

# HÅLLBAR DAGVATTENHANTERING I URBANA MILJÖER



Robert Furén, NCC AB

2022-12-21

# FÖRORD

Detta projekt har genomförts vid Luleå tekniska universitet (LTU) i forskningsämnet VA-teknik, inom avdelningen Arkitektur och vatten vid institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser. Projektet är en del av DRIZZLE, centrum för dagvattenhantering, ett av VINNOVA:s kompetenscentrum för forskning i världsklass inom områden viktiga för Sverige. Projektet har genomförts under ledning och stöttning av huvudhandledare professor Godecke Blecken, biträdande handledare professor Maria Viklander och industrihandledare Marie Kruså.

Denna rapport utgör en sammanfattning av licentiatavhandlingen ”STORMWATER BIORETENTION: POLLUTANT OCCURRENCE AND ACCUMULATION IN FILTER MATERIALS AND FOREBAYS” (Furén, 2022), vilken utgör ett delresultat av Robert Furén’s doktorandstudier.

Författaren vill rikta ett stort tack till de finansiärer som möjliggjort detta projekt: SBUF, NCC, LTU och VINNOVA (Grant no. 2016–05176). Ett stort tack riktas även till projektets referensgrupp som bistått med värdefull information, synpunkter och givande diskussioner. Referensgruppen har bestått av Stefan Indahl (Aarsleff), Marie Kruså (NCC), Birgitta Olofsson (Tyréns), Hans Säll (NCC) och Eva Vall (SVOA).

Robert Furén, december 2022

# SAMMANFATTNING

Våra städer påverkas av mänskliga aktiviteter och verksamheter vilka producerar föroreningar som vid nederbörd leds till och blir en belastning för sjöar och vattendrag. Förståelsen för dagvatten och föroreningar har ökat intresset för att rena och behandla dagvatten. Biofilter anses vara effektiva för att rena dagvatten och är populära för hantering av dagvatten. Många föroreningar ackumuleras i filtermaterialet. Forskning har identifierat de föroreningar vilka ackumuleras i biofilter som en föroreningsdepå och potentiell föroreningskälla. Därav är det av stor vikt att förstå och känna till föroreningars förekomst, mobilitet och de processer som styr ackumulering till biofilter och filtermaterialet.

Syftet i denna uppsats har varit att studera förekomst, ackumulering och koncentration av föroreningar i biofilteranläggningar vilka har använts för att rena dagvatten i urbana miljöer under en längre tid. För att bättre förstå dessa processer utfördes en fältstudie som innefattade provtagning av 29 biofilter (varav 20 försedda med en försedimentering) belägna i USA och som varit i drift för rening av dagvatten under en längre tid (7–16 år). Från 12 biofilter analyserades 116 prover för innehåll av 38 organiska föroreningar (16 PAH, 7 PCB, 13 ftalater och 2 alkylfenoler). Förekomst av metaller (Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) analyserades i 269 prover från 29 biofilter och en femstegs sekventiell lakning användes för studier av metallers mobilitet i filtermaterial.

Bland organiska föreningarna var PAH:er och PCB:er mest frekventa i filtermaterialet, där PAH påvisades i 12 undersökta filter och PCB i 10 anläggningar. Fyra organiska föreningar (tre olika ftalater och en PAH kongen) påvisades aldrig i något filterprov. Samtliga undersökta metaller hittades i alla filterprover förutom Cd vilket påvisades i 91% av undersökta prover. Organiska föreningar detekterades för 34 av 38 undersökta ämnen. Stora variationer i ämneskoncentration påvisades mellan olika biofilter, särskilt för organiska ämnen. Koncentrationen var högst i de översta 10 cm av filtermaterialet och minskade med ökat djup. Denna trend var tydligast för de organiska ämnena men observerades även för Cr, Cu, Pb och Zn. En trend av minskande koncentrationer med ökat avstånd från inlopp kunde observeras för organiska ämnen men var mindre tydlig för metaller. Högst ämneskoncentration detekterades i försedimenteringar, vilka dock endast innehåller sediment och inget filtermaterial. En Principalkomponentanalys visade ett starkt samband mellan ämneskoncentration och förhållandet mellan biofiltrens area och avrinningsområdets area. Resultaten i denna studie visade även på likheter i ackumulering till filtermaterialet mellan partikelbundna organiska ämnen och partikelbundna metaller.

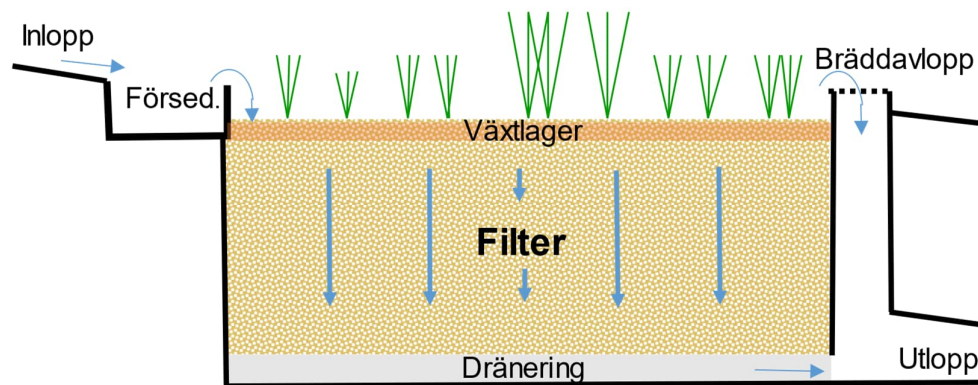
Slutsatserna i denna LIC avhandling bidrar med kunskap till att utveckla bättre metoder för dagvattenhantering och därigenom en hållbar utveckling av framtida städer. Av praktisk betydelse är att regelbundet underhåll och periodvis byte av översta filterlagret kan säkerställa en bibehållen reningsfunktion över längre tid.

# INNEHÅLL

FÖRORD.....	1
SAMMANFATTNING.....	2
INNEHÅLL.....	3
1 BAKGRUND.....	4
2 SYFTE OCH MÅL.....	5
3 METOD OCH GENOMFÖRANDE.....	5
4 RESULTAT.....	6
4.1 ORGANISKA FÖRORENINGAR.....	6
4.2 METALLER.....	7
4.3 SEKVENTIELL LAKNING.....	8
4.4 PRINCIPALKOMPONENTANALYS.....	9
5 SLUTSATSER.....	9
6 FORTSATTA STUDIER.....	10
LITTERATURFÖRTECKNING.....	12

# 1 BAKGRUND

Dagvatten är en del av den urbana hydrologiska cykeln och spelar en viktig roll vid utformningen av hållbara städer. Hårdgjorda ytor ger snabb avrinning och genom aktiviteter och verksamheter producerar städer en rad olika föroreningar, t ex metaller, PAH, PCB och mikroplaster (Müller et al., 2020). Vid nederbörd och snösmältning leds föroreningar till sjöar och vattendrag där de belastar recipient och vattenmiljö (Barbosa et al., 2012; Müller et al., 2020). Rent vatten är essentiellt för människor och djur varför det är av stor vikt att vi skyddar och hanterar vårt vatten på bästa sätt. Val av anläggningstyp för omhändertagande av dagvatten är beroende av platsspecifika förutsättningar t ex föroreningars koncentrationer, klimat, mark- och grundvattenförhållanden och recipientens känslighet. Biofilter (Figur 1) är en populär reningsteknik för dagvatten (Davis et al., 2009) som är bra på att rena föroreningar, såsom suspenderat material (Hsieh and Davis, 2005), metaller (Blecken et al., 2009a) och ett flertal organiska föroreningar (PAH och PCB) (Zhang et al., 2014).



Figur 1. Principskiss av biofilter där huvudsaklig rening av dagvatten sker i filtermaterialen.

Biofilter är växtbevuxna infiltrationsbäddar där vattnet från omgivande ytor renas av växter och filtermaterial. Filtermaterialen består vanligtvis bestående av jord/sandblandningar ibland med ett översta lager organiskt material (SV 2016-05). Det har även testats olika reaktiva filtermaterial som tillsats i biofilter. En fördel med biofilter (jämfört med till exempel sedimentationsanläggningar) är att de kan avskilja lösta föroreningar. Tidigare studier av biofilter visar att ackumulerade föroreningar kan verka som en föroreningsdepå i biofilter vilket kan utgöra en potentiell föroreningskälla (Davis et al., 2003). För att upprätthålla god reningsfunktion kräver grön infrastruktur regelbundet underhåll (Graham and Lei, 2000; Hoyt and Brown, 2005). Forskning likväl som praktiska erfarenheter visar att underhåll av dagvattenanläggningar ofta är otillräckligt med försämrade funktion som resultat (Al-Rubaei et al., 2015; Lindsey et al., 1992; Starzec et al., 2005). Studier från Sverige, Danmark och USA visar även att infiltrationsanläggningar på grund av bristande underhåll ibland inte fungerar alls (Al-Rubaei et al., 2013; Bergman et al., 2011). Trots tidigare intensiv forskning på biofilter kvarstår frågor angående biofilter och långtidsfunktion (Blecken et al., 2017), t ex. föroreningars förekomst och tillgänglighet i biofilter. Då huvudsaklig ackumulering sker i filtermaterialen (Blecken et al., 2009b) är det av särskilt stor vikt att förstå processer som styr ackumulering och mobilisering av föroreningar i filtermaterialen. Mycket av tidigare forskning på biofilter har bedrivits i laboratorier eller i korta projekt på nyinstallerade fältanläggningar. Därav genomfördes i detta projekt tillsammans med Ohio State University en mycket omfattande fältstudie av biofilter i norra USA med provtagning från 29 olika biofilter. Totalt analyserades

269 filterprover avseende förekomst och koncentration av metaller (Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) och 38 olika organiska föreningar (16 PAH, 7 PCB, 13 ftalater och 2 alkylfenoler).

