

Svensk dagvattenforskning

En systematisk genomgång av forskning
under perioden 2012-2021

L Lundy, G Blecken, H Österlund och M Viklander
VA-teknik, Luleå tekniska universitet



Förord

Denna rapport presenterar resultaten av en systematisk genomgång av svensk dagvattenforskning under tidsperioden 2012–2021. Syftet med genomgången var att göra en omfattande uppdatering av såväl bredden som djupet inom svensk dagvattenforskning i en nationell och internationell kontext. Totalt granskades 149 artiklar vilka valdes ut med hjälp av definierade söktermer och kriterier. Dessa artiklar grupperades utifrån dagvattnets väg från källa via transport och rening till recipient, och placerades sedan i en av tio kategorier (baserat på artikelns huvudinriktning). Forskningsartiklarna kopplade till respektive kategori beskrevs sedan för att ge en översikt över det aktuella kunskapsläget inom ett svenskt forsknings-sammanhang. Rapporten avslutas med att identifiera ett antal kunskapsluckor och rekommendationer om fortsatt forskning för att minska påverkan av städernas diffusa förorenings-spridning till vattenrecipienterna och att förbättra hållbarheten hos dagvattenhanteringen i Sverige.

Rapporten är framtagen på uppdrag av Naturvårdsverket. Författarna ansvarar dock för rapportens innehåll och utformning.

Vår förhoppning är att den här rapporten ska vara till nytta för såväl forskare, tjänstemän och praktiker inom dagvattenområdet men också hela samhällsbyggnadssektorn.

Luleå i februari 2022

Lian Lundy, Godecke Blecken, Heléne Österlund och Maria Viklander

Sammanfattning

I denna rapport presenteras resultaten av en systematisk genomgång av svensk dagvattenforskning under tidsperioden 2012–2021. Med hjälp av definierade söktermer och kriterier gjordes ett urval på 149 artiklar för detaljerad granskning och diskussion. Syftet med genomgången var att göra en omfattande uppdatering av bredden och djupet inom svensk dagvattenforskning i en nationell och internationell kontext. De utvalda artiklarna grupperades utifrån dagvattnets väg från källa via transport och rening till recipient, och placerades sedan i en av tio kategorier (baserat på artikelns huvudinriktning). Forskningsartiklarna kopplade till respektive kategori beskrevs sedan för att ge en översikt över det aktuella kunskaps-tillståndet inom ett svenskt forskningssammanhang, tillsammans med identifierade luckor i forskningen. Rapporten avslutas med ett antal förslag för vidare forskning.

När det gäller föroreningskällor är den skadliga inverkan av städernas dagvattenavrinning på de mottagande recipienternas vattenkvalitet väl etablerad i ett svenskt sammanhang. De viktigaste källorna till diffus förorenings-spridning (t.ex. trafik, industriområden) har varit föremål för avsevärd uppmärksamhet när det gäller klassiska föroreningar från städer (metaller, kolväten och partiklar). Vi vet dock mycket mindre om deras bidrag till förekomsten av ett större antal ämnen, t.ex. mikroplaster och PFAS, i stadsmiljön, eller de processer som bidrar till frigöring av föroreningar och hur dessa varierar med tiden i relation till t.ex. åldring, korrosion och klimatförändringar. Vartefter nya material introduceras i våra stadsmiljöer behöver nya ämnen identifieras och deras frigöringsmönster över tid studeras för att hantera de nuvarande riskerna och informera berörda inom stadsutveckling hur man minskar risken att bidra till framtida diffusa föroreningsbelastningar. Förorenings-spridningen från stadsmiljön till vattenrecipienterna går via direkta dagvattenutsläpp, utsläpp av behandlat/renat dagvatten eller via bräddning från kombinerade avloppsnät. Torrdeposition är en annan väg (t.ex. vindspridning och/eller uppvirvling av tidigare deponerade partiklar) men vi vet lite om dess relativa betydelse jämfört med våt deposition. Det finns en allt mer gedigen svensk databas med avseende på dagvattenkvalitet, provtaget från många olika typer av markanvändning och ytor. Endast en mindre del av forskningen behandlar den ekotoxikologiska påverkan av dagvattenutsläpp på vattenrecipienternas ekologi. Dessutom, även om det finns standardmetoder för att avgöra många etablerade föroreningar, är analytiska metoder för bedömning av t.ex. mikroplast fortfarande under utveckling, vilket innebär att jämförelser mellan studier försvåras. När det gäller att förutse föroreningskoncentrationer har flera kvantitativa modeller utökats för att koppla dagvattenflöden till kvalitetsdata. Dessa har dock oftast problem med att tillförlitligt förutse koncentrationer på andra platser än där modellen tagits fram, vilket visar att ytterligare forskning krävs. När det gäller dagvattenmängder är användning av modeller som förutser flödesvolymen mycket mer etablerade, och den aktuella forskningen fokuserar på att minska osäkerheter och hur man ska kunna förutse avrinningsvolymen kopplade till de förutspådda klimatförändringarna.

Det finns nu nationellt, och allt mer internationellt, erkännande av behovet att behandla och rena dagvatten från städer innan det når vattenrecipienterna. Eftersom rörsystem har lite – om ens något – att erbjuda när det gäller rening, finns ett ökande intresse av att använda den blå-gröna infrastrukturen (BGI) för att hantera både vattnets kvantitets- och kvalitetsmål. Termen BGI avser ett brett område av åtgärder för att kontrollera dagvattnet, från växtbäddar/biofilter till anlagda våtmarker, vilka också kan bidra till ytterligare ekosystemtjänster, t.ex. lokala minskningar av luftföroreningar, temperatur och buller. Som sådana är deras användning av potentiellt intresse för många fler intressenter än de som traditionellt är inblandade i stadsplanering, och ett viktigt forskningstema är hur man integrerar användningen av BGI i de aktuella institutionella strukturerna. Denna rapport avslutas med att identifiera ett antal kunskapsluckor och gör rekommendationer om fortsatt forskning för att både minska påverkan av städernas diffusa förorenings-spridning till vattenrecipienterna och att förbättra hållbarheten hos dagvattenhanteringen i Sverige.

Abstract

This report presents the findings of a systematic review of Swedish stormwater research over the time period 2012-2021. Using defined search terms and inclusion and exclusion criteria, 149 papers were shortlisted for detailed review and discussion. The aim of the review was to provide a comprehensive update on the breadth and depth of Swedish stormwater research in a national and international context. Following an initial review, short-listed papers were initially grouped using a source pathway receptor approach, and then allocated to one of ten categories (based on the paper's main focus). The research papers associated with each topic are then described to provide an overview of the current state-of-knowledge within a Swedish research context together with identified research gaps. The report concludes with a series of recommendations for further research.

In terms of sources, the deleterious impact of urban stormwater runoff (a term which includes snowmelt) on receiving waterbody quality is well established in a Swedish context. The key sources of diffuse pollution (e.g. traffic, industrial activities) have been the subject of considerable attention with regard to classical urban pollutants (metals, hydrocarbons and particulate matter). However, much less is understood about their contribution to the occurrence of a wider range of substances e.g. microplastics and PFAS to the urban environment or of the processes contributing to pollutant release and how these vary over time in relation to e.g. ageing, corrosion and climate change. As the diversity of materials used within urban environments increases, developing an understanding of the identity of substances and their patterns of release overtime is an increasing priority in terms of mitigating current risks as well as informing (re) development practices to avoid contributing to future diffuse pollution loads. Pathways from the urban environment to receiving waters direct runoff, discharge after treatment or via combined sewer overflows. Dry deposition is a further pathway (e.g. wind dispersion and/or direct resuspension of previously settled particulate matter) but little is understood about its relative importance compared to wet deposition. There is an increasingly solid Swedish database pertaining to the quality of runoff derived from a variety of urban surfaces at sub-catchment scales. However, less is known about the ecotoxicological impact of these discharges on receiving water ecology. Further, whilst standard methods are available for the determination of many established pollutants, analytical methods for the assessment of e.g. microplastics are still in development meaning comparison between studies is challenging. With regard to predicting pollutant concentrations, several quantitative models have been extended to link flows with quality data. However, these typically struggle to reliably predict concentrations outside of their original site of development, indicating further research is required. In terms of stormwater quantity, the use of models to predict flow volumes is much more established with current research focussed on reducing uncertainties and how to predict volumes associated with climate change predictions.

There is now nationally, and increasingly internationally, recognition of the need to treat urban stormwater runoff before its discharge to receiving waters. As piped systems offer little – if anything – in terms of treatment, there is increasing interest in the use of the blue-green infrastructure (BGI) to manage both water quantity and quality objectives. The term BGI refers to a wide range of stormwater control measures – from rain gardens to constructed wetlands – which may also contribute to the delivery of a range of further ecosystem services e.g. local reductions in air pollution, temperature and noise. As such, their use is of potential interest to a wider range of stakeholders than those traditionally involved in urban planning and a key research theme is how to integrate the use of BGI within current institutional structures. This report concludes by identifying a series of knowledge gaps and makes recommendations for further research to both reduce the impact of urban diffuse pollution on receiving waters and enhancing the sustainability of stormwater management in Sweden.

Innehållsförteckning

1. Inledning	7
1.1 Kontext	7
1.2 Mål.....	8
2. Metod	9
2.1 Urval av artiklar för granskning.....	9
2.2 Sammanställning av forskningsfinansiärer	10
3. Svensk dagvattenforskning i stadsmiljö i ett internationellt sammanhang	11
4. Granskning av svensk forskning relaterad till dagvattenavrinning	14
4.1 Föroreningskällor	14
4.2 Mätning och förutsägelse av dagvattnets kvalitet och beteende.....	16
4.3 Modellerig av avrinningsvolymmer	19
4.4 Prestanda av anläggningar för en mera hållbar dagvattenhantering.....	20
4.4.1 Fältmätningar	21
4.4.2 Modellerad prestanda.....	23
4.5 Utformning av bgi-system.....	25
4.6 Konventionella och nya sätt att hantera dagvatten	28
4.7 Påverkan på vattenrecipientens ekologi	30
4.8 Drift, underhåll och hantering av dagvattenanläggningar	31
4.9 Planering, implementering och praktik	32
4.10 Ekosystemens tjänster och fördelar	34
5. Finansieringskällor för forskning	36
6. Slutsatser och rekommendationer för vidare forskning	38
6.1 Slutsatser och kunskapsluckor	38
6.2 Rekommendationer för fortsatt forskning	39
7. Referenser	42

Tabeller

Tabell 1. Översikt över antalet granskade dagvattenartiklar som publicerats 2012–2021 (identifierade med Scopus).

Tabell 2. De tio internationellt mest publicerade författarna inom dagvatten-forskning, tillsammans med skandinaviska författare med minst 15 artiklar.

Tabell 3. Tillhörighet hos svenska forskare som publicerar dagvattenartiklar efter antal publikationer (2012–2012).

Tabell 4. Lista över forskningsfinansiärer som bidragit till fem eller fler artiklar under den angivna tidsperioden.

Figurer

Figur 1. Översikt av övergripande kategorier (textrutor) som användes för att strukturera den systematiska granskningen (siffror inom parentes avser antal granskade svenska artiklar).

Figur 2. Gruppering av föroreningskällor för dagvatten från stadsmiljö och föroreningarnas transportvägar (modifierad från Müller et al., 2020).

Figur 3. Klassificering av olika begrepp inom dagvattenhantering i relation till begreppens specificitet och fokus (Fletcher et al., 2015).

Figur 4. Illustration över tre tillvägagångssätt för uppsugning som utvärderats under torra och våta väderförhållanden (a: taksystem, b: system som omger befintliga strukturer, c: strukturer som skjuts upp).

1. Inledning

1.1 Kontext

Sverige genomgår en snabb klimatförändring, där temperaturen förväntas stiga med 3–5 °C fram till 2080 under Representative Concentration Pathways (RCP) 4,5 (SMHI, 2021). Bland annan påverkan har ändringar i nederbördsmonstren (mer regn under höst, vinter och vår, vilket leder till högre avrinningshastighet och volym) påverkan på hur vi hanterar dagvattenavrinningens mängd och kvalitet. När det gäller dagvattenmängden kommer de nuvarande trenderna och mönstren av urbanisering i kombination med ökad frekvens av extrema korta skyfall att öka risken för översvämningar vintertid. Varmare somrar kommer öka avdunstningshastigheten vilket bidrar till en ökning av antalet dagar med låga flöden i vattendrag och torka kommer förekomma i många delar av Sverige. Därigenom kan samma stadsområden stå inför en årlig ökning av både översvämningar och torka. Hur vi hanterar dagvattenavrinning i stadsområden kan därför året runt påverka livskvaliteten för stadsbor, från hur vi hanterar denna form av "avloppsvatten" på vintern till dagvattnets potentiella roll som alternativ vattenresurs för att lindra torka på sommaren, och de ytterligare fördelar alternativa åtgärder kan ge.

När det gäller dagvattenkvalitet innehåller avrinningen från städer en oavsiktlig blandning av kemikalier som kommer från många olika källor och som släpps ut i ytvattnet vid regn och snösmältning. Nödvändigheten att minska utsläppen av kemikalier till miljön får ökande politisk uppmärksamhet, till exempel i samband med FN:s hållbara utvecklingsmål (SDG): mål 3 (God hälsa och välbefinnande) genom att minska påverkan av kemikalier på människors hälsa och miljö, SDG 6 (Rent vatten till alla) och SDG 14 (Hav och marina resurser) genom att minimera utsläpp av kemikalier till vattenmagasin, samt SDG 9, 11 och 12 (Hållbar infrastruktur; Hållbara städer och samhällen; Hållbar konsumtion och produktion) genom att skapa en hållbar dagvatteninfrastruktur. På europeisk nivå är identifiering av möjligheterna att minska människornas och miljöns exponering för farliga ämnen central i EU:s Zero Pollution Ambition (ett nyckelåtagande i den europeiska gröna överenskommelsen, 2019) och EU:s kemikaliestrategi (EU CSS, 2020). EU CSS understryker behovet av att hantera kombinerad exponering för flera kemikalier från olika källor över tid och pekar på problemet med avsiktliga jämfört med oavsiktliga kemiska blandningar, och hur denna senare aspekt ännu inte har behandlats i relation till antingen nuvarande eller historiska föroreningar (d.v.s. förorenade sediment). EU:s ramdirektiv för vatten (EU WFD, 2000) hänvisar till behovet av att hantera diffusa källor till föroreningar för att uppnå miljö kvalitetsnormer i vattendragen samt hur källorna bidrar till förorening av ytvatten, vilket framhålls i utvärderingen av EU:s avloppsdirektiv (EU, 2019). Dagvatten i städer, som en beståndsdel i översvämningar från kombinerade avlopp och via direkt avrinning, har identifierats som en viktig källa till föroreningsbelastning som inte behandlas på rätt sätt i EU UWWTD i sin nuvarande form och har utpekats som en viktig källa till förorening av ytvatten som kan undvikas.

Vartefter som de tätbebyggda områdena utökas och de säsongrelaterade ovädren ökar i intensitet, varaktighet och frekvens blir traditionella rörledningssystem allt oftare överbelastade, vilket leder till lokala översvämningar. Rörledningar endast flyttar, snarare än hanterar, dagvattenflöden och bidrar mycket lite till att minska förorenings spridning. I motsats till detta traditionella tillvägagångssätt finns numera ett ökande intresse för användning av blå-grön infrastruktur (BGI) och andra dagvattenanläggningar som ett alternativ eller komplement till ledningssystem. Termen BGI avser system av olika typer och storlekar, från planteringar och regnträdgårdar till stora dammar och anlagda våtmarker, med syfte att infiltrera (eller där det inte är möjligt, hålla kvar) dagvattenvolymer vid källan. BGI-system kan dock, förutom att bidra till mängdmålen för dagvatten, förbättra vattenkvaliteten och även bidra med andra fördelar såsom att skapa naturliga miljöer, kyla ner av stadsområden, förbättra luftkvaliteten samt främja fysisk och mental hälsa. Detta har lett till att användning av BGI (även kallat naturbaserade lösningar) anses vara bästa praxis när det gäller att hantera dagvatten. Det finns dock fortfarande utmaningar vid införandet av dessa som ett nytt tillvägagångssätt, där kommuner och stadsplanerare behöver stöd för att kunna integrera dem i redan framtagna strategier och styrdokument för implementering, drift och underhåll.

- I detta sammanhang för policyutveckling och -införande finns ett akut behov av att bättre förstå:
- källorna till diffusa föroreningar från städer (d.v.s. vilka ämnen avges från vilka material och huruvida materialens ålder påverkar utsläpp)
- processer som påverkar mobilisering av föroreningar från städer och transport av dessa via dagvattenavrinning (hydraulisk modellering och vattenkvalitetsmodellering inklusive omvandlingar i rören)
- möjligheterna att förhindra att avrinning från städer hamnar i vattenrecipienterna (prestanda, underhåll och införande av blå-grön infrastruktur för dagvatten och nya tillvägagångssätt som är under utveckling)
- möjligheter att ta hand om förorenade sediment (hantering av sediment från avloppsbrunnar och dagvattendammar)

1.2 Mål

Som ett bidrag till att ta hand om detta behov i ett svenskt sammanhang ger denna rapport en systematisk genomgång av forskning om urbant dagvatten, som företagits i Sverige under tidsperioden 2012–2021, och denna forsknings bidrag till den skandinaviska och bredare internationella forskningslitteraturen om dagvatten.

Med fokus på vetenskapliga artiklar som genomgått kollegial granskning (peer review) använder den här rapporten en gruppering utifrån dagvattnets väg från källa via transport och rening till recipient för att strukturera och syntetisera den forskning som gjorts av svenska dagvattenforskare, följt av en genomgång av forskning relaterad till olika metoder för behandling och rening av dagvatten från städer innan det släpps ut i vattenrecipienterna. Rapporten är kompletterad med en fullständig lista över referenser med länkar till de forskningsartiklar om dagvatten som publicerats under den utvärderade tidsperioden och som diskuteras i denna rapport. Rapporten avslutas med ett antal rekommendationer till fortsatt forskning inom detta dynamiska forskningsfält.

2. Metod

2.1 Urval av artiklar för granskning

Tidskriftsdatenbanken Scopus för kollegial granskning (www.scopus.com) genomfördes i juni 2021 för att identifiera relevanta forskningsartiklar och litteraturoversikter ("reviewartiklar") som publicerats under tidsperioden 2012–2021 i internationella vetenskapliga tidskrifter. Sökorden "stormwater or runoff or snowmelt" användes för att söka i artiklarnas titlar, nyckelord och sammanfattningar (120 005 artiklar hittades). Sedan söktes listan igenom efter termen "urban" (33 754 artiklar hittades) och begränsades till tidsperioden 2012–2021 (20 507 artiklar hittade) och sedan till enbart forskningsartiklar och litteraturoversikter (exkluderande t.ex. konferensbidrag) (17 320 artiklar hittades). Denna långa lista över artiklar utgjorde grunden till utvärderingen av svensk forskning i en internationell och skandinavisk kontext.

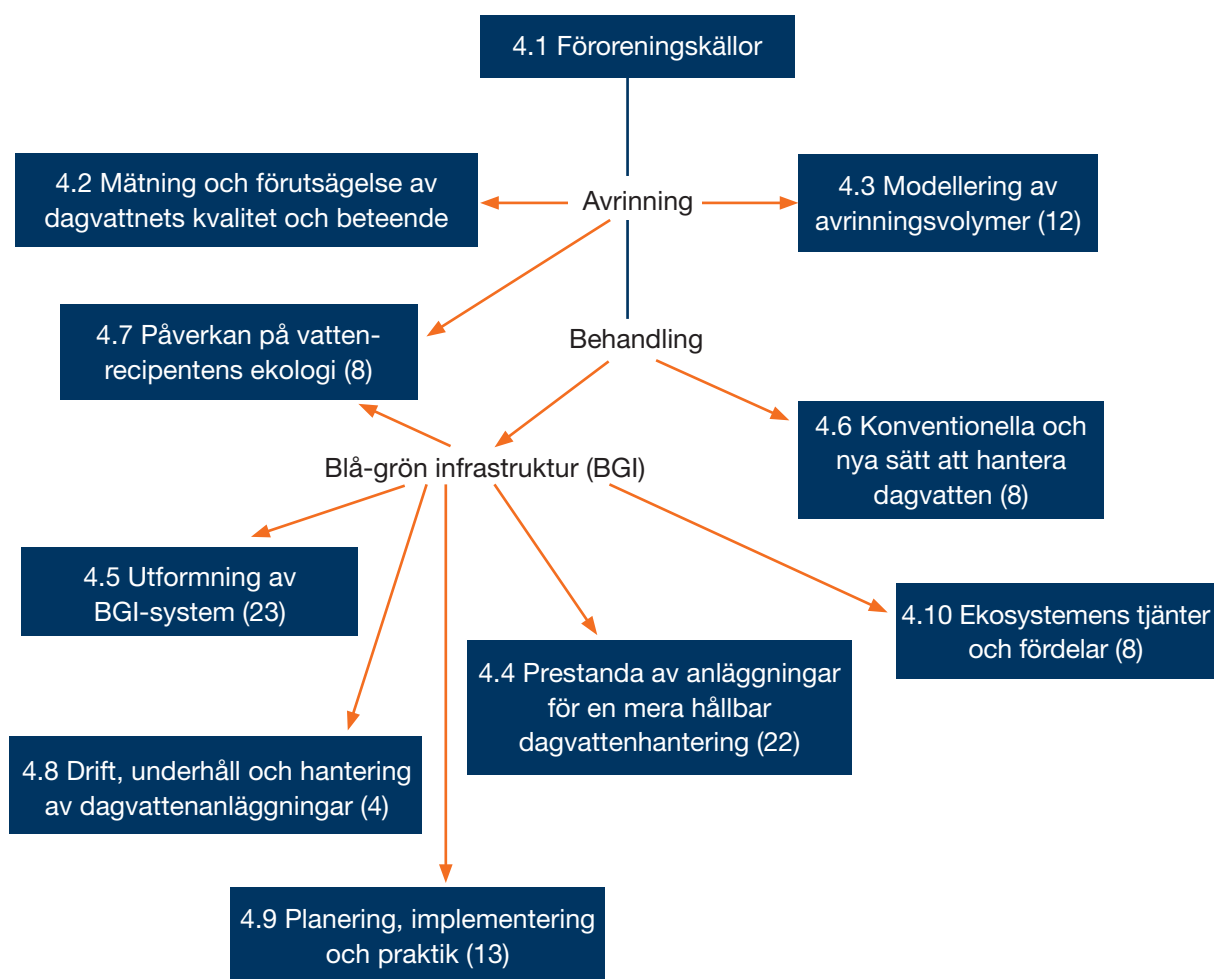
Av de 17 320 artiklarna hade 840 artiklar minst en skandinavisk författare, varav 370 artiklar hade minst en svensk författare. En närmare sökning i de 370 artiklarna som identifierats för Sverige gjordes med sökorden "stormwater and urban runoff or snowmelt" för att identifiera artiklar som hade dessa ämnen som huvudfokus (till skillnad från att termerna bara nämns enstaka gånger). Detta resulterade i en "kortlista" med 176 artiklar där det fanns minst en svensk författare.

Dessa 176 artiklar granskades sedan manuellt med följande villkor för att ingå eller inte:

- Artiklar av en helsvensk forskningsgrupp: ingår i rapporten
- Artiklar av en internationell forskningsgrupp (där det ingår minst en svensk forskare) och där det inte ingår en fallstudie: ingår i rapporten
- Artiklar av en internationell forskningsgrupp (där det ingår minst en svensk forskare) och där det ingår en svensk fallstudie: ingår i rapporten
- Artiklar av en internationell forskningsgrupp (där det ingår minst en svensk forskare) och där det ingår en fallstudie som inte är inom Sverige: ingår inte i rapporten

Denna manuella granskning minskade det totala antalet artiklar för utvärdering till 149 stycken.

Dessa artiklar grupperades i tio övergripande kategorier (se figur 1) för att underlätta för läsarna att lokalisera artiklar om ämnen av specifikt intresse. Om en artikel platsade i mer än en kategori diskuteras den inom kategorin där den var mest framträdande. Varje övergripande kategori av artiklar beskrevs sedan för att ge en översikt över svensk dagvattenforskning i urban miljö som företagits i området inom den valda tidsperioden. Länkar till alla granskade artiklar finns i bilaga A.



Figur 1. Översikt av övergripande kategorier (texturor) som användes för att strukturera den systematiska granskningen (siffror inom parentes avser antal granskade svenska artiklar).

2.2 Sammanställning av forskningsfinansiärer

Alla publicerade artiklar redovisar den eller de forskningsfinansiärer som det ekonomiska stödet kommer från. Denna information användes för att sammanställa forskningsfinansiärerna till de 370 identifierade svenska forskningsartiklarna under den valda tidsperioden.

3. Svensk dagvattenforskning i stadsmiljö i ett internationellt sammanhang

Resultaten från Scopus-sökningarna visas i tabell 1. Av de 17 320 identifierade forskningsartiklarna var 16 603 forskningsartiklar och 717 identifierades som litteraturöversikter. Av detta antal är 5 % publicerade av grupper med minst en forskare placerad i Skandinavien. Dessa 5 % motsvarar 840 forskningsartiklar och litteraturöversikter, varav det i 39 % förekommer svenska forskare, 27 % danska forskare och 18 % respektive 16 % forskare baserade i Norge och Finland. Som region skulle Skandinavien hamna på 7:e plats när det gäller antal publicerade dagvattenartiklar som granskats av kollegor (efter USA, Kina, Australien, Storbritannien, Kanada och Tyskland), och Sverige hamnar på 15:e plats när det gäller en jämförelse av länder.

Tabell 1 Översikt över antalet granskade dagvattenartiklar som publicerats 2012–2021 (identifierade med Scopus)

Plats	Antal artiklar*
Globalt	17 320
Skandinavien	840 (6,0 %)
Sverige	370 (2,3 %)
Danmark	255 (1,8 %)
Norge	172 (1,0 %)
Finland	146 (0,9 %)

*siffror inom parentes avser andelen artiklar som identifierades per region och land, i förhållande till totalt antal identifierade artiklar

I tabell 2 anges de tio mest publicerade författarna globalt inom dagvattenforskning under 2012–2021, samt deras hemvist och antal artiklar. Listan har utökats med namn, hemvist och antal artiklar för alla skandinaviska forskare med mer än 15 publicerade artiklar under den valda tidsperioden. En skandinavisk forskare hamnar bland de tio bästa internationellt: Viklander (Luleå tekniska universitet, Sverige). När det gäller internationella citeringar är två skandinaviska forskare medförfattare till den mest citerade dagvattenartikeln under denna tidsperiod: Steen Mikkelsen (Danmarks tekniska universitet, Danmark) och Viklander (Luleå tekniska universitet, Sverige) (Fletcher et al., 2015, 581 citeringar).

Tabell 2. De tio internationellt mest publicerade författarna inom dagvattenforskning, tillsammans med skandinaviska författare med minst 15 artiklar

Författare	Institution	Antal publikationer
A Deletic	University of New South Wales (Australien)	95
WF Hunt	North Carolina State University (USA)	87
T Fletcher	University of Melbourne (Australien)	76
A Goonetilleke	Queensland University of Technology (Australien)	76
M Viklander	Luleå tekniska universitet (Sverige)	69
P Egdowatta	Queensland University of Technology (Australien)	59
DT McCarthy	Monash University (Australien)	56
J Li	Xi'an University of Technology (Kina)	52
A Liu	University of New South Wales (Australien) / Shenzhen University (Kina)	51
LH Kim	Kongju National University (Sydkorea)	44

Forskare med mer än 15 publicerade artiklar som tillhör skandinaviska universitet		
J Marsalek	Luleå tekniska universitet (Sverige)	42
P S Mikkelsen	Danish Technical University (Danmark)	42
GT Blecken	Luleå tekniska universitet (Sverige)	25
MB Jensen	Copenhagen University (Danmark)	22
TM Muthanna	Norwegian University of Science and Technology (Norge) / Luleå University of Technology (Sverige)	21
N Sillanpää	Aalto University, Espoo (Finland)	20
J Vollertsen	Aalborg University (Danmark)	20
H Koivusalo	Aalto University, Espoo (Finland)	
H Österlund	Luleå tekniska universitet (Sverige)	16
K Arnbjerg Nielsen	Danish Technical University (Danmark)	17
MN Futter	Sveriges Lantbruksuniversitet (Sverige)	15
L Vezzaro	Danish Technical University (Danmark)	15
CY Xu	University of Oslo (Norge)	15

Med hjälp av Scopus-databasen och söktermer (se avsnitt 2.1) identifierades 176 artiklar för manuell granskning. I tabell 3 visas hemvisten för de svenska forskningsgrupper som ansvarar för publicering av fem eller fler artiklar inom denna korta lista.

Tabell 3. Tillhörighet hos svenska forskare som publicerar dagvattenartiklar efter antal publikationer (2012–2012)

Institution	Antal artiklar
Luleå tekniska universitet	72
Chalmers tekniska universitet	21
Sveriges Lantbruksuniversitet	17
Lunds Universitet	14
Kungliga Tekniska Högskolan (KTH)	11
Stockholms universitet	10
Linnéuniversitetet	7
Uppsala Universitet	5
IVL Svenska Miljöinstitutet	5
Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI)	5
Övriga	≤4

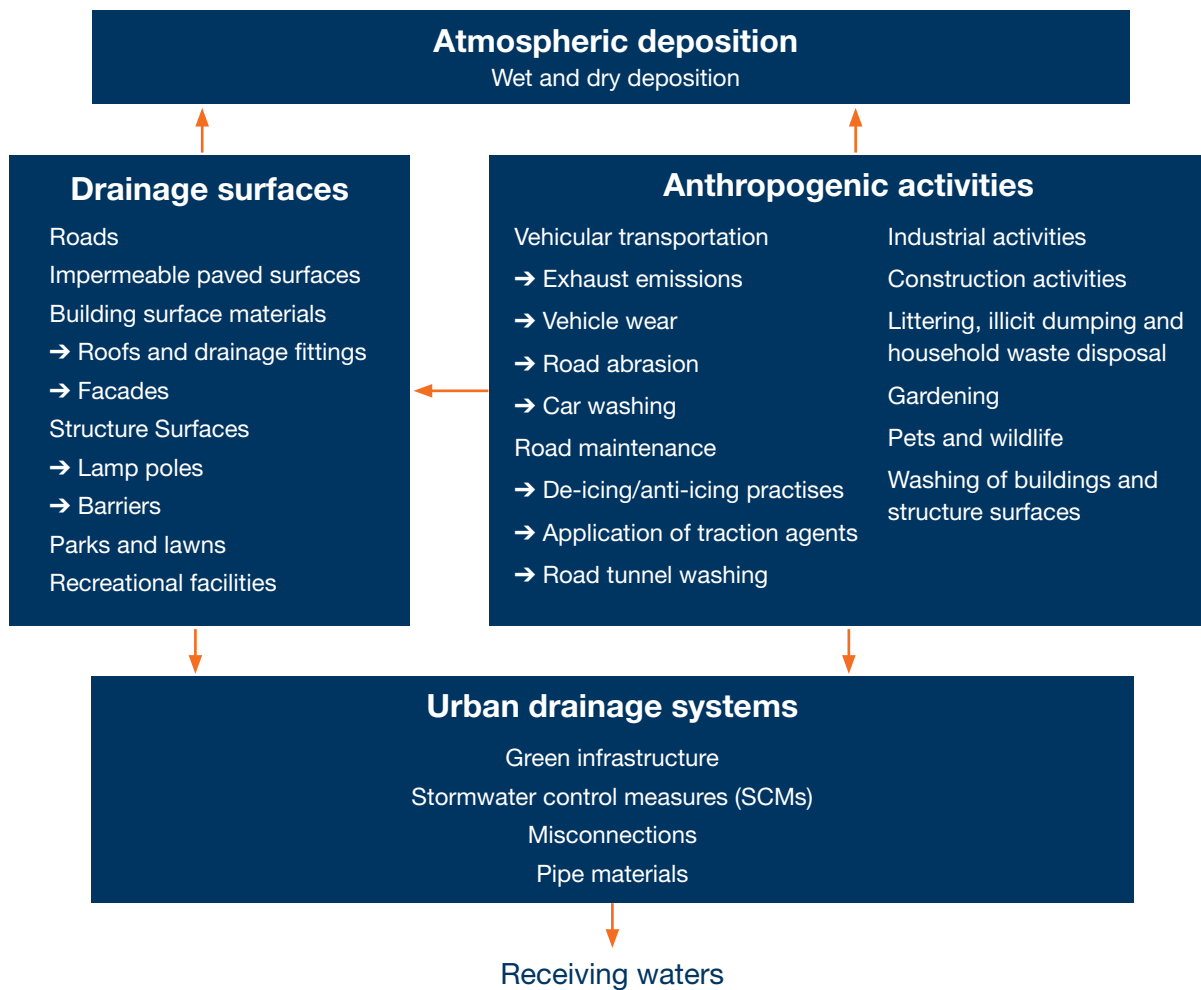
4. Granskning av svensk forskning relaterad till dagvattenavrinning

Urbaniseringsprocessen har en dramatisk påverkan på den naturliga vattencykelns funktion genom att anläggningen av vägar, vägbeläggningar och byggnader effektivt omvandlar genomsläppliga till ogenomsläppliga ytor. Vid regn och snösmältning avleds avrinningen, som tidigare primärt skulle ha infiltrerats i marken, till en infrastruktur av dagvattenledningar för att förhindra lokala översvämningar. Detta traditionella tillvägagångssätt har dock flera begränsningar: den snabba urbaniseringen har resulterat i att många rörsystem har nått eller överskridit sin kapacitet, vilket resulterar i ett ökande antal översvämningar av dagvatten vid regn. När avrinningen passerar över ogenomsläppliga ytor, mobiliseras tidigare avsatta föroreningar (t.ex. från trafik eller industriutsläpp), som är en stor källa till föroreningsbelastningen i vattenrecipienterna, antingen som direkta utsläpp eller som komponenter i översvämningar från kombinerade avlopp. Dessutom kan utsläppen av stora volymer dagvatten vid en och samma punkt orsaka erosion i vattenrecipienterna, både av de ursprungliga jordarna och/eller återsuspension av tidigare avlagrade sediment. Dagvattenavrinning från städer släpps ofta ut direkt i närmaste vattenrecipient. Vartefter som medvetenheten om dess biologiska, kemiska och fysiska påverkan ökar börjar dock behovet av och fördelarna med att behandla dagvatten från städer innan det släpps ut få mer uppmärksamhet när det gäller både politiska mål (att uppfylla allt striktare miljö kvalitetsnormer) och mål beträffande människors hälsa och välmående (skydd av en ändlig resurs och många fördelar som skapas av blå-gröna områden i städer).

4.1 Föroreningskällor

Ett stort antal olika källor bidrar med en mängd olika föroreningar till dagvatten från städerna (Müller et al., 2020). Eftersom förekomsten av olika föroreningskällor varierar mellan avrinningsområden, varierar också typen och mängden av föroreningar som släpps ut mellan olika avrinningsområden (se figur 2 beträffande en översikt över olika källor och spridningsvägar). Flera studier har utvärderat kvaliteten på städernas dagvatten som källa till diffusa föroreningar som hamnar i vattenrecipienter. Identifierade typer av avrinningsområden som studerats är stadsområden (Järleskog et al., 2021; Czemieli, 2014; Galfi et al., 2016 och 2017), industriområden (Lindfors et al., 2020 och 2021), flygplatser (Jia et al., 2019) och bilparkeringar (Lindfors et al., 2020 och 2021). Andra studier har utvärderat de föroreningsbelastningar som skapas av specifika aktiviteter såsom trafik (Markiewicz et al., 2019), snöupplag (Vijayan et al., 2021; Vijayan et al., 2019; Lundberg et al., 2013), lagring av biobränsle (Larsson et al., 2016) och timmerupplag (Kaczala et al., 2012), inträngning av avloppsvatten i dagvattenledningar (Panasiuk et al., 2015 och 2016; Hu et al., 2018) och avfallsdeponering (Kalmykova et al., 2013). Anläggandet av Testsite E18 vid motorvägen E18 (Sverige) har gett möjlighet att undersöka miljöpåverkan av ett antal föroreningar som har sitt ursprung från trafiken på motorvägen (Eaton et al., 2012). Resultaten från studien tyder på att avrinning infiltreras året runt (även vintertid) eftersom snötäcket smälter på grund av vägsalt och vägkonstruktionen har en högre hydraulisk ledningsförmåga jämfört med den ursprungliga jorden. Metallkoncentrationerna i snötäcket låg oftast högre än svenska Naturvårdsverkets gränser för grundvatten.

Under senare år har forskare börjat undersöka frigöringen och mobiliseringen av föroreningar från vissa byggnadsmaterial såsom ett antal takmaterial (Müller et al., 2019), byggnaders fasader (Bollmann et al., 2014), zink/zink-legerade material (Odnevall och Leygraf, 2017), kopparkoppar-/fasader (Hedberg et al., 2014) och materialen i dagvattenledningar (Borris et al., 2017) samt andra bidrag från stadsmiljö, till exempel vägdamm (Järleskog et al., 2020; Polukarova et al., 2020; Folens et al., 2018) och grova vägpartiklar (Borris et al., 2016). Identifierade faktorer som påverkar frigöring av föroreningar från källorna är (för byggnadsmaterial) dess lutning, orientering, exponering för atmosfären (Hedberg et al., 2014) och nederbördens egenskaper (Odnevall och Leygraf, 2017). För vägsediment är de viktigaste faktorerna som påverkar frigöring av föroreningar partiklarnas egenskaper (t.ex. innehåll av organiska ämnen), avrinningens pH, varaktighet och tillförd energi (Borris et al., 2016). Dessutom har också den pågående frigöringen av föroreningar från historiskt förorenade områden, till exempel vattendrag som förorenats av bekämpningsmedel (Rasmussen et al., 2015) och dagvattendammar (Flanagan et al., 2021) fått uppmärksamhet.



Figur 2. Gruppering av föroreningskällor för dagvatten från stadsmiljö och föroreningarnas spridningsvägar (modifierad från Müller et al., 2020)

Viktiga föroreningar i städernas avrinning är metaller, där koppar, zink, bly, kadmium, krom och nickel ofta kan hittas (Lindfors et al., 2020; Borris et al., 2016; Lundberg et al., 2013; Järleskog et al., 2021) liksom platinagruppens ämnen, till exempel platina (kopplat till användningen av katalysatorer) (Folens et al., 2018). När det gäller organiska föroreningar har alifatiska och aromatiska petroleumkolväten, alkylfenoler, bisfenol A och polycykliska aromatiska kolväten (PAH) ofta rapporterats som förekommande i studier av städernas avrinning via en kombination av fältstudier (t.ex. Polukarova et al., 2020; Kalmykova et al., 2013; Järleskog et al., 2021) och litteraturstudier (Markiewicz et al., 2017). Mer specifikt har nonylfenoler och ftalater detekterats i avrinning från byggnadsmaterial (Müller et al., 2019), och en studie av Bollman et al., (2014) kopplar också detektering av biocider i kombinerat avloppsvatten till deras frigöring från byggnaders fasader och överföring till avloppssystemet via nederbörd.

Nyligen, och delvis som ett resultat av granskningen av data som företagits av Naturvårdsverket (Magnusson et al., 2016), har ökad uppmärksamhet fokuserats på att identifiera källor till mikroplast (MP) som förs ut i havet. Denna granskning drog uppmärksamheten till mängden MP som förutspås avges från däck och bitumen (vägslitage) och därigenom bli tillgängliga för att sköljas av och hamna i vattenrecipienterna. Även om analysmetoder för mikroplast fortfarande är under utveckling, d.v.s. standardmetoder för analys eller rapportering av MP saknas, har initiala studier rapporterat om förekomst av olika MP i dagvattenavrinning och vägdam (Järleskog et al., 2020 och 2021) tillsammans med förekomsten av ett antal metaller och organiska föroreningar, vilket stöder hypotesen att trafik är en viktig källa till MP till miljön. Detta kompletteras av en teoretisk studie av Schernewski et al., 2020, som utvecklade MP-specifika utsläppsscenarioer som indata för 3D-modellsimuleringar, vilket gjorde att transport, beteende och deponering

av olika MP i Bottenhavet kunde uppskattas. Även om ett ökande antal fältstudier (både nationellt och internationellt) rapporterar om vitt spridd förekomst av MP inom många olika miljöer, är dock både typen och påverkansnivån av MP på mänsklig och/eller ekologisk hälsa fortfarande ett livligt debatterat ämne (Rahman et al., 2021).

Medan studier av föroreningar från stadsavrinning oftast fokuserar på metaller och/eller mikroföroreningar (inklusive MP), är detta inte de enda diffusa föroreningar som rapporteras förekomma i urbant dagvatten. Till exempel har Wu et al., (2015) och Wu och Malmström (2015) utvärderat diffusa källor till näringsämnen och spridningsvägar inom avrinningsområden i stadsmiljö, där de viktigaste källorna identifierades som atmosfärisk deposition och trafik. När det gäller biologiska parametrar undersöktes bidraget från olika avrinningsområden i stadsmiljö till utsläpp av ett urval indikatorbakterier (inklusive *Escherichia coli*, *enterococci* och *Clostridium perfringens*) av Galfi et al., (2016). Resultaten från provtagningen tydde data på att indikatorbakterierna var en till två storleksordningar högre vid snösmältning respektive regnavrinning, jämfört med basflödet i ledningarna i torr väderlek. Från studier med fokus på olika metodjämförelser rapporterades också dagvatten som källa till mikrobiella patogener (Hu et al., 2018) och virus (Rusiñol et al., 2019), där de viktigaste källorna för dagvatten antas vara felkopplingar av spillvatten och husdjur.

För att minska utsläppen av föroreningar från urbant dagvatten till vattenrecipienterna är ett första steg att karaktärisera varje föroreningskälla inom respektive avrinningsområde för att utveckla en tydlig förståelse för dess relativa vikt. Att upprätta en förteckning över föroreningskällor i ett område är ett viktigt första steg inom till exempel utveckling av åtgärdsprogram för vattenförekomster (EU WFD, 2000) som underlag för utveckling av riktade åtgärder för att uppnå MKN (Lützhøft et al., 2012). Med avsikt att stödja detta mål i en stadsmiljö utvecklade Lützhøft et al., (2012) ett system för klassificering av källor där användare kan extrahera data från två europeiska föroreningsförteckningar: Statistical Classification of Economic Activities in the European Community (NACE) (Eurostat 2008) som identifierar den ekonomiska aktivitet som är ansvarig för utsläpp av en förorening och EU:s harmoniserade nomenklatur för källor till utsläpp (NOSE-P) (Eurostat 1998) som specificerar den process som resulterar i utsläpp av en förorening. Detta data kopplas sedan till ett antal attribut såsom den stadsstruktur/del av miljön där föroreningen släpps ut, och data om emissionsfaktorer och utsläppsprofiler.

4.2 Mätning och förutsägelse av dagvattnets kvalitet och beteende

Som vi redogjort för i avsnitt 4.1 har flera studier rapporterat de föroreningar och koncentrationsintervall som är kopplade till olika typer av markanvändning, aktiviteter och specifika material/komponenter. Det är dock känt att det ofta inte är den totala koncentrationen av enskilda föroreningar som är den mest lämpliga indikatorn på miljöpåverkan. Med tanke på den exponentiella ökningen av nya ämnen som dyker upp på marknaden och det faktum att urbant dagvatten i princip är en oavsiktlig blandning av kemikalier, en "föroreningscocktail", där ämnen kan fungera både samverkande och motverkande, finns ett ökande intresse i den internationella forskningslitteraturen och inom politiken för nya sätt att identifiera, ta hand om och reglera påverkan av urbana dagvattens utsläpp. Två sätt att angripa denna utmaning börjar ta fart: för det första användning av ekotoxicitetstestning och utvärdering av biologisk mångfald (se avsnitt 4.7) och för det andra, utvärdering av metallers och organiska föroreningars fördelning mellan olika faser och fraktioner som ett bättre underlag för att utforma och välja behandlingstekniker. Det senare tillvägagångssättet är också erkänt i politiken, t ex. har miljö kvalitetsnormer (MKN) för nickel och bly reviderades och relaterar nu till den biotillgängliga koncentrationen av respektive metall (Lindfors et al., 2021). Denna åtgärd följdes av utvecklingen av nationella MKN för biotillgänglig halt av flera medlemsländer, exempelvis för koppar i Sverige (Hoppe et al., 2015).

