruppen, da vandværket er et godt eksempel på blødgøring af grundvand (fra infiltration) i nærheden af Danmark.

Vombverket (1949) er det største vandværk med grundvandsbehandling i Sverige, med en vandproduktion på ca. 1000 l/sek.

Ud over selve processen bestående af mikrosil-anlæg, henstandstank, infiltration til grundvand og luftning, har Vombverket et pellet anlæg med 8 reaktorer med hver en højde på 9,5 m og en diameter på 3,3 m. Kapaciteten af pellet anlægget er 1800 l/sek. Inden vandet kommer til pellet anlæg, er flowet splittet, så 80% af flowet bliver blødgjort, mens 20% af flowet er bypasses. Efter de to delstrømme igen er samlet, blandes vandet med FeCl<sub>3</sub>, filtreres og desinficeres til sidst med monokloramin. Figur 4.3 viser et billede af pellet anlægget på Vombverket fra Sydvattens hjemmeside.



Figur 4.3. Vombverket Vandværk i Sverige

På Vombverket bruges lud (NaOH) og sand (0,4-0,6 mm i korn diameter) til dannelse af pellets. Sandet vaskes i en sandvasker, hvor sandet doseres i toppen af en tank og drikkevand under tryk doseres i bunden af tanken. Vandet transporterer de fineste sandpartikler og "fines" til toppen af tanken, hvor de ledes videre til afløb ved siden af. Den vaskede sandfraktion pumpes videre til processen.

#### 4.3.2 Oasen / Delft TU, Holland

Rodenhuis Vandværk er en del af Oasen, en af de største vandforsyningsselskaber i Holland (en årlig produktion af vand på ca. 45 mill.m<sup>3</sup>). Rodenhuis blev besøgt af projektgruppen, da Holland er et af de lande der har størst erfaring med pellet teknologien, og Oasen har et tæt samarbejde med den anerkendte Professor J.C. van Dijk, tidligere Professor fra Delft Tekniske Universitet, som er ekspert i blødgøring med pellet teknologi. Figur 4.4 viser billeder fra besøget på Rodenhuis Vandværk.



Figur 4.4 Billeder fra besøg på Rodenhuis Vandværk i Holland

Rodenhuis Vandværk behandler ca. 1290 m<sup>3</sup>/t grundvand (infiltreret flodvand) med en total hårdhed på ca. 11° dH. Anlægget består af beluftning, trickle-sandfiltrering, blødgøring i pellet reaktorer, GAC-filtrering og UV desinfektion. Anlægget har 6 stk. pellet reaktorer à hver 500 m<sup>3</sup>/t fordelt i to identiske linjer med 3 stk. pellet reaktorer hver. Der blødgøres vandet til ca. 6-8° dH. Den resulterende hårdhed måles on-line.

Besøget til Rodenhuis Vandværk gav adgang til nyttig viden særligt i relation til Drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet, da der her, som et af de første steder i Holland, ikke anvendes kloring af det behandlede vand inden distribution til forbrugere.

Det mest relevante aspekt med hensyn til drikkevandssikkerhed og hygiejne var sandvaskning og desinfektion af sandet inden anvendelse i Pellet-kolonnerne.

I Holland er der stor opmærksomhed på at tilførslen af sand potentielt udgør en risiko for uacceptabel mikrobiologisk forurening af det behandlede vand. Dette er også her udpeget som den væsentligste risikofaktor i relation til Drikkevands Sikkerhed.

En række undersøgelser i Holland har tidligere vist at det sand, der blev anvendt i pellet-kolonnerne i Holland, kunne indeholde høje niveauer af bakterier, parasitter mv. Dette blev bl.a. sammenkædet med at sandet blev indvundet fra floder og deltaer mv., hvilket potentielt kan indeholde store mængder af

bakterier etc. Endvidere var der også indikationer på, at der under transporten kunne ske kontaminering afhængigt af hvad de anvendte silovogne tidligere havde transporteret.

I Holland er der derfor udarbejdet kravspecifikationer i samarbejde med alle vandforsyninger, til det sand der skal bruges i pelletkolonner. Som led heri er der stillet krav til at sandet indvindes fra grusgrave (i stedet for som tidligere fra floder etc.) samt at sandet varmebehandles inden levering. De øvrige krav omfatter at silovogne til sandtransport vaskes / skylles inden påfyldning af sand og forsegles efter påfyldning. Forsyningerne i Holland har samfinansieret en sådan vogn, der alene benyttes til sandmaterialer til blødgøringsreaktorer.

På Rodenhuis Vandværk bruges der sand i Pellet-kolonnerne med en kornstørrelse på 0,1-0,3 mm.

Ved modtagelse af sandet udtages der prøver på stedet af sandet og disse analyseres for mikrobiologi (E.coli, Clostridium perfringens, spectrococci, sulfid-reducerende clostridia). Det skal være et indhold på under 1 cfu pr. 10 ml prøve for at dokumentere at der ikke er bakteriologisk forurening i sandet.

Derudover vaskes og desinficeres sand inden det injiceres i processen. Sandvaskeren anvendes til at udvaske den fineste fraktion (fines dvs. partikler mindre end ca. 0,1 mm). Endvidere anvendes sandvaskeren til desinfektion. Til denne proces bruges der lud og vand i sandvaskeren og der vaskes ved ca. 50 m/h i fluid bed vaskeren i 10 minutter. Når der klargøres sand til en "ren" kolonne efter servicering af denne hvert ca. 3. år, skal der vaskes i op til et døgn på grund af den store sandmængde.

Oasen har udført test af desinfektion af sandet med lud og klor. Ifølge disse test har Oasen ikke set stor effekt til at fjerne indikatororganismer jf. deres undersøgelser. De er særligt bekymret for clostridiumsporer, der ikke fjernes ved desinfektion med lud som det er tilfældet for de øvrige indikatororganismer.

#### 4.4 Forbedret design af pellet-anlæg

Baseret på de indhentede erfaringer og drøftelser under projektet er der designet en ny generation af pellet-kolonne der minimerer de væsentligste identificerede risikofaktorer for selve kolonnen. De primære forhold der er udviklet og optimeret fremgår af figur 4.5.

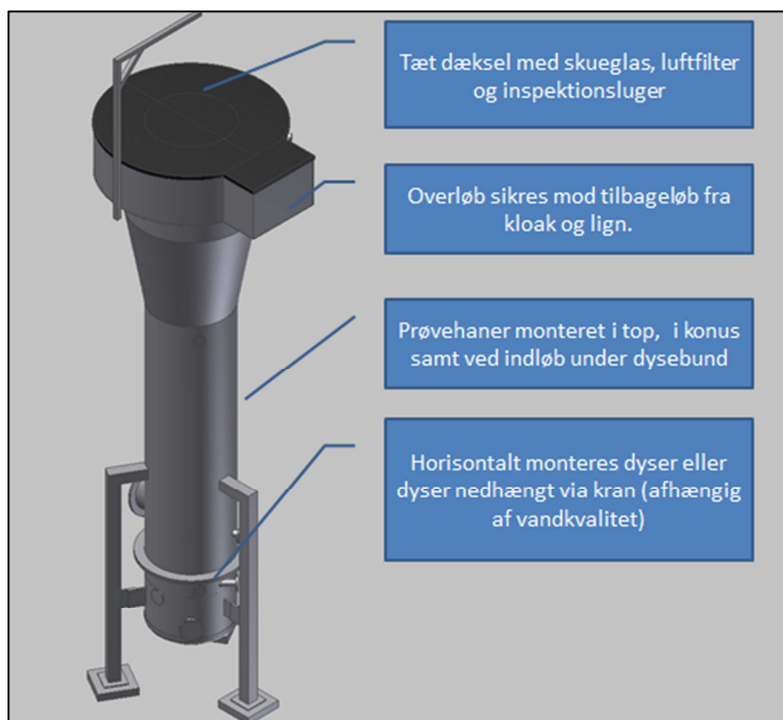
Det ses heraf, at der er tale om følgende forhold:

- 1) Tæt afdækning af toppen af kolonnen. Udføres skueglas med lys for let visuel inspektion, inspektionsluger der kan åbnes under rengøring, filter for filtrering af luft der suges ind kolonnen
- 2) Tilbageløbssikring fra overløb. Overløbet sikres mod at der kan forekomme tilbageløb fra kloak
- 3) Hygiejnisk og sikker rensning af kemikaliedoseringsdyser: Montage af dyser med speciel konstruktion der sikrer, at dyser kan udtages under drift for service og rengøring. Dette kan udføres med enten dyser monteret horisontalt eller vertikalt afhængig af vandkvalitet.

