

DOBBELTPORØS FITRERING

INDUSTRIMODUL

Kolofon

Titel:

Dobbeltporøs Filtrering industrimodul

Emneord:

Dobbeltporøs filtrering, overfladevand, rensning af vejvand, tungmetalindhold og filtreringsteknik til rensning af vand.

Projektmidler:

Projektet er gennemført med støtte fra tilskudsmidlerne i forbindelse med den miljøteknologiske handleplan.

Udgiver:

Naturstyrelsen

Forfatter:

Frank Hallig, Rambøll Marina Bergen Jensen, KU LIFE

Sprog:

Dansk

År:

2011

ISBN nr.: 978-87-7279-231-6

Udgiverkategori: Statslig

5

Resume:

Dobbeltporøse Filteranlæg (DPF) anlægget i Ørestaden er opbygget til at genanvende overfladevand rekreativt i kanaler i området.

Formålet med projektet er, at designe og teste et modul, der kan fremstilles industrielt, og som kan sikre en simpel og regenererbar opbygning af fuldskala DBF. Via projektet er der udviklet og modtaget prototype på DPF-moduler fra to forskellige producenter.

Ansvarsfraskrivelse:

Naturstyrelsen offentliggør rapporter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøministeriet. Offentliggørelsen betyder, at Naturstyrelsen finder indholdet af væsentlig betydning for en bredere kreds. Naturstyrelsen deler dog ikke nødvendigvis de synspunkter, der kommer til udtryk i rapporterne

Må citeres med kildeangivelse.

INDHOLD

1.	Indhold	3
2.	Forord	1
3.	Formål og metode	2
3.1	Formål	2
3.2	Metode	2
4.	Indledning og resumé	4
4.1	Det hidtidige udviklingsarbejde	4
4.2	Resumé	5
4.3	Styre- og interessentgruppe	8
5.	Summery in English	9
5.	Objective and Method	10
5.1	Objective	10
5.2	Method	10
5.3	Introduction and summary	12
5.4	The Developing Work	12
5.5	Short summary	13
5.6	Steering and Stakeholder Groups	16
6.	Undersøgelse af sedimentet i pilotanlæg	17
6.1	Formål med udtagning af filterprøver	17
6.2	Metode	17
6.2.1	Fordeling af akkumuleret sediment	18
6.2.2	Rumvægt af akkumuleret sediment	20
6.2.3	Størrelse og form af partikler akkumuleret i sediment	21
6.2.4	Fordeling af tungmetal og fosfor på sediment og kalk	21
6.3	Resultater og diskussion	22
6.3.1	Felt-karakterisering af akkumuleret sediment	22
6.3.2	Akkumuleret sediment i pilotanlægget, efterår 2009	24
6.3.3	Vurdering af sedimentets rumvægt (højporøse lag)	26
6.3.4	Partikelstørrelsesfordeling og partikel-form i akkumuleret	
	sediment	26
6.3.5	Partikelform	29
6.3.6	Fordeling af tungmetal og fosfor på sediment og kalk	31
7.	Supplerende analyser af vejvand	34
7.1	Formål	34
7.2	Materialer og metoder	34
7.2.1	Forholdet mellem opløst og partikelbunden forurening som	
	funktion af tid fra afstrømning	36
7.2.2	Effekt af sandfang og olieudskiller på stoffjernelsen	36
7.3	Resultater og diskussioner	36
7.3.1	Strømningsforløb ved de to hændelser, PH1 og PH2	36
7.3.2	Ændring i opløste tungmetaller og fosfor ved henstand af	
	prøver	38
7.3.3	Effekt af sandfang og olieudskiller på stoffjernelsen	39
7.3.4	Partikelstørrelsesfordeling	44
7.3.5	PAH i DPF-anlæg	47
8.	Indbygning af anlæg - konstruktioner	49
8.1	Anlægsopbygning	49
8.1.1	Filter og forrensning	49
8.1.2	Konstruktioner	51
8.2	Udførelse	53
8.3	Levetid	54
8.4	Ørestad	54

8.4.1	Økonomisk overslag	55
8.4.2	Drift og bortskaffelse	56
9.	Litteraturstudie af metoder til forsedimentering	58
9.1	Sedimentationsbassin	58
9.2	Lamelseparator	59
9.3	Gravitations-sandfilter	59
9.4	Kombineret lamelseparator og filter	59
9.5	Tromlefilter	60
9.6	Båndfilter	60
9.7	Tryksandfilter	60
9.8	Cross flow filtration	60
10.	Design og test af dpf-lamelplader	61
10.1	Formål	61
10.2	Funktionskrav	61
10.3	Materialer og metoder	61
10.4	Resultater og diskussion	63
10.4.1	Turbiditet og strømning	63
10.4.2	Partikelstørrelsesfordelinger	64
10.4.3	Fjernelse af suspenderet stof	65
11.	3D-flowberegninger af sedimentering i DPF-	
	lamelplader	67
11.1	Geometri og opsætning	67
11.1.1	Partikler	67
11.1.2	Forrensning – lamelplader	67
11.1.3	Forrensning lamelseparator	69
11.2	Resultater	70
11.2.1	Strømning i forrensning og indløbsbygværk	70
11.2.2	Variation i volumenstrøm	71
11.3	Optimering af geometri på lamelplader	71
11.3.1	Variation af flowlag og fangstlag med konstant lagtykkelse –	
	lamelhøjder	71
11.3.2	Variation af afstanden mellem lamellerne	73
11.3.3	Variation af fangstlag med konstant højde af flowlag – højde	
	af tværgående lameller	75
11.4	Sammenligning med lamelseparator	76

2. FORORD

Vores forhold til regnvand har gennem de senere år skiftet fra, at regnvand er noget, som blot skal afledes, til at se regnvand som en ressource. Baggrunden for dette projekt var et ønske om at udnytte regnvand rekreativt i de kanaler, som man ønskede at etablere i Ørestad. Her har man valgt at aflede regnvand fra tage og andre ikke trafikerede flader direkte til kanalerne, hvorimod regnvand fra veje, p-pladser mv. skal gennemgå en rensning før udledning. Da man ikke fandt egnede metoder valgte man, at starte udvikling af et anlæg, der kunne rense dette vand. Metoden der i den forbindelse blev udviklet betegnes DobbeltPorøs Filtrering (DPF).

Dobbeltporøs Filtrering er en filtreringsteknik til rensning af vand, der er forurenet med partikulære og opløste komponenter. Metoden er i perioden 2007-2009 testet i et pilotanlæg, der modtager regnvand fra veje i Ørestad. Resultatet er beskrevet i tre testrapporter, som kan findes på: http://www.sl.life.ku.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes_filtrering.aspx.

Den hidtidige udvikling og test er foregået i et samarbejde mellem Københavns Universitet og Rambøll samt Københavns Energi, By & Havn og Københavns Kommune. Desuden har bl.a. Videnskabsministeriet og RealDania ydet finansiel støtte.

På baggrund af lovende testresultater har Miljøministeriet via programmet Miljøeffektiv Teknologi bevilget midler til udvikling af en prototype af et DPF-modul, der er egnet til industriel fremstilling, og som via sit design optimerer funktion, anlæg og drift af storskala DPF-filtre.

Bevillingsmodtagere er Rambøll og Skov & Landskab ved KU-LIFE, der gennemfører projektet i samarbejde med Københavns Energi og By & Havn. De to sidstnævnte har også støttet projektet økonomisk. Projektets styregruppe består af:

Karin Dahlgren	By- og Landskabsstyrelsen (nu Naturstyrelsen)
Helle Bjerg Sørensen	Københavns Kommune, Center for Park og Natur
Kirsten Ledgaard	By & Havn
Sonia Sørensen	Københavns Energi
Marina Bergen Jensen	Københavns Universitet, LIFE
Christian Nyerup Nielsen	Rambøll
Frank Hallig	Rambøll

Styregruppen har holdt 3 møder i projektperioden fra ultimo 2009 til medio 2010.

Til projektet er endvidere knyttet en interessentgruppe, der har bidraget til produktudviklingen gennem to workshops, afholdt henholdsvis før og efter udviklingen af DPF-modulet. Der har været afholdt 3 workshop i denne gruppe. Vi vil gerne benytte lejligheden til, at sige deltagerne tak for konstruktivt input.

Endeligt blev der afholdt en temadag omkring rensning af regnvand på KU Life, hvor DPF teknologien blev præsenteret.

DPF-teknikken er IPR-beskyttet af Københavns Universitet (Patentnummer PCT/DK2003/000443).

Fotos er taget af Christian Nyerup Nielsen, Rambøll og Marina Bergen Jensen, Skov & Landskab, KU-LIFE.

3. FORMÅL OG METODE

3.1 Formål

Projektets formål er beskrevet i ansøgningen til Miljøstyrelsen:

"Projektets langsigtede mål er at videreudvikle rensemekanismerne i Dobbeltporøs Filtrering således, at teknikken kan indbygges i industrielt fremstillede moduler egnet til markedsføring i moderne større bysamfund samt internationalt i byområder i hurtig udvikling, herunder BRIKlandene, Østeuropa, Japan, Canada og USA.

De specifikke mål, der forventes opfyldt med gennemførelsen af projektet er:

- At vurdere om de innovative mekanismer, der i DPF-pilotanlægget i Ørestad succesfuldt har omdannet vejvand til klart vand med lavt forureningsindhold, kan indbygges i et DPFindustrimodul, eksempelvis en plastkassette, egnet til industriel fremstilling, og dermed bane vejen for en kommercialisering af teknologien.
- At opstille scenarier for fuldskala-indpasning af det under 1) udviklede modul-baserede DPF-anlæg til rensning af vand i forskellige sammenhænge, samt at vurdere de anlægstekniske, økonomiske og driftsmæssige forhold, herunder indpasning i eksisterende infrastruktur.
- 3) At etablere en interessentgruppe bestående af potentielle forhandlere, entreprenører, arkitekter og anlægsejere i Danmark til at bistå med specifikationskrav og –ønsker til moduludvikling og opstilling af scenarier."

Projektets hovedformål er således, at bringe DPF-teknologien et skridt nærmere markedsføring ved at overføre erfaringerne fra pilotanlægget i Ørestad til et kommercielt DPF-produkt.

Specifikt er målet at designe et DPF-modul, der kan optimere kapacitet, stoftilbageholdelse og levetid af filteret samtidigt med at lette anlægs- og driftsfasen.

Designprocessen skal resultere i en prototype for et DPF-modul, der skal testes for fjernelse af suspenderet stof. Herudover skal der udarbejdes anlægsskitser, der illustrerer hvordan fuldskalaanlæg kan opbygges og kobles til eksisterende infrastruktur.

Parallelt med udviklingen afholdes workshop med deltagelse af interessenter – entreprenører, arkitekter, forsyninger, myndigheder mv. – for at få deres input til muligheder og udfordringer.

I perioden har der været afholdt 3 styregruppemøder, hvor ovenstående formål er blevet drøftet og justeret.

3.2 Metode

Med udgangspunkt i ovenstående formål blev det besluttet, at design af DPF-modulet skulle baseres på flere tiltag:

- Yderligere forsøg med pilotanlægget, der supplerer de allerede gennemførte forsøg, j.fr. Basisrapport, Tillæg 1 til basisrapport, Tillæg 2 til basisrapport:

- Udtagning af destruktive¹ prøver af det nu 2 år gamle filter til dokumentation af den vertikale og horisontale fordeling af akkumuleret sediment, tætheden af det lejrede sediment samt fordeling af tungmetal og fosfor på sediment og kalk
- Prøvetagning af vejvand i offentlig "indløbspumpestation" til vurdering af betydningen af prøve-henstand for fordeling af tungmetaller og fosfat på opløst og partikulær form
- Prøvetagning af vejvand i pumpestationen til dokumentation af funktion af sandfang og olieudskiller
- Udarbejdelse af skitser til anlægsopbygning:
 - Vurdering af alternative metoder til rensning af vandet inden det ledes til DPFanlægget
 - Gennemførelse af tredimensionelle strømningsberegninger til vurdering af hydrauliske og bundfældningsmæssige egenskaber i forrensningsmetoder
- Udarbejde skitser til et DPF-modul:
 - o Fremstilling af prototyper i samarbejde med leverandør
 - Teste prototypen i forsøgsopstilling

¹ Betegnelsen "destruktive prøver" er ikke nuanceret, idet der, som beskrevet i afsnit 4.2 er tale om udtagning af små filter-prøver, der på ingen måde destruerer filteret som helhed. Der er snarere tale om en "biopsi".

4. INDLEDNING OG RESUMÉ

Som nævnt i forordet blev udviklingen af Dobbeltporøs Filtrering startet, for at tilvejebringe rent vand til kanalerne i Ørestad. Her ledes regnvand fra tage og andre ikke trafikerede flader direkte til kanalerne, hvorimod regnvand fra veje, p-pladser mv. skal gennemgå en rensning før udledning. Renseanlægget skal bl.a. opfylde følgende krav:

- Rense regnvandet til de af myndighederne opstillede krav uden større vandtab, således at der kan tilvejebringes en tilfredsstillende vandkvalitet i kanalerne.
- Kunne indpasses i et tæt urbant område, som er målsætningen med Ørestad. Det vil sige, at der ikke må være tale om store, pladskrævende bassiner.
- Anlægget skal have en positiv miljøprofil, dvs. der må ikke bruges kemikalier og energiforbruget skal minimeres.
- Anlægs- og driftsøkonomi skal kunne stå mål med andre metoder, der opfylder tilsvarende krav til rensning.

Med udgangspunkt i ovenstående krav blev en række eksisterende rensemuligheder undersøgt, men ingen opfyldte samtlige krav.

Det er "kendt teknologi", at kalk har en bindende virkning på tungmetaller, fosfor mv. Denne teknik er hidtil anvendt i bassiner, hvor vandet passerer gennem kalken. Ulempen ved dette er, at kalken ofte stopper til, idet suspenderet materiale aflejrer sig over og i kalken. Ideen med dobbeltporøs Filtrering er at lade vandet strømme over kalken, hvorved tilstopning minimeres samtidig med, at sedimentation optimeres og vandtab undgås. Det er dette koncept der er anvendt i Dobbeltporøs Filtrering.

De indledende laboratorieforsøg og Pilotanlægget i Ørestad har vist:

- 1. Dobbeltporøs Filtrering er specielt attraktivt i urbane områder med mangel på frie arealer
- 2. Det er muligt, at designe anlægget så det indpasses i bymiljøet.
- 3. Hvor regnvandet skal bruges rekreativt eller hvor der stilles udledningskrav, det er vanskelige, at opfyldes på anden vis.
- 4. Kvaliteten af udløbsvandet, hvad angår tungmetaller, fosfor, PAHer mv., opfylder for de fleste stoffers vedkommende de af myndighederne stillede krav.

Efter gennemførelse af ovenstående udestod en række udfordringer, som skulle afklares i nærværende projekt, jf. Projektbeskrivelsen som fremgår af afsnit 2, Formål, samt nedenstående afsnit 3.1.

4.1 Det hidtidige udviklingsarbejde

Dobbeltporøs Filtrering (DPF) er en vandrenseteknik, der er udviklet til samtidig fjernelse af finpartikulært materiale og opløste forureninger. Proof of concept er gennemført i perioden 2007-2009 på et DPF-pilotanlæg i Ørestad, der modtager regnafstrømning fra 1,3 hektar veje og Parealer. Testresultaterne er beskrevet i tre rapporter (Basisrapport, Tillæg 1 til Basisrapport, og Tillæg 2 til Basisrapport), der alle kan hentes på:

 $\underline{http://www.sl.life.ku.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes_filtrering.aspx}\ .$

På baggrund af tilfredsstillende testresultater er formålet med nærværende projekt, at designe og teste et DPF-modul, der kan fremstilles industrielt, og som kan sikre en simpel og regenererbar opbygning af fuldskala Dobbeltporøse Filteranlæg, for derigennem at bane vejen for kommercialisering og udbredelse af DPF-teknikken.

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 og dræn-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 indløbssiden for at opretholde flowkapaciteten og opnå en acceptabel levetid af anlægget.

4.2 Resumé

I det følgende er givet et kort resume af de undersøgelser, der er udført for at kunne skabe en prototype af et DPF-modul. For uddybning henvises til det pågældende afsnit, som fremgår af afsnittenes overskrift.

Undersøgelse af sediment i pilotanlægget - afsnit 4

Efter 2 års afprøvning af pilotanlægget blev der i nærværende projekt udtaget intakte prøver af DPF-6-Lags filteret for direkte at beskrive fordelingen af akkumuleret sediment, tungmetal og fosfor, dels vertikalt i hvert af de 6 dobbeltlag, dels horisontalt på langs af det 50 m lange filter.

I afstandene 1, 3, 5, 10, 20 og 30 m fra indløbet blev der i strømningsretningen af DPF-6-Lag gravet ned til membranen omkring DPF-6-Lag og udtaget en 20 cm x 30 cm blok af filteret, indeholdende alle 6 dobbeltlag. Også rumvægt, partikelform og partikelstørrelsesfordeling blev bestemt på sedimentet.

Der var omtrent samme mængde sediment akkumuleret i alle 6 dobbeltlag ved de enkelte afstande, og det konkluderes dermed at de 6 højporøse lag har transporteret omtrent samme mængde vand.

Sedimentets fordeling i strømningsretningen fulgte det mønster, der var indikeret ud fra vandprøverne, hvor faldet i indhold af suspenderet stof er størst tættest på indløbet. Således var der akkumuleret ca. 3 kg/ m² dobbeltporøst lag (dvs. 18 kg/m² af den samlede DPF-6-Lags opbygning) tættest ved indløbet, faldende til omkring 0,5 kg/m² i afstanden 30 m. I større afstande var det ikke muligt, at udtage tilstrækkeligt sediment til at gennemføre analyserne.

Kalkmåtterne tættest på indløbet var fyldt fuldstændig op med sediment, og sedimentet havde også lejret sig mellem de øvre og nedre tråde i det PE-net, der udgør de højporøse lag. I afstanden 10 m lå der en tynd film af sediment oven på kalkmåtten, mens der i afstandene 20 og 30 kun var aflejret sediment i selve kalkmåtten. Samtidig kunne den konstaterede faldende hydrauliske kapacitet forklares, idet aflejringen af sediment mellem trådene i de højporøse lag over de første par meter af anlægget havde reduceret tværsnitsarealet.

Konklusionen er således, at der ved den givne belastning med sediment er behov for jævnligt, f.eks. hvert halve år, at kunne fjerne sediment akkumuleret nærmest indløbet. Det anbefales derfor, at lade fremtidige fuldskala DPF-anlæg bestå af to segmenter. Det første segment skal være en forrensningsenhed, som er beregnet til sedimentfjernelse. Det andet segment skal indeholde kalk eller andet filtermateriale. Sidstnævnte segment er beregnet til fjernelse af de fineste partikler og tilbageholdelse af opløst stof, og skal i princippet ikke kunne regenereres, men forventes at have en lang levetid. Se nedenfor under Indbygning af anlæg - konstruktion. De to segmenter benævnes i det følgende henholdsvis forfilter og kalkfilter.

Der kunne ikke konstateres nogen berigelse af kalken med hverken tungmetaller eller fosfor. Hovedparten af forureningsstofferne er associeret med sedimentet.

Sedimentet pakker med en tæthed (rumvægt) af ca. 600 kg/m³, hvilket ligger inden for de tidligere vurderede intervaller (Tillæg 1 til Basisrapport, kapital 3). Ud fra scanningselektronmikroskopi kan det konstateres, at sedimentet består af nogle små, få µm store, pladeformede og kantede partikler.

Størrelsesfordelingen er i overensstemmelse med tidligere observationer, idet medianværdien er knap 10 μ m for sediment aflejret tættest på indløbet, faldende til 2,7 μ m for sediment aflejret i afstanden 30 m fra indløbet, som er den sidste afstand der kunne udtages prøver fra.

Supplerende analyser af vejvand – afsnit 5

I afprøvningen af pilotanlægget viste analyserne af indløbsvandet, at en overraskende lille andel af tungmetallerne var på opløst form, hvilket forklarer den ringe mængde stof bundet til kalk.

For at undersøge om dette hænger sammen med vandets opholdstid i rør og pumpestation opstrøms for pilotanlægget, samt i prøvebeholdere før analyse, blev der under regn udtaget prøver af indløbsvandet til den pumpestation, der forsyner pilotanlægget, og af udløbsvandet fra samme pumpestation. Tesen var, at oprindeligt opløste tungmetaller kunne tænkes at adsorbere til suspenderet stof over tid, hvorfor den tidslige udvikling i koncentration af opløst og partikulært bundet tungmetal og fosfor er undersøgt.

Det viste sig, at tungmetallerne allerede ved ankomst til pumpestationen var partikulært bundet, og at fordelingen ikke ændrede sig markant ved henstand. For fosfor sås en faldende tendens, således faldt koncentrationen af opløst fosfor fra omkring 30 μ g/L til omkring 20 μ g/L over 2 døgn. Det konkluderes derfor, at regnafstrømningen fra Ørestad har en mindre andel tungmetaller på opløst form end hvad der er fundet andre steder. Årsagen kan være et forholdsvist stort indhold af finkornet suspenderet stof, hidhørende fra de mange byggeaktiviteter.

Det anbefales, at fastholde kalk som filtermateriale som sikkerhed for tilbageholdelse af opløste forureninger også i fremtidige situationer med forventet større andel opløst forurening i indløbsvandet.

Indbygning af anlæg – konstruktion – afsnit 6

Det samlede anlæg skal designes, så det indpasses i landskabet under samtidig hensyntagen til at kvaliteten af udløbsvandet er tilstrækkelig og at levetiden af anlægget er tilfredsstillende.

Anlæg til Dobbeltporøs Filtrering er specielt attraktive i urbane områder med mangel på frie arealer og hvor regnvandet skal bruges rekreativt. Dobbeltporøs Filtrering er også en god løsning hvor der af hensyn til en recipient stilles særligt høje udledningskrav.

Som tidligere omtalt blev det på et tidligt tidspunkt i projektforløbet konstateret, at det er nødvendigt, at opbygge anlægget af to principielt forskellige dele, hhv. forrensning og et kalkfilter. I forrensningen skal hovedparten af det grovere suspenderede materiale tilbageholdes, mens kalkfilteret skal fange det fineste af det suspenderede materiale og binde det opløste materiale.

Der er undersøgt forskellige kendte forrensningsmetoder, jf. afsnit 7, som evt. alternativ til et DPF-forfilter (første segment). Konklusionen er dog, at den optimale rensning sker ved at lade vandet strømme på tværs af designede DPF-plader med lameller, hvorved materialet lejres mellem disse lameller. Der er skitseret et system, hvorved det er muligt med jævne mellemrum at spule disse plader, f.eks. hvert halve år. Det skal sikres, at denne del af anlægget er konstant vandfyldt således, at sedimentet ikke "gror fast".

Kalkfilteret (andet segment) etableres ligeledes af DPF-lamelplader. Kalken placeres mellem lamellerne. Når vandet strømmer henover kalklaget aflejres stadig finere partikler, ligesom opløste forureninger kan bindes til kalken og akkumuleret sediment ved direkte kontakt samt ved diffusion og dispersion.

Levetiden af DPF-forfilteret er i princippet svarende til materialernes levetid på ca. 100 år idet dette kan renses. Levetiden af DPF-kalkfilteret er bestemt af størrelsesfordelingen af det aktuelle sediment, hvor meget sediment, der fanges i forfilteret samt hvor meget der kan lejres mellem kalkkornene.

Mængden af sediment, der fanges i forfilteret er bestemt på baggrund af de destruktive prøver, der er udtaget af anlægget i Ørestad. Dvs. den mængde sediment der er lejret i anlæggets første 6 m. Denne mængde er verificeret ved modelforsøg på prototyper af lamelplader, jf. afsnittet Design og test DPF-lamelplader. Disse undersøgelser viser, at ca. 35 % af sedimentet fanges i forfilteret.

Kalkkornene i kalkfilteret lejres med en tæthed af ca. 50%. Dvs. at der er ca. 50 % hulrum som kan fyldes med suspenderet materiale inden filteret er fyldt og skal udskiftes eller regenereres. På baggrund af kendskab til indløbs- og udløbskoncentrationer af suspenderet materiale i kalkfilteret og lejringstæthed estimeres kalkfilterets levetid i Ørestad til 20-30 år, ved en forrensningsdel på 6 m.

Med udgangspunkt i en konkret placering af et fuldskalaanlæg i Ørestad er der foretaget en vurdering af anlægsøkonomien. Denne viser at udgiften andrager størrelsesordenen 0,8 til 0,9 mio. kr. pr. red. ha. De tilhørende driftsudgifter er af størrelsesordenen 5.000-10.000 kr. pr. år pr. red. ha.

Litteraturstudie af metoder til forrensning – afsnit 7

Som beskrevet ovenfor foreslås anlægget at bestå af en forrensningsdel og et kalkfilter. Forrensningsdelen kan opbygges af lamelplader. Alternativt kunne en kendt sedimentationsmetode anvendes. I afsnit 7 er forskellige kendte metoder til sedimentation af suspenderet materiale i vejvand beskrevet og vurderet. Formålet med undersøgelsen er at vurdere om disse kendte metoder er bedre end Dobbeltporøs filtrering.

Følgende metoder er undersøgt:

- Sedimentationsbassin
- Lamelseparator
- Gravitations-sandfilter
- Tromlefilter
- Båndfilter
- Tryksandfilter
- Cross flow filtration

Fordele og ulemper ved ovenstående metoder er vurderet. Såfremt metoderne skal opfylde de samme krav som Dobbeltporøs Filtrering er ulemperne bl.a. at de er meget pladskrævende eller meget energikrævende. Konklusionen er derfor, at den bedste forrensning opnås ved det ovenfor beskrevne DPF-forfilter.

Design og test af DPF-lamelplader – afsnit 8

DPF-modulet opbygges af lamelplader, der har lameller i een retning på oversiden, og i modsat retning på undersiden. Lamellerne er placeret i strømningsretningen på pladernes underside. Når pladerne stables vil vandet strømme mellem lamellerne på undersiden af en plade, og strømme vinkelret henover lamellerne på oversiden af den underliggende plade. Vandet mellem de tværstillede lameller vil være stillestående, og dermed vil suspenderet materiale aflejres her. Denne opbygning anvendes til forrensningsdelen.

I filterdelen placeres et filtermateriale imellem tværlamellerne. Dette design er vurderet mest effektivt i forhold til at udnytte det fulde volumen af filteret. Ud fra computerstøttede tredimensionelle (CFD) flow-beregninger samt de opnåede erfaringer fra pilotanlægget foreslås en højde af lameller på oversiden af DPF-modulet (fangstlag) på 12 mm, mens der foreslås 6 mm for lamellerne på undersiden (flow-lag).

Der er udviklet og modtaget to prototyper på DPF-moduler fra to forskellige producenter. Den ene er testet i en forsøgsopstilling, der indikerer at omkring 20 % af sedimentet tilbageholdes over 2 m ved et flow svarende det som pilotanlægget er dimensioneret for.

Der foreslås en segmentopbygning, hvor det første segment (uden kalk og beregnet til jævnlig regenerering) gøres min. 6 m langt, mens det efterfølgende kalksegment gøres 44 m langt. Længden på 6 m er foreslået ud fra testresultaterne på DPF-modulerne, der ved ekstrapolation af de 20 % fjernet på 2 m anslår, at 6 m vil kunne fjerne omkring 35 % (ekstrapolationen følger det sediment-akkumuleringsmønster der er set i pilotanlægget) af den samlede mængde suspenderede stof. Forfilteret skal stå permanent vanddækket for at minimere sammenkitning af sediment. Forfilteret indbygges i et kammer, så der er mulighed for at fjerne sediment ved i en periode at recirkulere vand på tværs af hovedstrømningsretningen, og derefter, når hovedparten af sedimentet er i suspension, fjerne recirkuleringsvandet. Alternativt kan forfilteret spules manuelt.

Kalksegmentet deles i to serielt forbundne strenge á hver 22 m, der placeres ved siden af hinanden, sådan at indløbsvandet på skift, f.eks. hver halve år, kan løbe først til henholdsvis den ene eller den anden streng, og dermed sikre bedre udnyttelse af det fulde kalkfilter.

3D-flowberegninger af sedimentering i DPF-lamelplader – afsnit 9

Der er med en computermodel udført en række simuleringer for at vurdere effektiviteten af lamelplader som forrensning efter princippet i Dobbeltporøs Filtrering. Lamelpladernes effektivitet er undersøgt ved at modellere bevægelse og bundfældning af forskellige partikelstørrelser. Der er parameterstudier for at optimere lamelpladernes geometri og for at undersøge dets effektivitet ved højere volumenstrømme.

For at sammenligne med traditionel filtreringsteknik er der desuden udført nogle simuleringer på en lamelseparator. Denne er simuleret med en hastighed mellem lamellerne, der svarer til den i DPF-filteret.

Simuleringerne er foretaget som Computation Fluid Dynamics (CFD) beregninger. CFD beregninger anvendes til analyse af 3D flow i mange sammenhænge som f.eks. ventilation, brandudvikling, vindsimulering samt komplekse flow- og sedimentationsforhold i vand.

På baggrund af simuleringerne er afstanden mellem og højden af lamellerne i det Dobbeltporøse Filter fastsat. Beregningerne viser endvidere, at en traditionel lamelseparator ikke er i stand til at tilbageholde så fine partikler som det Dobbeltporøse Filter.

4.3 Styre- og interessentgruppe

Til projektet har været knyttet en styregruppe som beskrevet i Forordet. Styregruppen har haft til formål, at virke som sparringspartner til projektledelsen. Der er afholdt 3 styregruppemøder, hvor fremdrift, økonomi mv. er gennemgået. Endvidere er plan for det kommende arbejde diskuteret, planlagt og justeret.

Til projektet er endvidere knyttet en interessentgruppe, bestående af repræsentanter for myndigheder – primært kommuner -, forsyningsselskaber, rådgivere – landskabsarkitekter og ingeniører – samt producenter og udviklere. Der har været afholdt 3 workshops i denne gruppe med forskellige temaer.

Tema for den første workshop var "Hvor kan DPF-teknikken tænkes anvendt og hvordan kan anlæg indpasses i bymiljøet?". Workshoppen blev afholdt relativt tidligt i udviklingsprocessen – 23. april 2009 - for at give input, til det videre udviklingsarbejde, dvs. inden design af filtermodul var påbegyndt. 26 repræsentanter fra interessegruppen deltog i workshoppen.

Parallelt med udvikling af DPF-modulet blev der afholdt 2 workshops, for at kommentere modulprototyper, og for at give input til det endelige design. Tema for anden workshop var "Drift og vedligehold af segmentopbygget DPF-anlæg", hvor det primære formål var at få en dialog omkring den fysiske opbygning af anlægget.

Temaet for den tredje workshop var "Test af moduler, fuldskalanlæg, lokaliteter, samarbejdsformer mv.". Formålet var at få input til hvor interessegruppen kunne forestille sig at et anlæg kunne blive placeret. Anden og tredje workshop blev afholdt henholdsvis formiddag og eftermiddag 27. april 2010, med deltagelse af 24 repræsentanter.

Som afslutning på projektet blev der den 27. oktober 2010 afholdt en national temadag "Rensning af regnvand" på KU Life med 140 deltagere, hvor bl.a. DPF anlægget blev præsenteret.

Styregruppen og interessentgruppen er ikke omtalt yderligere.

5. SUMMERY IN ENGLISH

Over the last years, our view on rainwater has changed from the understanding that rainwater only needs to be drained into the perception of rainwater as a resource. The incentive of this project was the wish to use the rainwater for recreational purposes in the canals which was planned in Ørestad, where rainwater from roofs and other nontrafic surfaces is carried directly into the canals, whereas rainwater from roads, parking areas etc. is led through a treatment process before discharge into the same canals. As no qualified methods were available, the development of a rainwater treatment plant was initiated. The method developed in this connection is termed Dual Porosity Filtration (DPF).

Dual Porosity Filtration is a filtration technique for the treatment of rainwater contaminated with particulate and dissolved components. Between 2007 and 2009 the method was tested at a pilot treatment plant receiving rainwater from the roads in Ørestad. The result is described in three test reports, available at (Danish only):

http://www.sl.life.ku.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes_filtrering.aspx

The development and testing was carried out in corporation between the University of Copenhagen and Ramboll as well as Copenhagen Energy, CPH City & Port Development and the Municipality of Copenhagen. Furthermore, the Ministry of Science, Technology and Innovation and RealDania have provided financial support.

Based on promising test results, the Ministry of Environment granted funds through the initiative "Promoting Eco-Efficient Technologies" for the development of a DPF module prototype which is suited for industrial production, and through its design optimizes function, construction and operation of large-scale DPF-filters.

Fund recipients are Ramboll and KU-LIFE (the University of Copenhagen – Faculty of Life sciences) who carry out the project in corporation with Energy Copenhagen and the CPH City & Port Development. The two latter have also supported the project financially. The project steering group consists of the following members:

Agency for Spatial and Environmental Planning
The Municipality of Copenhagen, Center for Parks and Na-
ture
CPH City and Port Development
Copenhagen Energy
University of Copenhagen, KU-LIFE
Ramboll
Ramboll

Three steering group meetings were held in the project period from the end of 2009 to the middle of 2010.

Furthermore, a stakeholder group is associated to the project whose members have contributed to the product development through two workshops held before and after the DPF module development, respectively. Three workshops have been held in this group. We would like to take this opportunity to thank the participants for constructive input.

Finally, a feature day about rainwater treatment was held at KU-LIFE, introducing the technology.

The DPF technique is IPR protected by University of Copenhagen (Patent no. PCT/DK2003/000443).

Photos taken by Christian Nyerup Nielsen, Ramboll and Marina Bergen Jensen, Forestry & Landscape, KU-LIFE.

5. Objective and Method 5.1

Objective

The objective of the project is described in the application to the Danish Environmental Protection Agency:

"The long-term objective of the project is to develop the Dual Porosity Filtration treatment mechanism further so that the technique can be implemented in industrially produced modules, which is marketable in larger urban areas as well as internationally in fast-developing urban areas, including the BRIC economies, Eastern Europe, Japan, Canada and the USA.

The specific scopes, which will expectedly be achieved through the completion of the project, are:

- 4) To assess whether the innovative mechanisms, which in the DPF plant in Ørestad have transformed road water into clear water with a low level of pollution, can be built into a DPF industrial module, for example a plastic cassette suitable for industrial production, and thereby prepare the way for commercializing the technology.
- 5) To draw up scenarios for full-scale adaptation of the under 1) developed module-based DPF plant for water treatment in different contexts, as well as to assess the plant engineering, financial and operational conditions, including adaptation to the existing infrastructure.
- 6) To establish a stakeholder group with participation from potential distributors, entrepreneurs, architects and plant owners in Denmark with the purpose to provide requirements specification and wishes for the module development and the drawing up of scenarios."

Thus, the main project objective is to carry the DPF technology one step closer to marketing through the transfer of experience from the pilot project in Ørestad to a commercial DPF product.

Specifically, the scope is to design a DPF module that can optimize the capacity, substance detension, and filter lifespan, and at the same time lighten the construction and operational phases.

The design process should result in a prototype for a DPF module, which will be tested for removal of suspended substances. Furthermore, construction sketches will be prepared, illustrating how a full-scale plant can be built up and connected to the existing infrastructure.

Parallel to the development, a workshop will be held with participation from stakeholders - entrepreneurs, architects, public utilities, authorities etc. - in order to collect their input regarding opportunities and challenges.

Three steering group meetings have been held in the period where the above scope was discussed and adjusted.

5.2 Method

Based on the above objective, it was decided that the design of the DPF module should be based on the several initiatives:

Additional tests at the pilot plant complimenting the tests already completed, cf. Basic Report, Appendix 1 to the Basic Report, Appendix 2 to the Basis Report:

- Taking destructive² samples of the now 2 years old filter for documentation of the vertical and horizontal distribution of accumulated sediment, the density of the suspended sediment as well as the distribution of heavy metals and phosphorus in sediment and lime.
- Taking road water samples in a public "inlet pump station" for the assessment of the importance of test respite for the distribution of dissolved and particulate heavy metals and phosphorus.
- Taking samples of road water in the pump station for the documentation of function of sand trap and oil separator.
- Production of plant construction sketches:
 - Assessment of alternative methods for purification of the water before it is led to the DPF plant.
 - Execution of three dimensional flow calculations for the assessment of hydraulic and sediment properties in pretreatment methods.
- Production of DPF module sketches:
 - Production of prototypes in corporation with the supplier.
 - Testing of the prototype in a testing environment.

0-11

² The term "destructive tests" is one-sided . Chapter 4.2 of the final report, describes the taking of small filter samples, which in no way destruct the filter as a whole. The talk is more of a "biopsy".

5.3 Introduction and summary

As mentioned in the Introduction, the development of Dual Porosity Filtration was initiated with the objective to provide clean water for the canals in Ørestad, where rainwater from roofs and other nontrafic surfaces is carried directly into the canals, whereas rainwater from roads, parking areas etc. is led through a treatment process before discharge into the same canals. The treatment plant must meet the following requirements:

- Rainwater treatment based on requirements set up by the authorities without major water loss, so that a more satisfying water quality in the canals can be achieved.
- Be able to adapt to a dense urban area which is the scope for Ørestad. This implies that the reservoirs cannot be large and space-consuming.
- The plant should have a positive environmental profile, i.e. no chemicals should be used and energy consumption should be minimized.
- The construction and operation economy should compare favorably with other methods meeting equivalent treatment requirements.

Based on the above requirements, a number of existing treatment possibilities were examined, but none of them met all requirements.

It is "known technology" that lime has a binding effect on heavy metals, phosphorus etc.. Earlier, this technique has been used in reservoirs leading the water through the lime. The drawback is that the lime often blocks up, as the suspended material deposits above and in the lime. The idea of Dual Porosity Filtration is to let the water flow over the lime, hence minimizing the blocking and at the same time minimizing sedimentation and avoiding water loss. This concept is used in Dual Porosity Filtration.

The initial laboratory tests and the pilot plant in Ørestad have shown the following:

- 6. Dual Porosity Filtration is especially attractive in urban areas lacking recreational spaces.
- 7. It is possible to design the plant so that it can be adapted to the urban environment.
- 8. Where to use the rainwater recreatively or where drainage requirements are set which are difficult to meet by other means than Dual Porosity Filtration
- 9. The quality of the outflow water with respect to heavy metals, phosphorus, PAHs etc. meets the requirements imposed by the authorities.

After the completion of the above, a number of challenges remained, which should be clarified in the present project, cf. The Project Description appearing from Ch. 3, Purpose, as well as the Ch. 3.1. below.

5.4 The Developing Work

Dual Porosity Filtration (DPF) is a technique for the purification of rainwater, which is developed for the concurrent removal of fine particulate material and dissolved pollution. Proof of concept was carried out in the period 2007-2009 at a DPF plant in Ørestad receiving rainwater run-off from 1,3 ha. roads and parking areas. The test results are described in three reports (Basis report, Appendix 1of the Basis Report, and Appendix 2 of the Basis Report), which are all available at:

http://www.sl.life.ku.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes_filtrering.aspx

Based on the satisfactory test results, this project's objective is to design and test a DPF module which can be industrially produced, and which can ensure a simple and regenerable construction of the full-scale Dual Porosity Filtration plant with the sequent objective to pave the way for commercialization and distribution of the DPF technique.

The pilot-scale DPF plant i Ørestad is constructed with the available means. This implies that the 50 m long and 8 m wide pile of double porous layers is built from the existing or feebly modified products available on the market. Consequently, the high-porosity flow layers have been created by means of geonet and drain net, whereas the low-porosity lime layers are produced through a

modification of bentonite membranes. This worked, but it is assessed that a better treatment could be achieved with a specially designed element. Furthermore, the completed pilot plant tests have shown that regular removal of sediment from the inlet side is necessary in order to maintain the flow capacity and achieve an acceptable plant lifespan.

5.5 Short summary

The following comprises a short summary of the tests which were carried out with the objective to create a DPF module prototype. For further elaboration, we refer to the chapter in question as they appear from the headlines.

Testing of Sediment in the Pilot Plant – Chapter 4

Following 2 years of pilot plant testing, the present project took intact samples of the DPF-6 layer filter in order to describe the distribution of accumulated sediment, heavy metals and phosphorus, partly vertically in each of the 6 double layers and partly horizontally following the 50 m filter.

In the distances 1, 3,5,10, 20 and 30 m from the inlet a hole was dug in the flow direction of the DPF layer and down to the membrane, after which a 20 cm x 30 cm sample was taken from the filter, containing all 6 double layers. Also, specific weight, particle form and particle size distribution was determined from the sediment.

About the same amount of sediment was accumulated in all 6 double layers at the individual distances, and consequently it can be concluded that the 6 high-porosity layers have allocated approximately the same amount of water.

The sediment distribution in the flow direction followed the pattern indicated by the water samples, proving the largest decrease in concentration of suspended substance closest to the inlet. Consequently, approximately 3 kg/ m² dual porosity layer (i.e. 18 kg/m² of the collected DPF-6-Layer construction) was accumulated the closest to the inlet, decreasing to approximately 0,5 kg/m² at the 30 m distance. It was not possible to draw out sufficient sediment for the analysis at larger distances.

The lime pads which are closest to the inlet was completely filled with sediment, and the sediment also deposited between the upper and lower threads in the PE net, which constitutes the high porosity layers. At the 10 m distance a thin film of sediment deposited on top of the lime pad, while the 20 and 30 m distances only proved a deposit of sediment in the lime pad itself. At the same time the determined decrease in the hydraulic capacity was explained, as the deposit of sediment between the threads in the highly porous layers over the first couple of meters of the plant had reduced the cross section area.

Consequently, it is concluded that the given sediment strain requires regular, e.g. every 6 months – removal of sediment accumulated near the inlet. It is therefore recommended that the full-scale DPF plant should consist of two segments. The first segment should be a pre-treatment element suitable for sediment removal. The second segment should contain lime or other filter material. The last-mentioned segment is intended for the removal of the finest particles and detension of dissolved substances and should in principle not be regenerable, but is expected to achieve a long lifespan, cf. Internal Fitting of Plants – Construction. In the following, the two segments are termed "pre-filter" and "lime filter".

No enrichment of the lime with neither heavy metals nor phosphorus was found. The majority of the pollution substances are associated with the sediment.

The sediment packs with a density (specific weight) of approximately 600 kg/m³, which is within the formerly assessed intervals. (Appendix 1 of the Basis Report, Ch. 3). Based on a scanning electron microscopy is can be determined that the sediment consists of small plate shaped and edged particles of a few μ m.

The size distribution is in accordance with former observations, as the median value is just below 10 μm , regarding the sediment deposited the closest to the inlet, decreasing to 2,7 μm regarding

sediment deposited in the 30 m distance from the inlet, which is the last distance where the samples were usable.

Additional Analyses of Road Water - Chapter 5

Test analyses of inlet water from the pilot plant showed that a surprisingly small part of the heavy metals was dissolved, which explains the small amount of substance bound to the lime. With the objective to examine if this is coherent with the water retention time in the pipes and in the pump station upstream from the pilot plant as well as in test containers before the analysis, samples were taken during rain from the entrance water of the pump station which supplies the pilot plant and from the outlet water from the same pump station. The thesis was that the originally dissolved heavy metals might absorb into suspended substance over time, for which reason the timely development of the concentration of dissolved and particulate bound heavy metal and phosphorus was examined.

It became clear that the heavy metals were particulately bound already at the arrival at the pump station and that the distribution did not change radically when standing. The phosphorus proved a decreasing tendency, thus the dissolved phosphorus concentration decreased from approximately 30 μ g/L to approximately 20 μ g/L over 2 days. It is therefore concluded that the rain run-off from Ørestad contains a smaller share of dissolved heavy metals than findings in other locations. The reason for this may be a relatively large content of fine-grained suspended substances, related to the many building activities.

It is recommended that lime is maintained as filter material ensuring the detainment of dissolved pollution, also in future cases of expectedly larger share of dissolved pollution in the inlet water.

Internal fitting of the plant - Construction - Chapter 6

The plant should be designed so that it can adapt to the landscape and with due account being taken of that the quality of the outlet water is sufficient and that the plant lifespan is satisfactory.

Dual Porosity Filtration plants Filtration is especially attractive in urban areas lacking recreational spaces and where the rainwater is used recreatively. Dual Porosity Filtration is also a good solution on locations with strict outlet water requirements due to a recipient.

As previously mentioned, it was determined on an early stage in the project that it is necessary to construct the plant from two different parts, pretreatment and lime filter respectively. During the pretreatment the main part of the rough suspended material retained, while the lime filter should catch the finest particle suspended material and bind the dissolved material.

Various known pretreatment methods have been examined as potential alternatives to a DPFprefilter (first segment) cf. Ch. 7. However, the conclusion is that the optimal treatment is achieved when the water runs across the designated DPF plates with louvres by means of which the material is deposited between the louvres. A system has been sketched by means of which it is possible to hose down these plates regularly, e.g. every 6 months. It should be ensured that this part of the plant is constantly filled with water so that the sediment does not "take root".

The lime filter (second segment) is also constructed from DPF louvre plates. The lime is placed between the louvres. When the water runs over the lime layer, the ever finer particles are deposited, and dissolved pollutions can be bound by the lime as well as accumulated sediment in cases of direct contact as well as by diffusion and dispersion.

In principle, the lifespan of the DPF filter corresponds to the lifespan of the materials, approximately 100 years, due to the fact that is cleanable. The life span of the DPF lime filter is determined by the size distribution of the present sediment, how much sediment is caught in the prefilter and how much can be deposited between the lime grains.

The amount of sediment caught in the prefilter is determined by the destructive samples, which were taken from the plant in Ørestad, i.e. the amount of sediment which is deposited in the first 6 m of the plant. This amount is verified through model-based testing on louvre plate prototypes,

cf. the chapter "Design and test of DPF louvre plates. These tests show that approximately 35 % of the sediment is caught in the prefilter.

The lime grains in the lime filter are deposited under a density of approximately 50%. This leaves round 50 % cavity which can be filled up with suspended material before the filter is full and should be replaced or regenerated. Based on the knowledge of inlet and outlet concentration of suspended material in the lime filter as well as deposit density, the lifespan of the lime filter in Ørestad is estimated to 20-30 years, when using a 6 m pretreatment element.

Based on a specific location of a full-scale plant in Ørestad, the capital budget has been estimated, showing expenses amounting to DKK 0.8 to 0.9 mill. per red. ha. The related operational costs amount to DKK 5,000 to 10,000 per year per red. ha.

Literature review of pretreatment methods – Chapter 7

As described above, it is proposed that the plants should consist of a pretreatment element and a lime filter. The pretreatment part can be constructed from louvre plates. Alternatively, a known sediment method could be used. Chapter 7 describes and assessesses different methods for sedimentation of suspended material in road water. The purpose of the review is to evaluate if any known methods are better that Dual Porosity Filtration.

The following methods have been examined:

- Sedimentation of reservoirs
- Louvre separator
- Gravity sand filter
- Drum filter
- Tape filter
- Pressure sand filter
- Cross flow filtration

Advantages and disadvantages of the above mentioned methods have been assessed. Provided that the methods must meet the same requirements as Dual Porosity Filtration, the disadvantages include that they are space-consuming or energy intensive. The conclusion is therefore that the best pretreatment is achieved through the DPF filter previously described.

Design and Testing of the DPF Louvre Plates- Chapter 8

The DPF module is built from louvre plates with one-way louvres on the top side., in the opposite direction on the underside. The louvres are placed in the flow direction on the plate underside. When the plates are piled, the water will run between the louvres on the underside of a plate, and run perpendicularly over the louvres of the underlying plate. The water between the transverse louvres is stagnant and therefore the suspended material will deposit here. This construction is used for the pretreatment element.

In the filter element a filtration material is placed between the transverse louvres. This design is assessed to be the most effective regarding utilizing the full volume of the filter. Based on the computer supported three-dimensional flow calculations as well as the achieved experiences from the pilot plant, a height on the upper side louvre (catching layer) of 12 mm is proposed, whereas the length of the louvres on the underside is proposed to be 6 mm (flow layer).

Two DPF module proto types have been developed and received from two different producers. One has been tested in a test setup indicating that approximately 20 % of the sediment is retained over 2 m at a flow corresponding to the dimensions intended for the pilot plant.

A segment construction is proposed including a first segment (without lime and intended for regular regenerating) of 6 m, whereas the following lime segment is 44 mm. The length of 6 m is proposed according to the DPF module test results, which based on the extrapolation of the 20% removed at 2 m distance, estimate that 6 m would be able to remove approximately 35% of the collected amount of suspended substance (the extrapolation follows the sediment accumulation pattern observed in the pilot plant).

The pre-treatment filter should be permanently covered with water in order to minimize sediment cementation. The pretreatment filter is built into a chamber, providing the possibility to remove the sediment by recirculating water across the main-flow direction in a period and subsequently, when the majority of the sediment is in suspension, removing the recirculated water. Alternatively, the pretreatment filter can be hosed down manually.

The lime segment is divided into serially connected strings of 22 m each, which are placed sideby-side, enabling the inlet water alternately to run to the one or the other string respectively, e.g. every 6 months and thereby ensure a better utilization of the entire lime filter.

3D Flow Calculation of Sedimentation in the DPF Louvre Plates – Chapter 9

A number of computer model based simulations have been carried out with the purpose to assess the pretreatment efficiency of louvre plates according to the Douple Porous Filtration principle. The louvre plate efficiency has been assessed through modeling movement and sedimentation of different particle sizes. Parameter studies optimize the louvre plates' geometry and assess their efficiency at high volume runs.

Simulations on a louvre separator have been carried out in order to compare with traditional filtration techniques. The simulation was carried out with a speed between the louvres corresponding the one in the DPF filter.

The simulations have been carried out as Computation Fluid Dynamics (CFD) calculations. CFD calculations are used for analysis of 3D flows in many contexts, e.g. ventilation, fire behavior, wind simulation as well as complex flow and sediment conditions in water.

Based on the simulations, the distance between - and the height of - the louvres in the Dual Porous Filter have been determined. Furthermore, the calculations show that a traditional louvre separator is not able to retain as fine particles as the Dual Porous Filter.

5.6 Steering and Stakeholder Groups

As described in the Introduction a steering group has been associated with the project. The objective of the steering group is to operate as sounding board for the project management. Three steering group meetings have been held, addressing progress, economy etc. Furthermore, the plan for the future work has been discussed, planed and adjusted.

In addition, a stakeholder group is associated with the project, including representatives from the authorities – primarily municipal -, public utilities, consultants – landscape architects and engineers – as well as producers and developers. 3 stakeholder workshops have been held, addressing different themes.

The Theme of the first workshop was: "Where could the DPF technique be implemented and how should the plant be adapted to the urban environment?". The workshop was held at a relatively early point of the development process – 23 April 2009 – in order to produce input for the further development work, i.e. before the design of the filter module was initiated. 26 representatives from the stakeholder group participated in the workshop.

Parallel to the development of the DPF module, 2 workshops were held with the purpose to collect comments to the module prototypes and to produce input for the final design. The theme of this second workshop was "Operation and maintenance of the segment constructed DPF plant", with the primary purpose to promote a dialogue on the physical construction of the plant.

The theme of the third workshop was "Testing modules, full-scale plants, locations, form of cooperation etc.". The objective was to produce input to the possible location of a plant. The second and the third workshop were held on the 27 April 2010 in the morning and the afternoon, respectively, with participation from 24 representatives.

Concluding the project, a national theme day addressing "Rainwater treatment" was held on 27 October 2010 at KU LIFE with 140 participants, where among others the DPF plant was introduced. The steering group and the stakeholder group are not addressed further.

6. UNDERSØGELSE AF SEDIMENTET I PILOTANLÆG

Tidligere analyser af indholdet af suspenderet stof i prøver udtaget fra udvalgte strømningslag under regn har vist et eksponentielt fald fra indløb mod udløb (Tillæg 1 til Basisrapport, Figur 7.3). Indholdet af suspenderet stof i det strømmende vand ser ud til at komme under de krævede 25 mg/L i en afstand af 30 - 40 m fra indløbet. For at få et indtryk af den komplementære akkumulering af sediment i filteret er der efter afslutning af den primære testperiode udskåret lodrette prøver af filteret i stigende afstand fra indløbet. Udover at se på indholdet af sediment ønskes sedimentets bulkdensitet og partikelstørrelsesfordeling bestemt, ligesom fordelingen af tungmetal og fosfor på sediment- og kalkfraktion ønskes vurderet. Rumvægten er interessant fordi jo tættere vejvandets indhold af suspenderet stof pakker sig under sedimentationen i filteret, desto længere levetid har filteret. Rumvægten er tidligere estimeret under laboratorieforhold ved at re-suspendere og sedimentere sedimentprøver udskrabet fra indløbsvinduet (Tillæg 1 til Basisrapport, Tabel 3.2). Partikelstørrelsesfordelingen er vigtig som dokumentation for hvilke partikelstørrelser et DPF-filter er i stand til at tilbageholde. Størrelsen af partikler, der tilbageholdes i filteret, er tidligere estimeret ud fra analyser af partikelstørrelsesfordelingen i det strømmende vand (Tillæg 1 til Basisrapport, Tabel 7.3). Fordelingen af tungmetaller på sediment og kalk skal bruges til at vurdere betydningen af kalk for tilbageholdelse af tungmetal.

6.1 Formål med udtagning af filterprøver

Formålet med at udtage prøver af pilotanlægget er at beskrive:

- Fordeling af akkumuleret sediment på langs af det 50 m lange filter (vægt pr. arealenhed)
- 2) Rumvægt af akkumuleret sediment (vægt pr. rumfangsenhed)
- 3) Størrelse og form af partikler i akkumuleret sediment
- 4) Fordeling af zink, kobber, krom, bly og fosfor på henholdsvis sediment og kalk

6.2 Metode

Forsøgene gennemføres på pilotanlægget i Ørestad, opført 2006 og benyttet til forsøg 2007-2009. Det dobbeltporøse filter opbygget af 6 dobbeltporøse lag (DPF-6-Lag) benyttes.

Forholdene på langs af DPF-6-lags-filteret beskrives ved hjælp af filterprøver á 20 x 30 cm, udskåret i afstandene 1 m, 3 m, 5 m, 10 m, 20 m og 30 m målt fra indløbet Figur 1. Der blev benyttet en tynd jernplade á 20 * 30 cm som skabelon. Prøven udtaget i 1 meters afstand fra indløbet fungerede som testprøve, og blev udtaget d. 21. juli 2009. Her blev alle 6 lag udtaget. Ved de efterfølgende afstande, der blev prøvetaget d. 7. oktober 2009, blev kun de 4 øverste lag udtaget ved hver afstand.

De enkelte lag overføres i rigtig rækkefølge til en plastboks med tætsluttende låg, hvorefter de transporteres til laboratoriet. Efter udtagning erstattes filtermaterialet med grus, membranen repareres, og jordoverfladen retableres, hvorefter filteret som helhed forventes at fungere igen.

Ved prøvetagning d. 21. juli 2009 blev tykkelsen af filteret målt med en skydelære.

Desuden måltes ved alle prøvetagningerne tykkelsen af aflejret sediment på oversiden af øvre kalkmåttes toptekstil.



Figur 1. Udtagning af prøver af DPF-6-lags filteret. Til venstre: Med rendegraver graves der ned gennem plæne og gruslag til membranen omkring det dobbeltporøse filter. Til højre: Udtagning af prøve i 1 m afstand fra indløbet. Med en hobbykniv skæres en flade på 20 * 30 cm fri, og der fortsættes ned gennem alle 6 lag indtil bundmembranen ses. Hvert lag løftes forsigtigt ud og transporteres til laboratoriet. På fotoet ses overfladen af den sidste kalkmåtte, idet de 5 første dobbeltporøse lag (strømningsnet + kalkmåtte) samt det 6 strømningslag er løftet ud. Det skelagtige mønster består af sediment aflejret på toptekstilen i den nederste kalkmåtte. Mønsteret aftegner de nederste tråde i strømningsnettet.

6.2.1 Fordeling af akkumuleret sediment

For profilen 1 m fra indløb bestemmes indhold af sediment på tørstofbasis for hvert dobbeltlag ved dobbeltbestemmelse (a og b). Indledningsvist placeres de enkelte dobbletlag på et stykke plast, de to lag adskilles, og fotograferes Figur 2



Figur 2. Foto af dobbeltporøse lag udtaget i afstanden 1 m fra indløbet. Øverste række viser de højporøse lag, mens nederste række viser de parvist tilhørende lavporøse kalkmåtter. Hvert lag måler 20 x 30 cm.

Herefter samles hvert høj- og lavporøse par igen, og der udtages 2 kvadrater fra midterdelen af hvert dobbeltlag, en til hver af bestemmelserne a og b. Som skabelon til kvadraterne bruges en plade på 10,7 x 10,7 cm. Der skæres for med hobbykniv og klippes efter Figur 3. Der sørges for at kalk der falder ud under operationen fordeles efter hvor det hører til. Hvert højporøse lag og hvert lavporøse lag behandles adskilt som beskrevet i det følgende. Den samlede mængde akkumuleret sediment pr. dobbeltporøst arealenhed er summen af sediment i højporøst + lavporøst lag.



Figur 3. Udtagning af 2 delprøver á 10,7 cm x 10,7 cm til bestemmelse af sediment indhold. Træpladen fungerer som skabelon.

Højporøst lag af nylonnet (6 stk af 6 mm)

Nylonnet lægges i foliebakke og skylles/spules med demineraliseret vand, samtidig med at der skrubbes med en lille børste. Sediment aflejret på nylonnettets loft og bund, dvs. henholdsvis undersiden af den overliggende kalkmåttens bundmembran og oversiden af den underliggende kalkmembrans toptekstil vurderes at høre til det højporøse lag, og afskrabes derfor med en spatel og overføres til foliebakken Figur 4. Sedimentet bliver opslemmet i vandet i foliebakken og opslemningen sigtes gennem en 1 mm jordsigte for at fjerne evt. kalkkorn og rester af net, der er røget med. Den sigtede opslemning tørres ved 105 °C, hvorefter vægten bestemmes og del-prøve udtages til tungmetal- og fosforbestemmelse.



Figur 4. Sediment aflejret på kalkmåtte-tekstilerne over og under hvert højporøse lag blev skrabet af (her skrabes oversiden af en kalkmåtte), og målt sammen med sediment hængende i det tilhørende højporøse nylonnet (ikke vist).

Lavporøst lag af kalkmåtte (6 stk af 10 mm)

Kalkmåtte klippes op i syningerne og alt sediment og kalk skylles og gnubbes ud i en foliebakke med demineraliseret vand. Kalkmåttens top- og bundtextiler kasseres efter skylning. Sediment opslemmes og kalkkornene sigtes fra med 1 mm jordsigte. Kalken hældes i lille foliebakke, der tørres ved 105 °C. Efter tørring bestemmes kalkens tørvægt og delprøve udtages til tungmetalog P bestemmelse. Opslemningen med suspenderet stof fra sigtningen tørres ved 105 °C og vejes. Delprøve udtages til tungmetal- og fosforbestemmelse.

Bestemmelse af akkumuleret sediment i 3, 5, 10, 20 og 30 m afstand

De efterfølgende profiler i afstandene 3, 5, 10, 20 og 30 m undersøges på tilsvarende vis, dog med følgende ændringer: kun de 4 øverste dobbeltporøse lag undersøges; der udtages kun 1 kvadrat á 15 cm x 15 cm pr. dobbeltlag, og sediment fra alle fire dobbeltlag tørres og vejes samlet.

6.2.2 Rumvægt af akkumuleret sediment

Fra profilen 1 m fra indløb udtages tynde lag af "sedimentskæl" fra kalkmåtternes toptekstil (bund i højporøse lag) til bestemmelse af semimentets rumvægt. Med en tyndt glasstykke (et dækglas) overføres og stables sedimentskæl på et lidt større glasstykke (et objektglas). Der stables 5-6 skæl oven på hinanden. En plast-engangspipette afskæres i begge ender, så der fremkommer en cylinder med skarp kant og inddelinger for hver ½ ml. Dette rør fugtes og presses 1-2 gange ned igennem en stabel, afskæres og ordnes i begge ender så rumfanget på ½ ml er fyldt op, uden at presse sedimentsøjlen presses. Den ½ ml sediment overføres til foliebakke ved hjælp af destilleret vand. Tørres i ovn ved 105 grader til tørhed, hvorefter tørvægten bestemmes. Der laves 6 gentagelser. Denne selvopfundne metode er illustreret i Figur 5.

For de efterfølgende afstande var det kun afsat tilstrækkeligt sediment til at rumvægtsbestemmelsen kunne gennemføres for prøverne udtaget ved 3 m og 5 m. For disse to afstande blev rumvægten bestemt ved at udskære en kube af enkeltskæl, måle kuben op med skydelære, tørre og veje. Dette blev gentaget 3-4 gange.



Figur 5. Bestemmelse af rumvægt af aflejret sediment. Øverst t.v.: Sedimentskællene formet på kalkmåtternes toptekstil udnyttes til formålet. Med et dækglas lirkes nogle skæl forsigtigt af og lægges i en stabel. Nederst t.v.: To sedimentstabler klar til udstikning. Til højre: Med plastcylinder udstikkes et bestemt volumen (0,5 ml) af stablen. Dette tørres og vejes.

6.2.3 Størrelse og form af partikler akkumuleret i sediment

Der fremstilles 2 prøver til bestemmelse af partikelstørrelsesfordeling i afstanden 1 m fra indløbet, nemlig én prøve med sediment aflejret på kalkmåttens toptekstil og en med sediment fra kalkmåttens bundtekstil. Fra de efterfølgende afstande analyseres kun en sedimentprøve, udtaget som en blandingsprøve af sediment fra flere lag. Prøverne analyseres hos Particle Analytical, der dispergerer prøverne hjælp af ultralydsbehandling inden partikelstørrelsesfordelingen bestemmes ved hjælp af laser diffraktion (Malvern Mastersizer 2000). Partikelstørrelsen beskrives som diameteren af den ækvivalente sfæriske partikel, idet partiklerne reelt kan have alle former. Fordelingen udtrykkes på basis af partiklernes volumen. Mindste partikeldiameter, der analyseres for, er 0,02 µm og den største er 2000 µm.

De to sedimentprøver fra 1 m afstanden blev desuden fotograferet med et scanning-elektronmikroskop (SEM), hvorved information om partiklernes form opnås.

6.2.4 Fordeling af tungmetal og fosfor på sediment og kalk

Indhold af zink, kobber, krom, bly og fosfor blev for 1 m prøven bestemt ved to forskellige analyser, dels ved almindelig oplunkning efter standarden DS259/SM3120ICP, der benyttes ved kategorisering af forurenet jord (ekstraktion med 7 M HNO3), dels ved special oplukning efter standarden EN13656, hvor prøverne lukkes op med flussyre, saltsyre og salpetersyre i mikrobølgeovn ved ca. 230 °C og måles ved ICP-OES. Bestemmelserne foretages for følgende prøver:

- 4 prøver af vasket kalk fra lag 2a, 3a, 4a og 5a i DPF 1 m profilen.
- 4 prøver af sediment udtaget fra de dobbeltporøse lag: 2a, 3a, 4a og 5a i DPF 1 m profilen, dvs. en blanding af sediment fra tilhørende høj- og lavporøse lag.

For de efterfølgende prøver, udtaget i afstandene 3 m, 5 m, 10 m, 20 m og 30 m blev indholdet zink, kobber, krom, bly og fosfor bestemt ved almindelig oplunkning efter standarden DS259/SM3120ICP. Der blev analyseret en blandprøve af sediment og en blandprøve af kalk for hver af de fem afstande.

6.3 Resultater og diskussion

6.3.1 Felt-karakterisering af akkumuleret sediment

Tykkelsen af filteret efter udtagning af destruktiv prøve i 1 meters afstand blev målt til 10 cm +/- $\frac{1}{2}$ cm. Det er i god overensstemmelse med det oprindelige design, der burde resultere i en filtertykkelse på 9,6 cm (6 højporøse lag á 6 mm + 6 lavporøse lag af 10 mm).

Der blev observeret en tydelig gradient af akkumuleret sediment i filterets længderetning Figur 6. I afstanden 10 m sås en tynd hinde af sediment, hvorigennem toptekstilens net kunne ses. Ved afstandene 20 m og 30 m så kalkmåtterne ud som nye. Denne gradient blev bekræftet af målinger af tykkelsen af sediment aflejret på kalkmåtternes overflade Figur 7.



Figur 6. Kalkmåtter som de fremstår i afstandene 10 m (øverst), 20 m (midt) og 30 m (nederst) fra indløbet. De langsgående syninger, der kan ses på alle tre billeder, har en indbyrdes afstand på 2 cm. Der ligger lidt løs kalk oven på måtterne.



Figur 7. Tykkelse af sediment aflejret på oversiden af øverste kalkmåtte i 6 afstande fra indløbet. Se tilhørende fotos i Figur 5 (1 m) og Figur 6. (10, 20 og 30 m).

I prøven udtaget ved 1 m er der tydeligvis mest sediment. Kalkmåtternes hulrum ser ud til at være helt fyldt ud med sediment, og på oversiden af kalkmåttens toptekstil ligger der også aflejret materiale, ligesom der hænger sediment fast på undersiden af bundtekstilerne. Sediment aflejret på tekstilerne afspejler mønsteret i nylon-nettet benyttet til de højporøse lag.

I sedimentaflejringen på bunden af de højporøse lag ved 1 m prøven kan der iagttages et rødt lag, der formodes at stamme fra forsøgene med coatning af kalk med okkerslam og humus (Tillæg 2 til Basisrapport). Det vil sige, at okkerslammet på de første meter ikke har kunnet lejre sig blandt kalkkornene på grund af sedimentlaget på kalkmåtternes toptekstil.

Til trods for stor akkumulering på de første ca. 3 meter fremstår strømningslagene overalt med åbne hulrum. Dette ses af Figur 8. Denne observation viser at konceptet fungerer, og at de observerede problemer med tilstopning udelukkende er knyttet til selve indløbet.



Figur 8. Højporøst nylonnet fra lag nr. 1 i afstanden 1 m fra indløbet. Til trods for utilsigtet akkumulering af sediment i nettet ses de vandrette strømningsveje fortsat at være åbne. Billedet er taget i strømningsretningen.

6.3.2 Akkumuleret sediment i pilotanlægget, efterår 2009

Udvaskning, tørring og vejning af sediment i prøverne fra de forskellige afstande resulterede i akkumulerede sedimentmængder som vist i Figur 10. Mængderne er omregnet til kg pr. m² dobbeltporøs lag. Akkumuleringen ses at aftage ikke-lineært med afstanden til indløbet. Således er der akkumuleret ca. 6 gange så meget sediment over den første meter sammenlignet med akkumuleringen efter 30 m.

Den samlede akkumulerede sedimentmængde kan estimeres ved at beregne arealet under kurven i Figur 10, ekstrapoleret til afstanden 0 – 50 m. Hvis der ekstrapoleres lineært mellem de 6 målepunkter (1 m – 3 m – 5 m – 10 m – 20 m – 30 m), og hvis det antages at mængden akkumuleret over den første meter er det samme som i målepunktet 1 m, og at der i afstanden 50 m er akkumuleret halvdelen af den akkumulerede mængde målt ved 30 m fås en samlet akkumuleret mængde i DPF-6-Lag efter ca. 2 års drift på 845 kg. Dette er i god overensstemmelse med estimatet foretaget efter ½ års drift ud fra indløbsvandets tab af suspenderet stof. Her fjernede DPF-6-Lag i gennemsnit 112 mg SS/L, og i alt tilførtes 1761 m³ vand, hvilket svarer til en samlet sedimentmængde på 198 kg (Tillægsrapport 1, s. 7).



Figur 9. Gennemsnitlige indhold pr. m2 dobbeltporøst lag af sediment i DPF-6-Lag i afstandene 1 m, 3 m, 5 m, 10 m, 20 m og 30 m efter ca. 2 års drift. For afstanden 1 m er indholdet beregnet som gennemsnit af lagene 1-4, idet øverste og nederste lag er kasseret (data vist i Figur 10)

Den samlede sedimentmængde er 6 gange større, idet DPF-6-lag består af 6 lag.

Sammenlignes Figur 10 med Figur 6 og Figur 7 kan det konstateres at de ca. 5 kg sediment akkumuleret pr. m² i afstanden 30 m fra indløbet ikke har sat sig spor på oversiden af kalkmåtterne, der fremstår som nye. Det finpartikulære materiale i den afstand, har dermed ikke haft problemer med at passere kalkmåtternes toptekstil.

I hvilken grad kalkmåtterne nærmest indløbet er fyldt/mættet med sediment kan estimeres ved at sammenholde mængde og rumvægt af sediment med kalkmåtternes porøsitet. Ifølge producenten pakker den leverede kalk med en porøsitet på ca. 50 %, svarende til at 5 mm i hver 10 mm høje kalkmåtte består af luft, og 5 mm består af kalk. Højeste akkumulering er nærmest indløbet, hvor der ligger ca. 30 kg sediment pr. m² (Figur 10). Med en rumvægt på ca. 0,6 g/cm³ (Figur 12) vil 30 kg sediment danne et 4,6 mm tykt lag pr. kvadratmeter. Det må dermed konkluderes at måtterne nærmest indløbet er fyldt op med sediment.

Figur 10 viser sedimentindholdet i de 6 parallelle dobbeltporøse lag udtaget i afstanden 1 m fra indløbet. Det ses at indholdet af suspenderet stof i de lavporøse lag (kalkmåtte) er nogenlunde ens, mens der ses nogen variation i det utilsigtede indhold af suspenderet stof i de højporøse lag, hvor især prøve 1a, 6a og 6b skiller sig ud. Især lag 6 var svært at udtage, uden tab af materiale. I beregningen af den samlede akkumulering (Figur 9) er lag 1 og 6 ikke inkluderet i gennemsnittet for afstanden 1 m. Forekomsten af betydelige mængder sediment i alle lag viser at samtlige lag har været vand-førende. Forskellene i aflejring kan afspejle forskelle i strømningshastigheder.



Sedimentakkumulering i enkelt-lag i afstanden 1 m

Figur 10. Akkumuleret sediment i enkeltlag i afstanden 1 m. De 6 dobbeltporøse lag er nummeret 1 – 6 fra oven af. Fra hvert lag er udtaget 2 kvadrater á 10,7 cm * 10,7 cm (114,5 cm2), svarende til dobbeltbestemmelserne a og b. Sedimentet i det højporøse lag og i det lavporøse lag i hvert kvadrat er analyseret separat.



Figur 11. Forslag til to-delt DPF-anlæg (set oven fra). Mønsteret for akkumulering af sediment, med størst akkumulering nærmest indløbet, lægger op til et fuldskaladesign opbygget af 2 segmenter. Det første segment skal med regelmæssige intervaller (f.eks. hvert halve år) kunne spules på tværs af strømningsretningen.

På baggrund af det skæve mønster for sedimentakkumulering, som de destruktive prøver har vist, konkluderes det at eventuelle fuldskala-DPF anlæg bør segment-opdeles (Figur 11). Det første forholdsvis korte segment (f.eks. 5 m) skal kunne regenereres på stedet, og udelukkende beregnes til akkumulering af sediment (dvs. ingen kalk, kun stillestående vand i de lavporøse lag), mens de efterfølgende f.eks. 45 m fyldes med kalk, og beregnes til fjernelse af resterende partikulært materiale samt opløste forureninger, med ingen planlagt regenerering i filterets levetid.

6.3.3 Vurdering af sedimentets rumvægt (højporøse lag)

Sedimentets rumvægt blev som beskrevet over for estimeret ved at stable "skæl" af sediment aflejret på oversiden af kalkmåtternes toptekstil, og udtage og veje et bestemt volumen. Resultatet heraf fremgår af Figur 12. Det er vigtigt at være opmærksom på, at denne rumvægt sandsynligvis er større end rumvægten af sediment aflejret mellem kalkkorn, hvor det nok ikke er muligt at fylde alle hulrum op med sediment, fordi nogle hulrum er blændet af grundet kalkens lejring. Den fundne rumvægt afspejler den rumvægt der kan forventes i en situation med aflejring til vandfyldte lavporøse lag, som foreslået i Figur 11.

Ved sammenligning med tabel 3.2 i Tillæg 1 til Basisrapport ses at den observerede rumvægt svarer til den højeste rumvægt benyttet i levetidsvurderingerne (=0,69 g/cm³). Det er dermed sandsynligt at denne levetid kan opnås, såfremt et fuldskalaanlæg opbygges med den foreslåede segmentopdeling (Figur 11).

	1 m	3 m	5 m
Gennemsnit	0,632	0,571	0,526
Antal gentagelser	7	3	4
Standardafvigelse	0,1	0,027	0,073

Figur 12. Rumvægt (g/cm³) af sediment aflejret på oversiden af kalkmåtterne i afstandene 1 m, 3 m og 5 m. (For afstandene 10 m, 20 m og 30 m var der for lidt sediment til at analysen kunne gennemføres). Ved at gange tallene med 1000 fås enheden kg/m³.

6.3.4 Partikelstørrelsesfordeling og partikel-form i akkumuleret sediment

Partikelstørrelsesfordelingen i de i alt 6 afstande er vist i Figur 13 nederst. For afstandene 3, 5, 10, 20 og 30 m er det analyserede sediment udtaget fra selve kalkmåtten. For afstanden 1 m er der udtaget to prøver, begge fra sediment afsat i selve strømningslaget, henholdsvis nederst i strømningslaget (dvs. oven på den underliggende kalkmåtte) og øverst i strømningslaget (dvs. hængende på undersiden af den overliggende kalkmåtte). Øverst i Figur 13 er de samme 7 grafer vist, men splittet op på tre grafer, sådan at de 2 prøver fra 1 m kan sammenlignes, ligesom prøverne fra 3 og 5 m, og prøverne fra 10, 20 og 30 m.



Figur 13. nederst: Fordeling af partikelstørrelser i sediment i DPF-6-Lag efter ca. 2 års drift i følgende afstande fra indløbet: 1 m, 3 m, 5 m, 10 m, 20 m og 30 m fra indløbet. Figur 13, øverst: De tre Figurer viser de samme grafer, som den nederste Figur. Til venstre: Fordeling af partikelstørrelser i sediment aflejret 1 m fra indløbet. "Foroven"-prøven er sediment afsat på undersiden af kalkmåtternes bund-tekstil (dvs. loftet i det højporøse lag), mens "forneden"-prøven er sediment aflejret på oversiden af kalkmåtternes top-tekstil (dvs. gulvet i det højporøse lag). Midt: Fordeling af partikelstørrelser i sediment aflejret i kalkmåtte 3 m og 5 m fra indløbet. Til højre: Fordeling af partikelstørrelser i sediment aflejret i kalkmåtte 10 m, 20 m og 30 m fra indløbet.

De to prøver fra 1 m afstanden er ikke udtaget i kalkmåtten, ligesom de øvrige prøver, men består af afskrabet materiale fra tekstilerne over og under strømningslaget. 1 m – prøven er dermed ikke direkte sammenlignelig med de øvrige 5 afstande, hvor partikelstørrelsesfordelingen i alle tilfælde er udført på sediment udtaget fra kalkmåtterne.

Overordnet viser fordelingerne at det akkumulerede sediment består af stadigt mindre partikler, jo længere væk fra indløbet prøven tages. Dette svarer til at de tungeste partikler sedimenterer først, og at de partikler der føres videre frem med vandstrømmen bliver stadigt færre og mindre.

Mønsteret ses tydeligst for sediment udtaget i afstandene 10 m, 20 m og 30 m (Figur 13, nederst til højre). Her rykker fordelingerne tydeligt mod mindre partikeldiametre med stigende afstand, og toppene bliver samtidig skarpere. Mønsteret for sedimentprøverne fra 1 m, 3 m og 5 m ligger ret meget oven i hinanden (Figur 13, små figurer til venstre), om end det overordnede mønster følges, i hvert fald for prøverne fra 3 m og 5 m (lille midterfigur). Det afvigende mønster for 1-m prøverne ses tydeligt i Figur 14, hvor partikeldiameter hørende til 10 %, 50 % og 90 % fraktilerne er vist. Fraktil-diametrene for bund- og topprøverne fra 1 m afstanden minder mere om fordelingerne i afstandene 10 m og 20 m, end i 3 m og 5 m. Forklaringen er måske at kun i starten (måske det første år) kunne alle partikelstørrelser finde vej gennem kalkmåtternes toptekstil. I takt med at kalkmåtterne fyldes op og tekstilens hulrum fyldes ud, er det måske lettere for de mindre partikler at blive hængende oven på tekstilen, end for de større partikler, der dermed transporteres længere ind i filteret.

afstand fra indløb	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)
1 m (bund)	1,3	5,3	18,8
1 m (top)	1,4	7,0	25,5
3 m	1,7	8,7	33,9
5 m	1,6	7,3	33,3
10 m	1,5	6,5	33,4
20 m	1,2	4,2	27,0
30 m	0,9	2,7	13,2

Figur 14. Sammenligning af partikelstørrelsesfordelinger ved de 6 analyserede afstande (1 m, 3 m, 5 m, 10 m, 20 m og 30 m fra indløbet til DPF-6-Lag). Partikeldiameter (μ m) anført for 10 % fraktilen d(0,1), 50 % fraktilen d(0,5) og 90 % fraktilen d(0,9).

Sediment fra afstanden 1 m er udtaget på anden vis (fra de højporøse lag) end de øvrige (fra kalkmåtterne) og kan derfor ikke direkte sammenlignes.



Figur 15. Partikelstørrelse hørende til 10 %, 50 % og 90 % fraktilerne i afstandene 3, 5, 10, 20 og 30 m (data fra Figur 14).

Forskellen i størrelsesfordelinger af partikler i "bund"- og "top"-prøverne ved 1 m passer med at partiklerne afsat på oversiden af kalkmåtternes toptekstil er afsat i tyngekraftens retning, og derfor har en lidt grovere sammensætning, end partikler afsat på undersiden af kalkmåtternes bundtekstil, der skal hænge fast i selve tekstilen, og derfor er mindre.

Sammenfattende kan det konstateres at det dobbeltporøse filter fjerner partikler i alle størrelsesklasser. Dette illustreres tydeligt i Figur 14, der viser ændringer i diametrene ved 10 %, 50 % og 90% fraktilerne ved afstandenne 3, 5, 10, 20 og 30 m. Størst er fjernelsen af grove partikler (d(0,9) påvirkes mest), men også de 10 % mindste partikler påvirkes markant. Således falder 10 % fraktilen fra 1,7 µm ved afstanden 3 m til 0,9 µm ved 30 m (Figur 14).

6.3.5 Partikelform

Hvilken geometrisk form partikler i vejvand har, kan der fås en fornemmelse af ud fra Figur 16 og Figur 17. Her ses fotos af sedimentprøven udtaget fra kalkmåtte-oversiderne i afstanden 1 m optaget med et scanning elektron mikroskop. Der er taget to billeder med forskellig forstørrelse. Scanning elektron mikroskopi-billederne viser at partikler i vejvand snarere har en flad og kantet geometri end en sfærisk.



Figur 16. Scanning elektron mikroskopi af sedimentprøve afskrabet fra oversiden af kalkmåtte-toptekstil i afstanden 1 m. Bemærk målestok (øverst 100 μm, nederst 5 μm).





Figur 17. Scanning elektron mikroskopi af sedimentprøve afskrabet fra overside af kalkmåtte-toptekstil i afstanden 1 m. Bemærk målestok (50 µm begge steder).

6.3.6 Fordeling af tungmetal og fosfor på sediment og kalk

Indholdet af fosfor og tungmetallerne Zn, Cu, Cr og Pb i henholdsvis sediment og kalk i 4 af de 6 dobbeltporøse lag (det øverste og nederste ikke medtaget) fremgår af Figur 18. Indholdet blev bestemt ved dels almindelig dansk standard (DS259), dels ved special oplukning (EN13656), der giver en fuldstændig oplukning af materialet. Der er desuden analyseret en ren prøve af den anvendte kalktype, for at få et mål for baggrundsindholdet i kalken.

Af Figur 18 fremgår, at der ikke ser ud til at være nævneværdige forskelle i fosfor- og tungmetalindhold mellem de enkelte dobbeltporøse lag (lag 2, 3, 4 og 5).

Ved sammenligning af de to analysemetoder ses endvidere at special oplukning af prøven markant forhøjer koncentrationer af metallerne zink, krom og bly, men ikke kobber. Dette kan indikere at zink, krom og bly i højere grad afsættes som egentligt partikulært materiale, f.eks. metalpartikler fra karrosseri og forkromninger, og at kobber i højere grad er associeret med de mindste partikler(måske slid fra bremseklodser) eller adsorberet til overfladen af andre partikler, og derfor lettere ekstraheres ved den mildere DS-metode.

Gennemsnitstallene for kalk og sediment overføres til Figur 19, der i øvrigt viser indhold af Zn, Cu, Cr, Pb og P for bulkprøver for afstandene 3 m, 5 m, 10 m, 20 m og 30 m.

Prøve	Ana	lyse	Zink		Kobb	ber	Kro	m	Bly		Fosf	or
metode: detek-			DS:1		DS:1	,7	DS:	1	DS:	3	DS: 1	100
tionsgrænse			E	N: 10		EN: 2		EN: 2		EN: 5	EN	: 100
Ren kalk	DS		9		<1,7	1	<1		<3		110	
		EN		23		10		<2		17		960
Kalk lag 2	DS		13		2,7		<1		<3		130	
		EN		30		<1,2		<2		<5		870
Kalk lag 3	DS		12		2,3		<1		<3		120	
		EN		21		<2		<2		<5		890
Kalk lag 4	DS		14		2,7		<1		<3		120	
		EN		22		<2		<2		<5		930
Kalk lag 5	DS		13		2,4		<1		<3		120	
		EN		23		<2		<2		<5		860
Gns. kalk	DS		13		2,5		<1		<3		123	
		EN		24		<2		<2		<5		888
Sediment lag 2	DS		560		140		36		42		1100	
	EN			800		160		72		78		2200
Sediment lag 3	DS		570		150		35		43		1100	
	EN			860		170		84		80		2200
Sediment lag 4	DS		610		160		37		48		890	
	EN			920		180		82		84		1800
Sediment lag 5	DS		620		160		38		51		890	
	EN			910		190		86		88		2000
Gns. sediment	DS		590		153		37		46		995	
	EN			873		175		81		83		2050

Figur 18. Indhold af Zn, Cu, Cr, Pb og P i henholdsvis sediment og kalk i de fire mellemste dobbeltporøse lag i afstanden 1 m i DPF-6-Lag anlægget, udtaget efter ca. 2 års drift. Ren kalkprøve medtaget som kalk-baggrund. Samme prøver analyseret efter to metoder, dels Dansk Standard (DS), dels specialoplukning (EN). Detektionsgrænser angivet. Enhed: mg/kg tørstof.

Prøve	Zink	Kobber	Krom	Bly	Fosfor
Ren kalk	23	10	<2	17	960
Kalk 1 m	24	<2	<2	<5	888
Kalk 3 m	<50	<20	<10	<30	140
Kalk 5 m	<50	<20	<10	<30	<100
Kalk 10 m	<50	<20	<10	<30	170
Kalk 20 m	<50	<20	<10	<30	170
Kalk 30 m	<50	<20	<10	<30	140
Sediment 1 m	873	175	81	83	2050
Sediment 3 m	760	179	85	50	1500
Sediment 5 m	1200	230	95	72	1800
Sediment 10 m	1200	180	83	67	1500
Sediment 20 m	840	200	98	57	1600
Sediment 30 m	880	200	89	67	2300
Jordkvalitetskriterium	500	500	500	40	-
Afskæringskriterium	1000	1000	1000	400	-

Figur 19. Gennemsnitligt indhold af Zn, Cu, Cr, Pb og P i henholdsvis sediment og kalk i afstandene 1 m, 3 m, 5 m, 10 m, 20 m og 30 m i DPF-6-Lag efter ca. 2 års drift. Ren kalkprøve medtaget som kalkbaggrund. Analysemetode: EN13566. Detektionsgrænse angivet (gælder afstandene 3 – 30 m). Miljøstyrelsens jordkvalitetskriterium og afskæringskriterium - baseret på DS 259 - er anført. Enhed: mg/kg tørstof.

Af Figur 19 fremgår at kalken har spillet en rolle for tilbageholdelse af fosfor, idet der her ses en forhøjede koncentrationer sammenlignet med den rene kalk, især i afstandene 10 m og 20 m. For tungmetallerne kan der ikke ses nogen tilbageholdelse i kalken. Det skal bemærkes at den benyttede analysemetode har en ret høj detektionsgrænse. Sedimentets indhold af tungmetaller og fosfor er mange gange højere end kalkens, og viser at tungmetallerne forbliver forbundet med de partikler de ankommer sammen med, og ikke flytter over på kalken.

Ved sammenligning med Miljøstyrelsens jordkriterier skal man være opmærksom på, at kriterierne er baseret på DS259 mens den benyttede analysemetoden for sedimentet er den kraftigere specialoplukning EN13656. Det ses at zink og bly optræder i kritiske koncentrationer. Eftersom EN13656 ser ud til at ekstrahere ca. 50% mere zink og bly fra sedimentet end DS259 vurderes afskæringskriteriet ikke at være overskredet.

Fordelingen af tungmetaller og fosfor på langs af filteret er uens, hvilket afspejler at de partikelfraktioner, der sedimenterer i de forskellige afstande, ikke bærer samme stofmængde. Sedimentet aflejret nærmest indløbet, dvs afstandene 1 m og 3 m har de laveste stofkoncentrationer. Det antyder, at de største partikler, der udgør en relativt større andel af sedimentet i disse afstande (Figur 14), har et lavere tungmetal og fosfor indhold end de mindre partikler, der sedimenterer længere inde i filteret. Sediment i afstanden 5 m har for alle fire tungmetaller det højeste indhold, mens indholdet ved større afstande falder for zink men forbliver på samme niveau for kobber, krom og bly.

Fordelingen på langs af filtret kan på baggrund af data sagtens være en tilfældighed, men leder alligevel tanken hen på, om der mon i vejvand findes en særlig partikelfraktion, måske slidpartikler fra vejudstyr, der netop sedimenterer ved afstanden 5 m. For fosfor ses stort set samme mønster, dog indeholder sedimentfraktionen udtaget længst væk fra indløbet, nemlig 30 m, absolut mest. Da kalkprøverne fra samme afstand ikke er specielt beriget med fosfor må det anta-
ges at det høje fosforindhold i sedimentet skyldes meget fine partikler med højt P-indhold, og ikke adsorption af opløst fosfor.

Af Figur 20 fremgår de samlede mængder af tungmetal og fosfor tilbageholdt i forskellige dele af filteret. Figuren er fremstillet ved at gange koncentrationerne fra Figur 19 med de akkumulerede sedimentmængder fra Figur 9 (se tilhørende tekst i afsnit 4.3.2). I grove træk ses en halvering i akkumulerede mængder fra intervallet 0 – 10 m til intervallet 10- 20 m, og akkumulerede mængder fra 40 – 50 m er på ca. 1/6 af 0-10 m. Samlet set er der akkumuleret ca. 800 kg SS i filtret der indeholder ca. 800 g zink 160 g kobber 70 g Krom og 1500 g Fosfor.

	SS	Zink	Kobber	Krom	Bly	Fosfor
	kg	g	g	g	G	g
0 - 10 m	379	385	74	33	26	652
10 - 20 m	165	169	31	15	10	256
20 - 30 m	106	91	21	10	7	209
30 - 40 m	87	77	17	8	6	200
40 - 50 m	70	61	14	6	5	160
Akk i alt	807	783	158	72	53	1478

Figur 20. Estimeret akkumuleret stof i DPF-6-Lag på 2 år fordelt på 10 m intervaller. Estimatet tager udgangspunkt i lineær interpolation mellem prøvesteder for SS på Figur 9. Det skønnes at suspenderet stof falder lineært fra 0,47 kg/m² ved 30 til 0,3 kg/m² ved 50 m. Derudover antages uændrede koncentrationer i SS fra 30 til 50 m. Analysemetode: EN13566.

7. SUPPLERENDE ANALYSER AF VEJVAND

De observerede koncentrationer af opløste tungmetaller i indløbsvand til DPF-pilotanlægget i Ørestad ligger overraskende lavt i forhold til litteraturværdier (Tillæg til Basisrapport, maj 2009). Dette kan skyldes at opløste forureninger adsorberes til det suspenderede stof, i perioden efter afstrømning og indtil filtrering af prøven. Før vejvandet ankommer til DPF-pilotanlægget har det passeret en vejbrønd, samt sand- og olieudskilleren på pumpestationen på Center Boulevard. Desuden henstår prøver af DPF ind- og udløsvand typisk i et døgns tid i fraktionsopsamler før filtrering og analyse. I den periode – dvs. fra regnvandet afstrømmer fra kørebanen, og til filtreringen foretages og dermed fysisk adskiller opløst forurening fra partikelbunden, forekommer der muligvis en forskydning af fordelingen, hvilket i givet fald kan forklare de lave koncentrationer af opløst tungmetal. For at belyse dette blev der udtaget en ekstra prøveserie fra pumpestationens ind- og udløb under sommerregn d. 11. juni 2009, med filtrering af prøverne umiddelbart efter udtagning og derefter efter henstand i op til 48 timer.

Ved samme lejlighed undersøgtes sand- og olieudskillerens tilbageholdelse af suspenderet stof, tungmetaller og fosfor, for at få en stikprøvevurdering af stoffjernelsen opstrøms for DPFanlægget. De samme prøver blev analyseret for partikelstørrelsesfordeling for at vurdere størrelsen af partikler ind- og ud af sand- og olieudskiller.

Vurderingen af sand- og olieudskillerens effekt blev gentaget ved en hændelse d. 25. februar 2010, hvor der forekom sneafsmeltning samtidig med let regn. Der blev desuden udtaget enkelte prøver ved en vejbrønd, dels en prøve af vejvand (snesmelt) før ophold i vejbrønd, dels prøver af vand i vejbrønden. Snesmelt-situationen vurderedes desuden at være interessant som ekstra analyse i forhold til Basisafprøvningen af DPF-teknikken, idet der hverken i 2007 eller 2008 var mulighed for at måle på sne. Sne langs veje kan forventes at have et ekstraordinært højt indhold af fine partikler, der normalt vil deponeres længere væk fra vejen, men som fanges af driverne. Snesmeltningshændelsen blev af samme grund også analyseret for PAH'er.

7.1 Formål

Formålet med de supplerende analyser af vejvand var

- 1) At undersøge betydning af tid fra afstrømning til filtrering for vejvands indhold af opløste tungmetaller og fosfor
- 2) At få et indblik i hvilke stofmængder og partikelstørrelser, der fjernes i sand- og olieudskilleren opstrøms for DPF-anlægget i Ørestad

Som supplerende formål beskrives stofindholdet i en enkelt snesmeltningshændelse samt den tilhørende rensning gennem vejbrønd, sandfang og DPF-6-anlægget. Dette gøres i forbindelse med formål 2.

7.2 Materialer og metoder

Figur 21 er en oversigt over regnvandets vej fra kørebaner og P-arealer i oplandet gennem vejbrønd, sand- og olieudskiller til DPF-anlægget, samt de tilhørende prøvetagningssteder. Forkortelser for prøvetagningssteder fremgår af Figur 22, der også angiver hvordan vandprøverne er udtaget de forskellige steder.

Strømningshastighed gennem pumpestationen (PS) er estimeret ud fra pumpningens varighed (minutter) og det pumpede volumen (m3, aflæst på display).



Figur 21. Oversigt over prøvetagningssteder (blå cirkler). Fra den trafikerede overflade strømmer vejvandet ned i vejbrønde. Vejbrønden tættest på pumpestationen på Center Boulevard er udvalgt til prøvetagning. Fra vejbrønden løber vandet til et sandfang. En prelplade forhindrer vandet i at "spule" ind i sandfanget, ved at bremse og fordele vandet over et større areal. Når vandstanden i sandfanget når en vis højde starter en pumpe, der suger vandet fra sandfanget gennem en olieudskiller og pumper det ud i pumpeledningen der løber til Øresund, og hvorfra der er en stikledning til DPF-pilotanlægget. Fra DPFpilotanlægget pumpes det rensede vand til en grøft, der løber til Øresund.

Prøvenavn	Sted	Metode
VB	Vejbrønd, Center Blvd.	Kop på teleskopstang
PS-Ind	Pumpestation Ind	Dykpumpe (Whale) bag prelplade i indløb til sandfang (PS-Ind-D)
		Kop på teleskopstang bag prelplade (PS-Ind-T)
PS-FP	Pumperum før pumpe	Aftapning fra hane ved indløb til pumpe
PS-Ud	Pumpestation Ud	Aftapning fra hane på trykledning 5 m efter pumpe
DPF-Ind	DPF-pilotanlæg Ind	Fraktionsopsamler (24 delprøver + bulk)
DPF-6-Lag	DPF-6-lag filter Ud	Fraktionsopsamler (24 delprøver + bulk)
DPF-18-Lag	DPF-18-lag filter Ud	Fraktionsopsamler (bulk)

Figur 22. Prøvetagningssteder og metoder til udtagning af prøve.

Der skønnes at være et stående vandvolumen i pumpestationen (sandfang + olieudskiller) svarende til pumpeydelsen i 1 time. Der skal derfor være nedbør af en vis varighed for at de udtagne udløbsprøver repræsenterer den aktuelle nedbør og ikke "gammelt" vand. Det betyder desuden at sammenhørende prøver for ind- og udløbsvand i pumpestationen skal udtages med ca. 1 times forskydning.

Der er som nævnt arbejdet med to regnhændelser, dels d. 11. juni 2009, der betegnes PH1, dels d. 25. februar 2010, der betegnes PH2. Strømningshastigheder og vandstande i sandfang blev registreret.

7.2.1 Forholdet mellem opløst og partikelbunden forurening som funktion af tid fra afstrømning

For at følge eventuelle ændringer i forholdet mellem opløste og partikelbundne forureninger i det afstrømmende vejvand over tid blev der under sommerregnen d. 11. juni 2009 udtaget i alt 4 prøver, 2 fra indløbet til pumpestationen (PS-ind), repræsenterende vand med kort opholdstid i systemet, og 2 fra udløbet fra pumpestationen (PS-ud), udtaget 1 time senere, repræsenterende det vand, der løber ind til DPF-anlægget.

En andel af hver prøve filtreredes (0,45 µm filter) umiddelbart efter udtagning, og repræsenterer dermed fordelingen af opløst og partikelbunden forurening kort tid efter regnen har forladt asfalten. Over de næste 48 timer blev yderligere delprøver filtreret, dvs. efter 1 t, 2 t, 4 t, 12 t, 24 t og 48 t. Indholdet af opløste tungmetaller (Zn, Cu, Cr og Pb) og fosfor (P) blev bestemt ved ICP-MS målinger på de filtrerede og forsurede prøver, mens totalindholdet af tungmetaller og fosfor blev analyseret på ICP-MS efter oplukning i syre og mikrobølgeovn af startprøven (Se Basisrapport for metodebeskrivelse). Desuden blev de fire prøvers indhold af suspenderet stof bestemt.

7.2.2 Effekt af sandfang og olieudskiller på stoffjernelsen

Ved regnhændelsen d. 11. juni 2009 og igen ved snesmelt-hændelsen d. 25. februar blev der udtaget prøveserier fra ind- og udløb til pumpestationen. Indløbsprøverne blev udtaget hvert 20. minut. Udløbsprøverne blev udtaget med samme frekvens ved den første hændelse, men under snesmelthændelsen kørte pumperne kun kortvarigt (ca. 2 min. hvert 10 min), og udløbsprøver måtter derfor tages når pumpen kørte. Der blev ved begge lejligheder gennemført en normal prøvetagning af DPF-6-lag, og ved snesmelthændelsen d. 25. februar også på DPF-18-Lag efter samme procedure som beskrevet i Basisrapport. Desuden blev der d. 25. februar opsamlet 6 vandprøver direkte ved vejbrønden nærmest opstrøms for pumpestationen. Den første af disse 6 prøver (VB1) blev opsamlet før vejvandet havde passeret vejbrønden (ved hjælp af en opstemning på kørebanen, og hurtig prøvetagning) og repræsenterer dermed den direkte afstrømning fra vejen, mens de sidste 6 blev udtaget fra vandet i vejbrønden, dvs. efter en vis opholdstid.

Alle prøver blev analyseret for suspenderet stof, organiske stof, total- og opløst indhold af zink, kobber, krom, bly og fosfor, samt elektrisk ledningsevne og turbiditet. Alle analyser blev gennemført som beskrevet i Basisrapport og Tillæg til Basisrapport. Udvalgte prøver blev desuden analyseret for partikelstørrelsesfordeling ved laserdiffraktion, ligesom indholdet af PAH (16 EPA-PAH'er) i bulkprøver fra DPF-anlæggets ind- og udløb blev bestemt ved snesmelthændelsen.

7.3 Resultater og diskussioner

7.3.1 Strømningsforløb ved de to hændelser, PH1 og PH2

I PH1 blev de første prøver i PS-Ind taget den 11. juni 2009 kl. 14:25, og det er starttidspunkt for den samlede hændelse, der benyttes ved karakterisering af n. På Figur 23 ses forløbet, og strømningen gennem PS-Ud afspejler en varierende intensitet i nedbøren. Hændelsen startede med en lille byge, og efter et ophold kom der en middelkraftig byge efter 1 time. Efter et fald i intensiteten kom der kraftig nedbør efter 1/1/2 time. Pumpen kørte ikke kontinuerligt den første 1 2/3 time. Efter 2 1/3 time kan pumpen ikke længere følge med strømning gennem indløb, og vandstanden stiger ca. 130 cm frem til den 3. time. Den forhøjede vandstand ser ud til at øge strømningen gennem pumpen ved kontinuerlig drift fra 69 til 75-78 m³/t. Den kraftigere strømning øger trykket i pumpe-ledningen, og dermed også strømning gennem DPF-Ind.

DPF-Ind og DPF-6-lag tog de første prøver efter ca. 1 time. Største strømning gennem DPF-6-Lag var 6,0 m³/t og gennemsnittet var på 2,4 m³/t. På strømningen gennem DPF-Ind, ses en stor variation, som tilskrives den varierende intensitet i nedbøren.



Figur 23. Strømning under sommerregn d. 11. juni 2009 (PH1) gennem sand- og olieudskiller (PS-Ud) samt gennem DPF-6-anlægget (DPF-Ind og DPF-6-Lag). Desuden registreredes vandstanden i sandfanget (vandstand).

Hændelsen PH2 startede med første prøvetagning i PS-Ind den 25. feb 2010 kl. 10:40, og strømning fremgår af Figur 24. Strømningen gennem PS-Ud afspejler en aftagende let nedbør frem til 6. time. I denne periode var der ingen opstuvning af vand i pumestationen, og pumpen kørt kun i kort tid (2 minutter) – ca. hvert 10. minut, hvor vandstanden reduceres med 23 cm til minimum vandstand. Strømning gennem PH-Ud er beregnet ud fra akkumuleret volumen efter at pumpen er stoppet. Det lokale maksima omkring 5. time skyldes, at der undtagelsesvis blev pumpet "3 m³" i stedet for "2 m³" mens pumpen kørte.

I DPF-pilotanlægget havde fraktionsopsamlerne ikke taget deres første delprøver da prøvetagningen i pumpestationen var afsluttet efter 6 timer. Derfor blev indløbshanerne til filtrene åbnet helt i den 6 time. Efter 7 timer ses et stigende flow gennem DPF-Ind. DPF-6-lag og DPF-18-Lag tog deres første prøver efter hhv. 10 og 15 1/2 timer. Flowmønstrene i DPF-pilotanlægget tyder på, at der har været vedvarende regn fra den 11. time og frem.



Figur 24. Strømning under snesmelthændelse og let regn d. 25. februar 2010 (PH2) fra pumpehuset (PS-Ud), ved indløbet til DPF-anlægget (DPF-ind), ved udløbet fra DPF-6-lag, og ved udløbet fra DPF-18-lag. Desuden registreredes vandstanden i sandfanget (vandstand).

7.3.2 Ændring i opløste tungmetaller og fosfor ved henstand af prøver

Totalt og opløst indhold af zink, kobber, krom, bly og fosfor i alle fire prøver til henstand fra pumpestation i PH1 fremgår af Figur 25. Prøvernes indhold af suspenderet- og organisk stof er medtaget da der kan ske en udveksling mellem fast og opløst stof. Ændringer over tid i indhold af opløst zink, kobber, krom, bly og fosfor fremgår af Figur 26.

	PS-ind, a	PS-ind, b	PS-ud, a	PS-ud, b
Suspenderet stof (SS)	187,3	80,0	78,1	67,8
Organisk indhold i SS	(44,5)	(24,0)	(21,9)	(16,5)
Zink total	539,5	350,3	426,6	292,4
(opløst)	(22,0)	(19,0)	(25,9)	(25,7)
Kobber, total	181,8	94,6	79.6	78,7
(opløst)	(12,6)	(8,3)	(8,0)	(7,8)
Krom total (µg/L)	54,0	36.4	35.3	33.0
(opløst)	(7,1)	(6,3)	(8,1)	(7,8)
Bly total (µg/L)	28,1	14,2	13,1	11,8
(opløst)	(0,2)	(0,2)	(0,2)	(0,3)
Fosfor total (µg/L)	354,6	217,8	227,8	216,1
(opløst)	(43,8)	(38,4)	(13,2)	(41,69)

Figur 25. Startkoncentration af suspenderet stof og tungmetaller i prøver til henstands-undersøgelse. Enheder: SS og org stof i mg/L, øvrige i µg/L.

Ændring over tid (henstand) i indholdet af opløst zink, kobber, krom, bly og fosfor i de 4 udtagne prøver fremgår af Figur 26.

For opløst zink, kobber, krom og bly ses ingen betydelige ændringer over de målte 48 timer. Et par af zink analyserne afviger betydeligt fra de øvrige, men den samlede trend viser ingen markante forskelle på koncentrationer målt umiddelbart efter prøveudtagning, og efter 48 timer. For opløst fosfor ses et tydeligt fald i koncentration over tid for alle prøver. Koncentrationen falder i gennemsnit fra 28 mg opløst P/L til 14 mg/L.

Det må dermed konkluderes at de i DPF-anlægget observerede lave koncentrationer af opløste tungmetaller, og til dels fosfor (Tillæg til Basisrapport), ikke kan forklares med henstand af prøver, men ser ud til at være reelle. Ørestad må dermed som opland siges at adskille sig fra andre oplande rapporteret i litteraturen.



Figur 26. Ændring over tid i koncentration af opløst zink, kobber, krom, bly og fosfor i 4 vejvandsprøver udtaget ved indløb (PS-ind a og b) til og udløb fra (PS-ud a og b) pumpestationen på Center Boulevard i Ørestad.

7.3.3 Effekt af sandfang og olieudskiller på stoffjernelsen

Indhold af suspenderet stof, turbiditet og elektrisk ledningsevne i prøveserierne udtaget fra pumpestationens ind- og udløb er for de to regn d. 11. juni 2009 og d. 25. februar 2010 vist i henholdsvis Figur 27 og Figur 28. Det gennemsnitlige indhold af suspenderet stof, tungmetaller og fosfor for de udtagne prøveserier fremgår af Figur 29.



Figur 27. Ind- og udløbsprøver udtaget under regn 11. juni 2009 (PH1). Øverst: Indhold af suspenderet stof. Midt: Turbiditet (uklarhed). Nederst: Elektrisk ledningsevne.



Figur 28. Ind- og udløbsprøver udtaget under snesmeltning 25. februar 2010 (PH2). Øverst: Indhold af suspenderet stof. Midt: Turbiditet (uklarhed). Nederst: Elektrisk ledningsevne.

Ved begge hændelser (Figur 27 og Figur 28) ses indløbsprøvernes indhold af suspenderet stof at variere mere i indløbsprøver end i udløbsprøver. Det tyder på, at der sker en udligning under vandets passage af pumpestationen, sandsynligt afspejlende både sedimentations- og resuspensionsprocesser. Feltmålingen af turbiditet ses i store træk at følge indholdet af suspenderet stof. Forskellen i elektrisk ledningsevne mellem de to hændelser afspejler saltning af Ørestads veje i vinteren 2009/2010. Hændelsen PH2 har højere niveauer for ledningsevne i PS-ind og PS-ud sammenlignet med vejbrøndsmålinger, og det tyder på, at "gammelt" vand i systemet har haft en endnu højere saltkoncentration.

Ved læsning af Figur 29 skal det bemærkes, at selv om udløbsvandet fra pumpestationen (PS-ud) i princippet er det samme som indløbsvandet til DPF-anlægget (DPF-ind), kan man ikke regne med fuld overensstemmelse i data, på grund af tidsforskydninger i prøvetagningen og den tilhørende variation i afstrømningens forureningsprofil.

Figur 29 viser at vejvandet ved begge hændelser renses noget i pumpestationen. Indholdet af suspenderet stof falder i PH1 med gennemsnitligt 26 % fra 116 mg SS/L til 87 mg SS/L. I PH2 falder SS med 14 % fra 252 til 217 mg SS/L. De efterfølgende fald under passage af DPF-6-Lag er 93 % i PH1 og 84 % i PH2. Mens hændelsen d. 11. juni 2009 ligger på linje med de øvrige observerede hændelser (Basisrapport samt Tillæg til Basisrapport) er stofindholdet i snesmelthændelsen ekstraordinært højt.

		PH1: 11.	juni 200	9		F	PH2: 25.	februar 2	010		
		(somm	nerregn)				(sne	esmelt)			
	PS-	PS-ud	DPF-	DPF-	VB1	Vejbrønd	PS-	PS-ud	DPF-	DPF-	DPF-
	ind		ind	6-lag			ind		ind	6-Lag	18-
											Lag
SS	116	87	58	4	1826	650	251	217	170	23	8
	65	25	-	-	-	581	72	40	-	-	-
org. SS	30	22	28	3	489	197	87	70	47	7	2
	11	6	-	-	_	146	29	15	-	-	-
Zn-tot	357	314	195	11	2475	1264	564	524	420	88	33
	159	70	-	-	-	614	95	35	-	-	-
Zn-opl.	22	22	22	8	71	87	93	121	99	24	26
	10	7	-	-	-	11	3	8	-	-	-
Cu-tot	105	85	49	6	882	481	242	220	181	72	61
	69	21	-	-	_	201	41	34	-	-	-
Cu-opl.	8	8	6	4	64	93	114	119	81	53	47
	3	2	-	-	-	22	10	21	-	-	-
Cr-tot	40	37	29	25	315	134	52	45	43	54	25
	15	4	-	-	-	90	10	7	-	-	-
Cr-opl.	7	10	25	10	11	13	16	17	13	10	9
	3	4	-	-	_	1,6	0,9	1,8	-	-	-
Pb-tot	16	13	9	0,3	91	41	18	14	11	3	0,9
	8	2	-	-	-	25	4	2	-	-	-
Pb-opl	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
	0,0	0,0	-	-	-	0,0	0,0	0,0	-	-	-
P-tot	253	222	139	16	869	349	163	125	126	50	41
	89	19	-	-	_	256	26	12	-	-	-
P-opl	28	25	18	19	21	18	17	11	8	12	16
	7	2	-	-	-	2	7	4	-	-	-

Figur 29. Indhold af suspenderet stof (SS), organisk andel (org. SS), total zink(Zn-tot), opløst andel (Znopl), total kobber (Cu-tot), opløst andel (Cu-opl), total krom (Cr-tot), opløst andel (Cr-opl), total bly (Pbtot), opløst andel (Pb-opl), total fosfor (P-tot) og opløst andel (P-opl) med tilhørende standardafvigelser (*i kursiv*) hvor indholdet repræsenterer et gennemsnit, i vandprøver udtaget under sommerregn den 11/6-09 (PH1) og under snesmelt den 25/2-10 (PH2) ved pumpestationens indløb (PS-ind), pumpestationens udløb (PS-ud), indløb til DPF-anlægget, og udløb fra DPF-6-Lag. For PH2 desuden første prøvetagning i vejbrøden (VB1), samt gennemsnit for de ilat 6 vejbrøndsprøver (vejbrønd) og udløb fra DPF-18-Lag. Enheder: SS og org. stof i mg/L, øvrige i µg/L. Fjernelsen af tungmetaller og fosfor følger i den første hændelse, 11. juni 2009, i store træk fjernelsen af suspenderet stof, og andelen af tungmetaller og fosfor er ganske lav, hvilket er i overensstemmelse med tidligere observationer (Basisrapport) og med de fire prøver, der blev filtreret over tid (se foregående afsnit). I snesmelt-hændelsen d. 25. februar 2010 er der derimod en overraskende høj andel af tungmetallerne, men ikke fosfor, der er på opløst form, især kobber og zink. Det svarer faktisk til det ud fra litteraturen forventede mønster, og må hænge sammen med vintersituationen. Under passage af pumpestationens sandfang og olieudskiller falder totalmængden af tungmetallerne og fosfor i nogenlunde overensstemmelse med tabet i suspenderet stof, men der sker intet fald i de opløste koncentrationer af zink, kobber og krom, der fortsat er høje. Under passage af DPF-anlægget sker der et markant fald i både totalkoncentrationer af alle stoffer, og for den opløste andel af zink og kobber, hvilket er en indikation af at de forventede sorptionsprocesser i DPF-6-Lag og DPF-18-Lag fungerer.

I snesmelthændelsen "PH2" er der i vejbrønden fundet høje koncentrationer af alle stoffer (Figur 29). Den første vejvandsprøve (VB1) repræsenterer det absolut mest forurenede vand, der er målt til dato i Ørestad med et suspenderet stofindhold på 1866 mg/L, og tilhørende høje tungmetalindhold. Stofindholdet i de øvrige prøver fra vejbrønden indikerer en betydelig effekt af vejbrønde på stoffjernelsen.

7.3.4 Partikelstørrelsesfordeling

Partikelstørrelsesfordelingen i vejvand der løber til pumpestationen, og i vejvand, der forlader pumpestationen er vist i de følgende figurer for de to hændelser PH1 og PH2. I Figur 36 er "nøgletallene" for fordelingerne samlet, og desuden sammenlignet med tidligere observerede fordelinger af indløbsvand til DPF-anlægget.

For hændelsen PH1 ses på Figur 30 partikelstørrelsesfordelinger for 3 prøver i indløb til pumpestationen (PS-Ind), udtaget over et par timer. Den gennemsnitlig partikelstørrelse er 8,1 µm, men der er en betydelig variation. Ved første udtagning (t = 0) er partiklerne mindre end ved de efterfølgende, og ved t = 2,3 ses ingen store partikler over 100 µm. Disse variationer må hænge sammen med variation i regnens intensitet.

Partiklelstørrelser i udløbsvand fra pumpestationen (PS-Ud) for den samme regn (med tidsforskydning på en time) er vist på Figur 31 for hændelsen PH1. Her er gennemsnit for 3 prøver på 8,4 µm, og der ses stigende partikelstørrelser over tid. Til t = 1 er der ingen partikler over 100. Ved t= 2 er grænsen flyttet til 200 µm, og til t = 3,3 ses endnu større partikler i udløb. Denne forskydning sker samtidig med at der sker en stigning i vandstanden i sandfanget (Figur 24).









På Figur 32 ses partikelstørrelser for sammenhørende prøver af indløb og udløb efter henholdsvis 2,3 t og 3,3 t. Det ses at udløbsvandet indeholder større partikler end indløbsvandet. Dette kan antyde at der sker en resuspension af større partikler fra sandfanget ved kraftig strømning (stigende vandstand). At der forekommer resuspension indikeres også ved at partikelindholdet for de to viste prøver er 70 mg SS/L i indløbsprøven og 123 mg SS/L i udløbsprøven (Figur 27) til trods for at der samlet set over hele hændelsen sker en partikelreduktion på de nævnte 26 %.



Figur 32. Sammenhørende partikelstørrelsesfordelinger ved høj vandstand i pumpestation.

For snesmelthændelsen (PH2) ses i Figur 33 partikelstørrelsesfordelinger for fire udvalgte indløbsprøver til pumpestationen (PS-ind) og i Figur 34 for de tilhørende (forsinkede) udløbsprøver (PS-ud). I forhold til sommerhændelsen (PH1), ses partiklerne generelt at være betydeligt mindre, nemlig ca. 3 µm mod ca. 8 µm. For både indløb og udløb i snesmelthændelsen ses faldende partikelstørrelser over tid.



Figur 33. Partikelstørrelsesfordeling PS-Ind.



Figur 34. Partikelstørrelsesfordeling PH-Ud.

Der blev ekstraordinært udtaget prøver til måling af partikelstørrelse fra anden delprøve i vejbrønd (VB2) og bulkprøver fra DPF-Ind, DPF-6-Lag og DPF-18-Lag. Indholdet af partikler i DPF-6-Lag og DPF-18-Lag er så lavt, at der ikke kan måles partikelstørrelse direkte på vandprøverne. Disse prøve er derfor filtreret gennem et filter med porestørrelse 0,22 µm, og partikler på filtret er derefter genopslemmet ved ultralydsbehandling i et lille vandvolumen inden måling. På trods af denne metode har det ikke været muligt, at få et brugbart resultat fra DPF-18-lag.

Data fremgår af Figur 35. Det ses, ikke at være nogen betydelig forskel i gennemsnitlig partikelstørrelse mellem VB2, PS-ind, PS-Ud og DPF-Ind, om end det største indhold af store partikler er fundet i VB2. Ved passage gennem DPF-6-Lag ses partikelstørrelsen at falde markant til et gennemsnit på 1,8 µm.





Figur 36 indeholder en samlet oversigt over partikelstørrelsesfordelingerne observeret ved de to hændelser, udtrykt ved fraktilfordelinger. Ved sammenligning med tidligere partikelstørrelsesanalyser af indløbsvand til DPF-anlægget adskiller og ved sammenligning med sommerregnen 2009 adskiller snesmelthændelsen sig med markant lavere partikelstørrelser.

	Prøve	n	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)
PH1	Pumpestation-ind	3	1,6	8,1	40,0
11.06.09	Pumpestation-ud	3	1,7	8,5	29,1
	Vejbrønd (VB2) 25/2-10	1	1,1	4,0	22,8
рн 2	Pumpestation-ind 25/2-10	4	1,0	3,2	12,4
26.02.10	Pumpestation-ud 25/2-10	4	1,0	3,3	12,0
20102110	DPF-anlæg-ind	1 (bulk)	1,0	3,6	16,0
	DPF-6-Lag-ud	1 (bulk)	0,7	1,8	6,0
Tidligere	DPF-anlæg-ind tidligere prøver	4	1,5	6,1	27,7

Figur 36. Sammenligning af partikelstørrelsesfordelinger i vejvand fra vejbrønd, pumpestation og DPFanlæg ved PH1 og PH2, samt tidligere indløbsprøver til DPF-anlæg (Tillæg til Basisrapport), udtrykt som partikeldiameter (μ m) ved 10 % fraktilen d(0,1), 50 % fraktilen d(0,5) og 90 % fraktilen d(0,9). Hvor der har været udtaget flere prøver (n), er gennemsnittet anført.

7.3.5 PAH i DPF-anlæg

Indholdet af PAH i indløb til DPF-anlægget under snesmelthændelsen d. 25. februar samt de tilhørende udløbsprøver fra DPF-6-Lag og DPF-18-Lag fremgår af Figur 37. Der er i DPFindløbsprøven fundet 10 af de 16 PAH'er, der blev analyseret for, over detektionsgrænsen på 0,01 µg/L. DPF-6-Lag reducerer koncentrationen af alle disse betragteligt, og i udløbsprøven fra DPF-18-Lag er der ikke gjort fund over detektionsgrænsen.



Figur 37. PAH'er i DPF-pilotanlægget (16 US-EPA). Indhold af chrysen og triphenylen er analyseret samlet. Detektionsgrænsen er 0,01 µg/L, og værdier under denne er sat til "0". Til trods for de høje koncentrationer af suspenderet stof observeret for denne hændelse adskiller niveauet af PAH'er sig ikke fra de tidligere målinger af PAH (Tillæg til Basisrapport). Dette fremgår af Figur 38, der viser sum PAH for samtlige analyser udført på forsøgsanlægget. Dette antyder, at PAH'er ikke akkumuleres i sneen langs vejene.

Prøvedato	DPF Ind	DPF-6-Lag	DPF-18-lag
2007.10.29	0.95	0.21	< 0.01
2008.10.15	0.09	< 0.01	< 0.01
2008.12.04	4.28	1.28	0.13
2010.02.25	2.26	0.25	< 0.01

Figur 38. Sum af PAH'er observeret i indløb til (DPF-ind) og udløb fra de to DPF-filtre (DPF-6-Lag, DPF-18-Lag) ved i alt fire prøvetagninger.

I Figur 39 sammenlignes ind- og udløbskoncentrationer for 6 PAH'er omfattet af EU's Vandrammedirektiv med de tilhørende kvalitetstandarder og grænseværdier. For yderligere diskussion af PAH'er i forhold til Vandrammedirektiv henvises til Tillæg til Basisrapport.

PAH forbindelse	AA/MAC	DPF Ind	DPF-6-Lag	DPF-18-lag
Naphthalen	2.4/NA	0.25	< 0.01	< 0.01
Acenaphten	0.1/0.4	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Flouranthen	0.1/1.0	0.33	0.036	< 0.01
Benz(b+j+k)fluoranthen	0.03/NA	0.27	0.039	< 0.01
Benzo(a)pyren	0.05/0.1	0.11	0.016	< 0.01
Benzo(g,h,i)perylen	0.002/NA	0.19	0.032	< 0.01

Figur 39. PAH målt den 25.feb 2010 sammenlignet med Vandrammedirektivets kvalitetsstandard og grænseværdi, anført som henholdsvis AA-EQS (Annual Average Environmental Quality Standards), MAC-EQS (Maximum Allowed Concentration) og NA(Not Applicable).

8. INDBYGNING AF ANLÆG - KONSTRUKTIONER

Anlæg til Dobbeltporøs Filtrering af regnvand kan anvendes i en række sammenhænge, hvor de lokale forhold vil stille lokale krav til anlægsudformning af dels DPF-anlægget med forrensning og kalkfilter (jf. Figur 11), dels ledningsanlæg og øvrige udenomskonstruktioner.

Det samlede anlæg skal designes så det indpasses i landskabet under samtidig hensyntagen til at kvaliteten af udløbsvandet er tilstrækkelig og at levetiden af anlægget er tilfredsstillende.

Anlæg til Dobbeltporøs Filtrering er specielt attraktive, i urbane områder med mangel på frie arealer og hvor regnvandet skal bruges rekreativt eller hvor der stilles udledningskrav, der ikke kan opfyldes på anden vis.

Den opnåelige vandkvalitet af udløbsvandet afhænger – foruden vandkvaliteten af indløbsvandet – alene af opholdstiden i forrensning og filterdel.

Levetiden af anlægget er betinget af volumenet til magasinering af det tilbageholdte suspenderede materiale og muligheden for eventuelt at udtage en del af det groveste materiale inden indløbet til filterdelen. Den beregningsmæssige sorptionskapacitet for opløste metaller og fosfor vil ikke blive opbrugt i filterets levetid på 20-30 år.

Det er således afgørende for levetiden, at der etableres en så effektiv forrensning som muligt idet der, jf. 5.3.4, **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** vel at mærke er tale om noget mindre partikelstørrelser end der tilbageholdes i et almindeligt sandfang eller lamel-separator.

Da der jf. afsnit 9 ikke findes standardmetoder til forrensning, der udviser samme rensegrad for suspenderet stof som DPF-anlægget, er der i dette projekt arbejdet videre med en forrensning, der baserer sig på principperne fra DPF men som er enklere at rense således at levetiden forlænges.

8.1 Anlægsopbygning

8.1.1 Filter og forrensning

På baggrund af driftserfaringerne med pilotanlægget er der i forbindelse med dette projekt skitseret en revideret anlægsopbygning med henblik på at forøge levetiden af anlægget samt at forbedre forholdene i anlægs- og driftsfasen, jf. Figur 11.

Opbygningen i pilotanlægget består af et fangstlag med kalk indsyet mellem to lag af geotekstil og et flowlag bestående af en drænmåtte. Dette giver relativt stor risiko for tilstopning af dels drænmåtte dels geotekstil mellem flowlag og fangstlag, hvorfor der ikke er optimal kontakt mellem det strømmende vand og sorptionsmaterialet. Desuden er opbygningen som i pilotanlægget vanskeligt at etablere og der forekommer sandsynligvis meget forskelligartede strømninger i anlægget grundet folder og andre utilsigtede makro-strukturer i filteret.



Figur 40. Anlægsopbygning af filter i pilot-anlæg

Det foreslås i dette projekt, at opbygge filteret med lamelplader som erstatning for adskillelser med drænmåtte og geotekstil, jf. Figur 40. Med en kombination af tværgående lameller, der skaber et fangstlag (lavporøst lag) og langsgående lameller, der skaber et flowlag (højporøst lag) opnås en veldefineret strømning i flowlaget og direkte kontakte mellem vandet i flowlaget og filtermaterialet i fangstlaget. Dette er illustreret i Figur 41.





Forrensningen kan foreslås udført på principielt samme måde som filterdelen blot uden filtermateriale i lamelpladerne. Herved foregår der er en sedimentation af en del af det suspenderede materiale i forrensningen og levetiden af filteret forlænges tilsvarende. Dette er illustreret i Figur 42.

Da der ikke er filtermateriale i forrensningsdelen er det muligt at fjerne det suspenderede materiale ved spuling.



Figur 42. Anlægsopbygning af forrensning med lamelplader

Det suspenderede materiale sedimenteres i det stillestående vand mellem lamellerne og kan spules ud med et flow på tværs af den normale strømningsretning.

For undersøgelser vedrørende sedimenteret materiale og muligheder for spuling af lamelplader henvises til afsnit 8.

Som alternativ til denne type forrensning kan anvendes traditionelle lameludskillere dog udlagt for et væsentligt lavere flow end normalt for at kunne fjerne det meget finkornede materiale, der udgør hovedparten af den samlede mængde suspenderede stof der tilledes anlægget.

For yderligere informationer omkring metoder til forrensning henvises til afsnit 9.

Af Figur 43 ses prototype af lamelplader støbt i plast. Lamelpladen kan anvendes til både filterdel med kalkfyld og til forrensning uden filtermateriale. Lamelpladen er udviklet i dette projekt.





Figur 43. Foto af prototype af lamelplade venstre side: tværgående lameller , højre side: langsgående lameller i bund af plade

Til filterdelen er der i projektet udviklet et alternativt modul bestående af et modificeret græsarmeringssystem. Dette system kan ikke umiddelbart anvendes til forrensning da der ikke er mulighed for spuling, hvorfor der enten skal anvendes lamelplader til forrensningen eller et andet alternativ.



Figur 44. Modificeret græsarmeringsnet til brug i filterdel

8.1.2 Konstruktioner

I dette projekt er skitseret en mulig anlægsopbygning til et fuldskala anlæg med placering i Ørestad. Anlægget kan opbygges efter principper der fremgår af nedenstående skitse.

Det på skitsen illustrerede anlæg er med en forrensning med lamleplader, der ses til højre på skitsen med et oppumpningskammer til spuling i midten og to modtagekamre til spulevand i siderne.

Efter forrensningen er der et mellemkammer, der dels sikrer en konstant vandfyldt forrensningsdel dels muliggør et skifte mellem indløb til de to linier i filterdelen. Mellem de to linier i filterdelen er skitseret en rørkanal, der giver tilbageløb til den anden linie således at begge linier gennemløbes inden vandet ledes til recipient.



Figur 45. Planskitse af muligt fremtidigt fuldskala anlæg i Ørestad – indløb fra højre mod venstre

Af plan og snit-skitser ses overløbskant i mellembygværket, der sikrer en konstant vandfyldt forrensningsdel. Desuden ses, at der er udlagt for et tørt bygværk sammenbygget med udløbsbygværket til moniteringsudstyr og demonstrationsbrug.



Figur 46. Længdesnit af muligt fremtidigt fuldskala anlæg i Ørestad

Et fuldskala Dobbeltporøst Filtreringsanlæg vil bestå af følgende konstruktioner/anlægsdele:

- Indløbsbygværk i beton, der sikrer et jævnt flow ind i forrensningsdelen og med mulighed for at afspærre indløbet til en eller flere linier i forrensningen.
- Forrensning, der består af lamelplader til fjernelse af suspenderet materiale inden indløb til filterdelen. Forrensningen er omsluttet af bygværker på 4 sider og er etableret på et afretningslag af grovbeton. Lamelpladerne etableres med tværfald af hensyn til spuling.
- Mellembygværk, der leder vandet fra forrensningen til filterdelen med mulighed for at afspærre en eller flere linier i filterdelen. I mellembygværket etableres en overløbskant, således at forrensningen vil være vandfyldt i normalsituationen, hvilket reducerer risikoen for at det sedimenterede materiale pakkes i aflejringer, der er svære at fjerne ved spuling.
- Spulebygværker til renspuling af lamelplader i forrensningen. Spulebygværkerne apteres med spjæld, der muliggør sektionsvis spuling af lamelpladerne. Spulekonstruktionen består af et modtagekammer og et oppumpningskammer. Spuling foregår ved at der pumpes vand fra modtagekammeret til oppumpningskammeret i et tidsrum idet spulingen foregår ved recirkulering af renset vand med stadigt højere indhold af opslemmede materialer. Når der er løsnet tilstrækkelig meget sedimenteret materiale ledes slammet til kloak eller bortkøres ved slamsuger. Der er et modtagekammer for hver linie mens to linier kan dele oppumpningskammer, jf. Figur 47 for uddybning.

- Filterdel, der består af en eller flere linier. Ved etablering af flere linier er der mulighed for at skifte indløb mellem de enkelte linier således at anlægget belastes så jævnt som muligt, hvilket øger levetiden. Ved flere linier er der samtidigt mulighed for ekstraordinært kun at have en linie i drift. Der er mulighed for, at etablere fald fra indløb til udløb således at der ikke opstår luftlommer i filterdelen med deraf følgende nedsat hydraulisk kapacitet. Filterdelen etableres med mulighed for aftømning mellem regnhændelser.
- Udløbsbygværk, hvorfra det rensede vand ledes ved gravitation eller pumpes til den ønskede recipient. I udløbsbygværket vil der være mulighed for etablering af prøveudtagning.
- Nødoverløb bør etableres ved indløbet til anlægget samt eventuelt efter forrensning og filterdel. Nødoverløbene sikrer mod oversvømmelse i tilfælde af svigt på udløbspumper, fejlagtig lukning af spjæld, tilstopninger el.lign. Nødoverløb kan føres til recipient eller spildevandssystem.

Af nedenstående skitse er vist strømningsretningen i forrensningen under spuling. Hver linie planlægges opdelt i flere sektioner. Spulingen foregår successivt sektionsvis idet der kan åbnes for en sektion ved spjæld eller skodder i henholdsvis oppumpningsbygværk og modtagebygværker.



f.todtagel.ammer

Modtagekammer

Figur 47. Tværsnit af forrensningen med princip for spulefunktion

8.2 Udførelse

Med udviklingen af en modulmæssig opbygning af filter og forrensning er det tilstræbt at gøre etableringen af anlæggene simplere ved at der anvendes kendte anlægsteknikker i opbygningen. Samtidigt giver den modulmæssige opbygning en større fleksibilitet i forhold til design af anlæggets form og dimensioner.

Etableringen af filteret kan foregå ved at udlægge modulerne på et afretningslag med samme teknik som når der etableres græsarmering på brandveje, parkeringspladser eller lignende. Dette er en velafprøvet teknik, der er anvendelige både på større og mindre arealer.

Der etableres et lag modul-plader oven på afretningslaget, der består af grovbeton og/eller afretningsgrus. Filtermaterialet udlægges fra grusudlægger med bånd og fordeles med asfaltrager eller en stiv kost. Filtermaterialet udlægges til niveau med overside af lameller idet der dog kan accepteres en vis underhøjde. Tolerancer på udlægningen svarer til tolerancerne indenfor brolægning. Herefter etableres næste lag lamelplader og proceduren gentages indtil det nødvendige antal lag er etableret.

Det foreslås, at udenomskonstruktionerne i det første anlæg etableres som in situ støbte betonkonstruktioner og mulighed for besigtigelse af blandt andet forrensning. Når driften af anlægget er bedre dokumenteret kan flere af udenomskonstruktionerne eventuelt etableres som rør eller kanaler i plast med ringere mulighed for inspektion og rensning.

Filterdelen foreslås beviklet med geotekstil og der tilfyldes med den opgravede råjord langs siderne for at hindre en langsgående bypass-strømning, der kan opstå ved traditionelt friktionsfyld.

Anlægget etableres med et jorddække på ca. 600 mm idet der tilfyldes med opgravet råjord og efterfølgende muldretablering eller retablering af anden eksisterende befæstelse.

Såfremt forrensningen etableres som lamelplader vil denne være omkranset af bygværker langs alle 4 sider og der vil alene være behov for geotekstil over pladerne.

8.3 Levetid

Der er i projektet foretaget analyser af det sedimenterede materiale i pilotanlægget, jf. afsnit 4.

Herved er rumvægten beregnet til omkring 600 kg/m³, hvilket er i samme størrelsesorden som det er observeret for regnvandsbassiner (690 kg/m³), jf. Basisrapport.

Belastningen på anlægget kan i gennemsnit antages at være 90-125 mg/l baseret på analyser udtaget i forbindelse med Basisrapport og Tillæg til Basisrapport for DPF-pilotanlægge, jf. Basis-rapport. Udløbet er gennemsnitligt på ca. 10 mg/l.

På baggrund af undersøgelsen af fordelingen af sediment i anlægget, jf. afsnit 4, kan der anslås en tilbageholdelse på ca. 35 % af SS på de første 6 m, der tænkes anvendt til forrensning efter princippet i Dobbeltporøs Filtrering. Undersøgelser på forsøgsopstillingen i Ørestad, jf. afsnit 8, indikerer en fjernelse på 16-21 % på de første 2 m, der kan ekstrapoleres til 6 m efter fordelingskurven på sedimentet i pilotanlægget til omkring 35% fjernelse af SS ved samme flow som pilotanlægget er udlagt for.

Den årlige afstrømning kan anslås på baggrund af en årsnedbør på 580 mm svarende til 450 mm med fradrag fra initialtab mv. Herved opnås 150.000 m³ svarende til ca. 15-18 t pr. år eller 25-30 m³. Fraregnet de 40 %, der antages fjernet i forrensningen fås en mængde til sedimentation på ca. 15-18 m³/år.

Med et porevolumen i kalklaget på 50 % og en højde af fangstlaget på 12 mm beregnes under forudsætning af samme forhold som i Ørestad et volumen disponibelt til slamophobning på 420 m³ og dermed en levetid på 20-30 år.

De mest usikre parametre i denne opgørelse er fjernelsen af stof i forrensningen og udnyttelsen af det frie volumen i kalken.

8.4 Ørestad

I Ørestad er det planlagt at etablere et eller flere fuldskala-anlæg til rensning af regnvand fra veje, hvor der til hvert anlæg er tilsluttet 34-37 ha. red., der afvandes via pumpestationer til separat regnvand. Der er mulighed for overløb fra regnvandssystemerne til Ørestads kanaler. Pumpestationerne er forsynet med sandfang og olieudskiller (lamelseparator).

Da området er relativt fladt og der hydraulisk set er dimensioneret efter de nyeste retningslinier indenfor serviceniveau samt fremskrevet regnintensitet er der et betydeligt magasineringsvolumen i ledningsnettet. Pumpestyring og magasinvolumen bevirker, at der vil være en vis forsinkelse og udjævning på tilløbet til renseanlæggene til regnvandet. Det rensede regnvand fra vejene indgår i vandbalancen til opretholdelse af vandstand og tilfredsstillende vandkvalitet i Ørestads kanaler.

I Ørestad City ønskes der etableret et fuldskala anlæg til den østlige del af Bypark Ørestad City, som skitseret i Figur 48.

Anlægget i Ørestad City forudsættes at modtage vejvand fra følgende 3 pumpestationer, som tilsammen dækker et opland på omkring 34 red. ha; Centerboulevard, C.F. Møllers Allé og Digevej. Det maksimale tilløb forudsættes at udgøre 4 l/red. ha ~ i alt ca. 135 l/s.



Figur 48. Dimensionerende tilløbsflow til Renseanlæg Midt

Afløbet fra anlægget kan pumpes til den eksisterende ø 315 mm på forsyningssystemet for Ørestads Kanaler i Ørestads Boulevard, hvorfra vandet kan fordeles til Ørestads kanaler. Fra pumpesumpen etableres nødoverløb til hovedkanalen via en kontraklap. Alternativt kan udledning foregå ved gravitation til de nærmeste kanaler; Hovedkanal City og Bydelskanal Ørestad City.

Opstrøms for indløbet til anlægget etableres nødoverløb til nærmeste større vejvandsledning i oplandet til pumpestation C. F. Møllers Allé. Nødoverløbene er ikke vist på ovenstående Figur.

8.4.1 Økonomisk overslag

I det følgende er angivet overslagspriser for etableringen af et fuldskala anlæg til Dobbeltporøs Filtrering i Ørestad City som skitseret ovenfor.

Som grundlag for beregninger er anvendt den dimensionsgivende vandføring fra de tre pumpestationer og det fra pilotanlægget forudsatte flow på 2,5 l/s for linien med 6 mm flowlag. Da der i pilotanlægget er 6 lag med en effektiv bredde på 3,9 m fås et flow pr. m. på 0,1 l/s.

Nedenstående anlægsudgifter er inklusive ca. 4 mio. DKK til etablering og omlægning af ekstra trykledningsanlæg. Disse udgifter gælder specifikt for anlægget i Ørestad og vil i mange andre tilfælde være betydeligt mindre.

Ledningsomlægningerne i Ørestad vil skulle foretages uanset, hvilken rensemetode der vælges. Udgifter til projektering og uforudseelige udgifter dækker ikke disse ekstra ledningsanlæg og ombygninger.

Projektering, tilsyn, opfølgning samt uforudseelige udgifter, vinterforanstaltninger, arbejdsplads mv. er baseret på erfaringstal fra etablering af ledningsanlæg, pumpestationer og øvrig infrastruktur i Ørestad.

Anlægsdele	Overslag i DKK
Ledningsarbejder	
Trykledninger fra pumpestationer – ombygninger mv.	4.000.000
Overløb, trykledninger fra anlæg og øvrige forbindelser	750.000
Betonarbeider	
Indløb	700.000
Spulebyayærker	800.000
Mellembygyærk	800.000
Afløbsbygværk	1.200.000
Jordarbejder	
Opgravning	350.000
Tilfyldning og indbygning	350.000
Deponering	50.000
Filter og forrensning	
Lamelplader inklusive etablering	11.000.000
Kalk inklusive indbygning	1.000.000
Maskininstallationer	
Pumper, spæld my.	2.600.000
El & sro	
El- og signal	1.200.000
Arbejdsplads, uforudseelige udgifter, vinterforanstaltninger	5.000.000
Projektoring	2 000 000
	5.000.000
Total	32.800.000

Figur 49. Overslag i DKK ekskl. moms, prisniveau 2010 ekskl. eventuelle ombygninger i pumpestationer

Den egentlige anlægsudgift for et fuldskala til 34 ha. red. bliver således overslagsmæssigt 28.8 mio. DKK, svarende til ca. 0,8-0,9 mio. DKK pr. ha. red.

8.4.2 Drift og bortskaffelse

Det forventes, at anlægget i Ørestad skal tilses løbende på niveau med regnvandspumpestationer i øvrigt, dog kan der eventuelt være ekstra miljøtilsyn i forbindelse med eventuel monitering i indkøringsperioden set i lyset af at anlægget formentlig vil fungere som demonstrationsanlæg.

I forbindelse med spulingen af forrensningen, der forventes at foregå hvert halve år skal der påregnes et spulehold i 2-3 dage inklusive spulevogn/slamsuger. Det foreslås, at der alterneres mellem indløb til linie 1 og linie 2 i filterdelen i forbindelse med spulingen af forrensningen.

Såfremt det fjernede materiale skal køres bort med slamsuger skal tillægges afgift for dette. I Ørestad forventes det at det opslemmede slam kan ledes til spildevandssystemet.

De totale driftsudgifter over anlæggets levetid skal tillægges et bidrag for bortskaffelse af filtermateriale og sedimenteret materiale.

Anlæggets levetid er anslået til 20-30 år. Det forventes, at der skal deponeres ca. 1.000 m³ kalk og sediment ved anlæggets udfasning.

De samlede anslåede udgifter til drift og bortskaffelse er vist i Figur 50

Aktivitet	Årlig udgift i DKK
Almindelig drift	35.000-75.000
Miljøtilsyn, demonstration	25.000-50.000
Spuling	50.000-100.000
Bortgravning og deponering	50.000-100.000
Total	160.000-325.000

Figur 50. Overslag i DKK ekskl. moms, prisniveau 2010

De årlige totale driftsudgifter inklusive deponering ved afslutningen af filterets levetid pr. tilsluttet ha. red. udgør således 5.000-10.000 kr.

9. LITTERATURSTUDIE AF METODER TIL FORSEDIMENTE-RING

I nærværende kapitel 7 er resumeret resultatet af en gennemgang af eksisterende velafprøvede metoder til fjernelse af suspenderet stof fra regnvand med en variation af suspenderet stof og partikelfordeling, som tidligere er registreret i tilløbet til DPF-pilotanlægget i Ørestad.

Metodegennemgangen er baseret på følgende tilløbsdata til et fuldskalaanlæg:

Maksimalt flow:	135 l/s
Partikelfordeling:	10 % fraktil: 1,0 mm 50 % fraktil: 3,6 mm 90 % fraktil: 16 mm
Suspenderet stof:	50 – 200 mg SS/l

De mest simple metoder er nævnt først, og de mest avancerede til sidst. For hver metode er fordele og ulemper vurderet.

9.1 Sedimentationsbassin

I et sedimentationsbassin vil de suspenderede partikler i regnvandet sedimenteres ved simpel gravitation og derefter fjernes manuelt med en passende hyppighed.

Sedimentationshastigheden vil afhænge af partiklernes størrelse, regnvandets opholdstid i bassinet samt turbulensforholdene i bassinet – vind mv.

Metoden er nok den mest simple og historisk mest benyttede metode til reduktion af suspenderet stof fra regnvand før udledning til recipient.

Sedimentationsbassiner for regnvand er i dag oftest indrettet med et droslet afløb og med mulighed for at opstuve og forsinke udledningen til recipienten. Sådanne bassiner kaldes i LAR-sammenhæng for "Våde bassiner".

I det aktuelle tilfælde vurderes der at være følgende fordele og ulemper ved at benytte et sedimentationsbassin til reduktion af suspenderet stof i tilløbet til et DPF-anlæg:

Fordele:

- Metoden er lavteknologisk.
- Metoden har lave driftsudgifter.
- Metoden kan give rekreative fordele.
- Metoden har en vis renseeffekt over for tungmetal og fosfor associeret til suspenderet stof.

Ulemper:

- Metoden kræver meget store arealbehov specielt på grund af de relativt små partikelstørrelser i tilløbet. Eksempelsvis har forsøg med sedimentation af lerpartikler i regnvand krævet over 48 timer uden tilløb og turbulens for at sedimentere, hvilket i det aktuelle tilfælde ville svare til en 1 m dyb sø på over 2 ha ved et tilløb på 135 l/s.
- Metoden med en åben sø er sårbar over for algevækst.
- Metoden har vist, at et åbent sedimentationsbassin ofte selv vil kræve en form for efterfiltrering af afløbet - f.eks. i et sandfilter - for at kunne overholde udledningskrav til recipient.
- Metoden erstatter kun delvis DPF's renseeffekt overfor reduktion af suspenderet tungmetal, fosfor og PAH.

9.2 Lamelseparator

I en lamelseparator er indsat skråtstillede lameller i en sedimentationstank, hvilket forkorter partiklernes sedimentationsvej, idet partiklerne rammer den underliggende lamel og derefter glider ned i en bundtragt i separatoren.

Sådanne lamelseparatorer findes på markedet til regnvand og markedsføres som olieudskillere til separate regnvandssystemer før udløb til recipient, men fungerer samtidig delvis som partikelud-skillere.

Den mest anvendte lamelseparatorer af denne type er udviklet til Unicon og markedsføres i dag af IBF.

Ifølge tidligere af Unicon udførte forsøg kan opnås en renseeffekt på op til 70 % af suspenderet stof i regnvand – ved et passende lavt maksimalt tilløbsflow.

Fordele:

• Metoden har relativt lave driftsudgifter og lamelseparatoren er nem at tømme med slamsuger.

Ulemper:

- Normalt dimensioneres disse lamelseparatorer kun for olieudskillelse ved et begrænset flow, og den faktiske partikeludskillelse er således begrænset ved de normalt forekommende regnvandsflow.
- Erfaringer med rensning af regnvand har således også vist, at de installerede lamelseparatorer til oliefjernelse generelt har en meget ringe renseeffekt over for de finere partikler i regnvandet. Denne konklusion er i overensstemmelse med CFD-simuleringerne (afsnit 9.2.1)
- Det må forventes, at det vil kræve ret store lameludskillere at tilbageholde de fine partikler i tilløbet til DPF-anlægget. Hertil skal bemærkes, at der i dag allerede er etableret lameludskillere til oliefjernelse i pumpestationen, som føder DPF-forsøgsanlægget – uden at der er registreret en større reduktion af suspenderet stof i afløbet fra pumpestationen.

9.3 Gravitations-sandfilter

I forbindelse med våde regnbassiner er i nogle tilfælde etableret et simpelt sandfilter før afløbet for at tilbageholde suspenderet stof.

Fordele:

• Metoden er lavteknologisk.

Ulemper:

- Metoden har i nogle tilfælde vist, at sådanne simple sandfiltre ret ofte stopper til.
- Den hydrauliske kapacitet er lille, og metoden kræver derfor et stort areal.

9.4 Kombineret lamelseparator og filter

HydroSystem Aps markedsfører en kombineret rensemetode for regnvand før udledning til recipient. Metoden er udviklet af Bonnerup Consult Aps, og er bl.a. installeret på Sluseholmen i København.

Metoden består af en tank med en kombination af følgende rensetrin:

- Sedimentationsvolumen til bundfældning af de groveste partikler i regnvandet.
- Lameludskiller til udskillelse af de finere partikler.
- Korrugerede filterelementer til udskillelse af de fineste partikler.

Efter endt regnhændelse tømmes hele procestanken automatisk til spildevandssystemet, idet tanken samtidig spules med renset regnvand.

Metoden reducerer regnvandets indhold af suspenderet stof med ca. 70 – 80 % til omkring 20 – 30 mg SS/I.

Fordele:

• Metoden er en automatiseret maskinel metode med begrænset vedligeholdelse.

Ulemper:

• Metoden medfører, at den fjernede forurening fra regnvandet automatisk pumpes til spildevandssystemet efter hvert regnskyl sammen med en væsentlig mængde skyllevand.

9.5 Tromlefilter

Hydrotech Aps markedsfører et selvrensende tromlefilter med spalteåbninger ned til 10 µm.

Fordele:

• Metoden er en automatiseret maskinel metode med begrænset vedligeholdelse.

Ulemper:

- Metoden vurderes ikke at kunne reducere partikler under 10 μm.
- Metoden medfører, at der med det frafiltrerede slam afledes en del skyllevand

9.6 Båndfilter

AL-2 markedsfører et båndfilter med et endeløs bånd med spaltevidder på ned til 10 µm.

Fordele:

• Metoden er en automatiseret maskinel metode med begrænset vedligeholdelse.

Ulemper:

- Metoden vurderes ikke at kunne reducere partikler under 10 µm uden tilsætning af polymer.
- Metoden medfører, at der med det frafiltrerede slam afledes en del skyllevand

9.7 Tryksandfilter

Eurowater (tidligere Silhorko) markedsfører et præfabrikeret automatisk sandfilteranlæg med dobbelt tryksandfilter og skyllevandstank til kontinuert sandfiltrering af vandværksvand eller processpildevand.

Normalt benyttes en sandfraktion, som sikrer en frafiltrering af partikler over 10 μ m, men anlægget kan leveres med en finere sandfraktion med frafiltrering af partikler over 1 μ m ved en reduceret ydelse.

Fordele:

• Metoden er en automatiseret, metode med begrænset vedligeholdelse.

Ulemper:

- Metoden har et indendørs, relativt stort pladskrav.
- Metoden har relativt store anlægsudgifter samt udgifter til el.
- Metoden medfører, at der med det frafiltrerede slam afledes en del skyllevand.
- Metoden vurderes ikke at være en "grøn" rensemetode.

9.8 Cross flow filtration

Til industriel filtrering af partikler ned til 1 μ m markedsføres filtreringsanlæg, som fungerer efter cross-flow princippet, hvor procesvandet under højt tryk pumpes rundt i et system af permable keramisk rør, indtil det er afvandet til en slurry, som afledes som slam. Det filtrerede vand forlader anlægget som renset procesvand.

Fordele:

• Metoden er en automatiseret, selvrensende metode med begrænset vedligeholdelse.

Ulemper:

- Metoden har et indendørs pladskrav.
- Metoden har væsentlige anlægsudgifter samt udgifter til el.
- Metoden medfører, at der med det frafiltrerede slam afledes en del skyllevand.

• Metoden vurderes ikke at være en "grøn" rensemetode.

10. DESIGN OG TEST AF DPF-LAMELPLADER

Design, fremstilling og test af prototype af et DPF-enhedselement, der kan fremstilles industrielt, og sikre enkel og velfungerende opbygning af fuldskala DPF-anlæg, udgør som nævnt i indledningen dette projekts hovedformål. Designet af et sådan DPF-enhedselement tager udgangspunkt i erfaringer fra DPF-pilotanlægget, og verificeres med computer-støttede 3D-flow- og sedimenationsberegningeri forskellige designs. Udover at DPF-enhendselementet skal kunne fremstilles industrielt skal det være lette at håndtere og installere, kunne tåle spulning, og være velegnet til opbygning af såvel forfilter uden kalk som efterfølgende hovedfilter med kalk.

10.1 Formål

Formålet er

- 1) at udarbejdes udkast til design af DPF-enhedselement
- 2) at identificere potentielle producenter og indlede samarbejde omkring design
- 3) at teste prototyper af et DPF-enhedselement.

10.2 Funktionskrav

I forbindelse med design af lamelpladerne er der en række dimensioneringshensyn og funktionalitetskrav, der skal opfyldes. Designet af lamelpladerne er foregået under hensyntagen til blandt andet følgende:

- Optagelse af jord- og trafiklast
- Hydraulisk kapacitet svarende til det ønskede flow i den ønskede højde af flowlag
- Minimering af ressourceforbrug af økonomi- og miljøhensyn
- Enkel og holdbar samling af plader til optimering af etableringsomkostninger
- Enkel indbygning af kalk til optimering af etableringsomkostninger
- Bestandighed af materialer uden afgivelse af miljøfremmede stoffer
- Mulighed for tværgående bundstrømning i forrensning af hensyn til muligheden for spuling
- Optimering af sedimenteringsegenskaber ved anvendelse i forrensning

10.3 Materialer og metoder

I råskitserne til design af et DPF-enhedselement er der sigtet efter en så enkel opbygning som mulig, hvor de afgørende funktioner i den dobbeltporøse filtreringsteknik fastholdes og optimeres, dvs. en åben spalte til konvektiv strømning i det højporøse lag, sikring af stillestående vand eller næsten stillestående vand i det lavporøse lag, samt adskillelse af de enkelte dobbeltporøse enheder i filter-stakken ved hjælp af en tæt eller næsten tæt bund i de lavporøse lag. Der er udarbejdet foldede papirmodeller, tegninger og computermodeller. Disse præsenteres ikke yderligere.

Identifikation af samarbejdspartnere omkring design og fremstilling af DPF-enhedselement har strukket sig over en længere periode, og involveret dialog med såvel Teknologisk Institut, hvor især Torben Knudsen har ydet værdifuld sparring, som danske industrielle designere og danske importører. Resultatet er blevet et samarbejde med to tyske firmaer, faciliteret af den danske virksomhed Byggros (www.byggros.com). Da der endnu ikke er indgået bindende aftale om produktion med nogen af de to firmaer bringes deres navne ikke.

Der er fra begge tyske firmaer modtaget prototyper af DPF-enhedselementer, der herefter benævnes DPF-lamelplader. Leverancen fra det ene firma er dog ankommet så sent at det ikke har været muligt at udføre test.

I samarbejde med Eltel Networks er der lavet en forsøgsopstilling til test af prototyper (Figur 51). Denne er placeret i Vandlaugets bygning i Ørestad.

Der er fra det ene tyske firma modtaget 5 prototyper af en DPF-lamelplade, med dimensionerne L: 1 m, B: 0,6 m og H: 0,016 m. Fire af disse plader er benyttet til test, idet de er stablet i 2 lag, svarende til et 2 m langt dobbeltporøst filter bestående af to dobbeltporøse enheder, og en samlet højde på 0,032 m. Dette er indbygget i en vandtæt kassette med et forkammer og et udløbskammer. Forkammeret kan forsynes med vejvand ved hjælp af en dykpumpe placeret i sandfanget i pumpestationen ved Vandlaugets bygning. Strømningshastigheden kan aflæses på en flowmåler placeret ved indløbet til forsøgsopstillingen. Fra forkammeret strømmer vandet vandret 2 m over lamelpladerne fra indløb til udløb. Lamelpladerne har tværgående 1 cm høje ribber for hver 7 cm, og de højporøse strømningslag (spalte) over ribberne er 6 mm høje. Fra udløbet udledes vandet til regnvandskloakken. Der kan udtages prøver af det øverste lag af strømmende vand tre steder: fra forkammeret (indløbsvand), efter 1 m, og i udløbskammeret (udløbsvand). Prøverne udsuges med en engangssprøjte via lodrette studse, monteret i opstillingens låg.



Figur 51. Forsøgsopstilling hos Vandlauget fotograferet fra udløbssiden. Den nærmeste, øverste lamelplade er blottet, mens den øverste plade nærmest indløbet er skjult under opstillingens låg.

Der foretages 2 afprøvninger af lamelpladerne i forsøgsopstillingen. Den første afprøvning foretages i tørvejr d. 25. marts 2010 med ensartet opslemmet sediment i sandfanget, hvor lamelpladernes renseevne vurderes ved måling af indhold af suspenderet stof (SS) i ind- og udløbsprøver ved 3 forskellige strømningshastigheder. Til opslemning af sediment anvendes en dykpumpe uden slange på bunden af sandfanget som laver en kraftig omrøring. I den anden afprøvning undersøges renseevnen ved varierende koncentrationer af suspenderet stof, idet der pumpes direkte under en nedbørshændelse, d. 11. maj. Ind- og udløbsprøvernes SS-indhold måles igen ved 3 forskellige strømningshastigheder. Indholdet af suspenderet stof bestemmes indirekte ved turbiditet i et spektofotometer af mærket DR-Lange ion 500, og direkte ved sædvanlig tørstofanalyse som beskrevet i Basisrapporten. Derudover bestemmes partikelstørrelsesfordelingen ved hjælp af laserdiffraktion.

I første afprøvning udtages kun prøver af ind- og udløbsvand. I anden afprøvning medtages prøver fra 1 m afstanden.

10.4 Resultater og diskussion

10.4.1 Turbiditet og strømning

Ved hjælp af in situ turbiditetmålinger kan indholdet af suspenderet stof estimeres. Der er tidligere fundet en høj korrelation mellem målinger af turbiditet og suspenderet stof i Ørestad (Tillæg til Basisrapport). For opslemmet sediment ses i Figur 52, at turbiditeten næsten har været konstant i hele måleperioden på ca. 80 minutter. Efter ændring af strømning (lodrette streger på Figuren), indikerer målingerne at det varer 10 -20 minutter før filtret har stabiliseret renseevne på et ny niveau. Ved højere strømningshastighed ses sedimenttilbageholdesen at falde. I afprøvningen med vejvand ses en betydelig mindre forskel på indløb og udløb i forhold til sediment, hvilket vurderes at hænge sammen med de relativt mindre partikler i denne test. Under målingerne på vejvandet ses næsten en halvering i turbiditet i løbet af måleperioden på 130 minutter, på såvel ind- som udløbsvand.



Figur 52. Turbiditet, opslemmet sediment



Figur 53. Turbiditet, vejvand

10.4.2 Partikelstørrelsesfordelinger

De to afprøvninger med henholdsvis opslemmet sediment (tørvejr, 25. marts) og vejvand (regnvejr, 11. maj) er som udgangspunkt forskellige, da det opslemmede sediment, der benyttes i den første test indeholder fraseparerede partikler fra mange nedbør, mens vejvandet der benyttes ved den anden test kun indeholder partikler fra dagens nedbør, hvoraf nogen kan nå at sedimentere inden vandet når frem til dykpumpen. Partikelstørrelsesfordelingen forventes derfor at være forskudt mod større partikler d. 25. marts sammenlignet med den senere test på friskt vejvand.

Som det fremgår af Figur 55 er fordelingen af det suspenderede stofs partikelstørrelser meget ensartet for de første tre prøver, og har, som det fremgår af Figur 54, en gennemsnitlig partikelstørrelse på 9,6 µm og de 10 % største partikler over 67 µm. Partiklerne i udløbsprøven kl 9:15 har en gennemsnitlig størrelse på 5,9 µm og en d(0,9), svarende til et fald i gennemsnitlig partikelstørrelse på 40 %. Den største ændring er sket fraktionen af store partikler (d(0,9)).

I afprøvningen med vejvand den 11. maj er partiklerne væsentligt mindre (Figur 55). Partiklerne i indløbet har haft nogenlunde samme størrelsesfordeling i den målte periode, med en gennemsnitlig størrelse er på 4,7 μm og de 10 % største partikler over 19,7 μm. I udløbet er den gennemsnitlige partikelstørrelse 3,8 μm, svarende til 20 % mindre end i indløb. Der ses også her betydelig reduktion i store partikler, da d(0,9)i udløb er på 12,8 μm.

	Prøve	N	d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)
25. marts 2010	Indløbsvand	3	1.7	9.6	67.3
(tørvejr, opslemmet se- diment)	Udløbsvand	1	1.3	5.9	27.2
11. maj 2010	Indløbsvand	3	1.2	4.7	19.7
(vejvand)	Udløbsvand	3	1.1	3.8	12.8

Figur 54. Oversigt over partikelsstørrelsesfordeling ved de to test af DPF-lamelplader i henholdsvis tørvejr (25. marts) og under regn (11. maj). Prøver er udtaget i indløb og udløb. Hvor prøven er baseret på et gennemsnit af flere prøver er antal gentagelser (n) anført. Partikeldiameter (μ m) anført for 10 % fraktilen d(0,1), 50 % fraktilen d(0,5) og 90 % fraktilen d(0,9).





10.4.3 Fjernelse af suspenderet stof

Der er foretaget stikprøve analyser på i alt 4 sæt prøver bestående af indløb og udløb. Det første sæt er udtaget d. 25. marts, og består af én indløbsprøve og én udløbsprøve. De tre øvrige sæt er udtaget d. 11. maj, ved de tre tidspunkter angivet i graferne for partikelstørrelsesfordeling. Samtidig er der målt turbiditet. I Figur 56 sammenstilles resultaterne. Der ses markant højere fjernelsesprocenter baseret på den direkte måling af suspenderet stof, sammenlignet med sediment. Dette antyder at sammenhængen mellem turbiditet og suspenderet stof ikke er lineær ved de observerede koncentrationer. Fjernelsesprocenten baseret på suspenderet stof ligger på 16 – 21 procent for stikprøverne af vejvand, over det to meter lange filter.

	Turbiditet			Suspenderet stof		
	Ind	Ud	Fjernet	Ind	Ud	Fjernet
Prøve	FAU	FAU	%	mg/L	mg/L	%
Sediment P12	95.1	72.2	24	53.9	37.5	70
Vejvand P26	426	394	8	205.7	172.2	16
Vejvand P32	400	344	14	177.3	140.7	21
Vejvand P38	257	252	2	114.4	94.2	18

Figur 56. Fjernelsesprocenter beregnet ud fra turbiditet og suspenderet stof

11. 3D-FLOWBEREGNINGER AF SEDIMENTERING I DPF-LAMELPLADER

Dette afsnit beskriver en række simuleringer udført for at vurdere effektiviteten lamelplader som forrensning efter princippet i Dobbeltporøs Filtrering. Lamelpladernes effektivitet er undersøgt ved at modellere bevægelse og bundfældning af forskellige partikelstørrelser. Der er udført en række parameterstudier for at optimere lamelpladernes geometri og for at undersøge dets effektivitet ved højere volumenstrømme.

For at sammenligne med traditionel filtreringsteknik er der desuden udført nogle simuleringer på en lamelseparator. Denne er simuleret med en hastighed mellem lamellerne, der svarer til den i DPF-filteret.

Alle simuleringerne er foretaget som Computation Fluid Dynamics (CFD) beregninger. CFD beregninger anvendes til analyse af 3D flow i mange sammenhænge som fx ventilation, brandudvikling, vindsimulering samt komplekse flow- og sedimentationsforhold i vand.

11.1 Geometri og opsætning

11.1.1 Partikler

Forrensning modtager regnvand fra veje, og indholdet af partikler og deres størrelsesfordeling i vandet er fastsat ud fra analyser af regnvandet som er foretaget i dette projekt og under tidligere forsøg med anlægget i Ørestad.

For at begrænse beregningstiden og lette fortolkningen af simuleringsresultaterne er partiklerne delt ind i 5 forskellige størrelser baseret på deres karakteristiske diameter. Størrelserne af partiklerne i partikelgrupperne og deres massefraktion i regnvandet er vist i Figur 57.

	P1	P5	P10	P50	P100
Diameter [µm]	1	5	10	50	100
Massefraktion [10 ⁻⁵ kg SS/kg indløbsvand]	6,0	12,0	13,6	6,0	2,4
Koncentration [mg SS/I]	60	120	136	60	24

Figur 57. Forudsatte størrelser og massefraktioner i regnvandet

Der er anvendt en samlet massefraktion på 400 mg SS/l, hvilket svarer ca. til den højeste målte koncentration i en samlet hændelse (flowproportional middel).

Lamelpladernes effektivitet kan vurderes ved at sammenligne hvor mange partikler, der er i det vand der kommer ind i forrensningen, med det vand, der kommer ud. Desuden kan det analyseres, hvor i anlægget de enkelte fraktioner forventes at sedimentere.

11.1.2 Forrensning – lamelplader

Lamelpladerne er som udgangspunkt for beregningerne simuleret med en afstand på 60 mm mellem de tværgående lameller. Højden af lamellerne, h, er 15 mm, som udgangspunkt. Den totale højde af laget H er 23 mm. Under optimeringen af filteret er h og l blevet systematisk varieret.



Figur 58. Illustration af filtergeometrien.

For at vurdere hvordan lokale strømningsforhold i tanken før filteret kan påvirke fordelingen af vandet i de forskellige lag er en model, der medtager en del af indløbsbygværket simuleret. Modellen er vist på Figur 59. Det ekstra bygværk i højre side er modelteknisk for at få simuleringen til at konvergere bedre. I indløbsbygværker er der en prelplade, ligeledes vist på Figuren, der sikrer et jævnt flow til de enkelte lag og hindrer "kortslutningsstrømme".



Figur 59. Illustration af geometri og randbetingelser for filter med fortank.

Til de nærmere studier af flowet over lamellerne er 1 m af et enkelt lag analyseret. Modellen af dette ses på Figur 60. Modellerne er inddelt i delvist strukturerede beregningsnet med forfininger af områder, hvor store hastighedsgradienter forventes, som f. eks. ved alle faste overflader. På Figur 61 er vist et eksempel på et beregningsnet.



Figur 60. Illustration af geometri og randbetingelser for filter.


Figur 61. Illustration af beregningsnettet.

11.1.3 Forrensning lamelseparator

Lamelseparatoren, der er modelleret i denne undersøgelse, er en "Johnson LS Plate separator". Da separatoren er symmetrisk er kun halvdelen af den modelleret. På Figur 62 er modellen vist med angivelse af placeringen af forskellige interesse områder. I toppen af lamelseparatoren er der nogle udløbsbakker. Disse er ikke medtaget, da det vurderes, at de ikke har indflydelse på flowet i interesseområdet ved lamellerne.



Figur 62. Illustration af lamelseparatoren med randbetingelser.

Lamellerne er modelleret som overflader uden tykkelse, da det ellers ikke er muligt at opløse lamellerne i beregningsnettet. Lamellerne har en vinkel på 55 ° i forhold til vandret, som det ses på Figur 63. Afstanden mellem lamellerne er 50 mm. En model med en afstand på 2.5 cm er ligeledes simuleret for at vurdere indflydelsen af afstanden. Volumenstrømmen i lamelseparatoren er baseret på hastigheden mellem lamellerne, der af hensyn til sammenligningen er normeret i forhold til hastigheden mellem lamelpladerne i dobbelt porøs filtrering.



Figur 63. Illustration af lamelseparatoren fra 2 sider.

11.2 Resultater

11.2.1 Strømning i forrensning og indløbsbygværk

For at undersøge hvorvidt flowet fordeler sig jævnt i de seks lag i forrensningen, er en model af forrensning med indløbsbygværk simuleret.

Simuleringen viser, som det ses på Figur 64, at flowet bliver relativt jævnt fordelt over de seks lag af filteret. Simulering med partikler har desuden vist at en del af de tunge partikler, P50 og P100, bundfælles allerede i indløbsbygværket, før de når til forrensningen, hvilket er i overensstemmelse med de observerede forhold i pilotanlægget.



Figur 64. Strømning i tank og filteråbning.

11.2.2 Variation i volumenstrøm

Som udgangspunkt er volumenstrømmen sat svarende til belastningen på pilotanlægget, 2,5 l/s, og for at undersøge filterets ydeevne ved forøget volumenstrøm, er 3 øvrige volumenstrømme testet. 5, 12,5 og 25 l/s.

Det svarer til hastigheder på henholdsvis 0,0134, 0,0267, 0,0668 og 0,134 m/s over obstruktionerne. På Figur 65 er massefraktionen på udløbet i procent af fraktionen i indløbet for hver af de 5 partikelstørrelser plottet som funktion af volumenstrømmen.



Figur 65. Massefraktion af de forskellige partikelstørrelser på udløbet, som funktion af volumenstrømmen.

Resultaterne af simuleringerne viser, som ventet, at filterets effektivitet falder, når volumenstrømmen stiger.

Ved den laveste volumenstrøm bliver alle de tunge partikler (P50 og P100) sedimenteret, mens der slipper en del igennem ved de højere volumenstrømme.

Ligeledes sedimenteres færre af de små partikler ved stigende volumenstrøm. Beregningerne er kun for 1 m af forrensningen, og viser derfor ikke, hvad der totalt set bliver sedimenteret.

Med den fulde længde på forrensningen vil alle de store partikler og en større del af de små sedimenteres.

Til beregning af hele filterets effektivitet, kan regnes med en nogenlunde konstant bundfældning, som procent af den tilstedeværende mængde af de enkelte partikelstørrelser.

11.3 Optimering af geometri på lamelplader

For at optimere geometrien af lamelplader er foretaget systematiske variationer af goemetri

11.3.1 Variation af flowlag og fangstlag med konstant lagtykkelse - lamelhøjder

For at undersøge effekten af størrelsen af højden af de enkelte lag er højden af de tværgående lameller, h, varieret systematisk fra 9 til 21 mm. Højden af lamellen svarer til tykkelse af fangstlag. I denne undersøgelse er den samlede lagtykkelse holdt konstant og flowlaget er således tilsvarende varieret fra 2 til 14 mm. Det medfører en variation i hastigheden i dette lag fra 0,0089 til 0,0267 m/s. Igen undersøges lamelpladernes effektivitet på massefraktionen på udløbet, der er plottet på Figur 66.



Figur 66. Massefraktion på udløbet, som funktion af h.

Resultatet af parameterstudiet viser, at effektiviteten er stort set uafhængig af højden på obstruktionen/lamellen. Den øgede hastighed, der river flere partikler med, modvirkes af de øgede blokeringseffekt fra obstruktionerne, jf. Figur 68.

Det er dog langt fra sikkert, at den samme konklusion kan drages for andre volumenstrømme end den her undersøgte.

Lavere mellemrum over lamellerne (svarende til det højporøse lag, strømningslaget) giver større risiko for tilstopning og større hydraulisk tab over filteret, hvilket vurderes vigtigere end den mindre optimering, der måtte ligge i at indsnævre spalten over lamellerne.







Figur 68. Vektorplot af hastigheder omkring obstruktion for to forskellige værdier af h.

11.3.2 Variation af afstanden mellem lamellerne

Afstanden mellem lamellerne, L, er varieret beregningsmæssigt for at undersøge effekten af denne på forrensningens effektivitet. Som det ses af Figur 69, har afstanden stort set ingen indflydelse på effektiviteten af filteret. Alle de store partikler bliver sorteret fra og en fast mængde af de små bliver sorteret fra. Undersøgelsen er kun foretaget ved standard volumenstrømmen på 2,5 l/s. Ved højere volumenstrømme vil et andet mønster muligvis vise sig.



Figur 69. Massefraktion på udløbet ved varierende afstand mellem lameller

På Figur 70 og Figur 71 er massefraktionerne af henholdsvis P10 og P50 vidst ned igennem filteret. Massefraktionerne ændre sig ikke meget, men der er dog en indikation af en ændring af strømningsmønsteret ved den største afstand. Denne indikation underbygges af vektorplottet i Figur 72. Ved en afstand mellem obstruktionerne på 120 mm slår flowet ned foran lamellen/obstruktionen og giver et noget anderledes bilede. Ved højere hastigheder kan denne forskel måske give en ændring i mængden af bundfældede partikler.







Figur 71. Massefraktion af P50 igennem filteret med forskellige afstande mellem obstruktionerne.



Figur 72. Hastighedsfelt ved obstruktion for 2 forskellige afstande mellem obstruktionerne.

11.3.3 Variation af fangstlag med konstant højde af flowlag – højde af tværgående lameller

Der er yderligere foretaget en analyse af højden af fangstlaget med konstant højde af flowlaget. Der varieres altså på højden af de tværgående lameller mens højden af de langsgående lameller holdes konstant.

Af Figur 73 ses, at der tilsyneladende er et optimum for de fineste partikler ved en lamelhøjde på 11-13 mm ved det aktuelle flow.



Figur 73. Massefraktion på udløbet ved varierende højde af fangstlag, tværgående lameller

Anbefalinger om lamelpladegeometri

De foretagne CFD-beregninger angiver en optimal lamelhøjde for de tværgående lameller ved det aktuelle flow på omkring 11-13 mm. Der er ikke på baggrund af beregningerne foretaget en optimering af afstanden mellem lamellerne eller højden af de langsgående lameller. Disse dikteres i høj grad af de konstruktionsmæssige og hydrauliske forhold i øvrigt. Afstanden mellem lamellerne og højden af flowlaget vælges til 70 mm henholdsvis 6 mm.

11.4 Sammenligning med lamelseparator

De foretagne beregninger viser en god tilbageholdelse af suspenderet materiale i forrensningen baseret på principperne i Dobbeltporøs Filtrering. Beregningerne er naturligvis behæftet med nogle usikkerheder særligt hvad angår bundfældningshastighederne af det suspenderede materiale.

For beregningsmæssigt, at kunne sammenligne metoden er der foretaget tilsvarende beregninger på bundfældningen i en standard lamelseparator. Flowet i lamelseparatoren justeres ned i forhold til det normalt anvendte for at sammenligne med den volumenstrøm pr. arealenhed, der anvendes i Dobbeltporøs Filtrering.

Ved sammenligning af resultaterne for de to bundfældningsmetoder er usikkerhederne på bundfældningshastighederne af mindre betydning idet der alene ses på den relative renseeffektivitet over for suspenderet materiale.

Til resultatbehandling er de to snitplaner vist på Figur 74 anvendt.



Figur 74.: Illustration af snitplaner til resultatbehandling.

På Figur 75 til Figur 79 er massefraktionerne i de to planer vist for de varierende partikelstørrelser. De små partikelstørrelser P1 og P5 er jævnt fordelt op igennem separatoren idet der ikke sker sedimentation af disse. For P10 ses en lidt mere varieret fordeling og en lille bundfældning i bunden af separatoren.

De store partikler P50 og P100 bundfældes som forventet mere effektivt, men P50 fraktionen er suspenderet i den nederste del af lamellerne og opnår meget høje partikelkoncentrationer (10 gange koncentrationen på indløbet) i dette område med risiko for medrivning til udløbet ved en mindre flowforøgelse.

Nogle få af P50 partiklerne bliver desuden trukket med helt op til udløbet allerede ved dette flow.

Lamelseparatoren bundfælder altså tilsyneladende stort set alle de store partikler, 50-100 μ m, fra, men næsten ingen af de små 1-10 μ m.

Sammenlignet med DPF-forrensningen er lamelseparatoren således ringere med hensyn til renseeffektivitet. Der er ikke vurderet på tilbageholdelsen af materiale over tid, hvor aflejringer dannes i de to metoder. Ligesom det ikke er taget i regning at lamelseparatoren driftsmæssigt er enklere.

Der er desuden foretaget beregninger med halvering af afstanden mellem lameller men der kan ikke eftervises nogen betydende effekt.



Figur 75. P1 massefraktion.







