



# Dobbeltporøs Filtrering

Dobbeltporøs Filtrering (DPF) er en ny teknologi, der er udviklet til rensning af vejvand. Teknikken, der er patenteret, er målrettet samtidig fjernelse af partikulære og opløste forureninger. First proof of concept er gennemført i perioden 2007-2009 i et pilotanlæg i Ørestad, der modtager regnafstrømning fra 1,3 ha veje og P-arealer. Licensaftale er under indgåelse med privat firma, og den første afprøvning af fuldskaalanlæg med specialudviklede DPF-industrimoduler forberedes.

MARINA BERGEN JENSEN,  
PER EDUARD ROBERT BJERAGER &  
KARIN CEDERKVIST

Vejvand er en kompliceret cocktail. Ikke nok med at regnafstrømningen fra vejene indeholder stort set alle tænkelige stoffer i stort set alle tænkelige koncentrationer (se artikel af Ingvertsen m.fl. andet steds i dette blad), afstrømningshastigheden er også meget variabel. Sammenlignet med andre typer spildevand, f.eks. husholdningsspildevand og industrispildevand, der ankommer til renseanlæggene med nogenlunde samme volumen døgnet rundt, varierer regnafstrømningen voldsomt. Fra tørke til monsteregn. Renseudfordringen har dermed både en stofmæssig og en hydraulisk dimension.

## Innovativ efterspørgsel

I Ørestad udgør de mange åbne vandspejl, i form af et over 10 km langt kanalsystem, det vel nok mest markante og karaktergivende træk i denne nye slipseformede bydel på 700 m x 5 km i København. Kanalerne er samtidig bydelens system til regnhåndtering. Så når det regner, stiger vandspejlet i kanalerne, mens det i lange tørkeperiode langsomt falder. Hovedforsyningen til kanalerne er drænvand fra nabobyen Tårnby, der pumpes ind i kanalerne. By & Havn, Københavns Kommune og Københavns Energi ønsker at den grønne miljøprofil skal veje højt over bydelen. Metroen, der overflødiggjør en stor bilpark; de høje boligblokke, der rummer mange mennesker og samtidig tillader en stor andel grønt; og de høje standarder for byggeri er udtryk for dette ønske. Tilsvarende ses

regnvandet som en ressource, der er med til at bringe liv til bydelen ved at bidrage til kanalernes vandforsyning.

## Rensning uden kemikalier

I øjeblikket ledes al regnafstrømning fra tagflader direkte ud i Ørestads kanaler. Det skal vejvandet også på sigt, men på grund af vejvandets dårlige kvalitet og fravær af en ikke-miljøbelastende renseteknik, pumpes det p.t. til renseanlæg. Der mangler nemlig en ikke-miljøbelastende renseteknik. Det blev man klar over allerede i slutningen af 1990'erne hvor man forsøgsvist tillod vejvand at løbe direkte ud i nogle af de første kanaler. Det resulterede i en uacceptabel, gråbrun fane i vandet. Kanalerne er et rekreativt element, så vandet skal være så klart at man kan se bunden, dvs. 1,2 m sigtdybde. Drænvandet fra Tårnby renses før udledning til kanalerne i et Actiflo-anlæg, der er baseret på tilsætning af jernklorid, polymer og mikrosand. Dette



**Figur 1.** Pilotanlægget i Ørestad 2006, under etablering. Indesluttet i vandtætte membraner ligger til højre DPF-6-Lag, og til venstre DPF-18-Lag, begge 3,4 m brede og 49,5 m lange. Indsat foroven er en prøveserie af vejvand under rensning i DPF-18-Lag, udtaget på en regnvejrsgang i januar 2007. Prøven længst til venstre er indløbsprøven (0 m), mens prøven længst til højre er udløbsprøven (50 m). De 8 prøver derimellem er udtaget gennem små sondeslanger indlagt i udvalgte højporøse lag (strømningslag) i afstandene 1 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m og 49 m. Indholdet i suspenderet stof falder fra knap 400 mg/L til omkring 2 mg/L over de 50 m.



resultater i nogle meget lave koncentrationer af suspenderet stof, tungmetaller og fosfor. Københavns Kommune har givet tilladelse til denne renseseteknik, men kun midlertidigt, fordi man ønsker at finde frem til en renseseteknologi, der kan rense vejvand og drænvand uden brug af kemikalier og med lille eller intet energiforbrug. Det er her udviklingen af Dobbeltporøs Filtrering kommer ind i billedet.

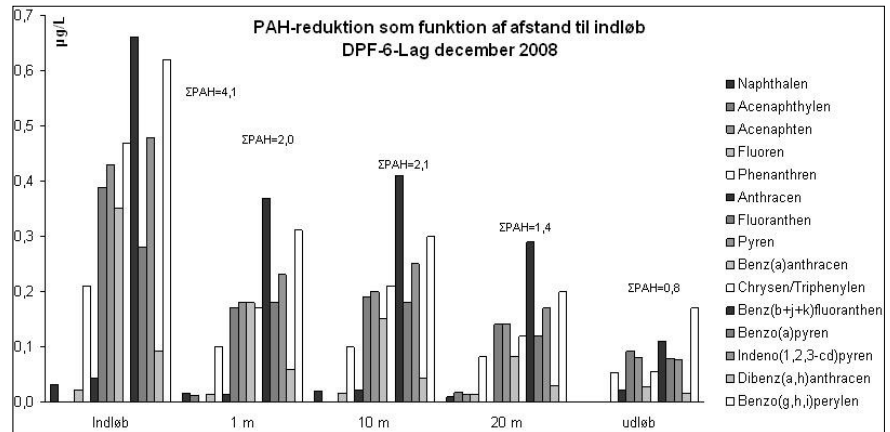
Københavns Universitet fik i 2001 til opgave, i samarbejde med Rambøll, og under medfinansiering af Københavns Energi, By & Havn, Realdania, Københavns Kommune og Videnskabsministeriet at udvikle et rensesystem baseret på naturlige rensesmekanismer til rensning af vejvand til skrappe krav (se Tabel 1). Plantebaserede rensesystemer blev overvejet, men hurtigt droppet igen. Dels på grund af den dårlige rensning i vinterhalvåret, hvor henfald af plantemateriale ligefrem kan føre til frigivelse af akkumuleret forurening, dels på grund af sådanne anlægs pladskrav. Idéen til det dobbeltporøse filtreringsprincip opstod i 2001, og er inspireret af stoftransport i struktureret morænejord. Her fører dybtgående høj-permeable biologiske makroporer og tektoniske sprækker strømmende vand dybt ned i jorden, under samtidig udveksling af stof med den omgivende, lavpermeable ler-matrice. Ideen blev patentanmeldt af Københavns Universitet med prioritetsdato 26.06.2002 og ansøgningsnummer PCT/DK2003/000443. Siden er der udstedt patent i USA og Europa.

### Sådan virker Dobbeltporøs Filtrering

Et Dobbeltporøst Filter har to porøsiteter; en høj og en lav, i form af to typer af alternerende vandrette lag. De højporøse lag udgør en form

**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       |          |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|             | mg/L        | µg/L      | µg/L      | µg/L      | µg/L      |          |
| Krav fra KK | 25,0        | 110,0     | 12,0      | 10,0      | 3,2       |          |
| Indløb      | gns.        | 123       | 98        | 25        | 18        | 9        |
|             | min-max     | 23-393    | 28-208    | 9-50      | 8-58      | 1-22     |
|             | stdafv. (n) | 87,1 (25) | 51,9 (25) | 10,7 (25) | 12,4 (25) | 5,2 (25) |
| DPF-6-Lag   | gns.        | 10,5      | 29,5      | 12,2      | 10,9      | 1,0      |
|             | min-max     | 1,4-25,8  | 9,7-70,2  | 7,4-20,5  | 3,1-37,2  | 0,2-2,5  |
|             | stdafv. (n) | 6,2 (23)  | 14,7 (23) | 3,5 (23)  | 9,3 (23)  | 0,7 (23) |
|             | % fjernet   | 91,5      | 70,0      | 50,6      | 40,5      | 88,1     |
| DPF-18-Lag  | gns.        | 1,4       | 12,5      | 9,6       | 10,0      | 0,2      |
|             | min-max     | 0,4-4,4   | 2,5-29,2  | 4,8-24,1  | 2,6-38,4  | 0,0-0,5  |
|             | stdafv. (n) | 0,8 (24)  | 7,2 (24)  | 4,4 (24)  | 9,7 (24)  | 0,1 (24) |
|             | % fjernet   | 98,9      | 87,3      | 61,1      | 45,7      | 97,7     |



**Figur 2. Indhold af PAH i vandprøver udtaget med sondeslanger i stigende afstand fra indløbet i strømningsslag nr. 2 fra oven fra DPF-6-Lag under regn december 2008. PAH'erne er ved hver afstand afbilledet i den anførte rækkefølge. Sum PAH er anført for hver prøve som ΣPAH (µg/L).**

for spalteformet makrostruktur beregnet til fremføring af vandet, mens de lavporøse lag udgør den omkringliggende matrice, hvor forureningen skal akkumuleres. Vandet strømmer vandret gennem filteret via de højporøse lag, der i princippet blot er en åben spalte af få millimeters højde. Undervejs afsættes forureningen til de underliggende lavporøse lag. I de lavporøse lag er vandet stillestående, eller langsomt strømmende, og her placeres et godt filtermateriale, der samtidig har en vis porøsitet (hulrumsprocent). Opløste forureninger adsorberes til filtermaterialets overflade, mens partikulære forureninger lejr sig i hulrummene. Med en membran under de lavporøse lag forhindres tab af akkumuleret materiale til det underliggende højporøse lag. Filterets kapacitet vokser med antallet af dobbeltlag, der stables oven på hinanden, og disses bredde (det samlede tværsnitsareal).

Graden af rensning vokser med vandets opholdstid, hvilket vil sige at rensegraden stiger med filterets længde ved en given bredde, højde, og strømningshastighed (gradient). Princippet i Dobbeltporøs Filtrering er illustreret på DPF-hjemmesiden (se link under referencer), der også har en animation af rensprocessen, udarbejdet af Rambøll.

### Test i pilotanlæg i Ørestad

I perioden 2001 – 2004 blev ideen testet i et 2 m langt laboratoriefilter. På baggrund af lovende laboratorieresultater blev der i 2005 – 2006 bygget et DPF-pilotanlæg til rensning af vejvand fra 1,3 ha veje og P-arealer i Ørestad. Pilotanlægget er placeret under plænen i Ørestads største park, Byparken, således at parkens fulde areal fortsat kan benyttes til rekreative formål, og publikum ikke eksponeres til de forurenede stoffer, der fjernes fra vejvandet. I perioden 2007 – 2009 er der gennemført first proof of concept med tilfredsstillende resultat, og i øjeblikket pågår produktmodning og markedsføring i samarbejde med potentiel licenstagere.

First proof of concept er gennemført på pilotanlæg i Ørestad. Her sammenlignes to versioner af et Dobbeltporøst Filter, dels et grovere DPF-filter bestående af 6 dobbeltporøse lag, dels et etableringsmæssigt dyrere DPF-filter bestående af 18 lag men med forventet bedre rensning og tre gange så lang levetid:

DPF-6-Lag består af 6 dobbeltporøse enheder med en spaltehøjde i højporøse lag på 6 mm og en tykkelse af lavporøse lag på 10 mm. Filtermateriale: Hård bryozokalk fra Faxe Kalkbrud med kornstørrelse 1-3 mm og 50 % porøsitet.

DPF-18-Lag består af 18 dobbeltporøse enheder med en spaltehøjde i højporøse lag på 4 mm og en tykkelse af lavporøse lag på 10 mm. Filtermateriale: Hård bryozokalk fra Faxe Kalk-



**Tabel 2. Resultater fra in situ coatingsforsøg med okkerslam og kompostekstrakt. Tilbageholdelse af kobber (tilsat som Cu<sup>2+</sup>), krom (tilsat som kromat), og arsen (tilsat som arsenat). Der blev tilsat i alt fire pulse, henholdsvis før coating (kun kalk), og efter hvert step i coating-processen. Det ses at tilsætning af okkerslam (amorf jernoxidhydroxider) har den mest markante effekt på tilbageholdelsen, og bør overvejes som filteringsrediens ved fremtidige anlæg.**

| Metal  | Koncentration i udløb umiddelbart før pulstilsætning $\mu\text{g/L}$ | Koncentration i udløb ved ligevægt efter pulstilsætning $\mu\text{g/L}$ | Hypotetisk konc. hvis der kun foregår fortynding af puls $\mu\text{g/L}$ | Reduktionsfaktor (hypo. konc. / obs. konc.) |
|--|--|---|--|---|
| Puls 1. Anlægget indeholder kalk   |  |   |  |   |
| Cu   | 16   | 18  | 435  | 24  |
| Cr   | 2,3  | 127   | 170  | 1,3   |
| As   | 3,6  | 31  | 170  | 5,5   |
| Puls 2. Anlægget indeholder kalk + okkerslam   |  |   |  |   |
| Cu   | 8,0  | 9,6   | 390  | 41  |
| Cr   | 0,6  | 1,5   | 152  | 101   |
| As   | 1,0  | 2,0   | 152  | 76  |
| Puls 3. Anlægget indeholder kalk + okkerslam + kompost-ekstrakt                      |  |   |  |   |
| Cu   | 26   | 36  | 390  | 11  |
| Cr   | 7,9  | 3,6   | 152  | 42  |
| As   | 2,4  | 3,5   | 152  | 43  |
| Puls 4. Anlægget har været underkastet redoxbehandling og har nu den færdige coating |  |   |  |   |
| Cu (ICP-MS)  | 13   | 16  | 386  | 24  |
| Cr   | 0  | 4,6   | 151  | 33  |
| As (ICP-MS)  | 2,5  | 2,9   | 151  | 52  |

brud med kornstørrelse 1-3 mm og 50 % porøsitet.

De to filtre ligger parallelt i den samme udgravning, og måler begge 3,4 m \* 49,5 m, se figur 1. De er hydraulisk adskilte, da de er indpakket i hver sin membran, og er dimensioneret til samme hydrauliske kapacitet, nemlig 9 m<sup>3</sup>/t, svarende til at 95 % af årsafstrømningen fra det tilkoblede opland på 1, 3 reduceret hektar, forventes at passere igennem, mens kun 5 % sendes i overløb.

Når det regner løber vejvandet ned i nedløbsbrøndene på vejene, hvorfra det via rørledninger føres til en pumpestation forsynet med sandfang og olieudskillere. Pumpestationerne pumper vejvandet fra Ørestad ud i Øresund, bortset fra den andel der ledes til pilotanlægget. Vejvandet, der modtages i pilotanlægget har således passeret et sandfang allerede.

### Gode rensere resultater

Pilotanlægget har rensset vejvand fra Ørestad med tilfredsstillende resultater. Der er undersøgt 25 regnhændelser i første halvår af 2007, hvor ind- og udløbskoncentrationer af suspenderet stof, zink, kobber, krom, bly og fosfor er bestemt og sammenholdt med kommunens krav til kvalitet af det rensede vand (figur 1 og tabel 1). Dette er dokumenteret i Basisrapport. Ud fra de samme hændelser er opstillet massebalancer og estimeret levetid, ligesom andelen af organisk stof, fordeling af zink, kobber, krom, bly og fosfor på opløst og partikulær form er bestemt. Derudover er renssevnen for yderligere 29 grundstoffer bestemt, og der er rapporteret data fra kam-pagnemålinger på miljøfremmede organiske

forbindelser, se eksempel i figur 2. Endelig er der fundet korrelationsværdier mellem suspenderet stof og turbiditet, zink, kobber, krom, bly og fosfor. Dette er alt sammen beskrevet i Tillæg 1 til Basisrapport. Efter det første halv år blev det besluttet at forsøge at forbedre fjernelsen af krom. Der blev derfor gennemført en coating af bryzo-kalken i DPF-6-Lag bestående af humus og jern, der blev tilsat enkeltvis i form af henholdsvis vandigt kompostekstrakt og okkerslam fra vandværk, og efterfølgende udfældet via en mikrobiel drevet reduktions-oxidationsproces. Effekten af coatingen på fjernelse af krom og kobber samt 9 PAH-forbindelser blev testet med kunstige pulstilsætninger direkte til indløbet under recirkulerende steady-state flow forhold (Tabel 2). Efterfølgende blev der opsamlet yderligere 17 naturlige regnhændelser, der blev analyseret efter samme program som de først 25 regnhændelser. Der blev desuden gennemført en enkelt vurdering af fjernelsen af patogener. Resultatet af disse analyser findes i Tillæg 2 til Basisrapport, og er også beskrevet i Cederkvist et al., 2010.

### Optimerede industrimoduler

DPF anlægget i pilotskala i Ørestad er opført efter "de forhåndenværende søms princip". Det vil sige, at den 50 m lange og 8 m brede stak af dobbeltporøse lag er opbygget ud fra eksisterende, eller svagt modificerede, produkter på markedet. Således er de højporøse strømningslag skabt ved hjælp af geo-net, mens de lavporøse kalklag er fremstillet ved en modifikation af bentonitmembraner. Dette har fungeret, men det vurderes, at der vil kunne opnås en bedre rensning med

et special-designet element. Desuden har de gennemførte forsøg med pilotanlægget vist, at det er nødvendigt regelmæssigt, at kunne fjerne sediment fra indløbsiden for at opretholde strømningskapaciteten og opnå en acceptabel levetid af anlægget.

### På vej mod industriel fremstilling

I øjeblikket arbejdes der i samarbejde med potentiel licenstagere på at fremstille specialudviklede moduler. Disse skal være egnede til industriel fremstilling, og skal via designet optimere funktion, anlæg og drift af fuldskala DPF-filtre. Dermed forventes vejen at være banet for kommerialisering og udbredelse af DPF-teknikken. Der er indhentet forslag til design i form af prototyper fra to tyske firmaer, der begge er under testning i ny laboratorieopstilling. Disse er fremstillet i PE og forsynet med kliksystemer til hurtig samling ved én person. For at forlænge levetiden af filteret er der derudover designet et spulbart forfilter, der opbygges af samme slags DBF-plastmoduler med uden indfyldning af kalk.

### København regner med DPF

Københavns Kommune har indskrevet rensning af vejvand med Dobbeltporøs Filtrering i deres Spildevandsplan 2008-2012: "Såfremt vejvandsrensaneanlægget i Ørestad giver tilfredsstillende resultater på renssevne og økonomi, kan to fuldskalalanlæg etableres i Ørestad". Med de specialdesignede DPF-plastmoduler forventes såvel god renssevne som god totaløkonomi, set i forhold til levetid og alternativ kemisk rensning.

### Referencer

- Artiklen er baseret på følgende tre rapporter, der alle findes på DPF-hjemmesiden ([www.sl.kvl.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes\\_filtretning.aspx](http://www.sl.kvl.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes_filtretning.aspx)):
- Basisrapport. Tillæg 1 til Basisrapport. Tillæg 2 til Basisrapport.
- Desuden refereres til: Cederkvist, K., Holm, P.E., and Jensen, M.B. 2010. Full scale removal of arsenate and chromate from water using a limestone and ochreous sludge mixture as low cost sorbent material. *Water Environment Research*, 82(5):401-408.
- MARINA BERGEN JENSEN, [mbj@life.ku.dk](mailto:mbj@life.ku.dk), hortonom, Ph.D, Seniorforsker ved Skov & Landskab.
- KARIN CEDERKVIST, [karince@life.ku.dk](mailto:karince@life.ku.dk), miljøkemiker, Ph.d.-studerende ved Institut for Grundvidenskab og Miljø.
- PER EDUARD ROBERT BJERGAGER, [pebj@life.ku.dk](mailto:pebj@life.ku.dk), agronom, Videnskabelig assistent ved Skov & Landskab.
- Alle Det Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet.