



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Sammenfatning

Rapport 12 i projektet

”Smart Re-design of Drinking Water Production”

MUDP Rapport

September 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Loren Ramsay

ISBN: 978-87-7038-551-0

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	5
1. Introduktion	8
1.1 Projektidéen	8
1.2 Projektleverancer	9
1.3 Redesign-principperne	9
1.4 Projektformidling	10
2. Vandbehandlingsdata	13
2.1 Mangel på vandbehandlingsdata	13
2.2 Behov for udvikling af nyt prøvetagningsudstyr	13
2.3 Fastlæggelse af KPI'er	13
2.4 Evidensbaseret vandbehandling	14
3. Iltning og jernfjernelse	15
3.1 Aktiv til passiv iltning	15
3.2 Dybdefiltrering	15
3.3 Returskylleeffektivitet	16
3.4 Massebalance og filtervækst	16
4. Filterbeholderdesign	17
4.1 Filtreringsprincip	17
4.2 Filterbund	17
4.3 Bærelag og filtermedie	17
4.4 Fluidisering og medieflugt	18
4.5 Monitoring og fuldskala	18
5. Indkøring	19
5.1 Mål for SmartSand	19
5.2 Fremgangsmåde	19
5.3 Produktion	20
5.4 Indkøring	20
5.5 Ydeevnedeklaration	20
6. Ammoniumfjernelse	21
6.1 Pilotanlæg	21
6.2 Robusthedstest	21
6.3 Fuldskala anlæg	21
6.4 Driftsfordele	22
7. Modellering	23
7.1 Fysiske input parametre	23
7.2 Brug af modellen	23
7.3 Jernfjernelse over en gangtid	23
7.4 Indkøring	24
7.5 Indkøring med SmartSand	24

8.	Returskylleprocedurer	25
8.1	To-medie filtre	25
8.2	Opblanding af filtermedier	25
8.3	Bevægelsesfænomener	26
9.	Behandlingsarkitektur	27
9.1	Mål for SmartSand	27
9.2	Fremgangsmåde	27
9.3	Højere omsætningsrater	27
9.4	Robust og stabil biomasse	28

Forord

Denne rapport er en del af fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production", som blev udført i perioden 2018 - 2022 og finansieret af projektdeltagernes egenfinansiering samt den offentlige støtteordning Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet. Projektets formål er at re-designe vandbehandling ved en dyb forståelse og en radikal nytænkning af vandbehandlingsprocessen. Da projektet omhandler helt almindelig dansk vandbehandling, er projektets resultater relevante for alle danske vand-forsyninger.

Fyrtårnsprojektet er formidlet gennem 12 rapporter, samt en serie konferenceindlæg, tidskrifts-artikler, og seminarer. Desuden er en række løsninger demonstreret ved fuldskaalanlæg på hhv. Østerbyværket syd for Aarhus og Lundeværket nord for Odense.

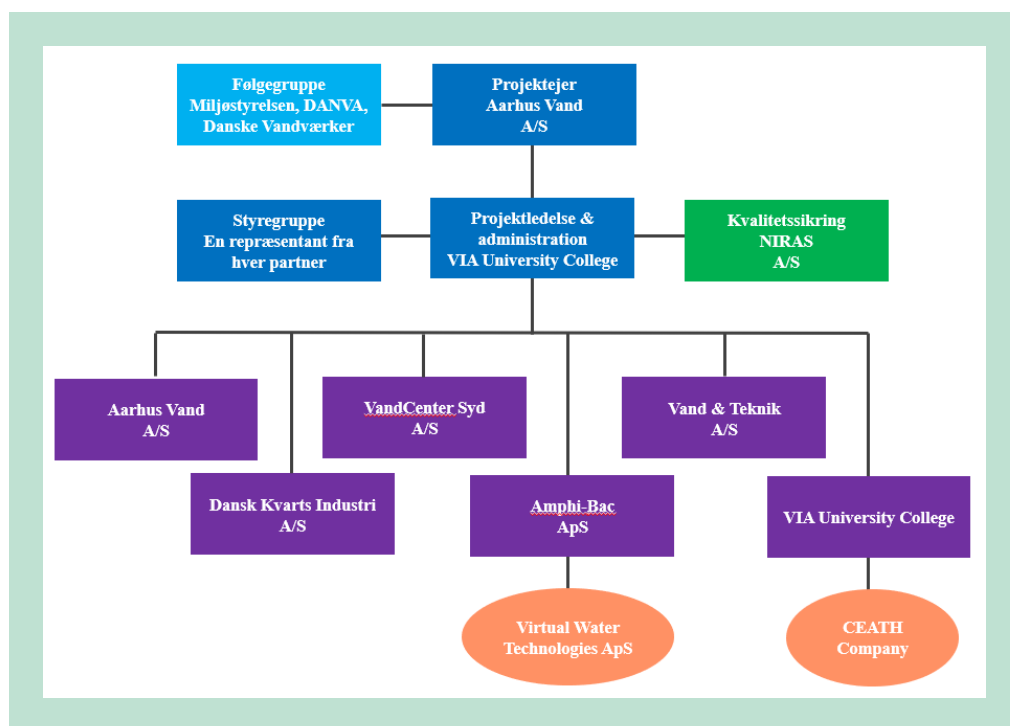
Baggrund

I Danmark er drikkevandsproduktion baseret på grundvand. Grundvandet behandles ved en ret enkelt proces, der kaldes for "normalbehandling" (Karlsen og Sørensen, 2014). Denne proces består af iltning af vandet efterfulgt af en biofiltrering med gravitations- eller trykfiltre. Biofiltrering indebærer en kompleks blanding af fysiske, kemiske og mikrobiologiske elementer. Da det indvundne grundvand ofte er kemisk reduceret, kan vandet indeholde opløste stoffer som jern, ammonium og mangan, der skal fjernes/omdannes. Avanceret vandbehandling kommer kun på tale, hvis der også er behov for at fjerne f.eks. gasser (svovlbrinte, methan, aggressiv kuldioxid), hårdhed, arsen eller pesticider. I Danmark anvendes hverken chlor eller andre former for kemisk desinfektion under behandling eller distribution af vandet.

Biofiltrering er hjertet af normalbehandling af drikkevand i Danmark. Design og drift af biofiltrering har dog ikke ændret sig væsentligt i mere end 100 år. Manglende proces- og mikrobiologisk viden kombineret med en konservativ tilgang har medført, at videreudvikling af biofiltrering har været begrænset, og at filtre har været betragtet som en black box. Nye og billigere mikrobiologiske analyser, sofistikerede prøvetagningsmetoder, at-line målinger og andre fremskridt har nu åbnet denne black box i vandbehandlingen og gjort det muligt at undersøge, forstå og manipulere processen i højere grad end før.

Projektorganisation

Projektet blev udført af syv partnere og to underleverandører, se FIGUR 1 nedenfor:



FIGUR 1. Diagram over projektorganisation.

Projektets følgegruppe og styregruppe bestod af følgende personer:

Følgegruppe

Bolette D. Jensen, Miljøstyrelsen (formand)
 Dorte Skræm, DANVA
 Robert Jensen / Henrik Hermansen, Danske Vandværker
 Flemming Fogh Pedersen, Aarhus Vand (projektejer)
 Loren Ramsay, VIA University College (projektleder)

Styregruppe

Flemming Fogh Pedersen, Aarhus Vand
 Finn Møllerup, VandCenter Syd
 Jens Kristensen, Vand og Teknik
 Claus Hove Sørensen, Dansk Kvarts Industri
 Søren Bastholm Olesen, Amphi-Bac
 John Kristensen, NIRAS
 Loren Ramsay, VIA University College

Projektets arbejdsplaner og rapporter

Projektet er inddelt i arbejdsplaner og rapporter, se nedenfor. Arbejdsplanerne og rapporterne er identificeret som "åbne" eller "kommercielle" for at tydeliggøre, hvornår resultater frit formidles til hele branchen og hvornår resultater holdes internt blandt de relevante partnere af hensyn til kommercielle interesser.

Arbejdsplan 1: Etablering af designgrundlag (åben)

Rapport 1: Indsamling af vandbehandlingsdata
 Rapport 2: Merkur: Web-baseret platform til vandbehandlingsdata

Arbejdsplan 2: Tekniske forsøg (åben)

Rapport 3: Flytning af filtermediekorn under returskyl
 Rapport 4: Jernfjernelsesdybde i biofiltre
 Rapport 5: Biostimulering med ammonium
 Rapport 6: Jernfjernelse i returskyl
 Rapport 7: Filtermediers gangtid

Arbejdsplan 3: SmartSand (kommerciel)

Rapport 8: Udvikling og produktion af SmartSand (fortrolig)

Arbejdspakke 4: SmartArkitektur (åben)

Rapport 9: Vandbehandlingsmodel

Arbejdspakke 5: Fyrtårnsdemonstration i fuldskala (åben)

Rapport 10: Demonstrationsanlæg ved Østerbyværket

Rapport 11: Demonstrationsanlæg ved Lundeværket

Arbejdspakke 6: Projektledelse

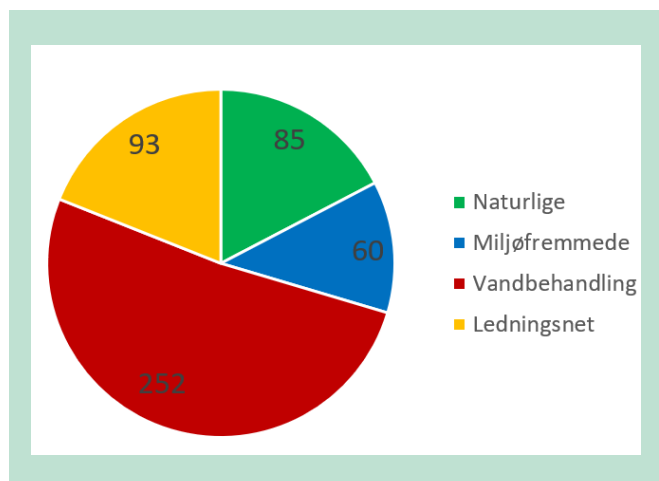
Rapport 12: Sammenfatning

1. Introduktion

Denne rapport er en sammenfatning og er Rapport 12 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Redesign of Drinking Water Production". Formålet med Rapport 12 er at se vandbehandling ud fra Redesign-projektets perspektiv samt give et overblik over udvalgte resultater. Resultater fra Redesign-projektet er et bidrag til "den nye lærebog" for normal vandbehandling i Danmark da den tidligere forståelse af normal vandbehandling har været ufuldstændige eller i enkelte tilfælde forkerte. Flere detaljer findes i Redesign-rapporterne 1-11.

1.1 Projektidéen

Fremskridt i prøvetagning og måleteknikker i forbindelse med biofiltrering har medført ny viden og mulighed for at undersøge, forstå og manipulere de kemiske, mikrobiologiske, fysiske og procesteknologiske elementer i drikkevandsbehandling. Samtidig har krav til bæredygtighed været stigende i de senere år. Endelig er vandkvaliteten blevet sat under øget pres og der er en erkendelse af, at mange af de nuværende overskridelser af vandkvalitetskrav på landsplan kunne undgås ved bedre vandbehandling (se FIGUR 2). Dette gør, at projektgruppen har ønsket at re-designe drikkevandsproduktion - både i forbindelse med anlæg og drift - fra bunden.



FIGUR 2. Oversigt over antal overskridelser og årsager hertil.

Der har været ønske om, at projektresultaterne skulle kunne anvendes på såvel eksisterende som nye vandværker. Mange vandværker i Danmark har en restlevetid, der gør, at procesanlægget ikke umiddelbart er økonomisk eller miljømæssigt rentabelt at udskifte. Projektet skulle derfor pege på, hvorledes eksisterende filteranlæg kan retro-fittes, dvs. renoveres radikalt, så de fungerer bedre i deres restlevetid.

Projektet har været tydeligt inddelt i åbne og kommercielle arbejdsplaner. Resultater fra de kommercielle arbejdsplaner har været holdt fortrolige for at kunne medføre øget vækst og beskæftigelse i de aktuelle partnere. Åbne arbejdsplaner har udnyttet diverse metoder til formidling af resultater (se afsnit 1.4) til så bred en kreds som mulig så hele forsyningsbranchen kunne nå længere end ved egne individuelle anstrengelser.

Da drikkevandsproduktion foregår ved hjælp af biofiltrering på alle danske vandværker i dag, har projektets resultater mulighed for en meget bred anvendelse. Dermed har projektet mulig-

hed for en væsentlig påvirkning af hele vandbranchen. Da interessen for en bæredygtig vandproduktion er stigende internationalt, er resultaterne fra Redesign-projektet gavnlig for den del af den danske vandbranche, der beskæftiger sig med eksport.

1.2 Projektleverancer

Ved projektets start blev en række resultater og leverancer stillet i udsigt.

Projektets formål	Succeskriterier	Resultater og leverancer	Arbejdspakke
At re-designe vandbehandling fra bunden ved radikal nytænkning af drikkevandsproduktion	50 % reduktion af vandspild ved returskyl.	Ny viden om procesdesigns.	AP1, AP2
	Signifikant mindre filterbeholdere.	Banebrydende nyt design af filterbeholdere.	AP4
	Indkøring forkortes fra 3 til under 1 måned.	Metoder til produktion og anvendelse af SmartSand.	AP3
	Anvendelighed i eksisterende anlæg.	Anvisninger til eksisterende filteranlæg.	AP4, AP5
	Open Science principper indarbejdes i udvalgte arbejdsplaner.	Demonstration i fuldskala på to lokaliteter.	AP5

FIGUR 3. Projektleverancer.

1.3 Redesign-principperne

Redesign-projektet har gennem egne resultater, litteraturstudier og samtaler med andre eksperter medført en dybere forståelse for, hvordan vandbehandling bedst designs og drives. Under ét er denne forståelse formuleret som en række principper. De mest centrale redesign-principper angives nedenfor:

1. Der bør tilsigtes at undgå overiltning af vandet (hvor der ikke er behov for at strippe reducerede gasser eller aggressiv kuldioxid), da iltning koster energi, øger risikoen for luftansamlinger i filtermediet samt øger risikoen for uønsket udfældning af kalk.
2. Adskillelse af filtrering i flere beholdere i serie muliggør at den enkelte proces kan optimeres, med bedre vandkvalitet og mindre anlæg til følge.
3. Ved valg af filtermedium til et forfilter til jernfjernelse, hvor der er forventning om behov for hyppige og grundige skyl, kan man overveje et filtermedium med lavere densitet end kvarts for at muliggøre bedekspansion ved lavere returskylleflow.
4. Et filters fribord bør minimeres. Det kan ske ved at sænke vandspejlet inden skyl og stoppe lille skyl inden vandspejlet når skyllevandsrenden – eller ved at bruge en filtermedie tilbageholdelsesanordning ved skyllevandsrenden. Et højt fribord a) kræver anlæg med højere filtre med unødigt brug af ressourcer til følge, b) forringer mulighed for at fjerne skidt under returskyl og c) medfører et tyndt lag slampartikler i toppen af filtret efter endt returskyl. Fribordets højde afhænger også af det planlagte filtermedies bedekspansion under returskyl.
5. Bærelag i filtre bør undlades hvor muligt (f.eks. ved tilpasning af filterbunden og/eller kornstørrelser), da der er risiko for at bærelag blandes med filtermedie under returskyl samt fordi bærelaget generelt har ringe renseevne.

6. Hvor bærelag vurderes nødvendigt, kan dette med fordel udgøres af glaskugler, der har et lavt uensformighedstal, en høj sfæricitet og en stor densitet. Bærelag med glaskugler har mindre tendens til at blandes med filtermediet.
7. Indkøring af nyt filtermedie bør forkortes, evt. ved brug af medie, der på forhånd er indkørt. Dette sparer tid og grundvandsressource samt reducerer behovet for afledning af vandet under indkøringen.
8. Til jernfjernelse, bør der tilsigtes en dybdefiltrering, dvs. at drikkevandets kvalitetskrav først opnås efter vandet har passeret mindst 75% af bed dybden.
9. Langt større flow i jernfiltre end er typisk i dag bør anvendes. Det muliggør mindre filtreareal og derfor mindre skyllevandspumper og skyllevandsmængder.
10. Det erkendes, at der findes forskellige jernfjernelsesmekanismer. Der sigtes mod at undgå homogen jernfjernelse, hvor jern udfældes i vandfasen uden kontakt til filtermedie. Det betyder bl.a. at opstuvning over toppen af filtermediet bør mindskes mest muligt. Overdreven store opstuvning medfører risiko for homogen jernudfældning, der bundfælder på toppen af filtermediet som en kage med kortere gangtider til følge mens begrænset opstuvning fremmer heterogen jernfjernelse.
11. Det accepteres, at det er sværere at fjerne mediecoating dannet ved heterogen eller biologisk jernfjernelse end ved homogen jernfjernelse. Derfor bør behandlingsanlæg designs for at lette en hyppig fjernelse af overskydende medie, især på anlæg, hvor råvandet indeholder meget jern.
12. Ammoniumfjernelse bør tilsigtes på efterfilteret, hvor der værnes om den biologiske vækst. Langt større ammoniumfjerneshastigheder end hvad der er typisk i dag opnås ved at sikre gode vækstbetingelser for mikroorganismer. Disse forhold er højt flow, få returskyl/lange gangtider, højt ammonium, lavt jern og tilstrækkeligt kobber.
13. Returskyl med luft alene påvirker de øverste cm og har begrænset værdi efter det første minut medmindre der findes en sammenkittet filterkage på toppen af filtermediet, der skal brydes op.
14. Ekspansion af filtermediebeddet under returskyl med vand kræver større flow end typisk fundet. Hvis der anvendes to-medie filtre samt returskyl med luft-og-vand samtidigt, skal beddet ekspanderes for at adskille de to medier fra hinanden.
15. Returskyl med luft-og-vand samtidig medfører kaotiske bevægelser af filtermediekorn, hvilket kan medføre at mediet i et to-medie filter bliver blandet under returskyl. Dette skal helst undgås, enten ved at anvende et-medie filtre eller ved at dimensionere filtermedie og skylleflow med vand alene således at der sker en væsentlig bedekspansion.
16. Returskyl med luft-og-vand samtidig medfører de største forskydningskræfter på mediekornene af alle skyllesekvenser og er dermed fordelagtig at inkludere i skylleproceduren, når et forfilter skal renskylles for jern. Der kan overvejes en skylleprocedure, hvor korte sekvenser med vand-og-luft samtidig efterfulgt af vand alene gentages flere gange.
17. Det erkendes, at vandbehandlings nøgletal bør spille en stor rolle i vurdering af design og drift af vandbehandlingsanlæg. Udvalgte nøgletal bør indsamles og gøres tilgængelige i en åben database.
18. Ved anlæg af nye vandværker bør udbudsmaterialet understøtte muligheden for innovation og design af bæredygtige anlæg. Dette kan kræve, at bygherren skal være villig til at påtage sig risici i forbindelse med vandbehandling.

En oversigt over projektets hovedresultater ses i de efterfølgende kapitler.

1.4 Projektformidling

Formidling blev anset som en særlig vigtig aktivitet for dette fyrtårnsprojekt, især fordi den traditionelle tilgang til drikkevandsproduktion, der har været anvendt i 100 år blev udfordret. Formidling blev gennemført ved anvendelse af en række meget forskellige virkemidler, både traditionelle, men også nyskabende.

Formidling har en vigtig rolle i understøttelse af det "praksisfællesskab", der tegner sig indenfor personer, der interesserer sig for drikkevandsbehandling.

2019

- 2019/01/22: **Seminar**. "Vandbehandling", Horsens. Resultater fra AP1 og 2 blev fremlagt. Besøgt af 35 deltagere med stor spørgelyst. Søren Bastholm, Sara Starcke, Ditte Andreasen Søborg, Majbritt Lund, Loren Ramsay.
- 2019/01/31: **Konferencepræsentation**. Danish Water Forum, København. "Performance indicators for the drinking water treatment process." Loren Ramsay & Martin Ramsay
- 2019/02/05: **Seminar**. "Vandbehandling", København. Resultater fra AP1 og 2 blev fremlagt. Besøgt af 20 deltagere med stor spørgelyst. Søren Bastholm, Sara Starcke, Ditte Andreasen Søborg, Majbritt Lund, Loren Ramsay.
- 2019/05/09: **Konferencepræsentation**. European Water Association, Treatment Technologies for Groundwater-based Water Supply, København. "Biofiltration for groundwater-based drinking water: Insights into a mature technology through novel monitoring." Loren Ramsay & Ines Breda.
- 2019/05/10: **PhD afhandling**. Horsens. "Manganese removal in drinking water biofilters – from start-up to matured filters." Ines Breda.
- 2019/07/06: **Projektrapport**, 6. semester. Mikkelsen, A.E., 2019. Investigation and amendment of Børkop Waterworks backwash procedure.
- 2019/06/24: **Konferencepræsentation**. IWA's International Young Water Professionals Conference, Toronto. "Manganese Removal At 10 Full-scale Drinking Water Biofilters." Ines Breda, Ditte Andreasen Søborg, Loren Ramsay & Peter Roslev.
- 2019: **Artikel**. "Manganese removal processes at 10 groundwater fed full-scale drinking water treatment plants. Water Quality Research Journal. Ines Breda, Loren Ramsay, Ditte Andreasen Søborg, R. Dimitrova and Peter Roslev. <https://iwapon-line.com/wqrj/article/54/4/326/67977/Manganese-removal-processes-at-10-groundwater-fed>
- 2019/11/04: **Konference poster**. Water Quality Technology Conference (AWWA), Dallas. "Benchmarking the Water Treatment Process." Loren Ramsay, Martin Ramsay.
- 2019/11/04: **Konferencepræsentation**. Amsterdam International Water Week, Amsterdam. "Non-compliance Issues in European Drinking Water: Extent, Causes & Solutions." Ditte Andreasen Søborg, Loren Ramsay, Anna Bondo Medhus, Lærke Thorling.
- 2019/11/12: **Konferencepræsentation**. Dansk Vand Konference 2019, Aarhus. "Kobling af stoffjernelse med mikrobielle samfund gennem dybden af sandfiltre." Ditte Andreasen Søborg, Ines Breda & Peter Roslev.
- 2019/11/12: **Konferencepræsentation**. Dansk Vand Konference 2019, Aarhus. "Merkur – Det første skridt mod evidensbaseret vandbehandling." Loren Ramsay.

2020

- 2020/02/10: **Konference poster**. International Symposium: Potable Reuse and Biological Treatment, Atlanta, GA, USA. "Removal of Fe, NH₄⁺, and Mn coupled with microbial communities through depth of 10 Danish full-scale drinking water sand filters." Ditte Andreasen Søborg, Ines Breda, Peter Roslev.
- 2020/02/10: **Konferencepræsentation**. International Symposium: Potable Reuse and Biological Treatment, Atlanta, GA, USA. "Revisiting two-stage biofiltration for drinking water production." Loren Ramsay, Majbritt Lund, Rasmus Bærentzen, Claus Paludan Hynkemejer, Søren Bastholm Olesen.

- 2020/02/10: **Konference poster**. International Symposium: Potable Reuse and Biological Treatment, Atlanta, GA, USA. "Common misunderstandings in biofiltration." Loren Ramsay, Ines Breda, Ditte Andreasen Søborg.

2021

- 2021/02: **Artikel**. "Grain Displacement during Backwash of Drinking Water Filters." Loren Ramsay, Feng Du, Majbritt Lund, Haiyan He, and Ditte Andreasen Søborg. Water Supply, Vol 21, Issue 1, pp 356-367. <https://iwaponline.com/ws/article/21/1/356/78074/Grain-displacement-during-backwash-of-drinking>
- 2020: **Artikel**. "Methane emission and methanotrophic activity in groundwater-fed drinking water treatment plants." Edmundas Maksimavicius og Peter Roslev. Water Supply, Vol 20.3, pp 819-827. <https://iwaponline.com/ws/article/20/3/819/71938/Methane-emission-and-methanotrophic-activity-in>

2022

- 2022/05/01: **Artikel**. Returskyl – Vandbehandlingens Problembarn. *Vand & Jord*, 27. årgang nr. 2. <http://vand-og-jord.dk/returskyl-vandbehandlingens-problembarn/>
- 2022/05/04: **MerkurForum**. Konference om vandbehandling med udgangspunkt i den nye, web-baserede dataplatform. VIA University College, Horsens.
- 2022/09/11-15: **Konferencepræsentation**. What Can Benchmarking (Metrics) Teach Us About The Biofiltration Treatment Process? Loren Ramsay. IWA World Water Congress & Exhibition.
- 2022/09/11-15: **Stand på udstilling** Re-designing drinking water treatment. Searching for the most efficient & sustainable method for treating drinking water. IWA World Water Congress & Exhibition.
- 2022/09/01: **Artikel**. Vil du vide mere om din vandbehandling? Loren Ramsay & Henriette Buch Lauersen. *Vandposten*, 84.

Kommende i 2023

- 2023: **Artikel**. "Microbial diversity is related to compound removal through depth of 10 groundwater fed full-scale drinking water biofilters in Denmark." Ditte Andreasen Søborg, Ines Breda, and Peter Roslev. In preparation.
- 2023: **Artikel**. Data om drikkevandsbehandling. *Vand og Jord*. Loren Ramsay & Henrik Bjørn.

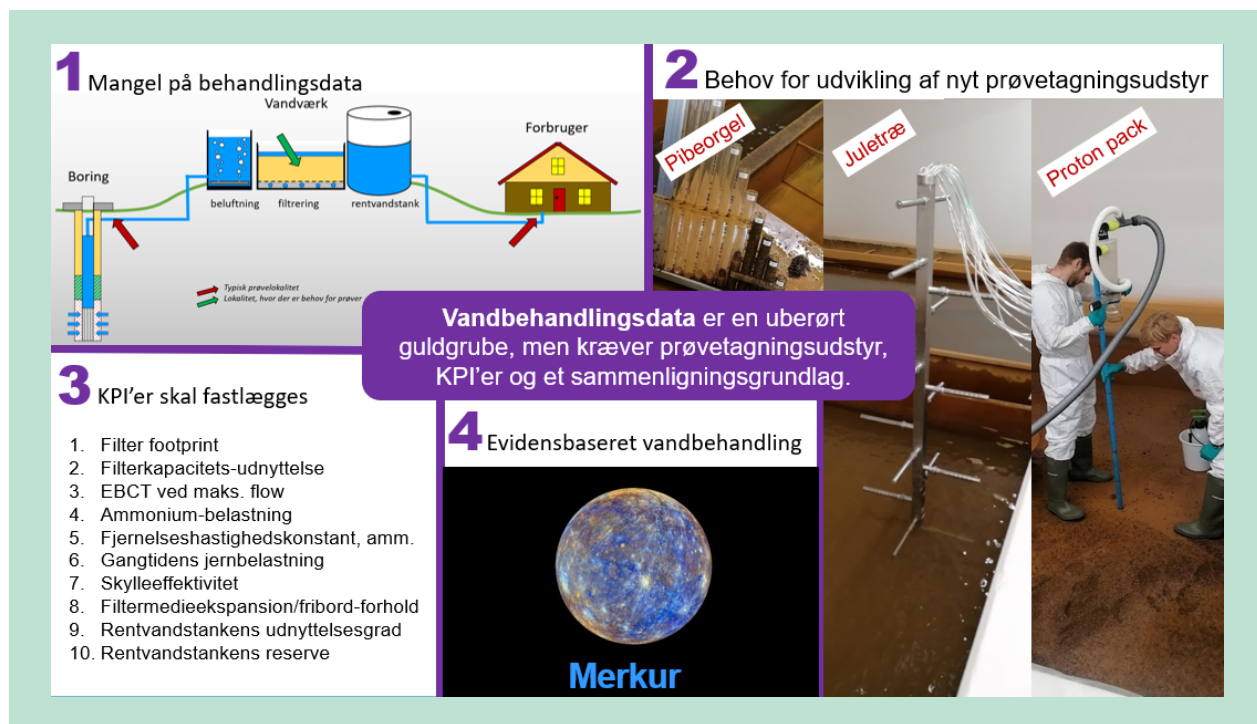
Undervisning:

- **VIA University College kurser**: Vandforsyning (1. semester), Kemi og Mikrobiologi (3. semester), Process Engineering (3. semester).
- **DANVA kurser**: Vandkvalitet (2 dage); Vandbehandling - design og optimering (2 dage).
- **World Water Camp** (6 dage fysisk i forbindelse med IWA World Water Congress & Exhibition i Bella Center i København i september 2022 samt 3 virtuelle dobbeltlektioner via Zoom)

2. Vandbehandlingsdata

Flere oplysninger om dette emne fås i følgende delrapporter:

- Rapport 1: Indsamling af vandbehandlingsdata
- Rapport 2: Merkur: Web-baseret platform til vandbehandlingsdata



FIGUR 4. Udvalgte perspektiver fra Re-design projektet vedrørende vandbehandlingsdata.

2.1 Mangel på vandbehandlingsdata

Jupiter er en enestående offentlig tilgængelig, national boringsdatabase, der er drevet af GEUS. Den er landsdækkende og indeholder data om grundvand, drikkevand, råstoffer miljø og geoteknisk, herunder resultater fra grundvandskemiske og drikkevandskemiske prøver (udtaget ved boringer og ved forbrugerens taphane). Til gengæld indeholder databasen ikke resultater fra prøver udtaget i forbindelse med vandbehandlingsprocessen. Det skyldes, at der ikke er lovmæssige krav om dette.

2.2 Behov for udvikling af nyt prøvetagningsudstyr

Da der ikke er lovmæssige krav om udtagning af prøver i forbindelse med vandbehandlingsprocessen, er der heller ikke nogen angivelse af hvilket udstyr skal anvendes til at udtage prøverne. I projektet er der behov for udvikling af udstyr og prøvetagningsmetoder, særligt på følgende områder: 1) pibeorgel til fastlæggelse af filter bedets ekspansion under returskyl med vand, 2) juletræ til udtagning af niveaubestemte vandprøver ned igennem filtermediet, 3) proton pack til udtagning af filtermedie prøver ned igennem filtermediet samt 4) teleskoparm til udtagning af tidsserie for vandprøver fra skyllerenden under returskyl.

2.3 Fastlæggelse af KPI'er

Selv om der er mange benchmarkingsprogrammer både nationalt og internationalt, blev der ikke fundet nogen liste over key performance indicators (KPI'er) for forsyninger, der anvender grundvand og som bør måles i forbindelse med drift af biofiltre. Re-design projektet har derfor

udvalgt en række KPI'er, der sammenlignes mellem forskellige forsyninger. Enkelte, som f.eks. maksimums flowhastighed, er velkendte mens andre, som f.eks. skylleeffektiviteten, er nye. For hver KPI er beregningsmetoden og enheder defineret.

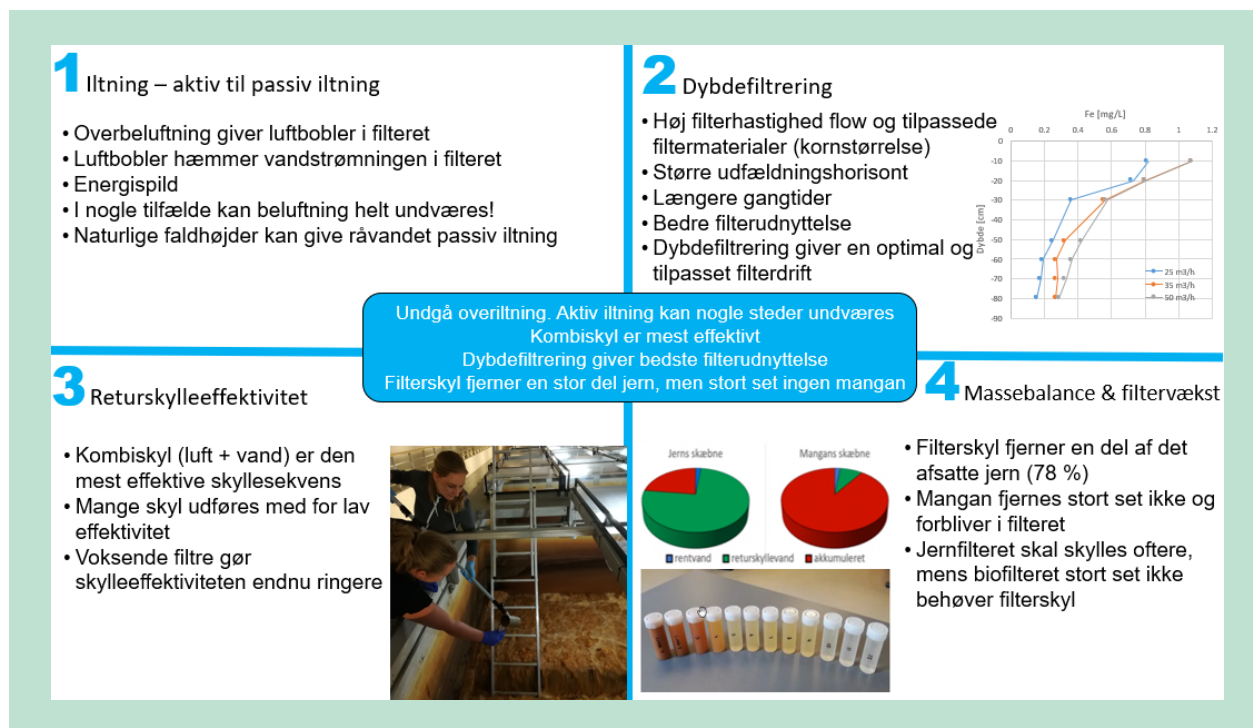
2.4 Evidensbaseret vandbehandling

Merkur er navnet på en database til lagring, systematisering og visualisering af vandbehandlingsdata, der blev udviklet i forbindelse med Re-design projektet. Oprindeligt, blev resultater fra de 10 vandværker i Re-design projektet inkluderet i databasen. Allerede før projektet var afsluttet, blev yderligere vandværker inddraget. Ved hjælp af visualiseringer i Merkur er det muligt at understøtte beslutning om design og driftsbeslutninger af biofiltre på evidens frem for erfaring alene.

3. Iltning og jernfjernelse

Flere oplysninger om disse emner fås i følgende delrapporter:

- Rapport 4: Jernfjernelsesdybde i biofilteret
- Rapport 6: Jernfjernelse i returskyl
- Rapport 7: Filtermediers gangtid



FIGUR 5. Udvalgte perspektiver fra Re-design projektet vedrørende iltning og jernfjernelse.

3.1 Aktiv til passiv iltning

Det er kendt, at luft kan afgasse fra vandet og fanges i filtermediet, hvis der er tale om overbeluftning. I dag anvender mange anlæg tallerkenbeluftning, hvor luften blæses ind gennem små huller på en tallerken i flere meters dybde, hvilket kan medføre overmætning. Luftansamlinger blokerer for vandets strømning, hvilket medfører højere reelle filterhastigheder og kortere opholdstid for vandet i filteret. Som vist i Re-design projektet kan aktiv beluftning i nogle tilfælde helt undværes, da den passive sekundær beluftning, der sker når vandet falder på et filters preplade eller ned i skyllevandsrenen er tilstrækkelig til at dække råvandets iltbehov.

3.2 Dybdefiltrering

Mange vandværker i Danmark anvender en relativ lav filterhastighed ($< 3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{t})$), hvilket kan give anledning til den såkaldt filterkageeffekt, hvor de øverste 10 cm af filtermediet tilklogges hurtig og forårsager behov for hyppig returskylning. For at modvirke denne tendens, kan der sigtes efter dybdefiltrering. Her, anvendes en høj filterhastighed og evt. større kornstørrelse. Dybdefiltrering giver længere gangtider og hermed bedre filterudnyttelse. I dette projekt har jernindholdet i vandprøver udtaget i 10 cm dybdeintervaller givet et indblik i dybdefiltreringen. Det skal nævnes, at udfældningshastigheden for jern afhænger bl.a. af vandets pH, hvormed filterhastighed ikke er den eneste vigtige parameter, der har betydning for dybdefiltrering.

3.3 Returskylleeffektivitet

Hovedformålet med returskylning er at fjerne okker og overskydende biofilm for at reetablere et filters permeabilitet og undgå at filtermediet vokser over årene. Resultater fra Re-design projektet peger på, at kombiskyl (skylning med luft og vand samtidig) er det mest effektive returskylletrin. Skylning med luft alene medfører ikke, at mediekorn skurer mod hinanden med undtagelsen af de øverste få cm. Desuden medfører skylning med vand alene oftest kun at porevandet udskiftes og ikke kornbevægelse. Derfor bør der fokuseres på kombiskyl, hvis der er behov for forbedring af returskylleeffektiviteten.

3.4 Massebalance og filtervækst

Ikke alt afsatte materiale fjernes under et returskyl. Målinger i Re-design projektet viste at 78% af det jern, der afsættes under en gangtid bliver fjernet igen ved det efterfølgende returskyl. Desuden viste målinger at det afsatte mangan fjernes stort set ikke ved et returskyl og forbliver i filtret. Selv om meget jern fjernes, er det typisk jern, der er hovedårsagen til filtervækst, da jern typisk findes i større koncentrationer end mangan i grundvand.

4. Filterbeholderdesign

Flere oplysninger om dette emne findes i følgende delrapporter:

- Rapport 10 Demonstrationsanlæg ved Østerbyværket
- Rapport 11 Demonstrationsanlæg ved Lundeværket



FIGUR 6. Udvalgte perspektiver fra Re-design projektet vedrørende filterbeholderdesign.

4.1 Filtreringsprincip

Filtreringsprincippet i Danmark er stort set altid baseret på "rapid filtration" med flowretningen "oppefra og ned". Filtrering sker i batch, hvor driften indstilles efter oftest få dage til returskyl, hvorefter driften tages op igen. Der bruges både gravitationsfiltre og trykfiltre. I udlandet, findes flere alternative principper, herunder kontinuerlig filtrering som DynaSand (hvor lidt af sandet skylles kontinuerlig), horisontale filtre (hvor flere kamre samles i én aflang filter) og stablede filtre (hvor flere filterbunde, tilløb og udløb findes stablet oven på hinanden i samme filter). Disse og andre filtreringsprincipper blev overvejet, men ikke udvalgt til videre undersøgelse i Re-design projektet.

4.2 Filterbund

De mest anvendte filterbunde i Danmark er bjælkebunde til gravitationsfiltre og dyssebunde til trykfiltre. Andre bundtyper inkluderer hulplader, slidsede eller V-wire bunde, samt udstandsede metal eller plastik profiler. I Re-design projektet blev nye bundtyper udviklet og afprøvet i forbindelse med fuldskalademonstrationerne ved Østerbyværket og Lundeværket.

4.3 Bærelag og filtermedie

I Danmark er kvartssand langt det mest udbredte filtermedie. I to-medie filtre anvendes anthracit som det ene lag. Herudover har knust kalk, manganoxidgranulat, jernoxidgranulat, samt ekspanderet ler vundet et vist indpas. I udlandet bruges ofte aktivt kul til biofiltre. Der er mange

krav til et filtermedie, der skal bruges til biofiltre. Disse inkluderer at det er let for mikroorganismer at binde sig, mediet er slidstærkt, samt at mediet har en bestemt densitet (højt til bærelag, lavt til filtermedie). I Re-design projektet er glaskugler afprøvet som bærelag og ekspanderet ler som filtermedie i fuldskalademonstrationen ved Østerbyværket. Slidtests viste, at ekspanderet ler er mindre slidstærkt end f.eks. anthracit. Der blev dog ikke gennemført langtidsforsøg i fuldskala for at afgøre, om dette medfører behov for hyppig påfyldning i filtre med kraftigt skyl.

4.4 Fluidisering og medieflugt

Under returskyl er der risiko for at filtermedie skylles med ud med skyllevandet. Med mindre der er tale om en særlig lavdensitets filtermedie, er risikoen størst ved trinnet med luft og vand samtidig. Der er flere måder, at imødegå denne risiko på. Den ene metode er at stoppe skylletrinnet inden vandet når op til skyllevandsrenden. En anden metode er at designe filtret med et fribord større end f.eks. 60 cm for at minimere risikoen for at mediekorn bæres af luftbobler helt op til renden. En tredje metode er at designe en anordning ved skyllevandsrenden, der fremmer at bobler bristes ved vandets overflade et stykke fra renden således at evt. mediekorn når at drysse ned igen. I Re-design projektet er der udviklet en anordning, som blev afprøvet i fuldskalademonstrationen ved Østerbyværket. Begrænset mediebevægelse under returskyl har dog betydet, at virkningen af anordningen ikke blev ordentlig belyst.

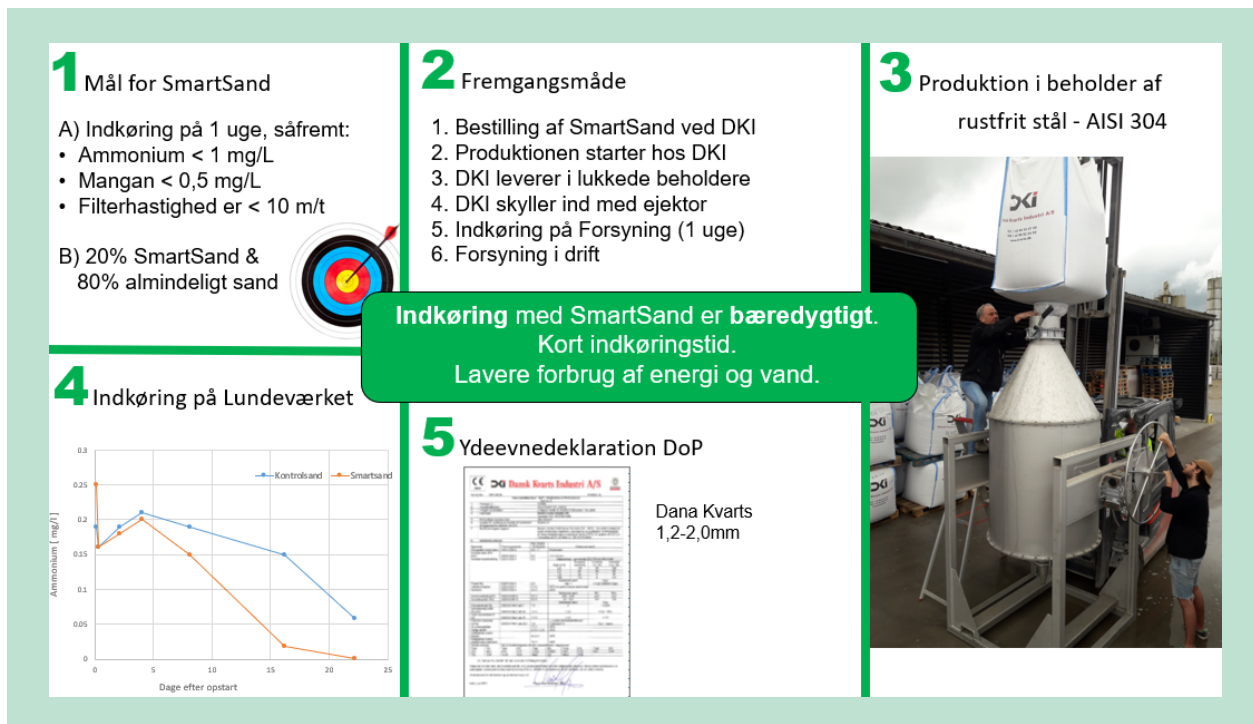
4.5 Monitering og fuldskala

Monitering af niveaubestemte vand- og medieprøver har vist sig at have stor værdi for forståelse af vandbehandling. Derfor blev filterbeholderne til fuldskalademonstrationerne ved Østerbyværket og Lundeværket bygget med porte til udtagning af disse prøver med 10 cm intervaller. Anvendelse af disse porte til prøvetagning afslørede en række udfordringer. Til vandprøver, var der behov for anvendelse af trykluft, da portene blev tilklogget af filtermedie. Desuden var det afgørende, at hanerne blev motioneret flere gange inden udtagning af prøverne for at opnå repræsentative prøver ved at fjerne udfældningspartikler (okker) ved porten. Til medieprøver var udvikling af et egnet prøvetagningsspyd vigtigt. Desuden var det vigtigt at dræne filtret inden prøveudtagning, hvormed størrelsen af filtrets bundventil er vigtig.

5. Indkøring

Flere oplysninger om disse emner fås i følgende delrapporter:

- Rapport 8 Udvikling og produktion af SmartSand
- Rapport 10 Demonstrationsanlæg ved Østerbyværket
- Rapport 11 Demonstrationsanlæg ved Lundeværket



FIGUR 7. Udvalgte perspektiver fra Re-design projektet vedrørende indkøring med SmartSand.

5.1 Mål for SmartSand

Indkøring af nyt filtermedium er en tidskrævende proces, ofte på 6-8 uger. I nogle tilfælde, tager indkøring endnu længere, og denne usikkerhed bliver ofte kapitaliseret i form af ekstra udgifter til bygherren. SmartSand er navnet på et "plug and play" filtermedium udviklet af Dansk Kvartsindustri (DKI), hvor indkøringen overfor jern, ammonium og mangan sker inden ilægning i filterbeholderen. Hermed har SmartSand både en uorganisk coating og en biofilm. For at minimere omkostninger, blandes SmartSand med nyt filtermedium under ilægning. Der er en naturlig balance mellem andel SmartSand i den færdige blanding og længden af indkøringsperioden. I dette projekt blev der sigtet mod en indkøringsperiode på ca. 1 uge.

5.2 Fremgangsmåde

Når bestillingen af nyt filtermedium er afgivet, går produktion i gang. På det aftalte tidspunkt leveres SmartSand i en lukket beholder. SmartSand og nyt filtermedium skylles ind i filtret ved hjælp af en ejektor. Resultater fra fuldskala demonstration ved Lundeværket har vist, at SmartSand er robust og at transport og indskyling kan foregå uden at SmartSand mister sin renseseffekt.

5.3 Produktion

DKI har udviklet en speciel lukket beholder af rustfrit stål til produktion af SmartSand. I Re-design projektet er nyt varmebehandlet sand podet med skyllevand fra en forsyning. Indkøringen foregik på DKIs grund ved at recirkulere vandet i beholderen. På denne måde er metoden mere bæredygtig end almindelig indkøring, da der spares på vand. Der blev doseret næringsstoffer til vandet løbende for at minimere produktionstiden og processen blev overvåget løbende ved målinger.

5.4 Indkøring

Fuldskalademonstration ved Lundeværket har vist, at SmartSand er effektivt ved fuldskalafor-søg og at indkøringen er kortere ved en blanding af SmartSand og nyt kvartssand end ved brug af en traditionel indkøring.

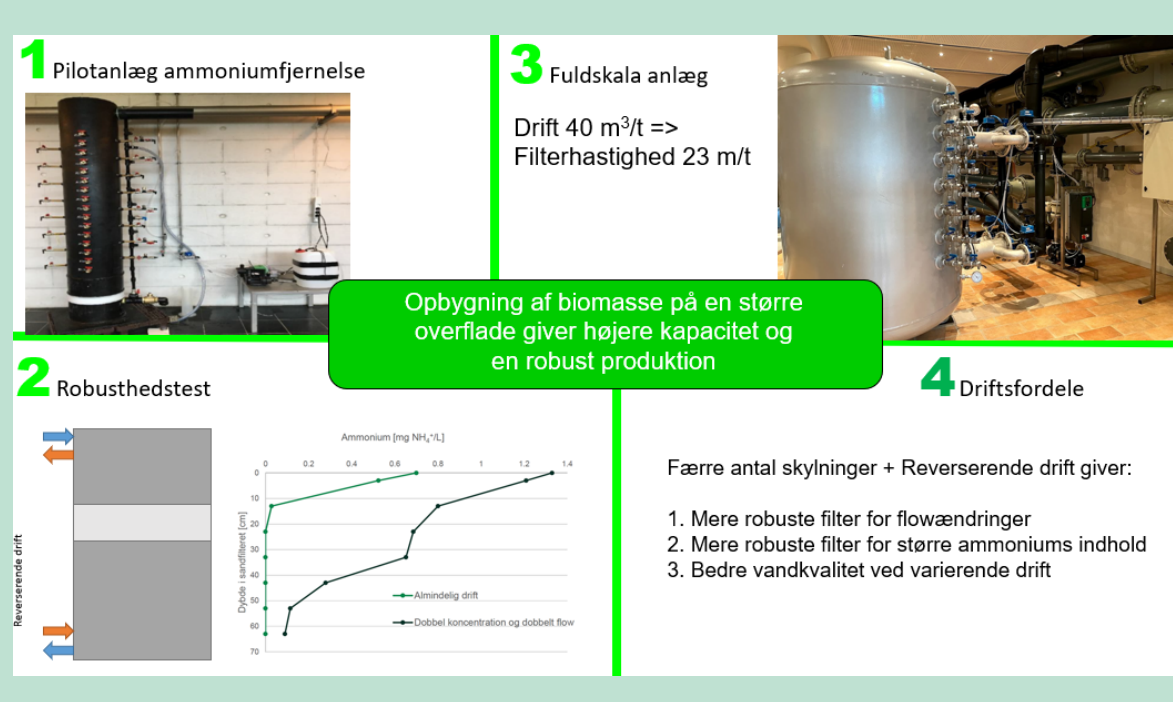
5.5 Ydeevnedeklaration

En fordel ved indkøring inden ilægning er, at renseevnen kendes inden ilægning. Desuden kan den bakteriologiske kvalitet dokumenteres ved målinger. En deklaration vil derfor medfølge hver leverance af SmartSand.

6. Ammoniumfjernelse

Flere oplysninger om disse emner fås i følgende delrapporter:

- Rapport 5: Biostimulering med ammonium
- Rapport 11 Demonstrationsanlæg ved Lundeværket



FIGUR 8. Udvalgte perspektiver fra Re-design projektet vedrørende ammoniumfjernelse.

6.1 Pilotanlæg

Et pilotanlæg med et 125 cm lag af sand (0,8-1,4 mm) blev udstyret med mulighed for udtagning af niveaubestemte vandprøver med 10 cm intervaller. Ved en råvandssammensætning uden jernindhold samt et ammoniumindhold på 0,5 mg/L blev kolonnen indkørt på 18 dage og efter en måned blev alt ammonium omsat i det øverste 13 cm.

6.2 Robusthedstest

Da kolonnens indløbskoncentration af ammonium eller flowhastighed blev sat op, blev det konstateret at ammoniumkoncentrationen stort set ikke faldt, efter ammoniummet kom under de aktive 13 cm sand. Det viser, at der ikke er aktive ammonium-oxiderende bakterier i de dybere sandlag. Anlægget blev opbygget så indløbet kunne alterneres mellem toppen og bunden af kolonne og anlægget blev driftet uden hyppigt returskyl for at give bakterierne tid til uforstyrret vækst. Under disse forhold, kunne kolonnen godt fjerne alt ammonium selv ved højere indløbskoncentration eller ved højere flowhastighed - og kunne næsten fjerne alt ammonium ved forøgelse af begge parametre samtidig. Hermed var pilotanlæggets fjernelseskapacitet op mod 10 gange så høj som normal.

6.3 Fuldskala anlæg

Ved demonstrationsanlægget i fuldskala ved Lunde blev et nyt efterfilter drevet med alternerende flowretning, lange gangtider og en høj filterhastighed på 23 m/t. Flere resultater fra demonstrationsanlægget ses i Rapport 11.

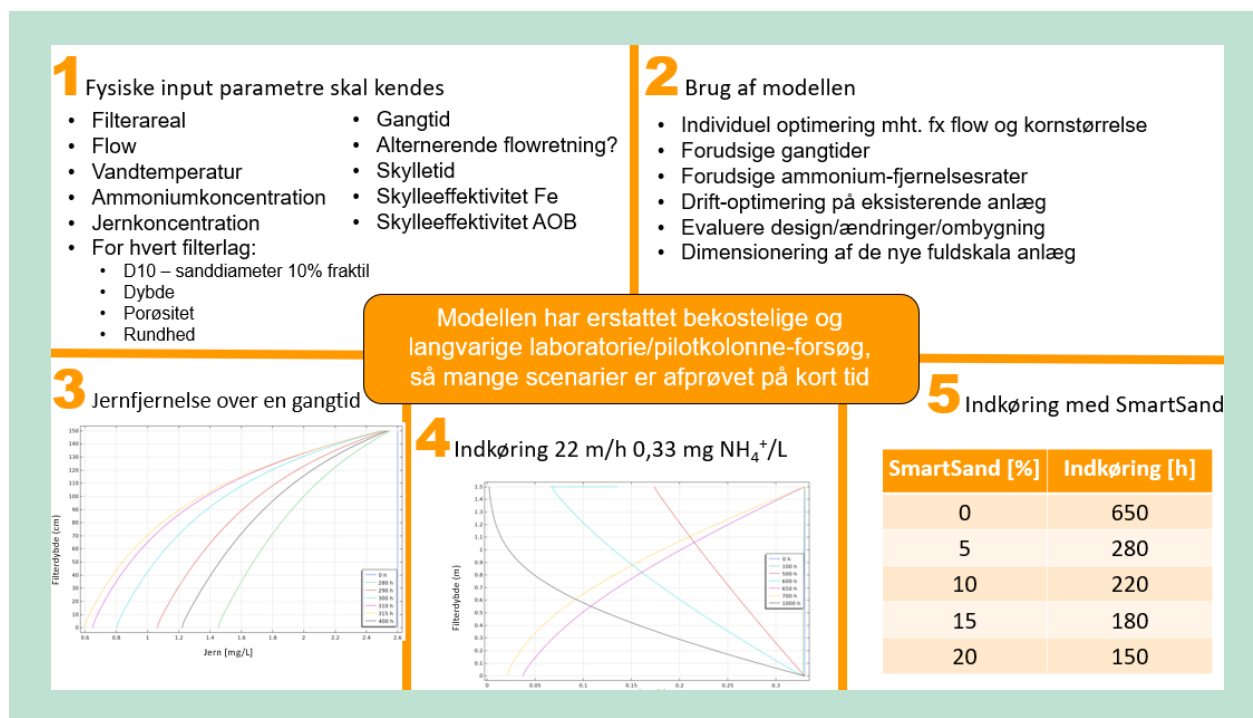
6.4 Driftsfordele

Ved den nye design og drift af vandbehandlingsanlægget ved Lundeværket kunne der konstateres store fordele. Det viste sig muligt at opbygge en overkapacitet af biomasse, som betyder, at pludselige ændringer i råvandets ammoniumkoncentration eller ændringer i produktionsflowet op til 100% ikke resulterer i gennembrud af ammonium. Vandbehandlingsresultaterne er så overbevisende, at en procesarkitektur med separat jern og ammoniumfjernelse (dobbeltfiltrering), lange gangtider på efterfiltret samt biostimulering på efterfiltret ved alternerende flowretning er anbefalelsesværdige.

7. Modellering

Flere oplysninger om disse emner fås i følgende delrapport:

- Rapport 9 Vandbehandlingsmodel



FIGUR 9. Udvalgte perspektiver fra Re-design projektet vedrørende modellering.

7.1 Fysiske input parametre

Firmaet Virtuel Water Technology har udviklet en virtuel prototype i programmet COMSOL for at understøtte design af fuldskalademonstrationsanlæggene ved hhv. Østerbyværket og Lundeværket. Programmet regner på fjernelse af jern (første-ordens kinetik) og ammonium (Monod kinetik) på baggrund af en række ligninger (herunder Darcys ligning). Samtidig beregner modellen ændringer i ammonium oxiderende bakterier i biofilmen (vækst samt fjernelse via returskyl), ændringer i porøsitet over tid (som følge af udfældning af jernoxid og fjernelse af samme via returskyl) samt filtermodstand som funktion af tid (og dermed gangtider). I modelberegningerne indgår over 25 parametre, hvor nogle er målt direkte i demonstrationsanlæggene, nogle er kalibreret ud fra udførte forsøg og nogle er baseret på litteraturværdier. Værdier for alle disse parametre skal kendes før der kan udføres kørsler med modellen.

7.2 Brug af modellen

Modellen bruges til at undersøge forskellige scenarier i stedet for f.eks. at skulle udføre fysiske forsøg i pilotskala. Det medfører en stor fleksibilitet, hvor mange scenarier kan testes på kort tid. Modellen er blevet anvendt til at evaluere design og drifts ændringer samt at dimensionere de nye fuldskalademonstrationsanlæg.

7.3 Jernfjernelse over en gangtid

Modelkørsler af flere scenarier for jernfjernelse på forfæltret ved det nye demonstrationsanlæg ved Østerbyværket blev kørt. Resultaterne viste, at en acceptabel jernkoncentration på ca. 0,2

mg/L slipper igennem forfiltret til efterfiltret ved et flow på 30 m³/h (svarende til en flowhastighed på knap 10 m/t) mens 0,6-1,4 mg/L jern slipper igennem, hvis der anvendes et flow på 80 m³/h (25 m/t).

7.4 Indkøring

Indkøring af ammonium på demonstrationsanlægget ved Lundeværket uden brug af SmartSand er undersøgt ved en modelkørsel. Her blev der set en indkøringsperiode på ca. 650 timer (ca. en måned) for udløbskoncentrationen kommer under 0,05 mg/L ammonium. Denne størrelsesorden bekræftes af mange fuldskalaerfaringer, men er væsentlig længere end der kunne ønskes sig.

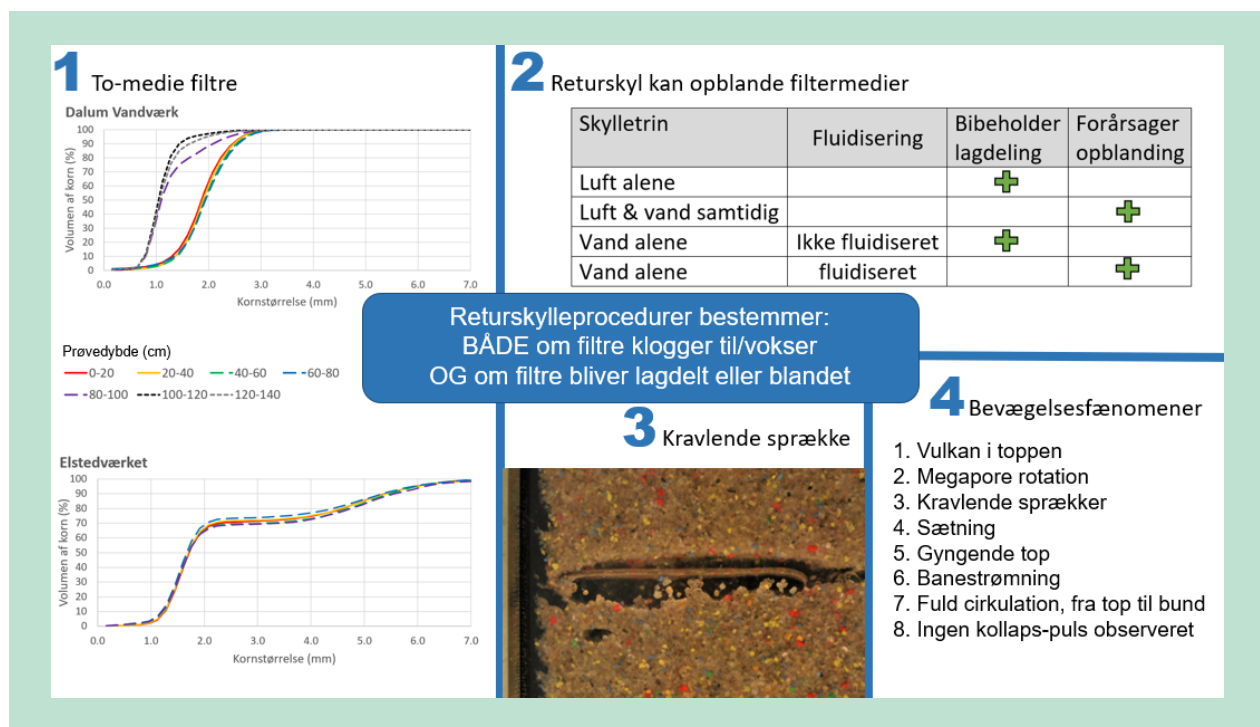
7.5 Indkøring med SmartSand

Indkøring af ammonium på demonstrationsanlægget ved Lundeværket med brug af forskellige forhold mellem SmartSand og nyt (ikke-indkørt) filtermedie blev også undersøgt ved en modelkørsel. Her kunne man bl.a. se, at ved brug af 20% SmartSand var indkøringen forkortet til ca. 150 timer (knap en uge). Da en indkøringsperiode på ca. en uge blev i projektet anset som acceptabel, kunne beregningerne danne et udgangspunkt for indkøring af fuldskalademonstrationsanlægget ved Lundeværket.

8. Returskylleprocedurer

Flere oplysninger om disse emner fås i følgende delrapport:

- Rapport 3: Flytning af filtermediekorn under returskyl



FIGUR 10. Udvalgte perspektiver fra Re-design projektet vedrørende returskylleprocedurer.

8.1 To-medie filtre

Mange danske drikkevandsfiltre består af to filtermedier: anthracit (med større diameter korn) i toppen og sand (med mindre diameter korn) i bunden. Hovedformålet med denne opstilling er at forlænge filtrets gangtid ved at undgå at stofafsætning i de øverste lag tilklogger filtret. Da anthracit er væsentlig lettere (partikeldensitet ca. 1,4 kg/L) end sand (partikeldensitet ca. 2,6 kg/L), vil den teoretisk set (så længe forskellen i kornstørrelsen ikke er for stor) kunne løftes til toppen af filtret under det sidste returskylletrin med vand alene, hvormed de to medielag altid holdes adskilt. Den øverste graf over kornstørrelsesfordeling i medieprøver fra forskellige dybder i filtret viser denne situation, hvor de to lag med hver deres kornstørrelse ses tydeligt. Men denne situation var undtagelsen. Oftest viste medieprøver fra forskellige dybder ingen forskel i kornstørrelse (se nederste graf). Her ses samme blanding af større anthracit og mindre sand i alle dybder. Dette er stik imod hensigten med et to-medie filtre og kan forårsage gangtider, der er endnu kortere end for et et-medie filtre.

8.2 Opblanding af filtermedier

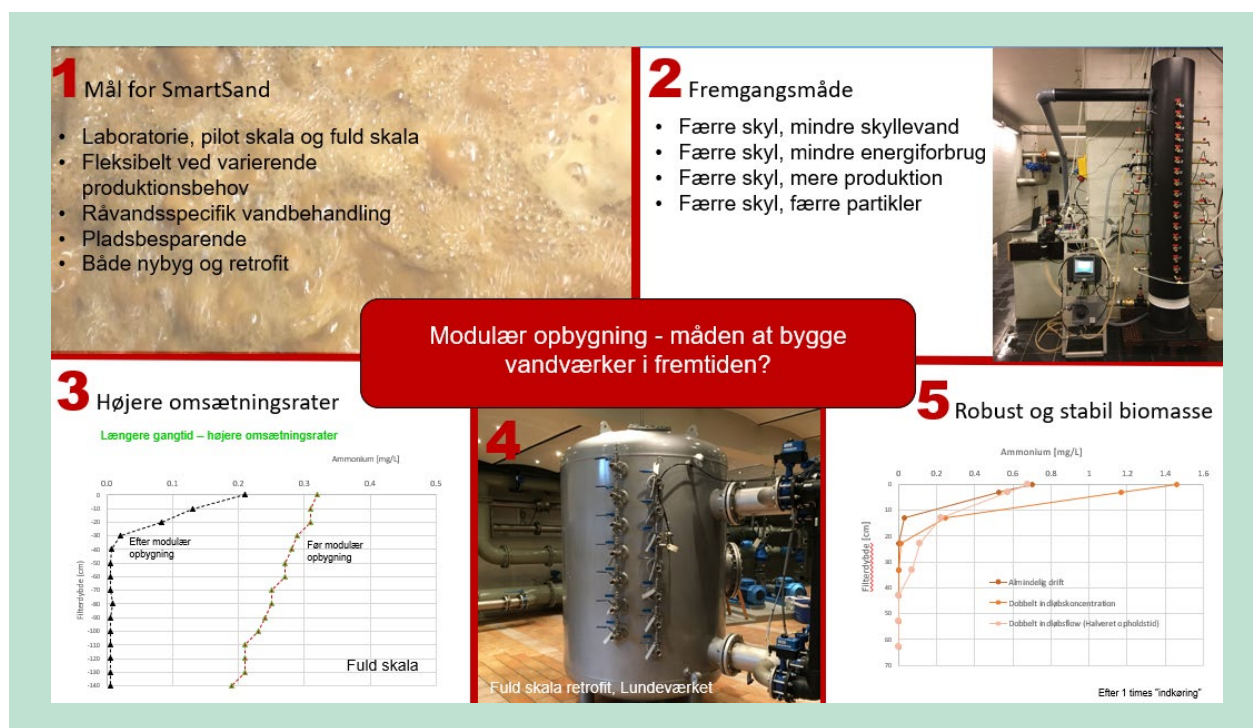
Når man skyller et filter, kan filtermedie bliver blandet rundt og flyttet væk fra dets oprindelige dybde. Det kan forringe funktionen af filtret da du ikke længere har det rigtige medie og de rigtige bakterier i den dybde, der er brug for. Forskellige trin i et returskyl har forskellig indflydelse

på denne medieflytning. Undersøgelser viser, at det er den såkaldte "lille skyl" (samtidig skyl med vand og luft) der primært forårsager den uønskede opblanding i filtret. Samtidig er det det trin, der renser mediekornene bedst.

8.3 Bevægelsesfænomener

Observationer har vist at bevægelsen af mediekornene under et returskyl er ret kaotisk. Ved direkte observation gennem en plexiglas vindue i et pilotfilter er der observeret 7 forskellige bevægelsesfænomener. Disse fænomener varierer meget i betydning. Nogle bevægelser har kun indflydelse i mindre områder (som megapore rotation), hvor få korn bevæger sig rundt i et porerum, der er mindre end 1 cm. Andre bevægelser (som banestrømning) skyldes inhomogeniteter i strømningshastigheden og medfører flytning af større mængder korn over store afstande i en banebredde på 5-10 cm.

9. Behandlingsarkitektur



FIGUR 11. Udvalgte perspektiver fra Re-design projektet vedrørende behandlingsarkitektur.

9.1 Mål for SmartSand

For at blive implementeret i fuldskala, er der behov for at en tilstrækkelig mængde SmartSand kan produceres uden alt for stort et produktionsanlæg. I projektet er det lykkedes at producere tilstrækkelig SmartSand til at kickstarte det fuldskala demonstrationsfilter ved Lundeværket. Desuden har forsøg vist, at nitrificerende bakterier på sand kan overleve i en periode på uger efter produktionen. Hermed kan flere batches SmartSand evt. produceres af samme udstyr, hvilket giver en mere fleksibel produktion. SmartSand kan anvendes både til opstart af nye filtre samt ved udskiftning af filtermedie i eksisterende filtre.

9.2 Fremgangsmåde

Ved at anvende en modulær opbygning og et højt flow på forfilteret kan man opnå dybdefiltrering af jernholdigt råvand. Dybdefiltrering betyder, at et større volumen råvand behandles inden der er behov for at filteret returskylles. Færre skyl fører til besparelser i skyllevand og energiforbrug – og det høje flow betyder at filterets areal kan mindskes og skyllevandspumpen kan være mindre. Færres driftsstop til skyl betyder også at der er mere tid til produktion af drikkevand. Endelig betyder færre skyl, at der er færre perioder lige efter et skyl, hvor antallet af partikler og dermed turbiditeten i det behandlede vand er højere end resten af gangtiden. Ved en modulær opbygning har disse partikler også mulighed for at blive opfanget på efterfilteret.

9.3 Højere omsætningsrater

Der er et stort potentiale for at opnå højere rater for ammoniumomsætning, end de rater, der typisk ses i fuldskala. Det er i høj grad behandlingsarkitekturen, der medfører dette potentiale. Undersøgelser har vist, at højere omsætningsrate kan fås ved 3 forskellige tiltag: 1) Ved brug af dobbeltfiltrering, hvor forfilteret er skræddersyet til at fjerne jern men ikke ammonium, får de

nitrificerende bakterier på efterfiltret bedre levevilkår. 2) Returskyllehyppigheden for efterfiltret er meget mindre når jern fjernes på forfiltret – og denne længere gangtid muliggør opbygning af en større biomasse. 3) Ved at skifte vandets indløb til efterfiltret dagligt mellem filtertop og filterbund, opbygges biomasse både i top og bund af filtret.

9.4 Robust og stabil biomasse

Projektet har vist at højere omsætningsrater er muligt samt at biomasse i filterbunden kan øges ved at veksle flowretning (oppefra-ned og nedefra/op). Det betyder, at filtret er robust overfor stigning både i indløbets ammoniumindhold og i filterhastighed. Denne robusthed overfor driftsvariationer er meget vigtig for forsyninger.

Sammenfatning

I Danmark er drikkevandsproduktion baseret på grundvand, der behandles ved en enkel proces, der består af iltning af vandet efterfulgt af en biofiltrering med gravitations- eller trykfiltre. Herved fjernes eller omdannes jern, ammonium og mangan. Design og drift af biofiltrering, som er hjertet i vandbehandlingen, har ikke ændret sig væsentligt i mere end 100 år. Fremskridt i prøvetagning og måleteknikker i forbindelse med biofiltrering har imidlertid medført ny viden og mulighed for at undersøge, forstå og manipulere de kemiske, mikrobiologiske, fysiske og procesteknologiske elementer i drikkevandsbehandling. Vandkvaliteten er under pres, og der er en erkendelse af, at mange af de nuværende overskridelser af vandkvalitetskrav på landsplan kunne undgås ved en bedre vandbehandling.

Projektets formål er at re-designe vandbehandling fra bunden ved radikal nytænkning af drikkevandsproduktionen, hvormed der kan ske en optimering af nye og eksisterende vandværker, herunder reduktion af vandspildet ved returskyl, forkortelse af indkøringen af nye filtre samt større bæredygtighed i drikkevandsproduktion. Projektet har resulteret i formulering af 18 "redesign-principper", der handler om design og drift af drikkevandsbehandling. Principperne blev testet ved fuldskala demonstration af ny filterbeholderdesign samt ny indkøringsprocedure med SmartSand. Endvidere blev principperne udviklet på basis af ny viden om jern- og ammoniumfjernelse samt returskylleprocessen. Projektet har desuden påbegyndt udvikling af den åbne dataplatform "Merkur" til vandbehandlingsdata samt en matematisk model til at belyse virkningen af forskellige filterkonstruktioner.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk