Slutrapport Projekt NV-02654-24

Effektbaserad bedömning av sedimenttoxicitet i urbana vattendrag: Sammanfattande rapport

Suna Ekin Kali
Haoyu Wei
Godecke-Tobias Blecken
Maria Viklander
Heléne Österlund

Luleå tekniska universitet
Institutionen för Samhällsbyggnad och Naturresurser
Forskargruppen VA-teknik
Dag&Nät, DRIZZLE
97187 Luleå

LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

Förord

Ett tack till Peter Rosander för all hjälp med fältarbetet. Tack också till alla på Swedavia/Arlanda flygplats, Uppsala kommun/Uppsala Vatten, Nodra (Norrköping) och Söderköpings kommun som möjliggjort att vi kunde provta dessa recipienter. Ett stort tack till Åängens B&B, Ensjöholms By och Tom Lindström i Söderköping för att vi kunde ha provtagningsutrustning på deras fastigheter.

Analyserna som presenteras i denna studie har möjliggjorts genom finansiering från Naturvårdsverket. Vi är tacksam för finansieringen. Dessutom har kompetenscentrum DRIZZLE (www.ltu.se/DRIZZLE) och forskningsklustret Dag&Nät (www.ltu.se/dag-nat) bidragit till provtagning och analyser.

Författarna, Luleå, december2025

Sammanfattning

Dagvattenutsläpp kan ge upphov till biologiska effekter i urbana vattenmiljöer. I denna studie togs botten-sedimentprover från fyra vattendrag, både uppströms och nedströms urbana och industriella områden. Proverna analyserades med fem in vitro-biotester som riktar in sig på aktivering av östrogenreceptorer (ER), androgenreceptorer (AR), arylkolvätereceptorer (AhR), hämning av AR (Anti-AR) samt induktion av oxidativ stress (Nrf2). Resultaten kompletterades med kemisk analys av 82 föroreningar som förekommer i urban avrinning. Så kallad "iceberg-modellering" användes för att identifiera vilka dagvattenrelaterade ämnen som driver de observerade biologiska effekterna.

Provtagningspunkter nedströms dagvattenutsläpp uppvisade förhöjd biologisk aktivitet, särskilt kopplat till AhR-aktivering och oxidativ stress. Intressant nog noterades ökad ER-aktivitet främst vid uppströms punkter med låg urban påverkan och större inslag av jordbruk. Iceberg-modelleringen indikerade att flera högmolekylära PAH:er, såsom benzo[k]fluoranten, potentiellt kan bidra till effekter inom flera av de analyserade verkningsmekanismerna. Resultaten antydde även att 4-tert-oktylfenol teoretiskt skulle kunna påverka främst ER- och Anti-AR-respons. För vissa PFAS visade modelleringen platsberoende potentiella bidrag; vid NrkC föreslogs exempelvis att FOSA kan stå för en del av den beräknade Anti-AR-aktiviteten. I ett enskilt fall (NrkA) var PFOA den enda substans som bidrog till den kemiskt beräknade Nrf2-effekten, men detta utgjorde endast en mycket liten andel av den observerade bioaktiviteten.

Resultaten understryker att urbant dagvatten är en transportväg för biologiskt aktiva föroreningar till recipienter, och att detta vidgar perspektivet bortom vad riktade kemiska analyser ensamma kan avslöja.

Innehåll

Förord 3

Sammanfattning 4

Innehåll 5

1. Inledning & Syfte 6

2. Metod 7

3. Resultat och Diskussion 9

3.1 Cytotoxicitet 9

3.2 Östrogen aktivitet (ER) 10

3.3 AhR aktivering 11

3.4 Oxidativ stress (Nrf2) 11

3.5 Androgen aktivitet (AR) och anti androgen aktivitet (Anti AR) 11

3.6 Skillnader mellan extraktionsmetoder 11

3.7 Iceberg modellering 11

4. Slutsatser 14

Referenser 15

1. Inledning & Syfte

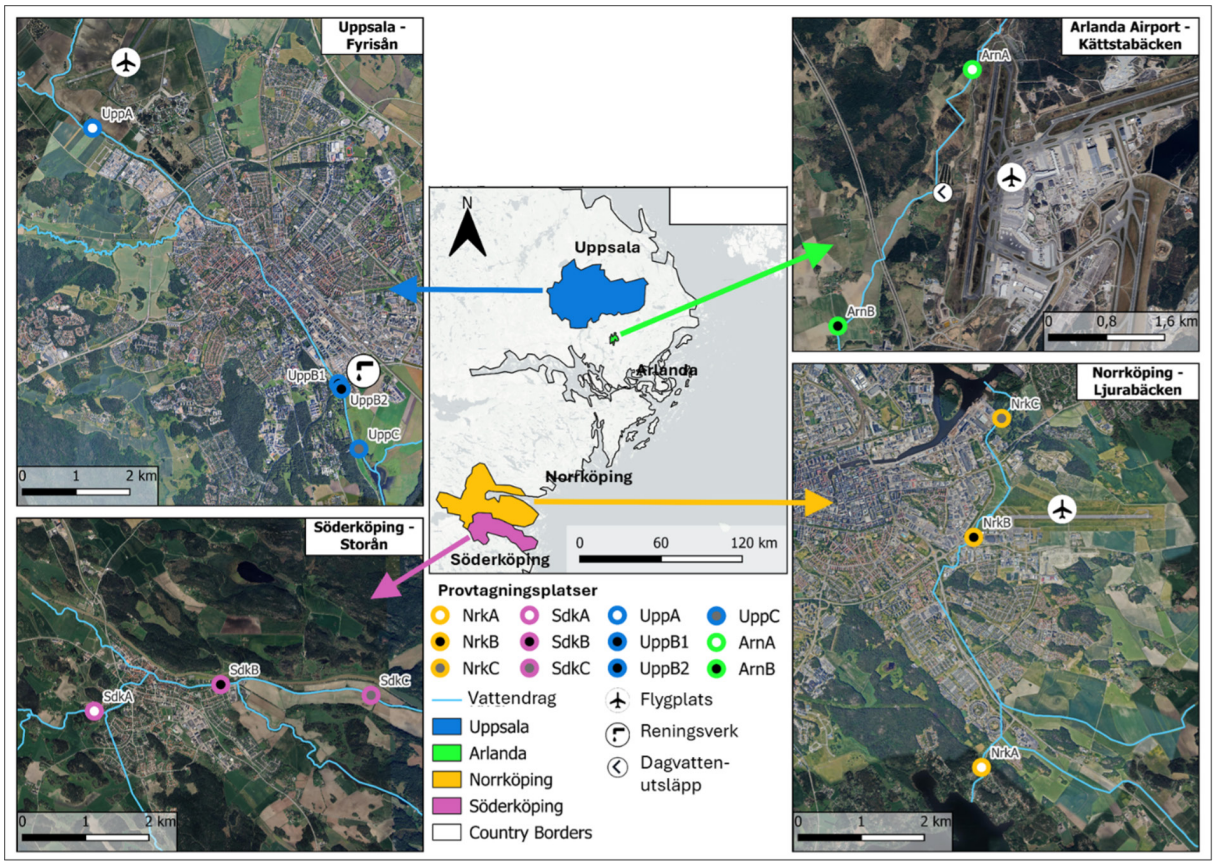
Urbant dagvatten är en källa till kemisk och ekologisk påverkan på vattendrag (Meyer et al., 2005; Paul & Meyer, 2001). Uppföljningen av dagvattenpåverkan på recipienter använder huvudsakligen kemiska analyser av ett relativt begränsat antal ämnen (t.ex. Kali et al., 2025a; Kali et al., 2025b; Masoner et al., 2019). Denna metod inkluderar inte effekter av okända kemikalier, nedbrytningsprodukter eller kombinerade effekter av olika kemikalier som förekommer i miljön (Silva et al., 2002; Wernersson et al., 2015).

Denna studie undersöker därför hur effektbaserade metoder kan komplettera traditionella kemiska analyser för att ge en mer nyanserad bild av riskerna med dagvattenutsläpp till recipienter. Studien hade även som mål att undersöka hur de biologiska responsnivåerna varierar rumsligt längs en gradient från relativt opåverkade områden uppströms staden till urbaniserade sträckor nedströms. Fokus ligger på bottensediment, eftersom sediment fungerar som en långsiktig sänka för hydrofoba ämnen som polycykliska aromatiska kolväten (PAH:er), fenoler och flera PFAS föreningar (Müller et al., 2020; Spahr et al., 2019; Kali et al., 2025a; Kali et al., 2025b). Dessa ämnen kan påverka sedimentlevande organismer under lång tid och successivt spridas vidare uppåt i näringskedjan.

Genom att kombinera kemiska analyser med en uppsättning cellbaserade bioassays analyserades fem toxikologiska verkningsmekanismer: östrogen aktivitet (ER), arylhydrokarbonreceptoraktivering (AhR), androgen aktivitet (AR), androgenblockerande aktivitet (Anti AR) samt induktion av oxidativ stress (Nrf2), vilka är väletablerade indikatorer för biologisk påverkan i vattenmiljöer (Escher et al., 2011; He et al., 2011; Neale et al., 2020). Dessutom användes så kallad "iceberg modellering" för att beräkna hur stor del av de observerade toxicitetseffekterna som kan förklaras av de ämnen som hittats vid kemiska analyser (Neale & Escher, 2020).

2. Metod

Sedimentprover samlades in från fyra vattendrag i södra Sverige som är påverkade av dagvattenutsläpp från urbana områden eller industri (Figur 1): Fyrisån (Uppsala), Ljurabäck (Norrköping), Storån (Söderköping) samt Kättstabäcken (Arlanda). Vid varje vattendrag valdes uppströmsplatser med relativt liten urban påverkan och nedströmsplatser där dagvatten från tätorter respektive flygplats tillförs. Detta provtagningsupplägg gör det möjligt att särskilja lokala punktkällor från mer diffus bakgrundsbelastning samt att följa förändringar längs sträckor som påverkas av dagvattenutsläpp.



Figur 1. Provtagningsplatserna

Sedimentproverna analyserades både kemiskt och biologiskt. Den kemiska analysen omfattade 82 dagvattenrelaterade ämnen, bland annat 16 PAH:er, 8 fenoler, 13 ftalater, 10 tennorganiska föreningar och 35 PFAS-substanser (Kali et al., 2025a).

Inför den effektbaserade analysen extraherades sedimenten på två sätt: med vatten för att efterlikna den fraktion som kan lakas ut naturligt till vattenfasen, och med metanol för att efterlikna den fraktion som blir tillgänglig för sedimentlevande organismer. Dessa extrakt testades sedan i fem in vitro-bioassays som belyser hormonstörande potential, dioxinlika effekter och cellstress (Tabell 1).

Tabell 1. Sammanfattning av bioassays. MOA: Mode of Action.

MOA	Cellinje	Referenssubstans	Enhet	Rapporte-ringsgräns (vattenextrakt)	Rapporterings-gräns (metanol-extrakt)
ER	T47D ER	17β estradiol (E2)	pg E2 ekv/g TS	2.96–912	10.6–1060
AhR	DR EcoScreen	2,3,7,8-Tetraklorodi-benzodioxin (TCDD)	ng TCDD ekv/g TS	0.00047–0.023	0.0041–0.30
Nrf2	MCF7 AREc32	Tert-butylhydrokinon (tBHQ)	µg tBHQ ekv/g TS	0.17–6.43	1.29–10.3
AR	AR EcoScreen GR KO M1	Dihydrotestosteron (DHT)	ng DHT ekv/g TS	0.0050–0.22	0.030–1.31
Anti AR	AR EcoScreen GR KO M1	Hydroxyflutamid (OHF)	ng OHF ekv/g TS	1.77–22.10	19.2–1060

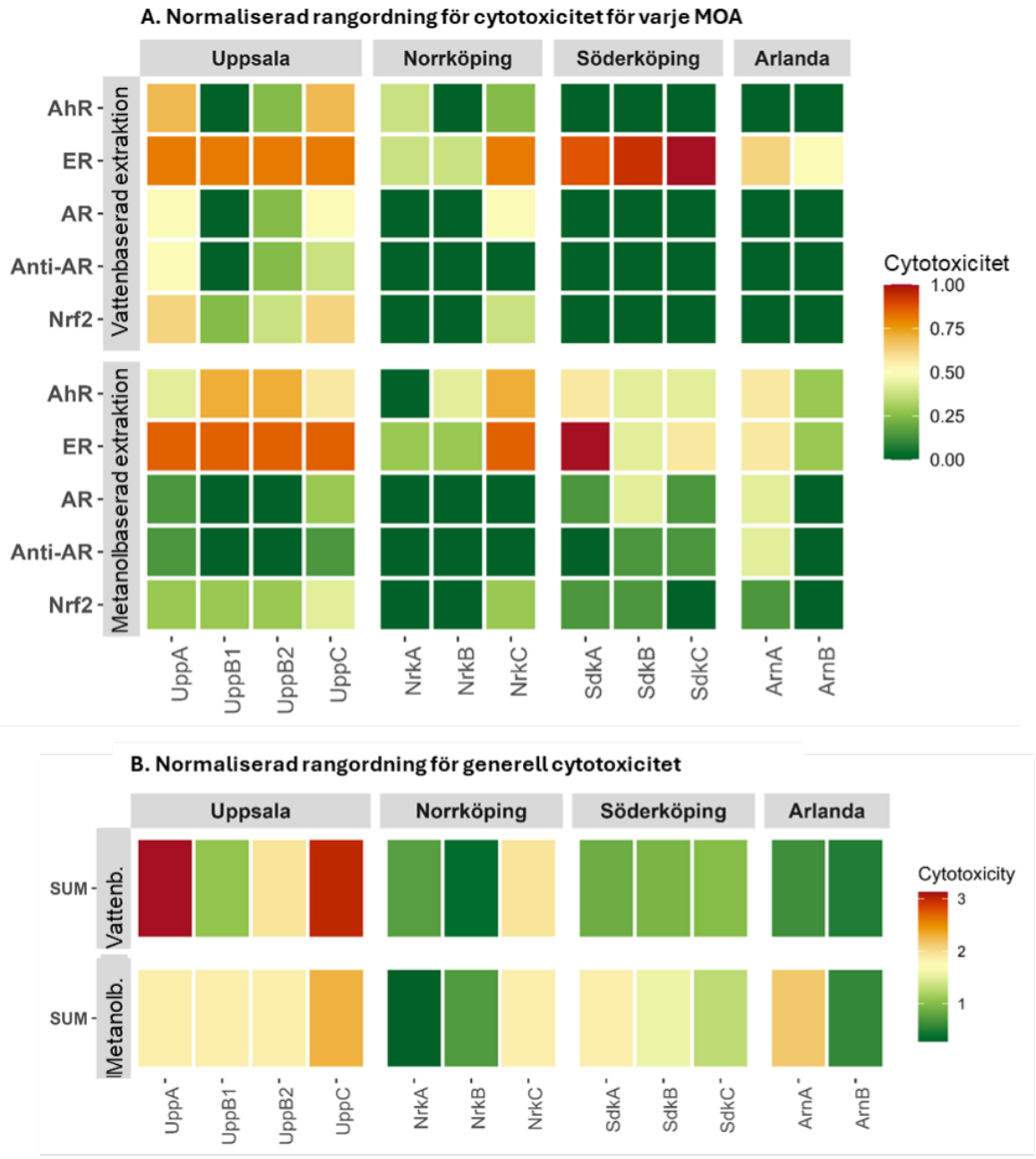
Iceberg-modelleringen användes därefter för att jämföra observerad biologisk effekt med den effekt som de uppmätta kemikalierna teoretiskt sett kan orsaka.