Ud over disse tiltag er kolonnen udført, så der let og sikkert kan udføres service og rengøring.

De øvrige risikofaktorer kan håndteres ved forholdsvist enkle tiltag der let kan implementeres, se tabel 1. Dette gælder dog ikke sikring mod forurening via det sand der anvendes i processen. Dette er behandlet separat i afsnit 5.

Den udviklede nye generation af pelletkolonne med fokus på drikkevandssikkerhed er beskyttet iht. reglerne for brugsmodeller hos Patent- og Varemærkestyrelsen.



Figur 4.5 Princip for optimeringer i den nye generation af pellet-teknologi

# 5. Arbejdspakke 2 – Sikker drift

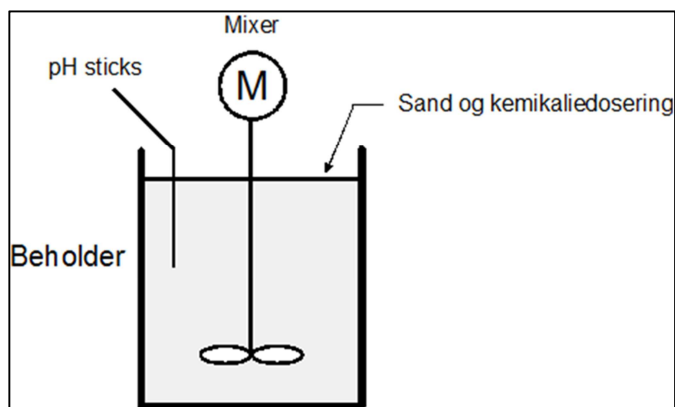
## 5.1 Laborieforsøg med desinfektion af sand

En del af aktiviteterne i MUDP projektet er, at gennemføre laborieforsøg med forskellige desinfektionsmidler til hygiejnering af sandet, som anvendes i pellet-anlægget. Der er testet 3 forskellige desinfektionsmidler, hvilket er:

- Natriumhypoklorit, NaOCl
- Hydrogenperoxid, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- Natriumhydroxid, NaOH

### 5.1.1 Forsøgsopstilling

Laborieforsøgene er udført i en kvadratisk beholder med en mekanisk omrører med variabel hastighed. Se nedenstående Figur 5.1



Figur 5.1 Forsøgsopstilling for laborieforsøg

### 5.1.2 Procedure

Formålet med testen er at fastlægge hvilket desinfektionsmiddel, der giver den bedste reduktion af *E.Coli* og Total Coliforme bakterier. Dette desinfektionsmiddel vil senere blive anvendt til fuldskala test i prototype af sandvaskeren. Laborieforsøgene er udført efter følgende procedure:

500 ml vand samt 50 g sand tilsættes den kvadratiske beholder. Derefter tilsættes en "E-Power pille" (*E.Coli* pille med en koncentration på  $4,3 \times 10^7$  CFU/pille). Der omrøres til E-Power pillen visuelt er opløst, ca. 2 min. Omrøringshastigheden fastsættes på 250 rpm, så alt sandet er i bevægelse og der ikke ligger noget på bunden. Desinfektionsmiddel tilsættes i en given koncentration og der omrøres i en given tid, se forsøgsskema i Tabel 5.1. Efter en given kontaktid stoppes omrøreren, og der udtages straks 10 ml prøve, som overføres til TECTA (instrument til måling af *E.coli* og Total Coliforme bakterie) prøvebæger, hvorefter der efterfyldes med vandhanevand til 100 ml mærket. Prøverne analyseres i TECTA for *E.Coli* og Total Coliforme bakterier. Der udføres triple bestemmelse af prøverne.

### 5.1.3 Laborieforsøgsplan

Der udføres laborieforsøg med tre forskellige desinfektionsmidler (natriumhypoklorit, hydrogenperoxid og natriumhydroxid) i tre forskellige koncentrationer og ved tre forskellige kontaktider (27 forsøg i alt).

Natriumhypoklorit og hydrogenperoxid testes i koncentration 2, 5 og 10 mg/l i kontakttider på hhv. 2, 5 og 10 minutter.

Natriumhydroxid tilsættes til der opnås en pH værdi på henholdsvis 10, 11 og 12 ligeledes med samme kontakttider på hhv. 2, 5 og 10 minutter. Efter endt forsøg med natriumhydroxid neutraliseres prøven til vandprøvens start pH (7,7) inden der analyseres for *E.Coli* og Total Coliforme bakterier. *Forsøgsplan* vises i Tabel 5.1

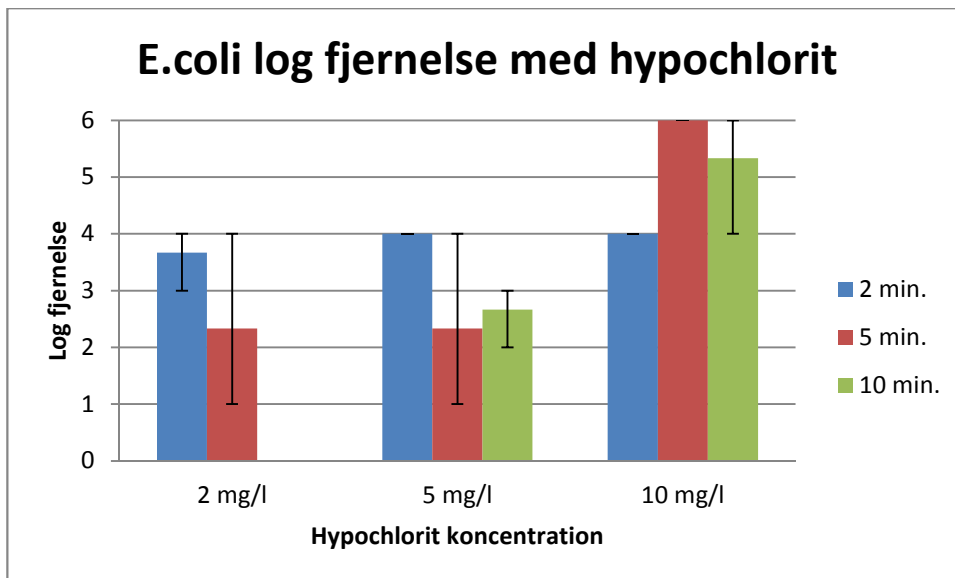
Tabel 5.1 Laboratorie forsøgsplan

Forsøgs nr.	Kemikalie type	Koncentration af desinfektionsmidler (mg/l)	Tid (minutter)
0.A	Nulprøve uden <i>E.Coli</i>	0	10
0.B	Nulprøve med <i>E.Coli</i>	0	2
0.C	Nulprøve med <i>E.Coli</i>	0	5
0.D	Nulprøve med <i>E.Coli</i>	0	10
1	Natriumhypoklorit	2	2
2	Natriumhypoklorit	2	5
3	Natriumhypoklorit	2	10
4	Natriumhypoklorit	5	2
5	Natriumhypoklorit	5	5
6	Natriumhypoklorit	5	10
7	Natriumhypoklorit	10	2
8	Natriumhypoklorit	10	5
9	Natriumhypoklorit	10	10
10	Hydrogenperoxid	2	2
11	Hydrogenperoxid	2	5
12	Hydrogenperoxid	2	10
13	Hydrogenperoxid	5	2
14	Hydrogenperoxid	5	5
15	Hydrogenperoxid	5	10
16	Hydrogenperoxid	10	2
17	Hydrogenperoxid	10	5
18	Hydrogenperoxid	10	10
19	Natriumhydroxid	Til pH 10	2
20	Natriumhydroxid	Til pH 10	5
21	Natriumhydroxid	Til pH 10	10
22	Natriumhydroxid	Til pH 11	2
23	Natriumhydroxid	Til pH 11	5
24	Natriumhydroxid	Til pH 11	10
25	Natriumhydroxid	Til pH 12	2
26	Natriumhydroxid	Til pH 12	5
27	Natriumhydroxid	Til pH 12	10

