

Miljøprojekt Nr. 871 2003

Tilbageholdelse af sedimenterbart stof og miljøfremmede stoffer i regnvandsbassiner i afløbssystemer

Torben Larsen og Ole Neerup-Jensen
Aalborg Universitet

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMERY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	11
2 DATAMATERIALET	15
2.1 HISTORIK	15
2.2 KEMISKE ANALYSER	16
3 BEREGNINGSMETODE	19
3.1 FLOW DIAGRAM	19
3.1.1 Regnserier	19
3.1.2 Sedimentationskurver	19
3.2 SEDIMENTATIONSMODEL	20
3.3 TILBAGEHOLDELSE	21
4 REGNEEKSEMPEL	23
4.1 FYSISKE PARAMETRE FOR OPLANDET	23
4.2 FYSISKE PARAMETRE FOR BASSINET	23
4.3 REGNSERIE	23
4.4 RESULTATER	23
5 AFSLUTTENDE KOMMENTARER	29
6 LITTERATUR	31
BILAG 1 MODEL DOKUMENTATION	33
BILAG 2 ADSORBERET TUNGMETALER	37
BILAG 3 PARTIKELKONCENTRATION	39

Forord

Denne rapport er fremkommet som et samarbejde mellem Miljøstyrelsen i Danmark, Aalborg Universitet og Hedeselskabet.

Formål

Projektets hovedformål har været at eftervise regnvandsbassiners evne til tilbageholde sedimenterbart materiale. Ved hjælp af indsamlede data fra Sydtyskland er der udført modelberegninger som viser at regnvandsbassiner kan tilbageholde en stor del af det partikulære materiale som er indeholdt i det vand der ledes til de modtagende recipienter. Dette sammenholdt med, at specielt PAH og tungmetaller adsorbere til specifikke partikelstørrelse gør at der på sigt kan udformes et operationelt krav til størrelse og design af bassin, hvis hovedparten af de forurenede partikulære stoffer skal tilbageholdes i bassinet.

Undersøgelsen omfatter regnvandsbassiner i fællessystemer. Der foreligger ikke tilstrækkelige data fra separatkloakerede områder.

Rapporten kan indeles i følgende 4 hovedområder:

Rapportens indhold

1. Indledning
2. Beskrivelse af datamaterialet
3. Beregningsmetode
4. Beregningseksempel

Selve dokumentationen af den udviklede model samt udvalgte resultater for undersøgelsen er vedlagt i bilag.

Projektet er udført for Miljøstyrelsen af Aalborg Universitet med Professor Torben Larsen, Aalborg Universitet som projektleder og Civilingeniør Ole Neerup-Jensen, Hedeselskabet som øvrig deltager.

Miljøstyrelsens ansvarlige har været Civilingeniør Mogens B. Kaasgaard, Vandovervågnings- og spildevandskontoret.

Der skal her rettes en stor tak til firmaet UFT (Umwelt- und Fluid-Technik), Dr. Brombach GmbH i Tyskland, specielt Steven Michelbach, for hjælp til databearbejdning. Det er UFT som har stillet data til rådighed for dette projekt. Data må ikke anvendes uden skriftlig tilladelse fra UFT.

Sammenfatning og konklusioner

Undersøgelsen omfatter en langtidsberegning af tilbageholdelsen i af sedimenterbart stof i regnvandsbassiner over en lang årrække. Resultaterne dækker fællessystemer. Det er vist at der sker en betydelig tilbageholdelse af stof i bassinerne.

Resultaterne opnået i denne undersøgelse er i god overensstemmelse med de erfaringer som beskriver målinger af ind- og udløb på vilkårlige bassiner og som er omtalt i den internationale litteratur.

I et beregningseksempel, som skønnes at dække de mest normale tilfælde er følgende tilbageholdelsesgrader er fundet for det sedimenterbare partikulære materiale i 5 forskellige bassiner.

Bassin		Tilbageholdelse [%]					
Størrelse [mm]	Aflastninger pr. år.	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	PAH*
20	3	84	83	78	86	88	87
15	7	81	79	73	83	84	84
10	13	74	72	64	76	77	78
6,5	22	65	63	54	67	67	69
4	34	52	50	41	55	53	57

*13 forskellige PAH'er

Set i den totale massebalance for bassinerne, som både omfatter det opløste og det partikulære stof, så betyder tilbageholdelsen på grund af sedimentation en yderlig reduktion på ca. 50 % af udledningen af stof til recipienten.

Summery and conclusions

This investigation included simulation and retention of particulate matter in retention basins during a long time period. The result covers combined servers. The results show good retention of particulate matter in the basins.

The results of the investigation are in accordance with measurements of inlets and outlets in basins and with other references in international literature.

The following retention of particulate matter for five different basins are found.

Basin		Retention [%]					
Size [mm]	Discharges pr. year	Cad	Cu	Ni	Pb	Zn	PAH*
20	3	84	83	78	86	88	87
15	7	81	79	73	83	84	84
10	13	74	72	64	76	77	78
6.5	22	65	63	54	67	67	69
4	34	52	50	41	55	53	57

* 13 different PAH's

With accordance to the total mass balance in the basins which include both suspended and particulate matter the retention obtained by sedimentation results in an additional 50 % retention of matter from the discharge to the recipient.

1 Indledning

Regnvandsbassiner anvendes ofte i Danmark til at begrænse udledningen af regnbetingede udløb til recipienterne. Flere undersøgelser har vist, at udledningen fra de regnbetingede udløb udgør en signifikant belastning af de modtagende recipienter. Denne belastning består i både en belastning af recipienten med forurenende miljøfremmede stoffer som f.eks. tungmetaller, PAH'er og NPO-stofferne samt en hydraulisk belastning.

I 1997 oplyste Ministeriet for Miljø og Energi i Danmark at regnbetingede udløb udgjorde ca. 8% for BOD, 15% for kvælstof og 8% for fosfor af den samlede belastning fra punktkilderne (punktkilder inkludere renseanlæg). Regnbetingede udløb kan enten komme fra de fælles- eller separatkloakerede områder. Aflastninger fra fælleskloakerede områder indeholder ikke kun overfladevand, men er en blanding af forurening fra både kommunalt spildevand, resuspenderet kloaksediment og overflade afstrømning. Aflastninger fra separatkloakerede områder indeholder primært forurening fra befæstede arealer (tage, veje mm.).

En vigtig målsætning ved design af regnvandsbassiner er, at mindske eller forhindre den hydrauliske effekt på recipienten i henhold til den aktuelle recipientplan og de anviste retningslinier, mens stoffjernelsen som oftest er en upåagtet sideeffekt, og denne inddrages som oftest ikke i selve designet af bassinet.

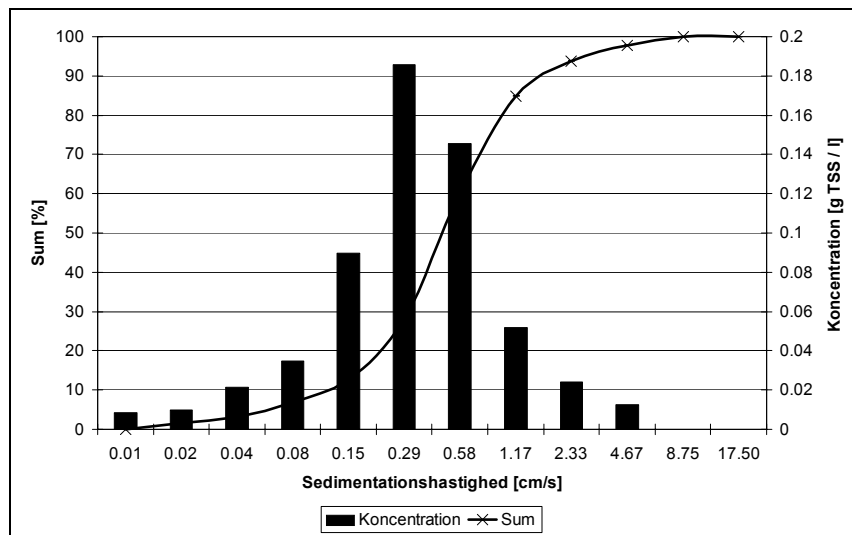
I mere end 20 år har bassiner været anvendt til at opmagasinere vand fra regnbetingede udløb. Til trods for denne lange anvendelse har bassiner ofte været anset for at være utilstrækkelige. Indtil for nylig var det kun effekten af opmagasineringen af vand og videreføres til renseanlægget, der kunne beregnes, mens sedimentationen af sedimenterbart materiale ikke kunne beskrives pga., at de processer, der påvirker sedimentationen i de stærkt turbulente bassiner var ukendte.

Der er især i USA, Tyskland og Frankrig lavet studier af eksisterende bassiners evne til at tilbageholde forureningskomponenter. Disse bassiner bl.a. first flush bassiner, altså et bassin med flere kamre samt bassiner af efterklarings typen mfl., viste en særdeles god tilbageholdelse af især sedimenterbart stof (Michaelbach, S et Al., 1992).

Når et bassin går i overløb, dvs. den hydrauliske kapacitet for bassinet overskrides, aflaster bassinet som oftest til nærmest recipient. Det vand der løber fra et regnvandsbassin til recipienten består af flere sammenhørende forureningskomponenter, som kan findes på 2 faser, nemlig som opløst stof eller som suspenderet stof. Det opløste stof kan som udgangspunkt kun fjernes ved at bygge bassinerne i nogle tilfælde ekstremt store eller indføre behandlingsteknologier overført fra renseanlægsteknologien eller anden omfattende rensning.

Fjernelsen af det suspenderet stof er mere håndterlig da partikulært stof består af en mængde definerede partikler bestående af både stigende og faldende partikler.

Flere både danske og udenlandske undersøgelser har udført sedimentationsundersøgelser af både spildevand og overløbsvand. Et eksempel på sådan sedimentationskurve er vist på figur 1.1 (Michaelbach, S et Al., 1992). Figuren viser en summerede sedimentationskurver over intervallet 0 - 17,5 cm/s.



Figur 1.1 Eksempel på sedimentationskurve.

***TSS = Total
sedimenterbart stof***

Sum-kurven skal forstås som den del af den samlede prøve der er mindre end den givne sedimentationshastighed, mens koncentrationssøjlerne viser de fundene koncentrationer til de enkelte sedimentationshastigheds-intervaller. Som det ses på figuren er ca. 80 % af alt det partikulære materiale under 1 cm/s mens ca. 50 % af alle de partikulære partikler har en faldhastighed på ca. 0,6 cm/s. Den information er i sig selv ingen sikring af at de forurenede miljøfremmede stoffer forbliver i bassinerne, da flere undersøgelser, bl.a. (Brombach, H. et al., 1993), vist at de miljøfremmede stoffer som PAH og tungmetaller adsorbere på specielle partikelfraktioner og ikke generelt på de organiske partikler.

