



# In-situ sensorers användning i nationell miljöövervakning

---

Emma E. Lannergård, Jens Fölster

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU  
Vatten & Miljö  
Rapportnr 2023:2



# In-situ sensorers användning i nationell miljöövervakning

Emma E. Lannergård      SLU, Vatten & Miljö

Jens Fölster              SLU, Vatten & Miljö

**Granskare:**              **Sara Sandström, Vatten & Miljö**

**Utgivare:**                Sveriges lantbruksuniversitet, Vatten och miljö

**Utgivningsår:**         **2023**

**Utgivningsort:**        **Uppsala**

**Foto:**                     E Lannergård

**Serietitel:**              Rapport / Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö

**Nyckelord:**              **in-situ sensorer, nationell miljöövervakning, övervakningsprogram**

## Sammanfattning

Övervakning med in-situ sensorer ger ett värdefullt komplement till den nuvarande miljöövervakningen med labanalyser av stickprov. Även om det än så länge endast är möjligt att mäta vissa variabler, som i vissa fall innebär indirekt mätning, ger högfrekventa mätningar ny och värdefull kunskap om hur vattenkvaliteten varierar i olika tidsskalor. Mätningarna bidrar därigenom till att uppfylla kraven på den kontrollerande övervakningen i EU:s ramdirektiv för vatten. Det gäller både att ge underlag för att utforma effektiva mätprogram och att följa långsiktiga förändringar i naturliga förhållanden och effekter av storskalig påverkan. På institutionen för vatten och miljö, SLU, har vi under tio år arbetat med in-situ sensorer. Vi har idag sensorer utplacerade i tio olika vattendrag som övervakar variationen i vattenkemi var 15:e minut. Metoder för installation av sonder i vattendrag, datahantering och kvalitetssäkring har utvecklats. Inledningsvis var arbetet inriktat på att förbättra transportberäkningar av total fosfor (TP) och slamhalt (TSS) baserat på turbiditetsmätningar samt att mäta halten organiskt material i råvattenintag för dricksvatten. Andra användningsområden är att bevaka erosionsbenägna vattendrag, fånga viktiga episoder/perioder (exempelvis algblomning, lågt pH), användning vid övervakning av dagvatten, adaptiv provtagning för att fånga perioder med höga/låga koncentrationer, utvärdering av åtgärder samt fånga variation med korta tidsskalor (exempelvis dygnskykler). Vi föreslår att mätningarna med sensorer i den nationella miljöövervakningen permanentas och om möjligt utökas. Det skulle ge möjlighet att bygga upp tidsserier med högfrekventa data samt att testa nya typer av mätutrustning i takt med att de utvecklas. Det kommer även att ge ny värdefull kunskap kring den kortsiktiga variationen av vattenkemiska parametrar, vilket tillför ett viktigt komplement till den idag långsiktiga beskrivningen av tillståndet i Sveriges vattenmiljö.

*Nyckelord:* in-situ sensorer, nationell miljöövervakning, övervakningsprogram

# Förord

Denna rapport är en utvärdering av de senaste årens pilotverksamhet med sensorer i vattendrag och utgör delredovisningen av överenskommelsen med dnr 1481-22. Pilotverksamheten har finansierats med överenskommelserna 2717-2016, 3592-2020, 4403-2020, 1365-21 som omfattar inköp, installation och drift av ett antal sensorer och tillhörande utrustning. I utvärderingen ingår även den verksamhet med sensorer som bedrivits av SLU inom ramen för EU-Life projektet Rich Waters, som HaV även bidragit med motfinansiering till.

Ett stort bidrag till utvärderingen av data från sensorerna har kommit från flera examensarbetare på SLU vars uppsatser på kandidat och mastersnivå hänvisas till i rapporten. Vi har även haft stor hjälp av Niklas Strömbeck på Luode och Anton Larsson på AddSitu som levererat utrustningen och bidragit med support på olika sätt.

Pilotverksamheten som HaV har finansierat har gjort det möjligt att bygga upp kompetens, infrastruktur och kontaktnät kring mätningar med sensorer. Det är vår förhoppning att rapporten ska leda till en långsiktig verksamhet med sensorer i den nationella miljöövervakningen i vattendrag.

Uppsala januari 2023.

Emma Lannergård och Jens Fölster

# Innehållsförteckning

<b>1. Inledning.....</b>	<b>6</b>
1.1. Syfte och frågeställning .....	7
<b>2. Beskrivning av nuläget .....</b>	<b>8</b>
2.1. Sensorer och telemetri .....	8
2.1.1. Praktiska erfarenheter .....	10
2.2. Kontinuerligt arbete för data av god kvalitet.....	11
<b>3. Användningsområden .....</b>	<b>14</b>
3.1. Variationen av vattenkvaliteten .....	14
3.1.1. Turbiditet som en proxy för suspenderat material och totalfosfor.....	15
3.1.2. Transportberäkningar .....	16
3.1.3. Erosion.....	17
3.2. Klorofyll och cyanobakterier .....	18
3.3. Surstötter .....	20
3.4. Adaptiv provtagning .....	21
3.5. Klimatförändringar .....	21
<b>4. Andra användningsområden .....</b>	<b>23</b>
4.1. Biologiska processer .....	23
4.2. Koldioxid i vattnet .....	23
4.3. Hydromorfologi och partikeltransport.....	24
<b>5. Förslag: sensorer i nationell miljöövervakning av vattendrag .....</b>	<b>25</b>
5.1. Motiv .....	25
5.2. Förslag på program .....	26
5.2. Kostnadsuppskattning.....	27
5.3. Risker .....	28
<b>6. Framtidsutsikter .....</b>	<b>29</b>
<b>7. Slutsatser och rekommendationer .....</b>	<b>31</b>
<b>Referenser .....</b>	<b>33</b>

# 1. Inledning

Syftet med den nationella miljöövervakningen är bland annat att beskriva tillståndet i vattenmiljön samt skapa underlag för att följa upp åtgärder (Havs och vattenmyndigheten, 2022). Miljöövervakningen av vattenkemi i vattendrag bedrivs med månadsvisa stickprover av vatten som analyseras på lab. Hur väl den månadsvisa provtagningen beskriver variationen i vattendrag och i vilka situationer informationen är bristfällig är återkommande frågor. Med in-situ sensorer som är monterade i vattendraget och mäter kontinuerligt, blir det möjligt att visa hur representativ den månatliga provtagningen är, men också få en bättre beskrivning av variationen i vattenkvalitet och få bättre uppskattningar av ämnestransporter. En in-situ sensor kan mäta vattenkemiska parametrar, enligt en förbestämd frekvens exempelvis var 15:e minut (t. ex. pH, konduktivitet, turbiditet, nitrat, fluorescerande organiskt material (fDOM), löst syrgas och klorofyll). Därmed skapas information där variationen på kort och lång sikt (exempelvis dygn, säsong, regneepisoder och snösmältning) kan ge förståelse över de faktiska förändringarna i miljön.

Institutionen för vatten och miljö på SLU har använt in-situ sensorer i vattendrag sedan 2012. Mätningarna har gett värdefulla mätdata, men också värdefulla erfarenheter om teknikens möjligheter och begränsningar, praktiskt handhavande och datahantering. Efter den stora skogsbranden i Västmanland 2014 erhöll SLU medel för två sonder med sensorer för att följa upp effekterna av branden i vattendragen som avvattnade brandområdet (Köhler m.fl., 2018). Sedan 2016 har SLU erhållit medel från HaV för att bedriva en pilotverksamhet med sensorer i den nationella miljöövervakningen i vattendrag. Från början var huvudsyftet att bättre kvantifiera transporter i flodmynningar, men utvecklingen av kompetens och rutiner kring mätningar och datahantering var också en viktig del. Sedan 2017 bedriver SLU också mätningar med sensorer i mindre vattendrag inom EU-Life projektet Rich Waters, även det delvis motfinansierat av HaV. Vid sidan av dessa myndighetsuppdrag genomförs mätningar med sensorer i externa uppdrag och inom egen forskning. Från 2016-2022 har mellan sju till åtta vattendrag övervakats med in-situ sensorer (tabell 1), vilket lett till de erfarenheter och rekommendationer som presenteras i denna rapport och i tidigare rapporter och studier (Fölster m.fl., 2019; Ottander, 2019; Haglund, 2021; Lannergård m.fl., 2019; Lannergård m.fl., 2021). Tre av dessa sensorer har varit placerade i flodmynningar och ytterligare tre i vattendrag samt två i en dagvattenpark av intresse för projektet Rich Waters. En

stor utmaning vid mätning med sensorer är att kvalitetssäkra den stora datamängd som genereras. Idag arbetar vi med en kvalitetssäkrad process som ständigt utvecklas, och som omfattar kontroll och underhåll av sensorerna samt kvalitetssäkring och lagring av data. En standard för installation och hantering av in-situ sensorer utvecklas för närvarande av europeiska standardiseringsorganisationen (CEN), där SLU ingår i referensgruppen.

In-situ sensorer används inom nationell övervakning för att mäta turbiditet exempelvis i Irland (sex vattendrag sedan 2009) och Norge (fyra vattendrag sedan 2013) (Skarbøvik m.fl., *under review*). Utöver det finns strategier hur dessa ska implementeras i Danmark och Finland. Det finns även statligt finansierade nätverk av sensorer som mäter löst syre och nitrat i USA (Rode m.fl., 2016). I övrigt används tekniken ofta inom dricksvattenverk som kräver kontinuerlig övervakning av vattenkvalitet (Cascone m.fl., 2022), men även inom forskningsprojekt, av forskningsinstitut (t. ex. IVL som arbetar med sensorer inom både vattenreningsverk och dagvatten) och för att utvärdera specifika åtgärder (exempelvis dagvattenparken i Gottsunda, kopplad till projektet Rich Waters).

