

# Returskyl – Vandbehandlingens problembarn

Der produceres frisk drikkevand hver evig eneste dag på Danmarks godt 2000 vandværker. Men med jævne mellemrum må produktionen afbrydes en kort stund for at returskylle vandværkets filtre, der er blevet tilstoppede. Denne returskylning er afgørende for filtrenes funktion men er samtidig et af det mest omdiskuterede emner i vandbehandling.

LOREN RAMSAY, SØREN BASTHOLM  
OLESEN, SARA STARCKE, FENG DU,  
MAJBRITT LUND, RASMUS BÆRENTZEN,  
CLAUS PALUDAN HYNKEMEJER,  
THOMAS VOGN KJELDSEN &  
DITTE ANDREASEN SØBORG

Når vandbehandlingsproblemer melder sig, starter udredningen ofte med at et returskyl overværes i praksis. Her kan den erfarne person udnytte synet og lugtesansen til at få et rigtig godt indblik i filtrenes sundhed. Man kan blandt andet afgøre om vandet er tilstrækkelig klart ved skylningens afslutning (Foto 1) eller om skylleluften fordeles jævnt over hele filtret (Foto 2).

Alle er nok enige om, at returskylning er afgørende for at fjerne jernudfældninger fra filtre og opnå en tilfredsstillende vandbehandling. Men der er ofte stor uenighed om, hvordan returskylning bedst indrettes. Derfor har vi kaldt returskylning for vandbehandlingens problembarn.

Når en skylleprocedure skal designes eller tilpasses, vil det være bedst, hvis subjektive vurderinger baseret på erfaring (fx som at overvære et returskyl) suppleres af forskningsresultater baseret på evidens.

Succeskriterierne for en god skylleprocedure omfatter 1) høj permeabilitet i filtret, der resulterer i lange gangtider, 2) høje stoffjernelsesrater, 3) ingen vækst af filtermediet 4) minimalt forbrug af skyllevand, 5) ingen luftansamlinger 6) ingen opblanding af medier i

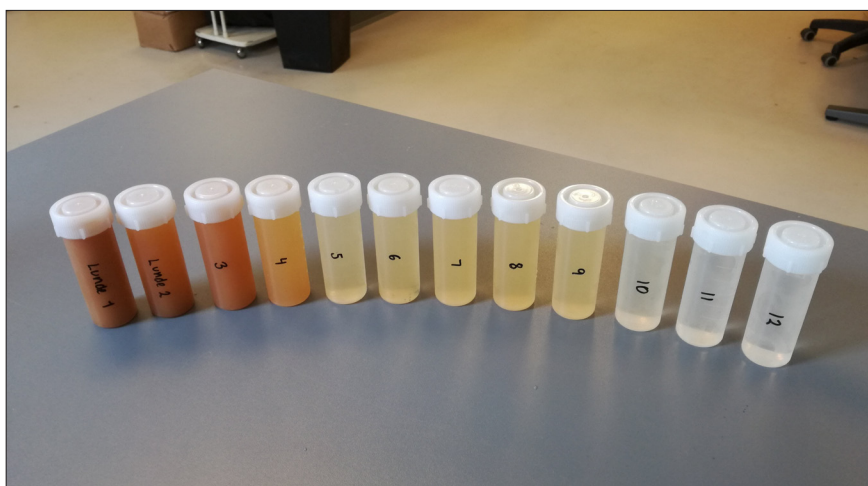


Foto 1. Tidsserie af skyllevandsprøver udtaget hvert 30 sekund. Hvornår er filtret rent nok?



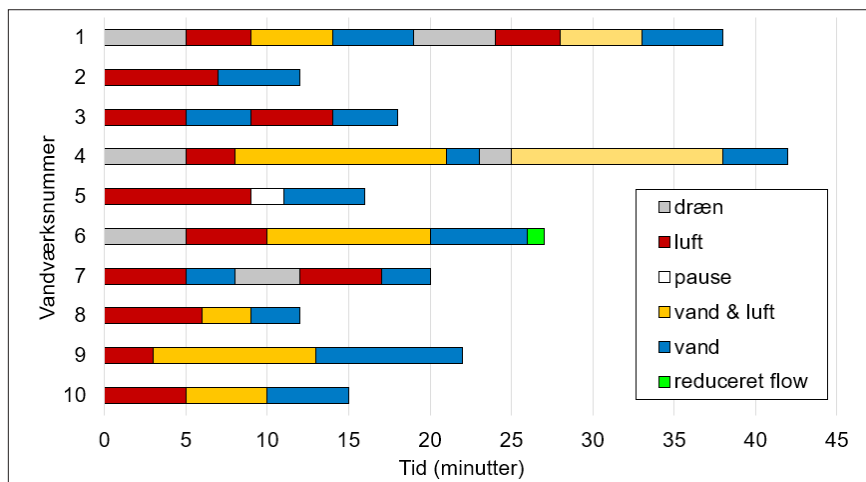
Foto 2. Ujævnt skyl med luft og vand, hvor skyllevandet plasker ud i skyllevandsrenden i bagenden af et gravitationsfilter.