Denne undersøgelse omhandler primært de partikulære fraktioner i overløbsvandet og den opløste del vil kun i mindre omfang blive indraget.

De viste data stammer fra et yderst detaljeret og omfattende datamateriale fremskaffet i Tyskland (Michaelbach, S et Al., 1992, Schmidt, T.G et al., 1997) mfl. Hovedformålet med denne rapport er at skitsere beregningsrækkefølgen, hvis et givet dansk bassin ønskes undersøgt i enten drift- eller designfasen. Det anvendte datamateriale omfatter et forskningsarbejde svarende til 8 mandeår og inkludere mange målinger af partikelfordelingen samt et antal kemimålinger af tungmetaller og PAH'er på selve partiklerne.

Det er vigtigt at gøre sig klart, at den totale stoftransport sker både som opløst stof og som suspenderet stof. Koncentrationen af suspenderet stof bestemmes ved filtrering. Det suspenderede stof kan herefter opdeles i sedimenterbart stof og i ikke-sedimenterbart stof. Det partikulære stof som herværende undersøgelse omfatter er den partikulære stoffraktion, som vil sedimentere ud efter to timer, som nærmere beskrevet i næste afsnit.

Hvis man ser på hvorledes det henholdsvis opløste og det partikulære stof vil påvirke recipienterne kan koncentrationer og mængder af de to fraktioner ikke umiddelbart sammenlignes. Den partikulære fraktion må forventes at sedimentere og/eller blive adsorberet til bund og planter i forholdsvis kort afstand fra udledningen, hvorimod den opløste del må forventes at blive transporteret noget længere før den bliver optaget og omsat. Det må bero på en konkret vurdering for det enkelte udløb at afgøre hvilken virkning, der skal tillægges størst betydning.

Kendskabet til de miljømæssige effekter på flora og fauna af de miljøfremmede stoffer er stærkt begrænset. Det må forventes at de mest kritiske effekter er akkumulerende effekter i recipienternes bundsediment, hvor der over en årrække er opbygget forhøjede koncentrationer af stofferne. Der er god grund til at antage at denne opbygning især skyldes det partikulære stof i udledningerne.

2 Datamaterialet

2.1 Historik

Det brugte datamateriale stammer primært fra den sydtyske by Bad Mergentheim, hvor et 3 årig forskningsarbejde tog udgangspunkt i kortlægningen af sedimenttransport, erosion, sedimentation og resuspension af kloaksedimenter i kloaksystem i et samlede projekt med titlen "Rain Caused Waste loads In Receiving Waters" (Schmidt, T.G et al., 1997).

I oplandet til Bad Mergentheim blev der installeret 7 målesteder, hver dækkende mellem 0,1 til 350 ha reduceret areal. Kloakledninger hvor målestederne er installeret var mellem 150 til 1600 mm i diameter. Bad Mergentheim havde i 1990 ca. 25.000 indbyggere. Der er primært tale om et fællessystem.

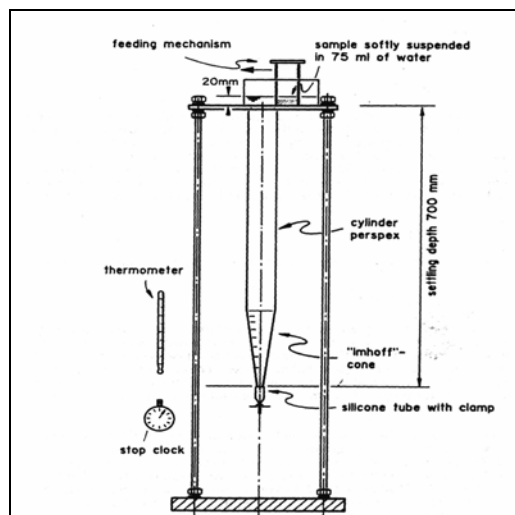
I perioden 1988-1991 blev der udført systematisk prøvetagning af følgende komponenter fra kloakken:

- Spildevand (tørvejs afstrømningen)
- Sediment (både fra overfladen samt fra bundtransporten)
- Biofilm
- Regnvandafstrømning
- Overløbsvand fra regnbetingede overløb.

Det skal her nævnes at næsten alle prøver er udtaget manuelt. For en uddybning af datamaterialet henvises der i øvrigt bl.a. til (Brombach, H. et al, 1993) og (Michaelbach, S. et al, 1992).

For hver af de ovenstående komponenter blev der bl.a. udført sedimentationsforsøg for derigennem at bestemme fordelingen af faldhastigheden på partiklerne.

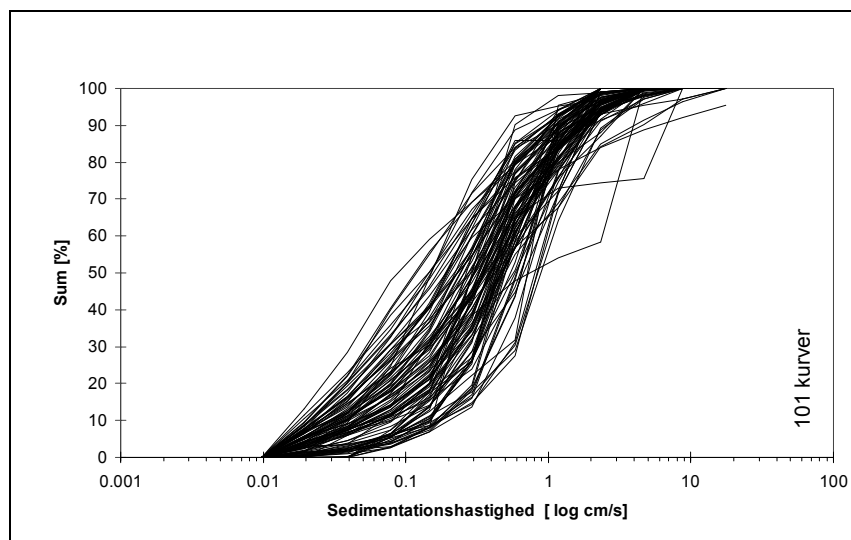
Apparaturet der blev anvendt til bestemmelsen af faldhastigheden er vist på figur 2.1.



Figur 2.1 Sedimentationsapparatet (fra Michaelbach, S et al, 1993)

Apparatet fungerer på følgende måde: I toppen af apparatet tilføres en delmængde af prøven, som er udsedimenteret i 2 timer i en Imhoff kegle. Når prøven tilsættes apparatet startes stopuret og der udtages for nede en delprøve som repræsenterer den mængde af sedimenterbart materiale som er udsedimenteret i det givne tidsinterval. Denne procedure fortsættes indtil alt det tilførte stof er udsedimenteret. Der er til hver prøve lavet 12 delprøver som dækker sedimentationsintervallet 17.5 cm/s til 0.001 cm/s, hvilket svare til at hver prøve tog ca. 2 timer at udføre.

Et udpluk af sedimentationskurverne er vist på figur 2.2. Kurverne viser fælleskloak afstrømningen, dvs. spildevand blandet med regnvand.



Figur 2.2 Sedimentationskurver for fælleskloak afstrømning. 101 kurver i alt.

Udover sedimentationshastigheden blev følgende parametre bestemt for hver prøve:

- vandindhold
- glødetab
- densitet

I alt 396 kurver blev undersøgt på denne måde, hvor 101 kurver stammer fra fælleskloak, mens de andre er fra separat regn- og spildevand samt udelukkende fra overfladen og overløbsvand. Et antal af prøverne fra fællessystemet blev underkastet kemiske analyser som nedenfor beskrevet. Prøverne fra separatsystemerne blev ikke analyseret kemisk.

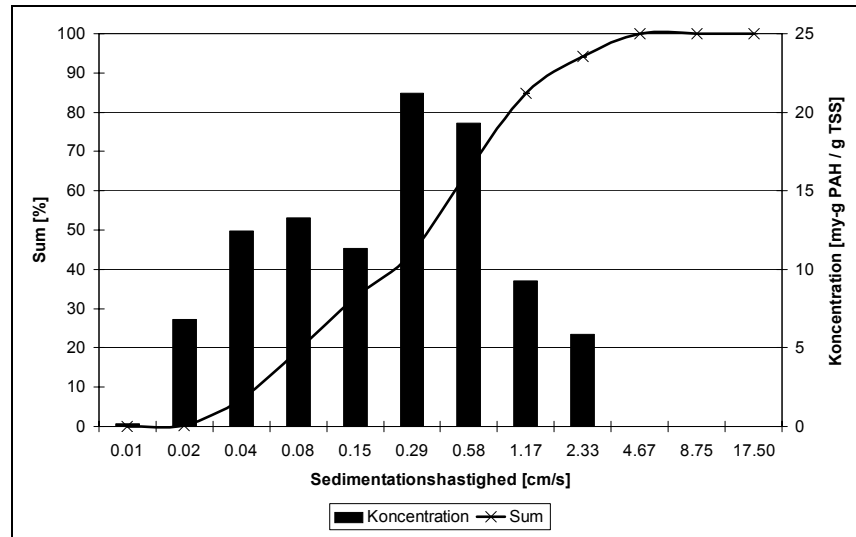
2.2 Kemiske analyser

Udover sedimentationsprøverne blev der som nævnt for udvalgte prøver lavet kemiske analyser for flere tungmetaller, PAH og COD for derigennem at bestemme en sammenhæng mellem partikelsedimentationshastighed og adsorption på de enkelte fraktioner. Figur 2.3 viser de målte koncentration for kobber, nikkel, bly, zink, cadmium og følgende 13 PAH'er:

Phenantren, Anthracen, Fluoren Pyren, Benzo(a)anthracen Chrysen, Benzo(b)fluoranthren - Benzo(k)fluoranthren, Benzo(e)pyren, Benzo(a)pyren, Perylen, Indeno(1,2,3-cd)pyren, Dibenz(a,c)anthracen - Dibenz(a,h)anthracen og Benzo(ghi)perylene.

COD er i denne undersøgelse fravalgt pga. mangelfuldt datamateriale.

