



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Demonstrationsanlæg ved Lundeværket

Rapport 11 i projektet ”Smart Re-design of Drinking Water Production”

MUDP Rapport

September 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Claus Paludan Hynkemejer

Søren Bastholm Olesen

Loren Ramsay

Ulla Brinkmann Trettenes

Fotos:

Claus Paludan Hynkemejer

ISBN: 978-87-7038-550-3

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
Sammenfatning	8
1. Introduktion	10
1.1 Hovedleverancer	10
1.2 Design- og anlægsaktiviteter	10
1.3 Indkørings- og driftsaktiviteter	10
2. Beskrivelse af filterdesign	11
2.1 Erfaringer fra filterprojektets tidligere faser til design af fuldskaalanlæg	11
3. Design af demoanlæg	12
3.1 Beskrivelse af opstillingen på Lundeværket	12
3.1.1 Forfilter 1	12
3.1.2 Placering af det nye efterfilter på Lundeværket	12
3.1.3 Diameter af nyt efterfilter	12
3.1.4 Filtermedie, forfilter	12
3.1.5 Bed højde	12
3.1.6 Fribord	13
3.1.7 Flow	13
3.1.8 Styring af vandet til efterfilteret	13
3.1.9 Skylleluft	13
3.1.10 Skyllevand	13
3.1.11 Andre designkriterier til filter-design	13
3.1.12 Rørføring fra Filter 1 til efterfilter samt forbindelsen til rentvandsbeholderen	16
3.1.13 Rørføring til skyllevand og returskyllevand	16
3.2 PI-diagram	17
3.3 Styringsbeskrivelse	18
3.3.1 Indvinding og udpumpning	18
3.3.2 Styring af produktionen på de 3 filtre	18
3.3.3 Styring af forsøgsfilteret i drift	18
3.3.4 Skylning af forsøgsfilteret	20
3.4 Hvem stod for hvad	20
4. Opstart af demo-anlægget	21
5. Undersøgelser	22
5.1 L1. Funktion af forfilter efter fjernelse af filtermateriale	24
5.2 L2. Indkøring af nyt efterfilter	29
5.3 L3 a & b. Kapacitet af det nye efterfilter	35
5.4 L4. Biomasse	40
5.5 L5. Driftspause	42
5.6 L6. Undersøgelse af kontrolfilter til sammenligning	44
5.7 L7. Indkøringsforsøg på kolonner	46
5.8 L8. Coliforme bakterier	49

6.	Perspektivering	52
7.	Referencer	54
Bilag 1.	Billeder fra værket før og efter re-design	55

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.

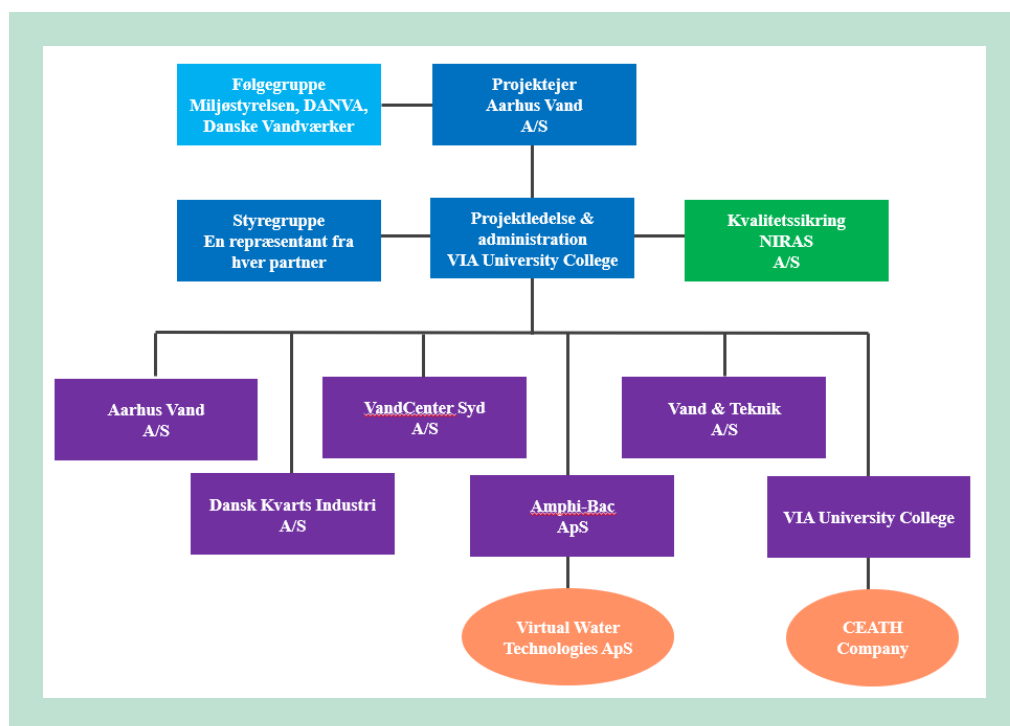
Baggrund

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, metan, 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

Sammenfatning

Denne rapport omhandler et demonstrationsanlæg ved Lundeværket og er Rapport 11 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Det primære formål er at videreudvikle og demonstrere nye vandbehandlingsløsninger under reelle driftsforhold.

I perioden 23.08.2021 – 30.09.2022 blev der udført demonstrationsforsøg med SmartSand i fuldskala på Lundeværket. Det nye efterfilter med SmartSand blev koblet til det eksisterende filter 1, der herefter fungerede som forfilter. Der blev suget filtergrus af filter 1 i to omgange for kun at fjerne jern, men ikke ammonium i forfilteret. Demonstrationsforsøget blev opdelt i 8 arbejdsplaner, se sammenfatning af disse nedenfor.

L1. Funktion af forfilter efter fjernelse af filtermateriale:

Demonstrationsforsøget viste at forfilteret som ventet var i stand til at fjerne jern. Ammonium blev fjernet fra ca. 0,35-0,40 mg/l til ca. 0,15 mg/l. Det var mere end forventet, men der kom fortsat nok ammonium ud af forfilteret til at fortsætte demonstrationsforsøget. Det var overraskende at se, at forfilteret yderligere fjernede mangan.

L2. Indkøring af nyt efterfilter:

Indkøringen af det nye efterfilter var forventet at tage en uge. Ammonium blev indkørt på efterfilteret med SmartSand på 23 dage. Nitrit blev dannet under ammoniumfjernelsen og kom under vejledende kvalitetskriterie på 0,01 mg/l 37 dage efter opstart af demonstrationsforsøget. Kortere indkøring ville sandsynligvis kunne opnås under andre forhold.

L3. Kapacitet af det nye efterfilter:

Kapaciteten af det nye efterfilter blev undersøgt. Ammonium blev fjernet til under grænseværdien med de testede flows på 40 og 50 m³/t (23-28 m/t) og viste dermed god performance selv ved højt flow. Dannelse af nitrit skete til et overraskende højt niveau ned gennem efterfilteret og udgjorde et opmærksomhedspunkt ved indkøring af nye filtre. Kapaciteten for nitritfjernelsen var overskredet ved flow på 50 m³/t (28 m/t), men ikke ved 40 m³/t (22 m/t). Set på bagkant havde det været godt at teste et flow ved 45 m³/t (25 m/t) for at komme tættere på grænsen for nitritfjernelse. Fjernelsen af ammonium skete højere oppe i efterfilteret efterhånden som filteret modnede. Kraftigt skyl (efter 3. gangtid) havde en negativ indflydelse på omsætningen af ammonium og nitrit og viste tydeligt bakteriernes behov for ro til omsætningen.

L4. Biomasse:

Det var forventet at der ville komme mere biomasse i efterfilteret målt som ATP efterhånden som filteret modnede. Dette blev bekræftet i demonstrationsforsøget. Det var yderligere forventet at der blev mindre biomasse i efterfilteret under filterskyllning. Dette blev ikke bekræftet i demonstrationsforsøget.

L5. Driftspause:

Der blev udført forsøg med driftspause på det nye efterfilter. Resultaterne viste at ammoniumfjernelsen var effektiv efter driftsstop på både 7 og 15 dage.

L6. Undersøgelse af kontrolfilter til sammenligning:

Filter 3 på Lundeværket blev undersøgt til sammenligning med det nye efterfilter. Ammoniumfjernelsen blev undersøgt ved flow op til 3,1 m/t, dvs. væsentlig under det testede flow på det nye efterfilter. Resultaterne viste at ammonium kunne fjernes i slutningen af en gangtid, men et enkelt målepunkt ved 2,2 m/t i starten af en gangtid viste ammonium over grænseværdien.

Der blev udført driftsstop på Filter 3 i 14 dage. Ammoniumkoncentrationen var over grænseværdien indtil 3 timer efter opstart, hvorefter koncentrationen af ammonium faldt til under grænseværdien i resten af forsøget.

L7. Indkøringsforsøg på kolonner:

To kolonner med hhv. SmartSand og kontrolsand blev undersøgt til sammenligning af indkøringstid. I hele forsøgsperioden blev der kørt flow top/down. Resultaterne viste at kolonnen med SmartSand blev indkørt hurtigere (17 dage) end kontrolsandet (29 dage). Resultaterne viste at nitrit var en kritisk parameter under indkøringen. Nitrit var indkørt efter hhv. 23 og 36 dage for hhv. SmartSand og kontrolsand.

L8. Coliforme bakterier:

På dag 47 i indkøringen af det nye efterfilter blev der målt coliforme bakterier. Bakterierne stammede med stor sandsynlighed fra selve fremstillingen af SmartSand og viste vigtigheden af forholdsregler for god hygiejne under fremstilling af SmartSand.

Perspektivering:

Arbejdet med Smart Re-design projektet har været en øjenåbner til fremtidig dimensionering, indkøring og drift af vandværksfiltre. Demonstrationsforsøget har givet indsigt i opmærksomhedspunkter under indkøring af nye vandværksfiltre. Yderligere har det givet en forståelse for, hvordan eksisterende vandværksfiltre kan driftes anderledes med øget fleksibilitet samt kapacitet til følge.

1. Introduktion

Det primære formål med det afrapporterede arbejde var at videreudvikle og demonstrere nye vandbehandlingsløsninger under reelle driftsforhold. På basis af resultater fra de øvrige arbejdsplaner i fyrtårnsprojektet "Re-design" blev fuldskala-demonstrationer på to eksisterende vandværker, Lundeværket og Østerbyværket, opført. På disse værker var det muligt at sammenligne de nyudviklede løsninger med eksisterende filterlinjer med traditionel vandbehandling med præcis samme vandtype. Desuden fungerede anlæggene som et kommercielt og teknologisk udstillingsvindue for de nyudviklede løsninger. Det producerede vand var, med undtagelse beskrevet i L8, af en sådan kvalitet, at det kunne sendes ud til forbrugerne. Fyrtårnsprojektets midler havde en afgørende tilskyndelsesvirkning for, at disse demonstrationer kunne opstilles hos forsyningerne.

1.1 Hovedleverancer

- Funktionsdygtige Retro-fit vandbehandlingslinjer i fuldskala på Lundeværket og på Østerbyværket baseret på re-design principperne.
- Dokumentation af re-design fordelene ved sidestilling af re-design kontra traditionelt design på samme vandværk med samme råvandskvalitet.

1.2 Design- og anlægsaktiviteter

Formålet med disse aktiviteter var at designe og bygge et nyt fyrtårnsanlæg ved Lundeværket på basis af resultater fra de øvrige arbejdsplaner i projektet Re-design, herunder SmartTank fra arbejdsplan 4 og modelleringerne i arbejdsplan 5. Anlægget blev tilpasset pladsforholdene på Lundeværket og indgik i en retro-fit løsning, hvor et eksisterende filter blev sat sammen med et nyt efterfilter. Aktiviteterne omfattede:

1. Projektering og projektledelse, herunder PI diagram, el projektering og beskrivelse, maskinprojektering, programmering af PLC.
2. Indkøb af komponenter såsom filterbeholdere, mellempumpe, PLC, rør, ventiler, VLT'er, flowmålere, instrumentering, el og styretavle.
3. Udførsel, herunder op svejsning af rør, montage, fragt, kranhjælp, elinstallation og SRO-opsætning.

1.3 Indkørings- og driftsaktiviteter

Formålet med denne aktivitet var at indkøre den nye vandbehandlingslinje på Lundeværket og drifte den i en periode for at kunne sammenligne med en traditionel vandbehandlingslinje med samme vandtype.

1. Produktion af SmartSand fra arbejdsplan 3. Sandet blev anvendt i fyrtårnsanlægget for at fremme indkøringen.
2. Indkøring af fyrtårnsanlægget. Monitoring af vandkvaliteten indtil vandet kunne indgå i produktion til forbrugerne.
3. Drift af fyrtårnsanlægget i en periode. Dokumentation af fysiske, kemiske og mikrobiologiske parametre af både fyrtårnsanlæggene og en sidestillet traditionel vandbehandlingslinje.

2. Beskrivelse af filterdesign

Dette afsnit giver en overordnet beskrivelse af filter-design. Der blev etableret et nyt efterfilter til fjernelse af ammonium og mangan ved inddragelse af SmartSand. SmartSand skulle sikre en hurtig indkøring af filteret, så man hurtigere kunne opnå god ammoniumfjernelse. Det nye efterfilter skulle være mere robust over for variationer i flowet pga. bakteriernes forbedrede forhold i filteret.

2.1 Erfaringer fra filterprojektets tidligere faser til design af fuldskaalanlæg

I forhold til design af filteret til ammoniumfjernelsen blev der i tidligere forsøg i projektet (se Rapport 5), indsamlet forskellige data og observationer, som kunne bruges i designet af et anlæg til fuldskalatest. Der blev opsat en række læringspunkter fra filterprojektets tidligere faser, som skulle demonstreres i denne fuldskalatest:

- Der blev lavet en række forsøg i nogle kolonner med fjernelse af ammonium. Her blev det erfaret, at ammonium kunne fjernes selv ved store flowændringer og højere koncentrationer. Dette krævede 1) at der ikke var jern til stede, 2) at bakterierne til nitrifikationsprocessen fik nok "mad" i form af ammonium samt 3) at kolonnerne ikke blev skyllet så tit.
- Der blev også foretaget forsøg med skiftevis at lede vandet med ammonium ind i toppen af kolonnen og i bunden. Derved kunne man opnå, at størstedelen af filteret var aktivt i hele dybden. Ved hjælp af en række prøvehaner kunne man måle fjernelsen af ammonium ned igennem filteret. I et forsøg med meget højt flow og højt indhold af ammonium kunne man måle, at den øverste del af filteret ikke kunne omdanne al ammonium. Men aktive bakterier i bunden var så med til at fjerne det sidste ammonium. Det påviste, at man kan holde hele sit filter aktivt ved skiftevis at lede vandet ind fra top og bund.
- Der blev også lavet forsøg med SmartSand. Ved at forbehandle sandet, så det indeholdt aktive bakterier til nitrifikationsprocessen, kunne man hurtigt indkøre et nyt filtermateriale og få gang i filtrene på vandværket. Det sparer en masse vand i opstartsfasen.

Hensigten med demonstrationsforsøget var dels at teste resultaterne i fuldskala, dels at vurdere langtidseffekterne. Dette krævede mulighed for at kunne måle og justere på forholdene ved at:

- Måle jernindholdet på tilgangen af efterfiltreret.
- Udtage prøver af ammoniumindholdet for hver 10. cm ned gennem filtermaterialet for at vurdere fjernelsen af ammonium i filteret.
- Etablere prøvehaner på tilgang og afgang fra filteret – både til udtagning af enkeltprøver og til online målinger.

3. Design af demoanlæg

3.1 Beskrivelse af opstillingen på Lundeværket

I projektbeskrivelsen står der, at demonstrationsanlægget er en retrofit-løsning (tilpasning af nyt udstyr til gammelt anlæg). Der blev igennem de første arbejdsplaner i Re-design-projektet lavet en del undersøgelser på Filter 1 på Lundeværket. Derfor blev dette filter valgt til at indgå i fuldskalatesten. I demonstrationen fungerede det eksisterende filter som forfilter til jernfjernelse, mens ammonium og mangan blev fjernet i det nye filter. Mellem de to filtre blev der etableret en mellempumpning.

3.1.1 Forfilter 1

Filter 1 blev brugt som et forfilter til jernfjernelse. En del af det gamle filtermateriale blev fjernet, til der var ca. 30 cm filtermateriale over bærelaget. Dette for at opnå høj jernfjernelse, mens mest muligt ammonium skulle fødes til efterfilteret (SmartFilter). Filter 1 havde et areal på 18 m² og bestod fra start af 90 cm kvarts 1,4-1,8 mm og 40 cm antracit 2,0-4,0 mm. Der blev i forundersøgelser vist, at de to materialer var blandet i toppen, mens det tilbageværende materiale stort set bestod af 100 % kvarts. Et vandflow på 40 m³/t svarede til en filterhastighed på 2,2 m/t. Hvis ammonium blev fjernet i forfilteret, var det planlagt at fjerne mere filtermateriale.

3.1.2 Placering af det nye efterfilter på Lundeværket

Filteret blev placeret i kælderen ved filterfronten. Der var begrænsninger i indgangspartiet, hvor filteret skulle kantes ind, samt i kælderen's loftshøjde (Bilag 1). Disse begrænsninger var med til at bestemme filterhøjde og diameter.

3.1.3 Diameter af nyt efterfilter

Grundet begrænsning i adgang til kælderen kunne efterfilteret maks. have en diameter på Ø1,5 m. Det gav et areal på 1,77 m². Et flow på 40 m³/t gav en filterhastighed på 23 m/t. Det høje flow blev valgt, med henblik på at finde grænsen enten i forhold til vandkvalitet eller tryktab. Hvis grænsen blev opnået før de 23 m/t, i forhold til fjernelse af ammonium og mangan ville denne viden kunne bruges i fremtidens dimensionering af efterfilter.

3.1.4 Filtermedie, forfilter

Det blev valgt at filtermaterialet på efterfiltret skulle være den samme type, som der er i filter 1. Så kunne det genbruges når filter 1 skulle føres tilbage til normal efter fuldskalatesten. Det blev valgt at genbruge materialet for hurtigere at indkøre filter 1 igen efter demonstrationsforsøget. Filtermediet på forfiltret var kvarts i størrelsen 1,4-1,8 mm og mediet i det nye efterfilter var SmartSand i kvarts i størrelsen 1,2 til 2,0 mm (1006 kg). Nyt sand i det nye efterfilter var kvarts 1,2-2,0 mm (2500 kg). Blandingsforhold: 29% SmartSand. Grundet det meget høje flow ville det kunne give hydrauliske udfordringer at vælge en for lille kornstørrelse. Derfor var den valgte størrelse også passende. Materialet blev leveret af Dansk Kvarts Industri A/S som SmartSand i en lukket beholder, hvori det blev fremstillet. SmartSandet blev pumpet fra den lukkede beholder ind i efterfilteret så hygiejnen var sikret. Under indpumpning blev SmartSand blandet med nyt medie (ikke SmartSand) i samme kornstørrelse.

3.1.5 Bedhøjde

For at øge bedhøjden, blev højden i kælderskakten (3,43 cm frihøjde) udnyttet fuldt ud, filteret blev fremstillet med en lav beholderbund og med lave ben og der blev ikke anvendt noget bærelag. Den opnåede bedhøjde var 1,35 m (ingen bærelag) svarende til 2,4 m³ sand.

3.1.6 Fribord

Da så godt som alt jernet skulle fjernes i forfilteret (filter 1) var der ikke behov for et kraftigt luft- og vandskyl på efterfiltret. Det gjorde, at fribord kunne mindskes på efterfilteret, da risikoen for at skylle filtermateriale ud var lille. Det blev planlagt kun at skylle med vand, men filteret blev udført, så der også kunne skylles med luft, men ikke samtidig. Det blev ikke regnet med at fluidisere kraftigt, så der blev ikke forventet at filtermedie ekspansionen vil blive større end 10%. Ved bedhøjde på 1,35 m var fribordet 20 cm.

