



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Vandbehandlings- model

Rapport 9 i projektet "Smart Re-design of Drinking Water Production"

MUDP Rapport

September 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Søren Bastholm Olesen

Peter Vittrup Christensen

Fotos:

Ditte Andreasen Søborg

ISBN: 978-87-7038-548-0

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	7
1. Introduktion	8
2. Metoder	9
2.1 Virtuel prototype	9
2.1.1 Model for flow	9
2.1.2 Model for jernfjernelse	10
2.1.3 Model for ammoniumfjernelse	10
2.2 Modelbrugerflade	11
3. Resultater	15
3.1 Driftsscenarier for prototypen Lundeværket	15
3.1.1 Generelle oplysninger om forfilter	15
3.1.2 Jernfjernelse på forfilter	15
3.1.3 Ammoniumfjernelse forfilter	18
3.1.4 Efterfilter med biostimulering	20
3.1.5 Jernfjernelse på efterfilter	20
3.1.6 Ammoniumfjernelse på efterfilteret	22
3.2 Driftsscenarier for prototypen Østerbyværket	23
3.2.1 Forfilter generelt	23
3.2.2 Jernfjernelse på forfilteret	24
3.2.3 Efterfilter	26
4. Konklusion	28

Forord

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

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

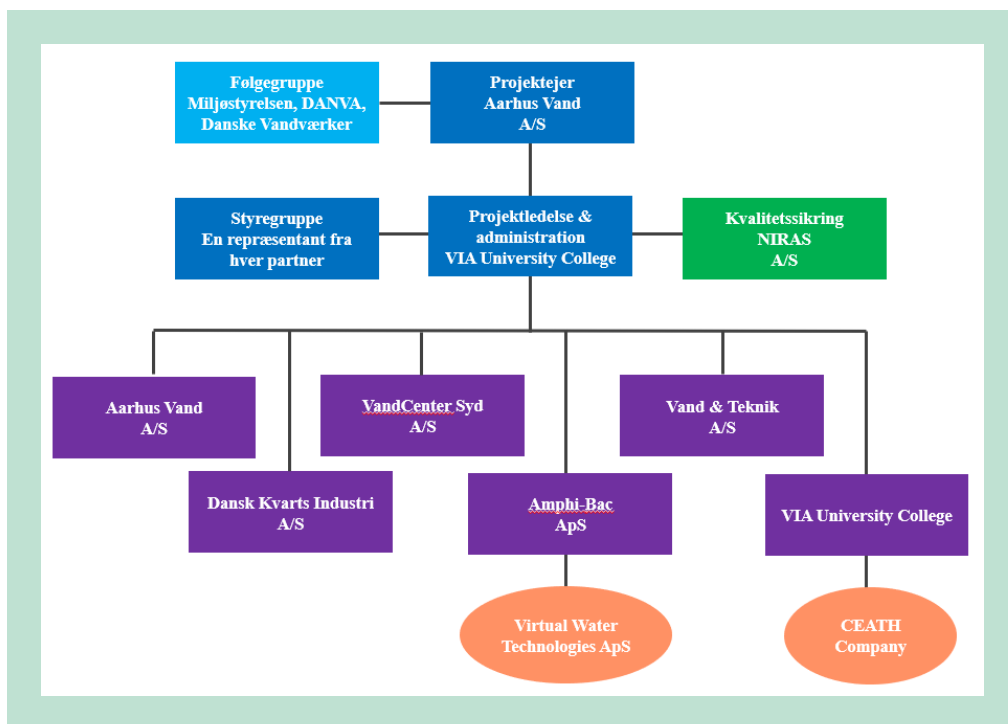
Baggrund

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

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

Projektorganisation

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



FIGUR 1. Diagram over projektorganisation.

Projektets følgegruppe og styregruppe bestod af følgende personer:

Følgegruppe

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

Styregruppe

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

Projektets arbejdsplaner og rapporter

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

Arbejdsplan 1: Etablering af designgrundlag (åben)

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

Arbejdsplan 2: Tekniske forsøg (åben)

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

Arbejdspakke 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 en udvikling og udnyttelse af en vandbehandlingsmodel og er Rapport 9 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Formålet med arbejdet er at undersøge og dokumentere fordelene ved de nye filterdesigns ved hjælp af CFD (Computational fluid dynamics) modeller, der ud fra modelberegninger kan belyse virkningen af den ændrede konstruktion.

Redesign-projektet indebærer en fuldskalademonstration af vandbehandling på Lundeværket nord for Odense og Østerbyværket syd for Aarhus. Beregningerne er udført for at skabe grundlag for og understøtte design af disse demonstrationsanlæg. På Lundeværket planlægges at opføre et nyt efterfilter (trykfilter) til ammonium og anvende et eksisterende filter som forfilter (efter afgravning en del filtermedie for at sikre, at forfilteret ikke fjerner al ammonium). På Østerbyværket planlægges at opføre et nyt forfilter (trykfilter) til jernfjernelse og anvende et eksisterende filter til efterfilter.

Den virtuelle prototype er udviklet i programmet COMSOL af firmaet Virtuel Water Technology. Der er lavet en Client brugerflade så det har været muligt at opsætte og undersøge mange forskellige driftsscenerier. I brugerfladen skal der vælges, hvordan modellen skal afvikles, herunder om der skal bruges almindelig filterdrift med flow oppefra og ned eller man vil bruge alternerende flowretning.

Modellen fremstiller dybdeprofiler for jern og ammonium, hvor jernfjernelsen er 1. ordens kinetik, mens ammoniumfjernelse bruger Monod kinetik. Modellen beregner koncentrationen af ammoniumoxiderende bakterier i biofilmen ved hjælp af forøgelse via vækst og fjernelse via returskyl. Desuden beregner modellen porøsitet over tid ved hjælp af forøgelse fra udfældning af jernoxid og fjernelse via returskyl. Endelig beregner modellen filtermodstand som funktion af tid (og dermed gangtider).

For Lundeværket viser resultater af diverse scenarier, at det eksisterende forfilter kan bortgraves til 50 cm lagtykkelse af filtermediet og stadig fjerne jern ved et flow på 40 m³/t. Ved et nyt efterfilter med 1,8 m² filterareal, vil samme flow give en filterhastighed på 22 m/t. Til trods for denne høje filterhastighed vil filteret være i stand til at fjerne det jern, der slipper igennem forfilteret (forudsat det ikke overskrider 0,1 mg/L) samt at ammonium vil kunne fjernes til under kvalitetskriteriet ved alternerende flowretning. Endvidere viser modellen, at indkøring af ammoniumfjernelse kan tage over én måned, hvorfor anvendelse af SmartSand, der allerede er indkørt, vil være fordelagtig.

For Østerbyværket viser resultaterne af diverse scenarier, at gangtiden på det eksisterende efterfilteret er meget afhængig af hvor meget jern slipper igennem forfilteret. Da hurtigt flow på forfilter medfører, at mere jern slipper igennem, vil der være en flowgrænse på ca. 30 m³/t for at der ikke slipper mere end 0,2 mg/L jern igennem forfilteret. Så kan gangtiden på efterfilteret være ca. en måned, hvilket tillader uforstyrret vækst af de nitrificerende bakterier uden at de fjernes ved et returskyl.

1. Introduktion

Denne rapport omhandler en udvikling og udnyttelse af en vandbehandlingsmodel og er Rapport 9 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Formålet med arbejdet afleveret her er at undersøge og dokumentere fordelene ved de nye filterdesigns ved hjælp af CFD (Computational fluid dynamics) modeller, der ud fra modelberegninger kan belyse virkningen af den ændrede konstruktion.

Projektet Redesign indebærer en fuldskala demonstration af vandbehandling på Lundeværket nord for Odense og Østerbyværket syd for Aarhus. Beregningerne afleveret her er udført for at skabe grundlag for og understøtte design af disse demonstrationsanlæg.

Projektet ønsker at gøre op med det traditionelle filterdesign, hvor jernfjernelse, ammonium-omsætning og manganfjernelse foregår i det samme store filterbassin. Ved at adskille processerne fysisk i en modulær opbygning, kan der tages individuelt hensyn til hver proces og disse kan pga. den nye opbygning optimeres. Den modulære opbygning åbner imidlertid også op for nytænkning mht. design og konstruktion af filterbeholderne, idet selve den fysiske udformning kan skræddersyes den ønskede proces.

Denne rapport dokumenterer udvikling af en ny CFD-model for biofiltre. Hermed er det muligt at afprøve en virtuel prototype ved beregning af et scenarium i stedet for f.eks. at udføre forsøg i pilotskala. Det medfører en stor fleksibilitet, hvor mange forskellige parametre kan testes på kort tid.

2. Metoder

2.1 Virtuel prototype

Den virtuelle prototype er udviklet i programmet COMSOL af firmaet Virtuel Water Technology, der er underleverandør til projektet. Modellen er lavet for jern og ammonium. I modelberegningerne indgår der en række parametre. Disse er listet herunder i TABEL 1.

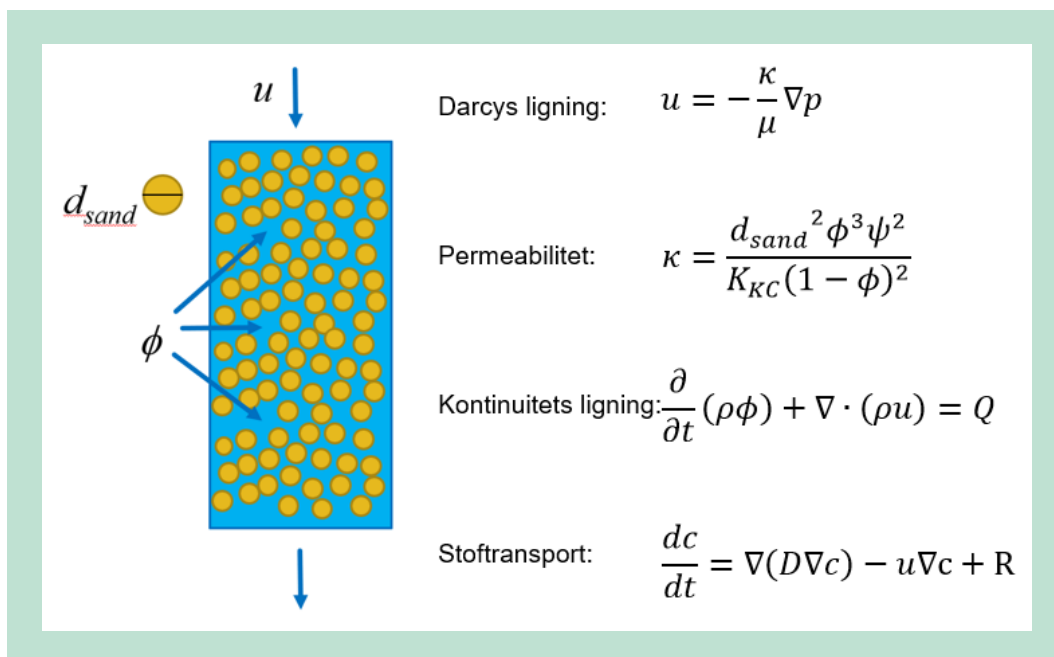
TABEL 1. Oversigt over parametre i modellen.

Symbol	Parameter	Enheder
u	Vandhastighed	[m/s]
κ	Permeabilitet	[m ²]
μ	Vandets viskositet	[Pa·s]
p	Tryk	[Pa]
d_{sand}	Diameter af sand	[m]
ϕ	Porøsitet af sandkolonne	[-]
ψ	Sfæricitet af sand	[-]
K_{KC}	Kozeny-Carman konstant	[-]
t	Tid	[s]
ρ	Densitet af vand	[kg/m ³]
Q	Indløbsflux	[kg/(m ² ·s)]
c	Koncentration	[kg/m ³]
D	Dispersionskoefficient	[m ² /s]
R	Reaktionsrate	[mol/(m ³ ·s)]
$[Fe]$	Koncentration af jern	[kg/m ³]
k_{Fe}	1.ordens ratekonstant for udfældning af jern	[s ⁻¹]
$k_{Fe,cat}$	2.ordens ratekonstant for katalytisk udfældning af jern	[m ³ /(kg·s)]
$[Fe_{precip}]$	Koncentration af udfældet jern	[kg/m ³]
$\hat{V}$	Specifik volumen af udfældet jern	[m ³ /kg]
$[NH_4^+]$	Koncentration af NH ₄ ⁺	[kg N-NH ₄ ⁺ /m ³]
μ_{NB}	Vækstratekonstant for nitrificerende bakterier	[s ⁻¹]
Y_{NB}	Udbyttekonstant for nitrificerende bakterier	[kg COD/kg N-NH ₄ ⁺]
X_{NB}	Koncentration af nitrificerende bakterier i biofilm	[kg COD/m ³]
$\mu_{NB,max}$	Maksimal vækstratekonstant for nitrificerende bakterier	[s ⁻¹]
K_{NH4+}	Halvmætningskonstant for ammonium	[kg N-NH ₄ ⁺ /m ³]
b	Henfaldsrate for nitrificerende bakterier	[s ⁻¹]
$X_{NB,max}$	Maksimal koncentration af nitrificerende bakterier i biofilm	[kg COD/m ³]

Parametrene d_{sand} , ϕ og ψ er direkte målt i dette projekt. D , k_{Fe} , $k_{Fe,cat}$, $\hat{V}$, $\mu_{NB,max}$, K_{NH4+} , $X_{NB,max}$ er kalibreret ud fra udførte forsøg. Resten er litteraturværdier.

2.1.1 Model for flow

Der anvendes fire hovedligninger til at drive den hydrauliske model, se FIGUR 2.



FIGUR 2. Hovedligninger, der driver den hydrauliske model.

2.1.2 Model for jernfjernelse

1.ordens fjernelse (oxidation og udfældning):

$$\frac{d[Fe]}{dt} = -(k_{Fe} + k_{Fe,cat}[Fe_{precip}])[Fe]$$

Dannelse af udfældet jern:

$$\frac{d[Fe_{precip}]}{dt} = (k_{Fe} + k_{Fe,cat}[Fe_{precip}])[Fe] \frac{\phi}{1 - \phi}$$

Ændring af porøsitet:

$$\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d[Fe_{precip}]}{dt} \hat{V}$$

2.1.3 Model for ammoniumfjernelse

Der anvendes Monod kinetik til at beskrive omsætningsraten for ammonium:

$$\frac{d[NH_4^+]}{dt} = \frac{\mu_{NB}}{Y_{NB}} X_{NB} \frac{1 - \phi}{\phi}$$

$$\mu_{NB} = \mu_{NB,max} \frac{[NH_4^+]}{[NH_4^+] + K_{NH_4^+}} \frac{[O_2]}{[O_2] + K_{O_2}}$$

Vækst af biofilm:

$$\frac{dX_{NB}}{dt} = (\mu_{NB}X_{NB} - bX_{NB}) \left(1 - \frac{X_{NB}}{X_{NB,max}}\right)$$

Rate:

$$R = \frac{d[NH_4^+]}{dt} = \frac{\Delta[NH_4^+]}{\Delta t} = \frac{\Delta[NH_4^+]u}{\Delta h \phi}$$

Ratekonstant (1.orden):

$$k_{1.orden} = \frac{R}{[NH_4^+]}$$

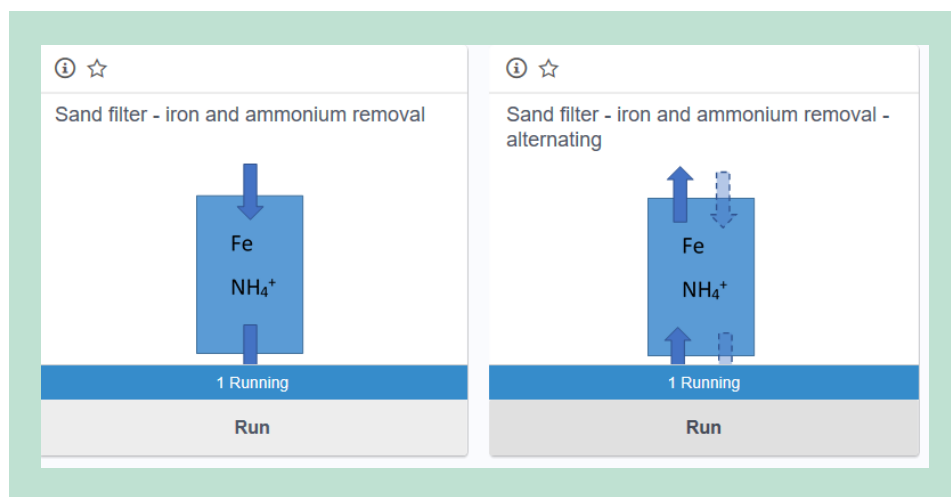
Ratekonstant (Monod):

$$k_{Monod} = \frac{R}{\frac{[NH_4^+]}{[NH_4^+] + K_{NH_4^+}} \frac{[O_2]}{[O_2] + K_{O_2}}} = \frac{\mu_{NB,max}}{Y_{NB}} X_{NB} \frac{1 - \phi}{\phi}$$

2.2 Modelbrugerflade

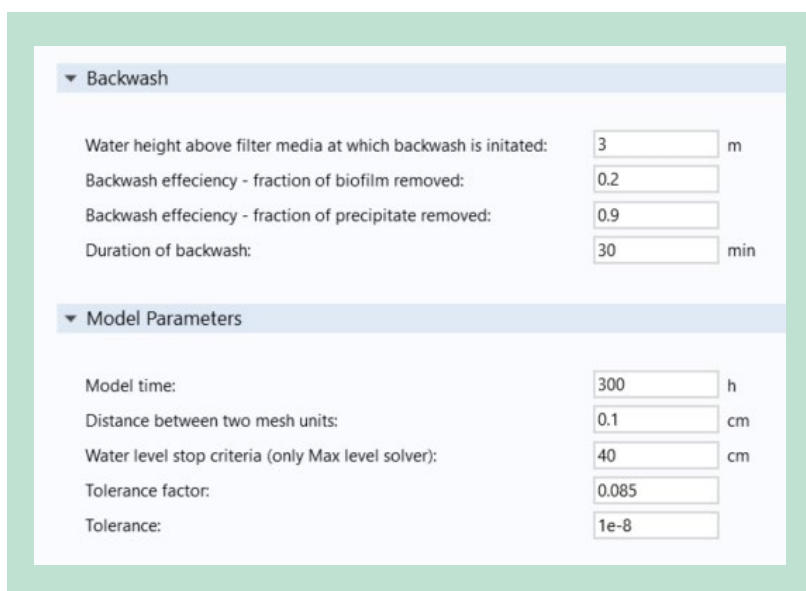
Virtuel Water Teknologi har opsat modellen i COMSOL og lavet en Client brugerflade så det har været muligt at opsætte og undersøge mange forskellige driftsscenarioer.

Der er en række input parametre, som skal indtastes i brugerfladen for at kunne afvikle modellen. Først skal det vælges, om man vil bruge almindelig filterdrift med flow oppefra og ned eller om man vil bruge modellen som kan alternere flowretningen, se FIGUR 3.



FIGUR 3. Visualisering af de to flowtyper under driften, som modellen kan håndtere: oppefra ned (til venstre) og alternerende flowretning (til højre).

Vælges almindelig filterdrift kan man vælge om modellen skal returskylle når en bestemt opstuvning er opnået eller den skal stoppe. Vælges returskyl skal modellen stoppe efter x antal timer (Model Time). Vælges at modellen skal stoppe når en bestemt opstuvning er opnået skal denne indtastes i cm (Water level stop criteria). FIGUR 4 viser disse data.



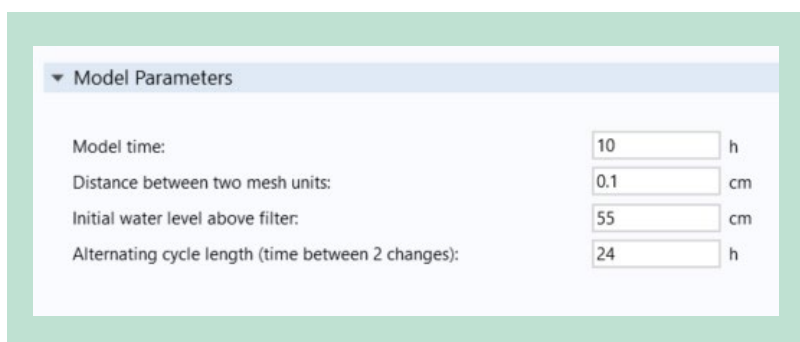
Backwash	
Water height above filter media at which backwash is initiated:	3 m
Backwash efficiency - fraction of biofilm removed:	0.2
Backwash efficiency - fraction of precipitate removed:	0.9
Duration of backwash:	30 min

Model Parameters	
Model time:	300 h
Distance between two mesh units:	0.1 cm
Water level stop criteria (only Max level solver):	40 cm
Tolerance factor:	0.085
Tolerance:	1e-8

FIGUR 4. Skærbillede af brugerfladen med data om returskyl og modellen generelt.

Vælges returskyl skal effektiviteten indtastes som den procentdel af henholdsvis biofilm og jernudfældning der fjernes ved hvert returskyl, samt varigheden af returskyllet.

Vælges modellen med alternerende drift kan der ikke vælges at modellen skal returskylle. Den alternerende drift er tiltænkt primært til ammoniumfjernelse og en betingelse for en god ammoniumfjernelse er en lang gangtid. Ideen er derfor, at det alternerende filter kun belastes med jern i en koncentration på 0,1 – 0,2 mg Fe/l. Ønskes det at se på effekten af en returskyl kan det gøres ved at starte modellen igen med en lavere startkoncentration af AOB biofilm svarende til det som forventes fjernet ved returskyllet. Der er to modelparametre som skal besluttes. Den ene er over hvor lang tid modellen skal simulere (model time) og den anden er hvor lang tid der skal være mellem at flowretningen skifter (Alternating cycle length). FIGUR 5 viser disse data.



Model Parameters	
Model time:	10 h
Distance between two mesh units:	0.1 cm
Initial water level above filter:	55 cm
Alternating cycle length (time between 2 changes):	24 h

FIGUR 5. Skærbillede af brugerfladen med data om model parameters.

De parametre, som er vist herunder, er de samme uanset hvilken model, der vælges. Det første er "Filter data" hvor filterareal, højden af op til 5 forskellige filtermaterialer, indløbsflow samt vandtemperaturen skal indtastes. FIGUR 6 viser disse data.

▼ Filter data

Filter surface area:

1

m²

Enter height of layers below. Leave zero value layer not in use.

Height of sand layer 1 (top):

1

m

Height of sand layer 2:

0

m

Height of sand layer 3:

0

m

Height of sand layer 4:

0

m

Height of sand layer 5:

0

m

Total filter height:

1

m

Height of outlet:

1

m

Flow of water into filter:

8

m³/h

Surface velocity:

8

m/h

Temperature of water:

15

°C

FIGUR 6. Skærbillede af brugerfladen med data om filteret.

Det næste er "Sand Properties" hvor D_{10} , porøsitet og rundhed af hvert filterlag skal indtastes. For de materialer, som er anvendt i dette projekt, er D_{10} og rundhed bestemt ved brug af partikelkarakterisering ved metoden Dynamic Image Analysis (Camsizer, Retsch, Tyskland) på nyt filtermateriale og porøsiteten er eksperimentelt bestemt i laboratoriet. FIGUR 7 viser disse data.

▼ Sand Properties

D10 - Sand diameter at 10% fractile - layer 1 (top):

3.28

mm

Initial porosity of filter - layer 1 (top):

0.39

Average sphericity of sand - layer 1 (top):

0.88

D10 - Sand diameter at 10% fractile - layer 2:

1

mm

Initial porosity of filter - layer 2:

0.4

Average sphericity of sand - layer 2:

0.9

D10 - Sand diameter at 10% fractile - layer 3:

1

mm

Initial porosity of filter - layer 3:

0.4

Average sphericity of sand - layer 3:

0.9

D10 - Sand diameter at 10% fractile - layer 4:

1

mm

Initial porosity of filter - layer 4:

0.4

Average sphericity of sand - layer 4:

0.9

D10 - Sand diameter at 10% fractile - layer 5:

1

mm

Initial porosity of filter - layer 5:

0.4

Average sphericity of sand - layer 5:

0.9

FIGUR 7. Skærbillede af brugerfladen med data om filtermediets egenskaber.

Under fanen for "Iron" skal indløbskoncentrationen for jern indtastes. Derudover skal modellen have en startkoncentration af jern, som ikke må være nul. Er det modnet filtermateriale, der ønskes simuleret, sættes startkoncentrationen til 0,5 mg/L. FIGUR 8 viser disse data.

▼ Iron

1st order reaction coefficient:

350

1/d

Rate constant for Fe precipitation catalysed by precipitate:

110

m³/(mol·d)

Molar volume of precipitated Fe:

2.52e-2[m³/mol]

m³/mol

Iron inlet concentration:

2.6

mg/L

Initial amount of Fe precipitate:

0.01

g/L

FIGUR 8. Skærbillede af brugerfladen med data om jern.

For "Ammonium" skal indløbskoncentrationen samt en startkoncentration af AOB i biofilmen indtastes. For nyt filtermedie anvendes en startkoncentration af AOB i biofilmen på 0,1 mg/L. Startkoncentration er meget betydende for, hvor hurtigt der opbygges en tilstrækkelig biomasse til, at alt ammonium i indløbsvandet når at blive fjernet. FIGUR 9 viser disse data.

▼ Ammonium

Maximum growth rate of AOB at 20C

1.252

1/d

Monod constant for ammonium in ammonium oxidation:

0.129

mg/L

Growth yield of AOB (g COD/g N-NH₄):

0.142

g/g

Decay rate of AOB in biofilm:

0.05

1/d

Maximum AOB biofilm layer:

6.93

mg/m²

Initial concentraion of AOB in biofilm:

0.1

mg/L

Ammonium inlet concentration:

0.32

mg/L

FIGUR 9. Skærbillede af brugerfladen med data om stoffet ammonium.

Hvis der kun ønskes simuleret for enten jern eller ammonium sættes inlet og startkoncentrationen bare meget lavt for det man ikke ønsker.

3. Resultater

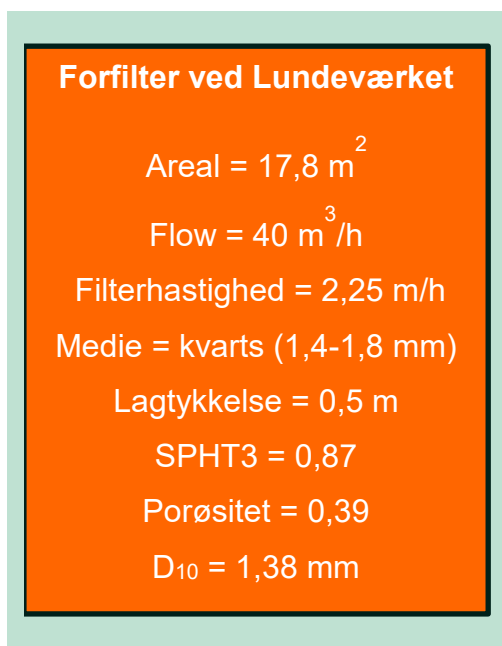
I det følgende angives resultater af modelkørsler for Lundeværket og Østerbyværket.

3.1 Driftsscenarioer for prototypen Lundeværket

På Lundeværket anvendes et eksisterende åbent gravitationsfilter som forfilter til jernfjernelse og der bygges et nyt efterfilter til ammoniumfjernelse med alternerende flowretning (se Rapport 5 om Biostimulering med ammonium) for at opbygge overkapacitet af ammonium oxiderende bakterier (AOB).

3.1.1 Generelle oplysninger om forfilter

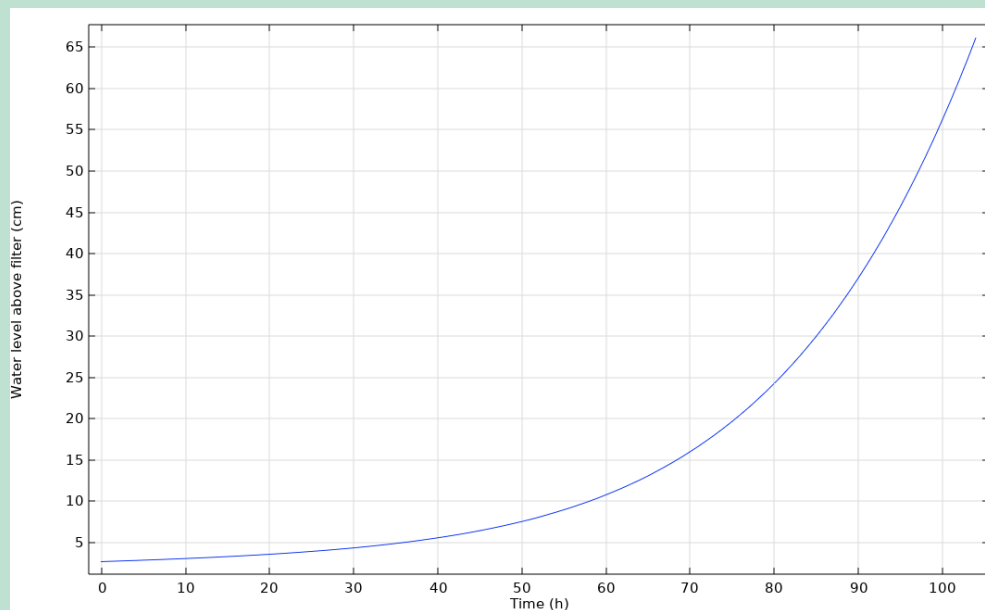
For at undgå at ammonium fjernes på forfilteret, afgraves der eksisterende filtermedie, så der kun er 0,5 meter filterdybde tilbage. 0,5 meter er valg ud fra fuldskala dybdeprofilmålinger af jernfjernelsen på Lunde, hvor jernkoncentrationen blev målt til 0,1 mg Fe/L i 50 cm dybde (se Rapport 4 om Jernfjernelsesdybde i biofiltre). Denne ændring bevirker en kortere opholdstid i filteret samt mulighed for et mere effektivt filterskyl mht. fjernelse af både jern og biofilm da modstanden mindskes. For at verificere denne beslutning er modellen brugt til at forudsige hvor meget jern og ammonium, der vil blive fjernet i forfilteret med den valgte filterdybde samt de fysiske parametre for forfilteret, som er vist i FIGUR 10. I tilgang til filteret er der regnet med 1,7 mg Fe/L og 0,33 mg NH_4^+ /L samt en vandtemperatur på 10 grader.



FIGUR 10. Data om eksisterende forfilteret (efter afgravning af filtermedie) ved Lundeværket.

3.1.2 Jernfjernelse på forfilter

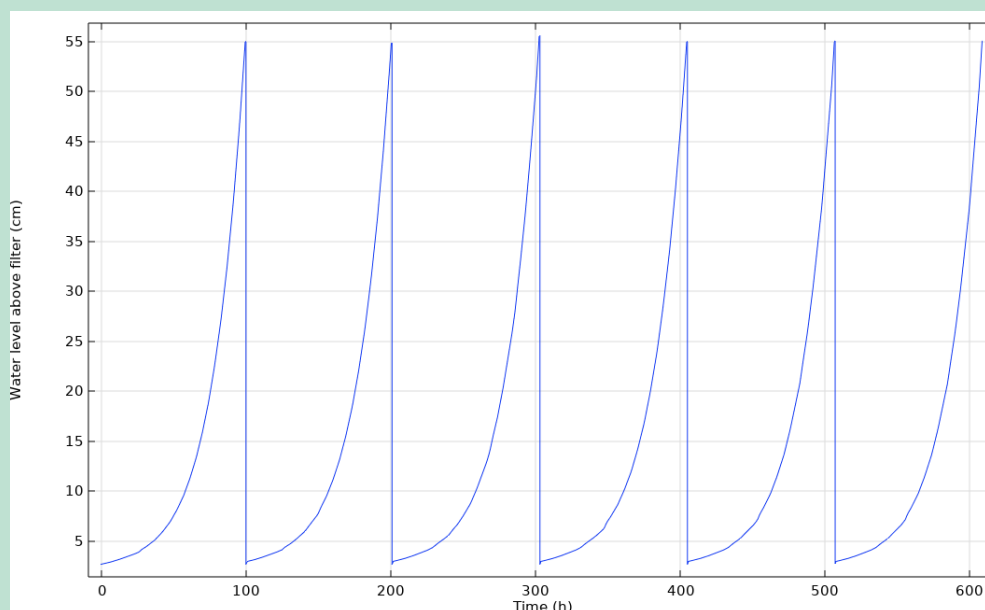
FIGUR 11 viser opstuvningen over filtermaterialet som funktion af tid. Opstuvningen skyldes, at der afsættes jern i filteret som giver en øget filtermodstand.



FIGUR 11. Opstuvning over filteret som funktion af tid, Lundeværket.

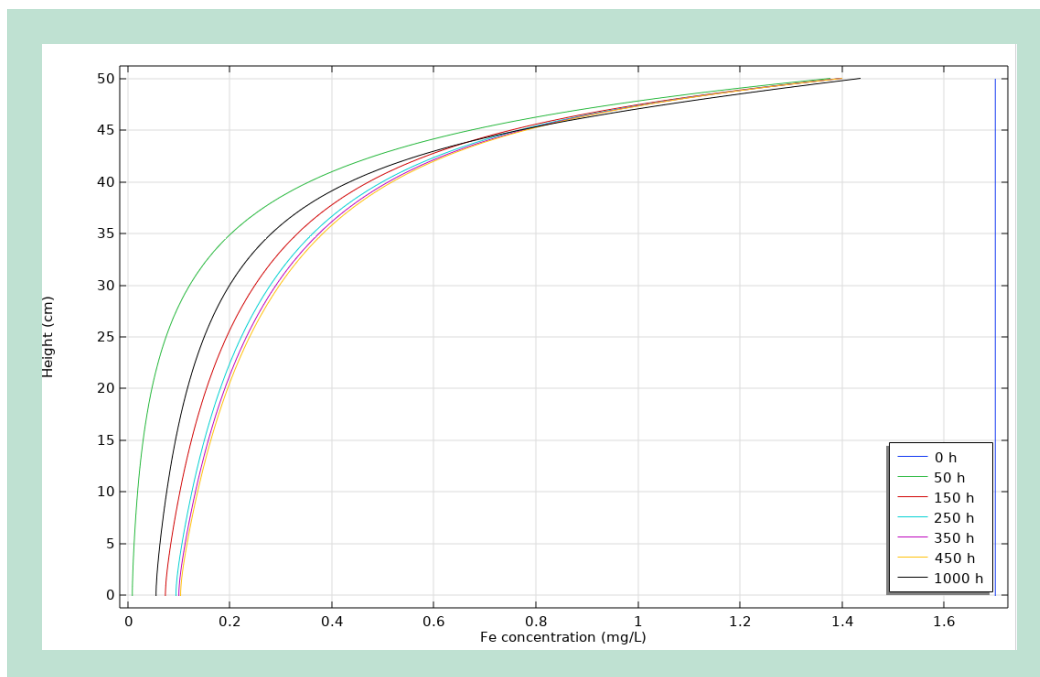
Som det ses af figuren, er der ikke den store gevinst mht. gangtiden om opstuvningen er 40 cm eller 70 cm. Der er ca. en forskel på 10 timer. En gangtid på ca. 100 timer kan godt accepteres. Derfor vælges en opstuvning på 55 cm til de følgende simuleringer. Ulempen ved at fortsætte op til 70 cm er, at den ekstra opstuvning kan komme til at virke som et reaktionsbassin, hvor jernet oxideres og udfælder i vandfasen (homogen jernfjernelse, se Rapport 4 om Jernfjernelsesdybde i biofiltre) i stedet for at udfælde på filtersandet (heterogen jernfjernelse).

På FIGUR 12 ses en driftsperiode på 600 timer, hvor filteret returskylles, når opstuvningen når op på de valgte 55 cm.



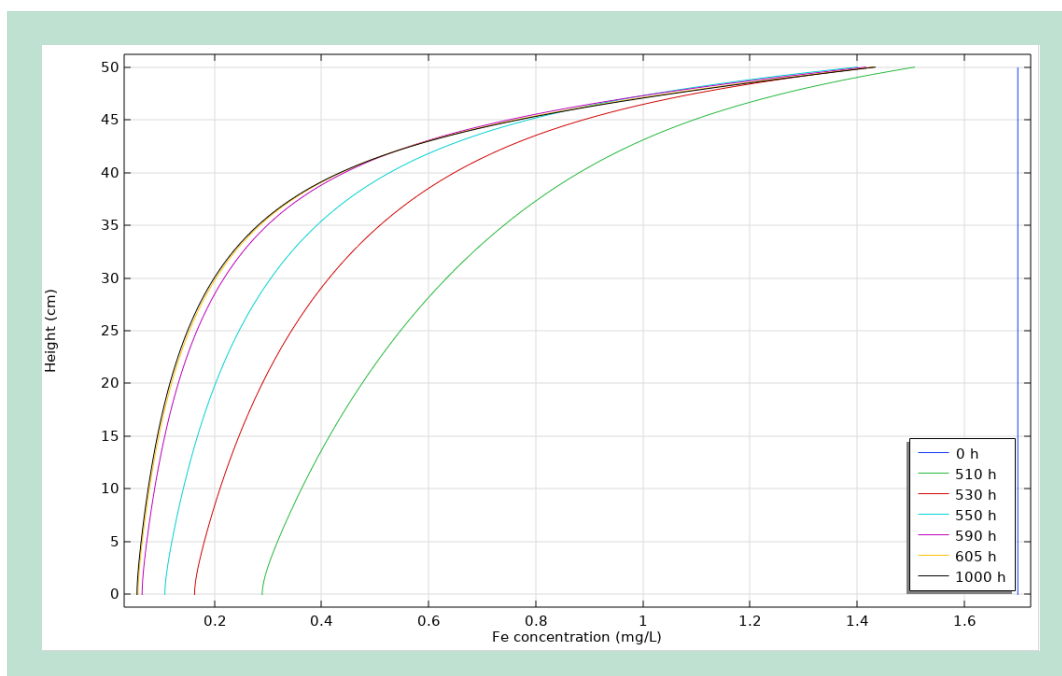
FIGUR 12. Trykstigninger og -fald over flere gangtider som følge af tilklogning og returskyllning, Lundeværket.

FIGUR 13 viser en modellering af jernkoncentrationen ned gennem filteret til forskellige tider. De valgte tider ligger ca. i midten af en gangtid, som det kan ses af FIGUR 12 på tidsaksen.



FIGUR 13. Dybdeprofil af jernkoncentration over flere gangtider, Lundeværket.

Jernkoncentrationen ved afgang filter (filterhøjde på 0 cm) ligger i alle tilfælde $< 0,1$ mg Fe/L. For at vise variationen i jernkoncentrationen afgang filter er jernkoncentrationen i filteret vist ved forskellige tiden indenfor én gangtid på FIGUR 14.



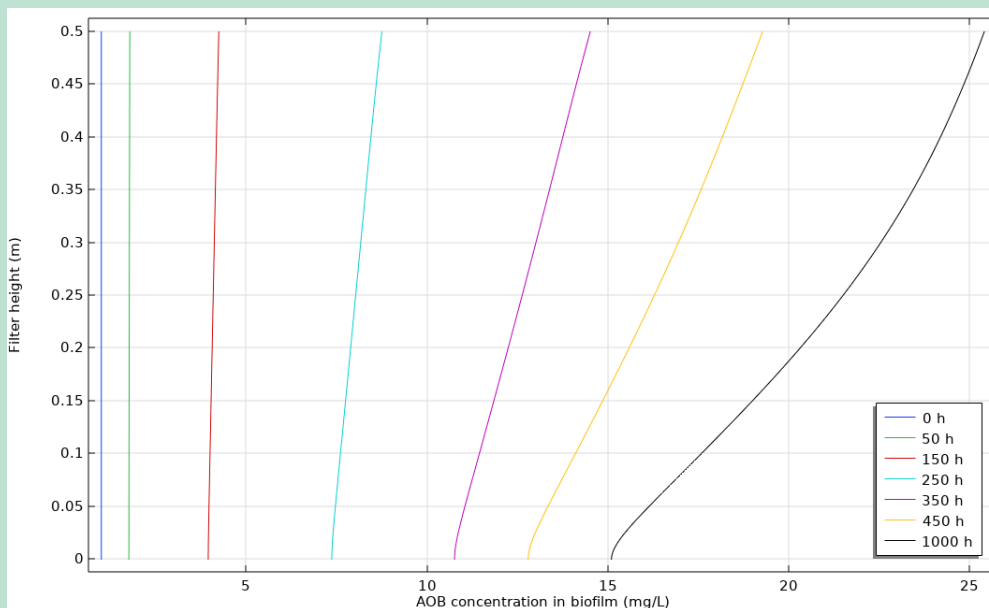
FIGUR 14. Dybdeprofil af jernkoncentration indenfor én gangtid, Lundeværket.

Tiden 510 timer er lige i starten efter det sidste returskyl vist på FIGUR 12 og 605 timer er lige i slutningen af gangtiden. Som det ses, er der en relativ høj udløbskoncentration ($0,3$ mg Fe/L)

lige efter et returskyl. I løbet af gangtiden forbedres jernfjernelsen og i gennemsnit over en gangtid er udløbskoncentrationen 0,12 mg Fe/L. En filterhøjde på 50 cm ser ud til at være et godt valg, da hele filterdybden bidrager til jernfjernelsen.

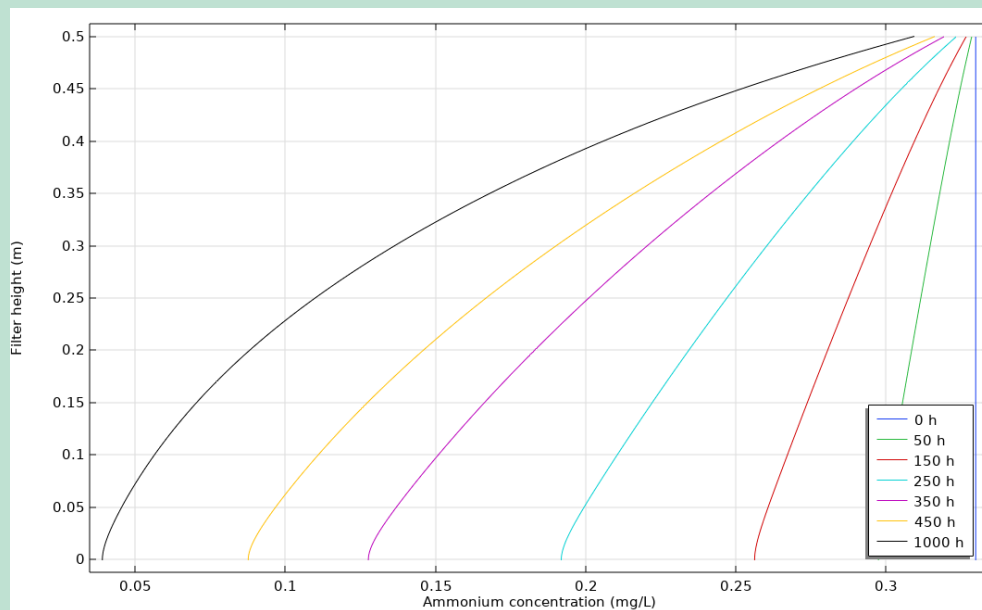
3.1.3 Ammoniumfjernelse forfilter

I de kørte simuleringer er returskyllet kun sat til at fjerne 20% af biofilmen. For vandværker, hvor både jern og ammonium fjernes i samme filter, tilstræbes det, at jernet fjernes effektivt fra filteret mens biofilmen med AOB bevares mest muligt. For at vise returskyllets betydning på AOB er startkoncentrationen sat til 1 mg/L. FIGUR 15 viser koncentrationen af AOB ned gennem filteret til forskellige tider.



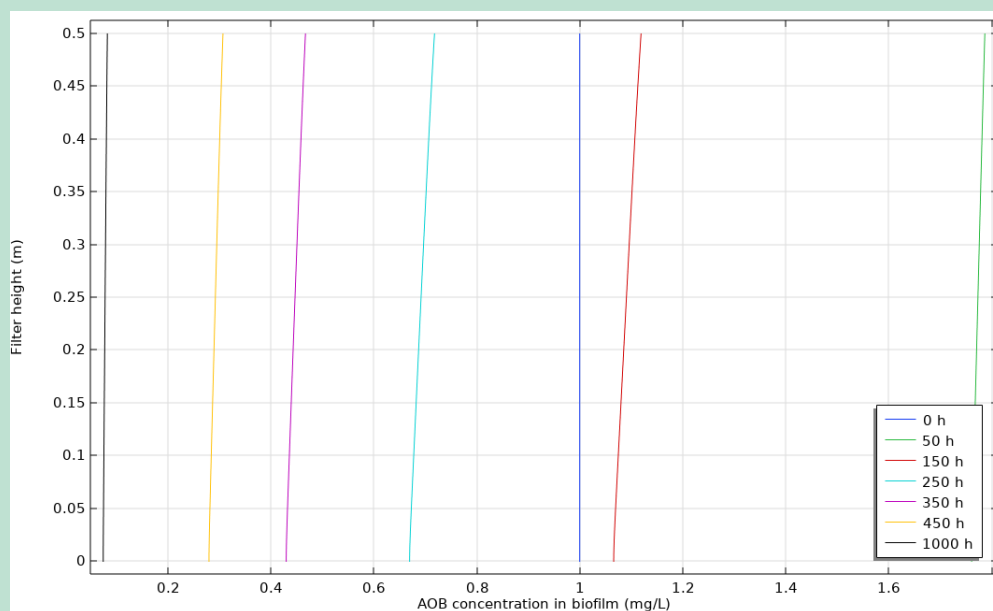
FIGUR 15. Dybdeprofil af AOB over flere gangtider, forfilter, Lundeværket.

Som det ses, er koncentrationen til tiden 0 timer 1 mg/L og øges som tiden går. Det vil sige at der i løbet af gangtiden opbygges mere biofilm end der bliver fjernet ved returskyllet. Det ses også, at der over tid dannes mere biofilm i toppen af filteret, hvor ammoniumkoncentrationen er højest. FIGUR 16 viser de tilhørende profiler for ammoniumkoncentrationen.



FIGUR 16. Dybdeprofil af ammonium over flere gangtider, forfilter, Lundeværket.

Som det ses på FIGUR 15 opbygges der AOB i forfilteret over tid, hvilket ikke er ønskeligt, da vi ønsker ammoniumfjernelsen på efterfilteret. For at undgå dette, er det nødvendigt at der fjernes mere biofilm ved returskyllet. Ved 70 % fjernelse opbygges der også mere biofilm end der fjernes, men en simulering med 80% fjernelse viser at en startkoncentration på 1 mg/L over tid udvaskes fra filteret, se FIGUR 17. Om det i praksis kan lade sig gøre, vil fuldskalaforsoget på Lunde vise (se Rapport 11 om Demonstrationsanlæg ved Lundeværket). Det vil også være muligt at returskylle oftere end nødvendigt (mht. jernfjernelsen) for at undgå vækst af AOB i forfilteret.



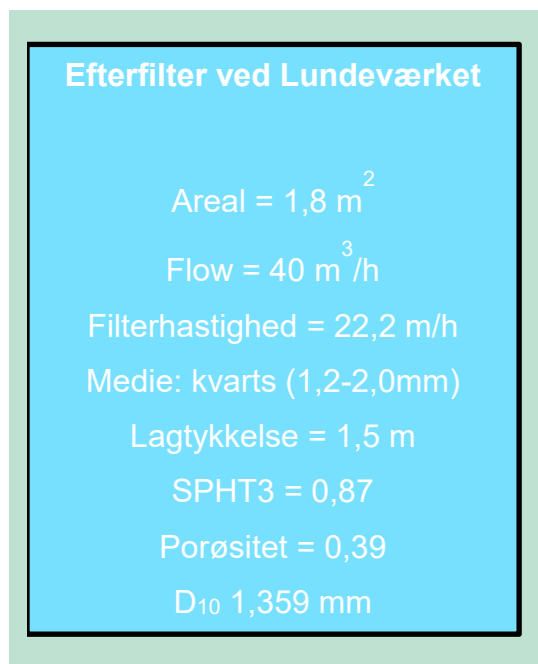
FIGUR 17. Dybdeprofil af AOB med 80% fjernelse under returskyl, forfilter, Lundeværket.

3.1.4 Efterfilter med biostimulering

Efterfilteret på Lunde opbygges som et traditionelt trykfilter, men med mulighed for alternerende flowretning. I simuleringerne er der regnet med en tilgang af jern på 0,12 mg Fe/L og 0,33 mg NH_4^+ /L. Flowretningen skifter hver 24. time for at der kan opformeres AOB i både top og bund af filteret. I Rapport 5 om Biostimulering med ammonium er fordelene ved denne tilgang belyst ved en række pilotskala forsøg.

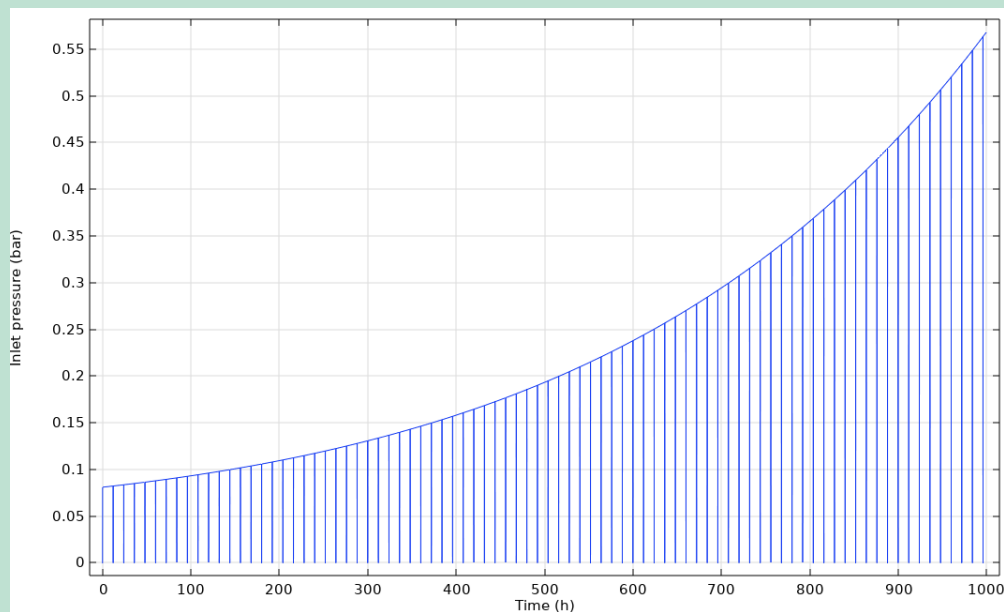
3.1.5 Jernfjernelse på efterfilter

FIGUR 18 viser de fysiske parametre for Lundeværkets nye efterfilter. Bemærk, at det planlagte efterfilter kun har et areal på 1,8 m², hvor det eksisterende forfilter har et areal på ca. 10 gange så stort, nemlig 17,8 m². Da der skal samme flow gennem forfilter og efterfilter (40 m³/t) betyder det, at efterfilteret har en stor filterhastighed på ca. 22 m/h.



FIGUR 18. Data om det planlagte efterfilter ved Lundeværket.

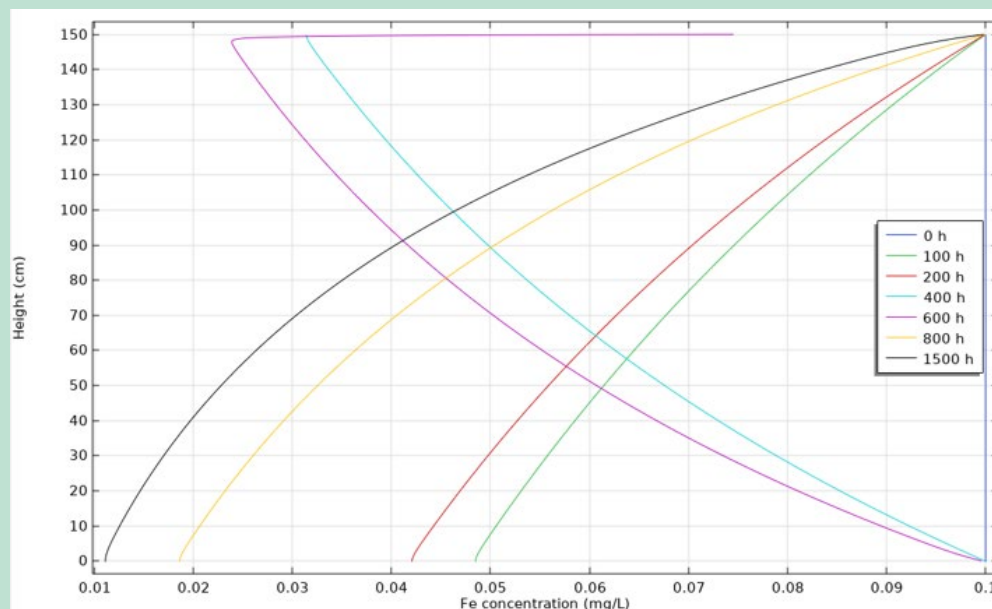
Et trykfilter skylles typisk inden trykstigningen når 0,3 bar. FIGUR 19 viser modelresultater for opstuvningen på efterfilteret over en gangtid. Der er regnet med, at der slipper 0,12 mg Fe/L gennem forfilteret.



FIGUR 19. Opstuvning over en gangtid, efterfilter Lundeværket.

Som det ses af figuren, er gangtiden 700 timer (29 dage) inden opstuvningen når 0,3 bar. Der er dog ingen grund til at have en så lang gangtid. Det forventes at jernet er nemmere at skylle ud af filteret hvis der returskylles oftere. En trykstigning på 0,15 bar vælges derfor som udgangspunkt. Det vil ifølge FIGUR 19 medføre en gangtid på ca. 380 timer (ca. 16 dage).

Jernfjernelsen forventes hurtigt indkørt på efterfilteret (< en uge). FIGUR 20 viser jernkoncentrationen ned gennem filteret.



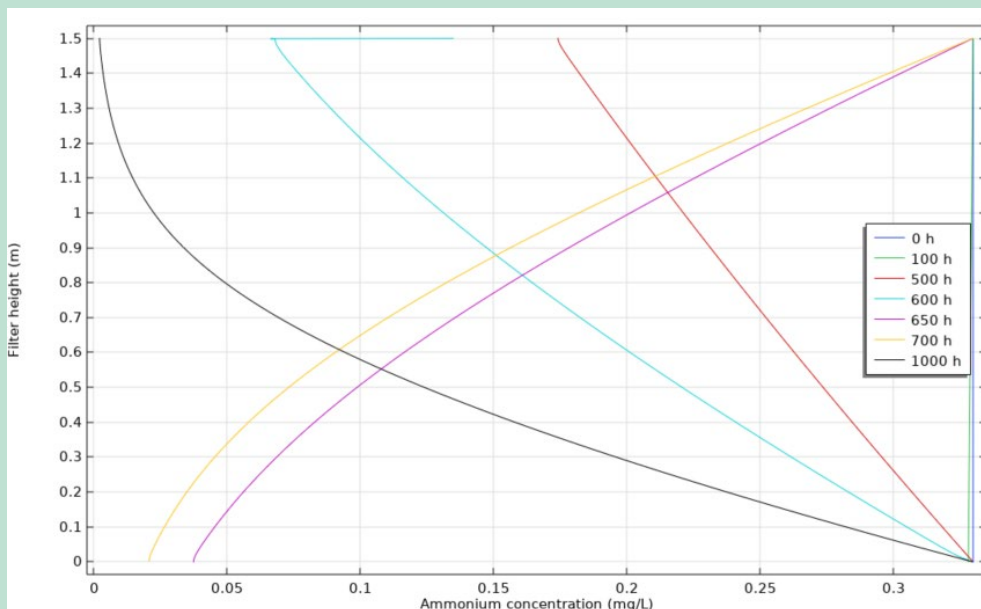
FIGUR 20. Dybdeprofil af jern, efterfilter med alternerende flowretning, Lundeværket.

På FIGUR 20 ses det, at efterfilteret fjerner det sidste jern så afgang efterfilter kommer under 0,05 mg Fe/L til trods for den høje filterhastighed. Alt efter om flowretninger er oppefra og ned

eller nedefra og op, aflæses afgangskoncentrationen ved en filterhøjde på henholdsvis 150 cm og 0 cm.

3.1.6 Ammoniumfjernelse på efterfilteret

På grund af en filterhastighed på 22 m/h og en relativ lav ammoniumkoncentration på 0,33 mg NH_4^+ /L må der forventes en rigtig lang indkøring af efterfilteret, hvis ikke der anvendes "SmartSand". Udvikling og produktion af Smartsand er beskrevet i Rapport 8. FIGUR 21 viser ammoniumkoncentrationen i efterfilteret til forskellige tider efter opstart uden brug af SmartSand.



FIGUR 21. Dybdeprofil af ammonium, efterfilter med alternerende flowretning, Lundeværket.

Først efter 650 timer er udløbskoncentrationen under 0,05 mg NH_4^+ /L. Det er ca. 1 måned og helt uacceptabelt. Dansk Kvarts Industri har bygget faciliteterne til fremstilling af SmartSand. SmartSand er indkørt filtermateriale med en høj koncentration af AOB som ved iblanding i nyt filtermateriale kan mindske indkøringsperioden. Det er ikke rentabelt at fylde hele efterfilteret med SmartSand selvom det ville betyde at ammonium kunne fjernes fra dag 1. Det er derfor undersøgt, hvor meget SmartSand er nødvendigt at tilføre efterfilteret, når der er et ønske om, at efterfilteret skal være indkørt indenfor ca. en uge både mht. jern, ammonium og mangan.

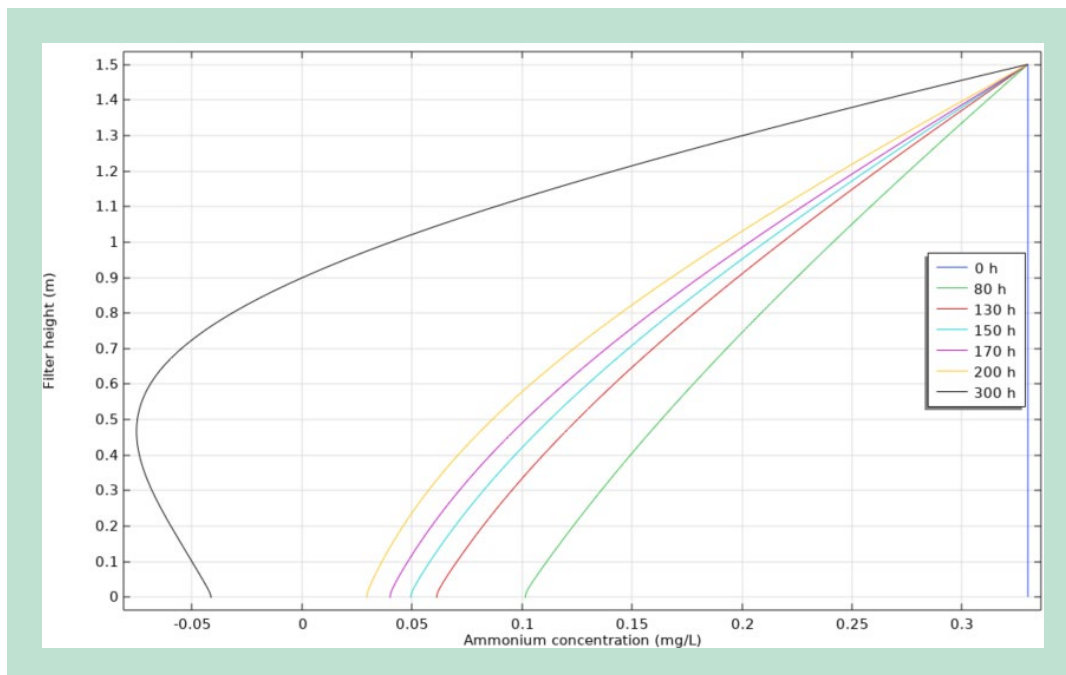
TABEL 2 viser den estimerede indkørings tid ved forskellige blandinger af SmartSand i nyt sand.

TABEL 2. Indkørings tid for ammonium ved forskellige mængder SmartSand, efterfilter, Lundeværket.

SmartSand [%]	Indkørings tid [t]
0	650
5	280
10	220
15	180
20	150

Ifølge beregningerne, vil en 20% blanding af SmartSand medføre en indkøring for ammonium på efterfilteret på 150 timer (knap en uge).

FIGUR 22 viser indkøringsresultatet ved anvendelse af 20% SmartSand.



FIGUR 22. Dybdeprofil af ammonium ved brug af 20% SmartSand, indkøring af efterfilter, Lundeværket.

Som det ses af figuren, falder indløbskoncentrationen på 0,33 mg/L til under kvalitetskriteriet på 0,05 mg NH_4^+ /L på 150 timer.

3.2 Driftsscenarier for prototypen Østerbyværket

På Østerby installeres et nyt forfilter (trykfilter) til jernfjernelse og et af de eksisterende filtre anvendes som efterfilter. Ideen er at afprøve dybdefiltrering af jern på et forfilter samt belyse, om flowet på efterfilteret kan øges, hvis jern i forvejen er fjernet på et forfilter.

3.2.1 Forfilter generelt

FIGUR 23 viser de fysiske parametre for Østerbyværkets forfilter.

Østerbyværket forfilter

$$\text{Areal} = 3,14 \text{ m}^2$$

$$\text{Flow} = 30\text{-}80 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Filterhastighed} = 25,5 \text{ m/h}$$

Medie: E-clay (2-4 mm)

$$\text{Lagtykkelse} = 1,5 \text{ m}$$

$$\text{SPHT3} = 0,88$$

$$\text{Porøsitet} = 0,39$$

$$D_{10} = 2,4 \text{ mm}$$

FIGUR 23. Data for den planlagte forfilter, Østerbyværket.

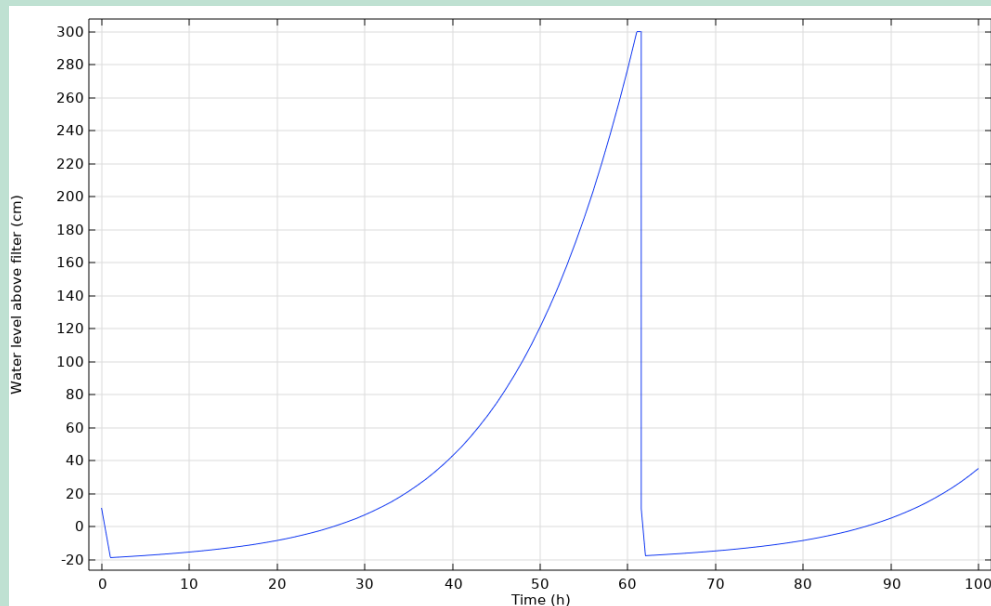
Igen er arealet af det nye filter ($3,14 \text{ m}^2$) langt mindre end det eksisterende filter ($14,8 \text{ m}^2$). Derfor vil det være muligt at presse forfilteret med en høj flowhastighed (ca. 25 m/t). På denne måde bør der opnås en dybdefiltrering og en stor jernfjernelse per m^2 filterareal end ved et langsommere flow.

Der regnes med en indløbskoncentration på $2,6 \text{ mg Fe/L}$ og $0,32 \text{ mg NH}_4^+/\text{L}$ samt en vandtemperatur på 10 grader.

3.2.2 Jernfjernelse på forfilteret

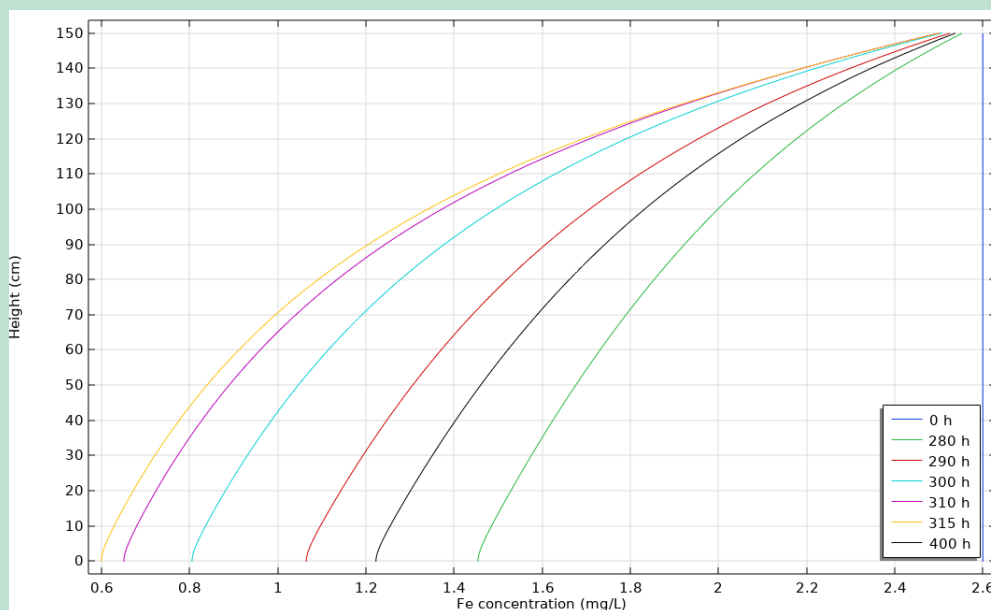
På FIGUR 24 er opstuvningen over filtermaterialet vist som funktion af tiden ved et flow på $30 \text{ m}^3/\text{h}$ hvilket svarer til det almindelige flow. Opstuvningen skyldes, at der afsættes jern i filteret som giver en øget filtermodstand.

Ved et flow på $30 \text{ m}^3/\text{h}$ kan der forventes en gangtid på ca. 60 timer, hvis der tillades en opstuvning svarende til en trykforøgning på $0,3 \text{ bar}$. Er flowet derimod $50 \text{ m}^3/\text{h}$ kan der forventes en gangtid på omkring 48 timer og ved et flow på $80 \text{ m}^3/\text{h}$ kan der kun forventes en gangtid på omkring 35 timer.



FIGUR 24. Opstuvning over tid, forfilter, Østerbyværket. Flow = 30 m³/t og jern = 0,26 mg/L.

Ved 30 m³/h fjernes jernet til ca. 0,2 mg Fe/L. Men anvendes 80 m³/h slipper der ca. 0,6 til 1,4 mg Fe/l gennem filteret og videre til efterfilteret. Dette er vist på FIGUR 25, hvor forskellige tider er vist indenfor samme gangtid (280-315 timer efter opstart).



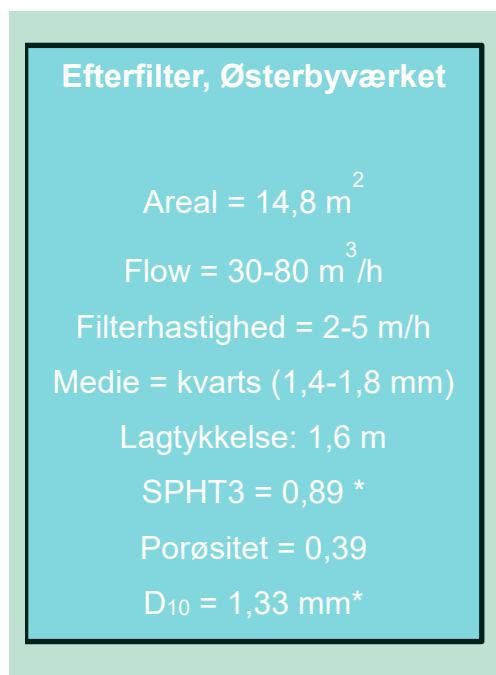
FIGUR 25. Dybdeprofil af jern ved forskellige tider i samme gangtid, forfilter, Østerbyværket. Flow = 80 m³/t.

Det har selvfølgelig en stor indflydelse for gangtiden af efterfilteret, hvor meget jern det belastes med.

3.2.3 Efterfilter

Det ønskes ikke, at ammonium fjernes på forfilteret. Som for simuleringerne for Lundeværket antages der her, at dette kan opnås ved effektive skyl af forfilteret, der forhindrer at der opbygges en biofilm med ammoniumoxiderende bakterier. Det regnes derfor med, at efterfilteret tilføres 0,32 mg NH₄⁺/L svarende til koncentrationen i råvandet.

Som efterfilter benyttes det eksisterende åbne filter nr. 6. Fribord er målt til 53 cm. Opstuvning sættes derfor til 50 cm, som er absolut max. FIGUR 26 viser de fysiske parametre for Østerbyværkets efterfilter.



FIGUR 26. Data for den eksisterende efterfilter, Østerbyværket. *middelværdier ud fra arbejds-pakke 1, hvor der er målt på Østerby.

Alt efter hvilket flow der besluttes til forfilteret vil efterfilteret belastes med forskellige koncentrationer af jern. Worst case er med det højeste flow på 80 m³/h hvor der i gennemsnit af en gangtid vil slippe ca. 1 mg Fe/L videre til efterfilteret. Det vil betyde en gangtid på kun 80 timer, hvilket er for kort tid for et effektivt efterfilter. Selv hvis der regnes med at der kun tilføres 0,6 mg Fe/l som svarer til, hvad der kommer gennem forfilteret i slutningen af en gangtid ved 80 m³/h, vil efterfilteret skulle skylles efter ca. 130 timer. Efterfilteret skulle gerne have en gangtid på op mod en måned (720 timer) og mindst 14 dage. Det er derfor nødvendigt at undersøge sammenhæng mellem flow og jern i udløbet fra forfilteret samt efterfølgende gangtid på efterfilteret, se TABEL 3.

TABEL 3. Sammenhæng mellem jernbelastning og gangtid, efterfilter.

Flow m ³ /h	mg Fe/L ved afgang for-filter	Gangtid efterfilter [h]
30	0,21	776
40	0,31	445
50	0,38	308
60	0,45	227

Ammonium kan i alle tilfælde fjernes på efterfilteret, men ideen med at fjerne jern på et forfilter er også at der kan spares noget vand til returskyl, idet efterfilteret kun skal skylles meget sjældent. Denne gevinst er ikke så udtalt, hvis der anvendes et flow på 60 m³/h til trods for at der fjernes mere end 80% af jernet på forfilteret.

4. Konklusion

Vandbehandlingsmodellen blev udviklet i COMSOL ved hjælp af CFD (Computational fluid dynamics) og anvendt til at dokumentere fordelene ved nye filterdesign.

For Lundeværket viser resultater af diverse scenarier, at det eksisterende forfilter kan bortgraves til 50 cm lagtykkelse af filtermediet og stadig fjerne jern ved et flow på 40 m³/t. Endvidere viser modellen, at indkøring af ammoniumfjernelse kan tage over én måned, hvorfor anvendelse af SmartSand, der allerede er indkørt, vil være fordelagtig.

For Østerbyværket viser resultaterne af diverse scenarier, at gangtiden på det eksisterende efterfilter er meget afhængig af hvor meget jern slipper igennem forfilteret. Hvis der slipper mindre end 0,2 mg/L jern igennem forfilteret, kan gangtiden være ca. en måned, hvilket tillader uforstyrret vækst af de nitrificerende bakterier uden at de fjernes ved et returskyl.

Vandbehandlingsmodel

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

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



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk