

First flush

Review og principper for karakterisering af first flush



Vand i Byer

Rapport

Januar 2018

Denne rapport er udarbejdet under DHI's ledelsessystem, som er certificeret af Bureau Veritas
for overensstemmelse med ISO 9001 for kvalitetsledelse

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Godkendt af



Invalid signature

X

Henrik Garsdal

Approved by

Signed by: Henrik Garsdal

First flush

Review og principper for karakterisering af first flush

Udarbejdet for Vand i Byer og Københavns Kommune
Repræsenteret ved Maria Burup Dahl, Teknologisk Institut
Mia Jahn Knudsen, Københavns
Kommune



Vejbrønd

Projektleder	Bodil Mose Pedersen
Kvalitetsansvarlig	Ulf Nielsen

Projektnummer	11821416
Godkendelsesdato	Endelig rapport 25. januar 2018
Klassifikation	Åben

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Sammenfatning	3
2	Indledning og formål	5
3	First flush	7
3.1	Karakterisering af first flush	7
3.2	Sammenfatning – Karakterisering af first flush	15
3.3	Monitoringsmetoder – parametre og stoffbelastning	16
3.3.1	Målemetoder anvendt til karakterisering af first flush	16
4	Regulering af regnvandsstrøm ved vandbremsere	19
4.1	Anvendelse af vandbremsere til regnvandsregulering	23
5	Måleprogram for first flush	25
5.1	2-trins måleprogram	25
5.1.1	Karakterisering af afstrømningsoplandet	27
5.1.2	Indretning af prøvetagningssted	27
5.1.3	Dataopsamling	27
5.1.4	Måleperiode	28
5.1.5	Databearbejdning og erfaringsopsamling	29
6	Konklusioner og anbefalinger	31
6.1	Anbefalinger	32
7	Referencer	33

FIGURER

Figur 3-1:	Afhængigt af first flush koefficienten er forholdet mellem den akkumulerede masse og det akkumulerede flow inddelt i forskellige zoner /9/.	8
Figur 3-2:	M(V) kurver for 162 regnhændelser /4/.	9
Figur 3-3:	To små regnhændelser fra d. 3. og 4. marts (b) samt 5. og 6. marts 2005 (c) i det separatkloakerede opland Chassieu i Frankrig. I figuren er vist regnintensiteten (I), flow (Q) SS (TSS) og COD. De lodrette linjer viser start og slut på regnhændelserne. Den lysegrå markering viser 95% konfidensinterval.	11
Figur 3-4:	Successive regnhændelser fra d. 29. og 30. maj (b) samt 5. og 6. juni 2008 (c) i det separatkloakerede opland Chassieu i Frankrig. I figuren er vist regnintensiteten (I), flow (Q) SS (TSS) og COD. De lodrette linjer viser start og slut på regnhændelserne. Den lysegrå markering viser 95% konfidensinterval.	11
Figur 3-5:	Klassifikation af M(V) kurver i tre zoner /12/.	12
Figur 3-6:	Effektivitetsfaktor E(V) for regnvandsafstrømning fra en motorvej i Californien /8/.	15
Figur 4-1:	Cyklonbremsen (CYE) /13/.	20
Figur 4-2:	Vertikal centrifugalbremse (CEV) /13/.	20
Figur 4-3:	Horizontal centrifugalbremse /13/.	21
Figur 4-4:	Grafisk præsentation af hvirveeffekten på udløbsflowet, når vandbremsen arbejder ved henholdsvis 73% og 100% effektivitet, og indløbsflowet til en brønd er større end udløbsflowet.	22

Figur 5-1:	Skitse med tilløb og afløb fra brønd med vandbremse. De ideelle målepunkter er indtegnet.	26
Figur 5-2:	Systemoversigt for datahåndtering.	28

TABELLER

Tabel 3.1:	Antallet af regnhændelser, der på baggrund af fire forskellige definitioner af first flush udviser first flush egenskaber. I alt 162 regnhændelser er vurderet. /4/	10
Tabel 4.1:	Sammenfatning af karakteristika for vandbremsere.	23
Tabel 5.1:	Oversigt over fire trin i et måleprogram for first flush.....	26

Forord

I juni 2017 indsendte Københavns Kommune en ansøgning til Vand i Byer II med anmodning om midler til finansiering af dette review om First Flush. Umiddelbart efter indsendelsen bevilligede Vand i Byer II penge til projektet. HOFOR bidrog også til finansieringen. I projektperioden frem til januar 2018 har følgende medarbejdere fra Københavns Kommune og HOFOR bidraget med viden og kommentarer til rapporten samt givet input til forbedringer:

- Mia Jahn Knudsen, Københavns Kommune (projektleder)
- Eva Baunegaard Hemmersam, Københavns Kommune
- Ida Marie Knudsen HOFOR
- Jeanet Stagsted, HOFOR

Bodil Mose Pedersen, DHI har udarbejdet rapporten.

1 Sammenfatning

I forbindelse med skybrudssikring og afkobling af overfladeafstrømning fra kloaksystemet ønsker Københavns Kommune og HOFOR at etablere systemer med vandbremsere til styring af fordelingen af vand mellem spildevandskloakken og vandområderne. Det er en almindelig antagelse, at den første regnvandsafstrømning i byområder har et forhøjet indhold af forurenende stoffer, og dette fænomen kaldes "first flush". Denne viden tænkes udnyttet til at styre afledningen af regnvand, så det mest forurenede vand ledes i kloakken, og det mindre forurenede regnvand ledes til vandområder.

Formålet med projektet har været at afklare, hvad der skal til for at dokumentere, om fraseparering af first flush ved hjælp af vandbremsere kan sidestilles med BAT. Metoden forventes anvendt i separate regnvandssystemer til at begrænse udledningen af det mest forurenede vand fra overfladeafstrømning. I relation til formålet er der gennemført en litteratursøgning, og baseret på udvalgte videnskabelige artikler om first flush er følgende overordnede emner behandlet:

- Karakterisering af first flush
- Vandbremsere
- Måleprogram til fastlæggelse af størrelsen af first flush effekten og vandbremseregulering

Litteraturgennemgangen viste, at ud over beskrivelser og kvalitativ bestemmelse af first flush er den mest anvendte metode til analyse af first flush udarbejdelse af $M(V)$ kurver, der viser den akkumulerede stofbelastning i forhold til den samlede masse fra en nedbørshændelse (y-akse) og forholdet mellem akkumuleret flow og det samlede flow (x-akse).

Regnhændelser kan overordnet set inddeles i tre kategorier:

- Små regnhændelser, hvor dynamikken i stofkoncentrationer og flow tilnærmelsesvist følges ad
- Successive regnhændelser med flere efter hinanden følgende flow peaks og peaks af stofkoncentrationer. Peaks forsvinder efterhånden og efterfølges af fortyndingseffekter
- Kraftige regnhændelser, hvor der indledningsvist opstår peaks med forhøjede stofkoncentrationer, som efterfølgende aftager, hvorefter fortyndingseffekten tager over.

Ved regnhændelserne beskrevet under det første punkt er der ingen first flush effekt, mens der i de to andre situationer vil være en større eller mindre first flush effekt, der kan udnyttes til at regulere regnvandsstrømme.

Vandbremsen er primært konstrueret for at beskytte nedstrøms beliggende kloaksystemer ved at tillade et forud fastsat maksimalt flow at passere. I første omgang kan en simpel regulering bestå i fast indstilling af vandbremsen baseret på måling af sammenhørende værdier af flow og turbiditet for et velbeskrevet opland. Ud fra erfaringsopsamlingen opstilles efterfølgende forslag til indstillinger af vandbremsen, der tillader forskellige størrelser af flow at passere til kloakken, og som samtidig sikrer en tilstrækkeligt god kvalitet af vandet, der udledes til vandområdet.

Et måleprogram til karakterisering af first flush og vurdering af om regulering med en vandbremse kan sidestilles med BAT anbefales gennemført i fire trin, hvor de to første trin alene består af online målinger og de to sidste inkluderer automatisk prøvetagning og kemiske analyser. Flow, turbiditet, nedbørsmåling og eventuelt ledningsevne er alle parametre, der kan gennemføres som online målinger med automatisk dataopsamling. For at reducere omkostninger til udstyr kan man i første omgang vælge kun at udføre online målinger. De hyppigst valgte parametre til karakterisering af first flush er suspenderet stof, tungmetaller (total og filtreret), COD, Total-N og Total-P. Suspenderet stof og COD er de parametre med den største first flush effekt. De nævnte analyseparametre kræver flowproportional fraktioneret prøvetagning for at resultaterne kan anvendes til karakterisering af first flush.

2 Indledning og formål

Dette projekt om first flush review og principper for karakterisering af first flush er et bobleprojekt under "Vand i Byer 2" og medfinansieres af Københavns Kommune.

I forbindelse med skybrudssikring og afkobling af overfladeafstrømning fra kloaksystemet ønsker Københavns Kommune og HOFOR at etablere systemer (vandbremsere) til styring af fordelingen af vand mellem spildevandskloakken og vandområderne.

Det er en almindelig antagelse, at den første regnvandsafstrømning i byområder har et forhøjet indhold af forurenende stoffer, og dette fænomen kaldes "first flush". Denne viden bør kunne udnyttes til at styre afledningen af regnvand, så det mest forurenede vand ledes i kloakken, og det mindre forurenede regnvand ledes til vandområder med tilstrækkelig kapacitet.

Kendskabet til, hvilke faktorer det er relevant at monitorere for at afgøre, hvor overfladeafstrømning kan ledes hen, er imidlertid begrænset og baseres i dag væsentligst på generelle regnkvalitetsdata og hydraulisk modellering og ikke på viden om sammensætningen af first flush.

Formålet med projektet har været at afklare, hvad der skal til for at dokumentere, om fraseparering af first flush ved hjælp af vandbremsere kan sidestilles med BAT. Metoden forventes anvendt i separate regnvandssystemer til at begrænse udledningen af det mest forurenede vand fra overfladeafstrømning. I relation til formålet gennemføres følgende aktiviteter:

- Indsamling af videnskabelige artikler og sammenfatning af viden om first flush
- Beskrivelse af parametre til karakterisering af first flush samt anvendelige prøvetagnings- og målemetoder
- Beskrivelse af vandbremsere og muligheden for deres anvendelse til at sikre tilfredsstillende vandkvalitet af det udledte vand
- Opstilling af overordnede guidelines i forhold til indretning af prøvetagningssteder med henblik på monitoring før og efter vandbremsen
- Opstilling af et måleprogram for first flush

Selve planlægningen og udførelsen af et måleprogram er ikke en del af projektet. Det er hensigten, at HOFOR efterfølgende gennemfører måleprogrammet i et eller flere case-områder. Københavns Kommune vil samle op på resultaterne, som formodes at kunne danne grundlag for egne og andre myndigheders vurdering af mulighederne for separering af first flush som alternativ til rensning af overfladeafstrømning.

3 First flush

I 1990'erne var beskrivelsen af first flush i stor udstrækning relateret til overløb fra kombinerede kloaksystemer og i mindre omfang relateret til regnvandssystemer, men som følge af udbygning af separate regnvandssystemer samt klimaændringer og stigning i de regnvandsmængder, der skal udledes til vandområder, er der i løbet af 00'erne udgivet flere videnskabelige artikler om karakterisering af first flush for regnvand alene. Karakteriseringen går både på matematisk beskrivelse og på indholdet af forurenende stoffer i first flush. Det følgende afsnit 3.1 beskriver væsentlige udfordringer i forhold til de aktuelle problemstillinger omkring first flush i Danmark. Beskrivelsen er baseret på informationer fra 11 internationale videnskabelige artikler om regnvandsmåleprogrammer og dataanalyse vedrørende nedbørs- og afstrømningsforhold, koncentrationer af forurenende stoffer, flowmålinger m.m. Ofte er de separatkloakerede arealer i udlandet betydeligt større end i Danmark.

