



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Jernfjernelsesdybde i biofiltre

Rapport 4 i projektet "Smart Re-design of Drinking Water Production"

MUDP Rapport

September 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:
Sara Starcke

Fotos:
Sara Starcke

ISBN: 978-87-7038-544-2

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
1.1 Motivation	8
1.2 State of the art	8
1.2.1 Fjernelsesmekanismer	8
1.2.2 Tilklogning og gangtid	9
1.2.3 Modning og returskyl	9
1.2.4 Kanaldannelse og filtermodstand	9
1.2.5 Key performance indikatorer	10
2. Metoder	11
2.1 Pilotopstilling Østerby vandværk	11
2.2 Forsøgsplan	11
2.3 Vandprøvetagning, pilotkolonne	11
2.4 Jernmåling	12
2.5 Flowmåling	12
3. Resultater	13
3.1 Jernfjernelsesdybde ved forskellige filterhastigheder	13
3.1.1 Filterhastighed på 3,5 m/h	13
3.1.2 Filterhastighed på 8,3 m/h	14
3.1.3 Flowhastighed på 14,6 m/h	14
3.1.4 Sammenligning af forsøg med forskellige filterhastighed	15
3.2 Opstuvningsforløb	16
3.3 Kornstørrelsens indflydelse på jernfjernelse	18
3.4 Trykfald gennem filteret	18
3.5 Strømningsforhold ved sporstofforsøg	20
4. Konklusioner	22
5. Referencer	23

Forord

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

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

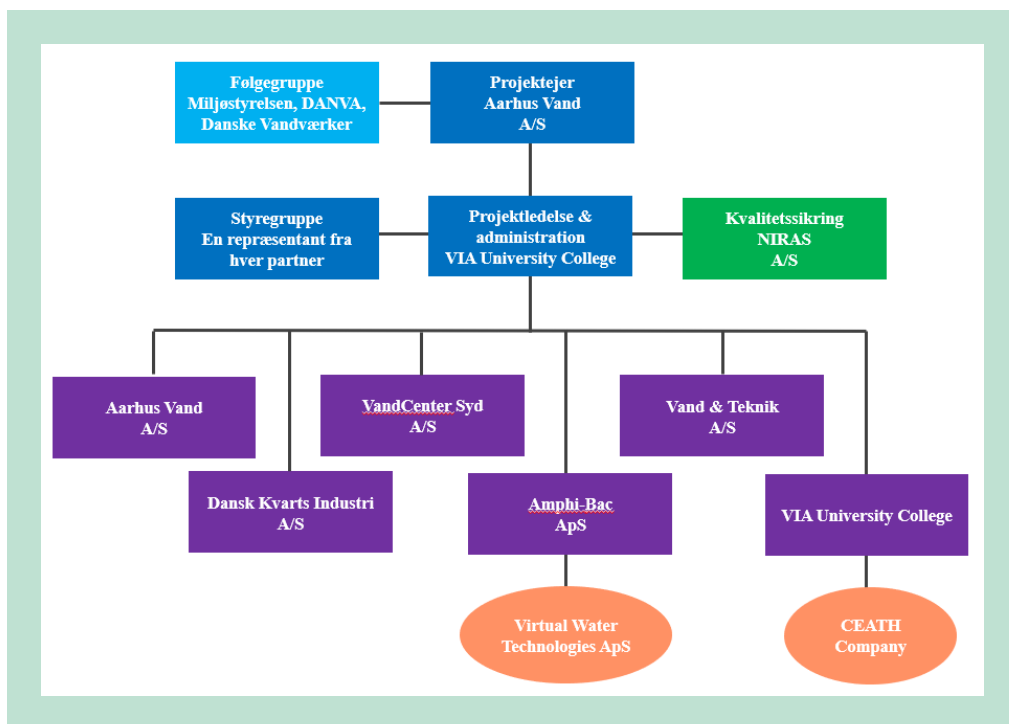
Baggrund

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

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

Projektorganisation

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



FIGUR 1. Diagram over projektorganisation.

Projektets følgegruppe og styregruppe bestod af følgende personer:

Følgegruppe

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

Styregruppe

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

Projektets arbejdsplaner og rapporter

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

Arbejdsplan 1: Etablering af designgrundlag (åben)

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

Arbejdsplan 2: Tekniske forsøg (åben)

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

Arbejdsplan 3: SmartSand (kommerciel)

Rapport 8: Udvikling og produktion af SmartSand (fortrolig)

Arbejdspakke 4: SmartArkitektur (åben)

Rapport 9: Vandbehandlingsmodel

Arbejdspakke 5: Fyrtårnsdemonstration i fuldskala (åben)

Rapport 10: Demonstrationsanlæg ved Østerbyværket

Rapport 11: Demonstrationsanlæg ved Lundeværket

Arbejdspakke 6: Projektledelse

Rapport 12: Sammenfatning

Sammenfatning

Denne rapport omhandler jernfjernelsesdybden i biofiltre og er Rapport 4 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Formålet med arbejdet er at kvantificere betydningen af filterets flowhastighed og filtermediets kornstørrelse for jernfjernelsesdybden og andre parametre, der er relevante for forståelsen af jernfjernelse på biofiltre.

Redesign-projektet indebærer en fuldskalademonstration af vandbehandling på Lundeværket nord for Odense og Østerbyværket syd for Aarhus. Demonstrationsanlæggene skal belyse vandbehandling, hvor jern fjernes på et separat forfilter, der er optimeret til jernfjernelse, mens øvrige stoffer fjernes på et efterfilter, der er optimeret til det. Forsøgene afrapporteret her er udført for at skabe grundlag for og understøtte design af disse demonstrationsanlæg.

Til forsøgene blev der opstillet en gravitationskolonne i pilotskala på Østerby vandværk. Kolonnens dimensioner er 345 mm indre diameter og 200 cm højde.

Resultaterne af forsøgene har vist, at forøgelse af filterets flowhastighed gør det muligt at opnå en væsentlig større jernbelastning før der skal returskylles.

Resultaterne har vist, at den større flowhastighed kun medfører begrænset øgning i jernfjernelsesdybden. Derudover viste sporstofforsøg at kanaldannelse var uvæsentlig. En filtermodstandsprofil har vist, at trykfaldet stadig sker i toppen af filteret selv med en filterhastighed på 8 m/t.

Resultaterne viste endvidere, at filtermediets kornstørrelse har stor indvirkning på jernfjernelsesdybden. Hermed medfører en større kornstørrelse behov for en større laghøjde i filteret. Resultaterne viste også, at modning af filteret efter returskyl ikke kun fandt sted i starten af gangtiden, men fortsatte under hele gangtiden.

Forsøgene understøtter, at en vandbehandlingsarkitektur bestående af et forfilter optimeret til jernfjernelse og et efterfilter optimeret til de øvrige parametre kan være fordelagtig. Fordelene ligger i, at vandforsyninger kan anvende mindre filtre, spare vand ved returskyl, anlægge mindre skyllebassiner, m.m. Desuden vil dobbeltfiltrering åbne muligheden for brug af meget lange gangtider på efterfilteret (da det ikke tilklogges af jern), der formodes at medføre opnåelse af en større biomasse til ammoniumfjernelse.

1. Introduktion

Formålet med arbejdet afrapporteret her er at kvantificere betydningen af filterets flowhastighed og filtermediets kornstørrelse for jernfjernelsesdybden og andre parametre, der er relevante for forståelsen af jernfjernelse på biofiltre.

1.1 Motivation

Projektet Re-design indebærer en fuldskala demonstration af vandbehandling på Lundeværket nord for Odense og Østerbyværket syd for Aarhus. Forsøgene afrapporteret her er udført for at skabe grundlag for og understøtte design af disse demonstrationsanlæg.

Demonstrationsanlæggene skal belyse vandbehandling, hvor jern fjernes på et separat forfilter, der er optimeret til jernfjernelse, mens øvrige stoffer fjernes på et efterfilter, der er optimeret til det. Brug af dobbeltfiltrering er ikke ualmindeligt i Danmark, især når der er tale om høje koncentrationer i råvand af jern, mangan og/eller ammonium. Erfaring viser dog, at forfiltre ofte er overdimensioneret og i stand til at fjerne alle stofferne til – eller tæt på – kvalitetskravene. Det nye i demonstrationsanlæggene – især Østerbyværket, hvor der opføres et helt nyt forfilter – er at optimere forfilteret så jern fjernes i hele dybden og de øvrige stoffer ikke fjernes.

1.2 State of the art

Under vandbehandlingsprocessen skal jern i råvandet fjernes til kvalitetskravet på 0,2 mg/L eller lavere (Miljøministeriet, 2021). I 2017 blev denne værdi fastsat til at gælde ved forbrugers taphane og en tidligere vejledende værdi på 0,1 mg/L ved afgang fra vandværk blev droppet. I dette afsnit bliver viden omkring jernfjernelse omtalt.

1.2.1 Fjernelsesmekanismer

Jern, der oppumpes med grundvandet, er opløst og findes i den reducerede Fe(II)-form, som er både farveløs og gennemsigtig. Under drikkevandsbehandling skal dette jern tilbageholdes i filteret. Slutresultatet er at jernet bliver tilbageholdt i filteret og omdannet til en jernoxid, hvor jern optræder i den oxiderede Fe(III)-form.

Detaljer omkring hvordan denne fjernelsesproces foregår er komplekse. Tidligere har man talt om to mekanismer, nemlig oxidation-floc formation eller adsorption-oxidation (Sharma et al., 2002). I dag taler man om tre forskellige jernfjernelsesmekanismer: homogen, heterogen, og biologisk (van Beek, et al., 2016).

Homogen jernfjernelse er en reaktion, hvor Fe(II) i vandfasen oxideres af ilt og udfælder som en jernoxid floc, hvorefter denne faste forbindelse fanges i filtermediet. Homogen fjernelse sker hurtigt ved høje pH-værdier og høje iltkoncentrationer i vandet. Desuden får homogen fjernelse bedre vilkår når der er stor opholdstid i det opstuvende vand over filteret, hvor der er ingen kontakt til filtermediet. Homogen fjernelse er nok den mest udbredt ved behandling af overfladevand.

Heterogen fjernelse sker ved at Fe(II) først adsorberes på en reaktiv overflade (som f.eks. allerede dannede jernoxider), hvorefter der sker en oxidation ved hjælp af ilt. Denne metode omtales undertiden som autokatalytisk, da den resulterende jernoxid indgår i fjernelse af den næste Fe(II) ion. Heterogen jernfjernelse synes at have en række potentielle fordele, som længere gangtider, bedre rentvandskvalitet, kortere modningstid, mindre skyllevandsmængde og mindre slamvolumen. Det er denne mekanisme, som man i dag i Danmark normalt sigter mod.

Den sidste jernfjernelsesmekanisme er biologisk, hvor mikroorganismer deltager i fjernelsesprocessen. Denne mekanisme har været kendt i en del år (Czekalla, 1985; Mouchet, 1992), men nye og billigere mikrobiologiske analysemetoder er stadig i gang med at afsløre hvilke organismer, der dominerer processen under hvilke forhold. Bakterier som *Gallionella* og *Lepidothrix* er blandt de vigtige mikroorganismer. Forhold der fremmer bakteriologisk jernfjernelse inkluderer lave pH-værdier og lave iltkoncentrationer. Det sidstnævnte krav kan have betydning for placering af iltning i behandlingsprocessen.

1.2.2 Tilklogning og gangtid

Efterhånden som jernoxider tilbageholdes i et filter, stiger filtermodstanden. På et tidspunkt, er det nødvendigt at returskylle filteret for at genskabe permeabiliteten. Perioden mellem to returskyl omtales som filterets gangtid. For at spare på skyllevand og reducere den tid, hvor filteret ikke kan producere drikkevand, ønskes gangtiden så langt som muligt.

Filerhastigheden har naturligvis betydning for længden af en gangtid. Ved en hurtig filterhastighed vil filteret tilklogges hurtigere end ved en langsom filterhastighed. Det er dog et spørgsmål om gangtiden forkortes tilsvarende øgningen i filterhastigheden. Årsagen er, at en hurtig filterhastighed fremmer såkaldt dybdefiltrering, hvor de tilbageholdte jernoxider er spredt over en større dybde og dermed forårsager mindre tilklogning. Der er behov for at kvantificere forholdet mellem filterhastighed og gangtiden. Det gøres opmærksom på, at større filterhastigheder stiller krav til filtermediet for at opnå en tilstrækkelig permeabilitet. Både kornstørrelsen og uensformighedstallet er vigtigt. Ved høje hastigheder kan kornstørrelser større end 1,2 – 2,0 mm og uensformighedstal mindre end 2,0 være relevant for at reducere filtermodstand. Store filterhastigheder kan medføre risiko for høj turbiditet ved filterets udløb.

Ved en langsom filterhastighed er der risiko for andre udfordringer. De største udfordringer er filterets areal footprint (en langsom filterhastighed medfører behov for større filtre) og kagefiltrering (hvor jernet bliver tilbageholdt i de allerøverste par cm, hvormed der hurtigt opbygges en stor filtermodstand og dermed en kort gangtid).

1.2.3 Modning og returskyl

Modning efter returskyl (eng. = ripening) er en proces, hvor et filters evne til at fjerne partikler forbedres umiddelbart efter et skyl (timer eller dage). Dette fænomen er noget andet end modning ved indkøring (eng. = maturing), hvor et biofilters biomasse udvikles ved opstart af et nyt filtermedie (uger eller måneder).

Evnen til at fjerne partikler afhænger blandt andet af antallet af partikler, der allerede er fanget i filtermediet. Jo flere partikler, der er fanget, jo bedre er filteret til at fange flere partikler. Hermed kan en særlig effektiv returskyl efterlade et filter, der er for rent til at have en høj evne til partikelfjernelse. Hermed kan jernfjernelse være forringet ved for dårligt returskyl (gangtiden kan være kortere på grund af tidlig tilklogning, hvis filteret ikke skylles rent) samt ved for grundigt returskyl (evnen til at tilbageholde partikler er forringet i et rent filter).

1.2.4 Kanaldannelse og filtermodstand

I løbet af en gangtid, stiger filtermodstand som følge af tilklogning af filtermediets porer. Der er risiko for, at det øgede tryk medfører forhøjet filterhastighed i de porer, der stadig er åbne. Disse porer kan være mere eller mindre forbundne og omtales i det daglige som kanaldannelse i filteret.

Ved udbredt kanaldannelse, vil noget af det gennemstrømmende vand opleve en kortere opholdstid i filteret (da kun en del af porerummene er tilgængelige til flow, mens andet vand vil opleve en længere opholdstid (ved at havne midlertidig i en strømningsmæssig blindgyde)).

Sporstofstuder kan anvendes til at karakterisere strømningsforhold i et filter. Her måles ofte en gennembrudskurve ved filterafgang, f.eks. ved at måle ledningsevne, hvis salt anvendes som sporstof. Ved udpræget kanaldannelse, kan man se et tidligere gennembrud, en lavere top samt en længere hale.

1.2.5 Key performance indikatorer

For at måle et filters performance i forhold til jernfjernelse kan man anvende en række indikatorer. Ofte vil disse indikatorer være forskellige for gravitationsfiltre og trykfiltre. Yderlig diskussion af indikatorer ses i Rapport 2 af Redesign-projektet. To af de centrale indikatorer for jernfjernelse er:

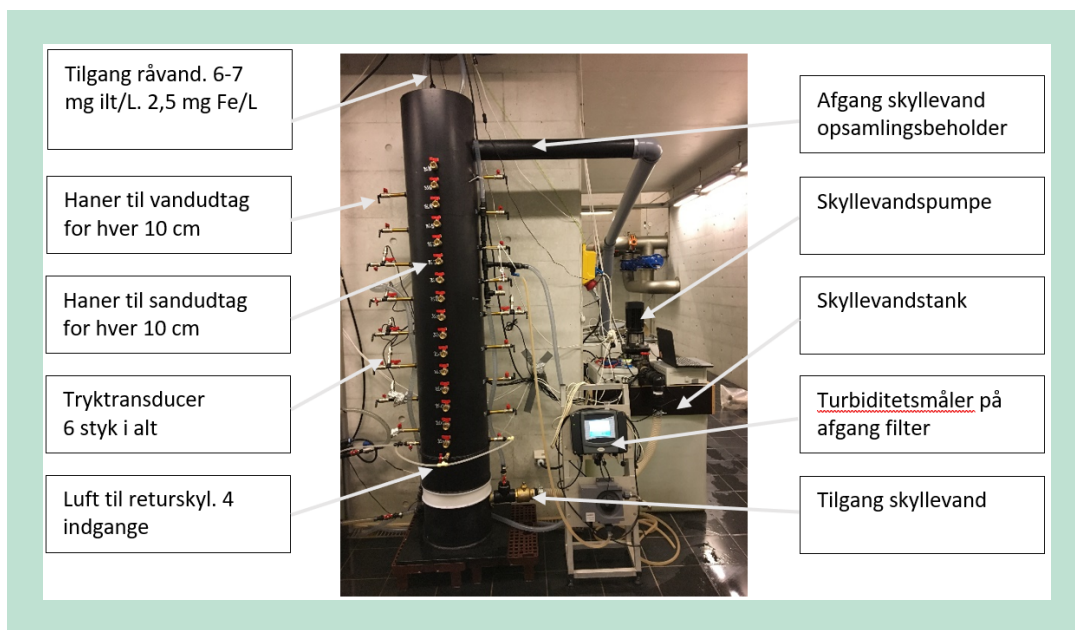
1. Gangtidens produktion: Defineres som det antal m^3 drikkevand, der kan produceres i løbet af en enkelt gangtid per m^2 areal. Enheder: m^3/m^2 .

Gangtidens jernbelastning: Defineres som det antal g jern, der tilløber filteret i løbet af en enkelt gangtid per m^2 filterareal. Enheder: $\text{g Fe}/\text{m}^2$.

2. Metoder

2.1 Pilotopstilling Østerby vandværk

For at undersøge forholdene mellem filtermedie, flow og tryk ift. jernfjernelsesdybde er der opstillet en gravitationskolonne i pilotskala på Østerby vandværk som det ses på FIGUR 2. Kolonnen med 345 mm indre diameter og 200 cm i højden er udstyret med ind- og udtag, som gør det muligt at udtage vandprøver for hver 10 cm til måling af jernkoncentration. Råvand føres ind i toppen af kolonnen og føres ud af bunden via en svanehals, der er i niveau med overkanten af sandet.



FIGUR 2. Pilotkala filter opsat på Østerbyværket i Aarhus. Filteret har en højde på 2 meter og en indvendig diameter på 345 mm (tværsnitsareal på 0,094 m²).

2.2 Forsøgsplan

Forhold ved de forskellige forsøg ses af TABEL 1.

TABEL 1. Oversigt over de udførte forsøgstyper ved Østerbyværket, pilotskala.

Forsøgstype	Kolonneyld [mm]	Flowhastighed [m/t]	Måleparameter
Jernfjernelsesdybde	1-2	3,5, 8,3 og 14,6	Jernprofil
Opstuvningsforløb	1-2	8	Opstuvning tidsserie
Kornstørrelsens indflydelse	1-2 og 3-5	8	Jernprofil
Trykfald igennem filteret	3-5	8	Trykfaldsprofil
Strømningsforhold ved sporstofforsøg	3-5	8	Gennembrudskurve med ledningsevne

2.3 Vandprøvetagning, pilotkolonne

For at udtage en vandprøve åbnes prøvehanen helt i et par sekunder for at renskylle. Derefter åbnes med lavt flow (ca. 60 ml/sek.) i 4-5 minutter inden prøvetagning. Prøverne er analyseret på stedet, straks efter udtag.

2.4 Jernmåling

Alle jernanalyser er analyseret med kittet LCK 321 eller LCK 521 begge forhandlet af HACH LANGE Denmark på et Hach DR 6000 spektrofotometer eller med Nanocolor Ion 3 analyseret på *NANOCOLOR VIS II*. Prøver, hvor jernkoncentrationen overskred måleområdet for metoden, blev fortyndet med hanevand.

2.5 Flowmåling

Flow blev bestemt ved at måle tiden det tager at fylde en kande på 5 liter eller en dunk på 25 liter ved tilgang eller afgang kolonne. Flowet måles i s/liter og omregnes til meter/time (m/h) ved at dividere med kolonnearealet.

3. Resultater

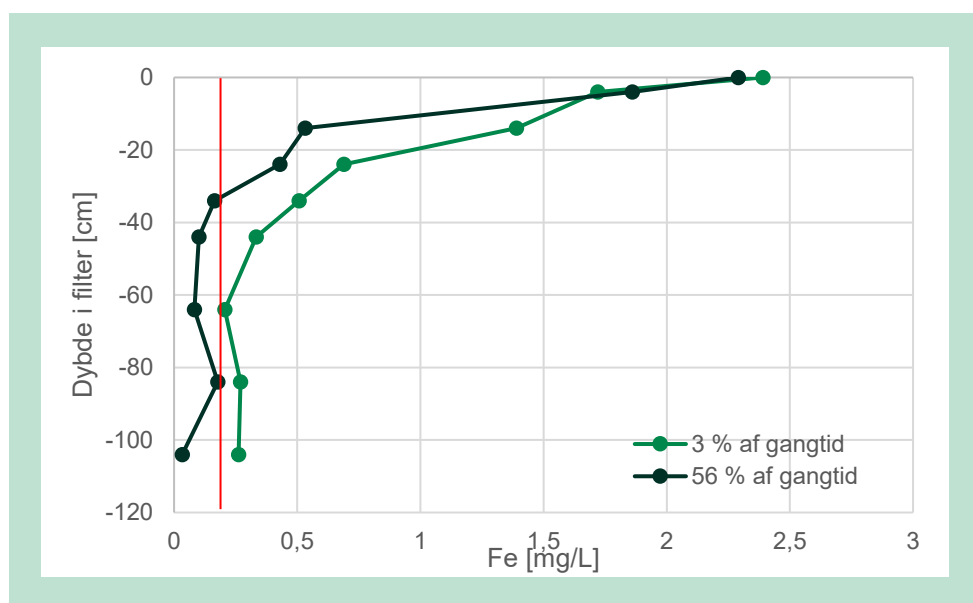
3.1 Jernfjernelsesdybde ved forskellige filterhastigheder

For at undersøge jernfjernelsesdybden ved forskellige filterhastigheder er det nødvendigt, at sandet i hele kolonnens dybde er indkørt mht. jern. For at opnå dette er der anvendt filtermateriale fra et af vandværkets sandfiltre, hvor de øverste 20 cm blev gravet af i et areal svarende til, at der kunne overføres 100 cm til forsøgskolonnen. Det afgravede filtermateriale har en størrelse på 1-2 mm.

Tre forskellige filterhastigheder er undersøgt på henholdsvis 3,5, 8,3 og 14,6 m/h. For hver filterhastighed er der udtaget vandprøver for hver 10 cm filtermateriale. De udtagne prøver er analyseret for indhold af totaljern, som beskrevet i metodeafsnittet. Da jernprofilen ændrer sig i løbet af gangtiden, er profilen gentaget flere gange i løbet af en gangtid. Tidspunktet for udtagning af prøver, er angivet som procentdel af gangtiden. Gangtiden er for alle filterhastigheder defineret som en opstuvning over sandet på 58 cm.

3.1.1 Filterhastighed på 3,5 m/h

FIGUR 3 viser jernprofiler ned igennem kolonnen på to forskellige tidspunkter i gangtiden ved et flow på 3,5 m/h.



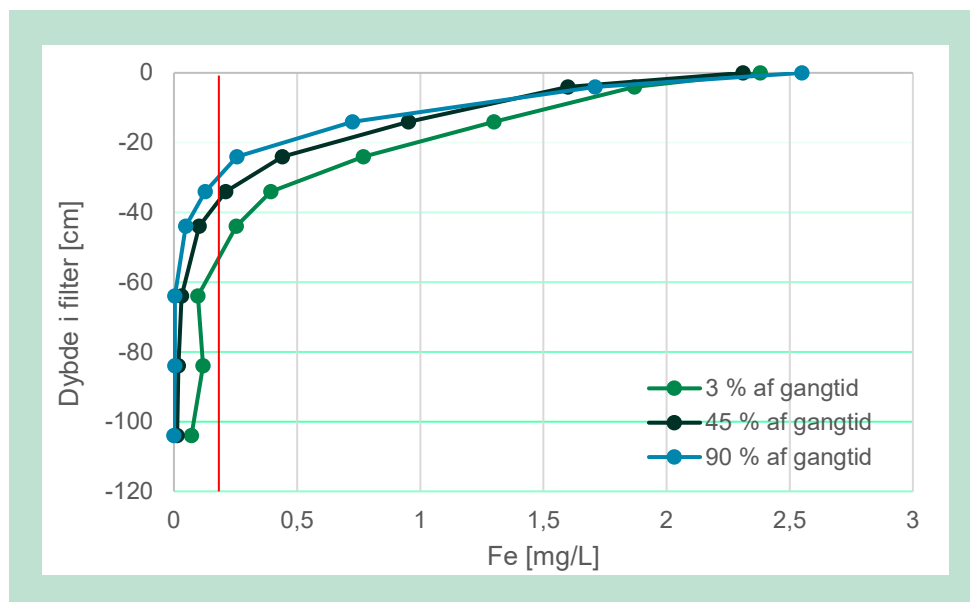
FIGUR 3. Jernprofiler over gangtiden ved 3,5 m/h. Lodret akse viser dybden af kolonnen, hvor 0 svarer til sandets overflade. Vandret akse viser jernkoncentrationen i mg/l. Den røde linje illustrerer kvalitetskravet for forbrugers taphane.

Jernkoncentrationen i indløbet er hhv. 2,3 og 2,4 mg/L. Udløbskoncentrationen er 0,26 mg/L efter 3 % af gangtiden og 0,03 mg/L 56 % inde i gangtiden. Profilen lige efter et returskyl, viser en dårligere jernfjernelse end en profil taget senere i gangtiden. Hermed understøtter resultaterne at der er en modningsperiode, hvor jernfjernelsen forbedres efter et skyl. Forskel i jernfjernelse i løbet af gangtiden afhænger bl.a. af den foregående skylleprocedure. Hvis skylleproceduren er så effektiv, at næsten alt jernet fjernes fra filtermediet, vil der være en mere betydelig modningsperiode. Eftersom der også er lavet forsøg med forskellige skylleprocedurer, kan profilerne i starten af gangtiden ikke sammenlignes for de forskellige filterhastigheder da returskyllet inden gangtiden ikke har været ens. Midt i gangtiden forventes resultaterne at

kunne sammenlignes uden indflydelse fra skylleproceduren. Af FIGUR 3 ses, at jernet, 56 % inde i gangtiden, fjernes til under kvalitetskravet ca. 33 cm nede i kolonnen. Efter 3% af gangtiden når jernkoncentrationerne slet ikke ned til kvalitetskravet.

3.1.2 Filterhastighed på 8,3 m/h

FIGUR 4 viser jernprofiler ned igennem kolonnen på tre forskellige tidspunkter i gangtiden ved en filterhastighed på 8,3 m/h.

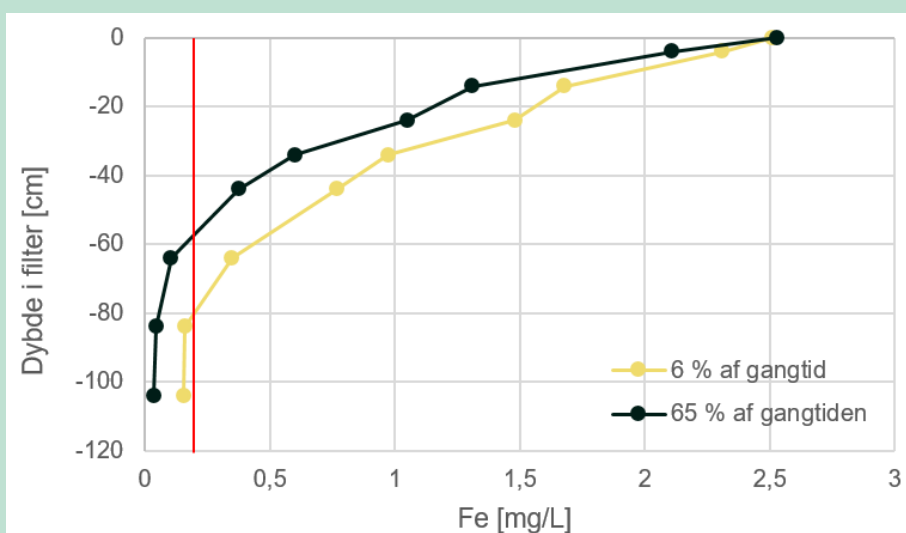


FIGUR 4. Jernprofiler over af gangtiden ved 8 m/h. Lodret akse viser dybden af kolonnen, hvor 0 svarer til sandets overflade. Vandret akse viser jernkoncentrationen. Den røde linje illustrerer kvalitetskravet for jern ved forbrugers taphane.

Jernkoncentrationen i indløbet er hhv. 2,31 og 2,55 mg/L. Udløbskoncentrationen er 0,07 mg/L efter 3 % gangtid, 0,01 mg/L efter 45% gangtid og <0,01 mg/L efter 90 % gangtid. Hermed understøtter resultaterne at der er en modningsperiode, hvor jernfjernelsen forbedres efter et skyl – og at denne modningsperiode fortsætter ind i den anden halvdel af gangtiden. Allerede 3 % inde i gangtiden lever det rensede vand op til kravværdien for jern. Det ses, at kvalitetskravet er nået over 50 cm nede i sandet ved 3% af gangtiden og at dette rykkes op til ca. 35 cm ved 45% af gangtiden og kun ca. 30 cm nede i sandet efter 90 % af gangtiden.

3.1.3 Flowhastighed på 14,6 m/h

FIGUR 5 viser jernprofiler ned igennem kolonnen på to forskellige tidspunkter i gangtiden ved et flow på 14,6 m/h.



FIGUR 5. Jernprofiler to tidspunkter inde i gangtiden ved 14,6 m/h. Lodret akse viser dybden af kolonnen, hvor 0 svarer til sandets overflade. Vandret akse viser jernkoncentrationen. Den røde linje illustrerer kvalitetskravet for jern ved forbrugers taphane.

Jernkoncentrationen i indløbet er hhv. 2,51 og 2,53 mg/L. Udløbskoncentrationen er 0,16 mg/L efter 6 % gangtid og 0,04 mg/L efter 65 % gangtid. Hermed understøtter resultaterne endnu engang at der er en modningsperiode, hvor jernfjernelsen forbedres efter et skyl. Efter 65 % af gangtiden nås kvalitetskravet knap 60 cm nede i sandet.

3.1.4 Sammenligning af forsøg med forskellige filterhastighed

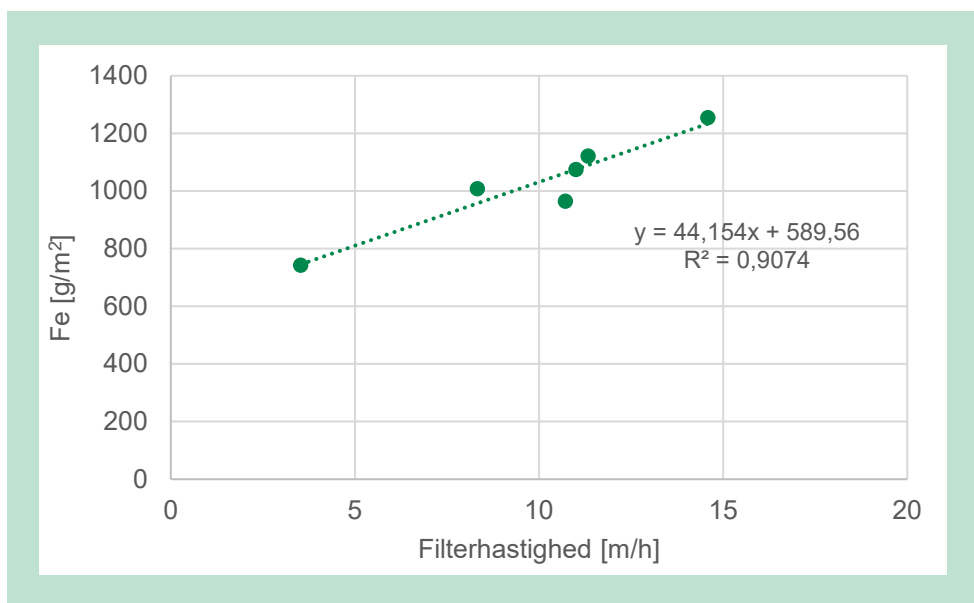
I nedenstående TABEL 2 sammenlignes forsøgene, der er lavet med forskellige filterhastigheder. Gangtiden er for alle filterhastigheder defineret som en opstuvning på 58 cm over sandet. Beregning for hvor meget jern der er bundet i kolonnen (jernfjernelse) i løbet af en gangtid antager en konstant jernkoncentration i indløbet på 2,43 mg/L (middel af 9 målinger i forsøgsperioden) og at der ikke kommer jern igennem kolonnen. For beregningen af jernfjernelse per m³ er det sandvolumen i pilotkolonnen hvor koncentrationen er over 0,1 mg Fe /L anvendt. For beregning af dybden til kravoverholdelse er der anvendt jernprofiler udtaget ca. midt i gangtiden.

TABEL 2. Oversigt over jernfjernelse ved forskellige filterhastigheder.

Filterhastighed [m/h]	Gangtid [h]	Gangtidens produktion [L]	Jernfjernelse [g Fe]	Gangtidens jernbelastning [g/m ²]	Dybde til kravoverholdelse [cm]
3,5	87	27.723	67	742	44
8,3	50	37.648	91	1.008	44
14,6	35	46.848	114	1.254	65

Som det ses af TABEL 2, medfører stigningen i filterhastigheden en kortere gangtid, men hvor der behandles mere vand i løbet af gangtiden (gangtidens produktion). Gangtidens jernbelastning (i g/m²) stiger også og der blev opnået højere værdier end der er set i Redesign-projektet i fuldskala (medianværdien blandt de 10 vandværker er 260 g Fe/m²). Forsøgsrække viser, at en 317% stigning af filterhastigheden kun medførte en stigning i den nødvendige filterdybde på 48%.

De opnåede jernfjernelser og filterhastigheder fra TABEL 2 er vist i FIGUR 6 sammen med tre yderligere opstuvningsforsøg, hvor filterhastigheden er omkring 11 m/t.

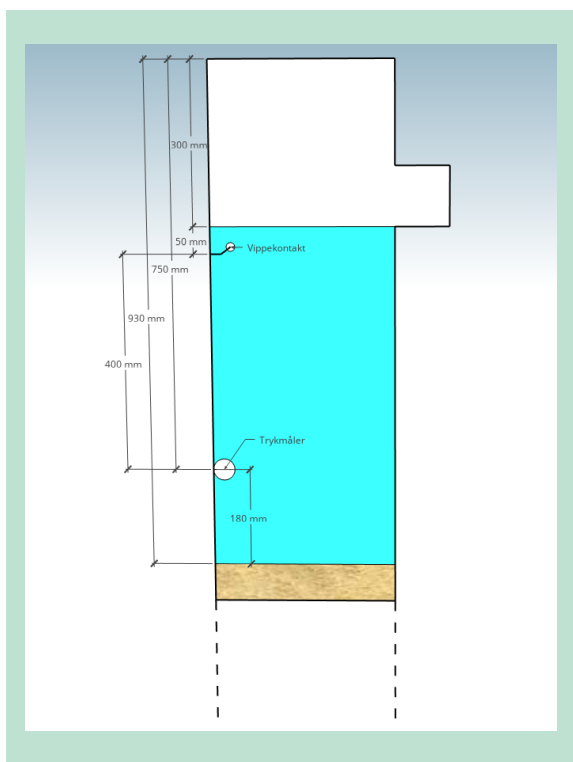


FIGUR 6. Sammenhæng mellem den opnåede filterbelastning inden opstuvning krævede re-turskyl (målt i g Fe/m² filterareal) og filterhastigheden.

Som det ses, udviser FIGUR 6 en lineær sammenhæng mellem den mulige filterbelastning og filterhastigheden ($R^2 = 0,91$). Den positive hældning af linjen betyder, at der kan behandles mere vand i løbet af en gangtid ved en stor filterhastighed end ved en lille filterhastighed. Det medfører et mindre vandspild til skyllevandsformål, et mindre skyllevandsbassin til bundfældning af skyllevandet samt at man ved dimensionering af vandbehandlingsanlægget kan nøjes med et mindre filterareal.

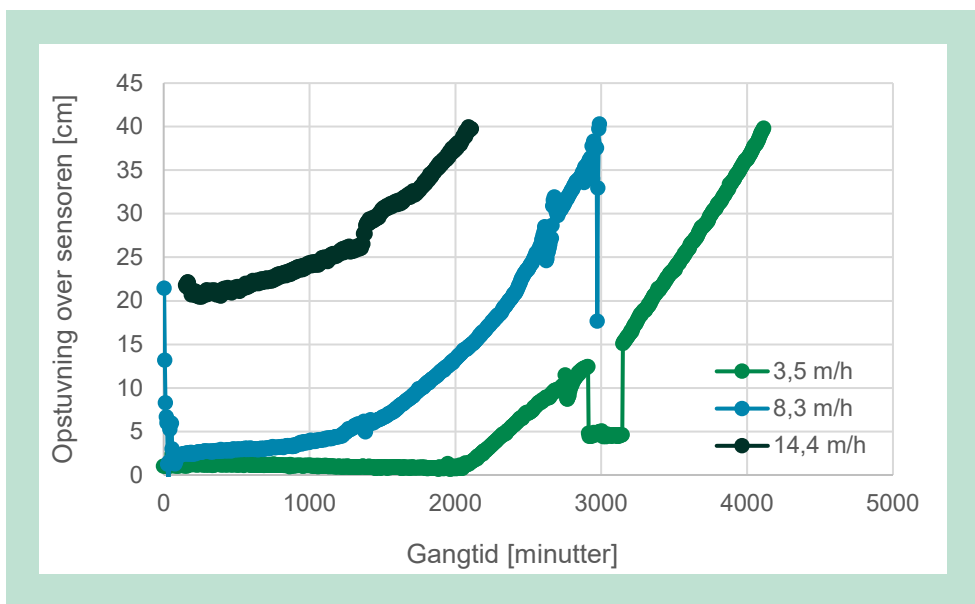
3.2 Opstuvningsforløb

For at kunne følge opstuvningen af vandspejlet over filtermaterialet var kolonnen udstyret med en tryktransducer, der logger trykket (og derved opstuvningen) hvert femte minut igennem gangtiden. Trykket er omregnet til cm opstuvning, hvor 0 cm svarer til niveausensorens placering, som er 18 cm over sandet. På FIGUR 7 vises en skitse af pilotkolonnens opbygning.



FIGUR 7. Toppen af kolonnen med placering af trykmåleren og vippekontakten.

Opstuvningen i kolonnen sker i takt med at permeabiliteten falder som følge af afsætning af jernoxider i filteret. Opstuvningsforløbet for de tre testede flowhastigheder er vist på FIGUR 8.

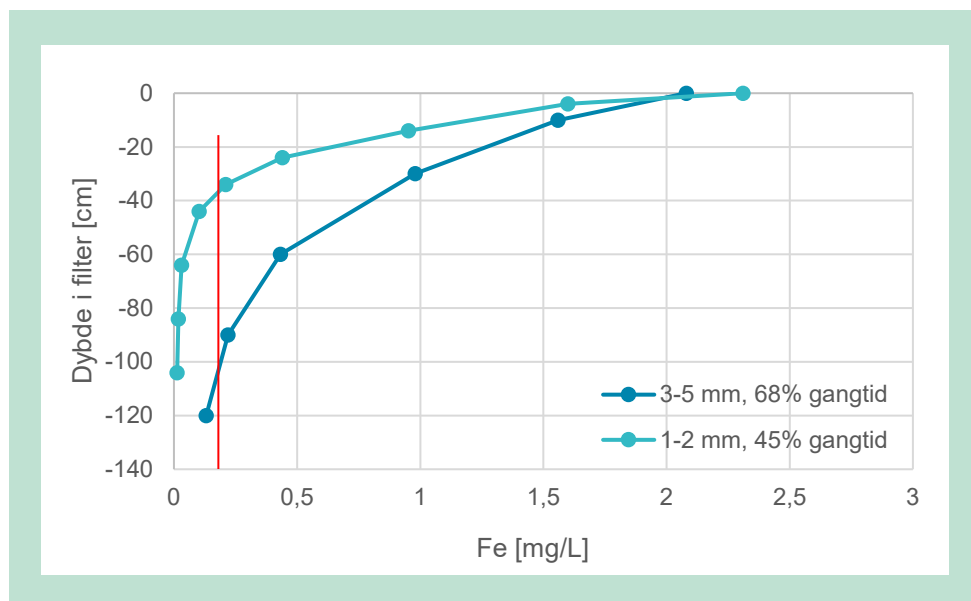


FIGUR 8. Sammenligning af opstuvningsforløbet ved tre forskellige flowhastigheder (niveau-sensorens placering ca. 18 cm over sandet).

Opstuvning var ved starten af en gangtid ved de to lave filterhastigheder ca. 20 cm (dvs. ca. 2 cm over sensoren). Dette blev styret af placeringen af kolonnens svane Hals. Ved den høje filterhastighed var opstuvningen ca. 40 cm (dvs. ca. 18 cm over sensoren). Hermed at der ved højt flow en stor opstuvning allerede fra starten af gangtiden, hvilket mindsker gangtidens længde, da vandspejlet hurtigt når op til vippekontakten.

3.3 Kornstørrelsens indflydelse på jernfjernelse

Der er udført forsøg med to forskellige kornstørrelser, 1-2 mm og 3-5 mm. Der blev anvendt en flowhastighed på 8 m/h. Jernprofiler for disse to forsøg ses i FIGUR 9.



FIGUR 9. Jernprofil ved forskellige sandpartikelstørrelser ved flow på 8 m/h. Den røde linje illustrerer kvalitetskravet for jern ved afgang vandværk.

Resultaterne viser, at i filteret med 1-2 mm korn overholder kvalitetskravet på 0,2 mg/L i en dybde på ca. 40 cm. Til sammenligning er der i filteret med 3-5 mm korn en udløbskoncentration på 0,13 mg/L. Det ses på figuren, at jernfjernelsesprofilen presses væsentlig dybere ned i filteret, når der anvendes en grovere filtermedie.

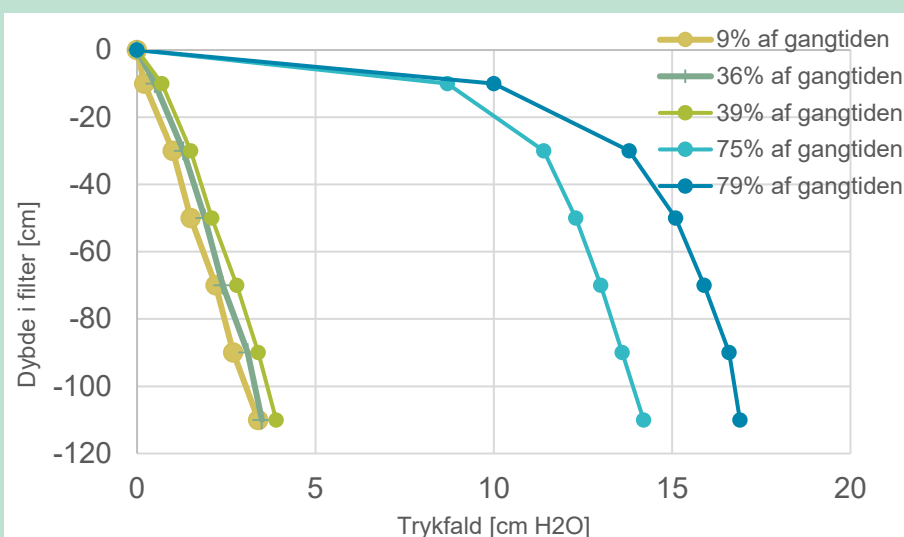
3.4 Trykfald gennem filteret

Ifølge teorien vil tryktabet stige lineært med filterdybden i et nyskyllet filter, hvis det antages, at permeabiliteten er ens i alle dybder. For at efterprøve teorien i praksis, blev der lavet en opstilling, hvor syv stigerør blev sat op på en plade (se FIGUR 10) og forbundet til udtag, der er placeret i forskellige højder på kolonnen på Østerbyværket. Ved forsøget var flowhastigheden 7,1 l/h (flow = 0,671 m³/t, areal = 0,094 m²).



FIGUR 10. Forsøgsopstilling med stigerørtavle, hvor hver af de syv stigerør er forbundet til et kolonneudtag i forskellige dybder (Poulsen, A. & Steinfeldt, C., 2019. Bachelorprojekt, side 40, Aarhus Universitet).

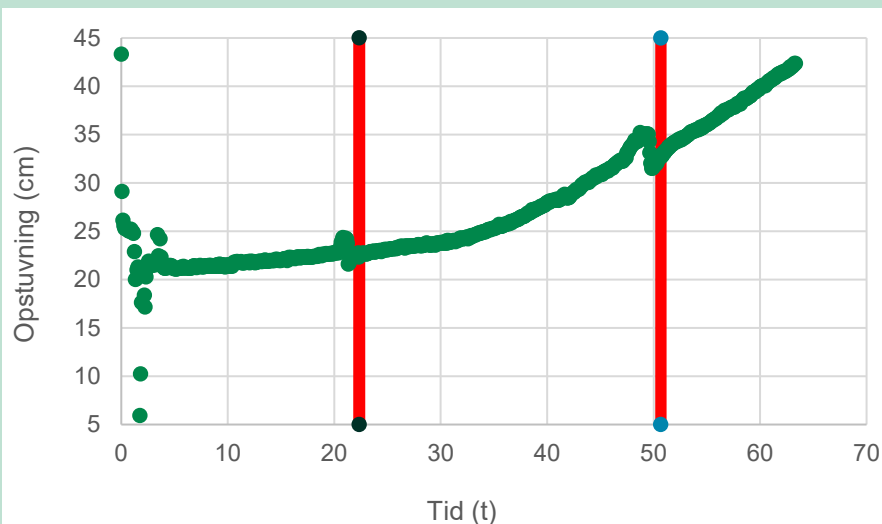
FIGUR 11 viser de målte trykfald som funktion af dybde på forskellige tidspunkter i løbet af en gangtid.



FIGUR 11. Trykfald som funktion af filterdybde, ved forskellige tidspunkter i en gangtid. (Poulsen, A. & Steinfeldt, C., 2019. Bachelorprojekt, side 40, Aarhus Universitet).

Som det ses af grafen, er der en lineær sammenhæng i starten af gangtiden, mens den lineære sammenhæng forsvinder i takt med at jernet aflejres i toppen af filteret. Hovedparten af afvigelsen fra en lineær sammenhæng sker i det øverste 30 cm af kolonnen ved den anvendte flowhastighed på 7,1 m/t. Grafen viser også, at trykfaldet ændres hurtigere i slutning af en gangtid end i starten.

Opstuvningsforløbet for samme forsøg ses i FIGUR 12.

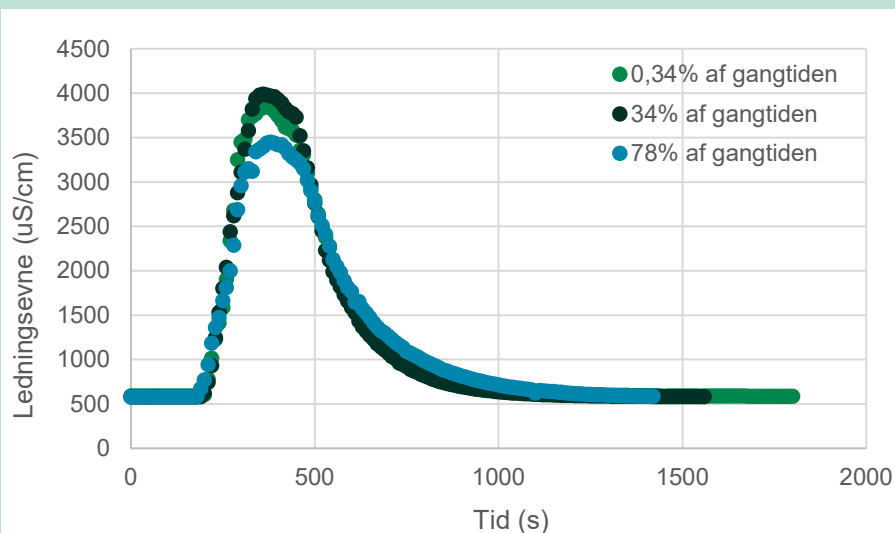


FIGUR 12. Opstuvningsforløb for samme forsøg som vist i FIGUR 11. De røde streger indikerer, at filteret kortvarigt er stoppet pga. prøveudtagning. (Poulsen, A. & Stenfeldt, C., 2019. Bachelorprojekt, side 40, Aarhus Universitet).

3.5 Strømningsforhold ved sporstofforsøg

For at undersøge om der er dannet kanaler i filtermediet er der udført et forsøg, hvor der i toppen af kolonnen tilsættes salt (NaCl) i en høj koncentration (100 mg/L) i én punktdosering. Efter doseringen måles ledningsevnen i udløbet af kolonnen. Saltdoseringen er udført tre gange i løbet af en gangtid. Her er der anvendt 3-5 mm filtermedie.

FIGUR 13 viser ledningsevnen i udløbskoncentrationen over tid tre forskellige tidspunkter i gangtiden.



FIGUR 13. Resultater fra sporstofforsøg - gennembrudskurver med ledningsevne som funktion af tid. Udført på 3 forskellige tidspunkter i løbet af en gangtid.

Efter 78 % af gangtiden viser figuren en lidt mere flad kurve (hurtigere gennembrud, lavere top, større hale). Dette stemmer overens med det effektive porevolumen er blevet en smule

mindsket. Forskellen mellem den grønne og den blå kurve er dog minimalt og formodes at være uden betydning for vandbehandling. Årsagen til den relativt lille ændring kan være den store kornstørrelse.

4. Konklusioner

I det følgende angives hovedkonklusionerne fra de udførte forsøg:

1. **Jernfjernelsesdybde:** Forøgelse af flowhastighed i et filter medfører kun begrænset forøgelse af jernfjernelsesdybden. F.eks. giver en stigning af flowhastigheden på 317% (fra 3,5 til 14,6 m/t) kun en stigning i jernfjernelsesdybden på 48%.
2. **Gangtidsproduktion:** Selv om der skal skylles oftere når der bruges en højere filterhastighed, stiger gangtidsproduktionen (målt i det antal m³, der behandles mellem to returskyl per m² filterareal).
3. **Gangtidens jernbelastning:** Ved høj filterhastighed (14,6 m/t) blev der opnået væsentlig højere jernbelastning (1254 g Fe/m²) i forhold til medianværdien for 10 fuldskala vandværker (260 g Fe/m²). Det bemærkes, at ved pilotskalaforsegene var en gangtid defineret som opstuvning på 58 cm for alle filterhastigheder.
4. **Modning:** Modning af et filter efter et returskyl fandt sted ikke kun i starten af gangtiden, men fortsatte under hele gangtiden.
5. **Kornstørrelse:** Forøget kornstørrelse medfører væsentlig stigning i jernfjernelsesdybden. Ved brug af en kornstørrelse på 1-2 mm var jernfjernelsesdybden ca. 40 cm mens ved brug af 3-5 mm var dybden > 120 cm.
6. **Filtermodstandsprofil:** Trykfaldet ved slut af gangtiden sker i toppen af filteret, selv ved en filterhastighed på 8 m/t og 3-5 mm filtermedie.
7. **Kanaldannelse:** Sporstofforsøg viste at kanaldannelse sidst i gangtiden er uvæsentlig ved 8 m/t, 3-5 mm filtermedie og en gangtid defineret som opstuvning på 58 cm.

5. Referencer

Miljøministeriet, 2021. Drikkevandsbekendtgørelsen. Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. BEK nr 1110 af 30/05/2021.

Mouchet, P., 1992. From conventional to Biological Removal of Iron and Manganese in France. *Journal AWWA*.

Sharma, S.K., Petrusevskit, B., Jonoski, A., Ijpelaar, G.F., & Schippers, J.C., 2002. Decision support system for optimization of iron removal from groundwater. *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol 2 No 5-6.

van Beek, C.G.E.M., Dusseldorp, J., Joris, K., Huysman, K., Leijssen, H., Schoonenberg Kegel, F., de Vet, W.W.J.M., van de Wetering, S., & Hofs, B. Contributions of homogeneous, heterogeneous and biological iron(II) oxidation in aeration and rapid sand filtration (RSF) in field sites. *Journal of Water Supply: Research and Technology AQUA*, Vol. 65.3

Czekalla, C., Mevius, W., & Hanert, H., 1985. Quantitative removal of iron and manganese by microorganisms in rapid sand filters (in situ investigations). *Water Supply*, Vol. 3(1), pp. 111-123.

Jernfjernelsesdybde i biofiltre

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

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



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk