

# Driftsanalyse og optimering af Deigvad vandværk

*Ved optimering af vandværker udgør en driftsanalyse et godt grundlag for at beslutte, hvilke aktiviteter der skal gennemføres*



Af Henrik Aktor, civilingeniør, Ph.D. Nellemann, Nielsen & Rauschenberger A/S



og Flemming Malker, driftsleder Kalundborg Vandforsyning

## INDLEDNING

### Baggrund

Som følge af stærkt stigende saltindhold i råvandet og stor risiko for ødelæggelse af omkringliggende kildepladser måtte Kalundborg Kommunes nye *Tranemosen Vandværk* stoppes i 1993.

Herved mistede Kalundborg Kommunes Vandforsyning (KKV) en væsentlig behandlingskapacitet sammen med ressourcen, og *Deigvad Vandværk*, placeret i Bjergsted Kommune, leverede derefter praktisk taget alt drikkevand i KKV's forsyningsområde.

KKV har efterfølgende arbejdet intensivt med at fastlægge den langsigtede strategi for den fremtidige vandforsyning. Imidlertid har KKV pga. stigende vandforbrug igennem den følgende periode været i en presset situation med hensyn til kapaciteten inden for både grundvandsressource og vandbehandling.

I foråret 1996 viste nye prognoser for forbruget af behandlet vand af drikkevandskvalitet i KKV's forsyningsområde, at der i perioden 1996-1998 måtte forventes et forbrug på op imod 3,6 mio. m<sup>3</sup> pr år. Det måtte samtidig forventes, at max. døgnforbruget incl. skyllevandsforbrug i samme periode ville tangere 12.500 m<sup>3</sup>, hvilket svarer til et timegennemsnit på 520 m<sup>3</sup>/h.

Hele dette forbrug skulle, som midlertidig foranstaltning, dækkes af det eksisterende filteranlæg på Deigvad Vandværk. De indtil da udførte undersøgelser og analyser af behandlingsanlægget på Deigvad Vandværk viste imidlertid, at der maksimalt kunne behandles 420 m<sup>3</sup>/h, primært pga. opstuvningsproblemer i reaktionsbassin og filterceller.

Der herskede også tvivl om, hvilken resulterende vandkvalitet der kunne leveres i en spidssituation.

Der var således et behov for at få undersøgt vandbehandlingsanlæggets tilstand og funktion, samt vurderet den mulige belastning af anlægget og behovet for ombygning eller renovering.

På denne baggrund gennemførte Nellemann, Nielsen & Rauschenberger A/S i foråret 1996 en *driftsanalyse* af Deigvad Vandværk. På grundlag af resultaterne blev der gennemført en *driftsoptimering* (renovering af filteranlægget) i løbet af vinteren 1996. Herved blev anlæggets behandlingskapacitet udbygget til 580 m<sup>3</sup>/h uden udvidelse af filterarealet.

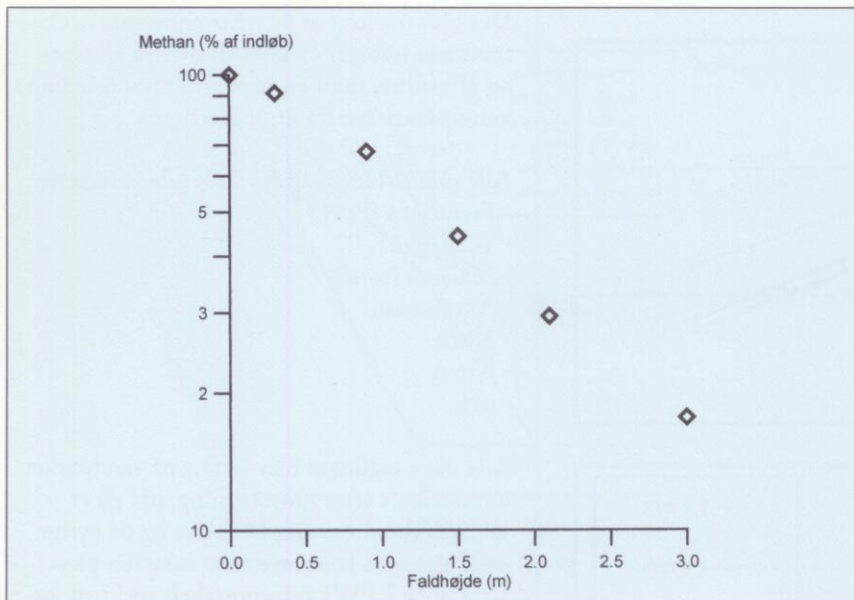
I denne artikel beskriver vi filosofien og arbejdsmetoderne bag driftsanalysen og hovedresultaterne herfra, samt gennemførelsen af den efterfølgende renovering og driftsoptimering.