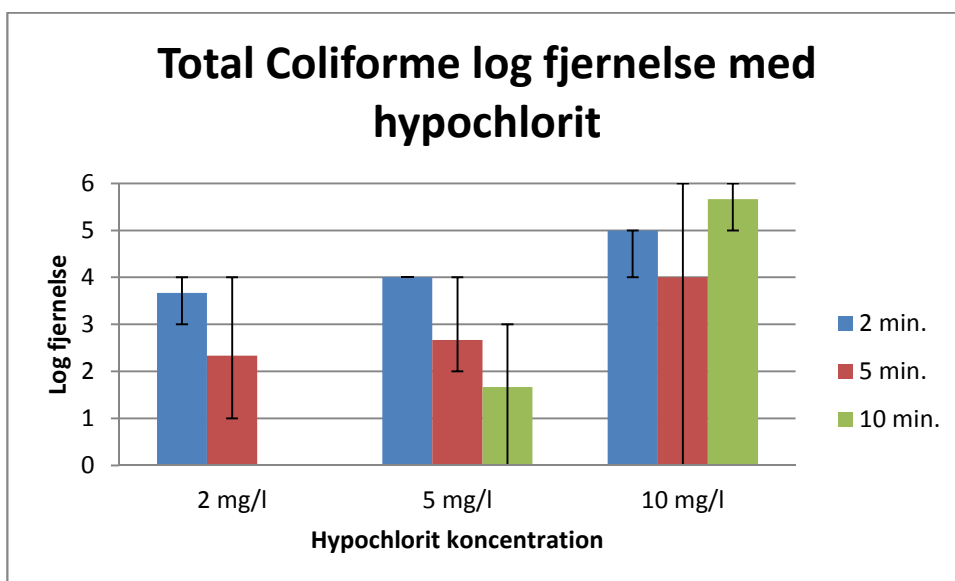


#### 5.1.4 Resultater

Resultater fra laboratorieforsøg viser, at det eneste af de tre afprøvede kemikalier som har en effektiv desinficerende effekt på *E.Coli* og Total Coliforme bakterier, er natriumhypoklorit. Figur 5.2 og Figur 5.3 viser resultater med natriumhypoklorit forsøg. Hver figur viser gennemsnittet af triple-bestemmelserne for hvert af de ni forsøg med natriumhypoklorit. Endvidere er variationsintervallet indikeret.



Figur 5.2 Log fjernelsen af *E.Coli* med natriumhypoklorit.



Figur 5.3 Log fjernelsen af Total Coliforme bakterier med natriumhypoklorit

Det ses af Figur 5.2 og Figur 5.3, at kontakttiden med natriumhypoklorit ikke er så afgørende for hvor effektiv en desinfektion der opnås, da der ikke er en tydeligt forskel på log fjernelsen af *E.coli* og Total Coliforme bakterier med 2, 5 eller 10 minutter kontakttid.

Resultaterne viser at effektiviteten i højere grad afhænger af koncentrationen af natriumhypoklorit.



Det fremgår således, at der med den forholdsvis lave koncentration på 2 eller 5 mg/l natriumhypoklorit, kun opnås en desinfektion på mellem 1 og 4 log fjernelse (svarende til ≈90-99,99% reduktion af udgangsniveaet) af *E.coli* og Total Coliforme bakterier. Med en koncentration på 10 mg/l opnås der en væsentligt mere effektiv desinfektion med op til 7 log fjernelse (svarende til ≈100% reduktion af udgangsniveaet).

Resultaterne fra laboratorieforsøgene viser endvidere, at hverken hydrogenperoxid eller natriumhydroxid har en desinficerende effekt på *E.Coli* og Total Coliforme bakterier. Med disse desinfektionsmidler opnås ingen effekt eller meget lille effekt. For disse to desinfektionsmidler er det derfor ikke vist nogle figurer. Resultatskema med alle resultater fra laboratorieforsøgene vises i bilag.

## 5.2 Udvikling af sandvasker prototype

### 5.2.1 Design og konstruktion af prototype

Som beskrevet i afsnit 4 er en af de væsentligste risikofaktorer for drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet den tilsætning af sand, der løbende foregår i takt med, at kalkpiller vokser, falder til bunds og udtages i pellet-kolonnen.

Der er derfor gennemført design og konstruktion af en prototype af en sandvasker. Der er i den forbindelse opstillet kravspecifikationer, som vist i Tabel 5.2

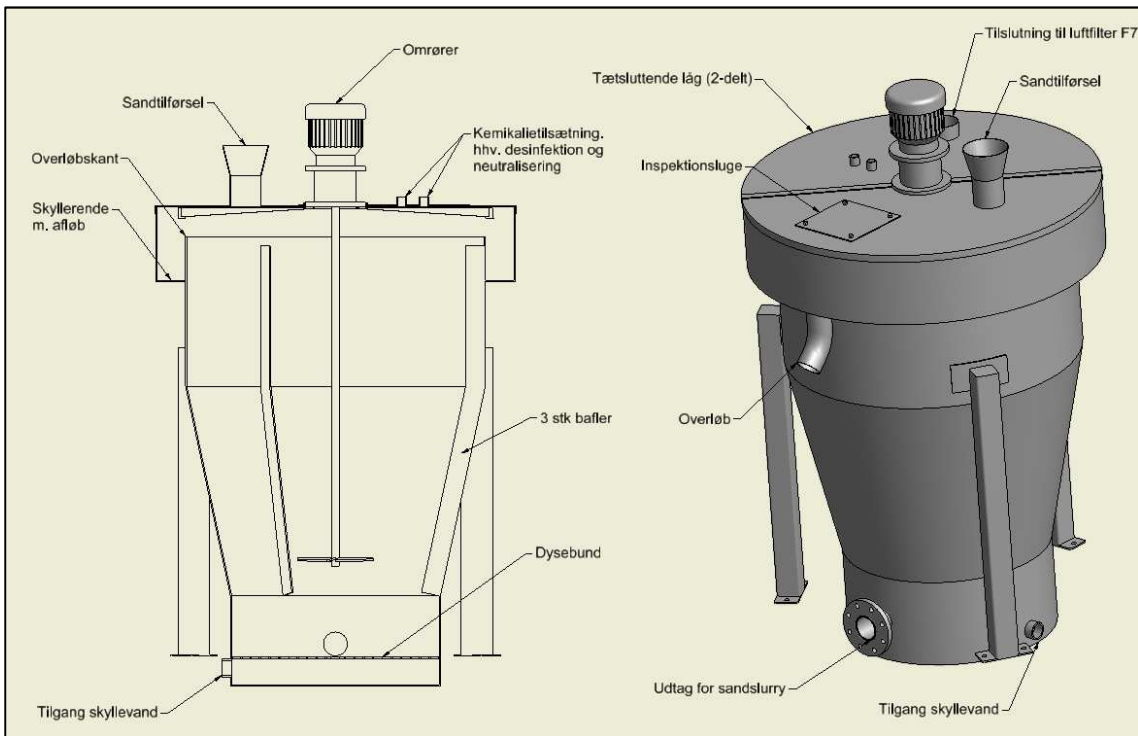
Tabel 5.2 Kravspecifikation for sandvasker

Kravspecifikation for sandvasker til pellet-teknologi
- Eget materiale af beholder og tilhørende sliddele ifht. korrosion, slid/erosion samt afsmitning til drikkevand
- Hygiejnisk design, der sikrer mod forurening fra omgivelserne, herunder tilbageløb fra kloak og forurening af rumluften
- Minimal service- og vedligehold, herunder selvrensende samt let mulighed for rengøring
- Batch-behandling af 80 kg sand pr. gang.
- Design for vask af sand i fraktionen 0,1-0,6 mm
- Effektiv udvaskning af "fines" skønnet < 0,06-0,1 mm
- Design for desinfektion af sand med efterfølgende neutralisering
- Behandlingstid på mindre end skønnet 1/2 time

Baseret på ovennævnte kravspecifikation er der konstrueret en prototype af sandvaskeren. Princippet for denne er vist i Figur 5.4 og Figur 5.5, hvor et foto af prototypen fremgår uden tilhørende afdækning/tæt låg.

Funktionen af den designede sandvasker er, at sand påfyldes i en vandfyldt beholder, idet sandet holdes flydende ved montage af automatisk omrøring i beholderen. Herefter desinficeres sandet ved tilsætning af desinfektionsmiddel, som efterfølgende neutraliseres efter en passende kontakttid. Herefter vaskes sandet rent for fint materiale ("fines") dvs. korn mindre end typisk 0,06-0,1 mm ved en opstrøms skylning med en høj hastighed, der sikrer fluidisering af sandet samt horisontal fordeling af sandet efter størrelse og udskylning af det fineste materiale i toppen af beholderen til en overløbsrende og herfra til afløb.

Afsluttende anvendes det desinficerede og vaskede sand som en "sand slurry" (kombination af sand og vand) ved pumpning til pellet kolonnen.



Figur 5.4 Princip for prototype af sandvasker



Figur 5.5 Foto af prototype af sandvasker

Sandvaskeren er designet efter følgende principper:

- Beholder opbygget med støtteben, tæt afdækning og rørgennemføringer i rustfrit syrefast stål i høj kvalitet ifht. korrosion og bestandighed samt i udførelse for let rengøring
- Omrører placeret centralt i beholder for dannelse af "sand slurry"
- Tætssluttende påfyldningstragt for sand
- Påfyldningsstuds for desinfektionsmiddel/neutraliseringsmiddel
- Dysebund for effektiv skylning/vask af sand
- Studs for tilgang af skyllevand under dysebund
- Luftfilter for hygiejnisk indsugning af rumluft ved aftømning
- Inspektionsluke i top dæk for visuel overvågning af effektiviteten af sandvaskeren
- Overløb med kontraventil for udledning af skyllevand med "fines" og samtidig sikring mod tilbageløb

Sandvaskeren er forberedt for automatisk drift via PLC/SRO styring efter følgende styringsprincip:

- Påfyldning af vand til  $\frac{3}{4}$  max. niveau
- Omrøring startes
- Påfyldning af sand (max. 80 kg)
- Tilsætning af desinfektionsmiddel
- Omrøring i et nærmere fastsat antal minutter (se forsøg i afsnit 5.2.2 og 5.2.3)
- Tilsætning af neutraliseringsmiddel
- Omrøring stoppes
- Skyllevand startes ved indpumpning af rent vand igennem dysebund i et nærmere fastsat antal minutter (se forsøg i afsnit 5.2.2 og 5.2.3)
- Omrører startes
- Skyllevand slukkes
- "Sand slurry" suges af pumpe til pellet-kolonne
- Sandvask er nu klar til næste batch

### 5.2.2 Test af prototype – udvaskning af fines

Prototypen af sandvaskeren er blevet testet for udvaskning af fines. Der blev tilsat 75 kg sand (Dana Kvarts 0,3-0,6 mm) til sandvaskeren. Sandet blev holdt omrørt i ca. 10 minutter, hvorefter skyllevandet blev startet. Der blev skyllet med et flow på ca. 8 m<sup>3</sup>/t (svarende til en hastighed på hhv. 20 og 10 m/time i bund og top af sandvaskeren i ca. 7 minutter). Sandvaskeren er designet for en max. hastighed på hhv. 40 og 20 m/time i bund og top. Figur 5.6 viser udskylning af fines ved test af prototypen. Det kunne visuelt konstateres at sandet blev fluidiseret, samt at fines blev udskyllet i toppen af sandvaskeren.



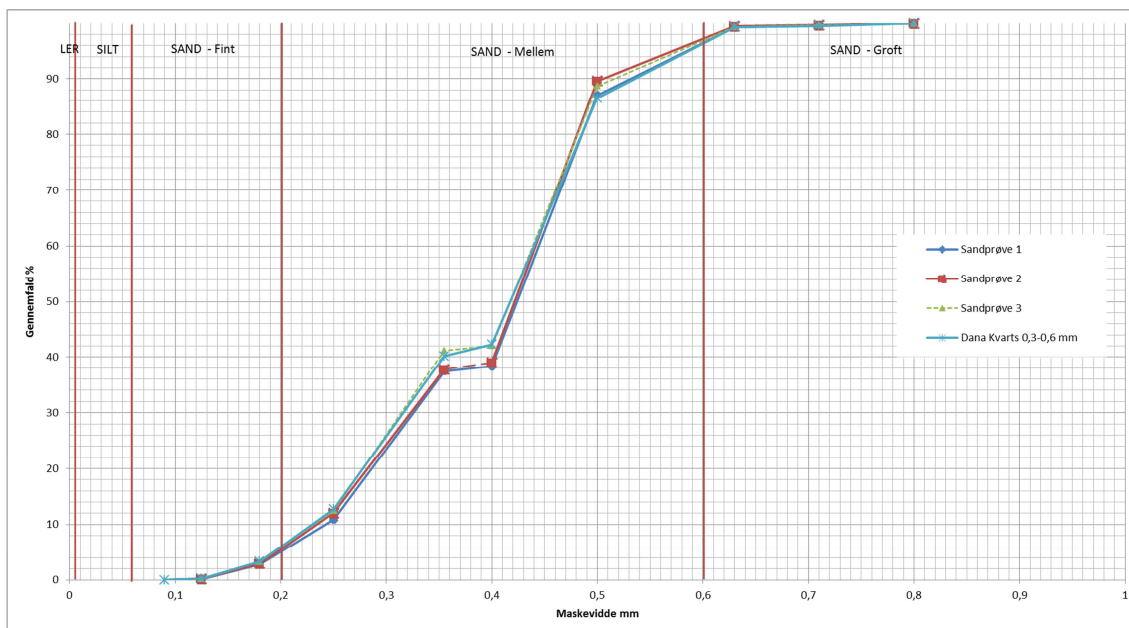
Figur 5.6. Udskylning af fines

Efter sandvaskning blev sandet udtaget i fire sække (dog kun en lille mængde i sæk nr. 4) og fra hver sæk blev der udtaget en sandprøve til sigteanalyse. Resultater af sigteanalyse ses i nedenstående Tabel 5.3. og Figur 5.7. Resultatet fra sæk nr. 4 er fjernet, da denne viste sig at være fejlbehæftet.

Tabel 5.3. Kornfordelingsdata for vasket sand

Maskevidde mm	Sandprøve							
	1		2		3		Dana kvarts 0,3-0,6 mm	
	Fordeling %	Gennemfald %	Fordeling %	Gennemfald %	Fordeling %	Gennemfald %	Fordeling %	Gennemfald %
> 0,710	0,38	99,99	0,34	100,00	0,31	99,99	0,46	100,00
0,630-0,710	0,35	99,61	0,19	99,66	0,31	99,68	0,20	99,54
0,500-0,630	12,24	99,26	9,86	99,47	10,66	99,37	12,87	99,34
0,400-0,500	48,68	87,02	50,57	89,61	46,73	88,71	44,16	86,47
0,355-0,400	0,88	38,34	1,21	39,04	0,82	41,98	2,12	42,31
0,250-0,355	26,57	37,46	25,73	37,83	28,69	41,16	27,43	40,19
0,180-0,250	8,06	10,89	9,16	12,10	9,17	12,47	9,39	12,76
0,125-0,180	2,66	2,83	2,74	2,94	3,07	3,30	3,09	3,37
0,090-0,125	0,16	0,17	0,19	0,20	0,22	0,23	0,26	0,28
< 0,090	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

Af figur 5.7 ses en sammenligning af kornkurven for det vaskede sand (sandprøve 1, 2 og 3) sammenholdt med referencen (Dana Kvarts 0,3-0,6 mm).

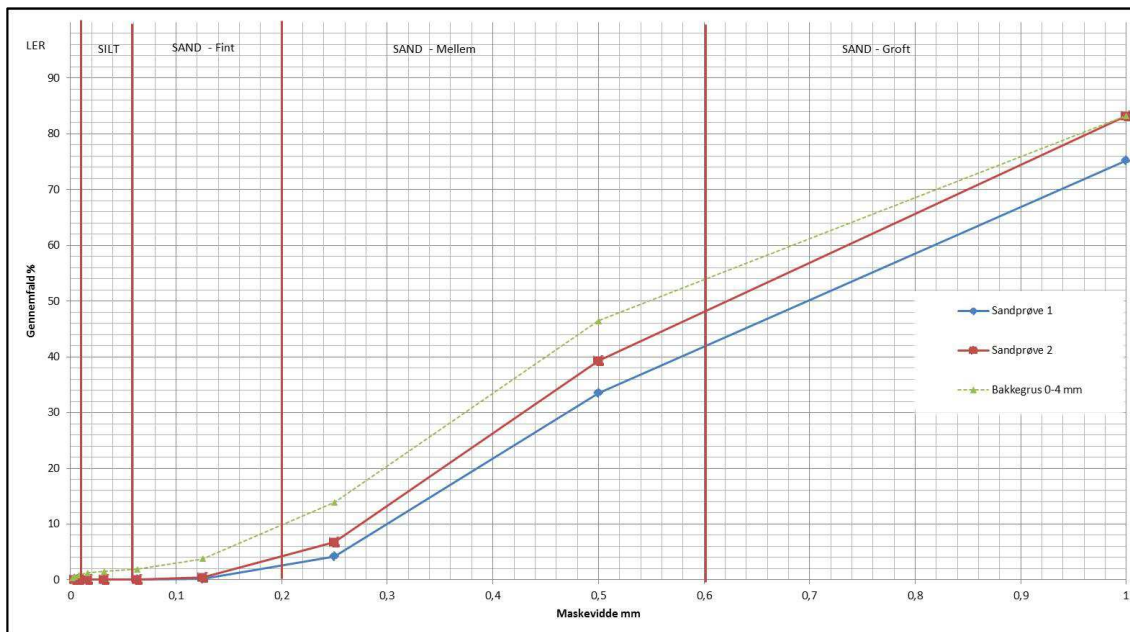


Figur 5.7 Kornfordelingskurve af vasket sand

Figuren viser, at sandets kornkurve stort set ikke ændres i intervallet 0,1-0,6 mm. Dette viser at sandvaskeren trods den observerede fluidisering ikke udvasker den fine del af sand fraktionen fra 0,1-0,2 mm. Dette vil med stor sandsynlighed ændres hvis der anvendes højere flow end anvendt i testen, idet det fine sand vil blive udvasket ved højere hastigheder.