3.1.7 Flow

På Lundeværket (før forsøget) begyndte man at se overskridelser på ammonium, når værket kom op på 120 m³/t over de 3 filtre. Derfor kunne et flow på op til 40 m³/t være optimalt i fuldskalatesten. Der ville man kunne måle, om der var forskel med det nye design kontra det gamle.

3.1.8 Styling af vandet til efterfilteret

I et tidligere forsøg i Re-design-projektet blev det set, at ammoniumoxiderende bakterier var mest effektive, hvis de fik "mad" i form af råvand med højt indhold af ammonium, så der var noget at arbejde med. Det blev også set, at filtret virkede bedst, hvis bakterierne var i hele filterets dybde. Ved det nye re-design blev indløbsvand (vand fra afløb forfilter) til efterfiltret kørt skiftevis (hvert døgn) på filteret i toppen og fra bunden. Derved var der aktive bakterier i hele filteret. Flow af vandet til efterfilteret blev styret af en flowmåler placeret foran mellempumpen.

3.1.9 Skylleluft

Filteret blev lavet så det var muligt at skylle med luft under filterbunden. Dog uden mulighed for at skylle med vand og luft samtidig da der ikke blev monteret separat luftharpe.

3.1.10 Skyllevand

Filterskylningen foregik manuelt. Ved skylning på Lundeværket er der to skyllevandspumper tilgængelig. Ved brug af den ene og ved at drøve en ventil før efterfilteret blev det ønskede flow tilpasset ved hjælp af værkets skyllevandsflowmåler. For at fluidisere kvarts i størrelse 1,2-2,0 mm (middelstørrelse på 1,6 mm), kræves nok en hastighed på ca. 77 m/t (formel fra Duris $V=40 \times 1,6^{1,38}$). Uden luftskyl, blev det anset som en god ide at have mulighed for at opnå fluidisering, ved skyl med vand. Den valgte pumpe havde en pumpeydelse på 360 m³/t med en løftehøjde på 12 m. Med et filterareal på 1,77 m² fås en pumpeydelse på 136 m³/t. For at sikre, at filtermedie ikke blev udskyllet, blev der lavet en visuel vurdering af skyllevandet. I fuldskalaforsøget foregik vandskyl med en pumpeydelse på 135 – 139 m³/t (svarende til 76 – 79 m/t).

3.1.11 Andre designkriterier til filter-design

Den nye beholder blev forsynet med 16 prøvesteder på siden i to rækker (8 haner i hver række, se FIGUR 2) til udtagning af dybdeprofilprøver.



FIGUR 2. Efterfilter med prøvetagningsventiler og manometre påmonteret.

Hanerne blev placeret så det var muligt at udtage prøver med 10 cm mellemrum. Hvert prøvested bestod af en prøvehane til udtagning af vandprøver samt en 1" ventil (FIGUR 3) til udtagning af sandprøver ved hjælp af et spyd (FIGUR 4).



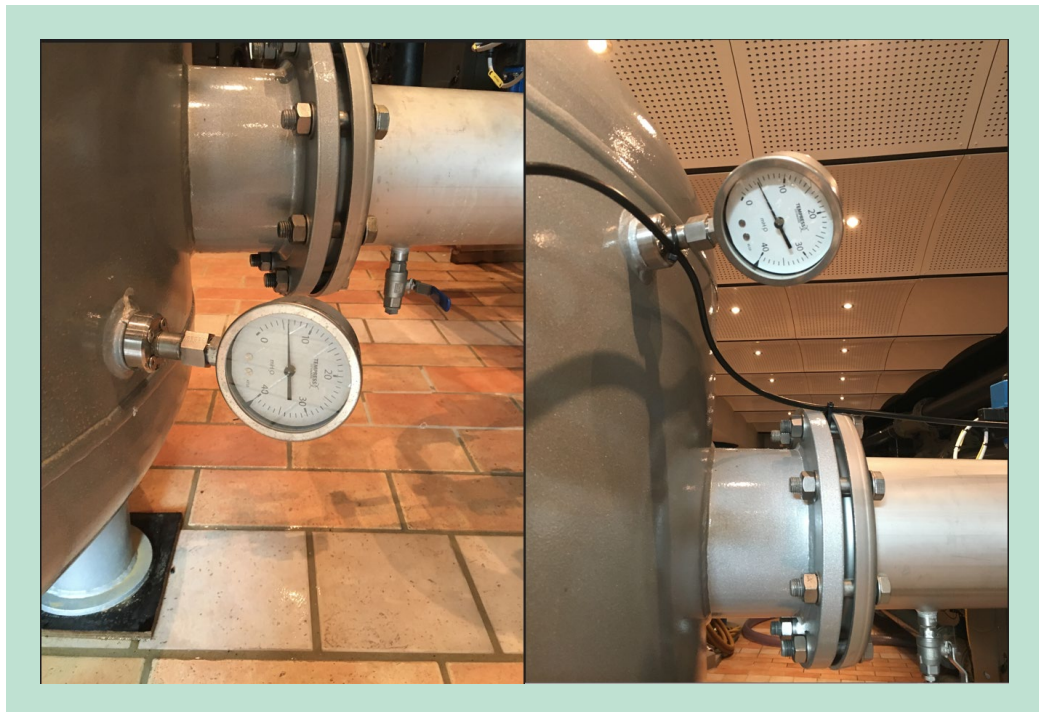
FIGUR 3. Prøvetagningshane med 1" ventil inden montering.



FIGUR 4. Prøvetagningsspyd til udtagning af sandprøver.

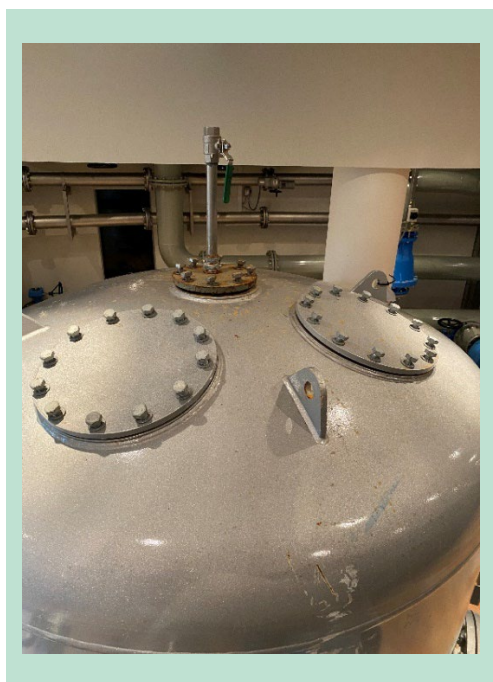
Der blev opstillet en 2-kanals samt en én-kanals on-line ammoniumsmåler (Amtax) til overvågning af vandets indhold af ammonium. En-kanalsmåleren blev tilkoblet den midterste dybdeprøvehane ved hjælp af et T-stykke.

Der blev sat en trykmåler til at måle tryktabet over filtermediet ved toppen og bunden af filtret (FIGUR 5).



FIGUR 5. Manometer bund (tv). Manometer top (th).

Der blev monteret 2 dæksler i toppen til inspektion samt evt. måleudstyr (FIGUR 6).



FIGUR 6. Dæksler i toppen af filter.

3.1.12 Rørføring fra Filter 1 til efterfilter samt forbindelsen til rentvandsbeholderen

I praksis blev T-stykket fra filter 1 til rentvandsbeholderen fjernet. Der blev opført et nyt PE-rør Ø110 PN10 (max vandhastighed 1,51 m/s) fra filter 1 til det nye efterfilter. Imellem blev der monteret en flowmåler, en mellempumpe (ca. 40 m³/t, h=8 m) og en kontra ventil. I afsnit 3.2 PI diagram (FIGUR 7) er opstilling vist. Fra indløb af Råvand i forfilteret til drikkevand i rentvandsbeholderne.

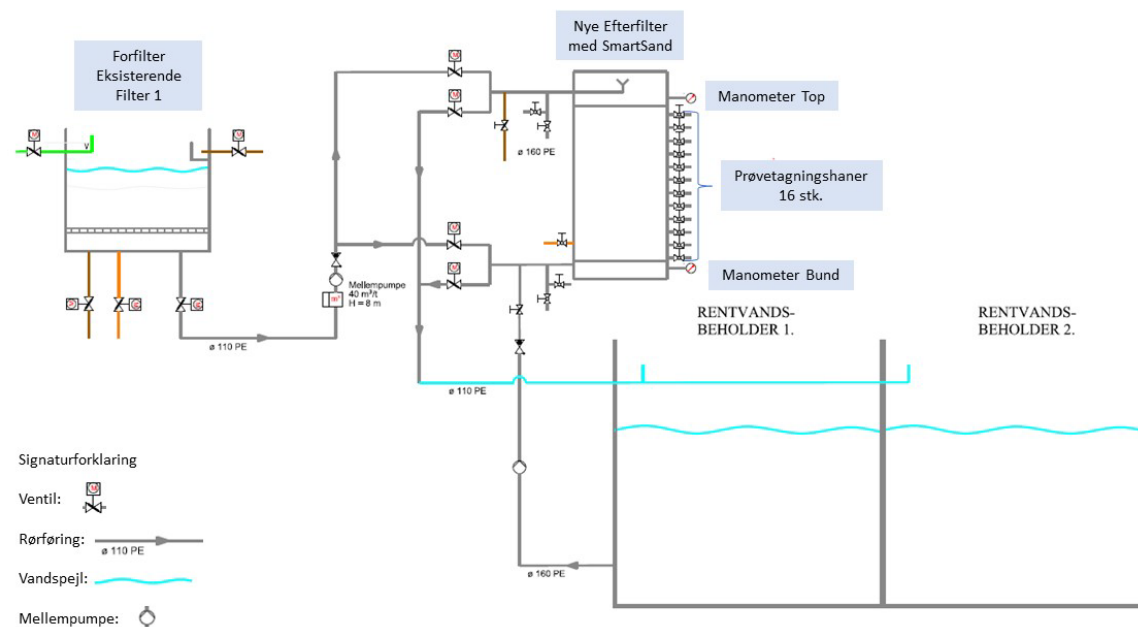
Fra efterfilteret blev vandet (efter indkøring) ledt til rentvandsbeholderen via et Ø110 mm PE rør.

3.1.13 Rørføring til skyllevand og returskyllevand

På filterfronten af filter 1 blev en 90 graders bøjning fjernet og erstattet af et T-stykke. På T-stykket blev der monteret en flange, hvori der blev monteret en ventil som kunne drøvles på ved det manuelle skyl af efterfilteret. Derfra blev der lavet en forbindelse til skyllevand til efterfilteret og returskyllevand fra filteret i PE Ø160 PN10 (Max vandhastighed 2,67 m/s). Skylningen blev udført manuelt, hvorfor ventiler med automatik blev fravalgt.

3.2 PI-diagram

PI diagrammet (Piping and Instrumentation diagram, FIGUR 7) blev lavet for at give et gennemskueligt og systematisk overblik over processen til den mekaniske montage og programmeringen af styringen til anlægget.



FIGUR 7. PI diagram.

3.3 Styringsbeskrivelse

3.3.1 Indvinding og udpumpning

Boringerne skulle forsætte med at køre, som tidligere, hvor alle 4 boringer var i drift med samtidig regulering op og ned i flowet ved hjælp af frekvensomformere til den ønskede indvinding. Undervejs blev de to boringer med højest indhold af ammonium udvalgt til fortsat drift mens de to øvrige blev stoppet. Lundeværket producerede vand hele døgnet rundt, så værket blev planlagt til at være i drift under hele demonstrationsforsøget.

Lundeværket indgår i en Zone 1 styring, som er den største trykzone i Odense.

Her kunne værket indgå i styringen som et regulerende værk f.eks. med et flow fra 40-120 m³/t, eller der kunne vælges et fast flow på f.eks. 80 m³/t. Da Lundeværket er det mindste af Vandcenter Syds værker, valgte man den form, som gav bedst mening til de forskellige forsøg i projektperioden. De andre værker i Zone 1 styringen blev tilpasset forbruget. Man var ikke låst i udpumpningsdelen, men mere af kildepladsen.

De senere år er vandspejlet faldet i området grundet stor indvinding og derfor ønskede man ikke at indvinde for store mængder i en længere periode.

3.3.2 Styring af produktionen på de 3 filtre

Lundeværket har 3 åbne filtre, hvor alle ventiler er styret af et Aumagear, hvor man kan vælge ventilstillingen imellem åben og lukket og derved ændret flowet.

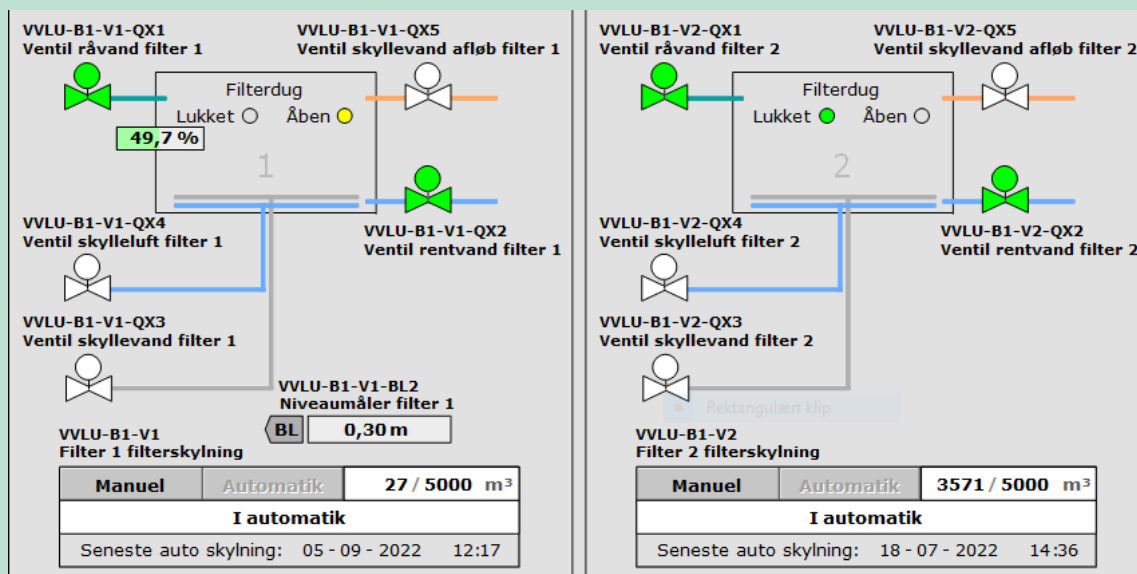
Det gav mulighed for at lave en regulering, hvor man kunne styre råvandsflowet til filter 1 ved hjælp af den flowmåler, der var monteret foran mellempumpen imellem filter 1 og efterfilteret.

Resten af belastningen på værket ville de 2 andre filtre så tage. Hvis værket kørte ind med 100 m³/t og produktionsønske fra filter 1 og efterfilteret var 40 m³/t, ville resten af belastning på de 60 m³/t lægges på de andre filtre.

Det blev styret, at hvis rest belastningen var under 40 m³/t blev det taget fra ét filter (2,2 m/t), og over 40 m³/t blev rest belastningen fordelt over 2 filtre. Hvis der kun var ét filter i drift ad gangen skulle de 2 filtre skiftes til at være i drift. Ved de forsøg, hvor der skulle sammenlignes forsøgsfilter kontra eksisterende filter, blev værket styret til at køre 80 m³/t og forsøgsfilteret 40 m³/t.

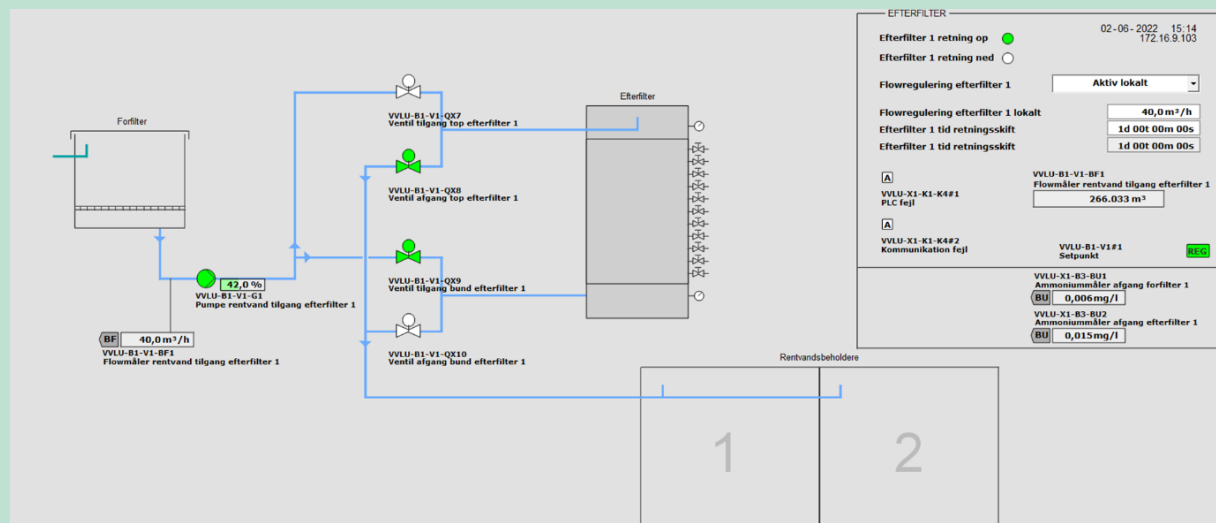
3.3.3 Styring af forsøgsfilteret i drift

Der blev lavet en flowregulering til styring af filter 1. Flowet i filter 1 blev styret af flowmåleren, som blev placeret efter filteret, se SCADA billedet på FIGUR 8. Der blev valgt et ønsket flow (FIGUR 8, øveste højre hjørne), hvor flow setpunkt blev indtastet. Dette signal blev brugt til at styre råvandsventilen til filter 1. På FIGUR 8, er ventil til råvand filter 1 vist med en åbningsgrad på 49,7%.



FIGUR 8. Udklip fra SCADA filter 1 og 2.

Flowet til efterfilteret var det samme som indløbet til filter 1, så der blev opnået et næsten konstant vandspejl i filter 1. Til det blev der brugt niveau radar monteret i filter 1. Den kan ses på FIGUR 8, hvor den viser 0,30 m (Niveaumåler filter 1). Signalet fra den blev brugt til at styre mellempumpen via en frekvensomformer ved hjælp af en niveauregulering. På SCADA billedet FIGUR 9 er pumpe rentvand til efterfilter 1 vist med en ydelse på 42,0%.



FIGUR 9. SCADA-billedet af forfilter og nyt efterfilter med SmartSand (efterfilter 1).

Efterfilteret kunne fødes fra skiftevis top og bund. Der blev lavet en funktion i SCADA, hvor der kunne vælges, hvor tit den skulle skifte. Setpunktet kunne indstilles i SCADA som kan ses på FIGUR 9. Ved skift af flowretning, blev mellempumpen stoppet midlertidig med en lille stigning i vandspejlet i filter 1, mens ventilernes position blev skiftet. Der var 2 stk. ventiler i top og 2 stk. i bund, hvor den ene var fra mellempumpen og den anden var afgang til rentvandsbeholderne.

3.3.4 Skylning af forsøgsfilteret

Filter 1 skulle stadig have automatiske filterskylning men parameterne skulle justeres i forhold til, at filtergrushøjden blev reduceret. Hvert filter havde deres egen filterskylningsblok, så ændringer på filter 1 ikke ville slå igennem på de 2 andre filtre. Når den automatiske skylning startede op, blev afgangsventilen til efterfilteret lukket og mellempumpen stoppet. Efter skylning blev afgangsventilen reduceret åbnet som ved et normalt filterskyl.

Skyl af forfilter: Trin 1) 5 min luft ved 60 m/t, Trin 2) 20 min vand ved $Q=260 \text{ m}^3/\text{t}$ (14 m/t), frekvens på 5-7 dage afhængig af flowet.

Efterfiltret kunne skylles manuelt ved at stoppe filter 1 ned og lukke de 4 stk.ventiler, (2 stk. tilgangsventiler og 2 stk. afgangsventiler) til efterfilteret. Ventilen til retur skyllevand skulle åbnes manuelt helt op og skyllepumpen startes op reduceret og justeres op til det ønskede flow ved hjælp af den manuelle ventil, som var monteret efter skylleledningen på værkets filterfront.

Skyl af efterfilter: 10 – 11 min vand ved $Q=135 - 139 \text{ m}^3/\text{t}$ (76 – 79 m/t). Ingen fast frekvens.

Ved første filterskylning, blev skyllevandsventilen justeret manuelt indtil skyllevandsflowmåleren viste ca. $138 \text{ m}^3/\text{t}$. Der blev udtaget skyllevandsprøver, hvor turbiditeten blev visuelt vurderet. Samtidig blev der observeret, om der blev skyllet kvarts med ud i skyllevandsprøverne. Planen var at se på turbiditeten af vandet og stoppe tiden, når vandet ikke blev klarere. Der var dog udfordringer med dette. Se L8. Coliforme bakterier.

3.4 Hvem stod for hvad

Entreprisegrænserne var som følger:

Vand og Teknik:

- Filterbeholder
- Rørføring omkring filter med tilhørende ventiler

Dansk Kvarts Industri A/S:

- Filtermateriale SmartSand (kvarts 1,2-2,0 mm)

VandCenter Syd:

- Fjerne noget af filtermaterialet i filter 1
- Ilægning af filtermaterialer (VCS og DKI)
- Sensorer (indkøb og installation)
- Rørføring (ekskl. Rørføring til selve filteret)
- Pumper og frekvensomformere
- Flowmåler DIN50
- Automation
- Prøveudtagning (VCS/VIA)

4. Opstart af demo-anlægget

Demonstrationsanlægget ved Lundeværket blev opstartet i efteråret 2021. Nedenfor beskrives forløbet af aktiviteterne, der blev udført i forbindelse med opstart af anlægget. I forbindelse med indkørings- og driftsperioderne blev der også udført en række forsøg for at dokumentere demonstrationen. Disse forsøg er beskrevet i kapitel 5.

Rørarbejde, styring, m.m.: Dette arbejde blev udført i 2021.

Modtagelse af det nye efterfilter: Vand og Teknik afleverede det nye efterfilter til Lundeværket d. 07/12-2020.

Filtermedie blev suget af det eksisterende forfilter af to omgange:

- d. 26/8-2021 (ca. 70 cm blev fjernet)
- d. 3/9-2021 (yderligere ca. 30. cm blev fjernet)

Efterfilter og det nye rørsystem blev skyllet igennem for at sikre, at der ikke er bakterier i filteret, inden det blev fyldt. Der blev udtaget bakteriologiske prøver, og der blev skyllet til der var rene prøver.

Der blev påfyldt filtermedie (uden bærelag) på det nye efterfilter ved hjælp af en ejektorpumpe. Filtermediet bestod af en blanding af SmartSand (29 %) og nyt sand, se afsnit 3.1. Filtret blev ikke skyllet i forbindelse med ilægning for ikke at skade SmartSandet.

Herefter blev det nye efterfilter sat i drift. Vandet blev udledt til vandløb.

Der blev udtaget bakteriologiske prøver, samt prøver til jern, mangan og ammonium. Da kvaliteten var tilfredsstillende, blev udledningen til vandløbet stoppet, og vandet blev ledt til rentvandsbeholder.

5. Undersøgelser

Der blev udført 8 undersøgelser i forbindelse med fuldskalademonstrationen på Lundeværket. En oversigt over forsøgene ses i TABEL 1. Procedure ved prøvetagning, prøveopbevaring og analyser i forbindelse med undersøgelserne blev udført som følger:

- 1) Udtagning af vandprøver fra haner: Haner blev åbnet ($\frac{1}{2}$ sekund) og lukket ($\frac{1}{2}$ sekund) 5 gange. Hanen blev åbnet til en langsomt prøvetagningsflow (ca. 100 ml /10 s) i 30 s. Herefter blev prøven udtaget uden at ændre yderligere på flowet. Formålet med denne fremgangsmåde var både at løsrive evt. okker og biofilm i hanen før prøvetagning samt ikke at forstyrre flowlinjer i filtret og dermed opnå en niveau-bestemt prøve. Vandprøver blev opbevaret på køl.
- 2) Desinfektion af prøvehaner før vandprøvetagning: Ingen.
- 3) Rækkefølgen ved udtagning dybdeprofil vandprøver: Rækkefølgen startede ved afløb og arbejde i modstrømsretning med slut ved indløb. Da flowretningen skiftede dagligt, kunne man ved et sæt prøver udtage fra bunden mod toppen, mens et andet sæt blev udtaget fra toppen mod bunden. Formålet med dette var at starte med den rene- ste prøve (for at undgå krydskontaminering af næste prøve) samt at undgå, at kolon- nens flowmønster blev forstyrret opstrøms prøvetagningsstedet.
- 4) Ved filtermedieprøvetagning af det nye efterfilter med spyd blev filtret drænet ved at åbne efterfiltrets bundventil ca. 2 timer før prøvetagning. Der blev anvendt et spyd, som var ca. 75 cm langt (kunne nå til ca. midten i filtret). Før prøvetagning blev føl- gende rengøringsprocedure udført – 1) sterile handsker blev taget på 2) spyddet blev skyllet med rentvand for at fjerne mediekorn, 3) spyddet blev skyllet med ethanol fra sprøjteflaske for at desinficere, 4) spyddet blev skyllet med rentvand for at fjerne ethanol og 5) spyddet blev aftørret med papir.
- 5) Filtermedieprøver blev placeret i en plastpose (2 stik for hvert prøvested) og homoge- niseret ved at blande meget forsigtigt i posen for at undgå, at biofilmen blev skrabet af kornene. Prøverne til ATP blev analyseret samme dag som dobbeltprøver, og den resterende del af prøven blev frosset samme dag.
- 6) Analysepakken M0 til vandprøver: Bestod af parametrene *E. coli*, coliforme og kim 22 °C. Prøver blev udtaget i sterile flasker.
- 7) Analyser af vandprøver, hvor der blev målt nitrit, blev udført indenfor 24, hvorfor prø- verne blev afsendt til laboratoriet samme dag som de blev udtaget. Efter prøvetag- ning blev prøverne straks sat på køl.

En række grundlæggende data er vigtige for forståelse af forsøgene. Disse oplysninger ses nedenfor:

Eksisterende forfilter efter fjernelse af toplag	Nyt efterfilter
Filtertype: gravitation	Filtertype: tryk
Længde: 5, 4 m	Diameter: 1,5 m
Bredde: 3,3 m	Areal: 1,77 m ²
Areal: 17,82 m ²	Maks flow, der blev testet: 50 m ³ /t
Maks flow: 50 m ³ /t	Maks filterhastighed: 28,3 m/t
Maks filterhastighed: 2,8 m/t	Medietype: kvarts (29 % SmartSand)
Medietype: kvarts (anthracit suget væk)	Kornstørrelse: 1,2-2,0 mm
Kornstørrelse: 1,4-1,8 mm	Bærelag: nej
Bærelag: ja, ca. 40 cm	Filterbund: Slidset rustfri bund over hulplade
Filterbund: spaltebund	

TABEL 1. Overblik over fuldskalademonstrationsforsøg ved Lundeværket.

Forsøg	Navn	For-filter	Efter-filter	Andet Filter	Prøvested	Parametre	Forhold	Tidspunkt
L1	Forfilter	X			Indløb Udløb	Fe, Mn, NH ₄ , kim, op- stuvning	3 forskellige flows	1. Gangtid 4. Gangtid
L2	Indkøring		X		Vandprofil	Fe, Mn, NH ₄ , nitrit, kim	Top mod bund eller Bund mod top	Indtil ammonium og nitrit var ind- kørt
L3a	Filterkapacitet, Flow		X		Vandprofil	NH ₄ , NO ₂ , Mn, tryk	2 forskellige flows	4. og 5. Gangtid
L3b	Filterkapacitet, Am- monium dosering		X		Vandprofil	NH ₄	3 forskellige doseringer	Ikke udført
L4	Biomasse		X		Sandprøver Top, midt og bund	ATP	Før og efter filterskyl	Før og efter filterskylning af efter- filteret.
L5	Driftspause		X	X	Indløb Udløb	NH ₄	7 og 15 dages driftspause	4. Gangtid
L6	Kontrolfilter			X	Indløb Udløb	NH ₄	Som L3a Som L5 efter 14 dages driftsstop	Uafhængig af SmartFilter
L7	Testkolonne			X	Indløb Udløb	NH ₄ , NO ₂	Almindelig drift	Start Projekt
L8	Coliforme bakterier	X	X		Boringer Filtre Rentvandsbeholder	Coliforme bakterier	Almindelig drift samt ved skyl af efterfilter	Fra dag 47 i projektet og frem til start af 3. gangtid.

5.1 L1. Funktion af forfilter efter fjernelse af filtermateriale

Baggrund

Før det nye efterfilter blev koblet til den ene af de tre behandlingslinjer på Lundeværket, blev det øverste lag af det eksisterende filter 1 suget af i to omgange. Ideen var, at råvandet skulle have så kort opholdstid på forfilteret, at der kun blev fjernet jern, mens ammonium først ville blive fjernet på det nye efterfilter. Efter første afsugning, blev for meget ammonium fortsat fjernet på forfilteret, og ammonium var således under grænseværdien i udløbet fra forfilteret.

Derfor blev følgende iværksat og forsøget startet op igen:

- Dræning af forfilter og afsugning af yderligere 30 cm filtermateriale.
- Kraftigt skyl af forfilter (1800 sek. Luft, 1000 sek. Vand).
- Ændring til udelukkende at køre med boringerne Lu 253 og Lu 256, hvor ammonium indhold var højest (hhv. 0,40 mg/l og 0,42 mg/l).
- Modtryk var for højt til at få flow over 20 m³/t (brandslange med lille diameter og lang afstand til Lunde Bæk). Derfor blev afløbsslanger skiftet til større diameter.

Resultaterne fra denne undersøgelse var ikke forskningsmæssigt nyskabende, men undersøgelsen var nødvendig for de senere forsøg på det nye efterfilter for at sikre, at der var ammonium ved indløbet til efterfiltret. Det bemærkes, at det fjernede filtermedie var modent, så der var ikke behov for indkøring af jernfjernelse efter mediefjernelsen i filter 1.

Formål

At fastlægge fjernelse af jern, mangan og ammonium på det eksisterende Filter 1 efter der blev suget filtermedie af, og dermed fastlægge indløbskoncentrationer til det nye efterfilter.

Forsøg

Efter der blev suget filtermedie af, blev der udført et returskyl. Herefter begyndte normal drift (med normal tilførsel af iltet råvand og udledning fra forfilteret til efterfilteret). Forfilterets returskylfrekvens og -procedure blev manuelt tilpasset og herefter automatiseret efter fjernelse af filtermateriale.

Forhold

- Indløbsvand: iltet råvand.
- Udløb til efterfilter fra opstart af forsøg.
- Den normale drift på Filter 1 var 20 m³/t de første to dage hvorefter flow blev sat op til 40 m³/t for at sikre højt ammoniumindhold til efterfilteret.
- Prøveudtagning ved forskellige flows; 20 m³/t, 30 m³/t og 40 m³/t.
- Returskyl, hver 5.000 m³. Ændret til godt 7.000 m³ undervejs for at tilpasse skyl til prøveudtagning.

Prøver

Et sæt vandprøver bestod af indløb til forfiltret (iltet råvand) samt udløb fra forfiltret. Efter hver ændring i flow, blev der afventet mindst 1 time før prøvetagning fandt sted. Der blev udtaget 7 sæt prøver set af TABEL 2.

TABEL 2. Tidspunkt for vandprøvetagning.

Prøvesæt	Gangtid	Flow [m ³ /t]
1	Start 1.	20
2	Start 1.	30
3	Start 1.	40
4	Midt 1.	40
5	Slut 1.	40
6	Start 4.	40
7	Slut 4.	40

Analyseparametre

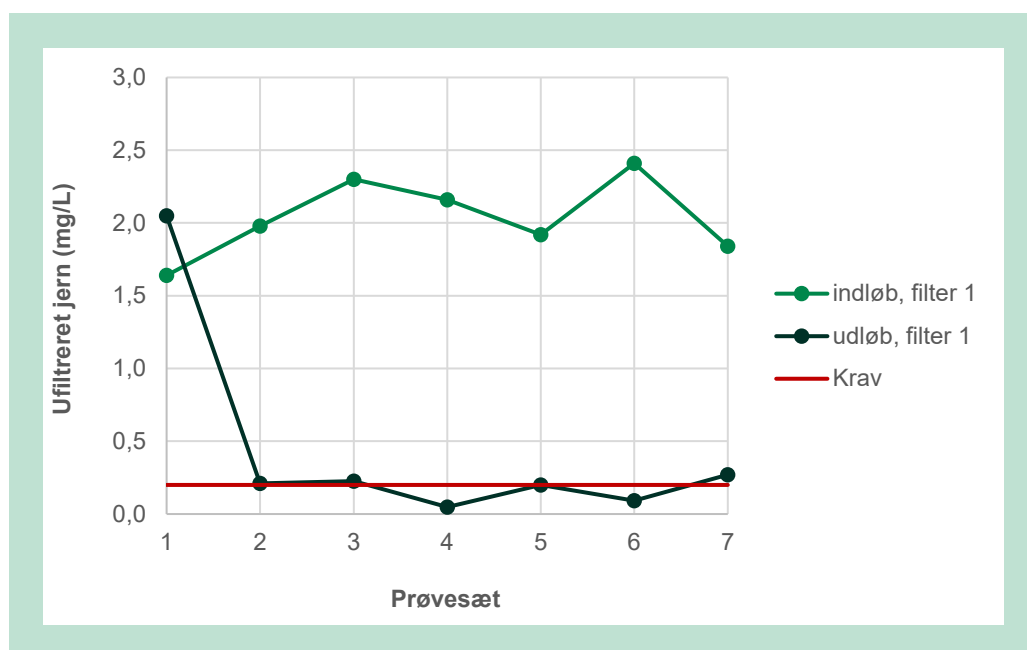
- Total og filtreret jern (AgroLab)
- Total og filtreret mangan (AgroLab)
- Totalammonium (AgroLab)
- Analysepakken M0 (kimtal 22, *E. coli* og coliforme bakterier) (AgroLab, kun målt ved prøvesæt 1 og 5).
- Logging af opstuvning (niveaumåling af vandspejlet, opsamlet på SCADA)

Anlægskrav

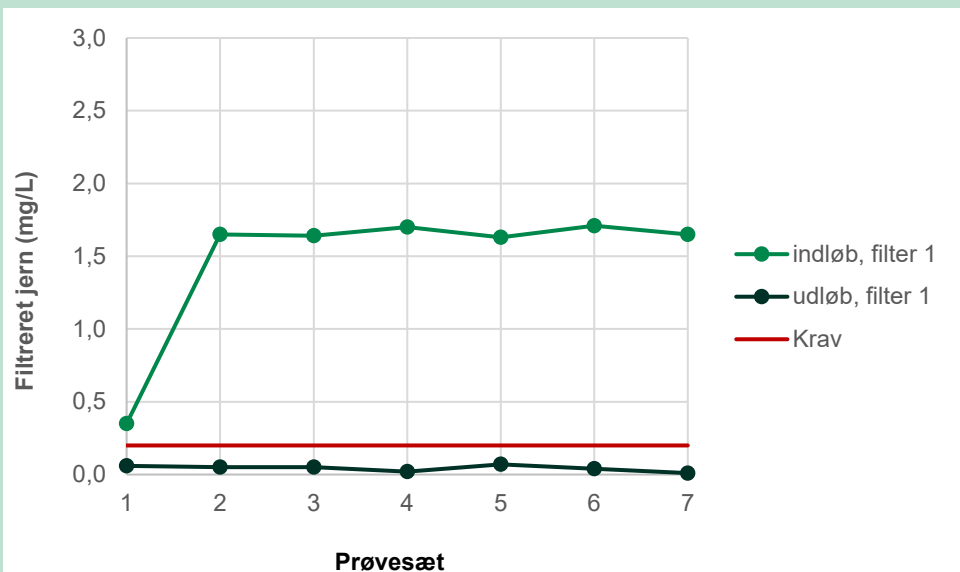
Niveaumåling på forfilter, vandhane ved afgang forfilter, råvandsprøver ved vandhane afgang iltning, flowmåler ved udløb forfilter.

Resultater

Nedenfor ses grafer for hhv. jern, mangan, ammonium og kimal 22. For jern og mangan vises resultater både for opløste (FIGUR 11) og total koncentrationer (FIGUR 10).



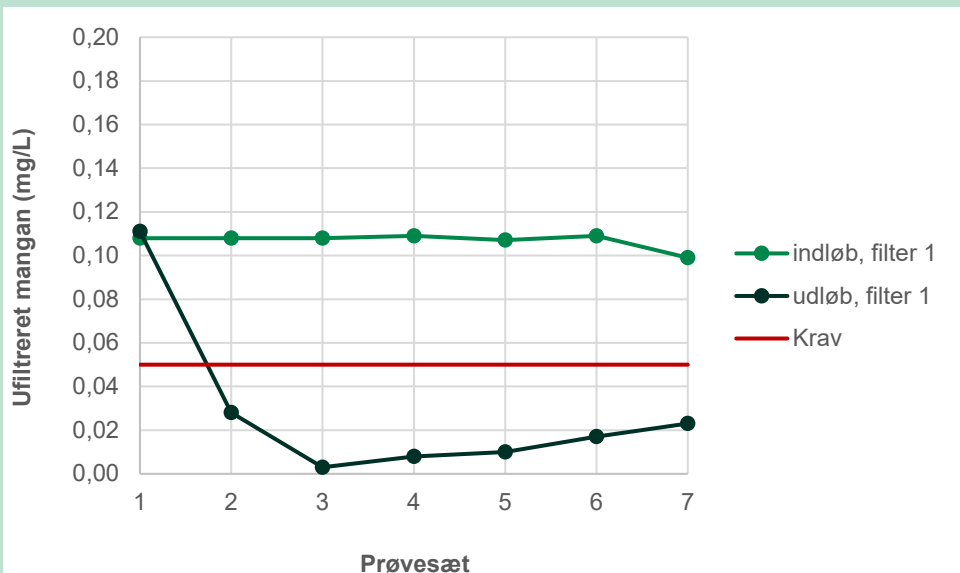
FIGUR 10. L1: Funktion af forfilter – Ufiltreret jern (total jern).



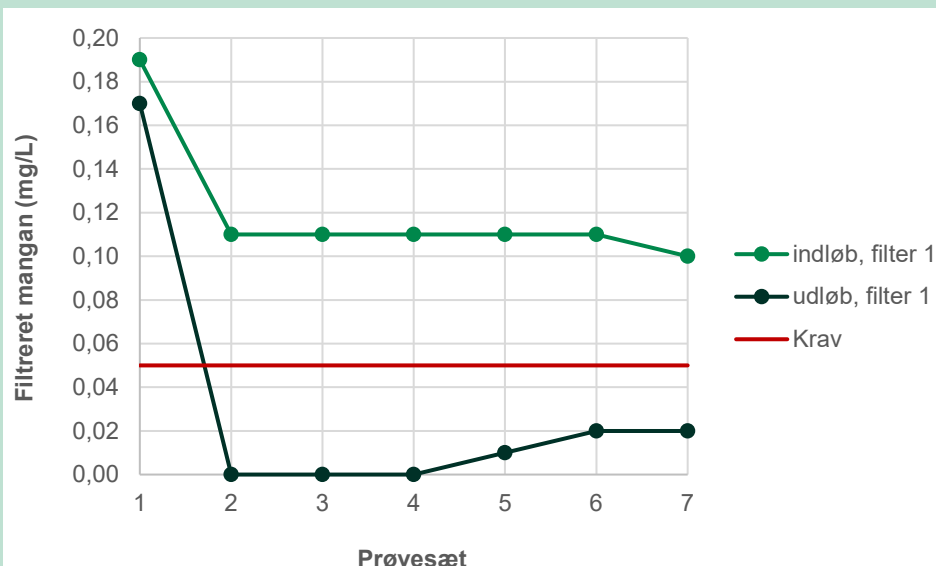
FIGUR 11. L1: Funktion af forfilter – Filtretet jern (opløst jern).

