



# Användning av högupplösta data inom miljöövervakningen

Erfarenheter med användning av en  
multielektrods sond av typ EXO2 för övervakning av  
Ullfjärdarna

Stephan J. Köhler, Christian Demandt, Karin Wallman,  
Stina Drakare & Jing Li

---

Referera gärna till rapporten på följande sätt:

Köhler, S., Demandt, C., Wallman, K. , Drakare, S. , Li, J. 2022. Användning av högupplösta data inom miljöövervakningen. Erfarenheter med användning av en multielektrodsönd av typ EXO2 för övervakning av Ullfjärdarna. Rapport / Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö 2023:03

Omslagsfoto: Bro över bäcken mellan Lilla och Stora Ullfjärden , Stephan J. Köhler

Tryck: endast digital upplaga

Tryckår: 2023

Kontakt:

[Christian.demandt@slu.se](mailto:Christian.demandt@slu.se)

<http://www.slu.se/vatten-miljo>

# Innehåll

Förord.....	1
Sammanfattning.....	2
Summary.....	3
1 Introduktion.....	4
2 Metodik.....	6
2.1 Provtagningsplatser.....	6
2.2 Användning av sonden.....	7
3 Provtagningar i Stora Ullfjärden.....	9
3.1 Resultat från mätningar med optisk sond samt analysresultat från vattenprovtagning.....	9
3.2 Analysresultat från EXO.....	12
4 Extraprovtagning i Lilla Ullfjärden.....	14
5 Diskussion.....	17
5.1 Genomförandet.....	17
5.2 Förbättringsområden.....	17
5.3 Möjliga framtida användningsområden.....	19
6 Slutsatser.....	19
7 Referenser.....	21
8 Appendix.....	22
8.1 Jämförelse laboratorie- och sonddata (rådata).....	22
8.2 Protokoll för läsning av data.....	28

## Förord

Förekomst av cyanobakterieblomningar är fortfarande en stor utmaning i många svenska sjöar. Förutom fortsatt övergödning bidrar klimatförändringar med varmare ytvatten till ökad förekomst av cyanobakterier. Mälaren är dricksvattentäkt för drygt två miljoner människor och förekomst av cyanobakterier kan vara en utmaning för en säker dricksvattenproduktion. Pga. av de stora kostnaderna för analys övervakas cyanobakterier och andra växtplankton väldigt sällan inom miljöövervakningen av sjöar.

I denna rapport beskrivs användning av en multielektrod med ett stort antal sensorer som kan registrera djupprofiler av ett stort antal relevanta parametrar (temperatur, ledningsförmåga, turbiditet, vattenfärg, pH, syrgas, redox, klorofyllhalt samt halt av pigment från cyanobakterier) med hög spatial upplösning (< 0.3m) i två Mälarbassänger (Stora och Lilla Ullfjärden) som sedan tidigare är kända för förekomst av cyanobakterier, särskilt sådana som uppehåller sig lite djupare i vattenmassan. Användning av högupplösta sensorer kan stödja förståelsen av förekomst och massutveckling av cyanobakterier.

Projektgruppen bestod av personal från institutionen för vatten och miljö, SLU: Stephan J Köhler, Christian Demandt, Karin Wallman och Stina Drakare, samt Jing Li från Lunds Universitet.

## Sammanfattning

Inom miljöövervakningen används sonder för registrering av temperatur och syrehalt sedan ett par år tillbaka. I detta projekt testades om en multielektrods sond av typ EXO2, som utöver syrgas och temperatur även registrerar ett stort antal andra analysparametrar, skulle kunna användas på samma sätt. Multielektrods sonden har använts under sex månader för provtagning i Ullfjärdarna. Sondens är mycket bra lämpad för analys av förhållanden i sjöar där man inte har tidigare kunskap om de förekommande spatiala variationerna av vattenkemi och olika pigment. Eftersom sonden registrerar vattenkemidata för ett stort antal viktiga parametrar kan den användas för att kartlägga naturligt förekommande variationer, särskilt i djupled. Resultat från sonden är tillgängliga direkt vilket gör att provtagningen kan anpassas i fält baserat på de observerade signalerna från sonden. Resultat från denna undersökning bekräftar bland annat tidigare resultat från provtagningar i Stora Ullfjärden där man kunde observera förekomst av cyanobakterier nära temperaturskiktningen på några meters djup. Sondens kunde registrera data som inte är tillgängliga via den vanliga miljöövervakningen och profilerna ger en stor förståelse för de akvatiska processerna. Vid två tillfällen fanns det indikationer att sondens turbiditetsmätningar ger en sannare bild av sjöns skiktningförhållande än turbiditetsresultaten från ordinarie provtagning.

Hantering av elektroden i fält var enkel. Datahanteringen var inte krångligare än den som uppstår vid hantering av andra sensordata. Omhändertagandet av elektroden, inklusive kalibrering och annan kvalitetskontroll, kräver dock utbildad personal. Under projektets gång har laboratoriepersonal utfört ett antal provtagningar med sonden. Laboratoriet analyserade inte resultatet och gjorde inte heller någon kvalitetskontroll av sönerna eller erhållna resultat. Detta förklarar varför en del avvikelser uppstod med avseende på syrgashalt vid första provtagningen och under nästan hela projektet för klorofyll.

För att sonden ska kunna användas med framgång i miljöövervakning krävs det en större arbetsinsats runt arbetet med kvalitetskontroll och uppföljning. Så länge det inte finns ett större antal uppdrag där sonden kan användas i flera provtagningsprogram, så kan inte laboratoriet lägga den nödvändiga tiden som krävs för att autonomt kunna använda sonden.

## Summary

Environmental monitoring has made use of probes for recording temperature and oxygen content since a couple of years ago. In this project, it was tested whether a multi-electrode probe of type EXO2, which in addition to oxygen and temperature also registers many other analysis parameters, could be used in the same way. The multi-electrode probe has been used for six months for sampling in Ullfjärdarna. The probe is very well suited for the analysis of environmental conditions in lakes where there is no prior knowledge of the occurring spatial variations of water chemistry and pigments. Since the probe records water chemistry data for many important parameters, it can be used to map naturally occurring variations. Results from the probe are available immediately, allowing sampling to be adjusted in the field based on the observed signals from the probe. Results from this investigation confirm, among other things, earlier results from sampling in Stora Ullfjärden, where the presence of cyanobacteria could be observed near the temperature stratification at a depth of a few meters. The probe was able to record data not available through regular environmental monitoring and the profiles provided a good understanding of the aquatic processes. On two occasions there were indications that the probe's turbidity measurements give a more accurate picture of the lake's stratification conditions than the turbidity results from the regular sampling. Handling the electrode in the field is simple. Data handling is no more complicated than when handling other conventional sensor data. The maintenance of the electrode, incl. calibration and other quality control, however, requires trained personnel. During the project, laboratory personnel have carried out several samplings with the probe. The laboratory did not directly analyse the results nor did any quality control of the probes occur continuously. This explains why some deviations occurred regarding oxygen content at the beginning and during almost the entire project for chlorophyll.

In order for the probe to be used successfully in environmental monitoring, a greater effort is required around work with quality control and follow-up. If there are not many missions where the probe can be used in several sampling programs, the laboratory cannot invest the necessary time required to be able to use the probe autonomously.

# 1 Introduktion

Klimatförändringar och påverkan på ytvatten som resultat av en växande befolkning och strukturella förändringar i våra städer är två faktorer som bidrar till ökade utmaningar att nå miljökvalitetsmålet levande sjöar och vattendrag. Höga vattentemperaturer och syrefattiga förhållanden i sediment i kombination med ökad avrinning kan bidra till ökande halter av fosfor i en del sjöar. Syrefattiga förhållanden i bottenvattnet hotar känsliga kallvattensarter som inte klarar att vara i ytvattnet sommartid. En av konsekvenserna av ökad fosforhalt är algblomning som har negativ inverkan på offentliga bad och dricksvattenförsörjning.

Stora Ullfjärden är en av tre Mälarbassänger där syrefattiga förhållanden förekommer under större delar av sommaren (Drakare et al. 2021). Denna bassäng är också en av tre Mälarbassänger som pga. av en stor dominans av cyanobakterier får klassningen dålig ekologisk status.