## 1.1. Syfte och frågeställning

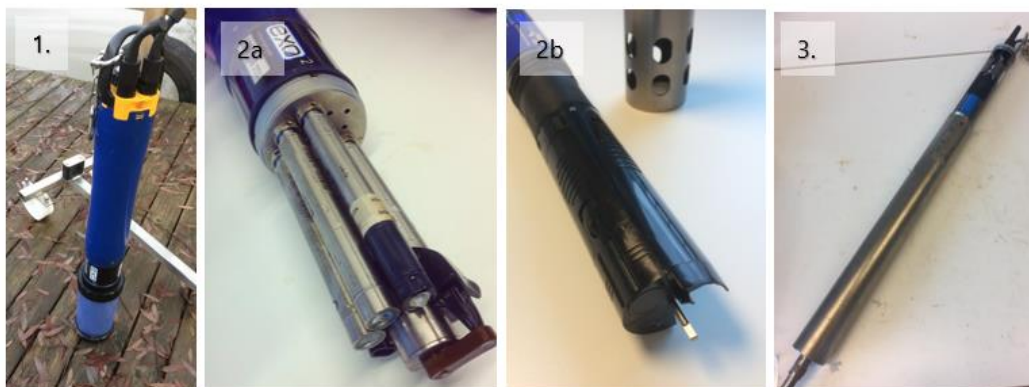
Syftet med denna rapport är att utvärdera den pilotverksamhet som institutionen bedrivit på uppdrag av HaV för att undersöka in-situ sensorers användbarhet i nationell miljöövervakning i vattendrag. Frågor som rapporten ska besvara är:

- Hur används in-situ sensorer idag?
- Vid vilka frågeställningar kan in-situ sensorer ge värdefull information?
- Hur kan in-situ sensorer implementeras på ett kostnadseffektivt sätt i nationell miljöövervakning?
- Finns identifierade risker och kan dessa i så fall överbryggas?

## 2. Beskrivning av nuläget

### 2.1. Sensorer och telemetri

En in-situ sensor består av (1) sonden, (2) sensorerna som monteras på sonden (exempelvis temperatur, tryck, pH, konduktivitet, turbiditet, redox, fDOM, nitrat, löst syre, klorofyll och cyanobakterier) och i vissa fall en (3) telemetrienhet vars uppgift är att sända data till en server (Figur 1). En noggrann genomgång av de olika typerna av sensorer som finns tillgängliga finns i Fölster m.fl. (2019).



*Figur 1. Bild ett visar sonden, bild 2a och 2b två olika fabrikat av sensorer och hur de kan monteras, bild tre visar en telemetrienhet.*

Efter att ha undersökt marknaden med sonder för mätning av vattenkvalitet valde vi att använda två modeller i pilotverksamheten: YSI EXO2 och InSitu Aquatroll. Sensorer har använts på olika platser i landet med följande syften; (1) att undersöka transporter av olika ämnen, (2) utvärdera effekter av åtgärder (exempelvis anläggning av en dagvattendamm/våtmark), (3) utvärdera turbiditet som en proxy för totalfosfor (TP), suspenderat material (TSS) och metaller samt (4) erosion (tabell 1).



Tabell 1. Plats, år sensorn installerades, fabrikat, om sensorn hanteras av extern personal utanför SLU (X=Ja) samt syfte med datainhämtningen.

Plats	Installation	Modell	Extern personal	Projekt
Sävjaån, Uppsala	2012	Flertal olika	-	Forskning
Fyrisån, Uppsala	2017	EXO2	-	HaV
Dalälven, Älvkarleby	2018	EXO2	X	HaV
Skivarpsån, Skivarp	2018	EXO2	X	HaV
Hågaån, Uppsala	2018	Aquatroll 600	-	Rich Waters
Kilaån, Nyköping	2019	Aquatroll 600	X	Rich Waters
Nyköpingsån, Nyköping	2021	Aquatroll 600	X	Rich Waters
Julmyrabäcken, Julmyra	2019-2020	Aquatroll 600	X	Rich Waters
Sagån, Sala	2020	Aquatroll 600	-	Uppdrag
Gottsunda vattenparker, Uppsala	2021	Aquatroll 600	-	Rich Waters
Lärjeån, Lärjeholm	2022	Aquatroll 600	X	HaV

De parametrar som ingick i pilotverksamheten på SLU redovisas i tabell 2, men det sker en ständig utveckling av nya sensorer som möjliggör mätning av nya parametrar. Vanligtvis kan 4-6 parametrar väljas för en in-situ sensor (beroende på vilket utbud företaget har som säljer sensorn). Tryck, temperatur, konduktivitet, pH, fDOM (fluorescerande delen av organiskt material), nitrat, löst syre, redox och turbiditet är parametrar som använts för SLU:s sensorer i olika kombinationer. Övriga parametrar som är möjliga att mäta är exempelvis klorofyll a, cyanobakterier (BGA-PC) och ammonium. Klorofyll a har testats vid utloppet av en sjö (Nyköpingsån) men där har stora problem med algpåväxt uppstått. En ammoniumsensor och en enklare typ av nitratsensor (jonselektivt membran) testades under en period, men den fungerade mindre bra i svenska vatten, troligen på grund av känslighet för turbiditet och vattenfärg. Den nitratsensor som nu testas, med bättre resultat, bygger på optiska mätningar.

Tabell 2. De olika parametrarna som använts under delar av mätperioden/hela perioden in-situ sensorn varit installerad.

	Kond	fDOM	pH	Nitrat	DO	Redox	Turbiditet
Sävjaån, Uppsala	X	X	X				X
Fyrisån, Uppsala	X	X	X	X	X		X
Dalälven, Älvkarleby	X	X	X		X		X
Skivarpsån, Skivarp	X	X	X		X		X
Hågaån, Uppsala	X				X		X
Kilaån, Nyköping	X				X		X
Nyköpingsån, Spånga	X		X		X	X	X

Julmyrabäcken, Julmyra	X		X				X
Sagån, Sala	X		X			X	X
Gottsunda vattenparker, Uppsala	X		X		X	X	X
Lärjeån,	X		X		X	X	X



Figur 2. Exempel på installation i strandkanten.

### 2.1.1. Praktiska erfarenheter

Många praktiska erfarenheter har erhållits under åren. Gällande val av lokal och installation kan mer information hittas i Fölster m.fl. (2019) och exempel på installation ses i Figur 2. Här följer en lista som kan vara av relevans för implementering inom den nationella miljöövervakningen:

1. Placering av in-situ sensorer bör ske i anslutning till befintlig miljöövervakning av vattenkemi för att möjliggöra kvalitetssäkring och utvärdering av data från sensorerna.
2. In-situ sensorerna behöver regelbundet underhåll (exempelvis månadsvis) för att förhindra perioder utan data eller data med begränsad användning. Främst består det i byte av batterier, rengöring och kalibrering av vissa sensorer, men det kan även handla om borttagande av biologisk påväxt som borsten inte klarar av att ta bort, djur (iglar), problem med sensorborste eller telemetrienhet. Den löpande kontrollen av data via telemetrin kan också föranleda extra tillsyn om data indikerar att det inte fungerar som det ska. Rengöring och batteribyte kan göras av närboende eller provtagare som ändå är på platsen för att ta vattenprover. Mer avancerat underhåll som kalibrering i fält, eller felsökning kräver en mer tekniskt kunnig person. För utrustning på längre avstånd från den ansvarige institutionen är det då en stor fördel att ha tillgång till lokal personal så man kan undvika långa resor.

3. Insamlad data behöver kvalitetsgranskas innan den kan analyseras och göras tillgänglig för andra användare. Detta kan till stor del göras genom automatiska script, men ett visst mått av manuell granskning av utbildad personal är nödvändigt.
4. In-situ sensorer har en begränsad livslängd, liksom de flesta elektroniska produkter, och en investeringskostnad per sond bör finnas med i beräkningen exempelvis var 10:e år. Dessutom behöver delar bytas med jämna mellanrum på grund av slitage (borstar, o-ringar, enstaka sensorer m. m).

## 2.2. Kontinuerligt arbete för data av god kvalitet

För att säkerställa kvaliteten på data som samlas in krävs kontinuerligt arbete i fält, på lab och med datahantering och bearbetning (Figur 3). Vid långsiktig användning av in-situ sensorer produceras stora mängder data (exempelvis 35 000 observationer/år/provtagningsplats). Dessa data behöver kvalitetskontrolleras, lagras och tillgängliggöras.

Innan installation av sensorn väljs en lämplig plats (mer information i Fölster m.fl., 2019), och sensorn kontrolleras mot kända kalibreringslösningar på lab. Samtliga av de använda sensorerna har monterats i PEX-rör, oftast i strandkanten på vattendraget (Figur 2). Röränden i vattnet är placerat strategiskt för att få ett representativt mått på vattenkemin, t.ex. tillräckligt långt ut och på ett visst djup. I den andra änden (belägen på stranden) finns möjlighet att sätta lås för att motverka skadegörelse och stöld. Röret är monterat så att in-situ sensorn är belägen tillräckligt djupt under vattnet för att inte frysa sönder. Sonden kan enkelt dras upp och ned i röret vilket bidrar till en trygg och praktisk arbetsmiljö vid underhåll och reparationer.