**Definitioner**

Danske vandværker behandler oftest grundvand, der indeholder jern, som udfælder og tilstopper filtrene.

Returskylning er den proces, hvor den almindelige drikkevandsproduktion indstilles og rent vand (og evt. luft) sendes op igennem filtermediet nedfra for at fjerne de udfældede jernoxider og andre urenheder.

Processen udføres med jævne mellemrum, afhængig af filtrets jernbelastning. En gangtid er tidsintervallet mellem to skyl.



Figur 1. Oversigt over skylleproceduren på 10 vandværker ved Aarhus Vand og VandCenter Syd.

to-medie filtre og 7) lav turbiditet ved genoptagelse af drikkevandsproduktion. Det bemærkes, at disse succeskriterier ofte er modstridende, hvorfor design af skylleprocedurer nærmer sig en kunst.

Vi håber at denne artikel kan være med til at skabe mere klarhed om dette fascinerende og komplekse emne. Flere oplysninger i artiklen stammer fra et igangværende fyrtårnsprojekt "Smart Redesign af Drikkevandsproduktion" (Redesign-projektet), der støttes af MUDP (Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram) og gennemføres af Aarhus Vand, VandCenter Syd, Vand & Teknik, Dansk Kvarts Industri, Amphi-Bac, NIRAS og VIA University College.

**Returskylningens historie**

Det første danske vandværk blev bygget med langsomfiltre i Odense i 1853 /1/. Langsomfiltre bliver ikke skyllet, men det øverste par

cm af overfladen – det såkaldte schmutzdecke – bliver afskrabet manuelt efter behov /2/. Ved indførslen af hurtigfiltre var afskrabning af filtrets overflade ikke tilstrækkelig, da dybdefiltrering medførte tilstopning af fx et 30 cm tykt lag. Derfor blev returskylning med vand indført /3/. I USA blev der oprindeligt anvendt et lavt flow (6–12 m/t) i den tro, at biofilmen ikke måtte fjernes. Men tidligt i 1900-tallet blev skyllehastigheden skruet op til 30–40 m/t /4/. Denne skyllehastighed er stadig ofte anvendt i dag.

**Hvad er returskylning?**

På større vandværker består den typiske skylleprocedure i dag ofte af tre trin: lufts skyl, luft-og-vand skyl og vandskyl. Danmarks decentralte forsyningsstruktur består af ca. 2600 almene vandværker, hvoraf kun 340 er kommunalt ejet /5/. Resten er private og ofte små. Ved små vandværker består skyllepro-

ceduren normalt af to trin: lufts skyl efterfulgt af vandskyl. Kun få vandværker benytter sig udelukkende af vandskyl.

Figur 1 er en oversigt over de skylleprocedurer, der anvendes på 10 større vandværker. Som det ses, er der stor variation både i forhold til hvilke trin, der anvendes, samt trinenes varighed. Der er tillige store forskelle i skyllefrekvensen. Så store variationer kan tyde på, at en "best practice" endnu ikke er fastlagt i vandbranchen.

Hypigheden af returskylning fastlægges individuelt for hvert vandværk og afhænger hovedsagelig af filtrets jernbelastning (dvs. kombination af råvandets indhold af jern samt flowet på filtret). Ofte automatiseres skyllehyppighed i praksis på basis af et bestemt antal m<sup>3</sup> behandlet vand, et bestemt tidsinterval, en bestemt opstuvningshøjde eller en kombination af faktorer. Som en del af Redesign-projektet har man undersøgt jernbelastning



Foto 3. Eksempel på en bjælkebund (venstre) og en dysebund (højre).

på 10 vandværker og fundet, at der skylles efter afsætning af 150–900 g jern per m<sup>2</sup>, med et gennemsnit på 360 g. Denne belastning er væsentlig mindre end det dimensioneringsgrundlag på 2900 g som angives for to-medie-filtre /1/.