De udenlandske erfaringer vedrørende first flush kan imidlertid sammenlignes med danske forhold, idet den mest anvendte metode til karakterisering af first flush består af flowdata og data for forurenende stoffer i form af $M(V)$ -kurver, der viser den akkumulerede stofbelastning i forhold til den samlede masse fra en nedbørshændelse (y-aksen), samt forholdet mellem akkumuleret flow og det samlede flow. I afsnit 3.1 er der mere detaljeret redegjort for, hvordan first flush karakteriseres. Helt overordnet er first flush effekten større for små afstrømningsoplande end for større oplande.

Centrale emner fra de videnskabelige artikler er gennemgået under følgende overskrifter:

- First flush fænomenet og fordeling af forurenende stoffer i forhold til vandvolumenet /3/
- First flush analyse /9/
- Kvalitativ og kvantitativ analyse af regnvandsafstrømning /4/
- Online turbiditetsmålinger, suspenderet stof og COD /12/
- Tungmetalforurening /2/, /7/
- Afstrømning fra kobbertag /6/
- Afstrømning fra zinktag /10/
- Sæsonbestemt first flush /1/, /8/
- Redefinering af first flush fænomenet /5/

3.1 Karakterisering af first flush

First flush fænomenet og fordeling af forurenende stoffer i forhold til vandvolumenet /3/

Indledningsvist defineres first flush som den første del af det udledte vandvolumen, der transporterer hovedparten af mængden af forurenende stoffer. Denne definition er meget upræcis, og der er derfor behov for en kvantificering af first flush.

Som et alternativ til en udelukkende beskrivende eller kvalitativ bestemmelse af first flush er der i denne artikel præsenteret en kvantitativ bestemmelse og definition af first flush ud fra $M(V)$ kurver. Definitionen samt metoden til beregning af, hvornår der optræder first flush, kan imidlertid ikke stå alene, når man ønsker at designe rensefaciliteter, idet first flush fænomenet er komplekst, og variationerne af first flush er mange. På den anden side er en statistisk analyse af eksperimentelle $M(V)$ kurver og bestemmelse af first flush koefficienten b (afvigelsen fra diagonalen) et anvendeligt udgangspunkt, hvor der er taget hensyn til oplandet, regnvandssystemet og regnhændelsen. Ved gennemgang af /9/ er der en mere detaljeret beskrivelse af $M(V)$ kurver – herunder datagrundlag og princip.

Ved analyse af 197 regnhændelser fra kombinerede kloaksystemer og separate systemer fandt man, at det for separate systemer gjaldt, at 80% af den samlede masse af forurenende stoffer blev transporteret med de første 74% af vandmængden. Dette gjaldt for 50% af

regnhændelserne. I undersøgelsen fandt man, at first flush koefficienten (b) afhænger af forureningsparameteren, overfladetypen samt regnhændelsens intensitet og varighed.

First flush analyse /9/

I artiklen "First flush analysis of urban storm runoff" /9/ er first flush defineret som den indledende periode med overfladeafstrømning, hvor koncentrationen af forurenende stoffer er højere end senere i nedbørshændelsen. En anden anvendt definition af first flush /3/ er, at 80% af massen skylles af inden for 30% af tiden for regnhændelsen. Dette gælder imidlertid kun i 1% af alle regnhændelser.

Andre forskere er refereret i artiklen, og disse forskere har konkluderet, at first flush resulterer i en betydelig "peak" i stofbelastningen i begyndelsen af en regnhændelse, og at denne "peak" vil variere fra parameter til parameter. F.eks. blev der i /3/ målt større first flush effekt for suspenderet stof end for COD.

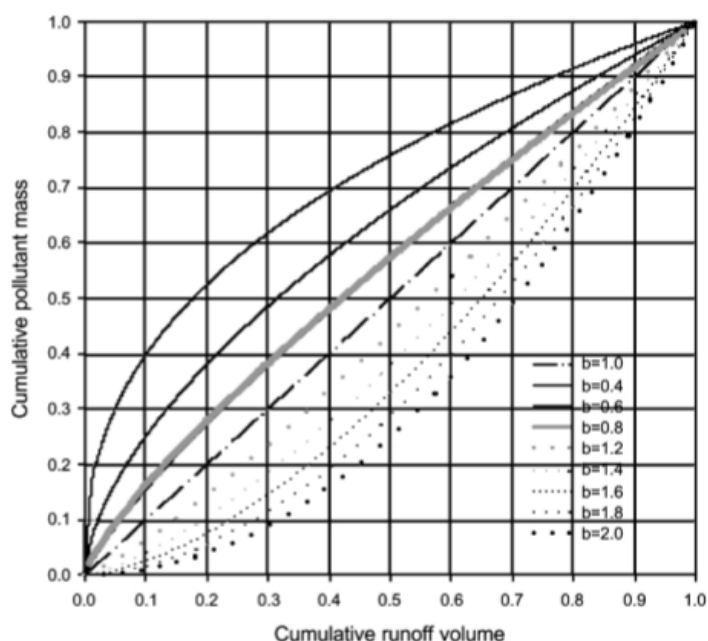
Desuden er det konkluderet, at der ikke var nogen sammenhæng mellem tørvejrperiodens varighed og størrelsen af first flush, og endelig konkluderes det, at first flush er større for små afstrømningsarealer end for store arealer (>100 ha).

First flush effekten bestemmes ud fra kurver, der viser akkumuleret stofbelastning (y-aksen), hvor L = forholdet mellem akkumuleret masse/samlet masse, mens x-aksen er F =Akkumuleret flow/samlet flow (se Figur 3-1). Vinkelhalveringslinjen (45° linjen) i figuren repræsenterer den situation, hvor koncentrationen af forurenende stoffer er konstant under regnhændelsen. First flush er repræsenteret ved data, der ligger over 45° linjen, og datapunkter under linjen repræsenterer situationen, hvor der er sket en fortynding af forurenende stoffer.

Afvigelsen af den akkumulerede masse-kurve fra diagonalen er et udtryk for størrelsen eller størrelsen af first flush. Her i rapporten er anvendt "størrelsen af first flush", og det er det samme som afvigelsen fra diagonalen i en figur svarende til Figur 3-1. Afvigelsen i forhold til diagonalen er omvendt proportional med first flush koefficienten b . Det vil sige, at:

$$L = F^b$$

Værdien af first flush koefficienten b kan beregnes ved $\ln(L) = b \cdot \ln(F)$.



Figur 3-1: Afhængigt af first flush koefficienten er forholdet mellem den akkumulerede masse og det akkumulerede flow inddelt i forskellige zoner /9/.

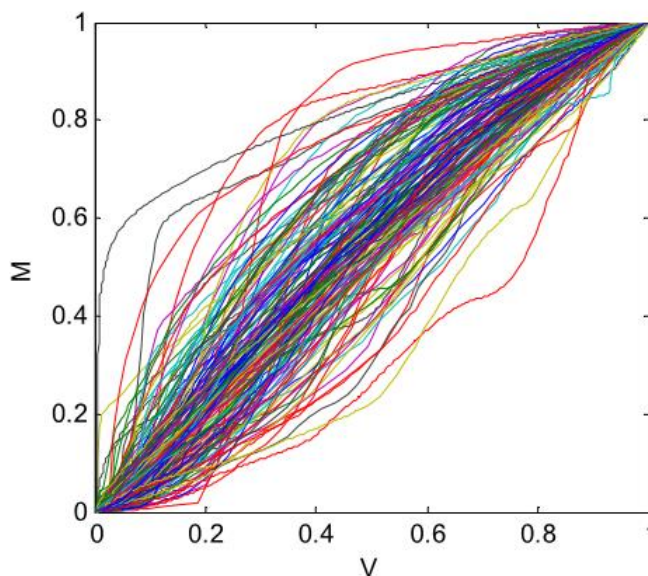
I artiklen er præsenteret data fra 38 regnhændelser fra 13 forskellige oplande, og på baggrund af analyser af data udført efter principperne beskrevet ovenfor er følgende konklusioner fremhævet:

- Den relative størrelse af first flush i et beboelsesområde er $SS > HEM > Fe$ og $PO_4-P > TKN > COD > TP > Pb$, hvor HEM er olie/fedt efter n-hexan ekstraktion, og TKN er total Kjeldahl-N.
- Baseret på beregning af størrelsen af b kan den relative størrelse af first flush rangeres på følgende måde: $TKN > PO_4-P > TP > COD > Fe > HEM > SS$
- Der blev ikke fundet nogen sammenhæng mellem first flush og den forudgående tørvejrperiodes længde.

Kvalitativ og kvantitativ analyse af regnvandsafstrømning /4/

Ved undersøgelse af 162 regnhændelser og præsentation af tilhørende M(V) kurver er hændelserne blevet inddelt efter forskellige definitioner af first flush. Følgende definitioner er i artiklen anvendt for first flush:

- 40% af mængden af forurenende stoffer er indeholdt i 20% af vandvolumenet
- 80% af mængden af forurenende stoffer er indeholdt i 30% af vandvolumenet
- $Max-MV > 0,2$ (afstanden mellem M(V) kurven og vinkelhalveringslinjen) og
- $b < 0,862$, hvor first flush koefficienten b kan beregnes ved $\ln(L) = b \cdot \ln(F)$ (se side 6)



Figur 3-2: M(V) kurver for 162 regnhændelser /4/

Data i Tabel 3.1 viser, at antallet af first flush hændelser er meget afhængigt af definitionen, der anvendes. Definitionen $b < 0,862$ svarer til en definition, hvor 50% af mængden af forurenende stoffer er indeholdt i 55% af vandvolumenet (50/55). Jo mindre skarp/afgrænset definitionen er, jo flere hændelser vil blive betragtet som first flush.

Ovenstående vil kunne anvendes i et måleprogram for first flush til at fastlægge, hvilken definition der vil være fordelagtig at anvende under danske forhold for at afgøre, hvor der er tale om first flush, og hvilke kriterier der skal lægges til grund for fremtidig intelligent styring af vandbremsere.

Tabel 3.1: Antallet af regnhændelser, der på baggrund af fire forskellige definitioner af first flush udviser first flush egenskaber. I alt 162 regnhændelser er vurderet. /4/

First flush definition	Number of events
40/20	15
80/30	0
Max-MV > 0.2	45
$b < 0.862$	91

Online turbiditetsmålinger, suspenderet stof og COD /12/

Over fire år har der i et separatloakeret opland i Chassieu i Frankrig været gennemført turbiditetsmålinger, som har resulteret i vurdering af 239 regnhændelser. Oplandet dækker et areal på 185 ha.

