



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Jernfjernelse ved returskyl

Rapport 6 i projektet ”Smart Re-design of Drinking Water Production”

MUDP Rapport

September 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Sara Elsborg Starcke

Loren Ramsay

Fotos:

Sara Elsborg Starcke

ISBN: 978-87-7038-546-6

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	7
1. Introduktion	8
1.1 Formål	8
1.2 Baggrund	8
1.3 Vandværksdata	8
1.4 Rapportens indhold	9
2. Metoder	10
2.1 Forsøgsdesign	10
2.2 Beregning af massebalance	11
2.3 Prøvetagning af skyllevand	12
2.4 Analyse af skyllevand	13
2.4.1 Oplukning af jernprøver	13
2.4.2 Manuelle jernmålinger	13
2.4.3 Automatiske jernmålinger	14
3. Resultater	15
3.1 Rentvandskvalitet og filtermodning	15
3.2 Opstuvning	16
3.3 Vandforbrug	17
3.4 Filtervækst	17
3.4.1 Jernkoncentration i indløb og udløb	17
3.4.2 Jernkoncentration i skyllevand	19
3.4.3 Massebalance for jern	22
4. Konklusion	27
5. Referencer	29

Forord

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

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

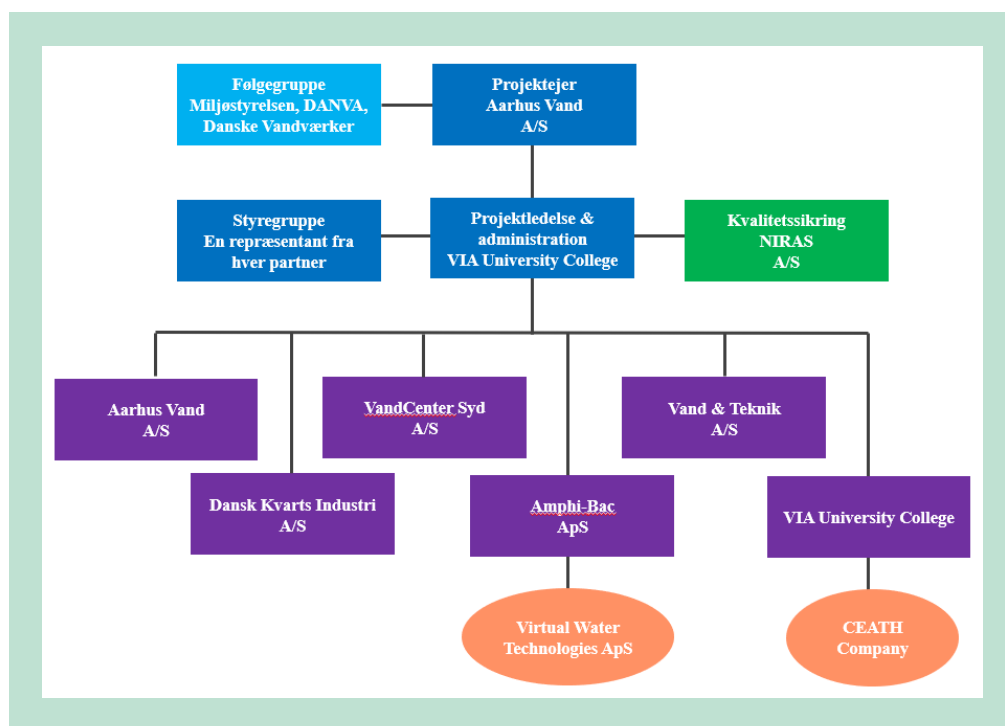
Baggrund

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

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

Projektorganisation

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



FIGUR 1. Diagram over projektorganisation.

Projektets følgegruppe og styregruppe bestod af følgende personer:

Følgegruppe

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

Styregruppe

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

Projektets arbejdsplaner og rapporter

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

Arbejdsplan 1: Etablering af designgrundlag (åben)

Rapport 1: Indsamling af vandbehandlingsdata

Rapport 2: Merkur: Web-baseret platform til vandbehandlingsdata

Arbejdsplan 2: Tekniske forsøg (åben)

Rapport 3: Flytning af filtermediekorn under returskyl

Rapport 4: Jernfjernelsesdybde i biofiltre

Rapport 5: Biostimulering med ammonium

Rapport 6: Jernfjernelse i returskyl

Rapport 7: Filtermediers gangtid

Arbejdsplan 3: SmartSand (kommerciel)

Rapport 8: Udvikling og produktion af SmartSand (fortrolig)

Arbejdspakke 4: SmartArkitektur (åben)

Rapport 9: Vandbehandlingsmodel

Arbejdspakke 5: Fyrtårnsdemonstration i fuldskala (åben)

Rapport 10: Demonstrationsanlæg ved Østerbyværket

Rapport 11: Demonstrationsanlæg ved Lundeværket

Arbejdspakke 6: Projektledelse

Rapport 12: Sammenfatning

Sammenfatning

Denne rapport omhandler jernfjernelse ved returskyl og er Rapport 6 af 12 om fyrtårnsprojektet "Smart Re-design of Drinking Water Production". Formålet med arbejdet er at belyse jernfjernelse ved returskyl ved brug af forskellige skylleprocedurer.

Returskylleprocedurer varierer meget både mellem de enkelte vandforsyningsselskaber og imellem de enkelte vandværker. Ved at optimere skylleprocedurer kan der spares skyllevand og energi til skyllet, opnås større produktionstid og nøjes med mindre skyllevandsbassiner.

Forsøgene i denne rapport er udført ved Lundeværket over en 3-måneders periode. I denne periode blev der undersøgt tre forskellige returskylleprocedurer; 1) Lundeværkets normale dobbeltskyl (hvor skyl med luft alene og vand alene blev gentaget), 2) enkeltskyl (hvor luft alene og vand alene kun blev udført én gang) og 3) lilleskyl (hvor et længerevarende skyl med luft og vand samtidig blev anvendt).

Resultaterne viste, at kvalitetskravet for jern i det behandlede vand blev overholdt i alle forsøg. Opstuvningskurver indikerede, at enkeltskyllet (Skylleprocedure 2) på længere sigt kan give hurtigere opstuvning og dermed kortere gangtid. Der blev ikke målt væsentlige forskelle i modningstiden af filteret mellem de tre skylleprocedurer.

Umiddelbart ser Skylleprocedure 3 ud til at være det bedste skyl for dette filter, selvom skyllet tog en smule længere tid at udføre.

En massebalanceberegning for jern blev udført for at se, om denne parameter kunne anvendes til at vurdere risikoen for filtervækst. Massebalanceberegningen er forholdsvis usikker, hvorfor det anbefales at lave målinger af jernindholdet i skyllevand (f.eks. hver 30 s) over f.eks. 5 gangtider for at opnå bedre data. Beregningen kan dermed bruges som et relativt udtryk for langsigtet filtervækst, men ikke umiddelbart til at forudse den aktuelle filtervækst i cm/år.

1. Introduktion

1.1 Formål

Formålet med arbejdet afleveret her er at belyse jernfjernelse ved returskyl ved brug af forskellige skylleprocedurer. Undersøgelser har vist, at fjernelsen af jern under et returskyl ofte følger en eksponentiel aftagende funktion, hvorfor der benyttes forholdsvist meget skyllevand, energi og tid på at fjerne de sidste 10-20% af jernet i filteret. I denne aktivitet undersøges, hvordan ændringer i returskylleprocessen har indflydelse på filterets gangtid og akkumulering af jern i filteret. Fokus er primært rettet mod at undersøge mulighederne for at forkorte længden af returskyllet eller effektivisere skylleproceduren/skyl-sammensætningen uden mærkbar indflydelse på vandproduktionen eller drikkevandskvaliteten.

1.2 Baggrund

I Danmark bruges grundvand til drikkevandsproduktionen. For at grundvandet kan overholde kravene til drikkevandskvalitet, fjernes bl.a. jern fra grundvandet, ved at vandet filtreres igennem et filter. I sandfilteret vil jern udfælde på filtermediet som jernoxider, og i takt med at mere og mere jernoxid udfælder i filteret, vil det tilstoppes og modstanden vil blive så høj, at vandet ikke længere i tilstrækkelig grad kan komme ned igennem filteret. Det er derfor nødvendigt at returskylle filteret ved at vende vandstrømmen og skylle det udfældende jern af filtermediepartikler.

Returskylleprocedurer varierer meget både mellem de enkelte vandforsyningsselskaber og imellem de enkelte vandværker. Returskylleprocedure fastlægges på baggrund af råvandets sammensætning og filternes fysiske udformning men også ved hjælp af visuelle vurderinger, erfaringer og traditioner.

Forud for projektet, har projektgruppen adspurgt en række vandforsyninger i Danmark om hvilke parametre, der vil være mest værdifulde for deres drift af vandværksfiltre. Forsyningerne var bredt enige om at drikkevandskvalitet og stabil drikkevandsproduktion er de vigtigste parametre at sikre. Dernæst var det også vigtigt, at filtrene ikke voksede for meget, da dette har risiko for at kompromittere filterdriften - og hermed drikkevandsproduktionen - og er omkostningstungt at håndtere.

1.3 Vandværksdata

Der blev udført forsøg i fuldskala på Lundeværket hos Vandcenter Syd. Dette vandværk har tre parallelle åbne filtre, der alle oprindeligt har to-mediefiltre med antracit over kvarts. Filtermediet har været i brug siden værkets opførelse i 1998. Gangtiden på Lundeværket er bestemt ud fra produceret vandmængde og indvindingen blev holdt konstant i projektperioden. De aktive borer blev også holdt fast i projektperioden. Skylleparametre for Lundeværket er præsenteret nedenfor i TABEL 1.

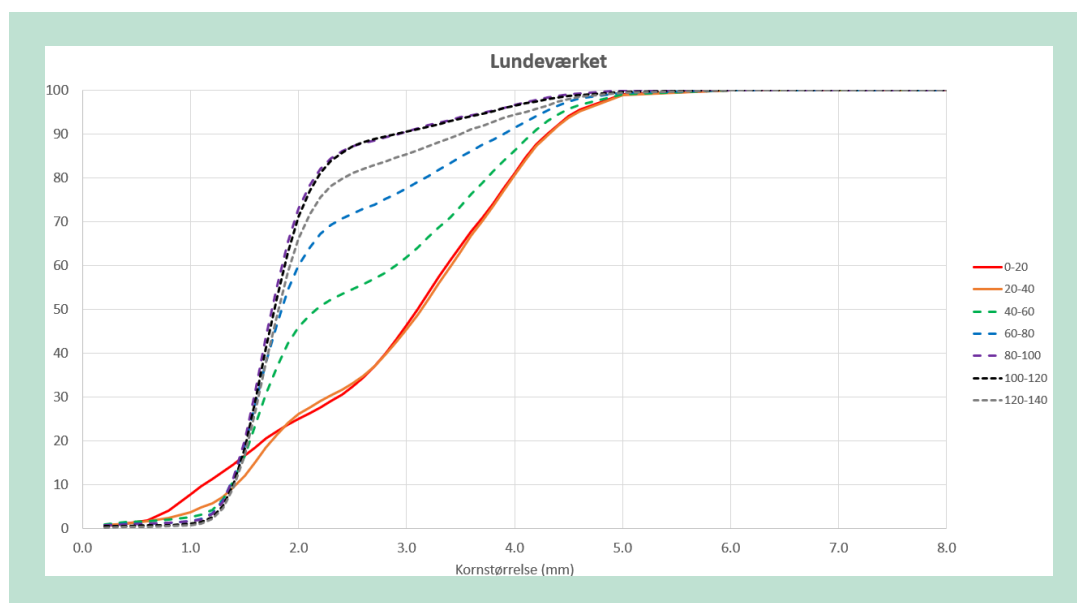
TABEL 1. Skylleparametre for Lundeværket.

Parameter	Enhed	Værdi
Undersøgt filter		F1
Gangtid	m ³	5.000
Normal returskylleprocedure		luft, vand, luft, vand, reduceret opstart
Returskylleflow, vand (vand alene)	m ³ /time	730
Returskylleflowhastighed, vand (vand alene)	m/t	41

Filterareal (pr. filter)	m ²	17,82
Årsproduktion for hele værket	m ³ /år	874.943 (2017)

Filtrenes aktive medielag er opbygget af 40 cm antracit (ukendt størrelse) over 90 cm kvarts (1,4-1,8 mm). Kornstørrelsesfordelingen over 20 cm dybdeintervaller ses i FIGUR 2. Her ses en delvis lagdeling med store korn (formentlig antracit) i toppen og mindre korn (formentlig kvarts) i bunden. I de midterste lag ses en blanding af de to medietyper (bimodal kurve). Det bemærkes, at det øverste lag (rød kurve) viser at næsten 10% af kornene er under 1 mm. Dette finkornede materiale kan have indflydelse på modning efter et returskyl.

At filtermediet er stadig delvis lagdelt efter næsten 25 års drift, kan skyldes 1) at der ikke bruges lille skyl samt 2) at kornstørrelserne er forholdsvis store (hvormed man ikke vil forvente fluidisering under returskyl med vand).



FIGUR 2. Kornstørrelsesfordeling i et filter ved Lundeværket.

1.4 Rapportens indhold

På baggrund af disse svar, er fokusområderne for denne rapport udvalgt til:

1. Rentvandskvalitet
2. Opstuvning
3. Vandforbrug til filterskylning
4. Filtervækst

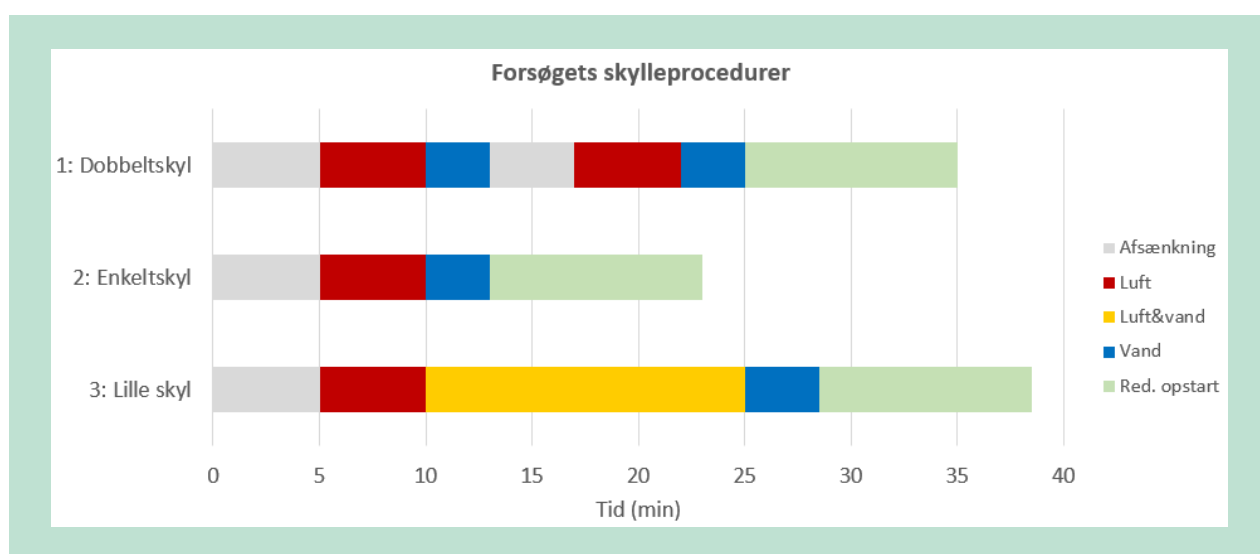
Der ses ikke nærmere på konsekvenserne af slid på biofilm eller på opblanding af lagdelingen i filtrene. Disse emner belyses i en anden del af Redesign-projektet.

2. Metoder

Nedenfor beskrives de metoder, der er blevet anvendt.

2.1 Forsøgsdesign

Anlægget ved Lundeværket blev fulgt over en 3-måneders periode. I denne periode blev der anvendt tre forskellige returskylleprocedurer; 1) Lundeværkets normale dobbeltskyl (hvor skyl med luft alene og vand alene blev gentaget), 2) enkeltskyl (hvor luft alene og vand alene blev udført kun én gang) og 3) lilleskyl (hvor et længere varende skyl med luft og vand samtidig blev anvendt). Skyl med vand og luft samtidigt anses generelt for at være mere effektivt, men mindre brug af tid og skyllevand (Karlsen & Sørensen, 2014). Skylleproceduren for de tre skyl er vist i FIGUR 3 nedenfor.



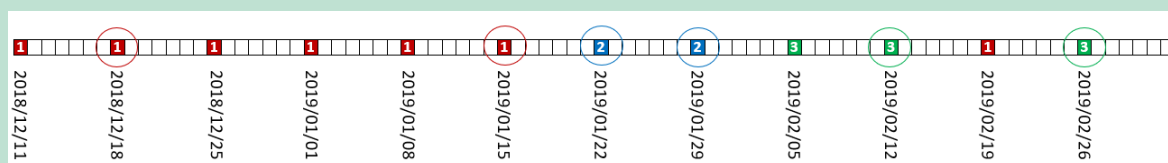
FIGUR 3. Oversigt over de tre anvendte skylleprocedurer.

Til returskyl med samtidig luft + reduceret vand (se foto i FIGUR 4) blev der anvendt 48 m³/t vand (2,7 m³/t) og 1.737 m³/t luft (aflæst på blæserens mærkeplade).



FIGUR 4. Kombineret luft/vand skyl på Lundeværket.

Flowet på Lundeværket blev tilpasset således, at returskyllet kunne fastlægges til at ske med et fast interval på 7 dage, uden at den normale gangtid blev ændret (5000 m³). Forsøgsperioden omfattede i alt 12 returskyl, se FIGUR 5. Hver skylleprocedure blev anvendt efter mindst to gangtider (så vidt muligt i forlængelse af hinanden).