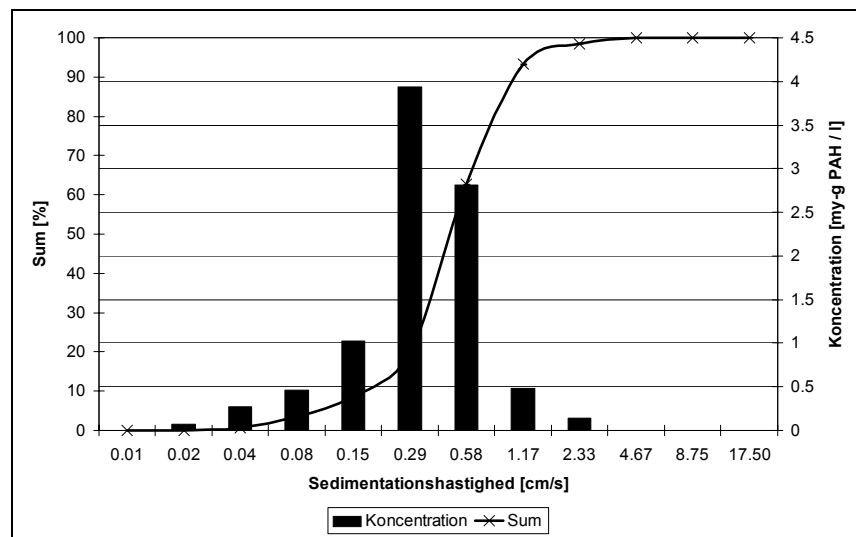
Figur 2.3 viser sammenhængen mellem sedimentationshastigheden og koncentrationen af PAH pr. g TSS. De samme figurer for de undersøgte 5 tungmetaller findes i bilag 2.



Figur 2.3 Eksempel på sammenhæng mellem PAH koncentration på de enkelte partikel fraktioner.

Ovenstående kurve for PAH er et gennemsnit af 6 kemi-analyser.

Sammenholdes ovenstående figur med figur 1.1 fremkommer sammenhængen mellem sedimentationshastigheden og koncentrationen af PAH pr. liter.



Figur 2.9 Sammenhæng mellem koncentration af PAH og sedimentationshastighed.

Ovenstående kurve viser at ved at tilbageholde partikelfraktioner større end eller lig 0,29 cm/s opnås en næsten optimal tilbageholdelse af alt det partikelbundende PAH. Det betyder at det er faktisk kun "nødvendig" at tilbageholde partikler med en faldhastighed på 0,29 cm/s og op, hvis ca. 80 % af alt det partikelbundende PAH skal tilbageholdes i et bassin. Samme sammenhæng ses for tungmetallerne, og vises senere.

Som det ses af bilag 3 er der ca. 50 % af tungmetallerne under en partikel med sedimentationshastigheden på 0,08 cm/s. Så hvis koncentrationen af TSS var ens for alle partikelfraktioner betyder det at man "kun" vil tilbageholde 50 % af alle tungmetallerne. Figur 1.1 viser dog, at der er en betydelig forskel, og laves samme sammenligning med tungmetallerne som for PAH ses det at ca. 70 - 80 % af den samlede tungmetal koncentration der vil adsorbere på partikler med en sedimentationshastighed mindre end ca. 0,30 cm/s. Det betyder at det sammenholdt med PAH belastningen vil være mest optimalt at dimensionere sit bassin så partikler med en sedimentationshastighed større end ca. 0,30 cm/s tilbageholdes i bassinet. Hvis det resterende 20-30 % ønskes tilbageholdt i et bassin, skal bassinet være betydeligt større.

Kapitel 3 og 4 viser en beregningsmetode samt resultaterne fra et beregningseksempel af et bassin hvor ovenstående data anvendes.

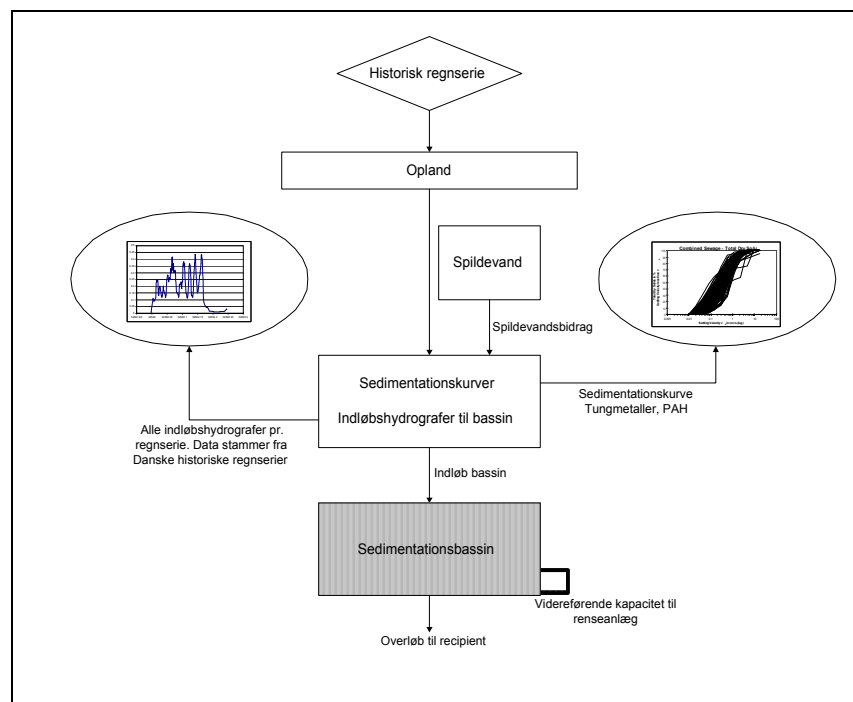
I denne metode antages der at der sker en udsedimentering af partikler, og dertil udsedimentering af tungmetaller og PAH i bassinet.

3 Beregningsmetode

Det ovenstående kapitel viste indholdet af både partikler og tungmetaller samt PAH der er indeholdt i det spildevand/regnvand der løber til et givet bassin under en regnhændelse. Som indikeret sker der en sedimentation og derved tilbageholdelse af partiklerne og der er i den forbindelse udviklet et edb-program som kan simulere dette. Edb-programmet er udviklet således at det kan regne alt fra beskrivelsen af hydrologien på oplandet til sedimentationen i bassinet. Programmet anvender historiske danske regnserier. Nedenstående afsnit beskriver beregningsmetoden til edb-beregningen af tilbageholdelsen i et bassin.

3.1 Flow diagram

Nedenstående figur viser flowdiagrammet for opstillingen af metode til beregning af tilbageholdelsen af partikler i et bassin.



Figur 3.1 Flowdiagram for beregningen af tilbageholdelsen af partikler i et bassin.

3.1.1 Regnserier

For at kunne vurdere tilbageholdelsen af partikler i et bassin er det nødvendigt at anvende lokale historiske regnserier da kasseregning ikke kan anvendes i denne sammenhæng.

I Danmark sker der en registrering af nedbørsdata i forbindelse med Spildevandskomiteens regnmålere.

3.1.2 Sedimentationskurver

Der er taget udgangspunkt i gennemsnittet af 101 kurver. Som der ses på figur 2.2 er der nogen variation i sedimentationshastigheden på de forskellige

kurver. En dybere gennemgang og sammenligning af sedimentationskurver kunne evt. frembringe en sammenhæng mellem nedbør, mellemliggende tørvejrperiode og afstrømningen i kloaksystemet.

3.2 Sedimentationsmodel

Til beskrivelsen af tilbageholdelsen af partikler i bassinet er Hazen formel anvendt. Hazens formel angiver den nødvendige opholdstid T , for et givet bassin til at tilbageholde en partikel med sedimentationshastigheden W_s :

$$T \geq \frac{h}{\alpha \cdot W_s}$$

Hvor

T er opholdstiden [s]
 h er højden af bassinet [m]
 W_s er sedimentationshastigheden [m/s]
 α er en empirisk konstant afhængig af turbulens samt design af bassin. Intervallet for α er 0,2-0,6. I dette regneeksempel er anvendt 0,3.

Da hydraulikken i bassinet er kendt kan der til hvert et tidsskridt regnes den aktuelle opholdstid ud fra følgende relation:

$$T(t) \geq \frac{V_{\text{bassin}}}{Q_{\text{indløb}}}$$

hvor

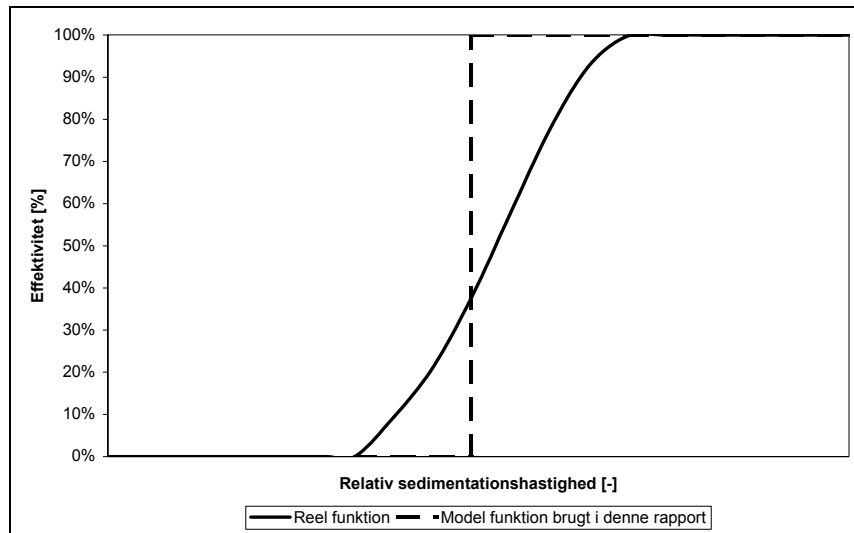
V_{bassin} er bassin volumenet [m³]
 $Q_{\text{indløb}}$ er indløbsvandføringen til bassinet [m³/s]

Ved at sammenholde de 2 ovenstående ligninger fremkommer følgende sammenhæng:

$$W_{s,\text{kritisk}}(t) \geq \frac{h}{\alpha \cdot \frac{V_{\text{bassin}}}{Q_{\text{indløb}}}}$$

Det betyder at hvis der til et tidsskridt udregnes en kritisk sedimentationshastighed for overløbsvandet på 1 cm/s, vil det betyde, at alle partikler med en sedimentationshastighed større end denne tilbageholdes i bassinet.

Dette er vist på figur 3.2 hvor den anvendte funktion til beskrivelsen af tilbageholdelsen af organisk stof er vist sammenholdt med den reelle funktion, som alternativt kan anvendes, hvis denne er kendt for bassinet.



Figur 3.2 Forskellen mellem reel og anvendt tilbageholdelsesfunktion..

Effektiviteten er defineret i nedenstående afsnit mens den relative sedimentationshastighed er forholdet mellem partikel sedimentationshastigheden og overfladebelastningen.

$$W'_s = \frac{W_s}{s}$$

hvor

W'_s er den relative sedimentationshastighed [-]

W_s er sedimentationshastighed [cm/s]

s er overfladebelastningen [cm/s]

$$s = \frac{Q_{indløb}}{A}$$

hvor

$Q_{indløb}$ er indløbsvandføringen [m³/s]

A er overfladearealet for bassinet [m²]

Alternativt til denne simple formel kunne anvendes andre empiriske formler som (se f.eks. Cock et al, 1998) eller en fuld dynamisk tre dimensional beskrivelse af strømmingen og partikelsedimentationen i bassinet (Miljøstyrelsen, 2001 og Neerup-Jensen, O. et al, 1999).

3.3 Tilbageholdelse

Tilbageholden i overløbsvandet fra bassinet udregnes efter følgende forhold:

$$\text{Tilbageholdelse}[\%] = \frac{\sum (C_m - C_{\text{fjernelse}}) \cdot Q_{\text{over}}}{\sum C_m \cdot Q_{\text{over}}}$$

Hvor

$\sum C_m$ er summen af alle partikler [kg TSS/m³]

$\sum C_{\text{fjernelse}}$ er summen af tilbageholdelsen i bassinet [kg TSS/m³]

Q_{over} er overløbsvandmængden [m³]

Dvs. at der for alle partikelfraktion udregnes hvor mange kilo partikler der tilbageholdes i bassinet og det sammenlignes med tilfældet hvis der ikke blev regnet på tilbageholdelsen.

4 Regneeksempel

For at konkretisere ovenstående beregningsmetode er der her præsenteret et regneeksempel hvor der for et givet opland er vist hvor stor tilbageholdelsen er i forskellig størrelse bassiner. Selve dokumentation af den anvendte model er vist i bilag 1. Det er valgt at præsentere tilbageholdelsen af følgende stoffer for de forskellige bassiner: PAH, kobber, nikkel, bly, zink, cadmium.

4.1 Fysiske parametre for oplandet

Det anvendte opland er har følgende fysiske parametre:

Parameter	Værdi
Reduceret oplandsstørrelse [ha]	10
Koncentrationstid [min]	10
Enkelttab [mm]	0,6
Reduktionsfaktor [-]	1

4.2 Fysiske parametre for bassinet

De anvendte bassiner er et rektangulært bassin med et ind- og udløb samt en overløbskant hvorover der aflastes. De anvendte bassiner har følgende volumener 2000, 1500, 1000, 650 og 400 m³ samt parametre:

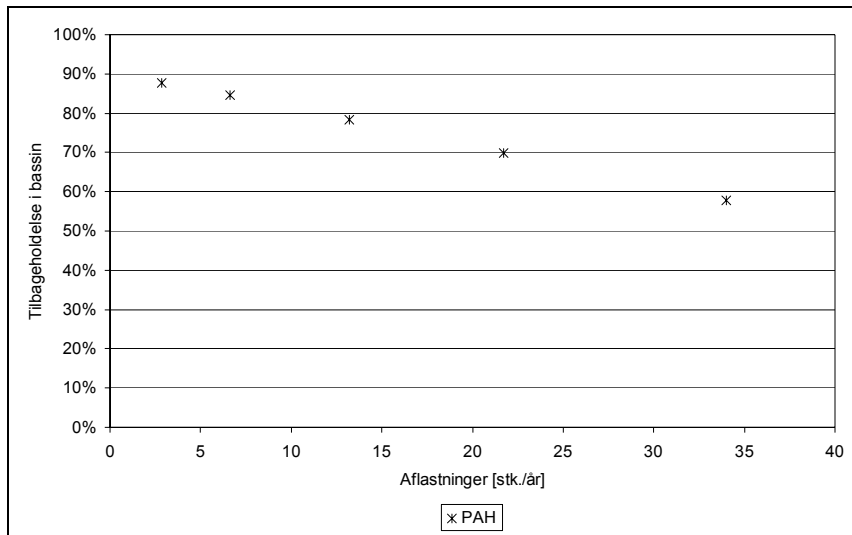
Bassin volumen [m ³]	Parameter	Værdi
2000, 1500, 1000, 650, 400	Bassinhøjde [m]	3
	Afløbstal [μm/s]	0,1

4.3 Regnserie

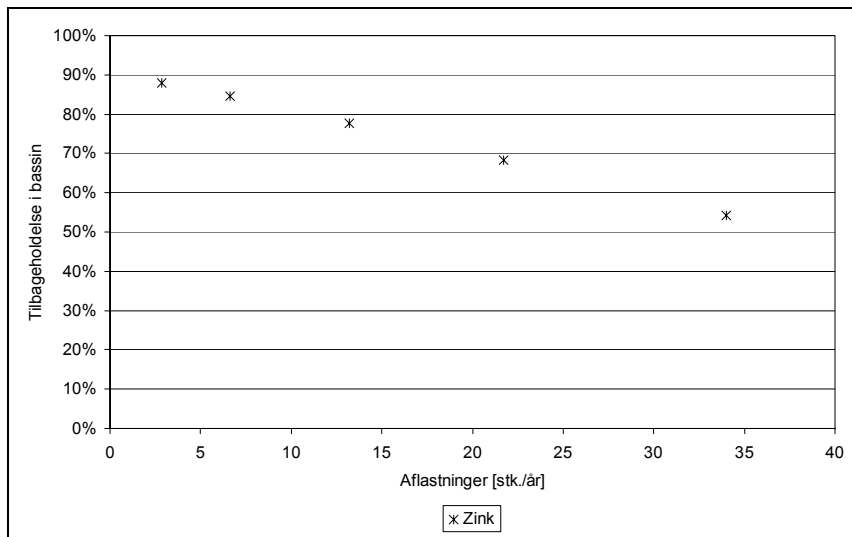
Den brugte regnserie er fra nedbørsstation 23321, Kolding forrenseanlæg. Der er anvendt data fra 01.01.1979 til 31.12.1996, dvs. 18 års data (Spildevandskomiteen, 1999).

4.4 Resultater

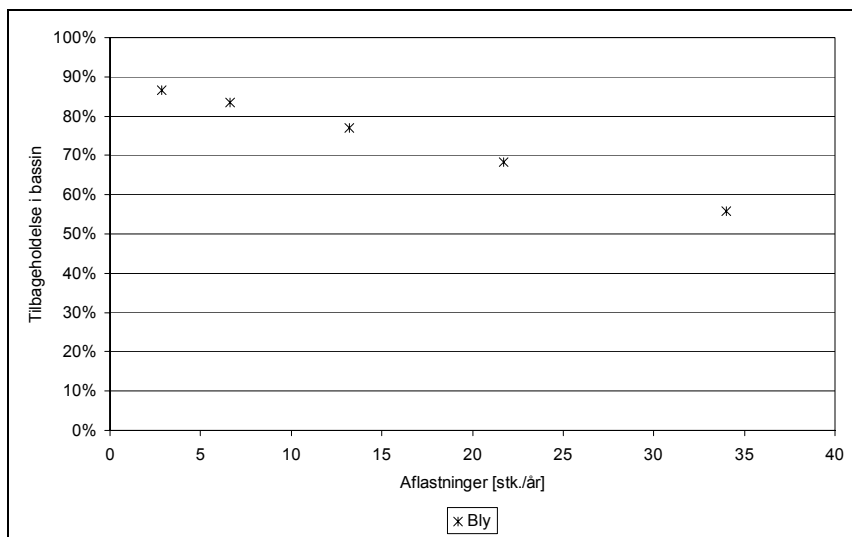
Udfra den dynamiske model er der for de 5 bassiner udregnet hvor stort tilbageholdelsen af partikler er i overløbsvandet i forhold til hvis sedimentationen ikke blev inddraget.



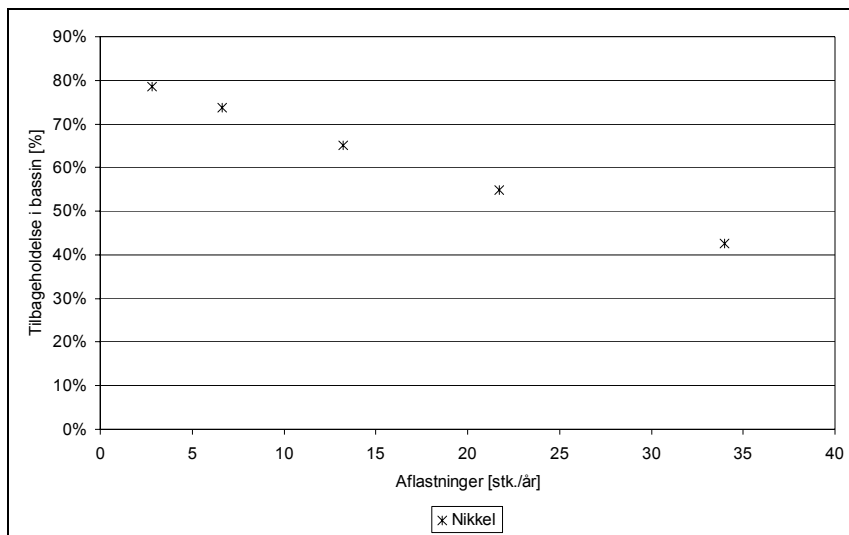
Figur 4.1 Beregnet tilbageholdelse af PAH i de 5 bassiner.



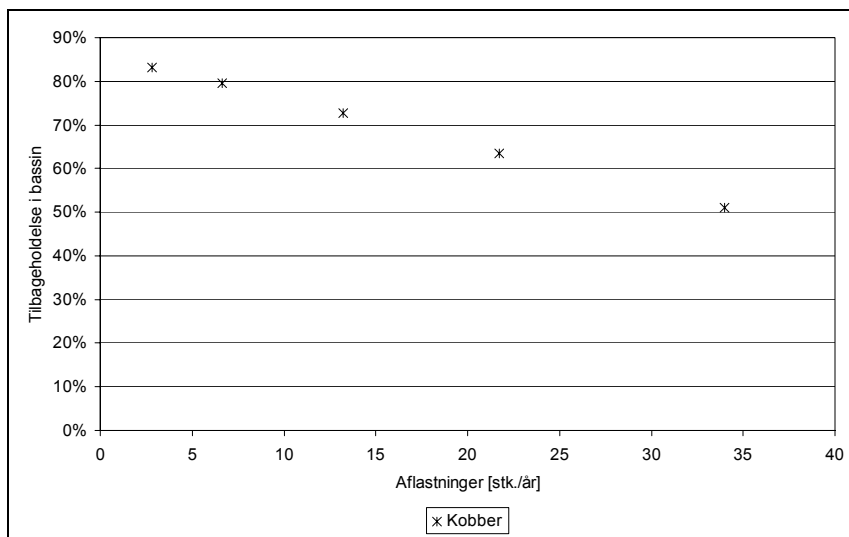
Figur 4.2 Beregnet tilbageholdelse af zink i de 5 bassiner.