### Driftsoptimering: Hvorfor, hvornår og hvordan ?

Hver gang en driftsleder eller hans medarbejdere ændrer på start/stopniveauerne for udpumpningsanlægget, indpumpningsperioden for råvandspumperne, filterskyllesekvensen e.l., gennemfører han en driftsoptimering.

Driftsoptimering er en nødvendig og tilbagevendende aktivitet på et godt drevet vandværk. Der er al mulig grund til at revurdere vandværkets maskinkomponenter og enhedsprocesser med jævne mellemrum. I Danmark er den traditionelle opbygning af behandlingsanlægget simpel - sammenlignet med udlandske vandværker - men de grundlæggende kemiske, biologiske og fysiske mekanismer er det absolut ikke !

En væsentlig del af designgrundlaget for de eksisterende vandværker er *tommelfinger*-regler, der ikke altid er lige velbegrundede i fysiske mekanismer. Derfor er det væsentligt med mellemrum at revurdere vandværkets



Figur 1.  
Restindhold af metan på  
iltningstrappens forskellige trin,  
som funktion af den samlede  
faldhøjde.

maskiner, ventiler, filtre osv. på grundlag af ny viden, ændringer i råvandets sammensætning, nye kvalitetskrav til det behandlede vand, nye materialer i distributionsnettet osv.

Denne vurdering udføres efter vores opfattelse bedst i form af en driftsanalyse, der er en systematisk måling af parametre der beskriver anlæggets funktion. Grundlaget for driftsanalysen er en problemformulering - dvs. en præcis beskrivelse af det problem der skal findes en løsning på. Det er således ikke en god ide bare "at tage vandværkets temperatur" - udgangspunktet må nødvendigvis være et ønske om at afhjælpe en utilfredsstillende situation i den daglige drift.

På dette grundlag er det muligt at få målrettet driftsanalysen, så den bliver en teknisk-økonomisk optimal aktivitet, som kan give præcise anvisninger til problemets løsning (**driftsoptimering**). I det aktuelle tilfælde, som beskrives nedenfor, er det således formålet at vurdere de hydrauliske problemer på Deigvad Vandværk, hvorledes de kunne afhjælpes, og om vandværket kunne behandle en 25 % større vandmængde til en tilfredsstillende kvalitet.

## DRIFTSANALYSE AF DEIGVAD VANDVÆRK

### Kort om Deigvad Vandværk

Deigvad Vandværk er opført i 1947 og er siden udbygget i 1960 og i 1990. Vandværket består af en iltningstrappe over et reaktionsbassin og et åbent filteranlæg bestående af 9 parallelle linier, hver med for- og efterfilter, der giver et sammenlagt filterareal på  $2 \times 114 \text{ m}^2$ . Vandværket har et slambassin på ca.  $350 \text{ m}^3$  og en rent-

vandstank på  $1200 \text{ m}^3$  og derudover en mindre sideordnet rentvandstank, der tjener som reservoir for skyllevandspumpen.

På grund af de gentagne udbygninger er fordelingen af det iltede råvand udført i både støbte betonkanaler og støbejernsrør. Resten af rørføringen er temmelig ensartet og gennemført i en central filtergang med rørgalleri for både for- og efterfiltre.

Man har ved udbygningerne valgt at fastholde de oprindelige rørdimensioner og asymmetrisk gennemføring i filterfrontens betonvæg af tilgang for skyllevand og afgang for filtreret vand - et noget uheldigt valg, som det vil fremgå i det følgende.

### Driftsanalysens formål

Formålet var at beskrive og vurdere resultaterne af en funktionstest af:

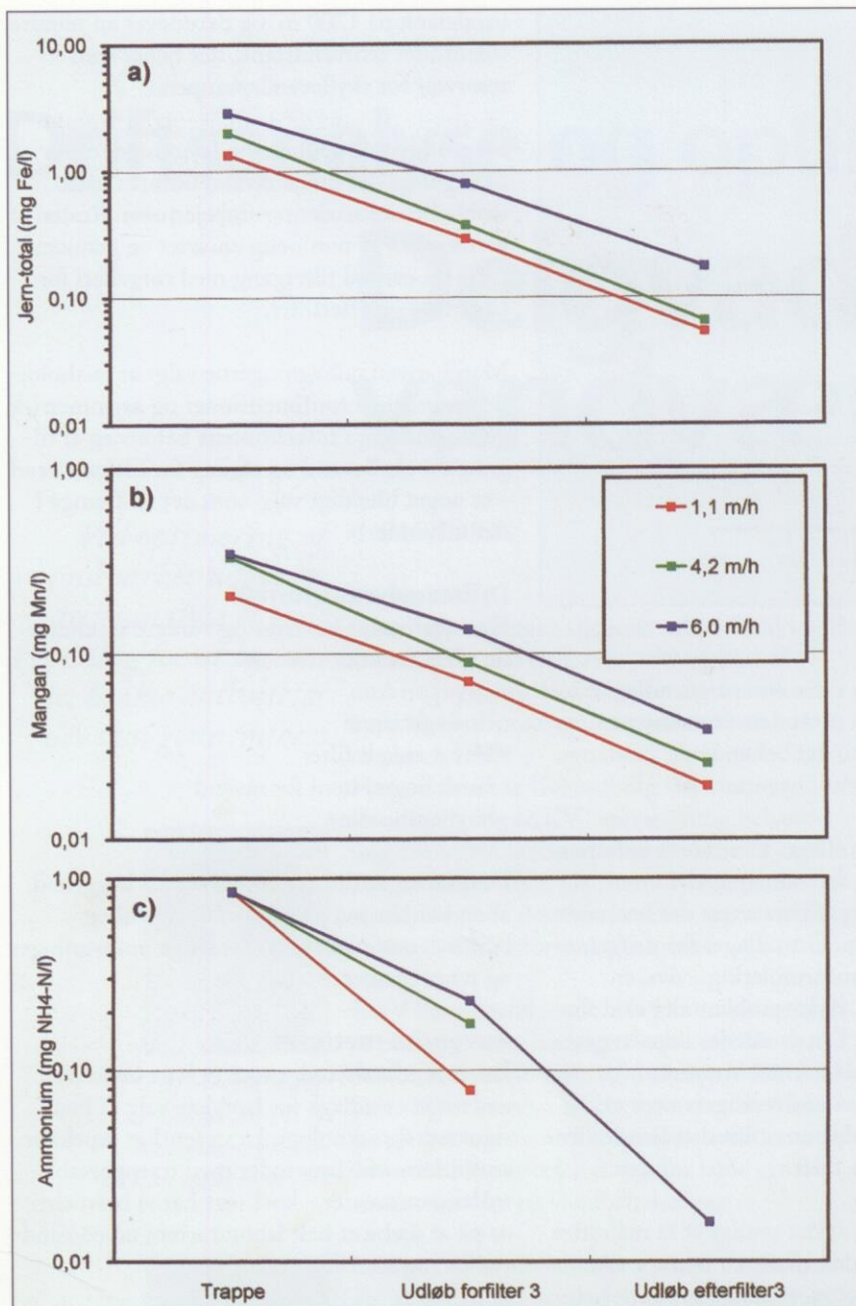
- Iltningstrappe
- Hvert enkelt filter
- Fordelingssystem for råvand
- Skyllprocedure

Derudover skulle driftsanalysen på baggrund af en konklusion give anbefalinger til og beskrive omfanget af nødvendige ombygninger og renoveringer.

### Anvendte metoder

De anvendte metoder som er kort beskrevet nedenfor, er udtryk for bevidste valg af hensigtsmæssig teknologi. Et væsentligt aspekt er anvendelse af feltmetoder med transportable måleinstrumenter - kort sagt har vi bestræbt os på at slæbe et helt laboratorium ud på vandværket, og hvorfor nu det ?

- Man opnår en hurtig tilbagemelding, som er af særlig betydning, når man har en "mærkelig" måling. Er det udtryk for en reel tilstand eller har man begået en fejl? Det får man på denne måde hurtigt svar på, når man selv er tilstede, og man bliver som regel klogere hver gang.
- Analysen af jerns fordeling på opløst og suspenderet form gennemføres bedst og med højeste følsomhed umiddelbart efter prøvetagning. Netop skelen imellem opløst og suspenderet stof er af afgørende betydning for vurdering af filternes funktion.
- Vurdering af dynamiske forhold, som f.eks. ændring i hydraulisk belastning, filtermodning og tryktabsopbygning, kræver et stort antal målinger, der rent praktisk bedst lader sig gennemføre på vandværket.



Figur 2. Fjernelsen af jern (a), mangan (b) og ammonium (c) fra iltningstrappe til udløb fra filterlinje 3 er vist som funktion af filterhastigheden (værdier under 0,01 mg/l er ikke medtaget).

Indsamlingen af oplysninger til denne driftsanalyse omfattede:

- Udtagning og analyse af vandprøver med mobilt udstyr på vandværket.
- Måling af hydraulisk belastning af hver filterlinje
- Adskillelse af udvalgte rørforbindelser
- Afprøvning af filterskylling og undersøgelse af filtermaterialer
- Systematisering af oplysninger om eksisterende borer (vandkemi og ydelser), samt sammensætning af behandlet vand.

Vandværkets funktion er blevet undersøgt ved tre forskellige hydrauliske belastninger svarende til en gennemsnitlig filterhastighed på 2,0 m/h, 3,8 m/h og 5,7 m/h.

Der blev for hver af de tre ovennævnte driftssituationer udtaget en afløbsprøve fra alle for- og efterfiltre, samt én prøve fra råvandsledningen og én prøve fra iltningstrappen.

Alle prøver blev målt for følgende parametre:

- Ferro-jern ( $Fe^{2+}$ )
- Total-jern
- Mangan (total)
- Ammonium
- Nitrit
- Nitrat
- pH

Alle disse målinger blev udført på vandværket umiddelbart efter prøvetagning; pH på et WTW laboratorium pH-meter og de øvrige målinger med kolorimetriske metoder på et Dr. Lange LPW1 transportabelt spektrofotometer. Standarder for jern, mangan, ammonium og nitrat blev medtaget i analyseserien.

Derudover blev der udtaget en serie vandprøver fra iltningstrappen ved maksimal belastning ( $430 \text{ m}^3/\text{h}$ ) og med den ene halvdel af iltningstrappen delvist afspærret for at simulere en belastning større end  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ . Disse prøver blev analyseret for indholdet af methan og svovlbrinte af MLC i Holbæk.

I forbindelse med udtagningen af vandprøver fra forfiltrene blev den hydrauliske belastning af hvert filter målt med en POLYSONIC "clamp-on" flowmåler baseret på ultralydsprincippet.

Der er samtidig målt totale drivtrykstab for hvert filter inkl. tryktab i rør, bøjninger og ventiler.

## RESULTATER AF DRIFTSANALYSEN

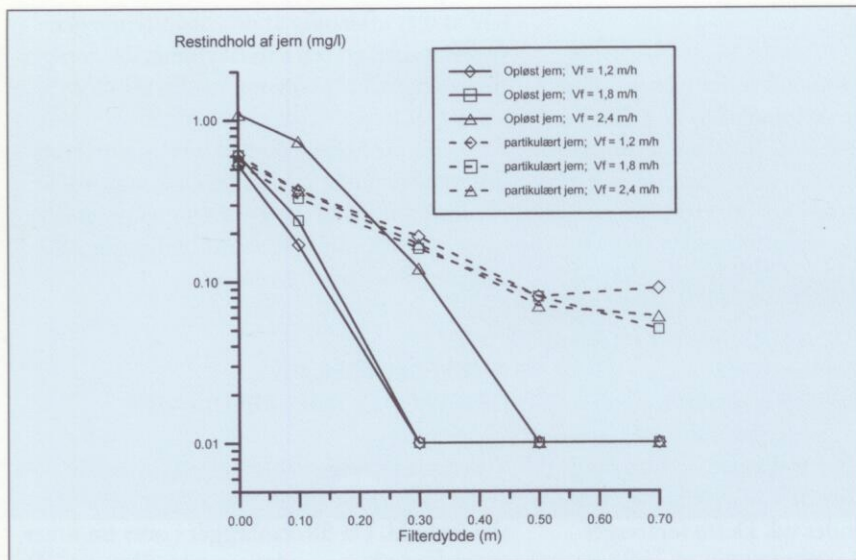
### Iltningstrappens evne til at fjerne methan

Iltningstrappens evne til at fjerne methan blev bestemt til over 80 %, hvilket er vist på figur 1 som funktion af faldlængden.

Den udførte analyse af iltningstrappens funktion er i god overensstemmelse med den forventede (eksponentielt aftagende koncentration af methan med faldhøjden). Iltningstrappen må forventes at opretholde samme rensningsgrad overfor methan (80 %) ved råvandskoncentrationer op til  $1,0 \text{ mg/l}$ , da sådanne koncentrationer ikke vil føre til en mærkbar hævelse af luftens indhold af methan i iltningstårnet.

### Filteranlæg

Ved sammenligning af filteranlæggets funktion under de tre afprøvede driftsforhold fremgik,



Figur 3. Indholdet af opløst jern fjernes langt hurtigere end partikulært jern ned gennem et fuldskalafilter (12,5 m<sup>2</sup>). Restindholdet af jern er vist for forskellige filterhastigheder (Vf).

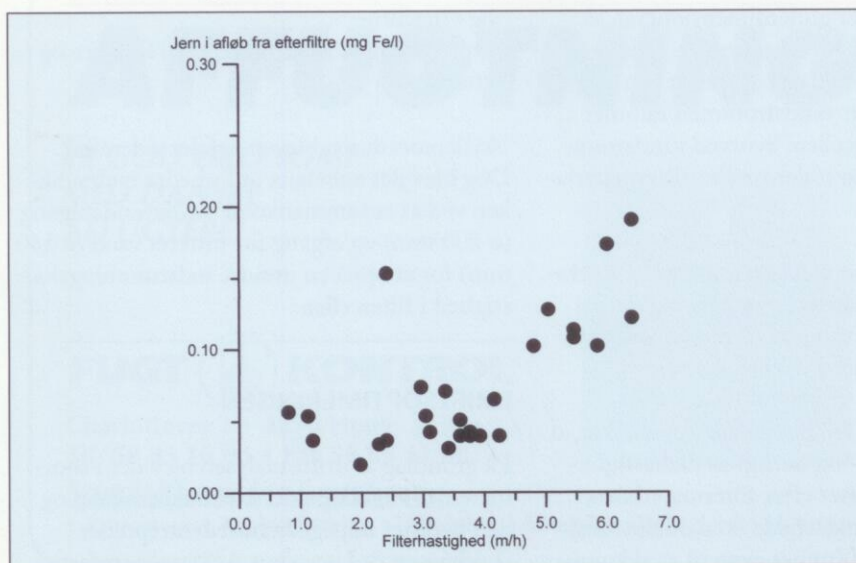
at filteranlæggets funktionsevne var afhængig af den hydrauliske belastning.

Til illustration er rensningsevnen overfor jern, mangan og ammonium i filterline 3 vist på figur 2a-2c. Det er et generelt træk, at renssevnen i forfiltre er lavere end i efterfiltre, hvilket på figur 2a-2c er særlig tydeligt mht. til fjernelsen af mangan og ammonium (kurverne "knækker" i logaritmisk afbildning).

Ammonium og praktisk taget al mangan forekommer i vandprøverne på opløst form, og fjernelsen skyldes hovedsagelig optagelse og omdannelse i den biologisk aktive filmhud på filtermaterialet, som etableres i et veldrevet filter (biofilm). En væsentlig del af manganfjernelsen skyldes dog også adsorption i manganoxidbelægninger på filtermaterialet (som derved bliver sort).

Tilsvarende forhold gælder for filternes evne til at fjerne jern. Fjernelsen af jern er dog mere

Figur 4. Jernindholdet i afløbet fra efterfiltrene stiger over den anbefalede værdi (0,05 mg/l) ved højere filterhastigheder.



kompliceret, da jern både forekommer på opløst form og som mikroskopiske (kolloide) partikler. Ændringer i indholdet af jern og den relative betydning af de forskellige jernfraktioner skyldes primært:

- Aflejring af partikulært jern i filterets pore-volume.
- Resuspendering af partikulært jern fra pore-volume.
- Omdannelse af opløst jern til partikulært jern ved iltning.
- Adsorption af opløst jern på jernoxid-belægninger og okkerslam i filteret.
- Iltning af opløst jern i filterets biofilm (jernbakterier).

Disse ovennævnte mekanismer har som regel alle væsentlig betydning. På figur 3 er der vist resultatet af feltmålinger fra et fuldskalafilter (12,5 m<sup>2</sup>). Det resterende indhold af jern er vist som funktion af filterdybde og er opdelt på opløst [Fe(II)] og partikulær [Fe(III)] form. Det fremgår tydeligt, at fjernelsen af opløst jern er væsentlig hurtigere end fjernelsen af partikulært jern.

Fjernelsen af jern som funktion af de påtvungne filterhastighed er også vist på figur 4 for udløbet fra efterfiltrene på Deigvad. Det fremgår, at der i udløbet fra efterfiltrene vil være ca. 0,1 mg Fe/l eller derover ved høje belastninger, hvilket er over den anbefalede grænseværdi (0,05 mg Fe/l), men under den maksimale grænseværdi (0,20 mg Fe/l).

### Hydraulik

Undersøgelsen af fordelingsarrangementets og filteranlæggets hydrauliske egenskaber viste, at drivtrykstabene på forfiltrene var meget væsentlige og generelt oversteg hvad man må forvente for de anvendte grove filtermaterialer.

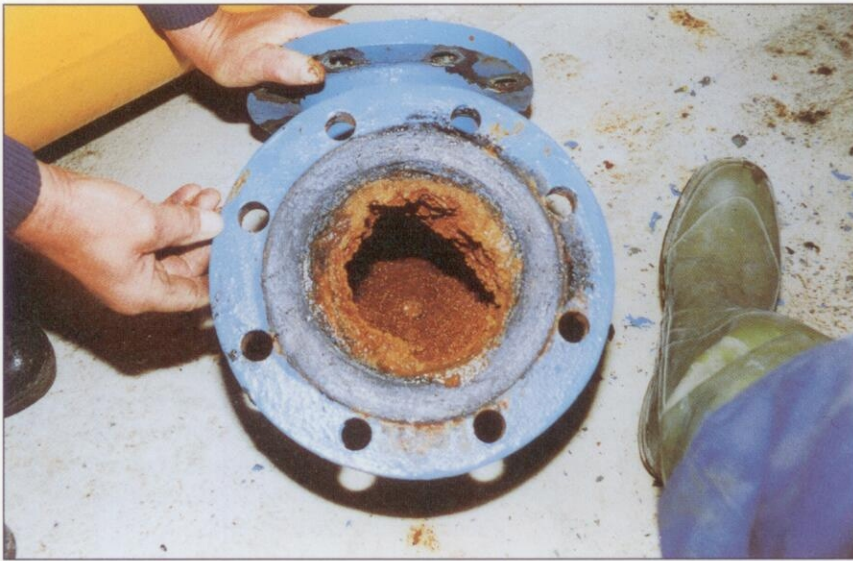
Som et væsentligt resultat af analysen kunne en sammenholdelse af forfiltrernes udmærkede stoffjernelse med deres dårlige hydrauliske egenskaber anvendes til at udpege rørforbindelserne mellem for- og efterfiltre som sandsynlige hydrauliske bremsere.

Dette blev eftervist ved adskillelse af rørforbindelserne i en enkelt filterlinie (se figur 5). Det blev her vurderet, at rørforbindelsens tværsnitsareal var reduceret til ca. det halve af det oprindelige, og ydermere havde en særdeles ru overflade som følge af en uensartet afsætning af okker. Sådanne aflejringer i rørforbindelserne er en logisk konsekvens på dobbelfilteranlæg, hvor der netop er væsentlige stofindhold tilbage efter forfiltrene.

## Skylleprocedure

Skylleproceduren som anvendes på vandværket giver mulighed for skylning af op til 6 filtre i én sekvens. Der anvendes først luftskylning, dernæst kombineret luft-/vandskylning og afslutningsvis udelukkende vandskylning. Skylleproceduren gennemføres med fastlagt mellemrum og varer 3-3½ time (5 filtre).

Der kunne observeres en mangelfuld fordeling af skyllevandet i forfiltrerne både under kombinerede luft/vandskylninger og vandskylning alene. Hovedparten af skyllevandet steg op i den bageste tredjedel af filtrerne og hovedsagelig i forfiltrernes højre side, hvor tilgangsrøret for skyllevand munder ud. Dette forårsager



Figur 5.  
En kontrol af rørforbindelserne (DN 150) mellem for- og efterfiltre bekræftede, at årsagen til den nedsatte hydraulik var kraftige okkeraflejringer.

erosion i filtermaterialet og kanaldannelser, og man kan ligefrem se dette som opskylning af det dybere liggende sorte filtermateriale (se figur 6).

Årsagen er primært, at tilgangsrøret for skyllevand er placeret til den ene side (asymmetrisk) i filterfronten og er underdimensioneret, så strømningshastigheden ved indløb i filtercellen er over 3 m/s. Herved opstår der en slags "rekylvirkning" når vandstrømmen rammer bagvæggen i filtercellen, hvorved vandstrømmen rettes opad og roder rundt i filtermaterialet.

Der blev også observeret en utilstrækkelig ekspansion af filtermaterialerne. Der var en høj grad af sammenkitning af filtermaterialerne i den forreste halvdel af filtercellerne.

Det er en generel fejl på mange vandværker, at skylleproceduren - og særligt skylléhastigheden - ikke er afpasset efter filtermaterialets kornstørrelse og massefylde (ved dualmedie/aktivt kul filtre). Filtrernes evne til at akkumu-

lere stof er afhængig af den afsluttende ekspansion med en ren vandskylning, der forøger filtermaterialets porevolumer.

Skylning med udelukkende luft og kombineret luft/vandskylning forårsager en komprimering af filtermaterialet, der giver en god rengøring (skureeffekt), som dog samtidig formindsker filtermaterialets porevolumer.

## ANBEFALINGER PÅ DRIFTANALYSENS RESULTATER

Filteranlægget blev vurderet ud fra ønsket om at have en timekapacitet på 520 m<sup>3</sup>/h under alle forhold. Da filteranlægget i over tre timer om dagen vil være reduceret til 8 filtre pga. filterskylninger, vil det være nødvendigt at benytte denne situation som udgangspunkt for vurderingen af filteranlæggets funktion svarende til en gennemsnitlig filterhastighed på 5,2 m/h.

Den væsentligste faktor for en bedre rensning for jern er en optimering af fjernelsen af kolloide jernhydroxidpartikler. På baggrund af de gennemførte målinger blev det vurderet, at det var nødvendigt at udskifte de øverste 30 cm af det eksisterende filtermateriale (kvartssand 1,2-2,0 mm) i efterfiltrerne med nyt kvartssand 0,8-1,2 mm for at opnå den ønskede koncentration af jern i afløbet (0,05 mg Fe/l).

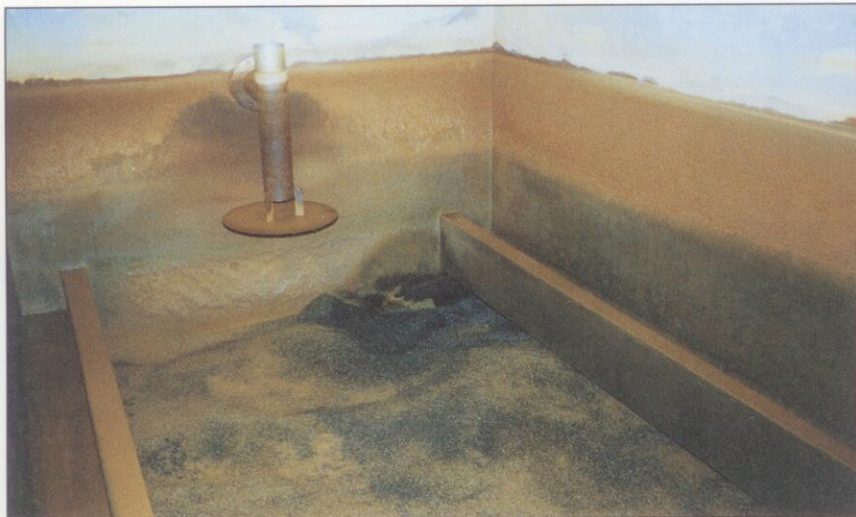
Anvendelse af finere materialer giver en bedre rensningsevne overfor partikler i det kolloide størrelsesområde. De heraf følgende forringede hydrauliske egenskaber skulle opvejes af nedenstående tiltag:

- Oprensning af fordelingsarrangementets rørforbindelser.
- Oprensning af rørforbindelser mellem for- og efterfiltre.
- Oprensning af filtermaterialer i forfiltre og efterfiltre.

Skylleproceduren blev anbefalet videreført. Dog blev det anbefalet at forbedre hydraulikken ved at sammenkoble skyllevandstilgangen ved at at sammenkoble skyllevandstilgangen (ø 200 mm) og afgang for filtreret vand (ø 150 mm) for at opnå en mindre indstrømningshastighed i filtercellen.

## DRIFTSOPTIMERINGEN

På grundlag af driftsanalysen blev der i sommeren 1996 udarbejdet et udbudsprojekt, og den herefter udpegede hovedentreprenør (Ludvigsen & Hermann A/S) gennemførte



Figur 6. Indløbsastigheden for skyllevandet er så stor at dets "rekyl" mod filtercellens bagvæg spuler hul i filtermaterialet (ved det sorte "krater").

med aflevering i marts 1997 de tilknyttede arbejder omfattende:

- Delvis udskiftning, samt renovering af rørforbindelserne mellem forfiltre og efterfiltre.
- Ombygning af rørrangement i filterfront (forfiltre), der tillader anvendelse af udløbsledning for filtreret vand som en ekstra tilgangsstuds for skyllevand.
- Højtryksspuling af alle rørforbindelser før forfiltrene samt udløbsarrangementet i selve filtrene.
- Udskiftning af de øverste 30 cm filtermateriale i efterfiltrene med 30 cm kvartssand 0,8-1,2 mm.

Renoveringen blev gennemført med vandværket i fuld drift, og der var derfor stor fokus på

logistik, som nødvendiggjorde, at kun en filterlinie af gangen var ude af drift. Samtidig måtte der udarbejdes en tilpasset procedure for desinfektion af de nye filtermaterialer omfattende kloringsmetode og -tid, samt efterfølgende analyse og kontrolprocedurer.

Sideløbende med disse aktiviteter etableredes en ny kildeplads i Løgtved plantage og råvandsledning herfra til vandværket, der kunne sikre en yderligere spredning af indvindingen i Deigvadområdet.

De efterfølgende driftserfaringer har vist at:

- Den producerede vandkvalitet fuldt har kunne leve op til forventningerne
- Vandværket som forudsat kan behandle 520 m<sup>3</sup>/h med 8 ud af 9 filterlinier i drift
- Skyllevandsforbruget er reduceret fra over 150.000 m<sup>3</sup> til ca. 50.000 m<sup>3</sup> pr. år på grund af forlængede filtergangtider.

## AFSLUTNING

En driftsanalyse er et udmærket beslutningsgrundlag for gennemførelsen af de egentlige aktiviteter ved optimering af vandværker.

Driftsanalysen udgjorde i dette tilfælde en omkostning på kr. 65.000. Driftsoptimeringen omfattende udbud, tilsyn og entreprise beløb sig til ca. kr. 750.000.

Disse udgifter skal ses i relation til en forøgelse af vandværkets behandlingskapacitet på 160 m<sup>3</sup>/h med fuldt tilfredsstillende drikkevandskvalitet.

# AFFUGTNING

ER GOD ØKONOMI  
MED DANSKE  
AFFUGTERE

**FUGT KONTROL**

Charlottevej 2 • 4270 Høng  
Tlf. 58 85 10 08 • Fax 58 85 11 08

**Specialfirma for fugtstyring**

• Projektering • Salg • Service • Udlejning • Affugtere • Befugtere • Stylinger



Vi har løsningen på:

### Sommerproblemet

med svedende rør  
i alle  
vandværksbygninger.

DANSK



KVALITET

**Vinterproblemet**  
med høj luftfugtighed og kondens på vægge og loft i alle vandværker med åbne filterbassiner.