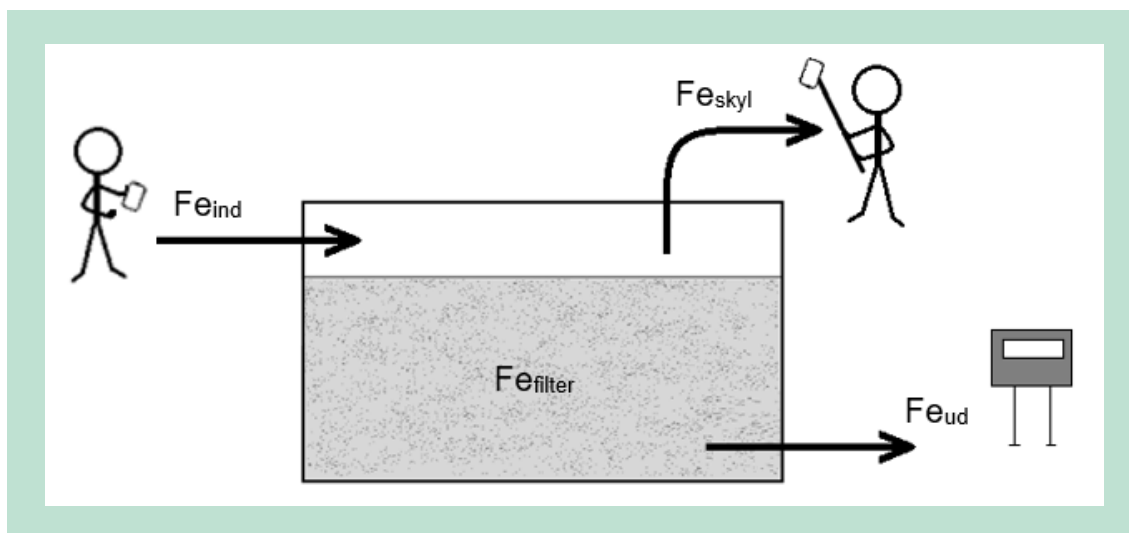


FIGUR 5. Oversigt over forsøgets skylledatoer. Cirklerne angiver skyl, hvor der er målt jern til massebalancen.

Jernkoncentration i returskyllevandet er bestemt til massebalancen (se afsnit 3.4.3) på følgende datoer: Skyllet d. 05-02-19 (markeret med 3*), forløb ikke som det skulle pga. en teknisk detalje, hvorfor der ikke kan konkluderes herpå. Imellem de to sidste skyl med skylleprocedure 3, blev der ved et teknisk uheld skyllet med skylleprocedure 1 (d. 18-02-19).

2.2 Beregning af massebalance

En massebalance blev opstillet over det aktuelle filter (se principskiten i FIGUR 6) for at beregne, hvor meget jern, der løb ind på filtret på den foregående gangtid tilbageholdes i filteret efter et returskyl. Ved at måle hvor meget jern, der kommer ind på filteret og hvor meget jern, der kommer ud fra filteret (ved afgang filter og ved returskyl), antages differencen imellem de to værdier at blive tilbageholdt i filteret.



FIGUR 6. Principskitse, beregning af jern massebalancen over filteret. Indløbskoncentrationen er et beregnet gennemsnit af kontrolprøver. Udløbskoncentrationen måles online med EZ1000 jernmåleren. Jernkoncentrationen i returskyllevandet måles i manuelt udtagne prøver.

Ligning til beregning af massebalancen ses nedenfor:

$$Fe_{ind} = Fe_{ud} + Fe_{skyl} + Fe_{filter}$$

Hvor,

Fe_{ind} = Antal gram jern ind på filteret over en gangtid (5000 m³)

Fe_{ud} = Antal gram jern ud af filteret (behandlet vand) over en gangtid (5000 m³)

Fe_{skyl} = Antal gram jern i skyllevandet i forbindelse med returskyl

Fe_{filter} = Antal gram jern, der tilbageholdes i filteret over en gangtid.

2.3 Prøvetagning af skyllevand

Skyllevandsprøver blev udtaget manuelt fra skyllevandsrenden i 120 ml plastrør. Prøverne udtages midt i skyllerenden for at opnå bedst mulig opblanding af skyllevandet. Prøverne er udtaget med 30 sekunders interval. Billeder af skyllerenden lige inden returskyl og skyllerenden under returskyllet ses på FIGUR 7.



FIGUR 7. Billeder af skyllerenden lige inden prøvetagning (tv) og skyllevandet, der løber i skyllerenden (th), Lundeværket.

Høje jernkoncentrationer fortyndes med hanevand for, at jernkoncentrationen ligger indenfor analysemetodernes måleområde.



FIGUR 8. Prøver udtaget af returskyllevandet i skyllevandsrenden med 30 sekunders interval startende fra venstre.

2.4 Analyse af skyllevand

2.4.1 Oplukning af jernprøver

Forud for bestemmelsen af analysemetoden, blev det undersøgt om de spektrofotometriske kits afviger signifikant fra resultater opnået ved oplukning af jernprøverne med syre. Resultaterne af undersøgelserne viste, at forskellen ikke er større, end hvad der kan tilskrives almindelig analyseusikkerhed både for høje og lave koncentrationer. Jernprøver til oplukning blev analyseret af det akkrediterede analyselaboratorium Analytech med metode M-0071 DS 259/ICP.

2.4.2 Manuelle jernmålinger

Alle manuelt udtagne jernprøver er analyseret efter forhandlerens anbefalinger enten med kitet LCK 321 (produceret af HACH LANGE Denmark) eller NANOCOLOR Ion 3 (produceret af MACHEREY-NAGEL). LCK321 prøver er analyseret på et HACH DR 6000 spektrofotometer.

NANOCOLOR Ion 3 er analyseret på et *NANOCOLOR VIS II* spektrofotometer. Prøver, hvor jernkoncentrationen overskred øvre måleområde for metoden, er fortyndet med hanevand. Prøverne udtaget i skyllerenden i forbindelse med fuldskalaforsøgene er analyseret af VIA University College på deres laboratorie.

2.4.3 Automatiske jernmålinger

I forsøget på at måle ind- og udløbskoncentrationen af jern så præcist som muligt, anvendes en on-line jernmåler fra HACH Lange (EZ1000) til at måle jernkoncentrationen i råvandet og i afgang fra filter. På FIGUR 9 ses jernmåleren (til højre på billedet) opstillet på vandværket, hvor den skiftevis måler jernkoncentrationen i råvand og udløb af filteret hvert kvarter igennem hele gangtiden. På billedet ses også on-line mangan måler (til venstre). Resultater fra manganmåleren kunne ikke anvendes i projektet.



FIGUR 9. Til højre på billedet ses EZ1000 jernmåleren opstillet på vandværket, hvor den måler jernkoncentrationen skiftevis i råvand og udløb fra filter. Til venstre ses manganmåleren.

Da jernkoncentrationen i råvandet overskred det øvre måleområde for jernmåleren, blev råvandet fortyndet kontinuerlig inden analyse. Til det formål blev et fortyndingskammer bygget, hvor to peristaltiske pumper blandede råvandet med vand fra afgang filter (til fortynding).

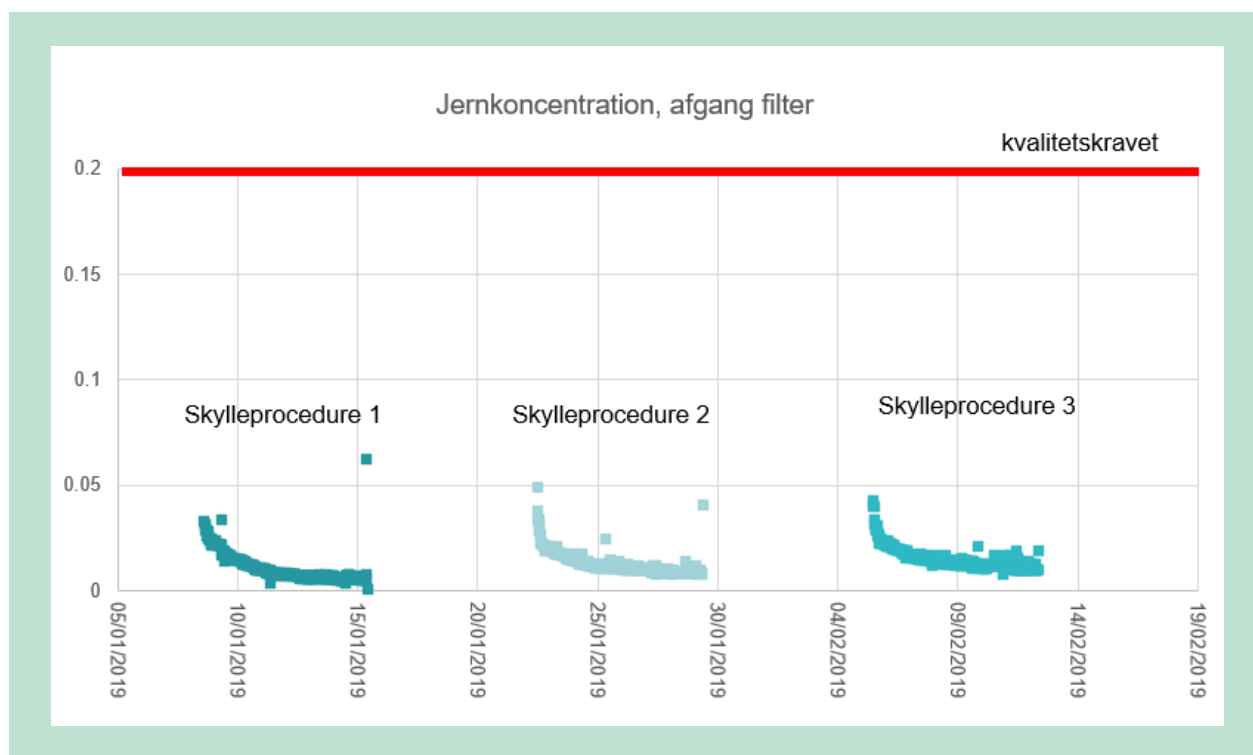
3. Resultater

I det følgende præsenteres resultaterne for hver af de fire fokusområder.