3. Resultat och Diskussion

3.1 Cytotoxicitet

Analysen av cytotoxicitet visade tydliga skillnader mellan provtagningsplatser och mellan extraktionsmetoder. Metanolextrakt uppvisade högre cytotoxicitet än vattenextrakt, vilket överensstämmer med tidigare studier där hydrofoba ämnen såsom PAH:er, fenoler och tennorganiska föreningar binds starkt till sediment och extraheras därför mer effektivt med organiska lösningsmedel (Escher et al., 2011).

Den rumsliga variationen var markant, där platser nedströms urbaniserade områden i samtliga vattendrag uppvisade högre cytotoxicitet än uppströmsproverna. Detta överensstämmer med rapporter om att dagvattenutsläpp kan transportera komplexa kemikalieblandningar med både kända och okända toxikologiskt aktiva ämnen (Müller et al., 2020) och att det generellt finns högre föroreningshalter i recipienter nedströms staden (Kali et al. 2025b).



Figur 2. (A) Cytotoxicitetsprofiler för provtagningsplatserna för de fem analyserna (AhR, ER, AR, Anti-AR och Nrf2) för vattenbaserade och metanolbaserade extraktioner. (B) Normaliserad rangordning av generell cytotoxicitet för provtagningsplatserna för vattenbaserad och metanolbaserad extraktion. Varje ruta representerar den normaliserade rangordningen (färgkodade från grönt [låg] till rött [hög]).

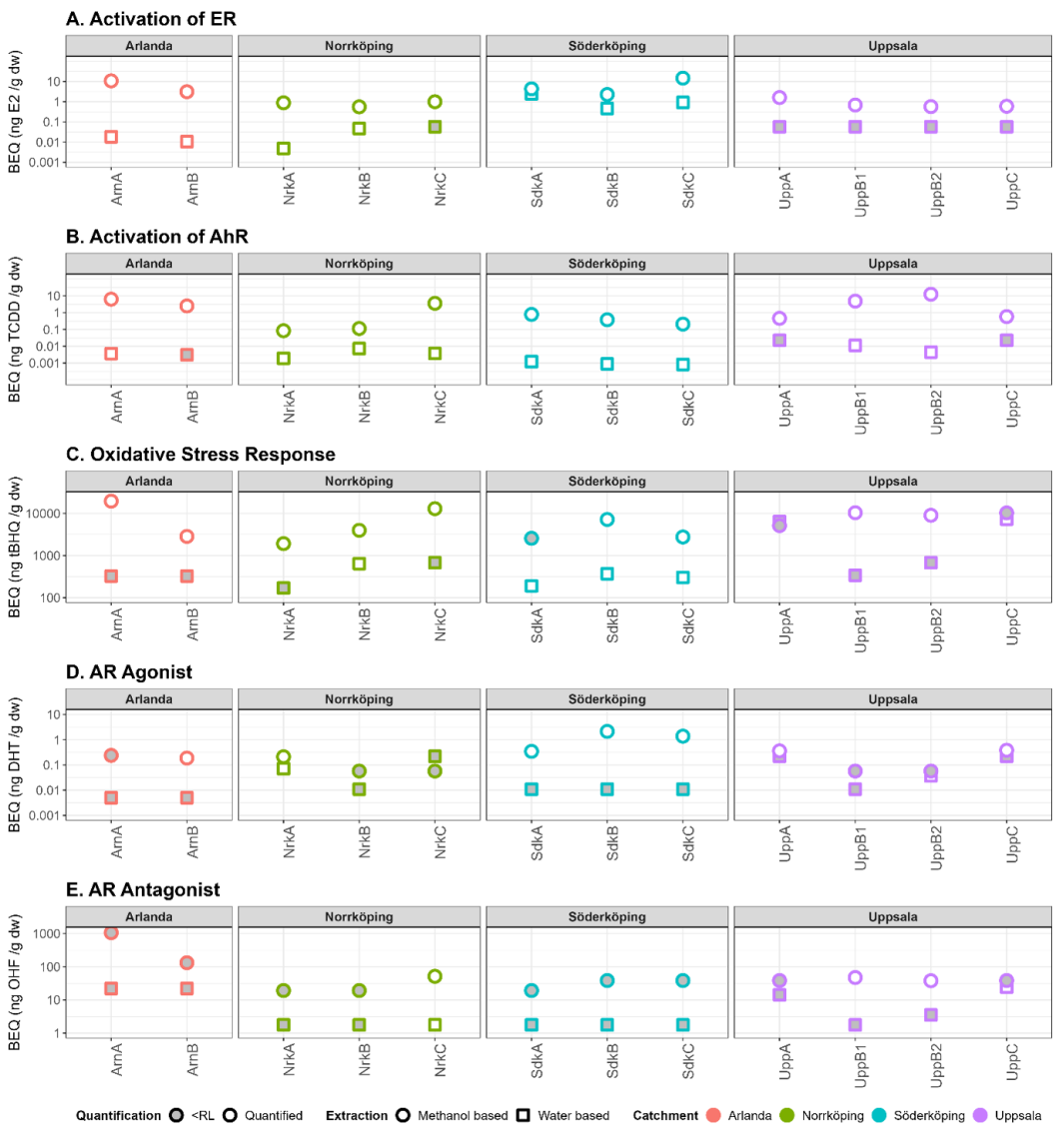
Den positiva korrelationen mellan cytotoxicitet och antalet kvantifierade ämnen i metanolextrakt stärker antagandet att urban påverkan leder till ökade nivåer av föroreningsblandningar med potentiellt kombinerade effekter. Liknande samband har observerats i studier där sedimentets kemiska diversitet predicerar blandningstoxicitet (Niu et al., 2020).

