

GEOFYSIK I FILTRE

- 3D kortlægning af filterkage



GEOFYSIK I FILTRE - 3D KORTLÆGNING AF FILTERKAGE (3D-FIL) - DANVA VUDP

DATO: 19. december 2019

Projekt ID: 91.2016

Udgiver:

DANVA, Dansk Vand- og Spildevandsforening

Udarbejdet af:

Lemvig Vand og Spildevand: Lars Nørgård Holmegaard, Bo Hviid Nielsen og Flemming Andersen

FoU Center for Byggeri, Energi, Vand og Klima, VIA University College: Majbritt Lund og Theis Raaschou Andersen

NIRAS: Michael Christian Hansen og Henrik Schmidt

Institut for Geoscience, Aarhus Universitet: Thue Sylvester Bording og Esben Auken

Finansiering:

Arbejdet er finansieret af VUDP, Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram

Samarbejdspartnere:

Lemvig Vand og Spildevand A/S

Center for Forskning og Udvikling i Byggeri, Energi & Miljø, VIA University College

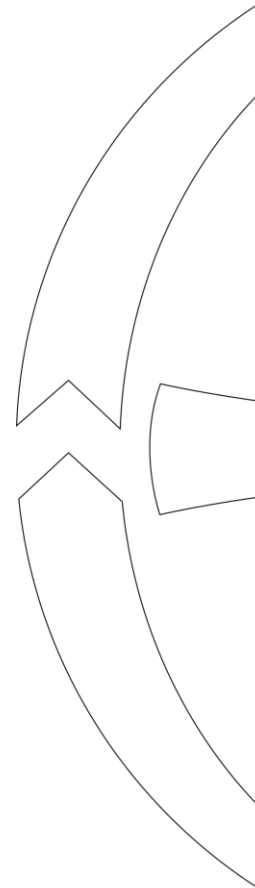
Institut for Geoscience, Aarhus Universitet

NIRAS

Kategori: Drikkevand

Indholdsfortegnelse

Forord	3
1 Sammenfatning	4
2 English summary	5
3 Introduktion	6
4 Projektets betydning for vandbranchen	7
4.1 Næste skridt	8
4.2 Marked eller anvendelsesmuligheder	8
4.3 Formidlingsplan	9
5 Projektet	11
5.1 Formål	11
5.2 Udført arbejde	11
5.3 Eksisterende viden på området	11
5.4 Danske udfordringer i forbindelse med returskyl	12
5.5 Kort introduktion til DC/IP	15
5.6 Udvikling af geofysisk udstyr	18
5.7 Geofysisk dataindsamling	19
5.8 Projektresultater	20
5.9 Konklusion og perspektivering	30
6 Litteraturliste	32



Forord

Denne rapport beskriver VUDP projektet " Geofysik i filtre - 3D kortlægning af filterkage (3D-fil)", der blev finansieret af VUDP med i alt 1.034.980 kr. Projektet er udført som et samarbejde mellem Lemvig Vand og Spildevand A/S, Center for Forskning og Udvikling i Byggeri, Energi & Miljø fra VIA University College, NIRAS, og Institut for Geoscience, Aarhus Universitet i perioden januar 2017 til december 2019.

Projektgruppen har bestået af:

Lemvig Vand og Spildevand

Lars Nørgård Holmegaard

Bo Hviid Nielsen

Flemming Andersen

VIA Byggeri, Energi, Vand og Klima

Majbritt D Lund

Theis Raaschou Andersen

NIRAS

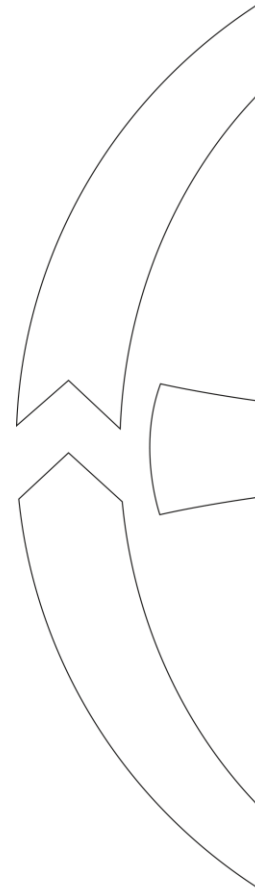
Michael Christian Hansen

Henrik Schmidt

Institut for Geoscience, Aarhus universitet

Thue Sylvester Bording

Esben Auken



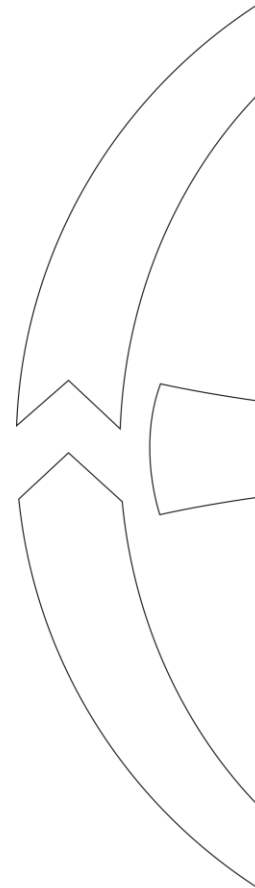
1 Sammenfatning

Projektet " Geofysik i filtre - 3D kortlægning af filterkage" er gennemført efter Triple Helix modellen som et samarbejde mellem VIA University College (VIA), Aarhus Universitet (AU), Lemvig Vand og Spildevand (LVS) og Niras i perioden fra januar 2017 til december 2019. Der er arbejdet tæt sammen i projektgruppen, hvor den store praktiske erfaring og nysgerrighed fra Lemvig Vand og Spildevand hurtigt kunne udfordre og dermed udvikle den teoretiske viden om metodens mere traditionelle anvendelser med ex. grundvands-kortlægning. Det har derfor været muligt løbende at udvikle og optimere på såvel udstyrs-design og monitoringshyppighed, ligesom tolkningsdiskussionerne i forbindelse med data-analyserne har draget stor nytte af kombinationen af teori, solid metode kendskab og praktiske erfaringer.

Der er i projektet

- succesfuldt udviklet et geoelektrisk udstyrsdesign,
- udstyret har kontinuerligt og fjernbetjent monitoreret fuldskala drikkevandsproduktion i et åbent sandfilter,
- udstyrsdesign til 1D konfiguration har bevist funktionalitet og passende sensibilitet gennem 6 måneders dataopsamling,
- opsamlede data er analyseret og sammenholdt med driftsdata og viden om det aktuelle filters tilstand,
- det udviklede design og metoden har vist sig specielt værdifuldt i forhold til monitorering af effektiviteten af anvendt returskylning.

Resultaterne fra projektarbejdet har vist, at det generelt er muligt at kortlægge ændringer i filtermassens struktur mellem to gangtider i et åbent sandfilter. Dvs. at det lokalt i filterets masse er muligt at iagttage en form for strukturændringer op til en returskylning af filteret og efter en returskylning at kunne se en tilbagevenden til filterets oprindelige status. Disse ændringer kan identificeres lokalt i zoner i filteret som funktionen af dybden.



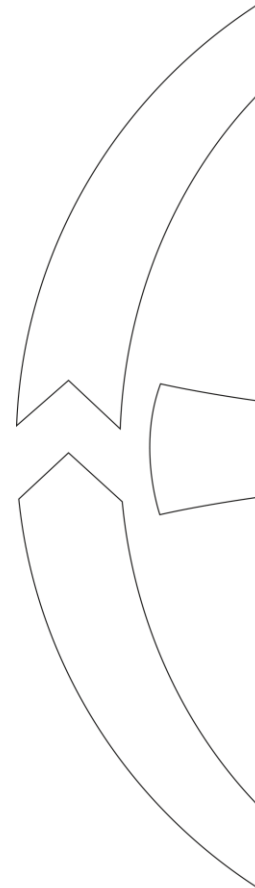
2 English summary

The present project "Geophysics in filters - 3D mapping of filter cake" was implemented according to the Triple Helix model as a collaboration between VIA University College, Aarhus University, Lemvig Vand og Spildevand and Niras during the period from January 2017 to December 2019. Within the project group close cooperation and discussions, where the great practical experience and curiosity from Lemvig Vand og Spildevand quickly could challenge and thus develop the theoretical knowledge of the method's more traditional applications from for instance hydrological mapping of groundwater sources. Therefore, it has been possible to continuously develop and optimize both equipment design and monitoring frequency, and the interpretation discussions in connection with the data analyzes have greatly benefited from the combination of theory, solid method knowledge and practical experience.

There is in this project

- successfully developed a geoelectric equipment design,
- the equipment has continuously and remotely monitored full scale drinking water production in an open sand filter,
- 1D configuration equipment design has proven functionality and appropriate sensitivity through 6 months of data collection,
- Collected data is analyzed and compared with operating data and knowledge of the current filter's condition,
- the developed design and method have proved particularly valuable in relation to monitoring the effectiveness of the used backwash.

The results from the project work have shown that it is generally possible to map changes in the structure of the filter mass between two times in an open sand filter. I.e. that it is possible, locally in the mass of the filter, to observe some form of structural change up to a backwash of the filter and, after a backwash, to see a return to the original status of the filter. These changes can be identified locally in zones of the filter as the function of depth.

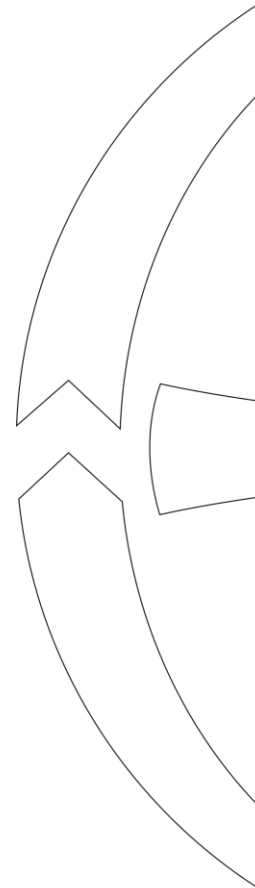


3 Introduktion

Drikkevandet i Danmark er i langt overvejende grad baseret på grundvand som oppumpes fra jordlagene i undergrunden. Vandet er typisk kun oprenset ved en række simple, men effektive oprensningemetoder i form af iltning og filtrering, således at vandet overholder de fysiske og kemiske krav til vandkvaliteten. Typisk sker iltningen af vandet enten ved en iltningstappe (typisk ældre vandværker), iltningsspor eller ved direkte tilføjelse af ren ilt, mens filtreringen af vandet enten sker gennem åbne gravitationsfiltre eller lukkede, typisk tryksatte sandfiltre. Tendensen de seneste år er, at iltningen sker ved direkte tilføjelse af ilt til råvandet samt at vandet filtreres i lukkede sandfiltre. Det sker alt sammen for at undgå store åbne flader, hvor risikoen for at vandet nemmere kan blive forurenset alt andet end lige vil være større.

Sandfiltrene på vandværkerne har flere funktioner. Dels fungerer de som aflejningssted, hvor suspenderede partikler aflejres, og dels fungerer de som medie for de fysiske, kemiske og biologiske processer, der fjerner primært jern, mangan og ammonium. Alt afhængig af råvandets kemiske komponenter skal sandfiltrene periodevis renses for at de fungerer optimalt med hensyn til 1) ydelse og 2) drikkevandskvalitet. Dette sker ved hjælp af et returskyl. Typen af returskyl varierer fra vandværk til vandværk, men involverer sædvanligvis en kombination af luftskyl, luft- plus vandskyl og afsluttes af et kraftigt vandskyl. Her ved skylles de fleste af de aflejrte partikler og løsrevet korncoating ud af sandfiltret over skyllevandsafløbet. Enkelte vandværker genbruger vandet fra returskyllet, men dette er ikke tilfældet ved hovedparten af vandværkerne, hvor vandet betragtes som et spildprodukt. Indtil nu er returskylene på de fleste vandværker blevet foretaget efter et fast periodevist mønster baseret på erfaring og en visuel observation af farven eller renheden af skyllevandet eller ved at følge tryktabet i filtret. Typisk går der 2 til 10 dage imellem hvert returskyl afhængig af råvandets kemi og mængden af produceret drikkevand. Da der bruges rent vand og pumpeenergi til returskyllet, er det i vandværkernes interesse at returskyllet udføres optimalt. Skylles der for kort eller for sjældent kan resultatet være en gradvis tilklogning eller at filtermaterialet "vokser" som følge af akkumulering af coating på kornene. Resultatet er gradvist forringet vandkvalitet, der ender med et behov for at udskifte filtermaterialerne tidligere end ellers nødvendigt. Alternativt skylles der for længe eller for ofte, hvilket resulterer i spildt vand og energi og muligvis også i reduceret vandkvalitet.

Generelt har det været svært for vandværkerne konkret at eftervise, hvor effektive deres returskyl er. Erfaringer viser, at langt størstedelen af de aflejrte partikler skylles ud af sandfilteret, men i Danmark vil filtermaterialet over tid typisk coates med jern- og manganoxider. Endvidere kan der være mindre sektioner af filtermaterialet, som ikke oprenses under returskyllet, hvorved disse vil ligge i filtret som mindre områder af lavpermeabelt materiale, der ikke har den ønskede rensende effekt. Over tid kan disse problemer vokse sig større og større indtil filtermaterialet skal udskiftes.



4 Projektets betydning for vandbranchen

Med krav om mere bæredygtige og fleksible systemer, vil der fremover være et større behov for at kunne optimere og fokusere skylleprocessen efter det faktiske behov og ligeledes kunne udnytte filtersystemer mere fleksibelt.

Der er igennem de sidste år foretaget en del nærmere analyser af processerne i eksisterende vandværksfiltre, hvor det viser sig, at en forholdsvis lille del af filtermassen er aktiv i den normale daglige drift. Formentligt fordi vandværksfiltre er dimensioneret efter en forventet maks. døgnproduktion, som skal sikre at forbrugerne har en fornuftig forsyningsikkerhed.

Men da disse uudnyttede filtervolumener ikke bliver brugt i den daglige drift, er der en betydelig risiko for, at de bliver biologisk inaktive. Forslag til et fremtidigt filterdesign går derfor på at kunne udnytte filtermassen i hele sin udstrækning og i stedet alternere mellem flere mindre sektionerede filtre.

Det vil medføre en mere intensiv anvendelse af vandværksfiltre og dermed også øge behovet for en form for intelligent overvågning og styring af skylleprocessen, men også for overvågning af filtermassens tilstand.

Gevinsten forventes at blive højeffektive filtre med mulighed for en væsentlig større filterhastighed end man i dag "tør" belaste vandværksfiltre med, samtidig med en mindre anvendelse af skyllevand, da filterarealerne bliver mindre og man "nøjes" med at returskylle den del af filtermassen, der er belastet.

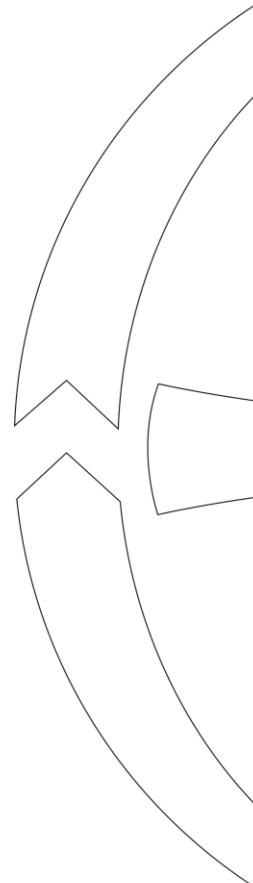
Her vil en naturlig del af instrumenteringen kunne være en overvågning af filtermateriale-nes tilstand og gerne online, så der eventuelt gives alarmer ved risiko for akkumulering i filtermassen.

Ved at optimere returskylleprocessen både med hensyn til perioden mellem returskyl, længden af returskylle og deres renseseffekt, vil vandværkerne kunne spare vand og energi.

Branchens behov for forbedret filtermonitoring omfatter en række emner:

- Hurtige og kontinuerte målinger af filterets tilstand mht. udfældninger
- Bedre forståelse af hvornår et returskyl er nødvendigt
- Bedre forståelse af hvornår filtret er helt oprenset og der ikke længere findes "ikke rensede områder"
- Muligheden for at reducere skyllelængden, hvis den nødvendige renhed opnås før forventet.

Filterovervågning med det ny-udviklede geoelektriske udstyr bør således kunne være en naturlig del af bestykningen af fremtidige nye filtersystemer, men vil også kunne anvendes til optimering og overvågning af eksisterende filtre.



4.1 Næste skridt

Der er i dette projekt udviklet en geoelektrisk metode opsætning til brug for kontinuerte målinger af et sandfilters tilstand. Det udviklede prototype set-up har været testet over længere tid i fuldskala vandværksfiltre og resultaterne demonstrerer at udstyret fungerer i praksis samt at resultaterne kan anvendes til online monitoring af filtertilstand som f.eks. returskyllets effektivitet. Med reference til Technology Readiness Level, TRL, der anvendes af om teknologiudvikling i EU og Innovationsfonden [1], har vi i dette projekt udviklet og demonstreret teknologien til TRL niveau 5. På dette niveau er metoden succesfuldt testet og demonstreret i fuldskala operationelt miljø som prototype.

Næste skridt vil derfor være at videreudvikle prototypen, hvor det specielt kræver justeringer og tilpasninger i det software, der anvendes til styring af dataopsamlingen, samt videreudvikling af softwareinterface og dataformater ved datahåndtering og visning af data, således at udstyret kan kobles direkte på eksisterende SRO-systemer. Derudover bør den udviklede metode yderligere valideres gennem forsøg under andre drikkevandsproduktionsforhold, herunder i trykfiltre. Der er i projektet opsamlet solide erfaringer, hvorved det forventes, at der vil kunne laves et mere specialiseret måleinstrument tilpasset disse specifikke opstillinger udviklet i dette projekt. Udvikling af et målrettet måleinstrument vil kunne reducere produktionsprisen for måleudstyret. Disse videreudviklinger vil flytte teknologiens TRL niveau gennem TRL 6-8, hvorfra et reelt kommercielt produkt kan færdigudvikles.

Det anbefales derfor, at der arbejdes videre med de nævnte udviklingsmuligheder.

4.2 Marked eller anvendelsesmuligheder

Med det udviklede udstyr opnås mulighed for at følge med i, hvordan selve filtermassens homogenitet bevares.

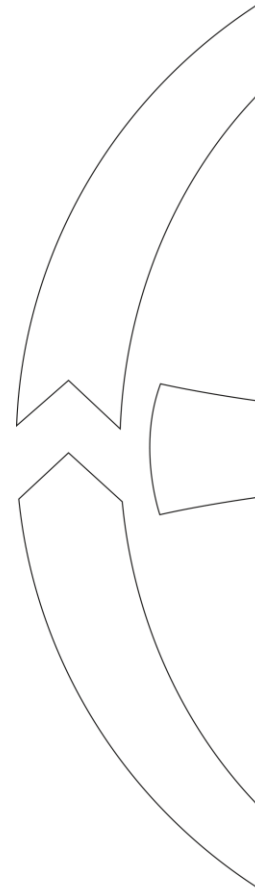
Det udviklede geoelektriske udstyr bør således kunne være en naturlig del af bestykningen af fremtidige nye filtersystemer, men vil også kunne anvendes til optimering og overvågning af eksisterende filtre.

I projektet her har der været fokus på anvendelsen til vandforsyningsfiltre, men andre dele som rensning af industrielt procesvand eller procesanlæg, hvor der anvendes sandfiltre og hvor de samme udfordringer gør sig gældende, kan formentlig også være en anvendelsesmulighed.

Indenfor vandværksfiltre vurderes umiddelbart at være et behov på 300-500 enheder inden for Danmark, men tages det internationale marked med og ses der nærmere på anvendelsesmulighederne inden for rensning af processpildevand og spildevand, forventes markedet at være væsentligt større.

Det forventes, at hvert procesanlæg/vandværk skal have et måleinstrument der bliver kalibreret efter de aktuelle forhold. Hvert måleinstrument vil kunne måle på elektroderne på de filtre som vandværket har installeret f.eks. en gang pr. time. I dag vil et vandværk typisk have 2-8 filterenheder.

På det nuværende stade er specielt måleudstyret forholdsvis bekosteligt, da der bruges geofysisk feltudstyr med en bred vifte af anvendelsesmuligheder, men det forventes at der



vil kunne laves et mere specialiseret instrument tilpasset disse opstillinger og dermed kunne reducere produktionsprisen.

En estimeret salgspris for et færdigt udviklede instrument, forventes at ligge i intervallet kr. 75-100.000 og ca. kr. 15-20.000 for elektrode delen som skal installeres i hvert filter.

Et vandværk med 4 filterenheder påregnes således at kunne bestykes for ca. kr. 180.000.

4.3 Formidlingsplan

Projektet og dets resultater er blevet formidlet jævnfør nedenstående tabel, hvor dato, titel og sted for formidlingen fremgår.

Formålet med nedenstående formidlingsplan har været,

- at gøre opmærksom på projektets eksistens og dets resultater for relevante interessenter
- at formidle resultaterne af projektet til relevante interessenter
- at få målgrupperne til at anvende resultaterne og metoderne

Aktivitet	Midler/ Hvor	Tidspunkt for formidling	interessenter	Hvem	Udført
AP 2: State-of-the-art	Inkluderet i Nærværende rapport	Første ½ år af projektet	Internt i projektet	VIA, Theis Raaschou Andersen	✓
AP 3: Udvikling af det geofysiske udstyr	Præsentation	DanskVand konferencen 2017	Dansk Vandbranche	Lemvig Vand og Spildevand v. Lars Nørgård Holmegaard	✓
AP 5: Afprøvnings af det geofysiske udstyr i fuldskala	Præsentation ved DanskVand konferencen	DanskVand konference 2018	Dansk Vandbranche	VIA, Majbritt Lund	✓
AP 5: Afprøvnings af det geofysiske udstyr i fuldskala	Præsentation ved IWA2018, internationalt	IWA 2018, Japan September 2018	International Vandbranche og fagnetværk	VIA, Theis Raaschou Andersen	✓
AP 5: Afprøvnings af det geofysiske udstyr i fuldskala	Præsentation ved 5th International conference on Induced polarization, Internationalt	5th International IP Workshop, USA Oktober 2018	International forskningsnetværk	AU, Thue Sylvester Bording	✓

AP 5: Afprøvn- ning af det geo- fysiske udstyr i fuldskala	Præsentation ved DANVA Årsmøde 2019	DANVA Årsmøde, Dk, april, 2019	Dansk vandbranche	AU, Thue Sylvester Bording, Lemvig Vand og Spildevand v. Lars Nørgård Holmegaard	✓
AP 6: Rapport- ring og formid- ling	Indeværende Rap- port	Ultimo 2019	Fonden, dansk vand- branche	Alle	✓
AP 6: Rapport- ring og formid- ling	Præsentation ved Danish Water Fo- rum	14th Annual Water Research Conference, Dk, 2020	Dansk vandbranche og forskningsnetværk	VIA, Majbritt Lund	✓
AP 6: Rapport- ring og formid- ling	Artikel	Internationale vandsektor, 2020	International branche og forskningsnetværk	VIA, Majbritt Lund, AU, Thue Sylvester Bording 2020	

5 Projektet

5.1 Formål

Projektet omhandler måling og monitorering af udfældninger i filtermedier på vandværker ved hjælp af geofysik i filtre. Formålene med projektet er:

- at udvikle et geoelektrisk udstyr til måling og monitorering af udfældninger i filtermedier på vandværker
- at teste det udviklede geoelektriske udstyr mht. funktionalitet, sensitivitet og praktisk anvendelse
- at afprøve det geoelektriske system i fuldskala.

Udviklingsarbejdet er foregået hos Institut for Geoscience i Aarhus, og test af udstyr er foregået hos Engbjerg Vandværk ved Lemvig.

5.2 Udført arbejde

Aktiviteterne udført i forbindelse med projektet har omfattet følgende:

- Afdækning af state-of-the-art over danske og udenlandske geoelektriske systemer til monitorering og måling i sandfiltre
- Udvikling af geoelektriske udstyr til monitorering og måling af filtermedie
- Udførelse af test af forskellige systemløsninger og konfigurationer til optimal monitorering af udfældninger på filtermediet vha. geoelektrik
- Udføre en kortlægning af filterdrift og filtermedie i det fuldskala drikkevandsfilter, der skal anvendes til test af udstyr
- Test af udstyret på vandværker i fuldskala
- Opstilling og demonstration af geoelektrik til monitorering og måling på åbne sandfiltre.

5.3 Eksisterende viden på området

Til forfatterens viden er der ingen undersøgelser, der bruger DC/IP til monitorering af sandfiltre i vandsektoren. Tætteste beslægtede videnskabelige forsøg er foregået ved hjælp af akustik, hvor dels arbejdet med projektet "Mikroseismik" som var et tidligere VTU projekt under Fyrtårnsprojektet "Fremtidens Drikkevandsforsyning" [2] og dels forskningen af [3] og [4] har inspireret nærværende arbejde. [3] og [4] brugte med succes akustik til at de-

tektere og undersøge effekten af returskyl for åbne sandfiltre i Holland. Over en måleperiode på 10 dage sås en stigning i mængden af energi reflekteret, hvilket blev tolket som et resultat af en øget densitet samt en øget seismikhastighed fra de øverste 5 cm af sandfiltret grundet sedimentation af jern og mangan i porerne mellem filtermaterialet. Dette blev tolket som en svag kompaktering af filtermaterialet gennem de 10 dage ved at top af filtermaterialet sank ned. Tilsvarende resultater blev observeret i projektet "Mikroseismik - Fremtidens Drikkevandsforsyning" [2]. Det blev desuden observeret, at er de øverste 30 cm af filtret "rene" igen efter returskylning, dog med undtagelse af mindre lokale områder, hvor der stadigvæk kunne observeres sandlommer af kompakteret og højere densitet området, hvilket tydede på at returskylningen ikke renser filtermaterialet fuldstændigt. Dette kunne ikke verificeres i projektet "Mikroseismik - Fremtidens Drikkevandsforsyning" [2] idet opløseligheden var utilstrækkelig. Dette håber forfatterne at kunne imødegå i dette projekt ved at bruge geoelektrik i stedet for akustik.

5.4 Danske udfordringer i forbindelse med returskyl

5.4.1 Vandbehandlingsprocessers betydning for tilstopning af filtermaterialer.

I Danmark er vi som udgangspunkt underlagt et krav om, at der som udgangspunkt kun må benyttes simple vandbehandlingsprocesser svarende til en vandbehandling bestående af en beluftning efterfulgt af en filtrering. Yderligere processer som f.eks. dosering for flokkulering af organiske forbindelser m.fl. betegnes som videregående vandbehandling og kræver en myndighedsdispensation, hvilket normalt kun gives såfremt der ikke er tilgængelige alternativer.

Dette har medført, at man som udgangspunkt er begrænset i sit procesvalg til dimensionering af vandbehandlingsanlægget, ligesom man i større grad er bundet af den måde grundvandet reagerer på en simpel vandbehandling.

I Danmark er der tradition for at dimensionere vandværks filtre efter samme hydrauliske belastning (f.eks. en filterhastighed på 5 m/h for åbne sandfiltre) og så tilpasse filterhøjde og sammensætning af filtermaterialer efter den aktuelle vandtype og den ønskede gangtid (gangtid = antal timer med maksimal filterhastighed mellem to filterskyl).

Tidligere blev beluftsanlæggene udført som risle bakker eller iltningstrapper, men for at gøre vandbehandlingen mere robust over for gasser som svovlbrinte og metan samt give mulighed for at kunne styre/variare beluftsprocessen, er de fleste vandværker etableret de sidste 30-35 år udført med mekanisk beluftning i form af enten en bundbeluftning i et iltningsspor eller en in-line beluftning i vandbanen.

Specielt bundbeluftningen medfører en forholdsvis kraftig beluftning i 1. procestrin således, at der sker en iltning af jern til $\text{Fe}(\text{OH})_3$ samt en vis stripping af aggressiv kulsyre med tilhørende kalkudfældning FeCO_3 , hvilket bevirker at en stor del vil udfældes forholdsvis momentant i rør og i toppen af filteret og lægge sig her som et slamlag øverst i vandværkets forfilter og dermed give anledning til en forholdsvis hurtig tilstopning af filteret og dermed en relativ kort gangtid. Til gengæld er filteret normalt nemt at returskylle, da det typisk kun drejer sig om at få løftet det øverste slamlag ud af filteret.

Er vandbehandlingsanlægget designet med for- og efterfilter, således at der er fokus på dette procesforløb, kan det fungere fornuftigt og en del vandværker i Danmark er opbygget på denne måde, men gennem de sidste 35 år er der arbejdet med forskellige former for dybfiltrering via forskellige sammensætninger af filtermaterialer og filterhøjder (2-

medie filtre og lignende) for at udnytte filtrene mere effektivt. Kortlægning af filtertilstandene i 10 vandværker i Dk har senest vist at filteropbygningerne til gavn for dybdefiltrering ikke bevares over tid, sandsynligvis på grund af de anvendte returskylleprocedurer [5].

Ligeledes har man via justering af iltningen i de forskellige procestrin, samt reduceret opholdstiden i de gamle reaktionsbassiner, arbejdet på at øge andelen af autokatalytisk binding af jern til filterkornene for dels at få en mere robust proces, men også for at reducere skyllevandsmængden ved at opnå bedre dybdefiltrering og dermed længere gangtider for filtrene.

Andre processer som biologisk jernbinding foregår ved lave pH og lave iltindhold og giver en endnu bedre udnyttelse af filtrene.

Filtertype	Jernfiltrering	Jern (kg/m ² ¹⁾)
Sandfilter	Proces med fysisk-kemisk effekt	0,6-0,9
2-mediefilter (Antrazit/kvarts)	Proces med fysisk-kemisk effekt	Ca. 2,9
Sandfilter	Proces med biologisk effekt	Ca. 3,1

(Elin Dichmanns tabel 17.34 fra [6])

¹⁾ Gennemsnitlig frafiltreret jernmængde pr. m² filter med en filterhøjde på 1 m

Disse processer medfører de længste filtergangtider og dermed den bedste udnyttelse af filtermaterialerne. Til gengæld vil de også stille større krav til en effektiv returskylning og god vedligeholdelse af filtermaterialerne, da man her ikke så hurtigt får opbygget et modtryk/tilstopning af den øverste del af filteret, men derimod langsomt får sat en stor del af filtermassen til.

5.4.2 Udfordringer med traditionelle indikatorer for returskylning

Typisk returskylles danske vandværksfiltre efter antal behandlet m³ grundvand, samt med mulighed for supplerende returskylning ved øget opstuvning i filteret. Den faktiske gangtid er baseret på erfaringstal fra filterets indkøring og trimmes i den efterfølgende drift.

I dag følges filterets tilstand ved at følge med i, hvor hurtigt/meget opstuvningen over filtermaterialerne øges eller hvor meget modtrykket over f.eks. et trykfilter stiger mellem to filterskylninger og er modtrykket/opstuvningen neutraliseret efter en filterskylning. Ligeledes udføres visuel inspektion af skyllevandet, hvor det iagttages en ensartet afklaring af skyllevandet fra gang til gang og får man det indtryk at der sker akkumulering i filtrene suppleres med et manuelt skyl hvor man ligeledes ser på afklaringen af skyllevandet. Dette er de primære styringsparametre i dag.

Den sidste parameter kan også overvåges ved visuel inspektion under filterskyl, hvor der ses på om fordelingen af filterskyllevandset og luftskylningen sker over hele filterarealet.

Dette er en naturlig del af tilsynet med åbne hurtig filtre, men er ofte vanskeligt med lukkede trykfiltre. Nyere trykfiltre kan i dag leveres med inspektions vinduer så dette er muligt.

Til trods for dette opleves det alligevel, at der på længere sigt alligevel sker vækst i filtermassen og filtermaterialer vokser langsomt og skal udskiftes af forskellige årsager. Det skyldes typisk for svag skylleproces eller for dårlig fokuseret skylleproces. Begynder filtermaterialerne at vokse vil man typisk forsøge at trimme skylleprocessen til der er balance.

Er filtrene aktiveret med en større grad af autokatalytisk og biologisk jernfjernelse vil en større del af filtermassen blive sat til med udfældninger. Det vil medføre, at der begynder at ske kanaldannelser i filtermassen og man får gennembrud af jern og mangan pga. for kort opholdstid/kontaktid til filtermaterialerne, hvilket ikke behøves at medføre et markant større modtryk.

Det vil sige, at ved en større grad af autokatalytisk og biologisk jernfjernelse øges således behovet for andre måder at vurdere filtrenes skyllebehov på, samt andre måder at måle skylleprocessens effektivitet på.

De fleste nyere vandværker er derfor i dag indrettet med online monitoring på filterets afgangsledning af parametre som turbiditet, redox og pH til at indikere et behov for returskylning, men også for at dokumentere at filteret er klar til at blive sat i drift efter en returskylning.

Tendensen går ligeledes i retning af at udnytte filtrenes kapacitet mere fleksibelt og udnytte filtermaterialerne fuldt ud hele tiden og ikke kun til sikring af en maksimal filterkapacitet til dækning i en kortere fremtidig spidsbelastning, men også at kunne reducere skyllevandsbehovet i perioder med lav filterbelastning.

For grundlast vandværker er udfordringerne lidt anderledes, idet disse drives efter en fast døgnproduktion, hvor det er specielt vigtigt at skyllesekvensen er i balance med den aktuelle råvandskvalitet, filterproces og døgnproduktion.

5.4.3 Udfordringer med returskylleprocessen

Generelt opbygges returskylleprocessen i 3 sekvenser – en luftskyllesekvens, en kombineret luft og vand sekvens og en ren returskylning med vand.

Variablerne er skylletiderne og skyllehastighederne samt gangtiden mellem filterskyl.

Skylleprocessen vurderes normalt kun visuelt og trimmes efterfølgende i driften, men da det kan tage flere år inden kanaldannelser i filtermaterialerne bliver så omfattende at filtermaterialerne reelt er ødelagte eller giver begrænsninger i kapaciteten, kan det være vanskelig at justere skylleprocessen i tide.

Vækst i filtermassen indikerer, at skylleprocessen ikke er i balance, men opstår som regel først når en væsentlig del af filtermassen er sat til.

Ved den efterfølgende udskiftning af filtermaterialerne kan man prøve på at evaluere skylleprocessen i forhold til den måde filtermaterialerne forefindes (dybde til belægninger og farve) og ud fra dette revurdere skylleprocessen.

Tilsvarende kan der udtages kerneprøver af filtermassen med passende interval, men det er forholdsvis bekosteligt og hygiejnisk kritisk, idet man er nødt til at lave indgreb direkte i vandbanen.

Ligeledes ses der i dag flere vandbehandlingsanlæg med dispensation til videregående vandbehandlingsprocesser som blødgøring af grundvandstyper med en høj kalkhårdhed og andre med pH-justering af kalkaggressive grundvandstyper, mens andre igen har dosering med flokkuleringsmiddel, aktiv kulfiltrering eller dosering med jernsulfat med henblik på binding/fjernelse af arsen eller dosering af mineraler for at forbedre filter processerne.

En større udbredelse af disse processer øger ligeledes behovet for at kunne optimere og trimme skylleprocessen i forhold til de aktuelle vandbehandlingsprocesser.

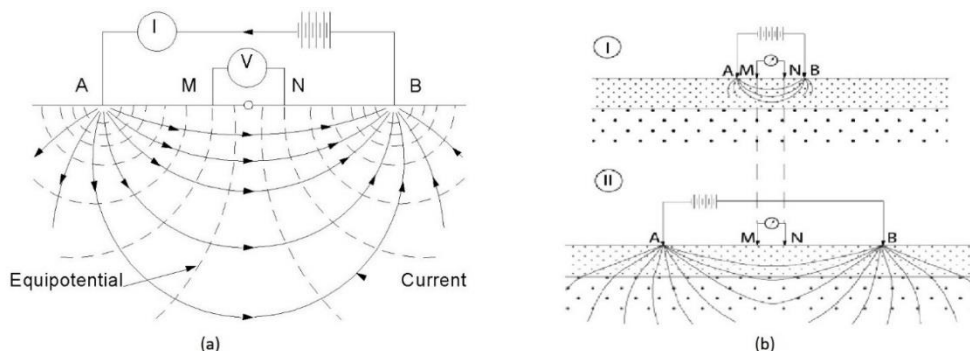
Denne udviklingstendens vil øge behovet for at kortlægge de anvendte skylleprocessers effektivitet og forbedre disse. Ligeledes må det forventes, at ved en optimal udnyttelse og vedligeholdelse filtrene vil det ikke kun være muligt at kunne reducere skyllevandsmængden markant, men også at kunne forbedre filtrenes rensningsevne og forlænge filtermaterialernes levetid.

5.5 Kort introduktion til DC/IP

I det følgende afsnit vil de anvendte principper inden for måling og modellering af DC/IP data blive beskrevet.

5.5.1 DC Metoden

Resistivitets målinger bliver udført ved at injektere en elektrisk strøm i jorden og derpå måles de resulterende potentiale forskelle på overfladen. Navnet DC kommer af at der anvendes jævnstrøm (Direct Current - DC). Den målte resistivitet afhænger af materialet, porøsiteten og porevæskens ledningsevne. I praksis udføres en måling ved at sende strøm i jorden gennem to elektroder (A og B), og potentiale forskellen på overfladen måles så gennem et andet sæt af elektroder (M og N), og dermed opnåes et estimat af jordens resistivitet kaldet den tilsyneladende resistivitet. Strømlinjerne og ækvipotential flader for en homogen jord er vist i Figur 1.



Figur 1: (a) Strømlinjer og ækvipotential flader for et homogent halvrum. A og B er strøm elektroder og M og N er potentiale elektroder. (b) Skitse der viser at ved at øge elektrodeafstanden så opnåes information fra dybereliggende lag. Figur fra Christensen (2008) [7].

Potentialet på et vilkårligt sted på overfladen af et homogent isotropisk halvrum kan udtrykkes som

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

hvor I er den transmitterede strøm, ρ er resistiviteten og r er afstanden fra punktet på overfladen til punktkilden. Med en elektrode konfiguration som vist i Figur 1 kan potentiale forskellen i et homogent halvrum udregnes som:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{|AM|} - \frac{1}{|BM|} - \frac{1}{|AN|} + \frac{1}{|BN|} \right)$$

hvor $|AM|$, $|BM|$, $|AN|$ og $|BN|$ er afstandene mellem strøm og potentiale elektroderne

I virkeligheden kommer det målte potentiale sjældent fra et homogent halvrum og det ovenstående udtryk omskrives til at give den tilsyneladende resistivitet:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} 2\pi \left(\frac{1}{|AM|} - \frac{1}{|BM|} - \frac{1}{|AN|} + \frac{1}{|BN|} \right)^{-1} = \frac{\Delta V}{I} K$$

hvor K er den geometriske faktor som afhænger af geometrien af den valgte elektrodekonfiguration. Den tilsyneladende resistivitet, ρ_a , er den resistivitet som et homogent halvrum skulle have for at give den faktiske måling.

Forskellige elektrodekonfigurationer har forskellig indtrængningsdybde, men generelt gælder at når elektrode afstanden øges, så opnåes information om dybereliggende lag (Figur 1b). Moderne måleinstrumenter er designet til at kunne måle potentiale forskelle mellem mere et sæt elektroder af gangen, og typisk måles mellem 4-10 potentiale forskelle samtidigt.

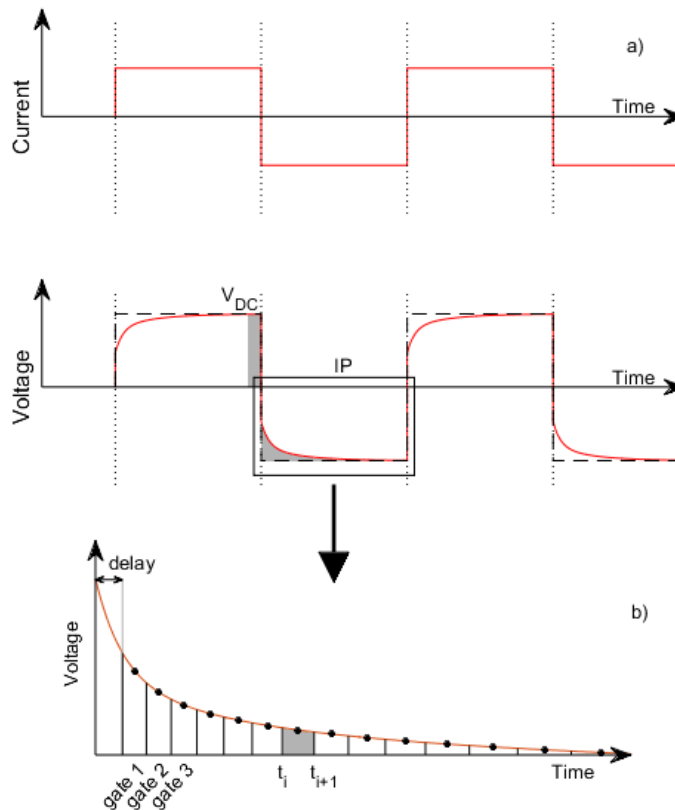
5.5.2 Tids Domæne Induceret Polarisation (TDIP)

I forbindelse med indsamlingen af resistivitetsdata er det med nogle instrumenter muligt også at indsamle tidsdomæne IP data (TDIP). I det følgende antages en duty cycle på 100% [8]. Tidsdomæne IP består i at måle opbygningen af spænding i forbindelse med en strøm injektion. Figur 2 viser de grundlæggende principper indenfor måling af TDIP data, og efterfølgende notation referer til denne figur. Umiddelbart efter at strømmen bliver tændt, stiger potentialet mellem potentiale elektroderne. Efter en opladningsperiode måles den primære spænding (V_{DC}), lige inden polariteten af strømmen skifter. Den primære spænding bruges i beregningen af den tilsyneladende resistivitet. Opladningseffekten er karakteristisk for materialet (med hensyn til størrelse, hældning og relaxationstid), og er målet for TDIP indsamlingen.

På grund af inductive signaler, som opstår umiddelbart efter at strømmen bliver slukket, opererer man med et forsinkelse inden man begynder at måle. Denne forsinkelse er typisk i størrelsesordenen 2-3 ms. Derefter bliver signal henfaldet integreret over n tidsvinduer til beregningen af chargeabiliteten M . Chargeabiliteten [mV/V] i det i 'tende vindue er defineret som [9],[10]:

$$M_i^{100\%} = \frac{n_{pulses}}{2n_{pulses} - 1} \frac{1}{V_{DC} \cdot [t_i - t_{i-1}]} \int_{t_{i-1}}^{t_i} (V_{DC} - V_{ip}) dt$$

hvor V_{ip} er det sekundære potentiale [mV] der kan ses som det transiente respons af jordens polarisations når strømmen tændes. t_i og t_{i+1} er åbne og lukke tiderne [s] for det pågældende vindue hvor signalet bliver integreret.



Figur 2: Tidsdomæne IP måling principskitse. (a) bølgeformene for en injiceret strøm og den resulterende spænding. (b) en enkelt IP henfaldskurve

5.5.3 Inversion

DC og IP data inverteres med en 2D-DCIP inversions kode udviklet ved Aarhus Universitet af HydroGeofysikGruppen [11]. Med denne kode beskrives den polarisation som finder sted ved mineralkorn-porevæske interfacet, umiddelbart efter at strømmen slukkes, ved den empiriske Cole-Cole model. Cole-Cole modellen beskriver den komplekse resistivitet, ζ , som en funktion af de fire Cole-Cole parametre ρ , m_0 , τ and C :

$$\zeta = \rho \left(1 - m_0 \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^C} \right) \right)$$

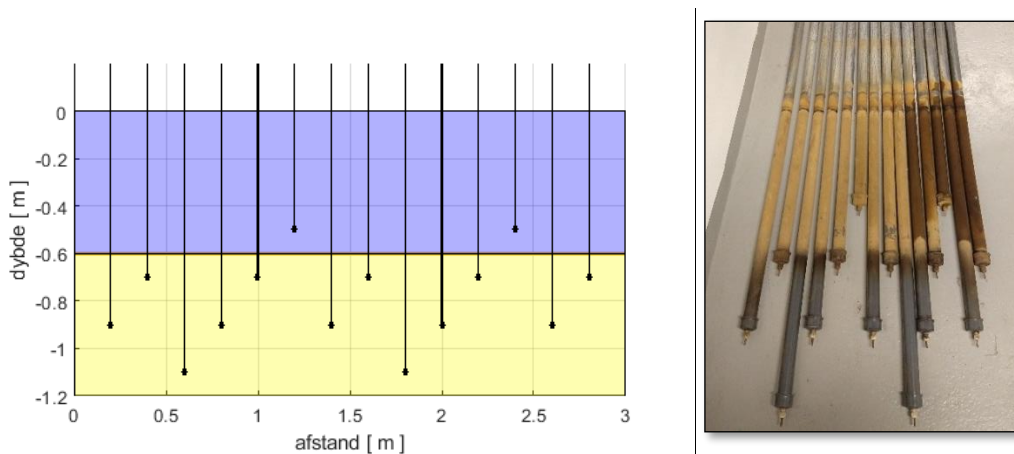
hvor ρ er resistiviteten, m_0 er størrelsen af chargeabiliteten og betegnes polarisations magnituden, τ er en relaxationstids konstant som karakteriserer henfaldet og C er en konstant der kontrollerer frekvensafhængigheden.

Inversionskoden anvender hele IP henfaldskurven, hvilket resulterer i en bedre forståelse for polarisationsfænomenet og dermed en bedre beskrivelse af undergrunden. Tidligere IP inversionskoder har normalvis kun brugt den integrerede chargeabilitet, hvor hele henfaldet er integreret til et enkelt datapunkt.

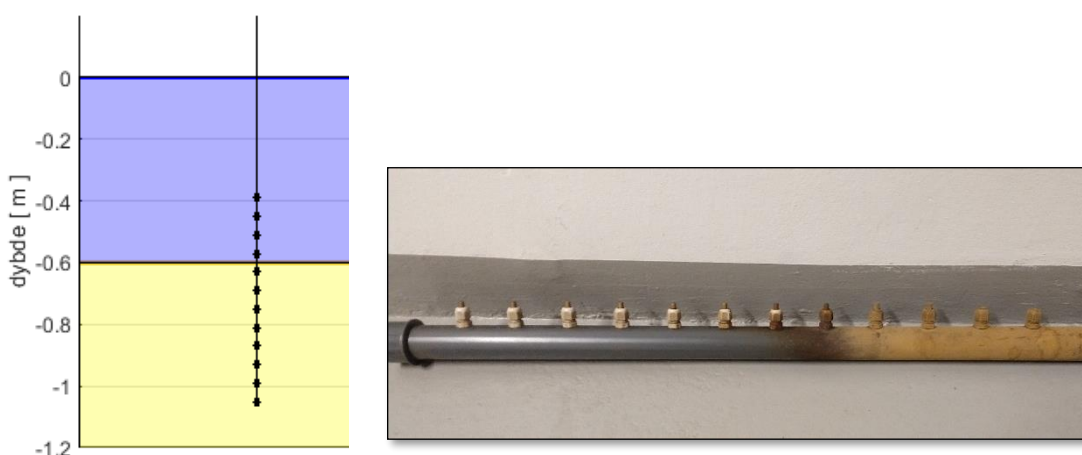
5.6 Udvikling af geofysisk udstyr

I projektet er udviklet to separate elektrode konfigurationer: en 2D konfiguration og en 1D konfiguration, i daglig tale omtalt som hhv. "panfløjten" og "blokfløjten", se Figur 3 og Figur 4.

2D konfigurationen blev konstrueret først med henblik på at kunne se om der var tværgående forskelle i filteret. 1D konfigurationen blev konstrueret for at få en højere datakvalitet og dermed bedre indblik i filterprocesserne.



Figur 3: Til venstre ses en koncept skitse for elektroderørs placeringerne i 2D konfigurationen og til højre ses elektroderørerne efter over et år i filteret. De fem rør til højre var fugtige da billedet blev taget og er derfor mørkere i farven. Okkerbelægningen er meget tydelig i vandfasen.



Figur 4: Til venstre ses en koncept skitse for elektrode placeringen i 1D konfigurationen og til højre ses elektroderøret efter over et år i filteret. Okkerbelægningen er meget tydelig i vandfasen.

Til indsamling af data, blev et 4-kanals ABEM Terrameter LS benyttet, sammen med en special fremstillet monitoringsenhed som blev udviklet i et tidligere projekt. Denne enhed tillod os at indsamle data og hjemsende data fuldautomatisk.

5.7 Geofysisk dataindsamling

I perioden februar til april 2018 blev der indsamlet 52 datasæt med 2D konfigurationen, ca. en gang i døgnet. Målingerne var sat til at starte kl. 02 for at minimere støj fra produktionen, da vandforbruget var forventet at være lavest på dette tidspunkt. Den indledende konklusion på den dataindsamling var at støjen var meget høj og at det var nødvendigt at måle meget oftere.

I starten af august 2018 blev 1D-konfigurationen installeret og dataindsamlingen blev genoptaget, nu med en øget målefrekvens så ca. 8 datasæt blev indsamlet i døgnet. Derudover blev måleindstillingerne ændret for at reducere støjen. Det var dog stadig tydeligt, at støjen var ret dominerende. Derudover viste det sig at den ene kanal på instrumentet var blevet beskadiget så hver 3-4 datapunkt var blevet ubrugeligt. Dette blev løst ved kun at måle på to kanaler, hvilket effektivt forlængede en måling med en faktor to. Efter en længere periode lykkedes det os at lokalisere støjen til at være forårsaget af en defekt UPS (Uninterruptible Power Supply). Denne UPS blev derfor fjernet fra opstillingen, hvilket gjorde hele setuppet en anelse mere skrøbeligt, men heldigvis resulterede det ikke i yderligere problemer.

Det reelle datasæt tælles derfor fra d. 24 oktober, hvor alle udbedringerne var udført. Der er i projektet således opsamlet data kontinuerligt i 6 måneder på vandværksfilter i normal drift.

PERIODE	ANTAL DATASÆT
14 FEBRUAR - 15 APRIL 2018	52
22 AUGUST - 24 OKTOBER 2018	600
24 OKTOBER - 15 APRIL 2019	1486

	1D KONFIGURATION	2D KONFIGURATION
# ELEKTRODER	12	14
# QUADRUPOLER	48	519

INSTRUMENT INDSTILLINGER	
MAX SPÆNDING	600 V
MAX STRØMSTYRKE	50 mA

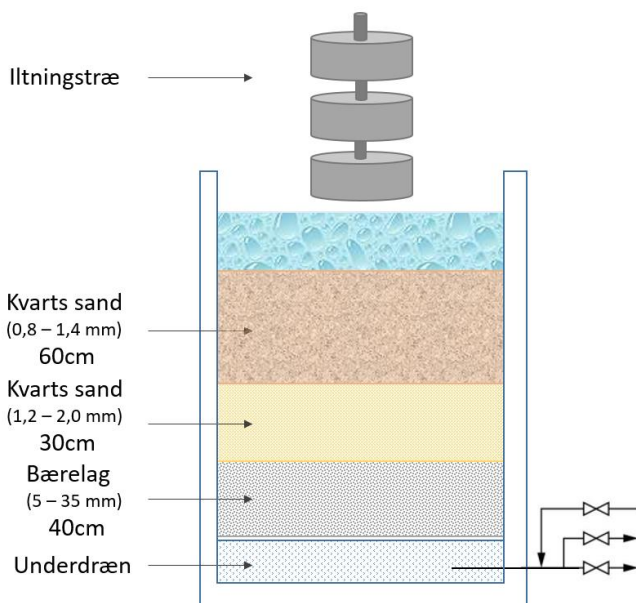
MAX POWER	150 W
DC ON TIME	1 s

Efter en periode begyndte datakvaliteten at falde. Når kontaktmodstanden ved en af strømelektroderne blev for høj, kunne instrumentet ikke foretage målingen og den blev derfor ekskluderet. I de tilfælde hvor den første strøm elektrode udgår er der sket det at nummereringen af elektroderne er blevet forskubbet, hvilket har resulteret i at alle datapunkterne i det datasæt reelt har haft forkert geometri og har fremstået som støj. Efter denne fejl blev opdaget blev datakvaliteten markant forbedret.

5.8 Projektresultater

5.8.1 Kortlægning af udgangspunkt – Engbjerg Vandværk

Der er udvalgt et åbent sandfilter til test-filter. Filteret er en del af et vandværk, hvor der oppumpes ca. 770.000m³ råvand om året. Der er 6 primære råvandsboringer, hvoraf det filter, der bruges i forsøgene primært får vand fra 2 af disse boringer. Der er ikke registreret pesticider i nogen af boringerne og vandværket oplever ikke problemer med overskridelser mht. vandkvaliteten fra vandværket. Vandbehandlingen foregår ved iltning over iltningstræer efterfulgt af enkeltfiltrering i 6 åbne sandfiltre. Filteropbygningen består af kvartssand som vist i Figur 5. Der er i projektet udelukkende arbejdet i et af filtrene, filter 6.



Figur 5: Skitse af filteropbygning og vandbehandlingen i filteret anvendt til test.

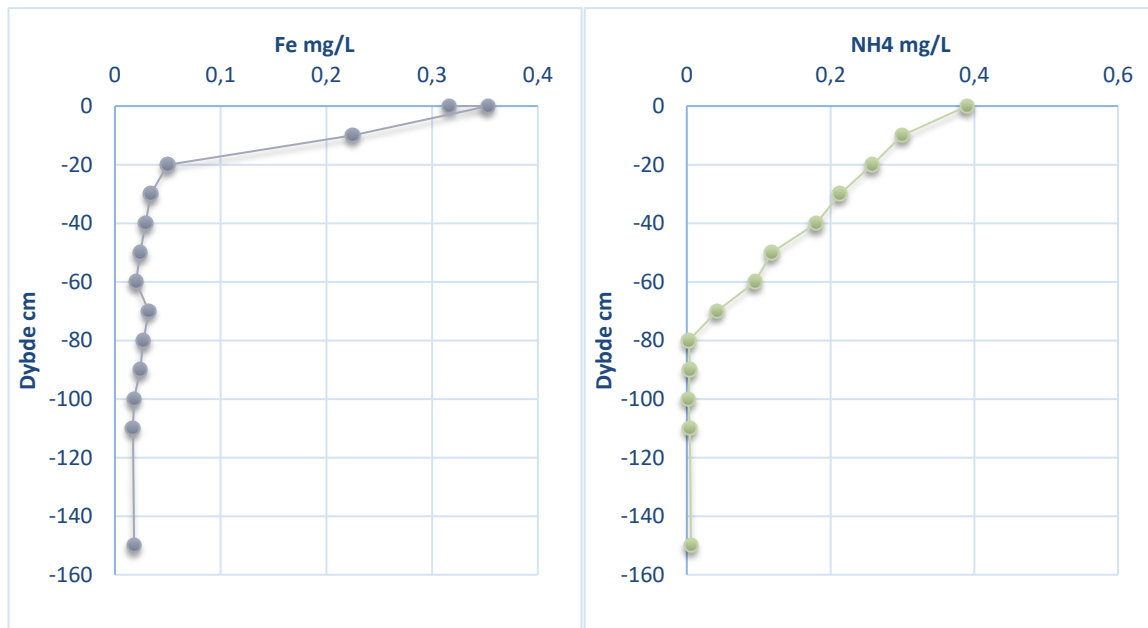
Filteret skylles efter fast mængde behandlet vand på 7000m³. Filteret har ved projektstart været skyllet 337 gange siden ibrugtagning i år 2000. Returskylleproceduren består af 5min luftskylning efterfulgt af 7min vandskyl. Der anvendes rent vand til returskylningen.

Vandværket er fuldt automatiseret med mulighed for overvågning gennem vandforsynings centrale SRO-system.

Der er i flere sammenhænge udtaget prøver i det åbne sandfilter der er genstand for den geofysiske dataindsamling. Prøverne er udtaget for at give en generelt billede af filterdriften samt filtermaterialerne i filteret.

PRØVE TYPE	ANTAL	FORMÅL
DYBDESPECIFIKKE VANDPRØVER FRA DRIFT	14 stk. m. 10cm dybde-interval	Analyseret for jern – hvor i filteret fjernes jern under drift?
RETURSKYLLEVANDSPRØVER	21 stk. 15sek-30sek grab-sampling	Analyseret for jern og turbiditet – hvor meget jern skylles ud ved returskylning
DYBDE SPECIFIKKE FILTERMATERIALEPRØVER	48 stk. 5cm's dybdeintervaller 0-40cm	Kornkurver og jerncoating

Resultaterne af disse undersøgelser vises i dette afsnit.



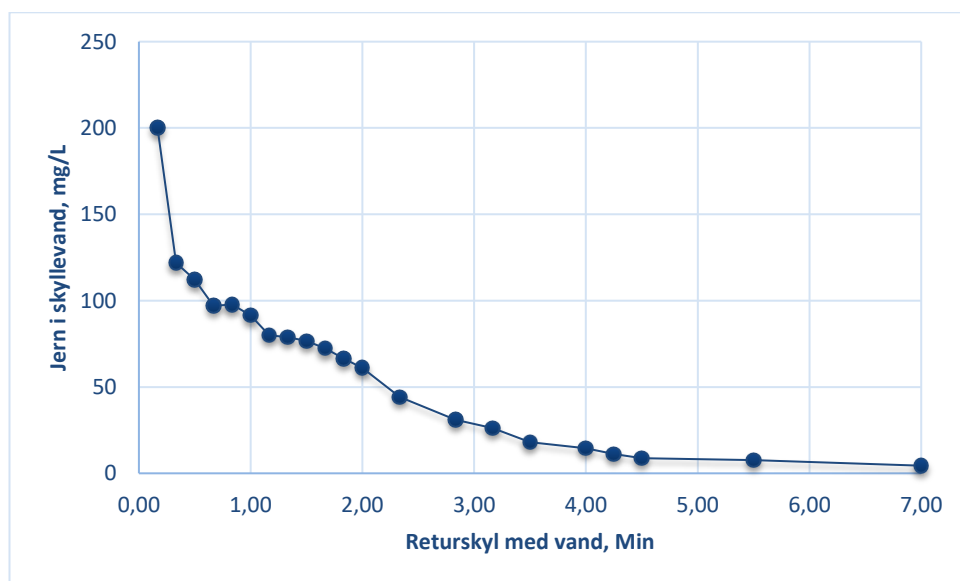
Figur 6: Dybdespecifikke vandprøver udtaget gennem hele filterets dybde under drift. Prøverne er analyseret for jernindhold i mg/L, vist til venstre og ammonium i mg/L, vist til højre.

Vandbehandlingen gennem filteret sker som vist af Figur 6 tilfredsstillende, uden problemer med vandkvaliteten. Det kan desuden ses 89% af det jern der fjernes i filteret afsættes i de øverste 20cm af filterdybden. Den samlede volumenmæssige fjernelsesrate for jern i filteret kan beregnes til at være $1,6 \text{ g}/(\text{h} \cdot \text{m}^3)$, beregnet jf. [12].

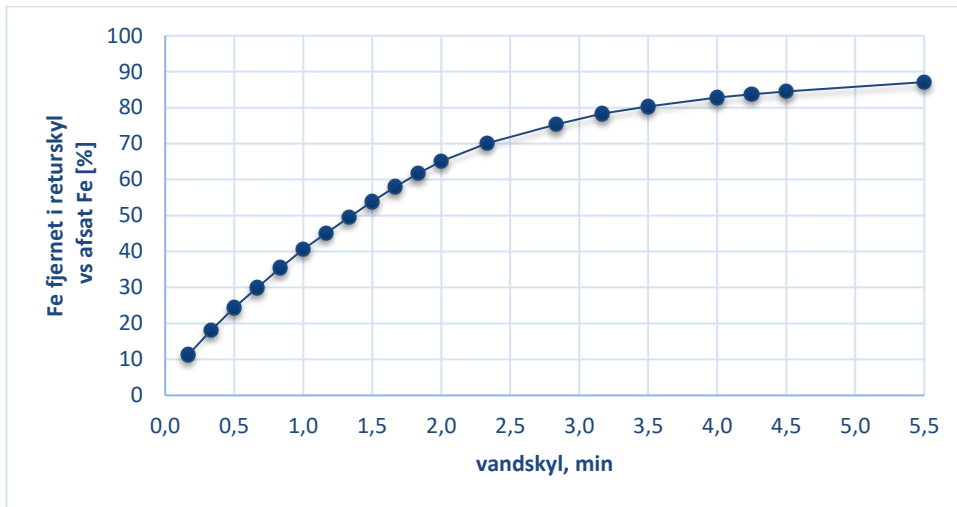
Ved returskyllning af filteret følges jernindholdet i returskyllevandet (se Figur 7 og Figur 8). Heraf kan jernmængden, der fjernes ved et skyl beregnes til 1,93kg for hele filteret. Sammenholdes den fjernede jernmængde med det jern der afsættes i filteret under drift ses det af Figur 9 at ca. 90% af det afsatte jern fjernes igen ved hver returskyllning.



Figur 7: Returskyllevandsprøver udtaget for hver 15-30 sek under returskyllning med vand. Foto: Ditte Andreasen Søborg.

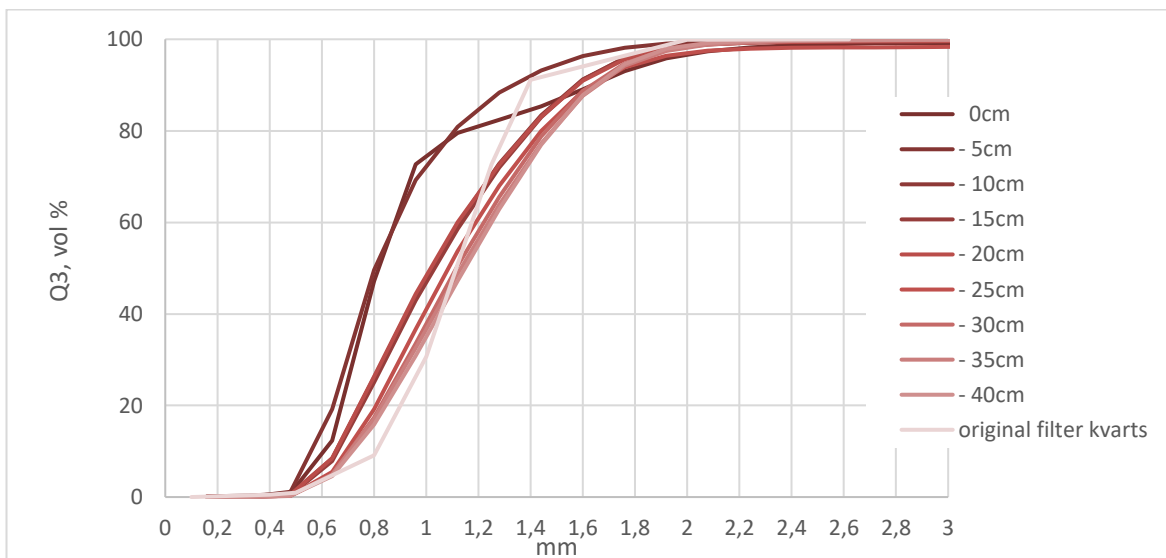


Figur 8: Analyser af returskyllevandet udtaget under returskyl med 15-30 sek mellemrum er analyseret for jernindhold (i mg/L) og viser reduceret jernindhold gennem de 7 min skylleperiode.



Figur 9: Forholdet mellem den samlede afsatte jernmængde i filteret under drift og det jern der fjernes ved returskylleproceduren er her set som funktion af skylletiden i minutter.

Filtermaterialet er kvartsand, der er ilagt filteret i år 2000. Filteropbygningen bestod dengang øverst af 30cm kvartssand 0,8-1,4mm efterfulgt af 60cm kvartssand 1,2-2,0mm. Filtermaterialer er udtaget i 5cm intervaller over de øverste 40cm af filteret. Filtermedieprøverne er tørret og analyseret for kornstørrelsesfordelinger på Retsch Camsizer Particle Analyzer. Figur 10 viser at der er sket en udvikling i filtermaterialet siden ilægning, således er de øverste 25cm væsentlig mere finkornede end oprindeligt (d50 nu 0,8mm-1mm; i 2000 1,1mm), hvorimod 30-40cms dybde kornkurvens forløb ændret lidt, men middelnkornstørrelsen ca. uændret. Ændringer i kornstørrelsesfordeling har direkte indflydelse på filtermaterialerens pakning og porøsitet. Det er derfor fordelagtigt at kende filtermaterialernes aktuelle tilstand forud for de praktiske test af geoelektrisk udstyr i filteret.



Figur 10: kornstørrelsesfordelinger af filtermedier udtaget med 5cm intervaller over de øverste 40cm af filteret, analyseret på Retsch Camsizer Particle Analyser.

Sammenfattende har kortlægningen af filteret forud for test at det geoelektriske udstyr fortalt, at filteret har en god stabil og balanceret drift uden problemer med vandkvaliteten. Returskylleanalyserne viser, at den største andel af det afsatte jern udvaskes ved skyl. Det er tydeligt at selve jernfjernelsen sker i de øverste 20 cm af filteret. Analyserne af filteret bekræfter at det valgte fokus på de øverste 40cm i filteret for de geoelektriske målinger er hensigtsmæssigt.

5.8.2 2D konfiguration opsætning og resultater

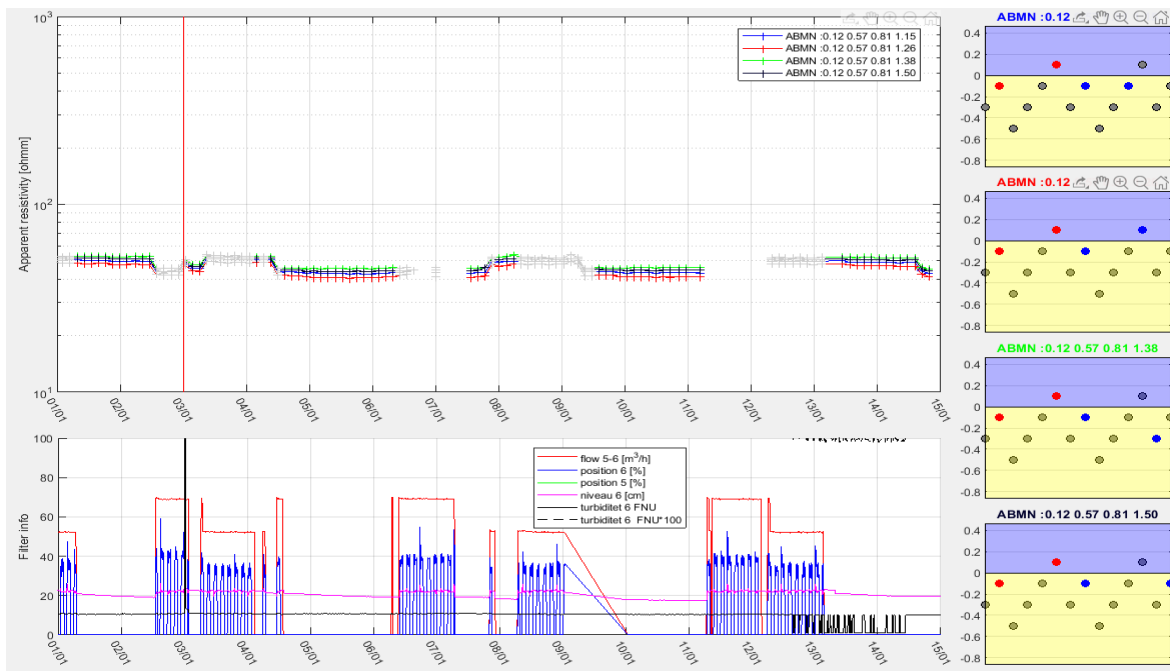
2D konfigurationen blev udviklet og opsat med henblik på at kortlægge tværgående formationer i sandfilterets øverste 40 cm.

2D resultaterne viser meget lidt variation i data, og efter nytår er der generelt ret højt udfald af data. Nedenstående figurer er udvalgte eksempler.

Udfald i dataopsamlingerne kan have flere forskellige forklaringer, hvoraf belægninger eller ansamlinger af luft/ilt omkring måleelektroden kan være mulige forklaringer. Det blev i projektet besluttet at arbejde videre med 1D konfiguration opsætningen.



Figur 11: Data eksempel fra 2D konfiguration. Yderst til højre vises målekonfigurationen for de fire konstellationer, der vises i figuren øverst til venstre som funktion af tiden (her 26/10-7/11-2018). Hvert kryds er en målekampagne, den røde vertikale linje, viser tidspunkt for et returskyl (31/10-2018). Figuren nederst til venstre viser produktionens flow på filteret.

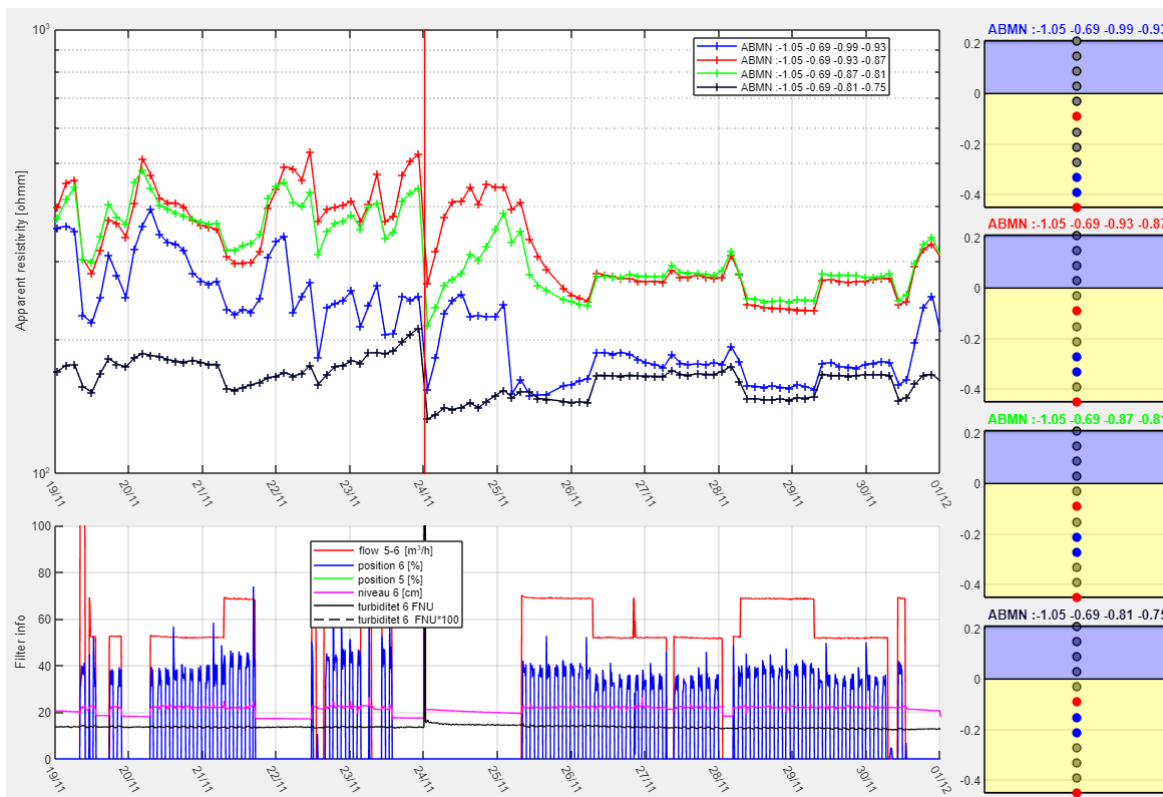


Figur 12: Første januar til femtende januar. Ikke nogen klar tendens og store udfald. Samme tidsperiode som Figur 14.

5.8.3 1D konfiguration opsætning og resultater

1D konfigurationen blive konstrueret for at få en højere datakvalitet og dermed bedre indblik i filterprocesserne. Data er opsamlet kontinuerligt og viser kun meget få dataudfald. I det følgende vises nedslag i data som viser generelle tendenser.

Generelt er det muligt at følge ændringer i drift på filteret med ændringer i de observerede relative resistivitetsdata med denne opstilling, se eksempel fra perioden 19/11-1/12 2018 i Figur 13.

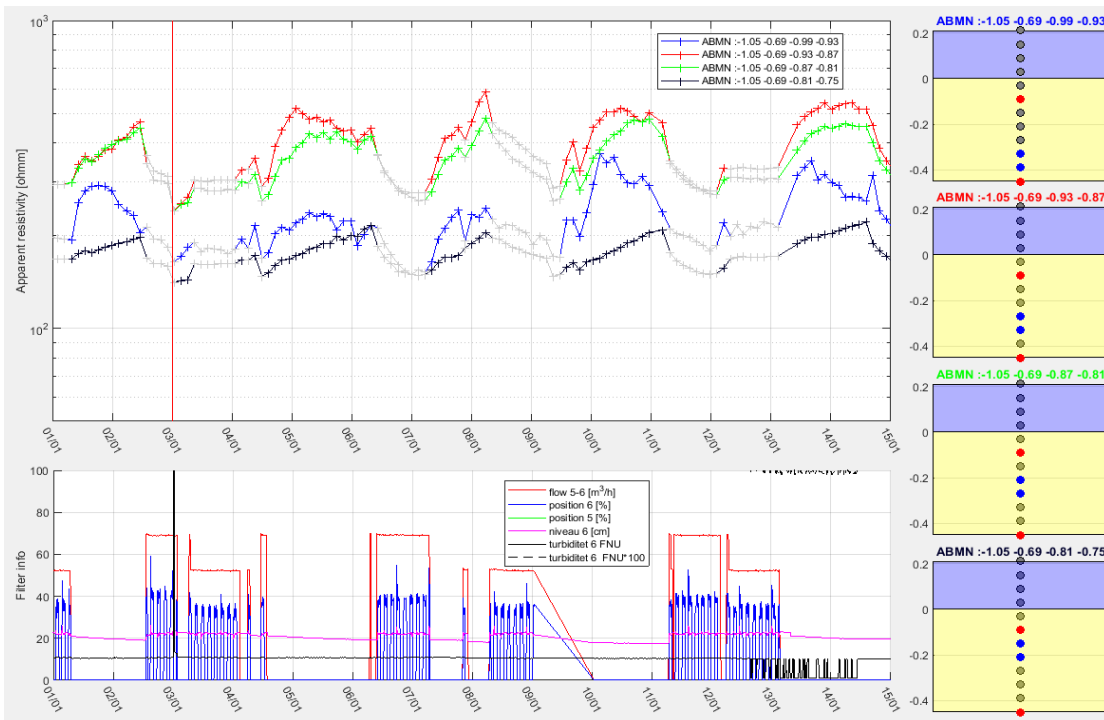


Figur 13: Eksempel på data opsamling fra 1D i perioden nittende november til første december 2018. Filtreret returskylles den 24/11-2018.

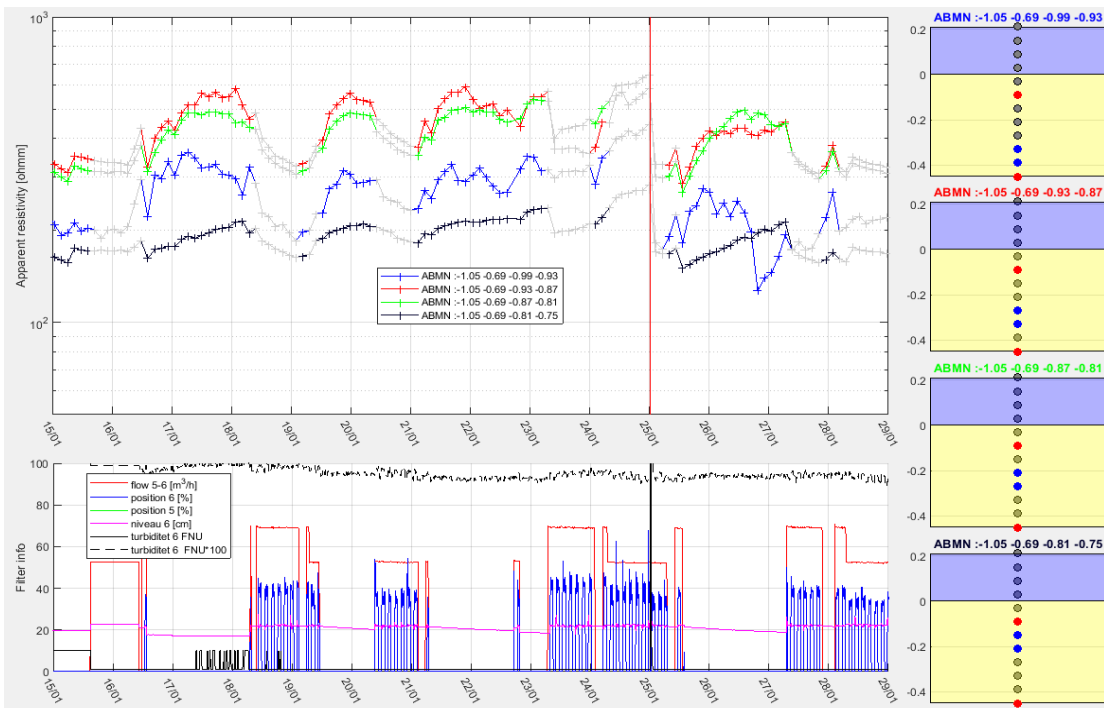
De helt generelle tendenser viser, at resistiviteten stiger i perioder uden drift og falder i perioder med drift. De forskellige konfigurationer stiger med forskellige hastigheder men overholder alle den generelle tendens.

I perioder med drift ved reduceret flow ($\sim 50 \text{ m}^3/\text{h}$), er resistiviteten meget stabil. Dette ses omkring eksempelvis d. 27-28/11 (Figur 13) og d. 3/1 og d. 12/1 (Figur 14). Resistivitetens niveauet er dog afhængig af driftshistorikken.

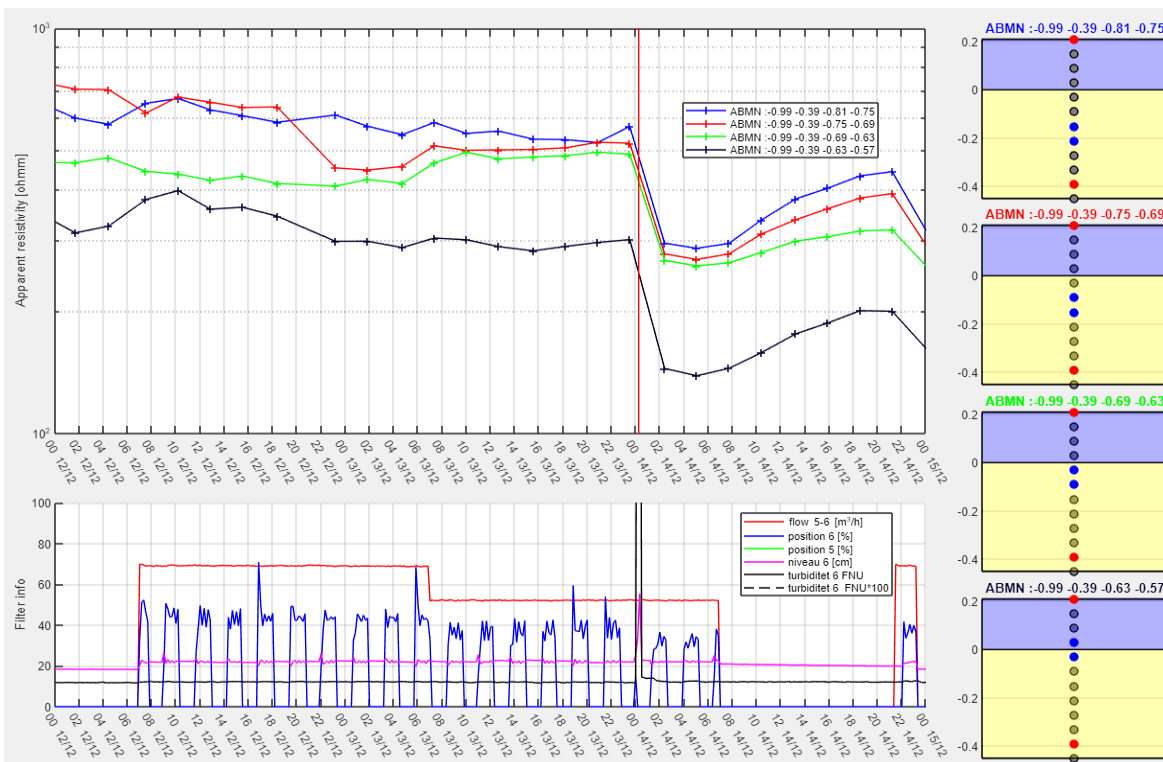
Gennemgående tendens i data viser kraftigt fald i resistiviteten i forbindelse med returskyllning af filter. To eksempler er vist i Figur 15 og Figur 16.



Figur 14: Første januar til femtende januar. Der ses de generelle tendenser med stigende resistivitet ude for drifts perioderne og faldende resistiviteter ved drift. Når flowet på filteret er reduceret fra 70m³/h til 50m³/t er resistiviteten mere konstant



Figur 15: Femtende januar til niogtyvende januar. D. 25 januar er der et filterskyl som ses som en kraftig reduktion af resistiviteten.



Figur 16: Tolvte december til femtende december 2018. Returskylning af filteret d. 14/12-2018, driftsflow både før og efter returskylning er ca. 50m³/h.

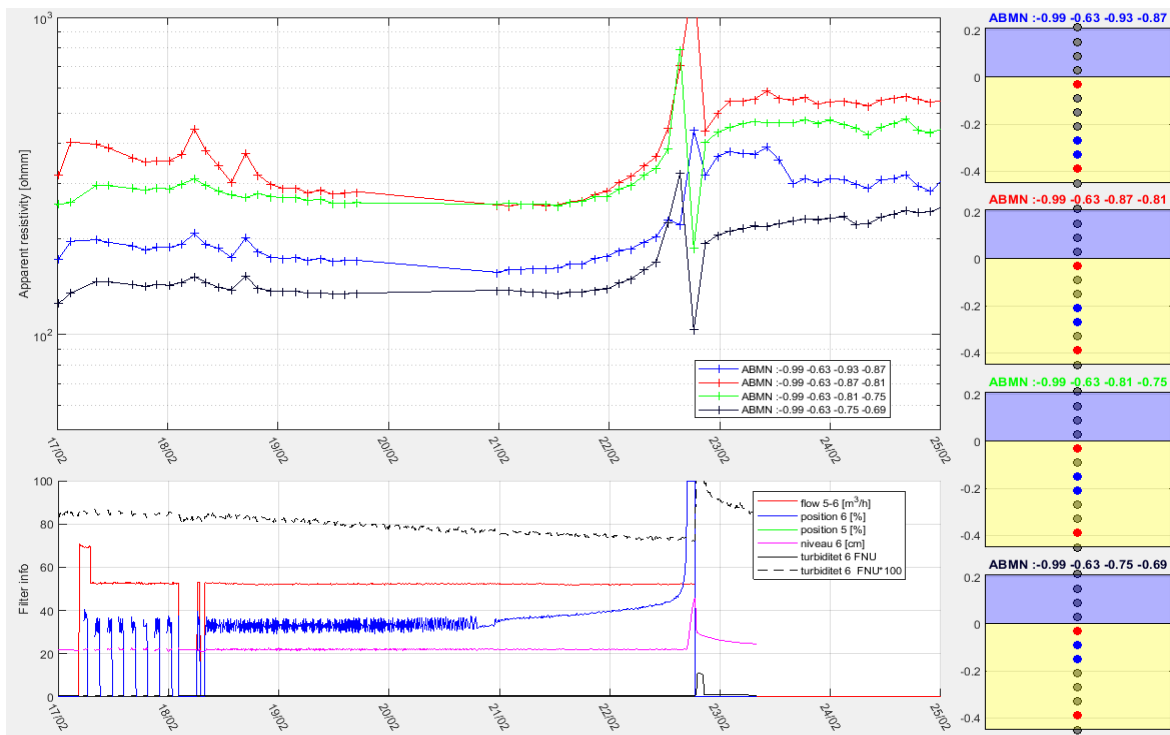
5.8.4 Filtertest med konstant flow

Normaldrift på filteret er variabel drift med typisk flow på 70m³/t. For at validere tendenserne observeret i data blev der udført et forsøg, hvor driften omlægges til konstant drift ved 50m³/t.

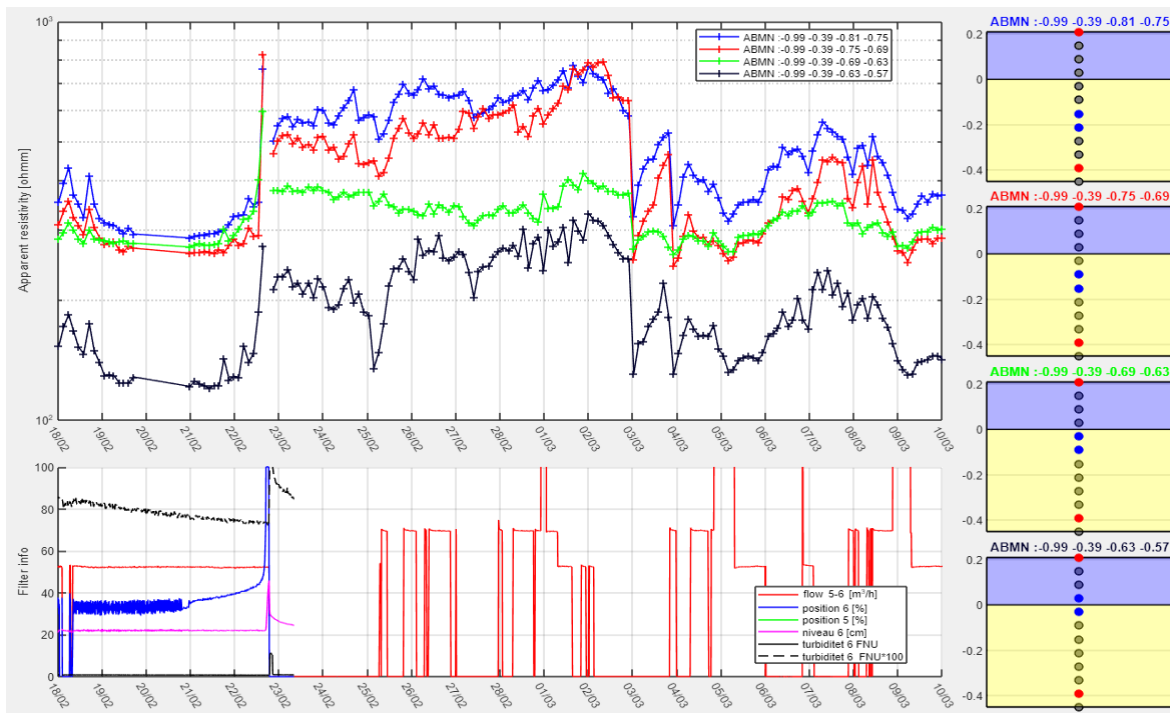
Forsøget viser at ved drift med konstant flow er signalet fra 1D konfigurationen meget konstant for de forskellige konfigurationer, der måles i. Figur 17 viser desuden at efter nogle dage med konstant flow på filteret steg resistiviteten voldsomt, ikke ulig kurven for positionsmåleren i bunden af i filter 6.

Ved returskylningen d. 22/02-19 falder resistiviteten som tidligere vist, dog forbliver resistiviteten i filteret efter returskylningen højere end normalt, se Figur 17. Først ved filterskyllet d. 03/03 falder resistiviteten ned til sammenlignelig niveau fra før forsøget, se Figur 18.

Fra den fysiske kortlægning af filteret (afsnit 5.8.1) er det dokumenteret at den normale drift og normale returskylningsprocedure giver et velrenset filter med stabil filterdrift.



Figur 17: Filtertest med konstant flow fra den 18/2-22/2 2019. Returskylning d. 22/2-2019.



Figur 18: Attende februar til tiende marts 2019. Perioden viser hhv. perioden med konstant drift (18-22/2), returskylningen herefter (22/2), første gangtid efter test 22/2-3/3, returskylning d. 3/3, anden driftsperiode efter test 3/3-10/3.

5.8.5 IP resultater

I de fleste konfigurationer ses de samme generelle tendenser i IP data som for resistivitet data, men der er dog konfigurationer som ikke viser de samme tendenser. Teoretisk kunne IP signalet også bidrage til information omkring størrelsen af porerummene og overfladeledningsevnen af kornene, hvilket vil bidrage til den samlede tolkning.

Efter de mange indledende problemer med 50 Hz støj på IP data, blev vi enige om ikke at fokusere på IP data, da datakvaliteten stadig ikke var særlig god. IP datamængden er 20 gange større og data skal håndholdes i langt højere grad end med resistivitets data. I projektet nåede vi ikke at lave en samtolkning af IP og resistivitet, men data er forberedt til at blive (gen)-tolket hvis nye udviklinger indenfor dataprocessering tillader det. Derudover er det et oplagt datasæt at bearbejde i fremtidige studenterprojekter.

5.9 Konklusion og perspektivering

Der er i projektet succesfuldt udviklet geoelektrisk udstyr til måling og monitorering af sandfiltre i drift på vandværker. Udstyret er udviklet og testet i et åbent sandfilter på Engbjerg Vandværk og har opsamlet data kontinuerligt i seks måneder.

Undervejs i projektet blev to typer af udstyr udviklet, henholdsvis et udstyr til 2D konfigurationer og et udstyr til 1D konfigurationer. Udstyret til 1D konfigurationer viser data med høj spartial kvalitet i det målte område, og stabiliteten i dataindsamlingen er stor. Desuden har designet for 1D udstyret den fordel også at ville kunne anvendes i tryksatte filtre.

Afprøvningen af udstyret er sket i fuldskala i et åbent sandfilter i normal drift over en kontinuerlig periode på 6 måneder. Dataopsamlingen viser, at det udviklede geoelektriske udstyr er i stand til at måle ændringer i driften og placering af returskylninger på lige fod med de eksisterende logningsudstyr, som regulering af bundventilen.

Generelt er det muligt at kortlægge ændringer i filtermassens struktur mellem to gangtider. Dvs. at det lokalt i filterets masse er muligt at iagttage en form for strukturændring op til en filterskylning og efter en skylning at kunne se en tilbagevenden til filterets oprindelige status. Disse ændringer kan identificeres lokalt i zoner i filteret som funktionen af dybden.

En stresstest af filteret blev gennemført, hvor driften blev omlagt til konstant drift med $50\text{m}^3/\text{t}$ modsat normalt variabelt drift flow. Resultaterne herfra bekræfter ovenstående konklusion og derudover viser de også at den udviklede 1D geoelektriske metode er sensibel overfor om sandfilteret ved returskylningen blev skyllet tilfredsstillende rent. Resultaterne der er vist i Figur 18 fortæller at den normale returskylningsprocedure (d. 22/2-19) ikke var i stand til at rense filteret efter stresstesten til samme niveau som efter en normal variabel driftsperiode. Det er først efter andet returskyl (d. 3/3-2019) at resistivitetsniveauerne i filteret kommer tilbage på normalt niveau.

Konklusionen er derfor, at det udviklede geoelektriske udstyr til 1D konfigurationer med opsamling af DC data kan anvendes til monitorering af effektiviteten af den returskylnings-

procedure, der anvendes på det givne sandfilter. Hvilket betyder, at der i projektet er udviklet et konkret bud på et nyt intelligent overvågning og styringsudstyr til kontrol af skylleproceduren og dermed indirekte også til at øge effektiviteten af sandfilteret, reducere mængden af anvendt returskyllevand og energiforbrug.

Det udviklede udstyr er testet i et åbent sandfilter, der er dog i designet af 1D-udstyret taget hensyn til at dette udstyr ligeledes vil kunne installeres i et trykfilter, hvilket vil øge markedspotentialet for udstyret væsentlig i drikkevandsbehandlingsbranchen fremadrettet.

I dette projekt her har der været fokus på anvendelsen til vandforsyningsfiltre, men andre procesanlæg, hvor der anvendes sandfiltre og hvor de samme udfordringer gør sig gældende, kan udstyret formentlig også finde en anvendelse, samt ved f.eks. rensning af industrielt procesvand.

Den udviklede metode og det udviklede udstyr er på nuværende tidspunkt en prototype, der har bekræftet sin funktionalitet i fuldskala. Udstyret består af en 1D elektrode, der skal placeres fysisk ned i sandfilteret, et måleinstrument til modtagelse af signaler og gengivelse af data, software til håndtering af dataopsamlingsstrategi, samt software til databehandling og håndtering af resultater. For at kunne producere udstyret kommercielt vil det kræve en fortsat udvikling specielt følgende punkter kræver fortsat udvikling:

- af det software, der anvendes dels til intelligent styring af dataopsamlingen samt håndteringen og visning af data
- af software og dataformat i forhold til anvendelse direkte ind i vandværkernes etablerede SRO-systemer
- af selve måleudstyret (se herunder)

På det nuværende stade er specielt måleudstyret forholdsvis bekosteligt, da der bruges geofysisk feltudstyr med en bred vifte af anvendelsesmuligheder.

På baggrund af de opsamlede erfaringer i dette projekt forventes det, at der vil kunne laves et mere specialiseret instrument tilpasset disse specifikke opstillinger og dermed kunne reducere produktionsprisen for måleudstyret. En estimeret salgspris for et færdigt udviklede instrument, forventes at ligge i intervallet kr. 75-100.000 og ca. kr. 15-20.000 for elektrode delen som skal installeres i hvert filter. Dermed vil et færdigudviklet kommercielt instrument prismæssigt kunne sælges ind i den danske vandbranche.

Det forventes at hvert procesanlæg/vandværk skal have et måle instrument der bliver kalibreret efter de aktuelle forhold. Hvert måleinstrument vil kunne måle på elektroderne på de filtre som vandværket har installeret f.eks. en gang pr. time. I dag vil et vandværk typisk have 2-8 filterenheder. Indenfor vandværksfiltre vurderes umiddelbart at være et behov på 300-500 enheder inden for Danmark. Tages det internationale marked med og ses der nærmere på anvendelsesmulighederne inden for rensning af processpildevand og spildevand, forventes markedet at være væsentligt større.

6 Litteraturliste

1. TRL level, Innovationsfonden 2019: https://innovationsfonden.dk/sites/default/files/2019-03/technology_readiness_levels_-_trl.pdf
2. Miljøstyrelsen, 2016. Mikroiseismik - Fyrtårnsprojektet Fremtidens Drikkevandsforsyning: Arbejdspakke 7B.
3. Allouche, N., Simons, D.G. and Rietveld, L.C., 2012. Monitoring of rapid sand filters using an acoustic imaging technique. IWC International Water Conference: New Developments in IT & Water, Amsterdam, The Netherlands, 4-6 November 2012.
4. Allouche, N., Simons, D.G., Keijzer, P., Rietveld, L.C. and Kappelhof, J., 2014. A novel acoustic imaging tool for monitoring the state of rapid sand filters. Water Science & Technology. Water Supply 14.
5. Lund, M. Søborg, D.A. and Ramsay, L., 2019. Stratification of physical parameters in dual media filters at 10 waterworks, 13th Annual Meeting on water research and innovation.
6. Kristensen, A.H. et al. 2014. Vandforsyning 3.udgave
7. Christensen, N. B. 2008. Environmental applications of geoelectrical methods. Lecture notes
8. Olsson, P.-I., Fiandaca, G., Dahlin, T. & Auken, E., 2015. Impact of time-domain IP pulse length on measured data and inverted models, in Near Surface Geoscience 2015-21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Extended Abstract), doi:10.3997/2214-4609.201413755, Turin, Italy
9. Schön, J. H. 2015. Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Elsevier.
10. Slater, L. D. and Lesmes, D. 2002. IP interpretation in environmental investigations', Geophysics, 67(1), pp. 77-88.
11. Auken, E., A. V. Christiansen, G. Fiandaca, C. Schamper, A. A. Behroozmand, A. Binley, E. Nielsen, F. Effersø, N. B. Christensen, K. I. Sørensen, N. Foged, and G. Vignoli, 2015. An overview of a highly versatile forward and stable inverse algorithm for airborne, ground-based and borehole electromagnetic and electric data: Exploration Geophysics, 2015, 223-235.
12. Lee, C.O., Boe-Hansen, R., Musovic, S., Smets, B., Albrechtsen, H.J. and Binning, P., 2014. Effects of dynamic operating conditions on nitrification in biological rapid sand filters for drinking water treatment. Water Research 48, 226-236.