## 2 SYFTE OCH MÅL

Detta projekt har syftat till att studera biofilters långtidsfunktion (förekomst, ackumulering och koncentration av föroreningar i biofilter) med målet att öka förståelsen för var och hur föroreningar ackumuleras i anläggningar, vilka processer som styr detta över tid och vilka risker det innebär vid praktisk tillämpning.

De huvudsakliga projektaktiviteterna har varit att studera följande;

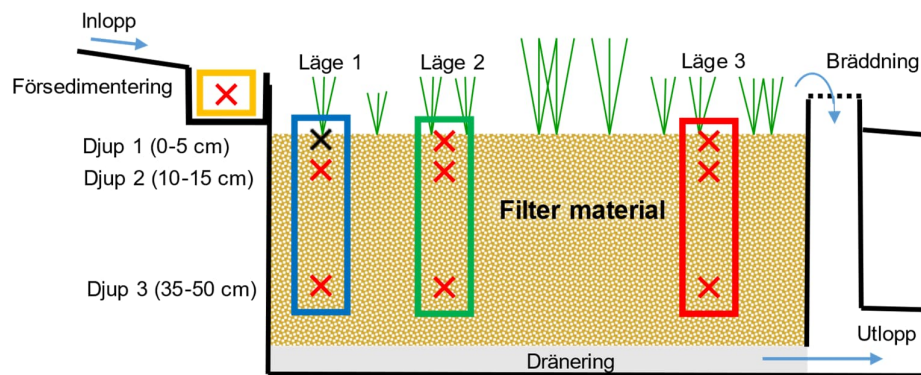
- Förekomst, ackumulering och koncentration av föroreningar i biofilter (metaller och organiska ämnen).
- Fördelning av föroreningar i filtermaterial och styrande processer (biotillgänglighet).

För ökad förståelse för;

- Drift och underhållsfrågor kopplade till långtidsfunktion (utbyte av filtermaterial i översta lagret).
- Risker vid hantering av filtermaterial och sediment samt åtgärder vid hantering av förbrukat filtermaterial och sediment (metallens lakbarhet i sediment och filtermaterial).

## 3 METOD OCH GENOMFÖRANDE

I november 2019 utfördes en fältstudie av biofilter i Ohio, Michigan och Kentucky (USA), där prov på filtermaterial samlades in från 29 biofilter vilka varit i drift i 7–16 år. Filtrens avrinningsområden vilka huvudsakligen behandlar vägdagvatten bestod av stadskärnor, tätorter, industri- och handelsområden. Vald metodik för provtagning var en hypotesstyrd provtagning i likhet med metod tidigare använd bland annat av Tedoldi et al., (2017) för enklare jämförelser med tidigare studier. Samtliga prover analyserades under 2020 vid ackrediterat laboratorium (ALS Global, 2022) för koncentration av sex metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) och från 12 filter analyserades koncentration av 38 organiska föreningar (16 PAH, 7 PCB, 13 ftalater och 2 alkylfenoler). För undersökning av metallernas potentiella förmåga att lakas ut ur filtermaterial användes en femstegs sekventiell lakning på material från prov i läge 1, djup 1 (Figur 2).



Figur 2. Principalskiss biofilter med djup och läge för provtagningspunkter. Sekventiell lakning har utförts på prov i Läge 1, djup 1 (svart kryss).

För analys av data och illustration av fördelning och koncentration av föroreningar skapades boxplots och stapeldiagram i Minitab 18. En Principalkomponentanalys (PCA, Principal Components Analysis) utfördes i Simca 17 för studie och visualisering av trender samt korrelationer mellan olika parametrar. Merparten av data var icke normalfördelat och icke-parametriskt Kruskal-Wallis-test användes för att identifiera statistiskt signifikanta skillnader mellan undersökta parametrar. Data under detektionsgräns redovisas med värde för högsta rapporteringsgräns i enlighet med Helsel, (2012) och är indikerat som  $DL_{max}$  i Boxplots i figur 3 och 4.

## 4 RESULTAT

### 4.1 Organiska föroreningar

I filterproverna undersöktes förekomst av organiska ämnen PAH, PCB och Ftalater där flera ämnen påvisades i mer än hälften av de uttagna proverna där uppmätt halt till viss del verkar bero på provtagningsdjup i biofiltret. 34 av de 38 undersökta organiska föroreningar upptäcktes i minst ett av 116 prover av filtermaterial. PAH hittades över detektionsgränsen i 79 % av 116 prover och påträffades i samtliga tolv undersökta filter. PCB påvisades i 77 % av alla prover och utgjorde tillsammans med PAH den mest frekventa gruppen av organiska föroreningar. Ftalater upptäcktes i elva undersökta filter och i 59 av 116 prover (51 %). Tio av de 13 undersökta ftalaterna påvisades i minst ett prov. Alkylfenoler hade den lägsta förekomsten av undersökta organiska föroreningar. Den mest frekventa alkylfenolen var nonylfenol vilken upptäcktes i 10 av 12 filter och i 26 av 115 prover (23 %). För PAH, ftalater och för nonylfenol var koncentrationer statistiskt sett högre (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ) i försedimenteringen än i filtermaterialet och för PCB observerades en liknande trend. För PAH och PCB var molekyler med högre molekylvikt mer vanligt förekommande än molekyler med lägre molekylvikt och för PAH hade även substanser med hög och medelhög molekylvikt högre halter än PAH med lägre molekylvikt. Koncentrationerna av PAH, PCB och ftalater var högst i ytskikten (Figur 3), men påträffades även i djupare lager om än mindre frekvent och i lägre koncentrationer. Alkylfenoler detekterades främst i det översta lagret nära inlopp och försedimentering. Koncentrationerna minskade med ökat djup i filtret för PAH, PCB, ftalater och för nonylfenol.

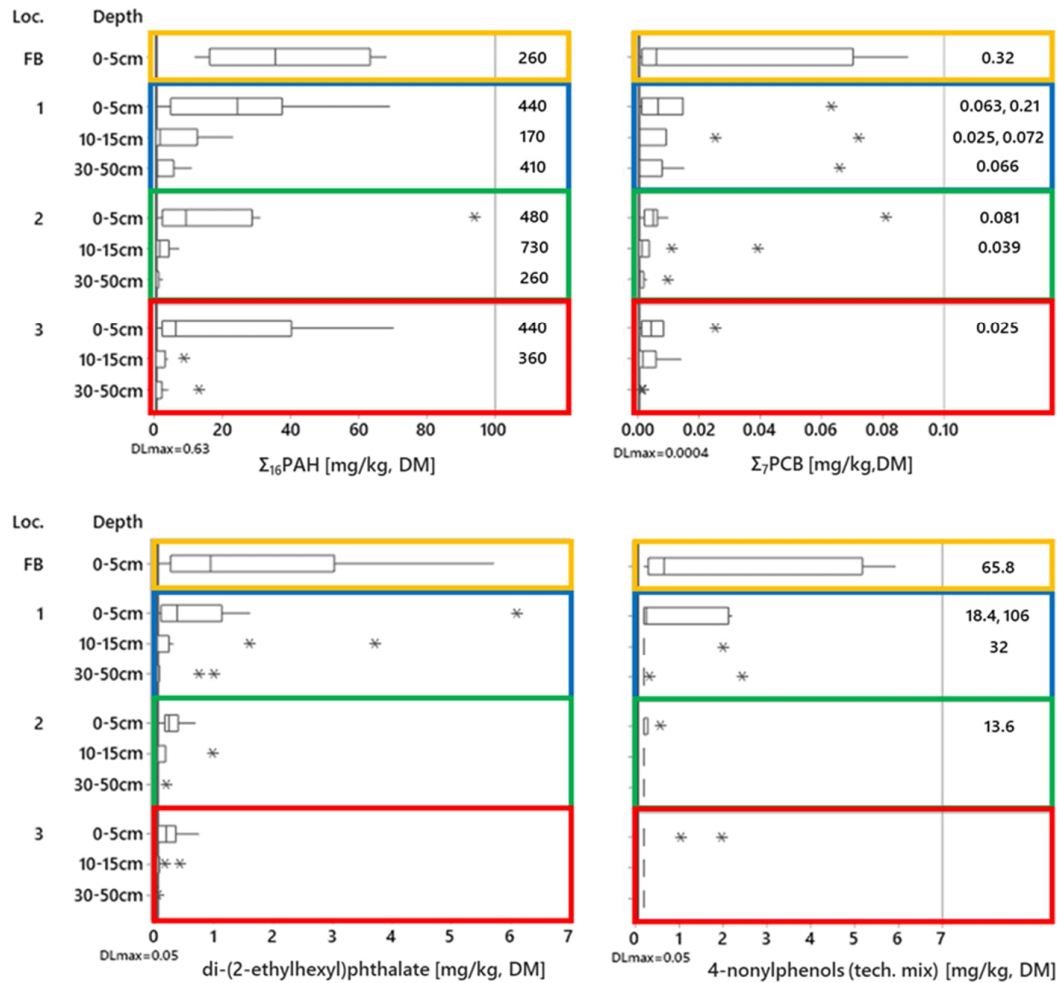
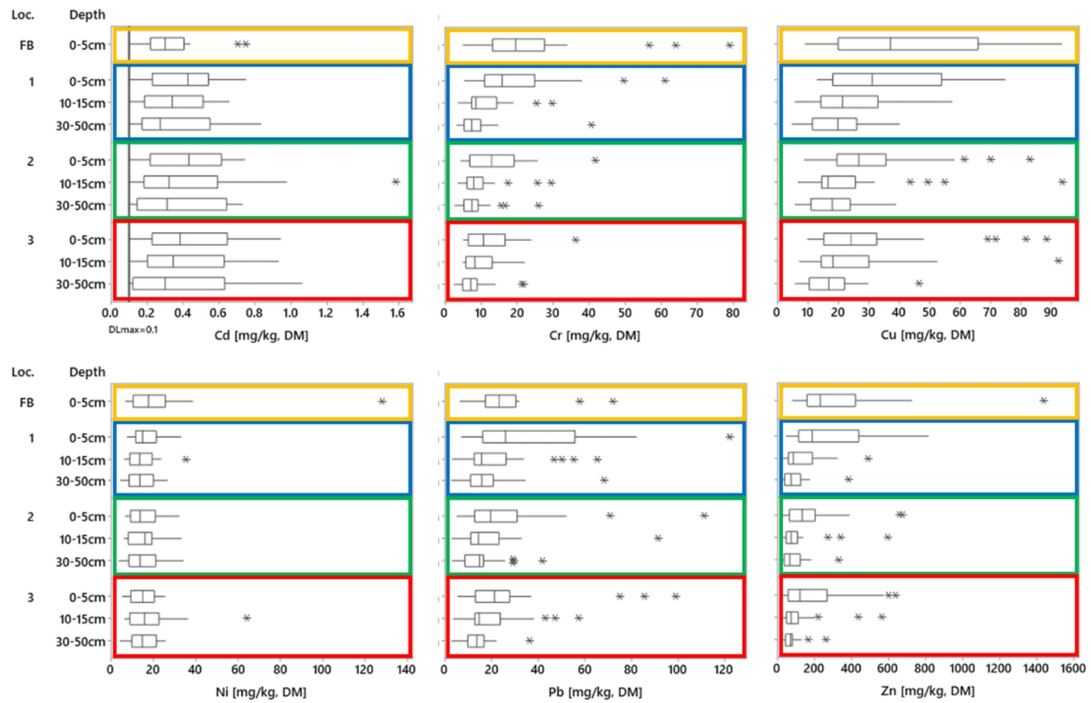


Figure 3. Boxplot med koncentrationer av  $\Sigma_{16}\text{PAH}$ ,  $\Sigma_7\text{PCB}$ , di-2-ethylhexylftalat och 4-nonylphenol (tech. mix) i för sedimentering (FB) och tre lägen (loc.) i biofilter för tre olika djup (Depth). Varje läge i filtret är markerad med en färgad rektangel som motsvarar dem i figur 2. Extremvärden redovisas med asterisk (\*) och i förekommande fall med siffror till höger i diagrammet.

## 4.2 Metaller

Alla metaller utom Cd (dvs. Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) hittades i alla 269 analyserade prover. Cd påvisades i 245 av 269 analyserade prover. En trend med minskande koncentrationer med ökat djup observerades för Cd, Cr, Cu, Pb och Zn men inte för Ni (Figur 4). Denna trend var statistiskt signifikant (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ; figur 6) för Cr, Cu, Pb och Zn, men kunde även observeras för Cd i boxplots. För Cr och Zn observerades även en tendens till minskande koncentrationer med ökande avstånd från inloppet, främst i det översta lagret av filtren. En liknande tendens observerades även för Cu och Pb, men skillnaden var inte statistiskt signifikant (Kruskal-Wallis,  $p = 0,05$ ). Cr, Cu och Zn uppvisade något högre koncentrationer i försedimenteringar än i filtermaterialaet.

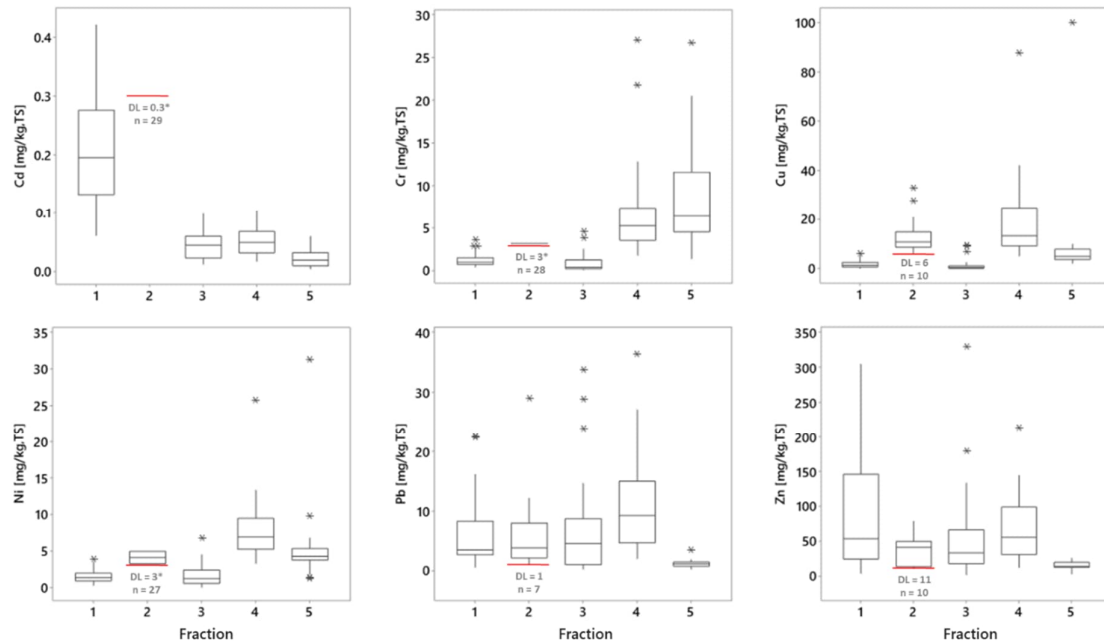




Figur 4. Boxplots för totalkoncentration av Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn vid tre olika lägen (Loc.) och olika djup (Depth). Sekventiell lakning utfördes på prover i läge 1 vid djupet 1 (0-5 cm). Data för Cd med en förekomst på 90 % är censurerade till lägsta detektionsgräns (DL<sub>max</sub>=0,1 mg/kg, DM). Varje läge i filtret är markerad med en färgad rektangel som motsvarar dem i figur 2.

### 4.3 Sekventiell lakning

En femstegs sekventiell lakning utfördes för metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) från filterprov i läge 1, djup 1 (Figur 1). Lakningen beskriver metallers mobilitet i filtermaterial där steg 1 efterliknar lätt lakade former vilka kan frigöras från ett biofilter vid nederbörd och bli ett hot mot omgivningen. Lakningssteg 5 efterliknar mer extrema förhållanden där även stabilare former kan lakas ur, förhållanden vilka sannolikt inte förekommer i ett biofilter. Resultaten från den sekventiella lakningen visade att alla undersökta metaller var spridda över alla fem fraktioner (förutom Cd i fraktion 2 som var under detektionsgränsen) och därför i varierande grad är potentiellt tillgängliga i filtermaterial (Figur 5). Cd var den mest lakningsbenägna metallen och Cr den med lägst lakbarhet.



Figur 5. Boxplots för fraktionering av metaller i fem fraktioner. För alla metaller anges detektionsgränsen (DL) i fraktion 2 och markeras med en horisontell linje. "n" anger antalet värden under DL av totalt 29 prover. \* Anger att för Cd, Cr och Ni hade ett prov i analysen en högre DL (dubbelt värde) jämfört med de andra DL (dvs.  $Cd_{DL}=0,3$  för 28 prover och  $Cd_{DL}=0,6$  för ett prov,  $Cr_{DL}=3$  för 27 prover och  $Cr_{DL}=6$  för ett prov,  $Ni_{DL}=3$  för 26 prover och  $Ni_{DL}=6$  för ett prov).

## 4.4 Principalkomponentanalys

De viktigaste trender och tendenser som identifierats i PCA var att koncentrationer var korrelerade efter geografiskt olika filter, olika markanvändning och djup. En trend kunde även observeras i förhållandet mellan avrinningsområdets och filtrets storlek där stora avrinningsområden var korrelerat till högre koncentrationer.

## 5 SLUTSATSER

Alla metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) och organiska föroreningar (16 PAH:er, 7 PCB:er, 13 ftalater och 2 alkylfenoler) som analyserats i denna studie var vanligt förekommande i filtermaterialen från de undersökta biofilter belägna i Michigan, Ohio och Kentucky (USA), vilka varit i drift för rening av dagvatten i 7–16 år. Alla analyserade metaller påvisades i samtliga 269 prover, utom Cd som påvisades i 91 % av proverna. De organiska föroreningarna påvisades för 34 av 38 analyserade ämnen i minst ett filtermaterialprov. PAH:er och PCB:er var de mest frekventa förekommande organiska föroreningarna, medan ftalater och alkylfenoler var minst frekvent påvisade. Biofiltren uppvisade stora variationer i koncentration mellan olika filter,

främst för de organiska föroreningarna men även för metaller dock i mindre utsträckning. Detta beror sannolikt på platsspecifika skillnader i föroreningskällor men olika typer av filtermaterial kan ha inverkan.

De högsta koncentrationerna av organiska föroreningar fanns i de övre 10 cm av filtermaterialet och minskade sedan med ökande djup i filtret. För metaller observerades en liknande, men mindre tydlig trend för Cr, Cu, Pb och Zn. En tendens till minskande koncentration med ökande avstånd från inloppet observerades för alla fyra grupper av organiska föroreningar (PAH, PCB, ftalater och alkylfenoler), men var mindre tydlig för metallerna. Förutom djup och avstånd från inloppet uppvisade även förhållandet mellan avrinningsområdets area och filtrens storlek en stark korrelation till koncentrationer. Dessa likheter i fördelning och ackumulering av partikelbundna organiska föroreningar och metaller i denna studie kan indikera likheter i långtidfunktion och behov av drift och underhåll för organiska föroreningar och metaller.

Sekventiell lakning på filtermaterial från det översta skiktet i ett biofilter visar att samtliga undersökta metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) har en potentiell risk för urlakning från filter och filtermaterial över tid. Högst risk för urlakning identifierades för Cd, Zn och Pb, vilka kan vara mobila i filtermaterial vid nederbörd, medan Cr, Cu och Ni hade svårare för att röra på sig och fäster således starkare till filtermaterialet. Metaller löper också en potentiell risk att laka ur från filtermaterial eller sediment som avlägsnats från ett biofilter, varför även förhållanden vid deponeringen är viktiga.

Regelbundet underhåll av försedimentering och byte av det översta lagret i filtret kan vara tillräckligt för att säkerställa en långvarigt god filterfunktion samt förhindra ansamling av föroreningar och igensättning av ytlager. Säkert bortskaffande av förorenat filtermaterial är viktigt då material avlägsnas från en biofilteranläggning. En rekommendation är därför att filtermaterial provtas och analyseras regelbundet avseende på koncentrationer av organiska föroreningar och metaller för att möjliggöra en bättre miljöbedömning av materialet.

- Alla som analyserats i denna studie var vanligt förekommande
- De högsta koncentrationerna av organiska föroreningar fanns i de övre 10 cm av filtermaterialet och minskade sedan med ökande djup i filtret
- Samtliga undersökta metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) har en potentiell risk för urlakning från filter och filtermaterial över tid
- Regelbundet underhåll av försedimentering och byte av det översta lagret i filtret kan vara tillräckligt för att säkerställa en långvarigt god filterfunktion samt förhindra ansamling av föroreningar och igensättning av ytlager

## 6 FORTSATT STUDIER

Ett antal områden har i denna studie identifierats som intressanta för vidare studier;

- Studier av kort- respektive långtidfunktion vid olika underhåll krävs för ökad förståelse av ackumulering och fördelningen av metaller, organiska föroreningar, andra partikelbundna och lösta föroreningar i biofilter.
- Denna studie inkluderar inte biologisk nedbrytning då information saknades om filtrens föroreningsbelastning. Kompletterande mätningar av dagvattenkvalitet och flöde in

respektive ut ur försedimentering och i filtermaterial skulle kunna möjliggöra massbalansberäkningar. Detta skulle kunna ge information om fördelning av mängden föroreningar mellan filtermaterial och försedimentering men också om urlakning och biologisk nedbrytning av föroreningar i biofilter.

- Tidigare studier har visat på variationer i utsläpp av föroreningar över tid i biofilter (Markiewicz et al., 2017). Därav skulle kontinuerlig provtagning av filtermaterial från tidigare provtagna platser tillsammans med riktade provtagningskampanjer över årscykler och längre tidsperioder möjliggöra en bredare förståelse av filtrens funktion över tid.
- Studier vilka omfattar en större spridning i ålder mellan olika biofilter, med fördelning mellan nyare och äldre filter, vilka har varit i drift under längre tid. Detta skulle kunna ge information om trender för ackumulering av föroreningar som man kan förvänta i biofilter i drift över tid.
- På grund av skillnader mellan olika nationella och regionala lagar och regler samt användande av olika byggmaterial rekommenderas studier som inkluderar provtagning från olika länder. Detta för att utvärdera inverkan av hur geografiska skillnader i temperatur, luftfuktighet och nederbörd påverkar ett biofilter och dess ackumulation av metaller, organiska- och andra föroreningar. Resultat från fältstudier är till viss del platsspecifik, men begränsas också av de analyser och metoder som används. Studier från andra geografiska platser och av andra föroreningar skulle därför bidra till en bredare förståelse av filtrens funktion.
- Då filtermediets egenskaper påverkar ackumulation och adsorption av såväl lösta som partikelbundna föroreningar behövs ytterligare studier av olika sorters filtermaterial, till exempel med olika kornstorleksfördelning, materialsammansättning och användning av tillsatser (med innehåll av biokol, torv, kalkrika material eller pimpsten).

# LITTERATURFÖRTECKNING

- Al-Rubaei, A.M., Stenglein, A.L., Viklander, M., Blecken, G.-T., 2013. Long-Term Hydraulic Performance of Porous Asphalt Pavements in Northern Sweden. *J. Irrig. Drain Eng.* 139, 499–505. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000569](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000569)
- Al-Rubaei, A.M., Viklander, M., Blecken, G.-T., 2015. Performance upkeep of 30 Swedish wet ponds for stormwater treatment. Presented at the NORDIWA 2015 - 14th Nordic Wastewater Conference, Bergen, Norway.
- ALS global, 2022. ALS Scandinavia [WWW Document]. ALS Global. URL <https://www.alsglobal.se/> (accessed 11.8.21).
- Barbosa, A.E., Fernandes, J.N., David, L.M., 2012. Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research* 46, 6787–6798. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>
- Bergman, M., Hedegaard, M.R., Petersen, M.F., Binning, P., Mark, O., Mikkelsen, P.S., 2011. Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central Copenhagen after 15 years of operation. *Water Science and Technology* 63, 2279–2286. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.158>
- Blecken, G.-T., Hunt, W.F., Al-Rubaei, A.M., Viklander, M., Lord, W.G., 2017. Stormwater control measure (SCM) maintenance considerations to ensure designed functionality. *Urban Water Journal* 14, 278–290. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1111913>
- Blecken, G.-T., Zinger, Y., Deletić, A., Fletcher, T.D., Viklander, M., 2009a. Influence of intermittent wetting and drying conditions on heavy metal removal by stormwater biofilters. *Water Research* 43, 4590–4598. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.008>
- Blecken, G.-T., Zinger, Y., Deletić, A., Fletcher, T.D., Viklander, M., 2009b. Impact of a submerged zone and a carbon source on heavy metal removal in stormwater biofilters. *Ecological Engineering* 35, 769–778. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.009>
- Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G., Clar, M., 2009. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. *J. Environ. Eng.* 135, 109–117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109))
- Davis, A.P., Shokouhian, M., Sharma, H., Minami, C., Winogradoff, D., 2003. Water Quality Improvement through Bioretention: Lead, Copper, and Zinc Removal. *Water Environment Research* 75, 73–82. <https://doi.org/10.2175/106143003X140854>
- Graham, E.I., Lei, J.H., 2000. Stormwater Management Ponds and Wetlands Sediment Maintenance. *Water Quality Research Journal* 35, 525–540. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2000.031>
- Helsel, D.R., 2012. *Statistics for censored environmental data using Minitab and R*, 2nd ed. ed, Wiley series in statistics in practice. Wiley, Hoboken, N.J.
- Hoyt, S., Brown, T., 2005. Stormwater Pond and Wetland Maintenance Concerns and Solutions, in: *Impacts of Global Climate Change*. Presented at the World Water and Environmental Resources Congress 2005, American Society of Civil Engineers, Anchorage, Alaska, United States, pp. 1–12. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)226](https://doi.org/10.1061/40792(173)226)
- Hsieh, C.-H., Davis, A.P., 2005. Multiple-event study of bioretention for treatment of urban storm water runoff. *Water Science and Technology* 51, 177–181. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0589>
- Lindsey, G., Roberts, L., Page, W., 1992. Inspection and maintenance of infiltration facilities. *Journal of soil & water conservation* 47, 481–486.
- Markiewicz, A., Björklund, K., Eriksson, E., Kalmykova, Y., Strömvall, A.-M., Siopi, A., 2017. Emissions of organic pollutants from traffic and roads: Priority pollutants selection and substance flow analysis. *Science of The Total Environment* 580, 1162–1174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.074>
- Müller, A., Österlund, H., Marsalek, J., Viklander, M., 2020. The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of The Total Environment* 709, 136125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>
- Starzec, P., Lind, B.B., Lamngren, A., Lindgren, Å., Svenson, T., 2005. Technical and Environmental Functioning of Detention Ponds for the Treatment of Highway and Road Runoff. *Water Air Soil Pollut* 163, 153–167. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-0216-y>
- SV 2016-05, 2016. Rapport Nr 2016-05 (Kunskapssammanställning dagvattenrening No. Kunskapssammanställning dagvattenrening).
- Tedoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Kovacs, Y., Gromaire, M.-C., 2017. Assessment of metal and PAH profiles in SUDS soil based on an improved experimental procedure. *Journal of Environmental Management* 202, 151–166. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.063>
- Zhang, K., Randelovic, A., Page, D., McCarthy, D.T., Deletic, A., 2014. The validation of stormwater biofilters for micropollutant removal using in situ challenge tests. *Ecological Engineering* 67, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.004>