Anlæg til returskylning kan tage forskellige former. Vand og luft kan indføres samlet i filtrets underkammer, hvorfra de fordeles gennem en bjælkebund eller dysebund (Foto 3). Lufttilførsel kan også ske separat via en harpe, placeret i bærelaget og udformet som et "sildebæn" med hovedfordelingsrør og en række siderør med huller på undersiden /1/. I udlandet findes mange opfindsomme filterbunde med forskellige fordele og ulemper.

Én af de største udfordringer med disse anlægsudformninger er at sikre en jævn fordeling af vand og luft gennem filters tværsnit.

### Vandskyl og fluidisering

Skylleprocedurer afslutter altid med et vandskyl. Normalt bruges der rentvand til dette formål. I mange tilfælde sigtes der mod at opnå en fluidiseringsstilstand under vandskylling, hvor filtermediet løftes af skyllevandet, så kornene svæver i vandet og opfører sig som en væske. Denne tilstand gør det lettere for skidt at slippe ud af kornenes porerum og videre ud til skyllevandsrenden. Derfor er det vigtigt at fastlægge filtermediets minimums fluidiseringshastighed ( $U_{mf}$ ).

Det teoretiske grundlag for beregning af  $U_{mf}$  er Stoke's lov, som er baseret på det punkt, hvor opdriften fra det strømmende vand netop balanceres af tyngdekraften (Figur 2).

For små korn kan  $U_{mf}$  regnes efter Stoke's lov som følger:

$$U_{mf} = \frac{2(\rho_p - \rho_v)}{9} \frac{gr^2}{\mu}$$

hvor

$U_{mf}$  er minimums fluidiseringshastighed (m/s)

$\rho_p$  og  $\rho_v$  er densiteten af hhv. partiklen og vand (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  er dynamisk viskositet af vandet (kg/ms)

$g$  er tyngdeaccelerationen (m/s<sup>2</sup>)

$r$  er radius af partiklen (m)

Det skal bemærkes, at  $U_{mf}$  stiger proportionalt med densitet, men eksponentielt med kornstørrelse. Hermed har en fordobling af kornstørrelse større betydning for fluidisering end en fordobling af forskellen i densitet mellem filtermediekorn og vand. Sagen kompliceres yderligere af, at kornenes diameter stiger og densiteten falder med årene, efterhånden som coatingen vokser.

Stoke's lov benytter imidlertid en række an-

tagelser, der er langt fra virkeligheden. Antagelser inkluderer at kornene ikke påvirker hinanden, at der er laminart flow, at kornene er sfæriske med glatte overflader, og at der kun er tale om én kornstørrelse. Det har givet anledning til en lang række alternative formler, der næsten alle inkluderer parametre, der kun kan bestemmes ved empiriske målinger. En meget simpel af slagsen (hvor filtermediets minimums fluidiseringshastighed i m/t betegnes  $V_{mf}$ ) er som følger /6/:

$$V_{mf} = 40 \times d_{50}^{1,380}$$

hvor

$d_{50}$  er middeldiameter (mm)

$V_{mf}$  er minimums fluidiseringshastighed (m/t)

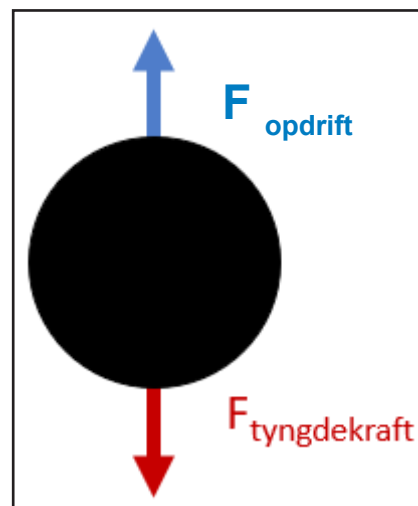
Denne ligning giver anledning til kurven i Figur 3.

Vandskyllets flow begrænses ofte i praksis af skyllevandspumpens kapacitet og typisk ligger på 25 - 40 m/t. Dette flow er utilstrækkeligt til at fluidisere filtermedie bestående af kvartssand med mindre kornenes middeldiameter er mindre end ca. 1 mm. Da mange danske vandværker har valgt større korn, foregår vandskyl i mange tilfælde med et flow i sub-fluidiseringsområdet.

Mediet i et filter begynder at ekspandere når man nærmer sig fluidisering. Der anbefales ofte en filtermedieekspansion på ca. 20% /7/. I Danmark måles ekspansion sjældent i praksis, men er i mange tilfælde langt mindre. Lette filtermedier (fx ekspanderet ler) er blevet introduceret i de senere år og kan fluidiseres ved et lavere vandflow.

