
Svenskt Vatten

UTVECKLING

Rapport
Nr 2025-3

Tekniker för yteffektiv dagvattenbehandling: zeoliter, raster och membran

Annelie Hedström
Ivan Milovanović
Saida Kaykhaii
Maria Viklander

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

RAPPORTENS TITEL	Tekniker för yteffektiv dagvattenbehandling: zeoliter, raster och membran
TITLE OF THE REPORT	Components for area efficient stormwater treatment: Zeolites, bottom grid structures and membranes
FÖRFATTARE	Annelie Hedström, Ivan Milovanović, Saida Kaykhaii och Maria Viklander, VA-teknik, Dag&Nät, Luleå tekniska universitet
RAPPORTNUMMER	2025-3
ANTAL SIDOR	33
SAMMANDRAG	Projektet har utvärderat avancerade tekniker för dagvattenrening som kan komplettera och införlivas i etablerade lösningar och bebyggda områden för att skapa mer yteffektiva dagvattenreningssystem. Tekniker som har undersökts är zeolitfilter, membranrening, kemisk fällning och en rasterstruktur för dammar. Avskiljning av föroreningar har varit i fokus, men projektet har även belyst aspekter som rening över tid, implementering och utvecklingsbehov.
SUMMARY	The project has evaluated advanced stormwater treatment techniques that can complement and be integrated into established solutions and urban areas to create more space-efficient stormwater treatment systems. Zeolite filters, membrane filtration, chemical precipitation and grid structures for ponds have been investigated. For all components, treatment of stormwater pollutants has been in focus, but other aspects such as treatment over time, implementation and further need of research have been discussed.
SÖKORD	Dagvatten, koppartak, koppar, ultrafilter, dagvattendammar, zeolitfilter, reningssystem, yteffektivitet
KEYWORDS	Stormwater, copper roof, copper, ultra filter, stormwater pond, zeolite filter, treatment system, area efficiency
MÅLGRUPPER	Kommuner, konsulter, forskare
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGSÅR	2025
UTGIVARE	©Svenskt Vatten AB
REFERENS	Hedström A., Milovanović I., Kaykhaii S. och Viklander M. (2025). <i>Tekniker för yteffektiv dagvattenbehandling: zeoliter, raster och membran</i> . SVU-rapport 2025-3. Stockholm: Svenskt Vatten.

Om projektet

PROJEKTNUMMER	16-115
PROJEKTETS NAMN	Yteffektiv dagvattenrening – Var? När? Hur?
PROJEKTETS FINANSIERING	Svenskt Vatten Utveckling, Formas

Förord

Denna rapport är en av två SVU-rapporter som skrivits inom ramen för projektet ”Yteffektiv dagvattenrening – Var? När? Hur?”. Detta SVU-projekt har medfinansierats av Formasprojektet med samma namn som varade under perioden 2016 till och med 2023. Inom ramen för projektet har flera olika tekniska lösningar för dagvattenrening testats och utvärderats. I denna rapport återfinns en sammanfattning av de resultat som erhållits från de delprojekt som rör zeolitfilter för att behandla dagvatten med höga kopparkoncentrationer, en rasterstruktur för att förbättra sedimentationen i dagvattendammar samt membranrening av dagvatten. I kapitel 6 diskuteras ytbehov för olika typer av anläggningar, var de kan placeras i ett avrinningsområde och vilka typer av föroreningar som kan avskiljas.

Studierna har beskrivits i detalj i Ivan Milovanovic och Saida Kaykhais licentiatavhandlingar (Milovanovic 2021 och Kaykhaii 2023). Den första SVU-rapporten publicerades som SVU-rapport 2023-5 och fokuserar på kemisk fällning som reningsmetod för dagvatten (Nyström et al. 2023).

Många har bidragit till de studier som redovisas i denna rapport. Vi tackar Inga Herrmann, Kerstin Nordqvist, Maria Gelfgren, Jiri Marsalek och Peter Rosander vid Luleå tekniska universitet som bidragit stort till studiernas planering och genomförande. Vidare tackas Vojtěch Bareš och Tomas Pícek för deras engagemang i studien med rasterkonfigurationerna och för att vi fick nyttja deras hydrauliska laboratorium vid Tjeckiens tekniska universitet i Prag, samt Filip Nedorost, masterstudent, som genomförde den första försöksserien med rastret i det hydrauliska laboratoriet.

Ingmar Heidfors, Purac, tackas för sin kunskap och bidrag till membranfilterstudierna och Svante Nilsson, Mikael Östman och Håkan Andersson, Statens fastighetsverk, för den hjälp de bidrog med vid Nationalmuseum. Slutligen tackas Ico Broekhuizen, Brenda Vidal, Sarah Lindfors, Alexandra Müller, Joel Lönnqvist och Robert Furén, Luleå tekniska universitet, för deras hjälp med provtagning vid Nationalmuseum, och Ivan Mantilla, Emmanuel Okwori, Haoyu Wei, Rasmus Klapp, Ali Beryani och Nikita Razguliaev för deras hjälp med membranstudierna.

Författarna

Innehåll

Förord.....	2
Sammanfattning.....	4
Summary	5
Ordlista.....	6
1 Introduktion	8
1.1 Syfte, mål och avgränsningar.....	8
2 Bakgrund	10
2.1 Zeoliter som filtermaterial	10
2.2 Membranrening av dagvatten.....	10
2.3 Rasterstruktur för förbättrad sedimentering i dagvattendammar	11
3 Material och metoder	12
3.1 Zeolitfilter för koppartak	12
3.2 Membranrening av dagvatten.....	13
3.3 Rasterstruktur för förbättrad sedimentering i dagvattendammar	15
4 Resultat	18
4.1 Zeolitfilter för koppartak	18
4.2 Membranrening av dagvatten.....	20
4.3 Rasterstruktur för förbättrad sedimentering i dagvattendammar	23
5 Avslutande diskussion	25
5.1 Zeolitfiltersystem.....	25
5.2 Rasterstruktur och kemisk fällning för dammar och sedimentationsbassänger.....	26
5.3 Membranfiltrering.....	26
6 Slutsatser och råd	27
6.1 Avskiljning av lösta och partikulära föroreningar.....	27
6.2 Ytbehov för olika typer av anläggningar.....	27
6.3 Zeolitfiltersystem.....	29
6.4 Rasterstruktur och kemisk fällning för dammar och sedimentationsbassänger.....	29
6.5 Membranfiltrering.....	30
Referenser	31

Sammanfattning

Projektet har utvärderat avancerade tekniker för dagvattenrening som kan komplettera och införlivas i etablerade lösningar och bebyggda områden för att skapa mer yteffektiva dagvattenreningssystem. Tekniker som har undersökts är zeolitfilter, membranrening, kemisk fällning och en rasterstruktur för dammar. Avskiljning av föroreningar har varit i fokus, men projektet har även belyst aspekter som rening över tid, implementering och utvecklingsbehov.

Zeolitfiltren har störst teknikmognad men ytterligare utveckling och fälttester behövs för alla teknikerna. Under renoveringen av Nationalmuseum i Stockholm installerades ett zeolitfilter för att rena avrinningen från koppartaket. Systemet utvärderades under perioden 2018–2020, och inkommande och utgående prover analyserades för koppar och zink. Membranrening av dagvatten utfördes i tre experimentserier i laboratorieskala med ultrafiltermembran. Både kvalitet på det behandlade vattnet (permeatet) och backspolningsvattnet utvärderades, och även olika driftparameterar undersöktes. Studierna av rasterstrukturen genomfördes i ett hydrauliskt laboratorium i skala 1:10 där avskiljning av suspenderat material undersöktes. Flera parametrar för rastercellernas utformning utvärderades, såsom area, djup och vägglutning.

Resultaten visar att zeolitfiltret avlägsnade 48–94 % av löst koppar och 48–94 % av löst zink. Reningsgraden minskade över tid. Filtret i detta system belastades med för högt flöde, vilket resulterade i för kort kontaktid i filtret. Membranreningen reducerade effektivt totalt suspenderat material (TSS), turbiditet och olja till under detektionsgränsen. TOC reducerades med 70–91 %, och COD avskildes upp till 92 %. Metaller >0,45 µm avskildes helt, och vissa lösta metaller avskildes delvis. Rasterstrukturer ökade sedimentationen med cirka 25 % jämfört med en slät botten. Större celler (10x10x10 cm³) var 13 % effektivare än mindre celler (5x5x5 cm³). Lutande cellväggar var cirka 20 % effektivare än vertikala väggar. Resultaten indikerar att rasterstrukturer kan förbättra reningen i befintliga dammar och minska ytbehovet vid nyanläggning.

Zeolitfiltersystemet har stor potential att avskilja lösta metalljoner, men för att uppnå högre reningsgrader behövs längre kontaktid och lägre ytbelastning, det vill säga lägre flöde dividerat med effektiv filteryta. Dagvattnet behöver även ha låg halt av partiklar. Kemisk fällning och rasterstrukturer kan användas för att öka effektiviteten i sedimentationsanläggningar. Ett system med kemisk fällning behöver utformas i flera steg vilket gör det förhållandevis driftintensivt. Rasterstrukturer kan öka sedimentationen av partiklar och minska ytbehovet för dammar, men behöver testas i fält. Membranrening visade hög reningsgrad och potential för vattenåteranvändning, men tekniken behöver utvecklas mer för att vara praktiskt tillämpbar.

I urbana områden är det svårt att hitta plats för dagvattenanläggningar, både ovan och under jord. Små kompakta anläggningar, som till exempel zeolitfilteranläggningen i detta projekt, visade sig behöva ungefär lika stor procentuell andel av avrinningsområdets area som det som brukar vara riktvärde för en damm. Val av system för dagvattenrening blir därför en avvägning mellan tillgänglig yta, ovan eller under jord, i relation till de föroreningar som behöver avskiljas samt underhållsbehov.

Summary

The project has evaluated advanced stormwater treatment techniques that can complement and be integrated into established solutions and urban areas to create more space-efficient stormwater treatment systems. Zeolite filters, membrane filtration, chemical precipitation and grid structures for ponds have been investigated. For all components, treatment of stormwater pollutants has been in focus, but other aspects such as treatment over time, implementation and further need of research have been discussed.

Zeolite filters have the highest technological maturity, but further development and field tests are needed for all the studied techniques. At the National Museum, a zeolite filter was installed to treat runoff from the copper roof. The system was evaluated during 2018-2020, and influent and effluent were sampled and analyzed for copper and zinc. Membrane filtration of stormwater was conducted in three experimental series on a laboratory scale with ultrafiltration membranes. The quality of the treated water and the backwash water was evaluated, as well as various operational parameters. Studies of the bottom grid structure were conducted in a hydraulic laboratory at a 1:10 scale, and several different configurations were examined for the separation of suspended solids.

The results showed that the zeolite filter removed 48–94 % of dissolved copper. For zinc, the removal was 48–94 %. The treatment decreased over time. The hydraulic load of the filter in this system was too high, resulting in too short contact time in the filter. The membrane filtration effectively reduced TSS, turbidity, and oil to below detection limits. TOC was reduced by 70–91 %. Metals related to particles >0.45 µm were completely removed, and some dissolved metals were partially removed. The evaluated bottom grid structures increased sedimentation by approximately 25 % compared to a smooth bottom. Larger cells were 13 % more efficient than smaller cells. Inclined cell walls were about 20 % more efficient than vertical walls. The results indicated that grid structures can improve treatment in existing ponds and may reduce land requirements for new installations.

The zeolite filter system has great potential to remove dissolved metal ions, but to achieve higher removal rates, longer contact time and lower surface loading are needed. Chemical precipitation and grid structures can be used to increase the efficiency of sedimentation facilities. A chemical precipitation system needs to be designed with a number of steps, making the system relatively operation-intensive. Grid structures can increase the sedimentation of particles and reduce the land requirements for ponds, but field tests are needed for verification. Membrane filtration showed high treatment efficiency and potential for water reuse, but the membrane technology needs further development to be practically applicable.

In urban areas, space for stormwater facilities is limited, both above and below ground. Small compact facilities, such as the zeolite filter system, was found to require about the same percentage of the catchment area as is usually applied for stormwater ponds. The choice of stormwater treatment system becomes a trade-off between available space, in relation to the pollutants that need to be removed, and the maintenance efforts of the different systems.