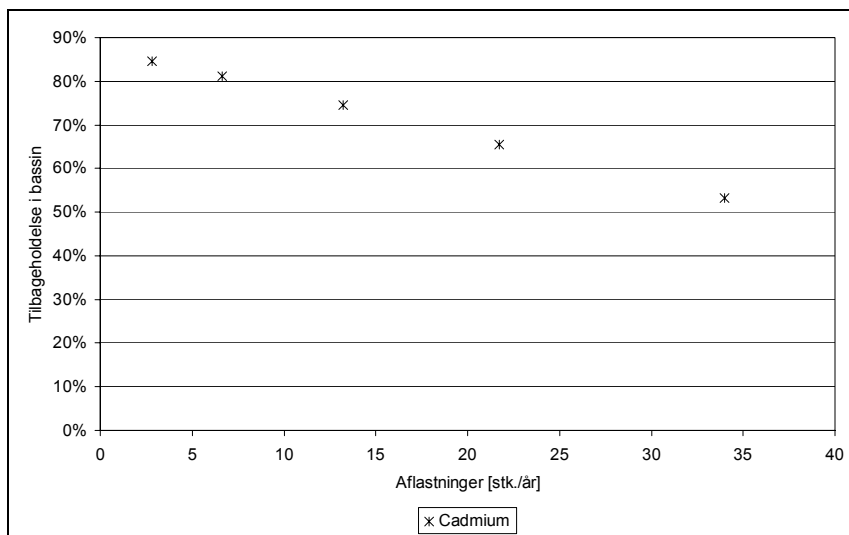
Figur 4.3 Beregnet tilbageholdelse af bly i de 5 bassiner.



Figur 4.4 Beregnet tilbageholdelse af nikkel i de 5 bassiner.



Figur 4.5 Beregnet tilbageholdelse af kobber i de 5 bassiner.



Figur 4.6 Beregnet tilbageholdelse af cadmium i de 5 bassiner.

Samles de ovenstående 6 figurer tabellarisk fremkommer følgende tabel.

Tabel 4.1 Resultat af modellering af tilbageholdelse af tungmetaller og PAH i bassinerne.

Bassin		Tilbageholdelse [%]					
Størrelse [mm]	Aflastninger pr. år.	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	PAH*
20	3	84	83	78	86	88	87
15	7	81	79	73	83	84	84
10	13	74	72	64	76	77	78
6,5	22	65	63	54	67	67	69
4	34	52	50	41	55	53	57

*13 forskellige PAH'er

Som det ses er der god tilbageholdelse af både tungmetallerne og PAH i bassinerne og de fundende størrelsesordner er i overensstemmelse med målinger udført på et givet bassin som er dimensioneret med en overfladebelastning svarende til 10 m/t som er de tyske dimensionerings retningslinier (Schmitt, T.G. et al, 1997, ATV 1992).

Som indikeret i indledningen består det vand der strømmer fra bassinet til recipienten både af partikulært materiale samt opløst stof. Ovenstående beregning inddrager kun den partikulære fraktion, og det er udelukkende denne del, den viste procentuelle tilbageholdelse indeholder. Det har ikke været muligt at finde litteraturværdier hvor forholdet mellem de opløste og partikulære fraktion er fastslået, dog har det brugte datamateriale fra Tyskland, målt én prøve hvor forholdet mellem COD sedimenterbart samt COD opløst er opgivet. Prøven viste at der var ca. 2/3 sedimenterbart COD samt 1/3 opløst COD udad den samlede prøve. Dette forhold er desværre ikke undersøgt for tungmetallerne samt PAH, men nedenstående berøgnings eksempel viser hvordan den samlede tilbageholdelse for bassinerne vil være hvis forholdet mellem sedimenterbart og opløst stof også er gældende for tungmetallerne og PAH. Der er lavet to tabeller hvor den øverste (tabel 4.2) regner med sedimentation mens det er undladt i den nederste (tabel 4.3). Eksemplet er lavet for PAH. For at kunne sammenligne resultat, hvor sedimentationen af det partikulære stof er inddraget, regnes tilbageholdelsen for både det opløste og partikulære stof som forholdet mellem den mængde stof der er tilført bassinet og den mængde der ledes til recipienten.

Tabel 4.2 Tilbageholdelse af PAH i de 5 undersøgte bassiner hvor både det partikulære og opløste stof inddrages og hvor der regnes med en sedimentation af det partikulære stof. Koncentration af opløst PAH er ca. 4 µg/l og den partikulære koncentration er ca. 9 µg/l.

Bassin volumen [mm]	Type	Tilført Bassin [g PAH/ år]	Videreført til renselanlæg [g PAH/ år]	Fjernelse ved sedimentation [g PAH/ år]	Til recipient [g PAH/ år]	Fjernelse [%]	Samlede Fjernelse [%]
20	Sedimenterbart	676	674	17	2	100	99
	Opløst	328	319	0	9	97	
15	Sedimenterbart	676	670	31	6	99	98
	Opløst	328	310	0	18	95	
10	Sedimenterbart	676	659	57	17	97	95
	Opløst	328	293	0	35	89	
6,5	Sedimenterbart	676	638	84	38	94	90
	Opløst	328	270	0	58	82	
4	Sedimenterbart	676	598	103	78	88	84
	Opløst	328	242	0	86	74	

Tabel 4.3 Tilbageholden af PAH i de 5 undersøgte bassiner hvor både det partikulære og opløste stof inddrages. Sedimentationen inddrages ikke. Koncentration af opløst PAH er ca. 4 µg/l og den partikulære koncentration er ca. 9 µg/l.

Bassin volumen [mm]	Type	Tilført Bassin [g PAH/ år]	Videreført til renseanlæg [g PAH/ år]	Fjernelse ved sedimentation [g PAH/ år]	Til recipient [g PAH/ år]	Fjernelse [%]	Samlede Fjernelse [%]
20	Sedimenterbart	676	657	0	19	97	97
	Opløst	328	319	0	9	97	
15	Sedimenterbart	676	639	0	37	95	95
	Opløst	328	310	0	18	95	
10	Sedimenterbart	676	602	0	74	89	89
	Opløst	328	293	0	35	89	
6,5	Sedimenterbart	676	554	0	122	82	82
	Opløst	328	270	0	58	82	
4	Sedimenterbart	676	495	0	181	73	73
	Opløst	328	242	0	86	73	

Som det ses er der en betydelig forskel på tilbageholdelsen af PAH i bassinerne hvis sedimentationen inddrages i bassinet. Samtidigt ses det også at med antagelsen om forholdet mellem opløst og sedimenterbart stof at være en forholdsvis stor belastning fra det opløste stof.

Tabel 4.4 viser det totale udløb til recipienten (både partikulære og opløst).

Tabel 4.4 Total udløb til recipienten (både partikulært og opløst).

Bassin [mm]	Sedimentation medregnet	Sedimentation ikke medregnet	Reduktionsfaktor [-]
	Tab [g PAH /år]	Tab [g PAH /år]	
20	11	28	0,39
15	24	55	0,44
10	52	109	0,47
6,5	96	180	0,53
4	164	267	0,61

Det ses at udledningen yderligere reduceres til ca. halvdelen såfremt sedimentationen medregnes. Regneeksemplet omhandler PAH men på grund af at fjernelsen af tungmetaller ret nøje følger PAH kan denne konklusion overføres til tungmetallerne også.

5 Afsluttende kommentarer

Nærværende projekt har haft til formål at skitsere en beregningsmetode til beregning af tilbageholdende af både sedimenterbart stof, tungmetaller og PAH i sedimentationsbassiner når de går i overløb. Projektet har taget udgangspunkt i et meget omfattende Tysk målearbejde, hvor partikelfraktioner er blevet vurderet også i forhold til adsorptionerne af miljøfremmede stoffer. Der vurderes ikke, at være den store forskel på de tyske eller danske forhold generelt, hverken mht. nedbør el. kloakudformning. Det anbefales dog, at der laves tilsvarende danske undersøgelser af partikelfraktionernes sedimentationsegenskaber, så det kan fastslås hvorvidt de tyske data er valide i Danmark, samt undersøgelser som også omfatter separatsystemer.

Herværende undersøgelsen har omfattet fællessystemer. Der foreligger ikke data, som omfatter separatsystemer. Nyere undersøgelser i anden, sammenhæng Miljøprojekt nr. 355 fra 1997, viste at 90 % PAH var bundet på det suspenderet stof i et separatsystem. Der er derfor god grund til at antage at den totale stoffjernelse ved bassiner i separatsystemer vil være relativt større end her angivet i denne rapport.

6 Litteratur

- ATV, 1992 Arbeitsblatt A 128. Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. **ATV regelwerk Abwasser Abfall, Verlag GFA.**
- Brombach, H. et al., 1993 Feststoffe in der Mischwasserkanalisation; sedimentation und remobilisierung. **Korrespondenz Abwasser 40(12) pp. 1910-1926, 199.3**
- Cock et al, 1998. The efficiency of a storage sedimentation basin behavior. **Water Res. Vol. 17 no. 8 pp. 861-867.**
- Michaelbach, S et Al., 1994 Settleable solids from combined sewers: settling, stormwater treatment and sedimentation rates in rivers. **Wat. Sci. Tech. Vo. 29(1-2), 1994.**
- Makepeace, D. K, 1995. Urban Stormwater Quality: Summary of contaminant Data. **Critical Reviews in environmental Sci. And Tech 25(2) pp. 93-139.**
- Marselek, J., 1999. Management of urban wet-weather flow pollution in Canada.
- Marselek, J. et al., 1999. Toxicity of wet-weather pollution sources: stormwater and CSOs. **I.B. Jolliffe and J.E. Ball(eds.), Proc. of the 8th Int. Conferences. Urban water, in press.**
- Michaelbach, S et Al., 1992 Absetzbarkeit von schwermetallbelasteten Feststoffen im Mischwasser. **GWF, Nr. 8, pp. 404-410.**
- Michaelbach, S et al, 1993 Settleable solids in a combined sewer system, settling characteristics, Heavy metals, efficiency of storm water tanks. **Wat. Sci. Tech. Vol. 27, No. 5-6, pp. 153-164, 1993.**
- Miljøstyrelsen, 1997. Miljøfremmede stoffer i overfladeafstrømning fra befæstede arealer. **ISBN 01053094**
- Miljøstyrelsen, 2001. Regnbetingede udløb fra kloaksystemer - Et litteraturstudium over danske og udenlandske erfaringer. **Miljøprojekt Nr. 547.**
- Neerup-Jensen, O. et al., 1999 Tilbageholdelse af partikulært stof i forsinkelsesbassiner. **Stads- og havneingeniøren 1999(12) pp. 24-27.**
- Schmidt, T.G et al., 1997 Stoffstrøme in der urbanhydrologie, Kanalisation-Band II. **ISBN 3-486-26415-X**
- Spildevandskomitéen, 1998. Rapport om udledningskrav for regnbetingede udløb fra kloaksystemer i relation til fysiske forhold i vandløb. **Aalborg Universitet Marts 1998**
- Spildevandskomitéen, 1999 Regional variation af ekstremregn i Danmark. **Skrift nr. 26.**

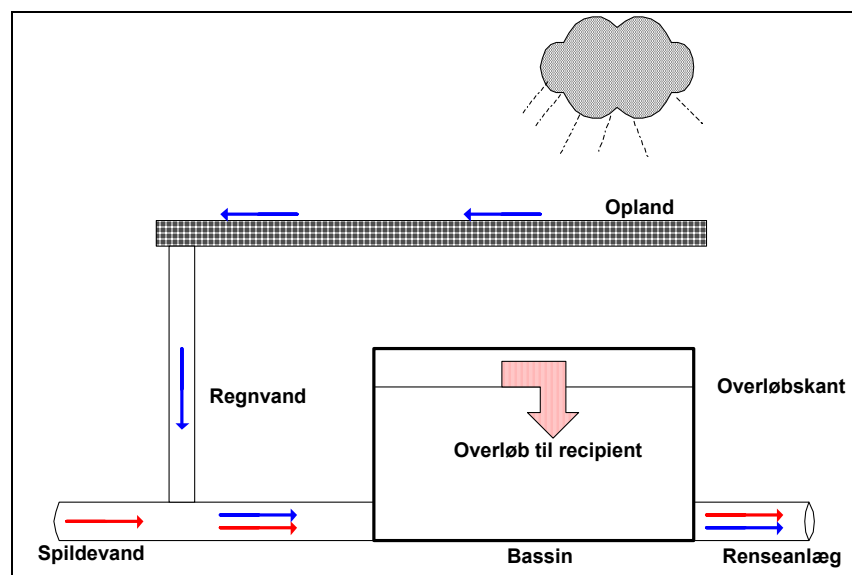
Xanthopoulos, C. & Hahn, H.H, 1997Schadsstoffe im regenabfluss in stadtischen Gebieten. Erste ergebnisse des BMFT-Verbundprojektes "Niederschlag". Korrespondenz Abwasser, pp. 1282-1304 vol 9.

Bilag 1 Modeldokumentation

I forbindelse med dette projekt er der udviklet en edb-model (PART2) som kan bruges til simulering af både de hydrauliske- samt de stofspecifikke processer.

Dette bilag er ment som en dokumentation af de antagelser samt metoder der er anvendt i modellen.

Figur B1.1 viser princippet i modellen.



Figur B1.1 Principskitse for model 1 en

Den regn der rammer oplandet vil strømme til kloakken hvor regnvandet bliver blandet med spildevandet som samlet løber til et regnvandsbassin. I selve bassinet sker der under regnhændelsen en magasinering samt en vidreføring af regn- og spildevandet til renseanlægget. Når kapaciteten i bassinet er overskredet vil der ske en aflastning til recipienten. Alle beregningerne sker dynamisk og anvender som regndata, historiske danske regndata.

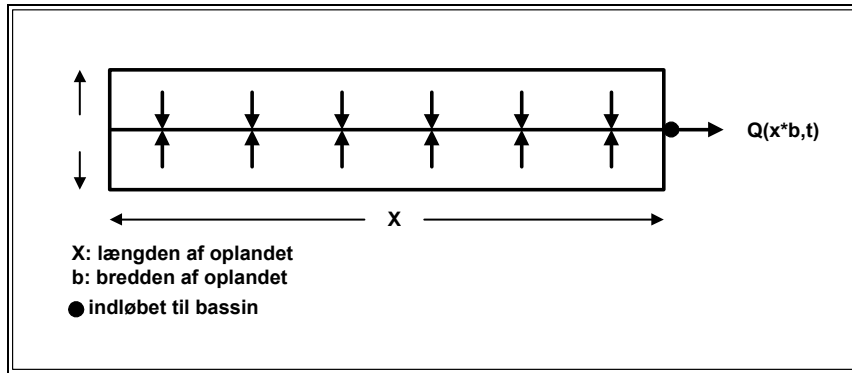
Regndata

Programmet anvender standart km2-filer som stammer fra Spildevandskomiteens regnmålere. For yderlig information se bl.a.: <http://www.er.dtu.dk/projects/svk26/regnserier-km2.htm>

Overflademodel

Modelleringen af afstrømningen sker via en tid-areal overflademodel. Nedenstående model viser princippet samtidigt med at overflademodellen er verificeret i forhold til et bereningseksempel med programmet MOUSE fra DHI.

Oplandet er rektangulært med bredden b og længden x og er vist på figur B1.2. Vandet strømmer fra oplandet til nederste punkt i oplandet hvor indløbet til bassinet forefindes.



Figur B1.2 Oplandsudformning

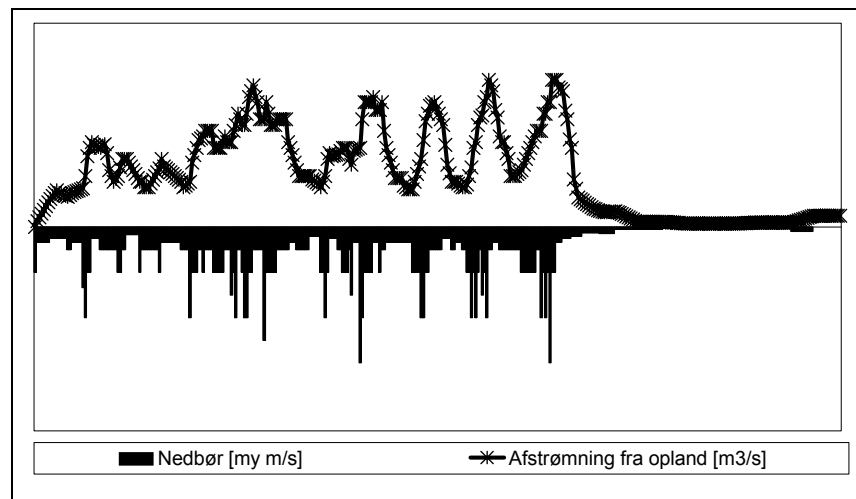
Princippet bygger på at der til hvert et tidspunkt og for en hver regnregistrering opgøres hvor meget areal der bidrager til tilstrømningen til indløbet til bassinet . Dette areal multipliceres dernæst med den respektive regnintensitet, hvorved den samlede indløbs hydrograf fremkommer. Da regnserierne er kontinuerte, dvs. varierende og fortløbende i tid, vil den resulterende hydrograf fra oplandet til indløbet af bassinet beregnes ud fra følgende forhold:

$$Q_{indløb}(t) = i_{regn}^t \frac{A}{t_r} + i_{regn}^{t-1} \frac{A}{t_r} \dots + i_{regn}^{t-t_r} \frac{A}{t_r}$$

hvor

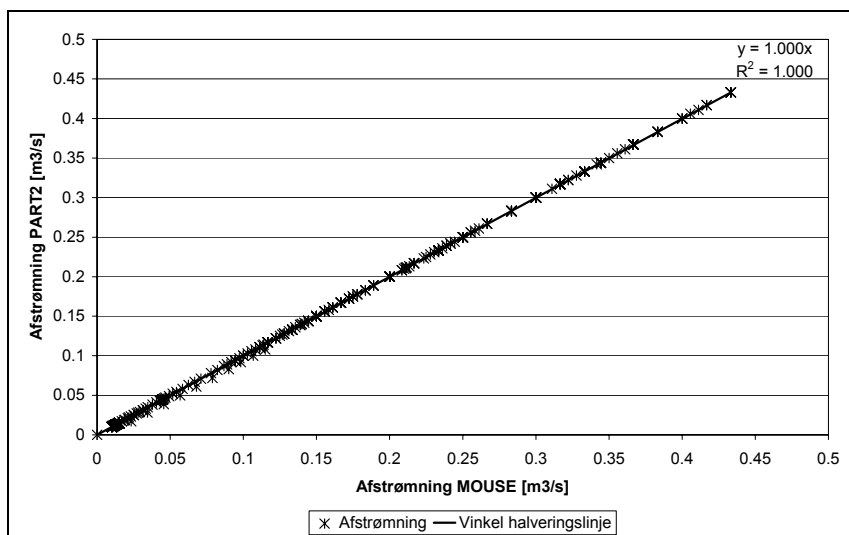
i_{regn}^t er den aktuelle regnintensitet [$\mu\text{m/s}$]
A er oplandsstørrelsen [ha]
 t_r er koncentrationstiden for oplandet [min].

Et eksempel på et registeret regnskyl er vist på figur B1.3.



Figur B1.3 Eksempel på til løbhydrograf til bassin ud fra en givet regnhændelse

Den opstillede overflademodel er eftervist ved at sammenligne resultatet fra den udviklede overflademodel i PART2 med resultatet fra en MOUSE kørsel. Sammenligningen er vist på figur B1.4 og det ses at der er god overensstemmelse mellem de 2 modeller. Alternativt er det muligt i PART2 at definere en vilkårlig tid-arealkurve.



Figur B1.4 Sammenligning mellem afstrømning fra et opland beregnet med PART2 og MOUSE

Bassinmodel

Den hydrauliske model for bassinet er opbygget som en magasineringsmodel som vist på figur B1.1. Bassinmodellen regner dynamisk hvor meget vand der strømmer til/fra bassinet samt hvor meget vand der vand aktuelt er opmagasineret, samt hvis kapaciteten i bassinet er overskredet, hvor meget vand der ledes via overløbskant til recipient. Modellen er opstillet ud fra følgende 2 modeludtryk:

Hvis magasineringen er mindre end bassin kapaciteten:

$$Ind = ud + \text{magasinering}$$

$$Q_{indløb}(t) = Q_{udløb}(t) + \Delta M(t)$$

hvor

$Q_{indløb}$ er indløbsvandføringen [m^3/s]

$Q_{udløb}$ er udløbsvandføringen [m^3/s]

ΔM er magasineringen [m^3]

Hvis kapaciteten i bassinet er overskredet:

$$Q_{overløb}(t) = (Q_{indløb}(t) - Q_{udløb}(t)) + (\Delta M(t) - V_{bassin})$$

hvor

$Q_{overløb}$ er overløbsvandføringen [m^3/s]

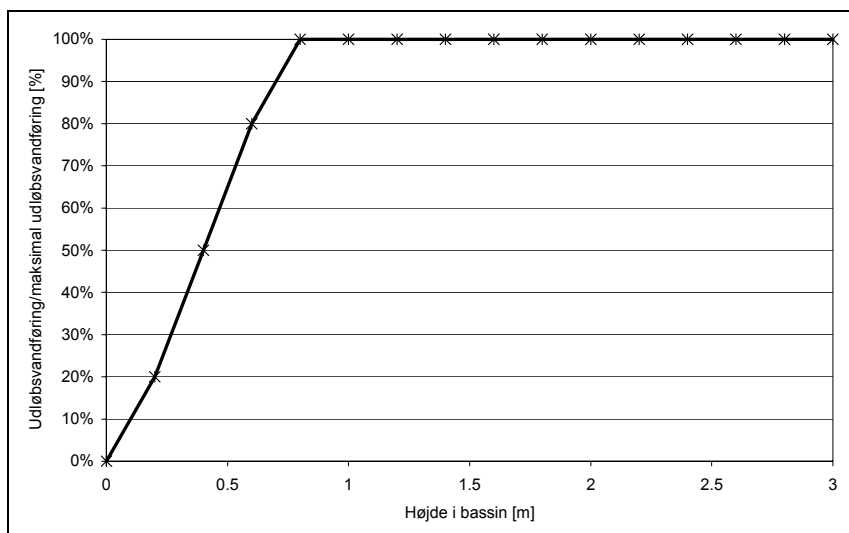
V_{bassin} er bassinvolumnet [m^3]

Udløbet

Udløbet er styret af en QH-kurve som kan specificeres vilkårligt.

Eksempel på den anvendte QH-kurve er vist på figur B1.5.

QH relationen angiver forholdet mellem den reelle udløbsvandføring samt maksimal udløbsvandføringen og den aktuelle dybde i bassinet.



Figur B1.5 Den anvendte QH kurve i udløbet af bassinet

Tilbageholdelsen af sedimenterbart materiale

I det vand der tilledes bassinet regnes der med en konstant koncentration af total sedimentbart stof (TSS), fordelt som vist på figur 1.1.

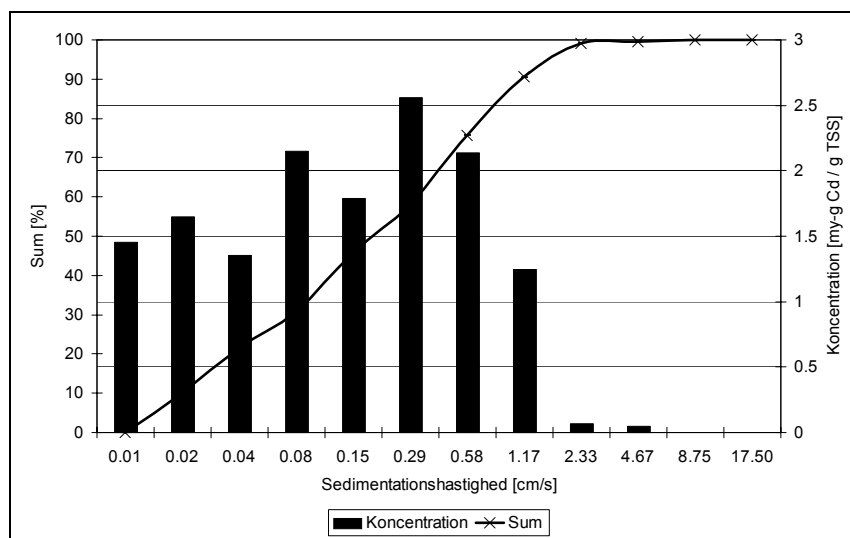
Dvs. at der ved at gennemregne afstrømningen fra oplandet for hele regnserien kendes den samlede belastning af stof og forureningskomponenter som PAH og tungmetaller. Ligeledes kendes hvor meget partikulært stof og fordelingen af de enkelte partikler i overløbsvandet. Nedenstående tabel viser et beregningseksempel.

Tabel B1.1 Beregningseksempel for beregningen af stof udledningen af bassinet. Eksemplet bygger på en udløbsmængde på ca 37.000 m³ over 18 år.

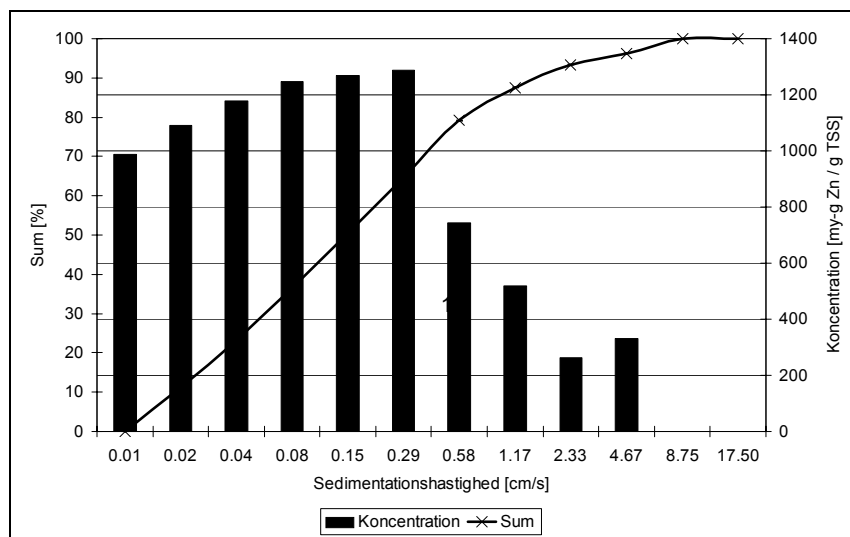
Partikel-sedimentationshastighed [cm/s]	Belastning af partikler [Tons TSS]	Koncentration PAH [µg/g-Ts]	Belastning PAH [g PAH]
17,5	0,0	0	0
8,75	0,0	0	0
4,667	0,0	0	0
2,333	0,0	5,8	0
1,167	0,0	9,2	0
0,583	0,1	19,3	3
0,292	0,6	21,2	13
0,146	0,8	11,3	10
0,078	0,6	13,2	8
0,039	0,6	12,4	7
0,019	0,3	6,7	2
0,01	0,3	0,16	
Samlet	3		43

Dvs. at ovenstående simulering viser at der samlet ledes ca. 3 tons TSS til recipienten henover 18 år, mens kun ca. 43 g partikelbunden PAH ledes til recipienten. Ovenstående procedure er indbygget i programmet, hvor det er muligt at angive vilkårlige og tidsvarierende stof koncentrationer.

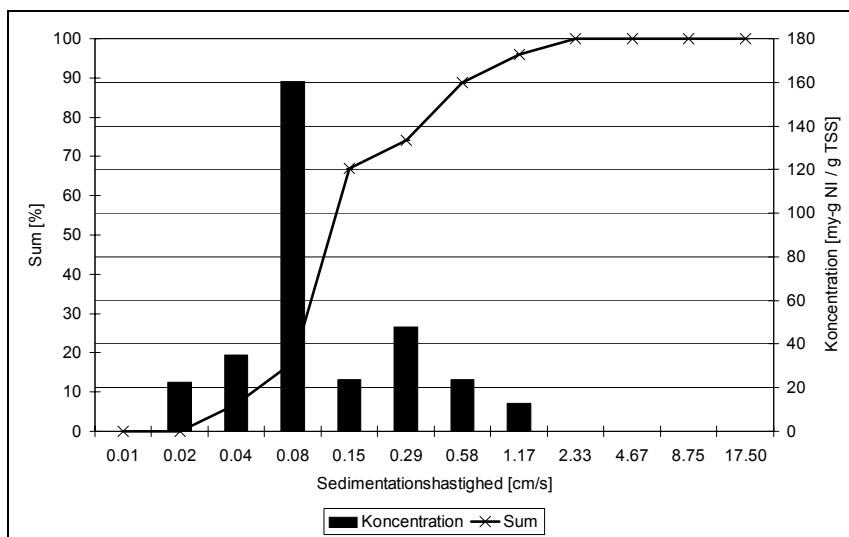
Bilag 2 Adsorberet tungmetaler



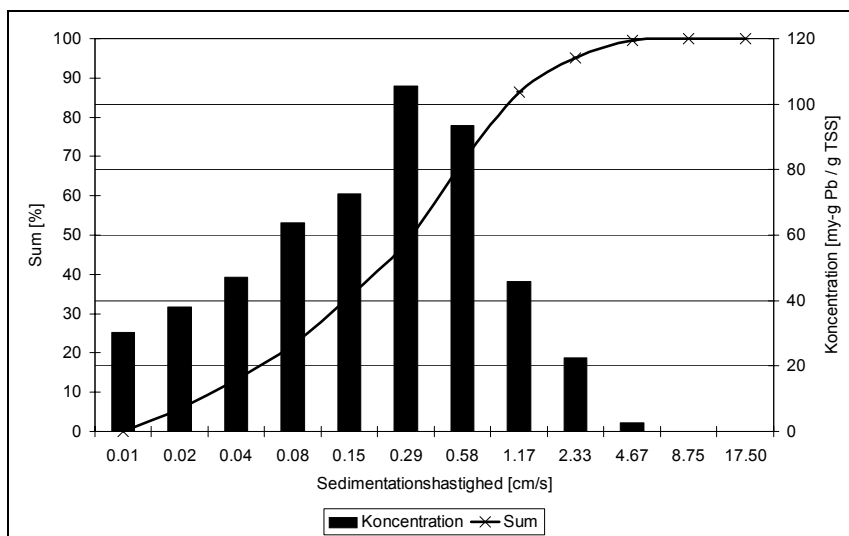
Figur B2.1 Sammenhængen mellem cadmiumkoncentrationen på de enkelte partikel fraktioner.



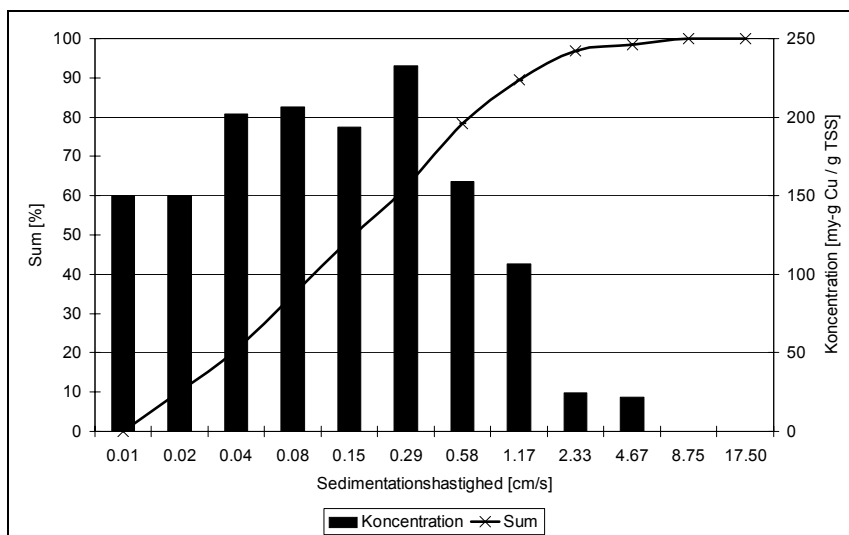
Figur B2.2 Sammenhængen mellem zinkkoncentrationen på de enkelte partikel fraktioner.



Figur B2.3 Sammenhængen mellem nikkelkoncentrationen på de enkelte partikel fraktioner.

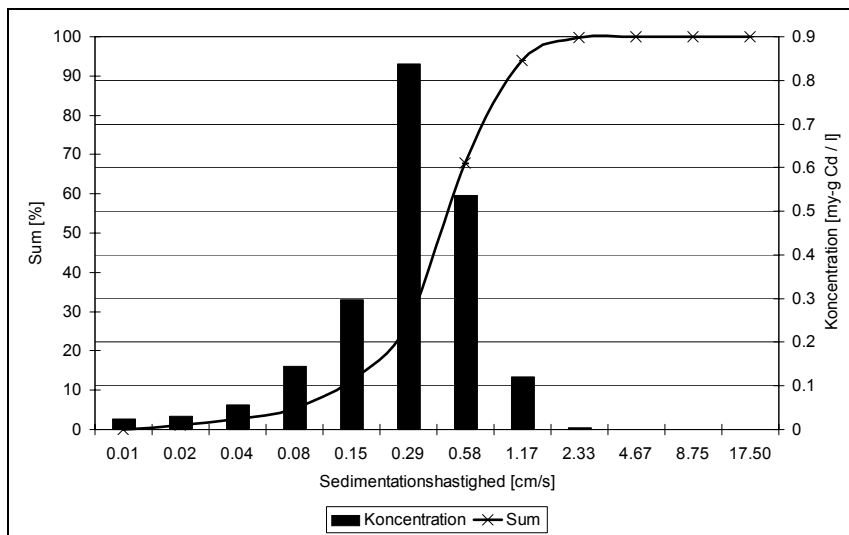


Figur B2.4 Sammenhængen mellem blykoncentrationen på de enkelte partikel fraktioner.

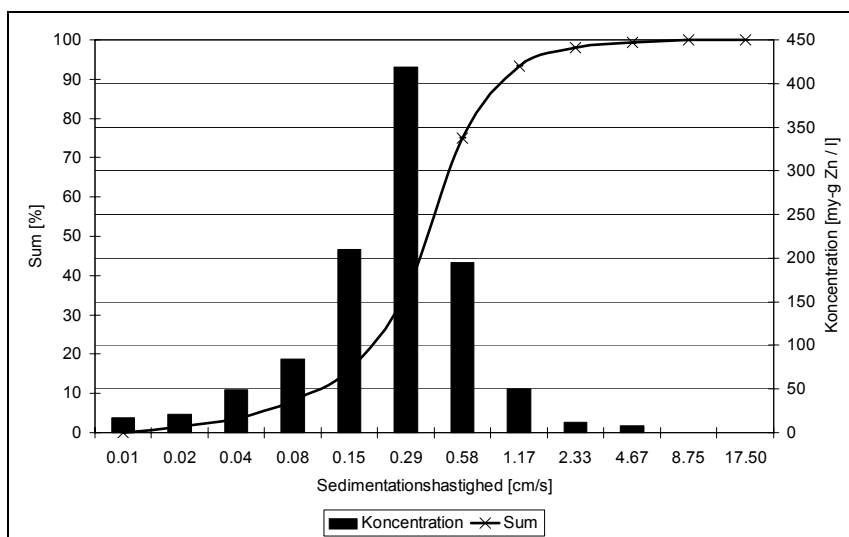


Figur B2.5 Sammenhængen mellem kobberkoncentrationen på de enkelte partikel fraktioner.

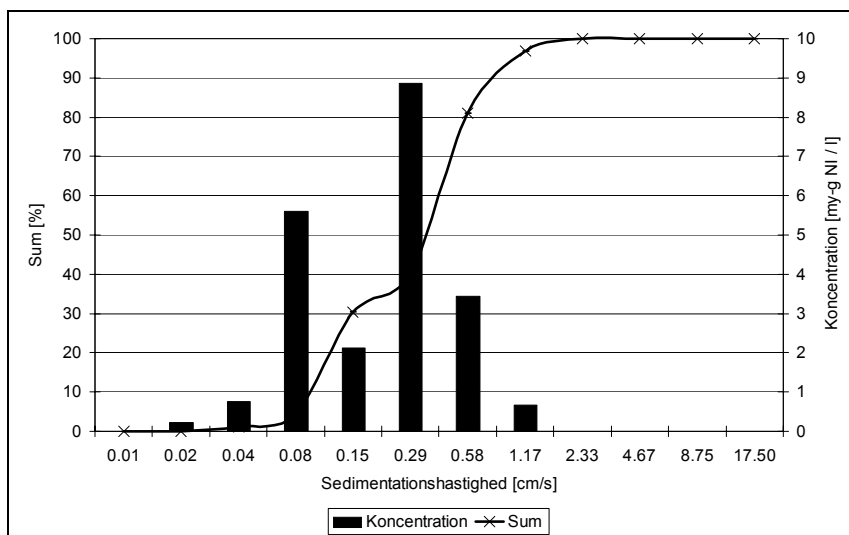
Bilag 3 Partikelkoncentration



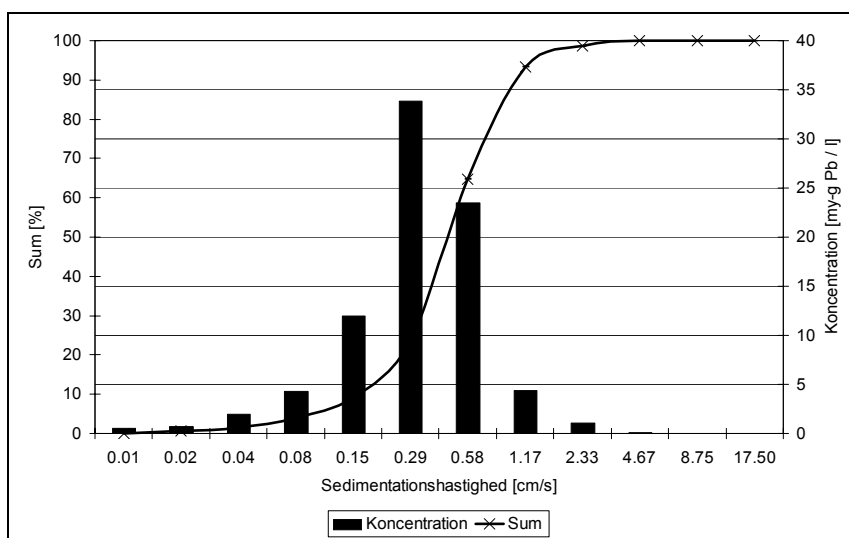
Figur B3.1 Sammenhæng mellem koncentration af cadmium og sedimentationshastighed.



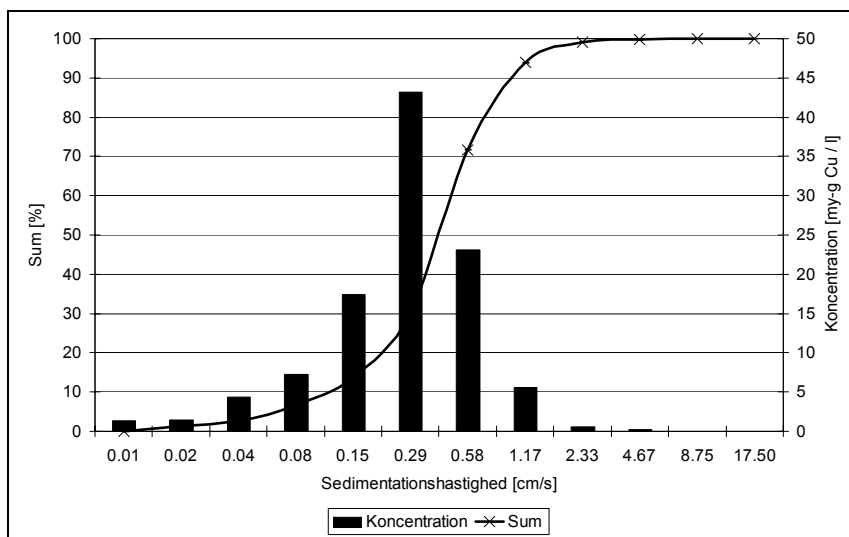
Figur B3.2 Sammenhæng mellem koncentration af zink og sedimentationshastighed.



Figur B3.3 Sammenhæng mellem koncentration af nikkel og sedimentationshastighed.



Figur B3.4 Sammenhæng mellem koncentration af bly og sedimentationshastighed.



Figur B3.5 Sammenhæng mellem koncentration af kobber og sedimentationshastighed.

De viste figurer for tungmetallerne bygger på et gennemsnit af 6 kemi-analyser.