Generelt var forfilteret som ønsket i stand til at fjerne ca. 2 mg/l jern i råvandet til kvalitetskravet på 0,2 mg/l. Indløb af jern i forfilteret var overvejende jern(II) (opløst jern). Udløb af jern fra forfilteret var primært partikulært (jern(III)).

Det ses at ulfilteret jern var marginalt over grænseværdien i prøvesæt 2, 3 og 7. Prøvesæt 2 og 3 var begge fra 1. gangtid ved flow på hhv. 30 og 40 m³/t. Prøvesæt 7 var fra slutningen af 4. gangtid ved 40 m³/t. Prøvesæt 1 er fra opstart af 1. gangtid umiddelbart efter afsugning og adskiller sig markant fra de øvrige prøvesæt.



FIGUR 12. L1: Funktion af forfilter – Ufilteret (total) mangan.

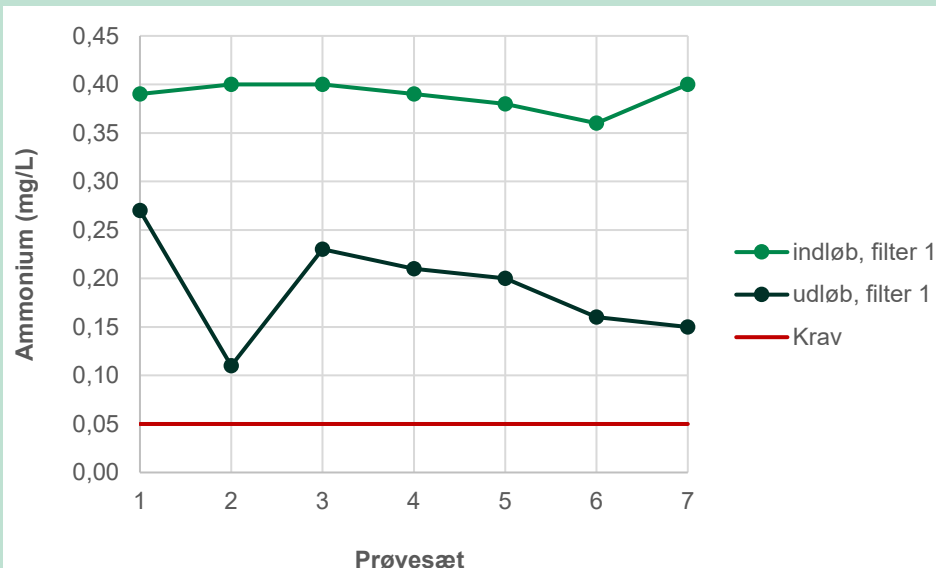


FIGUR 13. L1: Funktion af forfilter – Filtreret (opløst) mangan.

Indløb af mangan i forfilteret var primært opløst mangan idet resultaterne for total mangan og filtreret mangan var ens (FIGUR 12 og FIGUR 13). I udløb for prøvesæt 2, 3 og 4, var mangan primært på partikulær form (ingen opløst jern tilgængelig). Prøvesæt 2 og 3 var begge fra 1. gangtid ved flow på hhv. 30 og 40 m³/t.

For prøvesæt 5, 6 og 7 var mangan i udløbet primært i opløst form (total mangan og opløst jern ens). Prøvesæt 5, 6 og 7 blev alle taget med et flow på 40 m³/t.

Igen adskilte prøvesæt 1 umiddelbart efter afsugning af filtermateriale sig væsentlig fra de øvrige prøvesæt.



FIGUR 14. L1: Funktion af forfilter – Ammonium.

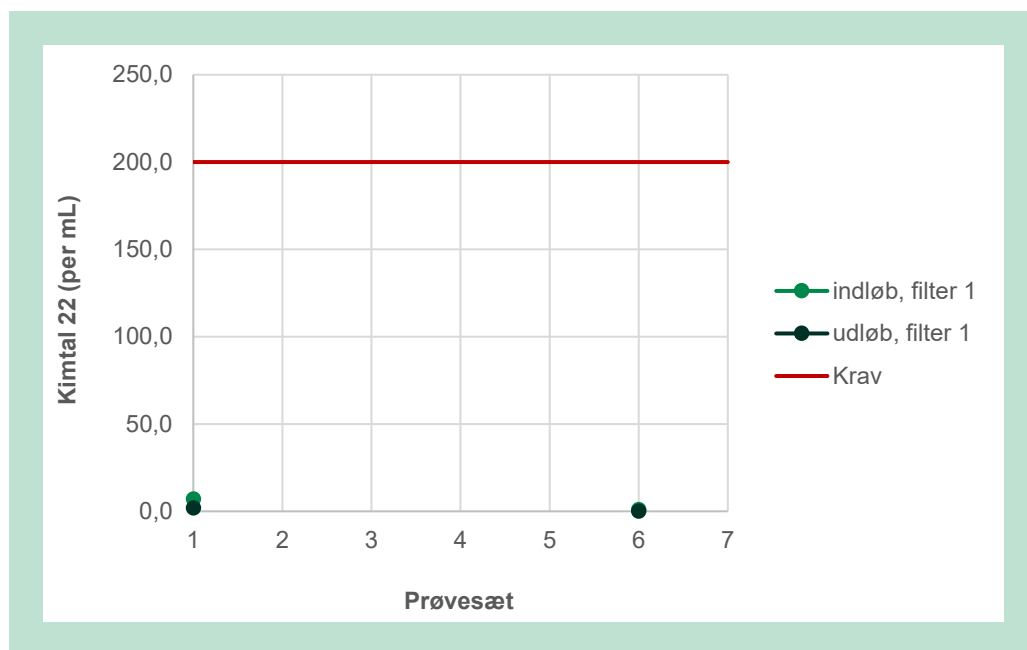
Ønsket med forfilteret var at fjerne så lidt ammonium som muligt.

I Starten af 1. gangtid blev flow 20, 30 og 40 m³/t testet (FIGUR 14, prøvesæt 1, 2 og 3). Resultatet fra 1. prøvesæt diskuteres senere. Ved flow på 30 m³/t (prøvesæt 2) blev der fjernet

væsentligt mere ammonium end ved flow på 40 m³/t (prøvesæt 3). Herefter blev det høje flow på 40 m³/t bibeholdt som minimum flow for at få så meget ammonium som muligt over på efterfilteret.

Ca. halvdelen af ammonium blev fjernet i forfilteret med et flow på 40 m³/t, således at det ammonium indhold som efterfilteret modtog, var ca. 0,15 mg/l svarede til 3 gange grænseværdien for ammonium.

Prøvesæt 3-7 blev alle udtaget med et flow på 40 m³/h. Der blev set en modning af forfilteret fra 1. gangtid (prøvesæt 3) til starten af 4. gangtid (prøvesæt 7), hvor mere og mere ammonium blev fjernet i forfilteret.



FIGUR 15. L1: Funktion af forfilter – Kimtal.

Under indkøring af forfilteret blev der målt kim 22 i starten af 1. gangtid (FIGUR 15, prøvesæt 1) samt slutningen af 4. gangtid (FIGUR 15, prøvesæt 6). Der blev højest målt 7 CFU/ml kim 22 i prøverne.

Diskussion

Prøvesæt 1: Sættet blev taget umiddelbart efter afsugning af ekstra filtermateriale samt kraftigt skyl. I normal drift på et vandværk ses der højere turbiditet efter et skyl som følge af de rester der er tilbage i filteret. De meget høje værdier af partikulært jern samt opløst mangan i dette forsøg tilskrives dette. I daglig drift ville man løse det med reduceret opstart eller ved at lede vandet retur til toppen af filteret umiddelbart efter filterskylning.

Jern: Som det ses af graferne, blev jern fjernet til under eller tangerende grænseværdien i alle prøvesæt med undtagelse af prøvesæt 7, hvor ufiltreret jern viser 0,27 mg/l. Prøvesættet 7 var fra slutningen af 4. gangtid. Gangtiden var sat op fra de normale 5.000 m³ til godt 7.000 m³ med manuel igangsættelse af hensyn til prøveudtagning. Det kunne forklare de høje værdier af jern(III) ved afgang fra efterfilteret idet forfilteret har været mættet med jern(III) og burde være skyllet før. Efterfølgende gangtider for forfilteret var 5.000 m³.

Mangan: Som det ses af graferne, blev mangan fjernet i forfilteret i alle prøvesæt med undtagelse af prøvesæt 1, hvor årsagen som tidligere nævnt vurderes at være manglende "sætning" af filteret efter skyl. En observation af at mangan blev fjernet til under grænseværdien i højere lag af filteret i forhold til ammonium, blev ligeledes dokumenteret i den overvejende del af 10 undersøgte fuldskala filtre i studie af Søborg et al, *In prep*.

Ammonium: Efter første filter afsugning blev ammonium i forfilteret fjernet til under grænseværdien (resultater ikke vist). Derfor blev der fjernet yderligere filtermedie. Se afsnit 4, Opstart af demo-anlægget.

Graferne viser, at forfilteret efter anden afsugning fortsat fjernede for meget ammonium (defineret som > 20%). Det blev dog vurderet at den opnåede koncentration af ammonium var nok til at fortsætte demonstrationsforsøget uden yderligere tilsætning af ammonium.

Det var overraskende hvor meget ammonium, der blev fjernet i forfilteret på trods af, at der næsten ikke var noget filtermateriale tilbage. Resultatet fra 1. prøvesæt udtaget umiddelbart efter afsugning viste meget fint resultatet af den voldsomme behandling (afsugning samt kraftig skylning), som filteret var udsat for med høje jern, mangan og ammonium værdier. Men allerede i løbet af få timer (prøvesæt 2, 30 m³/t) fjernede filteret både jern og ammonium. Yderligere blev der set en modning af forfilteret i forhold til ammoniumfjernelse fra 1. til 4. gangtid. I tidligere forsøg som blev indsamlet og samlet i rapport 1, blev det vist, at ammonium blev fjernet i hele dybden med undtagelse af de første 20 cm hvor jern blev fjernet. Dermed var det forventet at der var aktivitet i form af nitrificerende bakterier i bunden af forfilteret. Det blev dog ikke belyst yderligere i demonstrationsforsøg, idet der ikke blev set på niveauer af jern og ammoniumfjernelsen i dybder efter afsugning af materiale. Det kunne dog tyde på, at fjernelsen af ammonium var rykket ned til selve bærelaget idet der kun var 30 cm filtermedie tilbage efter afsugning.

Kimtal: Der var ikke tegn på problemer med kimal under indkøring af forfilteret. Se yderligere L8 der beskriver en infektion med coliforme bakterier i for- og efterfilter efter 47 dages kørsel.

Læringer til videre forsøg:

Forfilteret fjernede for meget ammonium ved flow under 40 m³/t.

Konklusion:

Samlet set viste resultaterne af L1, at forfilteret leverede vand med partikulært jern omkring eller under grænseværdien, ammonium omkring 0,15 mg/l og ingen mangan. Det var positivt, at al mangan blev fjernet i forfilteret, men dermed kunne efterfilterets evne til at fjerne mangan ikke undersøges i demonstrationsforsøget.

5.2 L2. Indkøring af nyt efterfilter

Baggrund

Det eksisterende Filter 1 blev tilpasset til demonstrationslinjen ved at afgrave filtermedie, således at den tilbageværende kvarts kun var i stand til at fjerne jern, men ikke ammonium. Lidt overraskende fjernede forfilteret også mangan (Se L1). Herefter blev forfilteret koblet til det nye efterfilter.

Formål

At fastlægge længden af opstartsperioden for ammonium, nitrit, mangan og kimal, når der bruges SmartSand.

Forsøg

Under indkøring blev det nye efterfilteres flowretning skiftet daglig (top mod bund og bund mod top). Indkøring blev fulgt over en periode på flere uger. Der blev udtaget vandprøver på forskellige vis, se nedenfor.

Forhold

- Indløbsvand var udløb fra det eksisterende forfilter
- Indløb til det nye filter blev skiftet daglig mellem top og bund af filtret
- Udløb blev sendt til vandløb indtil kvaliteten var acceptabelt, derefter til rentvandsbeholderne
- Flow var 20 m³/t de første to dage, herefter 40 m³/t, undtagen når der blev lavet forsøg med varierende flow

- Det nye efterfilter blev ikke returskyllet i indkøringsperioden

Anlægskrav

- Prøvetagningshaner i efterfilteret for hver 10 cm's dybde
- Prøvehane ved indløb og udløb til filtret
- 2 x Amtax-målere (3 kanaler i alt) (Resultater ikke anvendt pga. nedbrud i udstyr)
- Tilkoblinger til vandløb og rentvandsbeholdere
- Flowmåler

Prøver

- Manuelle fra indløb og udløb af efterfilteret: jern, mangan og kimal
- Manuelle dybdeprofiler fra efterfiltrets prøvehaner placeret i forskellige dybder: ammonium og nitrit
- Automatiske fra indløb, midt og udløb af efterfilteret: ammonium (resultater ikke anvendt pga. nedbrud af udstyr).

De 15 manuelle prøvesæt blev udtaget på dag 1 (opstartsdagen), dag 2, dag 7, dag 8, dag 16, dag 22, dag 29, dag 36 og dag 46. Alle prøvetagninger var med top mod bund flowretning undtaget dag 7 og 8 der var bund mod top.

Prøveudtagninger på opstartsdagen blev navngivet som hhv. 0,1 og 0,3 svarende til tidspunktet på dag 1. Tilsvarende blev datasæt 7.0 udtaget på dag 8 i forsøget.

Analyseparametre

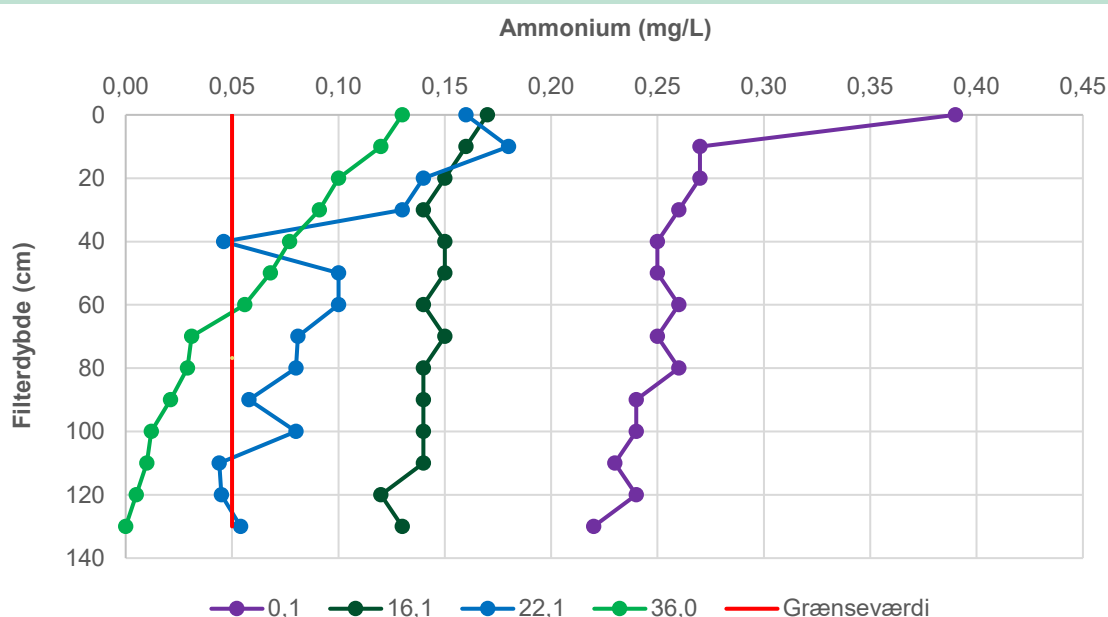
- Ammonium og nitrit (dybdeprofil måles af VCS og top/bund, AgroLab)
- Totalmangan (kun indløb/udløb, AgroLab)
- Totaljern (kun indløb/udløb, AgroLab)
- Analysepakken M0 (kimal 22, *E. coli* og coliforme bakterier) (kun indløb/udløb, AgroLab)

Resultater

Alle datasæt med undtagelse af datasæt 0,1 (opstartsdagen), blev taget med flow 40 m³/t og retning top mod bund. Datasæt 0.1 og 36.0 viser hhv. start og slut af indkøringsperioden. Ammonium var kørt ind efter 23 dage. Der blev ikke set en væsentlig forskel i kurveforløb på dage med modsatrettet flow (data ikke vist).

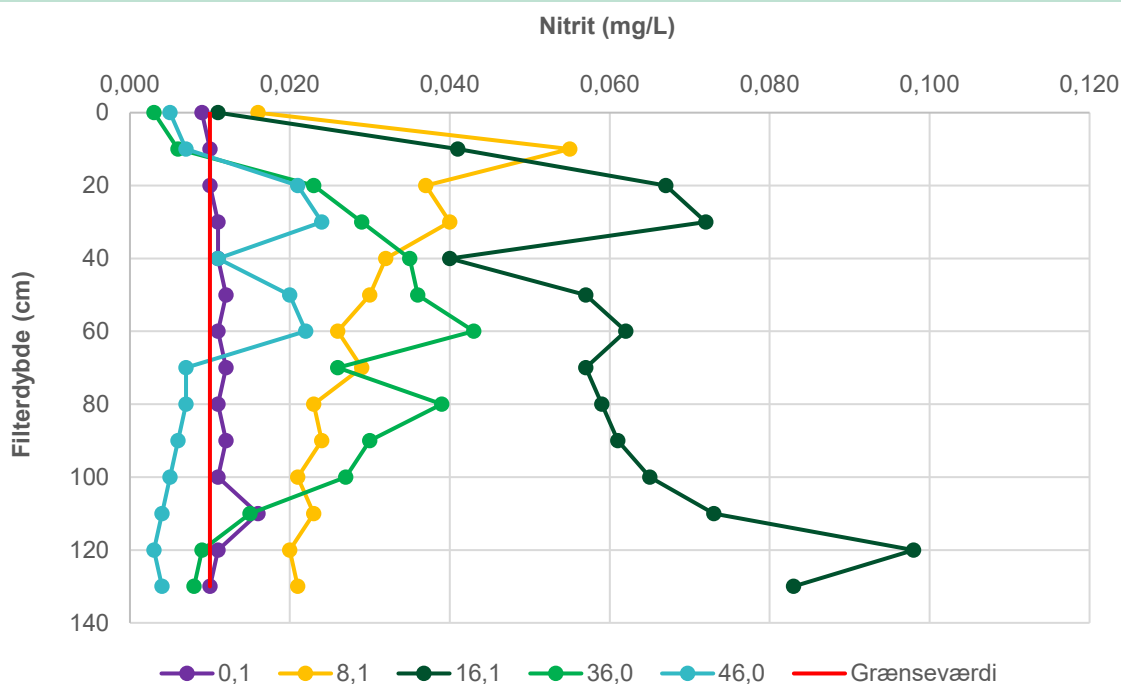
Nedenfor ses grafer for hhv. ammonium, nitrit, og mangan.

Første datasæt (0,1 FIGUR 16) blev udtaget i starten af forfilterets 1. gangtid med 20 m³/t (11,3 m/t). Indgangskoncentrationen af ammonium var høj (Se L1, Funktion af forfilter efter fjernelse af filtermateriale). Der blev fjernet knapt 1/3 ammonium i de øverste 10 cm af efterfilteret, hvorefter der blev fjernet yderligere 0,05 mg/l gennem resten af filteret.



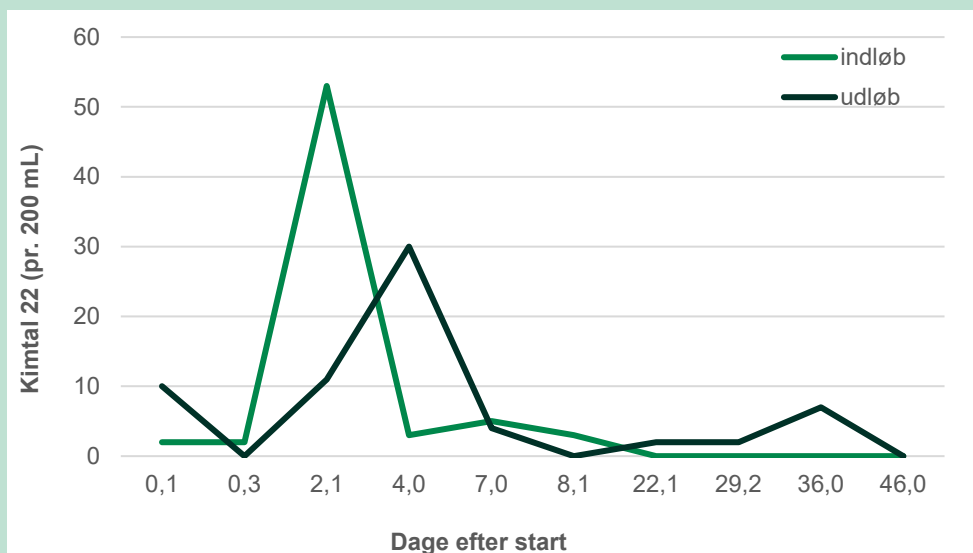
FIGUR 16. L2: Indkøring af efterfilter, ammonium. Kurverne viser dage efter start.

Efter 17 dage (datasæt 16,1 FIGUR 16), var indgangskoncentrationen til filteret faldet til ca. 0,17 mg/l og igen var fjernelsen i dybden ca. 0,05 mg/l til en koncentration i bunden af filteret på ca. 0,13 mg/l. Efter 23 dage (FIGUR 16, datasæt 22,1), var ammoniumfjernelsen for alvor kommet i gang og ca. halvdelen blev fjernet i de øverste 40 cm af filteret og til grænseværdien i 110 cm dybde. Efter 37 dage (FIGUR 16, datasæt 36,0), var ammoniumfjernelsen jævn gennem hele filteret og nåede grænseværdien i 70 cm dybde.



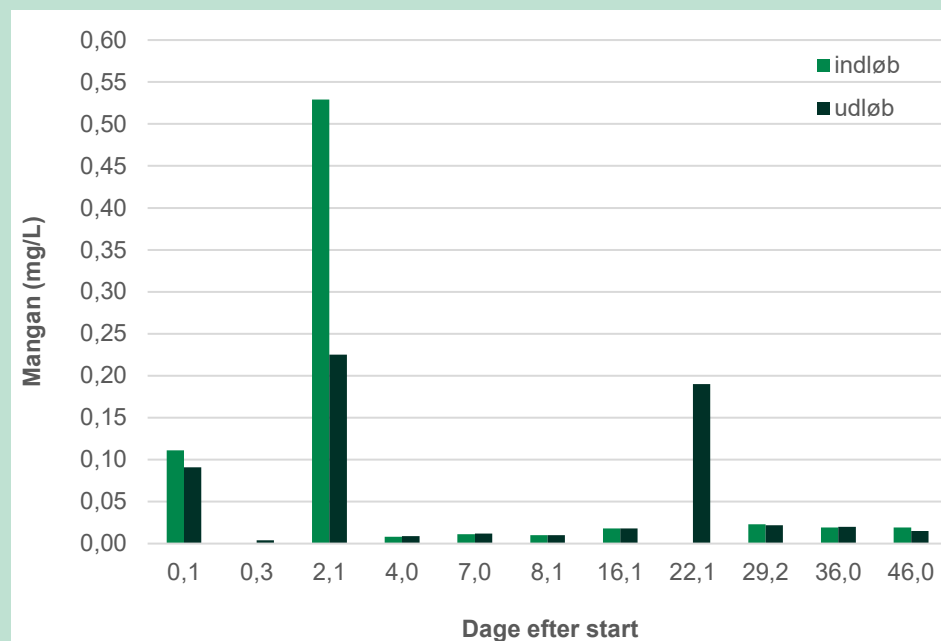
FIGUR 17. L2: Indkøring af efterfilter, nitrit. Kurverne viser dage efter start.

I starten af forsøget, var nitritindholdet jf. FIGUR 17 lavt (datasæt 0,1), men steg herefter kraftigt. Først steg indholdet af nitrit i den øvre del af filteret i 10 cm dybde (dag 8.1), herefter i hele filterets dybde (datasæt 16.1), hvorefter værdierne faldt til under vejledende kvalitetskriterie (afgang vandværk) på 0,01 mg/l efter 37 dage i 120 cm dybde (datasæt 36,0). Nitrit var indkørt på det nye efterfilter efter 37 dage. Efter yderligere 10 dage (datasæt 46,0) var nitrit under 0,01 mg/l i 70 cm dybde og den højeste målte værdi var 0,024 mg/l.



FIGUR 18. L2: Indkøring af efterfilter, mikrobiologi, kim 22 °C.

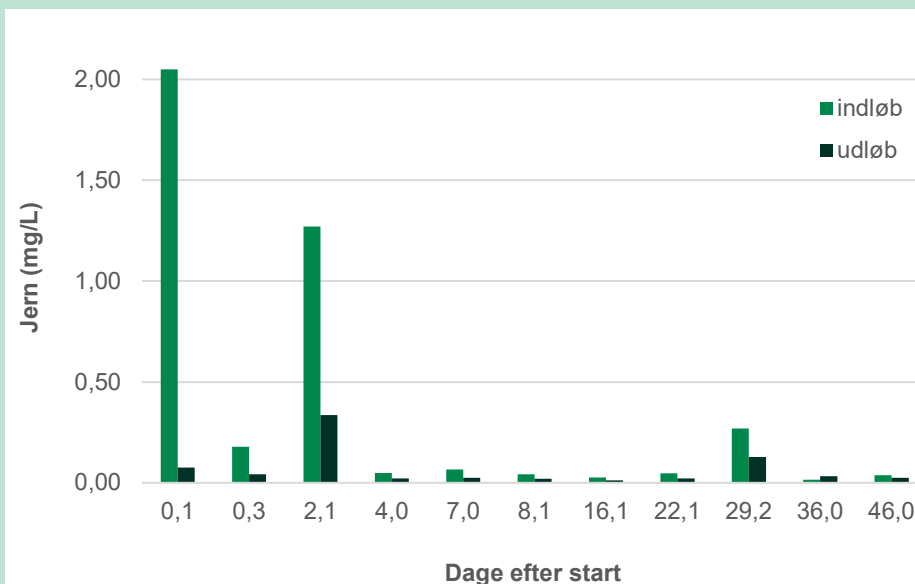
Kimtallene ved 22 graders inkubering var >50 CFU/ml i indløb i starten af forsøget (FIGUR 18). Kimtallet faldt til under 10 CFU/ml efter 8 dage (datasæt 7,0) og forblev lave i resten af forsøget.



FIGUR 19. L2: Indkøring af efterfilter, mangan (total).

Jf. FIGUR 19, blev der målt mangan over grænseværdien umiddelbart efter opstart (datasæt 0,1) samt umiddelbart efter justering af flow fra 20 til 40 m³/t (datasæt 2,1). Resten af perioden var mangan-niveauet i indløb og udløb under grænseværdien. Forskellen mellem indløb og udløb var lille.

Ved datasæt 22,1 ses en høj værdi af mangan i udløb, men under detektionsgrænsen i indløb. Denne værdi anses ikke som korrekt.



FIGUR 20. Indkøring af efterfilter, jern (total).

Jern blev hovedsageligt fjernet i forfilteret, se L1. Ved opstart af efterfilteret (FIGUR 20, datasæt 0,1 dage) samt ved ændring af flow fra 20 til 40 m³/t (datasæt 2,1), blev der set gennembrud af jern fra forfilteret til efterfilteret. Resten af perioden blev der set værdier under grænseværdien på 0,20 mg/l jern i både indløb og udløb med undtagelse af datasæt 29,2. Denne dag blev der observeret kakaofarvet vand ved de 3 nederste prøvehaner. Prøvesættet er udtaget i slutningen af forfilterets 4. gangtid, hvor der i L1 blev set overskridelse af kravværdi i udløb fra forfilteret grundet lang gangtid af dette (7.000 m³ mod normalt 5.000 m³).

Diskussion

Ammonium:

Oprindeligt var det planlagt at køre forsøget med et flow på 20 m³/t svarende til 11 m/t. Imidlertid blev for meget ammonium fjernet på forfilteret, og flowet blev derfor sat op til 40 m³/t (23 m/t) under resten af indkøringen af efterfilteret. Fjernelsen af ammonium begyndte mellem dag 9 og 17 (FIGUR 16). Efter 23 dage var ammonium blevet fjernet til under kvalitetskravet på 0,05 mg/l. Undervejs, var modningen af filteret tydelig. Efter kvalitetskravet var opnået, gik der yderligere 10 dage, hvorefter det kun var halvdelen af filterets dybde der var nødvendigt for at komme under grænseværdien. Dermed var der fortsat kapacitet i efterfilteret i modsætning til det oprindelige Filter 1, hvor hele dybden blev anvendt til at fjerne ammonium. (Se rapport 1).

Det var forventet, at indkøringen af ammonium ville tage en uge. I demonstrationsforsøget blev der set en væsentlig længere indkøringstid (23 dage) der var mere end 3 gange så lang som forventet. Årsagerne til dette kan være mange. F.eks. var flow i efterfilteret meget højt. Normalt dimensioneres et vandværksfilter til et flow på 8 - 10 m/t i et lukket efterfilter som der står beskrevet i bogen Vandforsyning om enkelt- og dobbeltfiltrering. I demonstrationsforsøget

på Lundeværket, blev indkøringen testet med et flow der var mere end dobbelt så højt. Det var også det dobbelte af det oprindeligt planlagte flow.

Perioden fra SmartSand forlod Dansk Kvarts Industri A/S til bakterierne igen fik ammonium var på 12 dage. I den periode fik filteret i princippet rent vand, idet forfilteret fjernede ammonium for effektivt frem til der blev suget yderligere filtermateriale af. Derfor viste demonstrationsforsøget indkøring under lidt ekstreme forhold. Både i forhold til udsultning af bakterierne inden opstart samt det meget høje flow under selve indkøringen.

Det blev overvejet, om der i stedet skulle doseres ammonium for at øge indgangskoncentrationen. Dog blev det vurderet, at indgangskoncentrationen på ca. 0,15 mg/l ammonium var tilstrækkelig til at fuldføre resten af demonstrationsforsøget.

Nitrit:

Resultaterne med stigning i nitrit under indkøringen stemte meget godt overens med at efterfilteret begyndte at fjerne ammonium og dermed danne nitrit. Derimod var den videre omdannelse af nitrit til ammoniak endnu ikke modnet. Der gik 37 dage fra starten af indkøringen, til nitrit igen var under det vejledende kvalitetskriterie for vandværker på 0,01 mg/l.

Det var overraskende, hvor store koncentrationer af nitrit der blev opnået i filteret under indkøring (FIGUR 17, datasæt 16,1), hvor nitritkoncentrationen næsten var på grænseværdien hos forbruger. Grænseværdien hos forbruger på 0,10 mg/l blev aldrig overskredet i dette demonstrationsforsøg.

Mangan:

Langt de fleste værdier lå under detektionsgrænsen både i indløb og udløb og på omtrent samme niveau (FIGUR 19). Dette kunne tyde på at mangan ikke fjernes i efterfilteret. Undtagelse herfra var ved datasættene 0,1 samt 2,1. Her blev der set høje værdier af mangan i indløb og markant lavere værdier i udløb. Datapunkt 22,1 blev anset som en fejlprøve. Årsagen var sandsynligvis mere en fejl ved analysen end forurening fra prøveudtaget, idet jern analyseret fra samme flaske, ikke viste høje værdier.

Det var for få målepunkter til at konkludere andet, end at efterfilteret og dermed SmartSands evne til at fjerne mangan ikke kunne undersøges til fulde i denne forsøgsopstilling.

Jern:

Hovedparten af jern blev fjernet på forfilteret som forventet (FIGUR 20). De højeste koncentrationer ved indløb til efterfilteret var 0,27 mg/L, hvis man så bort fra opstartsdagen. Udløb fra efterfilteret overholdt alle kvalitetskravet på 0,20 mg/l, med undtagelse af datasæt 2,1, hvor flow blev sat op fra 20 til 40 m³/t. Der var ikke tendens til tilklogning af efterfilteret. En forklaring på dette kunne være den dagligt skiftende flowretning. F.eks. blev der ved prøveudtagning ved datasæt 29 (top mod bund) observeret kakaofarvet vand ved de 3 nederste prøvehaner. Dette blev ikke observeret på andre dage, hvilket kunne tyde på, at eventuelle aflejringer af jern fjernes ved ændring af flowretning. Ved prøveudtagning af efterfilteret efter 1. gangtid, blev der desuden ikke observeret aflejring på sandkornene. Sandkornene lignede visuelt nyt filtermateriale.

Konklusion:

Ammonium blev indkørt på efterfilteret med SmartSand på 23 dage. Nitrit blev dannet under ammoniumfjernelsen og kom under vejledende kvalitetskriterie på 0,01 mg/l 37 dage efter opstart af demonstrationsforsøget. Nitrit var dermed en kritisk parameter under indkøring af det nye efterfilter. Kortere indkøring ville sandsynligvis kunne opnås under andre forhold.

5.3 L3 a & b. Kapacitet af det nye efterfilter

Baggrund

Disse forsøg blev udført efter det nye efterfilter var indkørt. Ideen med at veksle dagligt med nedadrettet og opadrettet flow var at etablere biomasse både i top og bund af filtret og på den måde forøge kapaciteten for ammoniumfjernelse. Det var forventningen, at hvis efterfiltrets ammoniumbelastning var høj (enten via højt flow, høj koncentration eller en kombination), så ammonium ikke når at blive omsat i den første halvdel af filtret, at det så kunne fjernes ved mødet med en veludviklet biomasse i den anden halvdel af filtret. Ideen med at fjerne jern på et forfilter og undgå hyppige returskyl på efterfiltret var at skabe endnu mere biomasse, hvor med fjernelseshastighed øges.

Formål

At fastlægge efterfiltrets ammoniumfjernelseskapacitet.

Forsøg

Dette forsøg var inddelt i a) kapacitet ved 3 forskellige flows og b) kapacitet ved 3 forskellige ammoniumkoncentrationer (ikke udført). Forsøg L3a blev udført i 1. gangtid samt ved projekt-slut. Forsøg L3b blev ikke udført.

Forhold

- Indløbsvand er udløb fra det eksisterende forfilter
- Udløb sendes til rentvandsbeholderne (flowforsøg) eller bækken (doseringsforsøg – ikke udført)
- Flow og ammoniumkoncentration mellem forsøgene var 40 m³/t og uden ekstradoser
- De 2 testede flows var 40 og 50 m³/t (23 og 28 m/t) målt i slutningen af 3. gangtid, start 4. gangtid, slut 4. gangtid og start 5. gangtid (kun 50 m³/t).

Anlægskrav

- Prøvetagningshaner, vandhane ved indløb og udløb
- Trykmålere ved indløb og udløb
- Flowmåler

Prøver

Der blev udtaget dybdeprofiler af vandprøver fra prøvetagningsportene (12 prøver) efter 1 times drift med det nye flow.

Analyseparametre

- Ammonium (AgroLab)
- Nitrit (AgroLab)
- Mangan (AgroLab)
- Tryk (manuel aflæsning ved indløb og udløb af efterfiltret).

Resultater

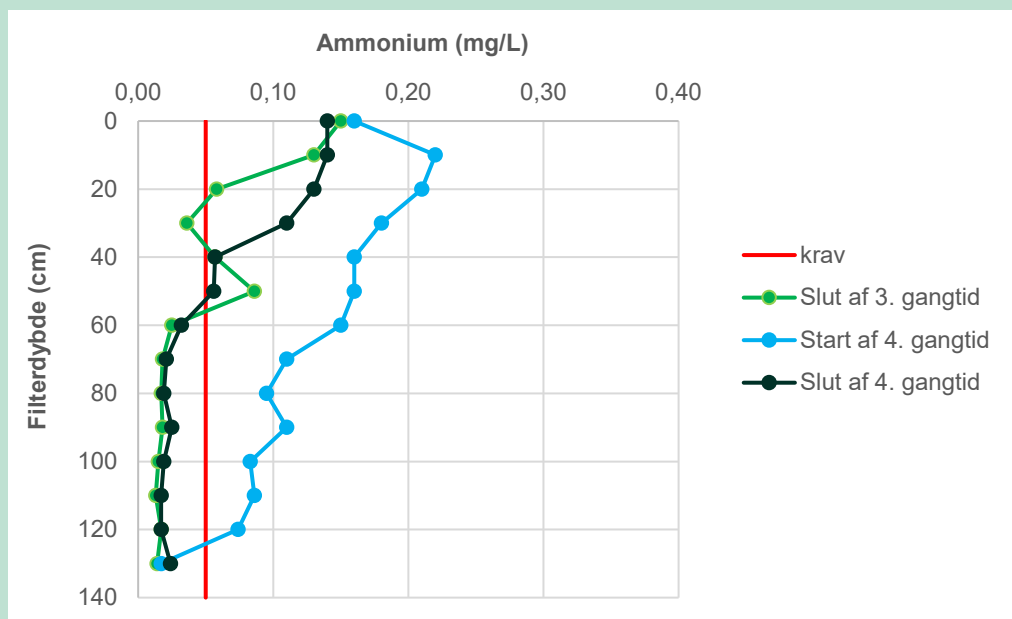
Oversigt over gangtider:

Alle prøverne til L3 kapacitetstests blev udtaget i gangtid 3, 4 og 5. Demonstrationsforsøget sluttede i 5. gangtid. Pilene markerer udtagning af sandprøver til L4, Biomasse. 2. gangtid var 6 dage.



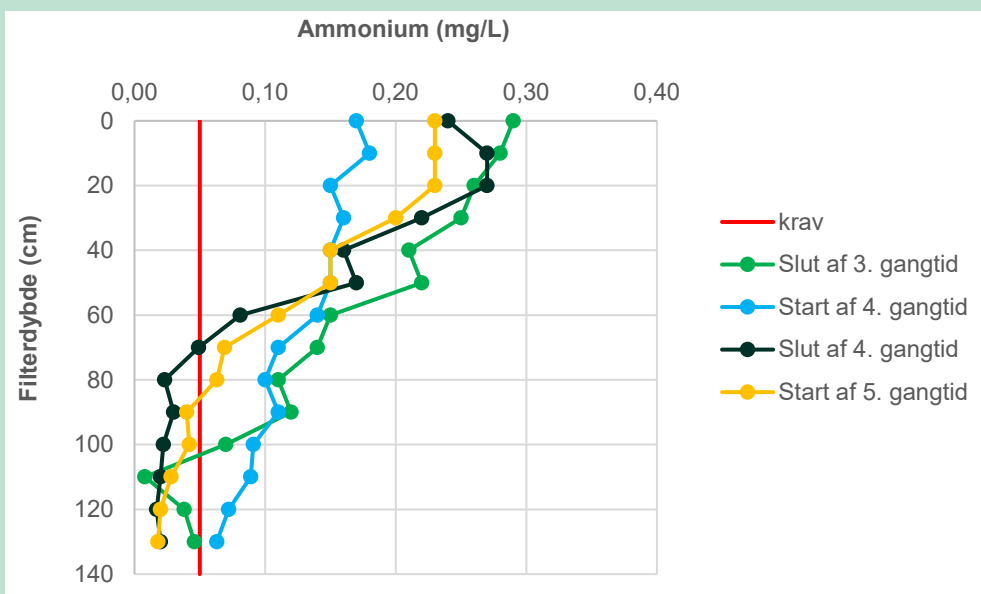
FIGUR 21. Gangtider gennem demonstrationsforsøget. Pilene markerer udtagning af sandprøver.

Resultaterne af kapacitetstests ved 40 og 50 m³/t (23 og 28 m/t) ses på FIGUR 22-25.



FIGUR 22. Dybdeprofiler for ammonium ved flow på 40 m³/t (23 m/t) i slutningen af 3. og 4. gangtid samt starten af 4. gangtid.