Ordlista

Begrepp som relateras till fysikaliska och kemiska analyser

<i>BOD</i> (Biochemical Oxygen Demand)	Ett mått på mängden syre som mikroorganismer behöver för att bryta ner organiskt material i vatten. Det används för att bedöma föroreningsnivån i avloppsvatten.
<i>COD</i> (Chemical Oxygen Demand)	Ett mått på mängden syre som krävs för att kemiskt oxidera organiskt och oorganiskt material i vatten. Det används för att bedöma föroreningsnivån i vattenprover.
<i>Flockar</i>	Bildas vid kemisk fällning när små partiklar i vattnet eller lösta ämnen fälls ut och klumpas ihop till större klumpar (flockar). Dessa större flockar kan lättare avlägsnas från vattnet genom sedimentering eller filtrering.
<i>Färgtal</i>	Ett mått på vattnets färg. Färgtalet bestäms genom att mäta absorptionsen i ett optiskt instrument eller genom att jämföra vattenfärgen med kalibrerade lösningar av platinaklorid. Färgtalet uttrycks i milligram platina per liter (mg Pt/l).
<i>NTU</i> (Nephelometric Turbidity Unit)	En enhet som används för att mäta turbiditet (grumlighet) i en vätska. Turbiditet mäts genom att bestämma hur mycket ljus som sprids av partiklarna i vätskan vid en 90-graders vinkel från den infallande ljusstrålen.
<i>TOC</i> (totalt organiskt kol)	Ett mått på det totala organiska kolinnehållet i ett medium, såsom vatten. Det inkluderar både löst och partikulärt organiskt material.
<i>Totala koliforma bakterier</i>	En grupp bakterier som normalt finns i tarmarna hos människor och andra varmblodiga djur och används som indikator för att bedöma den sanitära kvaliteten på vatten, eftersom deras närvaro kan tyda på att andra patogena organismer också kan finnas i vattnet.
<i>TSS</i> (totalt suspenderat material)	Ett mått på mängden partiklar som är suspenderade i en vätska. Dessa partiklar kan vara organiska eller oorganiska och påverkar vattnets klarhet.
<i>Turbiditet</i>	Ett mått på en vätskas grumlighet, som orsakas av närvaron av suspenderade partiklar som silt, lera, plankton, bakterier och andra mikroorganismer. Hög turbiditet kan påverka vattenkvaliteten och minska genomskinligheten.
<i>Ytbelastning</i>	Beräknas genom att dividera flödet med den effektiva filterytan.

Begrepp som relateras till membranfiltrering

<i>Backspolning</i>	En process där flödet genom ett membranfilter vänds och går åt motsatt håll för att avlägsna de partiklar och föroreningar som har fastnat på membranet. Detta hjälper till att rengöra membranet och återställa dess filtreringskapacitet. I praktiska applikationer kan 2–10 % av det renade vattnet behöva användas för filterspolning.
<i>Flux</i>	Ett mått på permeatets flödes hastighet genom ett membran som ofta mäts med enheten liter per kvadratmeter membran-yta per timme ($\text{l/m}^2/\text{h}$) vilket ofta förkortas med <i>LMH</i> .
<i>Permeat</i>	Vätskan som passerar genom ett membranfilter. Permeatet innehåller endast de komponenter som är tillräckligt små för att passera genom membranets porer.

Begrepp som relateras till mer avancerade analysmetoder m.m.

<i>CFD-modellering</i> (Computational Fluid Dynamics)	En metod för att analysera och lösa problem som involverar vätskeflöden genom att använda numeriska metoder och algoritmer. Används inom många områden för att simulera vätske- och gasflöden.
<i>EDX-analys</i> (energidispersiv röntgenanalys)	En mikroanalysteknik som används tillsammans med svep-elektronmikroskopi (SEM). Tekniken identifierar den kemiska sammansättningen av ett prov genom att mäta de karakteristiska röntgenstrålar som avges när materialet bestrålas med en elektronstråle. Analysen används för att bestämma grundämnessammansättningen i små områden eller partiklar för att kartlägga fördelningen av grundämnen över en yta.

Kemiska beteckningar

Cd: kadmium
Cr: krom
Cu: koppar
Hg: kvicksilver
Ni: nickel
Pb: bly
V: vanadin
W: wolfram
Zn: zink

1 Introduktion

De vedertagna sätten att rena dagvatten är att anlägga dagvattendammar och numera även att bygga biofilter längs gator och på parkeringsplatser. Våtmarker förekommer också i mindre omfattning. Dagvattendammar och våtmarkssystem placeras nedströms ett avrinningsområde vilket kräver att det finns tillgängliga markytor.

Dagvattendammar avskiljer endast partikulära och partikelbundna föroreningar genom sedimentation. Kolloidala och lösta föroreningar avskiljs inte. Biofilter har kapacitet att avskilja lösta metaller genom adsorption till filtermaterialet. Dock har de typiska filtermaterialen för biofilter begränsad adsorptionskapacitet, mätt som gram per volymenhet, medan andra mineral som zeoliter har avsevärt högre adsorptionskapacitet.

I urban bebyggelse är tillgänglig yta för dagvattenrening begränsad och i vissa mycket tätbebyggda stadsmiljöer är den tillgängliga ytan extremt liten. På senare år har ett antal olika kompakta reningssystem kommit ut på marknaden, men de har inte utvärderats på ett systematiskt sätt. I stadsbebyggelse förekommer koppar som tak- och fasadmateriäl. Avrinning från dessa ytor kan generera ett dagvatten med mycket höga halter av koppar. I områden med känsliga recipienter där miljö kvalitetsnormerna begränsar vad som får släppas ut med dagvattnet finns behov av nya typer av reningssystem som både är yteffektiva och kan hantera de specifika föroreningar som förekommer i dagvattnet.

Medan dagvattenbehandling i första hand är naturbaserade metoder, har utvecklingen av reningsteknik för andra typer av vatten tagit en annan riktning. Avloppsvatten renas främst på centrala reningsverk som har fler reningskomponenter och mer processstyrning än naturbaserade metoder. Under många decennier har kemisk fällning använts både på reningsverk och vid dricksvattenproduktion på ytvattenverk. Däremot är erfarenheterna av kemisk fällning och dagvatten begränsade.

På senare år har membranreningsteknik implementerats i olika former på vattenverk och reningsverk. Däremot finns endast ett fåtal studier med membranteknik och dagvatten. Huvudanledningen är att kraven för dagvattenrening är lägre vilket inte har drivit på teknikutvecklingen i den riktningen. Därtill byggs dagvattenreningsanläggningar decentraliserade vilket gör att med högteknologiska anläggningar blir driften svår att klara av. Å andra sidan finns potential att dra nytta av den kunskap om membranrening som redan finns på avloppsidan. Särskilt kunde detta vara intressant för områden med mycket känsliga recipienter och även där vattenresurserna är begränsade.

Projektet "Yteffektiv dagvattenrening – Var? När? Hur?" har utmanat det gängse paradigmet för dagvattenhantering. Projektet har fokuserat på att undersöka reningsförmågan hos ett antal mer avancerade reningstekniker för dagvatten, med syfte både att öka reningsgraden och att bidra med tekniker som gör att dagvattenanläggningar kan bli mer yteffektiva.

1.1 Syfte, mål och avgränsningar

Syftet med detta projekt var att utvärdera mer avancerade tekniker för dagvattenrening som kan komplettera och i vissa fall införlivas i redan etablerade lösningar och bidra till en mer yteffektiv dagvattenrening. Dessa tekniker är kemisk fällning, membranrening, reaktiva filtermaterial, flytande våtmarker och en rasterstruktur för förbättrad sedimentation i dammar. Ett delsyfte var att utvärdera hur dessa reningstekniker kan förbättra avskiljningen av mindre partiklar och lösta föroreningar.

Fokus i denna rapport ligger på resultaten från studierna av följande komponenter:

- Zeolitfilter
- Ultramembranfiltrering
- Rasterstruktur för förbättrad sedimentering i dagvattendammar

Eftersom teknikmognaden är olika för dessa komponenter har frågeställningarna varierat mellan de olika studerade komponenterna. För alla komponenter har avskiljning av föroreningar varit i fokus, men även aspekter såsom rening över tid, implementeringsaspekter och utvecklingsbehov har belysts. Beroende på teknikmognad har de olika teknikerna för dagvattenrening antingen studerats i fält eller i laboratorium. Viss modellering har även genomförts.

Ett system som inkluderar ett zeolitfilter som renar avrinningen från koppartaket på Nationalmuseum i Stockholm har utvärderats. För zeolitfilter har även en vägledning tagits fram som kan stödja den fortsatta implementeringen av filter med zeolitmineral (Milovanović 2024). En ytterligare studie har genomförts för andra reaktiva filtermaterial och finns redovisade i Milovanovic et al. (2023).

Ultramembranfilter har undersökts i bänkskala där både kvalitet på utgående vatten, koncentrat av föroreningar samt driftparametrar har utvärderats. Såväl dagvatten från olika områden i staden som smältvatten har testats.

Tre tekniker som har undersökts och som kan relateras till dammsystem för dagvattenrening är 1) en rasterstruktur som kan placeras på botten av en damm för att effektivisera sedimentationen av partiklar, 2) en skärmdamm, samt 3) kemisk fällning. Rasterstrukturens utformning har undersökts genom att bygga fysiska modeller och testa funktionen av dessa i ett hydrauliskt laboratorium. Skärmdammsstudien genomfördes i stället för den planerade med flytande våtmarker. Resultaten från provtagningarna från den skärmdamm som byggts i Östersund ingår inte i rapporten eftersom utvärdering fortfarande pågår.

Rening av dagvatten med kemisk fällning och sedimentering med olika typer av fällningskemikalier och polymerer har undersökts i laboratorium. Resultaten har publicerats i tre vetenskapliga publikationer (Nyström et al. 2019; 2020a; 2020b). En litteraturstudie om kemisk fällning samt en sammanfattning av resultaten från de vetenskapliga studierna har redan publicerats i SVU rapport 2023-5 (Nyström et al. 2023) och kommer därför endast att beröras i den avslutande diskussionen i denna rapport.

I kapitel 6 diskuteras typer av föroreningar som kan avskiljas med de reningstekniker som utvärderats i detta projekt. Vidare diskuteras olika anläggningars ytbehov och huruvida de passar som decentraliserade lösningar eller mer nerströms i avrinningsområdet. Slutligen ges några råd för fortsatt utveckling och implementering.

2 Bakgrund

2.1 Zeoliter som filtermaterial

En grupp av mineraler som är känd för att ha en hög katjonbyteskapacitet är zeoliter (Hedström, 2001). Zeoliter är porösa naturliga mineral som bryts på olika platser i världen. Dessa har under flera decennier undersökts och nyttjats i olika applikationer för att avskilja olika typer föroreningar som är positivt laddade såsom metalljoner och ammonium (Hedström 2001; Pitcher et al. 2004; Gray et al. 2012; Li et al. 2016). Både naturliga zeoliter såsom chabasit, mordenit och klinoptilolit likväl som syntetiskt tillverkade zeoliter har använts (Hedström 2001). Ofta prepareras zeolitmineralet innan användning genom att skölja kornen med en koncentrerad koksaltlösning. På så sätt kan positiva joner som sitter hårdare bundna i materialet tvättas bort och ersättas med natriumjoner som binds svagare till materialet än andra positiva joner. På så sätt kan zeolitens jonbyteskapacitet öka och bli mer homogen (Li et al. 2011).

Zeoliter har utvärderats specifikt avseende metallavskiljning (Ćurković et al. 1997; Doula et al. 2002) och även i dagvattensammanhang. I en studie av Pitcher et al. (2004) testades en syntetisk zeolit och mordenit med avseende på kapacitet att avskilja lösta metaller (Kadmium (Cd), koppar (Cu), bly (Pb) och Zn) från dagvatten. Resultaten visade att avskiljningen av metalljoner låg i intervallet 42–90 %. Färm (2002) fann att ett filtermaterial bestående av en blandning av en silikat och en zeolit reducerade metallhalter i vatten, men att den hydrauliska belastningen av filtret hade en signifikant inverkan på filtermaterialets avskiljningsförmåga avseende metaller. I en fältstudie som genomfördes av Athanasiadis et al. (2007) utvärderades ett filtersystem med ett klinoptilolitfilter. Upp till och med 96 % av kopparspartak från avrinningen från kopparkoncentrationer avskildes under en trettimånaders utvärderingsperiod och utgående kopparkoncentrationer var lägre än den utsläppsnivå som myndigheterna hade satt i Tyskland.

2.2 Membranrening av dagvatten

Det finns många olika slags applikationer med membranfilter för rening av olika typer av vatten och föroreningar. Beroende på porstorlek omnämns membranfilterprocesser som mikro-, ultra- och nanofiltrering. Mikrofiltrering kan vara tillräckligt för att avskilja bakterier (Strathmann 1981). För avskiljning av kolloider kan ultrafiltrering vara lämpligt (Yu et al. 2020), medan petroleumföroreningar och lösta organiska föreningar kan behöva behandlas med nanofiltrering eller omvänd osmos (Pervov och Matveev 2014).

Det finns ett antal studier i litteraturen som har fokuserat på membranrening av regn- och dagvatten. Wang et al. (2014) hävdade att membrantechnik kunde vara en lämplig metod för rening av regnvatten eftersom ett mycket rent permeat erhålls som kan användas antingen som tekniskt vatten eller till och med som dricksvatten. Membranrening av dagvatten har även föreslagits som del av ett decentraliserat system för vattenförsörjning där det centrala systemet för vattenförsörjning inte är utbyggt.

När membranrening används generellt, är det ofta lämpligt att kombinera membransteget med andra typer av reningstekniker som sedimentation, traditionella filtersteg och/eller kemisk fällning (Wintgens et al. 2008). Studier har visat att någon slags förbehandling av dagvattnet är en förutsättning för att kunna förlänga membranets livslängd (Pervov & Matveev 2014).

Ett fåtal studier har tidigare genomförts för att undersöka membranfiltrering av dag- respektive regnvatten. En kombination med flockulering och filtrering av dagvatten med mikrofiber studerades av Johir et al. (2009). Reduktionen av totalt suspenderat

material (TSS), totalt organiskt kol (TOC) och totala koliforma bakterier uppmättes till 98 %, 30–40 % respektive 93 %. Ortega Sandoval et al. (2019) undersökte hur väl polyimidmikrofilter respektive polyetersulfon (PES) ultrafilter kunde avskilja TSS, biokemisk syreförbrukning (BOD), bakterier, och metaller. Oavsett filtertyp var metallavskiljningen låg. För övriga parametrar inklusive bakterier var reningseffektiviteten hög. I en studie av Lau et al. (2013) utvärderades tre olika typer av membran för att rena avloppsvatten från en biltvätt. Den högsta avskiljningen av parametern kemisk syreförbrukning (COD) erhöles med nanofiltret och uppgick till en reduktion av 71–91 %.

2.3 Rasterstruktur för förbättrad sedimentering i dagvattendammar

En rasterstruktur som kan placeras på botten av en dagvattendamm har föreslagits som lösning för att öka sedimentationen av partiklar och minska dagvattendammarnas ytbehov. Hypotesen som ligger till grund för denna rasterstruktur är att vertikala virvlar i vattnet kommer att bildas när vattnet flödar över strukturen och på så sätt kan avskiljningen av partiklarna i dagvattnet ökas och fångas upp i rastrets celler. Strukturen har även föreslagits kunna hålla kvar sediment som frånskilts tidigare och minska resuspensionen när flödet genom en damm blir hög vid kraftiga regn.

Denna typ av rasterstruktur har bara föreslagits och undersökts i två tidigare studier (He et al. 2014; He och Marsalek 2014). Det komplexa förhållande som uppstår mellan rasterstrukturen och partiklarna i dagvattenflödet gör att numerisk modellering av systemet är komplicerat. Därför har de tidigare studierna genomförts i ett hydrauliskt laboratorium respektive i fält. He och Marsalek (2014) visade med försök i laboratorium att sedimentationen ökade med ökad flödes hastighet över rasterstrukturen upp till en viss nivå. Rasterstrukturen visade sig kunna förbättra sedimentationen med 10–30 %, jämfört med när botten var slät. Försöken visade alltså att rasterstrukturen hade en större positiv inverkan när flödet ökade. He och Marsalek (2014) diskuterade att detta kunde bero på att sedimenteringen förbättrades med virvelbildningen och samtidigt höll kvar sedimentet och minskade resuspensionen. Även om de två studierna indikerade att rasterstrukturen förbättrar infångningen av sediment, visade studierna på att det behövdes fler undersökningar för att kunna fastställa utformningen av cellerna i rastret.

3 Material och metoder

Nedan följer en sammanfattning av material och metoder för de studier som ligger till grund för rapporten. Den övervägande delen har redan tidigare publicerats i vetenskapliga tidskrifter, och i slutet på varje avsnitt finns hänvisningar till dessa vetenskapliga artiklar.

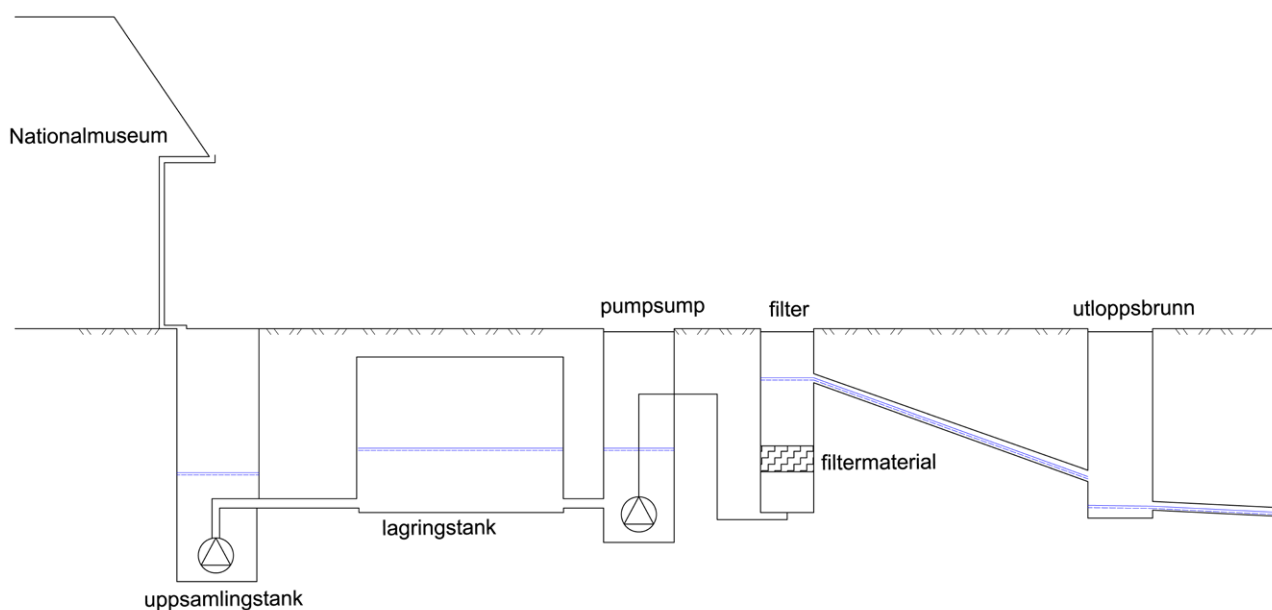
3.1 Zeolitfilter för koppartak

Vid den omfattande renoveringen av Nationalmuseum i Stockholm byttes det gamla koppartaket ut mot ett nytt. I samband med det byggdes även en underjordisk filteranläggning för att rena avrinningen från koppartaket. Filtret som installerades var en kommersiell produkt, Hydrosystem 1000, tillverkat av 3P Teknik. Enligt tillverkaren kunde en filterenhet behandla en yta upp till 1 000 m². På grund av takets storlek installerades därför fem parallella filterenheter.

Varje filterenhet var cylindrisk med en diameter av 1 m, en höjd av 0,5 m och med ett hål med diameter 2 cm som löpte centriskt genom cylindrarna. Varje cylinder innehöll 66 kg zeolit. Den zeolit som användes var en syntetisk klinoptilolit, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2,4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, med hög katjonbyteskapacitet.

Ett komplett reningssystem utformades av en konsult som förutom filterenheterna även inkluderade en uppsamlingstank, en stor lagringstank och två pumpar som var nivåstyrda, se Figur 3.1. På grund av byggnadernas placering på tomten kunde inte ett bräddavlopp installeras. I stället inkluderades den stora lagringstanken och pumpar med hög kapacitet.

Reningssystemet mottog takavrinningen och även en del av vattnet från parkområdet på baksidan av museet. Takytan var ca 4 000 m² och 90 % av takytan utgjordes av koppar, resten av glas. Parkens dräneringsyta som gick till filtersystemet uppgick till ca 800 m². Dagvattnet från taket och parkområdet leddes först in i uppsamlingstanken via stuprör och ledningssystem. När en förinställd vattennivå i uppsamlingstanken nåddes, pumpades vattnet till den lagringstanken med volymen 76 m³. Den var i sin tur ansluten till en pumpsump. Därifrån pumpades vattnet uppåt genom filterenheterna när vattennivån i lagringstanken nådde en kritisk nivå. Pumpflödet från pumpsumpen genom zeolitfilterenheterna var inställt på ett flöde som motsvarande 7 l/s. Detta flöde motsvarade en ytbelastning på 6,7 m/h. Ytbelastningen beräknas genom att dividera flödet med den effektiva filterytan. Efter filterenheterna avleddes det behandlade vattnet genom ett självfallsrör till en utloppsbrunn och därifrån till recipient.



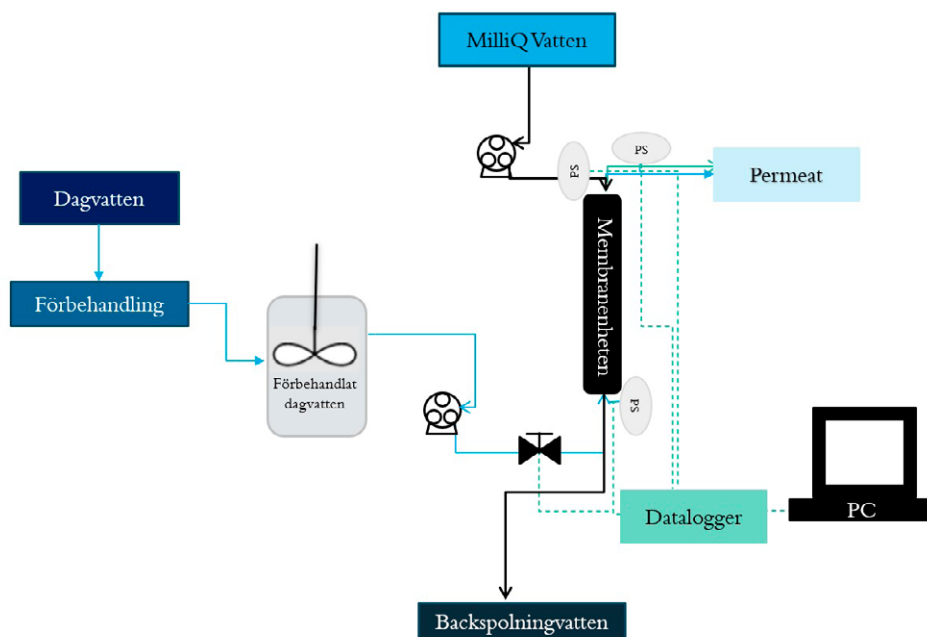
Filtersystemet togs i drift i juli 2018 och utvärderades under perioden december 2018 till mars 2020. Vid sju provtagningstillfällen togs, vid varje tillfälle, i medeltal ungefär fem tidsproportionella prov, både i pumpsumpen respektive i utloppsbrunnen. Vid varje provtagningstillfälle var det uppehållsväder och pumpen i pumpsumpen startades och det vatten som för tillfället fanns lagrat i lagringstanken renades genom filtret. Dessa prover analyserades med avseende på löst och total halt koppar respektive zink samt totalhalt suspenderad substans (TSS). Vidare mättes pH och turbiditet. För mer detaljer kring provtagning, se Milovanović et al. (2022).

Figur 3.1

Skiss över reningssystemet med zeolitfilter vid Nationalmuseum i Stockholm.

3.2 Membranrening av dagvatten

Tre större experimentserier har genomförts i laboratorieskala för att undersöka olika aspekter avseende membranrening av dagvatten. För alla dessa experiment användes samma försöksupställning (Figur 3.2).



Figur 3.2

Försökupställning för rening av dagvatten med ultrafiltermembran i laboratorium.

Den centrala delen i försökupställningen var en modul med ultrafiltermembran (Figur 3.3). Membranet som användes var ett hydrofiliskt med beteckningen UF HFW1000 och bestående av polyetersulfon (PES) och polyvinylpyrrolidon (PVP), och tillhandahålls från PENTAIR, Sverige. Gränsen för storleken på partiklar som kunde avskiljas med detta membranfilter definierades av gränsen för molekylär vikt (Molecular weight cut-off, MWCO) motsvarande 1 kDa. Det betyder att membranfiltret kan separera molekyler som är större än 1 000 Dalton från mindre molekyler. Filtret hade en aktiv yta på 0,07 m². Diametern för varje fiber var 0,8 mm och modulen inkluderade 120 fibrer.



Figur 3.3

Membranfiltermodul.

Två peristaltiska pumpar reglerade flödet för behandlingsprocessen respektive backspolningen. Tre trycksensorer mätte trycket för inflöde och permeat. Permeat är den vätska som passerar genom membranet och innehåller endast de föroreningar som är tillräckligt små för att passera genom membranets porer. En omrörare i plast placerades i tanken med dagvatten för att hålla inflödeskvaliteten så konstant som möjligt.

Membranexperimenten genomfördes i ”dead-end-mode”, vilket innebär att hela flödet trycktes genom membranfiltret. Trycksensorerna registrerade trycken kontinuerligt. Flödet registrerades genom att kontinuerligt mäta vikten på det permeat som strömmade genom filtret med våg. Filterhastigheten (flux) beräknades genom att dividera flödet med filtrets aktiva yta och mäts ofta i enheten l/m²/h (LMH).

Både snö som smälts och dagvatten har använts i experimenten. Snön till studien hämtades längs en väg med en trafikbelastning motsvarande 20 000 fordon/dygn (Kaykhaii et al. 2023a). Snön blandades och delades upp i satser om ca 20 liter och förvarades i ett frysrum. Innan experiment startades togs satser ut och läts tina.

Dagvattnet som användes i efterföljande studier (Kaykhaii et al. 2023b och Kaykhaii 2025) hämtades från fyra olika platser, två områden med externhandel och mindre industriverksamheter, ett bostadsområde och vid en väg med ca 7 400 fordon/dygn.

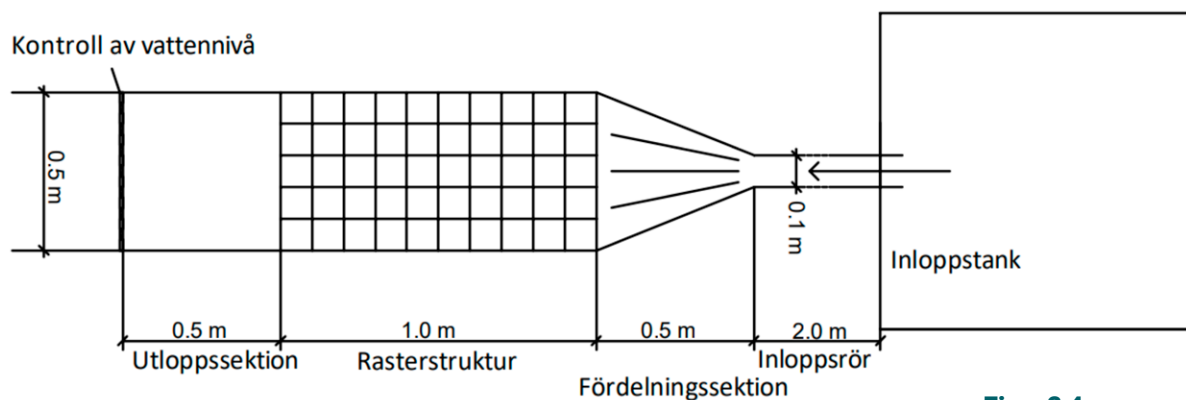
I en tidigare förstudie gjordes antagandet att dagvattnet behövde förbehandlas innan själva membranreningen. Detta gjordes med en filtrering genom sil med 5 µm (GrönNano 2016). Det konstaterades att denna förbehandling var alltför effektiv och att ultrafiltrets förmåga att behandla dagvattnet inte kunde utvärderas. I de efterföljande studierna har därför förbehandlingen varit mindre omfattande. I studien där snö användes fick den smälta snön först sedimentera i en timme och därefter silades vattnet genom en sil med 315 µm avskiljningsförmåga. Snön innehöll en del grövre grus som avskildes med separation och silen avskilde i första hand sådant som flöt, t.ex. löv och kvistar. I de efterföljande studierna med dagvatten var det väldigt liten andel av mängden partiklar som avskildes med sedimentation och därför valdes enbart filtrering med 315 µm filter som förbehandling av dagvattnet.

För detaljer om genomförandet och vilka analyser som gjordes av dagvattnet, permeatet och backspolningsvattnet se Kaykhaii et al. (2023a, 2023b). För att undersöka backspolning och rening av membran testades tre backspolningsvaraktigheter och två olika kombinationer av kemikalier (Kaykhaii et al. 2023b).

3.3 Rasterstruktur för förbättrad sedimentering i dagvattendammar

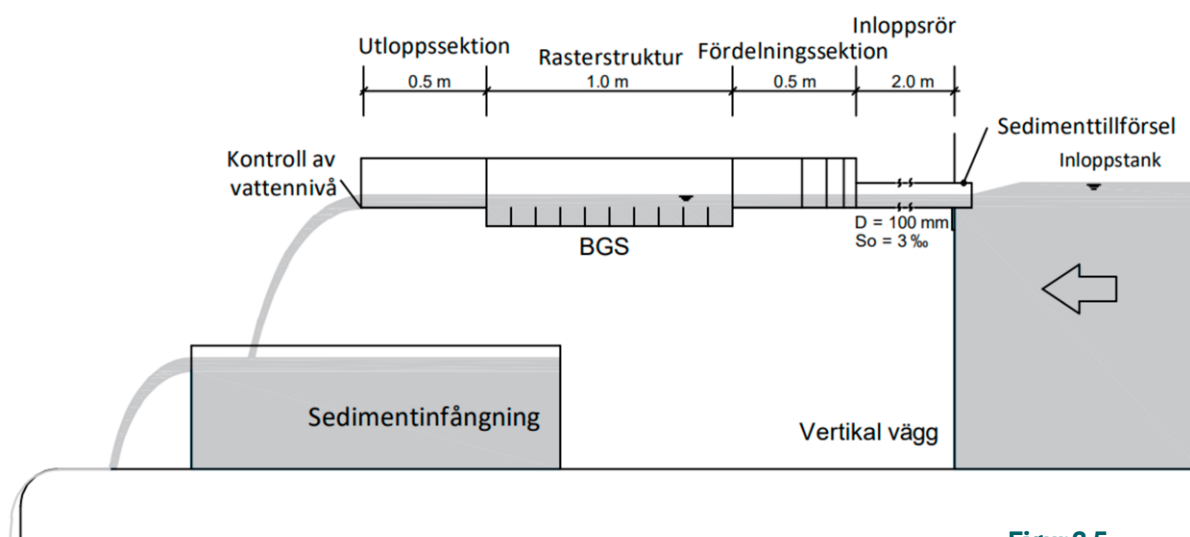
Experimenten som genomfördes inom ramen för detta projekt som syftade till att fördjupa kunskapen om utformning av en rasterstruktur för att förbättra sedimenteringen i dagvattendammar baserades på resultat från tidigare studier som genomförts i Kanada (He et al. 2014; He & Marsalek 2014), samt på CFD-modelleringar som genomfördes i GrönNano-projektet (finansierat via Vinnovas program ”Utmaningsdriven innovation”) (GrönNano 2016). CFD modellering (Computational fluid dynamics) är ett vedertaget sätt att modellera strömningsdynamik. De tidigare resultaten visade på en förbättrad sedimentation vid användning av rasterstruktur, men för att säga något om cellstrukturen i rastret krävdes mer input-data till ytterligare CFD-modellering (GrönNano 2016). Därför togs initiativ, inom ramen för detta projekt, att bygga fysiska modeller för olika rasterkonfigurationer och testa modellerna i ett hydrauliskt laboratorium.

I detalj har experimenten beskrivits i Milovanović et al. (2020). Nedan följer en kort sammanfattning av modellen och försöken. Experimentuppställningen byggdes i skala 1:10. Utgångspunkten för dimensionerna var en inkommande ledning med diameter 1 m och en cellstruktur med celler av storlek 0,5x0,5x0,5 m³ som sedan skalades ner tio gånger. Dimensionerna för uppställningen syns i Figur 3.4 och Figur 3.5.



Figur 3.4

Skiss över försöksuppställning med rasterstruktur i laboratorium, uppifrån.



Figur 3.5

Skiss över försöksuppställning med rasterstruktur i laboratorium, från sidan.

Val av partiklar som kunde representera suspenderat material i dagvatten behövde också väljas utifrån skalan på försöksuppställningen. Valet föll på ett PVC-pulver med densitet något högre än vatten (NERALIT®, specifik vikt= 1.32 och $d_{50} = 143 \mu\text{m}$). Partikelkoncentrationen i inloppsflödet var 100 mg/l. Vattendjupet i utloppssektionen sattes till 7,5 cm efter några inledande försök.

Fem olika rasterstrukturer studerades. De kvadratiske cellernas area respektive djup varierades likväl som cellväggarnas lutning. Försök gjordes även med en kontroll där botten var slät. I Tabell 3.1 kan de olika rasterstrukturerna ses. I tabellen kan också de testade flödena ses. Försöksuppskallningens skala var 1:10 vilket för första rasterstrukturen i verkligheten skulle motsvara ett rutnät med celler på 50x50x50 cm och ett med djupare celler motsvarande 100 cm.

Cellbredd (cm)	Celldjup (cm)	Cellväggens lutning (°)	Flöde (l/s)
Slät botten			1
Slät botten			2
Slät botten			2
Slät botten			3
Slät botten			4
5	5	90	2
5	5	90	3
5	5	90	4
5	10	90	2
5	10	90	3
5	10	90	4
5	10	90	1
10	10	90	2
10	10	90	3
10	10	90	4
5	10	120	2
5	10	120	3
5	10	60	2
5	10	60	3

Tabell 3.1

Experimentell design av de testade rasterstrukturerna inklusive kontrollerna med slät botten.

För en rasterkonfiguration (area 5x5 cm², djup 10 cm och vertikala cellväggar) gjordes fem replikat för att undersöka osäkerheten i genomförandet. Detta test visade på en sedimentation av partiklarna som i medeltal var 28 % med en standardavvikelse på 0,5 %. Dessa resultat indikerade att osäkerheten i metodologi inklusive att samla upp och väga sedimentet var liten. För vidare detaljer om metod och genomförande se Milovanović et al. (2020).

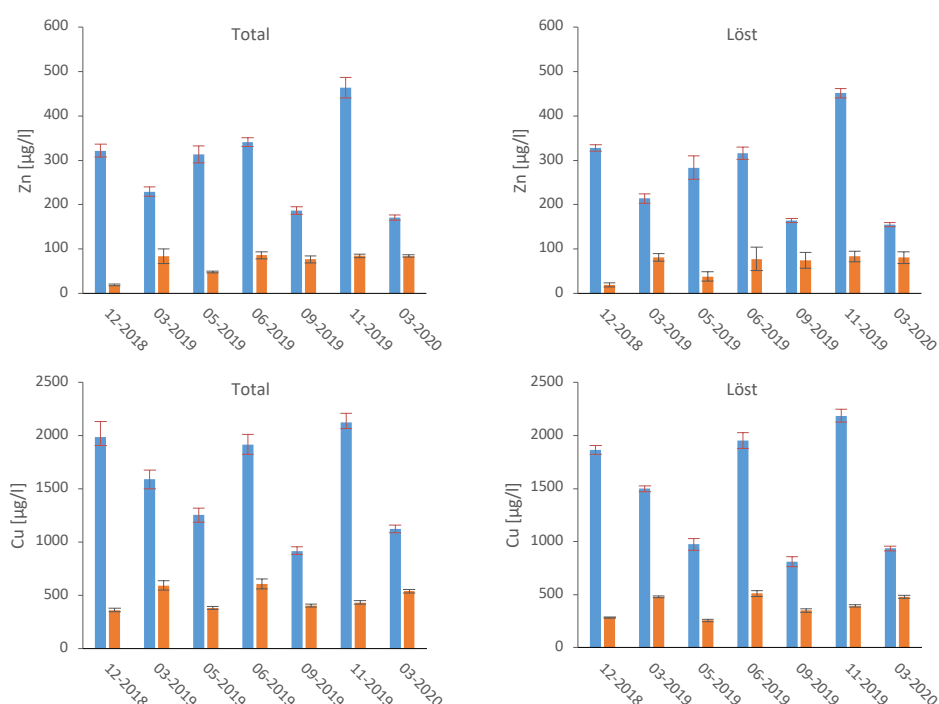
På grund av komplexiteten i att modellera sedimentation i en fysisk skalmodell kan studiens resultat huvudsakligen ge en bra indikation på vilka parametrar som leder till bättre sedimentering, men resultaten kan inte direkt uppskalas för att förutsäga reningseffektivitet.

4 Resultat

4.1 Zeolitfilter för koppartak

4.1.1 Reningsresultat

Den totala kopparkoncentrationen i avrinningen från koppartaket och det mindre parkområdet varierade mellan 920 µg/l och 2100 µg/l (Figur 4.1). Mer än 90 % av totalhalten koppar förekom i löst fas (<0,45µm), vilket är den form av koppar som är känd för att vara mer giftig för vattenlevande organismer än partikelbunden koppar (Milovanović et al. 2022). Detta innebär att dammar, som är en vanlig dagvattenreningsanläggning, och andra system som baseras på sedimentering som behandlingsmekanism inte kommer att fungera här, eftersom de inte kan ta bort lösta föroreningar effektivt.



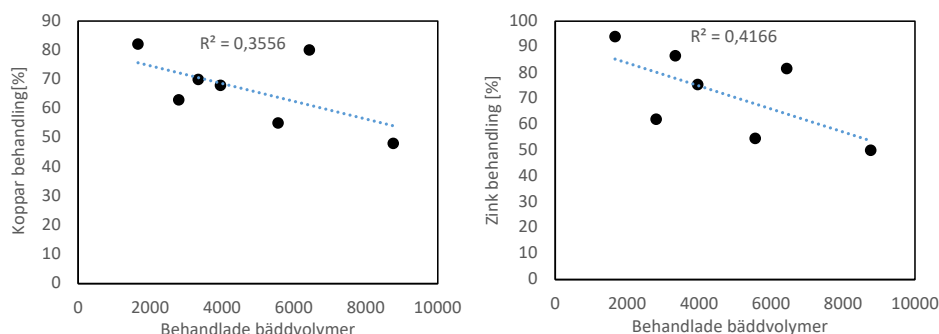
Figur 4.1

Inkommande och utgående halter av total och löst zink och koppar under utvärderingsperioden 2018–2020. Blå staplar indikerar inkommande koncentrationer och röda utgående.

Figur 4.2 visar hur reningseffekten såg ut över tid, baserad på behandlade bäddvolym. Detta mått används eftersom filtereffektiviteten vanligtvis beror på hur mycket vatten som behandlats, inte hur lång tid som har gått. Detta är särskilt relevant när dagvatten behandlas eftersom nederbörden kan komma oregelbundet. Under observationsperioden på 16 månader renades dagvatten motsvarande drygt 9 000 bäddvolym. Under den perioden avlägsnade zeolitfiltret 52–82 % och 48–94 % av totalhalt respektive löst koppar. Motsvarande reningsgrad för zink var 50–94 % och 48–94 % för totalhalt respektive löst zink.

Även om behandlingsnivån var relativt hög, var den lägre än de värden som redovisats i tidigare studier (Athanasiadis et al. 2007) samt de reningsresultat som tillverkaren hade utlovat. En möjlig orsak till den lägre reningsnivå som erhöles vid Nationalmuseum kan vara att zeolitfiltret belastades med för högt flöde och att kontakttiden i filtret därmed blev för kort. När den hydrauliska belastningen utvärderades för zeolitfiltret vid Nationalmuseum kunde konstateras att den var 6,7 m³/m²/h. I tidigare vetenskapliga studier har belastningen varit mycket lägre. I en kolumnstudie som Färm (2002) genomförde konstaterades att den hydrauliska belastningen behövde vara maximalt

3,5 m³/m²/h för att erhålla en tillfredsställande rening med de zeoliter som användes i dessa försök.



Figur 4.2

Zeolitfiltrets reningseffektivitet avseende koppar och zink under utvärderingsperioden, i relation till behandlade bäddvolym.

Under studien observerades en tydlig nedgång i reningseffektivitet över tid, både för koppar och för zink. Detta är en intressant observation eftersom studieperioden varade i 16 månader medan filtrets livslängd hade uppskattats till 3 år av tillverkare.

4.1.2 Rekommendationer vid installation och drift av zeolitfilter

Om ett liknande system byggs behöver vattnets kontakttid i filtret vara betydligt längre för att säkerställa bättre behandling. Kontakttiden behöver minst dubblas och ytbelastningen av filtret halveras. Det hade i detta fall kunnat lösas genom en lägre pumpkapacitet och eventuellt även fler filterenheter. Då skulle systemet även behöva en konstruktion för bräddning för att undvika återströmning och eventuell översvämning när intensiva regn inträffar. En enklare preliminär analys indikerar att även om pumpkapaciteten minskar och viss bräddning av orenad takavrinning tillåts vid intensiva regn, kommer den totala belastningen av koppar att minska till recipient eftersom vattnets uppehållstid i filtret blir längre och adsorptionen och därmed avskiljningen av koppar ökar vid små och normalstora regn.

På grund av topografin i området belastades filtret med en pump i denna studie. I andra fall har liknade system byggts med självfall där det inkommande flödet till filtret har strypts till ett visst flöde. Även i självfallssystem är det viktigt att hålla nere ytbelastningen så att den maximalt ligger på ca 3,5 m³/m²/h. Fördelen med ett självfallssystem är att vid små regn kan ytbelastningen bli ännu lägre vilket torde vara gynnsamt för reningseffektiviteten. Även självfallssystem kan behöva en lagringstank för att kunna ta hand om större regn.

Med denna typ av reningssystem blir filtermaterialet mättat över tid. Därför är det av yttersta vikt att regelbundet byta ut zeolitmaterialet för att upprätthålla reningen. I andra sammanhang med decentraliserade lösningar för rening (t.ex. enskilda avlopp) används reaktiva filter såsom polonitfilter för att avskilja fosfor. Även dessa filtersystem bygger på att filtermaterialet regelbundet behöver bytas ut. Erfarenheter från dessa system (Vidal 2022) indikerar att det förekommer att filtermaterial i reningsanläggningarna aldrig byts ut. Till viss del beror det på att det inte finns någon regelbunden kontroll av systemen. En helt annan orsak till att filtermaterialet inte byts ut är att filtret anlagts på ett ställe på fastigheten som inte är åtkomlig för den kranbil som kommer med storsäcken med filtermaterial. Sådana aspekter såsom lokalisering, åtkomst och rutiner för byte av filtermaterial behöver även beaktas vid installation av zeolitfilter för behandling av avrinning från koppartak, då det ofta kan vara trångt i urbana miljöer.

Regelbunden backspolning av filtret rekommenderades av filterleverantören för att upprätthålla filtrets hydrauliska konduktivitet. Dagvattnets kvalitet avgör längden på backspolningsintervallet. I detta fall togs filtret i bruk i juli 2018 och backspolades en gång (i april 2019) under utvärderingsperioden. Under utvärderingsperioden observerades

inte någon igensättning av filtret. Den uppmätta koncentrationen av suspenderat material i det inkommande vattnet till filtret var mycket låg, 3,4–19 mg TSS/l. Till viss del kan den låga halten förklaras av den stora lagringstank (76 m³) som låg före zeolitfiltret i systemet och som även fungerade som en sedimentationsbassäng. En annan förklaring är att avrinning från metalltak generellt ger lägre koncentrationer av suspenderat material än dagvatten från exempelvis högtrafikerade vägar. Beroende på vilket dagvatten som ska renas med denna typ av filter kan backspolningsintervallet behöva anpassas.

För att denna typ av filterlösning ska fungera behövs även en fungerande logistikkedja för leverans av nytt filtermaterial, byte av filtermaterial och omhändertagande av mättat filtermaterial. Företag som även kan tillhandahålla en backspolning av filtret där backspolningsvattnet samlas upp är en förutsättning för att systemet ska fungera över tid.

4.2 Membranrening av dagvatten

I den första försöksserien kunde konstateras att suspenderade partiklar och turbiditet (mått på vattnets grumlighet) reducerades effektivt. Koncentrationen av TSS och turbiditet minskade från 340±56 mg/l respektive 253±46 NTU i det förbehandlade snösmältvattnet till under detektionsgränsen i det renade vattnet (permeatet). NTU är den enhet turbiditet mäts i, se ordlista. Smältvattnet innehöll hög halt av olja. I det förbehandlade snösmältvattnet var oljeindex 2 400±750 µg/l. Med ultramembranfiltret avskildes oljehalten, mätt som oljeindex, ner till under detektionsgränsen.

Rent generellt innehöll smältvattnet en låg halt av organiskt material. Totalorganiskt kol (TOC) reducerades i ultramembranfiltret med 70–91 %, från 11±5,7 mg/l till 1,8±0,6 mg/l. COD avskildes upp till och med 92 %, ner till koncentrationen <5–7,1 mg/l. Däremot avskildes BOD i mindre omfattning, ca 33 %, ner till 3,7±0,8 mg/l. Detta indikerar att den lättnedbrytbara andelen av organiskt material förekom i så små molekyler att de inte kunde avskiljas med ultramembranfilter.

Om metaller avskiljs med ultramembranfilter eller inte beror på om metallerna förekommer i löst jonform eller i partikulär form. Analyserna visade att metallerna som var >0,45 µm avskildes helt med ultramembranfiltret. En viss del av den fraktion metaller som analyserats som löst kan i realiteten vara i form av mycket små partiklar (<0,45 µm) och kan också avskiljas med den aktuella typen av membranfilter. En del kan även fastna i/på själva membranet i en beläggning om kallas för "fouling". Därför kunde avskiljning av lösta metaller också observeras, se Tabell 4.1. Zink kunde inte utvärderas med den försökssupställning som användes eftersom enheten i sig löste ut zink.

Metall	Löst medelkoncentration och std (µg/l)		Reningsgrad
	Inkommande	Utgående	(%)
Cd	0,007±0,007	0,004±0,004	13
Cr	0,17±0,01	<0,08±0,03	>24
Cu	2,1±0,5	1,9±0,6	12
Ni	0,4±0,07	0,3±0,07	21
Pb	0,03±0,001	0,01±0,00	44
V	0,4±0,05	0,4±0,05	1,4

Tabell 4.1

Inkommande och utgående medelkoncentrationer och standardavvikelse (std) samt reningsgrad av lösta metaller med membranrening.

I smältvattnet mättes förhållandevis höga kloridhalter upp, $7,6 \pm 12$ mg/l och $7,8 \pm 11$ mg/l i inkommande respektive renat dagvatten. I tidigare studie har det rapporterats att kloridhalten bör vara lägre än 0,5 mg/l för att undvika skador på membranet (Minnesota Rural Water Association 2001).

I den första delstudien kunde det konstateras att det renade dagvattnet erhöll en mycket hög vattenkvalitet utifrån ett recipientperspektiv, och såvida en reningsanläggning med ultramembranfilter är aktuell bör vattenåteranvändning övervägas. För att utröna vattenåteranvändning djupare genomfördes därför ytterligare en försöksserie då dagvatten från tre olika platser inhämtades och renades. I den studien analyserades de flesta av de parametrar som ingår i Livsmedelsverkets föreskrifter om dricksvatten (Livsmedelsverket 2022). I det renade vägdagvattnet (7400 fordon/dygn) var halterna av mangan, nitrat och ammonium högre än gränsvärdena. Alla övriga parametrar låg under. I det renade dagvattnet från området med lätta industrier och handel var färgtalet något högre än gränsvärdet, alla övriga parametrar under. För dagvatten från bostadsområdet låg alla analyserade parametrar under Livsmedelsverkets gränsvärden. Bisphenol A, Epichlorohydrin, klor, klorat, klorit, microcystin, radon, uran, vinylklorid, actinomycet, total alpha- och betaaktivitet analyserades inte. PFAS 21 analyserades men på grund av höga rapporteringsgränser kunde inga säkra slutsatser dras. Med den valda experimentella designen kunde inte heller avskiljning av bakterier studeras, men tidigare studier har visat på avskiljning av bakterier med ultrafiltermembran.

Vid drift av membranfilter behöver filtren regelbundet backspolas. I praktiska applikationer används 2–10 % av det renade vattnet för filterspolning (Kaykhali 2023). I det backspolningsvattnet som erhålls är koncentrationen av föroreningar förhållandevis hög. Eftersom avskiljningen av partiklar i det närmaste är total skulle membranrening på ett mycket effektivt sätt kunna koncentrera föroreningar från dagvatten och för efterföljande omhändertagande. I Tabell 4.2 ses koncentrationer av metaller i backspolningsvattnet efter ultramembranrening av dagvatten (Kaykhali 2025). I jämförelse med det behandlade vattnet koncentrerades metallerna 2–13 gånger beroende på hur stor andel av metallerna som förekom löst form. Från vägen uppmättes de högsta halterna av metaller. Noterbara koncentrationer av metaller i backspolningsvattnet var Zn (49 000 µg/l), V (1950 µg/l) och W (1047 µg/l).

	Enhet	Koncentration i backspolningsvattnet			Koncentrationsfaktor (medel ± std)		
		A	B	C	A	B	C
TS	%	1,3	0,07	0,06	$9,2 \pm 4,7$	$7 \pm 1,7$	$3,0 \pm 1,3$
TSS	mg/l	9550	437	482	$8,4 \pm 3,7$	$3,8 \pm 5,3$	$5,3 \pm 2$
Cd	µg/l	2,8	0,2	0,25	$7,8 \pm 2,7$	$\geq 3,4 \pm 0,4$	$4,1 \pm 4,4$
Cr	µg/l	651	33	38	$8,2 \pm 5,4$	$8,9 \pm 4$	$9,3 \pm 7,4$
Cu	µg/l	881	143	432	$7,5 \pm 4$	$3,9 \pm 0,6$	$3,6 \pm 2,5$
Hg	µg/l	0,2	0,03	0,05	$\geq 6,7 \pm 3$	$1,9 \pm 1,1$	$\geq 2,5 \pm 2,3$
Ni	µg/l	359	18	60	$7 \pm 4,8$	$3,8 \pm 1,7$	$5,0 \pm 3,5$
Pb	µg/l	272	20	53	8 ± 4	$9,8 \pm 4,8$	$6,2 \pm 3$
V	µg/l	1950	72,5	58	$7,3 \pm 4$	6 ± 3	$6,6 \pm 6$
W	µg/l	1047	22,4	1	$9,3 \pm 4,6$	13 ± 12	$1,9 \pm 0,4$
Zn	mg/l	49	0,3	0,4	$7,7 \pm 4$	$3,3 \pm 1,3$	$3,6 \pm 3,1$

Tabell 4.2

Totala koncentrationer av metaller och partiklar (TS och TSS) i backspolningsvattnet när dagvatten från tre olika områden, A (väg), B (lätt industriområde) och C (bostadsområde), behandlats med membranrening samt hur många gånger metallerna koncentrerades i relation till det obehandlade dagvattnet (koncentrationsfaktor).

I den andra delstudien om membranrening (Kaykhali et al. 2023b) undersöktes hur filtret skulle backspolas och hur membranet skulle rengöras. Backspolningsintervallen och -varaktigheten beror på hela systemets utformning samt på det vatten som renats med membranfiltret. I försöken var det tydligt att ju längre backspolningsvaraktighet,

desto högre permeabilitet kunde återfås. Å andra sidan krävdes mer vatten för längre backspolningsvaraktighet vilket minskade hela systemets produktivitet. Det vill säga, för få en bra drift behöver en optimal balans hittas mellan produktivitet, permeabilitet och energianvändning. I detta specifika fall erhöles högsta produktivitet vid 45 s backspolning medan permeabiliteten var avsevärt högre efter backspolning i 60 s (47 LMH/bar) jämfört med 45 s (37 LMH/bar) (Kaykhaii et al. 2023b). (LMH är en förkortning av enheten l/m²/h som betyder liter per kvadratmeter per timme, och som ofta används för att ange permeatets flödes hastighet genom ett membran.)

Dagvattnets kvalitet skiljer sig avsevärt jämfört med råvatten för dricksvattenproduktion och avloppsvatten där membranrening används mer frekvent. Dagvattnets partikelinnehåll är främst mycket små oorganiska mineralpartiklar och dessutom kan höga halter av oljerester förekomma. Därför var det inte självklart vilken kemikaliekombination som skulle användas vid membranrening. Både kombinationen natriumhydroxid följt av saltsyra samt alternativet med natriumhydroxid, natriumhypoklorit och saltsyra testades. Permeabiliteten var något högre efter membranrening som inkluderade natriumhypoklorit men skillnaden var inte statistiskt signifikant.

Efter de två delstudierna (Kaykhaii et al. 2023a; Kaykhaii et al. 2023b) plockades membranmodulen ut och det testades om membranfibrerna fortfarande var intakta eller hade fått skador såsom små revor och hål. Detta var en farhåga vid projektets start då dagvattnets partikelinnehåll främst är oorganiska mineralpartiklar. Resultaten visade att membranfibrerna fortfarande var hela och att inga sådana skador hade uppkommit trots att betydande mängder dagvatten och snösmältvatten hade behandlats. Totalt hade filtret belastats under mer än 380 h och genomgått kemisk rengöring 22 gånger. Resultaten från analysen av membranen med svepelektronmikroskop som där efter gjordes visade att det fanns permanenta beläggningar på ultrafiltermembranet (Kaykhaii et al. 2023b). Även om membranfibrerna främst hade beläggningar på insidan (feed side) återfanns även beläggningar på utsidan. På insidan var beläggningen kompakt, kanske beroende på att filtret hade belastats med ett tryck som låg nära det maximalt rekommenderade. Den energidispersiva röntgenanalysen (EDX-analys) visade att beläggningen främst var oorganisk och bestod av kisel, järn och syre vilket skulle kunna indikera utfällningar av järnoxider och -hydroxider likväl som silikater. Färgen på beläggningen var brunaktig vilket också styrker hypotesen med järnutfällning. De permanenta beläggningarna på membranfiltret indikerar att den kemiska rengöringen med natriumhydroxid, natriumhypoklorit och saltsyra kanske var otillräcklig och att andra kemikalier kan behöva användas (Cardew & Le 1999).

4.2.1 Resultat från studierna med dagvattenrening med ultramembranfilter

När studierna med ultramembranfiltrering av dagvatten inleddes var många aspekter okända och det fanns många farhågor rörande laboratorieförsökens genomförbarhet. Den första farhågan var att dagvattnets partikelinnehåll skulle riva sönder membranen eftersom dagvatten innehåller mineralpartiklar i första hand, till skillnad från avloppsvatten och råvatten för dricksvattenproduktion. Erfarenheterna från de aktuella studierna visade att membranen höll under hela försöksperioden för de studier som publicerats Kaykhaii (2023a) och Kaykhaii (2023b). Den förbehandling av snösmältvattnet och dagvattnet som användes (sedimentation i en timme med efterföljande silning för att ta bort partiklar >315 µm) var tillräcklig för den efterföljande membranreningen. Särskilt för snösmältvattnet var sedimentationen nödvändig då det fanns en del större kornfraktioner samlade i snön.

Det kunde också konstateras att metaller som typiskt förekommer i dagvatten avskildes effektivt med membranrening, och även oljeföroreningar. Dock beror effektiviteten på om metallerna förekommer i jonform, i små lösta komplex eller om de är bundna till partiklar. Lösta metaller avskiljs inte med ultrafiltermembran. Utifrån ett recipientperspektiv erhöles ett renat dagvatten av mycket hög kvalitet. Så hög kvalitet att en utveckling

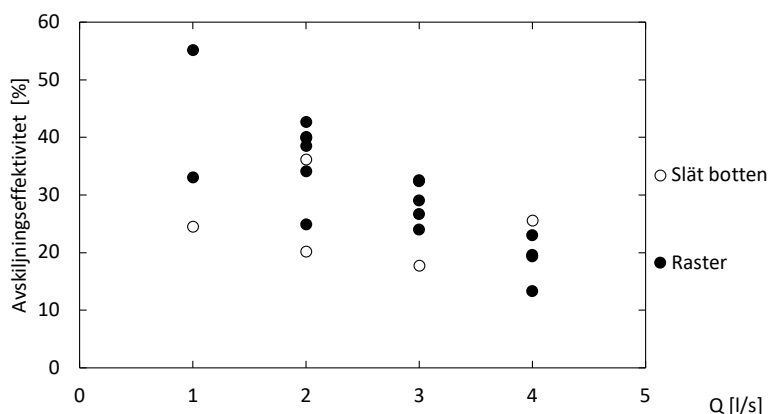
av dagvattenrening med membranteknik även bör inkludera koncept för vattenåteranvändning. Beroende på användningsområde skulle permeatet från membranreningen behöva poleras ytterligare.

Applikationer med ultrafiltermembran genererar ett backspolningsvatten med höga koncentrationer av föroreningar. Ingen annan typ av applikation för dagvattenrening kan koncentrera föroreningarna på detta sätt. Samtidigt är dock backspolningskoncentratet fortfarande i vätskeform med låg TS-halt. Den högsta halt som uppmättes var runt 1 % TS, och detta från ett vägddagvatten i början på ett regn. I övriga fall var TS-halten lägre. Det innebär att för att hanteras behöver backspolningsvattnet behandlas ytterligare och hur detta ska göras behöver utforskas vidare. Den höga halten av metaller i backspolningsvattnet inbjuder till tankar om metallåtervinning från dagvatten. I en pågående studie utvärderas potentialen för detta.

4.3 Rasterstruktur för förbättrad sedimentering i dagvattendammar

4.3.1 Rasterstrukturers effekter på sedimentation

Experimentstudien visade att sedimentationen var ca 25 % effektivare då en rasterstruktur $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ användes än då sedimentationen skedde på en slät botten, se Figur 4.3. I Figur 4.3 kan också ses att avskiljningseffektiviteten generellt minskar med ökat flöde.



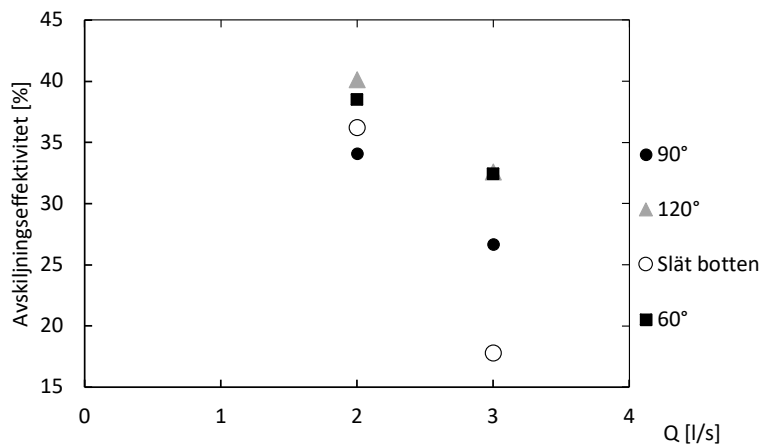
Figur 4.3

Avskiljningsgrad av partiklar med och utan rasterstruktur.

Experimenten visade att cellstorleken i rasterstrukturen hade en effekt på sedimentationen. I medeltal var de större cellerna på $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ 13 % effektivare på att avskilja sediment än strukturen med $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Däremot kunde inte någon skillnad i sedimentation påvisas mellan rasterstrukturer med samma cellarea men med olika djup (5 respektive 10 cm).

En möjlig förklaring till varför cellerna med större area var effektivare på att avskilja sediment än de mindre cellerna kan vara att de större cellerna stimulerade virvelbildning i horisontalled i större omfattning som bidrog till infångning av partiklarna.

I experimentserien undersöktes också effekten av cellväggarnas lutning på sedimentationen, både med väggar som lutade mot och med flödet (120° eller 60°). Oavsett om cellväggarna lutade med eller mot flödet, var dessa rasterkonfigurationer ca 20 % effektivare på att avskilja sediment än den struktur som hade vertikala cellväggar (Figur 4.4).



Figur 4.4

Avskiljningsgrad av partiklar med rasterstrukturer med olika lutande cellväggar inklusive referens med slät botten.

4.3.2 Vad visar resultaten från experimenten med rasterstruktur?

Den fysiska modellen i skala 1:10 med olika rasterkonfigurationer och de tillhörande experimenten hade begränsningar men kan ändå ge viss vägledning för fortsatt utveckling. Resultaten indikerade att en rasterstruktur som placeras på botten av en damm vid inloppet kan koncentrera sedimentationen av grövre partiklar till en mindre yta. Sedimentet som sedimenterar i rasterstrukturen skulle regelbundet kunna tas bort med hjälp av konventionell tillgänglig utrustning (vakuumsug).

Vid en installation av en rasterstruktur i en befintlig dagvattendamm skulle dagvatten komma in i dammen med varierande flöde och koncentration av suspenderat material. Därför skulle sedimentinfångningen variera beroende på flödet men även beroende på partikelkoncentration och aktuell kornstorleksfördelning och densitet. Sådana förhållanden har tidigare testats av He et al. (2014) med en rasterstruktur 22x22x11 cm³ (LxBxD) som placerades på botten på en damm, 10 meter nedströms ett dagvatteninlopp. I deras studie fångade cellerna in fyra gånger så mycket sediment med partikeldiameter <250 µm jämfört med en kontrollperiod om tre månader då ingen rasterstruktur användes. För fraktionen finare partiklar med partikeldiameter <32 µm var infångningen ännu högre. Elva gånger så mycket sediment fångades in med rasterstrukturen än utan. I den aktuella studien studerades inte effekten av partikelstorlek då endast en storleksfraktion användes.

Resultaten från denna studie indikerar att det finns potential med denna typ av rasterstruktur för att öka partikelavskiljningen. Studien visar också att cellstorleken och utformningen av dessa har betydelse. Eftersom försöken genomfördes i skala 1:10 motsvarade den mest effektiva strukturen som testades 100x100x100 cm³. Vad som är optimal cellstorlek behöver verifieras i fältförsök. Cellerna som hade lutande cellväggar var också mer effektiva på att fånga in sediment jämfört med vertikala väggar. En sådan struktur behöver också testas i fält, då främst utifrån perspektivet att testa genomförbarheten att avlägsna sediment med vakuumsugning.

5 Avslutande diskussion

Det rådande paradigmet för dagvatten är att rena detta med naturbaserade metoder. Typiska lösningar för rening är biofilter (mycket decentraliserat) samt dammar och våtmarker som är anläggningar som byggs nedströms för större avrinningsområden men ändå oftast kan klassificeras som decentraliserade eftersom de vanligtvis bara tar hand om dagvatten från en begränsad del av en urban bebyggelse eller stad.

I projektet ”Yteffektiv dagvattenrening – Var? När? Hur?” har alternativa renings-tekniker för en mer yteffektiv dagvattenrening utvärderats. Resultaten från tre av teknikerna redovisas i denna rapport. Dagvattenrening med kemisk fällning har presenterats i en tidigare SVU-rapport (Nyström et al. 2023). De olika komponenterna som utvärderats har nått olika teknisk mognad.

5.1 Zeolitfiltersystem

Dagvattensystemet med zeolitfiltret för rening av avrinning från koppartak inkluderade en kommersiell produkt, och utifrån det perspektivet har denna tekniklösning nått längst vad gäller mognadsgrad. Flera lärdomar från den studien kan dras. Zeoliter har en mycket hög potential att avskilja lösta positivt laddade metalljoner och detta har dokumenterats sedan åtminstone 1970-talet (Hedström 2001). Det är svårt att finna ett annat filtermaterial som har högre adsorptionskapacitet per volymenhet än zeoliter. Den aktuella studien visade att avskiljningen av koppar och zink var hög, men inte så hög som filtertillverkaren hade sagt. Studien visade även att filterenheten inte införlivats i systemet på bästa sätt vilket gjorde att ytbelastningen på filtret blev för hög och kontaktiden mellan jonerna och zeoliten för kort. Vid dimensionering av ett system som inkluderar zeolitfilter behöver man hålla isär filtermaterialets hydrauliska kapacitet och den ytbelastning som krävs för att erhålla en tillräckligt lång kontaktid för dagvattnet genom filtret. För att lösa detta behövs en fördröjningstank, men troligtvis även en bräddpunkt från denna som kan hantera flödena vid riktigt stora nederbördstillfällen. På så sätt kan kopparavskiljningen bli högre än den som erhöles i Milovanović et al. (2022), men det är tveksamt om man kan nå ner till riktigt låga koncentrationer utan att bygga betydligt större filter. Detta på grund av den höga koncentration av koppar som kommer från koppartak, och med detta är det också svårt att erhålla en riktigt yteffektiv dagvattenrening för detta ändamål. Utifrån ett recipientperspektiv vore det därför bättre att undvika koppar som tak- och fasadmaterial.

När det gäller zeolitfiltersystemet finns även andra aspekter att fundera på. I det system som studerades i det här projektet var halten suspenderat material låg då det mesta av dagvattnet som gick till reningssystemet härrörde från ett tak. Om halten suspenderat material är högre är det viktigt att det finns en effektiv förbehandling av dagvattnet innan det går genom filtret. I annat fall kommer filtret att sätta igen. Det aktuella filtersystemet backspolades vid ett tillfälle under utvärderingsperioden för att upprätthålla filtrets hydrauliska kapacitet. Det fanns en farhåga att backspolningen i sig skulle spola loss den koppar som tidigare adsorberats vilket skulle förflytta kopparen från filtermaterialet till backspolningsvattnet. I det aktuella fallet låg kopparadsorptionen på samma nivå direkt efter backspolningen som före, vilket utmynnar i hypotesen att kopparen var kvar i filtermaterialet efter backspolning. Detta skulle dock behöva undersökas vidare.

5.2 Rasterstruktur och kemisk fällning för dammar och sedimentationsbassänger

Studien som fokuserade på rasterstrukturen indikerar att en högre sedimentation av partiklar skulle ske närmare inloppet om en rasterstruktur skulle placeras nära inloppet på en dagvattendamm. Tidigare studier har även visat på effektivare infångning av mindre partiklar om en rasterstruktur sätts ner i en damm (He et al. 2014). Den aktuella studien ger även viss vägledning om cellernas utformning och storlek. Nästa steg vore att testa olika rasterstrukturer i fält för att bättre kunna bedöma deras funktion under faktiska förhållanden, samt att utvärdera hur lätt det skulle vara att avlägsna sediment som fastnat i rasterstrukturen med vakuumsugning. Såvida fältresultaten skulle vara positiva, finns potential att både uppgradera befintliga dagvattendammar men det kunde även vara en väg framåt i områden där tillgänglig yta är något för liten för en vanlig dagvattendamm. Detta behöver dock undersökas mer.

I den tidigare SVU-rapporten som skrevs inom ramen för detta projekt (Nyström et al. 2023) testades olika koagulanter och polymerer för att fälla och sedimentera dagvatten. Den rapporten ger vägledning om exempelvis kemikalieval och dosering. Genom att tillsätta koagulanter kan större flockar av partiklar erhållas som lättare kan avskiljas. Fällning används i alla möjliga applikationer och har även använts i dagvattensammanhang. I några exempel har fällning lagts till som komponent i befintliga sedimentationsanläggningar för att förbättra avskiljningen, se till exempel Isteniç et al. (2012). För att nå full potential med kemisk fällning vid rening av dagvatten behöver antagligen ett helt system utformas från grunden som består av flera steg; ett inledande utjämningsmagasin som kan utjämna flödet in till flockningssteget och en väl dimensionerad damm eller sedimentationsbassäng som placeras efter flockningskammarna. I sedimentationsbassängen skulle även en rasterstruktur kunna placeras för att eventuellt kunna minska sedimentationsytan. Det behöver utredas vidare. I urbana miljöer kan det vara svårt att både få plats med en sådan anläggning och ha möjlighet att upprätthålla driften.

På större industriområden är dagvattenhanteringen ofta en viktig fråga i tillståndprocessen för verksamheten. I dessa fall kan exempelvis dagvattenrening med kemisk fällning vara en möjlighet för att både förbättra reningen av dagvattnet och eventuellt även minska ytbehovet i jämförelse med traditionella dagvattendammar. Vissa delar av ett sådant system skulle även kunna placeras under jord. Det finns också bättre förutsättningar på en större industri att upprätthålla driften av en sådan reningsanläggning då det ofta även finnas andra reningsanläggningar på området, t.ex. rening av rökgaser.

5.3 Membranfiltrering

Rening av dagvatten med ultrafiltermembran är den reningsteknik som studerats inom ramen för detta projekt som har nått lägst mognadsgrad. De försök som genomfördes har gjorts i liten skala under kontrollerade förhållanden. Däremot indikerar resultaten en hög reningsgrad och att en eventuell utveckling av ett reningssystem med membran bör kombineras med vattenåteranvändning och därför skulle passa när det finns behov av att använda det reade dagvattnet som resurs. För stora industriområden som även är i behov av processvatten kunde detta vara en teknisk lösning för framtiden. En annan fördel med membranrening jämfört med kemisk fällning är att endast mindre mängder kemikalier behöver tillföras systemet. De kemikalier som behövs är endast avsedda för den regelbundna tvätten av membranen. Dock finns fortfarande stora frågor att lösa, en av dessa är hanteringen av backspolningsvattnet och de föroreningar som koncentreras där.

6 Slutsatser och råd

I detta projekt har ett antal olika reningstekniker för dagvatten utvärderats som komplement till mer vanligt förekommande system, såsom dammar och biofilter. Kapitlet sammanfattar slutsatser från projektet och ger några råd till verksamhetsutövare och kommuner.

6.1 Avskiljning av lösta och partikulära föroreningar

Zeoliter avskiljer lösta föroreningar

Olika typer av zeoliter är kända för sin förmåga att avskilja lösta positiva joner. Reningstekniker med zeoliter har därför stor potential att avskilja lösta föroreningar som metalljoner. I jämförelse med filtermaterial som vanligtvis förekommer i till exempel biofilter är adsorptionsförmågan hos zeoliter högre per volymsenhet, vilket gör att själva filtren kan bli kompaktare eller verka effektivare på dagvatten med höga koncentrationer av joner, såsom avrinning från tak och fasader beklädda med koppar och zink.

Dammar och raster avskiljer partiklar

Dagvattendammar och den rasterstruktur som undersökts i denna studie har främst en funktion av att avskilja partikulära föroreningar. Resultat från projektet indikerar att, beroende på utformning, rasterstrukturen kan minska ytbehovet för sedimentation i en damm. Lösta föroreningar passerar dessa system.

Kemisk fällning kan avskilja lösta föroreningar

Studierna med kemisk fällning indikerar att lösta föroreningar till viss del kunde avskiljas, beroende på vilka fällningskemikalier som tillsattes. Den reningsanläggning som byggs med kemisk fällning behöver dock utformas på ett sådant sätt att de flockar som bildas vid utfällning avskiljs och inte lämnar anläggningen med utgående vatten.

Membranrening avskiljer partiklar

Även membranreningstekniken bygger i första hand på partikelavskiljning. Resultaten från detta projekt visar att de partiklar som kan avskiljas med ultrafilter är mycket små, mindre än 0,45 µm som vanligtvis definierar gränsen mellan löst och partikulärt. Detta gör att dagvatten behandlat med ultrafiltrering får mycket hög kvalitet.

6.2 Ytbehov för olika typer av anläggningar

I riktigt tätbebyggda urbaniserade områden kan det vara mycket svårt att få plats för en dagvattendamm eller ett större biofiltersystem nedströms ett större avrinningsområde. En möjlighet då är att försöka finna plats för underjordiska anläggningar på fler platser i avrinningsområdet, och då sikta in sig på de dagvatten som är mest förorenade i relation till recipientstatus. Å andra sidan skapar en sådan strategi ett drift- och underhållsbehov som både kräver en fungerande organisation och ekonomiska resurser.

Zeolitfiltersystem

Dagvattensystem behövs främst i urbana områden där utrymmet är begränsat. Det studerade systemet med zeolitfiltret, inklusive insamlings- och lagringstankar samt de fem filterenheterna, kunde installeras under marken. Detta är dock inte alltid möjligt, eftersom även marken under jord ofta är upptagen av annan infrastruktur såsom rör

och andra installationer för dricksvatten, avloppsvatten, fjärrvärme, fjärrkyla, el och bredband.

Den totala yta som upptogs av den studerade filterinstallationen var cirka 60 m². Denna reningsanläggning behandlade dagvatten från en total avrinningsyta motsvarande cirka 4 800 m². Den yta som krävdes för anläggningen uppgick till 1,25 % av avrinningsområdets storlek, vilket är jämförbart med det ytbehov som vanligtvis krävs för dagvattendammar (Persson et al. 1999). Om den hydrauliska belastningen på filtret skulle minskas, för att förbättra behandlingseffektiviteten, skulle det erforderliga ytbehovet för filterinstallationen öka ytterligare. Detta visar att en kompakt dagvattenanläggning inte nödvändigtvis har mindre ytbehov än dagvattendamm, sett till hur stor avrinningsyta som är kopplad till reningssystemet.

Reningskassetter i rännstensbrunnar

Exempel på extremt decentraliserade reningssystem är att placera kassettlösningar med filtermaterial i rännstensbrunnar och på så sätt rena dagvattnet nära källan (Lau et al. 2001; Färm 2003). Fördelen med dessa system är att de enkelt kan eftermonteras i befintlig urban dagvatteninfrastruktur och att dessa reningskassetter inte har något eget ytbehov. Nackdelen är dock att dessa system lätt sätts igen och kräver mycket frekvent underhåll, kanske så ofta som efter vartannat regntillfälle (Basham et al. 2024).

Rasterstruktur och kemisk fällning för dammar och sedimentationsbassänger

En viktig parameter för dimensionering av en dagvattendamm är den area som behövs för sedimentation av partiklar (Persson 1999). En tidigare studie rörande en rasterstruktur som testades i ett fältexperiment gjorde en grov uppskattning att implementering av en rasterstruktur i en dagvattendamm skulle kunna minska den erforderliga sedimenteringsarean med 5 till 60 gånger (He et al. 2014). Detta skulle kunna göra implementeringen av dagvattendammar i urbana områden mer genomförbar, där tillgänglig yta är begränsad. Detta behöver dock verifieras med fler fältstudier.

Kemisk fällning har på enstaka platser installerats som tillägg i redan befintliga sedimentationsanläggningar. Med en sådan installation kan en bra inblandning av kemikalien åstadkommas genom den turbulens som genereras när dagvatten kommer in i sedimentationsanläggningen. För bästa resultat behövs även ett flockningssteg. Ett sådant steg kräver ytterligare yta. Dessutom kan ett utjämningsmagasin behövas före tillsatsen av fällningskemikalien för att utjämna flödet. Detta gör att ett effektivt kemiskt fällningssteg inte är enkelt att installera i befintliga sedimentationsanläggningar och ökar ytbehovet. Däremot kan det vara görbart när nya reningsanläggningar byggs, där yta finns att tillgå.

Membranfiltrering

För behandling av avloppsvatten på reningsverk har membranteknik börjat implementeras med syfte att erhålla en effektivare rening och samtidigt minska utrymmesbehovet för avloppsreningen. Detta är exempelvis planen för Henriksdals reningsverk i Stockholm, när reningsverket byggs om. Detta ger en indikation på att även ytbehovet för behandling av dagvatten med membran skulle kunna bli mindre än för en sedimentationsanläggning. Eftersom dagvatten genereras när det regnar kan anläggningen behöva yta för utjämning och förbehandling och det behövs även yta för att hantera backspolningsvattnet. Mer studier krävs därför för att kunna säga om dagvattenbehandling med membran skulle vara en mer yteffektiv lösning än andra typer av behandlingsanläggningar för dagvatten. Hur personalintensiv driften av en sådan anläggning skulle behöva vara, behöver också undersökas vidare.

Slutsats när det gäller ytbehov

Fördelen med filtersystem är att de kan behandla lösta föroreningar på ett bättre sätt än system med enbart sedimentation som reningsmekanism, som beskrivits ovan. Däremot visar jämförelsen mellan ytbehov för olika typer av reningsanläggningar i relation till avrinningsområdets storlek att de har liknande ytbehov. Därför kommer valet mellan dagvattenreningssystem alltid vara en avvägning mellan tillgänglig yta, ovan eller under jord, i relation till de föroreningar som behöver avskiljas och det underhållsbehov de olika systemen har.

6.3 Zeolitfiltersystem

Slutsatser

Projektet visade att zeolitfilter har stor kapacitet att rena koppar och zink från takkonstruktioner med koppartak. Under utvärderingsperioden avlägsnade zeolitfiltret 52–82 % av kopparen och 50–94 % av zinken i takavrinningen. Reningen minskade något över tid och var inte lika hög som leverantören av filtret redovisat. Det kunde konstateras att filtret belastades med för hög ytbelastning, det vill säga flöde dividerat med effektiv filteryta. För att komma upp i högre reningsgrader och lägre utgående kopparkoncentrationer behöver filtren vara större och belastas med lägre ytbelastning för att öka kontakttiden i filtret. Resultaten indikerar också att filtren behöver ha en större yta för att vara riktigt effektiva reningsmässigt, för de höga metallkoncentrationer som förekommer i avrinning från exempelvis koppar- och zinktak.

Råd

Zeolitfiltersystemet som undersöktes i detta projekt har störst teknisk mognad av de undersökta teknikerna och är en kommersiell produkt. Systemet har potential att rena bort höga halter av lösta positiva joner som zink och koppar, vilket få andra system har.

För bästa funktion behöver ett reningsystem med zeolitfilter utformas med utjämningsmagasin för att kunna åstadkomma en låg filterhastighet. Det specifika systemet som utvärderades i detta projekt var utformat med för kort uppehållstid i själva filtret. Om bräddavlopp hade installerats hade regn från fler nederbördstillfällen kunnat behandlas med lägre filterbelastning vilket troligtvis hade gett en högre reningsgrad, sett till årsbelastning.

Dessa zeolitfilter lämpar sig bäst i applikationer för specifika dagvatten med låg halt av partiklar såsom avrinning från tak och fasader. Systemet kräver ett utjämningsmagasin med bräddpunkt placerat före själva filtret för att kunna hålla filterbelastningen på en jämn låg nivå, och kan öka reningsgraden på årsbasis. I första hand kan detta vara en lösning på fastighetsmark, även om det finns exempel när detta system implementerats som en del av stadens dagvattensystem.

6.4 Rasterstruktur och kemisk fällning för dammar och sedimentationsbassänger

Slutsatser

De tester som utfördes på olika rasterstrukturer i ett hydrauliskt laboratorium visade att rasterstrukturerna ökade avskiljningen av partiklar. De större cellerna (10x10 cm²) avskilde mer partiklar än de mindre cellerna (5x5 cm²). Försöken genomfördes i skala 1:10 vilket motsvarar en cellsida i storleksordningen 50–100 cm. De testade celldjupen gav ingen skillnad i resultat. Effektivast var de celler som hade lutande cellväggar, med eller mot strömningsriktningen.

De aktuella resultaten tillsammans med tidigare studier indikerar att dessa rasterstrukturer kan förbättra reningen i befintliga dagvattendammar och minska ytbehovet

för dammar då nya anläggs.

Råd

De studier som har genomförts avseende rasterstrukturer för att öka sedimentationen av partikulära föroreningar är lovande. Det som krävs nu är att testa detta i full skala, och i det sammanhanget blir det även viktigt att undersöka hur själva tömningen av sedimentet i rastret kan genomföras på bästa sätt.

När det gäller kemisk fällning har projektet gett kunskap om exempelvis kemikalieval och dosering för framtida applikationer. Kemisk fällning har använts tidigare i dagvattensammanhang. För att nå full potential med kemisk fällning och dagvattenbehandling behöver systemet utformas i flera steg och innehålla ett inledande utjämningsmagasin samt de komponenter som man vanligtvis ser på reningsverk. Ett sådant system blir förhållandevis driftintensivt och passar kanske främst på stora industriområden där det redan finns en organisation som sköter andra typer av reningssystem, t.ex. för rökgaser och processvatten.

6.5 Membranfiltrering

Slutsatser

Membranfilterstudierna visade att den membrantyp som användes i experimenten var förhållandevis tålig och att enbart grövre partiklar behövde avskiljas innan dagvattnet pumpades genom membranmodulen. Partiklar mätt som suspenderat material och turbiditet reducerades till under detektionsgränsen, likaså oljeföreningarna mätt som oljeindex.

Det utgående vattnet från membranfiltren (permeatet) höll mycket hög kvalitet. Såvida membranrening övervägs som teknislösning för dagvattenrening i framtiden bör därför även vattenåteranvändning beaktas samtidigt.

Dagvattenföroreningarna koncentreras effektivt i backspolningsvattnet men hur detta ska behandlas vidare behöver utredas mer.

Råd

Experimenten med membranfilter har genomförts i laborationsskala och tekniken behöver utvecklas mycket mer för att vara applicerbar. De försök som gjordes i detta projekt indikerade att förbehandlingen före ett ultrafilter inte behöver vara alltför avancerad och att en effektiv sedimentering räcker långt. Dessutom behöver naturligt material som flyter (t ex löv och kvistar) separeras bort.

Eftersom det utgående renade vattnet (permeatet) från membranet håller hög kvalitet, bör utveckling av denna typ av reningssystem kombineras med vattenåteranvändning. Fortfarande krävs mer studier för att undersöka hur de avskilda föroreningarna ska hanteras och tas om hand.

Referenser

- Athanasiadis K., Helmreich B. och Horn H. (2007). On-site infiltration of a copper roof runoff: Role of clinoptilolite as an artificial barrier material. *Water Research*, vol 41, nr 15, ss. 3251–3258. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.05.019>.
- Basham D., Zech W., Donald W. och Whitman J. (2024). Evaluating sediment removal efficiency of catch basin inserts as a post-construction water quality tool on roadways. *Water*, vol 16, nr 8, ss. 1081–1097. <https://doi.org/10.3390/w16081081>
- Cardew P. T. och Le M. S. (1999). *Membrane Processes: A Technology Guide*. 1:a utgåvan. Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781847551344>.
- Ćurković L., Cerjan-Stefanović Š och Filipan T. (1997). Metal ion exchange by natural and modified zeolites. *Water Research*, vol 31, nr 6, ss. 1379–1382. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00411-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00411-3).
- Doula M., Ioannou A. och Dimirkou A. (2002). Copper adsorption and Si, Al, Ca, Mg, and Na release from clinoptilolite. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol 245 nr 2, ss. 237–250. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7961>.
- Dufresne M., Dewals B. J., Erpicum S., Archambeau P. och Piroton M. (2010). Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. *International Journal of Sediment Research*, vol 25, nr 3.
- Färm C. (2002). Metal sorption to natural filter substrates for storm water treatment-column studies. In *The Science of the Total Environment*, nr 298.
- Färm, C. (2003). *Constructed Filters and Detention Ponds for Metal Reduction in Storm Water*. Doktorsavhandling. Västerås: Mälaruniversitetet.
- Gill T. W. och Pugh C. A. (2009). Sediment transport similitude for scaled physical hydraulic modeling. Conference proceedings of the 33rd IAHR World Congress in Vancouver, 2009.
- Gray C. S., Burns S. E. och Griffith J. D. (2012). *The Use of Natural Zeolites As a Sorbent for Treatment of Dissolved Heavy Metals in Stormwater Runoff*. Conference proceeding of GeoCongress 2012, in Oakland, California, March 25–29, 2012. <https://doi.org/10.1061/9780784412121.408>.
- GrönNano (2016). *Avancerade reningskomponenter för dagvattensystem*. GrönNano rapport. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- He C. och Marsalek J. (2014). Enhancing Sedimentation and Trapping Sediment with a Bottom Grid Structure. *Journal of Environmental Engineering*, vol 140, nr 1, ss. 21–29. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000774](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000774).
- He C., Post Y., Rochfort Q. och Marsalek J. (2014). Field study of an innovative sediment capture device: Bottom grid structure. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol 225, nr 6. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1976-z>.
- Hedström A. (2001). Ion exchange of ammonium in zeolites: a literature review. *Journal of Environmental Engineering* vol 127, nr8, ss. 673–681. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2001\)127:8\(673\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)127:8(673)).
- Istenci D., Arias C. A., Vollertsen J., Nielsen A. H., Wium-Andersen T., Hvitved-Jacobsen T. och Brix H. (2012). Improved urban stormwater treatment and pollutant removal pathways in amended wet detention ponds. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 47(10), ss. 1466–1477, <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.673306>.
-

-
- Johir M. A. H., Lee J. J., Vigneswaran S., Kandasamy J. och Shaw K. (2009). Treatment of stormwater using fibre filter media. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, vol 9, nr 5–6, ss. 439–447. <https://doi.org/10.1007/s11267-009-9237-7>.
- Kaykhahi S. (2023). *Urban Stormwater Treatment with Ultrafiltration and Pulsatile Fluid Flow*. Licentiatavhandling. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- Kaykhahi S. (2025). *Membrane technologies for treatment of urban wastewater streams and resource recovery*. Doktorsavhandling. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- Kaykhahi S., Herrmann I., Hedström A., Nordqvist K. och Viklander M. (2023a). Stormwater treatment using an ultrafiltration membrane and pulsatile fluid flow. *Urban Water Journal*. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2183136>.
- Kaykhahi S., Herrmann I., Hedström A., Nordqvist K., Heidfors I. och Viklander M. (2023b). Enhancing stormwater treatment through ultrafiltration: impact of cleaning chemicals and backwash duration on membrane efficiency. *Water Reuse* vol 13, nr 4, ss. 634–646. <https://doi.org/10.2166/wrd.2023.106>.
- Lau S.-L., Khan E., Stenstrom M.K. (2001). Catch basin inserts to reduce pollution from stormwater. *Water Science and Technology*, vol 44, nr 7, ss 23–34. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0381>.
- Lau W. J., Ismail A. F. och Firdaus S. (2013). Car wash industry in Malaysia: Treatment of car wash effluent using ultrafiltration and nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, vol 104, ss. 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.11.012>.
- Li M., Zhu X., Zhu F., Ren G., Cao G. och Song L. (2011). Application of modified zeolite for ammonium removal from drinking water. *Desalination*, vol 271, nr 1–3, ss. 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.047>.
- Li Y., McCarthy D. T. och Deletic A. (2016). Escherichia coli removal in copper-zeolite-integrated stormwater biofilters: Effect of vegetation, operational time, intermittent drying weather. *Ecological Engineering*, vol 90, ss. 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.066>.
- Livsmedelsverket (2022). *Livsmedelsverkets föreskrifter om dricksvatten*. Livsmedelsverkets författningssamling LIVSFS 2022:12. ISSN 1651-3533.
- Milovanović I., Bareš V., Hedström A., Herrmann I., Picek T., Marsalek J. och Viklander M. (2020). Enhancing stormwater sediment settling at detention pond inlets by a bottom grid structure (BGS). *Water Science and Technology*, vol 81, nr 2, ss. 274–282. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.101>.
- Milovanović I. (2021). *Components for area-efficient stormwater treatment systems*. Licentiatavhandling. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- Milovanović I., Hedström A., Herrmann I., och Viklander M. (2022). Performance of a zeolite filter treating copper roof runoff. *Urban Water Journal*, vol 19, nr 5, ss. 499–508. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2031230>.
- Milovanovic I., Herrmann I., Hedström A., Nordqvist K., Müller A., och Viklander M. (2023). Synthetic stormwater for laboratory testing of filter materials. *Environmental Technology*, vol 44, nr 11, ss. 1600–1612. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.2008516>.
- Milovanović I., Hedström A. och Herrmann I. (2024). *Zeolitfilter för avrinning från koppartak*. Ny Forskning och teknik, Nr 18. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- Minnesota Rural Water Association. (2001). *Minnesota Water Works Operations Manual: Chapter19: Membrane Filtration*, ss 1–12.
-

Nyström F., Hedström A., Herrmann I., och Viklander M. (2023). *Kemisk fällning - en möjlig renings-process för dagvatten*. SVU-rapport 2023-5. Stockholm: Svenskt Vatten.

Nyström F., Nordqvist K., Herrmann I., Hedström A. och Viklander M. (2019). Treatment of road runoff by coagulation/flocculation and sedimentation. *Water Science and Technology*, vol 79, nr 3, ss. 518–525. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.079>.

Nyström F., Nordqvist K., Herrmann I., Hedström A. och Viklander M. (2020a). Laboratory scale evaluation of coagulants for treatment of stormwater. *Journal of Water Process Engineering*, vol 36. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101271>.

Nyström F., Nordqvist K., Herrmann I., Hedström A. och Viklander M. (2020b). Removal of metals and hydrocarbons from stormwater using coagulation and flocculation. *Water Research*, vol 182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115919>.

Ortega Sandoval A. D., Barbosa Brião V., Cartana Fernandes V. M., Hemkemeier A. och Friedrich M. T. (2019). Stormwater management by microfiltration and ultra-filtration treatment. *Journal of Water Process Engineering*, vol 30. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.07.018>.

Persson J. (1999). *Hydraulic Efficiency in Pond Design*. Doktorsavhandling. Göteborg: Chalmers.

Pervov A. G. och Matveev N. A. (2014). Stormwater treatment for removal of synthetic surfactants and petroleum products by reverse osmosis including subsequent concentrate utilization. *Petroleum Chemistry*, vol 54 nr 8, ss. 686–697. <https://doi.org/10.1134/S0965544114080131>.

Pitcher S. K., Slade R. C. T. och Ward N. I. (2004). Heavy metal removal from motorway stormwater using zeolites. *Science of the Total Environment*, vol 334–335, ss. 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.035>.

Stovin V. R. och Saul A. J. (1994). Sedimentation in Storage Tank Structures. *Water Science and Technology*, vol 29, nr 1-2, ss. 363–372.

Strathmann H. (1981). Membrane Separation Processes. *Journal of Membrane Science*, vol 9, nr 1–2, ss. 121–189. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)85121-2](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)85121-2).

Vidal B. (2022). *Small sanitation systems-Treatment efficiency, sustainability and implementation*. Doktorsavhandling. Luleå: Luleå tekniska universitet.

Wang W., Zhang Y., Esparra-Alvarado M., Wang X., Yang, H. och Xie Y. (2014). Effects of pH and temperature on forward osmosis membrane flux using rainwater as the makeup for cooling water dilution. *Desalination*, vol 351, ss. 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.025>.

Wintgens T., Salehi F., Hochstrat R. och Melin T. (2008). Emerging contaminants and treatment options in water recycling for indirect potable use. *Water Science and Technology*, vol 57, nr 1, ss. 99–107. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.799>.

Yu H., Li X., Chang H., Zhou Z., Zhang T., Yang Y., Li G., Ji H., Cai C. och Liang H. (2020). Performance of hollow fiber ultrafiltration membrane in a full-scale drinking water treatment plant in China: A systematic evaluation during 7-year operation. *Journal of Membrane Science*, vol 613. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118469>.

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se