3.2 Östrogen aktivitet (ER)

Samtliga metanolextrakt uppvisade tydlig östrogen aktivitet, men variationerna mellan platserna visade ett oväntat och komplext mönster. De högsta nivåerna återfanns inte vid provtagningspunkterna med urban påverkan, utan längre uppströms (Figur 3). ER aktivitet är sannolikt kopplad till jordbruk och annan diffus påverkan snarare än direkta urbana källor. Jordbrukets bidrag kan inkludera pesticider som är kända för att uppvisa ER agonistiska egenskaper och vars förekomst ofta sammanfaller med hög biologisk respons i sediment (Bergman et al., 2012).

En annan viktig observation är den kraftigt förhöjda ER aktiviteten uppströms Arlanda. Här är PFAS föroreningar en trolig förklaring, särskilt eftersom vissa PFAS föreningar, såsom PFOA och PFOS, är dokumenterade endokrinstörande ämnen som kan påverka östrogenreceptorer och hormonell signalering (Wielsøe et al., 2015). PFAS halterna vid Arlanda uppströms var bland de högsta i studien.

Tillsammans visar dessa resultat att östrogen aktivitet i bottensediment inte enbart är en funktion av urbanisering utan även speglar påverkan från diffusa antropogena källor. De markanta skillnaderna mellan platserna understryker behovet av att koppla biologiska responsdata till detaljerade landanvändningsmönster för att förstå de bakomliggande föroreningskällorna. Detta bekräftar artikelns slutsats att ER responsen kan vara stark även i miljöer utan direkt urban belastning, vilket gör östrogenaktivitet till en särskilt känslig indikator på komplexa påverkanstryck i vattendrag.



Figur 3. Rumslig variation i bioanalytiska ekvivalentkoncentrationer (BEQ) för ER, AhR, Nrf2, AR och Anti AR i vatten- och metanolextrakt av bottensediment.

3.3 AhR aktivering

I Figur 3 illustreras hur de biologiska effekterna varierar längs gradienten från uppströms till nedströms lokaler. AhR aktiviteten följer tydligt detta mönster med ökade nivåer nedströms urbaniserade områden.

Aktivering av AhR receptorn var omfattande och återfanns i samtliga analyserade sedimentprover. De högsta aktivitetsnivåerna återfanns nedströms urbana miljöer, vilket är i linje med att PAH:er från trafik, förbränningsprocesser och industriella aktiviteter är kända AhR agonister (He et al., 2011). Att vissa uppströmsplatser också uppvisade AhR aktivitet trots låga uppmätta PAH halter tyder på förekomst av ytterligare oidentifierade AhR aktiverande ämnen. Detta är ett återkommande mönster i flodsystem där icke targetföroreningar bidrar avsevärt till dioxinlika effekter (Johann et al., 2024).

3.4 Oxidativ stress (Nrf2)

Nrf2 aktivering uppmättes i majoriteten av metanolextrakten och var särskilt förhöjd vid urbanpåverkade platser (Figur 3). Oxidativ stress är en känslig indikator på cellär belastning och aktiveras av en rad olika föroreningar, bland annat PAH:er och vissa PFAS (Wielsøe et al., 2015). Vid uppströmsplatserna låg Nrf2-responsen under rapporteringsgränsen, vilket innebär att eventuell aktivitet inte kunde kvantifieras med de använda metoderna och därför inte ska tolkas som avsaknad av biologisk respons. Det observerade mönstret tyder dock på att urban dagvattenrelaterade utsläpp kan bidra till sedimentens potential att inducera oxidativ stress.. Tidigare studier har visat att Nrf2 baserade bioassays ofta fångar blandningseffekter som inte avspeglas i kemisk analys (Escher et al., 2013).

3.5 Androgen aktivitet (AR) och anti androgen aktivitet (Anti AR)

AR och Anti AR aktiviteten visade en tydlig och platsberoende interaktion (Figur 3). AR aktivitet förekom vid ungefär hälften av metanolextrakten, men responsen var generellt låg och mycket känslig för förekomst av antagonister. Vid alla platser där Anti AR aktivitet uppmättes – samtliga starkt urbanpåverkade – uteblev AR signalen helt. Detta tyder på att antagonister effektivt blockerar androgenreceptorn och därmed dämpar agonistresponsen, något som även visats i tidigare sedimentstudier (Kinani et al., 2010).

Anti AR aktivitet detekterades främst i metanolextrakt, vilket indikerar att hormonstörande antagonister förekommer i den hydrofoba fraktionen av sedimenten. Flera lipofila ämnesgrupper, såsom fenoler, PAH er och PFAS, är kända för att kunna ge upphov till anti androgena effekter och förekommer ofta i urbana miljöer (He et al., 2011). Iceberg analysen visade att enskilda potenta föreningar – exempelvis FOSA – kunde dominera Anti AR svaret vid vissa platser, trots att deras koncentrationer var relativt låga.

Variationen mellan lokaler speglar skillnader i föroreningskällor, där urban påverkan tydligt associerades med högre hormonstörningspotential. Att AR aktiviteten var låg även vid platser där antagonister inte kvantifierades kan bero på att androgena ämnen ofta förekommer i låga halter och är svåra att detektera i sediment.

Sammanfattningsvis visar resultaten att androgena endpoints är känsliga indikatorer för dagvattenpåverkan och att Anti AR effekter särskilt kännetecknar starkt urbana miljöer. Detta betonar vikten av att använda flera kompletterande hormonstörande bioassays i övervakning av sediment i urbaniserade vattendrag.

3.6 Skillnader mellan extraktionsmetoder

De generellt högre biologiska aktiviteterna i metanolextrakten visar att en betydande del av de biologiskt aktiva ämnena i sedimenten är bundna till den partikulära, mer hydrofoba fraktionen. Detta belyser att olika extraktionsmetoder fångar olika exponeringsvägar: vattenextraktion speglar den lösta och mer lättmobiliserade fraktionen, medan metanolextraktion ger en bredare bild av den desorberbara delen av sedimentbundna ämnen. Valet av extraktionsmetod bör därför baseras på vilken typ av ekologisk exponering eller frågeställning som är i fokus. Liknande metodberoende skillnader har rapporterats i andra studier av dagvattenpåverkade vattendrag (Tang et al., 2013).

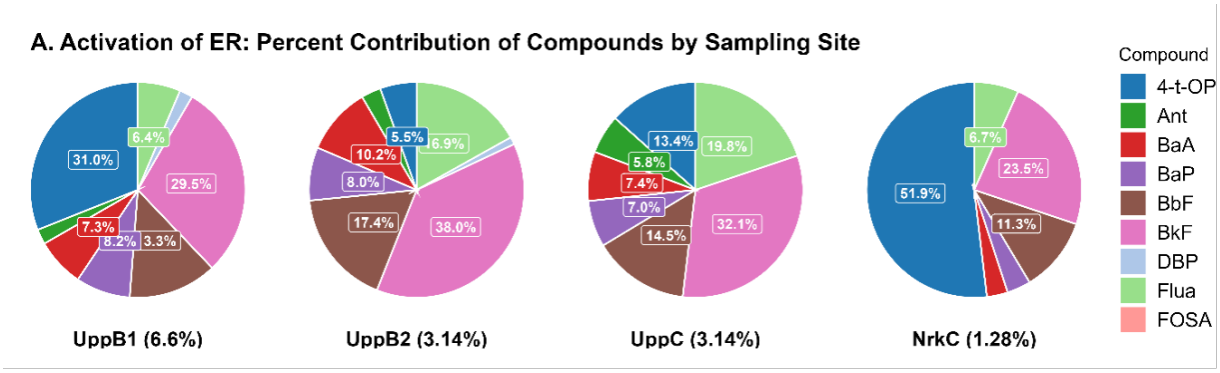
3.7 Iceberg modellering

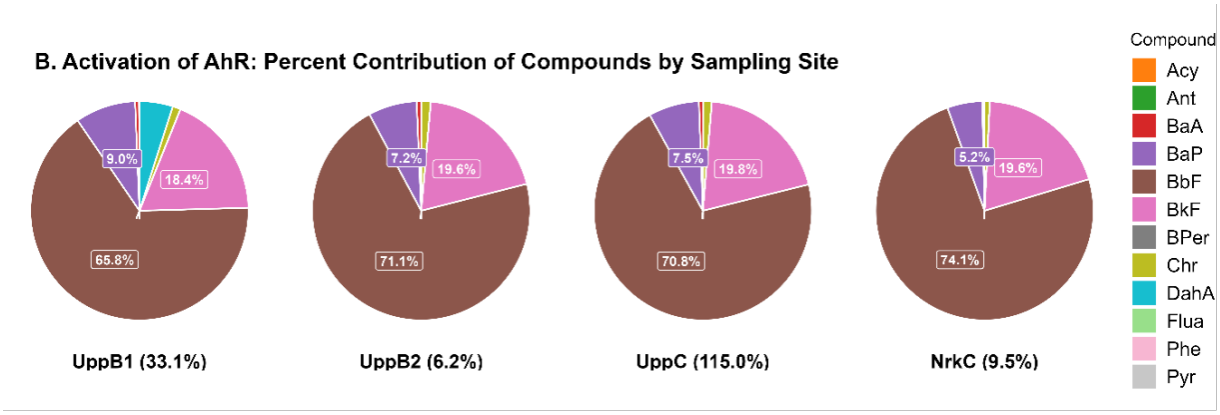
Iceberg analysen visade att endast en mindre del av de uppmätta biologiska effekterna kunde förklaras av de kemiskt analyserade ämnena (Sammanfattning: Tabell 2). Detta bekräftar att en betydande del av toxiciteten orsakas av okända eller oanalyserade ämnen och ämnen under detektionsgränsen samt av blandningseffekter.

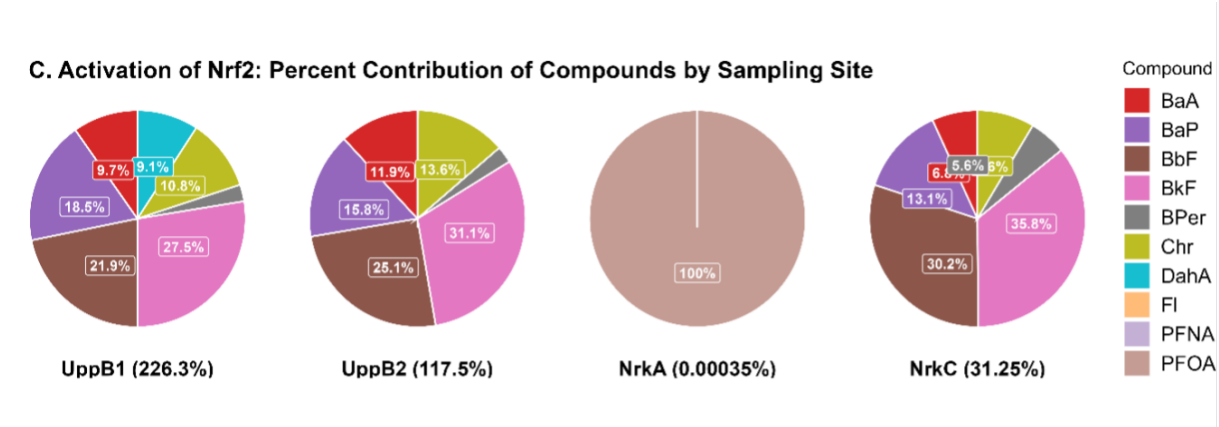
Tabell 2. Summa koncentrationer av detekterade ämnen I de olika föroreningsgrupperna (dw: torrvikt)

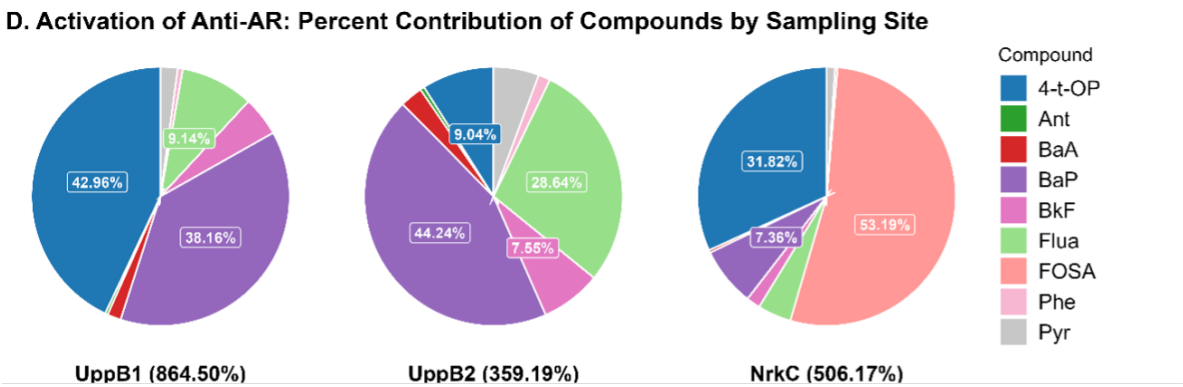
	∑tennorg. ämnen (µg/kg dw)	∑PAH:er (mg/kg dw)	∑PFAS (µg/kg dw)	∑Fenoler (mg/kg dw)	∑Ftalater (mg/kg dw)
UppA	5,98	<1,3	2,12	<0,44	<5,55
UppB1	195,37	9,49	1,14	1,57	5,99
UppB2	70,65	5,71	1,076	0,11	9,87
UppC	70,99	5,8	0,80	0,28	3,74
NrkA	<10	<1,3	0,17	<0,44	<5,55
NrkB	4,98	<1,3	0,084	<0,44	<5,55
NrkC	227,74	2	4,93	0,74	1,6
SdkA	2,24	<1,3	0,13	<0,47	<5,55
SdkB	19,63	<1,3	0,06	<0,44	9,35
SdkC	<10	<1,3	0,062	<0,44	<5,55
ArnA	<10	<1,3	9	<0,44	<5,55
ArnB	<10	<1,3	1,48	<0,44	<5,55

Flera studier har visat att kemiska analyser typiskt fångar endast en mindre andel av den bioaktiva kemikalieblandningen i urban miljö (Neale et al., 2020; Escher et al., 2013). Att PAH:er och 4-tert-oktylfenol utgjorde en stor del av den kemiskt förklarade effekten (Figur 4) är väntat med tanke på deras höga potens. Samtidigt var den totala förklaringsgraden låg, vilket understryker att riktad kemisk analys endast fångar en begränsad del av den bioaktiva blandningen. Effektbaserade metoder kan därför ge en mer heltäckande bild av den samlade påverkan.









Figur 4. Procentuell påverkan av de enskilda ämnena på de bioanalytiska ekvivalentkoncentrationerna (BEQchem) för (A) ER, (B) AhR, (C) Nrf2 och (D) Anti-AR för provtagningsplatserna (UppB1, UppB2, UppC, NrkA och NrkC). Procenttalen inom parentes under varje cirkeldiagram anger den totala BEQbio som förklaras av BEQchem. Varje ämne är färgkodat, och procentsiffrorna i varje diagram visar respektive ämnes bidrag till den förklarade BEQchem vid varje plats. Procentuella bidrag under 5 % anges inte i cirkeldiagrammen. Figurförklaringarna visar alla ämnen som bidrar till varje MOA.

4. Slutsatser

Studien visar att biologisk aktivitet i bottensediment är högre vid platser som påverkas av urban dagvattenavrinning.. Vid dessa platser uppmättes starkare cytotoxicitet, receptoraktivering och oxidativ stress, vilket tyder på en ökad kemisk belastning av sedimentbundna ämnen.. Samtidigt visade resultaten att även icke urbana områden, särskilt jordbruksdominerade sträckor, kan uppvisa betydande hormonstörande aktivitet, vilket understryker vikten av att beakta diffusa källor i miljöbedömningar.

Iceberg analysen bekräftade att endast en mindre del av den observerade bioaktiviteten kan förklaras av de kemiskt analyserade ämnena, vilket överensstämmer med tidigare forskning som betonar att okända spelar en avgörande roll i sedimentets toxicitet (Neale et al., 2020; Escher et al., 2013). Därmed visar studien att effektbaserade analyser kan komplettera traditionella kemiska analyser och för att ge en mer heltäckande bild av påverkan från dagvattenutsläpp.

Referenser

Bergman, Å., Heindel, J. J., Jobling, S., Kidd, K. A., & Zoeller, R. T. (2012). State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals. UNEP/WHO.

Escher, B. I., van Daele, C., Dutt, M., Tang, J. Y., & Altenburger, R. (2013). Most oxidative stress response in water samples comes from unknown chemicals: The need for effect-based water quality trigger values. Environmental Science & Technology, 47(13), 7002–7011.

Escher, B. I., Neale, P. A., & Leusch, F. D. (2011). Bioanalytical Tools in Water Quality Assessment. IWA Publishing.

He, G., Zhao, B., & Denison, M. S. (2011). Identification of benzothiazole derivatives and PAHs as aryl hydrocarbon receptor agonists in tire extracts. Environmental Toxicology and Chemistry, 30(8), 1915–1925.

Johann, S., Düster, M., Bellanova, P., Schwarzbauer, J., Weber, A., Wolf, S., … Hollert, H. (2024). Dioxin-like and estrogenic activity screening in fractionated sediments after extreme flooding. Environmental Sciences Europe, 36, 163.

Kali, S. E., Österlund, H., Viklander, M., & Blecken, G. (2025a). Occurrence, concentration and distribution of organic contaminants in urban streams. Water Research, 283, 123847.

Kali, S. E., Österlund, H., Viklander, M., & Blecken, G. (2025b). Stormwater discharges affect PFAS occurrence in water and sediments of urban streams. Water Research, 271, 122973.

Kinani, S., Bouchonnet, S., Creusot, N., Bourcier, S., Balaguer, P., Porcher, J.-M., & Aït-Aïssa, S. (2010). Endocrine- and dioxin-like activities in small river sediments. Environmental Pollution, 158, 74–83.

Masoner, J. R., Kolpin, D. W., Cozzarelli, I. M., Barber, L. B., Burden, D. S., Foreman, W. T., … Bradley, P. M. (2019). Urban stormwater: An overlooked pathway of contaminants to waters. Environmental Science & Technology, 53(17), 10070–10081.

Meyer, J. L., Paul, M. J., & Taulbee, W. K. (2005). Stream ecosystem function in urbanizing landscapes. Journal of the North American Benthological Society, 24(3), 602–612.

Müller, A., Österlund, H., Marsalek, J., & Viklander, M. (2020). The pollution conveyed by urban runoff: A review. Science of the Total Environment, 709, 136125.

Neale, P. A., Escher, B. I., et al. (2020). Assessing mixture effects in agricultural streams during rain events. Environmental Science & Technology, 54(13), 8280–8290.

Neale, P. A., & Escher, B. I. (2020). Mixture modelling and effect-directed analysis. In A New Paradigm for Environmental Chemistry and Toxicology (pp. 87–97). Springer.

Niu, L., Carmona, E., König, M., Krauss, M., Muz, M., Xu, C., Zou, D., & Escher, B. I. (2020). Mixture risk drivers in freshwater sediments. Environmental Science & Technology, 54(20), 13197–13206.

Paul, M. J., & Meyer, J. L. (2001). Streams in the urban landscape. Annual Review of Ecology and Systematics, 32, 333–365.

Spahr, S., Teixidó, M., Sedlak, D. L., & Luthy, R. G. (2019). Hydrophilic trace organic contaminants in urban stormwater. Environmental Science: Water Research & Technology, 6, 15–44.

Tang, J. Y. M., Aryal, R., Deletic, A., Gernjak, W., Glenn, E., McCarthy, D., & Escher, B. I. (2013). Toxicity characterization of urban stormwater with bioanalytical tools. Water Research, 47(15), 5594–5606.

Wernersson, A.-S., Carere, M., Maggi, C., Tusil, P., Soldan, P., James, A., … Kase, R. (2015). Effect-based monitoring tools under the Water Framework Directive. Environmental Sciences Europe, 27, 7.

Wielsøe, M., Long, M., Ghisari, M., & Bonefeld-Jørgensen, E. C. (2015). PFAS exposure and oxidative stress biomarkers. Chemosphere, 129, 239–245.

LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET