

# SmartFilter-Fe: en add-on løsning til jernfjernelse fra råvand



---

## SMARTFILTER FE: EN ADD-ON LØSNING TIL JERNFJERNELSE FRA RÅVAND

**DATO:** 27. marts 2020

---

**Projekt ID:** 1146.2017

**ISBN:**

Tekst

**Udgiver:**

DANVA, Dansk Vand- og Spildevandsforening

**Udarbejdet af:**

VandCenter Syd: Finn Møllerup, Claus Hynkemejer, Henrik Holst, Ulla Brinkmann Trettenes  
Aarhus Vand: Anders Bo Sørensen, Flemming Fogh Pedersen og Rasmus Bærentzen  
VIA Byggeri, Energi, Vand & Klima: Majbritt Lund og Loren Ramsay  
Amphi-Bac: Søren Bastholm og Sara Starcke

**Finansiering:**

Vejledningen er finansieret af:  
VUDP, Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram

**Samarbejdspartnere:**

VandCenter Syd A/S  
Aarhus Vand A/S  
VIA University College, VIA Byggeri, Energi, Vand & Klima  
Amphi-Bac

**Kategori:**

Drikkevand

## TEKNISK RAPPORT

# Indholdsfortegnelse

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduktion</b>                                      | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Metoder</b>                                           | <b>4</b>  |
| 2.1      | Prøvetagning, SmartFilter-Fe                             | 4         |
| 2.2      | Prøvetagning, åbne filterbassiner                        | 5         |
| 2.3      | Kontinuerlige målinger                                   | 8         |
| <b>3</b> | <b>Beskrivelse af det ydre anlæg</b>                     | <b>9</b>  |
| <b>4</b> | <b>Baseline for de åbne filtre</b>                       | <b>11</b> |
| 4.1      | Forlænget gangtid                                        | 11        |
| 4.2      | Filterfunktion over en gangtid                           | 12        |
| 4.3      | Slukning af bundbeluftning                               | 14        |
| 4.4      | Tilsætning af kobber til Filter 3                        | 16        |
| <b>5</b> | <b>SmartFilter-Fe</b>                                    | <b>17</b> |
| 5.1      | Installation af SmartFilter-Fe                           | 17        |
| 5.2      | Start-up af SmartFilter-Fe                               | 21        |
| <b>6</b> | <b>De åbne filtre efter tilkobling af SmartFilter-Fe</b> | <b>25</b> |
| 6.1      | Overgang til SmartFilter-Fe                              | 25        |
| 6.2      | Efter 1 måneds drift                                     | 27        |
| 6.3      | Højt flow                                                | 31        |
| 6.4      | Varierende flow                                          | 31        |
| <b>7</b> | <b>Konklusioner</b>                                      | <b>34</b> |

BILAG 1: SmartFilter-Fe driftsdata

BILAG 2: Kobbertilsetning

# 1 Introduktion

Projektet "SmartFilter – Fe" fokuserer på at reducere vand og energiforbrug i drikkevandsproduktionen ved at gøre op med det traditionelle filterdesign, hvor jernfjernelse, ammonium omsætning og manganfjernelse ofte foregår i det samme filterbassin. Ved at adskille jernfjernelsen fra resten af behandlingen i et såkaldt SmartFilter-Fe var projektets arbejdshypotese, at der kunne opnås en betydelig reduktion af vandspildet i forbindelse med returskylning samt følgeførdele såsom mindre skyllevandspumpe og mindre skyllevandsbassiner. Endelig var det arbejdshypotesen, at der vil ske en betydelig forbedring af ammonium omsætning og manganfjernelse i de efterfølgende filtre, da fjernelsesprocesserne ikke længere vil forstyrres af jernudfældning eller hyppige returskylninger pga. tilstopning med jernoxider.

Afrapportering af dette projekt består af to rapporter: denne teknisk rapport samt en separat hovedrapport. Denne tekniske rapport beskriver de anvendte metoder og det ydre anlæg. Herudover angiver rapporten resultaterne fra de forsøg, der blev udført på det nye trykfilter "SmartFilter-Fe" samt de eksisterende åbne bassiner på Østerby Vandværk hos Aarhus Vand.

## 2 Metoder

I dette projekt blev der udført forsøg i fuldskala. Der blev anvendt en forsøgsopstilling med såvel et traditionelt åbent vandværksfilter som et særligt trykfilter ("Smartfilter-Fe"). Der blev foretaget en sammenligning af filterdriften af det traditionelle vandværksfilter uden og med Smartfilter-Fe som et forfilter.

Under opstart af SmartFilter-Fe blev vandet fra filtrets udløbet ledt til kloakken. Efter tilkobling af afgang SmartFilter-Fe til tilgang Filter 6, indgik det behandlede vand i produktion og blev sendt ud til forbrugerne. Det bemærkes, at under projektperioden, blev iltning af råvandet på Østerby Vandværk ændret fra bundbeluftning i en beluftningsbassin til udelukkende ved sekundær beluftning på filtrene (dvs. bundbeluftning blev slukket).

I dette kapitel præsenteres og kommenteres de prøvetagningsmetoder, der blev anvendt i projektet. Kapitlet er inddelt i afsnit om prøvetagning i trykfiltret "SmartFilter-Fe", prøvetagning i åbne filtre (Filter 6 og Filter 3), samt kontinuerlige målinger.

### 2.1 Prøvetagning, SmartFilter-Fe

Fig 1 viser SmartFilter-Fe som opstillet på Østerby Vandværk. Flere data om filterbeholderen findes i Tabel 4.



Figur 1 SmartFilter-Fe med prøvetagningshaner for hver 10 cm's filterdybde.

Tabel 1 viser en oversigt over de prøver, der er udtaget på Østerby Vandværk ved hjælp af prøvehaner på SmartFilter-Fe beholderen. Opstart af filtret var 20. marts 2019 kl. 13:19.

Tabel 1 Oversigt over prøvetagningsgange til dybdeprofiler i SmartFilter-Fe, Østerby Vandværk.

| Dato       | Flow,<br>Smart-<br>Filter-Fe<br><br>m <sup>3</sup> /t | Bund-<br>beluftning | Stor<br>Pakke | Tid efter start |
|------------|-------------------------------------------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| 20/03-2019 | 30,0                                                  | Slukket             | X             | 1 time          |
| 21/03-2019 | 29,8                                                  | Slukket             | X             | 16 timer        |
| 22/03-2019 | 29,4                                                  | Slukket             | X             | 2 døgn          |
| 25/03-2019 | 29,1                                                  | Slukket             | X             | 5 døgn          |
| 28/05-2019 | 24,4                                                  | Slukket             | X             | 10 uger         |

Stor pakke: total jern, total mangan, total ammonium

Prøverne blev målt ved hjælp af Hach kit LCK 304 (ammonium), LCK 321 (jern) og LCW 532 (mangan) på en Hach 3200 spektrofotometer.

Flow og tryk blev noteret manuelt, ligesom hvert returskyl blev noteret, se bilag 1. Prøver til kimtal 22 blev analyseret af Eurofins for at dokumentere den mikrobiologiske vandkvalitet inden vandet fra afgang SmartFilter-Fe blev ledt til Filter 6 og videre til forbruger.

## 2.2 Prøvetagning, åbne filterbassiner

Et "juletræ" er et værktøj til udtagning af niveaubestemte vandprøver i et åbent vandværksfilter, se Figur 2. Et juletræ kan således anvendes til at dokumentere vandbehandlings fremgang ned gennem filtret. Juletræet anvendt i dette projekt blev produceret af VandCenter Syd i rustfrit stål og består af en stamme med 15 grene (med huller dækket af et net. Grenene er placeret for hver 10 cm vinkelret på hinanden rund om grenen således at prøvetagning fra én gren påvirkes mindst muligt af prøvetagning fra de øvrige. Hver gren er forbundet til egen slange, der løber indvendigt i stammen. Ved hjælp af en 4-kanals slangepumpe (Masterflex) kan vandprøver fra hver dybde udtages individuelt. Den niveaubestemte vandprøvetagning via "juletræet" er begrænset til en flowhastighed, som gør at vandstrømningen i filteret ikke forstyrres. Herved udtages der repræsentative vandprøver fra forskellige niveauer i filteret. Juletræet nedsættes i et filter under et returskyl og fjernes igen i forbindelse med nyt returskyl.



Figur 2 Slangepumpe tilkoblet juletræet (øverst t.v.), juletræet klar til nedsætning (øverst t.h.), nederste del af juletræet med grenenes placering (nederst t.v.), en enkelt gren med filter (nederst t.h.).

Tabel 2 viser en oversigt over de prøver, der er udtaget i åbne filterbassiner på Østerby Vandværk ved hjælp af juletræet samt de forhold, prøverne er udtaget under.

Tabel 2 Oversigt over prøvetagningsgange til dybdeprofiler i Filter 6, Østerby Vandværk.

| Dato       | Filter                                                                   | Beregnet filterflow<br>m <sup>3</sup> /t | Boringer*         | Bundbeluftning | Gangtid | Analysepakke 1 | Analysepakke 2 | Analysepakke 3 | Andre analyser | Årsag                                             |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|----------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------------------|
| 16/05-2018 | 6                                                                        | 29,2                                     | Ti2, Ti7, Ti9, Ø1 | Tændt          | Start   | X              | X              | X              |                | Baseline: med beluftning                          |
| 22/05-2018 | 6                                                                        | 29,2                                     | Ti2, Ti7, Ti9, Ø1 | Tændt          | Slut    | X              | X              | 0              |                | Baseline: med beluftning                          |
| 07/08-2018 | Bundbeluftning slukket                                                   |                                          |                   |                |         |                |                |                |                |                                                   |
| 31/10-2018 | 6                                                                        | 29,7                                     | Ti2, Ti7, Ti9, Ø1 | Slukket        | Start   | X              | X              | X              | turb.          | Baseline: Beluftningsstop                         |
| 06/11-2018 | 6                                                                        | 29,5                                     | Ti2, Ti7, Ti9, Ø1 | Slukket        | Slut    | X              | X              | X              | turb.          | Baseline: Beluftningsstop                         |
| 23/01-2019 | 3                                                                        | 29,7                                     | Ti2, Ti4, Ti7, Ø1 | Slukket        | Start   | X              | X              | X              | turb.          | Kobbertil sætning                                 |
| 29/01-2019 | 3                                                                        | 30                                       | Ti2, Ti4, Ti7, Ø1 | Slukket        | Slut    | X              | X              | X              | turb.          | Kobbertil sætning                                 |
| 20/03-2019 | Turbulent returløb fra dykpumpen i iltningsspor medførte øget beluftning |                                          |                   |                |         |                |                |                |                |                                                   |
| 30/04-2019 | 6                                                                        | 30,8                                     | Ti2, Ti7, Ti9, Ø1 | Slukket        | Start   | X              | X              | X              | turb.          | Overgang: Feholdigt vand                          |
| 30/04-2019 | Jernfrit vand fra afgang SmartFilter-Fe ledt til indgang Filter 6        |                                          |                   |                |         |                |                |                |                |                                                   |
| 01/05-2019 | 6                                                                        | 29,6**                                   | Ti2, Ti7, Ti9, Ø1 | Slukket        | Start   | X              | X              | X              | turb.          | Overgang: Fefrit vand Opstart                     |
| 06/06-2019 | 6                                                                        | 55,5**                                   | Ti2, Ti7, Ti9, Ø1 | Slukket        | 2 dage  | X              | X              | X              | Turb.          | Fe-frit vand Højt flow                            |
| 07/06-2019 | 6                                                                        | 30,0 – 56,0**                            | Ti2, Ti7, Ti9, Ø1 | Slukket        | 1 dage  |                |                |                |                | Fe-frit vand Varierende flow (kun amtax målinger) |

\*Disse boringer kørte under prøvetagning men ikke nødvendigvis mellem prøvetagninger.

\*\* Målt flow på flowmåler.

Pakke 1: O<sub>2</sub>, pH, redox, konduktivitet, temperatur

Pakke 2: total jern, total mangan, total ammonium

Pakke 3: filtreret jern, filtreret mangan

Pakke 1 og Pakke 2 blev analyseret af Eurofins, Vejen.

Feltparametre blev målt at-line ved hjælp af et WTW Multi 3430 måleapparat med følgende elektroder: WTW Sentix 940 (pH), WTW TetraCon 325 (ledningsevne), WTW FDO 925 (ilt) og WTW Sentix ORP 900 (redox). Elektroderne blev placeret i et 30 ml plastikbæger, der fyldtes med opadgående strømningsretning vha. juletræet og slangepumpen.

Prøver til måling af kimental 22 i Filter 6 på Østerbyværket blev udtaget den 16. maj og den 21. maj, dvs. i perioden efter vandet fra afgang SmartFilter-Fe blev ledt til tilgang Filter 6. Baggrunden for prøvetagning var at vurdere, om der var kimentsproblemer som følge af den lange gangtid på filter 6.

## 2.3 Kontinuerlige målinger

I forbindelse med forsøgene blev der udført kontinuerlige målinger for ammonium, opstuvningshøjde samt flow.

**Ammonium:** Ammoniumkoncentrationer blev målt at-line ved afgang Filter 5 samt afgang Filter 6 i perioden 10. april – 24. juni (måling af Filter 5 dog kun i en del af perioden). Filter 5 har i perioden fungeret som et referencefilter og har ikke som sådan indgået i forsøgene. Målingerne blev udført ved hjælp af et 2-kanals Amtax udstyr fra Hach (udstyr fra Aarhus Vand). Et ekstra Amtax (udstyr fra VIA University College) blev anvendt til måling af prøver fra juletræets gren 12 (30 cm from toppen af sandet) og gren 7 (80 cm fra toppen af sandet) i perioden 22. maj – 11. juni. Vandet blev oppumpet ved et flow på ca. 100 ml/min ved hjælp af to slangepumper.



Figur 3 Amtax udstyr (til højre) til at-line måling af ammonium på Østerbyværket.

**Opstuvningshøjde:** Under forsøgene blev vandspejlets opstuvningshøjde over toppen af det åbne filter målt kontinuerlig ved hjælp af radar, model Micropilot FMR10.

**Flow:** Endelig blev flow og hvilke borerer var aktive dokumenteret ved hjælp af Østerby Vandværks almindelig SRO-system. Målingen blev foretaget via elektroniske flowmålere (Siemens MAG 5100/6000).

### 3 Beskrivelse af det ydre anlæg

I dette afsnit præsenteres og kommenteres det ydre anlæg, dvs. anlægsdele ud over selve SmartFilter-Fe på Østerby Vandværk.

Vand til indløb i SmartFilter-Fe blev oppumpet fra Østerby Vandværks iltningsspor gennem et rør ved hjælp af en dykpumpe, se Tabel 3. Da den anvendte dykpumpe var dimensioneret til at kunne et flow i både lav kapacitet og ved høj kapacitet var det nødvendigt i lav kapacitetsperioderne at pumpens ydelse blev droslet. Det blev foretaget ved at etablere en retursløjfe således at en stor del af vandet blev returneret ved tilbageløb til iltningssporet. Dette medførte meget plask (se Figur 4) med ekstra beluftning af råvandet samt løsrivning af iltningssporets gamle jernoxidelægninger.



Figur 4 Plask i Østerbyværkets iltningsspor. Denne plask medførte ekstra iltning af råvandet og var forårsaget af en retursløjfe på den dykpumpe, der forsyndte SmartFilter-Fe med råvand fra iltningssporet.

Under indkøring, blev vandet fra SmartFilter-Fe ledt til kloak. Efter indkøring, blev det forbehandlede vand fra SmartFilter-Fe ledt til Østerby Vandværks Filter 6 og videre til rentvandstanken. Indkøringens længde blev fastlagt efter hvornår bakteriologien i filtret var i tilfredsstillende kvalitet til at indgå i produktionen af vand. Filtrets evne til at fjerne jern var indkørt før der var opnået bakteriologisk stabilitet (defineret som kimtal 22 under grænseværdi i 2 på hinanden følgende prøver). Under forsøget med tilledning af vand fra Smartfilter-Fe, blev det normale tilløb til Filter 6 afbrudt, således af filtret alene fik vand fra SmartFilter-Fe. Vandet blev ledt til filtret via skyllerenden, hvorved der blev ledt en ensartet vandmængde til hele det åbne filter, se Figur 5.



Figur 5 Skyllerenden i Filter 6, hvorfra indløbsvandet fordeles.

For at muliggøre returskyllning af SmartFilter-Fe var anlægget tilkoblet en luftblæser og en skyllevandspumpe. Detaljer omkring disse enheder ses i Tabel 3.

Tabel 3 Det ydre anlæg til SmartFilter-Fe

| Emne             | Fabrikat                                                                       | Kapacitetsforhold                                                                                                                                                               |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vandpumpe        | Iltningssporet<br>Model Grundfos SP60-3                                        | 0 – 75 m <sup>3</sup> /t ved 0 – 42 mVS.<br>Pumpens kapacitet blev reguleret med et tilbageløb til iltningssporet under forsøg for at opnå den ønskede kapacitet til forsøgene. |
| Skyllevandspumpe | Model Grundfos LP80-125/133                                                    | 85 m <sup>3</sup> /t under filterskyl (aflæst på flowmåler)                                                                                                                     |
| Luftblæser       | Model af ukendt fabrikat                                                       | Ukendt kapacitet, men beluftningen under skyl blev observeret gennem en mandeluge i toppen af Smartfilter-Fe. Der blev således foretaget en kvalitativ kontrol af effekten.     |
| Tilløbsrør       | DN100 rustfrit og 110 mm PE                                                    | Rørføringen bestod af en ældre del (rustfrit) og en ombygget del (PE)                                                                                                           |
| Afløbsrør        | DN100 rustfrit (D <sub>i</sub> = 100 mm) og 110 mm PE (D <sub>i</sub> = 96 mm) | Rørføringen bestod af en ældre del (rustfrit) og en ombygget del (PE)                                                                                                           |

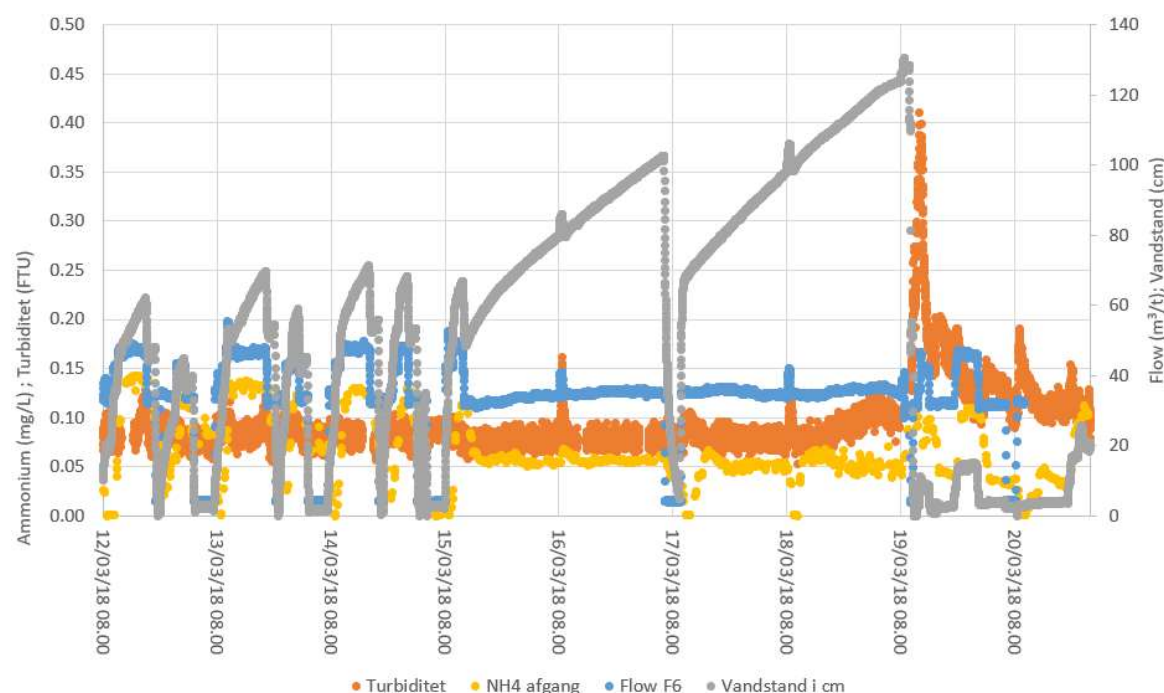
## 4 Baseline for de åbne filtre

I dette afsnit angives resultater for de åbne filtre på Østerby Vandværk før SmartFilter-Fe blev tilkoblet. Disse målinger udgør således referencemålinger i forhold til at vurdere Smartfilter-Fe's effekt på vandbehandlingen. Oplysningerne stammer hovedsagelig fra måling af dybdeprofiler i filtret ved hjælp af værktøjet juletræet, men også målinger på afgang filter indgår i vurderingerne.

Der blev udført undersøgelser af Filter 6 i perioden, hvor iltningssporet kørte normalt samt i perioden efter indblæsning af luft til iltningssporet blev slukket for at reducere problemer med luftansamlinger i filtermediet. Desuden blev der udført undersøgelser af tilsætning af kobber til Filter 3 med henblik på at forbedre ammoniumomdannelsen. Vandprøver blev udtaget fra både Filter 3 og Filter 6 (uden kobber) til sammenligning.

### 4.1 Forlænget gangtid

Formålet med denne registrering er at undersøge vandspejlsstigningen i forbindelse med en forlænget gangtid. Dette blev udført i perioden 12.-19. marts 2019, dvs. en gangtid på 7 dage. Figur 6 viser diverse on/at-line målinger under denne forlænget gangtid.



Figur 6 Tidserie med vandspejl, flow samt indhold af ammonium og turbiditet ved afgang Filter 6.

Som det ses af figuren, varierer vandspejlet i filteret meget i perioden. Når flowet sænkes kraftigt, falder vandspejlet. Når flowet efterfølgende genoptages, når vandspejlet ikke op til samme niveau. Årsagen til dette var ukendt. Dette kunne dog indikere, at der måske ligger luftbobler i fanget filtermaterialet, som blokerer for vandgennemstrømningen og muligvis også reducerer filterkapaciteten. Lige efter et driftsstop reduceres vandstanden ved

samme flow og dette kan indikere, at luftboblerne frigives under driftsstoppet. Under filterdrift ses periodisk at der bobler luft op af filtret og især i forbindelse med filterskyl når afgangsventilen lukkes. Dette kan sandsynliggøre problemstillingen med luft i filtret. Sidst i gangtiden var flowet uændret i længere tid og vandspejlet nåede op til >120 cm over filtermediet.

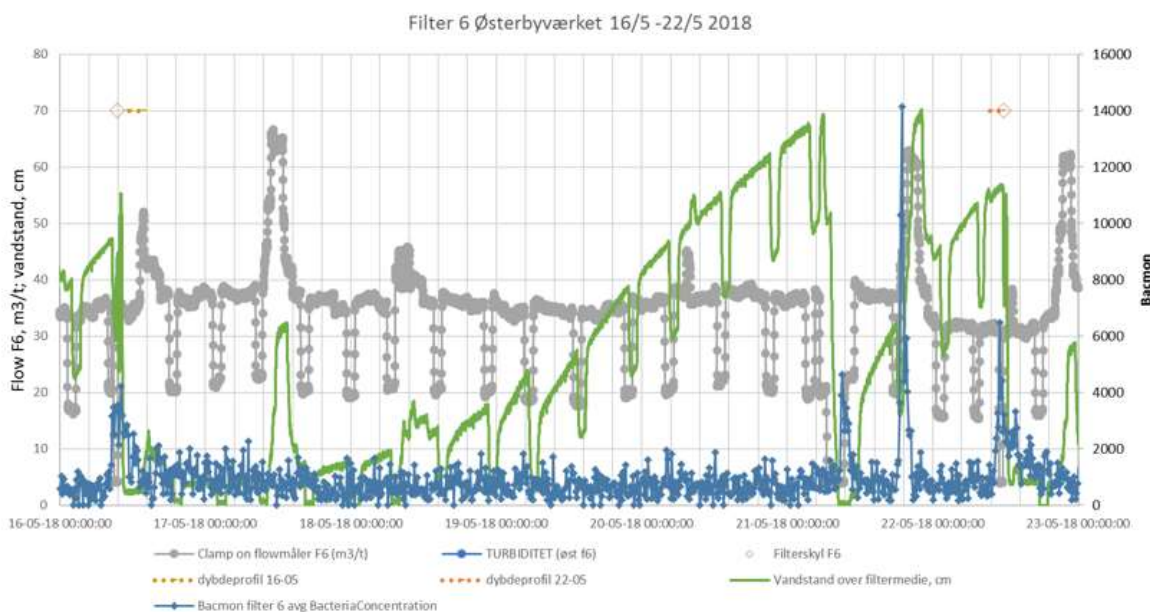
Der ses en tydelig stigning i ammonium i afløb fra Filter 6 når flowet sættes op fra fx 35 til 50 m<sup>3</sup>/t. Desuden ses turbiditetsudfordringer i perioden umiddelbart efter returskyllet d. 19. marts 2018.

## 4.2 Filterfunktion over en gangtid

Formålet med disse målinger var at fastlægge den typiske funktion af Filter 6 før idriftsættelse af et SmartFilter-Fe som forfilter. Der blev målt dybdeprofiler i Filter 6 ved hjælp af juletræet både i starten af en gangtid (umiddelbart efter et skyl d. 16. maj 2018) samt i slutning af en gangtid (d. 22. maj 2018), se Figur 8.

Under prøvetagning blev der indvundet vand med en fast kapacitet fra Tiset Kildeplads (T2, T7, T9) samt Østerby Kildeplads (Ø1) med et samlet flow på hele Østerbyværket på omkring 175 m<sup>3</sup>/t, se Tabel 2. Mellem målingerne overgik styring af indvinding til automatik, dog med ovennævnte boringer som primære leverandører, suppleret af Tiset Kildeplads T4. Hermed varierede flowet i løbet af gangtiden og stoppede helt i en kort periode mellem d. 21 og 22. maj. Det typiske flow på Filter 6 i perioden var omkring 35 m<sup>3</sup>/t, se Figur 18.

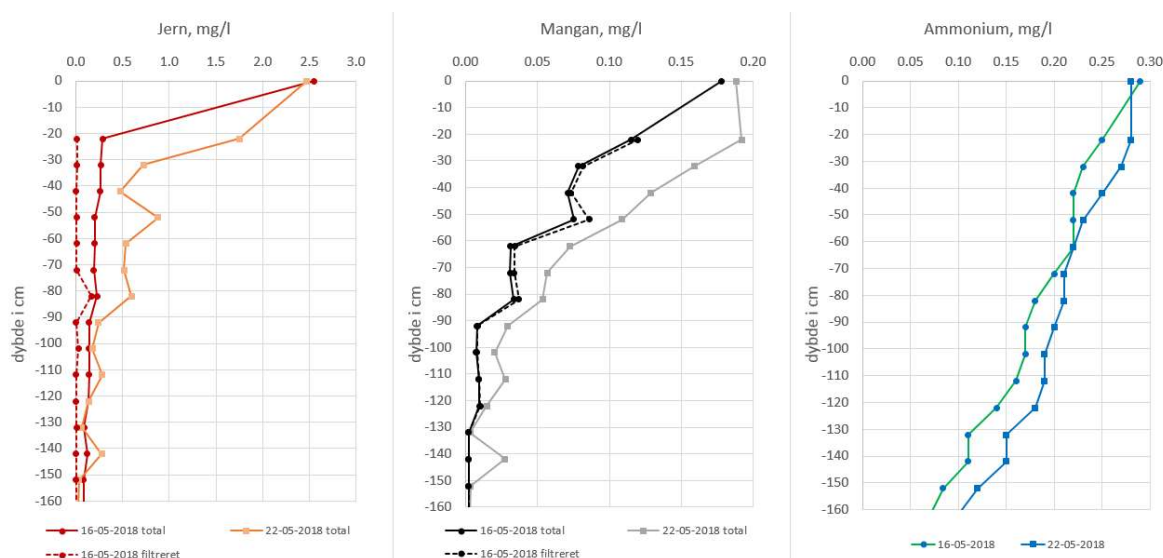
Det bemærkes, at bundbeluftningen i iltningssporet fungerede normalt med kraftig beluftning i hele gangtiden. Iltindholdet tenderede til overiltning (iltindhold på 10 - 12 mg/l) pga. kapaciteten af blæseren.



Figur 7 Oversigt over driften af Filter 6 i den aktuelle gangtid.

Som det ses af figuren, stiger vandstanden over filtermediet igennem gangtiden, fra 0 cm (dvs. tørlagt i områder) til 70 cm. Ved kraftig sænkning af flow d. 21. maj ses et stort fald i vandstanden. Det er muligt at dette fald i filtermodstand stammer fra frigivelse af luft i filtret, der langsomt er opbygget under drift med almindeligt flow. Frigivelse af luftansamlinger kan også være forklaringen på fald i vandspejlet ved kraftig sænkning af flowet, der ses i Figur 17.

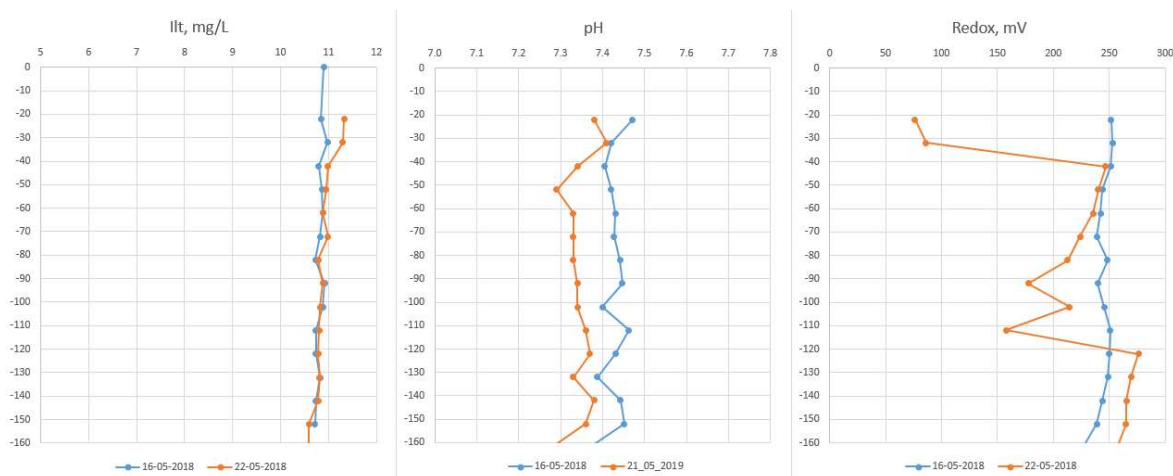
Efter genoptagelse af almindeligt flow stiger vandstanden stejlt. Dette indikerer opbygningen af luft i filteret igen som følge af den høje beluftning af råvandet i iltningsporet, som tenderer til overiltning. Endvidere ses en højere vandstand ved højt flow på omkring 65 m<sup>3</sup>/t, se Figur 18.



Figur 8 Dybdeprofiler for jern, mangan og ammonium i Filter 6 i starten af en gangtid (16. maj 2018) og ved slutning af en gangtid (22. maj 2018) med beluftning i iltningsporet.

Generelt for alle tre stoffer gælder, at fjernelsen er en smule ringere ved slutning af gangtiden (stofferne trænger dybere nede i filtret) end ved starten af en gangtid. Det kan være, at den ringere fjernelse skyldes opbygningen af luft som blokerer/reducerer filterkapaciteten. Figuren viser endvidere, at hovedparten af jernet i vandfasen, der trænger ned i filtret, er partikulært jern (indhold af filtreret jern er meget lavt) mens hovedparten af mangan, der trænger nede i filtret, er opløst.

Figur 9 viser dybdeprofiler for feltparametrene ilt, pH og redox i vandfasen i Filter 6.



Figur 9 Dybdeprofiler for feltparametre i Filter 6 i starten af en gangtid (16. maj 2019) og ved slutning af en gangtid (22. maj 2018).

Iltindholdet er højt begge dage, dvs. i nærheden af vandets mætningspunkt ved den aktuelle temperatur og det aktuelle saltindhold. Det blev observeret, at der i slutningen af gangtiden ved de øverste to prøvehaner ikke kunne suges vand op, fordi der var samlet luft i en lomme omkring udstyret. Ved at ruske let i udstyret blev luften frigivet og boblede op langs udstyret, herefter vandet blev oppumpet igennem udstyret i ca. 10 min før vandprøven blev udtaget. Denne observation medførte en række overvejelser, der endte med at bundbeluftning i iltningssbordet blev slukket på et senere tidspunkt.

pH-værdien viser lidt højere værdier i starten af gangtiden. Forklaring på denne forskel blev ikke fundet. Blandt mulige årsagsforklaringer er almindelig måleusikkerhed eller at returskyl med luft afstripper  $\text{CO}_2$  og hæver pH i en kortere periode efter skyllet.

Redoxværdierne var i starten af gangtiden stabil omkring 250 mV ved alle dybder. I modsætning hertil varierede redoxværdierne en del ved slutningen af gangtiden med lavere værdier i de to øverste målinger. Det vides ikke om dette kan skyldes måletekniske problemer eller den forlængede opholdstid i det opstuvende vand over filtret sidst i gangtiden.

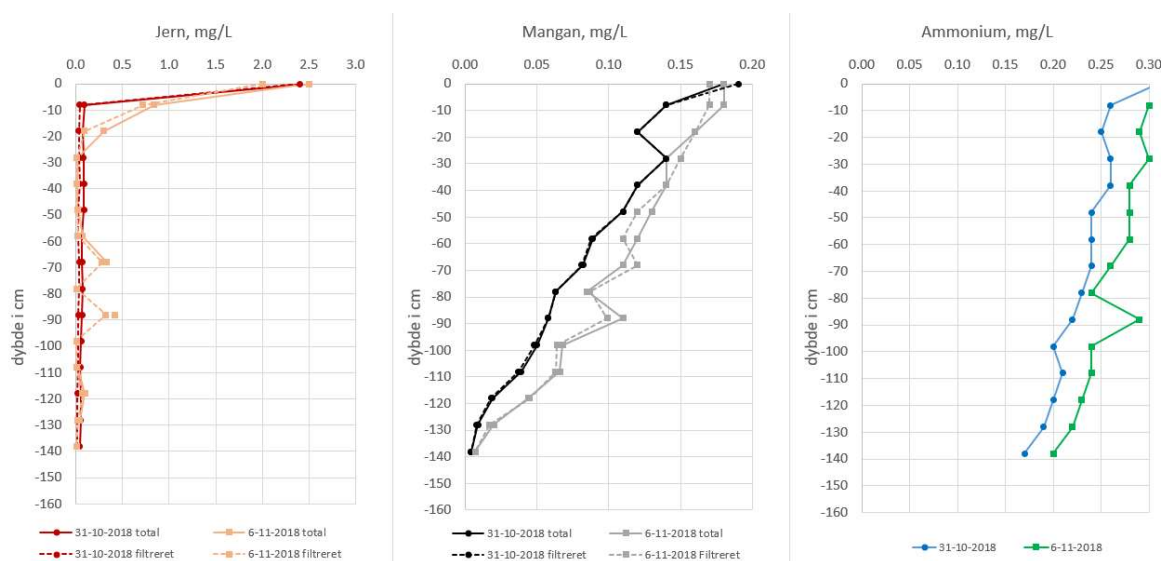
## 4.3 Slukning af bundbeluftning

På baggrund af resultater og observation fra de foregående undersøgelser blev det besluttet at slukke for bundbeluftningen i iltningssporet til hele Østerby Vandværk. Dette blev foretaget den 7. august 2018. Ønsket var at undgå luftansamlinger i filtrene, som blev vurderet til at være så alvorlige, at de kunne overskygge de øvrige optimeringstiltag i projektet. Det var på dette tidspunkt uvist, om slukning vil påvirke stoffjernelsen i en negativ retning eller om sekundære iltningprocesser (fx plask ved indløb til filtrene og diffusion ved åbne vandflader) vil være tilstrækkeligt til at behandlingsprocesserne kunne fortsætte uhindret. I forbindelse med tiltaget blev der målt iltindhold igennem hele filterprocessen både under opstart og som efterfølgende referencemålinger under både lav og højt råvandsflow. I alle tilfælde blev der fundet tilfredsstillende iltindhold dog med en tendens til

lavere ilthold ved højere råvandsflow. På intet tidspunkt blev der målt indhold under 4,5 mg/l.

For at undersøge virkningen af dette drastiske skridt, blev dybdeprofilerne gentaget i starten og slutning af en gangtid. Den undersøgte gangtid begyndt d. 31. okt. 2018 og stoppede d. 6. nov. 2018.