Sjön och den uppströms liggande Lilla Ullfjärden har tidigare studerats i ramen av ett forskningsprojekt (DiCyano: [www.dicyano.com](http://www.dicyano.com)) där olika tekniker för att kvantifiera övergödning användes. Under 2021-2022 utfördes tre examensarbeten som studerade Stora Ullfjärden i detalj:

I studien ”*Undersökning av tidigt varningssystem för algblomning – en studie genom vattenkvalitetsmätningar med EXO2 sond, fjärranalys och vattenprovtagning*” av Harald Löf (2021) framgick det att ”*Algblomningen föregicks av bildandet av en termoklin, stigande vattentemperatur och stigande pH vilket skulle vara lämpligt att övervaka som indikator på att algblomning kan ske...ett förslag på varningssystem för algblomning som använder fjärranalys med satelliter för klorofyllkoncentration och turbiditet i kombination av in situ sensorer för att övervaka vattentemperatur, phycocyanin och pH*” samt att ”*Jämförelser mellan satelliternas skattning, mätningarna med EXO2 sonden och resultat från analys av vattenproverna visade att de mer högupplösta Sentinel 2-satelliterna gav klorofyllvärden som bättre stämde överens med klorofyllkoncentrationerna från vattenproverna och från EXO2-sonden*”.

Studien med titeln ”*Modellering av fosfordynamik i Stora och Lilla Ullfjärden*” som utfördes av Walter Cassel (2022) kom fram till att: ”*För att bättre förstå fosfordynamiken och algblomningar i Ullfjärdarna är det nödvändigt att fortsätta ta profilmätningar i fjärdarna. Fler mätningar i Lilla Ullfjärden på olika platser med olika djup vore också nödvändigt för att förstå hur internbelastningen ser ut i olika delar av fjärden. Med mer information kan ett informerat beslut tas för att välja eventuella åtgärder för att säkerställa en god vattenkvalitet framöver*” samt ”*Analysen av mätdata visade att fjärdarna är skiktade under sommaren, vilket innebär att det djupare vattnet inte blandas med det ytliga. Fosforhalten i båda fjärdarna, men framför allt Lilla Ullfjärden, var periodvis hög vid botten. Detta*

*tyder på att fosfor frigörs från sedimenten på sjöbotten vilket kallas internbelastning. Fosforhalten och klorofyllhalten var höga vid 6 meters djup under sommaren, vilket tyder på att en växtplankton befann sig på det djupet i Ullfjärdarna.”*

I studien ”**Aluminiumbehandling som sjörestaureringsåtgärd i Stora och Lilla Ullfjärden**” jämförde Maja Sellergren (2022) effektiviteten och kostnaden för olika metoder att hantera intern fosforbelastning: ”*Från studien kan noteras att aluminiumbehandling verkar vara ett rimligt val av åtgärds metod för att minska internbelastningen i Lilla och Stora Ullfjärden. I Lilla Ullfjärden är internbelastningen av fosfor den huvudsakliga anledningen till den årliga algbloomingen. I Stora Ullfjärden är även den externa belastningen av fosfor av betydelse. Att aluminiumbehandla båda sjöarna, som har en total sjöyta på 500 hektar, beräknas kosta omkring 21,7 miljoner kronor. Att inte uppnå god ekologisk status i sjöarna kostar också pengar. Stora och Lilla Ullfjärdens ekonomiska värde ligger främst i tjänster som inte har ett marknadsvärde. Framför allt har sjöarna ett högt naturvärde och bidrar med många kulturella ekosystemtjänster såsom bad, fiske och rekreation. Allmänhetens betalningsvilja för att uppnå god vattenstatus är uppskattat till 23,1 miljoner kronor. Det betyder att allmänhetens betalningsvilja täcker kostnaderna för aluminiummetoden. Med hjälp av Bayesiansk beslutsanalys har det även kunnat konstateras att om det anses att god ekologisk status i Stora och Lilla Ullfjärden är värt mer än 25 miljoner kronor på en 12-årsperiod bör sjöarna aluminiumbehandlas. Innan en sådan åtgärd utförs måste fler undersökningar utföras för att bestämma en lämplig dos”.*

I miljöövervakningen av Mälaren används sedan ett par år optiska sonder som registrerar syrgas och temperaturförhållanden vid varje meter i epilimnion och sedan varannan meter i hypolimnion. Denna utökning är en värdefull analys som ger en mycket bättre förståelse för skiktningförhållanden i sjöar. Syrgasmätningen med denna sond är ackrediterad och följer en internationell standard

Under 2018 användes en multielektrodsond (EXO) för övervakning av Mälaren (Köhler et al. 2019) under ett helt år. Sonden togs med på den vanliga provtagningen och registrerade ett större antal parametrar i olika Mälarbassänger. Projektet finansierades av Havs- och Vattenmyndigheten. Baserad på dessa tidigare erfarenheter uppstod intresse att se om EXO kan användas för att undersöka vattenkemiska förhållanden i Ullfjärdarna. Istället för att ha provtagning vid fasta punkter ger EXO tillgång till högupplösta data. Användningen av EXO och dess hanterbarhet testades av ordinarie provtagningspersonal för att se om den skulle kunna integreras i pågående övervakning.

I projektet undersöktes om användning av en flerkanalssensor kan ge ett mervärde för miljöövervakning av sjöar. Utvärderingen beaktar olika aspekter såsom arbets-säkerhet vid provtagning, miljöaspekter (möjligheter till minskat antal prover som



behöver laboratorieanalyser), bedömningsunderlag för miljöövervakning och åtgärder (tillgång till högre djup- och tidsupplösning av viktiga data som rör syrgas- och temperaturförhållanden samt förekomst av växtplankton) och kostnader.

## 2 Metodik

### 2.1 Provtagningsplatser

Prover togs under perioden februari och november 2022 på två olika ställen (Figur 1, Tabell 1). Under juli 2022 genomfördes en extraprovtagning i Lilla Ullfjärden på två olika provplatser som ses i Tabell 1.



Figur 1: Karta över SLU provpunkterna i Stora Ullfjärden och Lilla Ullfjärden (Från Miljödata MVM; SLU)

Tabell 1: Provtagning i Ullfjärdarna med information om när mätningar med sond (EXO) och vattenprovtagning (MÖ) utfördes. Vid vattenprovtagningen skedde även temperatur- och syrgasmätningar med den optiska sond som används inom miljöövervakningen av Mälaren.

Provplatser	Datum	Mätresultat
St. Ullfjärden + utlopp	2022-02-23	MÖ
St. Ullfjärden + utlopp	2022-03-15	MÖ
St. Ullfjärden + utlopp	2022-04-28	MÖ + EXO
St. Ullfjärden + utlopp	2022-05-24	MÖ + EXO
St. Ullfjärden + utlopp	2022-06-16	MÖ
St. Ullfjärden + utlopp + Lilla Ullfjärden	2022-07-13	MÖ + EXO
St. Ullfjärden + utlopp	2022-08-22	MÖ + EXO
St. Ullfjärden + utlopp	2022-09-15	MÖ + EXO*
St. Ullfjärden + utlopp	2022-10-19	MÖ + EXO

\* Utan djupdata (pga. felaktigheter i sensorn försvann tryckgivaren i menyn). Detta uppmärksammades först efter provtagningen.

## 2.2 Användning av sonden

Sonden är utförligt beskriven i Köhler et al. (2019). EXO Handheld v2 (Figur 2) är en handhållen enhet vilken tillåter övervakning av mätresultat i realtid. Sonden har sju kanaler (Tabell 2). Det innebär att den kan utrustas med sju sensorer för elektrokemiska, optiska eller fysiska analyser. Den sond som nyttjats i denna studie var utrustad med sex sensorer; en kombinerad glaselektrod för pH-mätning samt oxidation/reduktionspotential (ORP), en kombinerad konduktivitetselektrod (ledningförmåga) och termistor för temperaturmätning, en elektrod för syrgasmätning, en optisk sensor för fluorescensmätning (fDOM), en optisk sensor för turbiditetsmätning och slutligen en optisk sensor för mätning av klorofyll (CHL) och phycocyanin (PCY) som motsvarar totalmängd växtplankton samt cyanobakterier. I den sista kanalen (nummer 7) kopplades en rengöringsmodul som rengör de optiska sensorerna samt konduktivitets- och temperatursensorn.