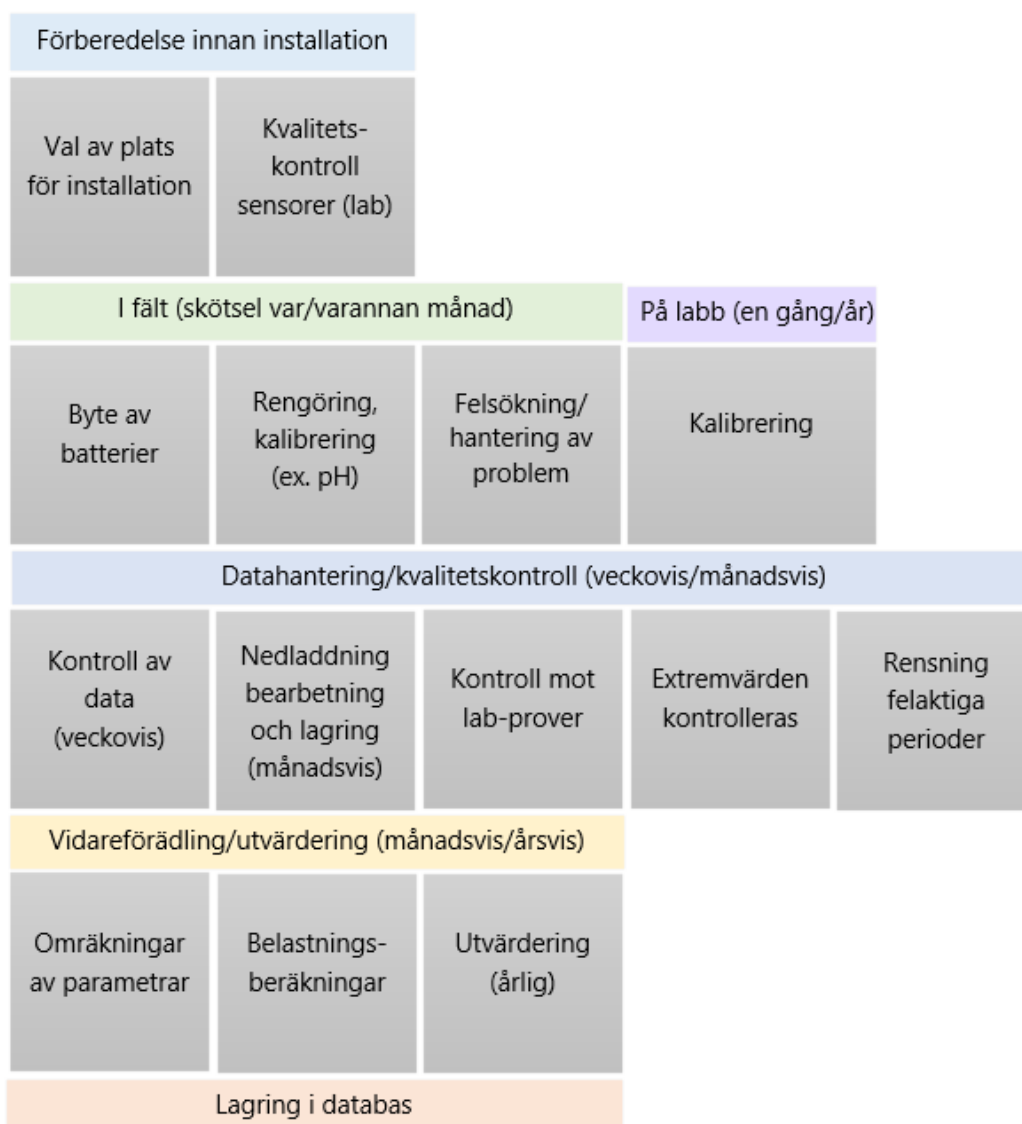
När sensorn placerats ut samlar den in data ett givet tidsintervall (t.ex. var 15e minut) och sänder data genom en telemetrienheter vid ett givet tidsintervall (t.ex. varje timme). Underhåll av sond och sensorer i form av rengöring och batteribyte, samt eventuell kalibrering av pH görs i regel varje 1-2 månader av personal på SLU eller extern personal som bor eller arbetar i närheten av platser där sonden är placerad. Utöver det kalibreras samtliga sensorer på lab en gång per år enligt en dokumenterad process för att säkerställa hög kvalitet på mätningarna. Genom telemetrien kan en kontinuerlig kontroll (veckovis) utföras från kontoret där avvikande värden och potentiella problem kan upptäckas tidigt och därefter åtgärdas, telemetri har använts för samtliga in-situ sensorer.

Data laddas ned varje månad för kvalitetsgranskning vilket innefattar (1) en jämförelse med uppmätta labprover under perioden, (2) felaktiga värden kontrolleras och (3) felaktiga perioder rensas bort. Data jämförs med manuella

prover analyserade på lab för att säkerställa att sensorvärdena håller sig inom förväntat intervall jämfört med analysresultaten. Felaktiga värden (nollvärden eller spikar) utan känd förklaring tas bort enligt förutbestämda formler och regler. Eventuell drift i samband med underhåll, kalibrering, påväxt noteras och lämplig åtgärd vidtas, exempelvis postkalibrering eller att data tas bort ur datasetet.

När kvaliteten på data säkerställts kan den aggregeras till tim- eller dygnsvärden, kombineras med flödesdata för belastningsinformation (kg/dag) och beräkningar kan göras för att jämföra fDOM med DOC. En årlig utvärdering av datan görs för samtliga stationer. Efter det lagras datan i en databas, som för närvarande är intern.

Inom några år kommer hela processen att standardiseras enligt internationella standarder som är under framtagande. Datan ska sedan göras tillgänglig hos datavärd. Diskussioner förs med ansvariga för SITES (nationell infrastruktur för terrester och limnologisk fältforskning) kring hur detta kan göras på bästa sätt.



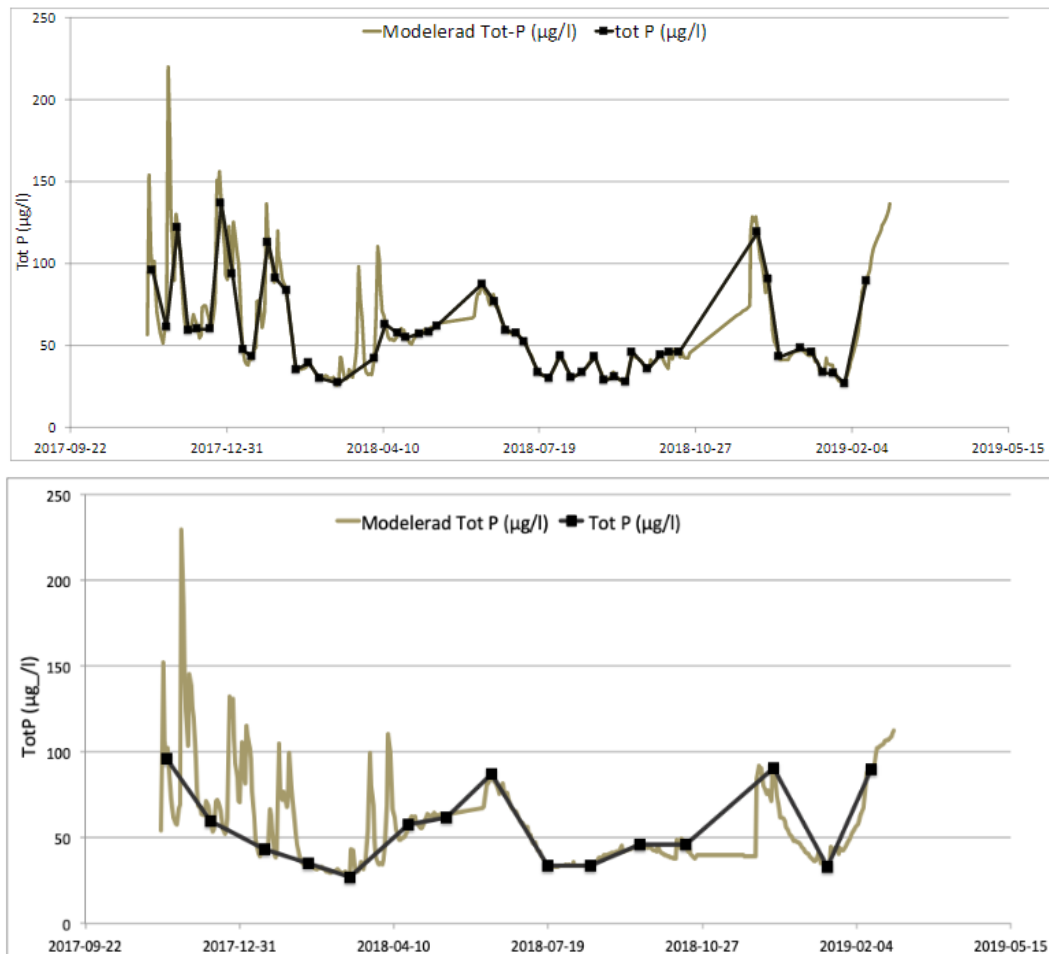
Figur 3. Kontinuerligt arbete som görs vid användning av in-situ sensorer, från installation till lagring i databas.

## 3. Användningsområden

### 3.1. Variationen av vattenkvaliteten

Miljöövervakningens provtagning med stickprov och labanalyser ger bara ögonblicksbilder av vattenkvaliteten vilket gör att viktiga aspekter av vattendragets egenskaper kan förbises. Kortvariga toppar av fosfor och nitrat kan ha stor påverkan på lokal övergödning i vattendragen (Jarvie m.fl., 2005), men även för den årliga belastningen (Cassidy och Jordan, 2011). Med månadsvis övervakning finns en överhängande risk att dessa höga koncentrationer inte fångas av provtagningen. Detta gäller särskilt för vattendrag med stor variation i flödet (Johnes, 2007), ofta med avrinning från mindre områden som exempelvis är dikade eller med mycket hårdgjorda ytor. Nitrat kan mätas av sensorer direkt i vattendraget, vilket till exempel sker i Fyrisån Flottsund i den pågående pilotverksamheten. Fosfor å andra sidan kräver kemiska analyser, vilket gör parametern mer komplicerad att mäta med sensorer direkt i vattendraget. Ofta används turbiditet som en proxy för TP (ex. Lannergård m.fl., 2019) och även för TSS (Ruzycki m.fl., 2014; Jones m.fl., 2012; Stubblefield m.fl., 2008).