Utifrån 18 dagvattenprovtagningar (inkluderande regn, snösmältning och regn-på-snö) undersökte Lindfors et al. (2020) fördelningen av metaller i olika storleksfraktioner. I alla undersökta prover var den så kallat "äkta" lösta fraktionen större än den kolloidala fraktionen även om bidraget till de båda fraktionerna varierade mellan metallerna. Även Vijayan et al., (2019) rapporterade att i en laboratoriestudie av snösmältning förekom de flesta metallerna i den äkta lösta fraktionen i högre utsträckning än i den kolloidala fraktionen. Ett ytterligare alternativ för att utvärdera storleksfraktionering är användning av passiva provtagare som gör att man kan härleda genomsnittliga lösta metallkoncentrationer över den tid som den passiva provtagaren är exponerad. Knutsson et al., (2014) utvärderade användningen av passiva provtagare för att bedöma förekomsten av metaller i dagvatten jämfört med stickprov tagna direkt på dagvattnet och

för att geokemiskt modellera förutsägelser som härletts med hjälp av mjukvaran och modelleringsverktyget visualMINTEQ. Resultaten tyder på att passiva provtagare är användbara för övervakning av förekomst av metaller under kemodynamiska förhållanden och att modellernas förutsägelser delvis beskriver metallernas förekomst i system som inte är i jämvikt. När det gäller organiska föroreningar undersökte Nielsen et al., (2015) uppdelningen av PAH:er mellan olika fraktioner: total, partikel, kolloidal och löst fraktion i fältprov och prov på syntetiskt dagvatten. De PAH:er som identifierats i dagvatten i partikulär fraktion och de lösta fraktionerna följde PAH:ernas hydrofoba egenskaper (d.v.s. mer än 50 % av PAH:er med hög molekylvikt (MW) fanns i partikelfraktionerna medan de med låg eller medelhög MW i högre grad fanns i de kolloidala och lösta fraktionerna, vilket visar på vikten av att utveckla reningstekniker som kan avskilja både partiklar och PAH:er som finns i de kolloidala och upplösta fraktionerna. Ett alternativt sätt för att förstå variationen av föroreningskoncentrationerna i dagvatten är att undersöka hur olika tillvägagångssätt för att samla in prover påverkar de erhållna resultaten (t.ex. stickprov jämfört med sammansatta prover, Galfi et al., 2014, McCarthy et al., 2018) liksom hur olika provtagningsstrategier påverkar (Jia et al., 2018), både mellan och inom olika avrinningstillfällen (Galfi et al., 2016). Med fokus på att undersöka föroreningsbelastningen i från plogad snö jämförde Vijayan et al., (2021) olika strategier för provtagning av snö för att identifiera det effektivaste sättet att uppskatta snöhögars föroreningsbelastning. På liknande sätt har flera studier utforskat hur valet av själva analysmetoden påverkar resultaten, med avseende på suspenderat material (Nordqvist et al., 2014), mikrobiella indikatorer (Hu et al., 2018, Rusiñol et al., 2014) och användningen av sonder för mätning av turbiditet och elektrisk konduktivitet som surrogat för TSS och fosfor uppmätta i korresponderande stickprov och flödesproportionella prov (Villa et al., 2019).

På grund av den tid som krävs för att samla in dagvattenprover som per definition är händelsestyrda, och även de höga kostnaderna för analys av prover (särskilt för organiska föroreningar) har flera studier utvecklat modeller för att förutsäga dagvattnets kvalitet under både nuvarande och framtida klimatförhållanden (Vezzaro et al., 2015; Borris et al., 2013, 2014 och 2016; Andersson et al., 2020). Dessa studier omfattade ett antal föroreningar såsom koppar, zink och fluoranten (Vezzaro et al., 2015), suspenderat material, koppar, zink och bly (Borris et al., 2013, 2014 och 2016) och MP (Fältström och Anderberg, 2021; Bondelind et al., 2020). Mer specifikt använde Vezzaro et al., (2015) dynamisk modellering för att bedöma möjligheterna med olika alternativa åtgärder för att minska utsläppen av de valda föroreningarna och uppnå vattenrecipientens MKN. Resultaten tydde på att alla åtgärder som undersöktes minskade belastningarna av valda föroreningar i vattenrecipienterna, varav användning av åtgärder för kontroll av utsläppet redan vid källan förutsågs ge bäst resultat. Ingen av de utvärderade strategierna förutsågs dock resultera i att MKN i vattenrecipienterna uppnåddes. Även om mängden data för MP förekomst i miljön ökar, är de nuvarande datamängderna otillräckliga för att kunna genomföra substansflödesanalyser (SFA). Som ett alternativt sätt att uppskatta hur olika åtgärder påverkar spridningen av MP jämförde Fältström och Anderberg (2020) systematiskt SFA-data för ett antal bättre karakteriserade föroreningar och på så vis identifiera möjligheter att minska MP i kedjan källa-spridningsväg-recipient, och drog slutsatser som styrker värdet av att använda ett holistiskt synsätt för att ringa in områden som ska skyddas. En annan studie av Bondelind et al., (2020) använde -teoretiska värden som indata för en hydrodynamisk modell (MIKE 3 FM) för att förutse vart partiklar från däckslitage i vägdagvatten som släpptes till Göta Älv (Göteborg) hamnade. Resultaten visade att det finns zoner där mikroplasterna företrädesvis deponeras, och att den vertikala densitetsgradienten (orsakad av saltvatten från Kattegatt) i vattenpelaren påverkar potentialen för att mindre MP-partiklar når havet.

För att bedöma en modells prestanda utvärderade Wu et al., (2021) de osäkerheter som finns i den lågkomplexa konceptbaserade modellen StormTac för simulering av den årlig dagvattenvolym och -kvalitet. Resultaten tyder på att osäkerheten i den modellerade årliga dagvattenkvaliteten (~ 30 %) är större än i de årliga avrinningsvolymerna (~24 %), där de känsligaste faktorerna var specifika parametrar beträffande markanvändning. Utöver olika sätt att förutse totala föroreningskoncentrationer i dagvatten, finns ett antal verktyg för "biotiska ligandmodeller" (biotic ligand models, BLM) för bedömning av biotillgänglighet och som utgår från lokala vattenkvalitetsparametrar och koncentrationer av lösta metaller för att förutse andelen metall som kan antas vara i biotillgänglig form. Lindfors et al., (2021) utforskade användning av den förenklade BLM Bio-met på dagvatten från tre platser och jämförde resultaten med analytiskt uppmätta äkta lösta koncentrationer, och kom fram till att de förutsedda biotillgängliga koncentrationerna var avsevärt lägre än äkta lösta koncentrationer för metallerna i studien.

Om vi ser framåt, och som ett sätt att ge information inför planering av åtgärder för anpassning till ett förändrat klimatet i våra städer, har flera studier granskat hur olika prediktioner om klimatförändringar påverkar både dagvattenvolymer (se avsnitt 4.3) och -kvalitet. Till exempel har forskning av Borris et al., (2013 och 2016) använt WinSLAMM och US EPA SWMM för att erhålla data om ändringar i föroreningskoncentrationerna vid de förändrade nederbördsmonster som förutses i norra Sverige. Dessa analyser tyder på, beroende på vilket scenario som utvärderas, ökning på 10–70 % för TSS (där de högre värdena är kopplade till vinterväghållning). Markanvändning och hur fort markanvändningen förändras identifierades som de viktigaste faktorerna som påverkar framtida föroreningskoncentrationer (Borris et al., 2013) och regnmängd samt -intensitet (i motsats till antalet föregående torra dagar) identifierades också att ha stor inverkan (Borris et al., 2014 a och b). En viktig slutsats av dessa studier var att de mindre regnen (som står för en stor andel av den årliga föroreningsbelastningen) var mest känsliga för de förutspådda klimatförändringarna, och att utnyttja grön infrastruktur för att minska andelen hårdgjorda ytor som är direkt anslutna till ledningsnätet var effektivt för att minska både avrinningsmängden och föroreningsbelastningen.

4.3 Modellering av avrinningsvolymer

Nationellt och internationellt har matematiska dagvattenmodeller en lång historia av användning i planering och analys av städernas dagvattensystem. Därför har senare forskning fokuserat på metodologiska studier, som främst har försökt identifiera typer och nivåer av osäkerhet och hur dessa kan hanteras. Till exempel har Sharafati et al., (2020) företagit en bedömning av osäkerheten i hydrograffunktioner vid översvämning (t.ex. toppmängd och volym) på grund av variabiliteten i dagvattenmodellen HEC-HMS. Med simulerade data utvärderades osäkerheter från regn- och modellparametrar på de genererade avrinningskurvorna vid översvämning/skyfall med genom beräkning av variationskoefficienter, vilket gav att regnmängden är den största källan till osäkerhet i modellen vid förutsägelser om en översvämningens maxvärden och volym. Talei et al., (2013) undersökte användningen av en lokal inlärning för regn-avrinningsmodellering. När resultaten av den lokala inlärningsmodellen användes på tre avrinningsområden av olika storlek var de jämförbara med eller bättre än resultaten från fysikaliska modeller, såsom den kinematiska vågmodellen (KWM) och dagvattenmodellen SWMM. Reynolds et al. (2018) utvärderade hur en hydrologisk modell (HBV) påverkades av olika definitioner av klimatologisk dag och utströmningsdag, och rapporterade att definitionen av den klimatologiska dagen (och dess påverkan på om vattnet applicerades vid ett eller två regntillfällen under samma dag) var en viktig drivande faktor för storleksordningen hos osäkerheterna för modellens prestanda. Andra studier har utforskat användningen av modeller som utvecklats för att förutse responsen från hårdgjorda ytor för att även förutse responsen hos genomsläppliga ytor, till exempel grönområden (Broeckhuizen et al., 2019 och 2020) och snötäcke (Moghadas et al., 2016 och 2018) på regnhändelser. Till exempel undersökte Broeckhuizen et al., (2019) hur väl modeller med olika underliggande matematiska strukturer (SWMM, MOUSE och Mike SHE) kunde förutse ett antal utdata såsom antal regnhändelser som skapade avrinning och hur modellerna de hanterade initiala förhållandena före regnhändelserna. Analysen omfattade elva olika jordtyper och sex olika jorddjup under den studerade tidsperioden på 26 år. Resultaten i form av utdata varierade mellan de tre modellerna, vilket tyder på att valet av modell kommer påverka en studies övergripande resultat. Denna studie kompletterades med en ytterligare studie som undersökte påverkan av olika tillvägagångssätt för att kalibrera modellen (Broeckhuizen et al., 2020). Med fokus på modellen SWMM kom man fram till att både enstegs- och tvåstegskalibreringar var lyckade. Tvåstegs-strategierna återgav dock flera valideringshändelser dåligt (Nash-Sutcliffe-effektivitet < 0) jämfört med enstegs-strategierna, men de återgav också fler händelser bra (NSE > 0:5) vilket tyder på att olika strategier för att välja kalibreringshändelser i vissa fall kan leda till olika resultat i valideringsfasen.

När det gäller modellering av regn-på-snö-händelser utvärderade Moghadas et al., (2018) användning av SWMM för att förutse avrinningsvolymer som uppstår vid regn-på-snö-händelser i nuvarande och framtida klimat. En viktig upptäckt var påverkan av snötäckets egenskaper, i synnerhet snödjupet, vilket påverkar volymen av regnvatten och/eller snösmältning som hålls kvar i eller frigörs från snötäcket. Fortfarande med fokus på snötäckets påverkan integrerade Järvi et al. (2018) fältdata och modellering för att utvärdera energi- och vattenutbyte i fyra städer som har snö vintertid. Resultaten indikerar att förekomsten av snö kritiskt ändrar den påverkan som stadens utformning har på hydrologi och klimat i lokal skala. Efter snösmältningen återgår städerna till att starkt styras av förhållandet mellan bebyggda och bevuxna ytor, och författarna visar hur vintertemperaturens variation mellan åren kan ändra förhållandet mellan avrinning och evapotranspirationen, vilket påverkar avrinningsflöden och/eller volymer på vintern.

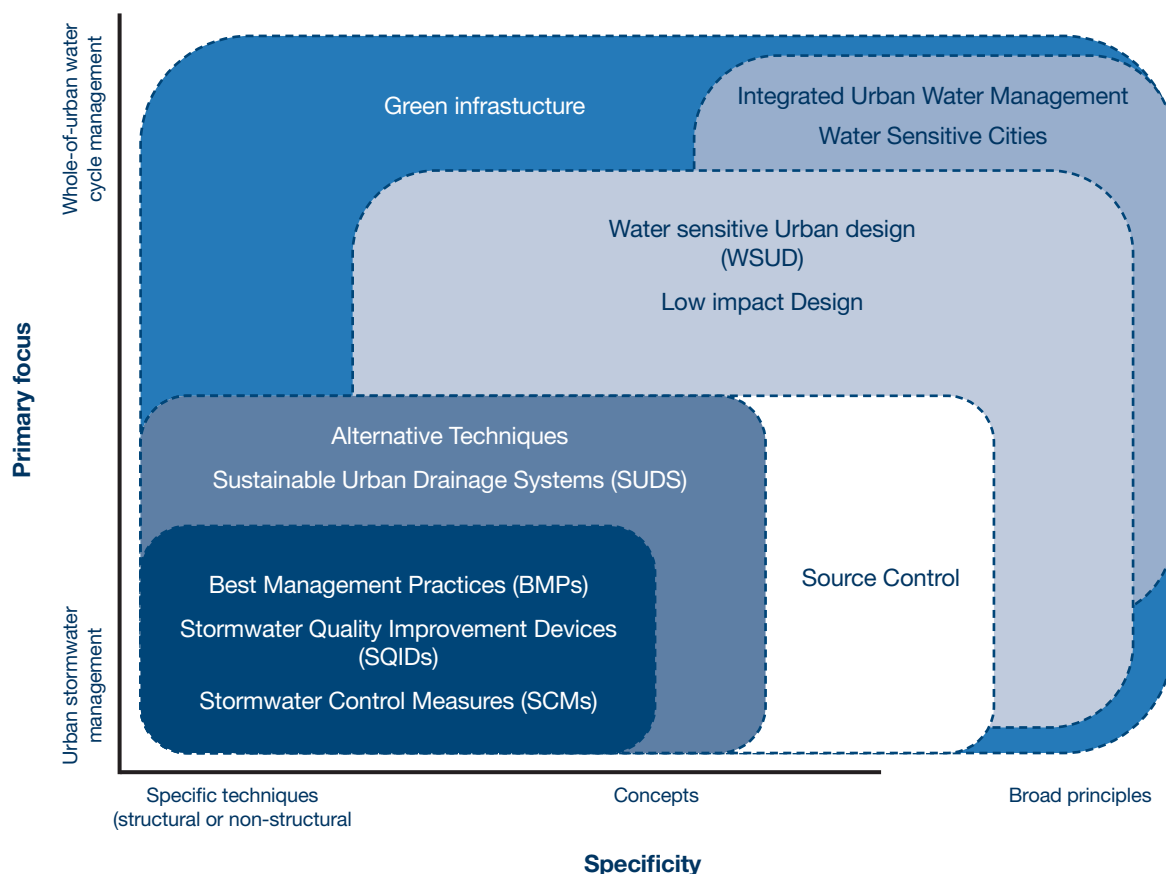
När det gäller planering för klimatförändringar genomförde Arnbjerg-Nielsen et al., (2013) en granskning av metoder för att analysera framtida ändringar av extrema regn i stadsmiljö och deras effekter på städernas dagvattensystem. Den förstärker klimatförändringarnas nyckelroll som den viktigaste drivande faktorn för förändring av städernas strategier för dagvattenhantering och visar att det fortfarande finns många begränsningar i vår förståelse för hur nederbördsmonster i ett föränderligt klimat ska beskrivas för att på bästa sätt kunna utforma och underhålla städernas dagvatteninfrastruktur. En viktig slutsats är att utformning och optimering av städernas dagvatteninfrastruktur med utgångspunkt i klimatförändringarnas påverkan och att optimera denna tillsammans med andra mål blir allt viktigare för att behålla våra städer beboeliga i framtiden. En ytterligare studie med fokus på att analysera klimatförändringarnas påverkan på städernas dagvattensystems hydrauliska kapacitet har genomförts av Berggren et al., (2014) som utvärderade påverkan av att använda alternativa dimensionerande regn såsom blockregn (BR) och CDS-regn (Chicago Design Storm) tillsammans med två metoder för att ta hänsyn till framtida klimat (användning av en konstant faktor och en deltaförändringsfaktor (DC) som är beroende av regnets intensitet). Resultaten från de olika tillvägagångssätten var inte likvärdiga. Användning av CDS skapade maximal hydraulisk respons men BR gav bättre kunskap om kritiska varaktigheter för systemet. En övergripande slutsats var att skillnaderna mellan de två metoderna tyder på ett högt beroende av de maximala faktorer som används för regnen.

Med ett bredare angreppssätt undersökte Sørup et al., (2018) användningen av fyra olika vädergeneratorer i relation till både nuvarande och framtida förhållanden i två olika avrinningsområden. Under nuvarande förhållanden resulterade alla vädergeneratorer i realistiska responser från avrinningsområdena (t.ex. antal avloppsledning som går fulla samt antal och volym för översvämningar från kombinerade avlopp). Under framtida förhållanden gav de olika vädergeneratorerna olika prediktioner även om det fanns viss samstämmighet när det gäller de övergripande prediktionerna, såsom att avrinningsområdena kommer behöva hantera fler avloppsledning som går fulla, i framtida klimat (stora skillnader i IDF-kurvor). I en större skala jämförde Tanouchi et al., (2019) användning av högupplösta polygonala data på markanvändning i EEA Urban Atlas med de mindre detaljerade EEA CORINE för karaktärisering av markanvändning i den dynamiska hydrologiska modellen HYPE. För ett område runt Svedala i södra Sverige utvärderades den simulerade flödes hastigheten gentemot tidsserier med uppmätta flöden i Segeån, statistiska indikatorer och kurvor över flödenas varaktighet. Resultaten tyder på att användning av data från Urban Atlas i allmänhet stämde bättre med nederbördsobservationer sommardag, särskilt när den dagliga regnmängden var 10 mm/dag eller mer.

4.4 Prestanda av anläggningar för en mera hållbar dagvattenhantering

Uppmärksammande av behovet av åtgärder som tar hänsyn till både dagvattnets kvalitet och mängd har ökat avsevärt under de senaste 25 åren. Det traditionella tillvägagångssättet med direkt avledning via ledningssystem till recipienten utvecklades när dagvatten ansågs vara i princip rent vatten. Som en följd av en ökande och stark kunskapsgrund (se avsnitt 4.1 och 4.2) börjar behovet av och fördelarna med att minska föroreningsbelastningen som kommer från städernas utsläpp av dagvatten att vinna mark både inom yrkeskåren och politiken (se avsnitt 1). Fastän ledningsnät är effektiva när det gäller att transportera (men inte hantera) dagvattenavrinning bidrar de med begränsade, om ens några, möjligheter att reducera föroreningar. Ett alternativ till rörsystem är användning av t ex. lokalt omhändertagande (LOD), naturbaserade lösningar och/eller blå-grön infrastruktur (BGI), d.v.s. hålla ytvattenavrinningen ovan mark och hantera flödet med olika anläggningstyper för att infiltrera, fördröja och/eller rena vattnet innan det släpps ut.

Vartefter som intresset för tillvägagångssättet växte nationellt och internationellt har terminologin kopplad till användning av BGI blivit allt mer komplex, där olika termer används för samma system och samma namn för olika system, vilket orsakar förvirring och missförstånd. Detta ledde till att forskare från flera länder samarbetade för att utveckla och dela en gemensam förståelse av relationerna mellan nyckeltermerna och konceptet i relation till deras primära inriktning och specificitet som sammanställts i Figur 3. På svenska brukar begrepp som lokalt omhändertagande av dagvatten (LOD), (blå-)grön infrastruktur (BGI), hållbar dagvattenhantering användas.



Figur 3. Klassificering av olika begrepp inom dagvattenhantering i relation till begreppens specificitet och fokus (Fletcher et al., 2015)

4.4.1 Fältmätningar

När det gäller prestanda hos dagvattenanläggningar har flera studier utvärderat påverkan av en rad olika typer av anläggningar på hur de påverkar vattenkvalitet, vattenvolymer/flöden, biologisk mångfald (se avsnitt 4.7) och deras bidrag med ekosystemtjänster (se avsnitt 4.10).

Till exempel har Gavric et al. (2019) granskat användning av gräsbevuxna svackdiken och översilningsytor i dagvattenhantering. Där rapporterades att förståelsen av dessa dagvattenanläggningars hydrologi och reningsförmåga är stor, men studier av föroreningarnas beteende och vart de hamnar är fokuserat på ett begränsat antal föroreningar och som inte har rapporterats systematiskt, vilket gör det svårt att göra jämförelser mellan studier.

Al-Rubaei et al. (2017a) granskade driftsstatus för 25 kommunala dagvattendammar (mellan 3 och 26 år gamla) genom att utvärdera hydraulisk belastning och hydraulisk effektivitet, vegetationsstatus och bottensedimentens egenskaper. Man fann att den uppskattade hydrauliska effektiviteten stämde väl med dammens längd och bredd-förhållande och förhållandet mellan dammens ytarea och den hårdgjorda ytan inom det avrinningsområde som bidrar till avrinningen. Sedimentkvaliteten befanns påverkad av antropogena aktiviteter (trafik), men inte på en nivå som ställer speciella krav vid bortskaffning. Genomgången visade på förhållandevis få och mindre problem som enkelt kunde åtgärdas, vilket poängterar vikten av relativt enkla regelbundna inspektioner för att upptäcka mindre problem på ett tidigt stadium innan de allvarligt kan påverka dammens funktion.

En anlagd våtmark som studerades av Herrmann (2012) bestod av ett 1 ha stort system som tog emot vatten från bostads- och vägområden under en fyraårsperiod. Även om en årlig genomsnittlig sänkning av kväve (173 kg per ha och år) och fosfor (12,1 kg per ha och år) rapporterades, visade en jämförelse av de utsläppta koncentrationerna med svenska miljö kvalitetsnormer (MKN), att de uppmätta nivåerna av totalkväve var medelhöga eller höga och totalfosfor mycket höga eller extremt höga. Metallkoncentrationerna (Cd, Cr, Cu, Pb och Zn) var låga eller medelhöga i förhållande till MKN. Denna studie rapporterade också att vegetationen var väl etablerad efter ett år. När det gäller bedömning av faunan tydde resultaten på att medan kolonisationen av ryggradslösa djur från början dominerades av fjädermyggor och buksimmare kunde senare avsevärda ökningarna märkas av gråsuggan *Asellus aquaticus*, snigeln *Physa fontinalis* och dagsländenympfen *Cloeon dipterum*, vilket tyder på att målen för biologisk mångfald och minskning av näringsämnen kan uppnås samtidigt i dagvattenvåtmarker kan uppfylla multifunktionella syften.

Med syftet att utvärdera äldre systems prestanda undersökte Al-Rubaei et al., (2017b, c) dagvattenrening och fördröjning för ett 6,8 ha och 19 år gammalt kombinerat damm- och våtmarkssystem i Växjö. Genomsnittliga volymminskningar för 53 avrinningshändelser för dammen och våtmarken var 40 % respektive 28 %, medan de genomsnittliga flödesminskningarna var 60 % respektive 76 %. Trots mycket varierande koncentrationer i tillflödet avlägsnade damm- och våtmarkssystemet föroreningarna effektivt: medelvärdet på reningsförmågan var för TSS: 91 %, totalfosfor: 80 %, partikulärt Cd: 94 %, partikulärt Cu: 91 %, partikulärt Pb: 83 % och partikulärt Zn: 92 %. Reningen av partikulärt och upplöst Ni varierade mycket med ett genomsnitt på 67 % ± 62 % respektive -5 % ± 41 %. Slutsatsen var att även relativt gamla system kan ge effektiv behandling. Etableringen av biologiska och geokemiska processer i våtmarker tar tid vilket gör att mogna våtmarker presterar ofta bättre än nyanlagda.

Flera studier har fokuserat på näringsämnenas beteende och öde i dagvattensystem. Till exempel gjorde Land et al., (2017) en systematisk granskning av anlagda våtmarkers prestanda med avseende på inflöde av näringsämnen till vattenrecipienterna. Kvantitativ analys av data från mer än 200 våtmarkssystem i Europa och Nordamerika visade att avskiljningsgraden av både totalt kväve (TN) och totalt fosfor (TP) är starkt beroende av föroreningsgraden, med medianvärden på avskiljningsgrad för TN och TP på 93 respektive 1,2 g m⁻² år⁻¹. Med fokus på påverkan av näringsämnenas status i avskiljningsprocesser för föroreningar undersökte Svensson et al. (2015) ett reningssystem i form av våtmark som behandlar dagvatten från en träindustri anläggning uppvisar brist på näringsämnen eller saknar effektiva mikrober, och om åtgärder mot dessa eventuella problem i form av tillförsel av näringsämnen och mikrober (som finns i slam från pappersbruk) förbättrade nedbrytningen av organiska ämnen. Resultaten tyder på att även om tillsats av näringsämnen hade en positiv effekt på möjligheten att behandla dagvatten ledde tillsats av aktiverat slam från pappersbruket till att det resulterande dagvattnet gav en toxisk effekt.

Bland dagvattenreningsteknikerna är den viktigaste processen för att avlägsna föroreningar att flödet saktas ned så för att uppnå sedimentering av partiklar och partikelbundna föroreningar. Med tiden samlas sediment, vilket gör att dessa regelbundet måste avlägsnas för att reningsanläggningen ska behålla sin hydrauliska kapacitet och behandlingskapacitet. Det är därför viktigt att utveckla en detaljerad förståelse för kvaliteten hos de ansamlade sedimenten både ur ett driftsperspektiv (se avsnitt 4.8) och för bortskaffande av sedimenten.

Som ett bidrag till att hantera detta behov analyserade Flanagan et al., (2021) sediment från 17 anläggningar för dagvattensedimentering med avseende på 259 organiska ämnen som antogs finnas i stadsmiljö. Studien visar att 92 av dessa ämnen kunde detekteras i minst ett prov, och högst 52 ämnen detekterades i ett enskilt prov. Denna omfattande screeningstudie gjorde att en typisk profil för organiska föroreningar kunde tas fram. Där ingår polyklorerade bifenylter (PCBer), PAHer, organiska tennföreningar, alifatiska kolväten, ftalater, aldehyder, polybromerade difenyletrar (PBDE), perfluorerade ämnen och alkylfenoler. Även om koncentrationen av föroreningar varierade mycket mellan dammarna överskred 22 av de 32 proven de föreskrivna tröskelvärdena som härletts från toxicitetsdata för minst ett ämne.

Beträffande svackdiken undersökte Gavric et al., (2021) metallanrikningen i jordar i tre vägdiken, som är snötäckta under en del av året (och därigenom utsatta för extra föroreningsbelastning från användningen av vägsalt och grus, dubbdäck samt lagring och smältning av snö som plogats bort från trafikerade områden). Det svackdike som fick avrinning från det mest trafikerade området uppvisade de högsta medelkoncentrationerna av de flesta studerade metallerna (Pb, Cu, Zn, Cr, Cd, Ni, Co, V, Ti och W). En

viktig upptäckt var att metallkoncentrationerna inte sjönk med avståndet från de trafikerade ytorna, vilket antydde att lagrad snö var en viktig källa till metaller som delvis uppväger metallernas fördelning över ytan i dikesjord.

När det gäller direkta mätningar av den långtids-hydrauliska funktionen hos BGI utvärderade Al-Rubaei et al., (2015) infiltrationskapaciteten hos tolv infiltrationssystem för dagvatten, inklusive genomsläpplig asfalt, infiltrationsstråk och gräsbevuxna svackdiken genom en kombination av fält- och laboratorieexperiment. De initiala data tydde på att på grund av ett antal problem såsom brist på regelbundet underhåll, användning av olämpligt material för fyllning av skarvar och kraftig kompaktering av jorden uppvisade de flesta systemen en minskad infiltrationskapacitet. Trots detta befanns äldre bevuxna system fortfarande kunna infiltrera intensiva dimensionerande regn. Relationerna mellan ett antal faktorer (t.ex. typ och ålder för systemen, typ av fyllnadsmaterial och avstånd från beläggningen) och långtids-infiltrationsbeteendet hos systemen identifierades dock också, med slutsatser som framhöll behovet av att fullständig implementering av konstruktionen och regelbunden kontroll och underhåll av den inspekterande myndigheten måste säkerställas.

4.4.2 Modellerad prestanda

Som vi noterade i avsnitt 4.1 är generering av fältdata dyrt och tidskrävande. Data om avlägsnandet av många föroreningar i de olika reningsanläggningarna är begränsade, särskilt för många ”nya” föroreningar för vilka man börjar känna oro, till exempel mikroplast och PFAS. Som stöd för utvecklingen av dagvattenplaner och i brist på fullständiga datamängder har flera studier försökt utveckla och validera modeller för att förutse avskiljningen av ett antal diffusa föroreningar från våra städer via ett antal anläggningstyper. De stora osäkerheterna som vanligen förknippas med modellering av dagvattenkvalitet (se avsnitt 4.3) påverkar dock också prestanda hos dagvattenbehandlingsmodellerna (Vezaro et al., 2012). För att bättre förstå källorna till osäkerhet utvärderade Vezaro et al., 2012 användningen av en konceptuell dynamisk modell för avskiljning av Cu och Zn i en damm och ett biofilter (BGI-system som skiljer sig åt i sina huvudsakliga avskiljningsprocesser). De känsligaste modellfaktorerna identifierades med hjälp av global känslighetsanalys (GSA) och modellens förutsägelsegränser uppskattades med hjälp av den generaliserade tekniken för sannolikhetsosäkerhetsuppskattning (GLUE). De viktigaste faktorerna som påverkade prestanda (d.v.s. de känsligaste) var relaterade till de simulerade systemens fysiska egenskaper (flöde och vattenförluster) och till de ödesprocesser som är relaterade till TSS, medan GLUE underströk modellernas strukturella osäkerheter. Trots de identifierade osäkerheterna stöddes dock användning av konceptuella dynamiska ödesmodeller baserade på ämnenas inneboende egenskaper i kombination med fältdata för att uppskatta avskiljning av föroreningar i olika dagvattenbehandlingssystem.

När det gäller modellering av ansamling av föroreningar i sediment utvärderade Gavric et al., (2019) användningen av beräkningsverktyget StormTac web för att uppskatta ackumuleringen av Cu, Pb och Zn i jordarna i tre diken genom att jämföra med resultaten från en detaljerad fältprovtagningsskampanj. Jämförelser av uppmätt och simulerad metallbelastning som ackumulerades i svackdikena tydde på att även om de uppmätta värdena oftast överskred de simulerade resultaten ger de stöd för att det går att uppskatta dikenans prestanda.

När det gäller modellering av dagvattenanläggningars påverkan på vattenmängd är de flesta modellerna väl utvecklade och kan användas som beslutsstöd för åtgärder inom avgränsade avrinningsområden. Till exempel kopplade Haghigatafshar et al (2018a) endimensionella (1D) avlopps- och tvådimensionella (2D) hydrodynamiska avrinningsmodeller för att utvärdera effekten av BGI:s förmåga att minska översvämningar i Augustenborg (Malmö). Simuleringsresultaten visade att de blå-gröna dagvattensystemen var effektiva på att reglera lokala översvämningar i innerstadens avrinningsområden och hade minskat de totala översvämmade ytorna med ungefär 70 %, och i efterhand anlagda BGI minskade toppflöden med ungefär 80 %. I uppföljande studier använde Haghigatafshar et al (2018b och 2019b) uppmätta avrinningsresponser från två avrinningsområden med LOD och ett med ledningssystem för att ge information till utveckling av en konceptuell modell av LOD-prestanda. Modellen visade att, i avrinningsområden med LOD, delas avrinningsområdet upp i ett flertal små åtskilda avrinningsområden som inte har någon direkt anslutning till utloppet. Dessa små avrinningsområden börjar avleda vatten till varandra (och eventuellt till utloppet) när regnmängden ökar. Resultaten tyder på att sammansättningen på fördröjningsanläggningar

i ett avrinningsområde påverkar systemets övergripande prestanda vilket leder till slutsatsen att det undersökta tillvägagångssättet kan stödja utformning och implementering av LOD i mesoskala, även för en kombination av flera olika typer av BGI-system med olika fördröjningskapacitet. I en vidareutveckling av LOD-modellering i mesoskala utökade Haghightafshar et al., (2019b) angreppssättet till att även omfatta ett konventionellt ledningsnät i en stad. Denna hybridmodell integrerar fördröjningseffekterna av blå-gröna dagvattensystem i mesoskala med den hydrauliska dynamiken hos ledningsnätet. Modellen utvecklades vidare via integrering av en kostnadsorienterad optimeringsalgoritm med flera mål som syftar till att minimera de totala kostnaderna genom optimal placering av de blå-gröna systemen i mesoskala med optimal storlek. Även om tillvägagångssättet ännu inte är fullt ut validerat framhålls det som en användbar metod för hållbar hantering av de befintliga ledningsnäten i städerna i ett "hydro-ekonomiskt" perspektiv.

I lokal skala kopplade Roldin et al., (2012) en modell av underjordiska infiltrationsmagasin (såsom dagvattenkassett eller stenkista) till en fysiskt distribuerad dagvattenmodell för att undersöka hur dagvattenkassetter påverkar dagvattensystem. En jämförelse av modellens förutsägelser med fältdata visar att beteendet hos en enskild dagvattenkassett kan modelleras på ett effektivt sätt med denna metod. I studien ingick också analys av alternativa sätt att aggregera data för enskilda dagvattenkassetter, med resultat som visar att användning av en viktad geometrisk genomsnittlig hydraulisk ledningsförmåga hos enskilda andelar var optimal vid jämförelse av total utflödesvolym och toppflödes hastighet. I en uppföljande studie beskriver Roldin et al., (2013) användningen av ett förenklat modelleringskoncept för infiltration av dagvattenkassetter under förhållanden med ytlig grundvattennivå där det ingår en representation av den lokala grundvattennivån och dess effekter på infiltrationstakten. Utdata från denna modell jämfördes med utdata från en tvådimensionell (2D) omättad/mättad flödesmodell baserad på Richards ekvation. Jämförelsen visar att dagvattenkassetternas tömningstider beräknade med den nya modellen är i genomsnitt 13 % högre än tömningstiderna i 2D-modellen, vilket leder till slutsatsen att detta nya sätt är ett användbart verktyg för simulering av småskalig dagvatteninfiltration i närvaro av ett tunt grundvattenlager med distribuerade modeller i större skala.

Med inriktning på svackdiken utvärderade Rujner et al., (2018) användning av den hydrologiska modellen Mike SHE (ofta använd på avrinningsområdesskala) för att simulera den hydrologiska reaktionen hos ett gräsbevuxet dike på dagvatteninflöden. Data som genererats från 12 artificiella avrinningshändelser användes för modellens indata, och "goodness of fit" bedömdes statistiskt för observerade och simulerade toppflöden, hydrografvolym, Nash-Sutcliffe-modelleffektivitet (NSE) och markvatteninnehållet (soil water content; SWC) i dikets jordlager. Den bästa anpassningen (NSE > 0,8) uppnåddes för höga inflöden och då marken redan var våt sedan innan (antedecent moisture conditions; AMC). Den sämsta anpassningen noterades för låga inflöden och torr AMC, när dikets primära funktion är flödesdämpning. Resultaten visar på vikten av korrekt modellering av jordinfiltrationen och, även om effekten av rumslig variation av SWC på dikets utloppshydrograf inte kunde bekräftas av simuleringens resultat, att hög topografisk noggrannhet var fördelaktig för att med precision reproducera platserna där vatten dämde upp som observerades.

Förutom utvärderingar av BGI-prestanda beträffande dagvattnets kvalitet och mängd har ett antal andra sätt att bedöma påverkan av sådana system också studerats. Till exempel utforskade Sörensen och Emilsson (2019) användning av försäkringsdata för att utvärdera nivån av minskad översvämningrisk genom användning av BGI i Augustenborg (Malmö) jämfört med närliggande områden som förlitar sig på konventionella dagvattensystem. Analysen inriktade sig på påverkan av den extrema nederbörden 2014 (återkomsttid mellan 50–200 år) och det verkade som att mindre översvämningsskador förekom i områden med BGI. Forskning av Bergen et al. (2019) tog ett annat perspektiv och utvärderade dagliga och säsongsmässiga utsläpp av växthusgaser från en liten damm under en 11-månadersperiod. Resultaten visade att under ett år orsakade dammen nettoutsläpp av växthusgaser, och föreslår både att koldioxidutsläppen övervägs när dammar anläggs och att dessa utsläpp kan minskas genom hantering av dammen med fokus på minskning av inflödet av näringsämnen och organiska ämnen. Ytterligare sätt att bedöma BGI-prestanda diskuteras i avsnitt 4.10.

4.5 Utformning av BGI-system

Även om det finns ett antal internationella riktlinjer (t.ex. CIRIA, 2015, ISO 24536, 2019) för utformning och strategier för implementering av BGI, pågår forskning för att utveckla en bättre förståelse av de reningsprocesser som förekommer i BGI och deras förhållande till olika utformningar. Till exempel visar Ekka et al., (2021) i en granskning av svackdikens utformning att de aktuella riktlinjerna för utformning främst är inriktade på hydraulisk transport. För att åtgärda denna brist användes befintliga litteraturlista för att utveckla evidensbaserade råd för utformning av svackdiken för behandling av ett urval föroreningar i dagvatten. Användning av tvärgående vallar i svackdiken ("check dams") för att bromsa upp vattnet, högre vegetation ("wetland swales", "bioswales") eller att tillhandahålla infiltration i diken (t ex genom ett underliggande grövre material) rekommenderas som de lämpliga alternativ både för att minska avrinningsmängden och avlägsna sediment och tungmetaller. Forskning av Sami Al-Janabi et al. (2020) stöder också användningen av tvärgående vallar i svackdiken, men noterar att deras utformning (t.ex. höjd och avstånd) har avsevärd påverkan på flödena i gräsbevuxna dagvattenstråk och därigenom deras infiltrationskapacitet. Deras empiriska studie fann till exempel att en ökning av vallens höjd från 10 till 20 cm ökade kanalens infiltration från 12 % till 20 %.

När det gäller gröna tak var en granskning av Kotze et al., (2020) inriktad på den terminologi som används för att beskriva och rapportera utformning och funktion för dessa system. När de fann att vanliga termer såsom intensiva och extensiva tak, liksom själva termen gröna tak, definierades och användes på flera sätt, föreslog de ett nytt klassificeringssystem baserat på takets primära funktioner och vegetation. Till exempel föreslogs kategorier såsom dagvattenängstak ("stormwater meadow roof") och biodiversitetskogstak ("biodiversity forest roof") som ett sätt att undvika oklarheter, möjliggöra generaliseringar och underlätta kommunikation inom detta snabbt växande ämnesområde.

För att försöka förstå hur kärlväxternas täckningsgrad och artsammansättning på gröna tak (faktorer som påverkar deras roll i att hålla kvar dagvatten) förändras över tid i kalla klimat undersökte Lönnqvist et al., (2021) vegetationen på 41 taksektioner i norra Sverige. Resultaten visar att fastän antalet oavsiktliga arter utgjorde ungefär 70 % av de funna arterna bildade de ett glest täcke (~7 %) och bidrog därför mindre till det gröna takets potentiella funktion än den avsedda vegetationen (~93 % täckning, dock få arter). Den viktigaste slutsatsen handlar både om vikten av substratets djup för att få stora mängder växter och mångfald av arter, och visar att också i kallt klimat kan kolonisation av oavsiktliga arter starkt bidra till artrikedomen på gröna tak. För gröna väggar visar Lausen et al., (2020) att ett relativt litet urval arter, valda främst för utseendet, används i de aktuella utformningarna. För att förbättra kunskaperna inom detta område och få ett bättre urval av växter beroende på deras respons på periodisk torka, utvärderades tillväxten för åtta inhemska, örtartade perenner med avseende på vattenbrist i en till sex veckor under kontrollerade förhållanden i växthus. Studien kom fram till att suckulenter som kan magasinera vatten i tjocka blad eller stjälkar hanterade torka bäst och att den egenskapen som är relevant för den absoluta volymen av vattenavdunstning är växternas biomassa.

Med inriktning på att förbättra anlagda våtmarkers prestanda undersökte Svensson et al., (2015) effekterna av luftning och/eller vegetation i flera experimentella anlagda våtmarker på rening av polyfenoler (PP), kemiskt syrebehov (COD) och vattnets färg (nyckelparametrar i dagvatten förorenat med lakvatten från ek). Resultaten visade att luftning ökade effekten av både COD- och PP-reducering, och att själva vegetationen hade en liten men signifikant effekt på reducering av COD. Studiens slutsats var att våtmarker kan användas för att behandla dagvatten förorenat med lakvatten från ek, samt vikten av att det ingår öppet vatten i behandlingssystemen och att den hydrauliska kvarhållningstiden är viktigare för reduceringen än luftning och vegetationsrelaterade processer.

Som ett alternativ till utformning av dagvattenbehandlingssystem baserat på enbart volym- och/eller ytrelaterade samband uppdaterade Larm och Alm (2014) ett större antal befintliga utformningsvillkor med nya fältdata, t.ex. inloppets koncentration, fördröjningstid, form och temperatur. Resultaten av denna granskning infördes i det företagsegna dagvattenprogrammet StormTac (som kan användas för att ge underlag för utformning och uppskattning av reningseffekt av bl.a. dagvattendammar och våtmarker). I deras studie ingår en bedömning av klimateffektparametrar, till exempel dimensionerande flöde och föroreningskoncentration i det ingående vattnet, med modellens resultat jämfört med fältdata. Resultaten visar att integrering av platsspecifika data på det större intervallet av identifierade villkor ledde till bättre modelleringsresultat än användning av enbart yt- och volymrelationer.

Förutom fältstudier har flera forskare genomfört kolonnexperiment i labb- och pilotskala som möjliggör att undersöka både avskiljningsprocesser och vilka faktorer som påverkar dessa under kontrollerade förhållanden. Till exempel utförde Søberg et al. (2014) en serie kolonnexperiment för att utvärdera påverkan av vinterförhållanden (d.v.s. låg temperatur och förhöjda saltkoncentrationer i dagvattnet) på avskiljningen av metaller i dagvattenbiofilter. Båda faktorerna (separat och i kombination) ledde till ökade metallkoncentrationer i kolonnens utflöde. Trots detta uppfyllde dock utflödets totala koncentrationer av metaller tröskelvärdet för klass 4 som definierats i bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag. En fortsättningsstudie bedömde också inverkan av att ta med en vattenmättad zon med en inbäddad kolkälla i experimentets utformning (Søberg et al., 2017). Resultaten tydde på att införandet av en SZC hade en övergripande positiv effekt och stödde tidigare rön om att biofilter är ett lämpligt alternativ för dagvattenbehandling i områden som har vinterförhållanden (vägsalt, låga temperaturer) eller kustregioner (saltblandat dagvatten). Samma experimentutformning användes sedan för att undersöka påverkan av temperatur, salt och SZC på avskiljningen av kväve, fosfor och TSS i biofilter (Søberg et al., 2020). Resultaten visade att på det hela taget var andelen avlägsnat fosfor och TSS hög vid alla behandlingar. Liksom för metaller minskade förekomsten av salt den totala avskiljningen av fosfor, men avskiljningen av löst fosfor påverkades inte med SZC (statistisk signifikans för avskiljningen av både fosfor och TSS). I tidigare studier använde Zinger et al., (2013) liknande kolonner i pilotskala för att undersöka om att i efterhand implementera en vattenmättad zon i dagvattenbiofilter ökade avskiljningen av totalt kväve och fosfor. Försöken, som utfördes med olika växtarter, visade på att den anpassning avsevärt förbättrade avskiljningen av kväve, medan avskiljningen av total fosfor minskade. En senare studie av Søberg et al., (2021) rapporterar att avskiljningen av kväve även i låga temperaturer (ca 2°C) fungerar i biofilter med en vattenmättad zon. Påverkan av torrperioder och temperatur på avskiljningen av bakterier med dagvattenbiofilter med och utan en vattenmättad zon utvärderades i ett till kolonnförsök av Søberg et al. (2019). Resultaten visade att utflödets koncentrationer var oberoende av inflödets koncentrationer vilket visar vikten av interna processer i biofiltret. Effekten av temperatur varierade mellan bakteriearter och biofilterutformning. Det första utgående vattnet ("first flush") visade på lägre koncentrationer än det senare flödet (event mean concentration), vilket tyder på att kvarvarande/överlevande bakterier i biofiltercellerna har liten effekt på de initiala utflödeskoncentrationerna. Medan förekomsten av en vattenmättad zon avsevärt minskade bakteriekoncentrationerna i utflödet skapade snabba temperaturökningar avsevärt högre koncentrationer av bakterier i kolonner med vattenmättade zoner, vilket tyder på att denna utformning kan vara ett smärre val för hantering av dagvattenavrinning i områden som har vinterförhållanden.

Lange et al., (2020a) genomförde en serie kolonnexperiment för att utvärdera påverkan av olika växtarter på avskiljningen av totala metaller och olika storleks fraktioner av metaller från dagvatten, som antingen tillfördes regelbundet eller i intervaller för att representera effekten av en längre torrperiod (fem veckor). Resultaten visade att utgående vattens koncentrationer av både totala och lösta metaller avsevärt skilde sig åt mellan olika växter, särskilt för lösta metaller efter torrperioden. Växtspecifika variationer på beteendet av de lösta koncentrationerna av Cd, Zn och Cu observerades, där alla metaller ibland överskred svenska MKN. I en fortsättning av denna studie undersökte Lange et al., (2020b) beteendet av Cd, Zn och Cu i partikelform, kolloidalt och "sant löst" (<~3 nm) vid olika vegetationsval och saltnivåer. Den totala avskiljningen av metaller var ofta > 95 %. Avskiljningen av de lösta och sant lösta fraktionerna, vilka generellt har större miljöpåverkan, var dock ofta avsevärt lägre. Medan förekomsten av vegetation i allmänhet hade liten effekt på avskiljningen av metaller och deras fraktionering så bidrog förekomsten av salt till ökade koncentrationer av Cd och Zn främst i den sant lösta fraktionen.

Vidare studier har undersökt prestanda hos ett antal komponenter i dagvattenbiofilter, med särskilt fokus på alternativa filtermaterial för att adsorbera utvalda föroreningar (och vilka faktorer som påverkar sådana processer) med syfte att förbättra utformningen av biofilter. När det gäller organiska föroreningar använde Markievicz et al. (2020) kolonner med granulerat aktivt kol, vitmossetorv eller bark från *Pinus sylvestris* med förfilter av sand för att undersöka retentionen av kolloidala och sant lösta hydrofoba organiska ämnen (hydrophobic organic compounds; HOC). Alla filter visade effektiv reduktion av alifatiska dieselkolväten C16–C35, bensen och PAH:erna fenantren, fluoranten och pyren under större delen av det 18 månader långa experimentet. Björklund och Li (2015) utvärderade potentialen hos fem absorberande lågkostnads-material (två mineral, två tallbark och ett sågspån) för att avlägsna lösta och kolloidala faser av utvalda HOC:er i en serie av så kallade batch tests. Medan de absorberande mineralen uppvisade obetydligt avskiljning av de organiska föroreningarna så avskilde de träbaserade materialen > 80 % av den

initiala HOC-koncentrationen. Vidare analys antydde att avskiljningen var en funktion av kemisk sorption av HOC:er på ett enkelskikt av de träbaserade medierna, och att detta kunde leda till snabb mättnad av materialen. En andra studie undersökte HOC-upptagningen av fyra andra potentiella absorberande material (cellulosa, kitosan, kitosan-täckt bark och polypropylen/polypropylenfibrer; PP/PE-fibrer) plus tallbark (Björklund och Li, 2018). Resultaten visar att cellulosa och kitosan uppvisar mycket låg absorptionskapacitet för HOC:er, medan > 70 % avskiljning uppnåddes med PP/PE-fibrer och > 80 % med tallbark och kitosan-täckt bark. Ytterligare studier av Björklund och Li (2016) undersökte om förekomsten av löst organiskt material (DOM) hade en negativ effekt på adsorption av HOC:er på slambaserat aktivt kol (SBAC) i batch-adsorptionstester. Vid användning av två typer av DOM (organisk jord och humussyra) tydde resultaten på att DOM inte hade någon signifikant negativ effekt på adsorptionen av HOC:er under de testade experimentella förhållandena (förutom en mycket hydrofobisk förening). Kinetiska adsorptionsstudier tyder på att den huvudsakliga adsorptionen av HOC:er skedde inom 10 minuter och att adsorptionskapaciteten i allmänhet är i omvänd relation till föreningens hydrofobicitet (log Kow) och att den är positivt kopplad till minskande molekylstorlek (Björklund och Li, 2017a). I upprepade adsorptionstester där det är troligare att konkurrens mellan HOC:er skulle förekomma, uppvisade dock de adsorberade föroreningslasterna starkt positiv relation till log Kow. Senare forskning av samma forskargrupp utvärderade påverkan av att förbättra ett filtermaterial för dagvattenbiofilter med SBAC när det gäller HOC-avskiljning (Björklund och Li, 2017b). I experimentet tillsattes SBAC (0,5 viktsprocent) till två av de tre kolonnerna med jord där syntetiskt dagvatten tillfördes under en 28-dagarsperiod. Resultaten tydde på att den förändrade jorden var mest effektiv för att avlägsna HOC:er med log Kow på 4,0–4,4, vilket leder till slutsatsen att tillsatsen av SBAC kan förlänga livslängden för biofiltermediet med ungefär 10–20 år.

På liknande sätt undersökte Genç-Fuhrman et al., (2016) effekterna av kontakttid, lösningens pH och förekomsten av humussyra (HA) på den kombinerade avskiljningen av Sb, Cd, Cr, Cu, Ni och Zn med tre typer av absorberande medel (aluminiumoxid, granulerat aktivt kol (GAC) och bauxsolTM-täckt sand (BCS)). Även om vissa skillnader i beteendet mellan metallerna rapporterades, blev den viktigaste rekommendationen som framkom att dagvattnets pH-värde måste ligga i intervallet 6–7 för att uppnå avskiljning av alla metallerna, och att naturligt organiskt material (OM) signifikant kan påverka avskiljningens effektivitet. Också med fokus på metaller undersökte Søberg et al., (2019) ackumulering av lösta metaller (som lösningar med enskilda eller flera metaller) i tio olika filtermaterial som rekommenderas och/eller används i biofilteranläggningar. Resultaten visar att alla testade material adsorberade 90 % av metallerna inom en timme. I allmänhet visade resultaten att filtermaterial klassade som sand (naturligt högt pH, relativt lågt OM-innehåll och stor specifik ytarea) fungerade. Tillsats av biokol förbättrade inte avsevärt adsorptionen av metaller och kan därför vara en oönskad (på grund av nedbrytning över tid) extra källa till OM. Oavsett filtermaterialets typ adsorberades metaller främst i den utbytbara formen (utvärderat med sekventiell lakning) som tyder på att metalladsorptionen kanske inte är permanent, utan reversibel i vissa fall. Mer forskning krävs för att undersöka detta närmare.

I kontrast till studier som fokuserar på avskiljning av metaller genom sorption i ett filtermaterial bedömde Schück och Greger (2020) rollen hos 34 flytande våtmarksväxter för att avlägsna Cd, Cu, Pb och Zn från vattenpelaren. Resultaten visar att växternas viktigaste funktion för att avlägsna metaller från vatten är avdunstning och hög total biomassa, särskilt stora mängder fina rötter och blad (med bättre korrelation efter fem dagars exponeringstid, jämfört med 30 minuter). Resultatens användbarhet för att förbättra metallavskiljning med flytande våtmarker beskrivs.

4.6 Konventionella och nya sätt att hantera dagvatten

När det gäller forskning om konventionella åtgärder för dagvattenhantering är de överallt förekommande rännstensbrunnarna med sandfång ett utmärkt exempel på en allmänt använd, men ofullständigt förstådd, teknik för dagvattenhantering i städer. Wei et al., (2021) utvärderade möjligheten att med två enklare deterministiska modeller för att beräkna suspendering och erosion av sediment som tagits fram för andra sammanhang modellera dagvattenbrunnar, både under nutida och framtida regnförhållanden. Två modeller (utvecklade med olika parametrar) användes på samma studieplats och det visade sig att predikerade TSS-koncentrationer i utgående vatten inte överensstämde mellan de två modellerna. Man kunde dock erhålla användbar information. Till exempel tydde resultaten av den ena modellen på att de totala mängderna TSS-halten i avloppsbrunnens utlopp som härrör från återsuspension av sedimenterat

material kan hållas lägre än 25 mg/l (riktvärde för ytvatten) om brunnens fyllnadsnivå hålls lägre än 60 %. Resultaten från den andra modellen visar att fint sediment är särskilt känsligt för återsuspension i brunnen, där till exempel sediment med specifik vikt på 1,1 och större diameter än 63 µm förutsågs utgöra 50 % av TSS-fraktionen från återsuspenderat sediment i brunnens utgående vatten.

När det gäller förbättring av behandlingsprocesser i fördröjnings- och/eller sedimentationsanläggningar för dagvatten har Nyström et al., (2019) undersökt användning av två kommersiella koaguleringsmedel för att gynna koagulering och flockning av föroreningar för att öka deras avskiljning via sedimentering. Resultaten av detta laboratorieförsök tydde på att användning av koaguleringsmedel resulterade i minskning av mängden partiklar och totala koncentrationen av metaller i vattnet på mer än 90 % jämfört med 40 % för bara sedimentering (d.v.s. utan tillsatt koaguleringsmedel). Upp till 40 % minskning av löst Cr, Cu och Pb kunde också observeras jämfört med 0 % för enbart sedimentering, vilket antyder att koagulering kan vara en användbar process för dagvattenbehandling. Nyström et al., (2020) byggde vidare på denna lyckade pilotstudie och screenade användning av tolv koagulerings- och flockningsmedel för att identifiera kemikalier som effektivt minskade grumligheten och suspenderade ämnen i dagvatten. Fem koaguleringsmedel valdes ut för vidare studier i labb skala ("jar tests"). Behandlingarnas effektivitet var > 90 % reducering för både grumlighet och suspenderade ämnen med alla koaguleringsmedel. I en fortsättningsstudie undersöktes möjligheten för ett urval av koaguleringsmedlen att avlägsna ett antal metaller i löst fraktion, oljeindex och PAH:er (Nyström et al., 2020). Resultaten tydde på att avskiljningen med alla koaguleringsmedel var i genomsnitt > 90 % för alla undersökta föroreningar. Hallberg et al., (2014) utvärderade användning av flockningsmedel för att förbättra sedimenteringsprocesser i tunneltvättvatten och genomförde försöken *in situ* i fält. Resultaten tydde på att användning av en sedimenteringstid < 24 timmar tillsammans med ett kemiskt flockningsmedel avsevärt minskade TSS-, metall- och PAH-koncentrationerna, liksom akut toxicitet. Ett alternativt nytt sätt att förbättra avskiljning av sediment från dagvatten i dammar och även minska återsuspension av sediment är användning av ett bottenraster (bottom grid structure; BGS). En BGS är avsedd att installeras vid inloppet till t.ex. en dagvattendamm (avsedd för rening) och består av en rasterstruktur med celler som förbättrar sedimentering av och sedan håller kvar suspenderat material (Milovanović et al., 2020). Denna initiala studie undersökte BGS-konceptet i en hydraulisk skalmodell för att utveckla en bättre förståelse för effekterna av BGS-geometrin på kvarhållandet av dagvattensediment, med resultat som visar att de större cellerna (10 x 10 cm) var mer effektiva än de mindre cellerna (5 x 5 cm) för att fånga upp och hålla kvar sediment. Cellernas höjd hade liten påverkan på prestanda och celler med lutande tvärväggar visade sig mer effektiva för att fånga upp och hålla kvar sediment.

När det gäller nydanande tillvägagångssätt för att hantera volymer av dagvatten har Lundström et al. (2020) undersökt potentialen för dynamisk dagvattenmagasinerings i svampliknande porösa kroppar (SPB:er). Detta är ett helt nytt koncept (se figur 4) och det har modellerats för SPB:er med nedåttflöde och uppåttflöde. Teoretisk analys visade att inflöde hastigheten drivs av absorption och/eller kapilläreffekt i porösa materialstrukturer som en funktion av tiden och är helt beroende av typen av struktur och det porösa material som används. Med data från fallstudier modellerades hastigheterna för inflöde och lagringsfyllning för olika förhållanden, och befanns stämma överens med (eller överskrida) hastigheterna för regnvatteninflöde och volym i två typer av svenska regn (60 minuters varaktighet, återkomsttid 10 år). Dessa initiala data bekräftar potentialen för dynamisk SPB-lagring för att kontrollera dagvattenavrinning. Ytterligare teoretisk analys som byggde på denna initiala analys bestod i att jämföra hur den teoretiska totala mängden vatten som absorberats av SPB ändrades om man tog med svällningen. Resultaten kan sammanfattas med de geometriska måtten för lagringsanordningen och storleksordningen på diffusionskoefficienten, D . De viktigaste slutsatserna var att i alla beaktade fall ökade svällning i allmänhet den maximala absorberade vattenvolymen med 14 %.

4.7 Påverkan på vattenrecipientens ekologi

Medan majoriteten av studierna har fokuserat på fysikaliskt-kemiska förändringar i samband med dagvattenavrinning och dess behandling, har några studier undersökt påverkan av dagvatten på recipientens vattenkvalitet och ekologi. Till exempel undersökte Rentz och Öhlander (2012) påverkan av dagvattenutsläpp från städer på stadsnära vatteförekomster i Luleå. Deras studie identifierade förhöjda nivåer av PAH:er och att vatten- och sedimentkvaliteten var beroende av avrinningsområdets karaktär. De rappor-

terade dock också att frånvaron av tillflöde av urbant dagvatten (tillsammans med låga vattennivåer och istäcke) bidrog till utvecklingen av förhållanden med syrebrist i vattenpelaren och sedimenten. I en liknande studie samlade Blecken et al., (2012) prov på ytligt sediment framför tre utlopp från dagvattenledningar och i anslutande diken och vattenrecipienter, liksom från en kontrollplats som inte var påverkat av dagvatten. Data tydde på att dagvattenutloppen påverkade koncentrationerna av föroreningar i bottensedimenten, med analys av årstidsförändringar som implicerade att relativt höga mängder föroreningar avges under snösmältningen. Med ett bredare perspektiv på att bedöma risknivåerna för mänsklig hälsa från dagvattenutloppen använde Björklund et al., (2018) hydrodynamisk modellering för att undersöka påverkan av utflöde av urbant dagvatten och bräddning från kombinerade ledningsnät till Göta Älv. Studien var inriktad på transporten av Cu och benzo[a]pyren (BaP) under två regnhändelser, och resultaten visade att riktlinjerna för Cu-koncentrationen skulle överskridas på flera platser. Data tydde på att dagvattenutsläpp i allmänhet ger upphov till högre Cu- och BaP-koncentrationer än bräddning från kombinerade nät, och låg inom en storleksordning från uppmätta värden i fält, vilket indikerar att hydrodynamisk modellering är ett användbart verktyg för att identifiera lämpliga platser för dagvattenåtgärder.

Beträffande dagvattenavrinningens påverkan på vattenrecipienternas ekologi är resultaten inte fullständiga. Till exempel har Søberg et al., (2016) utvärderat bioackumulering av metaller i fauna i två våta retentionssdammar och en referenssjö, samt deras relation till metallkoncentrationer i sedimenten. Resultaten visar att metallkoncentrationerna i faunan var högre i dammarna än i referenssjön, med positiv korrelation rapporterad bara för vissa metaller i fauna och sediment. I forskning av Pohl et al., (2015) undersöktes dagvattenkvalitetens påverkan på embryoutvecklingen hos amfibien *Xenopus (Silurana) tropicalis*, i syfte att bedöma dagvattendammars kvalitet som habitat. Medan analys av vattenkvaliteten indikerade att de flesta av de studerade dammarna hade vatten av tillräcklig kvalitet för utveckling av amfibiens embryon, så visade laborietest att på vissa platser orsakade vattnet för tidig kläckning och/eller sänkt hjärtfrekvens i embryon från *X. tropicalis*. I de flesta av dammarna kunde amfibiens larver inte hittas, och i laboriestudier identifierades olika troliga faktorer som påverkar amfibien även om effekterna inte var direkt dödliga. För att undersöka dagvattendammars potential till att kombinera deras primära funktion, rening och fördröjning, med att öka den biologiska mångfalden utvärderade Meland et al., (2020) miljöförhållandena och den biologiska mångfalden av bottenfauna i tolv dagvattendammar vid motorvägar och nitton naturliga dammar (placerade i eller i närheten av odlingslandskap). Resultaten visade att motorvägarnas dagvattendammar hade mycket högre konduktivitet och var större (nästan dubbelt så stor yta som naturliga dammar). Resultatet av bedömningen av biologisk mångfald visade att samhällenas sammansättning var mycket olika mellan de två typerna av dammar, där antalet arter var något större i motorvägsdagvattendammarna. Tillsammans med variablerna konduktivitet och yta identifierades även antalet dammar inom 1 km radie som en nyckelvariabel för prediktion, och de övergripande slutsatserna gav stöd för att motorvägsdammar har potential för att vara ett värdefullt habitat vid motorvägar.

I en studie av Johansson et al. (2019) utfördes provtagning i 18 dagvattendammar i Uppsala för att studera förhållandet mellan trollsländors betadiversitet och ett antal miljöfaktorer (t.ex. lokala variabler och markanvändningsvariabler). Totalt 31 arter av Odonata registrerades (61 % av alla Odonata-arter som rapporterats förekomma i Uppland) vilket tyder på värdet av dagvattendammar som bidrag till den biologiska mångfalden i stadsområden. Vidare analys antyder att artrikedomen främst var beroende av dammens yta och det totala vegetationstäcket, samt att hanteringen av olika typer av vegetation är viktig för att maximera dessa systems potential för att kunna bidra till biologisk mångfald i regional skala. I en annan studie jämförde Johansson et al. (2020) data om förekomsten av trollsländor som samlats in av medborgarforskare (volontärer) med data om förekomsten av trollsländor från dagvattendammar som samlats in enligt vetenskapliga, standardiserade metoder. Resultaten visar att medborgarforskarnas datamängder skilde sig avsevärt från de övriga, särskilt när det gäller underrapportering av vanliga trollsländearter. En viktig slutsats var att om data som samlats in av medborgarna ska användas för att uppskatta eller förutspå biologisk mångfald krävs en metod för att korrigera underrapporteringen av vanliga arter i medborgarnas forskning.

4.8 Drift, underhåll och hantering av dagvattenanläggningar

För att säkerställa tillräckliga prestanda över tid kräver alla infrastruktursystem underhåll, och i detta avseende är infrastruktur för dagvattenhantering i städerna inte annorlunda. Beträffande drifts- och underhållsaspekter för ett stort urval av BGI-system har Blecken et al., (2017) granskat och sammanställt

de viktigaste underhållsbehoven för dammar, anlagda dagvattenvåtmarker, biofilter, infiltrationsåtgärder, permeabel beläggning, svackdiken och för regnvattenskördning (rainwater harvesting). Gemensamma underhållsåtgärder för alla system är rensning av förbehandlingssteg och bevarande av infiltrationsytor, vilket leder till förbättrade prestandanivåer. Enligt sammanställningen kan orsaker till bristande underhåll vara otillräcklig kommunikation, otydliga ansvarsområden (delvis på grund av användningen av decentralisering av anläggningar), brist på kunskap eller finansiella hinder. En viktig rekommendation från studien var att framtida utformningar borde specifikt identifiera behovet av och underlätta tillgången till systemet för att vidta det underhåll som krävs samt ha tydliga drift och skötselinstruktioner redan från början.

Till exempel kräver permeabel beläggning (t ex. permeabel asfalt, gräsarmerad betong mm.) regelbundet underhåll för att bibehålla beläggningsens infiltrationshastighet (infiltration rate; IR). Infiltrationsförsök är en vanlig metod för att avgöra underhållsbehov/-intervall. Dock kräver konventionella tester (som ursprungligen framtagits för naturliga jordar, t ex. jordbruksmark) specialutrustning och kan vara tidskrävande. För att åtgärda detta testade Winston et al. (2016a) användning av ett förenklat infiltrationstest (simplified infiltration test; SIT) och jämförde resultaten med det konventionella testet på flera platser i Sverige och USA (sammanlagt 873 tester). Resultaten visade att båda testmetoderna predikerade ungefär samma IR upp till 250 mm/min. Den enkla metoden SIT tog en fjärdedel så lång tid att köra, vilket ger möjlighet till besparingar av kostnader och mantimmar. I en motsvarande studie utvärderade Winston et al. (2016b) användningen av åtta olika underhållstekniker för att återställa permeabla beläggningsars genomsläpplighet vid tio olika platser i Sverige och USA. I en liknande studie undersökte Al-Rubaei et al. (2012) metoder för att återställa genomsläppligheten hos permeabel asfalt i Sverige. De metoder som användes i dessa studier var manuellt avlägsnande av de övre 2 cm fyllnadsmaterial (i skarvar av betongsten), mekanisk gatusopning, vakuumsugning, högtryckstvätt och asfaltfräsning på tre olika anläggningar. Resultaten visar att effektiviteten hos de olika teknikerna varierade beroende på beläggningsmaterialets typ, där till exempel dammsugning för hand, högtryckstvättning och fräsning visade sig vara mest effektivt för att återställa IR för porös asfalt.

Beträffande identifiering av behoven för hantering av sediment från dagvattenanläggningar utvärderade Karlsson et al. (2016) metallers rörlighet i sediment som samlats i sedimenteringsbassänger, rännstensbrunnar och dagvattendammar. Med hjälp av sekventiell extrahering kunde studien rapportera att större delen av metallerna var svagt bundna till sedimenten och kan därför frigöras om de fysikaliskt-kemiska förhållandena ändras (t.ex. vid underhåll såsom sedimenttömning). Vidare forskning krävs för att överkomma hinder för en effektiv långtidsförvaltning av dagvattenanläggningar, både utifrån ett organisationsperspektiv och ett tekniskt perspektiv.

4.9 Planering, implementering och praktik

För att förstå utvecklingen av dagvattenhanteringen i Sverige granskade Cettner et al. (2012) drivkrafter och processer i samband med införandet av VA-system i Sverige under 1800- och 1900-talet i en kvalitativ studie. Deras analys visar att det nuvarande sättet att avleda dagvatten uppstod ur en kombination av människors önskemål och den samtidiga expansiva tillväxten av systemstödjande initiativ med allmänna medel, och att detta, eftersom det är ett socialt konstruerat system, kan förändras. En viktig slutsats från deras studie är dock att sådana försök till omvandling kräver en bestämd startpunkt, både fysiskt och mentalt, från systemkulturen och traditionella ledningssystem. För att komma vidare har flera konceptuella studier utforskat aktuella och möjliga framtida sätt att hantera dagvatten. Till exempel, med tanke på att traditionella tekniska tillvägagångssätt ökar översvämningsrisken på lång sikt och påverkar flodernas ekosystem negativt, föreslog Sørensen et al. (2016) ett alternativt koncept som betonar återhämtningsförmåga och synergier mellan ökad kapacitet att hantera dagvattenavrinning och funktionell kvalitet för stadsmiljöerna. De identifierar ett antal områden där de nutida utmaningarna kräver interdisciplinära arbetssätt för hantering av översvämnings i stadsmiljö. Det kan vara flexibilitet hos dagvattensystemen, minskad energianvändning, prioritering av transport och socioekonomiska sammanhang samt lösning av ansvarsfrågorna. Cettner et al. (2014) föreslog ett ramverk som ger stöd för systematisk bedömning av kontexten och påverkan på individuell och organisatorisk mottaglighet för förändring. Ramverkets giltighet utvärderades utifrån diskussioner (enkäter och intervjuer) med svenska yrkesverksamma inom dagvattenhantering. Resultaten tydde på att medan de svarande var professionellt förberedda på förändring (åtgärder) var de inte praktiskt förberedda på grund av icke-anpassade system och arbetssätt. Använd-

ning av det utvecklade ramverket visade sig ge nya insikter om påverkan av tankesätt för en förändring av vattenhanteringen, som kan användas av de som utvecklar policier för att implementera en hållbar dagvattenhantering i praktiken. I motsats till detta påstår Ward et al., (2020) att analys av hydrologiska risker bör fokusera på bedömning av både översvämnings- och torkrisker (dvs titta på de två extremfallen), eftersom dessa fenomen är nära sammankopplade. Med stöd i ett antal exempel där översvämnings- eller torka (eller åtgärder för att mildra dessa) har påverkat risken för den motsatta faran identifierar de viktiga utmaningar för att kunna gå mot ett mer holistiskt synsätt för riskhantering.

Med tanke på behovet av förändrad dagvattenhantering (många ledningssystem svämmar över vid skyfall, förväntade framtida ökning av sådana skyfall pga. klimatförändringarna) modellerade Olsson et al. (2013) de flöden som är kopplade till aktuella och framtida skyfall med Arvika som plats för en fallstudie. Med hjälp av MOUSE och en detaljerad avrinningsmodell förutsäger studien en ökning med 10–30 % av dagens kortvariga extrema regn mot slutet av århundradet. Att uppgradera systemen för att uppnå tillräcklig prestanda för framtidens dimensionerande regn skulle kosta ungefär dubbelt så mycket som en uppgradering baserad på dagens dimensionerande regn. Eftersom begränsningarna i de aktuella dagvattenledningssystemen både nu (bara transport) och i framtiden (transport och ytterligare behov av större fördröjningskapacitet) är kända ökar intresset för en alternativ dagvattenhantering. Som ett försök att utforska användning av BGI-åtgärder i praktiken utvecklade Zischg et al. (2017) en metodologi för att jämföra användningen av olika planeringsalternativ för dagvattenhantering. Med användning av metoden Info-Gap robustness pathway utvärderades tre planeringsalternativ som berör definierade kombinationer av blå-grön och grå infrastruktur för att identifiera kritiska prestandanivåer vid olika stadier över tid. Resultaten applicerades på Kiruna i samband med stadsomvandlingen och tyder på att användning av grön infrastruktur ger mer robusta lösningar när det gäller framtida osäkerheter, jämfört med enbart traditionell utformning av ledningsnät. Med ett bredare synsätt med systemtänk kopplade Pan et al. (2018) samman regional markanvändning, ekonomi och vattensystemens samverkan för att identifiera drivkrafter och systemåterkopplingar som påverkar städernas vattensystem. Resultaten tyder på att den fysiska tillgängligheten av mark för ekonomiska aktiviteter (prognostiserade via en bottom-up förändringsmodell för markanvändning) och deras placering skiljer sig mycket från top-down sektorbaserade ekonomiska prognoser. Artikeln anger att både mänskliga system (ekonomisk planering och planering av markanvändning) och naturliga system (begränsningar av markanvändning och därtill associerade konsekvenser för vattnet) måste beaktas, och här påstås att modellering av sociala och naturliga processer via en systemsyn ger en mer omfattande förståelse av kopplade kausala mekanismer, påverkan och återkopplingar vid användning av integrerad hantering av vattenresurser.

Stadsplaneringsprocesser rekommenderas ofta som en mycket relevant faktor för implementering av BGI i praktiken. I detta sammanhang undersökte Cettner et al. (2013) vilka möjligheter svenska yrkesverksamma inom vattensektorn har att påverka städernas planeringsprocesser för dagvatten, och vilka hinder som begränsar deras deltagande i planeringsprocesserna. Forskningen bestod av halvstrukturerade djupintervjuer med VA-verksamma från nio svenska kommuner. Man kom fram till att det finns en uppfattning om att det finns lagkrav beträffande dagvattenhantering som förhindrar tillämpning av annat än rörledningslösningar. Dessutom fanns en brist på tydlighet beträffande "ägandet", d.v.s. är dagvatten ett problem för planeringsavdelningen eller för VA-avdelningen? En viktig slutsats var att de yrkesverksamma i vattensektorn har unika möjligheter att integrera lösningar för dagvattenhantering i den bredare stadsplaneringen, och bör uppmuntras att göra det. I en likartad studie utvärderade Cettner et al. (2014) medvetenheten om och användningen av hållbarhetsindikatorer (sustainability indicators; SI) vid beslutsfattande av de VA-tjänstemän. De fann att intresset för SI var lågt, men beskriver sedan olika sätt hur implementering av en framtida hållbar dagvattenhantering med grön infrastruktur kan underlättas. Med särskild inriktning på att bättre förstå den långsamma takten i vilken hållbar dagvattenhantering implementerats genomförde Qiao et al. (2018) en systematisk granskning av dagvattenstudier för att identifiera de begränsande faktorerna ur ett organisationsperspektiv liksom föreslagna lösningar. De utmaningar som identifierades bestod av otydligt ledarskap och otydligt ansvar samt brist på finansiering, kostnadsuppgifter, samstämmiga riktlinjer samt intressenternas deltagande. Potentiella lösningar är till exempel att forskare fungerar som kunskapsförmedlare, engagemang av socialt kapital bland lokala intressenter och ökande marknadsstimulans för att engagera intressenterna. Även om ett öppet samarbete för gemensam styrning (till skillnad från slutna eller hierarkiska metoder) föreslogs som en användbar organisationsstruktur rekommenderades fortsatt forskning om socioekonomiska aspekter för att bättre karaktärisera processerna. I

en uppföljande studie undersökte Quiao et al. (2019) hur specifika styrande faktorer påverkade införandet av lokala beslut om dagvattenhantering i fyra fall i städer i Sverige och Kina. Genom att utföra antal halvstrukturerade intervjuer kunde forskarna identifiera ofta nämnda styrande faktorer och jämföra mellan städer och länder. Resultaten tyder på att en tydlig nationell policy för lokala prioriteringar samt tydliga organisationsstrukturer och planeringsinstrument är signifikanta faktorer i de kinesiska städerna. I de två svenska städerna var allmän medvetenhet, de lokala politikernas prioriteringar och förtroende för funktionen av hållbara dagvattensystem viktiga för deras införande. En gemensam utmaning som identifierades var att skapa finansiering för underhåll av systemen på lång sikt.

I en vidare studie av hinder och drivkrafter använde Wihlborg et al., (2019) en övergångsteori för att förstå faktorer som påverkar ett framgångsrikt införande av BGI i ett svenskt sammanhang. Genom att utföra halvstrukturerade intervjuer med personer som arbetar med dagvatten i kommunerna identifierades det ökade behovet av rekreation, skydd av biologisk mångfald och klimatförändringar som faktorer som driver fram användning av BGI. Interna (d.v.s. inom kommunernas egen VA-organisation) och externa (t.ex. brist på kunskap bland politiker, tjänstemän, utvecklare och medborgare) hinder för införandet identifierades också. En viktig upptäckt i studien var att övergång till ett nytt tillvägagångssätt inte kan framkallas av enbart pilotprojekt. Ändringar i juridiska strukturer, liksom förändrade finansieringsmodeller för blå-gröna lösningar, krävs för den pågående, men långsamma, förändringen mot mer hållbara sätt att hantera dagvattnet. Detta tyder på en evolutionär övergång (där nya synsätt kombineras med traditionella rörledningslösningar). Bohman et al., (2020) identifierar också att övergången till de inkluderande former av planering som krävs för att införa hållbar dagvattenhantering är långsam, och försöker utvärdera hur formell och informell institutionell förändring kan bidra till förbättrad hållbarhet i sektorn. Utifrån slutsatserna från workshops, intervjuer och litteraturstudier föreslås ett antal rekommendationer för integrering av dagvattenintressen i planeringsprocesser, inklusive att riskbedömning för dagvatten på en avrinningsområdesnivå blir obligatorisk samt centraliserat ledarskap som ska underlätta framsteg mot gemensamma mål.

4.10 Ekosystemtjänster och fördelar

Med behovet av att uppfylla kontinuerligt växande antal nationella och internationella åtaganden för att åstadkomma hållbara städer (t.ex. FN:s hållbarhetsmål SDG 11, svenska miljömål relaterade till byggda miljöer och vattenmiljöer) växer intresset för att använda system med flera fördelar inom många sektorer, inklusive dagvattenhantering. Användningen av BGI börjar allt mer att ses som ett framgångsrikt alternativ (eller ett kompletterande sätt) till dagvattenledningssystem, som kan erbjuda ett antal fördelar (som kallas ekosystemtjänster, ES). Dessa kan t.ex. vara förbättrad vattenkvalitet, minskning av värme-, luft- och bullerföroreningar, habitatfunktioner, osv.. I en systematisk genomgång av BGI i ett antal nordiska länder kom Amorim et al., (2021) fram till att BGI kan leverera ett större antal av ES, vilket ger viktiga bidrag till livskvaliteten i städer. De noterar dock också potentialen för att BGI ska kunna skapa ett antal nackdelar (t.ex. pollenutsläpp och egendomsskador) och att man även måste ta hänsyn till dessa vid planering och utformning. I relation till ett specifikt nordiskt sammanhang ser författarna behovet av klimatkänsliga planeringsätt för att säkerställa att man tar hänsyn till de årstidsmässiga klimatvariationerna, tillsammans med bättre engagemang hos och kommunikation med intressenterna.

Flera studier har försökt kvantifiera fördelarna med BGI, via alternativa metoder, till exempel livscykelanalys (Byrne et al., 2017) och bedömning av ekosystemtjänster (Goldenberg et al., 2017). När det gäller LCA företog Byrne et al. (2017) en systematisk genomgång av LCA-studier relaterade till ett antal infrastrukturkomponenter för urbant dagvatten, inklusive dagvattensystem (både konventionella och NBS). Deras granskning hittade ett antal preferenser för hur LCA genomfördes samt vilka möjligheter en LCA ger när det gäller att integrera ett större urval av mål, t.ex. allmänhälsa, ekonomiska och sociala bedömningar, i beslutsfattandet. Goldenberg et al. (2017) undersökte beroendet av ekosystemets tjänsteleverans på luft- och/eller vattenflödesprocesser som kan bära tjänsterna från källan till de områden som efterfrågar dem. Om man skiljer mellan potentiella och genomförda tjänster har flödesberoenden kvantifierats för ett specifikt landskap (Stockholmsområdet). De flödesprocesser som kopplar tillhandahållandet av lokal klimatreglering och dagvattenreglering till platser där dessa tjänster behövs jämförs med viktiga slutsatser som gäller behovet av att bättre förstå flödesprocessen som kopplar tjänsteleverantörerna till tjänsteanvändarna.

Medan fördelarna som levereras av BGI kan kvantifieras på ett antal sätt har utvecklingen och införandet av metoder för att härleda ekonomiska värderingar (som den måttenhet som är mest förstådd) fått avsevärd uppmärksamhet i Sverige och internationellt. Till exempel utforskade Zaleska-Jonsson et al. (2020) teori och praktik om användningen av "villighet att betala" (willingness to pay; WTP) för BGI och dess konsekvenser för bostadsutveckling. Författarna kunde åter hitta många olika fördelar som skapas av BGI i stadsområden och försökte se om, när och i vilken utsträckning de boende är villiga att betala för BGI som en mekanism som gör att säljare eller beslutsfattare kan påverka mängden BGI vid nybyggnation. Resultaten antyder att även om det finns bevis för att köpare betalar mer för bostadsfastigheter med höga nivåer av BGI, gör de det utan någon förståelse för de eventuella beslutsprocesser som leder till dessa högre priser, vilket ger slutsatsen att det behövs mer omfattande förståelse om drivkrafterna för BGI vid bostadsbyggande. I en annan studie jämförde Hamann et al., (2020) användning av två verktyg för en ekonomisk värdering av BGI (BEST och TEEB) som tillämpades på en fallstudie i Luleå för olika BGI-scenarier. Även om det inte gick att göra direkta jämförelser av varje kategori som användes i respektive verktyg (kategorierna och sättet som värderingen genomförs skilde sig åt), så identifierade båda verktygen ekonomiska fördelar beträffande boendemiljön, bostadsvärden, hälsa och sociala sammanhang/rekreation. En viktig slutsats var att beräkningsmodellerna och data behöver vidareutvecklas och anpassas till svenska förhållanden.

Med inriktning på att kvantifiera bidraget av ES-koldioxidbindning undersökte Merriman et al. (2017) lagring av koldioxid i dagvattendammar i fyra olika klimatzoner (inklusive två i Sverige). Resultaten visar att dagvattendammar kan avskilja koldioxid. Den årliga regnmängden och växtsäsongens längd i de olika klimatzonerna är viktiga generella faktorer för koldioxidackumulering. I en bredare studie inriktad ekologiska restaureringar för att mildra effekter av översvämningar i inlandet utvärderade Nilsson et al. (2018) ett antal åtgärder som syftar till att underlätta för samhällen att "leva med översvämningar". Med inriktning på att förbättra landskapets hållbarhet på avrinningsområdesnivå granskade Keesstra et al. (2018) BGI:s roll för att förbättra jord- och landskapsfunktioner. Utifrån ett antal internationella exempel (inklusive en våtmarksanläggning i Sverige) stöder deras resultat att användning av BGI är en kostnadseffektiv lösning på lång sikt för att motverka hydrologiska risker, och jordförstöring och bidrar till att uppnå FN:s mål för hållbar utveckling.

5. Finansieringskällor för forskning

I tabell 4 finns en översikt över finansiärer som nämns i avsnitten med författarnas tack (acknowledgements) i den långa listan över svenska forskningsartiklar (370 artiklar, se avsnitt 2.1).

Tabell 4. Lista över forskningsfinansiärer som bidragit till fem eller fler artiklar under den angivna tidsperioden.

Finansiär	Antal svenska forskningsartiklar (370)
Svenska Forskningsrådet Formas	72
Europeiska kommissionen	36
VINNOVA	33
Vetenskapsrådet	16
UK Research and Innovation	17
Svenskt Vatten	12
National Natural Science Foundation of China	11
Natural Environment Research Council	11
China Scholarship Council	9
Seventh Framework Programme	9
Fundação para a Ciência e a Tecnologia	8
Ministério da Educação e Ciência	8
Engineering and Physical Sciences Research Council	7
Australian Research Council	6
Department of Education and Training	6
Government of Canada	6
Horizon 2020 Framework Programme	6
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China	6
Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	6
Styrelsen för Internationellt Utvecklingssamarbete	6
European Regional Development Fund	5
European Research Council	5
Naturvårdsverket	5
Norges Forskningsråd	5

De har tillsammans bidragit till finansiering av nästan 30 % av de svenska artiklarna om dagvattenforskning. Sammanlagt 24 organisationer har bidragit till att finansiera fem eller fler artiklar. Noteras bör att i listan finns 19 finansiärer som inte är svenska, vilket visar att svensk dagvattenforskning är erkänd och värderad, inte bara nationellt utan också internationellt. Till exempel bidrog EU-finansiering (i de fem olika EU-organisationer som identifierats) till publicering av 61 artiklar (16 % av artiklarna). Nationella forskningsfinansiärer i sex länder utanför Sverige (från fyra kontinenter) har bidragit till publikationer med svenska forskare involverade. Detta är en tydlig och stark bekräftelse på att svensk dagvattenforskning är internationellt erkänd, att svensk forskningskompetens är efterfrågad och att svenska forskare ger ett starkt bidrag till ämnesområdet på en internationell nivå.

6. Slutsatser och rekommendationer för vidare forskning

6.1 Slutsatser och kunskapsluckor

Sverige har en lång historia av dagvattenforskning. Den första artikeln om dagvattenavrinning som hittades med Scopus publicerades 1982. Svensk forskning har bidragit till den internationella övergången till att förstå att hantering av dagvattenavrinning innebär både ett kvalitets- och ett kvantitetsproblem (t.ex. Morrison et al., 1984; Malmqvist, 1986). Antalet svenska forskningsartiklar om urbant dagvatten per år fortsatte att öka under de följande två decennierna, men det var inte förrän i början av 2000-talet som antalet publicerade artiklar per år regelbundet överskred tio. Under det senaste årtiondet, och i samverkan med ett ökat medvetande om behovet av att mildra diffusa föroreningar från städer för att uppfylla föreskrivna krav och hållbarhetsmål, har antalet artiklar fortsatt att öka, med nästan 60 svenska dagvattenartiklar publicerade under 2020.

När det gäller källor till dagvattenföroreningar finns starka svenska belägg för att många, om inte alla, material och aktiviteter i stadsmiljö kan släppa ut ämnen som kan mobiliseras vid nederbörd och därigenom nå vattendrag. Det är därför viktigt att mer uppmärksamhet ges till de material som används i vår stadsmiljö och hur de fungerar eller bryts ned med tiden. Eftersom den globala kemikalieproduktionen förväntas fördubblas fram till 2030 (EU:s kemikaliepolicy, 2019), kommer antalet ämnen och kombinationer av ämnen som kan förekomma i stadsmiljöer troligen att öka exponentiellt. Vidare forskning om processer kopplade till frigöring av ämnen, t.ex. den relativa vikten av lakning gentemot åldring gentemot väderdrivna erosions-/korrosionsprocesser (och hur dessa förändras med tiden) krävs snarast för att bygga strategier som kan minska föroreningarna av både nuvarande och nyutvecklade material. På samma sätt, medan de vägar som föroreningar som mobiliseras av dagvatten tar till vattenrecipienterna karakteriseras på en "grov" nivå (d.v.s. direkt avrinning av behandlat eller obehandlat dagvatten och indirekt avrinning vid översvämningar från kombinerade avlopp), är ett viktigt område som kräver mer forskning hur föroreningar "omvandlas i ledningsnätet" och hur detta påverkar dagvattenkvaliteten och -behandling. När föroreningar har hamnat i ett rörledningssystem, och beroende på systemets dynamik, kan de föroreningar som är kopplade till partiklar upprepade gånger avlagras och återsuspenderas när skyfallshändelser "pulserar" genom systemet. Dessutom kan lösta föroreningar upprepade gånger absorberas av och frigöras från partiklar och biofilmer när förhållandena i rören förändras, organiskt material bryts ned o.s.v. Resultatet kan bli att det dagvatten som kommer ut ur ett rörsystem kan ha en mycket annorlunda fysikalisk-kemisk och biologisk sammansättning jämfört med vad som kom in i systemet, vilket gör identifiering av källorna till ett betydande åtagande.

Påverkan av aktiviteter inom avrinningsområdet och olika typer av regnhändelser på dagvattenavrinningen är väl belagd i svensk litteratur. Även om mycket är känt om de klassiska diffusa föroreningarna från städer (suspenderat material, metaller, näringsämnen och PAH'er), har relativt få studier varit inriktade på det bredare urval av föroreningar som är ett framväxande problem ("contaminants of emerging concern", en allmän term som refererar till föroreningar som inte är reglerade men där det finns anledning till oro, t.ex. mikroplaster och många organiska mikroföroreningar såsom PFAS; CEC). Dessutom, när det gäller att uppnå "god ekologisk status" (enligt definition i EU:s ramdirektiv för vatten 2000), är kemisk vattenkvalitet endast en aspekt att ta hänsyn till. Begränsningarna när vattenkvalitetsnormer tillämpas på varje förorening var för sig blir allt mer tydliga, men är fortfarande det primära sättet att uppvisa uppfyllelse av föreskrifter. Behovet av att ta hand om blandningseffekter är diskuterat på politisk nivå (se avsnitt 1) med rekommendationer utfärdade avseende behovet att utveckla en "blandningseffektfaktor" att använda vid riskbedömningar med EU CSS (2020). Ett alternativt men kompletterande tillvägagångssätt för att skapa data för blandningseffekter är användning av ekotoxicitetstester, där ett batteri av sorter från olika trofiska nivåer utsätts för dagvattenprover. I dag har begränsad forskning inom detta ämne utförts i svensk miljö. Medan fältdata om koncentrationer förblir "gällande standard" när det gäller att förstå förekomsten och effekten av diffusa föroreningar från städerna har behovet av att fatta beslut nu i brist på kompletta underlag drivit fram intresse för dagvattenkvalitetsmodeller. Flera sådana modeller har använts i svenska fallstudier (oftast baserad på avrinningsmodeller för dagvattenflöden/volymer). Deras kalibrering och så småningom användning kräver dock ofta platsspecifika data som ofta inte finns lättillgängliga.

Däremot är kunskapen och tillhörande användning av modeller för dagvattenflöden och -volymer mycket bättre förstådd. Flera modeller används rutinmässigt i svensk forskning och praktik. Aktuella studier är inriktade på att minska nivåerna av identifierade osäkerheter för att optimera deras användning ytterligare och i allt mer lokal skala. Den numera största utmaningen när det gäller kvantitetsmodellering av dagvatten är dess användning i städernas dagvattenplanering när vi står inför ett snabbt föränderligt klimat. De viktigaste prediktionerna beträffande klimatförändringar i Sverige är ökad intensitet, frekvens och varaktighet för regn på vintern, och de händelser som används i den aktuella utformningen (t.ex. ge tillräcklig kapacitet för skyfall med återkomsttid på 30 år) ger nu endast kapacitet för en återkomsttid på tio år med konsekvenser för de aktuella systemens prestanda, liksom för framtida system- och hanteringsåtgärder.

När det gäller tillvägagångssätt för att mildra effekterna av dagvatten har svensk dagvattenforskning bidragit starkt till den internationella kunskapen för att dagvatten behöver behandling och rening och att de kommunala avloppsreningsverken inte är optimala för detta ändamål. Användning av BGI är ett lovande tillvägagångssätt som kan hantera både målen för hantering av vattenmängd och vattenkvalitet, samtidigt som det kan ge ett antal ytterligare fördelar. Medan många studier har fokuserat på att utvärdera enstaka BGI-system har dock bidraget från flera BGI för att uppnå målen för dagvattenhantering på hela avrinningsområden ännu inte helt utvärderats.

Olika typer av BGI kan leverera ekosystemtjänster i en stadsmiljö, till exempel kylning, förbättrad luftkvalitet, bullerdämpning och skapande av naturliga miljöer. Om dessa fördelar identifieras som att de uppstår från "tjänster" kan modeller för en samhällsekonomisk värdering av BGI användas. Dessa möjliggör att man med nyttokostnadsanalyser kan sätta ett ekonomiskt värde på tjänster som naturen (eller BGI i dagvattensammanhang) tillhandahåller. Som en multifunktionell infrastruktur kan deras implementering i stadsplanering bli av intresse för många fler intressenter än de som oftast är inblandade i städernas dagvattenhantering. Det krävs dock ytterligare ansträngningar för att engagera denna bredare publik. Därför är bidraget av ekosystemtjänster från BGI ett "hett ämne" både nationellt och internationellt. Aktuella ämnen för forskning inom detta område är:

- Utveckla en bättre förståelse för BGI-processer (består ofta av laboriebaserade studier) och använda denna kunskap i fullskaliga fältförsök
- Utveckla beslutsstödsverktyg för att praktiker ska kunna välja det lämpligaste systemet på en specifik plats
- Bedöma kraven på drifts- och bedömningshantering på kort och lång sikt för alternativa BGI-system
- Identifiera möjligheterna för att integrera städernas system för dagvattenhantering med flera fördelar i institutionella strukturer som oftast arbetar med "stuprör" på sektors- eller avdelningsnivå.

6.2 Rekommendationer för fortsatt forskning

Baserat på det som denna systematiska genomgång av svensk dagvattenforskning under det senaste årtiondet har kommit fram till, pekar detta avsnitt ut ett antal områden för vidare forskning med de dubbla målen att minska påverkan från städernas diffusa förorening av vattenrecipienterna och förbättra hållbarheten hos dagvattenhantering i Sverige.

Föroreningar från dagvatten: källor, förekomst och transport

- Förbättrade analyser och undersökningar av massflöden för att underlätta identifiering och prioritering av diffusa föroreningskällor. Resultat: Förbättrad förståelse av föroreningskällor och prioritering av dessa (t.ex. bättre förståelse av de faktorer som styr utsläppen och deras interaktion).
- Undersökning av interaktioner och förändringar av föroreningar i rörledningar. Resultat: stöd för spårning av föroreningskällor.
- Utvärdering av det relativa bidraget och betydelsen av torr respektive våt deposition för föroreningsmängder i dagvatten. Resultat: Ny kunskap som input i vattenkvalitetsmodeller.

- Utveckling av standardmetoder för att på ett tillförlitligt sätt fastställa koncentrationer av "nya" föroreningar (t.ex. mikroplaster) i dagvattenavrinning och det relativa bidraget från olika urbana källor/markanvändningar. Resultat: Utveckling av en databas över "predikterade miljökoncentrationer" (predicted environmental concentrations; PEC).
- Systematisk bedömning av dagvattenavrinning från olika typer av avrinningsområden med hjälp av olika ekotoxicitetstester. Resultat: Utveckling av en databas över "uppskattade nollevteffekt-koncentrationer" (predicted no-effects concentrations; PNEC).

Dagvattenkvantitet: fördröjning, infiltration och transport.

- Undersökning av hur en storskalig användning av dagvatteninfiltrationsanläggningar på avrinningsområdesnivå påverkar grundvattennivåerna. Resultat: ny kunskap om samspelet mellan dagvattenflöden och grundvattenförekomster.
- Undersöka effekterna av en utbredd användning av BGI-system på översvämningrisker. Resultat: ny kunskap om städernas anpassning till klimatförändringar.

Recipientpåverkan

- Riskbedömning (PEC:PNEC). Resultat: Ny kunskap om de risker som dagvattenavrinning medför för recipienten.

Åtgärder för kontroll av dagvatten/blå grön infrastruktur

- Systematisk övervakning av prestanda av BGI baserat på deras reningsprocesser och på föroreningsegenskaper. Resultat: evidensbas för att välja/utforma BGI baserat på deras potential att avskilja föroreningar beroende på de respektive fysikalisk-kemiska processerna.
- Undersökning av prestanda hos dagvattenreningsanläggningar för "nya" föroreningar. Resultat: Underlag för val av reningsteknik för ett bredare spektrum av föroreningar.
- Oberoende utvärderingar av kompakta reningssystem (inklusive kommersiella lösningar). Resultat: evidensbas för implementering av sådana anordningar.
- Utvärdering av hur de boende i staden uppfattar rollen av BGI i stadsmiljön, inklusive de fördelar/nackdelar de ger. Resultat: Nya uppgifter om allmänhetens och kommunernas uppfattning om BGI för att stödja utvecklingen av verktyg för beslutsstöd.
- Identifiera och utvärdera hur decentraliserad dagvattenhantering kan stödjas lokalt, t.ex. genom medborgarforskare. Resultat: förståelse för de aktiviteter och typer av datainsamling som kan genomföra lokalt och deras roll för att stödja drift och underhåll av BGI.
- Med tanke på att den gröna infrastrukturen i huvudsak är vit under en stor del av året i det nordliga klimatet, bör begreppet blågrön-vit infrastruktur (BGWI) utforskas systematiskt och dess roll i tillhandahållandet av ekosystemtjänster. Resultat: Utveckling av en mer nyanserad förståelse av den roll som BGI spelar i kalla klimat och deras bidrag till olika hållbarhetsmål.
- Systematisk bedömning av nuvarande metoder för drift och underhåll av dagvattensystem, inklusive BGI-system, för att identifiera hinder och möjligheter för drift och skötsel. Resultat: Ny kunskap som kan användas för att utveckla och genomföra drift- och skötselrutiner för BGI.

Lagring av och tillgång till data om dagvatten

- Utveckling av ett tillvägagångssätt för att underlätta insamling, lagring och fri tillgång till dagvattenrelaterade dataset/databaser. Resultat: jämförbara data och stöd för modellering.

7. Referenser

- Al-Rubaei A.M., Engström M., Viklander M., Blecken G.-T. 2016. Long-term hydraulic and treatment performance of a 19-year old constructed stormwater wetland—Finally matured or in need of maintenance? *Ecological Engineering* 95. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.031
- Al-Rubaei A.M., Engström M., Viklander M., Blecken G.-T. 2017. Effectiveness of a 19-Year Old Combined Pond-Wetland System in Removing Particulate and Dissolved Pollutants. *Wetlands* 37. DOI: 10.1007/s13157-017-0884-6
- Al-Rubaei A.M., Merriman L.S., Hunt W.F., Viklander M., Marsalek J., Blecken G.-T. 2017. Survey of the Operational Status of 25 Swedish Municipal Stormwater Management Ponds. *Journal of Environmental Engineering* 143. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001203
- Al-Rubaei A.M., Viklander M., Blecken G.-T. 2015. Long-term hydraulic performance of stormwater infiltration systems. *Urban Water Journal* 12. DOI: 10.1080/1573062X.2014.949796
- Amorim J.H., Engardt M., Johansson C., Ribeiro I., Sannebro M. 2021. Regulating and Cultural Ecosystem Services of Urban Green Infrastructure in the Nordic Countries: A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18; DOI: 10.3390/ijerph18031219
- Andersson S., Rahmberg M., Nilsson Å., Grundestam C., Saagi R., Lindblom E. 2020. Evaluation of environmental impacts for future influent scenarios using a model-based approach. 81. DOI: 10.2166/wst.2020.183
- Arnbjerg-Nielsen K., Willems P., Olsson J., Beecham S., Pathirana A., Bülow Gregersen I., Madsen H., Nguyen V.-T.V. 2013. Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: A review. *Water Science and Technology* 68. DOI: 10.2166/wst.2013.251.
- Berggren K., Packman J., Ashley R., Viklander M. 2014. Climate changed rainfalls for urban drainage capacity assessment. *Urban Water Journal* 11. DOI: 10.1080/1573062X.2013.851709
- Björklund K., Bondelind M., Karlsson A., Karlsson D., Sokolova E. 2018. Hydrodynamic modelling of the influence of stormwater and combined sewer overflows on receiving water quality: Benzo(a)pyrene and copper risks to recreational water. *Journal of Environmental Management* 207. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.014
- Björklund K., Li L. 2015. Evaluation of low-cost materials for sorption of hydrophobic organic pollutants in stormwater. *Journal of Environmental Management* 159. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.05.005
- Björklund K., Li L. 2017. Removal of organic contaminants in bioretention medium amended with activated carbon from sewage sludge. *Environmental Science and Pollution Research* 24. DOI: 10.1007/s11356-017-9508-1.
- Björklund K., Li L. 2018. Sorption of organic pollutants frequently detected in stormwater: evaluation of five potential sorbents. *Environmental Technology (United Kingdom)* 39. DOI: 10.1080/09593330.2017.1354924
- Björklund K., Li L.Y. 2016. Sorption of DOM and hydrophobic organic compounds onto sewage-based activated carbon. *Water Science and Technology* 74. DOI: 10.2166/wst.2016.240
- Björklund K., Li L.Y. 2017. Adsorption of organic stormwater pollutants onto activated carbon from sewage sludge. *Journal of Environmental Management* 197. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.04.011
- Blecken G.-T., Hunt W.F., III, Al-Rubaei A.M., Viklander M., Lord W.G. 2017. Stormwater control measure (SCM) maintenance considerations to ensure designed functionality. *Urban Water Journal* 14. DOI: 10.1080/1573062X.2015.1111913

- Blecken G.-T., Rentz R., Malmgren C., Öhlander B., Viklander M. 2012. Stormwater impact on urban waterways in a cold climate: Variations in sediment metal concentrations due to untreated snowmelt discharge. *Journal of Soils and Sediments* 12. DOI: 10.1007/s11368-012-0484-2
- Bohman A., Glaas E., Karlson M. 2020. Integrating sustainable stormwater management in urban planning: Ways forward towards institutional change and collaborative action. *Water (Switzerland)* 12. DOI: 10.3390/w12010203
- Bollmann U.E., Tang C., Eriksson E., Jönsson K., Vollertsen J., Bester K. 2014. Biocides in urban wastewater treatment plant influent at dry and wet weather: Concentrations, mass flows and possible sources. *Water Research* 60. DOI: 10.1016/j.watres.2014.04.014
- Bondelind M., Sokolova E., Nguyen A., Karlsson D., Karlsson A., Björklund K. 2020. Hydrodynamic modelling of traffic-related microplastics discharged with stormwater into the Göta River in Sweden. *Environmental Science and Pollution Research* 27. DOI: 10.1007/s11356-020-08637-z
- Borris M., Gustafsson A.-M., Marsalek J., Viklander M. 2014. Continuous simulations of urban stormwater runoff and total suspended solids loads: Influence of varying climatic inputs and catchment imperviousness. *Journal of Water and Climate Change* 5. DOI: 10.2166/wcc.2014.121
- Borris M., Leonhardt G., Marsalek J., Österlund H., Viklander M. 2016. Source-Based Modeling Of Urban Stormwater Quality Response to the Selected Scenarios Combining Future Changes in Climate and Socio-Economic Factors. *Environmental Management* 58. DOI: 10.1007/s00267-016-0705-3
- Borris M., Österlund H., Marsalek J., Viklander M. 2016. Contribution of coarse particles from road surfaces to dissolved and particle-bound heavy metal loads in runoff: A laboratory leaching study with synthetic stormwater. *Science of the Total Environment* 573. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.062
- Borris M., Österlund H., Marsalek J., Viklander M. 2017. An exploratory study of the effects of stormwater pipeline materials on transported stormwater quality. *Water Science and Technology* 76. DOI 10.2166/wst.2017.195
- Borris M., Viklander M., Gustafsson A.-M., Marsalek J. 2013. Simulating future trends in urban stormwater quality or changing climate, urban land use and environmental controls. *Water Science and Technology* 68. DOI: 10.2166/wst.2013.465
- Borris M., Viklander M., Gustafsson A.-M., Marsalek J. 2014. Modelling the effects of changes in rainfall event characteristics on TSS loads in urban runoff. *Hydrological Processes* 28. DOI: 10.1002/hyp.9729
- Broekhuizen I., Leonhardt G., Marsalek J., Viklander M. 2020. Event selection and two-stage approach for calibrating models of green urban drainage systems. *Hydrology and Earth System Sciences* 24. DOI: 10.5194/hess-24-869-2020
- Broekhuizen I., Muthanna T.M., Leonhardt G., Viklander M. 2019. Urban drainage models for green areas: Structural differences and their effects on simulated runoff. *Journal of Hydrology X* 5. DOI: 10.1016/j.hydroa.2019.100044
- Byrne D.M., Lohman H.A.C., Cook S.M., Peters G.M., Guest J.S. 2017. Life cycle assessment (LCA) of urban water infrastructure: Emerging approaches to balance objectives and inform comprehensive decision-making. *Environmental Science: Water Research and Technology* 3. DOI: 10.1039/c7ew00175d
- Cettner A., Ashley R., Hedström A., Viklander M. 2014. Assessing receptivity for change in urban stormwater management and contexts for action. *Urban Water Journal* 11. DOI: 10.1080/1573062X.2013.768683
- Cettner A., Ashley R., Hedström A., Viklander M. 2014. Sustainable development and urban stormwater practice. *Journal of Environmental Management* 146. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.024
- Cettner A., Ashley R., Viklander M., Nilsson K. 2013. Stormwater management and urban planning: Lessons from 40 years of innovation. *Journal of Environmental Planning and Management* 56. DOI: 10.1080/09640568.2012.706216

- Cettner A., Söderholm K., Viklander M. 2012. An Adaptive Stormwater Culture? Historical Perspectives on the Status of Stormwater within the Swedish Urban Water System. *Journal of Urban Technology* 19. DOI: 10.1080/10630732.2012.673058
- Czemiel Berndtsson J. 2014. Storm water quality of first flush urban runoff in relation to different traffic characteristics. *Urban Water Journal* 11. DOI: 10.1080/1573062X.2013.795236
- Davtalab R., Mirchi A., Harris R.J., Troilo M.X., Madani K. 2020. Sea level rise effect on groundwater rise and stormwater retention pond reliability. *Water (Switzerland)* 12. DOI: 10.3390/W12041129
- Earon R., Olofsson B., Renman G. 2012. Initial effects of a new highway section on soil and groundwater. *Journal of Environmental Management* 279. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111756
- Ekka S.A., Rujner H., LB41:B68eonhardt G., Blecken G.-T., Viklander M., Hunt W.F. 2021. Next generation swale design for stormwater runoff treatment: A comprehensive approach. *Land Degradation and Development* 29. DOI: 10.1002/ldr.3113
- EU (2019) Evaluation of the Urban Wastewater treatment Directive <https://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/pdf/UWWTD%20Evaluation%20SWD%20448-701%20web.pdf>
- EU Chemicals Policy (2019) EU chemicals policy 2030: building on the past, moving to the future. <https://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/concept%20note%20and%20draft%20programme.pdf>
- EU CSS (2020) EU Chemical Strategy for Sustainability. <https://ec.europa.eu/environment/pdf/chemicals/2020/10/Strategy.pdf>
- EU Green Deal (2019) Striving to be the first climate-neutral continent https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- EU WFD. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:EN:HTML>
- Fältström E., Anderberg S. 2020. Towards control strategies for microplastics in urban water. *Environmental Science and Pollution Research* 27. DOI: 10.1007/s11356-020-10064-z
- Flanagan K., Blecken G.-T., Österlund H., Nordqvist K., Viklander M. 2021. Contamination of Urban Stormwater Pond Sediments: A Study of 259 Legacy and Contemporary Organic Substances. *Environmental Science and Technology* DOI: 10.1021/acs.est.0c07782
- Fletcher T.D., Shuster W., Hunt W.F., Ashley R., Butler D., Arthur S., Trowsdale S., Barraud S., Semadeni-Davies A., Bertrand-Krajewski J.-L., Mikkelsen P.S., Rivard G., Uhl M., Dagenais D., Viklander M. 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal* 12. DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314
- Flores-Alsina X., Saagi R., Lindblom E., Thirsing C., Thornberg D., Gernaey K.V., Jeppsson U. 2014. Calibration and validation of a phenomenological influent pollutant disturbance scenario generator using full-scale data. *Water Research* DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.022
- Folens K., Van Acker T., Bolea-Fernandez E., Cornelis G., Vanhaecke F., Du Laing G., Rauch S. 2018. Identification of platinum nanoparticles in road dust leachate by single particle inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Science of the Total Environment* 615. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.285
- Galfi H., Haapala J., Nordqvist K., Westerlund C., Blecken G.-T., Marsalek J., Viklander M. 2016. Inter-event and intra-event variations of indicator bacteria concentrations in the storm sewer system of the city of Östersund, Sweden. *Journal of Environmental Engineering (United States)* 142. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001067
- Galfi H., Nordqvist K., Sundelin M., Blecken G.-T., Marsalek J., Viklander M. 2014. Comparison of indicator bacteria concentrations obtained by automated and manual sampling of urban storm-water runoff. *Water, Air, and Soil Pollution* 225. DOI: 10.1007/s11270-014-2065-z

- Galfi H., Österlund H., Marsalek J., Viklander M. 2017. Mineral and Anthropogenic Indicator Inorganics in Urban Stormwater and Snowmelt Runoff: Sources and Mobility Patterns. *Water, Air, and Soil Pollution* 228. DOI: 10.1007/s11270-017-3438-x
- Gavri S., Larm T., Österlund H., Marsalek J., Wahlsten A., Viklander M. 2019. Measurement and conceptual modelling of retention of metals (Cu, Pb, Zn) in soils of three grass swales. *Journal of Hydrology* 574. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.002
- Gavri S., Leonhardt G., Marsalek J., Viklander M. 2019. Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings. *Science of the Total Environment* 669. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.072
- Gavri S., Leonhardt G., Österlund H., Marsalek J., Viklander M. 2021. Metal enrichment of soils in three urban drainage grass swales used for seasonal snow storage. *Science of the Total Environment* 760. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144136
- Genç-Fuhrman H., Mikkelsen P.S., Ledin A. 2016. Simultaneous removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from stormwater using high-efficiency industrial sorbents: Effect of pH, contact time and humic acid. *Science of the Total Environment* 566-567. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.210
- Goldenberg R., Kalantari Z., Cvetkovic V., Mörtberg U., Deal B., Destouni G. 2017. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services. *Science of the Total Environment* 593-594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.130
- Grace K.A., Juston J.M., Finn D., DeBusk W.F., Ivanoff D., DeBusk T.A. 2019. Substrate manipulation near the outflow of a constructed wetland reduced internal phosphorus loading from sediments and macrophytes. *Ecological Engineering* 129. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.11.006
- Haghighatafshar S., Jansen J.C., Aspegren H., Jönsson K. 2018. Conceptualization and schematization of mesoscale sustainable drainage systems: A full-scale study. *Water (Switzerland)* 10. DOI: 10.3390/w10081041
- Haghighatafshar S., Nordlöf B., Roldin M., Gustafsson L.-G., la Cour Jansen J., Jönsson K. 2019. . A physically based model for mesoscale SuDS – an alternative to large-scale urban drainage simulations. *Journal of Environmental Management* 240. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.037
- Haghighatafshar S., Yamanee-Nolin M., Klinting A., Roldin M., Gustafsson L.-G., Aspegren H., Jönsson K. 2018. Efficiency of blue-green stormwater retrofits for flood mitigation– Conclusions drawn from a case study in Malmö, Sweden. *Journal of Environmental Management* 207. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.018.
- Haghighatafshar S., Yamanee-Nolin M., Larson M. 2019. Hydroeconomic optimization of mesoscale blue-green stormwater systems at the city level. *Journal of Hydrology* 578. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124125
- Hamann F., Blecken G.-T., Ashley R.M., Viklander M. 2020. Valuing the Multiple Benefits of Blue-Green Infrastructure for a Swedish Case Study: Contrasting the Economic Assessment Tools B£ST and TEEB. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment* 6. DOI: 10.1061/JSWBAY.0000919
- Hedberg Y.S., Goidanich S., Herting G., Odnevall Wallinder I. 2015. Surface-rain interactions: Differences in copper runoff for copper sheet of different inclination, orientation, and atmospheric exposure conditions. *Environmental Pollution*. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.11.003
- Hedberg Y.S., Hedberg J.F., Herting G., Goidanich S., Odnevall Wallinder I. 2014. Critical review: Copper runoff from outdoor copper surfaces at atmospheric conditions. *Environmental Science and Technology* DOI: 10.1021/es404410s
- Herrmann J. 2012. Chemical and biological benefits in a stormwater wetland in Kalmar, SE Sweden. *Limnologica* 42. DOI: 10.1016/j.limno.2012.07.003

- Hu Y.O.O., Ndegwa N., Alneberg J., Johansson S., Logue J.B., Huss M., Käller M., Lundeberg J., Fagerberg J., Andersson A.F. 2018. Stationary and portable sequencing-based approaches for tracing wastewater contamination in urban stormwater systems. *Scientific Reports* 8. DOI: 10.1038/s41598-018-29920-7
- Järilskog I., Strömvall A.-M., Magnusson K., Galfi H., Björklund K., Polukarova M., Garção R., Markiewicz A., Aronsson M., Gustafsson M., Norin M., Blom L., Andersson-Sköld Y. 2021. Traffic-related microplastic particles, metals, and organic pollutants in an urban area under reconstruction. *Science of the Total Environment* 774. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145503
- Järilskog I., Strömvall A.-M., Magnusson K., Gustafsson M., Polukarova M., Galfi H., Aronsson M., Andersson-Sköld Y. 2020. Occurrence of tire and bitumen wear microplastics on urban streets and in sweepsand and washwater. *Science of the Total Environment* 729. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138950
- Jia Y., Ehler L., Wahlskog C., Lundberg A., Maurice C. 2018. Water quality of stormwater generated from an airport in a cold climate, function of an infiltration pond, and sampling strategy with limited resources. *Environmental Monitoring and Assessment* 190. DOI: 10.1007/s10661-017-6375-7
- Johansson F., Bini L.M., Coiffard P., Svanbäck R., Wester J., Heino J. 2019. Environmental variables drive differences in the beta diversity of dragonfly assemblages among urban stormwater ponds. *Ecological Indicators* 106. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105529
- Johansson F., Heino J., Coiffard P., Svanbäck R., Wester J., Bini L.M. 2020. Can information from citizen science data be used to predict biodiversity in stormwater ponds? *Scientific Reports* 10. DOI: 10.1038/s41598-020-66306-0
- Juston J.M., Kadlec R.H. 2019. Data-driven modeling of phosphorus (P) dynamics in low-P stormwater wetlands. *Environmental Modelling and Software* 118. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.05.002
- Kaczala F., Marques M., Vinrot E., Hogland W. 2012. Stormwater run-off from an industrial log yard: Characterization, contaminant correlation and first-flush phenomenon. *Environmental Technology (United Kingdom)* 33. DOI: 10.1080/09593330.2011.641035
- Kalmykova Y., Björklund K., Strömvall A.-M., Blom L. 2013. Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons, alkylphenols, bisphenol A and phthalates. *Water Research* 47. DOI: 10.1016/j.watres.2012.11.054
- Karlsson K., Blecken G.-T., Öhlander B., Viklander M. 2016. Environmental Risk Assessment of Sediments Deposited in Stormwater Treatment Facilities: Trace Metal Fractionation and Its Implication for Sediment Management. *Journal of Environmental Engineering (United States)* 142. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001122
- Kotze D.J., Kuoppamäki K., Niemikapee J., Mesimäki M., Vaurola V., Lehvävirta S. 2020. A revised terminology for vegetated rooftops based on function and vegetation. *Urban Forestry and Urban Greening* 49. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126644
- Land M., Granéli W., Grimvall A., Hoffmann C.C., Mitsch W.J., Tonderski K.S., Verhoeven J.T.A. (2017) How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environmental Evidence* DOI: 10.1186/s13750-016-0060-0.
- Lange K., Österlund H., Viklander M., Blecken G.-T. 2020. Metal speciation in stormwater bioretention: Removal of particulate, colloidal and truly dissolved metals. *Science of the Total Environment* 724. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138121
- Lange K., Viklander M., Blecken G.-T. 2020. Effects of plant species and traits on metal treatment and phytoextraction in stormwater bioretention. *Journal of Environmental Management* 276. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111282
- Larm T., Alm H. 2014. Revised design criteria for stormwater facilities to meet pollution reduction and flow control requirements, also considering predicted climate effects. *Water Practice and Technology* 9. DOI: 10.2166/wpt.2014.002

- Larsson M., Yan J., Nordenskjöld C., Forsberg K., Liu L. 2016. Characterisation of stormwater in biomass-fired combined heat and power plants - Impact of biomass fuel storage *Applied Energy* 170. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.101
- Lausen E.D., Emilsson T., Jensen M.B. 2020. Water use and drought responses of eight native herbaceous perennials for living wall systems. *Urban Forestry and Urban Greening* 54. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126772
- Lindfors S., Österlund H., Lundy L., Viklander M. 2020. Metal size distribution in rainfall and snowmelt-induced runoff from three urban catchments. *Science of the Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140813
- Lindfors S., Österlund H., Lundy L., Viklander M. 2021. Evaluation of measured dissolved and bio-met predicted bioavailable Cu, Ni and Zn concentrations in runoff from three urban catchments. *Journal of Environmental Management*. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112263
- Locatelli L., Mark O., Mikkelsen P.S., Arnbjerg-Nielsen K., Deletic A., Roldin M., Binning P.J. 2017. Hydrologic impact of urbanization with extensive stormwater infiltration. *Journal of Hydrology* 544. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.030
- Lönnqvist J., Blecken G.-T., Viklander M. 2021. Vegetation cover and plant diversity on cold climate green roofs. *Journal of Urban Ecology* 7. DOI: 10.1093/jue/juaa035.
- Lundberg A., Feiccabrino J., Westerlund C., Al-Ansari N. 2013. Urban snow deposits versus snow cooling plants in northern Sweden: A quantitative analysis of snow melt pollutant releases. *Water Quality Research Journal of Canada*. DOI: 10.2166/wqrjc.2013.042
- Lundström T.S., Åkerstedt H.O., Larsson I.A.S., Marsalek J., Viklander M. 2020. Dynamic distributed storage of stormwater in sponge-like porous bodies: Modelling water uptake. *Water (Switzerland)* 12. DOI: 10.3390/W12082080
- Lützhøft H.-C.H., Donner E., Wickman T., Eriksson E., Banovec P., Mikkelsen P.S., Ledin A. 2012. A source classification framework supporting pollutant source mapping, pollutant release prediction, transport and load forecasting, and source control planning for urban environments. *Environmental Science and Pollution Research* 19. DOI: 10.1007/s11356-011-0627-9
- Malm A., Svensson G., Bäckman H., Morrison G.M. 2013. Prediction of water and wastewater networks rehabilitation based current age and material distribution. *Water Science and Technology: Water Supply* 13. DOI: 10.2166/ws.2013.011
- Markiewicz A., Björklund K., Eriksson E., Kalmykova Y., Strömvall A.-M., Siopi A. 2013. Emissions of organic pollutants from traffic and roads: Priority pollutants selection and substance flow analysis. *Science of the Total Environment* 580. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.074
- Markiewicz A., Strömvall A.-M., Björklund K. 2020. Alternative sorption filter materials effectively remove non-particulate organic pollutants from stormwater. *Science of the Total Environment* 730. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139059
- Markiewicz A., Strömvall A.-M., Björklund K., Eriksson E. 2019. Generation of nano- and micro-sized organic pollutant emulsions in simulated road runoff. *Environment International* 133. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105140
- Mattsson J., Mattsson A., Davidsson F., Hedström A., Österlund H., Viklander M. 2016. Normalization of Wastewater Quality to Estimate Infiltration/Inflow and Mass Flows of Metals. *Journal of Environmental Engineering (United States)* 142. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001120
- McCarthy D.T., Zhang K., Westerlund C., Viklander M., Bertrand-Krajewski J.-L., Fletcher T.D., Deletic A. 2018. Assessment of sampling strategies for estimation of site mean concentrations of stormwater pollutants. *Water Research* 129. DOI: 10.1016/j.watres.2017.10.001

- Meland S., Sun Z., Sokolova E., Rauch S., Brittain J.E. 2020. A comparative study of macroinvertebrate biodiversity in highway stormwater ponds and natural ponds. *Science of the Total Environment* 740. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140029
- Merriman L.S., Moore T.L.C., Wang J.W., Osmond D.L., Al-Rubaei A.M., Smolek A.P., Blecken G.T., Viklander M., Hunt W.F. 2017. Evaluation of factors affecting soil carbon sequestration services of stormwater wet retention ponds in varying climate zones. *Science of the Total Environment* 583, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.040
- Milovanovi I., Bareš V., Hedström A., Herrmann I., Picek T., Marsalek J., Viklander M. 2020. Enhancing stormwater sediment settling at detention pond inlets by a bottom grid structure (BGS). *Water Science and Technology* 81. DOI: 10.2166/wst.2020.101
- Moghadas S., Leonhardt G., Marsalek J., Viklander M. 2020. Modeling urban runoff from rain-on-snow events with the U.S. EPA SWMM model for current and future climate scenarios. *Journal of Cold Regions Engineering* 32. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000147
- Müller A., Österlund H., Marsalek J., Viklander M. 2020. The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of the Total Environment* 709. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136125
- Müller A., Österlund H., Nordqvist K., Marsalek J., Viklander M. 2019. Building surface materials as sources of micropollutants in building runoff: A pilot study. *Science of the Total Environment* 680. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.088
- Nielsen K., Kalmykova Y., Strömvall A.-M., Baun A., Eriksson E. 2015. Particle phase distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in stormwater - Using humic acid and iron nano-sized colloids as test particles. *Science of the Total Environment* 532. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.093.
- Nordqvist K., Galfi H., Österlund H., Marsalek J., Westerlund C., Viklander M. 2014. Measuring solids concentrations in urban stormwater and snowmelt: A new operational procedure. *Environmental Sciences: Processes and Impacts* 16. DOI: 10.1039/c4em00204k
- Nyström F., Nordqvist K., Herrmann I., Hedström A., Viklander M. 2020. Removal of metals and hydrocarbons from stormwater using coagulation and flocculation. *Water Research* 182. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115919
- Nyström F., Nordqvist K., Herrmann I., Hedström A., Viklander M. 2020. Laboratory scale evaluation of coagulants for treatment of stormwater. *Journal of Water Process Engineering* 36. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101271
- Nyström F., Nordqvist K., Herrmann I., Hedström A., Viklander M. 2019. Treatment of road runoff by coagulation/flocculation and sedimentation. *Water Science and Technology* 79. DOI: 10.2166/wst.2019.079
- Olsson J., Amaguchi H., Alsterhag E., Dåverhög M., Adrian P.-E., Kawamura A. 2013. Adaptation to climate change impacts on urban storm water: A case study in Arvika, Sweden. *Climatic Change* 116. DOI: 10.1007/s10584-012-0480-y
- Östberg J., Martinsson M., Stål Ö., Fransson A.-M. 2012. Risk of root intrusion by tree and shrub species into sewer pipes in Swedish urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening* 11. DOI: 10.1016/j.ufug.2011.11.001
- Pan H., Deal B., Destouni G., Zhang Y., Kalantari Z. 2018. Sociohydrology modeling for complex urban environments in support of integrated land and water resource management practices. *Land Degradation and Development* 29. DOI: 10.1002/ldr.3106
- Panasiuk O., Hedström A., Ashley R.M., Viklander M. 2016. Detection of Wastewater Discharges into Stormwater Sewers: Effects of Travel Distance on Parameters. *Journal of Environmental Engineering (United States)* 142. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001086

- Panasiuk O., Hedström A., Marsalek J., Ashley R.M., Viklander M. 2015. Contamination of stormwater by wastewater: A review of detection methods. *Journal of Environmental Management* 152. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.01.050
- Pohl J., Örn S., Norrgren L., Carlsson G. 2015. Toxicological evaluation of water from stormwater ponds using *Xenopus tropicalis* embryos. *Wetlands Ecology and Management* 23. DOI: 10.1007/s11273-015-9444-0
- Polukarova M., Markiewicz A., Björklund K., Strömvall A.-M., Galfi H., Andersson Sköld Y., Gustafsson M., Järskog I., Aronsson M. 2020. Organic pollutants, nano- and microparticles in street sweeping road dust and washwater. *Environment International* 135. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105337
- Qiao X.-J., Kristoffersson A., Randrup T.B. 2018. Challenges to implementing urban sustainable stormwater management from a governance perspective: A literature review. *Journal of Cleaner Production* 196. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.049
- Qiao X.-J., Liu L., Kristoffersson A., Randrup T.B. 2019. Governance factors of sustainable stormwater management: A study of case cities in China and Sweden. *Journal of Environmental Management* 248. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.07.020
- Rasmussen J.J., Wiberg-Larsen P., Baattrup-Pedersen A., Cedergreen N., McKnight U.S., Kreuger J., Jacobsen D., Kristensen E.A., Friberg N. 2015. The legacy of pesticide pollution: An overlooked factor in current risk assessments of freshwater systems. *Water Research* 84. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.021
- Rentz R., Öhlander B. 2012. Urban impact on water bodies in the Lulea area, northern Sweden, and the role of redox processes. *Hydrology Research* 43. DOI: 10.2166/nh.2011.167
- Reynolds J.E., Halldin S., Seibert J., Xu C.Y. 2018. Definitions of climatological and discharge days: do they matter in hydrological modelling? *Hydrological Sciences Journal* 63. DOI: 10.1080/02626667.2018.1451646
- Roldin M., Locatelli L., Mark O., Mikkelsen P.S., Binning P.J. 2013. A simplified model of soakaway infiltration interaction with a shallow groundwater table. *Journal of Hydrology* 497. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.005
- Roldin, M., Fryd, O., Jeppesen, J., Mark, O., Binning, P. J., Mikkelsen, P. S., & Jensen, M. B. (2012). Modelling the impact of soakaway retrofits on combined sewage overflows in a 3km² urban catchment in Copenhagen, Denmark. *Journal of Hydrology*, 452-453, 64-75. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.027
- Rosenzweig B., Ruddell B.L., McPhillips L., Hobbins R., McPhearson T., Cheng Z., Chang H., Kim Y. 2019. Developing knowledge systems for urban resilience to cloudburst rain events. *Environmental Science and Policy* 99. DOI: 10.1016/j.envsci.2019.05.020
- Rujner H., Leonhardt G., Marsalek J., Viklander M. 2018. High-resolution modelling of the grass swale response to runoff inflows with Mike SHE. *Journal of Hydrology* 562. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.05.024
- Rusiñol M., Fernandez-Cassi X., Hundesa A., Vieira C., Kern A., Eriksson I., Ziros P., Kay D., Miagostovich M., Vargha M., Allard A., Vantarakis A., Wyn-Jones P., Bofill-Mas S., Girones R. 2014. Application of human and animal viral microbial source tracking tools in fresh and marine waters from five different geographical areas. *Water Research*. DOI: 10.1016/j.watres.2014.04.013
- Sami Al-Janabi A.M., Ghazali A.H., Yusuf B., Sammen S.S., Afan H.A., Al-Ansari N., Shahid S., Yaseen Z.M. 2020. Optimizing height and spacing of check dam systems for better grassed channel infiltration capacity. *Applied Sciences (Switzerland)* 10. DOI: 10.3390/app10113725
- Schernewski G., Radtke H., Hauk R., Baresel C., Olshammar M., Osinski R., Oberbeckmann S. 2020. Transport and Behavior of Microplastics Emissions From Urban Sources in the Baltic Sea. *Frontiers in Environmental Science* 8. DOI: 10.3389/fenvs.2020.579361

- Schück M., Greger M. 2020. Plant traits related to the heavy metal removal capacities of wetland plants. *International Journal of Phytoremediation* 22. DOI: 10.1080/15226514.2019.1669529
- Sjöman H., Bellan P., Hitchmough J., Oprea A. 2015. Herbaceous plants for climate adaptation and intensely developed urban sites in northern Europe: A case study from the eastern Romanian steppe. *Ekologia Bratislava* 34. DOI: 10.1515/eko-2015-0005
- SMHI (2021) Change in annual mean temperature in Sweden, scenario RCP4.5 <https://www.smhi.se/en/climate/future-climate/climate-scenarios/sweden/nation/rcp45/year/temperature>
- Søberg L.C., Al-Rubaei A.M., Viklander M., Blecken G.-T. 2020. Phosphorus and TSS Removal by Stormwater Bioretention: Effects of Temperature, Salt, and a Submerged Zone and Their Interactions. *Water, Air, and Soil Pollution* 231. DOI: 10.1007/s11270-020-04646-3
- Søberg L.C., Viklander M., Blecken G.-T. 2014. The influence of temperature and salt on metal and sediment removal in stormwater biofilters. *Water Science and Technology* 69. DOI: 10.2166/wst.2014.161
- Søberg L.C., Viklander M., Blecken G.-T. 2017. Do salt and low temperature impair metal treatment in stormwater bioretention cells with or without a submerged zone? *Science of the Total Environment* 579. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.179
- Søberg L.C., Viklander M., Blecken G.-T., Hedström A. 2019. Reduction of *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* and *Pseudomonas aeruginosa* in stormwater bioretention: Effect of drying, temperature and submerged zone. *Journal of Hydrology X* 3. DOI: 10.1016/j.hydroa.2019.100025
- Søberg L.C., Vollertsen J., Blecken G.-T., Nielsen A.H., Viklander M. 2016. Bioaccumulation of heavy metals in two wet retention ponds. *Urban Water Journal* 13. DOI: 10.1080/1573062X.2015.1024689
- Søberg L.C., Winston R., Viklander M., Blecken G.-T. 2019. Dissolved metal adsorption capacities and fractionation in filter materials for use in stormwater bioretention facilities. *Water Research X* 4. DOI: 10.1016/j.wroa.2019.100032
- Song K., Winters C., Xenopoulos M.A., Marsalek J., Frost P.C. 2017. Phosphorus cycling in urban aquatic ecosystems: connecting biological processes and water chemistry to sediment P fractions in urban stormwater management ponds. *Biogeochemistry* 132. DOI: 10.1007/s10533-017-0293-1
- Sörensen J., Emilsson T. 2019. Evaluating flood risk reduction by urban blue-green infrastructure using insurance data. *Journal of Water Resources Planning and Management* 145. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001037
- Sörensen J., Persson A., Sternudd C., Aspegren H., Nilsson J., Nordström J., Jönsson K., Mottaghi M., Becker P., Pilesjö P., Larsson R., Berndtsson R., Mobini S. 2016. Re-thinking urban flood management-time for a regime shift. *Water (Switzerland)* 8. DOI: 10.3390/w8080332
- Sun Z., Majaneva M., Sokolova E., Rauch S., Meland S., Ekrem T. 2019. DNA metabarcoding adds valuable information for management of biodiversity in roadside stormwater ponds. *Ecology and Evolution* 9. DOI: 10.1002/ece3.5503
- Sun Z., Sokolova E., Brittain J.E., Saltveit S.J., Rauch S., Meland S. 2019. Impact of environmental factors on aquatic biodiversity in roadside stormwater ponds. *Scientific Reports* 9. DOI: 10.1038/s41598-019-42497-z
- Svensson H., Ekstam Bö., Marques M., Hogland W. 2015. Removal of organic pollutants from oak leachate in pilot scale wetland systems: How efficient are aeration and vegetation treatments? *Water Research* 84. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.017
- Svensson H., Hansson H., Hogland W. 2015. Determination of Nutrient Deficiency in Stormwater from the Wood Industry for Biological Treatment. *Clean - Soil, Air, Water* 43. DOI: 10.1002/clen.201300621
- UN SDGs (2015) Sustainable Development: the 17 Goals. <https://sdgs.un.org/goals>

- Vezzaro L., Eriksson E., Ledin A., Mikkelsen P.S. 2012. Quantification of uncertainty in modelled partitioning and removal of heavy metals (Cu, Zn) in a stormwater retention pond and a biofilter. *Water Research* 46. DOI: 10.1016/j.watres.2011.08.047
- Vezzaro L., Sharma A.K., Ledin A., Mikkelsen P.S. 2015. Evaluation of stormwater micropollutant source control and end-of-pipe control strategies using an uncertainty-calibrated integrated dynamic simulation model. *Journal of Environmental Management* 151. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.12.013
- Villa A., Fölster J., Kyllmar K. 2019. Determining suspended solids and total phosphorus from turbidity: comparison of high-frequency sampling with conventional monitoring methods *Environmental Monitoring and Assessment*. DOI: 10.1007/s10661-019-7775-7
- Ward P.J., de Ruiter M.C., Mård J., Schröter K., Van Loon A., Veldkamp T., von Uexkull N., Wanders N., AghaKouchak A., Arnbjerg-Nielsen K., Capewell L., Carmen Llasat M., Day R., Dewals B., Di Baldassarre G., Huning L.S., Kreibich H., Mazzoleni M., Savelli E., Teutschbein C., van den Berg H., van der Heijden A., Vincken J.M.R., Waterloo M.J., Wens M. 2020. The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies. *Water Security* 11. DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100070
- Wei H., Muthanna T.M., Lundy L., Viklander M. 2021. An assessment of gully pot sediment scour behaviour under current and potential future rainfall conditions. *Journal of Environmental Management*. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111911
- Wihlborg M., Sörensen J., Alkan Olsson J. 2019. Assessment of barriers and drivers for implementation of blue-green solutions in Swedish municipalities. *Journal of Environmental Management* 233. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.12.018
- Winston R.J., Al-Rubaei A.M., Blecken G.T., Hunt W.F. 2016. A Simple Infiltration Test for Determination of Permeable Pavement Maintenance Needs. *Journal of Environmental Engineering (United States)* 142. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001121
- Winston R.J., Al-Rubaei A.M., Blecken G.T., Viklander M., Hunt W.F. 2016. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate - The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. *Journal of Environmental Management* 169. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.12.026
- Wu J., Larm T., Wahlsten A., Marsalek J., Viklander M. 2021. Uncertainty inherent to a conceptual model StormTac Web simulating urban runoff quantity, quality and control. *Urban Water Journal* DOI: 10.1080/1573062X.2021.1878240
- Wu J., Malmström M.E. 2015. Nutrient loadings from urban catchments under climate change scenarios: Case studies in Stockholm, Sweden. *Science of the Total Environment* 518-519. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.041
- Xie L., Lehvāvirta S., Valkonen J.P.T. 2020. Case study: Planting methods and beneficial substrate microbes effect on the growth of vegetated roof plants in Finland. *Urban Forestry and Urban Greening* 53. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126722
- Zalejska-Jonsson A., Wilkinson S.J., Wahlund R. 2020. Willingness to pay for green infrastructure in residential development-a consumer perspective. *Atmosphere* 11. DOI: 10.3390/atmos11020152
- Zinger Y., Blecken G.-T., Fletcher T.D., Viklander M., Deleti A. 2013. Optimising nitrogen removal in existing stormwater biofilters: Benefits and tradeoffs of a retrofitted saturated zone. *Ecological Engineering* 51. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.007
- Zischg J., Goncalves M.L.R., Bacchin T.K., Leonhardt G., Viklander M., Van Timmeren A., Rauch W., Sitenfrei R. 2017. Info-Gap robustness pathway method for transitioning of urban drainage systems under deep uncertainties. *Water Science and Technology* 76. DOI: 10.2166/wst.2017.320
- Åkerstedt H.O., Lundström T.S., Sofia Larsson I.A., Marsalek J., Viklander M (2021) Modelling the swelling of hydrogels with application to storage of stormwater. *Water (Switzerland)* 13. DOI: 10.3390/w13010034

ISBN 978-91-8048-039-0 (tryck)
ISBN 978-91-8048-040-6 (pdf)