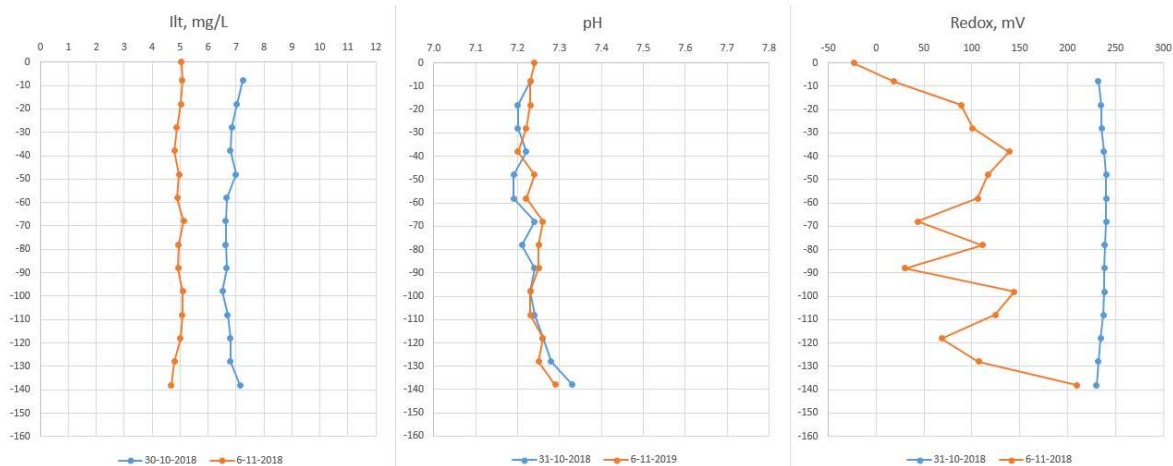
Figur 10 viser dybdeprofiler for jern, mangan og ammonium i vandfasen i Filter 6 uden bundbeluftning i iltningssporet.



Figur 10 Dybdeprofiler for jern, mangan og ammonium i Filter 6 i starten af en gangtid (31. okt. 2018) og ved slutning af en gangtid (6. nov. 2018) uden bundbeluftning.

Som for dybdeprofilerne med beluftning, viser denne figur at fjernelse uden beluftning er en smule ringere ved slutning af gangtiden (stofferne trænger dybere nede i filtret) end ved starten af en gangtid. Jerngrafen viser en bedre fjernelse end med beluftning. Mangan viser en ringere fjernelse (opløst mangan trænger dybere nede i filtre end da der var beluftning). Ammonium viser også en langsommere fjernelseshastighed end med beluftning.

Figur 11 viser dybdeprofiler for feltparametrene ilt, pH og redox i vandfasen i Filter 6 uden beluftning.



Figur 11 Dybdeprofiler for feltparametre i Filter 6 i starten af en gangtid (21. okt. 2018) og ved slutning af en gangtid (6. nov. 2018) uden beluftning.

Som det ses af Figur 11 er iltindholdet som forventet væsentlig lavere uden beluftning i iltningssporet end med beluftning, men stadig på et niveau, hvor man vil forvente, at vandbehandling kan finde sted. Det bemærkes, at iltindholdet falder over gangtiden fra ca. 7 til ca. 5 mg/l. Årsagen til dette fald er ikke kendt, men det er sandsynligt, at det kan skyldes en mindre plaskhøjde sidst i gangtiden som følge af et stigende vandspejl i filterbassinet.

pH-værdien er faldet ca. 0,1 enheder. Det vides ikke om dette er et reelt fald eller et spørgsmål om måleusikkerhed.

Redoxværdien viser stabile værdier med filterdybde omkring 239 mV lige efter et skyl. Ved slutning af gangtiden er værdierne væsentlig lavere og mere varierede, med mange målinger omkring 100 mV. Det øverste prøver er svagt negative. Dette mønster ligner den foregående med beluftning i Figur 9.

## 4.4 Tilsætning af kobber til Filter 3

Der blev udført forsøg med tilsætning af kobber til Filter 3 på Østerbyværket. Årsagen er, at kobbertilsetning er tidligere observeret at fremme ammoniumfjernelse og er en let løsning. Der var et ønske om at vurdere, om denne løsning kunne være tilstrækkelig på Østerbyværket.

Disse forsøg beskrives i BILAG 2. Som det ses af bilaget skete der en forbedring af ammoniumfjernelse ved kobbertilsetning. Set i lyset af at vandbehandlingen er udfordret i forhold til ammoniumfjernelsen er forbedringen i en signifikant størrelse, men forbedringen er ikke udslagsgivende for vandbehandlingen.

## 5 SmartFilter-Fe

I dette afsnit præsenteres og kommenteres installation og start-up af SmartFilter-Fe på Østerby Vandværk, Aarhus Vand.

### 5.1 Installation af SmartFilter-Fe

#### 5.1.1 Anlæg

På Østerbyværket har der stået en filterbeholder, som har været anvendt til genindvinding af filterskyllevand. Filterbeholderen har ikke været i drift i en længere periode pga. at dele af processen ikke er korrekt dimensioneret og desuden har løsningen en ikke tidssvarende drikkevandssikkerhed (anlæggets alder er 20 år). Til dette projekt blev filterkolonnen ombygget sådan at det kunne forsynes med iltet råvand fra iltningssporet med en dykpumpe i iltningssporet. Samtidig er rørføringen ændret sådan at afgang fra filterbeholderen blev ledt til Filter 6, hvor skyllerenden blev anvendt til at fordele vandet på filtret, se Figur 5.

Filterbeholderen ses på Figur 12.



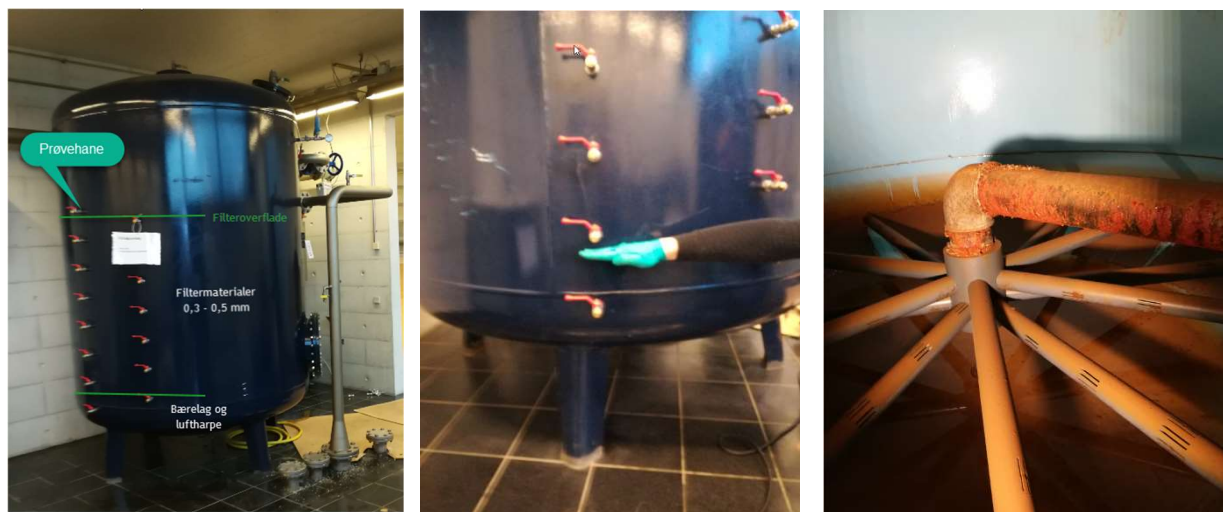
Figur 12 Foto af SmartFilter-Fe og rørføring omkring trykfilteranlægget efter ombygning af rørføring.

I Tabel 4 fremgår de vigtigste data på filterbeholderen og den tilhørende skyllepumpe.

Tabel 4 Dimensions- og driftsdata for SmartFilter-Fe beholderen.

| Filterbeholderens data                  | Enhed             | Størrelse                                                          |
|-----------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Filterdiameter                          | mm                | Ø1.90                                                              |
| Areal af trykfilter                     | m <sup>2</sup>    | 2,83                                                               |
| Filterbeholderens højde                 | mm                | 3.060                                                              |
| Beholdervolumen                         | liter             | 7.000                                                              |
| Skyllevandskapacitet                    | m <sup>3</sup> /t | 85 (målt)                                                          |
| Normal flow filterbeholder i produktion | m <sup>3</sup> /t | 25 – 30 (henholdsvis lige før filterskyl og lige efter filterskyl) |
| Højt flow filterbeholder                | m <sup>3</sup> /t | 56                                                                 |
| Filtermediehøjde                        | cm                | 125                                                                |
| Filtermedium                            | mm                | 3-5                                                                |
| Bærelægshøjde                           | cm                | Op til 0,5 m (bunden af filtret er afrundet)                       |
| Bærelagsmedium                          | mm                | 5-8                                                                |
| Filterbund, vand                        |                   | Radiær skylleharpe med 12 harper alle med 3 mm filterslidser       |
| Filterbund, luft                        |                   | Samme skylleharpe som ovenfor                                      |
| Prøvehaneafstand                        | cm                | 10                                                                 |

På nedenstående figurer er der fotos af filtrets indretning med luftharpe, se Figur 13. Som det ses af foto's har filtret mulighed for udtagning af prøver ved forskellige dybder med 10 cm's afstand. Det bemærkes, at prøvehane 1 er placeret i det opstuvende vand lige over filterlagets top, mens hane 14 og 15 er placeret i bærelaget.



Figur 13 SmartFilter-Fe (til venstre), højden af bærelaget set ud fra (midten) samt filtrets indretning med luftharpe (til højre).

### 5.1.2 Forarbejde

Filtermaterialet består af kvarts og blev leveret af Dansk Kvartsindustri, Addit. Bærelaget (5-8 mm) blev manuelt båret ind i filtret i sække. Der blev anvendt en mængde således, at skylleharpn blev dækket af ca. 20 cm bærelag. Herefter blev det aktive grus (3-5 mm) ligeledes manuelt båret ind i sække.

Der blev ikke foretaget nogen form for oparbejdning under ilægningsprocessen og ifølge filtersandets specifikationer lå ca. 10 % af filtermaterialet uden for kornstørrelsesspecifikationen på 3 – 5 mm. Såfremt filtret skulle have haft en permanent drift, ville man nok have foretaget en eller flere oparbejdninger af filtermaterialet, således at især den finere sandkornfraktion kunne blive fjernet. Permeabiliteten af filtermaterialet ville herved blive forøget, da en mere homogen kornstørrelsesfordeling giver en bedre permeabilitet og lavere tryktab under filterdrift. Det blev dog vurderet, at det var uden væsentlig betydning for filterforsøgene.



Figur 14 Bærelaget i Smartfilter-Fe (hvor prøvetagningsportene er synlige indefra) og visuel inspektion af skyl med luft (efter øgning af kapselblæserens kapacitet).

Efterfølgende blev der foretaget et skyl, hvor det blev observeret, at kapselblæserens kapacitet var for ringe fordi luftmængden var begrænset. Blæseren blev udskiftet til en større blæser, som dog var af ukendt fabrikat og kapacitet. Herefter blev der skyllet dels med luft og dels med vand for at fjerne mest muligt støv samt de mindste filterkorn, som lå under kornstørrelsesspecifikationen på 3 – 5 mm. Inden igangsætning blev filterkolonnen kloret og recirkuleret i et døgn og efterfølgende sat til indkøring med afledning til kloak. Under indkøringen blev jernfjernelsen overvåget igennem de første par døgn.

### 5.1.3 Drift og returskyl

Under indkøring af SmartFilter-Fe blev der anvendt et flow på ca. 30 m<sup>3</sup>/t, svarende til en flowhastighed på omkring 11 m/t. Anlæggets drift fulgte Østerby Vandværks drift, hvilket betyder, at flowet var stoppet ca. et par timer hver nat, hvor forbruget var lavt og rentvandstanken fyldt.

Returskylning blev udført med en to-trins procedure: 1) luft alene og 2) vand alene. Luftflow blev ikke målt. Skyllevandsflowet blev målt til 85 m<sup>3</sup>/t, svarende til ca. 30 m/t. Dette betyder, at skylleprocessen reelt ikke var kraftig nok til at medføre væsentlig bed ekspansion af det grove sand. Varigheden af luftskyl var generelt 6 minutter, mens varigheden af vandskyl var generelt 12 minutter. Varigheden af vandskyl blev fastlagt efter at vandet fra øverste prøvehane i filtret så rimeligt klart ud. Skyllevandet blev dog ikke helt så klart som

man normalt sigter efter ved filterskyl på normale filtre. I praksis betyder det, at der efterfølgende blev ledt partikulært jern ned gennem filteret og ud i afløbet til kloak og efterfølgende i Smartfilter-Fe forsøgene blev det ledt til Filter 6.

Skyllevandsforbruget på Østerby Vandværk er ca. 20.500 m<sup>3</sup>/år, svarende til ca. 3.400 m<sup>3</sup>/år for hvert af de 6 filtre. Skyllevandsforbruget på SmartFilter-Fe estimeres i beregningen nedenfor:

$$\frac{85m^3}{t} \times \frac{t}{60min} \times \frac{12min}{skyl} \times \frac{1skyl}{4dage} \times \frac{365d}{år} = \frac{1.500m^3}{år}$$

Som det ses i et senere afsnit, kunne Filter 6 nøjes med at blive skyllet 20% så ofte som før ibrugtagning af SmartFilter-Fe. Det vil give 0,20 x 3.400 m<sup>3</sup> = 680 m<sup>3</sup>. I alt giver dette 1.500 + 680 = 2.205 m<sup>3</sup> skyllevand per år per filter, svarende til 65% af normal.

Ved filterdrift er det meget vigtigt, at filtermediet ikke vokser over tid, da fjernelse af overskydende filtermateriale er en dyr arbejdsopgave, der også kan indebære en risiko for kontaminering med mikroorganismer. Derfor skal skylleprocessen gerne være så effektiv som muligt. Det kan være, at returskylleprocessen vil kræve højere flow af vand såvel som luft for at undgå langtidseffekter med vækst af filtermedie. Der ligger også mulighed for optimering af skylleprocessen, fx ved brug af 2 kortere cyklusser (luft, vand, luft, vand) i stedet for én lang proces (luft, vand). Undersøgelser af optimering af skylleprocessen af SmartFilter-Fe er ikke gennemført i forbindelse med dette projekt.

Selv efter en optimering af skylleprocessen forventes, at en løsning med et SmartFilter-Fe foran Filter 6 vil kræve væsentlig mindre skyllevand end den nuværende traditionelle løsning.

## 5.2 Start-up af SmartFilter-Fe

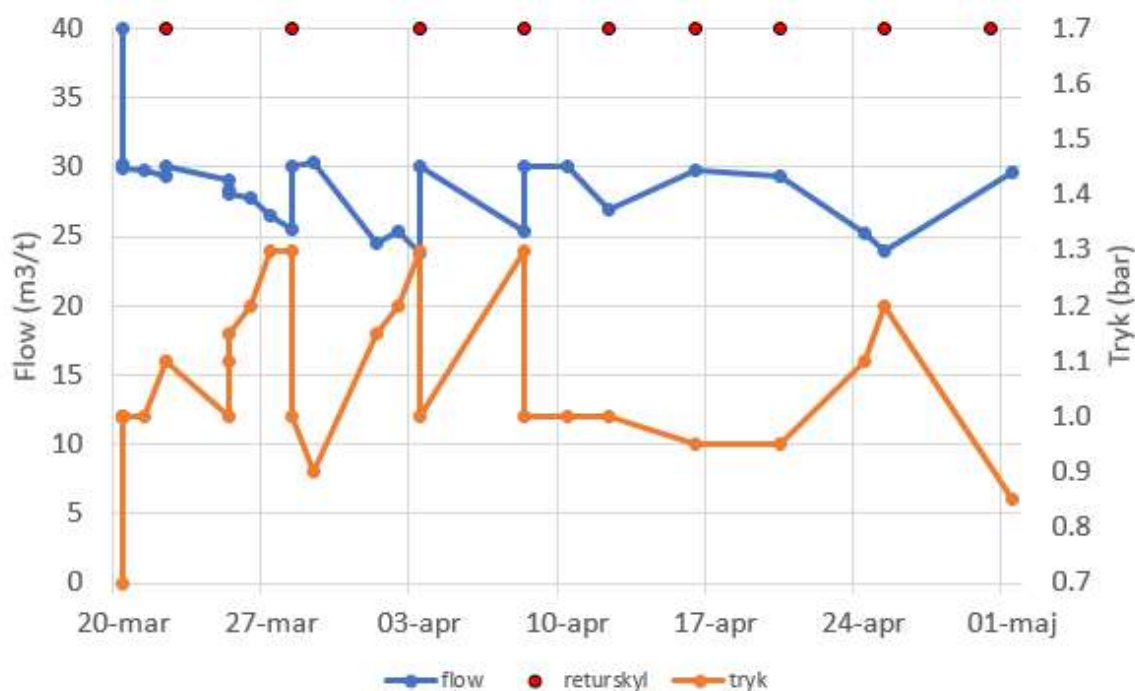
Normalt vil start-up af et trykfilteranlæg fokusere på fjernelse af ammonium og mangan, da disse tager længere tid til at blive indkørt end jern. Derfor findes der færre oplysninger om indkøring af jern på et nyt filter. Da et SmartFilter-Fe kun har til formål at fjerne jern, er jern's indkøringstid i fokus. Dog har også filtrets bakteriologiske indkøring (kimtal, coliforme bakterier og E.coli) også fokus, da disse er en forudsætning for at filtret kan indgå i drikkevandsproduktion.

Inden indkøring fandt sted var der usikkerhed om, hvor længe det vil tage at indkøre filtret for jern. Det skyldes, at der blev brugt et særligt groft filtermateriale (3-5 mm) samt et højt flow (ca. 11 m/t). Begge af disse parametre kunne tænkes at forlænge indkøring af nyt filtergrus som følge af hhv. lille overfladeareal og for højt flow til at jernoxider kunne sætte sig på det nye filtermateriale.

Under indkøring var tilløbsvandet særlig fyldt med jernoxidpartikler. Disse partikler stammede fra iltningssporet, hvor dykpumpens turbulente tilbageløb løsrev gamle jernoxidpartikler fra iltningssporet. Det kan tænkes, at disse partikler muligvis har fremmet indkøring af SmartFilter-Fe.

### 5.2.1 Hydraulik

SmartFilter-Fe blev indkørt i perioden 20. marts 2019 til 30. april 2019. Figur 15 viser en tidsserie med flow og tryk samt angivelse af tidspunkter for returskyl.



Figur 15 Tidsserie med indkøring af SmartFilter-Fe for jern - med angivelse af tryk, flow og tidspunkt for returskyl, Østerby Vandværk.

Som det ses af figuren blev SmartFilter-Fe returskyllet én gang om ugen de første to uger (gangtid 6 dage) og derefter ca. hver 3. dag for at undgå at filtret skulle returskylles i weekender. Figuren viser endvidere, at flowet falder fra ca. 30 m³/t til 25 m³/t over en gangtid (sløjfen med returvand i iltningssporet formodes at være øget), mens trykket stiger fra ca. 1,0 bar til 1,3 bar i takt med at filtret tilstoppes.

### 5.2.2 Gangtid

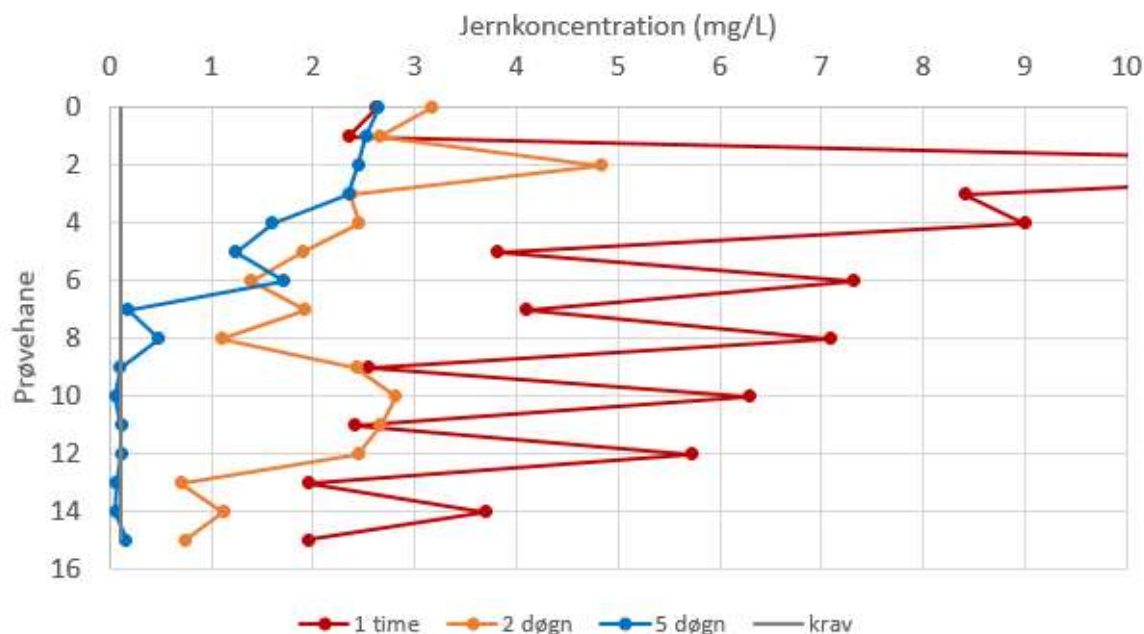
En typisk tommelfingerregel for længden af en gangtid er, at der skylles efter fjernelse af 0,5 eller 1,0 kg Fe fra råvandet per m² filterareal. I praksis er det dog ikke ualmindeligt, at vandværker kun fjerner omkring 0,2 kg/m² per gangtid. I det aktuelle tilfælde er der tale om fjernelse af ca. 2,0 kg Fe/m² filterareal, se et groft estimat i regnestykket nedenfor:

$$\frac{30 \text{ m}^3}{t} \times \frac{22 \text{ t}}{d} \times \frac{3,5 d}{\text{gangtid}} \times \frac{2,5 g \text{ Fe}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ kg Fe}}{10^3 g \text{ Fe}} \times \frac{1}{2,83 \text{ m}^2 \text{ filterareal}} = \frac{2,0 \text{ kg Fe}}{\text{m}^2 \text{ filterareal}}$$

Årsagen til at det er muligt at fjerne mere jern i løbet af en gangtid inden filtret tilstopper er, at jernfjernelse sker til en større dybde (dybdefiltrering) end normalt (på grund af den større strømningshastighed) samt at der er anvendt filtermedie med større kornstørrelse.

### 5.2.3 Indkøring

Figur 16 viser en dybdeprofil for indholdet af totaljern i vandfasen i start-up perioden.



Figur 16 Dybdeprofil for totaljern i vandfasen i start-up perioden på SmartFilter-Fe, Østerby Vandværk.

Som det ses af grafen, er flere af de målte jernkoncentrationer væsentlig højere end råvandskoncentrationen, der normalt ligger omkring 2,5 mg/L. Det er resultatet af, at dyk-pumpen i iltningssporet har løsrevet mange gamle jernoxidpartikler fra iltningssporet samt at vandprøverne ikke blev filtreret. Det ser dog ud til at have en aftagende effekt over tid.

Allerede efter 5 døgn ser det ud til at SmartFilter-Fe er indkørt med hensyn til jern og at udløbskoncentrationerne er omkring kvalitetskravet for drikkevand.

Det ser ud til, at jernfjernelse er komplet allerede efter 60 cm når der anvendes et flow på 30 m<sup>3</sup>/t. Det skal bemærkes, at hane 1 ligger lige over toppen af sandet og således repræsenterer tilløb til filtermaterialet. Da filtret indeholder ca. 120 cm sandtykkelse, lever SmartFilter-Fe ikke op til kravet om at jernfjernelse skal ske over minimum 75% af indsatshøjden, men kun 50%. Det hænger sammen med at filterhastigheden på 11 m/h er mindre end kravet om minimum 15 m/h for et SmartFilter-Fe. Disse resultater tyder på at SmartFilter-Fe godt kunne have været belastet med et større flow end de 11 m<sup>3</sup>/t, som blev anvendt under opstart. Det ville antageligt have øget filterets jernfjernelsesevne under opstart af selve Smartfilter-Fe forsøget.

Der blev udført kimtalsmåling og måling af coliforme bakterier under opstart for at sikre en god bakteriologisk vandkvalitet inden vandet blev ledt til Filter 6 og videre til forbrugerne. Der blev ikke fundet coliforme bakterier på noget tidspunkt og resultatet af kimtalsmålingerne ses i Tabel 5:

Tabel 5 Oversigt over mikrobielle målinger under start-up af SmartFilter-Fe og senere.

| Prøvetagnings-dato | Prøvested             | Kimtal 22<br>(antal pr.<br>mL) | Coliforme<br>(antal pr.<br>100 mL) | E.coli<br>(antal pr.<br>100 mL) |
|--------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 22. marts 2019     | Afgang SmartFilter-Fe | 37                             | <1                                 | <1                              |
| 28. marts 2019     | Afgang SmartFilter-Fe | 44                             | <1                                 | <1                              |
| 1. april 2019      | Afgang SmartFilter-Fe | 4                              | <1                                 | <1                              |
| 11. april 2019     | Afgang SmartFilter-Fe | 8                              | <1                                 | <1                              |
| 16. maj 2019       | Afgang Filter 6*      | 4                              | <1                                 | <1                              |
| 21. maj 2019       | Afgang Filter 6*      | 4                              | <1                                 | <1                              |

\* Vandanalyser foretaget med henblik på at sikre at der ikke var kimtalsproblematikker pga. den lange gangtid i filter 6.

Tabellen viser, at de mikrobielle målinger overholdt kvalitetskravene i hele perioden. Det høje flow medfører en fortynding, der kan være med til at forklare disse gode resultater.

## 6 De åbne filtre efter tilkobling af SmartFilter-Fe

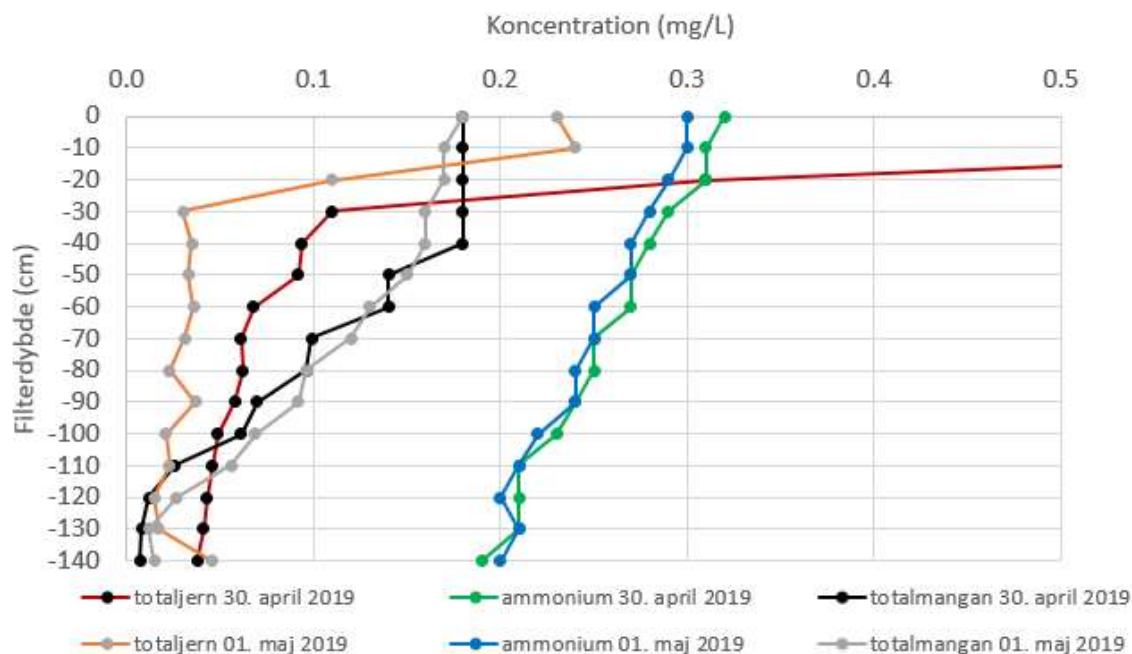
I dette afsnit angives resultater for de åbne filtre på Østerby Vandværk i forbindelse med tilkobling af SmartFilter-Fe. Oplysningerne stammer hovedsagelig fra måling af dybdeprofiler i filtret ved hjælp af værktøjet juletræet. Følgende undersøgelser blev udført:

1. **Overgang til SmartFilter-Fe:** Der blev udtaget vandprøver fra Filter 6 umiddelbart før og efter tilledning af vand fra afgang SmartFilter-Fe.
2. **Efter 1 månedens drift:** Filter 6 efter 1 måneds drift, hvor indløbet stammer fra SmartFilter-Fe.
3. **Højt flow:** Der blev udtaget vandprøver fra Filter 6, hvor der var højt flow gennem linjen med SmartFilter-Fe og Filter 6.
4. **Varieret flow:** Der blev udtaget vandprøver fra Filter 6, hvor der var varieret flow gennem linjen med SmartFilter-Fe og Filter 6.

### 6.1 Overgang til SmartFilter-Fe

Denne undersøgelse blev indledt med et filterskyl af Filter 6 d. 30. april 2019, hvor juletræet blev isat filtret. Udtagning af vandprøver til dybdeprofiler før tilkobling af SmartFilter-Fe blev påbegyndt først efter en times drift af filtret efter skyllet for at sikre, at der blev målt på en almindelig driftssituation og ikke på tilbageværende skyllevand fra filter-skyllet i filtermatricen. Herefter (samme dag, 30. april 2019) blev SmartFilter-Fe tilkoblet foran Filter 6. Dagen efter (1. maj 2019) blev der igen udtaget vandprøver til dybdeprofiler på Filter 6.

Figur 17 sammenligner dybdeprofiler for totaljern, totalmangan og ammonium i Filter 6 for disse to situationer (før og efter tilkobling af SmartFilter-Fe).

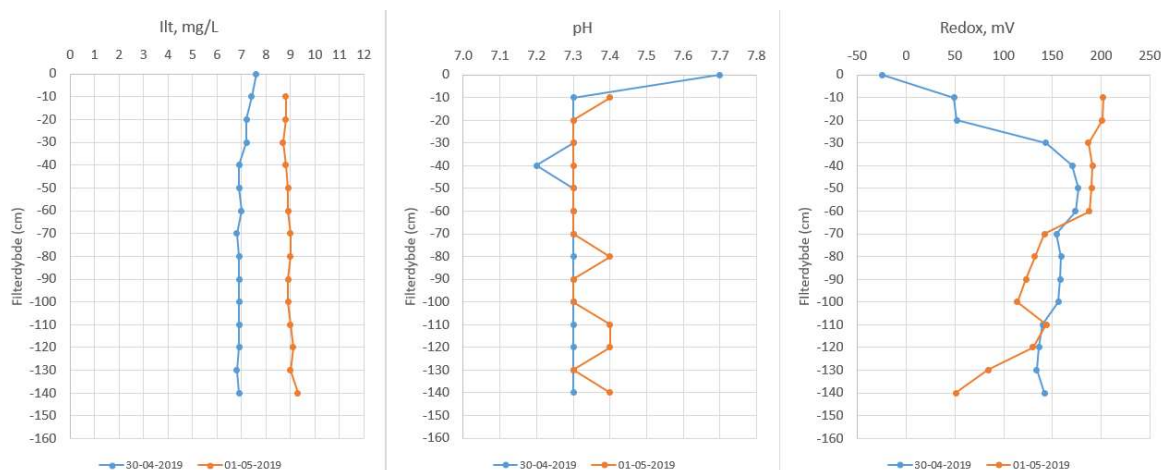


Figur 17 Dybdeprofil af totaljern, ammonium og totalmangan i Filter 6 umiddelbart før og efter tilkobling af SmartFilter-Fe foran Filter 6.

Jerngrafen i Figur 17 viser tydeligt, at Filter 6 er aflastet for jern efter tilkobling af SmartFilter-Fe. Jernkoncentrationen i indløbet faldt fra 2,50 mg/L d. 30. april 2019 (værdien overskrider grafens skala) til 0,23 mg/L d. 1. maj 2019. Denne reduktion i indløbskoncentration for jern er netop hensigten med SmartFilter-Fe.

Mangan- og ammoniumgraferne i Figur 17 viser ingen forskel i filterdybde 0 efter tilkobling af SmartFilter-Fe. Hermed er det vist, at SmartFilter-Fe på dette tidspunkt ikke fjerner disse stoffer, hvilket heller ikke er hensigten. Desuden ses, at der er ingen straks effekt på mangan- og ammoniumfjernelse i hele dybdeprofilen på Filter 6 ved overgang til et jernfrit tilløb. Det bemærkes, at ammoniumkoncentration i 140 cm's dybde overskrider stadig drikkevandets kvalitetskrav på 0,05 mg/L. Det bemærkes yderligere, at ammonium ved afgang Filter 6 var 0,036 og 0,022 mg/L på hhv. 30. apr. og 01. maj, så kvalitetskravet alligevel ikke overskrides i det behandlede vand. Hermed sker der en hel del ammoniumfjernelse under bunden af juletræet, dvs. i bærelaget og/eller filtrets underkammer. Dette interessante og vigtige fænomen er observeret flere gange, men årsagen er ikke undersøgt i dette projekt.

Figur 18 viser dybdeprofiler for feltparametrene ilt, pH og redox i vandprøver fra Filter 6 umiddelbart før og efter tilkobling af SmartFilter-Fe foran. Det bemærkes, at bundbeluftning i iltningssporet stadig slukket på dette tidspunkt.



Figur 18 Dybdeprofiler for feltparametre i Filter 6 umiddelbart før og efter tilkobling af SmartFilter-Fe foran Filter 6.

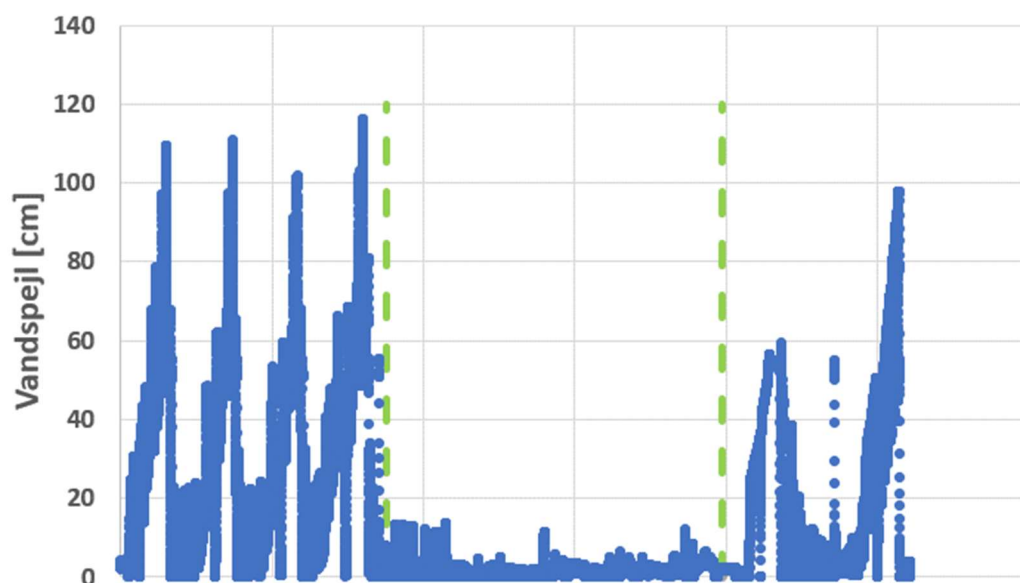
Iltgrafen i Figur 18 viser, at iltindholdet er højere efter tilkobling af SmartFilter-Fe. Årsagen er, at alt vand til Smartfilter-Fe tages fra samme iltningsspor, hvor tilbageløbet (som har til hensigt at reducere flow til SmartFilter-Fe) fra den store dykpumpe medfører kraftig plask og dermed et supplement til iltningen af vandet.

pH-grafen i Figur 18 viser meget stabile værdier på 7,3 eller 7,4 ved begge målegange.

Redoxgrafen i Figur 18 viser en højere værdi i toppen af filtret, når vandet kommer fra SmartFilter-Fe end når vandet kommer direkte fra iltningssporet. På den måde passer højere ilt og højere redox sammen. Til gengæld ses et fald i redox med dybden i prøverne udtaget i Filter 6 efter tilkobling af SmartFilter-Fe. Årsagen til dette kendes ikke. Ingen af værdierne overstiger 200 mV, som er tilfældet i prøver udtaget umiddelbart efter et skyl, se fx Figur 9 og Figur 11.