### Luftskyl

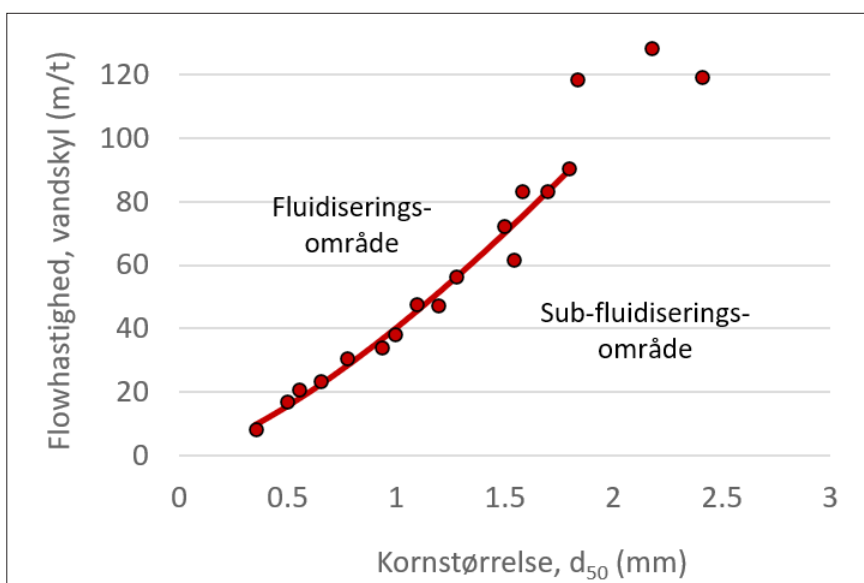
Luftskyllet har primært til hensigt at frigøre



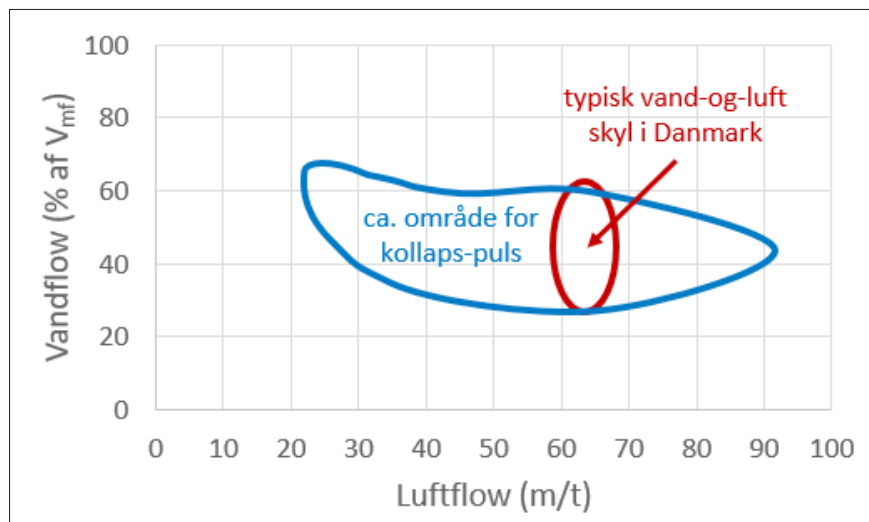
Figur 2. Når de modsatte kræfter er lige store, fluidiserer kornet.

det udfældede jern på filterkornene. I Danmark bruges typisk en luftskyllehastighed på ca. 60 m/t. Ved denne værdi ser filtre ud til at "koge" i toppen, hvilket giver indtrykket af, at luftskyl er en meget aggressiv skyllemetode. Visuelle vurderinger gennem en glasrude i siden af et 50 cm diameter pilotfilter i Redesign-projektet tyder dog på, at filtermediet kun bevæger sig ganske lidt under luftskyl. I skyllens første halve minut, flytter nogle korn sig få mm for at skabe "ormehuller" til lufttransport. Derefter er bevægelserne begrænset til de øverste få cm af filtret.

Skyl med luft-og-vand samtidig er en anden sag. Dette trin anses for at skabe de mest voldsomme gnidninger mellem kornene, især i den øverste halvdel af filtret, hvor vægten af det overliggende lag er mindre. Ved denne metode bliver korn ved toppen af medielaget løftet af det strømmende vand og luftbobler helt til toppen af vandspejlet. Hermed er der



Figur 3. Minimums fluidiseringshastighed baseret på empiri /6/.



Figur 4. Luft- og vandflow områder, hvor kollaps-puls fænomenet kan opstå (fortegnet fra /8/) i forhold til typiske anvendte flow i Danmark.

risiko for, at mediet bliver skyllet helt ud af filtret. Normalt må dette trin derfor stoppe så snart vandet når op til skyllevandsrenden. I udlandet er der udviklet diverse retentionsanordninger, så skyllet kan fortsætte også efter vandet når renden, uden at der mistes filtermedie.

Et særligt fænomen kaldet kollaps-puls kan forekomme ved luft-og-vand skyl /8/. Her danser luften hulrum i filtermediet, som vokser sig stort og straks kolliderer når opdriften af boblen gør, at den slipper ud gennem en sprække mod filtertoppen. Ved for store eller for små flow sker fænomenet ikke (Figur 4).

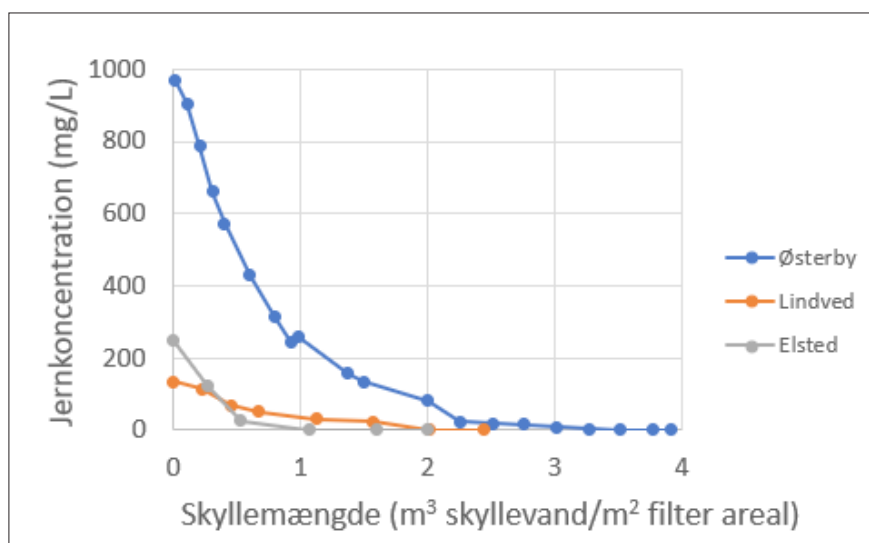
Fænomenet er vanskeligt at påvise i praksis, da det sker under filteroverfladen. Det er muligvis derfor, der ikke har været fokus på kollaps-puls i Danmark.

### Fjernelse af jern og mangan

Et af de vigtige formål med returskyl er at

fjerne jern- og manganoxider, der er tilbageholdt i filtermediet under den foregående gangtid. Man kan altid være i tvivl om hvor længe et skyl skal fortsætte for at opnå et tilstrækkeligt rent filter. En simpel måling af jernindholdet i skyllevand for hvert 30. sekund gør det muligt at visualisere forløbet. Dette er sket i forbindelse med Redesign-projektet (Figur 5). Her ses at skyllevandet fra Østerbyværket har højere jernkoncentrationer i starten og samtidig tager længere tid om at blive rent.

En massebalance for jern kan beregnes ved at måle flow og jernkoncentration i råvand, rentvand og skyllevand hen over en gangtid. Forsøg på Lundeværket (Figur 6) i forbindelse med Redesign-projektet har vist, at 22% af det tilførte jern fra råvandet stadigvæk hænger fast i filtret efter returskyl (gennemsnit af 6 målinger med forskellige skylleprocedurer). Ved at tage en række antagelser blev denne mængde



Figur 5. Udvikling i skyllevandets jernindhold under skylleforløbet.

omregnet til en filtervækst på knap 1 cm om året. Mere nøjagtige beregninger af filtervækst kræver, at der også udføres massebalance for fx mangan og kalk.

En alternativ, men mere langsommelig metode til at bestemme filtermedievækst, er at måle mediehøjden i filterbassinet hvert halve år fx lige efter et returskyl. På grund af ujævnheder i medietoppen skal der udføres en række målinger hver gang.

Der er store forskelle i, hvor let det er at fjerne forskellige metaller fra filtret ved returskyl. Sammenligning af jern/mangan-forhold i råvandet og i filtermediets coating (Figur 7) viser højere værdier i råvandet (dvs. 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.

### Fjernelse af bakterier

For stor bakterievækst i biofiltre er ofte en udfordring i lande, hvor der bruges varmt overfladevand med et højt indhold af organisk stof som råvand. Her fjernes mange bakterier ved returskyl, men ikke så mange, at fjernelse af det organiske stof i råvandet bliver påvirket efter et skyl, med mindre der skylles med chlorholdigt vand /7, 9/.

ATP er et mål for aktiviteten af mikroorganismer. Måling af indholdet af ATP i skyllevand fra et dansk vandværk viser, at det første skyllevand indeholder >200 pg/mL, mens rentvand fra samme vandværk indeholder ca. 1 pg/mL (ikke publicerede data fra VIA University College).

Det kan være vanskeligt at afgøre betydningen af denne fjernelse af aktive bakterier fra filtrene, da bakteriegrupper involveret i ammonium- og manganfjernelse kun udgør en del af den aktive biofilm. Fjernelse af funktionelle bakterier kan dog være problematisk herhjemme, hvor der er dårlige vækstbetingelser på grund af lave koncentrationer af ammonium og mangan i råvandet samt de kolde vandtemperaturer.

### Flytning af filtermedie under skyl

Bakterier i biofiltre kan forekomme lagdelt /10/. Det betyder, at stoffjernelsesrater under almindelig drift kan være høje i visse dybder og lave i andre dybder.

Det er derfor interessant at vide, om et returskyl flytter filtermediekorn så denne lagdeling forstyrres. Pilotfilterforsøg under Redesign-projektet viser, hvordan farvede sandkorn flyttes under et returskyl. De farvede sandkorn havde samme størrelse som fil-

trets fyld. Figur 8 viser antallet af farvede korn i filtermedieprøver udtaget i 20 cm dybdeintervaller efter 10 skyl, der hver afslutter med sub-fluidiseringsflow. Den røde streg viser den oprindelige placering af de farvede korn. Som det ses af grafen, er der stor opblanding i toppen af filtret. Yderligere forsøg med filtermediekorn med forskellig størrelse, densitet og form viser, at disse egenskaber har mindre betydning med mindre der anvendes fluidiseringsflow.

Disse resultater indikerer, at der i to-medie-filtre bestående af antracit og kvarts sagtens kan ske en uønsket opblanding af medierne, hvilket er i overensstemmelse med fuldska-målinger på 6 af 8 undersøgte vandværker med to-medie filtre.

### Vandspild

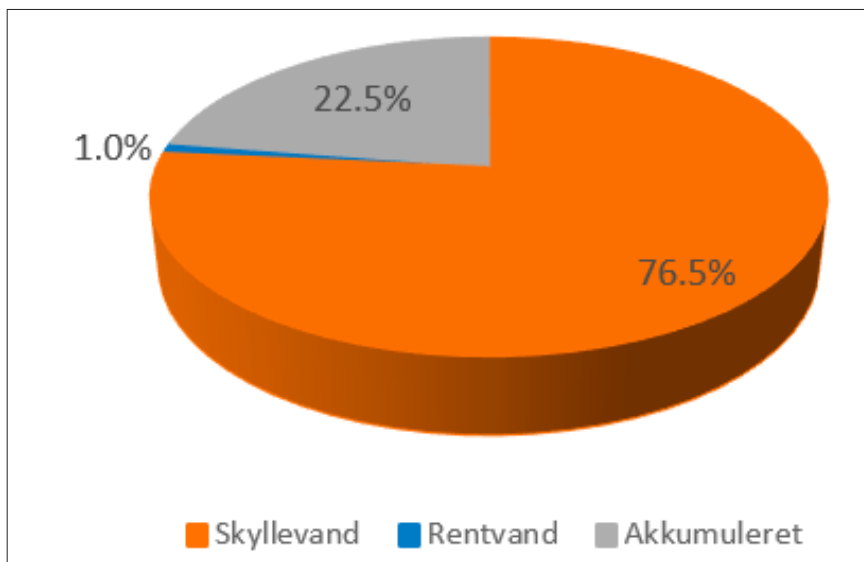
Ét af succeskriterierne for en god returskylling er et minimalt forbrug af skyllevand. I Danmark svarer forbrug af skyllevand til ca. 2,4% af det indvundne vand. Dette kan sammenlignes med vandspild, der stammer fra lækage fra ledningsnet. Af de ca. 50 selskaber, der deltager i DANVAs benchmarking er lækage knap 7% (vægtet pr. m<sup>3</sup>)/5/. Hermed er vandforbrug til skyl mindre end lækage, men til gengæld lettere at begrænse.

Der har hidtil været meget fokus på lækagetab, da der er en økonomisk straf for vand-selskaber, hvis tabet overstiger 10%. Der har været mindre fokus på vandspild ved returskyl undtagen de vandværker, hvor der betales kloakafgift fordi skyllevand ledes til kloak.

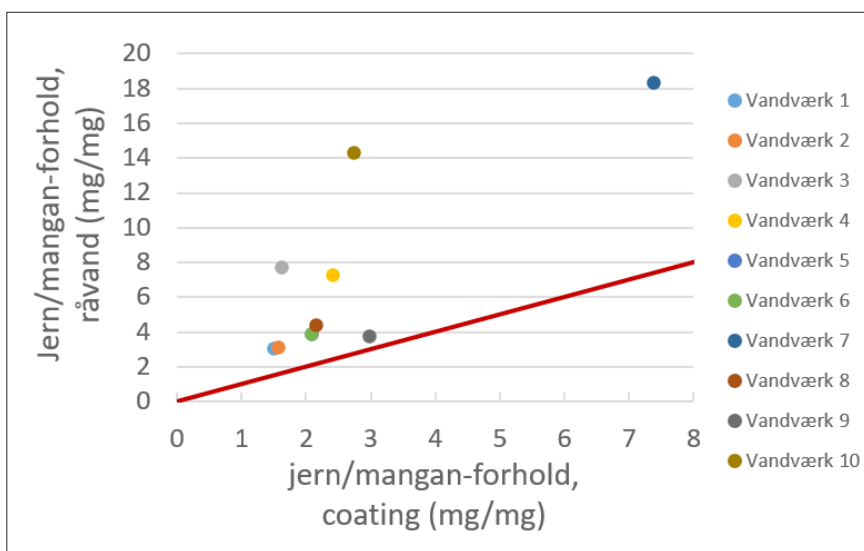
En interessant performance parameter er antal g jern, der fjernes fra filtret per anvendt m<sup>3</sup> skyllevand. I Redesign-projektet fandt man en variation fra 20 - 240 g/m<sup>3</sup> med et gennemsnit på 90 g/m<sup>3</sup>. Den store variation indikerer at nogle vandværker kan reducere skyllevandsmængden.

### Filtermodning efter skyl

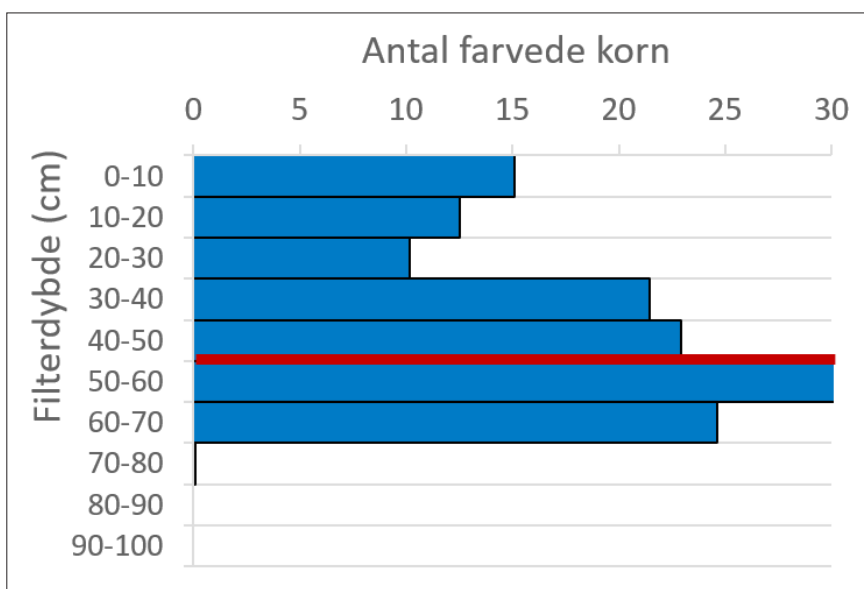
Lige efter et skyl kan turbiditeten i det behandlede vand ved filtrets udløb være høj – fx mere end 10 gange kvalitetskravet (ved forbrugers taphane) på 1 FNU. Som regel vil denne modningsperiode kun vare i minutter eller timer (denne modning må ikke forveksles med modning af nyt filtermedie, der tager flere uger). Men perioden kan alligevel 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



Figur 6. Massebalance for jern på Lundeværket.



Figur 7. Jern/mangan-forholdet i råvand kontra i coatingen på korn fra de øverste 20 cm på 10 vandværksfiltre.



Figur 8. Fordeling af farvede sandkorn efter en sub-fluidiserings skylleprocedure blev udført 10 gange på et pilotfilter (ø50 cm). Den røde streg indikerer den oprindelige position.

(mest problematisk ved brug af grundvand) og andre urenheder.

For at forstå modningsperioden, kan man tænke på hvor vandet står i filtret ved skyllets afslutning. Vandet i filtrets underkammer er det første, der når filterudløbet, når produktion genoptages efter et skyl. Dette vand er rent, da det ikke har været i kontakt med filtermediet. Det næste vand, der når filtrets 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 filtret ved almindelig drift. Bemærk, at modningsperioden kan fortsætte et stykke endnu, hvis filtrets renssevne er blevet forringet af skyllet.

Forskellige løsninger anvendes på visse vandværker til at reducere dette opstartsproblem. Løsninger inkluderer kortvarig produktion til dræn, reduceret flow, og recirkulering.

## Vejen frem

Selv om der har været forsket i returskyl i næsten 100 år er der stadig huller i vores viden. Emner som hvordan flytning af filtermedie under returskyl påvirker stoffjernelse-hastigheder i biofiltre, inhomogeniteter i fordeling af luft og vand i filtermediet i praksis samt modellering af filtermediebevægelse i tre-fase systemer trænger sig på.

Der er også behov for udvikling og standardisering af metoder, der kan anvendes til objektivi at belyse returskyllning via én-gangs målinger og tilbagevendende monitoringsaktiviteter. Målinger kan omfatte fx tidsserier af skyllevandets indhold af stoffer, ekspansion af filtermediet, massebalanceberegninger, samt dybdeprofiler af filtermediets porøsitet, densitet og kornstørrelsesfordeling. Ved brug af

disse metoder kan dansk returskyllningspraksis kortlægges. Det vil muliggøre benchlearning, hvor sammenligning mellem vandværker hjælper til at identificere såvel best practice som de største udfordringer. I Redesign-projektet er der påbegyndt en landsdækkende webbaseret platform "Mercur" til vandbehandlingsdata. Mercur udbygges under et nyt VUDP projekt (Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram) med samme navn og med deltagelse af 7 forsyninger og 3 kommuner.

Vejen frem indebærer også udvikling og afprøvning af nye anlægsdesign i pilot- og fuldskala. Brancheerfaring viser, at nye ideer først spredes, når der er opnået praktiske erfaringer på danske vandværker. For eksempel kan nogle af de modstridende succeskriterier i forbindelse med returskyl evt. løses ved korrekt dimensioneret dobbeltfiltrering, hvor hele forfiltret, og ikke kun de øverste 30 cm, bruges til jernjernelse.

Endelig er der behov for udarbejdelse af en drejebog omkring returskyl. En sådan bog kunne bruges af forsyninger, kommuner, rådgivere og entreprenører. I givet fald skulle drejebogen baseres på såvel evidens fra forskning som erfaring fra praksis. På denne måde kan vi ende med at forstå og afhjælpe vandbehandlingsproblembarn – returskyl.

## Referencer

- /1/ Karlsen, E. & Sørensen, I., 2014. Vandforsyning, 3. udgave. Nyt Teknisk Forlag.
- /2/ EPA, 1999. 25 years of the Safe Drinking Water Act: History and Trends. Office of Water. EPA-816-R-99-007.
- /3/ Hulbert & Herring, 1929. Studies on the washing of rapid filters. Journal AWWA, 21(11) s. 1445-1487.
- /4/ Baylis, 1959. Review of Filter Bed Design and Me-

thods of Washing. Journal of AWWA, pp 1433-1469.

- /5/ DANVA, 2019. DANVAs benchmarking. Herunder: Vand i tal 2019, DANVA Statistik og Benchmarking. <https://www.danva.dk/publikationer/benchmarking-og-statistik/>
- /6/ 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.
- /7/ 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.
- /8/ Amirtharajah, A., 1993. Optimum Backwashing of Filters with Air Scour: A Review. Wat. Sci. Technol., 27(10).
- /9/ Miltner, R., Summers, R.S. & Wang, J.Z., 1995. Biofiltration performance: part 2, effect of backwashing. J. AWWA.
- /10/ 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.

LOREN RAMSAY (lora@via.dk) er docent ved Forskningscenter for Byggeri, Energi, Vand og Klima, og MAJBRIIT LUND og DITTE ANDREASEN SØBORG er forskere. Alle ved VIA University College, Horsens.

SØREN BASTHOLM OLESEN og SARA STARCKE er medejere af Amphi-Bac, Aalborg.

RASMUS BÆRENZEN er driftsingeniør ved Aarhus Vand, Viby J.

CLAUS PALUDAN HYKEMEJER er teamleder ved VandCenter Syd, Odense.

THOMAS VOGN KJELDSEN er salgschef hos Vand & Teknik, Højbjerg.

FENG DU er lektor på Chendu University of Technology, Kina.