3.1 Rentvandskvalitet og filtermodning

I forsøgsperioden er der løbende udtaget kontrolprøver for at sikre, at kravene til drikkevandskvaliteten ikke blev kompromitteret af ændringerne i returskylle proceduren. Der er særlig fokus på modning af filteret, som forstås som den periode, hvor filteret ikke er fuldt effektivt efter en forstyrrelse (som et returskyl). Det er u hensigtsmæssigt, hvis modningsperioden er for lang, da eksempelvis jern ikke tilbageholdes i filteret i tilstrækkelig grad lige efter returskyllet, og derfor ledes i rentvandstanken eller ledningsnettet.

Ved at måle jernkoncentrationen ved afgang filter med EZ1000 jernmåleren blev det undersøgt, om de forskellige returskylleprocedurer resulterede i forskellige modningsperioder. På FIGUR 10 nedenfor er jernkoncentrationen ved afgang filter plottet for gangtiden efter ændring af hver af de tre skylleprocedurer.



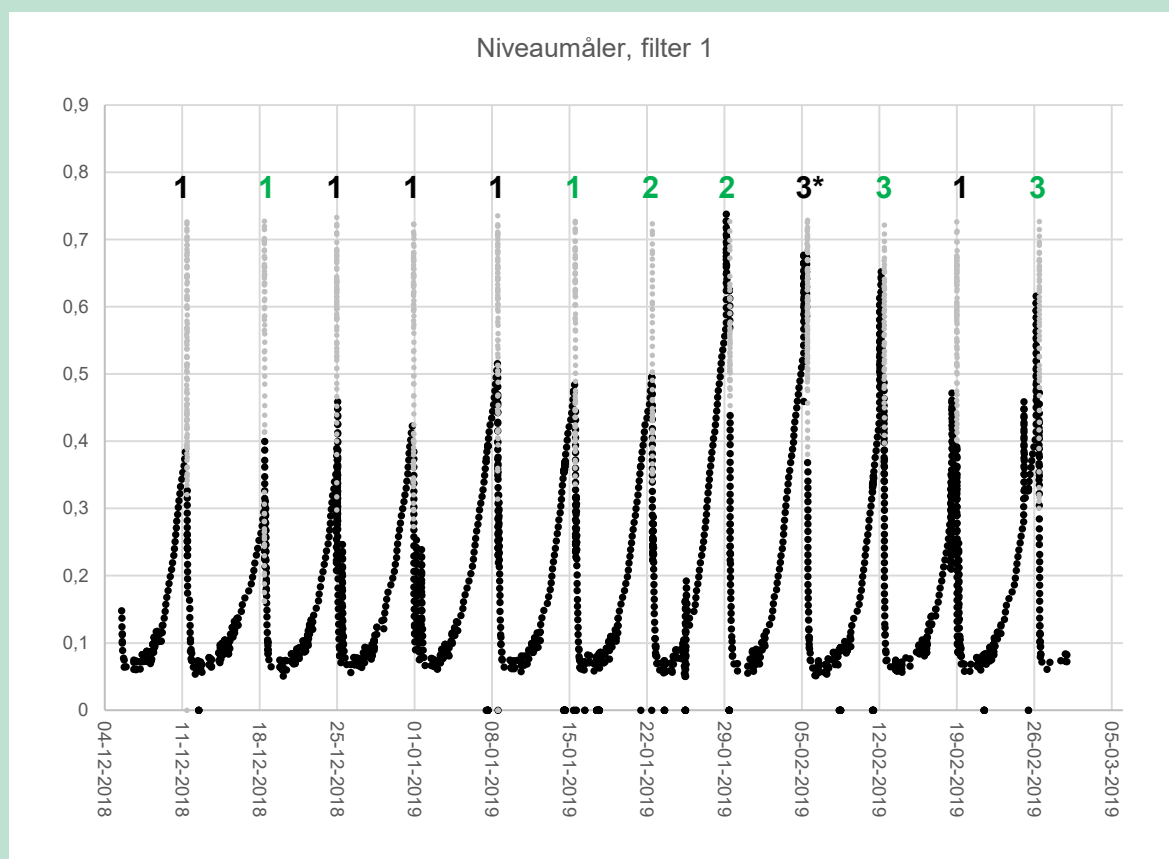
FIGUR 10. Jernkoncentrationen ved afgang filter hen over en gangtid. Data vises for den anden af de to gentagelser, således at jernkoncentrationen måles i anden gangtid efter at skylleproceduren er ændret. Grænseværdien for jern i drikkevand i Danmark er angivet med en rød streg.

Som det ses af figuren, er alle målinger langt under kvalitetskriteriet for jern. I alle tre tilfælde kan man se modningsforløbet, hvor koncentrationerne er højere i de første timer efter returskyllet og er lavere i den midterste og sidste del af returskyllet. Der er ikke tegn på koncentrationsstigning ved slutning af gangtiden, og dermed er gangtiden ikke for lang. I forhold til skylleprocedure 2 og 3, har skylleprocedure 1 en forsinket modning i det første døgn.

Returskylleproceduren forud for data vist for skylleprocedure 3, er ikke forløbet efter planen, da en ventil ikke åbnede som den skulle. Filteret er derfor blevet skylle mere med luft end planlagt, og mindre med vand end planlagt. Det vurderes dog ikke at ændre konklusionen, da en længere periode med luft i skyllet, nærmere må forventes at forværre modningsperioden fremfor det modsatte.

3.2 Opstuvning

I takt med at mere jern ophobes i filteret, stiger filtermodstanden, og der sker en opstuvning af vand over filteroverfladen. Opstuvningen over gangtiden for de forskellige skylleprogrammer er også en indikation af returskyllets effektivitet. FIGUR 11 viser opstuvning mellem returskyl for hele forsøgsperioden. Opstuvning under selve returskylle (niveaumålinger fra returskyllets start til returskyllets slut) er også vist på grafen, men er angivet med lys grå. Hvilket af de tre skylleprocedurer, der er anvendt, er markeret med et tal over skyllet.



FIGUR 11. Opstuvningsgrafer for hele forsøgsperioden. Hvilket skylleprogram, der er anvendt, er markeret med et nummer over returskyllet. *markerer at der skete en fejl under skyllet. Returskyllet brugt til massebalancen, er nummeret med grønt.

Tiden for opstuvning af vandet fra 0,1 meter til 0,25 meter blev beregnet som et gennemsnit for hver skylleprocedure.

Skylleprocedure 1: ca. 50 timer

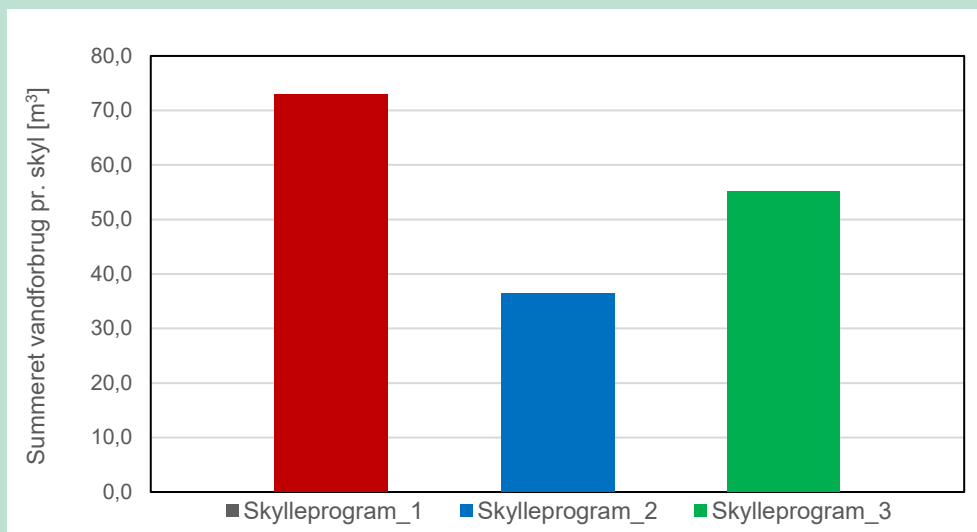
Skylleprocedure 2: ca. 40 timer

Skylleprocedure 3: ca. 50 timer

Den hurtigere opstuvning efter skylleprocedure 2 tyder på, at denne procedure (enkelt skyl) er mindre effektiv til at fjerne jern.

3.3 Vandforbrug

Den samlede mængde vand, der bruges i de forskellige skylleprogrammer, er plottet på FIGUR 12 nedenfor.



FIGUR 12. Den summerede vandmængde pr. skyl, der bruges til returskyllet ved hvert af de tre skylleprogrammer.

Grunden til at der samlet bruges en mindre mængde vand ved Skylleprocedure 3 i forhold til Skylleprocedure 1 – selvom der skylles i længere tid (se FIGUR 3) – er, at der under det kombinerede luft/vand-skyl skylles med et reduceret vandflow ift. skyl med vand alene.

3.4 Filtervækst

Hvis returskyllet ikke fjerner tilstrækkeligt af det ophobede jern i filteret, kan filtermediet vokse. Dette er en langsommelig proces, der foregår gradvist over flere år. Da processen er langsom, er filtervækst vanskeligt at følge for eksempel ved måling af fribord (afstanden mellem skyllevandsrenden og toppen af filtermediet).

En alternativ metode for at vurdere returskylles effekt er at opsætte en massebalance over jern over en enkel gangtid (se afsnit 2.2). Den beregnede mængde jern, der tilbageholdes i filtret, kan derefter bruges som et relativt mål for filtervækst.

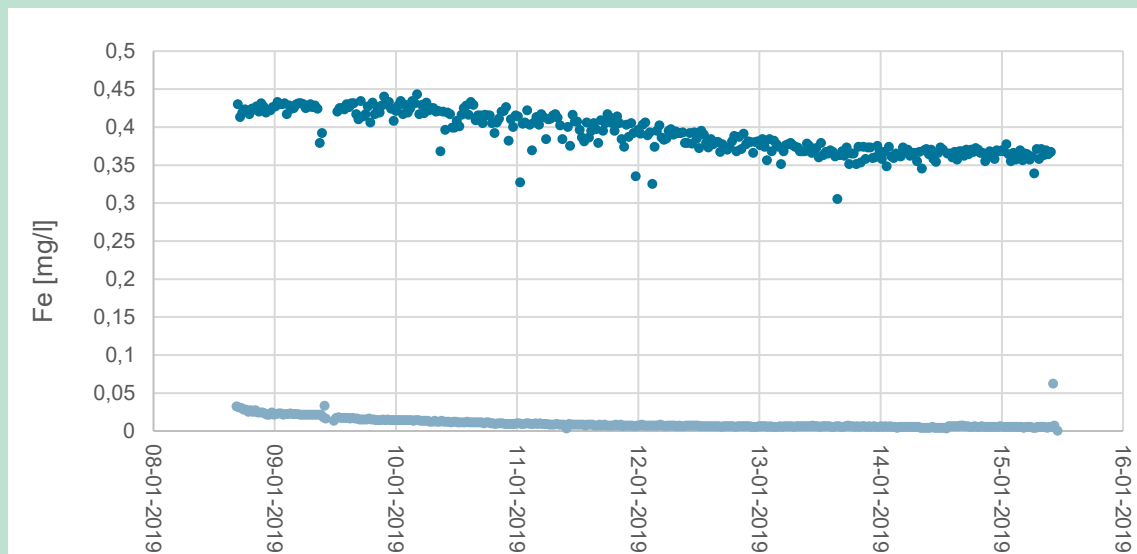
For at minimere usikkerheder i beregningen af massebalancen, blev så mange parametre som muligt låst fast i forsøgsperioden. Dette inkluderede boresammensætningen, flow på filteret, og gangtiden. For hver ændring i skylleprocedure, er massebalancen dobbeltbestemt. Råvandskoncentrationen og udløbskoncentrationen måles online med en EZ1000 jernmåler hvert kvarter.

3.4.1 Jernkoncentration i indløb og udløb

FIGUR 13 viser data fra EZ1000 jernmåleren over en gangtid (7 døgn, 5000 m³). Koncentrationen på andre gangtider i forsøgsperioden (ikke vist) var ikke markant anderledes.

Figuren viser et fald i den målte jernkoncentration i råvandet hen over gangtiden. Dette var uventet, da grundvandskoncentrationen forventes at være stabil. Årsagen til dette tilsyneladende fald kan hænge sammen med at EZ 1000 måleren driver eller at der var problemer med den automatiske fortynding af råvandet før måling (se metodeafsnit 2.4.3). Det fortyndede rå-

vand er blevet målt manuelt flere gange under forsøgsperioden, og koncentrationen i kontrolmålingerne svingede med op til 1,4 mg/l mellem højeste og laveste koncentration. Hermed er det sandsynligt, at den automatiske fortynding ikke fungerede stabilt nok.



FIGUR 13. Eksempel på måling af jernkoncentrationen i råvandet (mørk) og udløbet af filteret (lys) for en gangtid (5000 m³). Målinger er foretaget hvert kvarter. Fortyndingsfaktoren (ca. 4) er ikke ganget på råvandskoncentrationen.

Til massebalancen blev der i stedet for målinger med EZ 1000-apparatet, anvendt en gennemsnitskoncentration af råvandet. Råvandskoncentrationen blev målt manuelt 5 gange i forsøgsperioden, og gennemsnitskoncentrationen af disse målinger er 1,76 mg/l, se TABEL 2. Alle prøverne blev analyseret på Lundeværket umiddelbart efter udtagelse med undtagelse af prøven d. 5/2-19, der er analyseret hos VIA University College dagen efter udtagning.

TABEL 2. Jernkoncentrationen i råvandet målt manuelt med Hach Lange LCK321.

Dato	Jernkoncentration, råvand [mg/l]
11-01-2019	1,83
14-01-2019	1,75
18-01-2019	1,75
22-01-2019	1,76
05-02-2019	1,7
Gennemsnit	1,76

De målte jernkoncentrationer i råvandet var i samme størrelsesorden som de historiske værdier for råvand for Lundeværket, der findes i Jupiterdatabasen (den gennemsnitlige jernkoncentration i indløbet er 1,65 mg/l). Dette kan skyldes, at boresammensætningen har været anderledes. Da dette ikke vides, vurderes det, at være mest reelt at anvende gennemsnitskoncentrationen af de kontrolmålinger, der er foretaget i forsøgsperioden.

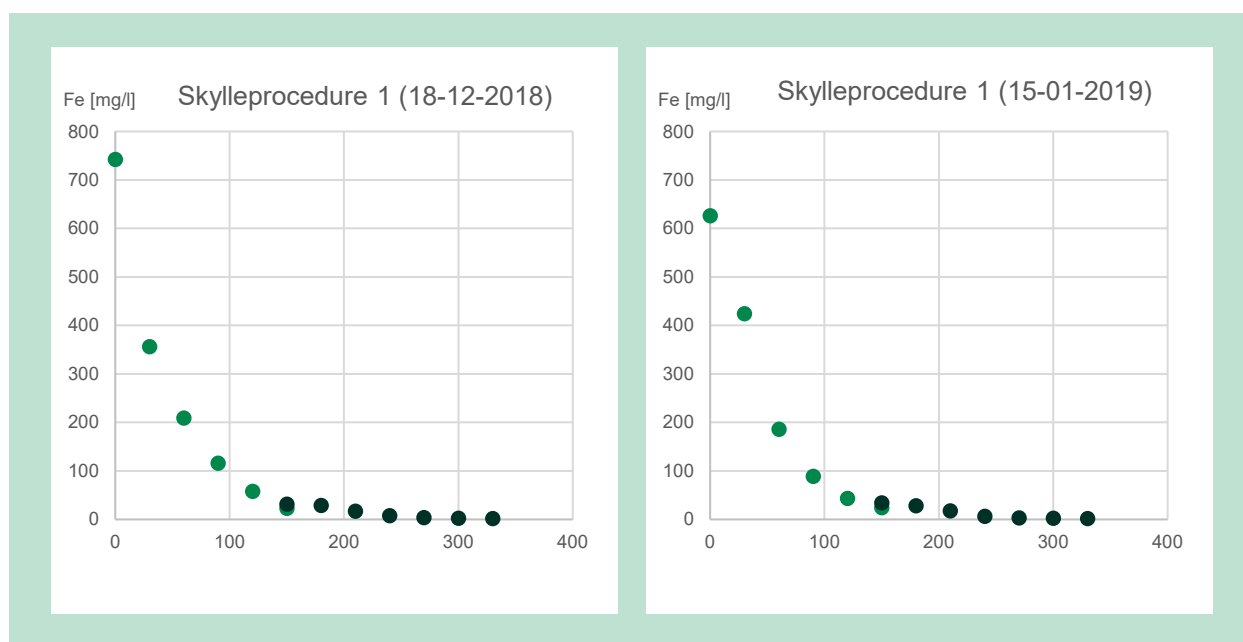
Resultaterne af standardanalyser hentet fra Jupiterdatabasen ses i TABEL 3.

TABEL 3. Resultater af standardanalyser, jernkoncentrationen målt i råvand [mg/l]. Kilde: BestKemi.

Dato	Jernkoncentration, råvand [mg/l]
14/5-2018	1,67
20/3-2012	1,70
11/12-2002	1,6

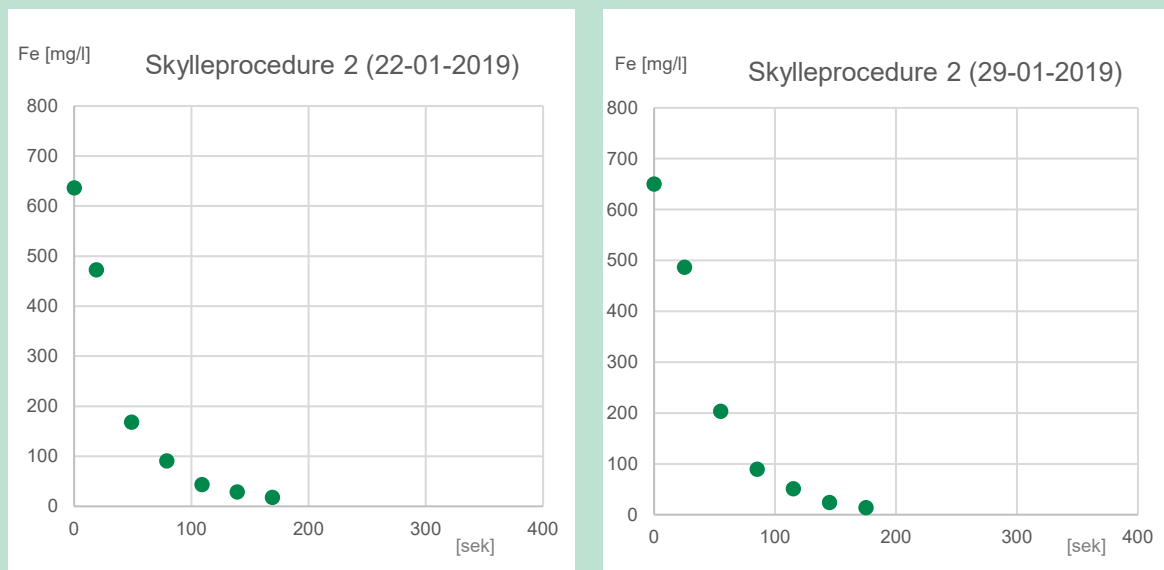
3.4.2 Jernkoncentration i skyllevand

Jern i skyllevandet blev bestemt som angivet i afsnit 2.3. Jernkoncentrationen for Skylleprocedure 1 (to forskellige datoer) er plottet på FIGUR 14 nedenfor. Skylleprocedure 1 består af et dobbelt skyl, hvilket på figuren ses med hver sin farve.



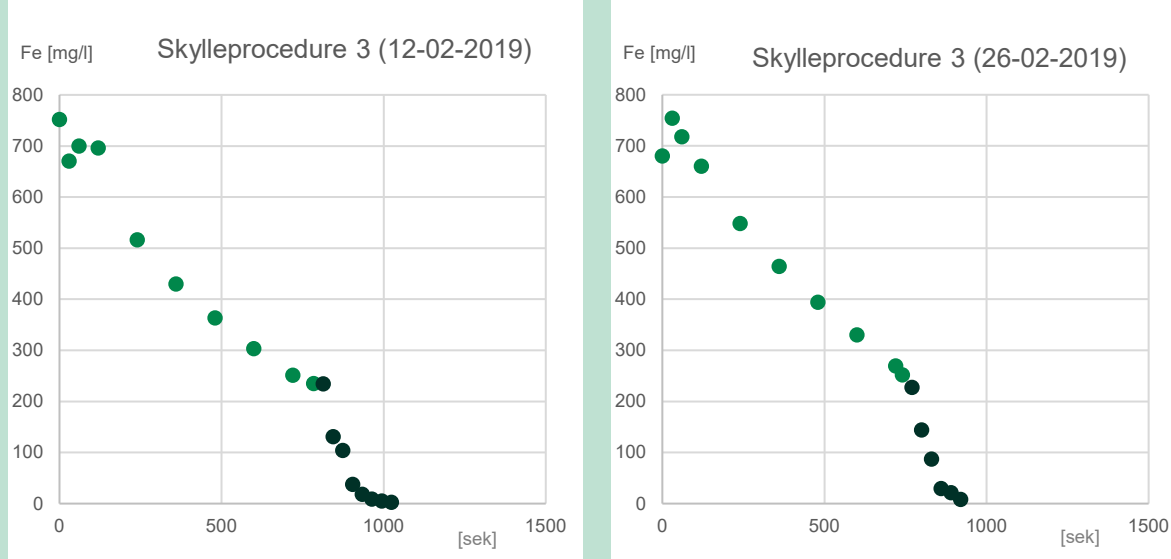
FIGUR 14. Jernkoncentrationen i skyllevandet, udtaget under returskyl (Skylleprocedure 1). Returskyllet fra d. 18. dec. er til venstre og d. 15. jan til højre. Den lyse farve viser jernkoncentrationen i den første del af skyllet, den mørke farve viser jernkoncentrationen i den anden del af skyllet.

Totalt opnås en beregnet fjernelse på hhv. 7383 g og 7.094 g jern for de to datoer for Skylleprocedure 1. FIGUR 14 viser, at >90% af det jern, der fjernes ved returskyllet, fjernes i den første del af skyllet. Det rejser spørgsmålet om, hvorvidt den anden del af returskyllet er nødvendigt. Jernkoncentration for Skylleprocedure 2 (to forskellige datoer) er plottet på FIGUR 15.



FIGUR 15. Jernkoncentrationen i skyllevandet, udtaget under returskyl (skylleprocedure 2). Forsøget er dobbeltbestemt.

Totalt opnås en beregnet fjernelse på hhv. 6.816 g og 7.186 g jern ved Skylleprocedure 2. Jernkoncentrationen for Skylleprocedure 3 (to forskellige datoer) er vist i FIGUR 16. Grundet den forøgede varighed af luft/vand skyllet, er skyllevandsprøverne ikke udtaget med samme tætte interval som tidligere.

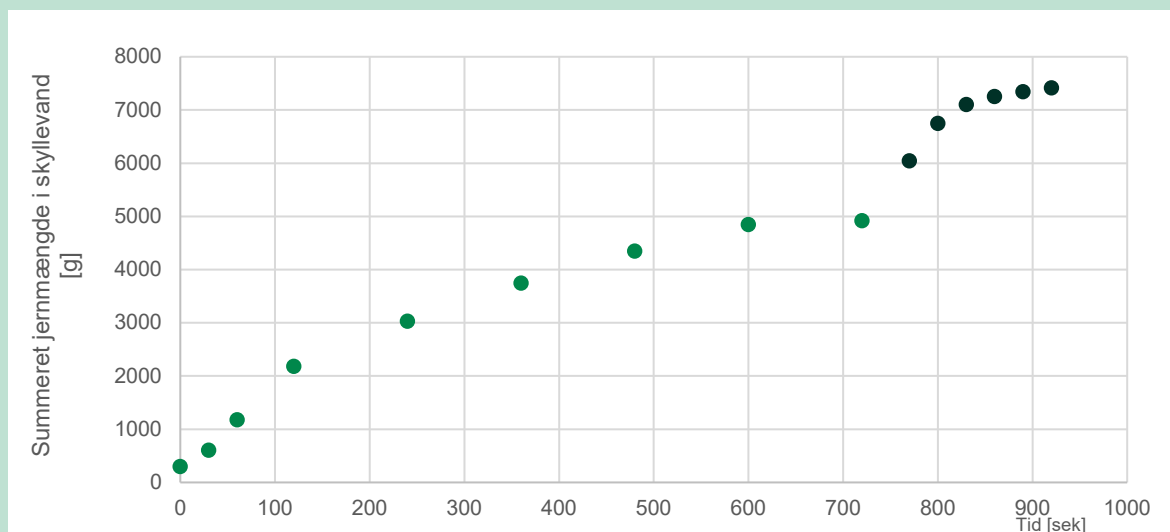


FIGUR 16. Jernkoncentrationen i skyllevandet, udtaget under returskyl (skylleprocedure 3). Forsøget er dobbeltbestemt. Den lyse farve viser jernkoncentrationen i den første del af skyllet, hvor der skylles med kombineret luft og vand. Den mørke farve viser jernkoncentrationen i den sidste del af skyllet, hvor der kun skylles med vand.

Under luft/vand delen af skyllet fjernes hhv. 5.260 g og 4.919 g jern. Den efterfølgende returskyl med vand-alene fjerner yderligere hhv. 2.588 g og 2.498 g jern, så der opnås en samlet jernfjernelse under Skylleprocedure 3 på hhv. 7.849 g 7.417 g jern.

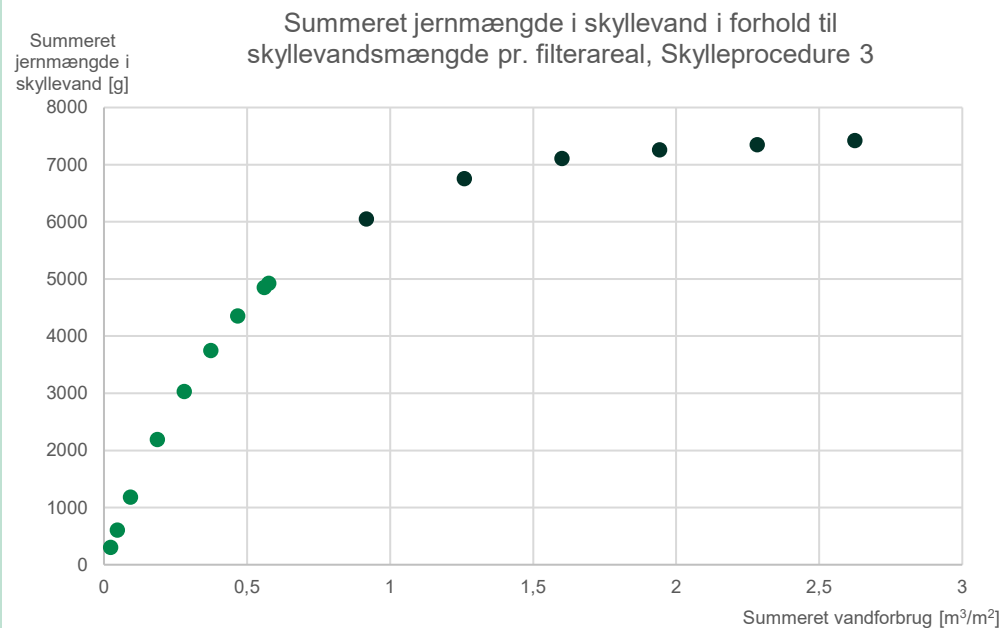
På FIGUR 16 ses et nærmest lineært fald i jernkoncentration under returskyllet med luft/vand. Det afviger fra det eksponentielle fald i koncentration, der ses, når der skylles med vand alene. Man bør dog bemærke, at skyllevandsflowet under luft/vand skyllet er ca. 15 gange lavere, end når der skylles med vand alene. Hermed når der ikke at blive fjernet så meget jern ved luft/vand skyl.

FIGUR 17 viser den summerede jernfjernelse som funktion af tid. Her ses, at skylleeffektiviteten i slutningen af sekvensen med luft og vand samtidig er lav, målt jernfjernelse per minut. Når der skiftes til vand-alene skyl med 15 gange så højt flow, stiger denne effektivitet.



FIGUR 17. Den summerede jernmængde, der fjernes i skylleprocedure 3 som funktion af tiden. Først skylles med luft/vand (markeret med lys farve), og derefter kun med vand med ca. 15 gange højere flow (mørk farve).

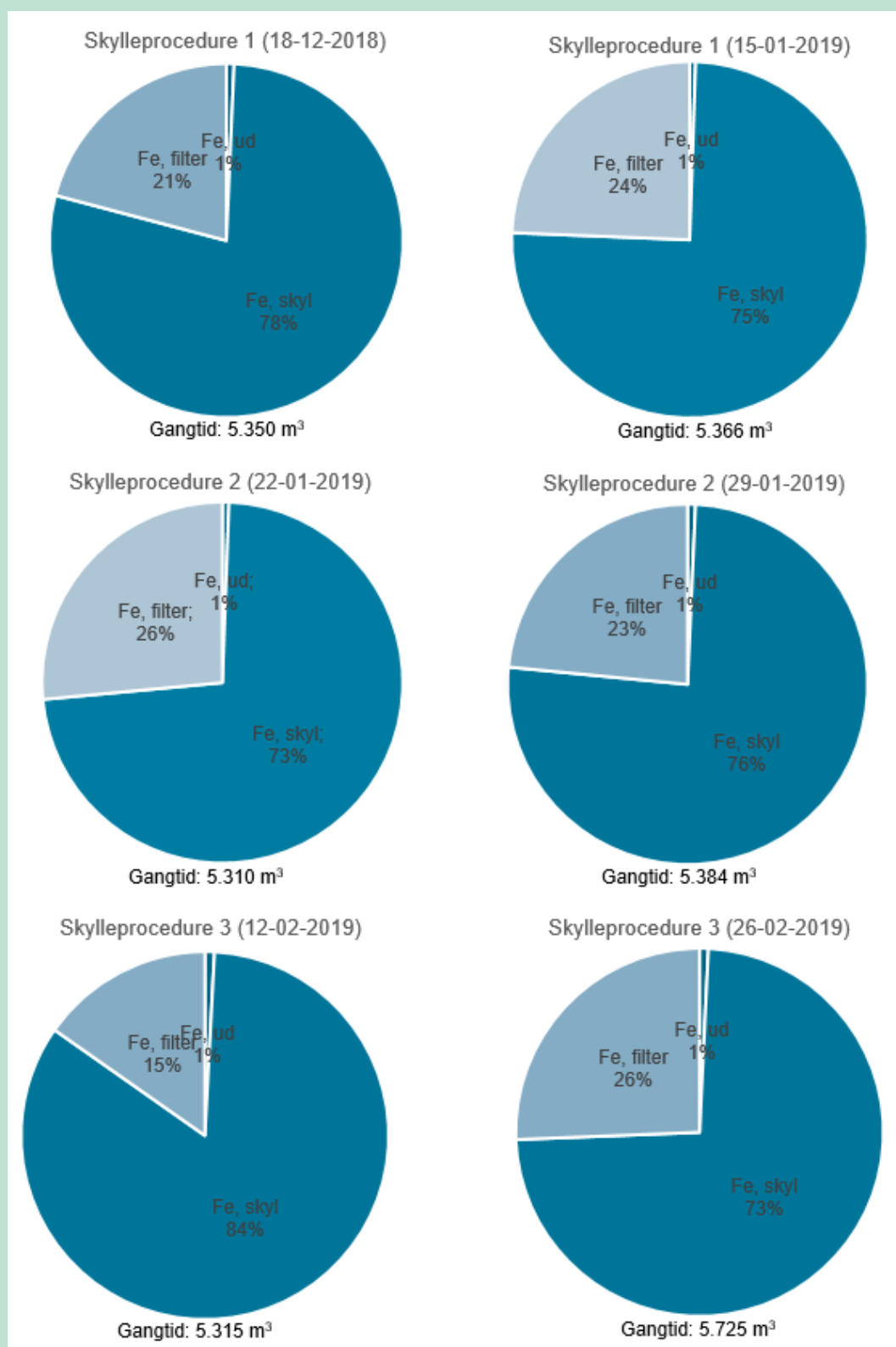
FIGUR 18 viser den summerede jernmængde i skyllevandet som funktion af skyllevandsmængden pr. filterareal. Denne figur viser, at skyllet med luft og vand samtidig har en høj effektivitet, når det er målt i jernfjernelse per m^3 skyllevand. Hermed ses at en vurdering af effektivitet afhænger af, om det er i forhold til forbrugt tid eller forbrugt skyllevandsmængde.



FIGUR 18. Den summerede mængde jern, der fjernes i skyllevandet plottet mod den mængde skyllevand pr. filterareal, der bruges i skyllet (skylleprocedure 3). Data fra returskyl d. 26/2-19. Først skylles med luft/vand (markeret med lys farve), og derefter kun med vand med ca. 15 gange højere flow (mørk farve).

3.4.3 Massebalance for jern

FIGUR 19 viser den procentmæssige fordeling af Fe_{ud} , Fe_{skyl} og $\text{Fe}_{\text{filter}}$ for de enkelte returskylleprocedurer.



FIGUR 19. Skæbne af den jernmængde, der tilføjes et filter med råvandet i løbet af en gangtid, fordelt på rentvand, skyllevand og akkumuleret på filtret. Det ses på FIGUR 19, at der ikke umiddelbart er stor forskel i fordelingen imellem de tre skylleprocedurer. Dog adskiller det første dato for Skylleprocedure 3 sig ved at fjerne mere jern i returskyllet sammenlignet med de andre skylletyper.

Mængden af jern, der akkumuleres i filteret, vurderes at være en god parameter til at sammenligne effekten af ændringer i returskylleprogrammet. Vandforsyningerne er imidlertid interesseret i at kunne omregne den værdi til et udtryk for potentiel filtervækst over tid. Denne omregning er dog udfordrende da den påvirkes af flere faktorer såsom stofsammensætningen af coatingen og coatingens densitet. Ingen af disse blev målt ved dette projekt.

I et forsøg på at opsætte et udtryk, der kan beskrive filtervæksten, antages det i det følgende, at al coatingen udgøres af ferrihydrit ((Fe³⁺)₂O₃), og at nedenstående værdier kan anvendes (TABEL 4). Værdien Fe_{filter} vil ændres afhængigt af hvilken skylleprocedure, der anvendes.

TABEL 4. Værdier anvendt til beregning, jern, Lundeværket, Skylleprocedure 1.

Parameter	Værdi	Enhed	Kildereference
Fe _{filter}	2.150	[g/skyl]	Målt i projekt, Skylleprocedure 1
Fe, molvægt	55,85	[g/mol]	Periodisk system
(Fe ³⁺) ₂ O ₃ •0.5H ₂ O, molvægt	168,7	[g/mol]	Wikipedia
2-line Ferrihydrit, densitet	3,5	[g/cm ³]	Heimstra og Van Riemsdijk, 2009
Filterbed porøsitet	0,4	-	Målt i projekt
Filter areal	178.200	[cm ²]	Målt i projekt

For at omregne mængden af akkumuleret jern i filteret til filtervækst i centimeter pr. år, anvendes følgende udtryk beskrevet i Ligning 1 med jern som eksempel.

Ligning 1

$$\frac{Fe_{Filter} [g Fe]}{skyl} * \frac{1}{gangtid \left[\frac{dage}{skyl} \right]} * \frac{365 dage}{år} * \frac{M FeO \left[\frac{g FeO}{mol FeO} \right]}{M Fe \left[\frac{g Fe}{mol Fe} \right]} * \frac{1 mol FeO}{2 mol Fe} * \frac{1}{\theta} * \frac{1}{\rho FeO \left[\frac{g FeO}{cm^3} \right]} * \frac{1}{filter areal [cm^2]}$$

Ved at indsætte værdierne angivet i TABEL 4, beregnes følgende værdi.

$$\frac{2.150 [g Fe]}{skyl} * \frac{1}{7 \left[\frac{dage}{skyl} \right]} * \frac{365 dage}{år} * \frac{168,7 \left[\frac{g FeO}{mol FeO} \right]}{55,8 \left[\frac{g Fe}{mol Fe} \right]} * \frac{1 mol FeO}{2 mol Fe} * \frac{1}{0,4} * \frac{1}{3,5 \left[\frac{g FeO}{cm^3} \right]} * \frac{1}{17,85 \cdot 10^4 [cm^2]} = 0,68 \frac{cm}{år}$$

Ved at sætte de målte værdier for akkumuleret jern i filteret for de to andre skylleprogrammer ind i ligningen, beregnes resultaterne vist i TABEL 5.

TABEL 5. Estimat af filtervækst baseret på omregning af jern til jernoxid.

	Akkumuleret jern, gennemsnit af to skyl, afrundede værdier [g/gangtid]	Filtervækst [cm/år]
Skylleprocedure 1	2.150	0,68
Skylleprocedure 2	2.350	0,74
Skylleprocedure 3	2.050	0,65

Historiske data viser, at fribordet ved Lundeværkets opførelse i 1998 var 150 cm og at der i januar 2014 er gravet 8 cm af filteret. I projektet er fribordet målt til 69 cm. Hermed ses at den gennemsnitlige filtervækst over en 20 års periode er på 3,65 cm per år. Estimering med massebalance giver tilsyneladende resultater, der er ca. 5 gange mindre end måling af ændring i fribordet over år.

Beregningerne forudsætter, at intet filtermateriale er skyllet ud af filteret igennem årene, at fribordet er blevet målt nøjagtigt, at antallet af centimeter gravet af filteret er korrekt, at antracit og kvarts coates ens, at coatingen er ens i hele filteret, at den akkumulerede jernmængde i filteret har været den samme i hele værkets levetid, og at hele coatingen på filterkornene udgøres af ferrihydrit.

I Redsign-projektet er der udtaget filtermateriale fra 10 vandværker, bl.a. Lundeværket (se Rapport 1). Filtermaterialet er blevet afsyret og coatingens opbygning er blevet bestemt. På filtermaterialet for Lundeværket, viste undersøgelsen, at mangan og calcium udgør en meget lille andel af coatingen. For et andet vandværk, Kastedværket, viste Rapport 1, at coatingen fra Kastedværket indeholdt en meget højere andel af mangan og calcium. Når værdien for akkumuleret jern i filteret for Kastedværket indsættes i Ligning 1, fås en værdi, der kun er halvt så høj som det antal centimeter filteret i Kastedværket vokser. Under antagelse af, at mangan findes i coatingen som Birnessit og 90% af det tilførte mangan ophobes i filteret, kan Ligning 1 også anvendes til at beregne den filtervækst mangan resulterer i. I Kastedværket akkumuleres 1.200 g jern pr. filterskyl. Værdierne for mangan findes i TABEL 6.

TABEL 6. Værdier anvendt til beregning, mangan, Kastedværket.

Parameter	Værdi	Enhed	Kildereference
Mn _{filter}	1.200	[g/skyl]	Målt i projekt
Mn, molvægt	54,94	[g/mol]	Periodisk system
Na,Ca,K) _x (MnIV,MnIII) ₂ O ₄ •1.5(H ₂ O), molvægt	215,71	[g/mol]	Wikipedia
Birnessit, densitet	3	[g/cm ³]	Wikipedia
Filterbed porøsitet	0,4	-	Målt i projekt
Filter areal	119.600	[cm ²]	Målt i projekt

Ved at indsætte værdierne for jern og mangan målt på Kastedværket i Ligning 1 opnås følgende:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1.200 \text{ [g Fe]}}{\text{skyl}} * \frac{1}{3 \left[\frac{\text{dage}}{\text{skyl}} \right]} * \frac{365 \text{ dage}}{\text{år}} * \frac{168,7 \left[\frac{\text{g FeO}}{\text{mol FeO}} \right]}{55,8 \left[\frac{\text{g Fe}}{\text{mol Fe}} \right]} * \frac{1 \text{ mol FeO}}{2 \text{ mol Fe}} * \frac{1}{0,4} * \frac{1}{3,5 \left[\frac{\text{g FeO}}{\text{cm}^3} \right]} * \frac{1}{11,96 \cdot 10^4 \text{ [cm}^2\text{]}} \\
 & + \\
 & \frac{1.200 \text{ [g Mn]}}{\text{skyl}} * \frac{1}{3 \left[\frac{\text{dage}}{\text{skyl}} \right]} * \frac{365 \text{ dage}}{\text{år}} * \frac{215,7 \left[\frac{\text{g MnO}}{\text{mol MnO}} \right]}{54,94 \left[\frac{\text{g Mn}}{\text{mol Mn}} \right]} * \frac{1 \text{ mol MnO}}{2 \text{ mol Mn}} * \frac{1}{0,4} * \frac{1}{3 \left[\frac{\text{g MnO}}{\text{cm}^3} \right]} \\
 & * \frac{1}{11,96 \cdot 10^4 \text{ [cm}^2\text{]}} = 3,3 \frac{\text{cm}}{\text{år}}
 \end{aligned}$$

Filtervæksten i filteret i Kastedværket er målt ved flere lejligheder af forskellige interessenter. I alle tilfælde måles en årlig filtervækst til 4,3-4,5 cm pr. år. Grunden til at beregningen af filtervæksten ligger noget lavere, kan skyldes, at calcium ikke er medtaget i ligningen. Resultater fra aktivitet 1.1. viser, at der findes en del calcium i coatingen fra Kastedværket, hvorfor det

formodes at bidrage til filtervæksten. Der er ikke målt calcium i dette projekt, hvorfor det ikke er muligt at opstille en tilsvarende beregning herfor.

4. Konklusion

Denne rapport undersøger, om man ved hjælp af relativt nemt tilgængelige målemetoder kan vurdere returskyllets effektivitet specifikt for det enkelte filter. Der er undersøgt tre forskellige skylleprocedurer, et dobbelt skyl, et enkelt skyl og et skyl med kombineret luft/vand (lille skyl).

Kvalitetskravet for jern i det behandlede vand blev overholdt i alle forsøg. Undersøgelserne viste heller ikke variation mellem de tre skylleprocedurer i forhold til kvaliteten af det behandlede vand. Dog indikerede opstuvningskurver, at enkeltskyllet (Skylleprocedure 2) på længere sigt kan give hurtigere opstuvning og dermed kortere gangtid. Der er ikke målt væsentlige forskelle i modningstiden af filteret mellem de tre skylleprocedurer.

Nogle af de vigtigste nøgleparametre for hvert skylleprogram er vist i TABEL 7.

TABEL 7. Sammenligning af skylletyper. Mængden af akkumuleret jern pr. gangtid i filteret er et beregnet gennemsnit af de to gentagelser og angivet i hele hundrede sammenholdt med relevante skylleparametre. Farverne viser den relative placering i hver kolonne (grøn=bedst, gul=imellem, rød=værst).

Skylletype	Tid, returskyl [minutter]	Brugt vand- mængde, returskyl [liter]	Akkumuleret jern i filteret, gennemsnit [g]	Estimeret filtervækst [cm/år]
Skylleprocedure 1	35	73.000	2.150	0,68
Skylleprocedure 2	23	36.500	2.380	0,74
Skylleprocedure 3	08,5	55.083	2.050	0,65

Umiddelbart ser Skylleprocedure 3 ud til at være det bedste skyl for dette filter. Skyklet tager en smule længere tid at udføre, men som det ses på FIGUR 17 og FIGUR 18 kan både luft/vand- og vand skyklet sandsynligvis forkortes uden mærkbar forskel. Til gengæld er den brugte vandmængde i Skylleprocedure 3 mindre end Skylleprocedure 1, og Skylleprocedure 3 fjerner mere jern end de andre procedurer. Som nævnt i indledningen, er de langsigtede effekter i forhold til slid af filtermaterialer og eventuel ødelæggelse af lagdelingen i filteret ikke taget med i betragtning, når skylleprocedurerne sammenlignes her.

En vigtig parameter i forhold til returskyllets sammensætning er filtervæksten. For meget filtervækst kan resultere i forringet vandbehandling samt betragtelige ekstra udgifter. Det vurderes, at beregningen af akkumuleret jern i filteret er en god parameter til hurtig vurdering af ændringer i skylleprogrammet, og at den akkumulerede jernmængde kan benyttes som et relativt udtryk for langsigtet filtervækst. Beregningen kan dog ikke umiddelbart bruges til at forudse den aktuelle filtervækst i cm/år. Massebalanceberegningen er usikker på grund af flere faktorer.

Derfor bør der tages særlig hensyn til:

1. Mineralsammensætningen i coatingen bør måles for jern, mangan og calcium. Beregningen af filtervæksten for de to forskellige værker, Lundeværket og Kastedværket, illustrerer dette. Det vurderes, at man, foruden jern, må opsætte en massebalance for mangan og calcium, hvis man vil have et mere reelt bud på filtervæksten.
2. Variation af jern i råvandet kan variere, hvis der anvendes forskellige borer i undersøgelsesperioden. Det foreslås, at boringens sammensætning holdes fast i hele perioden, som det blev gjort ved Lundeværket.

3. Jern i skyllevandet for bestemt skylleprocedure bør måles flere gange i træk (f.eks. 5 gange), for at opnå et bedre datagrundlag. Først herefter skiftes til en ny skylleprocedure. Hermed sikrer man, at filtrets historik får mindre indflydelse på massebalancen. Der skal sikres hyppig prøvetagning i starten af hvert skyl, da det er her, koncentrationerne er højest samt da pumperne ramper langsomt op i starten.

5. Referencer

Heimstra, T. og van Riemsdijk, W.H., 2009. A surface structural model for ferrihydrite I: Sites related to primary charge, molar mass, and mass density. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 15.

Karlsen, E., & Sørensen, I., 2014, Vandforsyning, 3. udgave. Nyt Teknisk Forlag.

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

Projektets formål er at re-designe vandbehandling fra bunden ved radikal nytænkning af drikkevandsproduktionen, hvormed der kan ske en optimering af nye og eksisterende vandværker, herunder reduktion af vandspildet ved returskyl, forkortelse af indkøringen af nye filtre samt større bæredygtighed i drikkevandsproduktion. Projektet har resulteret i formulering af 18 "redesign-principper", der handler om design og drift af drikkevandsbehandling. Principperne blev testet ved fuldskala demonstration af ny filterbeholderdesign samt ny indkøringsprocedure med SmartSand. Endvidere blev principperne udviklet på basis af ny viden om jern- og ammoniumfjernelse samt 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
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk