

Basisrapport:

Dobbeltporøs Filtrering

Pilotafrøvning - Rensning af vejvand i Ørestad
Hændelse 1-25, januar – juli 2007

Marina Bergen Jensen
Skov & Landskab, KU-LIFE,
Rolighedsvej 23, 2958 Frederiksberg C

Kvalitetssikring:

Per Bjerager, KU-LIFE, Skov & Landskab
Helle Bjerg Sørensen, Københavns Kommune
Jeanet Stagsted, Københavns Energi
Linda Bredahl, Rambøll Danmark
Frank Hallig, Rambøll Danmark

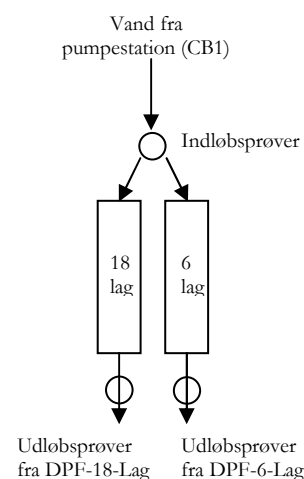
Styregruppe:

Kirsten Ledgaard, By & Havn
Sonia Sørensen, Københavns Energi
Kjell Nilsson, KU-LIFE, Skov & Landskab
Frank Hallig, Rambøll Danmark
Linda Bredahl, Rambøll Danmark
Marina Bergen Jensen, KU-LIFE, Skov & Landskab

Januar 2009

Sammendrag

Dobbeltporøs filtrering (DPF) er udviklet til rensning af vand forurenet med såvel finpartikulært materiale som opløste forbindelser. De primære rensmekanismer er gravitationsdrevne sedimentation og adsorption til et passende filtermateriale. Metoden er under afprøvning i Ørestad, hvor et pilotanlæg er placeret under plænen i Byparken. Kalk benyttes som filtermateriale. Anlægget modtager vand fra Center Boulevards Pumpestation 1, der håndterer afstrømmende regn fra området veje og parkeringsarealer, samt en del drænvand. Pilotanlægget er opført i skala 1:25 af et fuldskalaanlæg, svarende til 1,3 reduceret ha. Det måler 8 m x 50 m og er forsynet med ind- og udløbskamre, samt prøvetagningskamre. Der afprøves to versioner af det dobbeltporøse filtreringsprincip med henholdsvis 6 og 18 dobbeltporøse lag. Filtrene har samme forventede hydrauliske kapacitet. 6-Lags versionen (DPF-6-Lag) er billigere end 18-Lags versionen (DPF-18-Lag), der til gengæld forventes at rense bedre.



Figur 1:
Pilotanlæg skitseret fra oven

Der er analyseret 25 regnhændelser, opsamlet i perioden 15. januar – 26. juli 2007. For hver hændelse er forureningsindholdet i indløbsvandet analyseret og sammenlignet med forureningsindholdet i udløbsvand fra DPF-6-Lag og DPF-18-Lag (Figur 1). I nærværende rapport bringes data for filterets hydrauliske funktion samt rens effektivitet over for suspenderet stof (SS), total-zink (Zn), total-kobber (Cu), total-krom (Cr), total-bly (Pb) og total-fosfor (P), som er de stoffer Københavns Kommune har opstillet grænseværdier for.

Begge filterversioner renser tilfredsstillende (Tabel 1), dog bør der udvikles et filtermateriale, der mere effektivt end kalk tilbageholder kobber og krom. Den dobbeltporøse opbygning sikrer høj hydraulisk ledningsevne. Afprøvningen har givet betydelige input til optimering af anlæg og drift.

Tabel 1: Resultat af afprøvning af dobbeltporøs filtrering. SS = suspenderet stof. De anførte koncentrationer af zink, kobber, krom, bly og fosfor er totalindhold (både opløst og partikulært bundet). Gns = koncentrationsgennemsnit for de 25 hændelser. Min-max = laveste og højeste koncentration blandt de 25 hændelser. Stdafv = Standardafvigelse. (n) = antal hændelser gennemsnit er baseret på. % fjernet = gennemsnitlig udløbskoncentration i procent af gennemsnitlig indløbskoncentration. KK er Københavns Kommune.

		SS	Zink	Kobber	Krom	Bly	Fosfor
		mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
	Krav fra KK	25,0	110,0	12,0	10,0	3,2	100,0
Indløb	gns.	123	98	25	18	9	178
	min-max	23-393	28-208	9-50	8-58	1-22	66-656
	stdafv. (n)	87,1 (25)	51,9 (25)	10,7 (25)	12,4 (25)	5,2 (25)	117,8 (25)
DPF-6-Lag	gns.	10,5	29,5	12,2	10,9	1,0	47,4
	min-max	1,4-25,8	9,7-70,2	7,4-20,5	3,1-37,2	0,2-2,5	18,6-101,4
	stdafv. (n)	6,2 (23)	14,7 (23)	3,5 (23)	9,3 (23)	0,7 (23)	18,1 (23)
	% fjernet	91,5	70,0	50,6	40,5	88,1	73,3
DPF-18-Lag	gns.	1,4	12,5	9,6	10,0	0,2	39,0
	min-max	0,4-4,4	2,5-29,2	4,8-24,1	2,6-38,4	0,0-0,5	16,0-78,2
	stdafv. (n)	0,8 (24)	7,2 (24)	4,4 (24)	9,7 (24)	0,1 (24)	13,5 (24)
	% fjernet	98,9	87,3	61,1	45,7	97,7	78,0

Indholdsfortegnelse

Sammendrag.....	2
Forord (august 2008).....	4
Forord (januar 2009).....	4
Formål.....	5
Afgrænsning.....	5
Baggrund.....	6
Vejvand som ressource.....	6
Dobbeltporøs filtrering.....	6
Pilotanlægget i Ørestad.....	7
Kapacitet.....	7
Placering.....	7
Opbygning og dimensioner.....	8
Filtermateriale.....	9
Rensekrav.....	9
Materialer og metoder.....	10
Bestemmelse af pilotanlæggets hydrauliske egenskaber.....	10
Mættet hydraulisk ledningsevne.....	10
Flowmåling og – beregning.....	10
Nedbørsdata.....	10
Prøvetagning af ind- og udløbsvand.....	11
Prøvetagningsudstyr.....	11
Fremstilling af bulkprøver.....	11
Konservering af prøver.....	11
Definition af hændelse.....	12
Stofanalyser.....	13
Suspendert stof (SS).....	13
Totalanalyse af zink, kobber, krom, bly, fosfor.....	13
Resultater.....	14
Mættet hydraulisk ledningsevne.....	14
Nedbørmønster i måleperioden.....	15
Flowmønster i de 25 hændelser.....	15
Stofindhold ind- og udløb.....	17
Suspendert stof.....	18
Zink.....	19
Kobber.....	20
Krom.....	21
Bly.....	22
Fosfor.....	23
Kommentarer til data.....	24
Drænvand.....	24
Diskussion af resultater i forhold til krav.....	25
Hydraulisk kapacitet.....	25
Fjernelse af suspendert stof, zink, kobber, krom, bly og fosfor.....	25
Suspendert stof.....	25
Tungmetaller.....	26
Fosfor.....	26
Sammenligning af DPF-6-Lag og DPF-18-Lag.....	26
Perspektivering.....	28
Referencer.....	29

Forord (august 2008)

I perioden 2001-2004 udførtes laboratorieforsøg til optimering af det dobbeltporøse filtreringsprincip. Laboratorieforsøgene udførtes af Marina Bergen Jensen, supporteret af en Rambøll-følgegruppe, og i regi af en 27 måneders PostDoc-bevilling, finansieret med 1/3 fra Forskningsstyrelsen, 1/3 fra Rambøll og 1/3 fra KU-LIFE. Rambølls tredjedel finansieredes i fællesskab af Rambøll, Københavns Energi og By & Havn¹. På baggrund af resultater opnået i laboratoriet besluttedes at etablere et pilotanlæg til 18 m³/t (5 L/s) i Ørestad. Pilotanlægget blev opført 2005/2006 af Københavns Energi og Ørestadsselskabet, med tilskud fra Realdania, og Københavns Kommune. Rambøll og KU-LIFE bidrager via egenfinansiering af timer. Efter indkøringsperiode efteråret 2006 kunne de første regnvandshændelser opsamles og analyseres i januar 2007.

Dobbeltporøs filtrering er patentanmeldt af KU-LIFE² med prioritetsdato 26.06.2002 og international ansøgningsnummer PCT/DK2003/000443.

Basisrapporten er udarbejdet april – august 2008.

Forord (januar 2009)

Basisrapporten blev offentliggjort første gang på www.sl.ku.dk i august 2008. Nærværende rapport er en opdateret version, der inkluderer analyse af fosfor og tungmetaldata for hændelse 25.

¹ By & Havn er det tidligere Ørestadsselskab.

² KU-LIFE er Det Biovidenskabelige Fakultet for Fødevarer, Veterinærmedicin og Naturressourcer, ved Københavns Universitet. Tidligere KVL eller "Landbohøjskolen".

Formål

Basisrapportens formål er at dokumentere pilotanlæggets evne til at rense vand fra Center Boulevards Pumpestation 1 for suspenderet stof, totalindhold af zink, kobber, krom, bly og fosfor. Pumpestationen modtager vejvand og drænvand. Dokumentationen baseres på sammenligning af vandets stofindhold ved indløb og udløb. Resultatet sammenlignes med krav opstillet af Københavns Kommune. Formålet er desuden at dokumentere forsøgsanlæggets hydrauliske kapacitet, baseret på observerede strømningshastigheder i de enkelte hændelser. Der sammenlignes to versioner af et dobbeltporøst filter.

Afgrænsning

I nærværende basisrapport beskrives indledningsvist baggrunden for udviklingen af det dobbeltporøse filtreringsprincip og selve princippet forklares. Efter gennemgang af forsøgsanlæggets opbygning og de anvendte dokumentationsmetoder bringes resultater for hændelser opsamlet i perioden januar – juli 2007. I basisrapporten fokuseres udelukkende på de parametre Københavns Kommune har opstillet krav for, dvs. totalindhold af suspenderet stof, zink, kobber, krom, bly og fosfor. Resultaterne sammenlignes med kravene. Der gives desuden en kort beskrivelse af nedbørsforholdene i måleperioden.

I efterfølgende tillæg til basisrapporten forventes flere indhentede data formidlet. Der foreligger således data for en lang række yderligere miljømæssigt interessante elementer, bl.a. nikkell, cadmium og arsen samt platingrupperns elementer: rhodium, palladium og platin. For samtlige stoffer findes data for elementernes fordeling på opløst og partikulær form ved ind- og udløb, ligesom der foreligger glødetabsdata for alle hændelser. For alle hændelser findes målinger af elektrisk ledningsevne og turbiditet på de del-prøver hændelsen er sammensat af. Der foreligger lange måleserier med on-line målinger på ind- og udløbsflow af turbiditet, pH og elektrisk ledningsevne. Der er gennemført enkelte analyser af anlæggets evne til at fjerne pesticider og PAH-forbindelser, samt af partikelstørrelsesfordeling ved indløb og 1, 10, 20 og 30 m inde i filteret under en enkelt hændelse.

Udover formidling af yderligere data vil efterfølgende rapporttillæg fokusere på afdækning af forhold som:

- korrelation mellem indløbsvandets stofkoncentration og tørvejrperiodens længde og bygens maksimale intensitet
- korrelation mellem stofgrupper internt, og i f.t. pH, EC og turbiditet
- filterets renseevne overfor opløste elementer versus partikelbundne
- opstilling af massebalance for det samlede flow januar – juli 2007
- estimering af filterets levetid og vurdering af behov for vedligehold.

Henover efteråret/vinteren 2007/2008 er der foretaget en coating af det ene af to filtre i pilotanlægget for at forbedre fjernelsen af kromat, kobber og organiske mikroforureninger. Effekt af coatingen vurderes ved yderligere mindst 10 hændelser. Resultatet heraf bringes i rapporttillæg.

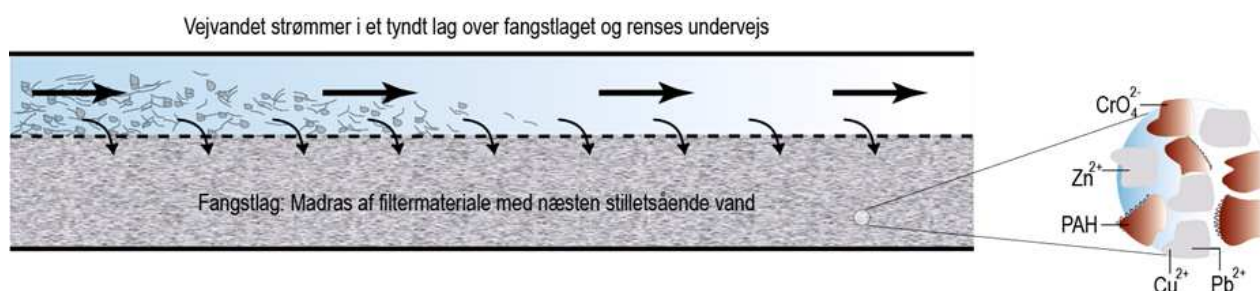
Baggrund

Vejvand som ressource

I Ørestad benyttes afstrømmende regn fra bydelens tage (tagvand) som forsyningsvand til bydelens kanaler. Institutionerne bag Ørestad, dvs. Københavns Kommune, Københavns Energi og By & Havn ønsker imidlertid også at benytte afstrømmende regn fra Metro, veje og parkeringsarealer, såkaldt vejvand, til at forsyne kanalerne. Dette forudsætter imidlertid at vejvandet renses forudgående, idet direkte udledning erfaringsmæssigt resulterer i grågrumset og uklart vand³ med betydeligt indhold af miljøskadelige stoffer (Jensen et al., 2008). Der er krav om, at rensningen af vejvandet skal være miljøvenlig, og metoder med et højt energi- eller kemikalieforbrug er derfor udelukkede. Ligeledes skal metoden fysisk kunne indpasses i en tæt by som Ørestad. Med udviklingen af miljøvenlige metoder til rensning af vejvand til høj kvalitet bidrager Ørestad til udviklingen af byer med høj miljøprofil, og samtidig illustrerer bydelen hvordan regnvand kan bruges som ressource.

Dobbeltporøs filtrering

Et dobbeltporøst filter er et filter med to porøsiteter; en høj og en lav (Figur 2). Det har en "sandwichstruktur", hvor højporøse lag ligger indlejret mellem lavporøse lag, der indeholder et velegnet filtermateriale. De højporøse lag er strømningslag, mens de lavporøse er "fangstlag". Strømningen foregår vandret gennem de højporøse lag, og kan billedligt opfattes som et lagen af vand, der strømmer over en madras af filtermateriale. Når vejvand i de højporøse lag strømmer uhindret over filtermaterialet i de lavporøse lag renses vandet undervejs. De primære resemekanismer er gravitationsdrevne sedimentation og sorption til naturlige materialer (figur 2). Fordelen ved DPF er at strømningsvejene er adskilt fra de lag, der tilbageholder suspenderet stof. Derved forventes ingen tilstopning og opretholdelse af renseevne indtil al porøsitet i fangstlaget er opbrugt.



Figur 2. Illustration af "sandwichstrukturen" i Dobbeltporøs Filtrering. Det beskidte vand strømmer vandret ind i filteret, fortrinsvist via de højporøse lag, der har en mange gange større hydraulisk ledningsevne end de lavporøse fangstlag indeholdende filtermateriale. I løbet af den tid det tager for vandet at bevæge sig fra indløb til udløb afsættes forureningen til det underliggende lavporøse lag. I det 50 m lange pilotanlæg i Ørestad er opholdstiden ca. 1 time i 6-lags versionen og ca. 2 timer i 18-lags versionen. Takket være strømningslagenes ringe tykkelse (6 mm i 6-lags versionen, 4 mm i 18-lags versionen i Ørestad) virker sedimentationen effektivt – partiklerne skal kun falde få mm før de havner i fangstlaget. Her lejrer partiklerne sig mellem filterkornene, der derfor skal have en vis porøsitet. Kalken der benyttes i pilotanlægget i Ørestad har en porøsitet på 50 %. Opløste forureninger kan tilbageholdes i filteret ved adsorption til overfladen af filtermaterialet. Det sker når vandets bevægelse bringer forbindelserne tæt forbi filtermaterialets overflade. Det er naturligvis en forudsætning at det valgte filtermateriale har affinitet for stofferne. Efter en regnhændelse dræner filteret af. I det beluftede, fugtige filter, der efterlades, er forholdene for omsætning af organisk stof gode, og der forventes derfor i tørvejrperioder, at ske en betydelig nedbrydning af organisk stof, herunder organiske mikroforureninger.

³ Ifølge Københavns Miljøkontrol udledtes vejvand forsøgsvist direkte til kanaler i Ørestad omkring 1999.

Pilotanlægget i Ørestad

Kapacitet

Ørestad er inddelt i tre spildevandsoplande, hver på omtrent 30 ha: et nordligt omkring Københavns Universitet; et centralt fra Bella Center til motorvejen; og et sydligt for Ørestads sydlige del. Det er tanken at vejvand fra det centrale og sydlige opland skal renses i hver sit renseanlæg, og bruges som forsyningsvand til kanalerne. Pilotanlægget, der er placeret i det centrale opland, modtager vand fra 1,3 reduceret ha.. Anlægget er dimensioneret til en hydraulisk kapacitet på 18 m³/t (5 L/s), svarende til at et evt. fuldskalaanlæg skal håndtere 450 m³/t (25 L/s). Med denne kapacitet vil et fuldskalaanlæg være i stand til at rense 95 % af årsnedbøren, der i Ørestad ligger på 580 mm. Renseperioden strækker sig ind i tørvejrperioden efter hver hændelse, idet bydelens vejvandsledninger er anlagt med betydelig bassinkapacitet.

Placering

Pilotanlægget er placeret i Ørestads centrale opland, nærmere bestemt under plænen i Byparken, der ligger mellem Ørestad Boulevard og Center Boulevard (Figur 3). Byparken fremstår som et stort grønt fritidslandskab omkranset af op til 12 etagers høje boligblokke. Med en underjordisk placering og fuld retablering af plænen oven over kan renseanlægget anlægges uden tab af areal. Dette er af stor betydning i en bydel hvor mange mennesker skal deles om begrænsede grønne områder. Samtidig sikrer den skjulte placering at mennesker og dyr ikke kan komme i fysisk kontakt med de frafiltrerede forureninger. Det er alene det rensede vand, der tilbydes via kanalerne. Den underjordiske placering sikrer samtidig stabile temperaturforhold året rundt, hvilket fremmer renseprocesserne.



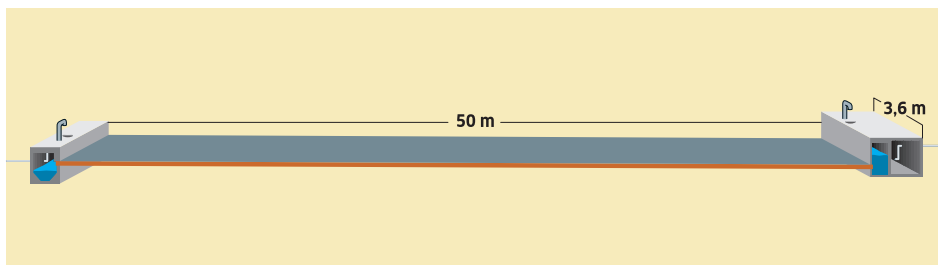
Figur 3 Byparken i Ørestad, 2007. Pilotanlægget er placeret langs den skrå cykelsti, ca. 1/3 fra den nærmeste ende (Center Boulevard), på højre side, og anes som en lys rektangulær flade i plænen. Parken er under ombygning til aktivitetspark.

Opbygning og dimensioner

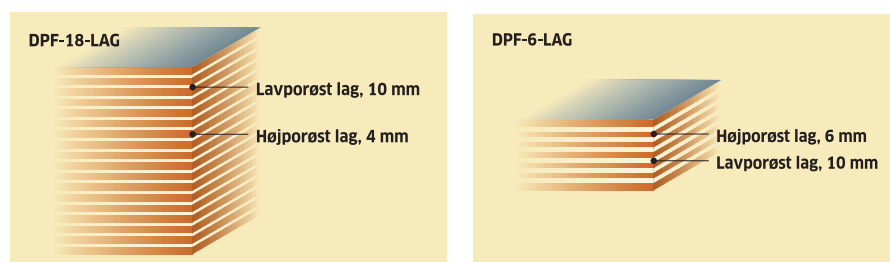
Der afprøves som nævnt to versioner af et dobbeltporøst filter (DPF-6-Lag og DPF-18-Lag). Disse er anlagt på en støbt bund i en fælles udgravning, der måler 8 m * 50 m, og som har en hældning på 10 ‰ fra indløb mod udløb. Dette fald sikrer at filterene dræner af efter hver hændelse. Bunden ligger i frostfrydybde, dvs. 1 m under terræn ved indløbet, stigende til 1½ m ved udløbet.

Pilotanlægget modtager vand fra en pumpestation, ”CB1”, på Center Boulevard, der er udstyret med sandfang og olieudskiller. CB 1 pumper vejvand og drænvand ud af bydelen via en pumpeledning i Center Boulevard. Pilotanlægget er med en stikledning koblet på pumpeledningen, hvilket betyder, at hver gang der er tryk i pumpeledningen, er der også tryk på indløbet til pilotanlægget. Indløbsvandet passerer først en prøvetagningsbrønd, der er fælles for de to filterversioner. Derefter splittes indløbet til de to filtre, der har individuelle modtagekamre. Vandføringen til de to modtagekamre kan reguleres ved hjælp af ventiler. Efter passage af filterne opsamles det rensede vand i de tilhørende udløbskamre, hvorfra det pumpes til en grøft i området. Vandet drives gennem filterne ved hjælp af tyngdekraften. Vandspejlet i indløbskammeret indstiller sig således ved et højere niveau end vandspejlet i udløbskammeret.

Begge filterversioner er 3,44 m brede og 50 m lange. DPF-6-Lag er opbygget af 6 dobbeltporøse sandwichlag, hvor strømningslagene består af et 6 mm ’flettet’ nylonnet, og underliggende fangstlag består af 10 mm kalkmætter (Figur 5). DPF-18-Lag består af 18 dobbeltporøse sandwichlag med samme type 10 mm kalkmætte, men her består strømningslagene af 4 mm hvælvet nylonnet, et såkaldt Enkadrain®. De samlede filtertykkelser er 9,6 cm for DPF-6-Lag og 25,2 cm for DPF-18-Lag. Kombination af antal lag og strømningslagenes tykkelse forventes at resultere i samme hydrauliske kapacitet i de to filterversioner. Kalkmætterne er fremstillet på fabrik ved sammensyning af to geotextiler under indlejring af kalkkorn. Den underste geotextil er næsten tæt, hvorved sedimentflugt fra fangstlag til underliggende strømningslag forhindres. Den øvre geotextil er valgt med størst mulig maskevidde, der samtidig fastholder kalkkornene under transport og udlægning af mætter. Derved sikres optimale vilkår for overførsel af stof fra strømningslag til fangstlag.



Figur 4: Skitse af pilotanlæggets ene dobbeltporøse filter. Til venstre ses modtagekammeret, hvor vandet strømmer ind, hver gang pumpen på Center Boulevard kører. Når vandet når op til indløbsvinduet begynder det at strømme ind i det 50 m lange dobbeltporøse filter. Den hydrauliske gradient er forskellen i vandstandshøjde mellem modtagekammer og udløbskammer. Fra udløbskammeret passerer det rensede vand et særligt prøvetagningskammer. Filterrets samlede tykkelse er 9,6 cm i 6-Lags versionen, og 25,2 cm i 18_Lags versionen.



Figur 5: Illustration af sandwichstrukturen i DPF, der opstår ved at højporøse lag (røde) indskydes mellem lavporøse fangslag, her bestående af kalkmætter (hvide). De højporøse lag er 4 mm i DPF-18-Lag og 6 mm i DPF-6-Lag. De lavporøse kalkmætter er 10 mm i begge tilfælde.

Filtermateriale

I kalkmætterne anvendes hård bryozokalk som filtermateriale. Kalken er af samme type som anvendes på danske vandværker til grundvandsiltning. Kornstørrelsen er 1-3 mm. I ikke-sur opløsning er kalken stort set uopløselig. Det gælder derfor også i vejvand, hvor pH ligger mellem 6,5 og 7,5 (Jensen et al., 2008). Kalken har en specifik densitet på 2.700 kg/m^3 og en rumvægt på $1.200 - 1.250 \text{ kg/m}^3$, afhængigt af hvor tæt kalken pakkes. Hulrumsporøsiteten er dermed 53 - 55 %, svarende til at der kan aflejres sediment i godt halvdelen af volumenet i de lavporøse lag i pilotanlægget.

Rensekrav

Københavns Kommune har med udgangspunkt i Miljøbeskyttelseslovens Bekendtgørelse 921 af 1996 fastsat følgende krav til rensset vejvand, der tilledes Ørestads kanaler:

- Suspenderet stof $< 25 \text{ mg/L}$
- $\text{Zink}_{\text{total}} < 110 \text{ } \mu\text{g/L}$
- $\text{Kobber}_{\text{total}} < 12 \text{ } \mu\text{g/L}$
- $\text{Krom}_{\text{total}} < 10 \text{ } \mu\text{g/L}$
- $\text{Bly}_{\text{total}} < 3,2 \text{ } \mu\text{g/L}$

Ud fra et ønske om at begrænse algevækst i bydelens kanaler og opnå en sigtddybde på mindst 1 m er der fastsat et skærpet krav til indhold af fosfor på:

- $\text{Fosfor}_{\text{total}} < 100 \text{ } \mu\text{g/L}$.

Det er disse krav det dobbeltporøse filter er udviklet til at overholde, og som de observerede udløbskoncentrationer skal sammenlignes med.

Materialer og metoder

Bestemmelse af pilotanlæggets hydrauliske egenskaber

Mættet hydraulisk ledningsevne

Under indkøring af anlægget i efteråret 2006 blev anlæggets hydrauliske ledningsevne bestemt i DPF-6-Lag og DPF-18-Lag under vandmættede forhold. Metoden er at fylde det pågældende filter op med vand, og sikre at indesluttet luft er fortrængt. Herefter recirkuleres vandet fra udløbskammeret til modtagekammeret ved hjælp af udløbspumpen. Der fortsættes indtil stabile vandstande har indfundet sig i kamrene. Sammenhørende værdier af flow og vandstande registreres, hvorefter pumpehastigheden ændres til en ny værdi og målingerne gentages. Ved hjælp af Darcy's lov for laminar strømning bestemmes den mættede hydrauliske ledningsevne ud fra sammenhørende målinger af flow og hydraulisk gradient, der er forskellen i vandspejlsniveau mellem modtage- og udløbskammer divideret med filterlængden, jf. Appendiks s. 8.

Flowmåling og – beregning

Indløbsflowet er registreret on-line med en MJK-flowmåler placeret direkte på stikledningen fra pumpeledningen i Center Boulevard. MKJ-flowmålere er baseret på magnetisk induktans. Flowmåleren sidder før (dvs. opstrøms) indløbsvandet passerer et gennemløbstrug, der bruges til prøvetagning og on-linemålinger af pH, elektrisk ledningsevne og turbiditet, og før vandet splittes til de to filtre. I gennemløbstruget er der et betydeligt vandtab. Flowmåleren på indløbssiden bruges primært til at styre udtagning af flowproportionale prøver af indløbsvandet, der sker ved hjælp af ISCO-fraktionsopsamlere (se afsnit om prøvetagning).

På udløbssiden registreres flow individuelt for DPF-6-Lag og DPF-18-Lag udløb. Der benyttes samme type målesystem som på indløbssiden, og tilsvarende indløbssiden styrer flowmålerne udtagningen af flowproportionale prøver.

Flowet gennem filtrene beregnes udelukkende ud fra flowmålinger på udløbssiden. På indløbssiden kan der dels forekomme overløb, dels er der som nævnt et ikke-registreret vandtab gennem gennemløbstruget.

Fraktionsopsamlernes logning af tidspunkt for udtagning af flowproportionale delprøver på udløbssiden (altid én prøve pr. m³) benyttes til beregning af flow i den enkelte hændelse. De benyttede fraktionsopsamlere kan opsamle op til 24 delprøver, så for hver delprøve kan det tilhørende flow beregnes. Det gennemsnitlige flow for en hændelse beregnes ud fra tidspunkterne for første og sidste delprøve, og det akkumulerede volumen, der er på 24 m³, hvis fraktionsopsamleren er fyldt.

Nedbørsdata

Data fra DMI-vejstation 30351 ”Taarnby pumpestation 4” er benyttet til en generel karakterisering af nedbøren i Ørestad i måleperioden. Der er indledningsvis indhentet data fra de 5 nærmest beliggende DMI-vejstationer. En sammenligning af data fra de 5 stationer har vist, at en

enkelt afviger markant, mens de øvrige fire viser fin overensstemmelse. Blandt disse fire ligger den valgte vejrstation tættest på Ørestad.

Prøvetagning af ind- og udløbsvand

Prøvetagningsudstyr

De flowproportionale prøver er på indløbssiden udtaget ved hjælp af en ISCO-fraktionsopsamler med 24 beholdere. Fraktionsopsamleren er placeret i indløbsmålebrønden. Prøvetagningsfrekvensen er én delprøve pr. 2 m³ indløbsvand for de første 13 hændelser og én delprøve pr. 4 m³ for hændelse 14 til 25, svarende til henholdsvis 48 m³ og 96 m³ indløbsvand repræsenteret i hændelsen ved fuld ISCO-fraktionsopsamler. Prøvetagningsstudsene suger fra ovennævnte gennemløbstrug. På udløbssiden udtages tilsvarende flowproportionale prøver med ISCO-fraktionsopsamlere koblet op på udløbet fra henholdsvis DPF-6-Lag og DPF-18-Lag. Prøvetagningsfrekvensen på udløbssiden er én prøve pr. 1 m³. De to fraktionsopsamlere på udløbssiden er ikke af samme type, idet den ene kun har én stor samlebeholder som alle de 24 flowproportionale delprøver bulkes i, mens den anden har 24 beholdere ligesom fraktionsopsamleren på indløbssiden. Der er med jævne mellemrum byttet om på de to fraktionsopsamlere på udløbssiden⁴.

Fremstilling af bulkprøver

Fra hver fraktionsopsamler er der fremstillet én repræsentativ bulkprøve ved at udtage en andel af vandet i hver delbeholder og blande til én samlet prøve. Dette gælder for de to fraktionsopsamlere, der fordeler fraktionerne på delbeholdere. Prøver udtaget med den fraktionsopsamler, der samler alle delprøver i en stor beholder er allerede bulket, og der er derfor blot udtaget en mindre prøve herfra. Før udtagning af prøver fra de enkelte beholdere foretages en grundig oprystning for at bringe evt. bundfald i suspension.

En hændelse er således repræsenteret ved 3 bulkprøver: én indløbsprøve, én DPF-6-Lag udløbsprøve, og én DPF-18-Lag udløbsprøve.

Konservering af prøver

Bulkprøverne deles til suspenderet stof analyse og til tungmetal- og fosforanalyse. Prøver til suspenderet stof opbevares koldt indtil analyse. Prøverne til tungmetal- og fosforanalyse deles i to, og den ene portion filtreres gennem et 0,45µm filter. Disse prøver benyttes til bestemmelse af opløste forbindelser⁵, mens den anden portion benyttes til totalbestemmelser. Herefter konserveres prøverne ved tilsætning af syre til pH<2 (1 % 7 M HNO₃).

⁴ Da der kun bringes data for bulkprøven fra hver af de 3 prøvetagningssteder kommenteres der ikke på delfraktioner i nærværende rapport.

⁵ Data for speciering af forbindelser på opløst og partikulær form bringes ikke i basisrapporten, men i efterfølgende tillæg.

Definition af hændelse

En hændelse starter ved tidspunktet for første delprøve i indløbets fraktionsopsamler, og varer normalt indtil alle tre fraktionsopsamlere er fyldt. Prøvetagninger, der kun resulterer i delvist fyldte fraktionsopsamlere er derfor typisk kasseret. For enkelte accepterede hændelser har dog ikke alle fraktionsopsamlere været helt fyldt (se Appendiks s. 12-14).

De analyserede hændelser er ikke veldefinerede i forhold til nedbørsmønsteret. Det skyldes dels forsinkelse i Ørestads afvandingssystem på grund af systemets betydelige bassinkapacitet, dels at Center Boulevards Pumpestation 1 også pumper i tørvejr pga. af tilløb af drænvand.

På baggrund af DMI's vejrudsigt er de tre fraktionsopsamlere programmeret til at begynde at registrere flowet til et tidspunkt placeret så tæt på den varslede nedbør som muligt. Forskydninger mellem varslet og reel nedbør betyder imidlertid at fraktionsopsamlerne for eksempel kan have opsamlet flere fraktioner bestående af drænvand, før regnen kommer. Dermed kræver det nærmere analyse at afgøre, hvor stor en andel af det analyserede vand, der er vejvand, og hvor stor en andel der er drænvand.

Generelt må man forvente, at drænvand på grund af filtrering gennem øvre jordlag har et lavere forureningsindhold end vejvand. Derfor bør de analyserede prøver på indløbssiden ikke tages som mål for vejvands forureningsindhold generelt.

Appendiks s. 3 – 7 indeholder grafer for strømningforløbet i hver enkelt af de 25 hændelser. Herudfra kan man få en idé om forholdet mellem vejvand og drænvand i en hændelse. Jo tættere prøvetagningstidspunkterne ligger på hinanden, desto større er strømningen mellem delprøver, og desto større er andelen af vejvand i hændelsen. I Appendiks ses f.eks., at hændelse nr. 6 er domineret af vejvand, mens hændelse nr. 15 overvejende består af drænvand. Svag regn udstrakt over længere perioder kan indeholde betydelige mængder drænvand.

Der er en tidsmæssig forskydning mellem ind- og udløbsprøver. Fraktionsopsamlerne er programmeret til at starte registrering af strømning samtidig, men vandet har en vis opholdstid i filteret, og derfor topper flowet på udløbssiden senere end på indløbssiden i forbindelse med nedbør. Forskydningen bliver større desto mere afdrænet filtrene er på det tidspunkt hvor bygen indtræffer, for filtrene skal vandmættes før afstrømning opstår. I DPF-18-Lag er det højporøse volumen på det dobbelte af DPF-6-Lag, og derfor bliver opholdstiden mindst dobbelt så stor i DPF-18-Lag ved samme flow gennem de 2 filtre. Typisk vil opholdstiden være mere end det dobbelte fordi DPF-18-Lag rummer 3 gange så mange kalkmætter.

Stofanalyser

Suspenderet stof (SS)

Suspenderet stof er analyseret efter DS/EN 872:2005 ”Vandundersøgelse. Bestemmelse af mængden af suspenderet stof. Metode med filtrering gennem glasfiberfiltre”, der er dansk og europæisk standard. Princippet er at filtrere prøven gennem et glasfiberfilter ved hjælp af en vacuum-pumpe. Filteret tørres ved 105 °C i 2 – 14 t og massen af stof tilbageholdt på filteret bestemmes ved vejning. Standarden foreskriver ikke en specifik nominal porestørrelse for glasfiberfilteret, der derfor kan være op til 2,6 µm. Der er valgt et borsilikatfilter med nominal porestørrelse på 0,7 µm (Whatman GF/A), hvorved grænsen mellem opløst og suspenderet stof fastsættes til denne størrelse⁶. Analyserne er udført på KU-LIFE af laborant Lise Bjørn Bak.

Indhold af suspenderet stof i hændelse 18 indløb er estimeret ud fra prøvens turbiditet målt spektrofotometrisk, da der ved en fejl ikke blev udtaget prøve til standardanalyse.

Totalanalyse af zink, kobber, krom, bly, fosfor

Totalindhold af zink, kobber, krom, bly og fosfor er analyseret på ufiltrerede prøver ved ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectrometry) efter oplukning i salpetersyre. Analyserne er udført af akkrediteret laboratorium på KU-Life. Sammenlignende dobbeltanalyse af enkelte prøver udført af Eurofins viser tilfredsstillende overensstemmelse.

Analyserne er gennemført efter DS 259:2003: ”Vandundersøgelse. Bestemmelse af metaller i vand, jord, slam og sedimenter. Almene principper og retningslinjer for bestemmelse ved atomabsorptions-spektrofotometri i flamme”. Denne standard er tilpasset oplukning i mikrobølgeovn og analyse på ICP-MS. Princippet er at bringe prøvens metalindhold på opløst form ved behandling med salpetersyre, hvorefter koncentrationen bestemmes ved ICP-MS. Hvis prøven er klar i udgangspunktet er oplukning ikke nødvendig, hvilket er tilfældet for de fleste prøver på udløbssiden. Oplukning er foretaget i 7 % HNO₃ (2 ml prøve + 8 ml 70 % HNO₃) ved 120 °C i 30 min. i mikrobølgeovn.

Data fra ICP-MS er korrigeret for baggrund (HNO₃) og drift som følge af tilsætning af injektionsdyse. Baggrunden er beregnet ud fra HNO₃-prøver, og driften ud fra kontrolprøven (standardrækkens midterprøve), der begge analyseres med for hver 10 prøver. Der er desuden korrigeret for fortyndinger. For hvert element er benyttet det energiniveau, der resulterer i den pæneste standardrække, dvs. med størst korrelationskoefficient.

⁶Valg af porestørrelse i filteret er afgørende for hvor let det er at overholde krav. Jo grovere filtre der benyttes desto lettere er det at overholde krav, for desto mere af det suspenderede materiale analyseres ikke med.

Resultater

Mættet hydraulisk ledningsevne

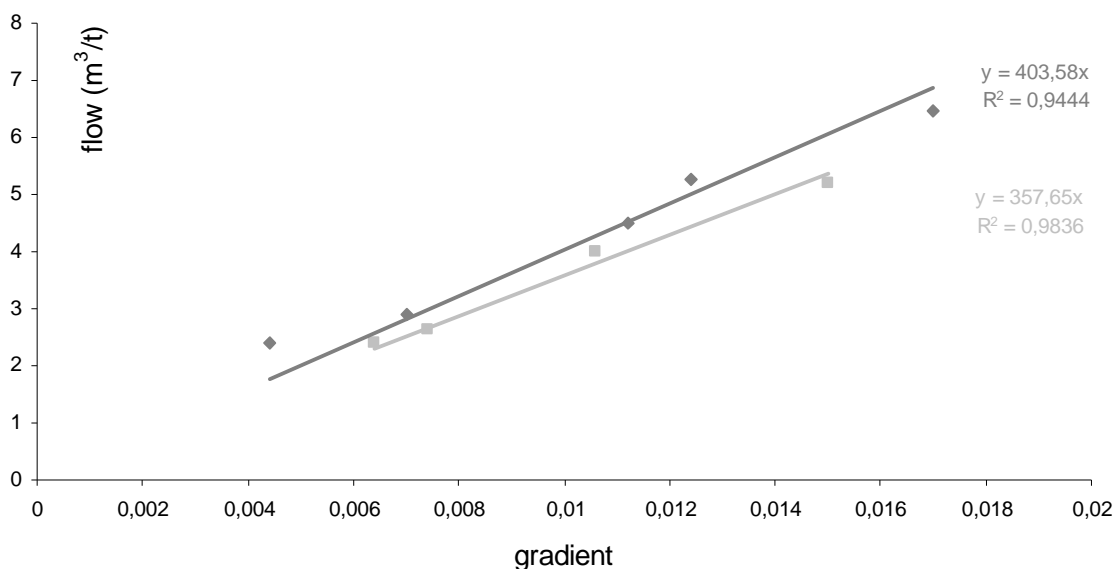
Inden måleperiodens start blev mættet hydraulisk ledningsevne bestemt for DPF-6-Lag og DPF-18-Lag. Resultaterne fremgår af Figur 6, der viser flow som funktion af gradient, hvor gradienten (i) er beregnet som niveauforskel mellem vandstand i ind- og udløbskamre (målt i m) divideret med filterlængden på 50 m. I Appendiks s. 8 er måleresultaterne vist i tabelform - sammen med beregninger af hydraulisk kapacitet og mættet hydraulisk ledningsevne.

Som det fremgår af Figur 6 er sammenhængen mellem gradient og det målte flow linear (korrelationskoefficienter tæt på 1) og strømmingen gennem filteret er dermed laminar og kan beskrives med Darcy's lov.

Ud fra leverandørens oplysninger om hydrauliske egenskaber for de benyttede højporøse lag blev begge filtre dimensioneret til $9 \text{ m}^3/\text{t}$ ved en gradient på 0,01. Af Figur 6 fremgår at den reelle hydrauliske kapacitet er $2\frac{1}{2}$ til 3 gange mindre ved denne gradient:

$$\text{DPF-6-Lag: } 4,04 \text{ m}^3/\text{t} \quad \text{DPF-18-Lag: } 3,58 \text{ m}^3/\text{t}$$

En gradient på 0,01 svarer til en niveauforskel på 0,5 m i vandstanden i ind- og udløbskammer. I pilotanlægget kan der maksimalt opnås en niveauforskel på 1,3 m, svarende til en maksimal gradient på 0,026. Figur 6 antyder, at det ønskede flow på $9 \text{ m}^3/\text{t}$ dermed netop kan opstå i begge filtre ved en gradient på 0,026. I overensstemmelse hermed forekom maks. flow i begge filtre i flere hændelser (Figur 9).



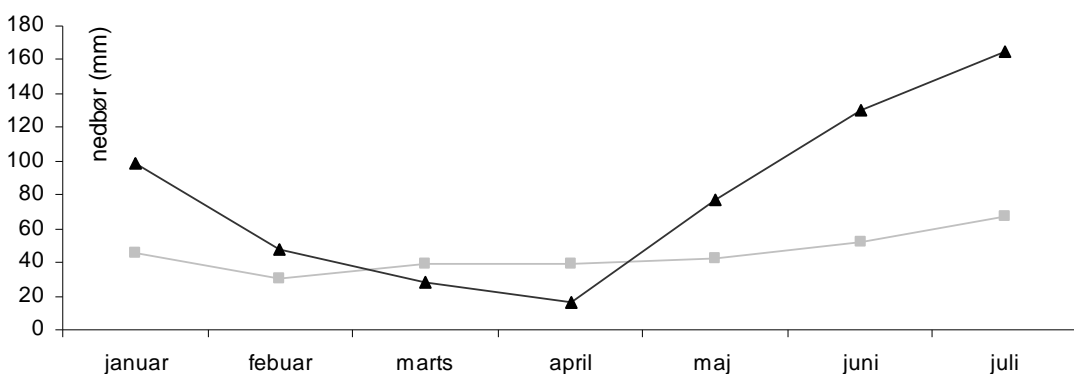
Figur 6: Flow som funktion af gradient bestemt efterår 2006. DPF-6-Lag: mørkegrå ruder. Dpf18-Lag: lysegrå firkanter.

Nedbørmønster i måleperioden

I måleperioden januar – juli 2007 har nedbøren i Ørestad (Tårnby pumpestation 4) afvejet markant fra normen (Figur 7). I januar var nedbøren på det dobbelte af normen og i juni og juli det tredobbelte. I april var nedbøren på halvdelen af normen.

I februar faldt en stor del af nedbøren som sne.

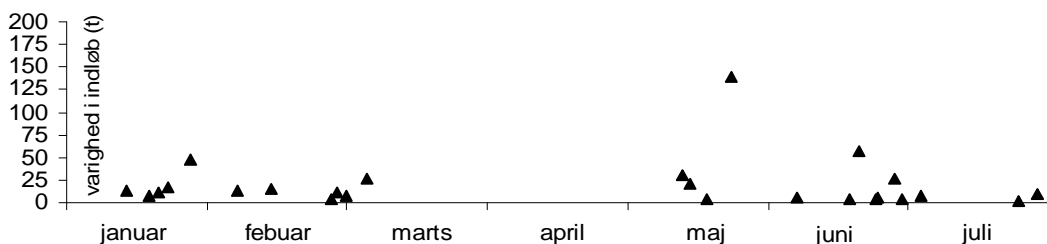
Måleperioden dækker således vinterafstrømning med forventet forhøjet saltindhold, samt perioder med kraftig sommernedbør. Første nedbør efter længere tørkeperioder er ikke repræsenteret, og det samme er tilfældet for efterårsnedbør med forventet forhøjet indhold af organisk stof på grund af løvfald.



Figur 7: Normnedbør (1961-1990) (lysegrå firkant) og aktuel nedbør (sort trekant) i måleperioden for DMI målestation 30351 "Tårnby pumpestation 4" fordelt på måneder. Kilde: DMI (Danmarks Meteorologiske Institut)

Flowmønster i de 25 hændelser

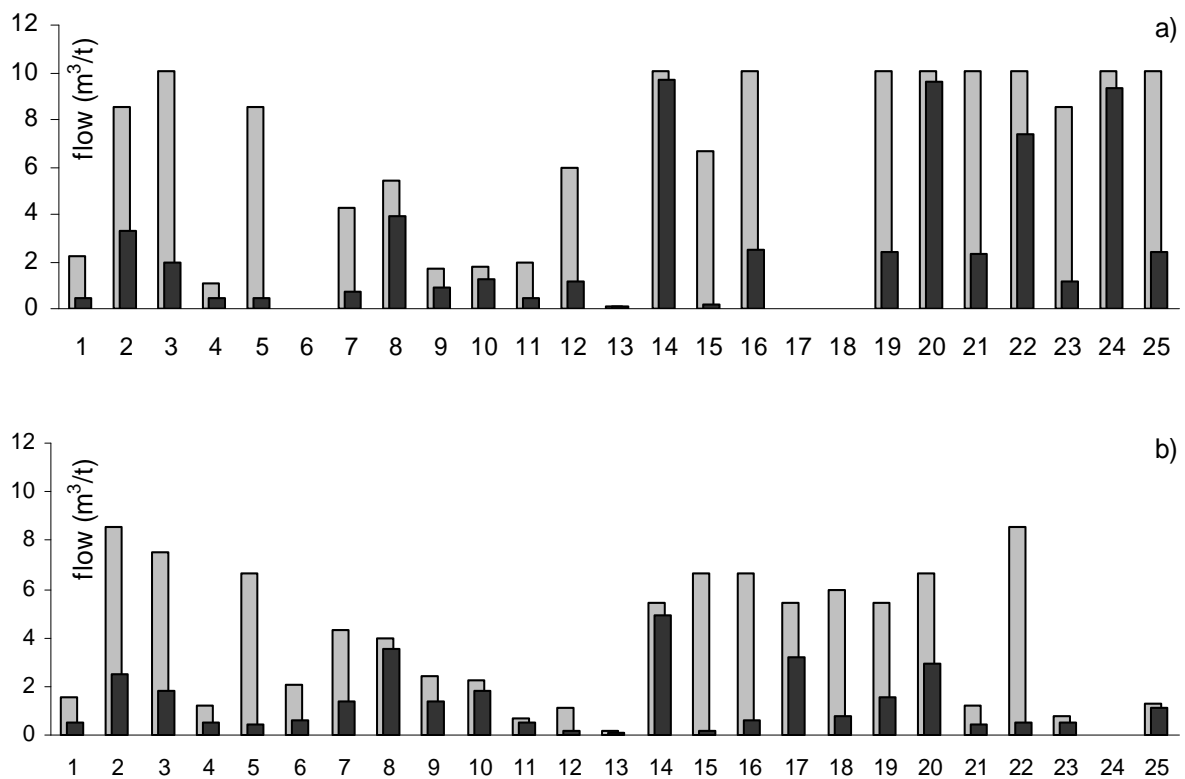
For hver af de 25 hændelser er starttidspunkt og varighed i indløb vist på Figur 8. Det ses, at de 25 hændelser er jævnt fordelt over måleperioden med undtagelse af perioden medio marts til udgangen af april, hvor nedbøren var beskeden. Ud af de 25 hændelser har 19 en varighed på under 24 timer.



Figur 8: Tidsmæssig fordeling (tidspunkt for første delprøve i indløb) og varighed (målt i indløb) af de 25 hændelser.

Figur 9 viser det maksimale flow observeret i hver hændelse, dvs. delprøven med det højeste flow i hændelsen, samt det gennemsnitlige flow for hele hændelsen. I DPF-6-lag er det højeste flow blandt alle delprøver i måleperioden på $10 \text{ m}^3/\text{h}$, hvilket er registreret i 9 af hændelserne. Tilsvarende for DPF-18-Lag er det højeste flow på $8,6 \text{ m}^3$, der er registreret i hændelse 2 og 22.

I Appendiks s. 3 - 7 findes grafer for flowforløb i indløb og udløb for hver enkelt hændelse. Derudover er alle hændelser karakteriseret enkeltvis på tabelform på s. 12 – 14 i Appendiks.



Figur 9. Flow i hændelse 1-25 for a) DPF-6-Lag og b) DPF-18-Lag, angivet som maksimalt flow (lys grå) og gennemsnitligt flow (mørk grå). Prøvetagning er mislykket for hændelse 6, 17 og 18 på DPF-6-Lag, og hændelse 24 på DPF-18-Lag.

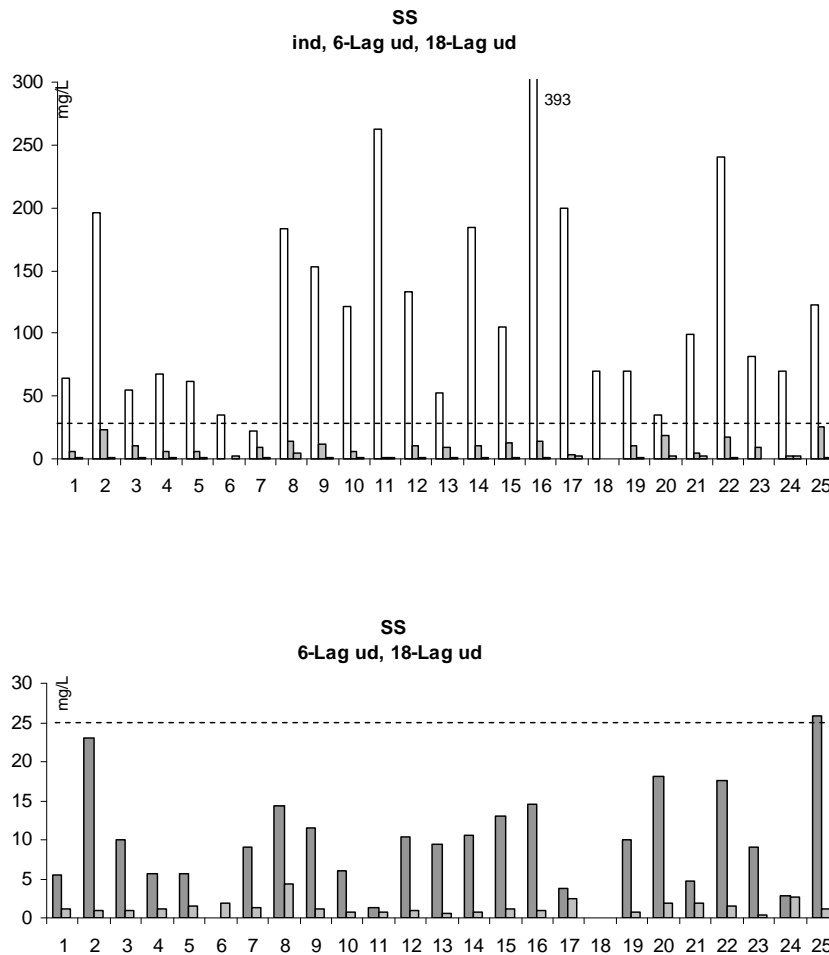
Stofindhold ind- og udløb

Figur 10-15 viser resultater for suspenderet stof og totalindhold af zink, kobber, krom, bly og fosfor. Af tabel 1 (Sammendraget) fremgår de gennemsnitlige koncentrationer i ind- og udløb for de 25 hændelser med tilhørende max og min, standardafvigelser og fjernelsesprocenter. Der er enkelte huller i datasierne, enten fordi det ikke er lykkedes at udtage udløbsprøver fra begge fraktionsopsamlere, eller fordi en prøve ved en fejl ikke er blevet analyseret. Antallet af data bag hvert koncentrationsgennemsnit er 23, 24 eller 25. Af Tabel 1 fremgår, hvor mange hændelser gennemsnit og øvrige beregninger er baseret på. I hændelserne er der ikke sorteret i data, eller på anden vis kasseret data. Appendiks s. 12 -14 indeholder alle stofdata på tabelform.

De grafiske fremstillinger er opbygget ens for alle stoffer. For hver hændelse vises 3 søjler: Den første viser stofindhold i bulkprøven fra indløbet, mens de to næste søjler viser stofindhold i bulkprøverne fra henholdsvis DPF-6-Lag og DPF-18-Lag udløb.

Suspenderet stof

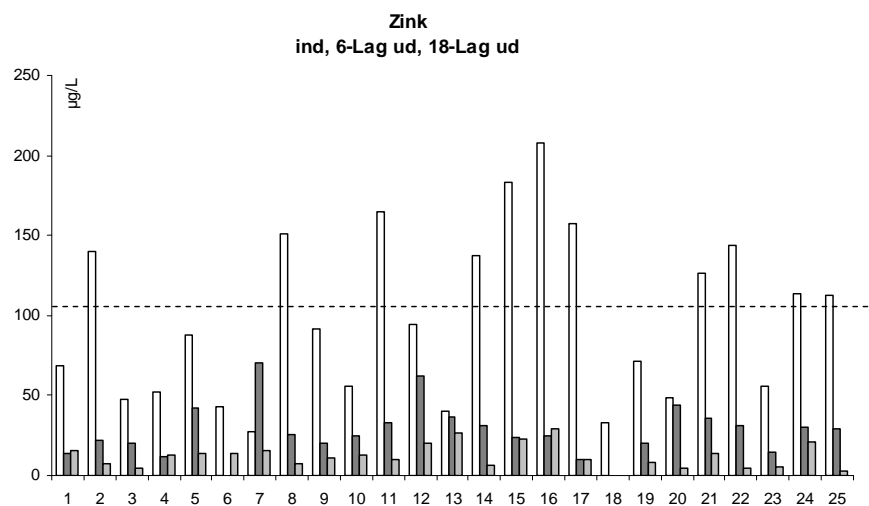
Indholdet af suspenderet stof i vand, der løber til pilotanlægget ligger i gennemsnit på 123 mg/L. Gennemsnittet dækker over en betydelig variation, fra 23 mg/L til 393 mg/L. Kun en enkelt hændelse overholder kravet på de maks. 25 mg/L allerede ved ankomsten til anlægget, og det værste tilfælde overskrider kravet med ca. 16 gange. DPF-6-Lag renser tilstrækkeligt til at overholde kravet i alle hændelser bortset fra hændelse 25, hvor udløbskoncentrationen er 25,8 mg/L og dermed tangerer kravet. I gennemsnit renser DPF-6-Lag ned til 10,5 mg/L. DPF-18-Lag renser vandet til langt under kravet. Gennemsnitkoncentrationen for vand, der forlader DPF-18-Lag, er 1,4 mg/L og variationsintervallet er 0,4 - 4,4 mg/L.



Figur 10. Indhold af suspenderet stof (SS). Øverst: Suspenderet stof i indløbsvand (hvid), udløbsvand DPF-6-Lag (mørk grå) og udløbsvand DPF-18-Lag (lys grå) i de 25 hændelser. Bemærk indløbskoncentration for hændelse 16 er uden for skala. Nederst: Udløbsdata vist alene (med større opløsning på y-akse). Krav til udløbsvand: maks. 25 mg SS/L (stiplet linje).

Zink

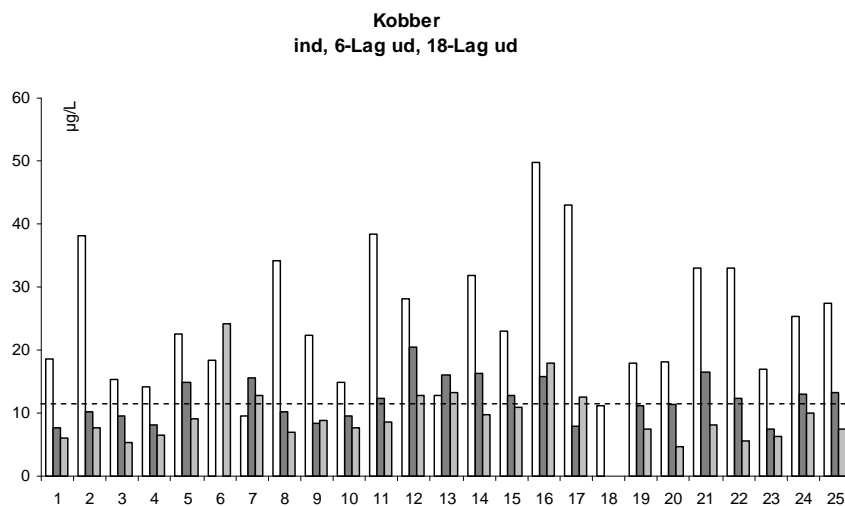
I ca. halvdelen af de observerede hændelser er indholdet af zink under kravet på 110 µg/L allerede ved ankomsten til pilotanlægget, mens flere af de resterende hændelser overskrider kravet med 2-3 gange (Figur 11). Indløbsvandet indeholder i gennemsnit 98 µg/L, med et variationsinterval på 28 – 208 µg/L. Udløbsvand fra DPF-6-Lag ligger alle under kravet og har en gennemsnitlig zink-koncentration på 29,5 µg/L, varierende fra 9,7 – 70,2 µg/L. For DPF-18-Lag ligger alle hændelser betydeligt under kravet med et gennemsnit på 12,5 µg/L og en variation fra 2,5 – 29,2 µg/L.



Figur 11. Indhold af zink (Zn_{total}) i indløbsvand (hvid), udløbsvand DPF-6-Lag (mørk grå) og udløbsvand DPF-18-Lag (lys grå) i de 25 hændelser. Krav til udløbsvand: maks. 110 µg/L (stiplet linje).

Kobber

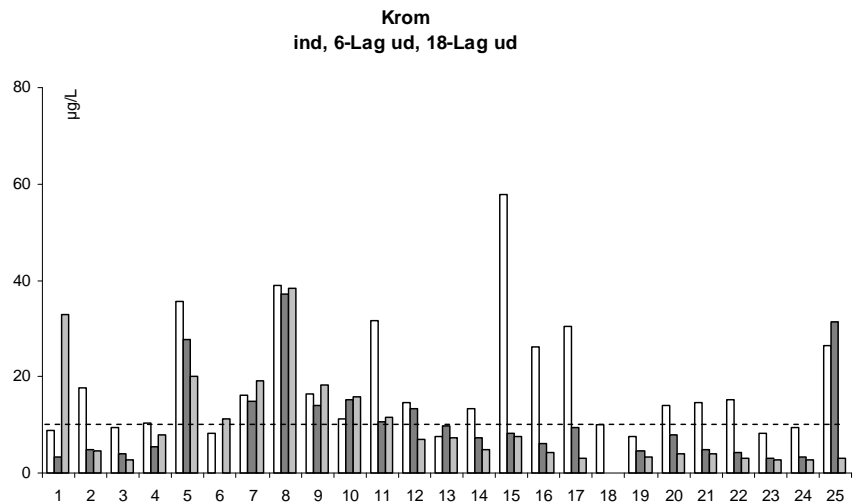
Indholdet af kobber i indløbsvandet ligger generelt over kravet på 12 µg/L. Gennemsnittet er 25 µg/L, varierende fra 9 – 50 µg/L. Udløbsvand fra DPF-6-Lag har en gennemsnitlig kobber-koncentration på 12,2 µg/L, varierende fra 7,4 – 20,5 µg/L. 11 hændelser overholder kravet. For DPF-18-Lag ligger koncentrationerne lidt lavere, med et gennemsnit på 9,6 µg/L og en variation fra 4,8 – 24,1 µg/L. 18 hændelser overholder kravet.



Figur 12. Indhold af kobber (Cu_{total}) i indløbsvand (hvid), udløbsvand DPF-6-Lag (mørk grå) og udløbsvand DPF-18-Lag (lys grå) i de 25 hændelser. Krav til udløbsvand: maks. 12 µg Cu/L (stiplet linje).

Krom

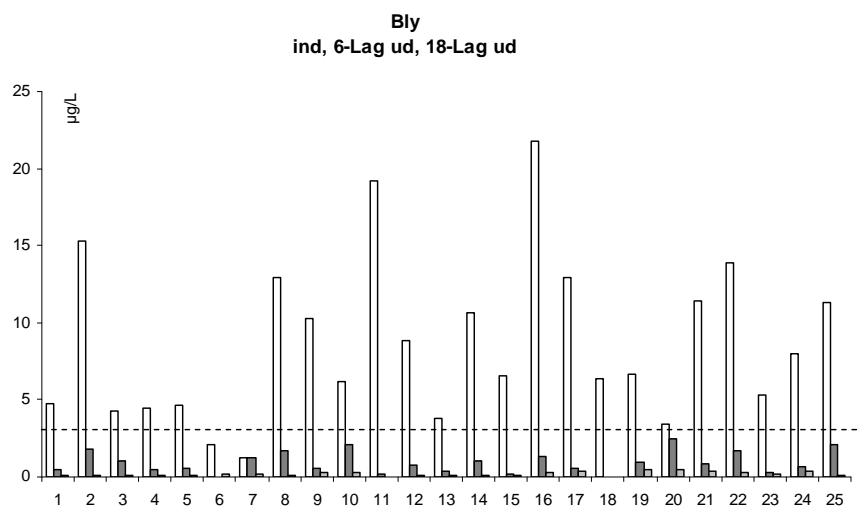
Koncentrationen af krom i indløbsvandet ligger i 3/4 af hændelserne over kravet på 10 µg/L. Gennemsnittet er 18 µg/L, varierende fra 8 – 58 µg/L. Udløbsvand fra DPF-6-Lag har en gennemsnitlig krom-koncentration på 10,9 µg/L, varierende fra 3,1 – 37,2 µg/L. 15 hændelser overholder kravet. For DPF-18-Lag er kromkoncentrationen i udløbsvandet 10,0 µg/L, varierende fra 2,6 – 38,4 µg/L. 16 hændelser overholder kravet.



Figur 13. Indhold af krom (Cr_{total}) i indløbsvand (hvid), udløbsvand DPF-6-Lag (mørk grå) og udløbsvand DPF-18-Lag (lys grå) i de 25 hændelser. Krav til udløbsvand på maks. 10 µg Cu/L vist som stiplede linje.

Bly

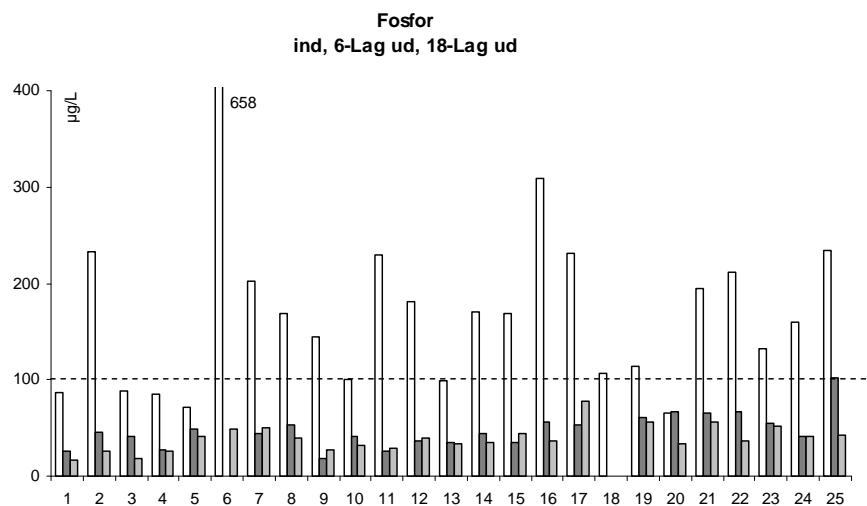
Indholdet af bly i indløbsvandet er generelt betydeligt over kravet på 3,2 $\mu\text{g/L}$. Gennemsnittet er 9 $\mu\text{g/L}$, varierende fra 1 – 22 $\mu\text{g/L}$. Udløbsvand fra DPF-6-Lag har en gennemsnitlig bly-koncentration på 1,0 $\mu\text{g/L}$, varierende fra 0,2 til 2,5 $\mu\text{g/L}$, og alle hændelser overholder kravet. For DPF-18-Lag ligger indholdet af bly langt under kravet, med en gennemsnitskoncentration på 0,2 $\mu\text{g/L}$, og et variationsinterval fra 0,0 til 0,5 $\mu\text{g/L}$.



Figur 14. Indhold af bly (Pb_{total}) i indløbsvand (hvid), udløbsvand DPF-6-Lag (mørk grå) og udløbsvand DPF-18-Lag (lys grå) i de 25 hændelser. Krav til udløbsvand på maks. 3,2 $\mu\text{g Pb/L}$ vist som stiplede linje.

Fosfor

For ca. 3/4 af de observerede hændelser ligger indholdet af fosfor i indløbsvandet over kravet på 100 mg/L. Indløbsvandet indeholder i gennemsnit 178 mg/L, med et variationsinterval på 66 - 658 mg/L. Udløbsvand fra DPF-6-Lag har en gennemsnitlig fosforkoncentration på 47,4 mg/L, varierende fra 18,6 – 101,4 mg/L. Alle hændelser overholder kravet på nær hændelse 25, der tangerer kravet. Udløbsvand fra DPF-18-Lag har en gennemsnitlig fosforkoncentration på 39,0 mg/L, og varierer fra 16,0 til 78,2 mg/L. Alle hændelser overholder kravet.



Figur 15. Indhold af fosfor (P_{total}) i indløbsvand (hvid), udløbsvand DPF-6-Lag (mørk grå) og udløbsvand DPF-18-Lag (lys grå) i de 25 hændelser. To hændelser i indløb ligger uden for figuren og værdi er anført. Krav til udløbsvand på maks. 100 µg P/L er vist som stiplede linje.

Kommentarer til data

Der er i måleperioden lavet 23 registreringer af hændelser, der blev kasseret, typisk på grund af for korte byger og dermed for få delprøver i fraktionsopsamlerne. De 25 rapporterede hændelser er således udvalgt ved at foretage en løbende grovsortering i måleperioden.

I enkelte hændelser er udløbskoncentration fra det ene eller begge filtre større end indløbskoncentration. Dette gælder for:

zink i hændelse 7

kobber i hændelse 6, 7, og 13

krom i hændelse 1, 6, 7, 9, 10, 13 og 25

fosfor i hændelse 20

For zink i hændelse 7 kan der være tale om en fejlmåling eller forurening af prøven, da fjernelsen af suspenderet stof i samme hændelse er god. For kobber og krom ses forholdet udelukkende at optræde hvor indløbskoncentrationen er lav, og skyldes da formodentlig den uundgåelige variation der kan være mellem det vand der analyseres på indløbssiden og det præcise volumen der måles på udløbssiden. Specifikt for hændelse 13 gælder, at denne er baseret på en lille hændelse gennem filtrene og dermed et lille antal delprøver (se graf for hændelse 13 på s. 5 i Appendiks).

Drænvand

Der er som nævnt drænvand i alle prøver, eftersom pumpestationen modtager såvel vejvand som drænvand. Andelen af drænvand i de enkelte hændelser afhænger af nedbørsmønsteret for hændelsen. I forhold til vurdering af den dobbeltporøse filtreringsteknik er indholdet af drænvand uden betydning, da renseeffekten vurderes ved sammenligning af stofindholdet ved ind- og udløb. I det omfang man måtte ønske at benytte indløbsdata som mål for vejvands sammensætning bør der enten kun inkluderes data for hændelser stærkt domineret af nedbør (vejvand) eller data må korrigeres for den fortynding drænvandet påfører vejvandet. Hertil kan benyttes hændelser domineret af drænvand, f.eks. hændelse 18, der blev udtaget med det formål at karakterisere drænvandets sammensætning. Spørgsmålet om vejvands og drænvands sammensætning vil ikke blive forfulgt yderligere i basisrapporten.

Diskussion af resultater i forhold til krav

Hydraulisk kapacitet

Et fuldskala dobbeltporøst filter til håndtering af vejvand fra Ørestads centrale opland skal kunne håndtere ca. 450 m³/t. Ved dimensioneringen af pilotanlægget blev der sigtet mod en hydraulisk kapacitet på 1/25 af et fuldskalaanlæg, dvs. DPF-6-Lag og DPF-18-Lag tilsammen skulle have en kapacitet på 18 m³/t ved en gradient på 10 ‰. Ud fra producentoplysninger om de anvendte geo-nets hydrauliske kapacitet blev DPF-18-Lag opbygget med 18 højporøse lag á 4 mm, og forventedes dermed at have en kapacitet på 9 m³/t. Samme kapacitet forventedes for DPF-6-Lag, der er opbygget med 6 højporøse lag á 6 mm. De indledende bestemmelser af hydraulisk kapacitet viser, at de to DPF-filterversioner har nogenlunde samme kapacitet (DPF-6-Lag 4,01 m³/t og DPF-18-Lag 3,54 m³/t ved en gradient på 0,01), men at gradienten i pilotanlægget skal være 2½-3 gange større for at opnå den ønskede kapacitet på 9 m³/t. Som nævnt kan denne gradient indstille sig uproblematisk med pilotanlæggets givne konstruktion af modtagekamre. For DPF-6-Lag er det højeste observerede flow 10,0 m³/t, og for DPF-18-Lag 8,6 m³/t (Figur 6).

Dette maksimale flow forekommer ved flere hændelser, fordelt over hele observationsperioden, og demonstrerer at der i pilotanlægget kan opnås tilstrækkelig gradient til at filteret kan modtage og behandle vand med den ønskede hastighed⁷. Set over hele måleperioden er gennemsnittet af maksimalt flow i DPF-18-Lag på 4,0 m³/t, og det er betydelig mindre end i DPF-6-Lag på 7,0 m³/t. Da indløbsvandet splittes ensartet op til de to modtagekamre må den samlede konklusion være, at DPF-6-Lag har betydeligt bedre hydraulisk ledningsevne end DPF-18-Lag. Da det af figur 9 endvidere ses, at forskellen tager til mod slutningen af måleperioden, tyder det på, at der foregår en vis tilstopning i DPF-18-Lag. Tilstopning ser ikke ud til at være et problem i DPF-6-Lag. Dette er nærmere diskuteret under perspektivering.

Fjernelse af suspenderet stof, zink, kobber, krom, bly og fosfor

Suspenderet stof

For suspenderet stof er fjernelsesprocenterne i DPF-6-Lag og DPF-18-Lag på henholdsvis 91,5 og 98,9 ‰. I forhold til kravet fra Københavns Kommune renses DPF-6-Lag tilfredsstillende, idet kun en enkelt hændelse i DPF-6-lag tangerer kravet på maks. 25 mg/L med et indhold af suspenderet stof på 25,8 mg/L, mens vejvandet i alle øvrige hændelser renses til under kravet. I DPF-18-Lag er den maksimale udløbskoncentration 4,4 mg/L. Fysisk erkendes den effektive fjernelse af finpartikulært materiale ved at indløbsvandets karakter ændres fra ugenomsigtigt gråbrunt til krystalklart i udløbet fra DPF-18-Lag, og til klart eller svagt gulligt i udløbet fra DPF-6-Lag.

⁷ Heldigvis har modtagekamrene fra starten af været konstrueret til at tillade en større vanddybde, og dermed en betydeligt større gradient end de 10 ‰.

Tungmetaller

Begge DPF-versioner renses tilfredsstillende for zink. DPF-6-Lag fjerner i gennemsnit 70,0 % og DPF-18-Lag fjerner i gennemsnit 87,3 %. Allerede i indløbet er indholdet af zink under kravet på 110 µg Zn/L i ca. halvdelen af hændelserne. Koncentrationen i udløb fra begge filtre ligger i alle hændelser betydeligt under kravet.

DPF-6-Lag og DPF-18-Lag fjerner i gennemsnit henholdsvis 50 % og 61 % af det kobber der findes i indløbsvandet, og tilsvarende overholder henholdsvis 11 og 18 af hændelserne kravet på 12 µg Cu/L. Der er dermed et betydeligt antal hændelser, der til trods for væsentlig reduktion, ikke overholder kravet. Den anvendte kalk vides fra forudgående laboratorieforsøg at have pæn affinitet for ikke-kompleksbunden opløst kobber, Cu²⁺. Forklaringen på den dårligere kobbertilbageholdelse i pilotanlægget er sandsynligvis, at en del af kobberet findes på opløst kompleksbunden form. Se tiltag for at øge kalkens affinitet over for kobber under perspektivering.

Med fjernelsesprocenter på 40,5 % i DPF-6-Lag og 45,7 % i DPF-18-Lag er krom det af de fire analyserede metaller, der fjernes dårligst. Indholdet af krom i indløbsvandet ligger gennemsnitligt på det dobbelte af kravet på 10 µg Cr/L. For udløbene er billedet ens for de 2 filtre; i en tredjedel af hændelserne overskrider udløbsvandet kravet. Den utilstrækkelige tilbageholdelse tilskrives, at krom i vejvand i betydeligt omfang findes på anion-form (CrO₄²⁻), der ikke adsorberes til den anvendte kalk. Dette forhold var kendt fra de indledende laboratorieforsøg, og som beskrevet under perspektivering er der udviklet en in-situ coatingsteknik, der forventes at kunne forbedre anlæggets tilbageholdelse af krom og kobber.

Bly i indløbsvandet ligger markant over kravet på 3,2 µg Pb/L. Fjernelsen af bly i DPF-6-lag og DPF-18-lag sker effektivt. De observerede gennemsnitlige fjernelsesprocenter er på henholdsvis 88,1 % og 97,7 %, og begge filtre renses til under kravet i alle hændelser.

Fosfor

Både DPF-6-Lag og DPF-18-Lag reducerer fosforindholdet i indløbsvandet i betragtelig grad. De gennemsnitlige fjernelsesprocenter er for DPF-6-Lag 73,3 % og for DPF-18-Lag 78,0 %. Fosforindholdet i indløbsvandet varierer mellem 66 og 656 µg P/L. DPF-6-Lag fjerner nok fosfor til at overholde kravet i alle hændelser (en enkelt hændelse tangerer kravet på 100 µg/L). DPF-18-lag ligger betydeligt under kravet i alle hændelser.

Sammenligning af DPF-6-Lag og DPF-18-Lag

Som forventet renses DPF-18-lag generelt bedre end DPF-6-Lag. Forskellen er mest markant for suspenderet stof, zink, bly og fosfor. Denne forskel tilskrives den korte sedimentationsdybde (4 mm versus 6 mm) og den ca. dobbelt så lange opholdstid i DPF-18-Lag set i forhold DPF-6-Lag. For suspenderet stof, zink, bly og fosfor er begge filterversioner stort set i stand til at overholde kravene, mens begge anlæg har problemer i forhold til kobber og krom. Set i forhold til overholdelse af renskravene, er den særligt gode renssevne i DPF-18-Lag dermed af mindre betydning, med mindre krav til f.eks. vandets klarhed skærpes. Hydraulisk fungerer de to anlæg stort set lige godt i udgangspunktet, men DPF-18-Lag ser ud til at

have en vis tilstopning, mens dette ikke ser ud til at forekomme i DPF-
Lag.

Perspektivering

Med pilotanlægget i Ørestad er der opnået en række værdifulde resultater. Først og fremmest viser afprøvningen, at det grundlæggende princip med indlejring af vandrette højporøse strømningslag mellem lavporøse fangstlag ser ud til at fungere rensemæssigt. Filterversionen med 6 højporøse lag á 6 mm, DPF-6-Lag, har demonstreret, at der med dobbeltporøs filtrering kan opnås en effektiv sedimentation samtidig med fastholdelse af en høj hydraulisk kapacitet. Filterversionen med 18 højporøse lag á 4 mm, DPF-18-Lag, har vist en formidabel sedimentation, men desværre også faldende hydraulisk ledningsevne. Dette er baggrunden for den nedenfor foreslåede segment-opbygning af fremtidige DPF-anlæg.

Dernæst giver de første resultater et indblik i variationen i den urbane afstrømning. Hovedkonklusionen er, at variationen i stofindhold er betydelig, og kun kan beskrives på baggrund af en række hændelser. Da de præsenterede stofdata er baseret på gennemsnit af delprøver indsamlet over en længere afstrømningsperiode og afstrømningen desuden er mere eller mindre fortyndet med drænvand må stofkoncentrationen i den direkte afstrømning fra vejene i Ørestad generelt forventes at være betydeligt større end observeret her. For Ørestad som helhed forventes generelt et forhøjet indhold af suspenderet stof på grund af bydelens mange byggeaktiviteter.

Ved design af pilotanlægget blev det overvejet at etablere en sedimentationsenhed opstrøms for modtagekamrene, målrettet partikler over 50 µm. Dette blev droppet, idet der allerede findes et sandfang ved den anvendte pumpestation, CB1. På baggrund af de første erfaringer med pilotanlægget, og sammenligningen af hydraulisk kapacitet i DPF-6-Lag og DPF-18-Lag er det oplagt at modificere anlægget ved hjælp af en segment-opdeling, så de første 10-20 m af et dobbeltporøs filter optimeres til fjernelse af det grovere sediment, og de resterende optimeres til fjernelse af finpartikulært og kolloidalt materiale samt opløste forureninger.

Desuden bør det overvejes at anlægge et fuldskalaanlæg med større længde end 50 m, især hvis der benyttes grovere højporøse lag, f.eks. lag á 6 mm som i tilfældet med DPF-6-Lag. Derved øges renseevnen og det rensede vand vil sandsynligvis kunne opnå samme klarhed som set for DPF-18-Lag. Med indbygning af mere filtermateriale forlænges filterets levetid samtidig.

De indledende laboratorieforsøg bekræftede, at kalk er uegnet som kromat-sorbent. Der blev derfor udviklet en teknik til coatning af kalkkornenes overflade med jern- og humusforbindelser, der øger kalkens affinitet overfor kromat. Coatningen opnås via en mikrobielt drevet redox-proces, og kan foregå in-situ. Henover vinteren 2007/2008 blev der foretaget en coatning af DPF-6-Lag og efterfølgende gennemført en indledende karakterisering af coatningens renseeffekt ved hjælp af pulstilsætninger af tungmetaller og PAH'er til indløbet under recirkulering af fast volumen i filteret. I efteråret 2008 forventes effekten af coatningen dokumenteret over for vejvand ved at sammenligne udløbsvand fra DPF-6-Lag (coatet) med DPF-18-Lag (ucoatet) i mindst 10 nye hændelser.

Referencer

Jensen, M.B., Sørensen, S. og Ingvertsen, S.T. Benchmarking of DPF and other end-of-pipe technologies for stormwater treatment in dense urban areas. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, September 2008.

Miljø- og Energiministeriet. 1996. Bekendtgørelse 921 af 8. oktober 1996 om kvalitetskrav for vådområder og krav til udledning af visse farlige stoffer til vandløb, søer eller havet.