Erfarenheterna från pilotverksamheten och andra studier visar att behovet av mätfrekvens varierar mycket beroende på vattendragets karaktär och frågeställning. En utvärdering av data från Kilaån visade exempelvis att veckovis provtagning av vattenkemi är ett bra underlag för belastningsberäkningar (Ottander, 2019) (Figur 4), medan det i dagvatteninloppet i Gottsunda behövs provtagning flera gånger i timmen för att få en representativ bild. För specifika frågor, i vatten med mycket kortsiktig variation är sensorer outhärliga. Med högfrekventa mätningar med sensorer kan man få en korrekt beskrivning av fördelningen av vattenkvalitet över tid och en säkrare uppskattning av ämnestransporter. Dynamiken kan även användas för att förstå processer som styr mobiliseringen av lösta och partikulära ämnen i avrinningsområdet.



Figur 4. Total fosfor (Tot-P) som beräknats med hjälp av förhållandet mellan turbiditet och Tot-P beskrivs som "Modelerad Tot-P" (grön linje), uppmätt Tot-P är indikerad som svarta markörer. Den övre panelen beskriver veckovis tillgång stickprov, den undre panelen månadsvis. Publicerad med tillåtelse av Ottander 2019.

### 3.1.1. Turbiditet som en proxy för suspenderat material och totalfosfor

Användning av turbiditet som en proxy för TSS och TP är vanligt förekommande (Gippel, 1995; Villa m.fl., 2019; Lannergård m.fl., 2019). I Villa m.fl., (2019) undersöktes sambandet mellan turbiditet och TP med linjär regression för 108 svenska övervakningsstationer. Korrelationskoefficienten ( $r^2$ ) varierade mellan 0,10 – 0,92, men var signifikant för 78 % av platserna. Styrkan på sambanden för enskilda vattendrag har visat sig vara svårt att förutsäga då de beror på till exempel partikelstorlek, form (Gippel m.fl., 1995) och typ av fosfor i vattendraget (Stubblefield m.fl., 2007) men även på idag okända faktorer. I de fall där stickprover visar ett gott samband mellan turbiditet och TP eller TSS, har denna metod visat sig vara användbar för att undersöka parametrarnas korttidsvariation.

Sambandet mellan turbiditet och TP undersöktes i sju av de vattendrag som ingick i pilotstudien. I dessa vattendrag varierade  $r^2$ -värdet mellan 0.45-0.96 (Haglund, 2021). I studien visades även att årstiden hade betydelse för sambanden vilket kan bero på både typ av partiklar i vattendraget under olika årstider och på att flödesregimen varierar med till exempel lägre flöden under sommaren.

#### *Markanvändning och jordtyp*

Även om det är svårt att på förhand säga hur sambandet mellan turbiditet och TP respektive TSS kommer att se ut kan vissa samband med markanvändning och jordtyp konstateras. I en studie som gjordes av Fölster och Rönnback (2015) visades att sambandet mellan turbiditet och TSS var god i områden med avrinning från lerjordar, vidare visade en annan studie att områden med högre andel jordbruksmark gav starkare samband (Villa m.fl., 2019).

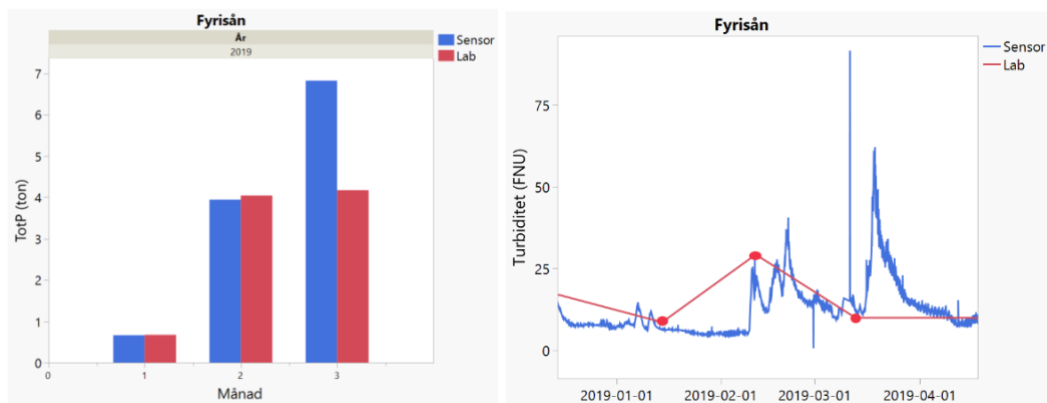
Kartdata avseende markanvändning och jordtyp har undersökts i relation till styrkan i de olika sambanden för stationerna som övervakas genom övervakningsprogrammet Flodmynningar (Hoang, 2017; Carlsson, 2022). I Hoang (2017) kunde inga starka samband hittas mellan landskapsfaktorer och korrelationen mellan TP och turbiditet. I Carlsson (2022) däremot hade avrinningsområden med hög andel jordbruksmark och lerhalt bra korrelationer mellan turbiditet och TSS. I Carlsson (2022) användes den digitala åkermarkskartan (DSMS) jämfört med Hoang (2017) som använde SGU:s jordartskarta.

### **3.1.2. Transportberäkningar**

Transportberäkningar av TP och TSS kan grundas på högfrekvent data (om turbiditet används som en proxy). Belastningsberäkningar grundat på fler prover minskar osäkerhet i beräkningarna, då den faktiska variationen i koncentrationer inkluderas. Fler studier har jämfört belastningar beräknade med stickprover/linjär interpolering i relation till belastning beräknad från högfrekvent data (Lannergård m.fl., 2019; Villa m.fl., 2019; Haglund, 2021). I Villa m.fl. (2019) gjordes jämförelserna i ett av typområdena i den nationella miljöövervakningen av jordbruksmark (U8, 6 km<sup>2</sup>) och där kunde generellt högre belastningar från den högfrekventa datan konstaterades. Haglund (2021) undersökte sju olika vattendrag och jämförde belastningsberäkningar (Figur 5). I tre av de undersökta områdena (Hågaån, Skivarpsån och Sävjaån) var skillnaden mellan metoderna signifikant, och gav i samtliga fall högre belastning med högfrekvent data. En tidigare studie gjort på Sävjaån (Lannergård m.fl., 2019) visade dock stora skillnader mellan år. I ytterligare en annan studie i Kilaån gav högfrekvent data en 30 % högre belastning än belastning beräknat från stickprover (Ottander, 2019). Flödet har stor påverkan på dessa beräkningar och om ett stickprov tas vid en topp i koncentrationer och flöde så får det stor påverkan på resultatet (Lannergård m.fl., 2019). Därmed blir det extra viktigt med högfrekvent data under perioder med varierande flöde och



höga koncentrationer, exempelvis vinter, vår och höst (Lannergård m.fl., 2019; Haglund, 2021). Skillnaden mellan belastning beräknat på stickprov och från in-situ sensorn är störst i mindre avrinningsområden med hög lerhalt. I de flesta flodmynningar är månadsvis provtagning tillräcklig för att ge en långsiktigt representativ bild av transport av TP och TSS.



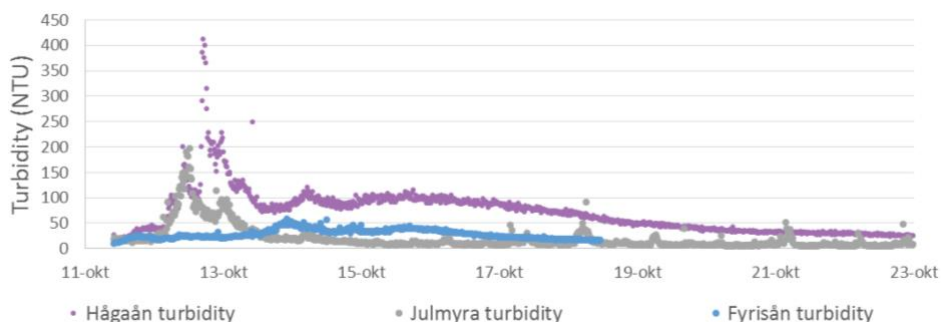
Figur 5. En jämförelse av sensor och labberäknad belastning. Till vänster ses ett stapeldiagram med jämförelse över tre månader, till höger hur labvärdena har interpolerats och hur uppmätt turbiditet räknats om till TP. Publicerat med tillåtelse av Haglund (Haglund, 2021).

### 3.1.3. Erosion

Vid analys av högfrekventa mätningar av turbiditet i förhållande till flöde kan olika mönster kopplat till mobilisering av partiklar upptäckas, även kallad hysteresis analys (Lannergård m.fl., 2021). I de fall turbiditetstoppen kommer före flödestoppen mobiliseras partiklarna snabbt, och när turbiditetstoppen kommer efter flödestoppen behövs mer kraft för att mobilisera partiklarna, alternativt transporteras de längre innan de når sensorn. Dessa mönster kan kopplas till olika faktorer, exempelvis väderförhållanden och markfuktighet. I en studie gjort på Sävjaån kunde snabba hysteresismönster kopplas till hög markfuktighet och vinter/vårsäsong, vilket visar att åtgärder för att förhindra snabb erosion är viktiga i detta avrinningsområde (exempelvis minimera bar mark och erosion i kantzoner) (Lannergård m.fl., 2021).

Den högfrekventa datan fångar den temporära variationen i halten partiklar i vattendraget. Därmed kan viktiga bakomliggande faktorer som påverkar erosion och höga halter TSS i vattendraget upptäckas, exempelvis väderförhållanden i kombination med markfuktighet, om området är bevuxet och hur det är dränerat. Med klimatförändringar förväntas erosion bli ett större problem till följd av extrem nederbörd på platser med hög risk för erosion, exempelvis områden med jordarter som domineras av mjåla och lera (Ulén & Jakobsson, 2005). Genom att övervaka erosionsbenägna platser, kan vi lära oss om hur och när vi ska sätta in åtgärder för att motverka erosion. I Figur 6 visas hur turbiditetsresponsen kan vara olika beroende på vattendragets karaktär, trots att nederbörden är likvärdig (60 mm över

några dagar). Där ses att Hågaån, som är ett lerdominerat vattendrag med hög andel jordbruksmark, ger en hög turbiditetstopp (~400 NTU), medan Julmyrabäcken (ett litet vattendrag omgivet av skog) ger en mindre turbiditetstopp (~200 NTU). Slutligen kan dessa två mindre vattendrag jämföras med Fyrisån, som reagerar cirka ett dygn efter de andra vattendragen med en betydligt mindre turbiditetstopp (~60 NTU). Detta indikerar att vissa vattendrag är mer erosionsbenägna och kommer att vara mer sårbara i ett förändrat klimat.

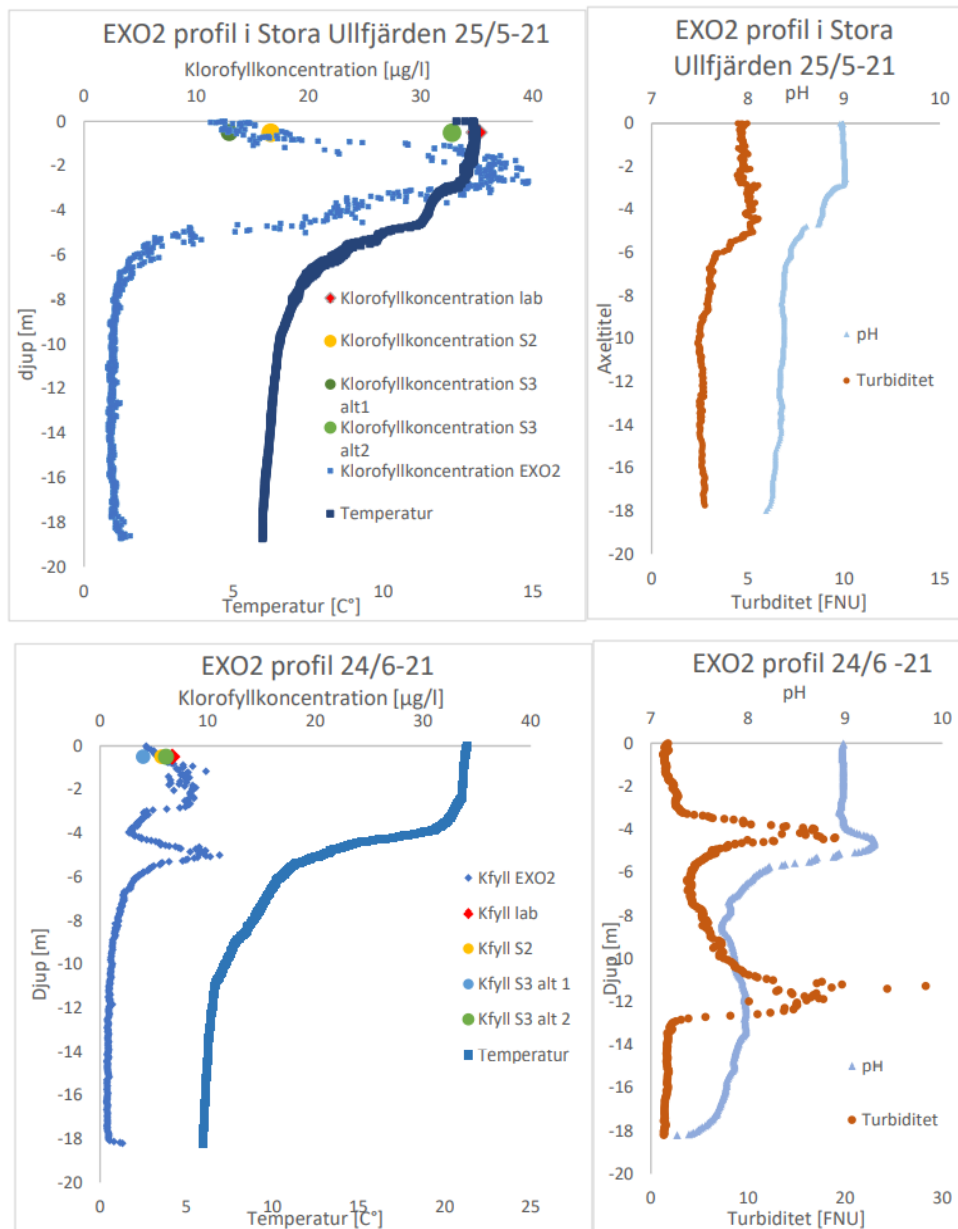


Figur 6. Turbiditetsvariationer över en period med intensiv nederbörd (ackumulerat 60 mm över några dagar) i tre olika vattendrag.

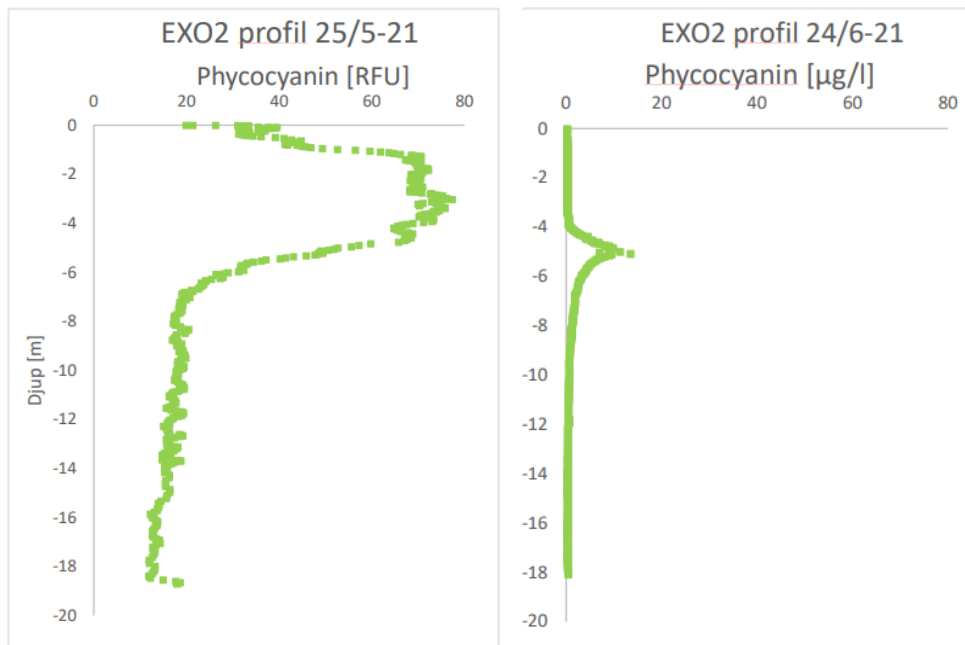
### 3.2. Klorofyll och cyanobakterier

Klorofyll och phycocyanin (indikator för cyanobakterier), mäts genom fluorescens och kan beskriva variationer i växtplankton i vattendrag och sjöar (Zeng & Li, 2015). Genom att koppla ihop variationer med andra parametrar, exempelvis temperatur, löst syre och turbiditet, kan vi skapa insyn i de processer som driver algbloomning. En klorofyllsensor har nyligen installerats på en av sonderna inom pilotprojektet, Nyköpingsån, där mätningarna sker vid utloppet av en sjö.

En mer utförlig testverksamhet med mätningar av klorofyll och phycocyanin har gjorts av SLU i anslutning till miljöövervakningen av Mälaren. Djupprofiler av klorofyll, phycocyanin, turbiditet och pH uppmättes i Mälaren (Stora Ullfjärden) för att undersöka potentialen av att skapa ett tidigt varningssystem för algbloomning. I Löf (2021) jämfördes data från sensormätta djupprofiler, labdata och satellitdata. Under mitten av maj när vattnet värmdes upp observerades stora variationer mellan ytvatten och djupare vatten avseende klorofyll, pH och phycocyanin (Figur 7 och 8). Vid andra tillfällen ökade halten klorofyll, men inte halten phycocyanin vilket indikerar att algbloomningen då drivs av andra alger.



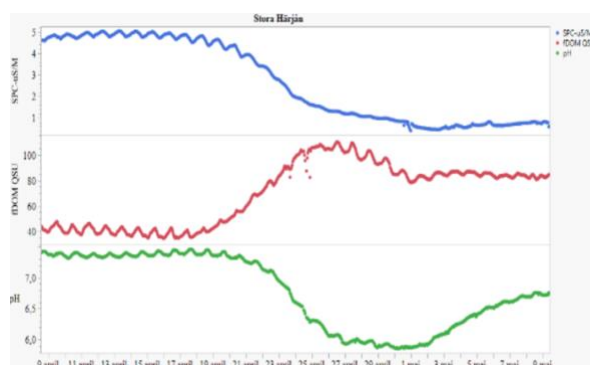
Figur 7. Djupprofiler uppmätta med en EXO2 sond i Stora Ullfjärden, vd två tillfällen av höga klorofyllhalter. Publicerad med tillåtelse av författaren (Löf, 2021).



Figur 8. Phycocyanin i mitten av Stora Ullfjärden vid två tillfällen av höga klorofyllhalter, vilket visar att 25/5 bestod en del av algbloomingen av cyanobakterier. Publicerad med tillstånd av författaren (Löf, 2021).

### 3.3. Surstötter

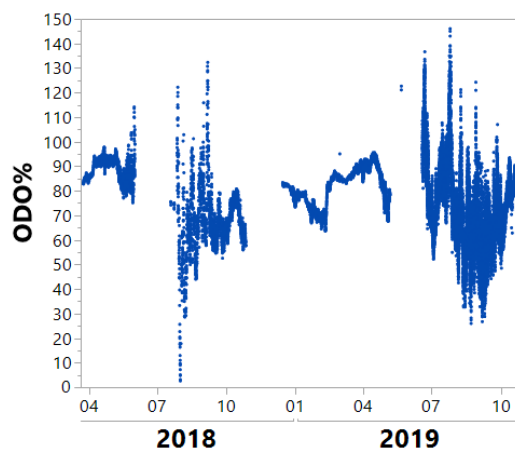
Länsstyrelsen i Jämtland har mätt pH, konduktivitet och löst organiskt material (fDOM) för att undersöka surstötter som vanligen inte fångas med månadsvis provtagning. I Figur 9 ses en försurningsepisod där pH och konduktivitet går ned under några veckor under våren medan fDOM ökar (Selin Norén, 2022). Detta visar dynamiken mellan organiskt material och pH, under högre flöden (konduktivitet späds ut) där organiska syror i det organiska materialet urlakas från marken och transporteras till vattendraget.



Figur 9. Försurningsepisod i Stora Härjeån, sensordata från 2019-2020. Konduktivitet (blå linje), fDOM (röd) och pH (grön). Från Selin Norén, 2022 (med tillåtelse).

### 3.4. Adaptiv provtagning

In-situ sensorer och telemetri ger möjlighet till att vattenkvaliteten kan övervakas i realtid, men det är inte alla ämnen av intresse som går att mäta med sensorer. Däremot kan sensorn via telemetri kopplas till ett larm så att en provtagare kan åka ut och ta ett extraprover när sensorerna indikerar extraordinära förhållanden. Ett exempel på det är i augusti 2018 då det kom 74 mm nederbörd på ett dygn i Uppsala, vilket innebar stor påverkan på vattenkemin i Fyrisån (Figur 10). En ovanligt låg syrenivå indicerade att ett extra stickprov togs som bekräftade den låga syrehalten och också visade höga halter ammonium. I såväl Skivarpsån och Hågaån tas extra vattenprover när turbiditeten överstiger ett tröskelvärde på 50 FNU. Ett sms skickas då till provtagaren som, om det är praktiskt möjligt, tar ett extra prov för labanalys. Detta har gjort det möjligt att få fler prover med höga nivåer på turbiditet och TP vilket ger säkrare skattningar av sambandet som används för beräkning av TP ur turbiditet. Andra möjliga implementeringar av detta är att ha ett larm när konduktivitet eller pH överstiger en viss gräns, såväl som klorofyll och phycocyanin som kan indikera algblomning. Larmnivåer från sensorer kan även användas till att styra automatiska provtagare.



Figur 10. Variation i syrehalt driven av stor mängd nederbörd, då löst syre närmade sig 0 inkom ett larm och extra prover togs för att undersöka variationen i vattenkemi parametrar som inte är möjliga att mäta med in-situ sensorn.

### 3.5. Klimatförändringar

I takt med att mätningarna med sensorer genererar långa tidsserier kan data användas för att analysera hur dynamiken i avrinningen påverkas av klimatförändringar. Klimatförändringar förväntas bidra till perioder med extrem nederbörd, högre temperaturer, mer regn men också en förändring av de typiska

säsonger vi är vana vid idag (Laguna Marín, 2022). Dessa förändringar kommer att påverka hydrologi och vattenkemi, på ett sätt vi inte kan förutse. En av de stora fördelarna med in-situ sensorer är att de på ett unikt sätt beskriver kortsiktig variation i vattendragen. Att redan nu skapa dataserier som fångar exempelvis episoder av extremt höga flöden för att se hur vattenkemin påverkas, kan hjälpa oss att förstå och bättre förbereda oss för de effekter som klimatförändringarna kommer att ge i olika typer av vattendrag. Även temperaturförändringar kan vara intressanta att övervaka för att förutsäga effekten av klimatförändringar idag och i framtiden.

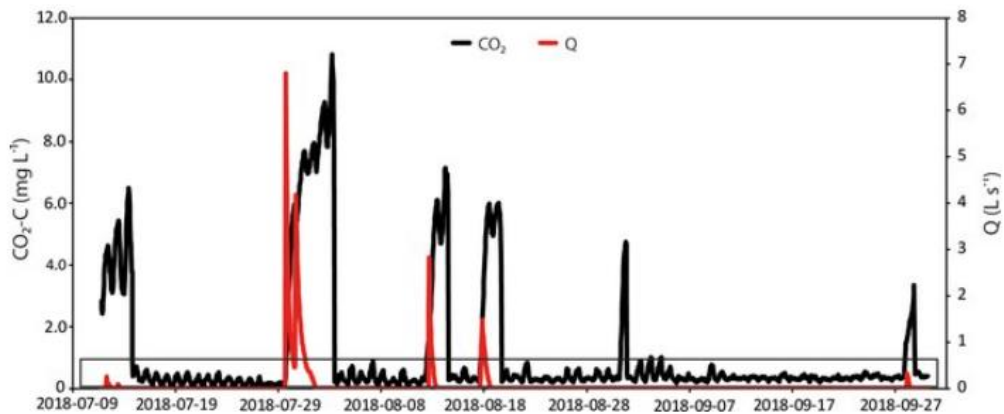
## 4. Andra användningsområden

### 4.1. Biologiska processer

Med fördjupad analys av dynamiken i de parametrar som redan nu kan mätas med sensorer kan man få kunskap om biologiska processer i vattendragen. Ett exempel på det är att dygnsvariationen av löst syre kan användas för att uppskatta metabolismen i vattendraget (Diamond m.fl., 2021). Metabolism och variation i löst syre kan användas för att förstå processer som styr omsättningen av organiskt material och hur kväve omsätts.

### 4.2. Koldioxid i vattnet

Inom forskningsprojekt på SLU används sensorer för löst koldioxid i vattendrag. Detta ger värdefull kunskap om hur hydrologiska och biologiska processer driver variabiliteten av koldioxid i vattendrag (Wallin m.fl., 2020). Under tider på året med växtlighet och låga flöden kontrollerar primärproduktionen i vattendraget koldioxidnivåerna, då dessa uppvisar tydliga dygnsmönster. Vid kraftigt regn efter en lång tid av torka, uppvisade sensordatan höga pulser av koldioxid i vattendraget vilka kan vara av betydelse för uppskattning av effekter av klimatförändringar (Figur 11). Sensorer för koldioxid är ännu inte tillräckligt robusta för att användas inom miljöövervakningen.



Figur 11. Dynamik i löst koldioxid i vatten kopplat till flöde i en jordbrukså (Wallin m.fl., 2020).

### 4.3. Hydromorfologi och partikeltransport

Implementeringen av EU:s ramdirektiv för vatten som bland annat lett till att alla vattendomar för vattenkraft planeras att omprövas har lett till ett ökat intresse för hur hydromorfologisk påverkan i allmänhet, och vattenkraft i synnerhet, påverkar vattenekosystemen. En del av påverkan utgörs av att mängden och dynamiken av partiklar i vattnet förändras. I dammar sker en sedimentation av partiklar medan korttidsreglering kan leda till ökad erosion under korta pulser med höga flöden. Genom att jämföra reglerade med oreglerade likvärdiga vattendrag kan man visa på effekten av dammar. Ett exempel på detta visades i en studie med dygnsvisa provtagningar av vattenkemi i Luleälven och Kalix älv (Rönback m. fl., 2009). Med sensorer blir sådana studier enklare och mer kostnadseffektiva att genomföra. För att studera effekterna av korttidsreglering är sensorer helt avgörande.



## 5. Förslag: sensorer i nationell miljöövervakning av vattendrag

### 5.1. Motiv

Övervakning med in-situ sensorer ger ett värdefullt komplement till den nuvarande miljöövervakningen med labanalyser av stickprov. Även om det än så länge bara är möjligt att mäta ett fåtal variabler, som i vissa fall innebär indirekt mätning, ger högfrekventa mätningar ny och värdefull kunskap om hur vattenkvaliteten varierar i olika tidsskalor. Mätningarna bidrar därigenom till att uppfylla kraven på den kontrollerande övervakningen i EU:s ramdirektiv för vatten. Det gäller både att ge underlag för att utforma effektiva mätprogram och att följa långsiktiga förändringar i naturliga förhållanden och effekter av storskalig påverkan (EU, 2000). Klimatförändringen förväntas ge mer extrema väder. Det räcker då inte att bara mäta trender i genomsnittliga halter utan förändring i variationen av vattenkvaliteten är minst lika viktig. Det gäller exempelvis en ökad frekvens och amplitud av extrema förhållanden. Mätningar med sensorer ger betydligt större möjligheter till sådana analyser.

Inledningsvis var SLU:s arbete inriktat på att förbättra transportberäkningar av TP och TSS baserat på turbiditetsmätningar samt att mäta halten organiskt material i råvattenintag för dricksvatten. Efter att ha arbetat med sensorer i tio år, ser vi att in-situ sensorer har bredare användningsområden än så. Vi ser också att möjligheterna kommer öka i framtiden i takt med att sensorer utvecklas. Vi föreslår därför att mätningarna med sensorer i den nationella miljöövervakningen permanentas och om möjligt utökas. Den kompetens och infrastruktur av mätningar med in-situ sensorer som har byggts kan då bibehållas och fortsätta att utvecklas gällande utrustning, datahantering, kvalitetskontroll och datavårdskap. Detta ger möjlighet att bygga upp tidsserier med högfrekventa data samt att testa nya typer av mätutrustning i takt med att de utvecklas. Utvecklingen bör ske i redan etablerade samarbeten med exempelvis fältforskningsinfrastrukturen SITES och med andra nordiska länder.