På FIGUR 22 ses at ammonium blev fjernet i 60 cm filterdybde ved flow på 40 m³/t (23 m/t) i slutningen af både 3. og 4. gangtid. Efter filterskylning (start 4. gangtid) viste resultaterne en noget anderledes profil, hvor ammonium først kom under grænseværdien i bunden af filteret. Resultater fra starten af 4. gangtid, se diskussion.

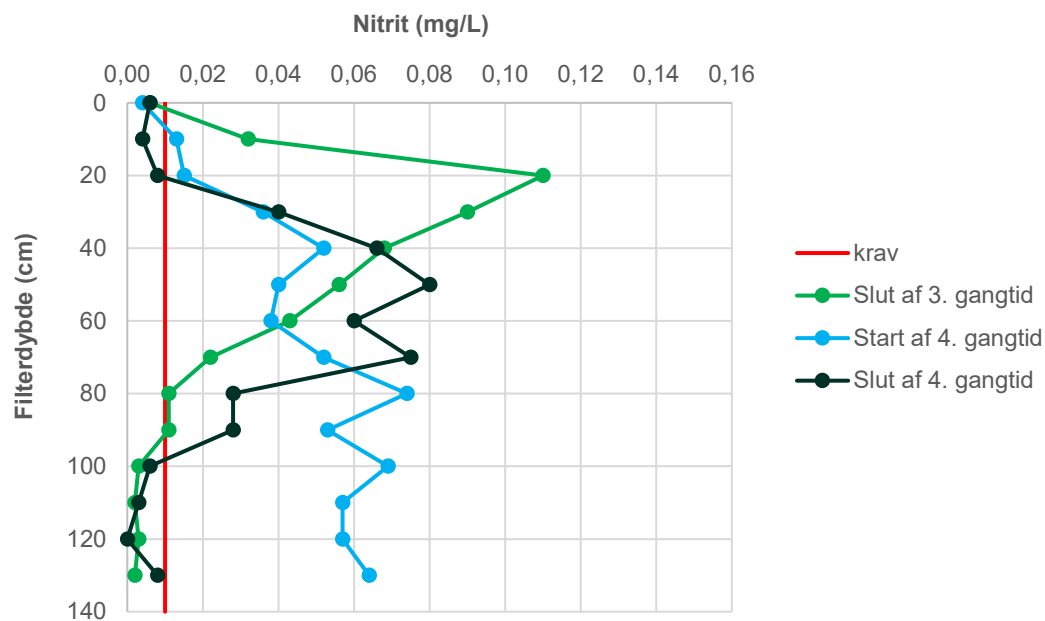


FIGUR 23. Dybdeprofiler for ammonium ved flow på 50 m³/t (28 m/t) i slutningen af 3. og 4. samt starten af 4. og 5. gangtid.

På FIGUR 23 ses dybdeprofiler ved et flow på 50 m³/t (28 m/t). Indgangskoncentrationen var øget idet fjernelse af ammonium i filter 1 var reduceret ved det højere flow. Fjernelsen af ammonium blev rykket længere ned i filteret ved det højere flow. I slutningen af 3. gangtid blev ammonium fjernet i 110 cm dybde, men fjernelsen rykkede højere op i filteret i takt med, at filteret modnede og blev fjernet i 80 cm dybde i slutningen af 4. gangtid.

I slutningen af 4. gangtid og starten af 5. gangtid er ammoniumfjernelsen mest stejl i 20-60 cm dybde.

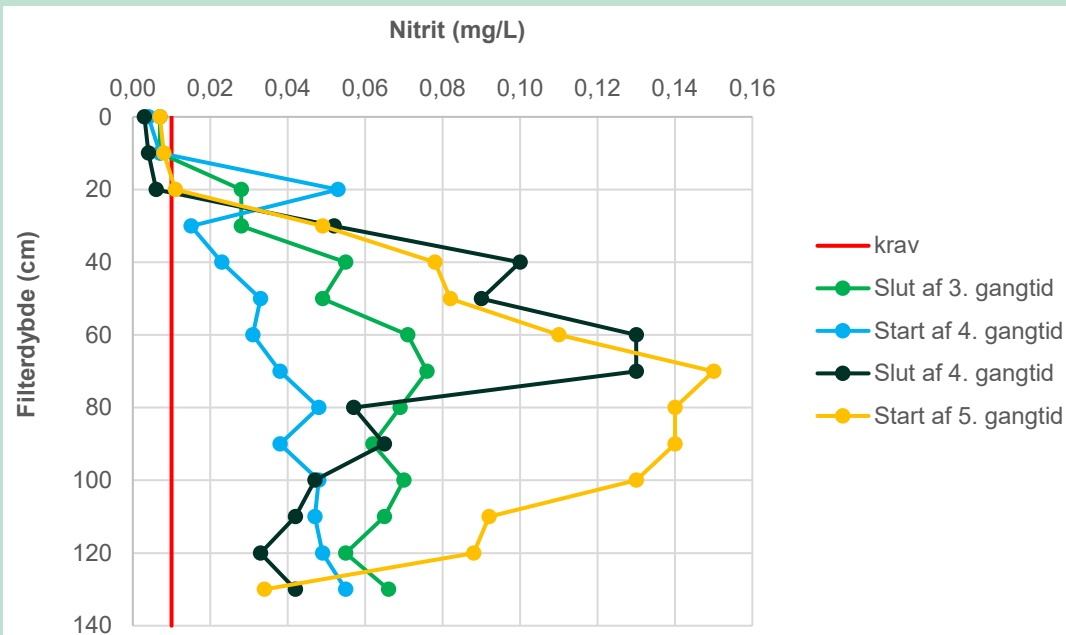
Ammonium blev fjernet til under grænseværdien i alle prøvesæt med undtagelse af starten af 4. gangtid, se diskussion.



FIGUR 24. Dybdeprofiler for nitrit ved flow på 40 m³/t (23 m/t) i slutningen af 3. og 4. gangtid samt starten af 4. gangtid.

På FIGUR 24 ses at der blev dannet nitrit ned gennem filteret. Dannelsen af nitrit skete i takt med omdannelsen af ammonium. I slutningen af 3. gangtid, skete dannelsen højt i filteret med høje værdier (op til 0,15 mg/l i 20 cm dybde). I slutningen af 4. gangtid var dannelsen rykket længere ned i filteret og værdierne var lavere end i slutningen af 3. gangtid.

Der findes ikke en grænseværdi for nitrit på afgang vandværk. Vejledende kvalitetskriterie for nitrit på afgang vandværk er 0,01 mg/l. Grænseværdien for nitrit hos forbruger er 0,10 mg/l. Nitrit blev fjernet til under vejledende kvalitetskriterie for afgang vandværk (0,01 mg/l), i 80-100 cm filterdybde ved flow på 40 m³/t (23 m/t) i slutningen af både 3. og 4. gangtid. Efter filterskylning (start 4. gangtid) viste resultaterne nitrit over vejledende kvalitetskriterie for afgang vandværk, men overholdt grænseværdien ved taphanen (0,10 mg/l), se diskussion.



FIGUR 25. Dybdeprofiler for nitrit ved flow på 50 m³/t (28 m/t) i slutningen af 3. og 4. gangtid samt starten af 4. og 5. gangtid.

På FIGUR 25 ses igen, at der blev dannet nitrit ned gennem filteret. Den højeste målte værdi var i starten af 5. gangtid med en værdi på 0,15 mg/l i 70 cm dybde.

I slutningen af 4. gangtid og starten af 5. gangtid ses en kraftig stigning i nitrit i 20-60 cm dybde.

Nitrit var over vejledende kvalitetskriterie (0,01 mg/l) i bunden af filteret ved flow på 50 m³/t (28 m/t), men under grænseværdien ved taphanen (0,10 mg/l).

Diskussion

Oprindeligt blev L3a planlagt til at blive udført ved flowene 20, 30 og 40 m³/t. Ved 20 og 30 m³/t kom der dog ikke nok ammonium over på efterfilteret og dermed var 40 m³/t det laveste flow der blev anvendt. Det højeste flow der blev anvendt var 50 m³/t svarende til det højeste flow, som pumpen kunne levere.

I FIGUR 21 og FIGUR 22, blev ammoniumfjernelsen ved de testede flows i forsøgsperioden opsat kronologisk. I disse skilte dybdeprofilerne i starten af 4. gangtid sig ud ved at være de eneste profiler, hvor ammonium ikke blev fjernet til under grænseværdien. Det skal bemærkes, at skylningen efter 3. gangtid ikke foregik helt som forelagt i protokollen, idet skyllevandsventilen kortvarigt var helt åben svarende til et flow på ca. 300 m³/t (mod 135-139 m³/t i protokol). Dette gav anledning til en del filtergrus i skyllevandet idet filteret blev løftet. Desværre blev der ikke udtaget sandprøver ved opstart af 4. gangtid, men den kraftige påvirkning kan have været medvirkende til, at filteret havde svært ved at komme i gang igen i starten af 4. gangtid med høje ammoniumværdier til følge.

Det var derfor spændende at se, hvordan filteret opførte sig i starten af 5. gangtid (kun testet ved 50 m³/t), hvor skylningen foregik med et flow på 138 m³/t som foreskrevet. Denne profil lignede profilerne taget i slutningen af 3. og 4. gangtid i forhold til ammoniumfjernelsen, hvilket kunne bekræfte formodningen om at skylningen efter 3. gangtid var for kraftig. Der blev derfor set bort fra resultaterne i starten af 4. gangtid.

Dybdeprofilerne i FIGUR 22 med flow på 50 m³/t (28 m/t) viste, at hele dybden blev anvendt til at fjerne ammonium, og flowet dermed var tæt på den kapacitet, som efterfilteret kunne klare.

Kurvens forløb viste, at der var aktivitet i bunden af filteret. Dette var også forventet med den alternerende drift, hvor der skiftevis blev ført vand ind i toppen og bunden af filteret.

I slutningen af 4. gangtid og starten af 5. gangtid ved flow på 50 m³/t var ammoniumfjernelse mest stejl i 20-60 cm dybde. Det må være her, at nitrit blev dannet. Fjernelsen af nitrit kunne tilsyneladende ikke holde trit med dannelsen (FIGUR 24). Det kunne skyldes, at flowet var højt og at fjernelsen havde behov for længere opholdstid.

Samlet set viste resultaterne af kapacitetsforsøget, at grænsen for omsætningen af ammonium ikke blev nået ved de testede flows. Omsætningen af nitrit gik først i gang når stoffet blev dannet i takt med at ammonium blev fjernet. Grænsen for nitritfjernelsen blev bestemt til et sted mellem 40 og 50 m³/t svarende til 23-28 m/t.

Det var meget overraskende, hvor store værdier af nitrit der blev set i filteret. Dette blev taget til efterretning til fremtidige filterindkøringer, hvor det sandsynligvis også ville være muligt at øge kapaciteten yderligere ved at forlænge efterfilteret. Ud fra kurverne, kunne yderligere 20 cm filtergrus have betydning for kapaciteten af nitrit uden at øge diameteren af filteret.

Dybdeprofilerne i starten af 4. gangtid viste tydeligt formålet med hele demonstrationsforsøget. Bakterierne, der omsætter ammonium og nitrit, havde godt af de meget lange gangtider (77-102 dage). Men det kraftige skyl efter 3. gangtid nedsatte tydeligt kapaciteten af efterfilteret med høje ammonium og nitrit værdier til følge i starten af 4. gangtid.

Tryk (resultater ikke vist) var marginalt højere (ca. 1 mVS) ved det højere flow, hvilket indikerede en let øget modstand i filtermediet eller i filterbund/rør. Dette havde ikke betydning under demonstrationsforsøget.

Opsummering af L3a:

- Ammonium blev fjernet til under grænseværdien med de testede flows på 40 og 50 m³/t (23-28 m/t) og viste dermed god performance selv ved højt flow.
- Nitritdannelsen var overraskende høj ned gennem efterfilteret.
- Kapaciteten for nitritfjernelsen var overskredet ved flow på 50 m³/t (28 m/t), men ikke 40 m³/t (23 m/t).
- På bagkant havde det været godt at teste et flow ved 45 m³/t (25 m/t) for at komme tættere på grænsen for nitritfjernelse.
- Fjernelsen af ammonium skete højere oppe i efterfilteret efterhånden som filteret modnede.
- Kraftigt skyl (efter 3. gangtid) havde en negativ indflydelse på omsætningen af ammonium og nitrit og viste tydeligt bakteriernes behov for ro til omsætningen.

5.4 L4. Biomasse

Baggrund

Det særlige ved det nye efterfilter (skiftende flowretning og lange gangtider) skulle gøre det muligt at opnå større biomasse. I forsøget L3 blev effektiviteten målt. I forsøg L4 blev indikatorer for selve den aktive biomasse målt.

Formål

At kvantificere den aktive biomasse i filtermediet.

Forsøg

Sandprøver blev udtaget fra 3 dybder (top, midte og bund). Forsøget blev foretaget i starten af 1. gangtid, slutningen af 1. gangtid, starten af 2. gangtid, slutningen af 3. gangtid, slutningen af 4. gangtid samt starten af 5. gangtid. Pilene på FIGUR 21 markerer udtagning af sandprøver. 2. gangtid var 6 dage (FIGUR 21).

Forhold

- Ved filtermedieprøvetagning af det nye efterfilter med spyd blev filtret drænet ved at åbne efterfiltrets bundventil ca. 2 timer før prøvetagning.
- Returskyl foregik manuelt med vand alene. Prøver blev udtaget samme dag, hhv. før og efter returskyl.

Anlægskrav

Prøvetagningsspyd til portene på det nye efterfilter.

Bundventil i filtret.

Prøver

Filtermedieprøver blev udtaget fra 3 prøvetagningsporte (20 cm fra top, 80 cm fra top og 130 cm fra top) ved hjælp af prøvetagningsspyd (FIGUR 26).

Analyseparametre

ATP: analysen blev udført straks som dobbeltbestemmelse af VIA på 1 g prøve med Lumi-nUltra Technologies, Canada, DSA (deposit and surface analysis) kit og PhotonMaster fotometer efter producentens protokol.

qPCR: prøverne blev frosset, men blev ikke analyseret i perioden for demonstrationsforsøget.

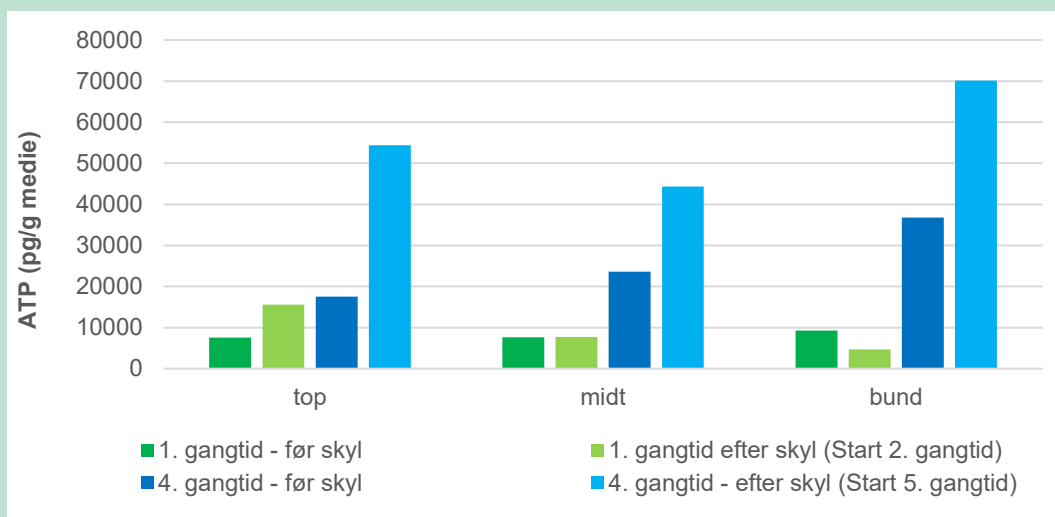


FIGUR 26. Udtagning af sandprøve med spyd fra 1" ventil (tv). Sandprøve udtaget og lagt i pose (th).

Resultater og diskussion:

ATP er et udtryk for den samlede bakterie aktivitet i filteret og medtager alle mikroorganismer. De nitrificerende bakterier udgør kun en brøkdel af alle mikroorganismer. Derfor kan værdien for ATP som indikator for nitrificerende bakterier være usikker.

Det var forventet at der ville ske en stigning i ATP fra 1. til 4. gangtid. Yderligere var det forventet at der ville ske et fald i ATP efter en skylning. På FIGUR 27 ses søjler for total ATP før og efter 1. og 4. filterskyl. Som forventet blev der set en stigning i ATP fra 1. gangtid til 4. gangtid som følge af at filteret blev mere modent.



FIGUR 27. L4. Total ATP i filtermediet i top, midt og bund efter 1. og 4. skylning af efterfilteret.

Det var glædeligt at se at der fortsat var aktivitet i filteret trods 12 dage forud, hvor efterfilteret kun fik leveret rent vand (Se 5.1. L1, Indkøring af forfilter).

Det var forventet at total ATP ville falde under filterskylningerne som udtryk for, at bakterierne ville blive skyllet ud med skyllevandet. Som det ses af FIGUR 27, stiger niveauet af ATP i toppen efter første filterskyl mens det faldt i bunden. Dette hænger muligvis sammen med, at filteret skylles fra bunden mod toppen, hvorved bakterierne potentielt kan flyttes fra bund mod top. Det samme blev ikke set ved filterskylning efter 4. gangtid. Både før og efter filterskylning, var der mest aktivitet i bunden, herefter midten og til sidst toppen. Det var forventet, at der ville være høj aktivitet i toppen og bunden af efterfilteret som følge af ilægningen af SmartSand primært i top op bund. At der alligevel var så meget aktivitet i bunden af filteret skyldes med stor sandsynlighed den alternerende drift.

5.5 L5. Driftspause

Baggrund

Under normal drift på et vandværk sker der ofte stilstand i flowet om natten. Der vides ikke meget om hvilken indflydelse denne stilstand har for den producerede vandkvalitet i perioden umiddelbart efter genopstart af flow.

I demonstrationsanlægget blev flowretningen skiftet i det nye efterfilter dagligt. Hermed fik bakterier i top og bund af filtret pause i ammoniumindhold, men ikke i vandflow.

Formål

At kortlægge betydningen af stilstand i driften på drikkevandskvaliteten.

Forsøg

For at få hyppige målinger var det planen at måle ved hjælp af to Amtax målere. Pga. nedbrud i udstyret, blev det ændret til manuel prøveudtagning. Forsøget blev udført to gange. Første gang efter en driftspause på 7 dage. Herefter en driftspause på 15 dage. Forsøgene med driftsstop blev udført i 4. og 5. gangtid.

Forhold

- Indløbsvand var udløb fra det eksisterende forfilter
- Udløb blev sendt til rentvandsbeholderne
- Flow før stilstand var 40 m³/t i minimum 7 dage og efter stilstand var flowet også 40 m³/t

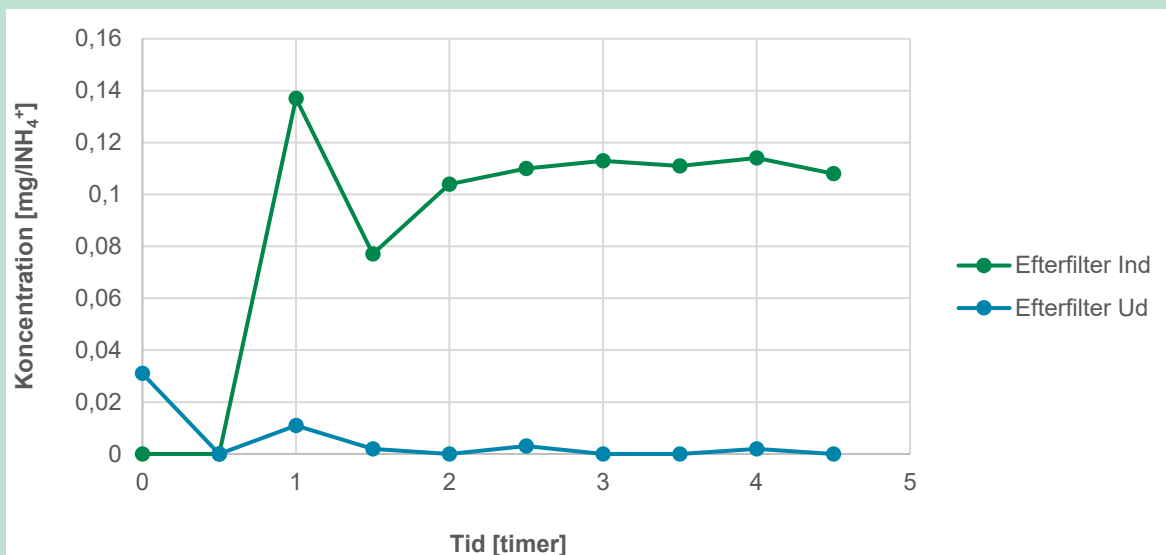
Prøver

Der blev udtaget manuelle prøver fra indløb og udløb af efterfilteret og analyseret med det samme med Hach ammonium kit.

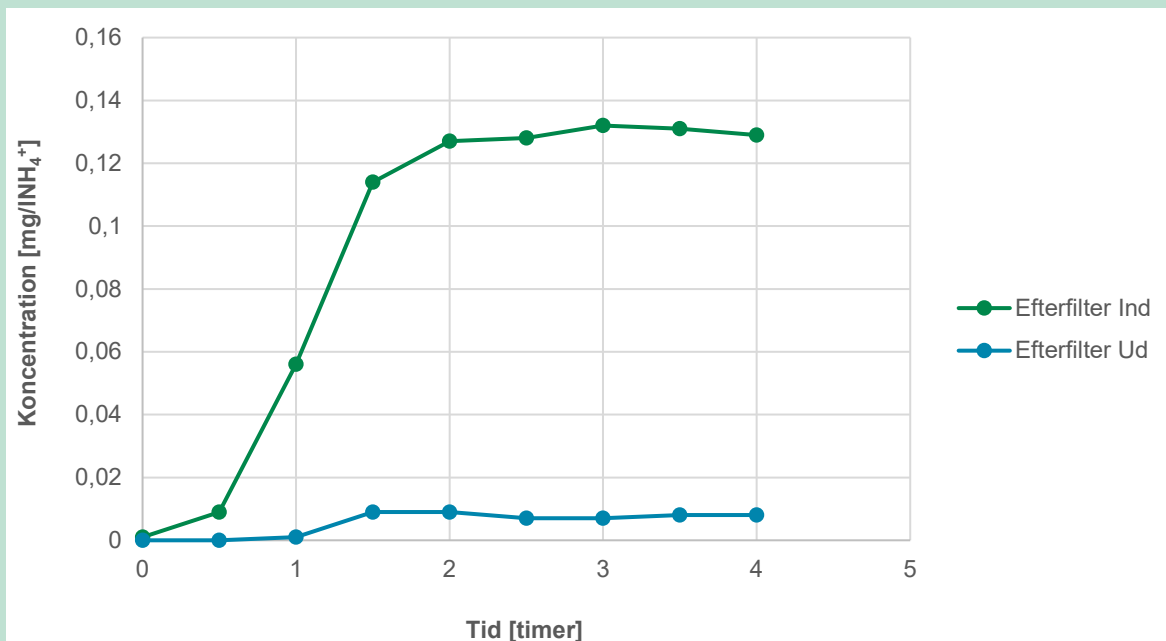
Analyseparametre

Ammonium (Hach ammonium analysekit LCK 304)

Resultater



FIGUR 28. Ammonium før (Ind) og efter (Ud) efterfilteret efter driftsstop på 7 dage. Flow var 40 m³/t (23 m/t).



FIGUR 29. Ammonium før (Ind) og efter (Ud) efterfilteret efter driftsstop på 15 dage. Flow var 40 m³/t (23 m/t).

FIGUR 28 og FIGUR 29 viser ammoniumfjernelsen efter driftsstop på hhv. 7 og 15 dage. På begge figurer ses at der ikke var ammonium til stede i indgangen til filteret ved forsøgets opstart. Efter ca. 2 timer blev der opnået et stabilt niveau omkring hhv. 0,11 og 0,13 mg/l på tilgangen til efterfilteret. I begge forsøg var ammoniumfjernelsen effektiv fra start og under grænseværdien i afgang fra efterfilteret under hele forsøget.

Diskussion

Driftsstop på 7 - 15 dage resulterede fortsat i meget lave ammoniumkoncentrationer (0,007-0,009 mg/l) og viste efterfilterets effektivitet trods lange driftsstop.

Under driftsstoppet stod forfilteret ligeledes stille med råvand. Dermed var reaktionstiden i forfilteret lang, hvilket gav mulighed for at al ammonium i forfilteret blev omdannet. Dermed var fødevandet til efterfilteret i starten af forsøget rent vand, hvilket kan forklare at der gik to timer inden ammoniumkoncentrationen ind på efterfilteret nåede et stabilt niveau (0,11 – 0,13 mg/l). Der blev ikke målt nitrit i disse forsøg, men det kunne have været interessant at se om nitritfjernelsen var lige så effektiv som ammoniumfjernelsen efter et driftsstop.

Det giver gode muligheder for fleksibilitet i driften på et vandværk, at et filter kan være ude i 7-15 dage ad gangen, uden at det giver en målbar forringelse af vandkvaliteten i forhold til ammoniumfjernelse. Det er velkendt at ammoniumomsætningen kan være udfordret på et vandværk, når flowet sættes op. Erfaringer fra demonstrationsforsøget kan med fordel udnyttes i driften af vandværksfiltre med henblik på større kapacitet og fleksibilitet, se også 6. Perspektivering.

5.6 L6. Undersøgelse af kontrolfilter til sammenligning

Baggrund

Det bedste bevis for at tilpasningerne på den nye filterlinje har medført væsentlige forbedringer er at sammenligne med data fra et kontrolfilter (eksisterende fuldskalafilter på Lundeværket), hvor der ikke er foretaget ændringer. I denne undersøgelse, blev der udført forsøg på Lundeværkets Filter 3 (kontrolfilter), som svarer til følgende forsøg på den nye filterlinje:

L3a – Kapacitet, flowændring

L5 – Driftspause

Formål

At indsamle data fra et kontrolfilter (hvor der IKKE var foretaget ændringer) for at kunne sammenligne med den nye filterlinje (hvor der VAR foretaget ændringer).

Forsøg

Forsøgene blev inddelt i A og B, svarende til hhv. L3 og L5.

L6A - Kapacitet: Der blev udtaget vandprøver ved følgende flow: 25, 40 og 50 m³/t ved start og slut af en gangtid på samme måde som L3. Der blev udtaget prøver fra indløb og udløb af filter 3.

Tilgangskoncentrationer: 0,37 – 0,38 mg/l ammonium.

L6B – Driftsstop: Der blev udtaget prøver fra udløb efter hvert kvarter i 4 timer.

Tilgangskoncentration: 0,294 mg/l. Flow de første 3 timer: 73 m³/t (4 m/t) – herefter 35 m³/t (2 m/t).

Forhold

- Indløbsvand til Filter 3 var iltet råvand
- Udløb blev sendt til rentvandsbeholderne
- Standard flow når der ikke udføres flowtests er 40 m³/t

Prøver

Der blev udtaget manuelle prøver af indløb og udløb.

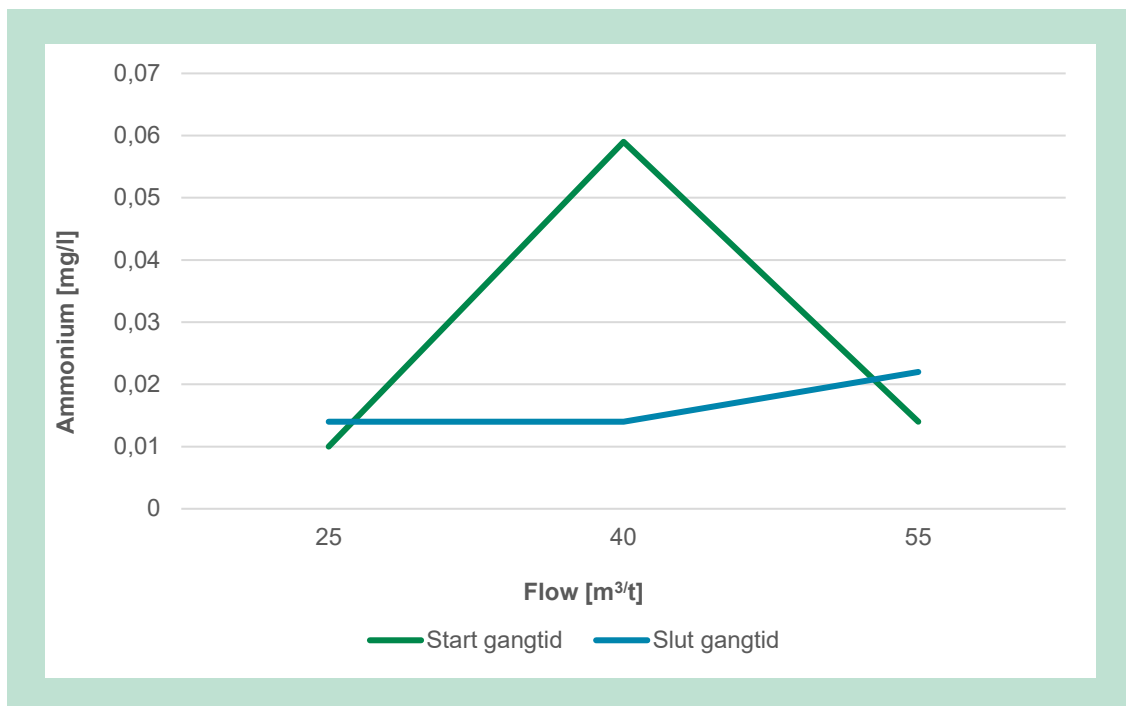
Analyseparametre

Som i forsøg L3a og L5.

Anlægskrav

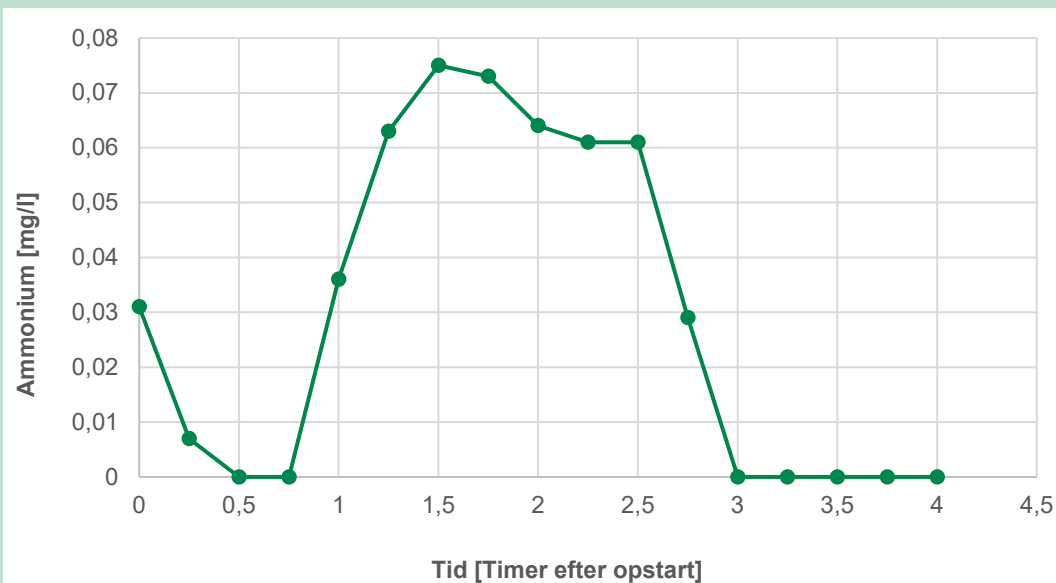
Flowmåler

Resultater



FIGUR 30. Ammonium i kontrolfilteret i starten og slutningen af en gangtid ved flow på 25, 40 og 55 m³/t (1,4; 2,2 og 3,1 m/t).

FIGUR 30 viser at ammoniumomsætningen i starten og slutningen af en gangtid er forskellig. I starten af en gangtid, viste flow ved 40 m³/t en utilstrækkelig fjernelse af ammonium med overskridelse af grænseværdien til følge.



FIGUR 31. Ammonium i udløb fra filter 3 efter 14 dages driftsstop. Indgangskoncentration: 0,294 mg/l ammonium. Flow de første 3 timer var 73 m³/t, herefter 35 m³/t.

FIGUR 31 viser ammoniumkoncentrationen efter 14 dages driftsstop. Efter en times drift, svarende til at nyt råvand kom ud af filteret, begyndte ammoniumkoncentrationen at stige og nåede efter 1,5 time det højeste niveau på 0,075 mg/l hvorefter værdien faldt. Efter 3 timers drift, var ammoniumkoncentrationen under detektionsgrænsen. Det blev valgt at starte op med et flow på 73 m³/t svarende til 4 m/t for virkelig at teste filteret af.

Diskussion

Det var væsentligt at teste ved de 73 m³/t for at være sikker på at filteret var tæt på sin maksimale kapacitet som er 90 m³/t. Forsøget viste at selv længere driftsstop var muligt uden store konsekvenser idet ammoniumkoncentrationen hurtigt (efter 2,75 timer) var under grænseværdien. Dette var en vigtig læring der fremover vil blive brugt i driften.

Muligheden for længere tids driftspause vil have stor betydning for vandværksdriften fremover, idet det giver mulighed for på skift at tage filtre ud af drift uden at miste bakteriekapacitet i de filtre, der står stille. Dette vil øge driftskapaciteten, se 6. Perspektivering.

5.7 L7. Indkøringsforsøg på kolonner

Baggrund

For at fremhæve den forskel, som SmartSand havde for indkøring, blev der udført et side-om-side indkøringsforsøg på to kolonner, hhv. med og uden SmartSand.

Formål

At visualisere, hvor meget SmartSand fremskynder indkøring.

Forsøg

Filtermedie blev fyldt i kolonnerne i forbindelse med indsætning af medie til fuldskala efterfiltret, dvs. med samme sand. Der blev afvejet 20% SmartSand og 80% nyt sand. De 2 sandtyper blev blandet i en plasticpose og derefter hældt på skift ind i den ene kolonne (kolonne med SmartSand). I den anden kolonne kom der 100% nyt sand (kontrolsand). Der var 10 cm bærelag og 70 cm filtermateriale i hver kolonne. Det gav $0,8 \text{ m} \times \pi (0,010)^2 \times 1,6 \text{ t/m}^3 = 0,5 \text{ kg}$ filtermedie total (ekskl. bærelag) i hver kolonne.

Forhold

- Indløb var udløb fra det eksisterende forfilter
- Udløb til dræn
- Flowretning – top mod bund
- Ingen returskylning af kolonnerne
- Kolonnefyld - 20% SmartSand og 80% nyt sand eller 100% nyt sand (kontrolsand).

Anlægskrav

- To kolonner (ø 200 mm PVC rør)
- Delstrøm fra mellempumpen mellem for- og efterfilter
- Bærelag (10 cm, 3-5 mm sand), 70 cm filtermedie bestående af
 - Kolonne med SmartSand: 20% SmartSand (1,2-2,0 mm) og 80% nyt sand (1,2-2,0 mm)
 - Kolonne med kontrolsand: 100% nyt sand (1,2-2,0 mm)

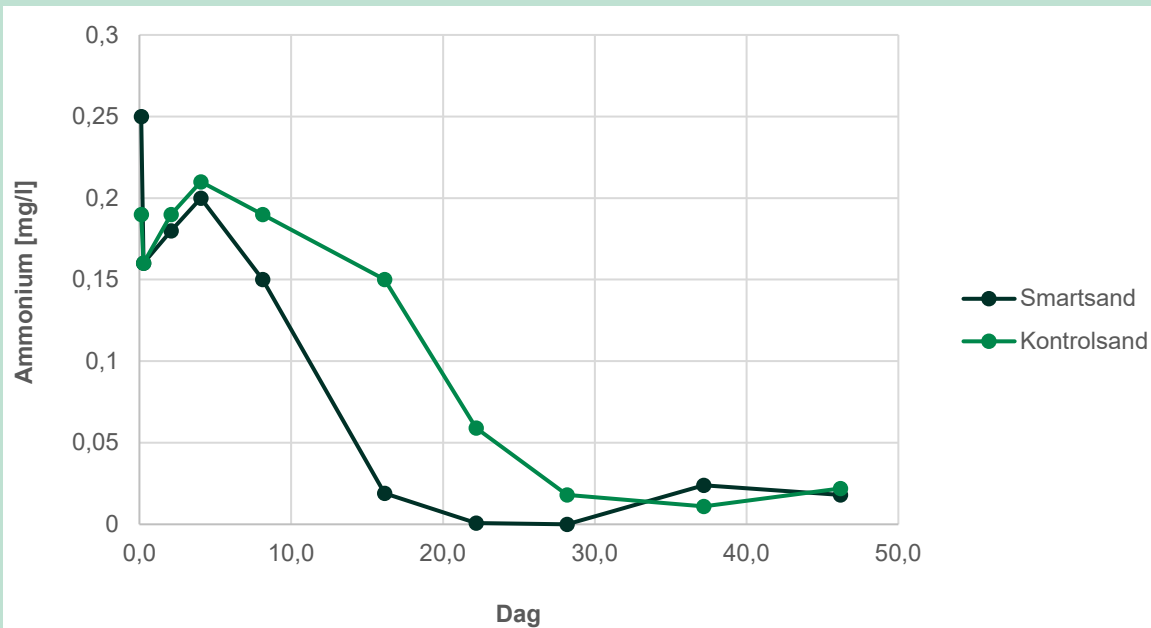
Prøver

Der blev målt ammonium og nitrit i vandprøver fra kolonnernes indløb (1 prøve) og udløb fra hver kolonne (2 prøver). Parametrene blev fulgt under indkøring af kolonnerne.

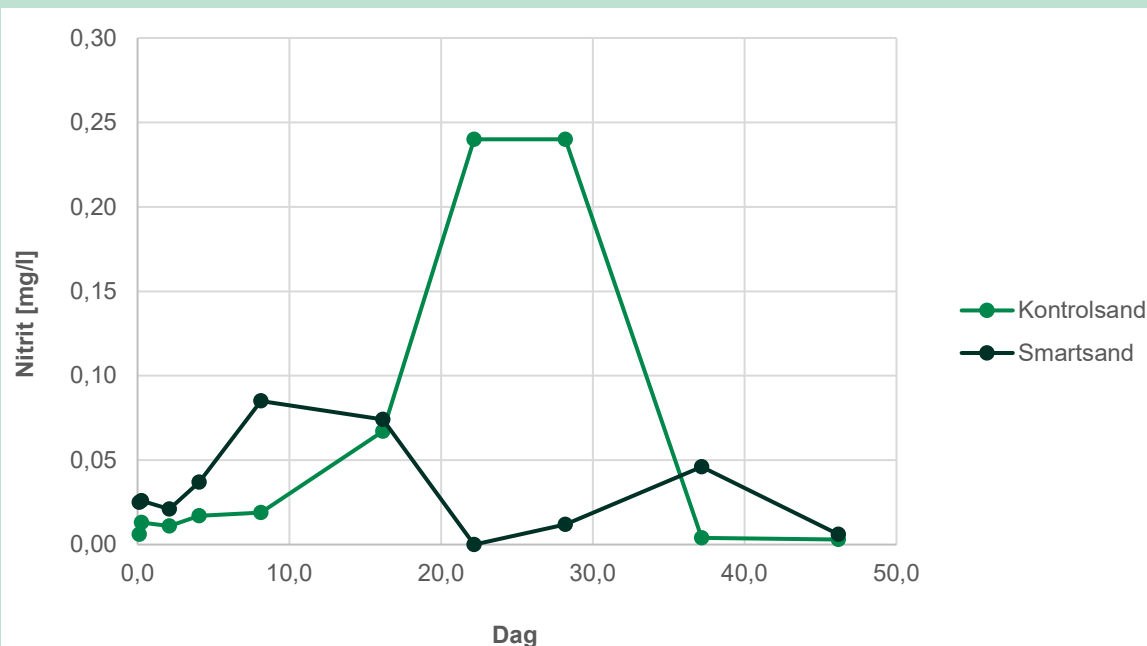
Analyseparametre

Ammonium og nitrit (AgroLab).

Resultater



FIGUR 32. Indkøring af ammonium med hhv. SmartSand og kontrolsand.



FIGUR 33. Indkøring af nitrit med hhv. SmartSand og kontrolsand.

Som det ses af graferne (FIGUR 32 og FIGUR 33), var der tydelige forskelle mellem forsøgs-kolonnen med SmartSand og forsøgskolonnen uden SmartSand. Ammonium blev målt til under grænseværdien på 0,05 mg/l på hhv. dag 17 for SmartSand og dag 29 for kontrolsand (FIGUR 31). SmartSand var dermed hurtigere indkørt i forhold til ammonium. Det var også forventet, idet podningen med ammonium skulle sørge for, at de ammoniumomsættende bakterier allerede var til stede i filteret fra start.

I takt med at ammonium blev fjernet, blev det omdannet til nitrit inden sidste omdannelse til nitrat.

Der blev set en stigning i nitrit på dag 3-7 for SmartSand med højeste værdi målt på dag 7 (FIGUR 33). I kontrolfilteret blev der set en stigning på dag 17-27 med højeste værdi målt til 0,24 mg/l. På dag 23 var SmartSand kørt ind i forhold til nitrit, mens kontrolfilteret var indkørt på dag 36.

Som det ses, kom stigningen af nitrit i kontrolfilteret senere, og niveauet var langt højere end for SmartSand. De bakterier, der omsætter nitrit til nitrat, var dermed først til stede senere i kontrolfilteret, hvilket stemte meget godt overens med den langsommere omsætning af ammonium til nitrit i kontrolfilteret.

Grænseværdien for nitrit hos forbruger er 0,10 mg/l og vejledende kvalitetskriterie på afgang vandværk er 0,01 mg/l. Grænseværdien hos forbruger blev ikke overskredet i kolonnen med SmartSand, men blev overskredet i kolonnen med kontrolsand. I begge kolonner, blev vejledende kvalitetskriterie på afgang vandværk overskredet under indkøringen.

Forsøget viste dermed at tilsætning af 20% SmartSand havde en positiv indflydelse på indkøring af et nyt filter i forhold til omsætning af ammonium og nitrit, idet indkøringen var hurtigere i forhold til begge parametre. Yderligere var koncentrationen af nitrit i kontrolfilteret væsentlig højere end i filteret med SmartSand og langt over grænseværdien hos forbruger. Denne viden skal tages til efterretning under indkøring af nye filtre.

Levering af vand fra disse testkolonner er sammenligneligt med vand til fuldskalaforsøget både i vandkvalitet og tid. Derfor fik testkolonnerne heller ikke leveret ammonium i sammenlagt 12 dage inden opstart af forsøget. Denne hårde udsultning af bakterierne i SmartSand kan have været medvirkende til at indkøringen ikke var så hurtig som forventet.

5.8 L8. Coliforme bakterier

Baggrund

Da produktion af SmartSand var komplet, blev der den 19. august 2021 målt 22 coliforme/100 ml i det recirkulerede vand fra produktionen. Det blev formodet, at gennemskylning under drift, med tiden ville fjerne de coliforme bakterier. Dog var der opmærksomhed omkring behov for løbende at udføre målinger under opstart.

Den nederste prøvehane på det nye efterfilter var utæt og blev udskiftet d. 22. oktober 2021 (dag 47). I den forbindelse skyllede en del filtermedie ud af hanen. Hvis der var coliforme bakterier i filtret, kan dette skred i sandet have "frigjort" coliforme bakterier til vandfasen.

D. 25. oktober blev der set coliforme bakterier i rentvandsbeholderne. Som konsekvens af dette, blev udløbet fra det nye efterfilter sendt til vandløbet indtil filteret igen var rent.

Formål

Kildeopsporing af coliforme bakterier ved afgang rentvandsbeholderne.

Vurdering om returskyllevandet fra det nye efterfilter indeholdt coliforme bakterier.

Sikring at vandet ved udløb af det nye efterfilter var rent inden der igen blev tilkoblet til rentvandsbeholderne.

Forsøg

Løbende målinger

Målinger under returskyl

Forhold

- Drift i hele perioden blev medtaget frem til observation af coliforme bakterier i rentvandsbeholderne.
- Efter afkobling til rentvandsbeholderne: Forfilter 1 kørte til efterfilteret med 20 m³/t med skiftende flowretning.
- Efterfilter skyllet i 10 minutter 23.11.2021 med et flow på ca. 136 m³/t (Slut gangtid 1, Start gangtid 2) og igen 29.11.2021 (Slut gangtid 2, Start Gangtid 3) med et flow på ca. 139 m³/t.
- Under filterskylning af efterfilteret blev der taget prøver for hver 30. sekund og opsamlet i fraktioner. Tiden i graf angiver tidspunkt for udtagning af første prøve i fraktionen.

Prøver

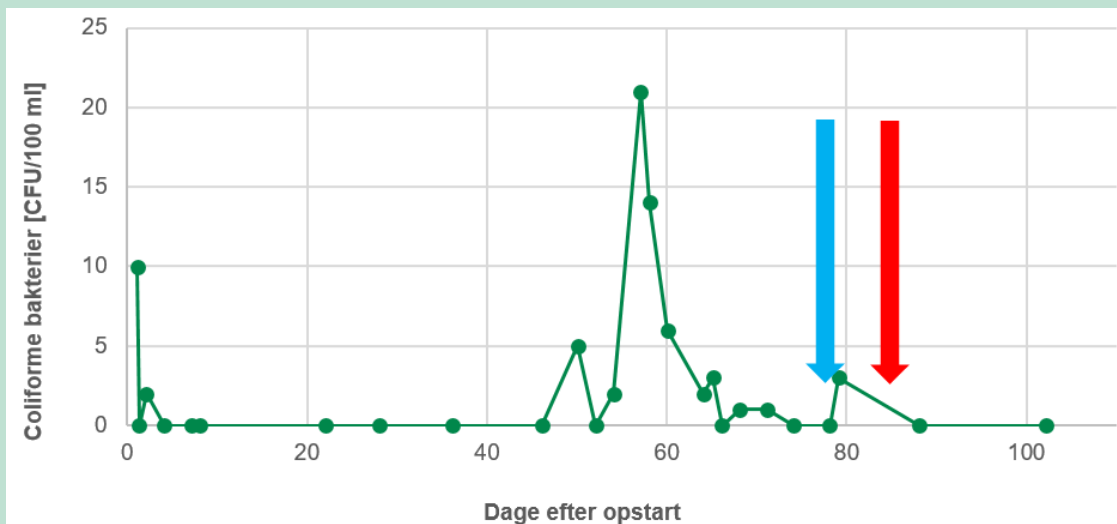
Der blev udtaget en lang række vandprøver fra borer, fra filterudløb samt fra rentvandsbeholderne (data ikke vist). Herudover blev der udtaget prøver fra returskyllevand fra det nye efterfilter. Desuden blev der udtaget skyllevand fra et kontrolfilter, se forsøg L6.

Analyseparametre

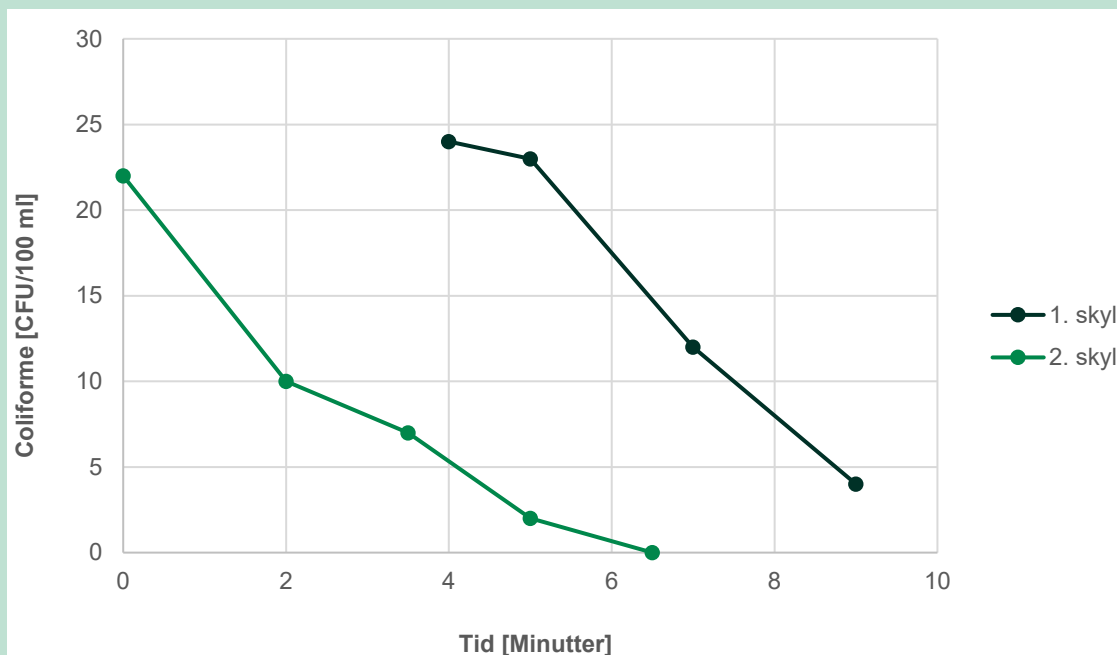
Coliforme bakterier (Agrolab).

Resultater

FIGUR 34 og FIGUR 35 viser indholdet af coliforme bakterier i vandprøver udtaget fra efterfilter samt skyllevandsprøver fra filterskylning af efterfilter. Blå pil markerer filterskylning efter 1. gangtid og rød pil markerer filterskylning efter 2. gangtid på det nye efterfilter (FIGUR 34).



FIGUR 34. Coliforme bakterier i afgang efterfilter.



FIGUR 35. Coliforme bakterier i skyllevandsprøver.

Efter ventilskift (dag 47) blev der målt coliforme bakterier i udløb fra efterfilteret frem til filter-skylning (dag 79). Idet der blev set coliforme bakterier i skyllevandet samt udløbet (3 CFU/100 ml), blev filteret skyllet igen på dag 85 (Slut 2. gangtid). Efter 2. filterskyl, var filteret rent.

Diskussion

Der blev set en kraftig opblomstring efter skift af nederste ventil i efterfilteret. To timer efter filterskyllet blev der igen udtaget prøver, der viste 3 coliforme bakterier/100 ml. Dermed var skylningen utilstrækkelig og blev gentaget på dag 85. Der blev ikke udtaget prøver i de første 4 minutter af 1. filterskylning, idet ventil til prøveudtagning var blokeret af filtergrus. Efter ventil blev motioneret, var alle skyllevandsprøver helt klare uden visuelt spor af okker eller sand.

Årsagen til forureningen med coliforme bakterier kunne ikke endelig fastlægges. Én mulig forklaring var at coliforme bakterier blev tilført det nye efterfilter med SmartSandet og at de først senere blev frigivet til vandfasen, muligvis pga. dvaletilstand.

6. Perspektivering

Arbejdet med Smart Re-design projektet har været en øjenåbner til fremtidig dimensionering, indkøring og drift af vandværksfiltre.

Indkøring af SmartSand:

Der var fra starten en forventning om at ammonium ville kunne indkøres på SmartSand i løbet af 7 dage. Denne forventning blev ikke indfriet idet der gik 23 dage, altså mere end 3 gange så lang tid.

Det der udfordrede indkøringen, var som nævnt i afsnit 5.2 L2 Indkøring af nyt efterfilter, den meget brutale behandling som bakterierne i SmartSandet fik, efter de forlod Dansk Kvarts Industri A/S. I 12 dage fik det nye efterfilter kun leveret rent vand fordi forfilteret fjernede ammonium for effektivt. Da indkøringen herefter startede, var det med et dobbelt så højt flow som oprindeligt tiltænkt – og det var allerede højt.

Alligevel var der biomasse i filteret i starten af 1. gangtid (Se, 5.4. L4 Biomasse). Dog var værdierne lave og de laveste ATP værdier der blev målt i demonstrationsforsøget. Det havde været interessant at se hvilken betydning, de 12 dage med rent vand forud for demonstrationsforsøget, havde på bakterierne.

Lange gangtider:

I demonstrationsforsøget blev der opnået meget lange gangtider med den længste gangtid på 102 dage. Den korteste gangtid var på 6 dage og var udelukkende pga. infektion med coliforme bakterier (se L8 Coliforme bakterier). Gangtiden på 102 dage opstod planlagt for at udføre yderligere forsøg med skyl og prøveudtagning. Der var ingen tegn på tilklogning eller trykstigning. Endnu længere gangtider bør derfor være muligt under normale driftsforhold såfremt jern er fjernet forudgående i et forfilter.

Driftsstop:

I demonstrationsforsøget blev det nye efterfilter med SmartSand (L5) samt et kontrolfilter (L6) undersøgt i forhold til kapacitet efter driftsstop. Både det nye efterfilter og kontrolfilteret klarede sig godt og resultaterne viste at driftsstop med både SmartSand og kontrolsand var mulig i hhv. 15 og 14 dage, dog med overskridelse af ammonium i kontrolfilteret de første 3 timer. Resultaterne var fra modne filtre og kan derfor ikke umiddelbart sammenlignes med betingelserne under indkøring af det nye efterfilter. Alligevel var det interessant at filtre (både det nye efterfilter og kontrolfilteret) der ikke fik noget som helst næring i form af ammonium perforerede så godt, da der igen blev ledt ammonium til filtrene. Det kunne tyde på, at bakterier gik i dvale, mens der ikke var ammonium til stede. Da ammonium igen var til stede efter hhv. 14 og 15 dage, var bakterierne klar til omsætning. Der blev ikke målt biomasse ved ankomst af SmartSand til Lundeværket, men det havde været interessant, at se om bakterierne gik i dvale eller decideret blev færre.

Flowretning:

Det var interessant at se den store biologiske aktivitet i form af ATP i toppen og bunden af det nye efterfilter med SmartSand (L4, FIGUR 27). Dette gjorde, at hele filterets dybde blev udnyttet og gjorde det muligt at skrue op for flowet uden ammonium overskridelser til følge (L3a, FIGUR 22).

Under normale driftsforhold på et vandværk, er det en udfordring at skrue op for flowet med overskridelser af ammonium til følge, idet de nitrificerende bakterier tilpasser sig til det givne flow.

Demonstrationsforsøget viste en mulighed for momentant at ændre flowhastigheden uden konsekvenser for ammoniumomsætningen, idet der var nitrificerende bakterier i både top og

bund. Dog viste nitrit sig at være en udfordring ved meget højt flow (50 m³/t svarende til 28 m/t).

Demonstrationsforsøget åbner op for nye muligheder for drift af lukkede filtre, hvor der er mulighed for at køre alternerende drift. Denne form for styring vil egne sig specielt godt på vandværker, hvor der er behov for hurtigt at kunne levere mere vand.

Flowhastighed:

Fra projektets start var det forventet filterhastigheden igennem efterfilteret ville nå sin maksimale kapacitet inden 23 m/t. Alligevel skulle det testes af til fremtidens dimensionering af nye filtre. Resultaterne viste, at der ikke var problemer med fjernelse af ammonium ved 23 m/t og heller ikke ved 28 m/t (se FIGUR 21 og FIGUR 22 i afsnit 5.3 L3). Fjernelsen af nitrit til under grænseværdien for forbruger blev opnået ved 23 m/t, men ikke ved 28 m/t. (FIGUR 23 og FIGUR 24). Dermed lå begrænsningen i efterfiltret imellem de 2 hastigheder. De høje hastigheder gav ikke problemer med for højt tab over filtret, hvilket var meget positivt med den specielt fremstillede slidsebund i bunden af filteret.

Demonstrationsforsøget viste dermed, at det nye efterfilter kunne køres med langt højere flows end forventet, hvilket giver store muligheder for fremtidens dimensionering og drift af nye filtre.

Potentiale for kapacitet og fleksibilitet på eksisterende vandværk:

De vigtige resultater i forhold til driftsstop har stort potentiale for at øge kapaciteten og fleksibilitet på allerede eksisterende vandværker ved at drifte dem anderledes. Det kan illustreres med eksemplet nedenfor:

Hovedværket på Vandcenter Syd er dimensioneret til 1.200 m³/t. Normalt ligger driften på 400 m³/t. Der er 12 filtre, hvilket giver et meget lille flow over hvert filter (33 m³/t eller 1,7 m/t). Det er kendt, at et øget flow kan resultere i forhøjede ammoniumkoncentrationer. På Hovedværket vil der være behov for øget flow i spidsbelastninger, eller hvis et andet vandværk er ude af drift. Der er dermed sandsynlighed for, at der ikke er nok bakterier til at omsætte ammonium, idet bakterierne er tilpasset til det givne flow. Derfor er der nu indført alternerende drift. Dvs. at der kører 6 filtre ad gangen. Dermed er flowet over de 6 filtre dobbelt så højt, som hvis alle 12 filtre er i drift.

Når sætpunkt på det enkelte filter er nået (flow styret 5.000m³), skylles filteret og der driftes i 12 timer hvorefter filteret stopper ned. Herefter overtager de 6 filtre der før var ude af drift. Hvis der opstår et behov for yderligere vand, medtages det antal filtre der er brug for i driften.

Denne form for drift giver en utrolig fleksibilitet og udnytter værkets kapacitet. Dog kræver det, at de nitrificerende bakterier er opformerede, for at ammoniumomsætningen er effektiv ved det højere flow. For at opnå dette, kan det være nødvendigt i en periode at opblende vandet med vand fra andre filtre hvor ammoniumomsætningen allerede er tilpasset til flowet.

7. Referencer

Søborg, DA, Breda, IL, Roslev, P og Ramsay, L. Relationships of bacterial community compositions with water quality parameters through depth of groundwater fed full-scale drinking water biofilters. *In preparation*.

Bilag 1. Billeder fra værket før og efter re-design

Det nederste T-stykke fjernes og efterfilteret kobles imellem de 2 flanger.



Loftshøjde 3,08 cm. Dørstørrelse B = 1,7 m og h = 2,35 m



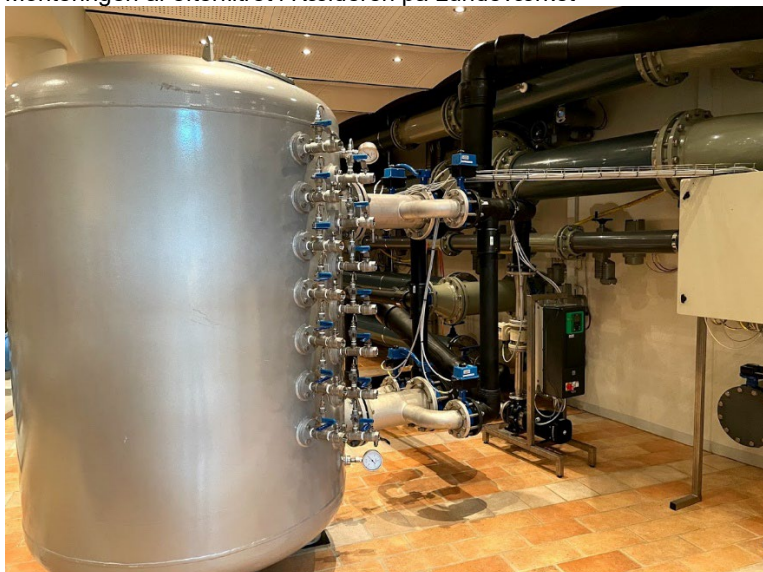


Højde i kælderskakt 3,43 m

Ydre dør mål $b = 1,68 \text{ m}$, $h = 2,31 \text{ m}$



Monteringen af efterfiltret i Kælderen på Lundeværket



Demonstrationsanlæg ved Lundeværket

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
Tolderundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk