



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Flytning af filtermediekorn under returskyl

Rapport 3 i projektet ”Smart Re-design of Drinking Water Production”

MUDP Rapport

September 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Loren Ramsay

Majbritt Lund

Feng Du

Fotos:

Loren Ramsay

Majbritt Lund

Feng Du

ISBN: 978-87-7038-543-5

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	8
1. Introduktion	10
1.1 Motivation	10
1.2 Udvalgte begreber	11
1.3 State of the art	12
1.3.1 Returskyllets historie	12
1.3.2 Vandskyl og fluidisering	12
1.3.3 Lufts skyl	13
1.3.4 Luft-og-vand skyl	13
1.3.5 Effekten af skylleprocessen	14
1.3.6 De enkelte korns bevægelse under et returskyl	15
1.3.7 Effekten af returskyl på biofiltres funktion	15
1.3.8 Filtermodning efter returskyl	16
2. Metoder og materialer	17
2.1 Forundersøgelser	17
2.1.1 Fuldskala forundersøgelser	17
2.1.2 Forundersøgelser med farvet sand	19
2.2 Forsøgsanlæg i pilotskala	21
2.3 Flytningsforsøg	22
2.3.1 Filtermedie ekspansion	23
2.3.2 Observation af bevægelsesfænomener	23
2.3.3 Tælling af spormedie	23
2.3.4 Beregning af statiske momenter	24
3. Resultater	25
3.1 Forundersøgelser	25
3.1.1 Viby Vandværk, fuldskala	25
3.1.2 Forundersøgelse med farvet sand	26
3.2 Filtermedietyper	30
3.3 Bevægelsesfænomener	31
3.4 Filtermedie ekspansion	34
3.5 Flytning af filtermedie under returskyl	35
3.5.1 Karakterisering af pilotfilteret med farvet sand	35
3.5.2 Betydning af den oprindelige placering	36
3.5.3 Betydning af størrelse	37
3.5.4 Betydning af densitet	38
3.5.5 Betydning af form	39
4. Diskussion	41
4.1 Effekten af medieflytning	41
4.2 Lufts skyl	41
4.3 Samtidigt luft-og-vand skyl	42

4.4	Vandskyl	42
4.5	Lagkagemodel	43
5.	Referencer	44

Forord

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

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

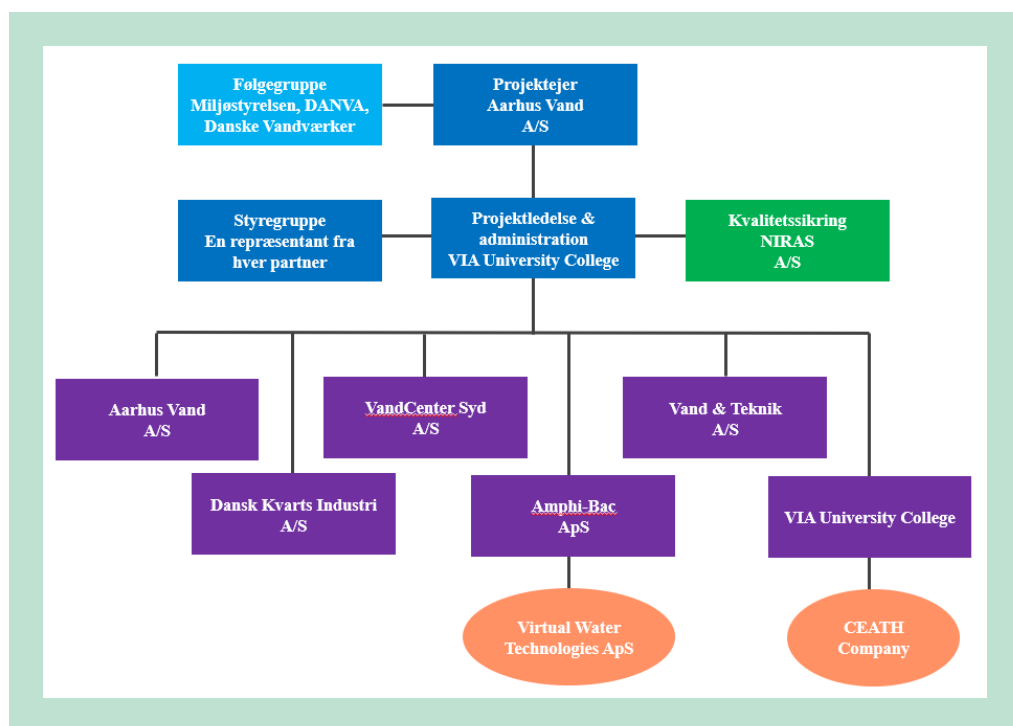
Baggrund

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

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

Projektorganisation

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



FIGUR 1. Diagram over projektorganisation.

Projektets følgegruppe og styregruppe bestod af følgende personer:

Følgegruppe

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

Styregruppe

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

Projektets arbejdsplaner og rapporter

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

Arbejdsplan 1: Etablering af designgrundlag (åben)

Rapport 1: Indsamling af vandbehandlingsdata

Rapport 2: Merkur: Web-baseret platform til vandbehandlingsdata

Arbejdsplan 2: Tekniske forsøg (åben)

Rapport 3: Flytning af filtermediekorn under returskyl

Rapport 4: Jernfjernelsesdybde i biofiltre

Rapport 5: Biostimulering med ammonium

Rapport 6: Jernfjernelse i returskyl

Rapport 7: Filtermediers gangtid

Arbejdspakke 3: SmartSand (kommerciel)

Rapport 8: Udvikling og produktion af SmartSand (fortrolig)

Arbejdspakke 4: SmartArkitektur (åben)

Rapport 9: Vandbehandlingsmodel

Arbejdspakke 5: Fyrtårnsdemonstration i fuldskala (åben)

Rapport 10: Demonstrationsanlæg ved Østerbyværket

Rapport 11: Demonstrationsanlæg ved Lundeværket

Arbejdspakke 6: Projektledelse

Rapport 12: Sammenfatning

Sammenfatning

Denne rapport omhandler flytning af filtermediekorn under returskyl og er Rapport 3 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Formålet med Rapport 3 er at fastlægge indflydelsen af skyllehastigheden, kornstørrelse, korndensitet og kornform på flytning af filtermediekorn i vandværksfiltre under forskellige trin i et returskyl.

Selv om flere forskere har kigget på bevægelsen af enkelte filtermediekorn under et returskyl, blev der ikke fundet litteratur, der beskriver placeringen af kornene efter endt skyl (i forhold til deres oprindelige placering). Med andre ord, beskriver litteraturen ikke, hvor stor en opblanding af filtermediet, et returskyl medfører. Opblanding af filtermedie kan potentielt både have en negativ og positiv indflydelse på vandbehandlingen. En af de negative indflydelser er fortynding af korn i det mest aktive lag, hvor kornene har den optimale biofilm og katalytiske overflade, med korn fra inaktive lag. En af de positive indflydelser er, at aktive korn flyttes til alle dele af filteret og gør filteret mere robust såfremt belastningen pludselig skulle stige. Dette arbejde har ikke til formål at kvantificere betydningen af disse effekter men udelukkende at skaffe evidens for om flytning finder sted og i givet fald i hvilken grad og under hvilke forhold.

Der er udført en lang række forsøg i forbindelse med denne aktivitet. Der er foretaget forundersøgelser af eksisterende forhold i fuldskala på Børkop og Viby Vandværk. Desuden er der udført forundersøgelser på et ø345 mm pilotskala anlæg på Østerbyværket. Hovedparten af arbejdet ligger dog i forbindelse med kornflytningsforsøg i pilotskala på VIA University College. Disse forsøg er udført på et ø500 mm rustfrit stål pilotanlæg med plexiglasvindue i siden. Her blev der anvendt sporkorn til at dokumentere flytning af korn under returskyl. De udvalgte sporkorn til forsøgene var farvet sand (i to størrelser), glaskugler (i to størrelser), antracit og granat. Pilotfilterets fyld bestod af finsand eller grovsand.

Forundersøgelser viste, at inhomogenitet i filtermediets lagdeling kan observeres i fuldskala filtre, hvor der forekommer lokale strømninger i filtermediet under returskyl efter et mønster, der afspejler underliggende lufthuller i luftharpen eller placering af dyser.

Resultaterne fra pilotskalaforsøg viste, at luftskyl medfører begrænset filtermediebevægelse med undtagelse af de øverste par cm af filteret. Returskyl med luft-og-vand samtidig medfører stor flytning og er formentlig årsagen til at hovedparten af de undersøgte to-medie filtre i projektet udviser total blanding af medielagene. Dette blev underbygget af, at ilagte sporkorn med meget forskellig størrelse, densitet og form fra selve fyldet blev blandet med fyldet alligevel. Da opblanding af to medier er uønsket, foreslås flere muligheder for at undgå dette.

Returskyl med vand alene kan ske med sub-fluidiseringshastighed eller med fluidiseringshastighed. De undersøgte fuldskalavandværker indikerer, at der ofte anvendes sub-fluidiseringshastighed i Danmark, hvormed muligheden for at reetablere den oprindelige lagdeling ved at adskille to medier efter opblanding med luft-og-vand skyl ikke kan forekomme.

Projektet fastslår, at lagkagemodellen af et vandværksfilter – hvor korn forbliver eller finder tilbage til deres rette dybde - er ikke eksisterende. Resultater tegner et billede af kaotisk flytning af filtermediekorn under returskylleproceduren, hvor graden af flytning afhænger af skylletrin, skylleflow, geometrien af filterbunden samt størrelse, densitet og form af mediekornene. Vandrette lag i et filterbassin ser ikke ud til at eksistere, og muligheden for at skabe orden igen i filtermediet ved at anvende et afsluttende fluidiseringsstrin med vand alene er også begrænset. Hermed sætter resultaterne spørgsmålstegn ved den udbredte anvendelse af to-medie filtrering og understøtter en tankegang, hvor filtrering sker i to eller flere filtre i serie, hvor opblanding

mellem medie fra separate filtre ikke er muligt. Projektet viser også, at mere effektive skylleprocedurer kan designes ved mindre vægt på lange luftskyl og mere vægt på fluidisering under skyl med vand alene eller ved korte sekvenser af skylletrin, der gentagne flere gange.

1. Introduktion

Denne rapport omhandler flytning af filtermediekorn under returskyl og er Rapport 3 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Formålet med arbejdet afrapporteret her er at fastlægge indflydelsen af skyllehastigheden, kornstørrelse, korndensitet og kornform på flytning af filtermediekorn i vandværksfiltre under forskellige trin i et returskyl.

1.1 Motivation

Da returskylning kan påvirke funktionen af et behandlingsanlæg, er driftsoperatører, rådgivere og entreprenører meget interesseret i at forstå denne proces. Returskylning får ofte skylden for korte gangtider, voksende filtermedie, uønsket opblanding af antracit og kvarts i to-medie filtre, ringe ammoniumfjernelsesrater, luftansamlinger i filterbassiner/beholdere, vand- og energispild og meget andet.

I Danmark varierer de anvendte trin i returskylleprocedurer fra vandværk til vandværk. På nogle værker (ofte dem med små trykfiltre) anvendes en procedure med to trin bestående af et luftskyl efterfulgt af et vandskyl. På større værker med åbne bassiner, anvendes ofte et tretrins proces med luftskyl, skyl med luft-og-vand samtidigt og vandskyl, i nævnte rækkefølge. Enkelte små vandværker bruger udelukkende vandskyl.

Der er også variation mellem vandværker med hensyn til skyllefrekvens, skyllelængde og skyllevandsflow. Især skyllevandsflowet kan variere kraftig. Her ses både eksempler i fuldskala på fluidisering af filtermediet (hvor opdriften fra det strømmende skyllevand får kornene til at svæve frit i vandet og filtermediet til at ekspandere 20% eller mere), og eksempler på sub-fluidisering, hvor filtermediet slet ikke ekspanderer.

Det er normalt driftsoperatøren, rådgiveren eller entreprenøren, der tager beslutningen om at fastlægge returskylleproceduren. Men der er ofte en vis tilbageholdenhed med at tilpasse proceduren, især hvis der ikke forekommer tydelige hydrauliske problemer eller overskridelser af kvalitetskravene. Denne tilbageholdenhed kunne selvfølgelig tænkes at stamme fra et behov for, at eksisterende viden gøres tilgængelig for forsyningens medarbejdere via efteruddannelse, men det kan også tænkes at stamme fra et behov for, at ny forskningsviden om returskylleprocessen først skal fremskaffes.

I denne rapport belyses spørgsmålene:

1. Hvordan påvirker returskylning et filtermediekorns placering i et filter?
2. Hvor meget betyder det for flytningen, om det sidste skylletrin benytter fluidisering eller sub-fluidisering?
3. Hvilken betydning har et filtermediekorns størrelse, densitet og form for flytning under returskyl?

Disse spørgsmål kan have særlig relevans for biofiltre, som anvendes overalt i Danmark. Det skyldes, at biofiltre kan udvikle lagdeling under drift, hvor bakterier med forskellige egenskaber findes i biofilmen på filtermediet i forskellige dybder. Hvis filtermediekorn flyttes rundt i filteret under returskyl med få dages mellemrum, er det oplagt, at dette kan påvirke biofilterets funktion (Ikhlef & Basu, 2016). Hertil kommer eventuel påvirkning af filterets hydrauliske egenskaber, f.eks. hvis de mindste korn ender i toppen af filteret, hvor tilklogningsudfordringen er størst. Denne rapport omhandler udelukkende spørgsmålet om flytning af filtermediekorn under returskyl og ikke eventuelle afledte effekter af denne flytning på rensegraden eller hydraulikken.

1.2 Udvalgte begreber

Indledningsvist defineres udvalgte begreber for at lette og kvalificere de efterfølgende diskussioner.

Returskylning er en proces, hvor flowretningen på et drikkevandsfilter vendes fra almindelig drift (normalt oppefra og ned) til nedefra og op. Skylleprocessen kan inkludere flere trin, men slutter altid med et vandskyl. Under et vandskyl kan der være tale om større flowhastigheder, der forårsager fluidisering (hvor mediekornene ikke længere hviler på hinanden, men svæver i det strømmende skyllevand) eller mindre flowhastigheder, der kaldes for sub-fluidisering. Filtermedieekspansion er den forøgelse af lagtykkelse af filtermediet, der sker under et vandskyl (opgives oftest i procent af den oprindelig tykkelse af det aktive filtermedielag).