## 5.2. Förslag på program

Följande långsiktiga strategi för mätningar med sensorer inom den nationella miljöövervakningen föreslås:

- Nivå 1. I pilotprogrammet som pågått sedan 2017 ingår nu fem sonder. Vi föreslår att åtminstone dessa mätningar blir permanenta, i de flesta fall i samma lokaler som nu. Mätning med dessa sonder täcker typerna 1, 3 och 7 enligt tabell 3 (jordbruksvattendrag med högt läckage av TP, vattendrag med stor risk för erosion samt lokaler med komplex belastning). Detta innebär en underhållskostnad enligt tabell 4.
- Nivå 2. De fem sonder som köpts in inom EU-Life projektet Rich Waters tas över av den nationella miljöövervakningen när projektet avslutas 2023. Vattendragstyperna 2 och 5 enligt tabell 3 bör prioriteras i första hand (jordbruksvattendrag med sandjordar med läckage av nitrat samt fjällvatten). Denna nivå skulle innebära en underhållskostnad enligt tabell 4.
- Nivå 3. Framöver ser vi att sonder i ytterligare stationer vore värdefullt. Typerna 4 och 6 (försurade vatten och reglerade/oreglerade älvar) skulle vara givande att övervaka. Generellt bör in-situ sensorerna inom det nationella miljöövervakningsprogrammet vara geografiskt spridda över Sverige, men stor hänsyn ska tas till möjligheten att underhålla dem. Samtliga platser för sensorer bör läggas där det redan finns vattenkvalitetsdata sedan tidigare.

Tabell 3. Olika typer av lokaler för övervakning.

Typ	Beskrivning	Tillvägagångssätt
1	Jordbruksvattendrag med lerjordar med högt läckage av TP	I första hand mäts turbiditeten som proxy för TP för att få bättre uppskattningar av transport och följa trender i fosforläckagets dynamik.
2	Jordbruksvattendrag med sandjordar med läckage av nitrat	Framför allt mäts nitrat för att följa upp effekter av åtgärder.

3	Vattendrag med stor risk för erosion och jordskred	Turbiditeten mäts för att följa trender i frekvens och magnitud hos episoder med höga värden samt trender i transporten.
4	Försurade vattendrag under återhämtning	Konduktivitet, fDOM och pH mäts för att detektera surstötter och för att kunna härröra dessa till utspädning, organiska syror och mänsklig påverkan.
5	Fjällvattendrag	Ett flertal variabler kan mätas för att på lång sikt följa förändringar i dynamiken orsakade av klimatförändringen
6	Reglerade och oreglerade älvar	Mäta turbiditeten men även fDOM framför allt under vårfloden för att följa effekterna av klimatförändringen och regleringsstrategier.
7	Lokaler med komplex belastning	Metodutveckling. I kombination med syften enligt 1-6.

## 5.2 Kostnadsuppskattning

Underhållskostnaden utgörs till största delen av personalkostnader (datasammanställning, tillsyn på veckobasis, batteribyte, rengöring, kalibrering och hantering av uppkomna problem), övriga kostnader är kemikalier och datasystem för hantering av data (Tabell 4). Investeringskostnader varierar beroende på vilket fabrikat som väljs på sond och de parametrar som är av intresse, en schablonsumma på 180 tKr används i exemplet nedan. Detta inkluderar sond, sensor, telemetri och installation.

Tabell 4. Redovisning av investerings- och underhållskostnader i kr för de olika förslagen (nivå 1-3).

Plats	Investeringskostnad	Underhållskostnad/år
Nivå 1 (5 sonder)		150 000
Nivå 2 (10 sonder)		300 000
Nivå 3 ( <i>per sond</i> )	180 000	30 000

### 5.3. Risker

Följande risker för att ej uppnå målet med en långsiktig implementering har identifierats (tabell 5). I samtliga fall kan motåtgärder tillämpas för att motverka identifierade risker.

Tabell 5. Identifiering av olika risker, dess sannolikhet, allvarlighet och hur vi bemöter risken.

Problem	Sannolikhet	Allvarlighet	Kommentar
Kvaliteten på data är inte bra nog för användning	Låg	Hög	I vår metodik för kvalitetskontroll upptäcks problem med data i ett tidigt skede vilket gör att problemet kan åtgärdas
Kortsiktig finansiering gör det svårt att driva en långsiktig infrastruktur inom nationell övervakning	Medel	Hög	Personal behövs för att bedriva föreslagen verksamhet, utebliven finansiering skulle påverka datatillgång och kvalitet.
Problem med utrustningen skapar hål i dataserier	Hög	Låg	Vid korrekt underhåll och tillgång på personal kan fel tidigt upptäckas och åtgärdas.

### 5.4 Samarbete

Arbetet med in-situ sensorer är en kontaktyta för många olika aktörer, vilket skapar möjligheter till samarbete. Samarbete har tidigare förekommit med länsstyrelser, kommuner, konsultföretag och IVL kring specifika miljöproblem (exempelvis försurning, dagvatten och åtgärdsuppföljning). Ett samarbete har upprättats med forskningsinfrastrukturen SITES gällande erfarenhetsutbyte kring lagring och kvalitetssäkring av högfrekvent data. Vidare har samarbeten upprättats med andra universitet (ex. Uppsala universitet) kring utvecklandet av ny teknik.

## 6. Framtidsutsikter

Utvecklingen av nya sensorer av olika slag är ett mycket expansivt och brett område för forskning och utveckling på global nivå. Det handlar både om att kunna mäta fler parametrar och att minska kostnaden per mätenhet. Att mäta med sensorer kontinuerligt året runt i ett vattendrag utan ständig tillsyn ställer dock höga krav på utrustningen. Det gör att många sensorer som utvecklas inte kommer att kunna användas i miljöövervakning, även om de mäter parametrar värdefulla för vattenförvaltning och forskning. Flera initiativ är dock intressanta att följa i närtid.

Sensorer för nitrat ( $\text{NO}_3$ ) och ammonium ( $\text{NH}_4$ ) baserade på jonselektiva membran har funnits tillgängliga ett tag. Våra erfarenheter hittills är att dessa inte klarar av mätningar under längre tid i jordbruksvattendrag, troligen på grund av att de förstörs av humus i vattnet. En mer lovande teknologi för nitrat är baserad på absorbansspektrometri inom UV-intervallet. En sådan sensor finns installerad på en av sonerna inom pilotprojektet. Det som gjort det möjligt är utvecklingen av energisnåla UV-LED lampor. Flera utvecklingsprojekt rör utvecklingen av fluorespektrometri som är samma princip som redan används för fDOM. Genom att kunna mäta fluorescens för fler våglängder tillräckligt energisnålt hoppas man kunna mäta till exempel fosfat ( $\text{PO}_4$ ), flera kvalitetsaspekter på det lösta organiska materialet och olika typer av organiska föroreningar som exempelvis oljespill (Muntlig kommunikation, Strömbäck, 2022).

Mer högteknologiska exempel på sensorutveckling är arbetet på institutionen för materialvetenskap och elektroteknik på Uppsala universitet där biokemiska sensorer baserade på kiselteknologi och nanopartikel/nanostrukturer utvecklas. Redan idag finns grafen/kiselbaserade sensorer som kan mäta jonstyrka, redox samt pH i vatten (Angizi m.fl., 2022). En stor utmaning inom detta fält är dock att mäta specifika joner, exempelvis  $\text{PO}_4\text{-P}$  i jonstarka vatten med potentiell hög humus/suspenderat materialhalt.

Ett alternativ till olika typer av direkta mätningar är sonder med miniatyrlab som analyserar fraktioner av fosfor och kväve med samma metoder som på lab (Figur 12). Dessa sonder är än så länge betydligt dyrare än de sonder med sensorer vi hitills provat och kräver regelbunden påfyllning av reagens. Erfarenheter från kollegor på andra universitet har visat att dessa sonder kräver mkt underhåll, då tillväxt av alger och biofilm skett på slangar och i utrustningens olika delar (Chen & Crossman, 2021). SLU kommer under kommande år att testa denna typ av utrustning i ett

pilotprojekt i samarbete med Ljusnan-Voxnans vattenförbund för att undersöka för- och nackdelar.

Ett annat område under utveckling är om e-colibakterier skulle kunna mätas kontinuerligt i vatten med hjälp av DNA-sekvensering.



Figur 12. WIZ-probe som mäter ex.  $PO_4-P$  och  $TP$ . [www.systea.it](http://www.systea.it)

I takt med att sensorer utvecklas och bli mer robusta skulle det finnas möjlighet att glesa ut befintlig vattenprovtagning (exempelvis till varannan månad istället för varje månad) och istället använda resultaten från in-situ sensorn i högre utsträckning vid utvärdering av vattenkvaliteten. Med ett kvalitetscertifierat arbetssätt skulle då dessa mätningar vara ett fullgott alternativ till traditionell provtagning, med mervärden gällande insyn i korttidsvariation.

## 7. Slutsatser och rekommendationer

Våra erfarenheter av tio års mätningar med sensorer i vattendrag med pågående ordinarie mätprogram har visat att de tillför värdefull information om den kortsiktiga variationen av vattenkvaliteten. Det gör det möjligt att bättre beskriva tillståndet i vattenmiljön, få bättre uppskattningar av ämne-transporten samt ge underlag för att följa upp åtgärder. Användningsområden där in-situ sensorerna ger ökad kunskap omfattar dynamik i näringsämnen och suspenderat material (kopplat till transportberäkningar och erosion), algblomning och surstötter. Sensorer ger också möjlighet till adaptiv provtagning så att extra vattenprover kan tas under extrema episoder. Vidare ger in-situ sensorerna kunskap kring korttidsvariation kopplat till klimatförändringar, exempelvis extrem nederbörd, men även insyn i hur olika vattendrag är sårbara för dessa typer av händelser. På detta sätt kan sensormätningar väsentligt bidra till att uppfylla målen med den kontrollerande övervakningen att utforma effektiva mätprogram och att följa långsiktiga förändringar i naturliga förhållanden samt effekter av storskalig påverkan.

Följande förslag på långsiktig implementering av in-situ sensorer i nationell miljöövervakning föreslås:

- Nivå 1: De fem sonder som ingått i det pilotprojekt som finansierats med hjälp av HaV permanentas. Detta är ett kostnadseffektivt första steg, då det skulle innebära att SLU använder det redan utarbetade systemet för underhåll, datahantering och kvalitetskontroll. I 4 av 5 fall används redan befintliga lokaler, som innefattar jordbruksåar med hög belastning av TP, vattendrag med hög erosionsrisk samt komplex miljöpåverkan. Detta alternativ innebär en underhållskostnad på 150 000 kr/år för samtliga fem sensorer.
- Nivå 2: Ytterligare fem sonder som tidigare ingått i projektet Rich Waters inkluderas i den nationella miljöövervakningen från och med 2024. Här finns möjlighet att behålla eller flytta dessa till nya lokaler. Typer av vattendrag som bör prioriteras är jordbruksåar med nitratproblematik samt fjällvatten. Detta alternativ innebär en underhållskostnad på 300 000 kr/år för samtliga tio sensorer.

- Nivå 3: Investering i ytterligare sonder, där investeringskostnaden uppskattas till 180 000 kr per sond och en underhållskostnad på 30 000 kr/år och sond. Typer av vattendrag som föreslås övervakas är oreglerade älvar och försurningspåverkade vattendrag.

En långsiktig finansiering av mätningarna gör det möjligt att behålla anställd personal för kontinuerligt underhåll och kvalitetskontroll. Därmed minimeras risken för luckor i data som beror på tekniska problem med mätningarna

Efter tio år av testning av utrustning och upparbetade rutiner samt en kvalitetskontrollerad process är lämpligt att införa denna nya teknik i den nationella miljöövervakningen. Detta kommer att ge ny värdefull kunskap kring den kortsiktiga variationen av vattenkemiska parametrar, vilket tillför ett viktigt komplement till den idag långsiktiga beskrivningen av tillståndet i Sveriges vattenmiljö.



## Referenser

- Angizi, S., Selvaganapathy, P.R., Kruse, P. 2022. Graphene-silicon Schottky devices for operation in aqueous environments: Device performance and sensing application. *Carbon*. 194:140–153. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.03.052>
- Carlsson, K. Turbiditet som proxy för slamhalt – Markfaktorers påverkan på korrelationen, Självständigt arbete vid institutionen för geovetenskaper 2022:12, Uppsala universitet
- Cascone, C., Murphy, K.R., Markensten, H., Kern, J.S., Schleich, C., Keucken, A., Köhler, S.J. 2022. AbspectroscOPY, a Python toolbox for absorbance-based sensor data in water quality monitoring. *Environmental Science: Water Research & Technology*. <https://doi.org/10.1039/D1EW00416F>
- Cassidy, R., Jordan, P. 2011. Limitations of instantaneous water quality sampling in surface-water catchments: Comparison with near-continuous phosphorus time-series data. *Journal of Hydrology*. 405(1):182–193. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.020>
- Chen Y-T, Crossman J. 2021. The impacts of biofouling on automated phosphorus analysers during long-term deployment. *Science of The Total Environment*. 784:147188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147188>
- Diamond, J-S, Bernal, S., Boukra, A., Cohen, M-J., Lewis, D., Masson, M., Moatar, F., Pinay, G. 2021. Stream network variation in dissolved oxygen: Metabolism proxies and biogeochemical controls. *Ecological Indicators*. 131:108233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108233>
- Fölster, J., Lannergård, E., Valley, S. Olshammar, M. 2019. Sensorer för vattenkvalitet i miljöövervakning av vattendrag. SLU report 2019:10. Uppsala
- Fölster, J., Rönnback, P. 2015. Turbiditet som mått på suspenderat material och totalfosfor. Institutionen för vatten och miljö, SLU Rapport 2015:2.
- Gippel, C.J. 1995. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological processes*. 9(1):83–97
- Haglund, M. 2021. Högfrekventa mätningar av turbiditet som indirekt mätning av totalfosfor i sju vattendrag. Masterarbete, Uppsala universitet Uppsala
- Havs och Vattenmyndigheten. Övervakningsprogram för ytvatten. [accessed 2022 Aug 24]. <https://www.havochvatten.se/planering-forvaltning-och-samverkan/vattenforvaltning/nationell-vagledning/overvakningsprogram-for-ytvatten.html>

- Hoang, C. 2017. Landscape Factors Related to Performance of In-Situ Sensors for Prediction of Total Phosphorus - A statistical analysis of data from 194 streams in Sweden. Master thesis, SLU Uppsala
- Jarvie, H.P., Jürgens, M.D., Williams, R.J., Neal, C., Davies, J.J.L., Barrett, C., White, J. 2005. Role of river bed sediments as sources and sinks of phosphorus across two major eutrophic UK river basins: the Hampshire Avon and Herefordshire Wye. *Journal of Hydrology*. 304(1):51–74. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.002>
- Johnes, P.J. 2007. Uncertainties in annual riverine phosphorus load estimation: Impact of load estimation methodology, sampling frequency, baseflow index and catchment population density. *Journal of Hydrology*. 332(1–2):241–258.
- Jones, A.S., Horsburgh, J.S., Mesner, N.O., Ryel, R.J., Stevens, D.K. 2012. Influence of sampling frequency on estimation of annual total phosphorus and total suspended solids loads1 [Internet]. [place unknown]: Wiley Online Library; [accessed 2017 Jan 16]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-1688.2012.00684.x/full>
- Köhler, S., McKie, B. Granath, G., Wallman, K., Segersten, J., Fölster, J., Drakare, S., Ecke, F., Kahlert, M., Göthe, E. 2018. Skogsbranden i Västmanland 2014 slutrapport. Utvärdering av effekter på vattenkvalitet och vattenlevande organismer i och runt brandområdet. SLU, Vatten och miljö: Rapport 2018:5
- Laguna Marín, C. 2022. Assessment of future climate and land use changes on streamflow and phosphorus transport in a Swedish agricultural catchment. Master thesis, SLU Uppsala
- Lannergård, E.E., Fölster, J., Futter, M.N. 2021. Turbidity-discharge hysteresis in a meso-scale catchment: The importance of intermediate scale events. *Hydrological Processes* [Internet]. [accessed 2022 Nov 15] 35(12). <https://doi.org/10.1002/hyp.14435>
- Lannergård, E.E., Ledesma, J.L.J., Fölster, J., Futter, M.N. 2019. An evaluation of high frequency turbidity as a proxy for riverine total phosphorus concentrations. *Sci Total Environ*. 651(Pt 1):103–113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.127>
- Löf, H. 2021. Undersökning av tidigt varningssystem för algblomning -en studie genom vattenkvalitetsmätningar med EXO2 sond, fjärranalys och vattenprovtagning. Masterarbete, SLU Uppsala
- Ottander, N. 2019. Högfrekventa mätningar med sensorer för transportberäkning av totalfosfor i vattendrag. Kandidatuppsats, SLU Uppsala
- Rode, M., Wade, A.J., Cohen, M.J., Hensley, R.T., Bowes, M.J., Kirchner, J.W., Arhonditsis, G.B., Jordan, P., Kronvang, B., Halliday, S.J., et al. 2016. Sensors in the Stream: The High-Frequency Wave of the Present. *Environ Sci Technol*. 50(19):10297–10307. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02155>
- Ruzycki, E.M., Axler, R.P., Host, G.E., Henneck, J.R., Will, N.R. 2014. Estimating Sediment and Nutrient Loads in Four Western Lake Superior Streams. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 50(5):1138–1154. <https://doi.org/10.1111/jawr.12175>

- Rönnback, P., L. Sonesten and M. Wallin. 2009. Ämnestransporter under vårflöden i Ume älv och Kalix älv. Effekter på transportberäkningarna av en utökad provtagningsfrekvens. Institutionen för vatten och miljö, SLU. Rapport 2009:20.
- Selin Norén E. 2022. Utvärdering av sensordata för bedömning av surstötter. Kandidatuppsats, SLU Uppsala
- Skarbøvik, E., Madsen van't Veen, G.S., Lannergård, E.E., Wennig, H., Stutter, M., Bierozza, M., Atcheson, K., Jordan, P., Fölster, J., Mellander, P-E., Kronvang, B., Marttila, H., Kaste, Ø., Lepistö, A., Kämäri, M. (under review) Challenges and opportunities when using and comparing in situ turbidity sensor measurements as a proxy for suspended sediments in North-Western European streams.
- Stubblefield, A.P., Reuter, J.E., Dahlgren, R.A., Goldman, C.R. 2007. Use of turbidometry to characterize suspended sediment and phosphorus fluxes in the Lake Tahoe basin, California, USA. *Hydrological Processes*. 21(3):281–291. <https://doi.org/10.1002/hyp.6234>
- Strömbäck, Niklas, Luode, Muntlig kommunikation 2022-11-13
- SYSTEIA [accessed 2022 Nov 15]. <https://www.systea.it/en/>
- Ulén B, Jakobsson C. 2005. Critical evaluation of measures to mitigate phosphorus losses from agricultural land to surface waters in Sweden. *Science of the Total Environment*. 344(1–3):37–50.
- Villa, A., Fölster, J., Kyllmar, K. 2019. Determining suspended solids and total phosphorus from turbidity: comparison of high-frequency sampling with conventional monitoring methods. *Environ Monit Assess*. 191(10):605. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7775-7>
- Wallin, M.B., Audet, J., Peacock, M., Sahlée, E., Winterdahl, M. 2020. Carbon dioxide dynamics in an agricultural headwater stream driven by hydrology and primary production. *Biogeosciences*. 17(9):2487–2498. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2487-2020>
- Zeng, L. & Li, D. 2015. Development of In Situ Sensors for Chlorophyll Concentration Measurement. *Journal of Sensors*. 2015:e903509. <https://doi.org/10.1155/2015/903509>