Databehandlingen inkluderede følgende:

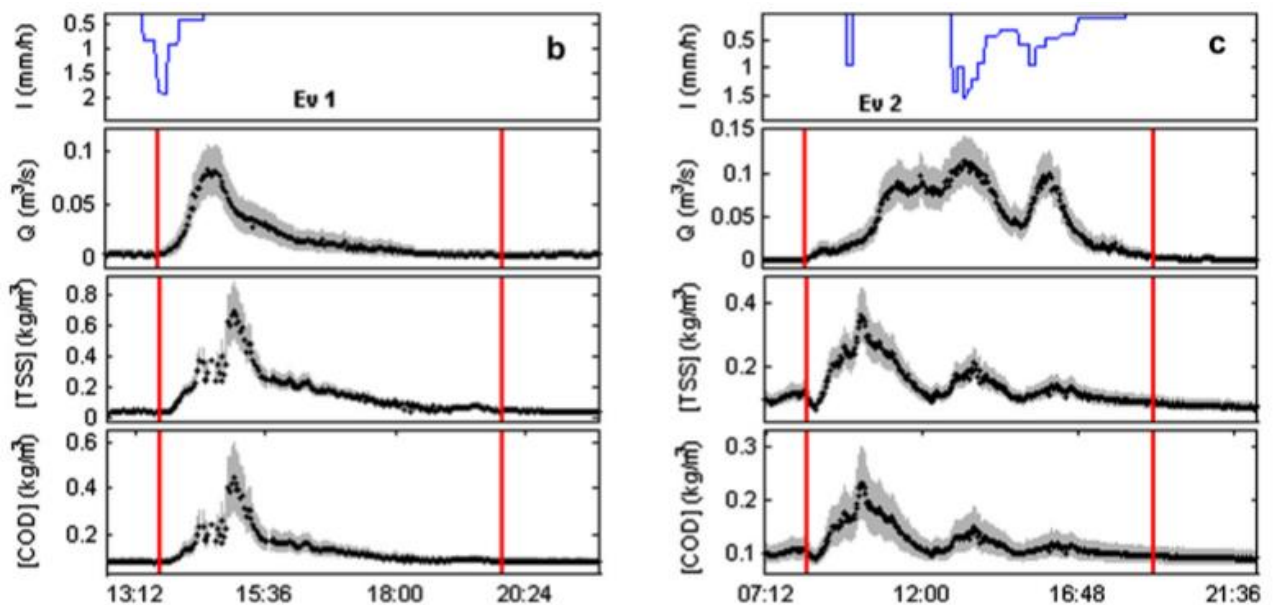
- En statistisk analyse af fordelingen af belastningen med SS og COD under regnhændelser samt beregning af de enkelte hændelsers middelkoncentration (EMC). Analysen viste, at EMC og stofbelastningerne tilnærmelsesvist er logaritmisk normalfordelt
- En undersøgelse af korrelationen mellem EMC/belastning og karakteristika for regnhændelsen, som ikke viste nogen klar korrelation til faktorer, der beskriver regnhændelsen, f.eks. det totale regnvolumen, mm regn, maksimal regnintensitet
- M(V) kurver, der beskriver massefordelingen inden for regnhændelsen. Massefordelingen blev klassificeret i tre kategorier.

Ud fra grafisk analyse af TSS og COD optegnet som M(V) kurver og sammenkædning med nedbørsdata samt flowmålinger er der opstillet tre typer af regnhændelser:

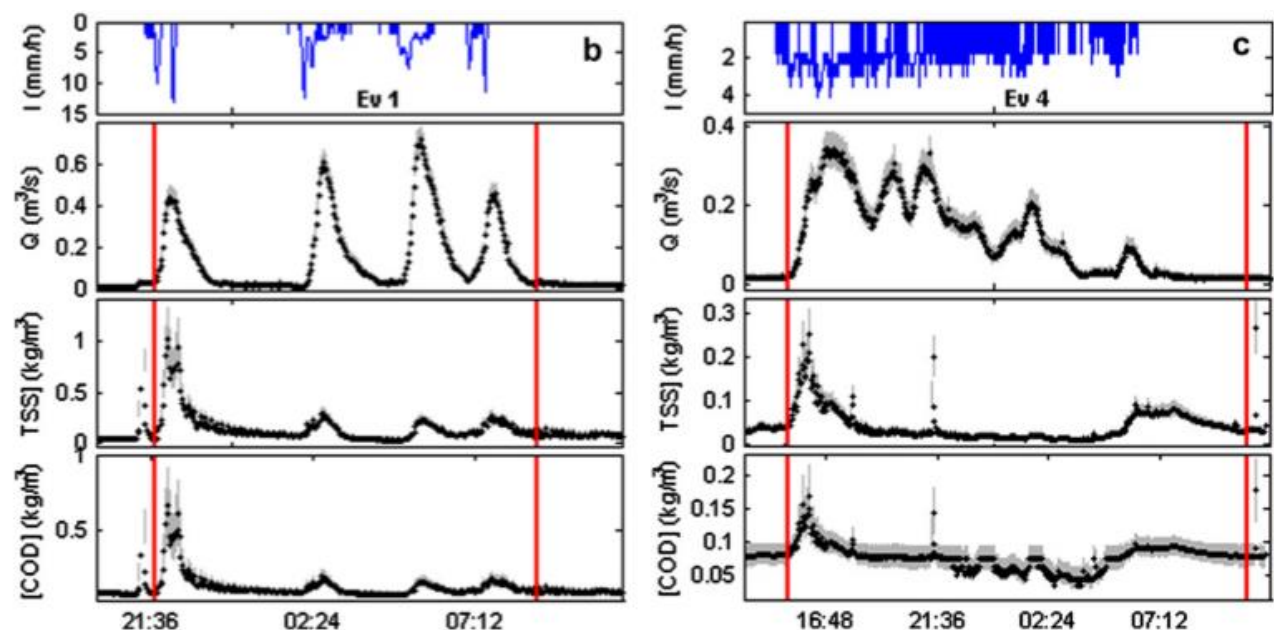
- Små regnhændelser, hvor dynamikken i stofkoncentrationer og flow tilnærmelsesvist følges ad
- Successive regnhændelser med flere flow peaks og peaks af stofkoncentrationer, der aftager og efterfølges af fortyndingseffekter
- Kraftige regnhændelser, hvor der indledningsvist opstår peaks med forhøjede stofkoncentrationer, som efterfølgende aftager, hvorefter fortyndingseffekten tager over.

I Figur 3-3 (b og c) ses en regnhændelse af den førstnævnte type. På grund af oplandets størrelse og placeringen af flowmåleren er det maksimale flow forsinket i forhold til tidspunktet for regnhændelsens maksimum. Toppen for TSS og COD koncentrationer er forskudt i forhold til maksimum for flow. I Figur 3-3 (c) ses det, at forøgelsen i stofkoncentration kommer lidt før forøgelsen i flow.

I Figur 3-4 ses successive regnhændelser med forøgelserne i stofkoncentrationerne efter den første regnhændelse. Efterfølgende udviser stofkoncentrationerne ikke samme dynamik som flowet. Forøgelsen i stofkoncentrationer forsvinder tilnærmelsesvist.

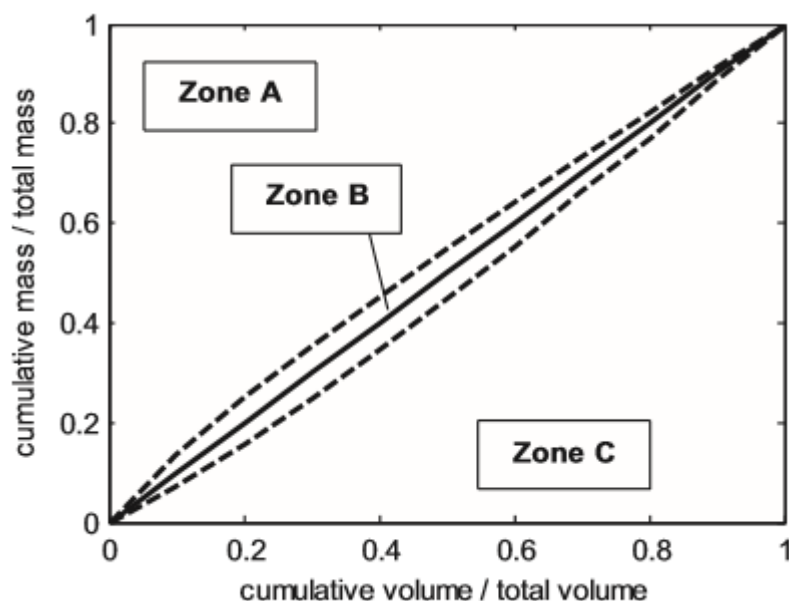


Figur 3-3: To små regnhændelser fra d. 3. og 4. marts (b) samt 5. og 6. marts 2005 (c) i det separatkloakerede opland Chassieu i Frankrig. I figuren er vist regnintensiteten (I), flow (Q) SS (TSS) og COD. De lodrette linjer viser start og slut på regnhændelserne. Den lysegrå markering viser 95% konfidensinterval.



Figur 3-4: Successive regnhændelser fra d. 29. og 30. maj (b) samt 5. og 6. juni 2008 (c) i det separatkloakerede opland Chassieu i Frankrig. I figuren er vist regnintensiteten (I), flow (Q) SS (TSS) og COD. De lodrette linjer viser start og slut på regnhændelserne. Den lysegrå markering viser 95% konfidensinterval.

M(V) kurver beskriver på samme måde som i 9/ og Figur 3-1 den relative akkumulerede masse af det forurenende stof (M) som funktion af det relative akkumulerede vandvolumen over hele nedbørshændelsen. I Figur 3-5 er M(V) kurverne klassificeret i tre zoner A, B og C.



Figur 3-5: Klassifikation af $M(V)$ kurver i tre zoner /12/.

- **Zone A** inkluderer hændelser, for hvilke det gælder, at fraktionen x af den totale hændelsesbelastning transporteres i en fraktion af det samlede vandvolumen, der er betydeligt mindre end x . Det betyder, at koncentrationen af forurenende stoffer bliver forhøjet svarende til, at der er en first flush effekt.
- I **Zone B** afviger andelen x af den totale forureningsmængde ikke fra andelen af det samlede vandvolumen for regnhændelsen. I den situation er first flush effekten minimal eller ikke eksisterende.
- **Zone C** inkluderer hændelser, hvor fraktionen af forurenende stoffer i relation til den samlede belastning transporteres i et relativt vandvolumen, der er større end x .

Denne simple klassifikation tillader en sammenligning af regnhændelser og oplande ud fra en praktisk orienteret synsvinkel i relation til realtidsskontrol af regnvandssystemer under regnhændelser.

De vigtigste konklusioner fra statistisk analyse og karakterisering af de mange regnhændelser ved $M(V)$ kurver i artiklen viser, at der er:

- Stor variation i resultaterne fra forskellige typer af oplande og regnhændelser
- Det er nødvendigt at udføre specifikke målinger i de enkelte oplandstyper
- Korrelationen mellem det totale vandvolumen under regnhændelsen og belastningen med SS og COD var god (højeste korrelationskoefficienter).

Der er i artiklen beskrevet en korrelationsanalyse af sammenhængen mellem traditionelle parametre til karakterisering af regnhændelser og belastning samt EMC. Der er kun få parametre til beskrivelse af regnhændelser, der korrelerer med stofbelastningen. Resultaterne fra /12/ er efterfølgende anvendt til at etablere regressionsmodeller med det formål at foreslå belastning og EMC for regnhændelser.

Tungmetalforurening /7/

Formålet med undersøgelsen beskrevet i artiklen var bl.a. at identificere nøgleparametre, der har indflydelse på størrelsen af first flush. I reference /2/ er som i andre artikler /5//6//8//9//12/ anvendt $M(V)$ kurver som udgangspunkt til at beskrive størrelsen af first flush. Indledningsvist er first flush defineret som en uforholdsmæssigt stor belastning med forurenende stoffer i løbet af den tidlige fase af en afstrømningshydrograf ($M(V)$).

First flush ratio FF_{25} er defineret som den totale forureningsbelastning transporteret af de første 25% af afstrømningsvolumen:

$$FF(25) = \frac{M(t)}{V(t)_{25}}$$

$M(t)$ = den normaliserede akkumulerede tungmetalbelastning (akkumuleret masse/samlet masse).

$V(t)_{25}$ = det normaliserede akkumulerede afstrømningsvolumen, når 25% af volumenet har passeret (akkumuleret volumen/samlet volumen). $FF(25) = 2$ svarer til, at 50% af mængden af forurenende stoffer vil være indeholdt i de første 25% af afstrømningsvolumenet

En variansanalyse (redundans) viste, at overfladetyper og karakteristika ved nedbørshændelsen har betydning for størrelsen af first flush effekten. Regnhændelser beskrives ved mm regn, regnintensitet samt længden af den forudgående tørvejrperiode. De nævnte parametre udgør 72,9% af variationen for first flush ratioen FF_{25} .

Fire nøgleparametre er identificeret som dem, der væsentligst påvirker størrelsen af first flush:

- Nedbørsmængden (mm)
- Regnintensiteten
- Den forudgående tørvejrperiode
- Overfladetyper

Endelig blev det konkluderet, at den relative størrelse af first flush for opløste metaller kunne rangordnes på følgende måde: Fe, Mn > Cu, Zn > Pb.

Afstrømning fra kobbertag /6/

First flush er defineret som den indledende periode af en regnhændelse, hvor koncentrationen af forurenende stoffer er betydeligt højere end i den efterfølgende periode. First flush er efterfølgende nærmere defineret på to alternative måder:

- 80% af stoffbelastningen afgives i 30% af den samlede vandmængde
- Stoffbelastningen i de første 25% af den samlede vandmængde

I denne undersøgelse er der tale om afstrømning fra en skrå tagflade, og derfor er karakteristika anderledes end for mere vandrette overflader.

Der er brugt den samme fremgangsmåde til beskrivelse af first flush effekten som i /2/ og /9/, hvor first flush koefficienten er et udtryk for størrelsen af first flush effekten. Når L afbildes mod F, og kurven ligger over diagonalen, er der en first flush effekt. Når kurven ligger under diagonalen, kan det være, fordi der ikke kan frigives korrosionsprodukter fra tagfladen, eller fordi regnen er så kraftig, at kontakttiden er for kort til, at vandet kommer i kontakt med tagfladen, så der frigives forurenende stoffer.

I en 18 måneders prøvetagningsperiode viste 40% af regnhændelserne moderate first flush effekter. I 37% af alle de regnhændelser, hvorfra der blev udtaget prøver, var der en moderat fortyndingseffekt.

Konklusionerne i denne artikel er væsentligt anderledes end i mange andre artikler, fordi undersøgelsesområdet er taget med en stejl hældning, hvilket giver andre afvaskningsforløb end for tilnærmelsesvist vandrette overflader. Eksempelvis fandt man ingen korrelation mellem first flush og parametre som regnintensitet, mm nedbør og længden af forudgående tørvejrperiode.

Afstrømning fra zinktag /10/

I en to-årig periode blev afvaskning fra et 14 år gammelt zinktag i Tyskland undersøgt. Den årlige afvaskningsrate for zink var 3,73 g/m², og den flowvægtede gennemsnitskoncentration var

4,9 mg/l. Den årlige nedbørsmængde i området er 868 mm. I 93% af de undersøgte regnhændelser blev first flush fænomenet observeret på baggrund af first flush koefficienter. Lav regnintensitet medførte højere zinkkoncentrationer. Varigheden af en forudgående tørvejrperiode kunne ikke direkte relateres til den indledende zinkkoncentration i en afstrømningshændelse.

Der blev anvendt samme prøvetagningsmetode som i /3/. Der blev målt zinkkoncentrationer på op til 30 mg/l i den indledende fase af en afstrømningshændelsen, hvorefter den flowvægtede middeldkoncentration faldt til ca. 5 mg/l. For størstedelens vedkommende befinder zink sig på opløst form. Ved lav regnintensitet stiger zinkafvaskningen. Ekstremt høje regnintensiteter (over 0,085 mm/min) resulterer i en fortyndingseffekt og i zinkkoncentrationer på under 1 mg/l.

Sæsonbestemt first flush /8/

Gennem analysing af regnvandsdata fra Californien fra perioderne 1999-2000 og 2002-2003 har man forsøgt at klarlægge fordelene ved at rense overfladeafstrømning først på sæsonen sammenlignet med sidst på sæsonen. Danmark har ikke på samme måde en lang tør sommer, hvor der sker opbygning af forurenende stoffer på overfladen. Her er varigheden af de tørre perioder kortere og den opbyggede forurening mindre, inden der sker afstrømning. I Californien efterfølges den tørre sommer af en våd vinter. Der er således tale om "sæsonpræget" first flush.

For at kunne bestemme den mulige fordel ved at behandle vandet tidligt på sæsonen frem for senere blev der defineret en effektivitetsfaktor som funktion af det akkumulerede afstrømningsvolumen:

$$E(V) = \frac{M(v)/v}{(1 - M(v))/(1 - v)}$$

- $E(V)$ = effektivitetsfaktor for et specifikt akkumuleret regnvandsvolumen V
- $M(v)$ er den normaliserede akkumulerede masse ved et specifikt normaliseret akkumuleret afstrømningsvolumen v

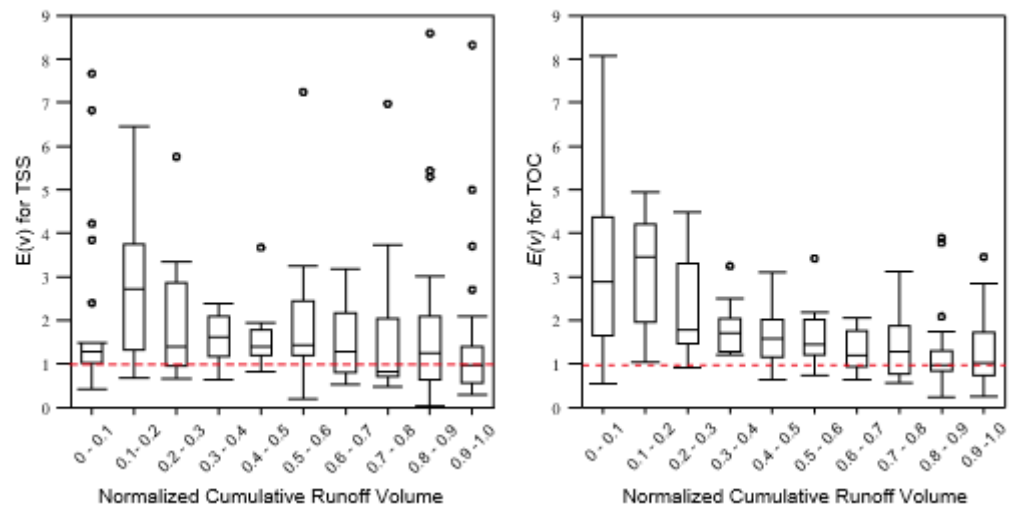
Effektivitetsparameteren er tænkt som et mål for den fordel, der er ved at behandle regnvandsafstrømning først på sæsonen frem for sidst på sæsonen.

På Figur 3-6 er vist effektivitetsfaktoren $E(V)$ for 10 intervaller af afstrømningsvolumener. Den stiplede linje ved 1,0 er den relative effektivitet, hvis forureningsparameteren er konstant over hele den våde periode, dvs. det tilfælde, hvor der ikke eksisterer en sæsonbestemt first flush.

For alle parametre gjaldt, at den relative effektivitet var højest i 10-20% intervallet af afstrømningsvolumenet. Eksempelvis var medianeffektivitet 3,5 for TOC ved 10-20% af afstrømningsvolumenet, hvilket betyder, at man ved at behandle de første 10-20% af vandet kan fjerne 3,5 gange flere forurenende stoffer i begyndelsen fremfor senere i en nedbørshændelse.

Metaller, der adsorberer til suspenderet stof, vil typisk følge den samme trend som suspenderet stof. Opløste metaller behøver derimod ikke en minimumsafstrømning for at blive mobiliseret, og dermed udviser de en høj grad af sæsonbestemt first flush. Svarende til danske forhold kan det betyde, at metaller efter en lang tørkeperiode vil kunne blive frigivet selv ved små regnskyl med lav intensitet. Erfaringen er, at hvis man er specielt bekymret for opløste metaller, er det værdifuldt at fastlægge styringsstrategierne efter at behandle/rense vand fra regnhændelser, der optræder efter lange tørvejrperioder.

En strategi, hvor afstrømningen renses først i en længere regnvejrperiode, kan ikke umiddelbart anvendes til danske forhold, men princippet om at lede regnvand i spildevandskloakken efter en tørvejrperiode på en vis længde kan godt fungere.



Figur 3-6: Effektivitetsfaktor $E(V)$ for regnvandsafstrømning fra en motorvej i Californien /8/.

Redefinering af first flush fænomenet /5/

I denne artikel bliver first flush fænomenet kvantificeret som det afstrømningsvolumen, der skal til for at reducere koncentrationen af forureningsparametrene til baggrunds niveauet. Den foreslåede metode til at opgøre afstrømningsvolumenet starter med at finde gennemsnitskoncentrationen for et givent "inkrement" (tilvækst) af et udledt volumen ved at bruge et antal "forureningsgrafer".

Ikke-parameterbetinget statistik benyttes til at etablere den karakteristiske forureningsgraf ved at poole statistisk forskellige afstrømningsinkremer. Det gør det muligt at identificere oplandets start- og baggrundsforureningskoncentration samt kvantificere first flush volumen og størrelsen.

I artiklens konklusioner står bl.a., at fremgangsmåden er lovende i forhold til at bestemme first flush volumen, dvs. det afstrømningsvolumen, som reducerer koncentrationen af forureningskomponenter til baggrunds niveauet, samt størrelsen af first flush beskrevet ved den statistiske sandsynlighed for henholdsvis den indledende koncentration og baggrundskoncentrationen. Til forskel fra de traditionelle metoder til beskrivelse af first flush (eksempelvis /1/) er denne metode knyttet til traditionelle statistiske værktøjer, som ikke er baseret på vilkårlige definitioner. Metoden er mere praktisk orienteret, men den er ikke fuldt udviklet, idet der mangler større indsigt i de faktorer, der karakteriserer first flush. Det pointeres, at det er vigtigt at få fastlagt netop dimensioneringen af behandlingssystemer til håndtering af first flush, idet der findes tommelfingerregler, der siger, at den første 0,5 inch (12,7 mm) nedbør skal behandles, eller 90% af vandmængden skal behandles. Ingen af delene er anvendelige i forhold til danske afstrømnings- og nedbørsforhold.

3.2 Sammenfatning – Karakterisering af first flush

Den mest simple definition af first flush er, at det er den første del af det udledte vandvolumen, og denne del indeholder hovedparten af mængden af forurenende stoffer. Denne definition er imidlertid upræcis, og derfor er der fremkommet mange alternative definitioner af first flush herunder:

- 80% af stoffbelastningen afgives i 30% af den samlede vandmængde
- 40% af mængden af forurenende stoffer er indeholdt i 20% af vandvolumenet
- 50% af mængden af forurenende stoffer er indeholdt i 55% af vandvolumenet
- Stoffbelastningen i de første 25% af den samlede vandmængde

Jo mindre skarpt afgrænset definition af first flush der anvendes, jo flere regnhændelser vil kunne karakteriseres som first flush hændelser.

Den hyppigst anvendte metode til karakterisering af first flush består i at opstille M(V)-kurver. Det vil sige kurver, der viser den akkumulerede stofbelastning i forhold til den samlede masse fra en nedbørshændelse (y-aksen), og forholdet mellem akkumuleret flow og det samlede flow. Herudfra kan størrelsen af first flush bestemmes.

Overfladetype og andre karakteristika som f.eks. mm regn, regnintensitet samt længden af den forudgående tørvejrperiode har for de fleste oplandstyper betydning for størrelsen af first flush effekten. For regnvandsafstrømning fra tagflader med en stejl hældning er situationen imidlertid en anden: Her vil regnvandet ikke indeholde større mængder forurenende stoffer efter en lang tørvejrperiode, og der ses ingen korrelation mellem størrelsen af first flush og høj regnintensitet og nedbørsmængden. Der er således forskel på first flush effekten ved afstrømning fra tage og ved afstrømning fra et opland med en svag hældning.