Skylleprocessen består ofte af tre trin. Det første trin er et luftskyl, hvor luft og kun luft blæses ind via dysebund, spaltebund eller harpe i bunden af et filter (der er dækket af vand) med et typisk flow på ca. 60 m/t ved hjælp af en kompressor eller blæser. Det andet trin kaldes her for et luft-og-vand skyl. Her sendes både luft og vand op gennem filtermediet på samme tid, enten via de samme huller/slidser eller via hver deres system. I daglig tale kaldes dette trin ofte lilleskyl, da vandflowet som regel er væsentlig mindre end ved det sidste trin. Det sidste trin består altid af et vandskyl, hvor vand og kun vand pumpes ind i bunden af filteret ved et typisk flowinterval på 20-45 m/t. I daglig tale kaldes dette trin ofte storskyl.

Filterslam defineres som det faste materiale, der ønskes fjernet fra et drikkevandsfilter ved returskylning. Når det lykkes at fjerne hovedparten af filterslammet, siger man at filteret er renskyllet. I Danmark, hvor råvand oftest stammer fra reduceret grundvand, består dette filterslam hovedsagelig af jernoxider. Filterslam indeholder dog også manganoxider, biofilm, naturlig organisk stof, kalk, samt andre komponenter i mindre mængder. I lande, hvor råvand stammer fra overfladevand, består filterslam i biofiltre oftest hovedsagelig af suspenderet stof (som f.eks. lerpartikler), overskydende biofilm (som følge af en kraftigere vækst end det ses, når der anvendes grundvand) samt eventuelt tilsatte flokkuleringskemikalier.

Filterslam kan være fastbundet til filtermediet, dvs. en del af filtermediets coating. Hvis jern i råvandet fjernes heterogent (van Beek, et al., 2012) f.eks. ved at binde sig til coatingen som jern II, hvorefter det oxideres til jern III i form af jernoxider – er det fastbundet og kan kun løsrides ved aggressiv fysisk påvirkning. Filterslam kan også være løst. Kategorien løst slam omfatter jern, der fjernes homogent (van Beek, et al., 2012) – dvs. udfældes som jernoxid i vandfasen uden kontakt til filtermediet. Løst slam kan også fremkomme ved fysisk påvirkning af fastbundet filterslam under returskylning. Løst filterslam kan være indfanget i filtermediet ved filterets siningseffekt. For at fjernes helt fra filteret, skal filterslam være frigivet, f.eks. ved fluidisering af filtermediet ved kraftigt vandskyl. Ved vandskyl med sub-fluidiseringsflow kan en del af det løse filterslam indfanges igen af det overliggende filtermedie, hvormed filteret ikke opnår at blive helt renskyllet.

Ved mediebevægelse tænkes på den retning, hastighed og rotation af filtermediekorn samt det spor, som kornene følger under et returskyl. Mediebevægelsen bestemmer den kraft, hvormed kornene rammer hinanden og dermed om fastbundet filterslam omdannes til løst filterslam. Ved flytning af filtermediekorns placering tænkes i stedet på den dybdefordeling korn, som oprindeligt lå i én bestemt filterdybde, får efter et returskyl. Denne fordelings middeldybde og standard afvigelse er særligt anvendelige til beskrivelse af flytningen. Det er ikke lykkedes at finde tidligere undersøgelser i litteraturen af flytning af filtermediekorns placering efter 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).

1.3 State of the art

1.3.1 Returskyllets historie

Brugen af sandfiltre til rensning af overfladevand blev udbredt i slutningen af 1800-tallet i Europa og starten af 1900-tallet i Nordamerika med fokus på fjernelse af bakterier, der fremkalder sygdomme (kolera, tyfus og dysenteri) samt fjernelse af uklarhed (turbiditet) (Baker, 1934; EPA, 1999; Sedlak, 2014). I starten var disse filtre såkaldt langsomfiltre (Ranjan & Prem, 2000), hvor filterhastigheden var så langsom (omkring 0,1-0,3 m/t), at der blev dannet et schmutzdecke (en måtte af biofilm med tilbageholdt organisk stof og suspenderet stof) i toppen. Få cm af dette lag skulle skrubes bort med jævne mellemrum for at genetablere filterets permeabilitet. Behovet for returskylning skete først efter udbredelse af et forudgående flokkuleringstrin muliggjorde en dybdefiltrering i hurtigfiltre (hvor flowhastigheden er 10-100 gange højere). Her bliver det tilkloggede lag så tykt (f.eks. 30 cm) at bortskrabning ikke længere giver mening. Der er blevet forsket i returskylning i ca. 100 år og flere artikler gennem tiden har forsøgt at give et overblik over diverse studier (Hulbert & Herring, 1929; Baylis, 1959; Cleasby et al., 1977; Slavik, et al., 2013).

1.3.2 Vandskyl og fluidisering

Siden starten af 1900-tallet har mineindustrien opnået erfaring med effekten af fluidisering med opadgående strømning af vand på knust malm (Epstein, 2005). Her udnyttede man, at fluidisering kan sortere korn både efter størrelse og efter densitet. I vandbehandling er sortering efter størrelse uønsket, da små korn ender øverst som er den del af filteret, der belastes mest af jernudfældning og klogges først til. I vandbehandling er sortering efter densitet ønsket, hvis der anvendes to-medie filtre. Her kan et returskyl med fluidisering sikre, at den lette antracit ender øverst og adskilles fra den tunge kvarts, som ligger nederst.

I Danmark fjerner de fleste vandværker jern fra råvandet, I disse filter vokser der med tiden en coating af jernoxider på filterkornene. Denne coating kan blive ganske betydelig og har dermed betydning både for kornenes størrelse, densitet og form (Sharma, et al., 2002; Gülay, et al., 2014). Det betyder, at filtermediekornenes coating kan have indflydelse på fluidisering.

Historisk set, bestod de første returskylning af hurtigfiltre kun af vandskyl. Da det har stor betydning for skyllets effekt på filtermediet om der opnås fluidisering eller ikke, er det vigtigt at kunne fastlægge, hvilket flow er nødvendigt for at opnå fluidisering. Hermed er der fokus på den såkaldt "minimum fluidiseringshastighed" (V_{mf}). Fastlæggelse af denne parameter har basis i Stokes' lov (se nedenfor), der siger, at fluidisering sker når tyngdekræften på et korn opvejes af opdrifts kræften, der er forårsaget af det strømmende vand.

$$V_{mf} = \frac{2}{9} \times \frac{(\rho_p - \rho_v)}{\mu} g r^2$$

Hvor:

V_{mf} er minimums fluidiseringshastighed (m/s)

g er tyngdekræft (m/s^2)

r er radius af en sfærisk korn (m)

ρ_p er partikeldensitet (kg/m^3)

ρ_v er densiteten af vandet (kg/m^3)

μ er den dynamisk viskositet (kg/ms)

Stokes' lov er god til give en basal forståelse af fluidisering. For eksempel ses at minimum fluidiseringshastigheden stiger lineært med stigende densitet af kornene (ρ_p). Endvidere ses det, at minimum fluidiseringshastigheden stiger endnu mere (i anden potens) med stigende kornstørrelse (r). Men Stokes' lov har også begrænsninger. Ligningen gælder kun for sfæriske og glatte partikler, én kornstørrelse (i stedet for en fordeling) og for ét korn ad gangen (uden indflydelse fra omkringliggende korn) og laminart flow. Disse antagelser gør, at beregning af minimum fluidiseringshastighed ud fra fysiske parametre som densitet og viskositet er meget kompleks og ender ofte i behov for indførelse af konstanter, der kun kan bestemmes empirisk, for at få

resultatet til at passe. Der er flere bud på ligninger baseret på empiriske målinger. En meget enkelt af slagsen, der kun gælder for kvarts ses nedenfor (Duris et al., 2013).

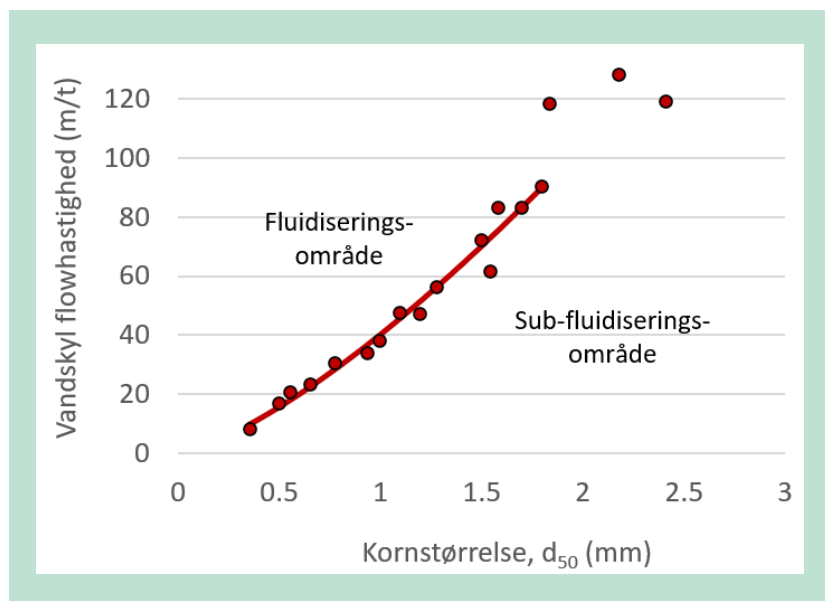
$$V_{mf} = 40d_m^{1,380}$$

Hvor

V_{mf} er minimum fluidiseringshastighed (m/t)

d_m er filtermediekornenes middeldiameter (mm)

Her er der kun behov for at kende filtermediets middeldiameter. Resultatet er visualiseret i nedenstående graf (FIGUR 2) med de punkter, som blev målt af Duris et al. Flere danske vandværker anvender vandskyl flowhastigheder og kornstørrelser, der ligger i sub-fluidiseringsområdet.



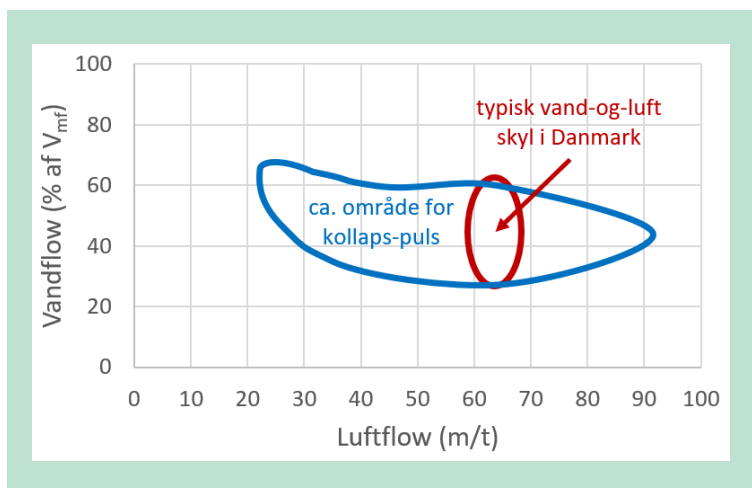
FIGUR 2. Empiriske målinger af minimum fluidiseringshastighed for kvarts (Duris et al., 2013).

1.3.3 Luftskyl

Da vandskyl er en relativ blid metode til rensning af filtermedie, blev luftskyl indført. Her kan man observere, at toppen af et filter netop dækket af vand "stødkoger", og at vandet over filtermediet, hurtigt bliver meget beskidt af løst filterslam. Effekten af et luftskyl i lagene under filteroverfladen kan normalt ikke observeres visuelt. Luftskyl efterfølges altid af vandskyl for at udvaske det løse filterslam til skyllevandsrenden.

1.3.4 Luft-og-vand skyl

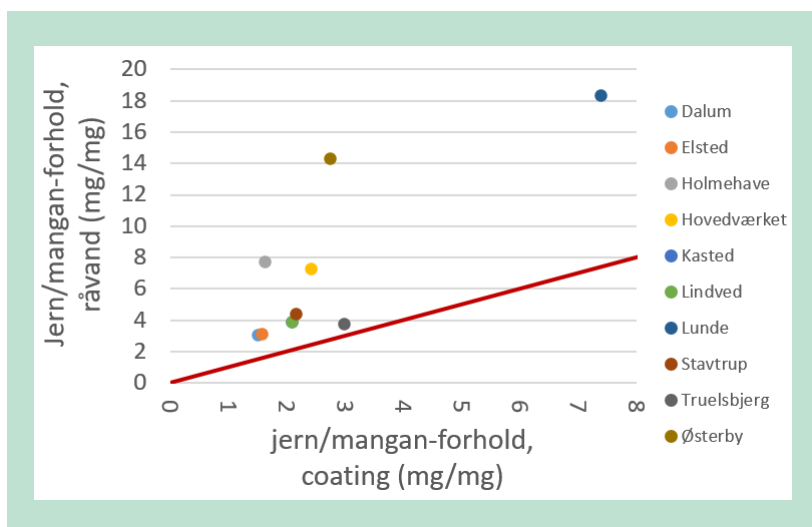
For at opnå en endnu mere aggressiv skylleproces anvendes der også luft-og-vand skyl, hvor luft og vand tilføres filteret samtidig. Ved det rigtige luft/vand-forhold opnås et fænomen, der er kendt som "kollaps-puls". Her danner luften hulrum i filtermediet, som vokser og straks kollapse når opdriften af boblen gør, at den slipper ud mod filtertoppen. Ved for store eller for små flow sker fænomenet ikke. Undersøgelser (Amirtharajah, 1993) viser, at kollaps-puls skaber de største forskydningskræfter mellem mediekorn og dermed giver den mest aggressive form for returskylning. FIGUR 3 nedenfor viser hvilke flow er nødvendige for at opnå fænomenet. Der er ikke fundet en let måde at afgøre, om kollaps-puls faktisk finder sted i fuldskala.



FIGUR 3. Flowområdet i grove træk, hvor der observeres kollaps-puls fænomenet (Amirtharajah, 1993) sammenlignet med typiske flow ved vand-og-luft skyl i Danmark.

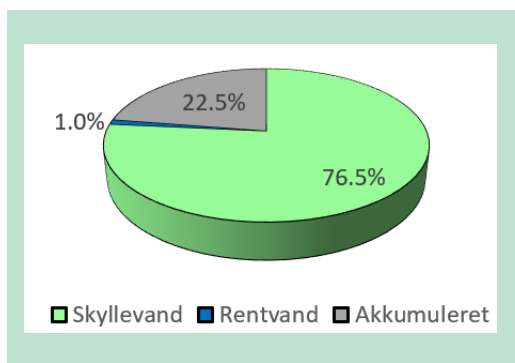
1.3.5 Effekten af skylleprocessen

Jern og mangan fjernes ikke lige let fra et filter under returskyl. Generelt fjernes en mindre andel af de tilbageholdte mangan end jern. For at belyse dette er der i Redesign-projektet udført en sammenligning af jern/mangan-forhold i råvandet på vej ind til et filter med jern/mangan-forholdet i filtermediets coating (se FIGUR 4). Her ses højere forholdstal i råvandet end i coating (dvs. målinger ligger over den røde streg). Det betyder, at mangan sidder mere fast på filtermediet og skylles kun ud i begrænset grad. Da råvandets indhold af mangan typisk er lavere end jernindholdet, er mangan dog normalt ikke hovedårsagen til voksende filtre.



FIGUR 4. Sammenligning af jern/mangan-forholdet i hhv. råvand og coating.

For yderligere at undersøge effekten af et returskyl kan der udføres en massebalance for jern på et bestemt filter over en gangtid. Dette gøres ved at måle flow og jernkoncentration i råvand og rentvand i perioden og jernkoncentrationen i det efterfølgende returskyl. Dette blev gjort på Lundeværket i forbindelse med Redesign-projektet. Forsøget blev udført i alt 6 gange med 3 forskellige skylleprocedurer. Resultater viste i gennemsnit, at 22,5% af det tilførte jern fra råvandet stadigvæk hænger fast i filteret efter returskyl. Ved at tage en række antagelser blev denne mængde omregnet til en filtervækst på knap 1 cm om året. Mere nøjagtige beregninger af filtervækst kræver, at der også udføres massebalance for f.eks. mangan og kalk, samt at coatingens densitet fastlægges nøjagtigt.



FIGUR 5. Massebalance for jern på Filter 1 på Lundeværket over en gangtid på basis af jerntilførslen via råvandet.

En alternativ, men mere langsommelig metode til at bestemme filtermedievækst, er at måle mediehøjden i filterbassinet hvert halve år f.eks. lige efter et returskyl. På grund af ujævnheder i medietoppen skal der udføres en række målinger hver gang på forskellige steder i filteret. Målingerne skal foregå over en årrække for at opnå statistisk signifikante resultater.

1.3.6 De enkelte korns bevægelse under et returskyl

Flere forskere har kigget på bevægelsen af enkelt filtermediekorn under et returskyl. Ives (1989) og Fitzpatrick (1993) anvendte endoskoper placeret i filtermediet til at opnå direkte videooptagelser af kornbevægelser under kollaps-puls fænomenet. Her blev bevægelsesfænomener beskrevet og kornhastigheder beregnet. Duris et. al (2013) undersøgte kornhastigheder under fluidiseringsfænomenet.

Der blev ikke fundet litteratur, der beskriver flytning af mediekorn, dvs. placeringen af kornene efter endt returskyl i forhold til deres oprindelige placering.

1.3.7 Effekten af returskyl på biofiltres funktion

Biofiltres funktion afhænger af biofilmen og den uorganiske coating, der findes på de enkelte filtermediekorn. Såfremt der over tid udvikles en lagdeling i biofilm og coating, er det nærliggende at et returskyl, der fordriver kornene fra deres oprindelige placering kunne have meget stor effekt på biofilterets funktion. Tatari, et al. (2016) dokumenterede netop en sådan lagdeling. Mere specifikt fandt forfatterne, at ammoniumfjernelseskapalet ved kortvarige belastningsforsøg var 10 gange højere for filtermedieprøver udtaget i toppen og midten af filteret end for prøver udtaget i bunden af filteret.

I en pilotskala undersøgelse i kolonner med to medier bestående af aktivt kul og kvarts (Ikhlef & Basu, 2016) fandt man, at fjernelse af organisk stof i den efterfølgende gangtid blev forbedret, når vandskyl blev suppleret med en kollaps-puls trin i returskyllet. Til gengæld blev fjernelse af organisk stof forringet når vandskyllet medførte en 40% filtermedie ekspansion i forhold til både 20% og 30%, hvilket kunne indikere, at der findes en optimal filtermedie ekspansion.

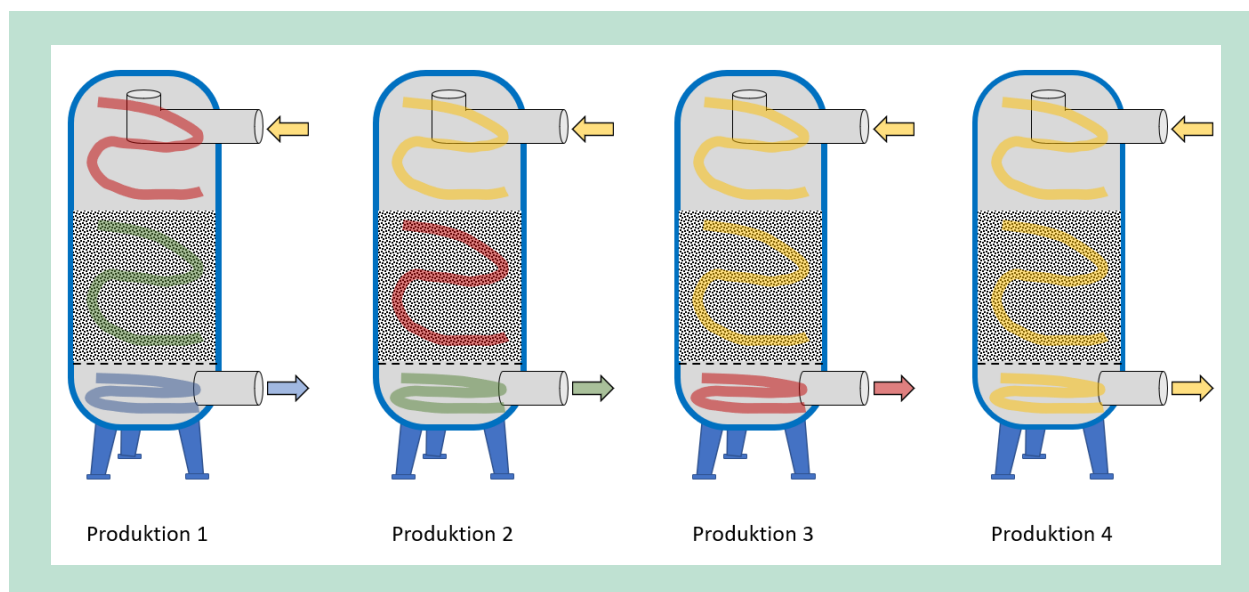
I mange lande tilsættes der chlor til drikkevandet. Hvis forsyningen benytter dette vand til returskyl, er det nærliggende at dette chlor kan have en negativ indflydelse på funktionen af biofiltre. Miltner, et al. (1995) fandt, at returskyl med ikke-chlorede vand ingen indflydelse havde på en to-medie biofilters evne til at fjerne total organic carbon (TOC og disinfection by-product (DBP) precursors. Til trods for den korte kontakttid, havde returskyl med chlorede vand en negativ effekt på biofiltrene fjernelsesevne.

1.3.8 Filtermodning efter returskyl

Det første vand, der produceres lige efter et filterskyl, kan have høj turbiditet. Ofte kan dette behandlede vand udvise over 10 gange kvalitetskravet for turbiditet (kravet er 1 FNU ved forbrugers taphane). Efterhånden som filteret modnes, falder turbiditeten igen til en lav værdi, der fortsætter resten af gangtiden. Som regel varer modningsperioden kun minutter eller timer. Denne modning må ikke forveksles med den modning, der sker for helt nyt filtermedie ved indkøring – en modning, der tager flere uger.

Filtermodningsperioden efter et skyl kan være problematisk, fordi de partikler, der er skyld i den forhøjede turbiditet, over tid kan samles på udsatte steder i ledningsnettet og medføre "rødt vand" til forbrugerne, når der sker tryk- og flowændringer, der hvirvler partiklerne op. Desuden vides det, at partikler kan binde sygdomsfremkaldende bakterier (mest problematisk ved brug af overfladevand), arsen (mest problematisk ved brug af grundvand) og andre urenheder og på den måde medføre en forringet vandkvalitet for forbrugerne.

For at forstå modningsperioden, kan man tænke på hvor vandet står i filteret umiddelbart efter et returskyls afslutning. Her kan vandet indeles i vand, der står i filterets underkammer, i kontakt med filtermediet og over toppen af filtermediet (se FIGUR 6). Det første vand, der løber ud af filteret når produktion genoptages efter et skyl er det vand, der stod i filterets underkammer. Dette vand er rent, da det ikke har været i kontakt med filtermediet. Det næste vand, der når filterets udløb er beskidt skyllevand fra filtermediets porer. Derefter kommer beskidt skyllevand, der var nået til området mellem toppen af filtermediet og skyllevandsrenden. Til sidst kommer nyt råvand, der er blevet rensat af filteret ved almindelig drift. Bemærk, at filtermodningsperioden kan fortsætte et stykke endnu, hvis filterets renseevne er blevet forringet af skyllet.



FIGUR 6. Faser i filtermodning (blå=rent skyllevand uden kontakt til filtermedie, grøn=skyllevand, der sluttede skyllet ved at være i kontakt med filtermedie, rød=skyllevand, der har passeret filtermediet under et skyl men står nu i fribordsområdet, gul=vand, der stammer fra nyt råvand).

Forskellige løsninger anvendes på vandværker til at reducere denne udfordring med genoptagelse af produktion efter returskyl. Løsninger inkluderer 1) produktion til dræn, 2) recirkulering af det første produktionsvand og 3) reduceret flow ved opstart af produktion. En alternativ tankegang er at sikre at returskyllet afslutter på en måde, at turbiditeten i det første produktionsvand er lav. En løsning med forlænget vandskyl med sub-fluidiserings flow er undersøgt af Pichea et al. (2019). En anden mulighed er at designe et filter med et minimalt fribord.

2. Metoder og materialer

I dette kapitel angives en oversigt over de aktiviteter, der blev gennemført i dette studie.

2.1 Forundersøgelser

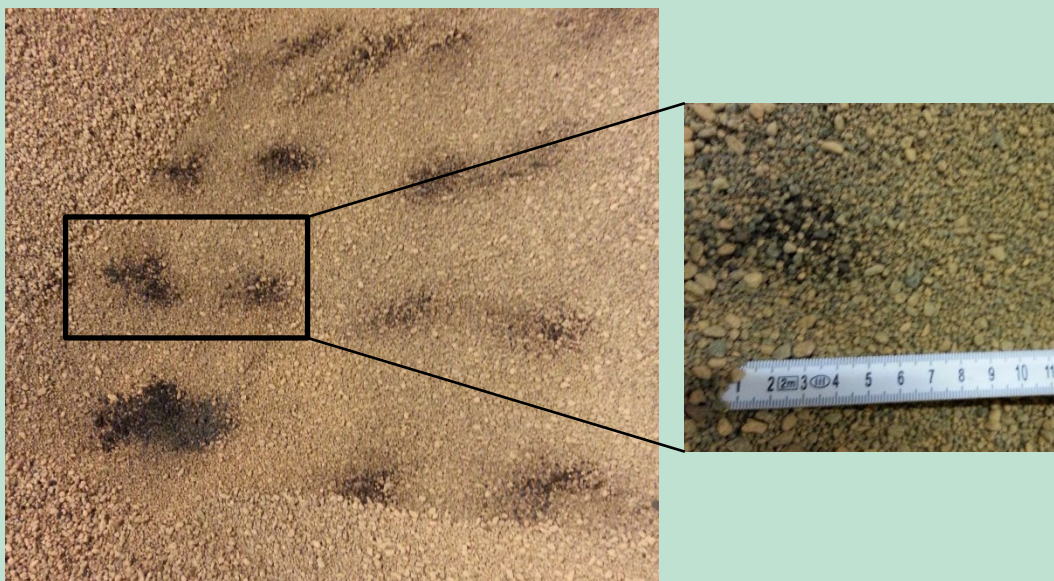
Som indledning til projektet blev der udført en række forundersøgelser både i pilotskala og fuldskala. Resultater fra disse undersøgelser var med til at danne baggrund for de senere undersøgelser.

2.1.1 Fuldskala forundersøgelser

Formålet med forundersøgelserne af fuldskala filtre var at give et indtryk af filtermaterialernes homogenitet og fordeling i filteret efter mange års drift. Der var udelukkende fokus på materialernes kornform og kornstørrelsesfordeling ved udtagning af prøver. Begge de undersøgte filtre var åbne sandfiltre med enkeltfiltrering og dual medie i filteropbygningen.

Viby Vandværk: På Viby Vandværk er filtrene opbygget med dysebund og returskylning blev fortaget på baggrund af opbygget filtermodstand. Returskylningsproceduren har været 3 min luftskyl alene, efterfulgt af 4 min vandskyl alene. Undersøgelserne blev udført i et drænet og tørt sandfilter med dual medie (antracit og kvarts) efter 20 års drift. Prøvetagning blev gennemført i Filter 4 i et areal på 50 cm x 50 cm, hvor de øverste 5 cm blev afskrabet forud for prøvetagningen. Der blev udtaget filtermedie i to niveauer; hhv. 5-10 cm's dybde og 20-25 cm's dybde.

Ved prøvetagning blev der observeret systematiske variationer i farven på filtermediet, ved udgravning til mere end 25 cm's dybde. Der ses mørkere områder i filteret i et systematisk mønster. Der er 15 cm mellem centrum af de mørkere områder. Der blev udtaget prøver af mørke og lyse områder i filteret i filterdybden +25 cm. De systematiske farvevariationer er observeret i filterdybderne fra ca. 20 cm og ned til ca. 45 cm i hele udstrækningen af det frigravede område (ca. 1 m x 0,7 m). På grund af sammenstyrtning af filtermaterialerne var det ikke muligt systematisk at afgrave filteret dybere.



FIGUR 7. Udgravning i Filter 4, Viby Vandværk. Venstre billede viser mørkere områder med 15 cm mellem-rum i en dybde af ca. 25 cm i filteret. Højre billede viser at disse mørkere områder i filteret findes i et systematisk mønster, her i en dybde af 35 cm i filteret, stadig med 15cm mellem de mørkere områder.

Der blev udført kornstørrelsesanalyser (Retsch Camsizer, P6) på alle filtermaterialer udtaget fra Viby Vandværk. Filtermedieprøver fra lyse og mørke områder i filteret er afsyret med en blanding af 10M HCl og 1M oxalsyre for at fjerne overfladecoatingen.

Børkop Vandværk: På Børkop vandværk er filtrene opbygget med to harper til returskyllning, én til vand og én til luftskyl. Der returskylles efter ti dage eller 2800 m³ produceret drikkevand. Filtrene har dimensionerne 4 x 2,5 m og består af to medier med kornstørrelser ved ilægning på 2,4-4,0 mm (antracit) og 1,2-1,8 mm (sand). Returskylleproceduren er blevet justeret i filterets levetid, men kørte på prøvetagningstidspunktet med dræning til top af mediet, 7 min luft skyl alene, 3 min med vand-og-luft samtidig efterfulgt af 6 minutter med vand alene. Det sidste trin af skyllet (vand alene) er inddelt i 3 med 260 m³/t efterfulgt af 340 m³/t (boost) efterfulgt af 200 m³/t. Skyllehastigheden under boost-skylllet er ca. 34 m/t, dvs. formentlig mindre end minimums fluidiseringshastigheden.

Undersøgelserne blev udført i et drænet filter efter 11 års drift. Prøvetagning blev foretaget i Filter 1 i forbindelse med bortgravning og udskiftning af filtermediet. Der blev udtaget prøver i forskellige niveauer i den øverste del af filteret. I forbindelse med prøvetagningen blev der lavet følgende noter omkring farven på den coating, der er på filtermaterialerne: i en dybde på ca. 50-60 cm skifter farven på filtermaterialet fra rødligt til sort. Langs frigravede filtervægge ses ligeledes afsætninger af farveskiftet. På filtervæggen noteres, at farveskiftet sker i ca. samme niveau hele vejen rund langs filtervæggene. Ligeledes blev der observeret gentagne tilfælde af mørke spikes eller kanaler op i det rødlig filtermateriale i de øverste dele af filteret. Afstanden mellem de mørke spikes kunne flere steder måles til 15 cm. Ved frigravning til luftharpen kunne det konstateres, at denne afstand svarer til afstanden mellem lufthullerne langs et luftharperør.



FIGUR 8. Venstre: Frigravning af filtervæg, hvor farveskiftet fra rødt til sort kan ses i ca. 50-60 cm's dyb-de. Dette blev observeret i hele filteret. Højre: Mørke kanaler, der går fra det nederste sorte filterlag og op i det rødlige filterlag. Højden af kanalerne er typisk 10-25 cm.

2.1.2 Forundersøgelser med farvet sand

Østerbyværket: På Østerbyværket blev der udført forsøg på pilotskalafiltre. Formålet var at undersøge, om farvede korn kan anvendes til sporing af filtermaterialers bevægelser ved returskylning.

Forsøgene blev udført på et pilotskala anlæg udført i PVC med en højde på 2 meter og en indvendig diameter på 345 mm. Filterbunden består af en 2 mm tyk plade i rustfrit stål med 15 mm store huller med mulighed for returskylning med luft og vand. Filteret blev bygget og anvendt i forbindelse med andre aktiviteter.

Ved dette forsøg blev kolonnen fyldt med 80 cm kvartssand 1,2 – 1,8 mm. Farvet sand hhv. rød og blå blev lagt ud i et lag på toppen af kolonnen, hvorefter tre forskellige returskylningsprocedurer blev afprøvet:

- Procedure A vand (3 min. ved 30 m/t)
- Procedure B vand (3 min. ved 60 m/t)
- Procedure C vand (3 min. ved 60 m/t), luft (3 min. ved 6 m/t), vand (3 min. ved 60 m/t)

FIGUR 10 viser fotos fra denne aktivitet.



FIGUR 9. Pilotkolonne med ilagt blå farvet sand på toppen, før test med 3 min vandskyl 30 m/l, venstre. Højre billede viser niveaubestemt prøvetagning med prøvetagningsspyd gennem prøveporte i siden af pilotkolonnen efter returskylning.

Prøveudtagningen af niveaubestemte prøver blev foretaget dels med Ghostbuster (se beskrivelse i projektrapporten fra Rapport 1) og dels med prøvetagningsspyd, gennem prøveporte i pilotkolonnen for hver 10 cm.

Børkop Vandværk: For at afprøve brugen af farvet sand til sporing af eventuel flytning af filterkorn ved returskyl, blev der foretaget et fuldskalaforsøg på Børkop Vandværk i november 2019. På Børkop Vandværk blev der udlagt farvet sand i to forskellige felter, Felt A (ved skyllevandsrenden midt i filteret) og Felt B (ved filterkant). I hvert felt blev der placeret hvide farvede sandkorn i hhv. 20-26 cm's dybde og 22-27 cm's dybde samt grønt sand på filtertoppen. For hver testfelt blev der anvendt 8 kg farvet sand.



FIGUR 10. Opbygning af de to forsøgsfelter på Børkop Vandværk forud for returskyllningen. Øverst vises Felt A ved skyllevandsrenden midt i filteret og nederst vises Felt B ved filterkanten.

Herefter blev der gennemført en returskylningsprocedure på 7 min luft skyl alene, efterfulgt af 3 min med kombineret luft-og-vand efterfulgt af 6 min med vand alene. Efter dræning af filteret blev der udtaget filtermedieprøver med ghostbusteren i fire punkter i hvert testfelt, for hver 10 cm's dybde, i alt 80 sandprøver. Antallet af farvede korn i prøverne blev talt manuelt efter tørring af prøven.

2.2 Forsøgsanlæg i pilotskala

Vand og Teknik fremstillede et forsøgsanlæg i pilotskala. Anlægget blev udført i rustfrit stål og forsynet med et skueglas, prøvetagningsporte, en dysebund og luftharpe, se FIGUR 11. Udvalgte data gives nedenfor:

Indre diameter: 50 cm

Areal: 0.20 m²

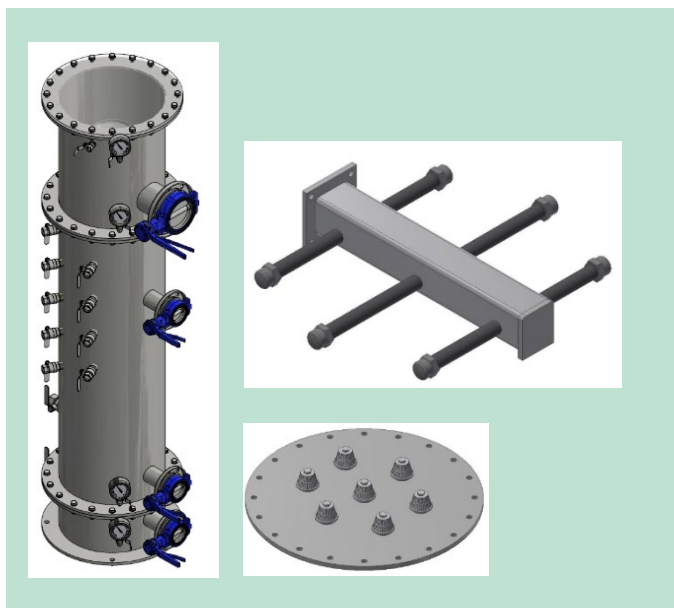
Totalhøjde: 2.4 m

Filterbund: dysebund med 7 dyser

Luftharpe: I alt 14 huller (5 mm diameter) på undersiden af rørene

Prøvetagningsporte: 10 stk. med 10 cm dybdeintervaller (placeret i to rækker)

Skueglas: udført i plexiglas (14 cm x 150 cm)



FIGUR 11. Pilotanlæg: kolonne (venstre), dysebund (nederst til højre), luftharpe (øverst til højre).

2.3 Flytningsforsøg

Formålet med disse forsøg er at belyse, hvordan forskellige korntyper flytter sig under returskyl. Til formålet blev der anvendt to fyldmaterialer (enten grovsand eller finsand) samt seks filtermedietyper til at spore flytningen.



FIGUR 12. De anvendte fyldmaterialer (grovsand eller finsand) samt de medietyper, der blev anvendt til sporing af flytning af mediekorn under returskyl.

TABEL 1 er en oversigt over kørsler med pilotanlægget. Ved alle kørsler, blev der udført 10 returskylleprogrammer i forlængelse af hinanden efterfulgt af udtagning af filtermedieprøvetagning, se proceduren nedenfor:

1. Filtermedia og sporelagene blev placeret i pilotfilteret
2. Filteret blev fyldt med vand fra bunden ved $2 \text{ m}^3/\text{t}$ og holdt neddykket natten over
3. Returskyl trin 1: 5 min. med luft
4. Returskyl trin 2: 5 min med luft-og-vand skyl
5. Returskyl trin 3: 5 min vand alene
6. Returskyl trin 4: 15 min. med produktionsflow (nedadrettet strømning) ved $\approx 3.5 \text{ m/h}$
7. Gentagelse af trin 3-6: 10 gange i alt

8. Dræning af filteret i minimum 2 timer, derefter udtagning af filtermedieprøver
9. Noget eller alt medie udskiftet til næste kørsel

TABEL 1. Oversigt over kørsler med pilotfilter. *over minimum fluidiseringshastighed

			Luftskyl	Luft-og-vand skyl		Vand-skyl	Sporelag, top	Sporelag, midt	Sporelag, bund
			luft	luft	vand	vand	medietype	medietype	medietype
Kørsel	Fyld	Dato	m/t	m/t	m/t	m/t			
1	grovsand	27. nov. 2019	60	60	15	40	grovsand, hvid	grovsand, grøn	grovsand, orange
2	grovsand	07. dec. 2019	60	60	15	40	glaskugler, store	glaskugler, små glaskugler, store	-
3	grovsand	12. dec. 2019	60	60	15	40	finsand, blå	finsand, sort	finsand, gul
4	grovsand	13. dec. 2019	60	60	15	40	-	anthracit granat	-
5	finsand	19. dec. 2019	60	60	10	20	finsand, grøn	finsand, blå	finsand, gul
6	Finsand	20. dec. 2019	60	60	10	20	grovsand, hvid	grovsand, orange	grovsand, rød
7	finsand	21. dec. 2019	60	60	10	20	glaskugler, store	glaskugler, små	-
8	finsand	22. dec. 2019	60	60	10	20	-	anthracit granat	-
9	finsand	08. jan. 2020	60	60	10	40*	-	finsand, grøn grovsand, rød glaskugler, små glaskugler, store anthracit granat	-

2.3.1 Filtermedie ekspansion

Der blev udført to forsøg med pilotanlægget for at fastlægge ekspansion af filtermedie ved forskellige skyllehastigheder. Det ene forsøg blev udført den 8. august 2019 med grovsand (1,2-1,9 mm) i pilotfilteret og det andet forsøg blev udført den 17. december 2019 med finsand (0,8-1,3 mm) i pilotfilteret. Begge forsøg blev udført i triplikat.

Forsøgene anvendte stigende flow af skyllevand (vand alene) og notering af filtermedie ekspansion ved hjælp af observationer af toppen af sandet i pilotfilteret ved hjælp af et endoskop og en lineal fastgjort til indersiden af pilotfilterets fribord. Ekspansionen i cm blev omregnet til ekspansion i procent af den oprindelige filterlagstykkelse.

2.3.2 Observation af bevægelsesfænomener

Under de forskellige trin i returskylle blev bevægelse af filtermediet observeret gennem skueglasset samt fra toppen af filteret. De noterede bevægelsesfænomener blev beskrevet.

2.3.3 Tælling af spormedie

Forskellige løsninger til tælling af spormedierne (glaskugler, farvet sand, anthracit og granat) blev afprøvet. En automatisk tællemetode blev udviklet. Metoden omfattede tørring af medieprøven natten over ved 80°C, udspreddning af prøven på en gennemsigtig plastlomme, farvefotokopiering og tælling af billedet ved hjælp af et farvegenkendelsesprogram i MatLab. Metoden blev forkastet til fordel for en manuel optælling ved hjælp af et forstørrelsesglas (10X) med lys. Hovedårsagen var udfordringer med overlappende korn i den automatiske metode, hvilke betød, at kun små prøver kunne tælles ad gangen.

I prøver med et højt antal sporkorn, blev prøverne delt med en rotationsneddeler (PT 100, Retsch Technology GmbH, Tyskland) og kun en delprøve blev optalt.

2.3.4 Beregning af statiske momenter

Optælling af sporkorn i prøver udtaget for hver 10 cm's dybde resulterede i en fordeling af sporkorn med dybde. For at belyse denne fordeling blev der anvendt statiske momenter. Disse momenter er en kvantitativ måde at beskrive en funktions form. Ofte opereres med 4 statistiske momenter: 1) middelværdi, 2) varians, 3) skævhed og 4) kurtosis. De 3. og 4. momenter blev vurderet ikke at bidrage signifikant til forståelse af flytning af filtermediekorn, hvorfor disse blev droppet.

Da sporkorn blev lagt i forskellige dybder inden returskyl, gav det mest mening at tale om ændringen i dybdefordelingens middelværdi i stedet for den absolutte middelværdi. De anvendte formler ses nedenfor:

$$\mu_{final} = \frac{\sum_{samples}(d \times n)}{N}$$

$$\text{Ændring i middelværdi} = \mu_{final} - d_{original}$$

hvor d er dybden (cm), n er antal sporkorn i en prøve fra en bestemt dybde fra optællingen, N er total antal sporkorn i alle prøver og μ er middelværdi af dybdefordelingen (cm).

For at holde enhederne i cm, blev der taget kvadratroden af 2. moment. Hermed er der tale om fordelings standardafvigelse i stedet for fordelings varians. De anvendte formler ses nedenfor:

$$var = \frac{\sum_{samples}((d - \mu)^2 \times n)}{N}$$

$$\text{Standard afvigelse} = \sqrt{var}$$

3. Resultater

I dette kapitel angives resultaterne fra de udførte undersøgelser.

3.1 Forundersøgelser

3.1.1 Viby Vandværk, fuldskala

Filtrene på Viby Vandværk blev etableret som to-medie filtre i 1992, hvor de øverste 35 cm bestod af antracit (2,5-4,0 mm) herefter 75 cm kvarts (1,0-2,0 mm). Resultaterne af kornstørrelsesanalyserne af filterprøverne (se TABEL 2) viser, at de oprindelige medier, nu efter 20 års drift, er fuldt opblandet.

TABEL 2. Filtermedie resultater fra to niveauer, Viby Vandværk.

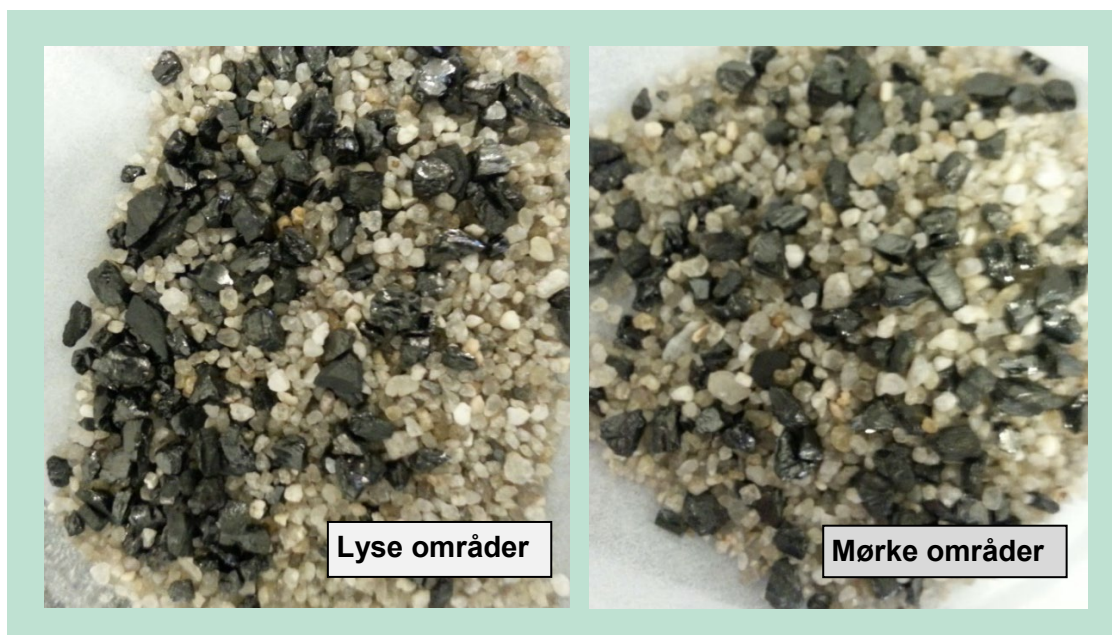
Prøve	d10	d50	d90	U (d60/d10)
F4 5-10 cm	1,57	2,17	4,09	1,50
F4 20-25cm	1,60	2,24	4,23	1,54
Original antracit	2,5	-	4	-
Original kvarts	1,0	-	2,0	-

Der blev udtaget separate prøver af de lyse og mørke områder. Resultaterne af kornstørrelsesanalyser (TABEL 3) viser meget lidt forskelle.

TABEL 3. Filtermaterialer udtaget af lyse og mørke områder i filteret, Viby Vandværk.

Prøve	d10	d50	d90	U (d60/d10)
F4 lys, +25cm	1,62	2,28	4,25	1,57
F4 mørk +25cm	1,58	2,14	4,01	1,47

Efter afsyring af filtermedieprøverne ses blandingen af kvarts og antracit tydeligt, se FIGUR 13.

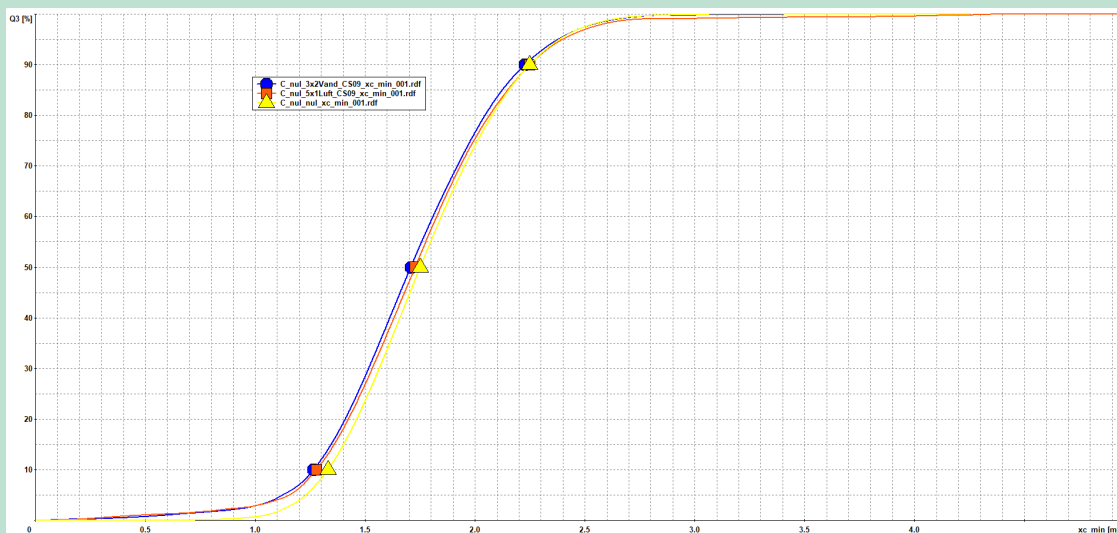


FIGUR 13. Afsyrede filtermaterialer fra 25 cm's dybde, Viby Vandværk.

De 15 cm's afstand, der er observeret mellem de mørke områder i filteret, svarer til den afstand, der er mellem dyserne i bunden af filteret. Filtermaterialerne lige over dyserne ser således ud til at være påvirket af deres placering netop lige over dyserne. Der ses i data ikke nogen belæg for kraftig sortering af filtermaterialerne pga. densitet eller størrelse. De observerede farveforskelle i filteret stammer derfor fra coatingen på kornene (og ikke fra om der er tale om antracit eller kvarts). Det formodes, at de mørke farver skyldes, at korn fra det mørke mangan lag skydes op under returskyl i områder lige over dyserne. Hermed afviger billedet fra en lagkagemodel, hvor de forskellige lag ligger vandret i filterbassinet.

3.1.2 Forundersøgelse med farvet sand

Østerbyværket, pilotskala: Forud for forundersøgelser med farvet sand blev ø 345 mm forsøgskolonnen af PVC bygget op med filtermateriale, der blev testet i forskellige returskylleprocedurer. I den forbindelse blev der udtaget filtermaterialer gennem prøvetagningsportene i siden af kolonnen for at tjekke for eventuelle ændringer i kornstørrelsessammensætninger som funktion af returskylningerne. Figuren herunder sammenligner forskellige skyl (vand, luft) med udgangspunktet, og viser ingen forskel i for filtermaterialernes kornstørrelsesfordeling ved brug af vand alene (ved 60 m/t) eller ved skylning med luft alene (6 m/t). De hermed testede returskyl-indstillinger for vand og luft anvendes derfor fortsat til de efterfølgende pilotskala forsøg på Østerbyværket.

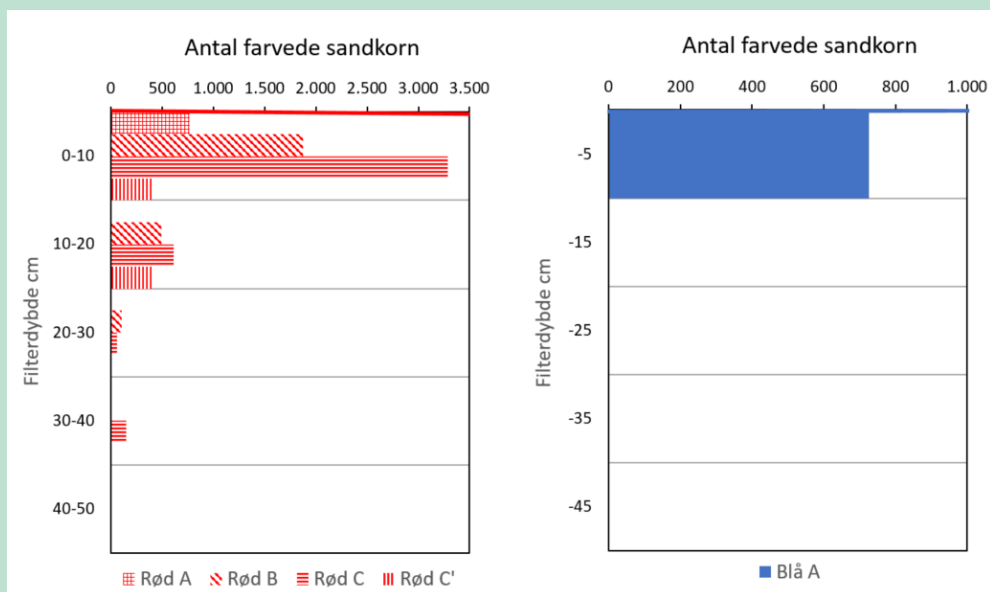


FIGUR 14. Kornstørrelsesfordeling for filtermedie udtaget i 15 cm's dybde hhv. før skylning (gul kurve) efter skylning med 3 x 2 min vand 60 m/t (blå kurve) og efter 5 x 1 min luft skyl (uden vandskyl) rød kurve.

I forsøgene med farvede sandkorn blev der arbejdet med forskellige returskylleprocedurer samt forskellige prøvetagningsmetoder.

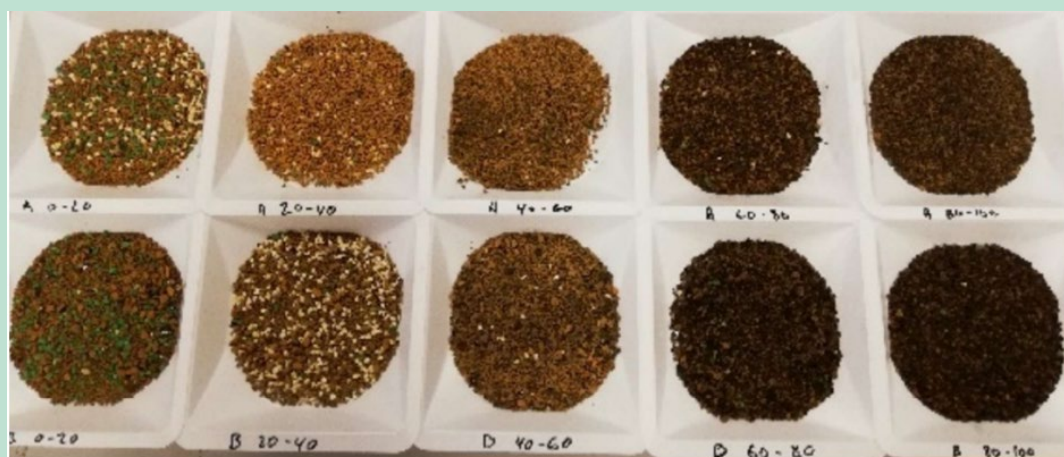
Erfaringerne fra forsøgene viser, at det i kolonneforsøgene er en stor fordel at kunne prøve-tage materialer fra prøvetagningsporte i siden af kolonnen i stedet for fra toppen af mediet. Herved undgås risiko for, at korn fra andre dybder falder ned i prøvetagningshullet og medtages i en dybere prøve. Herudover er der mulighed for mindre dybdeintervaller, alt efter hvor mange prøvetagningsporte en forsøgskolonne udstyres med. Prøvetagningen gennem disse porte blev foretaget med spyd, der går hele vejen tværs gennem kolonnens bredde og giver prøvemateriale nok til kornstørrelsesfordelingsanalyser samt sporkorntælling.

Forsøgene med farvede korn som sporkorn viser en vis bevægelse af kornene, se FIGUR 15. Resultaterne fra pilotskala forsøgene på Østerbyværket antyder, at vand alene flytter kornene mindre end når der også anvendes luft-skyl i returskylleproceduren. Ved returskylleprocedure C, der kombinerer vand og luftskyl ses korn der er ilagt på toppen ned til 40 cm's dybde i filteret. Ved vand alene med 30 m/t ses den mindste spredning af farvede korn ned i filter dybden.



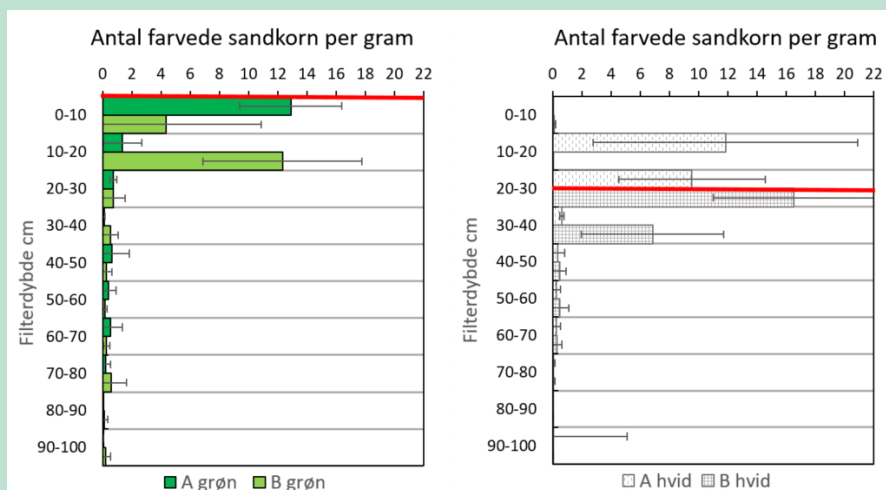
FIGUR 15. Dybdeprøver fra kolonneforsøg ved Østerbyværket. Farvet sand (rød/blå) ilagt toppen af filteret. Figurene viser antallet af farvede korn talt i dybdeprøverne efter hhv. returskylleprocedure A, B & C.

Børkop Vandværk, fuldskala: På Børkop Vandværk blev der placeret 8 kg farvet sand (grønt øverst og hvid under) i to felter. FIGUR 16 viser prøver udtaget i 20 cm's dybdeintervaller med ghostbuster-udstyret efter et enkelt returskyl.



FIGUR 16. Dybdeprøver efter én returskyllning fra de to forsøgsfelter på Børkop Vandværk (øverst Felt A ved skyllevandsrenden, nederst Felt B ved filterkant). Prøverne blev fotograferet efter udtagelse og tørring.

FIGUR 17 viser resultater af optælling af farvede korn i samme prøver. Her ses en vis ændring af sporkornenes placering efter udførsel af et returskyl. I sagens natur kunne de grønne korn (der var placeret øverst i filteret) kun bevæge sig nedad, mens de hvide korn (der var placeret et stykke nede i filteret) kunne bevæge sig både opad og nedad.



FIGUR 17. Resultat af korntælling af farvede korn (tv, grøn; th, hvid) som funktion af dybden. Der er vist et gennemsnit af fire individuelle prøver samt standardafvigelsen mellem de fire individuelle prøver. A og B henviser til de to forskellige forsøgsmålinger prøverne er udtaget fra. Den røde streng indikerer udgangspunktet for det ilagte farvede lag.

De observerede slutplaceringer var også forskellige alt efter den horisontale placering af feltet i selve filteret. Felt A er midt i filteret og Felt B er ude langs den ene side i filteret. Hvide farvede korn fra 20-30 cm's dybde ser ud til primært at bevæge sig op i filteret (mod lavere filterdybde) i Felt A centralt i filteret, hvorimod hvide farvede korn i Felt B i siden af filteret primært har bevæget sig ned i filteret (mod dybere filterdybder). Da der under Felt B er kendskab til mindre luftskyl pga. færre huller i luftharpen ved dette felt kunne den observerede forskel i bevægelsesmønstre for de farvede sporkorn skyldes denne forskel i påvirkning fra luftskylningen.

Hermed understøtter resultater fra Børkop Vandværk de tidligere resultater fra Viby Vandværk, nemlig at den vertikale flytning af mediekorn varierer fra sted til sted i et filter.

3.2 Filtermedietyper

TABEL 4 er en oversigt over de fysiske karakteristika af forskellige filtermedier, der blev anvendt i pilotskalafor søgene hos VIA University College. Der er både tale om to fyldmaterialer (to forskellige sandstørrelser) samt medier, der blev anvendt til at spore flytning af korn under returskyl. De anvendte medier har forskellige størrelse (to størrelser af farvet sand), form (store og små glaskugler) samt densitet (antracit og granat).

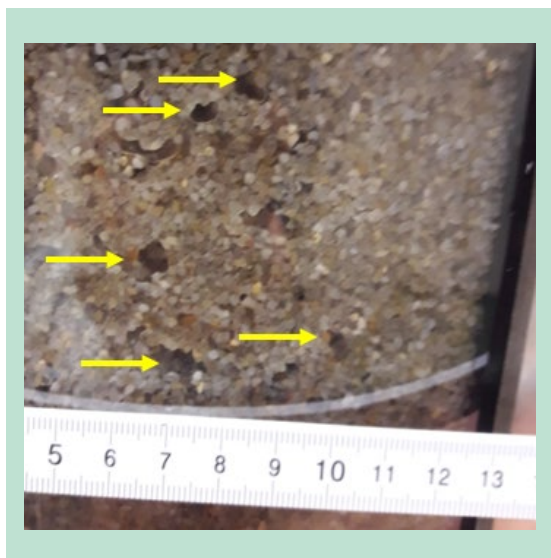
TABEL 4. Oversigt over anvendt fyldmateriale og sporkorn.

Filtermedie- type	Beskri- velse	Kornstørrelsesfordeling				Uensformig- hed	Sfæricitet	Bulk densitet	Part. densi- tet	Porøsi- tet
		d ₁₀	d ₅₀	d ₆₀	d ₉₀					
		mm	mm	mm	mm	U=d ₆₀ /d ₁₀	SPHT3	Tør kg/L	kg/L	%
Fin sandfyld	0.7-1.2	0.76	1.00	1.05	1.28	1.38	0.85	1.55	2.59	40.0
Grov sandfyld	1-2-1.8	1.23	1.59	1.66	1.94	1.35	0.86	1.52	2.64	42.3
Finsand, far- vet	Forskellige farver	0.81	1.07	1.13	1.36	1.40	0.87	1.52	2.25	32.6
Grovsand, farvet	Forskellige farver	1.17	1.58	1.67	2.06	1.43	0.88	1.54	2.37	34.9
Små glaskug- ler	0.5-1.2	1.61	1.68	1.70	1.76	1.06	0.98	1.56	2.46	36.7
Store glas- kugler	2.85-3.45	2.87	3.10	3.15	3.35	1.10	0.99	1.50	2.49	39.8
Anthracit	Akdolit H2	1.39	1.92	2.03	2.54	1.46	0.80	0.54	1.07	49.2
Granat	12/20 mesh	0.88	1.23	1.31	1.74	1.49	0.83	2.36	4.14	42.9

3.3 Bevægelsesfænomener

Under returskylleforsøgene blev der observeret fra toppen af kolonnen samt gennem skueglasset på kolonnens side. Der blev identificeret syv forskellige bevægelsesfænomener, der beskrives i det følgende:

1. **Megapore rotation:** Små hulrum blev dannet i filtermediet under luftskyl og samtidig luft-og-vandskyl, se FIGUR 18. Disse strukturer ligner det, som er beskrevet i litteraturen som "lenticular voids" (Ives, 1989). Hulrummene har en skala på ca. 1/2-1 cm. Porerne er delvis forbundne og fungerer for lufttransport lidt som ormehuller i jorden fungerer for regnvand. I løbet af forsøgene blev det observeret, at filtermediekorn roterer inde i disse megaporer. Mediekorn flytter kun over små afstande ved dette bevægelsesfænomen.



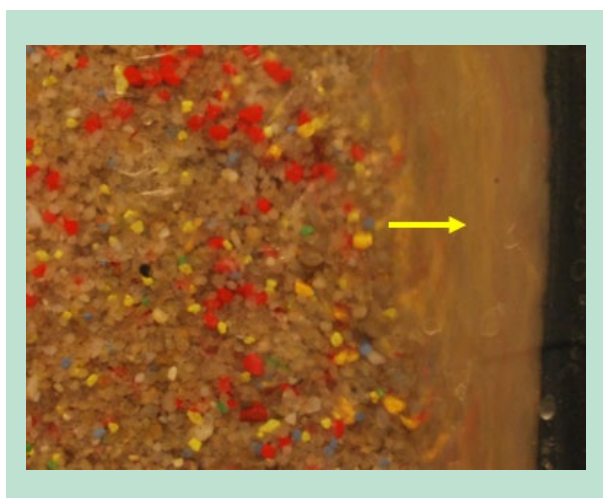
FIGUR 18. Megaporer.

2. **Kravlende sprækker:** Horisontale sprækker i filtermediet bestående af vand og en luftboble opstår under vand-og-luft skyl og starten af vand-alene skyl, se FIGUR 19. De observerede sprækker var ofte i størrelsesorden 1 cm høj og 5-10 cm i længde. Sprækker kravler langsomt opad, især under vand-alene skyl indtil luften er fjernet fra filterets top. Bevægelsen sker ved, at korn på sprækkens tag kollapser til gulvet lidt efter lidt. Filtermediekorn flytter kun over små afstande ved dette bevægelsesfænomen.



FIGUR 19. Kravlende sprække med luft og vand.

3. **Gyngende top:** Filtermediet i det øverste ca. 20 cm af kolonnen udviste en lille gyngende bevægelse fra side til side, lidt i stil med gelé, der rystes blid. Filtermediekorn flytter kun over små afstande ved dette bevægelsesfænomen.
4. **Banestrømning:** Hurtig strømning i baner på 5-10 cm bredde, er observeret under vand-alene skyl (se foto i FIGUR 20, der er optaget med langsom lukkehastighed). Strømnings-hastigheden i disse baner er langt større end gennemsnits flow for hele kolonnen. Hermed er der tale om inhomogeniteter i vandets strømning, der bl.a. kan skyldes ujævn indstrømning ved filterbunden, luftlommer fanget i filtermediet og forskelle i filtermediets permeabilitet. Det kan også skyldes randeffekter langs kolonnens ydervæg. Filtermediekorn rives med i banestrømningen og flytter derfor over store afstande i filteret ved dette bevægelses-fænomen. Dette fænomen blev observeret for mange år siden (Baylis, 1959), hvor den blev kaldt "jet action".



FIGUR 20. Banestrømning.

5. **Nedsynkning:** Denne langsomme bevægelse sker som naturlig konsekvens af, at filtermedie, der er forskudt opad ved banestrømning og andre bevægelsesfænomener erstattes af filtermedie, der synker ned oppefra, se FIGUR 21. Filtermedie forskydes over mellemafstande ved dette fænomen.



FIGUR 21. Nedsynkning af grønfarvet sand (det farvede lag var oprindeligt placeret ved den sorte streg).

6. **Fuldcirkulation:** Ved dette fænomen flytter filtermedie i en bevægelse, der spænder over hele filteret i en slags "bundvending". I pilotfilteret bevægede filtermedie opad langs hele observationsvinduet, mens mediets returløb til bunden af filteret ikke kunne ses fra vinduet. Det vides ikke om hovedårsagen til denne bevægelse er ujævnt flow gennem dyserne, et artefakt af filterdimensionerne eller en anden grund. Filtermedie flytter over store afstande ved dette fænomen.
7. **Sandvulkan:** Dette fænomen skyder sandet op få cm i fribordsområdet i en mini-vulkan, som ved stødkogning. Denne bevægelse kan ses på overfladen, se FIGUR 22. Fænomenet sker ved luftskyl og luft-og-vand skyl. Flytning af filtermediekorn sker kun i de øverste få cm. Bevægelsen giver indtrykket af, at luftskyl er et meget kraftigt skylletrin. Det er dog kun de øverste få cm, der oplever en kraftig bevægelse.



FIGUR 22. Sandvulkaner (set fra filtertoppen).

8. **Kollaps-puls:** Dette bevægelsesmønster noteret af Amirtharajah (1993) blev ikke observeret til trods for forsøg med varierende kombinationer af vandflow og luftflow. Kollaps-puls er en bevægelse, hvor en stor luftboble opbygges i filtermediet som løftes op, hvorefter luften slipper ud til filtertoppen og mediet kolliderer igen. Mønstret er ellers anset som den mest aggressiv skyllemetode, hvorfor den ofte tilsigtes i udlandet.

TABEL 5 viser en oversigt over disse bevægelsesfænomener. Der angives også de trin i returskylleprogrammet, hvor fænomenet blev observeret. I flere tilfælde, er der tale om en subjektiv vurdering.

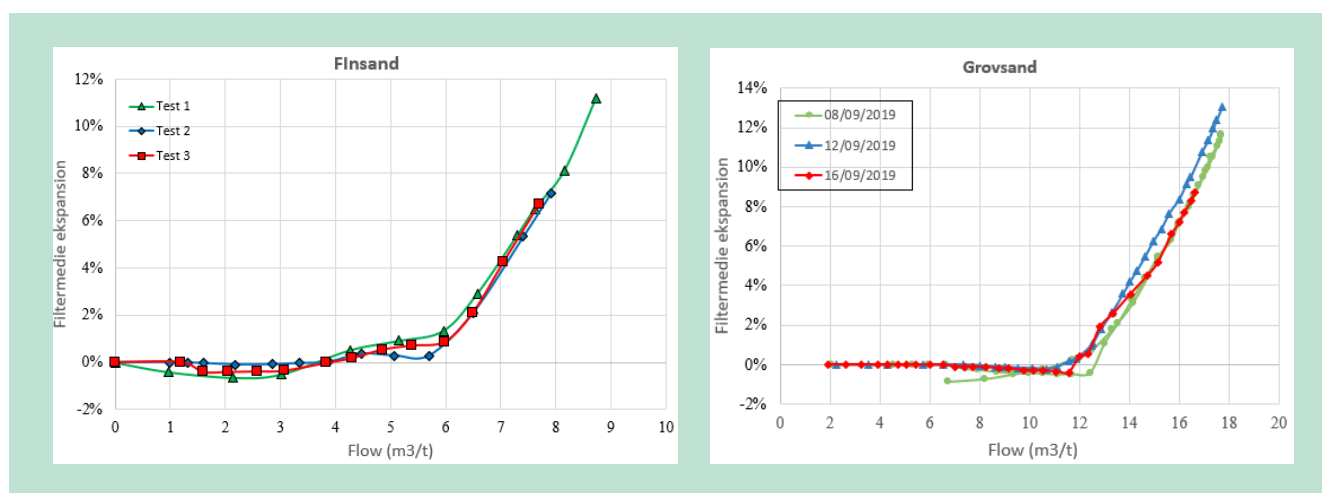
TABEL 5. Oversigt over bevægelsesfænomener og hvornår de blev observeret.

	Fænomen	Luftskyl	Luft-og-vand skyl	Vand-alene skyl
1	Megapore rotation	+	+	-
2	Kravlende sprækker	-	+	-
3	Banestrømning	-	+	+
4	Sandvulkaner	+	+	-
5	Nedsynkning	-	+	-
6	Fuldcirkulation	-	+	+
7	Gyngende top	-	+	-
8	Kollaps-puls	-	-	-

Til sammen, disse bevægelsesfænomener indikerer, at filtermedie flytninger er mere komplekst end makroparametre som filtermedie ekspansion kan afsløre. Observationerne gjorde det tydeligt, at filtermedie bevægelser i fuldskala og store pilotskala er inhomogene med individuelle fænomener på skalaer af f.eks. 1 cm, 10 cm og hele filteret. Storskala inhomogenitet kan overses i små pilotskala opsætninger og i modellering. Tre faser (medie, vand, luft) medfører næsten uoverkommelige udfordringer til modelarbejde. Fremgangsmåden i denne aktivitet er derfor at beskrive den resulterende distribution af en specifikt lag korn, der bruges til at spore medie flytninger.

3.4 Filtermedie ekspansion

FIGUR 23 viser målinger af filtermedie ekspansion (i procent af den oprindelige totale filtermedielag). Målingerne er udført i triplicat for både finsand og grovsand (se kornstørrelser i TABEL 4).



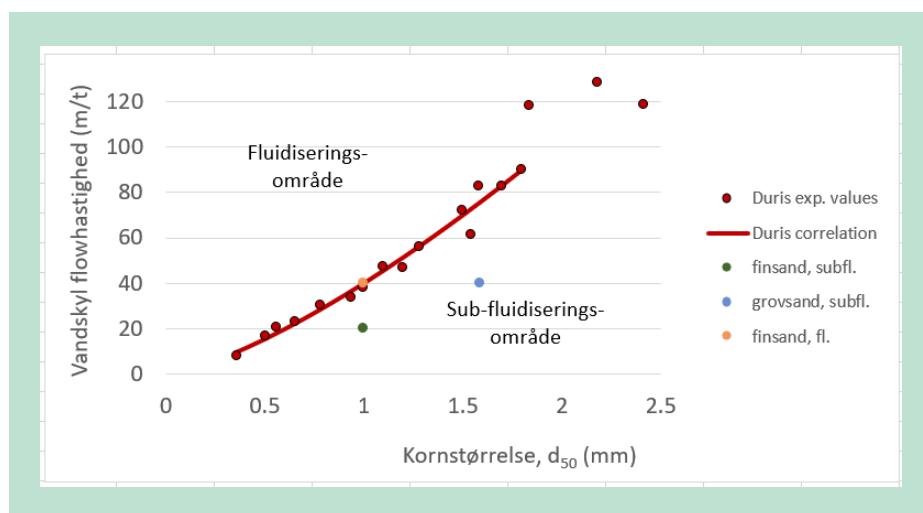
FIGUR 23. Filtermedie ekspansion under returskyl med vand alene for finsand (venstre) og grovsand (højre), begge udført i triplicat.

Som det ses af figurene, er der et relativt veldefineret flow, hvor filtermediet begynder for alvor at ekspandere. Disse flow er 6 og 12 m³/t for henholdsvis finsand og grovsand. Ved at anvende pilotfilterets tværsnitsareal på 0,20 m² kan disse flow omregnes til flowhastigheder på henholdsvis 30 og 60 m/t. Det bemærkes, at den optimale filtermedie ekspansion har været diskuteret i mange år men angives ofte i størrelsesorden 20% (Cleasby, et al., 1977), hvilket vil kræve op mod det dobbelte flowhastigheder i forhold til begyndende ekspansion angivet ovenfor.

Duris et al. (2016) udførte en række empiriske forsøg med kvartssand medie med en vis bredde i kornstørrelsesfordeling (dvs. typisk filtersand). Forsøgene blev udført ved 20 °C. FIGUR 24 viser resultatet af forsøgsrækken. Et simpelt udtryk for minimums fluidiseringshastighed (U_{mf}) i enheder m/s for kvartssand alene baseret på mediets middeldkorn diameter (d_m) i enheder mm blev foreslået som følge:

$$U_{mf} = 0.0111 \times d_m^{1.380}$$

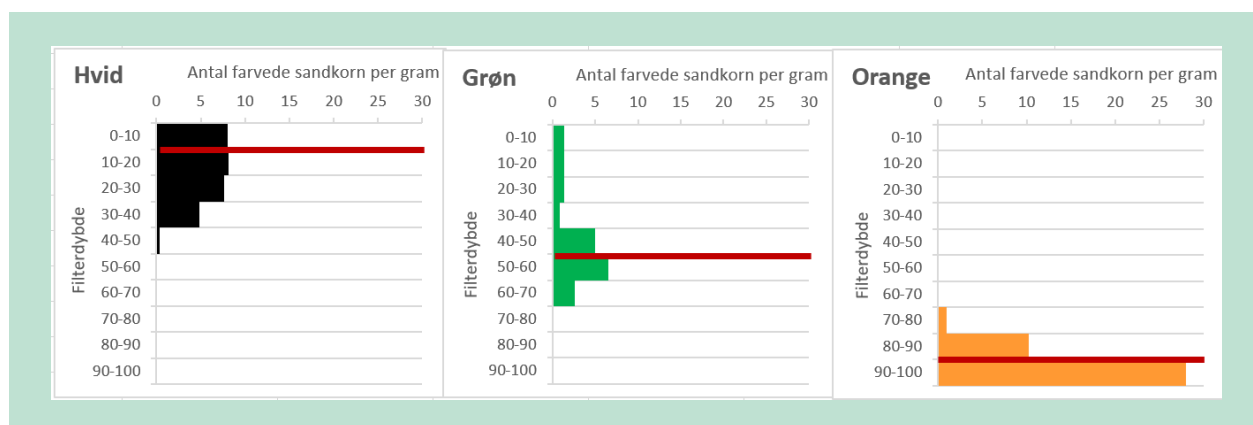
FIGUR 24 viser også de forventede fluidiseringsforhold ved flytningsforsøgene. Som det ses, er de anvendte skylleflowhastigheder tilstrækkelig til fluidisering kun når der anvendes finsand som fyld og 40 m/t vandskyl (kørsel 9), se TABEL 1.



FIGUR 24. Minimum fluidiseringshastighed for kvartssand medie (Duris, et al., 2016).

Flytning af filtermedie under returskyl

I det følgende angives resultater fra pilotfilterforsøgenes 9 kørsler (se TABEL 1). For hver kørsel er der indlagt sporkorn, gennemført 10 returskyl, udtaget prøver og sporkornene er blevet talt. FIGUR 25 viser et eksempel på rådata fra en af disse tællinger. Ud fra disse resultater blev gennemsnitsdybden af sporkorn (i form af ændring fra den oprindelige placering, M1) og spredning af sporkorn (i form af fordelingsstandardafvigelse, M2) beregnet.



FIGUR 25. Eksempel på rådata fra tælling af sporkorn (farvet grovsand i grovsand fyld) i prøver udtaget i pilotfilteret med 10 cm dybdeinterval efter et returskylforsøg (kørsel 1). Den røde streg indikerer den oprindelige placering af sporkorn.

I det følgende afsnit fremlægges M1 og M2 resultaterne. For at fremhæve vigtige sammenhænge på tværs af kørslerne er resultaterne ikke angivet i kørselsrækkefølge.

3.4.1 Karakterisering af pilotfilteret med farvet sand

Tanken ved brug af farvet sand var, at det skulle have præcis den samme kornstørrelsesfordeling, partikeldensitet og kornform som fyldmaterialet. Som tidligere vist i TABEL 4 har farvning af mediet dog medført mindre ændringer i sandets fysiske egenskaber, herunder øgning i kornstørrelsen og sfæricitet (som begge dog vurderes at være uden betydning). Desuden har farvning medført en lavere partikeldensitet, der kan være væsentlig, især for det fine sand, hvor farvning sænkede partikeldensiteten fra 2,59 (ufarvet sand) til 2,25 kg/L (farvet sand).

Ved kørsel 1, 5 og 9 blev der anvendt sporkorn af farvet sand med samme størrelse som fyldmaterialet. Hermed kunne flytning af sandkorn i pilotfilteret ved et almindeligt skyl karakteriseres.



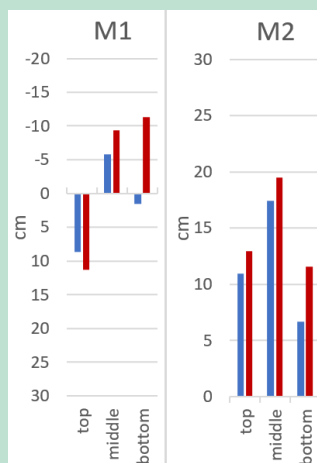
FIGUR 26. Farvet grovsand i grovsand fyld (blå) og farvet finsand i finsand fyld (rød og grøn), placeret midt i filteret. M1 er middel flytningsafstand og M2 er standardafvigelsen af det farvede sands dybdefordeling.

FIGUR 26 M1 (middelflytning) viser at farvet sand (placeret midt i filteret) i gennemsnit flytter sig lidt opad (< 10 cm) i filteret, når der anvendes sub-fluidiseringsflow (M1 blå og M1 rød). Dette indikerer, at der er mere bevægelse i den øverste del af filteret end i den nederste del. Ved fluidiseringsflow ses ingen ændring i gennemsnitsdybde (M1 grøn) efter 10 returskyl. Dette indikerer, at der er tale om symmetrisk spredning.

FIGUR 26 M2 (spredning som standard afvigelse) viser at farvet finsand (placeret midt i filteret) ender med at være fuldopblandet efter 10 returskyl, når der anvendes fluidiseringsflow (M2 grøn). Det bemærkes, at 100% jævn fordeling i alle dybder teoretisk ville give M2=28,7 cm, mens resultatet for M2 grøn var 28,6 cm. Dette indikerer, at ændring i placeringen af farvet finsand efter 10 returskyl er det samme som ufarvet sand. Ved sub-fluidisering ses M2 mellem 15 og 20. Det bemærkes, at en jævn spredning i de øverste 60 cm af filteret teoretisk ville give M2=17,1. Hermed svarer standardafvigelsen til, at sporkorn ved sub-fluidisering hovedsagelig spredes i toppen af filteret.

3.4.2 Betydning af den oprindelige placering

I kørsel 1 og 5 blev der også placeret andre farver korn i toppen og i bunden af filteret. Dette vil forventes at ændre på flytning af sporkorn, da filtertop eller filterbund udgør en barriere mod flytning (en randbetingelse).



	Kørsel	Filterfyld	Sporkorn	Placering	Vand-alene skylning
	1	Grov	Grov	Top, midt, bund	Sub-fluidisering
	5	Fin	Fin	Top, midt, bund	Sub-fluidisering

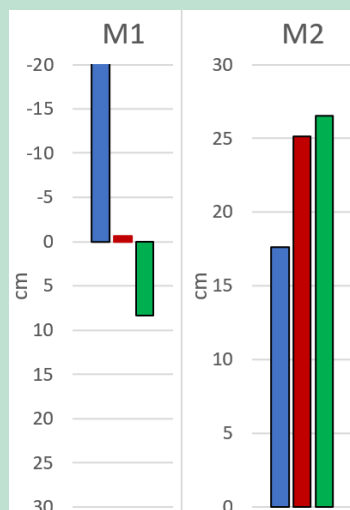
FIGUR 27. Farvet grovsand i grovsand fyld (blå) og farvet finsand i finsand fyld (rød) med forskellige oprindelige placeringer i filteret. M1 er middel flytningsafstand og M2 er standardafvigelsen af det farvede sands dybdefordeling.

FIGUR 27 M1 viser, at farvet sand ved sub-fluidisering generelt udviser begrænset flytning i gennemsnit (< 12 cm). Farvet sand placeret i toppen af filteret i gennemsnit flytter sig nedad (det kunne jo ikke flytte opad) mens farvet sand i bunden flytter sig opad (gælder dog ikke grovsand). Her var grovsand tilsyneladende i stand til at modstå at blive løftet op fra bunden af pilotfilteret af det anvendte returskylleprogram's kræfter. Som vist i afsnit 3.5.2 blev farvet sand placeret i midten af filteret i middel flyttet opad.

FIGUR 27 M2 viser, at spredning af farvet sand placeret midt i filteret er større end farvet sand placeret i top og bund af filteret. Den mindste spredning ses for farvet grovsand placeret i bunden af filteret. Der har tilsyneladende været mindre flytning af farvet grovsand i bunden af filteret med grovsand fyld.

3.4.3 Betydning af størrelse

I kørsel 3 og 6 blev der anvendt farvet sand i en anden størrelse end fyldet. Med andre ord blev der placeret farvet finsand i grovsand fyld og omvendt.



	Kørsel	Filterfyld	Sporkorn	Placering	Vand-alene skylning
	3	Grov	Fin	Midt	Sub-fluidisering
	6	Fin	Grov	Midt	Sub-fluidisering
	9	Fin	Grov	Midt	Fluidisering

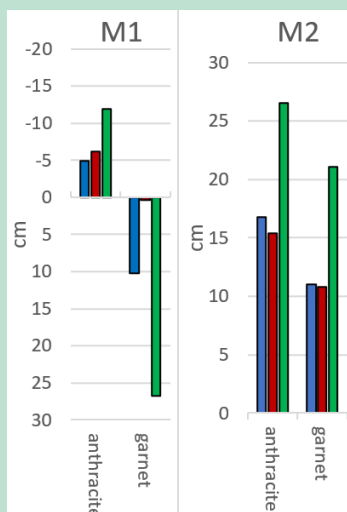
FIGUR 28. Farvet finsand (blå) i grovsand fyld, farvet grovsand (rød) i finsand fyld, begge ved sub-fluidiseringsflow samt farvet grovsand (grøn) i finsand fyld ved fluidiseringsflow. M1 er middel flytningsafstand og M2 er standard afvigelse af det farvede sands dybdefordeling.

FIGUR 28 M1 viser, at farvet finsand (blå) flytter sig kraftigt opad i grovsand fyld i gennemsnit, mens farvet grovsand (rød) i finsand fyld ikke flyttes i gennemsnit, begge ved sub-fluidisering. Sidstnævnt skyldes formentlig en balance mellem grovsandets tendens til at synke i finsandfyld og filtermediets generelle tendens til at mixes mest i den øverste del af pilotfilteret. Ved fluidisering, flytter farvet grovsand (grøn) i finsand fyld nedad i pilotfilteret, men kun i begrænset omfang (8,4 cm i gennemsnit).

FIGUR 28 M2 viser, at farvet grovsand (rød) spreder sig i hele kolonnen i finsandfyld (standard afvigelse > 25 cm), mens farvet finsand (blå) i grovsand fyld kun spreder sig i den øverste del af pilotfilteret, begge ved sub-fluidisering. Ved fluidisering spredes farvet grovsand (grøn) i hele kolonnen med finsandfyld. Her er grovsandets tendens til at synke ikke tilstrækkeligt til at overkomme fluidiseringens tendens til at cirkulere alle korn i hele filteret.

3.4.4 Betydning af densitet

I kørsel 4, 8 og 9 blev der anvendt antracit og granat som repræsentanter for filtermedier med hhv. lavere og højere partikeldensitet



	Kørsel	Filterfyld	Sporkorn	Placering	Vand-alene skylning
	4	Grov	Antracitgranat	Midt	Sub-fluidisering
	8	Fin	Antracitgranat	Midt	Sub-fluidisering
	9	Fin	Antracitgranat	Midt	Fluidisering

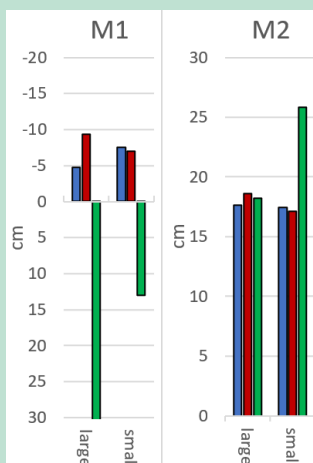
FIGUR 29. Antracit og granat i grovsand fyld (blå), finsand fyld (rød), begge ved sub-fluidiseringsflow samt finsand fyld (grøn) ved fluidiseringsflow. M1 er middel flytningsafstand og M2 er standard afvigelse af sporkorn distribution.

FIGUR 29 M1 viser, at disse medietyper i gennemsnit udviser en begrænset flytning opad (antracit) og nedad (granat) i filteret, som man vil forvente ud fra partikeldensitet. Undtaget herfra er granat ved sub-fluidisering (ingen flytning i gennemsnit) samt granat ved fluidisering (særlig stor nedsynkning).

FIGUR 29 M2 viser, som før, at den største spredning sker ved fluidisering.

3.4.5 Betydning af form

I kørsel 2, 7 og 9 blev der anvendt glaskugler i to størrelser for at repræsentere filtermedie med en mere afrundet kornform end sand.



	Kørsel	Filterfyld	Sporkorn	Placering	Vand-alene skylning
	2	Grov	store glaskugler små glaskugler	Midt	Sub-fluidisering
	7	Fin	store glaskugler små glaskugler	Midt	Sub-fluidisering
	9	Fin	store glaskugler små glaskugler	Midt	Fluidisering

FIGUR 30. Store og små glaskugler i grovsand fyld (blå), finsand fyld (rød), begge ved sub-fluidiseringsflow samt finsand fyld (grøn) ved fluidiseringsflow. M1 er middel flytningsafstand og M2 er standard afvigelse af sporkorns fordeling.

FIGUR 30 M1 viser, at gennemsnitsdybden for glaskugler efter returskyl med sub-fluidiseringsflow flytter sig opad i begrænset afstand (< 10 cm). På denne måde ligner glaskugler farvet

sand i begge størrelser. Ved fluidiseringsflow ses, at glaskugler i gennemsnit flytter sig nedad – store glaskugler mere end små glaskugler. Hermed ses, at kornformen har betydning for flytning ved fluidisering, men ikke ved sub-fluidisering.

FIGUR 30 M2 viser, at ved sub-fluidiseringsflow spreder glaskugler sig kun i den øverste del af filteret ($M2 < 20$). Hermed er glaskuglernes form ikke tilstrækkelig til at give andet resultat end ved sand. Ved fluidisering, havner store glaskugler i den nederste del af filteret (og har dermed $M2 < 20$), mens små glaskugler spredes i hele filteret ($M2 > 25$), dog med det største antal i den nederste del af filteret.

4. Diskussion

I dette kapitel diskuteres udvalgte emner vedrørende flytning af filtermediekorn under returskyl. I første afsnit diskuteres potentielle fordele og ulemper af medieflytning. Derefter diskuteres de tre hovedtrin i skylleprocessen (luft, luft-og-vand, vand) hver for sig. Endelig diskuteres lagkagemodellen for opbygning af filtermedie i et filter.

4.1 Effekten af medieflytning

Undersøgelserne i Rapport 3 har ikke til formål at fastlægge effekten af flytning af filtermedie under returskyl og har dermed ikke svar på om medieflytning bør tilstræbes eller undgås. I stedet fokuserer undersøgelserne på at skaffe evidens for om flytning finder sted og i givet fald i hvilken grad. Alligevel drøftes potentielle effekter her for at sætte fokus på emnet.

Målinger i forbindelse med filtermedieprøver udtaget i forskellige dybder gennem et filter viser, at omsætning af energiholdige stoffer som ammonium ofte sker hurtigst i ét bestemt lag (filterdybdeinterval) og langsomt i andre lag. Det velfungerende lag er dér, hvor bakterierne vokser, da forholdene er mest egnede til vækst og da der er tilstrækkelig tilførsel af substrat. Når filtermediekorn med tilhørende biofilm fra dette lag flyttes til et andet lag som følge af et returskyl, havner bakterierne et sted, hvor vækstmulighederne er ringere, enten på grund af manglende substrat (bunden af filteret) eller øget konkurrence og fældning af jernoxider (toppen af filteret). Derfor risikerer disse bakterier at gå til grunde hurtigere end hvis de forblev i det oprindelige lag. Samtidig erstattes de aktive, flyttede korn med korn fra et lag, hvor biomassen af de ønskede bakterier er mindre. Hermed er der tale om en slags "fortynding" af biomassen i det oprindelige aktive lag, hvilket kan medføre en lavere fjernelsesrate i laget. Dette anses som en ulempe. I filtre med særlige sorptionsmedier (f.eks. aktivt kul til pesticidfjernelse og jernoxider til arsenfjernelse) kan flytning af filtermedie være særlig ødelæggende, da mættet medie fra toppen kan havne i bunden af filteret, hvor desorption af de bundne stoffer lettere når udløbet.

Omvendt, kan flytning af aktiv biomasse til andre lag i filteret forøge filterets robusthed hvis behandlingsanlægget skal kunne klare en varierende belastning. Her tænkes særligt på øget råvandskoncentration (f.eks. af ammonium) og øget flowhastighed, der begge kan resultere i at ammonium når dybere i filteret end normalt med risiko for at det ikke når at blive helt omsat. Hvis filtermediet nederst i filteret inkluderer korn fra det mest aktive lag er der bedre muligheder for, at ammonium alligevel når at blive omsat.

Som det ses af ovenstående diskussion, kan flytning af filtermedie under returskyl medføre både positive og negative effekter. Undersøgelser vil være påkrævet for at kvantificere betydningen af disse effekter under forskellige forhold og for forskellige stoffer.

4.2 Lufts skyl

Narrativen fra vandbranchen er ofte, at returskyl med luft alene er en forholdsvis aggressiv metode, som kan bidrage til at sikre et rent filter. Gængse anbefalinger kan derfor lyde, at luftskyl skal begrænses til f.eks. 1-3 minutter for ikke at "slide" for hårdt på filtermediets biofilm eller omvendt, at luftskyl skal udvides til f.eks. 10 minutter eller mere for at fjerne jern- og manganbelægnings og undgå vækst af filtermediet.

Opfattelsen af, at luftskyl er en meget aggressiv skyllemetode underbygges af visuelle indtryk ved observation af filtertoppen under luftskyl. Her ses, at overfladen "stødkoger", at korn bliver kastet op med voldsom kraft i det overliggende vand, samt at vandet hurtigt bliver grumset.

Det bemærkes, at variationen i luftflowet fra et vandværk til et andet er forholdsvis lille, hvor en flowhastighed på 60 m/t (dvs. 60 m³/time pr. m² filterareal) er meget udbredt.

Resultater fra dette studie indikerer imidlertid, at denne gængse opfattelse ikke er korrekt. Observationer gennem pilotanlæggets skueglas viser, at en lille andel af filtermediet flyttes ganske lidt for at danne kanaler (delvis sammenhængende makroporer), hvor luften transporteres. Efter ½-1 minut er kanalerne dannede og yderligere flytning af filtermediet er så godt som ikke eksisterende. Observationer indikerer, at kun de øverste 1-2 cm er involveret i at blive kastet rundt i vandet over filteret, hvorfor observationer fra toppen af filteret er misvisende for, hvad der egentlig foregår dybere nede i filteret. Hermed er luftskyl måske ikke så aggressiv som hidtil antaget.

Disse resultater synes at tale for en skylleprocedure med et meget kort luftskyl (maks. 1 minut) efterfulgt af luft-og-vand skyl og/eller vandskyl.

4.3 Samtidigt luft-og-vand skyl

Kollaps-puls – et fænomen, der kan opstå under luft-og-vand skyl - er blevet studeret af Amirtharajah (1993) og andre. Fænomenet er et bevægelsesmønster, hvor filtermediet løftes i forbindelse med dannelse af store hulrum i filtermediet, hvorefter boblen pludseligt slipper ud til filtertoppen og hulrummet falder sammen, hvorefter processen gentages. Studier viser, at forskydningskræften ved kollaps-puls fænomenet (kræften, hvormed de enkelte korn slår hinanden) er større end kræfter ved skyl med luft alene eller skyl med vand alene, selv hvis der opnås fuld fluidisering. Ud over forskydningskræfternes størrelse, har metoden fordelen af, at filtermediet er i bevægelse således at filterslam, der er fanget mellem kornene frigives og transporteres opad og fjernes helt fra filteret. Hermed er dette den mest effektive skyllemetode til at sikre et rent filter. På denne baggrund har VandCenter Syd indført et "dybdeskyl" hver anden måned, hvor der anvendes samtidig luft-og-vand skyl i ca. ½ time for at sikre, at kornenes coating holdes nede.

I den nuværende undersøgelse med et pilotfilter, blev kollaps-puls fænomenet ikke observeret til trods for at forskellige kombinationer af luft- og vandflow blev testet. Til gengæld blev der dokumenteret stor flytning af filtermediet via et andet bevægelsesfænomen, der her kaldes for fuld cirkulation. Det betyder, at mediet i nogle områder i filteret stiger mens mediet synker i andre områder i en slags "bundvending". Resultatet er, at filtermediet fra alle lag blandes kraftigt sammen. Det vurderes, at luft-og-vand skyl er årsagen til, at mange fuldskalafiltre med to medier (antracit og kvarts) i Redesign-projektet har vist sig at være totalt opblandet fra top til bund af filteret.

Inddeling af filtermedie f.eks. i et for- og efterfilter er en 100% effektiv måde at undgå denne opblanding af to-medie filtre. En yderligere fordel af at adskille filtermedier i hver sit filter er, at luft-og-vand skyl evt. helt kan undlades på efterfilteret, da behovet for at fjerne jernaflejringer ikke er så stort. Hermed undgås at flytte kvartskorn fra et lag til et andet på efterfilteret. En anden måde at undgå opblanding er at droppe to-medie filtre og anvende ét-medie filtre i stedet.

Det bør bemærkes, at luft-og-vand skyl medfører risiko for, at filtermedie skylles ud ad filteret, såfremt returskylningen fortsætter efter vandspejlet er steget op til skyllevandsrenden. Det medfører, at anvendelse af fysiske anordninger ved skyllevandsrenden, der modvirker udskylning af filtermedie, kan komme på tale.

4.4 Vandskyl

Uanset foregående trin, slutter returskylleproceduren næsten altid af med skyl med vand alene. Effekten er at løsrevet filterslam (f.eks. jernoxid og biofilm) løftes med vandet ud af filteret via skyllevandsrenden og at turbiditeten i skyllevandet falder.

Hvis flowet er tilstrækkeligt til at fluidisere filtermediet er denne proces meget effektiv fordi mediet svæver og de løsrevne filterslampartikler ikke bliver fanget i mediet. En ønsket effekt af vandskyl for to-medie filtre er, at medierne kan blive adskilt efter densitet, dvs. at den lette antracit havner øverst i filteret og den tunge kvarts havner nederst. Hvis skyllet afslutter med en langsom nedtrapning af flowhastigheden, er chancen for adskillelse større. Vandskyl medfører risiko for en uønsket sortering efter kornstørrelse, med de små korn øverst og de store korn nederst. Dette fremmer kagefiltrering, hvor de øverste få cm er særlig effektiv til at fange filterslampartikler, hvilket medfører tidlig tilklogning og korte gangtider. For at undgå denne effekt er det vigtigt at anvende filtermedie med et lavt uensformighedstal. Vandskyl medfører desuden risiko for, at kvartskorn fra én dybde vil blandes med kvartskorn fra andre dybder (og det samme for antracit), hvormed det mest effektive lag fortyndes.

I Redesign-projektet blev der ikke observeret fluidisering under vand-alene skyl i fuldskala. Sammenligning af det aktuelle flow og den beregnede minimumsfluidiseringshastighed underbygger den manglende fluidisering. Denne "sub-fluidiseringspraksis" har stor betydning for filterdriften. Fordelen er, at man kan dimensionere et filter med større korn, uden at man skal bruge et tilsvarende større skyllevandsflow. Og større korn kan medføre længere gangtider. Ulempen er, at returskyllet ikke er så effektivt, da noget af det filterslam, der skal fjernes fra filteret, indfanges i det overliggende filtermedium på samme måde som ved almindelig vandproduktion med nedadrettet flow. Ved subfluidisering kan man heller ikke adskille to medier, der er blevet blandet efter luft-og-vand skyl.

Den ringere rensning som følge af et sub-fluidiseringsvandskyl kan have uheldige konsekvenser såsom turbiditet i timerne umiddelbart efter skyllet samt vækst af filtermediet over årene. Disse konsekvenser er imidlertid så alvorlige, at det anbefales enten at bringe sub-fluidiseringspraksis til ophør (ved brug af mindre filtermedie, medie med lavere densitet eller større skyllevandspumper). Alternativt kan der anvendes flere korte skylletrin (f.eks. luft-og-vand efterfulgt af vand alene), der gentages f.eks. 3 gange (se Rapport 10).

4.5 Lagkagemodel

Rapport 3 fastslår, at forestillingen om en lagkagemodel i vandværksfiltre er død. Resultater tegner et billede af kaotisk flytning af filtermediekorn under returskylleproceduren, hvor graden af flytning afhænger af skylletrin, skylleflow, geometrien af filterbunden samt størrelse, densitet og form af mediekornene. Vandrette lag i et filterbassin ser ikke ud til at eksistere, da fordelingen af korn fra et bestemt lag udviser stor variation både i horisontal og i vertikal retning. Muligheden for at skabe orden igen i filtermediet (hvor kornene finder tilbage til deres oprindelige plads ved at anvende et afsluttende fluidiseringstrin med vand alene) er også begrænset.

5. Referencer

- Amirtharajah, A., 1993. Optimum Backwashing of Filters with Air Scour: A Review. *Wat. Sci. Technol.*, 27(10).
- Baker, M.N., 1934. Sketch of the history of water treatment. *Journal of the AWWA*, Vol 26(7), s. 902-938.
- Baylis, 1959 Review of Filter Bed Design and Methods of Washing. *Journal of AWWA*, s. 1433-1469.
- Cleasby, J.L., Arboleda, J., Burns, D.E., Prendiville, P.W. & Savag, E.S., 1977. Backwashing of Granular Filters. *Journal AWWA*, s. 115-126.
- Duris, M., Radoičić, T.K., Garić-Grulović, R., Arsenijević, Z., Grbavčić, Ž., 2013. Particle velocities in quasi two-dimensional water fluidized beds of spherical particles. *Powder Technology*, 246, s. 98-10.
- Duris, M., Radoicic, T. K., Arsenijevic, Z., Garic-Grulovic, R., & Grbavcic, Z., 2016. Prediction of bed expansion of polydisperse quartz sand mixtures fluidized with water. *Powder Technology* 289, s. 95-103.
- EPA, 1999. 25 years of the Safe Drinking Water Act: history and trends. *Office of Water*. EPA-816-R-99-007.
- Epstein, N., 2005. Teetering. *Powder Technology*, 151, s. 2-14.
- Fitzpatrick, C.S.B. 1993. Observations of particle detachment during filter backwashing. *Water Science and Technology*. Vol 27(10), s. 213-221.
- Gülay, A., Tatari, K., Musovic, S., Mateiu, R.V., Albrechtsen, H.-J. and Smets, B.F. (2014). Internal porosity of mineral coating supports microbial activity in rapid sand filters for groundwater treatment. *Applied and Environmental Microbiology* 80(22), s. 7010-7020.
- Hulbert & Herring, 1929. Studies on the washing of rapid filters. *Journal AWWA*, 21(11) s. 1445-1487.
- Ikhlef, S. & Basu, O.D., 2016. Influence of backwash regime on biofilter performance in drinking water treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 92(7), s. 1777-1784.
- Ives, 1989. Filtration studied with endoscopes. *Wat. Res.* Vol. 23 (7), s. 861-866.
- Pichea, A., Campbell, A., Cleary, S., Douglas, I. & Basua, O.D., 2019. Investigation of backwash strategy on headloss development and particle release in drinking water biofiltration. *Journal of Water Process Engineering* 32, s. 1-9.
- Ranjan, P. & Prem, M., 2000. Schmutzdecke- A Filtration Layer of Slow Sand Filter. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, Vol. (7) s. 637-645.
- Sedlak, D., 2014. Water 4.0: Past, present and future of the world's most vital resource. *Yale University Press*.

Sharma, S.K., Petrushevski, B., Schippers, J.C., 2002. Characterisation of coated sand from iron removal plants. *Water Supply* 2, s. 247–258.

Slavik, I., Jehmlich, A., Uhl, W., (2013). Impact of backwashing procedures on deep bed filtration productivity in drinking water treatment. *Water Research* 47, s. 6348-6357.

Tatari, K., Smets, B.F., Albrechtsen, H.J., 2016. Depth investigation of rapid sand filters for drinking water production reveals strong stratification in nitrification biokinetic behavior. *Water Research*, 15;10, s. 402-410.

van Beek, C. G. E. M., Hiemstra, T., Hofs, B., Nederlof, M.M., van Paassen, J.A.M. & Reijnen, G.K., 2012. Homogeneous, heterogeneous and biological oxidation of iron(II) in rapid sand filtration. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 61 (1): 1–13.

Flytning af filtermediekorn under returskyl

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

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



Miljøstyrelsen
Tolderundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk