



Miljøministeriet  
Naturstyrelsen

# Partikeludskiller til regnafstrømning

- udvikling af udskiller samt testmetode

# Kolofon

**Titel:**

Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

**Emneord:**

Partikeludskiller, regnafstrømning, regnvand, olieudskiller, vejvandspartikler.

**Projektmidler:**

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

**Udgiver:**

Naturstyrelsen

**Udførende:**

Rørcentret, Teknologisk Institut

**Sprog:**

Dansk

**År:**

2011

Må citeres med kildeangivelse.

**ISBN nr. elektronisk version:**

978-87-7279-237-8

**Udgiverkategori:**

Statslig

**Resume:**

Projektet videreudvikler og optimerer en olieudskiller udviklet af firmaet Watercare til samtidig udskillelse af partikler i regnafstrømning. Desuden forbedres dokumentationsmetoderne for partikeludskillere til regnafstrømning. Resultaterne viser, at udskilleren udskilleren kan fjerne ca. ¼ af partiklerne i vejvandet ved 2l/s og ca. 1/10 ved 14l/s. Ved de maksimale vandstrømme for olieudskillelse er effekten overfor vejvandspartikler derfor begrænset. Endvidere vises, at brug af slibekorn som testpartikler på sigt sandsynligvis kan bruges til inddeling af partikeludskillere i miljøklasser, hvor der til hver klasse hører en bestemt størrelse slibekorn.

**Forbehold:**

Naturstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøministeriet. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Naturstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Naturstyrelsen finder, at indholdet er interessant for en bredere kreds.

# Indhold

<b>Forord</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Sammenfatning og konklusioner</b> .....	<b>6</b>
1.1 Baggrund og formål.....	6
1.2 Konklusioner.....	6
1.3 Det videre forløb.....	7
<b>Summary and conclusions</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Indledning</b> .....	<b>9</b>
2.1 Formål .....	11
<b>3.1 Materialer og metoder</b> .....	<b>12</b>
3.1 Udvikling af partikeludskiller .....	12
3.2 Udvikling af metode til test af partikeludskiller til regnafstrømning .....	12
3.3 Måleteknikker .....	13
<b>4.1 Udvælgelse og karakterisering af testpartikler</b> .....	<b>15</b>
4.1 Kommercielt tilgængelige testpartikler .....	15
4.2 Testpartiklers størrelse og faldhastighed .....	15
<b>5.1 Indledende forsøg med partikeludskiller</b> .....	<b>18</b>
5.1 Partikler til forsøg .....	18
5.2 Beskrivelse af anvendt partikeludskiller .....	18
5.3 Resultater fra indledende forsøg .....	19
<b>6.1 Hovedforsøg med 1900 I partikeludskiller</b> .....	<b>20</b>
6.1 Udvikling af partikeludskiller til 15 l/s.....	20
6.2 Metode ved test af ombygget udskiller.....	21
6.3 Resultater fra hovedforsøg.....	23
<b>7.1 Skillestrømning bestemt med slibekorn</b> .....	<b>26</b>
7.1 Måling af koncentration af slibekorn med spektrofotometer .....	26
7.2 Bestemmelse af skillestrømning .....	26
<b>8.1 Diskussion af resultater og perspektivering</b> .....	<b>28</b>
8.1 Sammenligning af hovedforsøg med partikelstørrelser i vejvand .....	28
8.2 Diskussion af målemetoder .....	29
8.3 Perspektivering.....	29
<b>9.1 Referencer</b> .....	<b>31</b>
<b>10.1 Bilag 1</b> .....	<b>33</b>

## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

## 1.1 Forord

Der er i disse år stigende opmærksomhed på regnafstrømningens betydelige forureningsindhold, samt på mulighederne for at forbedre kvaliteten ved at indbygge renseelementer i byens afvandingssystemer, før vandet udledes til recipient eller anvendes til forsyningsformål. Nærværende projekt fokuserer på mulighederne for at optimere den partikeludskillelse, der utilsigtet foregår i olieudskillere. Eftersom olieudskillere er lovpligtige i regnafledningssystemer for benzinstationer, større parkeringsarealer, erhvervsmæssige vaskepladser for biler og maskiner mv. og derfor findes vidt udbredte, kan en optimering i forhold til partikeludskillelse være en stor gevinst.

Projektet er bevilget af By og Landskabsstyrelsen i december 2009 under Miljøeffektiv Teknologi – programmet.

Formålet med projektet er at videreudvikle og optimere en olieudskiller udviklet af firmaet Watercare til samtidig udskillelse af partikler i regnafstrømning. Desuden er formålet at forbedre dokumentationsmetoderne for partikeludskillere til regnafstrømning.

Projektet har fokuseret på

- At dokumentere rensegrad for forurenende partikler i en nyudviklet partikeludskiller, idet Skov & Landskabs erfaringer fra det Dobbeltporøse Filteranlæg i Ørestad kombineres med Rørcentrets erfaringer med afprøvning af olieudskillere
- At foreslå videreudvikling af partikeludskilleren, samt skabe grundlag for på sigt at udarbejde forskrift for dokumentation af partikeludskillere til vejvandsrensning.

Projektet er gennemført via brainstorming-møder, litteraturstudier, laboratorietest på optimeret udskiller og forskellige typer kommercielt tilgængelige partikeltyper.

Rapporten er udarbejdet af Rørcentret, Teknologisk Institut i samarbejde med Skov & Landskab, KU-LIFE.

Projektgruppe:

Henrik Rønnest	WaterCare
Per Bjerager	Skov & Landskab, KU-LIFE
Marina Bergen Jensen	Skov & Landskab, KU-LIFE
Stig Clausen	Rørcentret, Teknologisk Institut
Ulrik Hindsberger	Rørcentret, Teknologisk Institut

Følgegruppe:

Følgegruppen har bestået af projektgruppen suppleret med en repræsentant fra Naturstyrelsen.

Tak til Morten Pejrup og Thorbjørn Joest Andersen KU, Department of Geography and Geology for velvilligt udlån af LISST laserdiffraktionsinstrument samt for værdifuld rådgivning.

# 1 Sammenfatning og konklusioner

## 1.1 Baggrund og formål

Regnafstrømning fra trafikerede arealer er ikke rent. Dette er der stigende opmærksomhed omkring, både i forbindelse med udledning af regnafstrømning til bynære vandløb eller nedslivning til grundvandet, og ved anvendelse af regnafstrømning til rekreative formål. Parallelt hermed ses en øget interesse for teknologier, eksisterende såvel som nye, der kan bidrage til forbedring af regnafstrømningens kvalitet.

I dag er det almindelig praksis at benytte sandfang og olieudskiller til rensning af regnafstrømning fra parkeringsarealer, vaskepladser, benzinstationer, større veje mv. Problemet er, at sandfangenes effektivitet generelt er svagt dokumenteret, og tvivlsom over for de mindste partikler i regnafstrømningen. Undersøgelser af vejvand i Ørestad i København i forbindelse med test af renseteknologien Dobbeltporøs Filtrering dokumenterer, at vejvands partikelbelastning efter passage af ordinært sandfang stadig er betydelig, i størrelsesordenen 100 – 125 mg suspenderet stof pr. liter, samt at 90% af partiklerne ligger i størrelsesfraktionen 0,3-30 µm i diameter, med en massefylde på 2250 kg/m<sup>3</sup> (Jensen M. B., 2009).

I forbindelsen med implementering af EU's Vandrammedirektiv, som forventes at skabe et behov for forbedret rensning af regnvand, særligt hvor vejvand udledes til følsom recipient, vil det være en fordel med god dokumentation af olieudskilleres partikelfjernelseeffekt.

Firmaet Watercare producerer olieudskillere i forskellige størrelser til placering i afløbssystemer. Ved tilsyn af deres nye olieudskiller, der er forsynet med aluminiumslameller, installeret på et vejvandssystem blev det erfaret, at en del partikulært materiale blev tilbageholdt i udskilleren. Naturligt nok stillede virksomheden sig selv det spørgsmål, om denne mekanisme ikke kunne effektiviseres og markedsføres.

På Teknologisk Institut blev olieudskilleren testet i foråret 2009 (Teknologisk Institut, 2010, Rørcentret). På baggrund heraf var det oplagt at undersøge, hvordan aluminiumsfiltreren kan opbygges, så det både kan fjerne olieforbindelser og mindre partikler. Ved at optimere såvel partikel- som olieudskillelsen kan værdien af komponenten øges.

### 1.1.1 Formål

Formålet med projektet har været at videreudvikle, optimere og dokumentere en ny type partikeludskiller, som udover at rense vejvandet for olieforbindelser kan fjerne en stor del af vejvandets partikelindhold, og som simpelt kan installeres i eksisterende afløbssystemer.

Desuden har formålet været at afprøve forskellige typer partikler med veldefineret densitet og diameter til standardiseret dokumentation af partikeludskilleres effektivitet over for partikler i regnafstrømning.

## 1.2 Konklusioner

Der er i projektet bygget en lille udskiller til indledende forsøg på ca. 550 l og en kapacitet på 4 l/s. Erfaringerne herfra er anvendt til udvikling af en større partikeludskiller på 1900 l med en optimeret afstand mellem lameller i aluminiumsindsatsen, og en flowkapacitet på ca. 15 l/s. Til test af udskillerne anvendes kvartspartikler af fabrikatet Millisil, der også bruges i Tyskland til test af partikeludskillere.

Som testpartikler i de indledende forsøg anvendtes Millisil W6, der har en middeldiameter d(0,5) på 40 µm. Her opnåedes de største fjernelser ved en afstand mel-

## Partikeludskillere til regnafstrømning – udvikling af udskillere samt testmetode

lem aluminiumslameller på 5 mm, hvor 80% af partikelindholdet i indløbsvandet blev tilbageholdt ved en vandstrøm på 4 l/s gennem udskilleren. Uden aluminiumslameller i udskilleren fjernedes 64% af partiklerne ved en vandstrøm på 4 l/s.

Hovedforsøgene med 1900 l udskilleren blev udført med Millisil W8, der med en  $d(0,5)$  på ca. 30  $\mu\text{m}$  er mindre og sværere at udskille end W6. Rensegraden i partikeludskilleren faldt fra 87 til 66%, ved en stigning i vandstrømmen fra 2 til 14 l/s. Analyser af partikelstørrelsesfordeling i indløb i forhold til rensegrader indikerer, at partikeludskilleren udskilte 90% af Millisilpartikler med diameter større end 13  $\mu\text{m}$  ved en strømning på 2 l/s, mens en tilsvarende rensegrad ved 14 l/s kun var mulig for partikler med diameter større end 34  $\mu\text{m}$ . Ved sammenligning af disse partikelstørrelser med observerede partikelstørrelser i vejvand i Ørestad ser det ud til, at udskilleren kan fjerne ca. 1/4 af partiklerne i vejvandet ved 2 l/s og ca. 1/10 af partiklerne ved 14 l/s. Ved de maksimale vandstrømme for olieudskillelse er effekten overfor vejvandspartikler derfor begrænset.

Som alternativ til brug af Millisil som testpartikler er der i projektet udviklet en mere præcis testmetode, hvor slibekorn, der består af carbid, bruges til at bestemme den strømning gennem en partikeludskillere, hvor halvdelen af slibekornene udskilles. Slibekorn har en smal normalfordelt partikelstørrelsesfordeling, der gør dem særligt velegnede som testpartikler. Slibekorn har betydeligt større massefylde end vejvandspartikler, hvilket dog er uden betydning ved sammenligning af udskillere. Metoden er indtil videre kun afprøvet i en forsøgsopstilling med plastmoduler til udskillelse af partikler ved Dobbeltporøs Filtrering. På sigt kan metoden sandsynligvis bruges til inddeling af partikeludskillere i miljøklasser, hvor der til hver klasse hører en bestemt størrelse slibekorn.

### 1.3 Det videre forløb

Det næste naturlige skridt er at indlede et samarbejde med branchen om udvikling af en formaliseret test til partikeludskillere, og at afprøve denne på flere forskellige udskillere og med forskellige udformninger af en udvalgt udskillere. Til støtte for produktudvikling på området er det ambitionen at videreudvikle simple tests, der kan anvendes i produktionshaller, samt matematiske modeller til simulering af sedimentation i partikeludskillere.

## Summary and conclusions

The purpose of this project was to develop, optimize and demonstrate a new type of particle separator, removing a large part of particles in storm water road run-off and can be installed as a simple component into existing drainage systems. Moreover, the objective was to test different types of particles with well defined density and diameter for standardized documentation of particle separators for treatment of storm water.

In the project a small flexible separator for initial experiments was build. Experience was used in the development of a larger particle separator of 1900 liters with fin spacing of 5 mm between lamellae and a capacity of approx. 15 l/s. As test particles Millisil was used, because they are also used for this purpose in Germany.

In the initial experiments Millisil W6 were used, which have an average diameter  $d(0,5)$  of 40 microns. The best results were obtained with 5 mm between lamellae, where the cleaning rate was 80% of particles in the influent, at water flow of 4 l/s separator. Without the filter the cleaning rate was 64% at 4 l/s.

Main experiments with the 1900 liters were performed with Millisil W8 as test particles. W8 has an average diameter on 30 microns and therefore smaller and harder to separate than W6. Cleaning rate in the separator decreased from 87 to 66% of particles in the inlet, at an increase in water flow from 2 to 14 l/s. Analyses of particle size distributions indicated a 90% separation of particles larger than 13 microns at a flow of 2 l/s. At 14 l/s the analysis indicates separation of about 90% of particles over 34 microns.

By comparison of these particle sizes with particle size distributions of road run-off in Ørestad it seems that the separator can remove approx.

1/4 of the particles in road run-off at 2 l/s and approx. 1/10 of the particles at 14 l/s. To obtain a clear road run-off approx. 90% of particles in road run-off over 3 microns must be removed, and it does not seem to be possible with this separator.

As an alternative to use of Millisil as test particles a more accurate test method was developed during the project, where abrasive grains are used to determine the flow through a particle separator, where half the Grains are separated.

Abrasive Grain has a narrow normal distribution of particles, making them particularly suitable as test particles. The method is so far only been tested in an experimental setup with plastic modules for the separation of particles by Dual Porosity Filtration (DPF). Eventually, the method may be used to assign particle separators in environmental classes, where each class is defined by "Half Grain Separation" of a specific size of abrasive grains.

The project team will seek funding for a larger project together with the industry, which is going to develop a formalized test of particle separators being tested in several different separators and with different versions of a selected separator. The ambition is to develop simple tests that can be used in production halls and mathematical models for simulation of sedimentation in particle separators.



## 2.1 Indledning

Regnafstrømning fra byområder er ikke rent. Det er der i disse år stigende opmærksomhed på, både som følge af Vandrammedirektivet, og takket være en generel interesse blandt borgere, bygherrer og myndigheder for at udnytte regnafstrømningen som alternativ ferskvandsressource. Parallelt hermed ses en spirende interesse for såvel dokumentation af kendte renseteknologiers egnethed, som udvikling af nye teknologier specielt tilpasset udfordringerne omkring regnafstrømning. I den udstrækning det er muligt at få regnafstrømningens forureningsindhold reduceret effektivt og til en økonomisk overkommelig pris, er vejen banet for at basere en større del af klimatilpasningen på afkobling og lokal afledning af regnvand. Det vil skabe basis for eksport af teknologier og koncepter til områder, hvor ferskvand er en ressource i absolut knaphed, og hvor etablering af lukkede vandkredsløb derfor er afgørende for byens udvikling.

Der er således brug for en række teknologier til forbedring af regnafstrømningens kvalitet. Regnafstrømning indeholder forurening på partikulær og opløst form, og en fuldstændig rensning kræver derfor en teknologi, eller en kombination af teknologier, der både kan fjerne partiklerne og fange de opløste stoffer. Partikeludskillelse kan derfor ses som et delelement i en renseproces.

Her er olieudskillere til regnvand interessante, fordi disse allerede skal installeres i forbindelse med servicestationer samt på større veje og parkeringspladser. Kravet om olieudskillere på regnvandssystemer står beskrevet i lærebøger for ingeniører og kloakmestre samt i DS 432 "Norm for afløbsinstallationer". Derfor er det oplagt at optimere olieudskillere, der let kan indpasses i de eksisterende regnvandssystemer til størst mulig samtidig partikelfjernelse. Spørgsmålet er dog, i hvilken grad det er muligt at udskille partikler i en vejvandsrelevant størrelse, eller om opholdstiden er for kort og/eller turbulensen for voldsom til at partiklerne kan nå at forlade vandstrømmen, og havne i et stillestående vandvolumen, før vandet igen har forladt udskilleren.

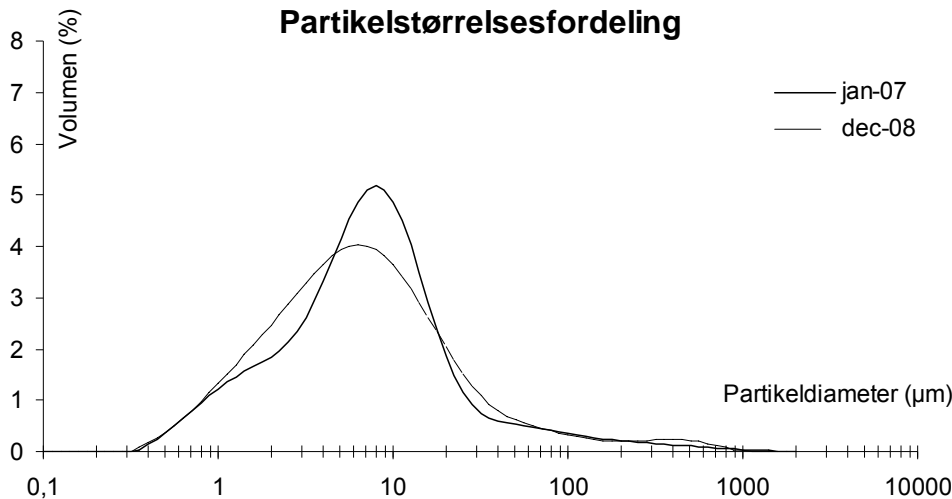
Partikler i regnafstrømning kan variere betydeligt i såvel størrelse som koncentration. I Ørestad er der udtaget en række prøver af vejvand (regnafstrømning fra veje) i forbindelse med test af renseteknologien Dobbeltporøs Filtrering. Prøverne er udtaget efter afstrømningen har passeret et sandfang og en olieudskiller. Der er analyseret for partikelkoncentration (suspenderet stof) i bulkprøver fra ca. 50 hændelser, mens et mindre antal prøver er analyseret for partikelstørrelsesfordeling (figur 1).

Disse analyser viser, at vejvands partikelbelastning efter passage af ordinært sandfang stadig er betydelig, i størrelsesordenen 100 – 125 mg suspenderet stof pr. liter, samt at 90% af partiklerne ligger i størrelsesfraktionen 0,2-30  $\mu\text{m}$  i diameter, og med en  $d(0,5)$ , dvs. 50% fraktal, på omkring 6 – 10  $\mu\text{m}$  (Jensen M. B., 2009).

Lignende intervaller er observeret i USA (TARP 2003; Rinker 2004). Det betyder, at teknologier til udskillelse af partikler fra regnafstrømning skal kunne fjerne partikler under 30  $\mu\text{m}$ . Hvis man ønsker en 90% fjernelse af partiklerne i vejvand i Ørestad, skal teknologien kunne udskille partikler ned til ca. 3  $\mu\text{m}$ . I en evt. test-sammenhæng betyder det, at testpartiklerne principielt bør dække intervallet 3 – 30  $\mu\text{m}$ .

Udskillelse af partikler ved sedimentation afhænger ikke kun af partiklens størrelse. Også vægten spiller en stor rolle, for jo tungere desto hurtigere synker partiklen ud af vandstrømmen. Fra forsøgene i Ørestad ved vi, at vejvandspartikler har en massefylde på omkring 2250  $\text{kg/m}^3$  (Jensen M. B., 2009). Såfremt testpartiklerne har

en anden massefylde end vejvandet, kan man korrigere for dette forhold ved brug af Stoke's lov.



**Figur 1**

To eksempler på partikelstørrelsesfordelingen i vejvand i Ørestad, hvor vandprøver efter passage af sandfang og olieudskiller er udtaget i indløb til DPF-pilotanlæg. Arealet under kurven er 100%. De tilhørende partikelkoncentrationer er for januar 2007 på 328 mg/l og for december 2008 på 88 mg/l. De to strikprøver har en middeldiameter  $d(0,5)$  på 6 - 8 µm, mens de mindste partikler har diameter på 0,2 – 0,3 µm, og de største på op til 1000 µm, svarende til sand. Akkumulering af de forskellige størrelsesklasser viser, at ca. 90% af partiklerne er mindre end 30 µm. Fra Jensen, M.B., 2009.

Sedimentationen, eller faldhastigheden af sfæriske partikler i stillestående eller laminært strømmende vand kan beskrives ved Stoke's lov (f.eks. Clement et al. 2009, Shearer et al., 2010):

$$V_s = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_p - \rho_f)}{18\eta}$$

- hvor  $V_s$  = faldhastigheden (m/s)
- $\rho_p$  = partklens massefylde ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_f$  = væskens massefylde ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\eta$  = væskens dynamiske viskositet ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ )
- $g$  = tyngdeaccelerationen ( $\text{m/s}^2$ )
- $d$  = partklens diameter (m)

Heraf ses bl.a. at faldhastigheden afhænger af kvadratet på partklens størrelse. Det betyder alt andet lige, at partikler med diameter på eksempelvis 5 µm kræver fire gange så lang sedimentationstid som 10 µm store partikler. Desuden ses, at faldhastigheden vokser med differencen mellem partklens massefylde og væskens massefylde. Udover størrelse og vægt spiller væskens viskositet en rolle. Jo koldere vandet er desto større er dets viskositet, og desto langsommere falder partiklen.

## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

For eksempel betyder et fald i temperaturen fra 30° C til 5° C en fordobling af viskositeten fra 0,0008 til 0,0016  $\frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$  (Anonymous, 1977) og dermed en dårligere partikeludskillelse.

Stoke's lov kan bruges til at estimere faldhastighed i en partikeludskiller med laminar (retlinet) strømning, som f.eks. Dobbeltporøs Filtrering. Man skal dog være opmærksom på, at partikler i vejvand snarere er pladeformede end sfæriske (DPF-hjemmeside, Tillæg 2 til Basisrapport). Ved kraftig strømning bliver strømningen turbulent (roterende, kaotisk, hvirvlende), og det reducerer partiklernes faldhastighed markant. Til vurdering af, hvorvidt strømningen i en given situation forventes at være laminar eller turbulent anvendes Reynolds tal, som ikke beskrives nærmere her.

En partikeludskiller baseret på sedimentation virker bedre desto længere opholdstid vandet får i udskilleren, desto kortere vej partiklen skal falde for at forlade det strømmende vand, og desto mindre turbulens der er i vandet. En udskiller kan derfor fjerne flere partikler hvis:

1. Udskilleren dimensioneres større i forhold til den vandmængde der passerer igennem (længere opholdstid)
2. Der indbygges et element, der forkorter partiklens faldlængde fra strømmende til stillestående vand (kortere faldlængde)
3. Udskilleren udformes, så vandet strømmer så laminart som muligt gennem volumnet
4. Stillestående vand over sedimenterede partikler forbliver stillestående også under kraftigt strømning

Udviklingen af en metode til dokumentation af partikeludskillerer til regnafstrømning er afgørende for de videre bestræbelser på at udvikle teknologier til rensning af regnafstrømning. Uden solid dokumentation er det umuligt at kvalificere en beslutning om en investering. Derudover formodes en færdigudviklet standardmetode i sig selv at have et markedspotentiale, for derved kan Danmark tilbyde prøvnings- og dokumentationstests af også udenlandske produkter.

### 2.1 Formål

Formålet med projektet er generelt at øge vores viden om partikeludskillerer til regnvand. De specifikke formål er:

1. At udvikle en partikeludskiller ved at ombygge en NS 15 olieudskiller på 1900 l fra firmaet Watercare
2. At udvikle metoder til test af partikeludskillerer til regnafstrømning

## 3.1 Materialer og metoder

### 3.1 Udvikling af partikeludskillere

En traditionel olieudskillere udnytter, at olie er lettere end vand, og derfor kan stige op i et dertil indrettet opsamlingsvolumen. Man kan forstærke denne proces ved at indsætte et filter, som kaldes et koalescencelement, og som kan opbygges af forskellige materialer. Når opsamlingsvolumenet er opbrugt, skal olieudskilleren tømmes. Hvis en olieudskillere også skal tilbageholde partikler, som typisk er tungere end vand, skal partiklerne ledes til bunden af olieudskilleren, hvor de tilbageholdes, indtil de fjernes ved tømning.

Projektgruppen har primært undersøgt to forskellige parametre ved optimering af en udskillere, som overholder kravene som klasse 1 olieudskillere (kan udskille til en udløbskoncentration af olie på maks. 5 mg/l) i den europæiske standard for olieudskillere EN 858-1. Disse to parametre er vandets strømningshastighed samt afstanden mellem lameller i en aluminiumsindsats hørende til et Watercare produkt.

I forforsøget blev vandstrømmen varieret mellem 2 og 4 l/s på en mindre udskillere, hvor det var let at komme til at udskifte koalescencelementet, som i denne udskillere blev opbygget af aluminiumslameller. Udskilleren havde et volumen på 550 l, og som testpartikler blev der anvendt kvartskorn af fabrikatet Millisil W. Der blev udført forsøg med aluminiumslameller med en lamelafstand på 5 mm og 10 mm samt forsøg helt uden aluminiumslameller. Alle aluminiumslameller havde en hældning på 45°.

I dette forsøg blev det primært undersøgt, hvilken effekt aluminiumslamellerne har i forhold til at undvære et lamelfilter. Desuden gav forsøget også en god indikation af, hvilken afstand mellem lamellerne, der er den mest optimale.

I hovedforsøget blev der taget udgangspunkt i en Watercare NS15 olieudskillere med et volumen på 1900 l, som allerede er godkendt som olieudskillere på det europæiske marked. I dette forsøg anvendtes Millisil W8, som har en højere andel af fine partikler end Millisil W6. Der blev kun benyttet aluminiumslameller med en indbyrdes afstand på 5 mm og en hældning på 45°, mens vandstrømmen blev varieret mellem 2 og 14 l/s.

### 3.2 Udvikling af metode til test af partikeludskillere til regnafstrømning

Første skridt var at undersøge markedet for partikler egnet til test af partikeludskillere til regnafstrømning. Som udvælgelseskriterier benyttedes partikelstørrelse, -densitet og pris. For udvalgte produkter blev der lavet en partikelstørrelsesfordeling ved hjælp af laserdiffraktion med en Malvern Mastersizer 2000 fra firmaet Particle Analytical. Metoden er i princippet den samme som beskrevet i afsnit 3.3. Desuden blev der observeret faldhastigheder ved at se på ændring i turbiditet ved henstand af en opslemning.

Der næst blev der afprøvet tre forskellige metoder til udvikling af Watercare partikeludskillere og test af partikeludskillere generelt. Alle metoder er baseret på sammenligning af partikelkoncentration i ind- og udløb til og fra partikeludskilleren, men adskiller sig ved målemetode og/eller type af testpartikler.

I forforsøget med Watercare partikeludskilleren på 550 l findes der kun resultater for måling af Millisil 6 ved inddampning og vejning.

I hovedforsøget med Watercare partikeludskilleren på 1900 l blev udskillelse af Millisil 8 målt ved inddampning og vejning, mens partikelstørrelsesfordeling blev bestemt med en laser af mærket LISST 100C.

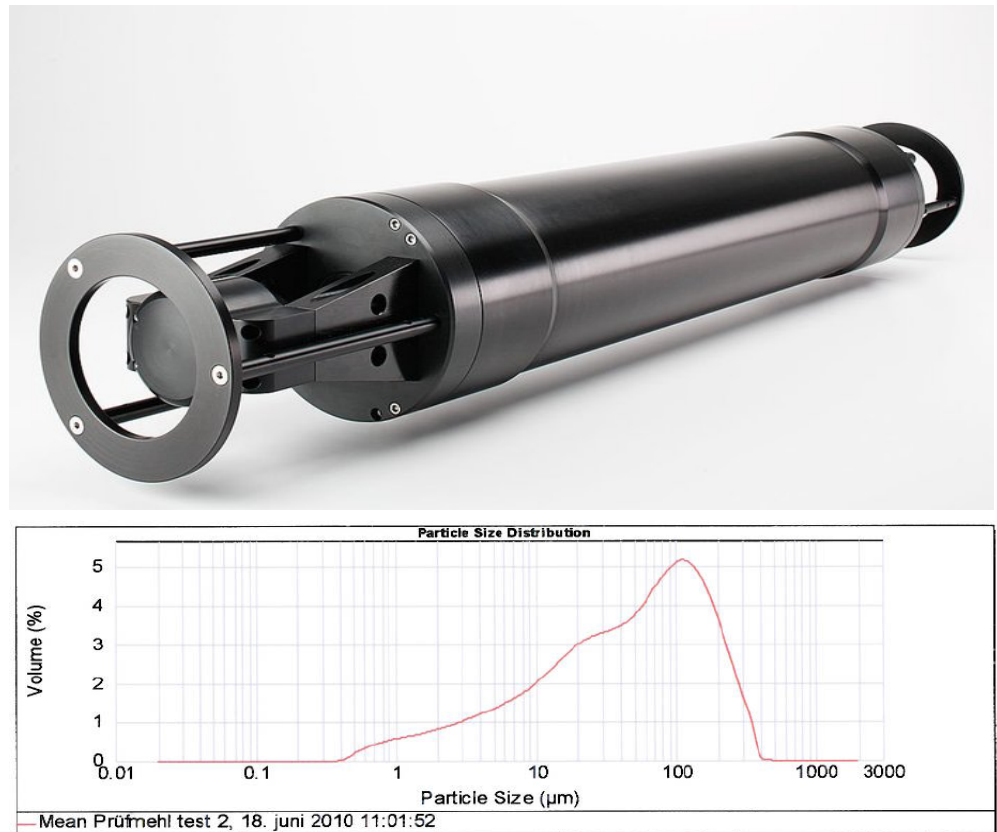
## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

Derudover blev der gennemført forsøg med slibekorn af siliciumcarbid (produktnavn: Dragon Fly), der har en smal partikelstørrelsesfordeling i forhold til Millisil. Disse forsøg fokuserede udelukkende på udvikling af en metode til standardtest af partikeludskiller. Ved at benytte standardpartikler med en smal størrelsesfordeling i en relevant størrelsesklasse er det ikke nødvendigt at analysere for partikelstørrelser, og dokumentationen kan derfor baseres på en simpel spektrofotometermåling.

### 3.3 Måleteknikker

Måling af partikelkoncentration ved inddampning foregår ved at vandprøven filtreres gennem et 0,45 µm filter, der efterfølgende tørres ved 60° C i 4 timer, afkøles til rumtemperatur i eksikator og vejes.

Partikelstørrelsesfordeling er i hovedforsøget målt med en laser af mærket LISST 100C (figur 2), der er udført af Institut for Geografi og Geologi på KU. Laserdiffraktion udnytter, at lys afbøjes af partikler, og jo mindre partiklen er, desto større er afbøjningen (spredningen af lyset). Ved at se på spredningsmønsteret kan man beregne størrelsesfordelingen i prøven (figur 3).



**Figur 2**

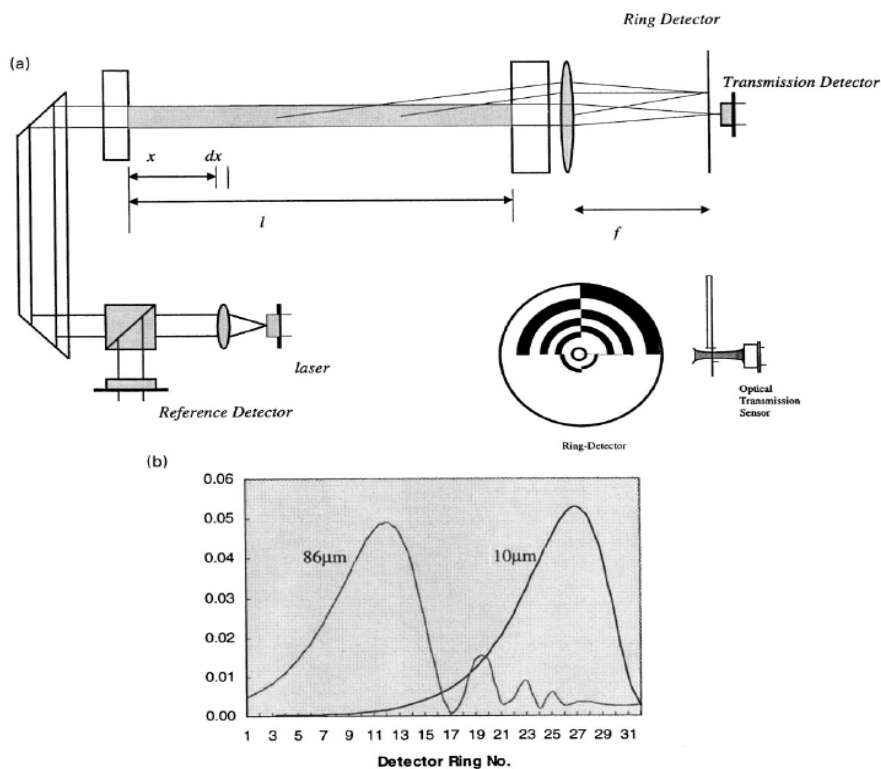
Laser af mærket LISST 100C til bestemmelse af partikelstørrelsesfordeling, samt eksempel på partikelstørrelsesfordeling optaget med laseren. Arealet under kurven svarer til 100% partikelvolumen

Der gøres to forudsætninger i udregningen af partikelstørrelsen (Rawle A., 2011), se også figur 3.

## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

1. Partiklerne antages at være kugleformede (diametrene udregnes ud fra volumen)
2. Partikelantallet antages at være så lavt, at det afbøjede lys fra partiklerne ikke rammer andre partikler, før det rammer detektorerne (skyggeeffekt)

I anden sammenhæng bør dels den maksimale koncentration uden skyggeeffekt bestemmes. Desuden bør faldhastigheder for testpartikler og partikler i vejvand sammenlignes direkte, så betydning af geometri mv. kan vurderes.



**Figur 3**

*Princippet ved laserdiffraktion: Der udsendes lys fra en laser mod en sky af partikler enten i væske eller luft. Lyset spredes af partikler i forskellige vinkler afhængig af partiklernes størrelse. Det spredte lys detekteres af fotodetektorer, der er placeret i forskellige vinkler. Ud fra det resulterende diffraktionsmønster udregnes til partikelstørrelsesfordelingen ved hjælp af Mie-teorien.*

Et mål for prøvens turbiditet kan opnås ved med et spektrofotometer at måle prøvens absorbans af lys med en bølglængde på 750 nm. I projektet er benyttet et feltspektrofotometer af mærket Dr. Lange Xion 500. Et spektrofotometer måler absorbansen ved bestemt bølglængde, og det er billigt, hurtigt og let at bruge.

## 4.1 Udvælgelse og karakterisering af testpartikler

### 4.1 Kommercielt tilgængelige testpartikler

Nedennævnte kommercielt tilgængelige partikler er undersøgt nærmere for at vurdere, om disse partikler er egnede til prøvning af partikeludskiller til regnafstrømning.

*Mikro-latex kugler* fra firmaet Microparticles består af poly methyl methacrylate (PMMA) og har en massefylde på  $1190 \text{ kg/m}^3$ . Disse blev hurtigt fravalgt på grund af prisen, der ligger på 70.000 kr/kg, og massefylden der er for lav sammenlignet med partikler i vejvand, jf. indledningen.

*Millisil* fra firmaet Quarzwerke består af kvartskorn (sand, Siliciumdioxid,  $\text{SiO}_2$ ) med en massefylde på  $2650 \text{ kg/m}^3$ . Millisil fås i 7 forskellige finheder, defineret ud fra middeldiameteren  $d(0,5)$ , der ligger fra 16 til 92  $\mu\text{m}$ . Hver type har dog en bred størrelsesfordeling, så selv i den fineste type er der en vis andel langt større partikler. Størrelsen af partikler, der tilbageholdes i en given udskiller, kan som beskrevet ovenfor, måles med en laser. Koncentrationen af partikler kan bestemmes ved indampning og vejning. Millisil koster 30 kr./kg og leveres i 25 kg sække. Millisil benyttes i Tyskland til test af partikeludskiller. Det blev besluttet at gå videre med Millisilpartikler.

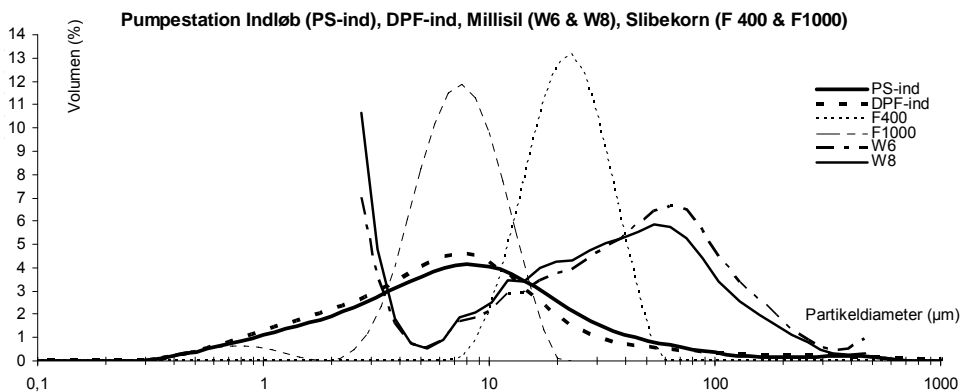
Fra firmaet Dragon Fly kan der købes et karborundpulver (Siliciumcarbid,  $\text{SiC}$ ), der har en massefylde på  $3210 \text{ kg/m}^3$ . Det benyttes normalt til fremstilling af sandpapir, og benævnes derfor slibekorn i det følgende. Dragon Fly slibekorn fås i veldefinerede og normalfordelte størrelsesfraktioner. Der findes således 10 standardprodukter under 100  $\mu\text{m}$ , med det fineste på 3  $\mu\text{m}$ . Det er derfor ikke nødvendigt at måle partikelstørrelsesfordelingen, men kun partikelkoncentrationen, hvilket kan gøres simpelt ved hjælp af et spektrofotometer, jf. beskrivelsen ovenfor. Slibekorn koster 120 – 220 kr./kg. Selv om massefylden er ca. 50% for stor i forhold til vejvandspartikler, blev det besluttet at gå videre med slibekorn fra Dragon Fly. Det skal bemærkes, at også firmaet Alsiano kan levere samme partikler som Dragon Fly, og derudover tilbyder en endnu finere størrelse slibekorn: F1500 med en  $d(0,5)$  på 1,8  $\mu\text{m}$  (Sigsgaard, 2011)

Til de videre forsøg blev der udvalgt to størrelser Millisil, nemlig W6 med  $d(0,5)$  på 40  $\mu\text{m}$  og W8 med  $d(0,5)$  på 30  $\mu\text{m}$ , samt to størrelser slibekorn, nemlig F400 med  $d(0,5)$  på 20,7  $\mu\text{m}$  og F1000 med  $d(0,5)$  på 6,7  $\mu\text{m}$ .

### 4.2 Testpartiklers størrelse og faldhastighed

Partikelstørrelsesfordelinger er på figur 4 vist for standardprodukterne F400, F1000, W6 og W8 samt vejvand i Ørestad. Alle analyser er gennemført ved laserdiffraktion (Malvern Mastersizer 2000, firmaet Particle Analytical). Det ses, at F1000 har en fordeling med et gennemsnit tæt på vejvand i Ørestad. W8 og W6 har skæve fordelinger med størst koncentration af store partikler og en lang hale af små partikler. Slibekornene F400 og F1000 har en smal fordeling med høj koncentration omkring gennemsnit.

## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

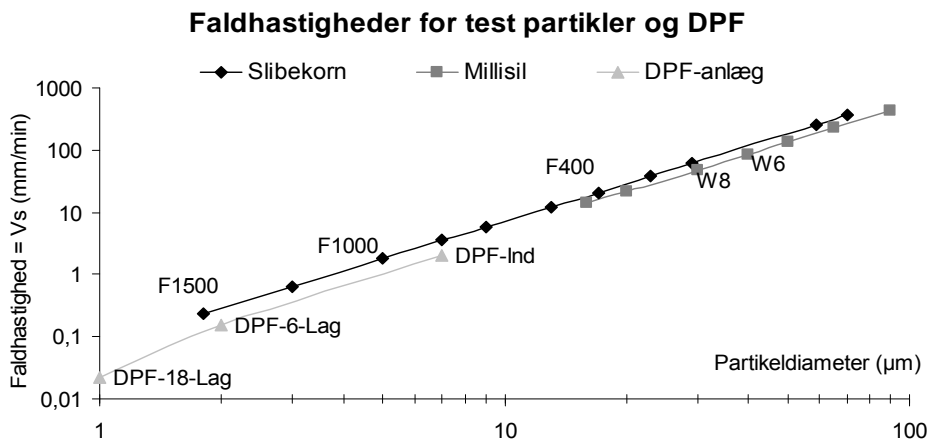


**Figur 4**

Partikelstørrelsesfordelinger for udvalgte standard produkter og vejvand i Ørestad, hvor PS-Ind er indløb til pumpestation med sandfang i hændelsen den 11/6 2009 og DPF-ind er gennemsnit for indløb til DPF-pilotanlæg for hændelserne den 12/1 2007 og 3/12 2008

På basis af gennemsnitlige partikelstørrelser er gennemsnitlige faldhastigheder for testpartikler og partikler i DPF-pilotanlægget beregnet med Stoke's lov. Resultatet er vist på figur 5. For DPF-pilotanlæg ses tre punkter, som viser indløb og skønnet partikelstørrelse i udløb fra pilotanlæggets to filtre 6-lag og 18-lag baseret på vandprøver udtaget i filtrene. Linjen for slibekorn ligger højere end linjen for Millisil, som igen ligger højere end DPF-anlæg. Det skyldes, at slibekorn har en højere massefylde ( $3210 \text{ kg/m}^3$ ) end Millisil ( $2605 \text{ kg/m}^3$ ), som igen har en højere massefylde end partikler i vejvand i Ørestad ( $2250 \text{ kg/m}^3$ ).

Set i forhold til at partikler i vejvand i Ørestad er kravet til, hvor fine partikler der skal fjernes i partikeludskilleren afgørende for valg af testpartikler til udskillere. Det ses af de fineste slibekorn F1500 har en passende diameter og faldhastighed i forhold til den skønnede diameter i udløb fra DPF-6-Lag.



**Figur 5**

Faldhastigheder for partikler på markedet, samt partikler i indløb til og udløb fra DPF-anlægget ved to hændelser, beregnet ved hjælp af Stoke's lov. For Millisil og slibekorn er producentoplysninger om middeldiameter  $d(0,5)$  og massefylde benyttet. DPF-ind er beregnet ud fra måleresultater i indløb til DPF, og DPF-6-Lag og DPF-18-Lag er beregnet ud fra skønnet diameter i udløbene fra de to filtre på grundlag af målinger i filtrene.



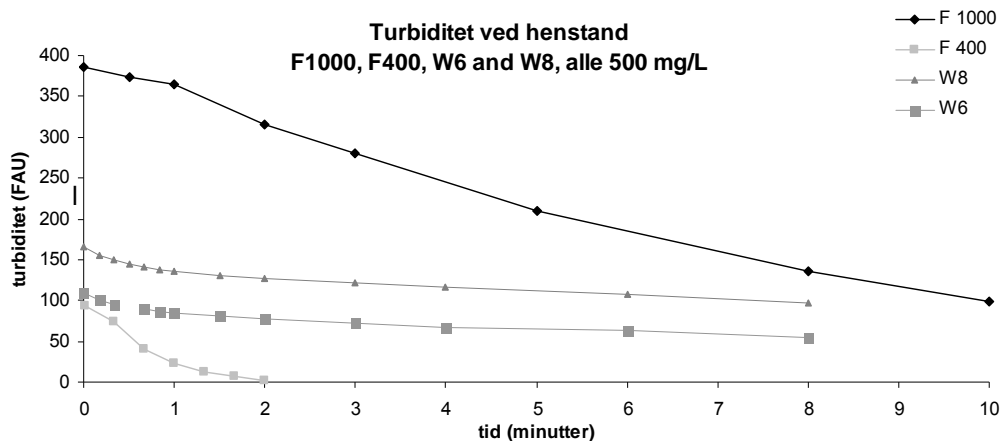
## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

Som supplement til de teoretiske beregninger af faldhastigheder er der gennemført forsøg med partikelopslemninger, hvor absorbansen er fulgt over tid ved henstand ved hjælp af et spektrofotometer. Der blev fremstillet fire opslemninger med testpartikler, alle til 500 mg/l: slibekorn F400 og F1000, samt Millisil W6 og W8. Efter omrøring blev en andel overført til en målekuvette, der hurtigt placeredes i et spektrofotometer, hvor absorbansen straks blev aflæst.

For hver opslemning blev der optaget absorbansmålinger over tid. På figur 6 ses resultatet. For F400 bliver absorbansen halveret på ca. ½ minut, svarende til at ca. halvdelen af partiklerne har forladt væskesøjlen og lagt sig i bunden af kuvetten, mens en tilsvarende halvering i koncentration for F1000-opslemningen varer ca. 5 minutter.

Disse halveringer er i god overensstemmelse med gennemsnitlige faldhastigheder for partiklerne beregnet med Stoke's lov (figur 5). Ved sammenligning af F400 og F1000 start-målingerne ses det for øvrigt at til trods for samme koncentration (500 mg/l), er absorbansen ca., 4 gange højere for F1000 end for F400, hvilket skyldes at de fine F1000 partikler har en langt større overflade. Det understreger vigtigheden af, at forskellige typer partikeludskiller sammenlignes med samme typer partikler og ved samme målemetode.

For Millisil ses, at W8-opslemningen ligger over W6, fordi W8 indeholder mindre partikler end W6. Kurverne er desuden næsten vandrette, fordi alle Millisil-produkter har et betydeligt indhold af meget små partikler med relativt store overflader (figur 4), som sedimenterer langsomt og dominerer ved måling af absorbans. Spektrofotometermetoden kan derfor ikke bruges til at bestemme en gennemsnitlig faldhastighed for Millisil.



**Figur 6**  
Spektrofotometermålinger af absorbans i forskellige opslemninger af testpartikler under henstand.

## 5.1 Indledende forsøg med partikeludskiller

### 5.1 Partikler til forsøg

I Tyskland benytter man normalt Millisil W6 og W8 til forsøg med udskillelse af partikler, hvor W8 har den laveste middeldiameter og dermed er sværest at udskille, jf. figur 4. Det blev besluttet at lave de første forsøg med udskilleren med Millisil, type W6, som er lettest at udskille. Koncentration af partikler i udløb blev bestemt ved inddampning, jf. kapitel 3. Partikelopslemningen i indløbsvandet blev fremstillet til en koncentration på 500 mg/l. Denne blev dog ikke målt. Partikelstørrelsesfordelingen blev desuden målt vha. LISST-apparatet, men desværre gik disse data tabt pga. en defekt harddisk.

### 5.2 Beskrivelse af anvendt partikeludskiller

Watercare fremstillede i første omgang en prototype af en partikeludskiller, der kunne benyttes til at se, om renseprincippet virkede. Vigtige parametre ved prototypen var udover selve rensningen, at drift og vedligeholdelse kan udføres på en tilfredsstillende måde, herunder at udskilleren kan tømmes for partikler, og at lameller kan tages op og renses på en enkel måde. På figur 7 ses et billede af filtre i prototypen fra Watercare, som blev benyttet til de indledende forsøg. Partikeludskilleren havde et volumen på ca. 550 l.

Der blev udført forsøg med aluminiumslameller med en lamelafstand på 5 mm og 10 mm samt forsøg helt uden aluminiumslameller. I begge tilfælde har lamellerne en hældning på 45° fra midten af udskilleren mod siderne.



**Figur 7**

Lamelindsats til indsætning i olieudskiller fra Watercare, som blev benyttet i indledende forsøg. Lamelafstand: 10 mm. Ved indsætning i udskilleren placeres indsatsen på den lange led (drejes 90° mod højre i forhold til billedet).

### 5.3 Resultater fra indledende forsøg

Der blev gennemført i alt 5 forsøg. Forsøgsopsætning og resultater fremgår af Tabel 1.

**Tabel 1**

*Resultater for test af Watercare prototype partikeludskiller ved to flowhastigheder og ved brug af kvartskorn med middeldiameter på 40 µm (Millisil W6).*

Forsøg	Lamelindsats	Vandstrøm l/s	Indløb mg/l	Udløb mg/l	Rensegrad %
1	Lamelafstand: 5 mm	2	500	70	86
2	Lamelafstand: 10 mm	2	500	100	80
3	Lamelafstand: 5 mm	4	500	100	80
4	Lamelafstand: 10 mm	4	500	125	75
5	Uden lamelindsats	4	500	180	64

Den indledende forsøgskørsel bekræfter, at der er en positiv effekt af lamelindsatsen. Det ses desuden, at den mindste lamelafstand (5 mm) ved begge de afprøvede flowhastigheder giver den mest effektive fjernelse, ca. 5 procentpoint større partikeludskillelse i begge tilfælde. Som forventet er udskillelsen omvendt proportional med flowhastigheden og dermed opholdstiden.

Det skal bemærkes, at der observeredes en vis partikelsedimentation i fødeslangen til udskilleren, hvorfor den reelle partikelkoncentration i indløbsvandet sandsynligvis har været lavere end 500 mg/l, og rensegraden dermed overvurderet. Dette har dog ikke betydning for ovennævnte konklusioner.

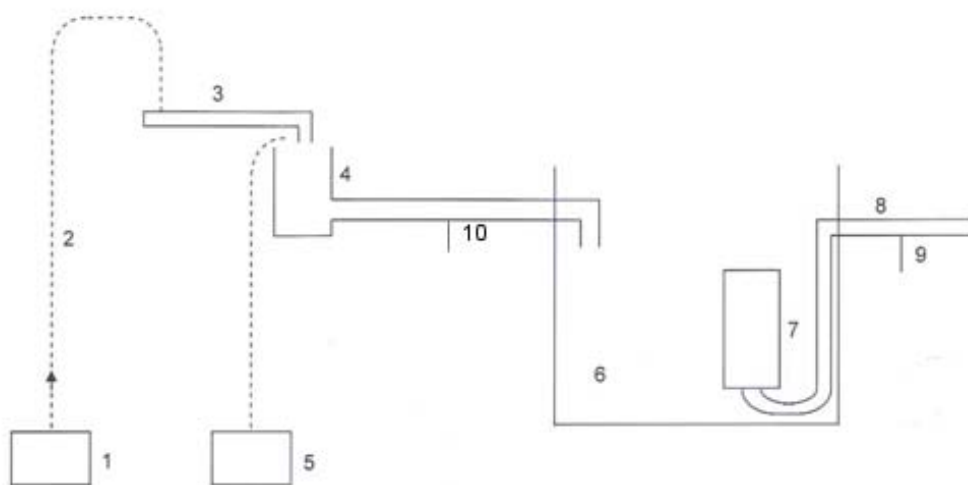
Det blev besluttet at gå videre med en lamelafstand på 5 mm og at teste denne ved flowhastigheder op til 15 l/s.

Ved midtvejsmødet i oktober 2010, hvor en repræsentant fra By- og Landskabsstyrelsen (nu Naturstyrelsen) deltog sammen med projektgruppen, blev det desuden diskuteret, om der ved hjælp af et mikrorelief på lameloverfladen kan opnås en endnu bedre udskillelse. Denne ide er ikke forfulgt nærmere.

## 6.1 Hovedforsøg med 1900 l partikeludskiller

### 6.1 Udvikling af partikeludskiller til 15 l/s

Watercare har i en årrække fremstillet olieudskillere til det danske og udenlandske marked til fjernelse af olie i vand. Olieudskillere, som sælges i dag, skal CE-mærkes efter den europæiske standard EN 858-1, hvilket medfører, at de skal godkendes i 2 forskellige klasser, alt efter hvor effektive de er til fjernelse af olie i vand. På figur 8 ses princippet i forsøgsopstillingen.



1. Vandstik med tilførsel af vand
2. Flowmåler
3. Rende
4. Blandetank
5. Fødetank med høj koncentration af opblandet millisil og vand, hvorfra der pumpes til blandetank
6. Olieudskiller
7. Koalescensfilter opbygget med aluminiumslameller
8. Udløbsrør
9. Prøveudtagningsstud i udløb
10. Prøveudtagningsstud i indløb

#### Figur 8

Forsøgsopstilling. Opstillingen bygger grundlæggende på den europæiske prøvningsstandard for olieudskillere EN 858-1.

Watercare, der kan fremstille godkendte olieudskillere til vandstrømme på op mod 100 l/s, valgte at tage udgangspunkt i en Watercare NS15 olieudskiller med et volumen på 1900 l (figur 9). Ved ombygningen af udskilleren til forbedret udskillelse af partikler har følgende været i fokus:

- Både olieforbindelser og partikler skal effektivt opfanges og tilbageholdes. Denne mekanisme forventes styrket ved indsætning af lamelindsats
- Afstanden mellem aluminiumslameller sættes lavt (5 mm) og gives en hældning (45°), så partikler ledes mod bunden og olie mod overfladen.



**Figur 9**

*Watercare NS15 partikeludskiller forsynet med 2 lamelindsatser til optimering af partikeludskillelse.*

## **6.2 Metode ved test af ombygget udskiller**

Ud fra et ønske om at teste den optimerede partikeludskiller med mindre partikler end i de indledende forsøg blev Millisil W8 valgt til hovedforsøget.

Omkring forsøgsopstillingen blev det besluttet at benytte så mange elementer som muligt fra olieudskillerstandarden EN 858-1. Det vil sige, at vand blev tilsat via en rende med veldefinerede mål. Partikler blev opblandet i vand i en fødetank og derfra pumpet via en fødeslange til udskillerens indløbsrør, hvor det blandes med indløbsvandet fra renden.

Indløbskoncentrationerne af Millisil W8 i fødetanken er i alle forsøgene 200 mg/l, idet afvejede mængder er opblandet i kendt volumen i fødetanken. Koncentration af partikler i udløb blev bestemt ved inddampning og vejning, jf. afsnit 3. Partikelstørrelsesfordelinger blev målt med LISST 100C.

Der blev udført i alt syv forsøg ved forskellige flowhastigheder. Højeste flowhastighed burde have været 15 l/s, men udskilleren kunne kun komme op på 14 l/s. Udover at variere flowhastighed blev der ved et enkelt forsøg ved 6 l/s lavet en fysisk modifikation af udløbet, så opholdstiden forventedes at blive længere og dermed bedre udskillelse.

Der blev også kørt en række forsøg med slibekorn F400, der dog ikke gav brugbare resultater, da slibekornene i stort omfang sedimenterede i fødeslangen til partikeludskilleren ved de valgte vandstrømme på 2 – 4 l/s. Derfor er resultaterne ikke medtaget. Forsøgene understreger dog vigtigheden af at benytte testpartikler, der har en faldhastighed lig de partikler, man ønsker udskilleren skal virke over for.

## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

På figur 10 og 11 ses billeder fra nogle af de 6 forsøg.



**Figur 10**  
Udløbet fra Watercare 1900 l partikeludskiller under forsøgskørsel.



**Figur 11**  
Samme som figur 10. Udløbskoncentrationen af partikler bliver målt ved den studs, der sidder på udløbsrøret ca. 1 meter fra partikeludskilleren.

### 6.3 Resultater fra hovedforsøg

Resultatet af hovedforsøget fremgår af Tabel 2. Generelt, og som forventet, ses en faldende rensegrad ved stigende vandstrøm, idet rensegraden falder fra 87% til 66% ved en stigning i vandstrømmen med en faktor 7 fra 2 til 14 l/s.

Rensegraden ved 6 l/s afviger fra det generelle billede med en rensegrad på 67%, der er på niveau med 14 l/s. Derfor blev udløbet fra udskilleren ændret i forsøg 7 for at undersøge, om hele udskillerens volumen bliver udnyttet ved en vandstrøm på 6 l/s. Den øverste halvdel af udløbet blev afskærmet med en pose, så vandet blev tvunget længere ned i udskilleren.

Ændringen af udløbet gav et fald i rensegrad fra 67% til 61%, så afdækningen havde – mod forventning - en negativ effekt på rensegraden. De lave rensegrader ved 6 l/s antyder, at der opstår turbulens omkring denne strømningshastighed. Desuden antyder de ensartede udskillelser ved 6, 10 og 14 l/s på 61-69%, at samme (grove) partikelfraktion udskilles ved disse hastigheder.

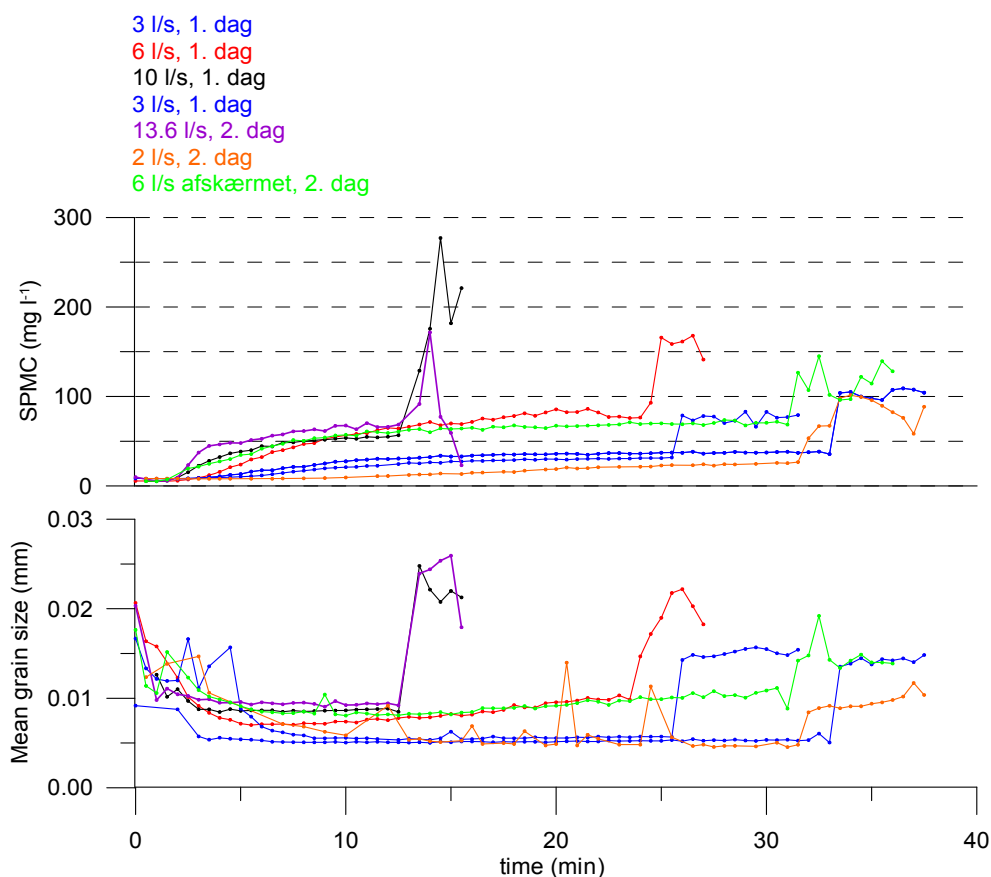
**Tabel 2**

*Rensegrad i hoved forsøg med 1900 l udskiller og Millisil W8*

Vandstrøm l/s	Fødetank mg/l	Udløb mg/l	Rensegrad %	Kommentarer
2	200	26,7	87	
3	200	35,0	83	Gennemsnit af 2 forsøg
6	200	65,6	67	
6	200	76,5	61	Afskærmet udløb
10	200	60,5	69	
14	200	67,9	66	

I figur 12 ses de rå resultater fra laseren i de 7 forsøg. Der blev målt i udløbet ved start af hvert forsøg med en frekvens på 30 sekunders interval. Når en forventet ligevægt i udløbet var trådt i kraft, blev laserdiffraktionsmåleren flyttet til indløbet.

## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode



**Figur 12**

Rå resultater fra laseren LISST 100C. Øverst ses koncentrationen ved de 7 forsøg som funktion af tiden. Instrumentet blev flyttet fra udløb til indløb, når det blev vurderet, at der var indtrådt ligevægt. Nederst ses middeldiameter for partiklerne, der blev målt ved de 7 forsøg.

I bilag 1 vises partikelstørrelsesfordelingen fra både ind- og udløb fra de 7 forsøg, der er målt vha. laserdiffraktion.

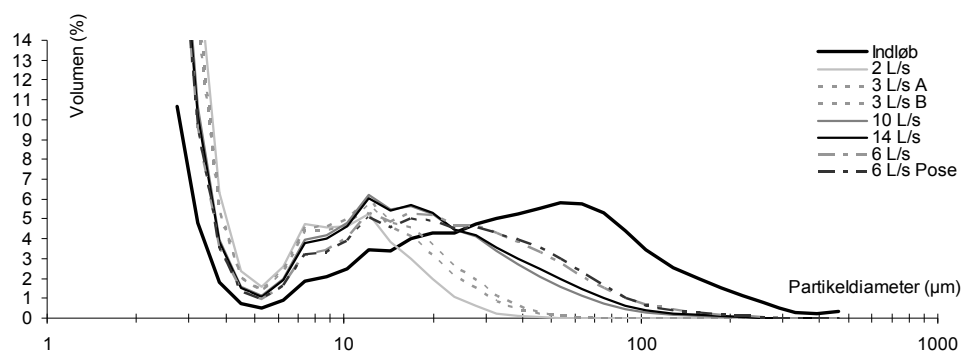
Partikelstørrelsesfordelinger i udløbet fra partikeludskilleren sammenlignes på figur 13 med partikelstørrelsesfordelingen i indløb ved 14 l/s, hvor sedimentationen i fødeslangen er minimal, idet koncentrationen i indløb var på 188 mg/l, og dermed i god overensstemmelse med koncentrationen i fødetanken, som var på 200 mg/l. Jo større vandstrøm desto kortere bliver opholdstiden i udskilleren, og desto større partikler findes i udløbet.

Ved de høje vandstrømme på 10 og 14 l/s er partiklerne i udløb på op til 100 µm. Det ses desuden, at ændringen i partikelsammensætning for de mindste partikler er stort set upåvirket af ændringer i strømningshastigheder – kun partikler over ca. 20 µm responderer tydeligt.

I forlængelse heraf bemærkes det høje indhold af meget små partikler i Millisil W8 bidrager til en relativ lav gennemsnitlig diameter, hvorfor resultaterne ikke bør vurderes i forhold til gennemsnitlig størrelse men i forhold til de største partikler i udløbet. Her anvendes  $d(0,9)$ , som angiver den partikeldiameter, som adskiller de 90% mindste partikler fra de 10% største partikler.



## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode



**Figur 13**

Partikelstørrelsesfordeling i indløb (ved 14 L/s) og i udløb (alle forsøg)

For udløb er middelværdi for partikelstørrelse og  $d(0,9)$  samlet i tabel 3. Når der ses bort fra forsøgene ved 6 l/s ses, at stigende vandstrøm fra 2 til 14 l/s medfører en stigning i partikelstørrelse i udløb, både målt på middelværdi og  $d(0,9)$ .

Stigningen er beskeden målt på middelværdi (fra 4,7 til 9,3 µm), som følge af den store andel små partikler i Millisil W8. Målt på  $d(0,9)$  ses en markant stigning, der indikerer at partikeludskilleren fjerner næsten alle Millisil partikler over 13 µm ved 2 l/s, og næsten alle partikler over 34 µm ved 14 l/s.

**Tabel 3**

Partikelstørrelser i udløb fra 1900 l udskiller og Millisil W8.  $d(0,9)$  = grænsediameter mellem 90% mindste og 10% største partikler

Forsøg nr.	Vandstrøm l/s	Middelværdi Udløb µm	$d(0,9)$ Udløb µm	Kommentarer
6	2	4,7	13	
1	3	5,3	16	
4	3	5,7	17	
2	6	10,8	45	
7	6	10,5	44	Afskærmet udløb
3	10	8,7	32	
5	14	9,3	34	

Partikelstørrelserne ved 6 l/s afviger fra den generelle tendens med de største middelværdier og største partikler i udløb. En mulig forklaring kan som tidligere nævnt være, at der omkring 6 l/s opstår turbulens i udskilleren, som hæmmer sedimentationen.

## 7.1 Skillestrømning bestemt med slibekorn

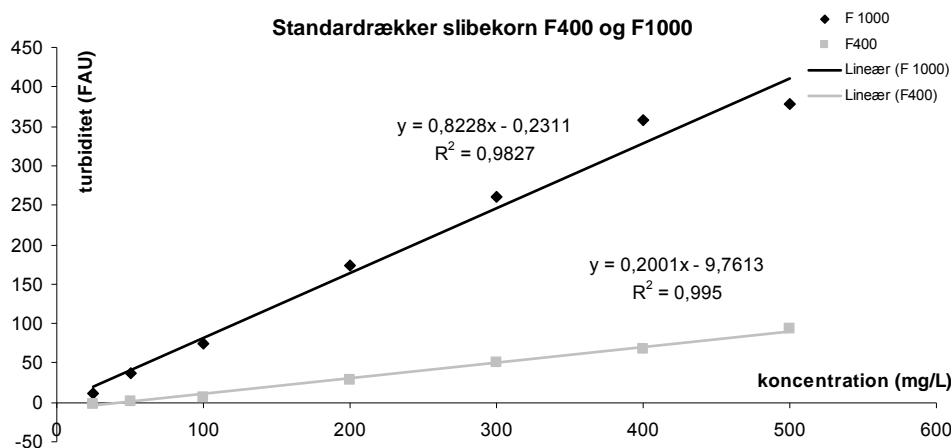
Som alternativ til brug af Millisil som testpartikler er der i projektet udviklet en mere præcis testmetode baseret på slibekorn, der som nævnt i kapitel 4 har en smal og normalfordelt partikelstørrelsesfordeling. Slibekorn har desuden den fordel, at de kan måles simpelt med et spektrofotometer, se nedenfor.

Det foreslås derudover, at begrebet skillestrømning indføres. Skillestrømning er den flowhastighed, hvorved halvdelen af slibekornene udskilles, og jo højere skillestrømning en given udskiller kan følge med til, desto mere effektiv er den. Skillestrømningen er i projektet bestemt for en forsøgsopstilling med partikeludskiller bestående af plastmoduler til dobbeltporøs filtrering.

### 7.1 Måling af koncentration af slibekorn med spektrofotometer

Som alternativ til inddampning er det undersøgt, om koncentrationen af slibekorn kan bestemmes ved måling af absorbans i spektrofotometer. Der er fremstillet standardrækker for slibekorn F400 og F1000 ved opslæmning af 25, 50, 100, 200, 300, 400 og 500 mg slibekorn i 1000 ml vand. Absorbansen er målt straks efter opslæmning. Resultaterne fremgår af figur 14.

For F400-slibekorn er der fundet en korrelationskoefficient ( $R^2$ ) på 0,995, mens den for F1000-slibekorn er 0,983. Den lidt lavere korrelation for de finere partikler, der især ses ved den højeste koncentration, er forårsaget af skyggeeffekt. Dermed bør F1000-slibekorn ikke benyttes i højere koncentrationer end 400 mg/l. Det ses desuden, at koncentrationer af F1000-slibekorn på under 50 mg/l ikke kan skelnes fra baggrunden. En koncentration på 100 - 200 mg/l ser derfor ud til at være velegnet til test af partikeludskiller. Koncentrationsintervallet svarer til observerede partikelkoncentrationer i vejvand i Ørestad.



**Figur 14**

Absorbans af standardrækker for Dragon Fly F1000- og F400-slibekorn målt med Xion 500 Hach Lange spektrofotometer

### 7.2 Bestemmelse af skillestrømning

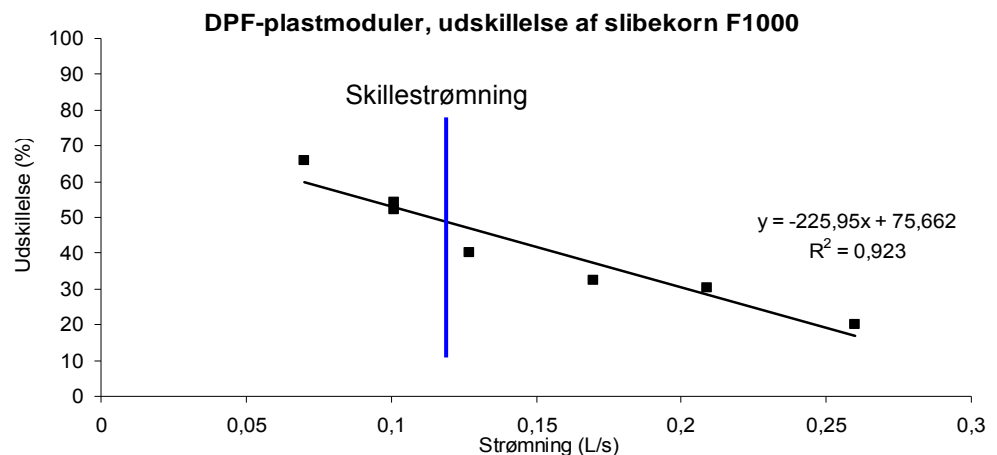
Skillestrømning er bestemt i forsøgsopstilling med vandrette DPF-plastmoduler, der har form som plader med tværgående lameller på oversiden og langsgående lameller på undersiden. Lamelhøjden er 10 mm. Vandet strømmer vandret over pla-

derne, henover lamellerne, i et 6 mm tykt strømningslag. Plastmodulerne ligger i 2 lag, og opstillingen er i alt 2 m lang, 0,5 m bred og 0,044 m høj. Udskillelse af slibekorn F1000 er bestemt ved måling af absorbans i indløb og udløb (figur 15). Absorbans omregnes til koncentration ved brug af standardrække (se figur 14).

Ud fra koncentrationerne beregnes udskillelsen som den procentvise forskel mellem ind- og udløb sat i forhold til indløbskoncentrationen ( $100 \times (1 - (Ind/Ud))$ ). I forsøget er udskillelsen af F1000 bestemt syv gange ved seks forskellige flowhastigheder. Der er udført dobbeltbestemmelse ved en strømning på 0,1 l/s, som ligger tæt på 50% udskillelse. På figur 15 ses, at der ved lineær regression er fundet en høj korrelationskoefficient ( $R^2$ ) på 0,92 mellem de forskellige flowhastigheder. Ud fra regressionslinien kan 50% skillestrømningen aflæses til 0,12 l/s.

I tilfælde af at 50% skillestrømning ved anvendelse af Dragon Fly F1000 slibekorn anvendes som standardtest for udskillere, ville konklusionen i nærværende tilfælde være, at DPF-modulet har en skillestrømning på 0,12 l/s. På figur 4 ses, at 50% udskillelse af F1000 i grove træk bør svare til 50% udskillelse af partikler i vejvand observeret i Ørestad (efter sandfang og olieudskiller), idet middeldiameter for F1000 er af samme størrelsesorden som middeldiameter for vejvand.

Man skal være opmærksom på, at slibekorn har en væsentlig højere massefylde end vejvand, og at vejvandspartikler er pladeformede snarere end kugleformede (Jensen, 2009). Med Stokes' s lov er det beregnet, at 50% udskillelse af F1000 med  $d(0,5) = 6,7 \mu\text{m}$  svarer til 50% udskillelse af kugleformede partikler i vejvand med  $d(0,5)$  på  $8,9 \mu\text{m}$ . Betydning af partikelgeometri bør undersøges nærmere i praktiske forsøg med sammenligning af F1000 og partikler i vejvand.



**Figur 15**

Bestemmelse af "skillestrømning" (50% udskillelse) i forsøgsopstilling med plastmoduler til Dobbeltporøs filtrering, bestemt med slibekorn Dragon F1000 med  $d(0,5)$  på  $6,7 \mu\text{m}$ . Skillestrømningen er på 0,12 l/s, og den beregnes ud fra regressionsligningen.

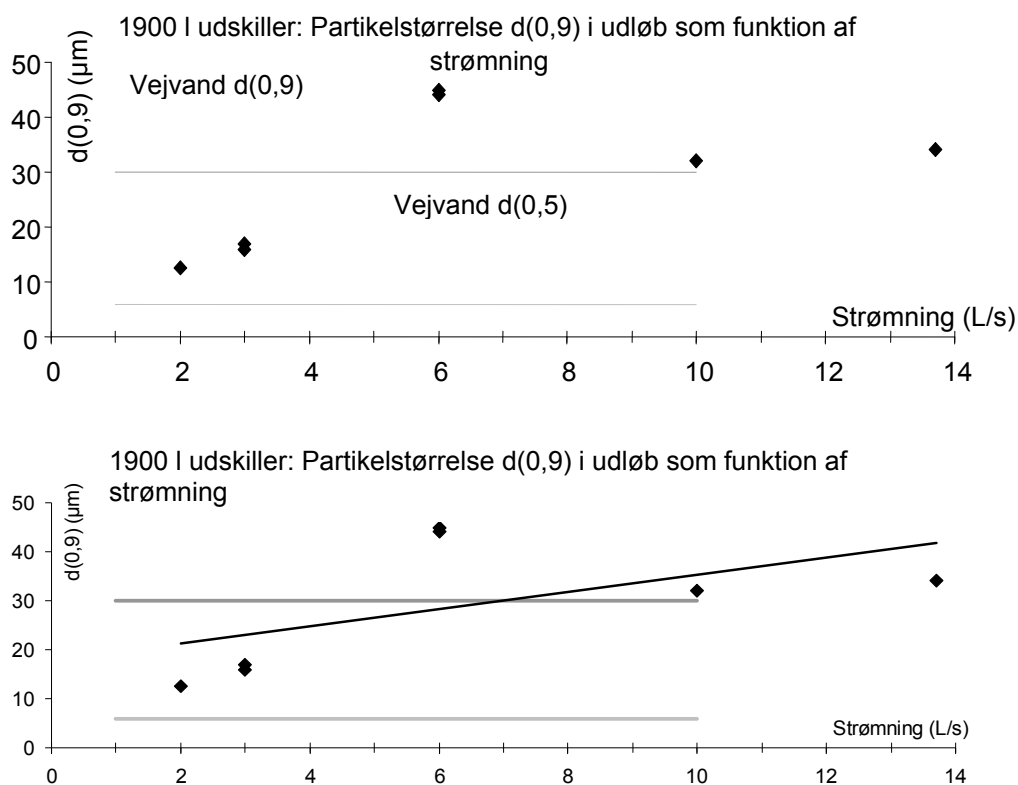
Skillestrømning (den strømning hvorved 50% af partiklerne med en veldefineret partikelfordeling udskilles) kan bruges til typegodkendelse af udskillere. Til sammenligning af forskellige udskillers evne til at fjerne partikler kan skillestrømningen normaliseres ved division med udskiller-volumen.

Desto større tal (stor skillestrømningsværdi og lille volumen) desto mere effektiv. Sammenligningen skal foregå ved skillestrømning for samme partikeltype og størrelse. Til udvikling af partikeludskillere kan måling af skillestrømning bruges til at optimere effektivitet.

## 8.1 Diskussion af resultater og perspektivering

### 8.1 Sammenligning af hovedforsøg med partikelstørrelser i vejvand

Resultaterne i hovedforsøg kan ikke bruges direkte til at vurdere, hvor god 1900 l udskilleren er til at udskille partikler i vejvand. Men ud fra rensegrader i forsøgene og partikelstørrelsesfordelinger for W8 og vejvand i Ørestad kan man foretage et skøn.



**Figur 15**

Sammenligning af partikeldiametre for udskilte partikler i 1900 l udskiller og vejvand i Ørestad. Partikelstørrelse  $d(0,9)$  for Millisil W8 i udløb på 1900 l udskiller vist som punkter (ruder) ved de anvendte strømninger. For vejvand i Ørestad er  $d(0,9)$  vist med en mørkegrå linje og  $d(0,5)$  er lysegrå.  $D(0,9) = 90\%$  fraktil (90% af partikler mindre end den angivne diameter) og  $d(0,5)$  er middel diameter.

På figur 15 ses, hvor små partikler 1900 l udskilleren er i stand til at udskille  $d(0,9)$  ved strømninger fra 2 til 14 l/s, og de sammenlignes med  $d(0,5)$  og  $d(0,9)$  for vejvand. Denne grove sammenligning indikerer, at udskilleren ved 2 l/s kan fjerne mere end 10% men under 50% af partiklerne i Ørestads vejvand. Ved 14 l/s ser det ud til, at udskilleren vil fjerne under end 10 procent af partiklerne i vejvandet i Ørestad.

I forhold til rensning af vejvand i Ørestad er det med andre ord ikke tilstrækkeligt at 1900 l udskilleren, der er godkendt til olieudskillelse op til 15 l/s, ved denne hastighed kun effektivt fjerner partikler over 30  $\mu\text{m}$ , som stort set ikke forekommer i vejvandet fra Ørestad.

Resultaterne ved 6 l/s afviger markant fra den generelle tendens med de største middelværdier og de klart største  $d(0,9)$ . En mulig årsag er målefejl, men anden forklaring kan som nævnt være, at der ved 6 l/s opstår turbulens i udskilleren, som hæmmer sedimentationen.

### 8.2 Diskussion af målemetoder

Laserdiffraktion har vist sig som en velegnet målemetode. Der er specielt 2 fordele, som skal fremhæves. For det første kan man få resultater 5-10 min efter en test eller et forsøg, hvilket gør det muligt hurtigt at ændre på forsøgsopstillingen eller justere en komponent. Den anden fordel er, at det er muligt at udføre forsøg med laserdiffraktion i felten på reel regnafstrømning. Det må forventes, at der i fremtiden skal måles på mange anlæg for kommuner og forsyningsselskaber, og her vil laserdiffraktion være et oplagt valg.

Resultaterne af laserdiffraktion giver et godt billede af partikelstørrelsesfordelingen på de partikler, der slipper gennem partikeludskilleren, hvilket er nødvendigt, hvis man skal sige noget om fjernelse af en lang række forurenende stoffer. Rensning af vejvand for eksempelvis tungmetaller kræver, at små partikler i intervallet 0,3-30  $\mu\text{m}$  fjernes fra vejvandet. Laserdiffraktion giver således et godt billede af en af de vigtigste parametre ved rensningen af vejvandet.

Millisil giver et generelt indblik i hvor store partikler, der kan udskilles, men er ikke optimale som testpartikler, som følge af et stort indehold af meget små og meget store partikler i forhold det mest relevante område fra 5 til 20  $\mu\text{m}$ . I dette område er partikelindholdet tilmed meget lavt i de anvendte Millisil. Det giver sig udslag i, at en fordobling af vandstrømmen i hovedforsøgene kun ændrer rensegraden med 9% point.

Ved sammenligning med forsøgene med Dragon Fly F1000-slibekorn ses der ved en fordobling af vandstrømmen fra 0,1 til 0,2 l/s en reduktion i rensegraden på 23% point. I forhold til Millisil giver slibekorn derfor mulighed for en mere præcis bestemmelse af en partikeludskillers ydeevne.

Brug af slibekorn som testpartikler i kombination med måling af absorbans med spektrofotometer gør det muligt at lave præcise bestemmelser af rensegrader ved forskellige strømninger. På det grundlag kan man ved lineær regression beregne skillestrømningen, hvor udskilleren udskiller 50% af slibekornene. Forsøgsteknik er det hurtigere end brug af inddampning og et billigt alternativ til målinger med laser, der er et forholdsvist dyrt apparat.

### 8.3 Perspektivering

Der er et behov for videreudvikling af partikeludskillerer til regnafstrømning og metoder til standardiseret prøvning af udskillerne.

På baggrund af de gennemførte forsøg med Watercare-udskilleren giver det god mening at arbejde videre med lamelindsatserne. Derudover bør problematikken omkring evt. turbulens undersøges nærmere, og målet må være, at designe udskilleren så det fulde volumen udnyttes til laminar strømning ved den godkendte flowhastighed. Partikeludskillerer kan tænkes udnyttet som første led i en renseproces til erstatning for eller reduktion af sandfang.

Det vil være en fordel, hvis man på europæisk plan bliver enige om en egnet testmetode, der kan dokumentere, hvor effektivt komponentbaserede rensesystemer fjerner partikler fra vejvand. Her er de to vigtigste spørgsmål, hvilke testpartikler man skal benytte, og hvordan koncentration og partikelstørrelsesfordeling skal måles.

## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

Millisil testpartikler har den fordel, at der kun skal udføres en test, og at det allerede benyttes i Tyskland. Ulempen er, at tolkning af resultater er mere usikker end for slibekorn. Hvis man ønsker at se nærmere på slibekorn som testpartikler, kan der udvikles en metode til bestemmelse af skillestrømning.

Det vil i givet fald være oplagt at bestemme skillestrømningen for tre forskellige størrelser af slibekorn, svarende til  $d(0,1)$ ,  $d(0,5)$  og  $d(0,9)$  for partikler i vejvand. På baggrund af analyser i Ørestad svarer disse tre størrelser til henholdsvis ca. 30  $\mu\text{m}$  (observeret interval 20-32  $\mu\text{m}$ ), ca. 7  $\mu\text{m}$  (observeret interval 5 -8  $\mu\text{m}$ ) og ca. 1,6  $\mu\text{m}$  (1,2 – 2  $\mu\text{m}$ ).

## 9.1 Referencer

Anonymous, 1977, Handbook of Chemistry and Physics, 57<sup>th</sup> edition.

Clement K.H., Fangel P, Jensen A. D. og Thomsen K. (2009): "Kemiske enhedsoperationer", 5. udgave., Polyteknisk forlag 2009, 597 sider.

Dansk standard (2005): "Udskillere til letflydende væsker" Dansk standard; Tillæg; DS/EN 858-1/A1, 1. udgave, 13. juni 2005, 17 sider.

DPF (2011): "Dobbeltporøs filtrering". Hjemmeside om Dobbeltporøs filtrering. [www.sl.life.ku.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes\\_filtrering.aspx](http://www.sl.life.ku.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes_filtrering.aspx).

Dragon (2010): "Available Size Gradings". Datablad fra Dragon Fly, modtaget i 2010, 1 side.

Handbook of Chemistry and Physics (1997): 57<sup>th</sup> edition publiceret af CRC press, Ohio, USA.

Ingvertsen S.T., Jensen M.B. AND Magid J (2011): "A review of urban storm water quality data to develop a minimum data set for assessing and comparing the efficiency of treatment facilities". Journal of Environmental Quality, In review.

Jensen H.E. og Jensen S.E. (2001): "Jordfysik og jordbrugsmeteorologi". 2.udgave, DSR Forlag, ISBN 87 7432 584 1. ca. 500 sider.

Jensen M. B. (2009): "Dobbeltporøs filtrering – tillægsrapport", Skov & Landskab, KU-LIFE, maj 2009. Offentliggjort på: [www.sl.life.ku.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes\\_filtrering.aspx](http://www.sl.life.ku.dk/Forskning/ParkerOgUrbaneLandskaber/Dobbeltporoes_filtrering.aspx), 71 sider.

Nielsen C. N., Jensen M.B. og Hallig F (2010): "Dobbeltporøs filtrering, Udvikling af industrimodul, Slutrapportering under udarbejdelse.

Purus (2008): "PURUS Katalog; Slamfang, Fedtudskiller, Olieudskiller, Alarmer; Dimensionering, Installation, Drift, Vedligehold. 1. udgave, 2. oplag, marts 2008, ca. 100 sider.

Rawle A, (2011): "Basic Principles of Particle Size Analysis. Technical paper, Malvern instruments. Publikationsdato ukendt, download fra Science Direct june 2011, 8 pages.

Rinker (2004): "Particle Size Distribution (PSD) in Storm water Runoff". Rinker Materials info series nr. 601, june 2004, download fra [www.rinkerpipe.com](http://www.rinkerpipe.com) i 2010, 3pp.

Quarzwerke (2009): "Stoffdaten, productdata". Produktblad nr. 1238 fra Quarzwerke GmbH, juni 2009 2 sider.

Sansalone, J., Koran, J., Smithson, J., Buchberger, G (1998): "Physical Characteristics of Urban Roadway Solids Transported During Rain Events". Journal of Environmental Engineering Vol. 124, No. 5, May 1998, p 427-440.

Shearer. S. A. and Hudson J. R.: "Fluid Mechanics: Stokes Law and Viscosity"; Measurement Laboratory Investigation No 3; University of Kentucky. September 2010, 7 pages.

## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode

Sigsgaard P. (2011): Personlig meddelelse fra Per Sigsgaard, Area Sales Manager, Alsiano A/S.

TARP (2003): The Technology Acceptance Reciprocity Partnership, Protocol for Storm water Best Management Practice Demonstrations. Endorsed by California, Massachusetts, Maryland, New jersey, Pennsylvania, and Virginia. Final Protocol updated July 2003, 37 pages.

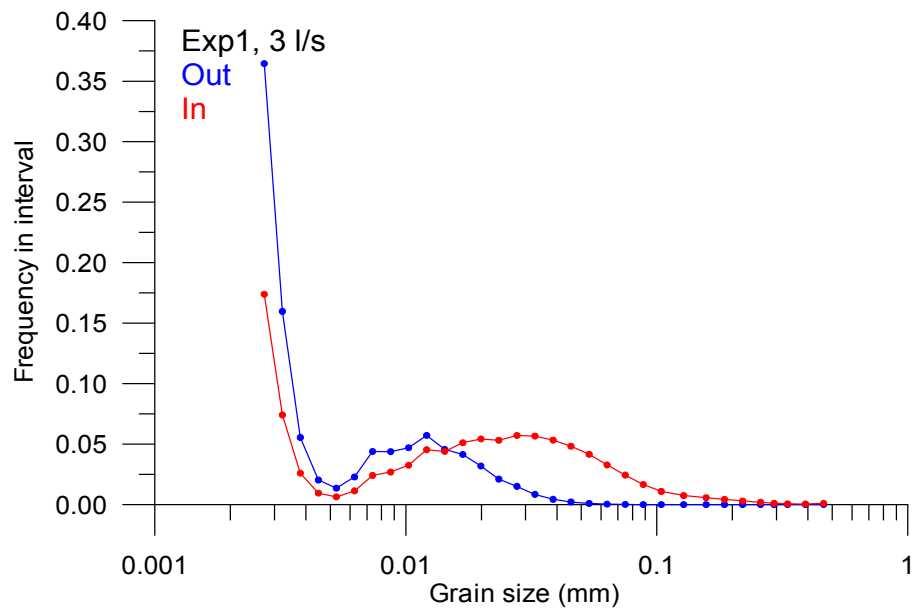
DS/EN 858-1, Separator system for light liquids (e.g. oil and petrol) – part 1.

Teknologisk Institut (2010), Rørcentret, Rapportering af videnkupon med journalnummer 08-045983.



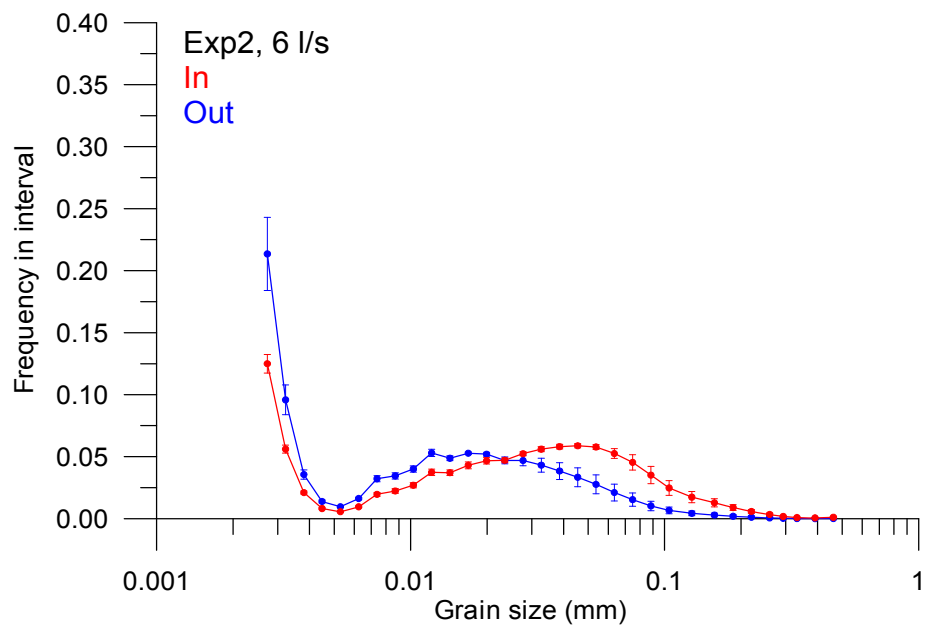
## 10.1 Bilag 1

På de følgende sider vises partikelstørrelsesfordelingen fra både ind- og udløb fra de 7 delforsøg med 1900 liters udskilleren, der er målt vha. laserdiffraktion. Der skal ses bort fra resultaterne, som ligger under 0,005 mm svarende til 5  $\mu\text{m}$ , da det skyldes instrumentets fejlkilder.



**Figur 1.1**

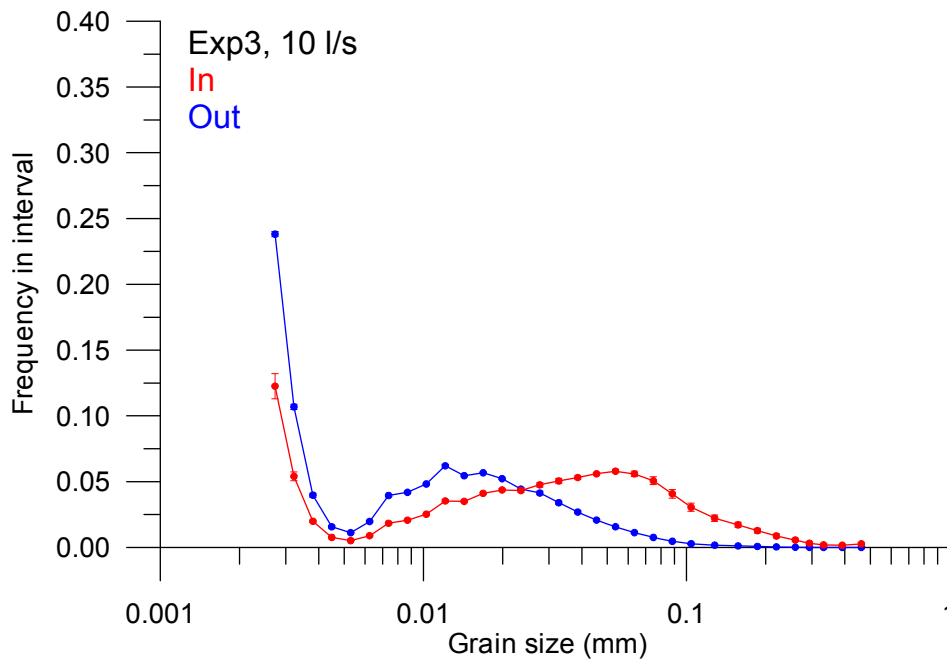
Partikelstørrelsesfordeling i ind- og udløb ved forsøg 1, hvor vandstrømmen var 3 l/s



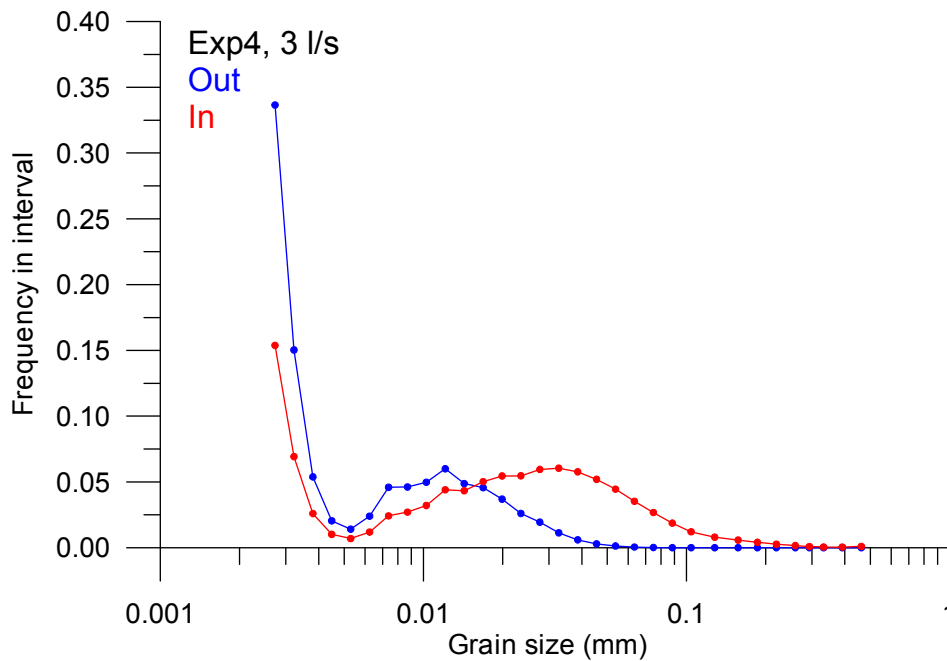
**Figur 1.2**

Partikelstørrelsesfordeling i ind- og udløb ved forsøg 2, hvor vandstrømmen var 6 l/s

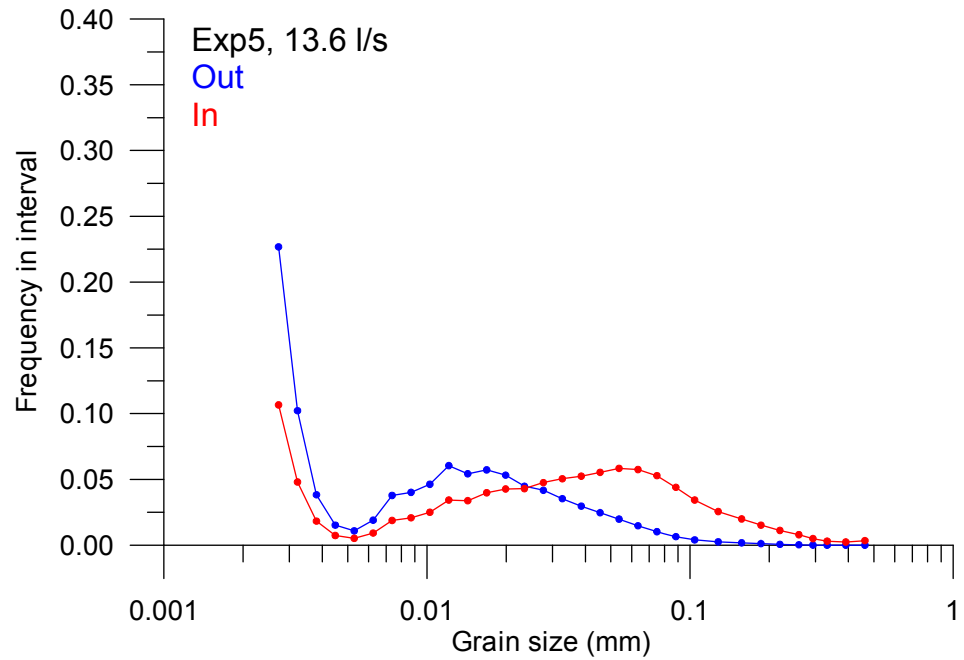
## Partikeludskiller til regnafstrømning – udvikling af udskiller samt testmetode



**Figur 1.3**  
Partikelstørrelsesfordeling i ind- og udløb ved forsøg 3, hvor vandstrømmen var 10 l/s

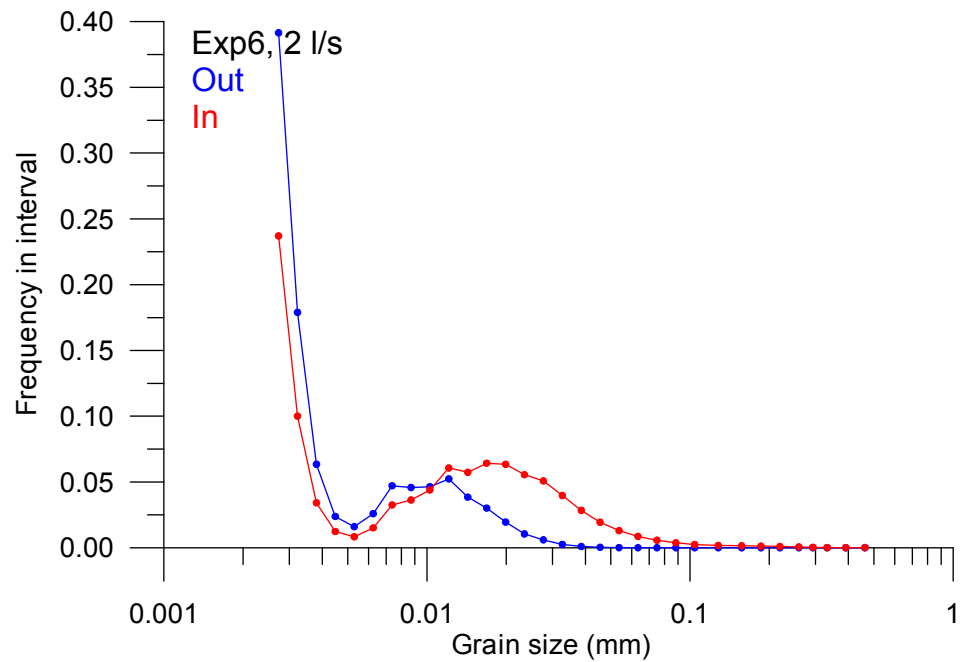


**Figur 1.4**  
Partikelstørrelsesfordeling i ind- og udløb ved forsøg 4, hvor vandstrømmen var 3 l/s. Dette var en gentagelse af forsøg 1, da der var lidt tvivl om der havde sat sig for meget suspenderet stof i pumpe-slangen ved det første forsøg. Umiddelbart er resultaterne fra de 2 forsøgsserier meget ens



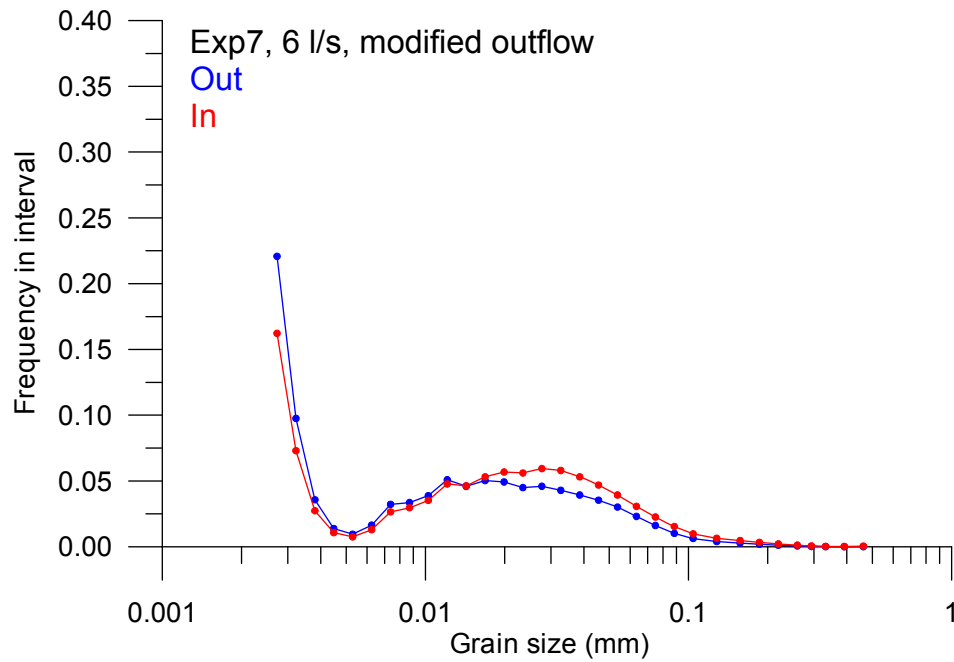
**Figur 1.5**

Partikelstørrelsesfordeling i ind- og udløb ved forsøg 5, hvor vandstrømmen var 14 l/s



**Figur 1.6**

Partikelstørrelsesfordeling i ind- og udløb ved forsøg 6, hvor vandstrømmen var 2 l/s



**Figur 1.7**  
*Partikelstørrelsesfordeling i ind- og udløb ved forsøg 7, hvor vandstrømmen var 6 l/s med modificeret udløb i forhold til forsøg nr. 2*



Naturstyrelsen  
Haraldsgade 53  
2100 København Ø  
[www.nst.dk](http://www.nst.dk)