Af figuren fremgår det også, at det anvendte sand desværre kun har haft meget begrænset indhold af fines, hvorfor eftervisning af effektiviteten i forhold til udvaskningen af fines bliver behæftet med usikkerhed. Af tabel 5.3 fremgår det, at indholdet af fines (< 0,2 mm) i referenceprøven lå på ca. 3 promille (0,3 %) mod ca. 2 promille (0,2 %) i det vaskede sand, som betyder at sandvaskeren fjernede ca. 30% af fines. Udvasningen kunne have været mere effektiv ved længere vasketid end de anvendte 7 minutter samt ved anvendelse af højere skyllehastighed, hvilket sandvaskeren er designet for. Der er således observeret og dokumenteret en lille effekt, men grunden af den effektive fluidisering af sandet, vurderes det, at sandvaskeren kan anvendes til effektiv udvaskning af fines.

Med henblik på at få yderligere vurdering af effektiviteten af sandvaskeren er der gennemført supplerende test på bakkegrus (sand 0-4 mm) indeholdende væsentligt større mængder fines. Resultater af dette forsøg vises i Figur 5.8.



Figur 5.8 Kornfordelingskurve af vasket bakkegrus

Af figuren ses det, at referencesandet (bakkegrus) har ca. 10% gennemfald af partikler under 0,2 mm (fines). Efter udvaskning af sandet over en periode på 7 minutter er gennemfaldet reduceret til 2-4%, svarende til en reduktion på ca.60-80%.

Dette illustrerer at den udviklede sandvasker kan anvendes til at udvaske fines. Det skal bemærkes, at det pga. forsøgsopstillingens udformning ikke har været muligt, at anvende den noget højere hastighed som sandvaskeren er designet for. For at opnå en højere og mere tilfredsstillende reduktion af indholdet af fines må det forventes, at der anvendes en længere periode evt. i kombination med en højere hastighed. Dette er muligt med sandvaskeren, hvorfor en mere effektiv udvaskning af fines vurderes at være et spørgsmål om trimning af prototypen ved fuldskala installation.

### 5.2.3 Test af prototype – desinfektion

Desinfektion af sandet er endvidere blevet testet i den udviklede sandvasker prototype.

Med udgangspunkt i desinfektionsforsøgene i laboratoriet, hvor det tydeligt blev vist at kun natriumhypoklorit havde en effekt over for de tilsatte *E.Coli* og Total Coliforme bakterier, blev dette valgt som desinfektionsmiddel til forsøget.

Effektiviteten af desinfektionen i sandvaskeren blev eftervist ved tilsætning af en *E.Coli* pille til sandslurryen under omrøring. Når pillen var opløst efter et par minutter blev der udtaget en prøve og analyseret for *E.Coli* og Total Coliforme bakterie for fastlæggelse af udgangsniveauet. Efterfølgende blev der tilsat natriumhypoklorit i en koncentration på 10 mg/l under omrøring. Kontakttiden var 10 minutter, hvorefter der igen blev udtaget en prøve for *E.Coli* og Total Coliforme bakterier. Der blev udtaget triple bestemmelse.

Resultaterne fremgår af tabel 5.4. Det fremgår heraf, at der ved den anvendte koncentration af natriumhypoklorit og den aktuelle kontaktid er dokumenteret en log fjernelse på mere end 7, idet der ikke er påvist indhold af *E. Coli* eller Total Coliforme bakterier efter desinfektion. Det gennemførte forsøg på prototypen af sandvaskeren viser således, at der med det valgte design kan opnås en effektiv desinfektion af sandet med tilsætning af natriumhypoklorit i en resulterende koncentration på 10 mg/l over en kontaktid på 10 minutter.

Tabel 5.4. Resultater af desinfektionsforsøg i prototype

Forsøgsnummer	Desinfektionsmiddel		E. Coli (#/ml)		Total Coliforme bakterie (#/ml)	
	Type	Koncentration	Antal	Fjernelse	Antal	Fjernelse
		mg/l	Målt	Log	Målt	Log
Nulprøve	Nulprøve	0	8609		1.0E+06	
Nulprøve			10000		1.0E+06	
Nulprøve			4828		1.0E+06	
Prøve 1	Natriumhypochlorit	10	Ingen	> 6	Ingen	> 6
Prøve 2			Ingen	> 6	Ingen	> 6
Prøve 3			Ingen	> 6	Ingen	> 6

#### 5.2.4 Vurdering af demonstration med prototypen

Der er udviklet en velfungerende prototype af en sandvasker. Sandvaskeren kan effektivt fluidisere sand og kan udvaske fines fra sandet. I forhold til de gennemførte forsøg må det forventes at der skal anvendes længere periode for effektiv udvaskning af sand end de 7 minutter samt en højere hastighed end der blev anvendt ved forsøget, hvor der blev opnået en fjernelse af fines på ca. 60-80 %.

Det er endvidere dokumenteret, at sandvaskeren kan give effektiv desinfektion af sandet ved anvendelse af natriumhypoklorit ved den anvendte kontakttid.

Samlet vurderes den udviklede prototype af sandvaskeren derfor at opfylde det opstillede succeskriterium, hvorfor den kan anvendes i fuldskala på kommende pellet-anlæg.

Denne model er beskyttet under Patent- og Varemærkestyrelsens regler for brugsmodebeskyttelse.



## 5.3 Test på pilotanlæg

### 5.3.1 Formål

Som supplement til de øvrige aktiviteter er der også gennemført supplerende test på pilotanlæg. Disse test er nærmere beskrevet i de følgende afsnit.

### 5.3.2 Test med vasket sand i pellet pilotanlægget

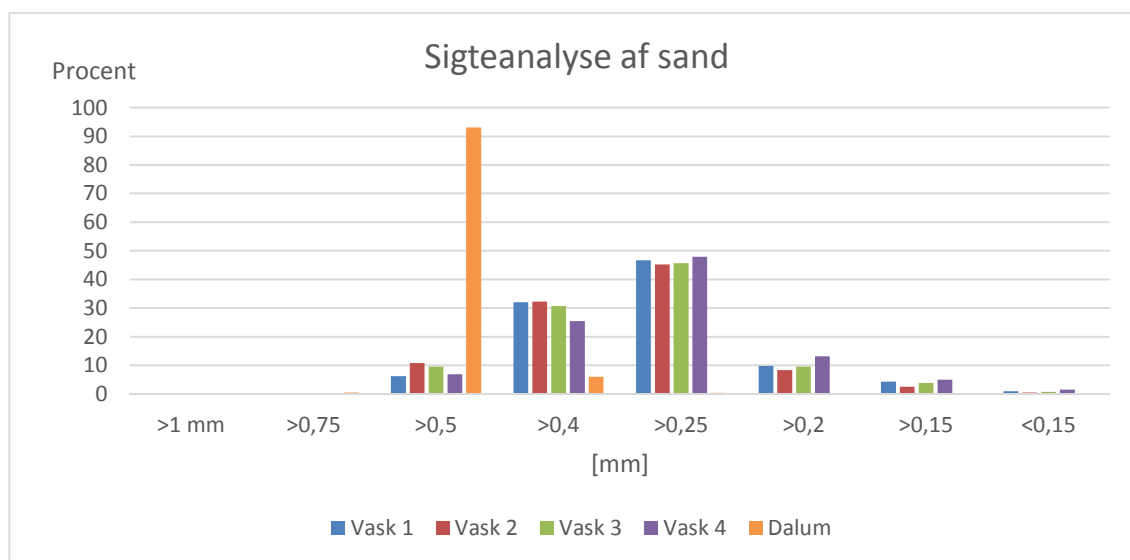
Vandcenter Syd har gennemført test af det vaskede sand i pilotanlæg for pelletteknologi.