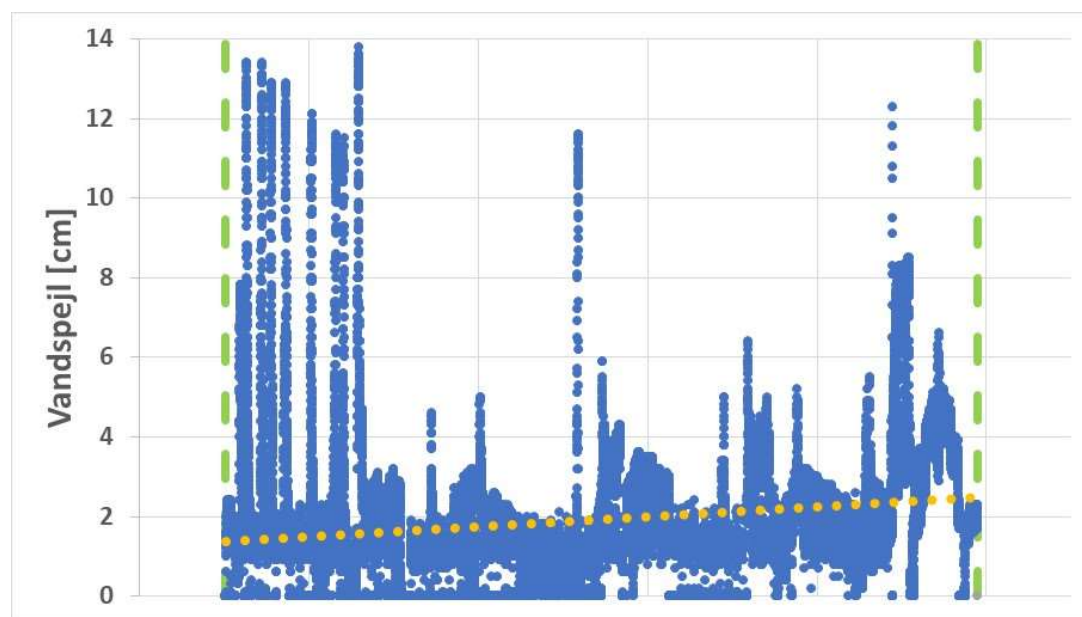
## 6.2 Efter 1 måneds drift

Figur 19 viser vandstands niveauet over sandet i Filter 6 i perioden 6. april til 18. juni, 2019. I perioden frem til den 1. maj vises almindelig drift, hvor råvandet tilføres filtret direkte. Figuren viser, at vandstands niveauet stiger til godt 1 meter i løbet af en gangtid og falder igen ved returskyl. Den første lodrette grønne stiplede linje markerer 1. maj, hvor råvandet først ledes gennem SmartFilter-Fe, hvor jernet fjernes, og derefter til filtret. Mellem de 2 grønne stiplede linjer er en periode på 1 måned, hvor råvandet er behandlet i SmartFilter-Fe. Som det ses, sker der meget begrænset opstuvning (generelt under 10 cm) til trods for, at der ikke foretages returskyl i perioden. Perioden blev begrænset til en måned, fordi manual skyl af SmartFilter-Fe var meget tidskrævende og derfor omkostningstungt for projektet.



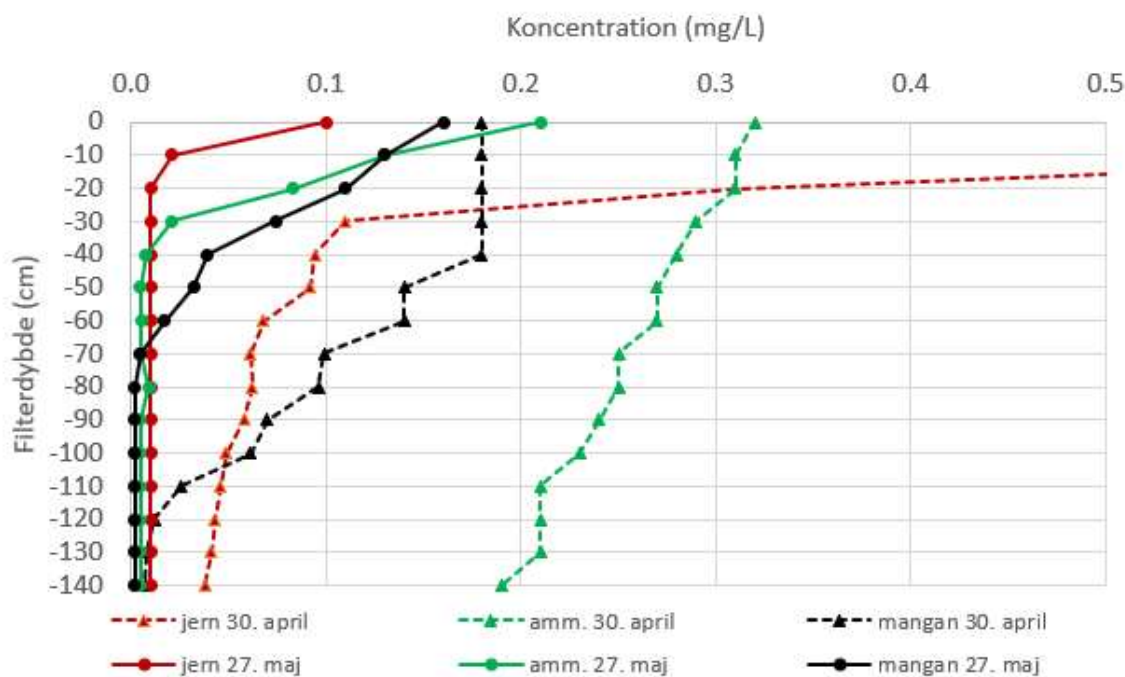
Figur 19 Tidsserie med vandspejlsmålinger i Filter 6 i perioden 6. maj til 18. juni 2019.

Figur 20 fremhæver perioden på én måned, hvor SmartFilter-Fe er tilkoblet foran Filter 6. Det ses af figuren, at vandspejlsniveauet variere fra 0 cm til kun 14 cm til trods for, at Filter 6 ikke blev skyllet i denne periode. De stiplede runde orange punkter viser en lineær tendenslinje. Tendenslinjen er svagt stigende, svarende til ca. 1 cm stigning i vandspejlet på en måned. Dette viser tydeligt, at Filter 6 har mindre skyllebehov, når SmartFilter-Fe er foran.



Figur 20 Tidsserie med vandspejlsmålinger i Filter 6 i perioden 1. maj – 1. juni 2019.

Figur 21 viser en dybdeprofil efter 1 måneds drift, sammenlignet med lige inden tilkobling af SmartFilter-Fe.

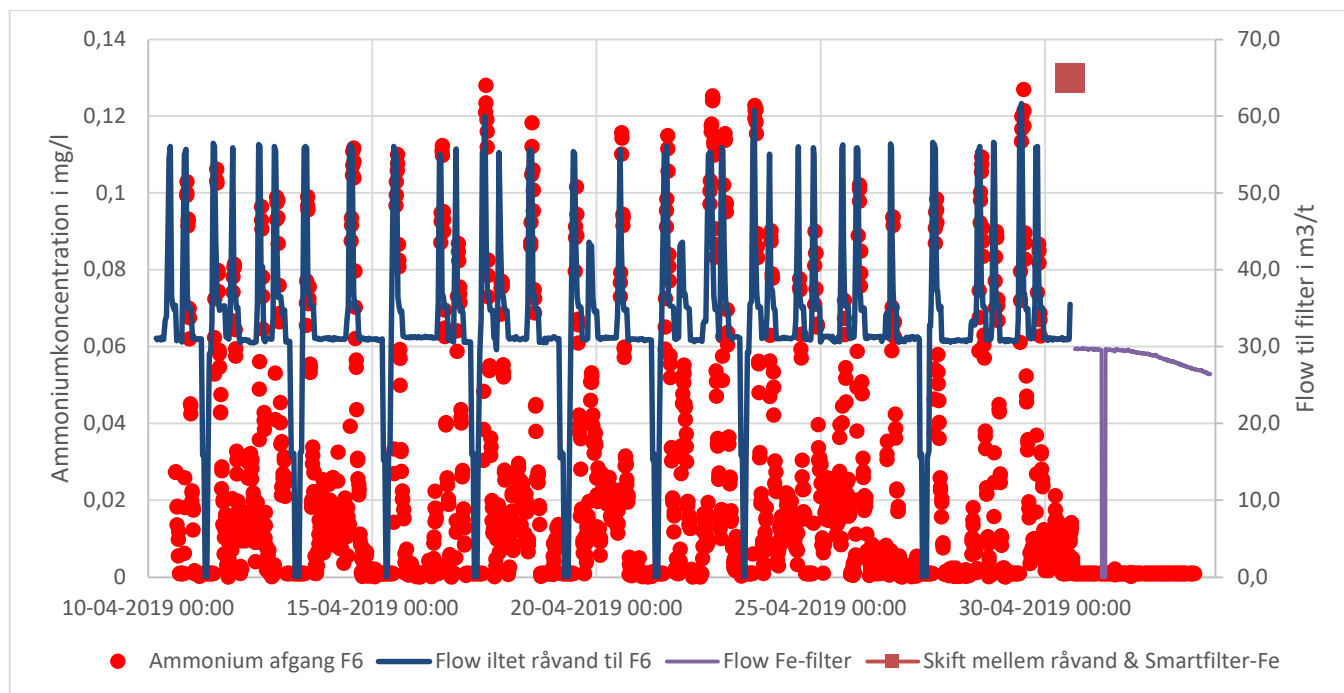


Figur 21 Dybdeprofiler for jern, mangan og ammonium i Filter 6 efter 1 måneds drift (27. maj 2019) af SmartFilter-Fe foran Filter 6 sammenlignet med lige inden tilkobling af SmartFilter-Fe (30. april 2019).

Figur 21 viser, at jernkoncentrationen i tilløbet til Filter 6 (dybde 0) er lavt efter SmartFilter-Fe er tilkoblet. Hermed fjerner SmartFilter-Fe langt hovedparten af jernet fra råvandet som ønsket. Desuden ses, at SmartFilter-Fe d. 27. maj er begyndt at fjerne lidt ammonium og mangan i forhold til 30. april (udgangspunktet i dybde 0 cm er lidt lavere). Dette er ikke det primære formål med SmartFilter-Fe, men kan ses som en bonuseffekt.

Projektets vigtigste resultat er dog, at vandbehandling i Filter 6 er d. 27. maj langt bedre med SmartFilter-Fe end 30. april uden SmartFilter-Fe. Jern fjernes til under drikkevandets kvalitetskrav på 0,2 mg/l allerede ved tilløb til Filter 6. Ammonium fjernes nu til under kravet på 0,05 mg/l allerede i 30 cm's dybde i stedet for at ligge på ca. 0,2 mg/l i bunden af filtret. Mangan opfylder kravet på 0,05 mg/l allerede i 40 cm's dybde i stedet for en dybde på > 100 cm. Hældningen af ammoniumfjernelseskurven stiger fra ca. 0,01 mg/l per 10 cm filterdybde til 0,06 mg/l per 10 cm filterdybde.

Hermed er det vist, at SmartFilter-Fe ikke alene reducerer forbrug af skyllevand, men også forbedrer vandkvaliteten og øger filtrets rensekapacitet.

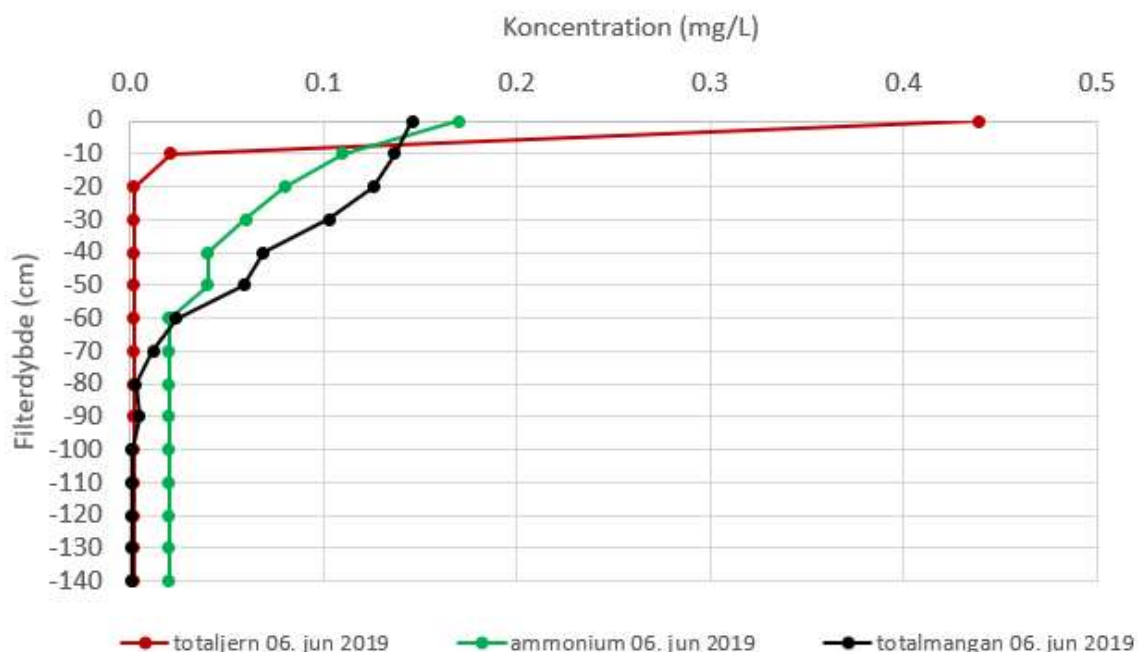


Figur 22 Ammoniumindholdet på afgang filter 6 før og efter igangsætningen af Smartfilter-Fe.

Figur 22 illustrerer effektiviteten af Smartfilter-Fe. Ammoniumindholdet i Filter 6's normale drift viser, at drikkevandskriteriet for ammonium på 0,05 mg/L overskrides (røde prikker), når belastningen af filteret (blå linje) øges. Efter at vandet ledes til Smartfilter-Fe før tilløb til Filter 6 (stor rød firkant) falder ammonium til et meget lavt niveau.

## 6.3 Højt flow

Figur 23 viser en dybdeprofil for Filter 6, når flowet er hævet fra i gennemsnit 27 m<sup>3</sup>/t (i måneden op til d. 27. maj 2019) til i snit 55 m<sup>3</sup>/t (i ugen op til 6. juni 2019).

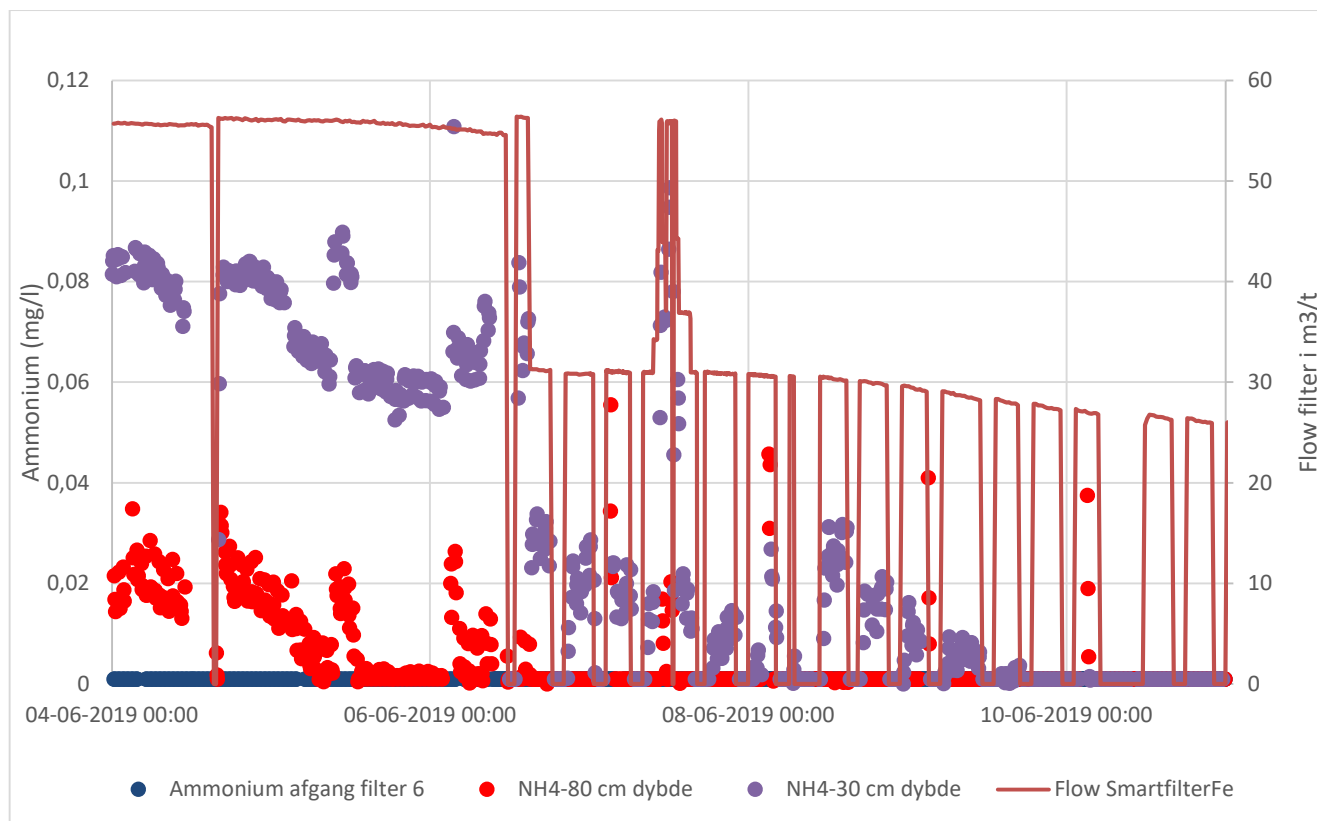


Figur 23 Dybdeprofiler for jern, mangan og ammonium i Filter 6 ved højt flow (6. juni 2019).

Som det ses af Figur 23 sker der et lille ryk nedad med hensyn til dybden, hvor drikkevandets kvalitetskrav for ammonium og mangan overholdes. Dog overholdes begge krav allerede i 60 cm's dybde. Hermed viser Filter 6, at det kunne klare en kapacitets fordobling uden problemer og at filtret formentlig vil kunne belastes yderligere.

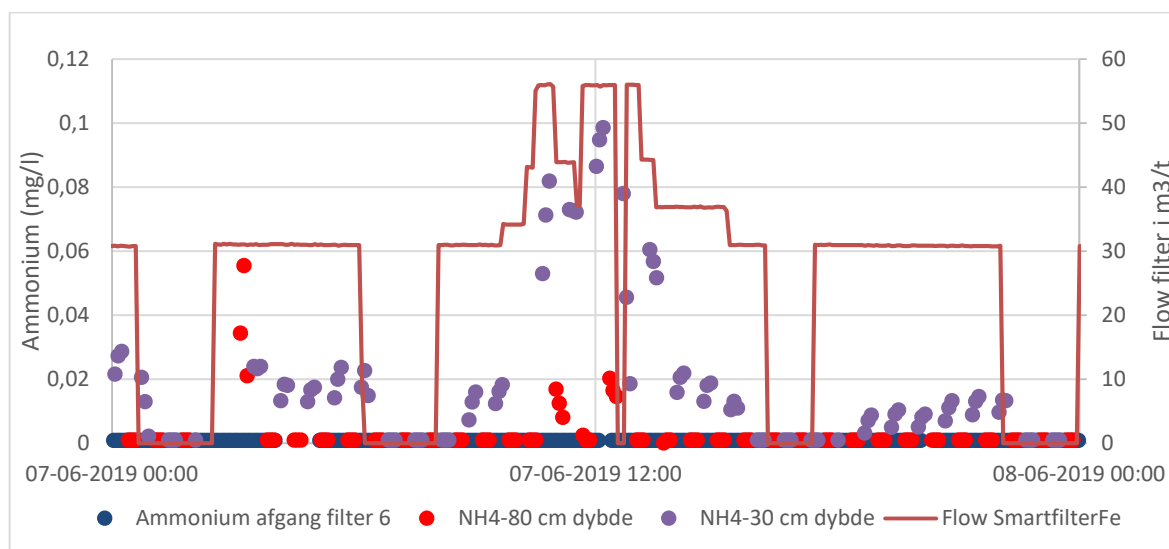
## 6.4 Varierende flow

Denne undersøgelse blev udført d. 7. juni 2019. Her blev almindelig drift med varierende flow efterlignet ved at dreje på en ventil for at ændre flowet igennem Filter 6. Figur 24 viser ammoniumkoncentrationen i Filter 6 i to dybder (hhv. 30 og 80 cm under toppen af sandet) målt ved Amtax udstyr, der var tilkoblet udvalgte grene på juletræet.



Figur 24 At-line ammoniummålinger (Amtax) udtaget fra to juletræsgrene ved højt flow (6. juni 2019) og varieret flow (7. juni 2019) og efterfølgende kontinuert lavt flow.

Figur 24 viser, at ammoniumkoncentrationen i 80 cm's dybde var meget lavt under hele forsøget. Til gengæld ses, at koncentrationen i 30 cm's dybden påvirkes af flowet. I perioden med højt flow viser figuren, at ammonium er over kvalitetskravet ved 30 cm's dybde, men overholder kvalitetskravet i 80 cm's dybde. Ammonium ved afgang Filter 6 er under detektionsgrænsen. Ved varieret flow og stabil lavt flow overholder ammoniumindholdet generelt kvalitetskravet allerede i 30 cm's dybde.



Figur 25 Ammonium og flowdata for perioden med varierende flow er vist i detaljer.

Resultaterne på figur 25 viser, at ammoniumfjernelsen påvirkes under variationer i flow og reduceres, når der forekommer længerevarende perioder med stabilt flow. Det er værd at bemærke, at selv om der forekommer variationer i ammoniumindholdet i de to målte dybdeintervaller i filtret, er den afgang filter langt under grænseværdien. Dette indikerer, at samdriften med Smartfilter-Fe øger filtrets rensekapacitet i forhold til ammonium væsentligt. Hermed har SmartFilter-Fe medført Filter 6 robusthed overfor flowændringer.

Disse resultater tyder på, at opstilling af SmartFilter-Fe løser udfordringen med ammonium på Østerbyværket.

## 7 Konklusioner

Nedenfor ses en oversigt over projektets tekniske konklusioner.

### Konklusioner om selve SmartFilter-Fe

1. SmartFilter-Fe blev indkørt for jern på  $< 5$  døgn.
2. Anvendelse af 3-5 mm kornstørrelse og flow på 11 m/t gav en acceptabel hydraulik i SmartFilter-Fe. En jernbelastning på filtret på 2,0 kg Fe/m<sup>2</sup> filterareal medførte en trykstigning på 0,3 bar over en gangtid.
3. SmartFilter-Fe var i stand til at fjerne 90% af råvandets jernindhold.
4. Målet for et SmartFilter-Fe blev fastlagt til jernfjernelse i mindst 75% af filterdybden (dybdefiltrering) og et minimumsflow på 15 m/t. Under forsøgene blev disse mål knap udnyttet med jernfjernelse på ca. 50% af dybden og flow på 11 m/t.
5. Under driften af SmartFilter-Fe oparbejder filteret en mindre renseeffekt overfor ammonium og mangan, selv om det ikke var hensigten.

### Konklusioner om de eksisterende filterbassiner

6. Generelt var der udfordringer med ammoniumfjernelse i Filter 6 med hyppige overskridelser ved udløbet. Ammoniumfjernelsen blev forringet lidt over en gangtid, hvor man ville forvente det modsatte.
7. Der blev observeret luftansamlinger i filtermateriale. Dette blev væsentligt reduceret efter at blæseren til iltningssporet blev slukket.
8. Iltkoncentrationen faldt ved slukning af blæseren til iltningssporet, men ammoniumfjernelsen blev også en smule forringet.
9. Filter 3 med tilsætning af kobber viste god fjernelse i starten af en gangtid, men ikke i slutning af en gangtid. Høj vandstand, som følge af reduceret permeabilitet i filterets øverste del, kan muligvis være årsagen.
10. Redoxværdier var generelt lavere og udviste større variation med dybde i slutning af en gangtid i forhold til starten af en gangtid.
11. pH-værdien var generelt højere lige efter et skyl end ved slutning af en gangtid.

### Konklusioner om de eksisterende filterbassiner efter tilkobling af SmartFilter-Fe

12. Gangtiden på Filter 6 var større end 28 døgn efter indførslen af SmartFilter-Fe. Der sås ingen bakteriologiske problemstillinger som følge af den længere gangtid.
13. Summen af skyllevandsforbruget til SmartFilter-Fe og Filter 6 er væsentlig mindre end skyllevandsforbruget uden SmartFilter-Fe.
14. Tilkobling af SmartFilter-Fe medførte, at fjernelse af ammonium og mangan på Filter 6 blev stærkt forbedret.
15. Højt flow viste, at kapaciteten af Filter 6 blev kraftig forøget efter tilkobling af SmartFilter-Fe.
16. Forsøg med variable flow viste, at ammoniumfjernelsen ned igennem filteret påvirkes, men reduceres under konstant flow. Forsøget viste også, at vandkvaliteten af det producerede drikkevand kunne overholde grænseværdien for ammonium under almindelige varierede flowforhold.