I Danmark er afstrømningsoplandene ofte betydeligt mindre end i udlandet, og dermed er first flush hyppigt større end den, der ses i udlandet. Det betyder også, at first flush effekten alt andet lige bedre kan udnyttes i reguleringsmæssig henseende til afledning af det mest forurenende regnvand til kloak og det mindre forurenede vand til vandområder.

De hyppigst anvendte analyseparametre til karakterisering af first flush er SS, COD og tungmetaller. For SS og COD er first flush effekten størst. Det er fordelagtigt at måle SS online som turbiditet frem for at udføre fraktioneret prøvetagning, der resulterer i et stort analysearbejde.

3.3 Moniteringsmetoder – parametre og stofbelastning

Måleprogrammer identificeret i den videnskabelige litteratur, og som har til formål at karakterisere first flush, er meget tidskrævende, hvis ikke målinger kan gennemføres online og med elektronisk dataoverførsel. Det betyder, at first flush gennemgående karakteriseres ved måling af turbiditet og flow. Turbiditeten kan via kalibreringskurver omsættes til koncentrationer af suspenderet stof. Temperatur, pH, ledningsevne målinger og flow kan måles og opsamles via online sensorer.

Parametre som COD, total-N, Total-P og tungmetaller kræver udtagning af vandprøver, der efterfølgende sendes til laboratorier. For at karakterisere first flush kræves eventuelt fraktioneret prøvetagning, og heraf følger et stort og omkostningsfuldt analysearbejde.

Dertil kommer indhentning af informationer om nedbørshændelserne, herunder mm nedbør, regnintensitet, varighed og forudgående tørvejrperiode. Disse informationer kan i Danmark indhentes via DMI's SVK målersystem (Spildevandskomiteens regnmålersystem) /16/, eller der kan opsættes en regnmåler i det afstrømningsopland, der ønskes karakteriseret. Der er i øjeblikket 145 SVK målestationer fordelt over hele landet.

3.3.1 Målemetoder anvendt til karakterisering af first flush

Nedenfor er refereret fra artikler, hvor fremgangsmåden for flowmåling, prøvetagning, analyseparametre og online måling af pH, temperatur, flow, ledningsevne og turbiditet er beskrevet.

I et separatkloakeret afstrømningsopland på 185 ha og en befæstelsesgrad på 0,72 blev der gennem flere år gennemført måleprogrammer af regnvandet. Case-området ligger nær Lyon i Frankrig, og det primære fokus i måleprogrammet var målinger af turbiditet og flow /4/. Formålet med målingerne var at vurdere langtidsudviklingen i regnvandskvaliteten. I datavurderingen indgik også M(V) kurver for suspenderet stof. Måleprogrammet inkluderede pH, temperatur,

flow, ledningsevne og turbiditet, som blev målt kontinuerligt i 2 minutters intervaller. Flowmålingen foregik ved hjælp af måling af vanddybden og –hastigheden i et kloakrør på 1,6 m i diameter, og her var loggeintervallet også 2 minutter. Regnmåleren leverede tidsserier af nedbørsmængden inden for 6 minutters intervaller. Vurdering af den samlede datamængde viste, at der skete udfald af dataopsamling for regnmålinger i 7,4% af tiden. Desuden manglede ca. 13% af flowmålingerne og ca. 30% af turbiditetsmålingerne, der alle blev udført i 2 minutters intervaller. Usikkerhed er uundgåelig ved målinger af hydrologiske faktorer og vandkvalitet. I den samlede usikkerhed indgår også usikkerhed på instrumentmålinger og kalibreringsusikkerhed. I 1/4/ lå den relative usikkerhed mellem 15 og 35% for flowmålinger, mens usikkerheden på bestemmelse af suspenderet stof var 10-20%

I måleprogrammet præsenteret i 1/9/ blev anvendt stikprøvetagning, hvor der eksempelvis blev udtaget 42 prøver over 2,2 timer og med prøvetagning i 3-5 minutters intervaller før peak flow og med 15-30 minutters intervaller efter peak flow. Flowet blev målt ud fra dybde og vandhastighed. I 1/7/ er beskrevet et måleprogram, hvor fokus var tungmetaller - herunder kobber, mangan, bly, zink og jern. Der blev undersøgt overfladeafstrømning fra tre typer overflader: tage med tagpap, en stærkt trafikeret vej og en p-plads. Formålet var at vurdere forureningen med opløste tungmetaller, tidsmæssige effekter af tungmetalforurening fra forskellige typer overflader samt at identificere nøgleparametre, der påvirker størrelsen af first flush (se side 12). Der blev manuelt udtaget stikprøver under regnhændelser med 2 minutters intervaller i de første 10 minutter, dernæst med 5 minutters intervaller i 20 minutter efterfulgt af 10 minutters intervaller i 30 minutter og endelig 15 minutters intervaller indtil afslutningen af regnhændelsen. I alt blev der udtaget 259 prøver fra forskellige regnhændelser til analyse.

Hovedformålet i dette studie 1/6/ var at identificere first flush effekten under overfladeafstrømning fra fire kobbertage (i alt 5.100 m²) i München. Der var fire prøvetagningssteder knyttet til fire separate tagflader. Der blev udført flowproportional automatisk prøvetagning med magnetisk induktive flowmålere samt online dataopsamling (datalogning med 20 sek. interval). Prøvetagningen begyndte, når flowet havde ligget på 1 l/min i 60 sek. Prøvetagningen stoppede igen, når flowet havde været under 0,6 l/min i 60 sek. Prøveoptageren havde 12 flasker hver med et volumen på 2,5 l. I løbet af denne to-trins prøvetagningsprocedure blev der opsamlet 500 ml. Med en prøvetagningsperiode på 2 min. og udtagning af fire prøver i hver flaske var det muligt at prøvetage over lang tid, inden prøvebeholderne var fyldt op.

Reference 1/8/ indeholder data fra karakterisering af overfladeafstrømning fra motorveje. Prøvetagningen foregik ved, at der i løbet af den første time blev udtaget stikprøver med 15 minutters mellemrum og derefter stikprøver med 1 times mellemrum i op til 8 timer. Desuden blev et antal prøver udtaget flowproportionalt med en automatisk prøveoptager. I reference 1/8/, hvor der er behandlet en stor mængde regnvandsdata, blev det konkluderet, at der er forskel på mængden af partikelbundne metaller i stikprøver sammenlignet med mængden i prøver udtaget som delprøver med en automatisk prøveoptager.

Følgende monitoringsmetoder anvendes typisk i forbindelse med karakterisering af first flush:

- Flowmåling baseret på måling af vandhastighed og –dybde samt logning med varierende frekvens
- Manuelt udtaget stikprøver med varierende frekvens
- Automatisk flowproportional prøvetagning med varierende start- og stopkriterier
- Online måling af parametre som f.eks. turbiditet, pH, ledningsevne, temperatur.

Følgende analyseparametre indgår hyppigt i måleprogrammer:

- Suspenderet stof (TSS)
- Metaller (Cu, Pb, Zn, Fe)
- COD, BOD, TOC, DO
- Total-N, TKN, Total-P, PO₄-P, NH₄-N, NO₃-N
- Heptan ekstraherede stoffer
- Hårdhed

- Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , F^-
- Mikrobiologiske parametre

I rapporten "Bobleprojekt – First flush og hverdagsregn", der beskriver monitoringsfaciliteter og et måleprogram for testanlæg med filtermuld /17/, er der refereret til udstyr og metoder, der kan benyttes til flowmåling, automatisk prøvetagning samt turbiditets-, ledningsevne- og nedbørsmåling. Desuden er der i rapporten givet anbefalinger til dataopsamling og datahåndtering.

4 Regulering af regnvandsstrøm ved vandbremsere

Ekstreme regnhændelser er ofte karakteriseret ved at være kortvarige og meget lokale, og det er ofte kun i korte perioder, at regnvandsledninger bliver fuldtløbende, og hvor der er behov for at lede regnvandet ad andre veje end den primære. Hyppigheden af hydraulisk overbelastning af regnvandssystemer forventes imidlertid at stige som følge af klimaændringer.

Vandbremsere anvendes typisk til at regulere vandstrømme, hvor regnvand er blandet op med overløb fra kloakker. I disse situationer er formålet med vandbremsen at beskytte nedstrøms beliggende kloaksystemer mod overløb ved kun at tillade et forud fastlagt maksimum flow og omdirigere det overskydende flow til eksempelvis et opmagasineringsbassin. Når belastningen af kloaksystemet er faldet, kan vandet fra opmagasineringsbassinet ledes tilbage til kloaksystemet.

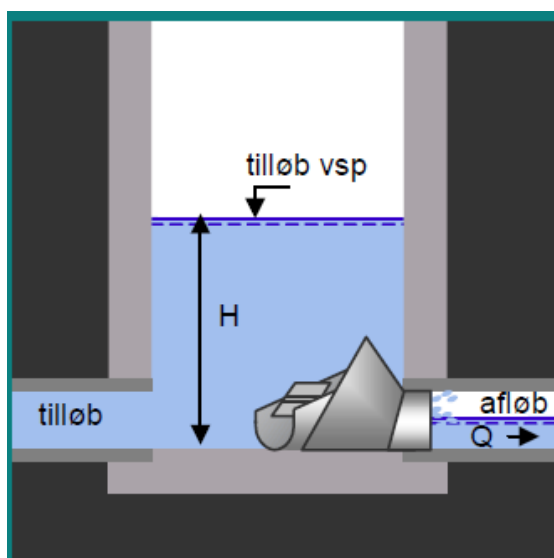
I Københavns Kommune anvendes vandbremsere også i separate regnvandsledninger i eksempelvis kvarteret omkring Tordenskjoldsgade, hvor regnvandet i forbindelse med hverdagsregn ledes til kloaksystemet og videre til Renseanlæg Lynetten. Hvis regnvandsflowet overstiger kapaciteten i kloakledningen, vil en vandbremse placeret i brønden, der har forbindelse til kloaksystemet, sikre, at flowet ikke overstiger kapaciteten i kloakledningen, og det overskydende regnvand vil blive udledt til Københavns Havn.

Som det er beskrevet tidligere, vil Københavns Kommune og HOFOR gerne reducere den hydrauliske belastning af kloaksystemerne og belastningen på renseanlæggene gennem anvendelse af vandbremsere, som omdirigerer regnvand med lav forureningsgrad til Københavns Havn. For at vurdere, om dette er en mulighed, er her beskrevet, hvilke typer af vandbremsere der findes, og hvordan de kan indgå i reguleringen af regnvandsstrømme.

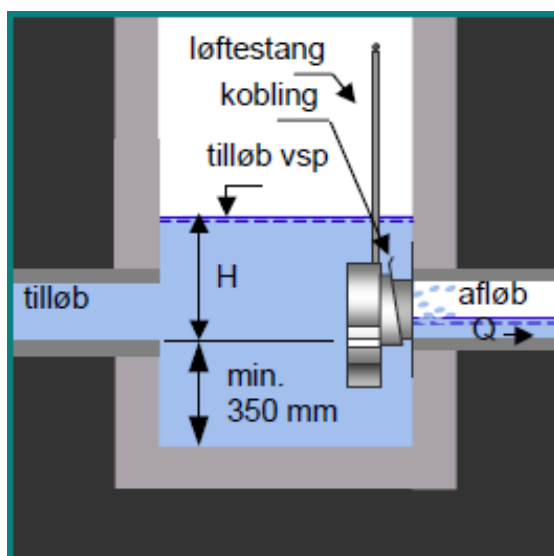
Denne form for regulering skal ses som et alternativ til rensning af regnvand tæt ved udledningspunktet. Hvis first flush effekten udnyttes ved indstilling af vandbremsere, kan der muligvis opnås en begrænset miljømæssig effekt. Den største miljømæssige effekt forventes opnået ved udvikling af vandbremsere, der kan reguleres ud fra sammenhørende målinger af flow og turbiditet.

Vandbremsere findes i to hovedtyper - hvirvelbremsere, der i hovedsagen bremser ved hjælp af centrifugalkraft, og dem, der bremser uden. Her forklares, hvordan hvirvelbremsere bremser ved hjælp af centrifugalkraft, hvilket er eksemplificeret med cyklonbremsen. I Figur 4-1, Figur 4-2 og Figur 4-3 er vist tre typer af hvirvelbremsere:

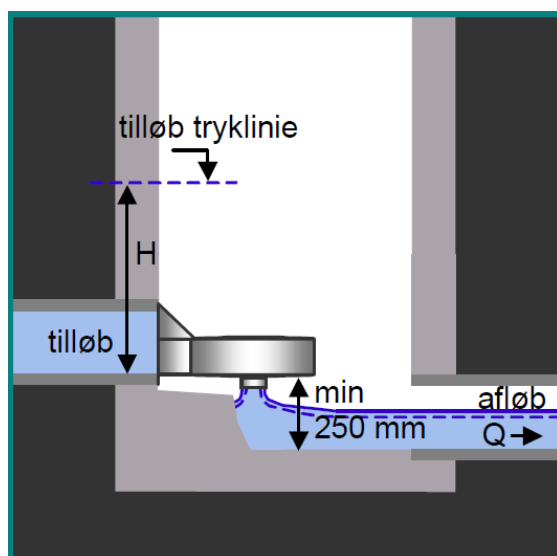
- Cyklonbremse (CYE)
- Centrifugalbremse-vertikal (CEV)
- Centrifugalbremse-horisontal (CEH)



Figur 4-1: Cyklonbremsen (CYE) /13/.



Figur 4-2: Vertikal centrifugalbremse (CEV) /13/.



Figur 4-3: Horizontal centrifugalbremse /13/.

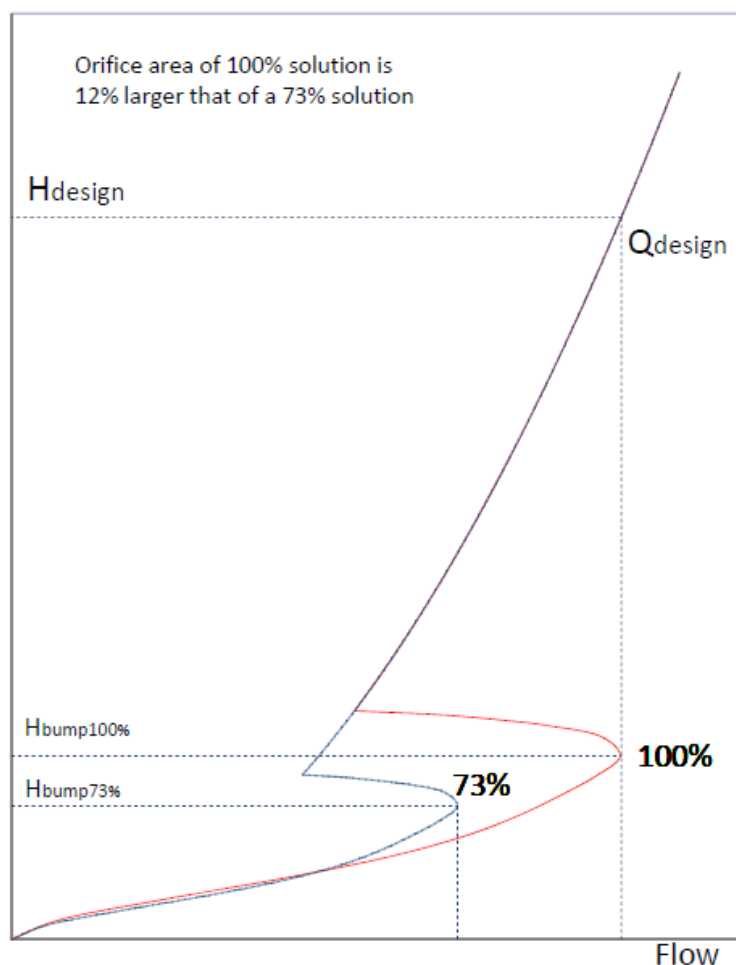
I en normal regnvejrssituation, hvor en lille vandmængde løber i kloakledningen, står vandspejlet under toppen af indløbsåbningen til vandbremsen, og der sker ingen opbremsning af vandet.

Under regn forøges regnvandsmængden, og vandet stiger foran regulatoren. Når vandet når op over toppen af indløbsåbningen - men stadig er under toppen af hvirvelkammeret – spærres luft inde i kammeret, og vandets strømningstværsnit indsnævres. Den øgede modstand reducerer den vandmængde, der kan løbe igennem regulatoren (Figur 4-1).

Når vandet stiger op over toppen af regulatoren, får trykket vandet i regulatoren til at rotere. Luften optager en del af udløbets tværsnitsareal, og vandet roterer hurtigere mod regulatorspidsens udløb. Resultatet er et tryktab og en passende modstand mod gennemløbet.

Vandstanden i brønden falder efterhånden til under toppen af vandbremsen, og med det aftagende tryk kollapser hvirvlen. Den erstattes af luft, der med nogen forsinkelse suges ind i regulatoren, som derfor først normaliserer sin funktion, når vandstanden er lidt under det niveau, hvor dannelsen af den bremsende hvirvel startede.

Når hvirvlen ophører, forøges flowet gennem vandbremsen, hvorved eventuelle aflejringer opstrøms spules med ud. Et typisk forløb af en vandbremse er præsenteret i Figur 4-4, der viser H som funktion af flowet.



Figur 4-4: Grafisk præsentation af hvirveeffekten på udløbsflowet, når vandbremsen arbejder ved henholdsvis 73% og 100% effektivitet, og indløbsflowet til en brønd er større end udløbsflowet.

Cyklonbremser kan monteres med en justerbar indløbsblænde. Indløbsblænden kan reguleres trinløst til eksempelvis $\pm 25\%$ af kapaciteten i midterstilling. Indstillingsintervallet vil variere afhængigt af vandbremsens maksimale kapacitet.

De nuværende modeller af vandbremser kan benyttes til at kontrollere og regulere regnvand, så f.eks. det første og mest forurenede regnvand ledes til kloaksystemet, mens store og mindre forurenede regnvandsmængder senere under en nedbørshændelse kan udledes til vandområder eller opmagasineres, indtil der er plads i afløbssystemet.

Cyklonbremser kan anvendes til regulering af alle vandføringer, undtagen de helt små – dvs. vandføringer mellem 8 og 600 l/s. Udformningen af regulatoren er dog lidt forskellig afhængigt af flowet. Cyklonbremsen fungerer ved hjælp af gravitation og er designet, så der opnås maksimal selvrensning.

Cyklonbremser kan indbygges i eksisterende brønde uden højdetab. De almindeligste størrelser kan passere et brønddæksel og er anvendelige både ved nye anlæg og ved reguleringer i eksisterende systemer.

Centrifugalbremsens gennemløbsåbning er større end cyklonbremsens, og det giver i den situation en mindre risiko for tilstopningsproblemer, så her er centrifugalbremsetypen mest hensigtsmæssig. Der findes to hovedtyper af centrifugalbremser: Horisontal, som benyttes til spildevand, og vertikal, som benyttes til regnvand. Designet af centrifugalbremserne adskiller sig fra cyklonbremserne, men funktionen er i princippet den samme.

Den vertikale centrifugalbremse kan monteres i en brønd med sandfang og i forbindelse med afløb fra forsinkelsesbassiner og bygværker m.m. Den vertikale centrifugalbremse anvendes til regulering af små og moderate vandmængder, og den findes i forskellige størrelser og kan regulere fra ca. 0,2 l/s til 80 l/s.

Den horisontale centrifugalbremse monteres normalt på tilløbet i en brønd i forbindelse med afløb fra bassiner og overfaldsbygværker og anvendes til regulering af små og moderate vandmængder (4-30 l/s). Horisontale centrifugalbremsere bliver kun brugt i specielle tilfælde og er ikke almindelige i Danmark.

I Tabel 4.1 er karakteristika for vandbremsere sammenfattet i forhold til dimensioner, funktion, fordele, ulemper og økonomi.

Tabel 4.1: Sammenfatning af karakteristika for vandbremsere.

Karakteristika for vandbremsere	
Dimensioner og kapacitet	Centrifugalbremse (0,2-80 l/s) eller cyklonbremse (10-600 l/s) sikrer konstant vandføring - selv ved stort interval af trykhøjder. Tværsnit >200 mm.
Funktion	Kan benyttes til at regulere tilførslen af regnvand til renseanlæg/recipient. Fungerer som et alternativ til drosselledninger og spjæld. Ingen renseeffekt, men kan anvendes til sikring af, at first flush ledes til renseanlæg. Sikring mod oversvømmelser nedstrøms bremsen.
Kombineres med	Kombineres typisk med regnvandssystemer med udløb til vandområder og kontrol af den hydrauliske belastning.
Fordele	Vandbremsere giver mulighed for, at der maksimalt kan passere en fast begrænset vandmængde på et udvalgt sted. Mulighed for spuling af vandbremse.
Økonomi	Anskaffelsespris: 12.000-35.000 kr.
Ulemper	Der kan være behov for spuling af vandbremsen

4.1 Anvendelse af vandbremsere til regnvandsregulering

Når der gives tilladelse til udledning af overfladeafstrømning fra befæstede arealer, skal det ske ved anvendelse af den kombinerede metode. Det betyder konkret, at der skal stilles krav om anvendelse af bedst tilgængelig teknik (BAT), og hvis ikke anvendelse af BAT er tilstrækkelig til at opfylde miljømål i henhold til vandplaner og miljøkvalitetskrav i BEK 439 af 19/05/2016, skal der stilles vilkår i den enkelte tilladelse.

Vandbremsere kan anvendes som en BAT-løsning, hvis det kan godtgøres – f.eks. gennem et måleprogram - at kvaliteten af den udledte vandstrøm er tilstrækkelig god til at sikre miljømålet for vandområdet.

Som beskrevet ovenfor er vandbremsen primært konstrueret for at beskytte nedstrøms beliggende kloaksystemer ved at tillade et forud fastsat maksimalt flow at passere vandbremsen. Anvendelse af vandbremsen til intelligent regulering under first flush vil kræve, at reguleringen også baserer sig på stofbelastningen målt ved parametre som eksempelvis turbiditet/suspenderet stof. Mosbæk A/S, der er leverandør af mange typer vandbremsere, er ikke bekendt med, at der findes vandbremsere med mulighed for intelligent styring /18/.

Ved litteratursøgningen er der ikke fundet beskrivelser af intelligent styring af vandbremses/flow regulatorer, hvor realtidsmålinger af turbiditet indgår i reguleringen. I første omgang kunne en simpel regulering bestå i fast indstilling af vandbremsen baseret på måling af sammenhørende værdier af flow og turbiditet for et velbeskrevet opland. Ud fra erfaringsopsamlingen opstilles efterfølgende forslag til indstillinger af vandbremsen, der tillader forskellige størrelser af flow at passere til kloakken. Under regnhændelser måles flow og turbiditet før brønden, hvor vandbremsen sidder, og i regnvandet, der passerer til vandområdet (eller til kloak).

5 Måleprogram for first flush

5.1 2-trins måleprogram

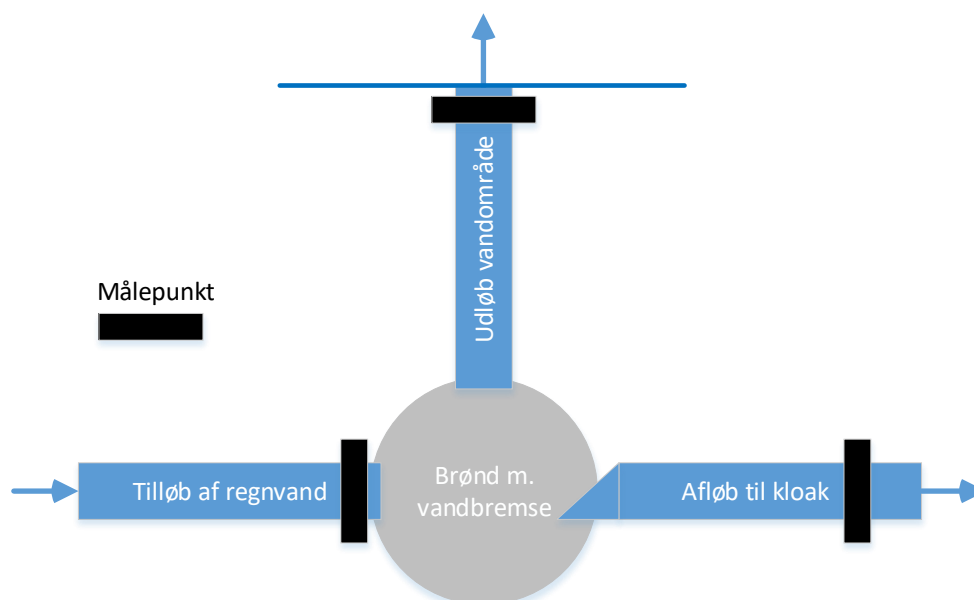
Overordnet set foreslås det at inddele måleprogrammet til karakterisering af first flush i fire trin, hvor de to første trin alene består af online målinger og de to sidste inkluderer automatisk prøvetagning og kemiske analyser. Figur 5-1 viser en skitse af tilløb og afløb fra en brønd med en vandbremse. Målepunkterne på figuren er beskrevet nedenfor.

- **1A:** I dette trin etableres erfaringer med måling af sammenhørende værdier af flow- og turbiditet samt kalibrering mellem turbiditet og suspenderet stof. Desuden opnås erfaring med dataopsamling og overførsel. Data anvendes til at opstille $M(V)$ kurver (se afs. 3.1) og fastlægge kriterier (flow og turbiditet) for afledning til vandområder
- **1B:** I dette trin suppleres med online målinger på udløbssiden til vandområdet. Regnvandet karakteriseres med hensyn til flow og turbiditet. Dermed kan der opstilles en simpel massebalance for fordelingen af stof og vand mellem kloak og vandområde. Det ideelle ville være også at udføre flow- og turbiditetsmåling i afløbet til kloak. Desuden kan der eventuelt udføres målinger, hvor vandbremsen indstilles til forskellige maksimum flow. Herefter opstilles massebalancer for vand og suspenderet stof (tilløb/kloak/vandområde) for forskellige driftssituationer.
- **2A:** I dette trin opstilles en automatisk prøveoptager i tilløbet til brønden med vandbremsen. Dette trin kan eventuelt springes over, og man kan gå direkte til trin 2B, så der straks etableres to prøvetagningssteder (før vandbremse og i udløb til vandområdet). Der opsamles vandprøver til kemisk analyse for tungmetaller, COD og næringssalte. Den automatiske prøvetagning bør gennemføres som fraktioneret prøvetagning med udtagning af delprøver efter et forud fastlagt regnvandsvolumen. Dette vil kræve en del erfaring vedrørende flow ved forskellige regnhændelser. Målet er at sammenkæde turbiditetsmålingerne med stoffbelastningen for de nævnte parametre.
- **2B:** Dette trin inkluderer som tidligere nævnt fraktioneret prøvetagning i udløbet til vandområdet samt kemiske analyser. Dette vil muliggøre opstilling af en massebalance for stoffordelingen mellem kloak og vandområdet.

I Tabel 5.1 er vist en oversigt over målesteder, online parametre og analyseparametre samt nødvendigt udstyr til karakterisering af first flush.

Tabel 5.1: Oversigt over fire trin i et måleprogram for first flush.

Program-trin	Målesteder	Parametre	Udstyr
1A Online målinger	I regnvandsledning, der fører til brønd, hvor vandbremsen sidder.	Online flow, turbiditet, nedbørsmåling samt eventuelt ledningsevne, temperatur og pH. Kalibrering mellem turbiditet og suspenderet stof.	Flowmåler, turbiditetsmåler, nedbørsmåler samt udstyr til dataopsamling og –overførsel.
1B Online målinger inkl. massebalance	I regnvandsledning, der fører til brønd, hvor vandbremsen sidder, samt i udløbet til vandområdet.	Online flow, turbiditet, nedbørsmåling samt eventuelt ledningsevne, temperatur og pH. Kalibrering mellem turbiditet og suspenderet stof i udløbet til vandområdet.	Flowmåler, turbiditetsmåler (to steder), nedbørsmåler samt udstyr til dataopsamling og –overførsel.
2A Online målinger Automatisk flowproportional prøveudtagning	I regnvandsledning, der fører til brønd, hvor vandbremsen sidder.	Online flow, turbiditet, nedbørsmåling samt eventuelt ledningsevne, temperatur og pH. Analyseparametre: SS, tungmetaller (total og filtreret), COD, Total-N og Total-P.	Flowmåler, turbiditetsmåler, nedbørsmåler samt udstyr til dataopsamling og –overførsel. Automatisk prøveoptager.
2B Online målinger Automatisk flowproportional prøveudtagning inkl. massebalance	I regnvandsledning, der fører til brønd, hvor vandbremsen sidder, og i udløbet til vandområdet.	Online flow, turbiditet, nedbørsmåling samt eventuelt ledningsevne, temperatur og pH. Analyseparametre: SS, tungmetaller (total og filtreret), COD, Total-N og Total-P.	Flowmåler, turbiditetsmåler (to steder), nedbørsmåler samt udstyr til dataopsamling og –overførsel. Automatisk prøveoptager (to steder).



Figur 5-1: Skitse med tilløb og afløb fra brønd med vandbremse. De ideelle målepunkter er indtegnet.

5.1.1 Karakterisering af afstrømningsoplandet

Det reducerede areal bestemmes bedst ved sammenhørende målinger af afstrømning og nedbør. Men da dette sjældent er muligt, beregnes arealet i praksis oftest ud fra erfaringsværdier for den hydrologiske reduktionsfaktor og opmålinger af det befæstede areal.

Det reducerede areal kan fastsættes ud fra nedenstående relation:

$$A_{\text{red}} = \Phi \cdot \beta \cdot A_{\text{total}}, \text{ hvor}$$

Φ er afløbskoefficienten (eller den hydrologiske reduktionsfaktor)

β er befæstelsesgraden

A_{total} er det samlede oplandsareal

Den anvendte metode afhænger af analysens formål, se eventuelt anbefalingerne i/19/. Typiske befæstelsesgrader for forskellige oplandsområder er:

- Butiksområder: Ca. 0,80-0,90
- Tæt, lavt/højt byggeri, f.eks. etageboliger: Ca. 0,50-0,75
- Erhvervsområder: Ca. 0,60-0,75
- Åbent, lavt byggeri, f.eks. parcelhusområder: Ca. 0,35-0,50

Afløbskoefficienten eller den hydrologiske reduktionsfaktor for befæstede arealer afspejler, at befæstede flader i en vis udstrækning er permeable. F.eks. giver fortove og brostensbelægninger mulighed for, at en del af afstrømningen nedsiver i jorden, hvorved afstrømningen reduceres.

Afløbskoefficienten (ϕ) kan fastsættes ud fra retningslinjerne i /19/:

- 1,0 for tagflader og tætte terrænelægninger, f.eks. af asfalt, beton eller belægninger med tætte fuger
- 0,8 for belægninger med grus- eller græsfuger
- 0,6 for grusbelægninger
- 0,1 for havearealer og arealer uden belægning

5.1.2 Indretning af prøvetagningssted

I rapporten om monitorering af hverdagsregn og first flush /17/ findes detaljerede beskrivelser af, hvordan et måle- og prøvetagningssted skal være indrettet for at opnå troværdige målinger af nedbør, flow og turbiditet samt udtagning af repræsentative prøver til analyse.

Prisen for etablering af en flowmåler, turbiditetsmåler, nedbørsmåler, prøvetager samt udstyr til dataopsamling og overførsel af data vurderes at være i størrelsesordenen 100.000 kr. Dertil kommer udgifter til opsætning og test. Prisen vil afhænge af målestedets indretning, om der er permanent strømforsyning, eller der skal anvendes batterier, og om udstyret f.eks. skal placeres i et målerskab for at beskytte mod hærværk, eller måleudstyret kan placeres i brønden. Her er det nødvendigt at kontakte en leverandør, der kan rådgive om mulighederne. Dataopsamlingen kan enten ske ved overførsel i realtid eller ved batchvis overførsel.

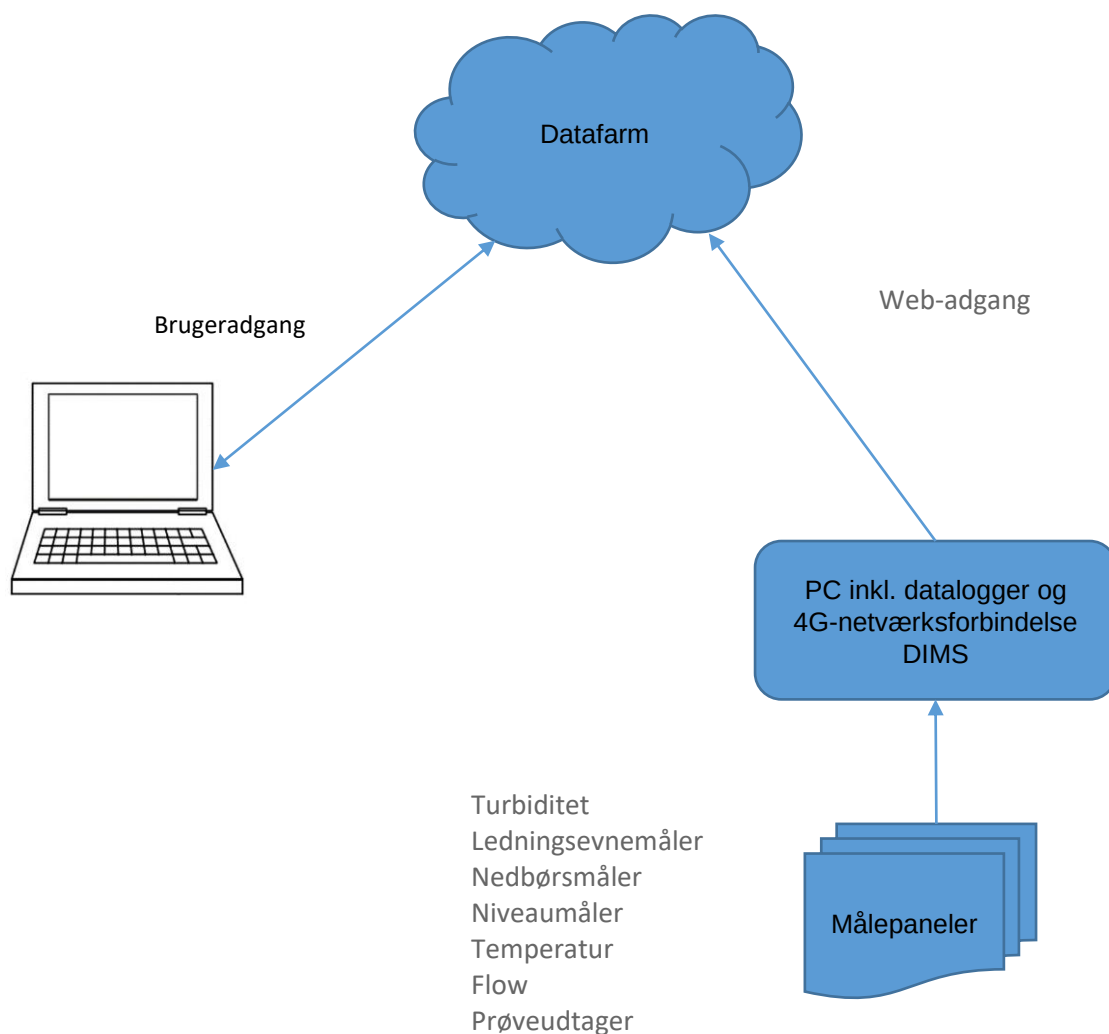
5.1.3 Dataopsamling

I tilknytning til målestedet - eventuelt i en målestation - etableres et dataopsamlings- og datahåndteringssystem for realtidsmålinger fra flowmålere, prøveudtagere og turbiditetsmålere.

I praksis kan man installere en lille DIMS database (DIMS = data integrationssystem) lokalt på en PC i målestationen, eksempelvis en NUC (kraftig minicomputer). Denne sender så data op i

skyen til datafarmen, hvor data også lægges i en DIMS database. DIMS er et system til datahåndtering i realtid samt til databearbejdning.

Fra bruger-PC'en kan der enten være adgang til data via en DIMS klient (hvor der er fuld mulighed for at anvende funktioner i DIMS), eller der kan laves en adgang via en browser. I så fald er der dog kun adgang til at se de data, man har valgt at gøre tilgængelige. Derefter kan man gemme data i Excel på egen PC, hvis man skal arbejde videre med dem. DIMS vil være installeret på NUC'en og kan også lægges på bruger-PC'en.



Figur 5-2: Systemoversigt for datahåndtering.

5.1.4 Måleperiode

I måleprogrammerne beskrevet i referencerne nævnt i kapitel 3 er der gennemgående opsamlet data om first flush over to år eller mere. Disse langvarige måleperioder er nødvendig for at opnå tilstrækkeligt med data til at kunne fastlægge, hvilke nedbørssituationer der kan karakteriseres

som first flush. Desuden er det nødvendigt med et solidt datagrundlag om forholdet mellem belastningen til kloak og til vandområdet i forskellige nedbørssituationer (regnintensitet, -mængde, varighed) og om driftssituationer for vandbremsen for at kunne opstille retningslinjer for indstilling af vandbremsen. Udvikling af vandbremsen/regulatorer, der kan styres intelligent ud fra flow og turbiditet, vil kunne forbedre reguleringen af forurenede regnvandsstrømme. Der bør som minimum gennemføres målinger over et år.

5.1.5 Databearbejdning og erfaringsopsamling

Efter en indkøringsperiode med test af turbiditets-, flow- og nedbørsmåler samt dataopsamling og overførsel iværksættes en testperiode på minimum tre måneder med dataopsamling under varierende nedbørshændelser (mm nedbør, intensitet og varighed) og situationer, hvor vandbremsen træder i funktion. First flush kvantificeres ud fra M(V) kurver for hver af de valgte måle/analyseparametre (turbiditet, COD, tungmetaller m.fl.).

6 Konklusioner og anbefalinger

Formålet med projektet har været at afklare, hvad der skal til for at dokumentere, om fraseparation af first flush ved hjælp af vandbremsere kan sidestilles med BAT, og om metoden kan anvendes i separate regnvandssystemer til at begrænse udledningen af det mest forurenede vand fra overfladeafstrømning.

Baseret på gennemgang af internationale videnskabelige artikler om first flush er der i rapporten beskrevet tre hovedemner:

- Metode til analyse af first flush
- Vandbremsere til regulering af regnvandsstrømme
- Måleprogram til karakterisering af first flush

Konklusioner og anbefalinger er relateret til disse tre emner.

First flush

First flush defineres – i sin mest simple form - som den første del af et udledt vandvolumen, der indeholder hovedparten af mængden af forurenende stoffer. Der findes flere og mere afgrænsede definitioner af first flush som f.eks., at de første 30% af vandmængden indeholder 80% af stofbelastningen. Jo mindre skarpt afgrænset definition af first flush er, jo flere regnhændelser vil kunne karakteriseres som first flush hændelser.

Litteraturgennemgangen viste, at ud over beskrivelser og kvalitativ bestemmelse af first flush er den mest anvendte metode til analyse af first flush udarbejdelse af $M(V)$ kurver, der viser den akkumulerede stofbelastning i forhold til den samlede masse fra en nedbørshændelse (y-aksen) og forholdet mellem akkumuleret flow og det samlede flow. Vinkelhalveringslinjen (45° linjen) på en figur med $M(V)$ kurver repræsenterer den situation, hvor koncentrationen af forurenende stoffer er konstant under regnhændelsen. First flush er repræsenteret ved data, der ligger over 45° linjen, og datapunkter under linjen repræsenterer situationen, hvor der er sket en fortynding af forurenende stoffer. Den maksimale afstand fra vinkelhalveringslinjen til kurven, der ligger ovenover, er et udtryk for størrelsen af first flush.

Regnhændelser kan overordnet set inddeles i tre kategorier:

1. Små regnhændelser, hvor dynamikken i stofkoncentrationer og flow tilnærmelsesvist følges ad
2. Successive regnhændelser med flere efter hinanden følgende flow peaks og peaks af stofkoncentrationer. Peaks forsvinder efterhånden og efterfølges af fortyndingseffekter
3. Kraftige regnhændelser, hvor der indledningsvist opstår peaks med forhøjede stofkoncentrationer, som efterfølgende aftager, hvorefter fortyndingseffekten tager over.

Ved regnhændelserne beskrevet under punkt 1 er der ingen first flush effekt, mens der i de to andre situationer vil være en større eller mindre first flush effekt, der kan udnyttes til at regulere regnvandsstrømme, så den første og mest forurenede del ledes til kloak og den efterfølgende til et vandområde.

Vandbremse

Vandbremsen er primært konstrueret for at beskytte nedstrøms beliggende kloaksystemer ved at tillade et forud fastsat maksimalt flow at passere.

I første omgang kan en simpel regulering bestå i fast indstilling af vandbremsen baseret på måling af sammenhørende værdier af flow og turbiditet for et velbeskrevet opland. Ud fra erfaringsopsamlingen opstilles efterfølgende forslag til indstillinger af vandbremsen, der tillader forskellige størrelser af flow at passere til kloakken, og som samtidig sikrer en tilstrækkeligt god kvalitet af vandet, der udledes til vandområdet.

Anvendelse af vandbremsen til intelligent regulering under first flush vil kræve, at reguleringen også baserer sig på stofbelastningen målt ved parametre som eksempelvis turbiditet/suspenderet stof og flow.

Måleprogram

Formålet med måleprogrammer for first flush i en brønd, hvor der er installeret en vandbremse, er at kvantificere størrelsen af first flush, fastlægge stofbelastningen i vandet, der udledes til vandområdet, og sammenligne med stofmængden, der ledes til kloak. Det maksimale flow til kloak kan reguleres ved indstilling af vandvandbremsen.

Forslaget til et måleprogrammet er inddelt i fire trin, hvor de to første trin alene består i online målinger, mens de to sidste inkluderer automatisk prøvetagning og kemiske analyser. Målingerne omfatter tilløb og to afløb fra brønden (til kloak og til vandområde).

Flow, turbiditet, nedbørsmåling og eventuelt ledningsevne er alle parametre, der kan gennemføres som online målinger med automatisk dataopsamling f.eks. med to minutters intervaller. For at reducere omkostninger til udstyr kan man i første omgang vælge kun at udføre online målinger. De hyppigst valgte parametre til karakterisering af first flush er suspenderet stof, tungmetaller (total og filtreret), COD, Total-N og Total-P. Suspenderet stof og COD er de parametre med den største first flush effekt. De nævnte analyseparametre kræver flowproportional fraktioneret prøvetagning.

6.1 Anbefalinger

Ved litteratursøgning blev der ikke identificeret måleprogrammer, hvori der indgik vandbremsen til regulering af regnvandsstrømme. Et måleprogram vil kunne dokumentere størrelsen af first flush og fordelingen af vand- og stofmængde mellem udløb til kloak og udløb til et vandområde. Som minimum anbefales målemåleprogrammet at omfatte følgende aktiviteter:

- Online måling og dataopsamling af flow og turbiditet i tilløb til regnvandsbrønd med vandbremse og i afløbet til kloak
- Kalibrering mellem turbiditet og koncentrationer af suspenderet stof
- Indsamling af data vedrørende oplandet (areal, overfladetyper) og nedbør (mm nedbør, intensitet, varighed m.m.)
- Målinger under varierende kapacitet for vandbremsen
- Kontakt til leverandør af nødvendigt måleudstyr og udstyr til dataopsamling
- Levering og opsætning samt indkøring af udstyr

De indsamlede og bearbejdede data forventes at kunne understøtte udvikling af en vandbremse med intelligent styring, hvor flow til kloak reguleres efter turbiditet og flow.

7 Referencer

- /1/ Soller, J. et al. 2005. "Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management". *Journal of Environmental Management* 76: 309-318.
- /2/ Charters, F.J., Cochrane, T.A. and O'Sullivan, A.D. 2016. "Untreated runoff quality from roof and road surfaces in a low intensity rainfall climate". *Science of the Total Environment* 550: 265-272.
- /3/ Bertrand-Krajewski, J.-L., Chebbo, G. and Saget, A. 1998. "Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon". *Water Resources* 32, 8: 2341-2356.
- /4/ Sun, S. et al. 2015. "Long-term stormwater quantity and quality analysis using continuous measurements in a French urban catchment". *Water Research* 85: 432-442.
- /5/ Bach, P.M., McCarthy, D.T. and Deletic A. 2010. "Redefining the stormwater first flush phenomenon". *Water Research* 44: 2487-2498.
- /6/ Athanasiadis, K., Horn H. and Helmreich, B. 2010. "A field study on the first flush effect of copper roof runoff". *Corrosion Science* 52: 21-29.
- /7/ Li, W. et al. 2012. "Temporal variation of heavy metal pollution in urban stormwater runoff". *Front. Environ. Sci. Eng.* 6(5): 692-700.
- /8/ Lee, H. et al. 2004. "Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges". *Water Research* 38: 4153-4163.
- /9/ Lee, J.H. et al. 2002 "First Flush analysis of Urban storm runoff" *The Science of the Total Environment* 293 (2002)163-175.
- /10/ Schriewer, A., Horn, H. Helmreich, B. 2008. "Time focused measurements of roof runoff quality" *Corrosion Science* 50: 384-391.
- /11/ Bonhomme, C., Petrucci, G. 2017. "Should we trust build-up/wash off quality models at the scale of urban catchments?" *Water Research* 108: 422-431.
- /12/ Métadier, M., Bertrand-Krajewski, J.-L. 2012. "The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes" *Water Research* 46: 6836-6856.
- /13/ Mosbæk A/S <http://www.mosbaek.dk/dk/losninger/funktion/vandbremser-med-hvirveeffekt/> 2017.
- /14/ Teknologisk Institut, Rørcenter – anvisning 019. "Vandbremser – Regulering af vandstrømme i afløbssystemer". Maj 2013.
- /15/ Københavns Kommune, Teknik og Miljøforvaltning. "Rensning af hverdagsregn – renseteknologier". Rapport udarbejdet af DHI januar 2016.
- /16/ DMI SVK målersystem: <https://www.dmi.dk/erhverv/anvendelse-af-vejrddata/spildevandskomiteens-regnmaalersystem/>
- /17/ Vand i Byer og Københavns Kommune. "Bobleprojekt – First flush og hverdagsregn". Rapport udarbejdet af DHI marts 2017.

- /18/ Mosbæk A/S. Kommunikation med Torben Krejbjerg 15.11.2017.
- /19/ Miljøministeriet, Miljøstyrelsen. 1992. "Bestemmelse af befæstet areal", Spildevandsforskning fra Miljøstyrelsen, Nr. 43.