Det vaskede sand blev sent til Vandcenter Syd i fire sække: De tre første sække var ca. 25 Kg hver, mens den sidste sæk kun vejede få kg. Der blev udført sigte-analyser af ca. 150 g sand fra de fire sække. Resultaterne blev sammenlignet med sandet på Dalum Vandværk (Odense), hvor der blev brugt nyt sand på 0,5 mm, hvor alle fraktioner < 0,4 mm var vasket ud i selve kolonnen. Driftshastigheden på Dalum Vandværk var 78 m/t og ved tilsætning af sand blev sandet skyllet i ca. 4 timer ved 97 m/t og 0,5 - 1 time ved 117 m/t.

Resultaterne i procent fordeling fra de fire sække og Dalum Vandværk er sammenlignet i Tabel 5.5 og Figur 5.9.

Tabel 5.5. Resultater fra sigte-analyser (i procent fordeling) med den vasket sand fra sandvasker prototype hos Vandcenter Syd

Maske str.	>1 mm	>0,75	>0,5	>0,4	>0,25	>0,2	>0,15	<0,15
Sæk 1	0	0,14	6	32	47	10	4	1
Sæk 2	0	0,27	11	32	45	8	3	1
Sæk 3	0	0,20	10	31	46	9	4	1
Sæk 4	0	0,13	7	25	48	13	5	2
Sand fra Dalum VV	0	0,54	93	6	0	0	0	0



Figur 5.9 Resultater fra sigte-analyser med den vasket sand fra sandvasker prototype hos Vandcenter Syd sammenlignet med sand fra Dalum Vandværk

Resultaterne viser, at sandet fra Dalum Vandværk var bedre sorteret end sandet fra sandvaskeren. Næsten alt sand fra Dalum Vandværk (93%) var 0,5 mm og der var ikke noget < 0,4 mm. Forskellen mellem resultaterne på Dalum Vandværk og fra det vaskede sand skyldes den lave hastighed som sandvaskeren kørte med, sammenlignet med hastigheden på Dalum Vandværk.



Det skal bemærkes at sandvaskeren ikke er designet til at sortere det sand der skal i pelletkolonnen. Der vurderes ikke at være behov for dette da levering af den rette fraktion kan stilles som et krav til leverandøren, der har produktionsfaciliteter til rådighed til at sikre at den rette fraktion leveres.

Sandvaskerens primære formål er at sikre at indholdet af fines kan fjernes hvis dette ved et uheld er indeholdt i leverance, samt at sikre, at sandet desinficeres effektivt inden det tilsættes i kolonnen, hvis der ved et uheld leveres ikke hygiejnisk sand.

Der er således ikke noget overraskende i resultaterne, der blot viser, at det, som det også teoretisk kan beregnes, er muligt at sortere sandet i takt med at højere hastighed anvendes. Endvidere er det ved testen vist, at en to-trins behandling kan give en effektiv sortering, men det kræver meget høje hastigheder og dermed store skyllemængder.

### **5.3.3 Test af pelletkolonne i pilotanlæg som mikrobiologisk barriere**

Vand Center Syd har gennemført mikrobielle forsøg i HOFORs pilotanlægs pelletkolonnen. Der blev analyseret for følgende bakterie typer: Total Coliforme bakterier, *E.coli*, enterococci, campylobactor og clostridium, både før og efter pellet kolonnen.

Resultatet viser, at 40 – 70% af de analyserede bakterier blev fjernet i pelletkolonnen. Dette er fint overensstemmende med den observerede reduktion i indholdet af assimilerbart organisk kulstof (AOC på engelsk) fra artiklen *Bacterial colonization of pellet softening reactors used during drinking water treatment* (se Ref #3# i afsnit "Litteratur") og må derfor tilskrives samme mekanismer – nemlig indkapsling af organisk aktiv overflade på sandkornene.

Konklusionen er, at en pelletkolonne ikke er en mikrobiel barriere, men at den forbedrer biostabiliteten ved at reducere AOC signifikant.

### **5.3.4 Rengøring af pilotanlægs pelletkolonne med citronsyre**

Da rengøring af pelletkolonner også udgør en risikofaktor er dette testet i pilotskala. Der er gennemført test af effektiviteten af citronsyre.

Citronsyre er en svag-middelstærk syre, i levnedsmiddelskvalitet, der bl.a. har den fordel, at der ikke skal håndtere stærke syrer i forbindelse med afrensningen og at der ikke sker pludselig og voldsom gasudvikling (klor/lungeødem samt CO<sub>2</sub> afgivelse). Set fra en slutbrugers synspunkt, vil det sandsynligt lyde mere betryggende at anvende et produkt der tilsættes i madvarer, frem for f.eks. salt- eller svovlsyre. Desuden vil metaller som rustfrit stål og messing ikke korrodere.

I pelletkolonnen sker den største kalkudfældning i de nederste 2 m, da pH her er >9. Det medfører, at det er her den største mængde kalk udfældes på kolonneoverfladen. (se billede nedenfor)



Figur 10. Kalkaflejring i pelletkolonnen

Rensning blev udført først på Dalum Vandværk og derefter på Lindved Vandværk. Pellet pilotanlægget kørte på Dalum Vandværk i ca. 4 mdr. og på Lindeved Vandværk i ca. 2 mdr. Der er anvendt en 1 m<sup>3</sup>-tank der er anvendt til at recirkulere citronsyre igennem kolonnen. Der er anvendt en 5% v/v opløsning ved at tilsætte citronsyrepulver til vandet, der blev cirkuleret med pumpe.

På Dalum Vandværk blev citronsyren cirkuleret i 3 dage og størstedelen af det tynde kalk var opløst, dog var der en del tykkere calciumkarbonat på den nederste meter. På Figur 11 vises resultater fra rensning på Dalum Vandværk (i billedet til højre ses det hvordan overfladen "skrælles" i store skaller).

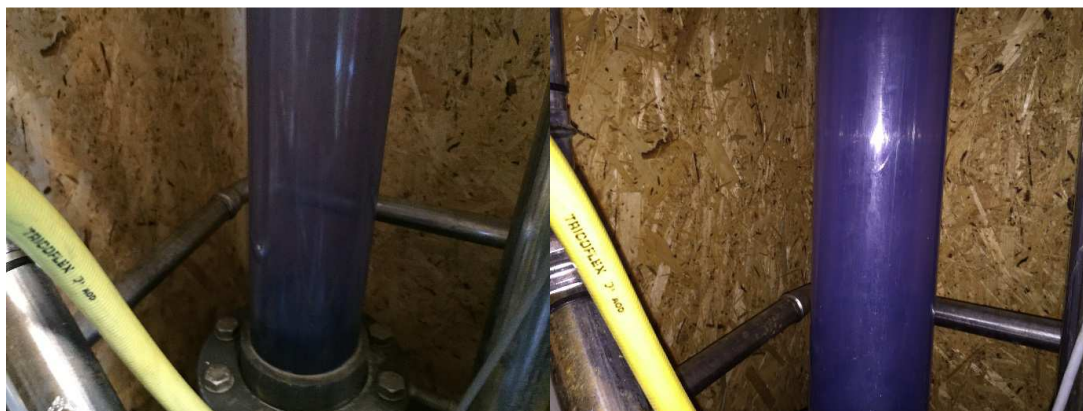


Figur 11. Resultater fra rensning med citronsyre på Dalum Vandværk

Som et forsøg på at løsne skallerne blev der pumpet trykluft ind i bunden af kolonnen. Det bevirkede at de løse skaller blev revet af, men den mere massive kalk, der sad på selve kolonneoverfladen, blev siddende.

Det er sandsynligt at en kost der trækkes op og ned, let ville kunne løse den resterende kalkaflejring, som synes meget løs. Redskaber, svarende til dem, der benyttes i boringer ville være velegnede.

På Lindeved Vandværket blev citronsyre cirkuleret i 8 dage, som resulterede i en helt ren kolonne, som Figur 4.1 viser.



Figur 12. Resultater fra rensning med citronsyre på Lindeved Vandværk

Under begge forsøg blev der løbende udtaget vandprøver til analyse af pH og calcium indhold. Resultaterne vises i Tabel 5.6

Tabel 5.6. Resultater af vandprøver analyser fra rensning med citronsyre

Dato	Tid	Antal timer	pH (-)	Calcium (mg/l)
Dalum VV, 30.06.2015	12:30	0,5	2,47	329
Dalum VV, 01.07.2015	14:00	22	3,06	1550
Dalum VV, 02.07.2015	10:00	42	3,31	1990
Lindeved VV, 03.07.2015	07:00	63	3,37	1980
Lindeved VV, 08.07.2015	-	190	-	-

Forskellen i de resultater fra Dalum og Lindeved vandværker skyldes at den længde af tid, som pellet processen havde kørt på Dalum Vandværk (ca. 4 måneder) og Lindeved Vandværk (ca. 2 måneder) da rensning blev udført og den længde af tiden som citronsyren blev recirkuleret på Dalum Vandværk (i 3 dage) og på Lindeved Vandværk (i 8 dage).

Konklusionen fra forsøget viser, at en afrensning af kalkaflejringer på pelletkolonner med citronsyre, klart er en mulighed, men den optimale dosering og længden af rensning med citronsyre bør undersøges yderligere.

### 5.3.5 Overfladers modstandsdygtighed over for kalkbelægning

Kalkafsætning er en af de væsentlige driftsmæssige udfordringer i blødgøringsanlæg, der baseres på pelletmetoden. Det er derfor fundet væsentligt at studere forskellige materialers egenskaber i den forbindelse. Materialeoverflader udmærker sig ved deres egenskaber i forhold til tre faktorer: friktion, non-stick og slid.

Da der i de nederste ca. 2 meter af kolonnen sker en meget kraftig afgivelse af kalk til pellets, er det også i dette område der opstår de mest kraftige kalkaflejringer på kolonneoverfladen. For at undersøge om der findes nogle materialer og/eller coatings, som er særlig modstandsdygtige over for kalkaflejringer, blev der udvalgt forskellige materialer, der blev nedsænket ca. 5,5-6 m ned i den 6,7 m høje pilot-kolonne.

Der er flere coatings, der er brugt indvendigt i pelletkolonnernes nederste del bl.a. ebonit og elastomer (gummi) overflade.

Følgende standardmaterialer blev nedsænket i kolonnen:

- Et stykke af et PE-rør
- Et stykke teflon
- Et stykke rustfast stål
- Et udsnit af en keramisk coatet stegepande
- Et stykke ebonit

Alle hyldematerialer blev i kolonnen i 25 dage, med undtagelse af ebonit, som kun har været i kolonne i 7 dage.

Derudover blev tre stykker rustfast stål sendt til ACCOAT Coatings og blev coatet med forskellige teflon/keramiske coatings: ("silver" og "Accfol IG54" og "PG28". Disse coatings er lavet af natur keramisk eller teflon med særdeles gode slidegenskaber og de er godkendt til fødevarer. Overfladen er meget hård og benyttes oftest i forbindelse med stegepander, bageforme og formværktøjer til plastindustrien. De tre coated rustfast stål blev ligeledes nedsænket i kolonnen i ca. 14 dage.

Resultaterne viser efter 25 dage, at en betydelig kalkbelægning bliver dannet på alle standardmaterialer. På ebonittens overflade er der intet spor af udfældning, men det er svært endeligt at konkludere om dette skyldes at materialet er mere effektivt end de øvrige som følge af den begrænsede forsøgsperiode. Vedr. coated rustfast stål viser resultaterne, at der efter 14 dage er kommet en del belægning på "silver" og "Accfol IG54" coatings, men coating "PG 28" viser sig meget modstandsdygtig. Figur 13 viser billedet af hyldematerialet og coated rustfast stål med kalkbelægninger.



Figur 13 Hyldematerialer og coated rustfast stål med kalkbelægninger

Det blev også undersøgt, hvor hårdt kalken bindes på overfladerne af både standardmaterialer og coated rustfast stål ved en mild destruktiv håndtering (bukke, bøje, kradse). Af standardmaterialer, kunne kalkbelægninger fjernes fra PE-rør, teflon og stegepanden. Rustfast stål kunne ved ret kraftig påvirkning deformeres så der kom sprækker i kalkoverfladen, men kalken forblev fastsiddende. Ebonit kunne ikke testes, da der ikke var nogen kalkbelægning på materialet. Dette kan skyldes den korte forsøgsperiode men kan også indikere at materialet har en god egenskab ifht. at minimere afsætningen af kalk. På coated rustfast stål krævedes der en del kraft for at få de små områder ved hullet blotlagt, så der kan konkluderes at disse coatings er uegnet til denne opgave. Resultatet vises på Figur 14.



Figur 14 Standardmaterialer og coated rustfast stål efter mild håndtering

Konklusioner på dette forsøg er følgende:

- Af standardmaterialer, ser Ebonit til at være det mest egnede hyldemateriale som coating af pellet kolonnen. Dog bør det laves flere undersøgelser, hvor dette materiale bliver nedsænket i kolonnen i 25 dage, for at kunne lave en reel sammenligning med de andre hyldematerialer.
- Af coated rustfast stål, er coating "PG 28" den mest interessante overflade at arbejde videre med, da denne belægning virker meget modstandsdygtig over for kalkaflejringer. Dens non-stick egenskaber er dog betegnet som ringere end traditionelle polymerbelægnings. Det kunne være interessant om længere opholdstid vil få de små kalkpletter til at gro sammen til en flade, lignende de andre coatings. Der vil forsøges udført langtidsforsøg med denne coating i forbindelse med senere test.

# 6. Konklusion

Det vurderes overordnet at formålet med projektet er opfyldt, idet projektet har afdækket hvilke udfordringer der skal løses for implementering af central blødgøring med pellet-teknologi i Danmark, således at de danske krav til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet kan overholdes.

Projektet har således afdækket, hvilke risikofaktorer der er de væsentligste i forhold til drikkevandssikkerhed og mikrobiologisk vandkvalitet, ligesom der er udarbejdet konkrete forslag til hvordan disse risikofaktorer kan elimineres.

For den største risikofaktor (tilsætning af sand til pellet-kolonnerne) er der endvidere udviklet og demonstreret en prototype til en sandvasker. Effektiviteten af denne er eftervist dels i forhold til udvaskning af fines fra sandet, dels ved dokumentation af effektiviteten af desinfektionen af sand.

Som supplement kan det også konkluderes at forsyninger / vandværker ved introduktion af blødgøring ved pelletteknologi skal opstille præcise krav til leverandørerne af sand. Disse krav skal bl.a. gælde hvilken fraktion af sand der skal leveres, max. indhold af fines, hygiejne under produktion, hygiejnisering i form af varmebehandling, anvendelse af hygiejniske silovogne, modtagekontrol med forsegling af silovogne mv.

Herudover er der udarbejdet et nyt design for en ny generation af pellet-anlæg, som lever op til kravene iht. Dokumenteret Drikkevands Sikkerhed (DDS). Der er som led heri fokuseret på at eliminere de primære risikofaktorer der er identificeret som led i projektet. Pilotforsøg har endvidere givet vigtigt ny viden herunder at blødgøring med pelletteknologi giver mere biostabilt vand. Endvidere har pilotforsøg vist at der kan udvikles effektive systemer til CIP-rensning (Cleaning In Place) bl.a. ved anvendelse af citronsyre. Endvidere er det vist, at indvendig coating og/eller anvendelse af standardmaterialer kan give en væsentligt reduktion af de kalkudfældninger der primært sætter sig i de nederste 2 meter af en pelletkolonne. Dette kan nedsætte frekvensen for rengøring af pelletkolonnerne og dermed højne både drikkevandssikkerhed samtidigt med at omkostningerne ved teknologien reduceres.

Den udviklede teknologi, såvel sandvasker og ny generation af pellet-anlæg, er beskyttet under Patent- og Varemærkestyrelsen.

# Litteratur

- /Ref. 1/: Delft University of Technology (2015) *Water Treatment – Softening*. Lecture Notes
- /Ref. 2/: Gülay A., Tatari K., Musovic S., Mateiu R.V., Albrechtsen H-J. and Smetsa B.F. (2014). *Internal porosity of mineral coating supports microbial activity in rapid sand filters for groundwater treatment*. Applied and Environmental Microbiology, vol. 80, no. 22, 7010–7020
- /Ref. 3/: Hammes F., Boon N., Vital M., Ross P., Magic-Knezev A. and Dignum M. (2011). *Bacterial colonization of pellet softening reactors used during drinking water treatment*. Applied and Environmental Microbiology, vol.77, no.3, 1041-1048
- /Ref. 4/: Rietveld L.C., Helm A.W.C. van der, Schagen K.M. van and Aa L.T.J. van der (2010). *Good modelling practice in drinking water treatment applied to Weesperkarspel plant of Waternet*. Environmental Modelling & Software, vol. 25, 661-669
- /Ref. 5/: Schagen K.M. van, Rietveld L.C. and Babuska R (2008) *Dynamic modelling for optimisation of pellet softening*. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA 57.1
- /Ref. 6/: Schagen K.M. van, Rietveld L.C., Babuska R. and Kramer O.J.I. (2008). *Model-based operational constraints for fluidised bed crystallisation*. Water Research, vol. 42, 327-337
- /Ref. 7/: Schagen K. M. van, Rietveld L. C., Babuska R. and Baars E. (2008). *Control of the fluidised bed in the pellet softening process*. Chemical Engineering Science vol. 63, 1390-1400
- /Ref. 8/: Snedecor J., Peters T. and Larsen M. (2008). *Pellet softening: hardness, iron and manganese removal*. Presentation for AWWA Conference
- /Ref. 9/: Hofman J., Kramer O., Hoek J. P. van der, Nederlof M. and Groenendijk M. (2007). *Twenty years of experience with central softening in the Netherlands: Water quality – Environmental benefits – Costs*. Water, vol. 21, 21.24
- /Ref. 10/: Chen Y., Yeh H. and Tsai M. (2000). *The application of fluidized bed crystallization in drinking water softening*. Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering. vol. 10, no.3, 177-184
- /Ref. 11/: McNeill L.S. and Edwards M (1997). *Arsenic removal during precipitative softening*. Journal of Environmental Engineering, vol.123, no.5, 453-460
- /Ref. 12/: Dijk J.C. van and Wilms D.A. (1991). *Water treatment without waste material: Fundamentals and state of the art of pellet softening*. J Water SRT- Aqua vol. 40, no. 5, 263-280





# Bilag





6.1 Bilag 1: Laboratorieforsøg, Desinfektion af sand, Resultater / forsøgsplan

Forsøgsnummer	Sand		Desinfektionsmiddel		Omrøring		FF	E. Coli (#/ml)			Total Coliforme bakterie (#/ml)		
	Størrelse mm	Mængde g	Type	Koncentration mg/l	Hastighed rpm	Tid min		Antal		Fjernelse Log	Antal		Fjernelse Log
								Målt	Beregnet		Målt	Beregnet	
0.A	0,3 - 0,6	50	Nul prøve uden <i>E.coli</i>	0	250	10	50	Ingen	0	-	Absent	0	-
0.B	0,3 - 0,6	50	Nul prøve med <i>E.coli</i>	0	250	2	50	1.0E+04	5.0E+05	-	1.0E+06	5.0E+07	-
0.C	0,3 - 0,6	50	Nul prøve med <i>E.coli</i>	0	250	5	50	1.0E+04	5.0E+05	-	1.0E+06	5.0E+07	-
0.D	0,3 - 0,6	50	Nul prøve med <i>E.coli</i>	0	250	10	50	1.0E+04	5.0E+05	-	1.0E+06	5.0E+07	-
1.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	2	250	2	50	1	50	4	241	1.2E+04	4
1.B								1	50	4	155	7.8E+03	4
1.C								6	300	3	1.2E+03	6.0E+04	3
2.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	2	250	5	50	116	5.8E+03	2	1.0E+04	5.0E+05	2
2.B								1	50	4	243	1.2E+04	4
2.C								618	3.1E+04	1	1.0E+05	5.0E+06	1
3.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	2	250	10	50	5.5E+03	2.8E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
3.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
3.C								8.5E+03	4.2E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
4.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	5	250	2	50	1	50	4	38	1.9E+03	4
4.B								1	50	4	45	2.3E+03	4
4.C								1	50	4	99	5.0E+03	4
5.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	5	250	5	50	1	50	4	283	1.4E+04	4
5.B								44	2.2E+03	2	7.9E+03	4.0E+05	2
5.C								448	2.2E+04	1	1.0E+04	5.0E+05	2
6.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	5	250	10	50	25	1.3E+03	3	3.6E+03	1.8E+05	2
6.B								63	3.2E+03	2	1.0E+06	5.0E+07	0
6.C								15	750	3	3.0E+03	1.5E+05	3
7.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	10	250	2	50	1	50	4	2	100	6
7.B								1	50	4	106	5.3E+03	4
7.C								1	50	4	14	700	5
8.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	10	250	5	50	Absent	0	>6	1.0E+07	5.0E+08	-1
8.B								Absent	0	>6	Absent	0	>6
8.C								Absent	0	>6	Absent	0	>6
9.A	0,3 - 0,6	50	Hypochlorit	10	250	10	50	Absent	0	>6	Absent	0	>6
9.B								Absent	0	>6	Absent	0	>6
9.C								1	50	4	12	600	5
10.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	2	250	2	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
10.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
10.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
11.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	2	250	5	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
11.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
11.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
12.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	2	250	10	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
12.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
12.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
13.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	5	250	2	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
13.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
13.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
14.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	5	250	5	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
14.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
14.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
15.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	5	250	10	50	9.7E+03	4.9E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
15.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
15.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
16.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	10	250	2	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
16.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
16.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
17.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	10	250	5	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+09	5.0E+10	-3
17.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
17.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
18.A	0,3 - 0,6	50	Hydrogenperoxid	10	250	10	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
18.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
18.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
19.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 10	250	2	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
19.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
19.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
20.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 10	250	5	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
20.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
20.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
21.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 10	250	10	50	1.5E+03	7.4E+04	1	1.0E+06	5.0E+07	0
21.B								1.7E+03	8.6E+04	1	1.0E+05	5.0E+06	1
21.C								1.7E+03	8.6E+04	1	1.0E+05	5.0E+06	1
22.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 11	250	2	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
22.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
22.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
23.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 11	250	5	50	1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+07	5.0E+08	-1
23.B								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
23.C								1.0E+04	5.0E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
24.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 11	250	10	50	3.2E+03	1.6E+05	0	1.0E+05	5.0E+06	1
24.B								5.8E+03	2.9E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
24.C								6.8E+03	3.4E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
25.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 12	250	2	50	4.19E+03	2.1E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
25.B								4.53E+03	2.3E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
25.C								5.29E+03	2.6E+05	0	1.0E+06	5.0E+07	0
26.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 12	250	5	50	1.1E+03	5.5E+04	1	1.0E+05	5.0E+06	1
26.B								1.6E+03	7.8E+04	1	1.0E+05	5.0E+06	1
26.C								2.4E+03	1.2E+05	1	1.0E+05	5.0E+06	1
27.A	0,3 - 0,6	50	Natriumhydroxid	Til pH 12	250	10	50	764	3.8E+04	1	1.0E+05	5.0E+06	1
27.B								793	4.0E+04	1	1.0E+05	5.0E+06	1
27.C								1.0E+03	5.0E+04	1	1.0E+05	5.0E+06	1

Log fjernelse:

1	90	%
2	99	%
3	99.9	%
4	99.99	%
5	99.999	%
6	99.9999	%
> 6	100	%

## **Optimering af teknologi til blødgøring af drikkevand**

Efterspørgslen efter teknologi til blødgøring af drikkevand er stigende i Danmark. Ved anvendelse af blødgøring i dansk vandforsyning introduceres en række risici i relation til drikkevandssikkerheden herunder den mikrobiologiske vandkvalitet. I denne rapport er der fokuseret på blødgøring med Pellet-teknologi, da denne vurderes at få stor udbredelse i Danmark ud fra et teknisk-økonomisk perspektiv.

I rapporten er de væsentligste risici identificeret og vurderet, ligesom der er givet forslag til, hvordan disse kan håndteres i en dansk kontekst. Der er endvidere udviklet og demonstreret en ny teknologi til håndtering af den største risiko, tilførsel af sand i blødgøringsprocessen, ligesom en ny optimeret generation af den hidtil anvendte kolonnetype er udviklet.

Naturstyrelsen  
Haraldsgade 53  
DK - 2100 København Ø  
Tlf.: (+45) 72 54 30 00

**[www.nst.dk](http://www.nst.dk)**