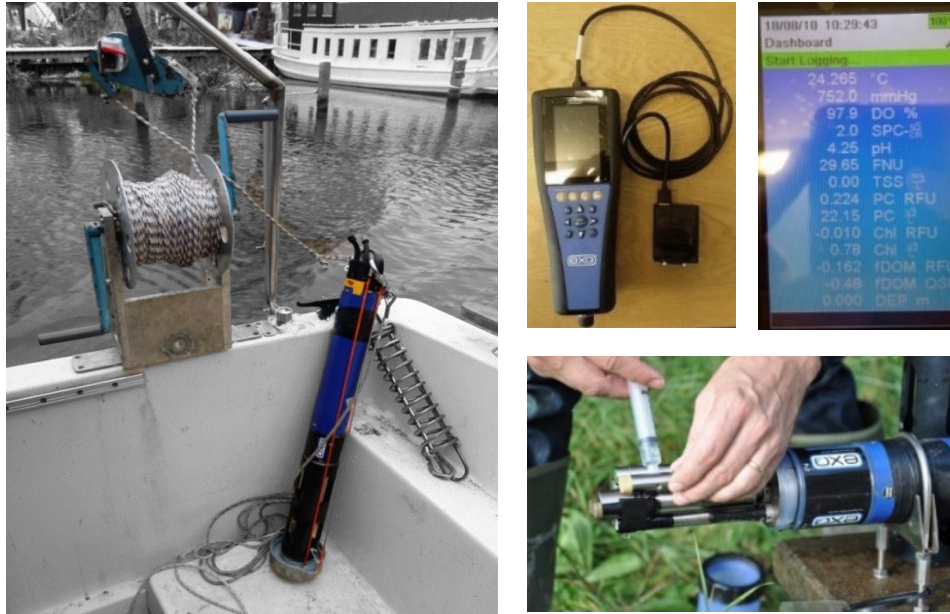
Tabell 2: Översikt av parametrar som bestäms med sonden

Parameter	Enhet	Analys	Resultattillgänglighet
Temperatur	°C	Termistor	Samma dag
Ledningsförmåga <sup>1</sup>	mS cm <sup>-1</sup> vid 25 °C	Elektrod	Samma dag
pH		Elektrod	Samma dag
Klorofyll	µg L <sup>-1</sup>	Fluorescens	Samma dag
BGA	µL <sup>-1</sup>	Fluorescens	Samma dag
fDOM <sup>2</sup>	mg L <sup>-1</sup>	Fluorescens	Samma dag
Syrgashalt	mg L <sup>-1</sup>	Fluorescens	Samma dag
Turbiditet <sup>3</sup>	FNU	Fluorescens	Samma dag
Tryck	hPa	Sond	Samma dag

<sup>1</sup> Salinitet

<sup>2</sup> DOC [mg L<sup>-1</sup>], A254 [m<sup>-1</sup>]

<sup>3</sup> Suspenderad material [mg L<sup>-1</sup>]



Figur 2: Närbild av sonden, elektroderna och handmodulen

Beroende på inställningar lagras registrerade data antingen i sondens internminne eller i den handhållna enheten. I denna studie användes det första sättet för maj månad och det senare alternativet för resterande provtagningar. Med den handhållna enheten tillkommer också möjligheten att registrera GPS-koordinater samt att övervaka vilket djup sensorn befinner sig på i djupprofilen i realtid.

Hantering av den långa sladden är platskrävande och hanteringen kan vara störande under svåra förhållanden. Sondens i denna studie användes därför bortkopplad från den handhållna delen. Istället programmerades provtagningsintervall i förväg och sedan fränkopplades sonden under själva nedsänkningen.

Kalibrering av sonden utförs med ett antal olika lösningar (Tabell 3). Felkommunikation ledde till att sonden aldrig kalibrerades ordentligt för klorofyll. Av samma skäl utfördes kalibrering för pH något osystematiskt (se även texten nedan).

Tabell 3: Översikt över vilka kalibreringar som ska utföras innan sonden kan användas.

Parameter	Enhet	kalibrering
Temperatur	°C	Termometer
Ledningsförmåga <sup>1</sup>	mS cm <sup>-1</sup> @25 °C	Standardlösning
pH		2 standardlösningar (pH 4 och pH 7)
Klorofyll	µg L <sup>-1</sup>	Rhodamin (Sigma Aldrich)
BGA	µg L <sup>-1</sup>	Rhodamine
fDOM	mg L <sup>-1</sup>	Quininsulfatlösning
Syrgashalt	mg L <sup>-1</sup>	Mättad syrgaslösning
Turbiditet	FNU	Standardlösning

Sondens data läses ut via ett tillhörande program (KOR:EXE) som är tillgängligt via YSI (<https://www.ysi.com/kor-software>). Den exakta proceduren är beskriven i appendix 8.2 med hjälp av ett antal skärmdumpar eftersom den innehåller ett flertal steg och involverar hantering via Excel och JMP. Efter inläsning av sondens värden filtreras signaler bort som är ostabila t.ex. en för snabb rörelse i vattnet eller värden från när sonden varit över vattenytan. I denna studie filtrerades alla mätvärden bort där signalen från konduktiviteten ändrades mer än 3% från ett till nästa djup. Om sonden inte ger stabila värden för konduktivitet anses de andra elektroderna inte heller kunna ge användbara värden. Därefter jämfördes resultat från EXO med de från provtagning med optisk syrgassond samt vattenprover som analyserades på laboratorium.

## 3 Provtagningar i Stora Ullfjärden

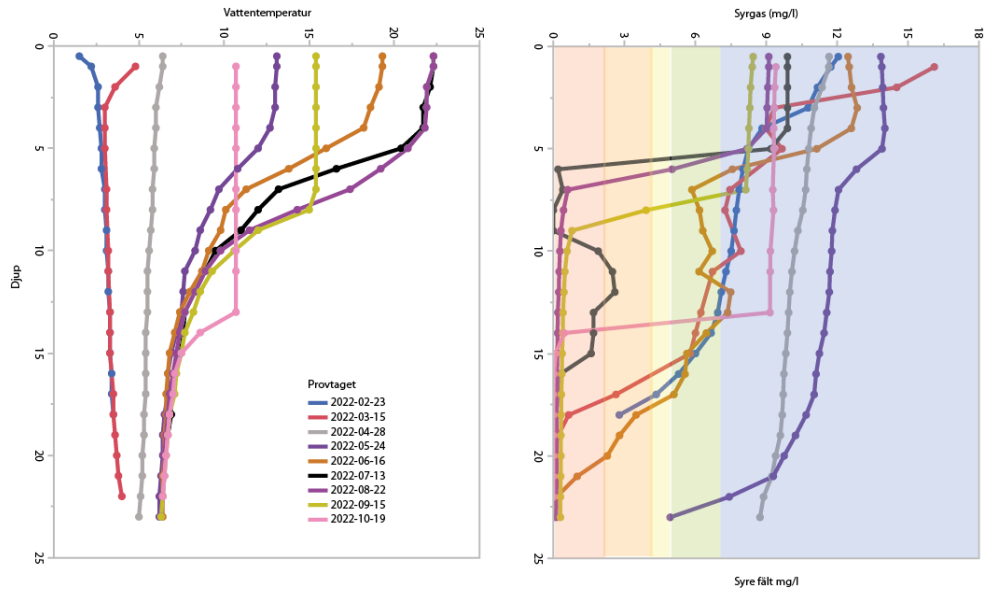
### 3.1 Resultat från mätningar med optisk sond samt analysresultat från vattenprovtagning

Temperatur- och syrgasmätningar med den optiska sond som vanligtvis används inom miljöövervakningen visade att vattnet i Stora Ullfjärden var omblandat i april och syrgashalten var över 7 mg/l i hela vattenmassan (Figur 3). I maj började det bli en temperaturskiktning på cirka 6 meter och syrgashalten var lägre i bottenvattnet. Från och med juli var det låga syrgashalter i under språngskiktet.

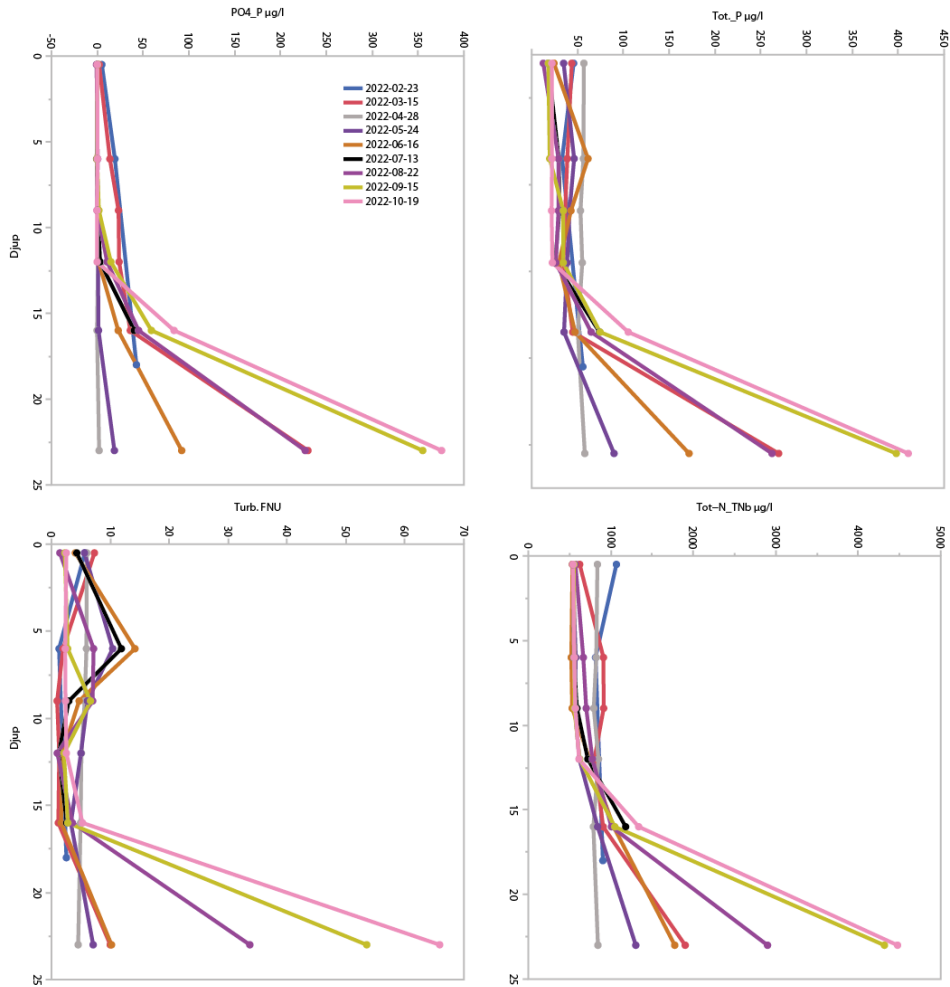
I februari mättes profilen endast ned till 17 meter varmed syrgashalten allra djupast är okänd vid det tillfället. Men resultaten visar att syrgashalterna är låga i bottenvattnet både tidig vår och hela sommarhalvåret från 6 meter och djupare. Syrgashalterna är egentligen bara tillräckligt höga under våromblandningen och strax där efter (i april och maj).

I och med syrgasbristen i bottenvattnet frigjordes fosfat från sedimentet och halterna ökade i bottenvattnet (Figur 3). Endast i april och maj var halterna av fosfat låga i bottenvattnet sammanfallande med högre halter av syrgas. Turbiditet och totalkväve ökade också med ökande djup under sommaren till följd av nedbrytning av material. De högsta halterna i bottenvattnet erhöles i oktober.

Turbiditeten ökade vid språngskiktet på 6 meter de månader då det var en tydlig temperaturskiktning (Figur 4).

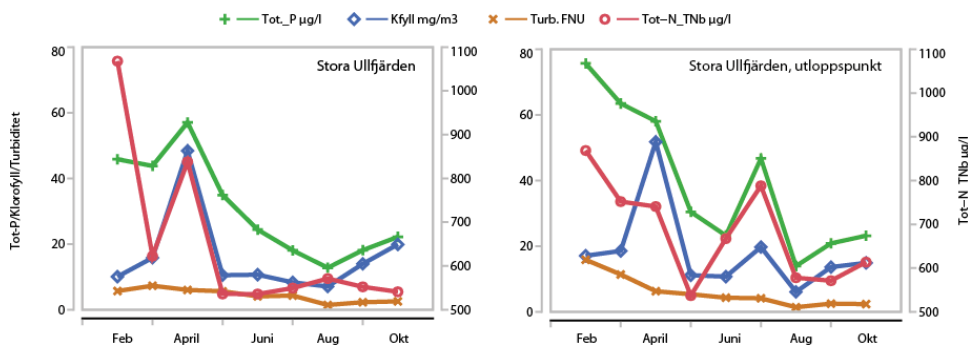


Figur 3: Syrgas- och temperaturprofiler i Stora Ullfjärden 2022 uppmätta med den optiska sond som används inom miljöövervakningen av Mälaren. De olika färgerna i det högra diagrammet visar statusklassningarna för syrgas (blå=hög, grön=god, gul=måttlig, orange=otillfredsställande, röd=dålig).



Figur 4: Analysresultat från vattenprovtagning i Stora Ullfjärden 2022. Djupprofiler av fosfatfosfor, totalfosfor, turbiditet, och totalkväve.

Halterna av totalfosfor, totalkväve och turbiditet minskade under året i ytvattnet i Stora Ullfjärden och i utloppspunkten (figur 5). I och med våromblandningen ökade halterna av totalkväve och totalfosfor tillfälligt i ytvattnet i Stora Ullfjärden i april. I utloppspunkten ökade halterna av totalfosfor och totalkväve i juli, troligen på grund av algblomning.



Figur 5: Analysresultat från vattenprovtagning 2022. Halterna av totalfosfor, klorofyll, turbiditet och totalkväve i ytvattnet i Stora Ullfjärden respektive utloppspunkten.

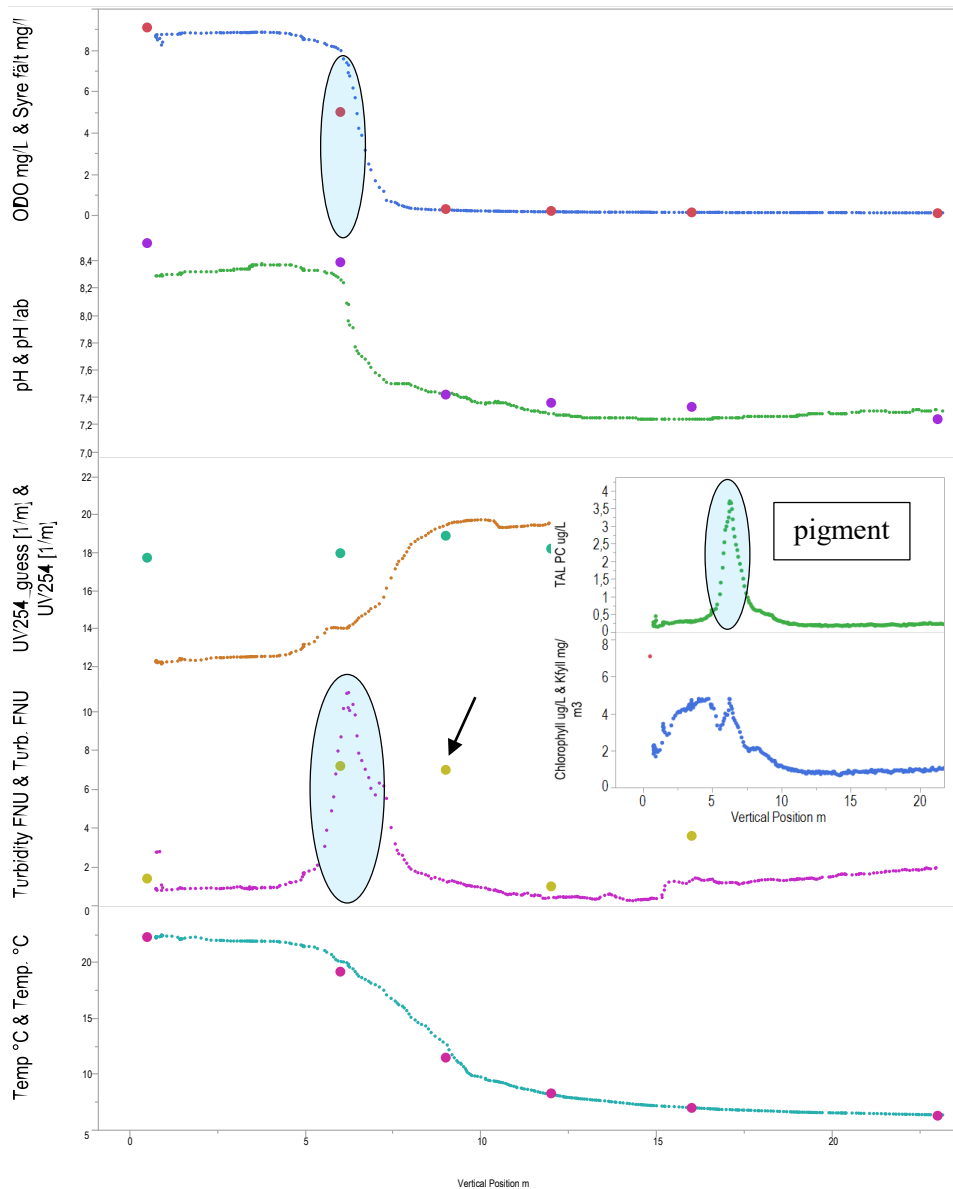
## 3.2 Analysresultat från EXO

Beskrivningen av resultat begränsas till parametrarna temperatur, pH, syrgas och klorofyll som alla kan jämföras med antingen sonddata från den ordinarie miljöövervakningen. Data från fDOM mätningar redovisas i ett antal diagram men diskuteras inte vidare.

Provtagningen i augusti i Stora Ullfjärden visas som exempel (Figur 6). Det finns ett tydligt gränsskikt med hög halt partiklar vid ca 6 meters djup som sammanfaller med övergången där syrgas minskar från över 8 mg L<sup>-1</sup> till nära noll. EXO registrerar förekomst av pigment från cyanobakterier med en tydlig signal i samma skikt. Avvikelse mellan turbiditet från laboratoriet (pil i figur 6) vid 9 meter är förmodligen en provtagningsartefakt när hämtaren passerar ett skikt med hög turbiditet. Möjligen passerar ruttnerhämtaren ett skikt med hög turbiditet så att vatten med partiklar finns kvar i hämtaren och ger utslag på nästkommande provtagningsnivå. Sondens sakta stigande och sedan sakta sjunkande turbiditet med fallande djup representerar förmodligen de verkliga förhållandena i sjön.

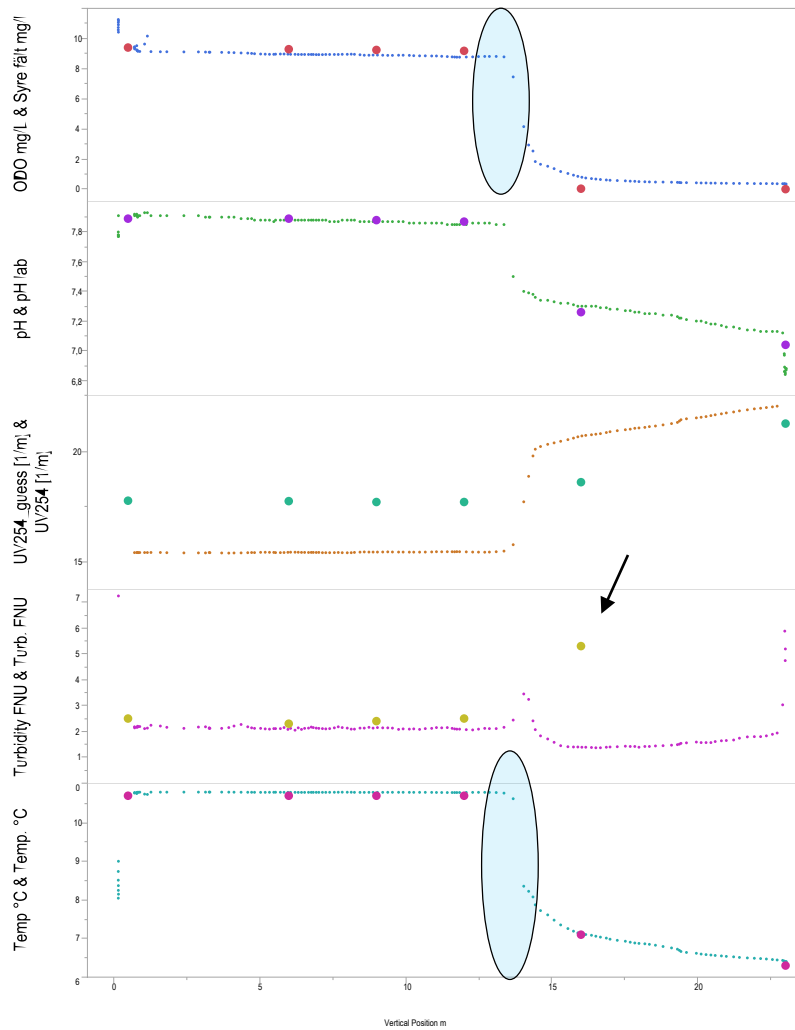
Liknade profiler har registrerats tidigare i Ullfjärden. Varken den vanliga vattenprovtagningen eller den som sker via satellit kan upptäcka förekomst av alger så långt ner i vattnet (Löf 2021). Sonden kan producera sammanhängande profiler av samstämmiga data som ger en tydlig bild av skiktningen och hur olika parametrar hänger ihop. Detta uppnås inte med provtagning på fasta djup som ju oftast är fallet med alla parametrar utom temperatur och syrgas.

Provtagningen i oktober visar en mycket bra överensstämmelse mellan EXO-sonden och den optiska sondens värden samt analysresultaten från vattenprovtagningen för parametrarna pH, syrgas och temperatur. Turbiditetsvärdena överensstämmer i det övre skiktet (Figur 7). Nedanför det anaeroba gränsskiktet på 14 meters djup ändras pH och halten organiskt material. Orsaken mellan den stora avvikelsen mellan de två utförda turbiditetsmätningarna är oklar. Detta har inte observerats tidigare (Köhler et al. 2021) och bör vara ett fenomen som kan vara kopplad till ett skikt av djupliggande cyanobakterier. Som ovan observerades ett tydligt gränsskikt med sonden.



Figur 6: Djupprofiler för parametrarna löst syrgas (mg/l), pH, fDOM och UV254 (fDOM omräknat till UV254), turbiditet (FNU) och temperatur (°C) som funktion av djup i Stora Ullfjärden augusti 2022. Punkter anger laboratorievärden eller värden från optisk sond och streckade linjer visar resultat från EXO-sonden. Områden som är markerade med blå cirklar eller en svart pil diskuteras i texten. Den inklade figuren visar en profil av den registrerade förekomsten av klorofyll ( $\mu\text{g/L}$ ) och pigment från cyanobakterier (TAL ( $\mu\text{g/L}$ )).

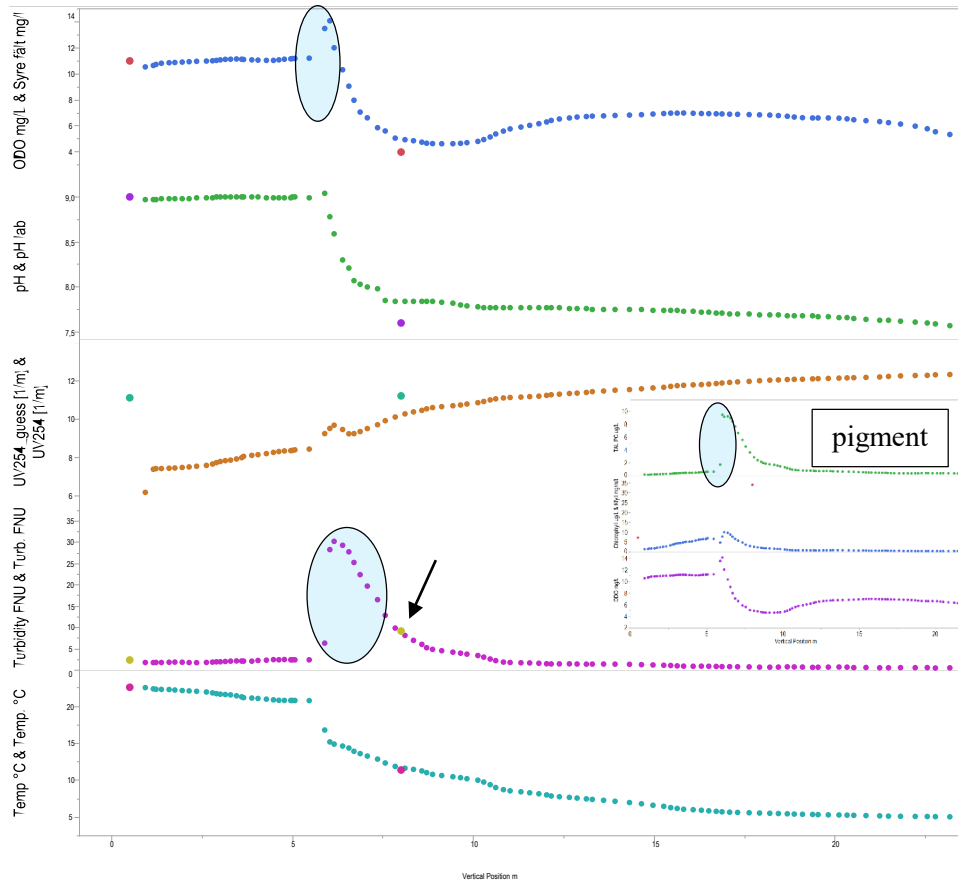




Figur 7: Djupprofiler för parametrarna löst syrgas (mg/l), pH, fDOM och UV254 (fDOM omräknat till UV254), turbiditet (FNU) och temperatur (°C) som funktion av djup i Stora Ullfjärden i oktober 2022. Punkter anger laboratorievärden eller värden från den ordinarie optiska sonden och streckade linjer visar resultat från EXO-sonden. Områden som är markerade med blå cirkel eller en svart pil diskuteras i texten.

## 4 Extraprovtagning i Lilla Ullfjärden

I samband med den reguljära provtagningen i juli på Stora Ullfjärden genomfördes två extraprovtagningar, en i Lilla Ullfjärden vid dess djupaste punkt (50 m) och en annan närmare Stora Ullfjärden. Resultaten från den sistnämnda redovisas i figur 8.



Figur 8: Djupprofiler för parametrarna löst syrgas (mg/l), pH, fDOM och UV254 (fDOM omräknat till UV254), turbiditet (FNU) och temperatur (°C) som funktion av djup i Lilla Ullfjärden i juli 2022. Punkter anger laboratorievärden eller värden från den optiska sonden och streckade linjer visar resultat från EXO-sonden. Områden som är markerade med blå cirklar eller en svart pil diskuteras i texten. Den inklippta figuren visar en profil av den registrerade förekomsten av klorofyll ( $\mu\text{g/L}$ ) och pigment från cyanobakterier (TAL ( $\mu\text{g/L}$ )).

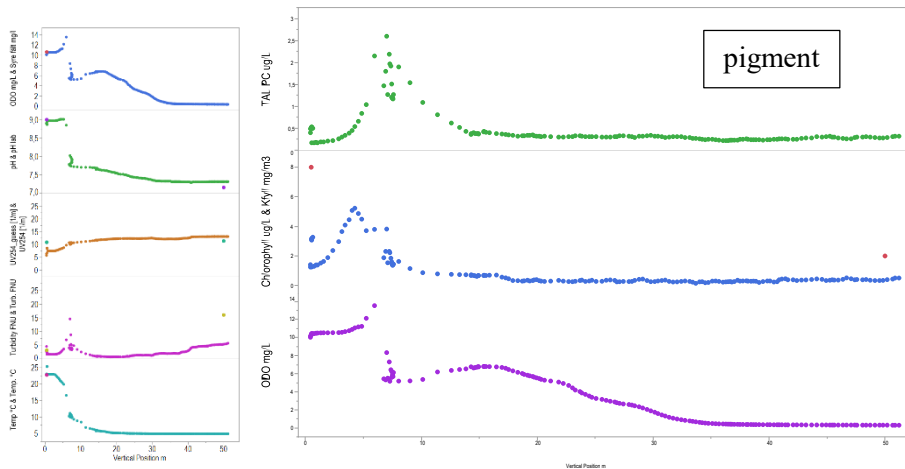
Profilen visar ett tydligt gränsskikt med sjunkande pH, hög partikelhalt som sammanfaller med pigmenten från cyanobakterierna. Samvariationen av EXO-värden jämfört med analysresultat från vattenprovtagning och den optiska sonden är bra för alla parametrar förutom för de uppmätta klorofyllhalterna (tabell 4) och UV. Systematiska avvikelser mellan beräknad och uppmätt UV beror på att en generell omräkningsfaktor har använts istället för ett platsspecifikt värde. Använder man platsspecifika värden kan fDOM från sonden skatta UV inom 5% (Köhler et al. 2021).

Den högupplösta sonden registrerar en tydlig profil av turbiditet och höga värden som den fasta provtagningen missar. I tabell 4 jämförs de uppmätta värdena.

Tabell 4: Jämförelse mellan värden från EXO-sonden och den ordinarie optiska sonden (Labsond) samt analysresultat från vattenprovtagningen (Labanalys) och EXO-sonden som utfördes på extraprovpunkten i Lilla Ullfjärden juli 2022

Parameter	Djup	EXOsond	Labsond	Labanalys
Syrgas	0.5	10.5	11.0	
	8.0	5.0	4.0	
Temperatur	0.5	22.6	22.6	
	8.0	11.4	11.4	
pH	0.5	8.97		9.00
	8.0	7.84		7.60
Turbiditet	0.5	1.82		2.2
	8.0	8.2-9.8		9.2
Klorofyll	0.5	1.4		7.2
	8.0	2.9		34

Vid provtagningen vid stationen för den djupaste punkten i Lilla Ullfjärden ger EXO-sonden en bra bild av temperaturskiktningen och syrgasförhållanden (figur 9). Inget mätvärde förekommer för djup 50 meter då den optiska sonden som används inom miljöövervakningen inte har en tillräckligt lång sladd för att kunna nå ner. EXO2 sonden kan användas ner till -250m.



Figur 9: Djupprofiler för parametrarna löst syrgas (mg/l), pH, fDOM och UV254 (fDOM omräknat till UV254), turbiditet (FNU) och temperatur (oC) som funktion av djup vid Lilla Ullfjärdens södra provtagningsstation i juli 2022. Punkter anger laboratorievärden eller värden från den ordinarie optiska sonden och streckade linjer visar resultat från EXO-sonden. Den inklippta figuren visar en profil av den registrerade förekomsten av klorofyll (µg/L) och pigment från cyanobakterier (TAL (µg/L)).

## 5 Diskussion

### 5.1 Genomförandet

Provtagning med EXO-sonden har fungerat nästan utan problem. Vid septemberprovtagningen tappade sonden kontakten med den interna tryckgivaren vilken gjorde att mätningarna inte gick att använda. Den uteblivna kvalitetskontrollen av sonden innan provtagningen och särskilt avsaknad av kalibrering av klorofyllsensorn gör att data från klorofyll inte kan användas annat än som relativa mått. Kvalitetskontrollen av sonden bör göras med hjälp av interna standarder så som beskrivs i Köhler et al. (2021).

Dataanalysen kräver en viss vana. För att underlätta EXO-hanteringen i framtiden togs det fram en steg-för-steg beskrivning som finns i appendix 8.2.

Tanken var att dataanalysen skulle skötas löpande av laboratoriepersonalen. Här har det tydligen skett en kommunikationsmiss vilket gjort att data utvärderades först i efterhand.

### 5.2 Förbättringsområden

Projektet visar tydligt vilka stora möjligheter det finns att förbättra den framtida miljöövervakningen genom användning av avancerad sensorteknik. På ett relativt enkelt sätt kan mer data tas fram och risken att extremvärden i djupled missas på grund av ett allt för statistiskt provtagningsupplägg försvinner. Dessutom kan analysdata kontrolleras i realtid, vilket öppnar upp för anpassningar av provtagningen på plats, till exempel upprepning av en misstänkt felaktig provtagning eller utökad provtagning vid upptäckten av intressanta resultat.

Dock finns flera utmaningar när tekniken finns, men miljöövervakningen ännu inte anpassats till att nyttja dess fulla potential. Sensorteknik har använts på institutionen för vatten och miljö, SLU, i flera år inom diverse forskningsprojekt och arbetet har organiserats utifrån forskningsprojektens behov och ramar. Bland förbättringsområden inom dessa forskningsprojekt kan bland annat belysas följande två punkter: Risk för brist på helhetsansvar i kombination med småskalig användning av dyr utrustning.

Den inom denna studie använda sensorn har införskaffats i forskningssyfte. Utrustningen är mycket dyr (350 000 SEK), målsättningen har därför av ekonomiska skäl varit att använda utrustningen så mycket som möjligt i så många olika uppdrag som möjligt. Inom dessa uppdrag har sonden använts på olika sätt och av olika personer och vissa uppdrag har dessutom pågått parallellt. Ansvar för olika moment (kalibrering, rengöring, förvaring, provtagning, dataöverföring och datakontroll) har skiftat mellan olika individer vid olika tillfällen.

Målsättningen med övervakningen av Ullfjärdarna var bland annat att testa huruvida sensorteknik skulle kunna användas på ett mer standardiserat sätt inom den fortlöpande miljöövervakningen. För det ändamålet missades det dock initialt att definiera och dokumentera ett nytt helhetsansvar för utrustningen. Vid övergången till en mer standardiserad användning av utrustningen resulterade denna miss i att det bl.a. utgicks ifrån att tidigare ansvarsförhållanden för vissa moment fortfarande var giltiga, vilket i sin tur bidrog till missförstånd och ibland även felaktig användning av utrustningen.

Med en initialt tydligare ansvarsfördelning och en definition av det nya helhetsansvaret hade missförstånd kunnat undvikas. En sådan tydlighet är ett standardkrav för all ackrediterat verksamhet. För att i framtiden kunna lyckas med användning av sensorteknik inom ramen för fortlöpande miljöövervakning behöver övergången från forskningsprojekt till standardiserad provtagning inom den ackrediterade verksamheten genomföras fullt ut.

För att kunna användas inom den fortlöpande miljöanalysen måste metoden ackrediteras och utrustningen får inte längre användas utanför ackrediteringens ramar vilket missgynnar forskningens behov av EXO-sonden. Själva ackrediteringen gör metoden mycket dyrare: Ramverket för ackrediteringen begränsar dessutom dess användningsområde vilket ytterligare har inverkan på möjligheten att kostnadseffektivt kunna använda utrustningen. För att kunna nyttja ackrediterad utrustning på ett kostnadseffektivt sätt krävs det att den efterfrågade mätningen, d.v.s. mängden uppdrag inom miljöövervakningen överskrider en kritisk massa. För dyr laboratorieutrustning är problemet mindre, då prov från många provtagare kan skickas in till laboratoriet och analyseras på den dyra utrustningen så att brytpunkten för kostnadseffektivitet kan uppnås. Detta är inte möjligt för dyr *in situ* utrustning som i stor utsträckning begränsas av transporttiden mellan två mätningar och som alltså endast kan mäta prov från en plats åt gången. Att utrusta många provtagare över hela landet med dyr och ackrediterad *in situ* utrustning är flera tiopotenser dyrare än att tillhandahålla ackrediterat laboratorieutrustning på ett ställe. Så länge inte alla provtagare utrustats med ackrediterad *in situ* utrustning måste laboratorieutrustningen finnas parallellt. Denna övergångsperiod är mycket lång. Som exempel kan nämnas att övergången från analys av syrgashalt med Winklermetoden på laboratoriet fram till utbredd *in situ* mätning av syrgashalt med bärbara syrgassonder (en faktor 10 billigare än EXO-sensorn) tog flera decennier. Sensormätningar kan vara ett bra komplement inom nuvarande fortlöpande miljöövervakning för att tillfälligt öka antalet mätningar, d.v.s. inom en mer projektmässig användning. Det är däremot under lång tid framöver inte realistiskt att anta att denna form av *in situ* mätningar går att införliva i den storskaligare och rumsligt mycket utspridda miljöövervakningen.

### 5.3 Möjliga framtida användningsområden

Sonden kan i fortsättningen användas i forskningsprojekt som har som uppgift att studera bakomliggande orsaker till snabba förändringar av vattenkemiska parametrar kopplade till förekomst av växtplankton. Speciellt i olika Mälarbassänger som Ekoln och Ullfjärdarna skulle sonden kunna användas för att kartlägga de spatiala variationerna av växtplankton i sjön. Detta kan bland annat ge underlag för en framtida möjlig aluminiumbehandling (Sellergren 2022), en bättre förståelse för modellverktyg som tar fram dynamiska förändringar av temperatur, näringsämnen eller förekomst av cyanobakterier i sjöar (Cassel 2022) samt skapa underlag för tidiga varningssystem för dricksvattenproduktionen runt Mälaren.

## 6 Slutsatser

Inom miljöövervakningen används sonder för registrering av temperatur och syrehalt sedan ett par år tillbaka. I detta projekt testades om en multielektrods sond av typ EXO2, som utöver syrgas och temperatur även registrerar ett stort antal andra analysparametrar, skulle kunna användas på samma sätt. Multielektrods sonden har använts under sex månader för provtagning i Ullfjärdarna. Sondens är mycket bra lämpad för analys av förhållanden i sjöar där man inte har tidigare kunskap om de förekommande spatiala variationerna av vattenkemi och pigment. Eftersom sonden registrerar vattenkemidata för ett stort antal viktiga parametrar så kan den användas för att kartlägga naturligt förekommande variationer av dessa särskilt i djupled. Resultat från sonden är tillgängliga direkt vilket gör att provtagningen kan anpassas i fält baserat på de observerade signalerna från sonden. Resultat från denna undersökning bekräftar bland annat tidigare resultat från provtagningar i Stora Ullfjärden där man kunde observera förekomst av cyanobakterier nära temperaturskiktningen på några meters djup. Sondens kunde registrera data som inte är tillgänglig via den vanliga miljöövervakningen och profilerna ger en mycket bättre förståelse för de akvatiska processerna. Vid två tillfällen fanns det indikationer att sondens mätningar av turbiditet faktiskt ger en sannare bild av sjöns skiktningförhållanden än resultat från turbiditet från vattenprovtagningen.

Hantering av elektroden i fält är enkel. Datahanteringen är inte krångligare än den som uppstår vid hantering av andra sensordata. Omhändertagandet av elektroden, inkl. kalibrering och annan kvalitetskontroll, kräver dock utbildad personal. Under projektets gång har laboratoriepersonal utfört ett antal provtagningar med sonden. Laboratoriet analyserade inte resultatet och gjorde inte heller någon kvalitetskontroll av sonderna eller erhållna resultat. Detta förklarar varför en del avvikelser uppstod med avseende på syrgashalt i början och under nästan hela projektet för klorofyll.

För att sonden ska kunna användas med framgång i miljöövervakning krävs det en större arbetsinsats runt arbetet med kvalitetskontroll och uppföljning. Så länge det

inte finns ett större antal uppdrag där sonden kan användas i flera provtagningsprogram, så kan inte laboratoriet lägga den nödvändiga tiden som krävs för att autonomt kunna använda sonden.

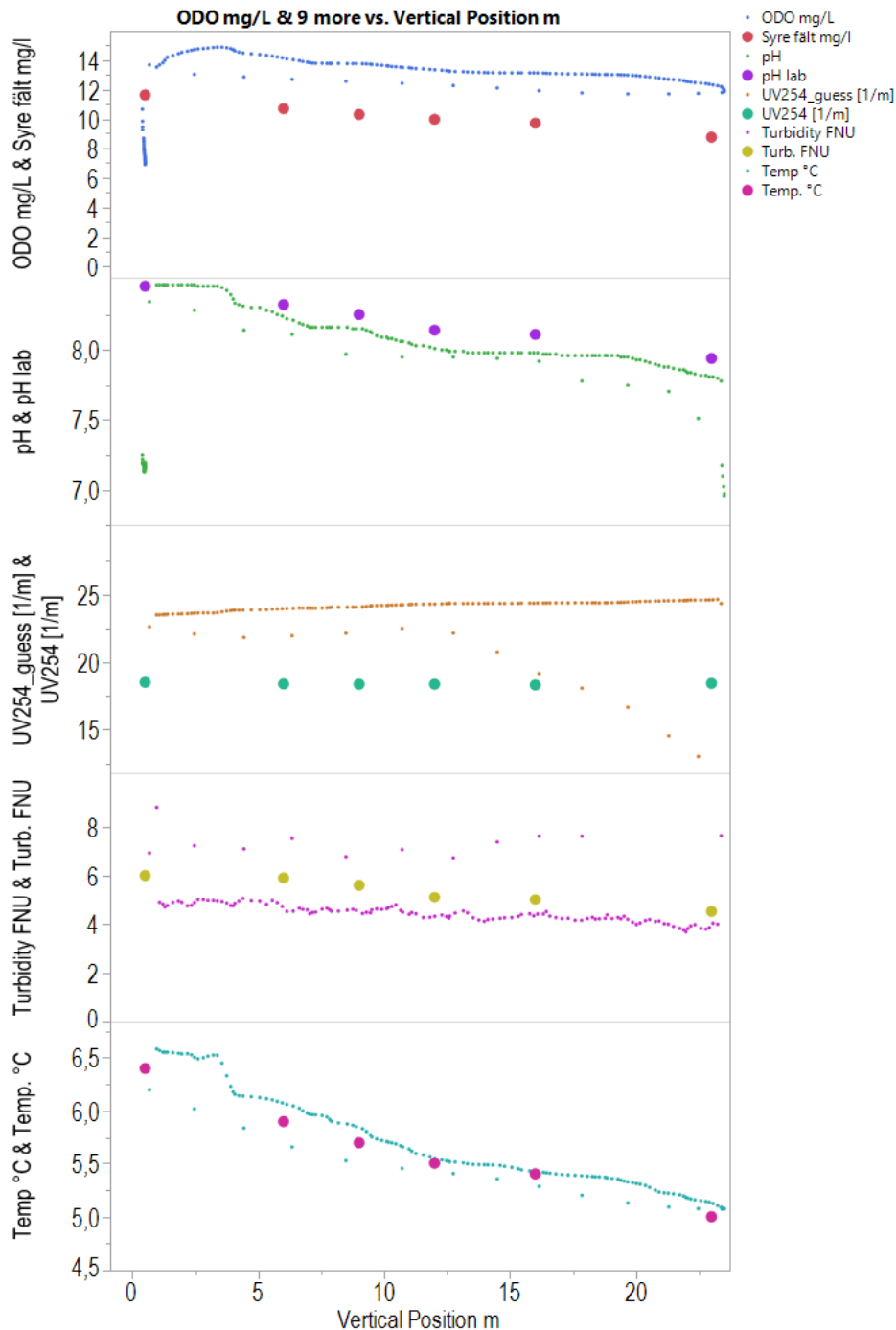
## 7 Referenser

- Drakare S, Wallman K & J Segersten (2022) Fokus på Mälaren 2021. Sammanfattande resultat från miljöövervakning och forskningsprojekt knutna till samarbetet mellan SLU och Mälarens vattenvårdsförbund. SLU, Vatten och miljö: Rapport 2022:3. <https://pub.epsilon.slu.se/27714/1/drakare-s-et-al-220505.pdf>
- Löf H (2021) Undersökning av tidigt varningssystem för algblomning – en studie genom vattenkvalitetsmätningar med EXO2 sond, fjärranalys och vattenprovtagning. Examensarbete civilingenjörsprogrammet i miljö och vattenteknik. Uppsala universitet och SLU. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1616571/FULLTEXT01.pdf>
- Cassel W (2022) Modellering av fosfordynamik i Stora och Lilla Ullfjärden. Examensarbete civilingenjörsprogrammet i miljö och vattenteknik. Uppsala universitet och SLU. <http://uu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1701990&dswid=-7731>
- Sellergren M (2022) Aluminiumbehandling som sjörestaureringsåtgärd i Stora och Lilla Ullfjärden. Examensarbete civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik, Uppsala universitet och SLU. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1679868/FULLTEXT01.pdf>
- Köhler S, Hoffmeister SM, Kikuchi J & K Wallman (2019) Utvärdering av användningen av multielektrodsonder inom miljöövervakning av sjöar. Exempel från Mälaren. SLU, Vatten och miljö: Rapport 2019:3. [https://pub.epsilon.slu.se/16067/7/kohler\\_s\\_et\\_al\\_190412.pdf](https://pub.epsilon.slu.se/16067/7/kohler_s_et_al_190412.pdf)
- Köhler, S, Cascone C & K Murphy (2021) Optiska sensorer inom dricksvattenberedning. Erfarenheter från SVU-projektet Genomljusning. Svenskt Vatten utveckling Rapport 2021-25. 96 sidor. <https://vattenbokhandeln.svenskvatten.se/wp-content/uploads/2022/03/svu-rapport-2021-25.pdf>



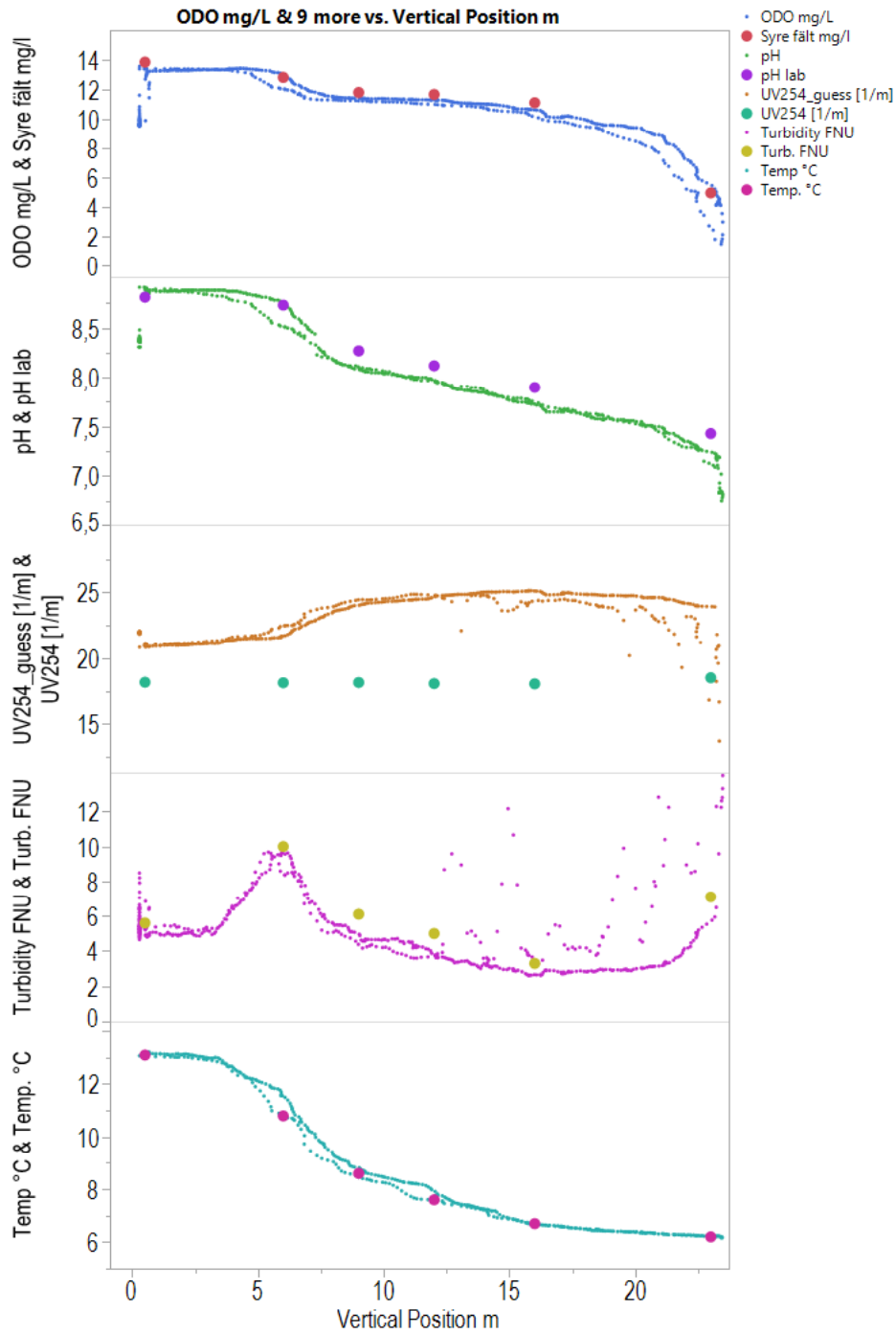
## 8 Appendix

### 8.1 Jämförelse laboratorie- och sonddata (rådata)

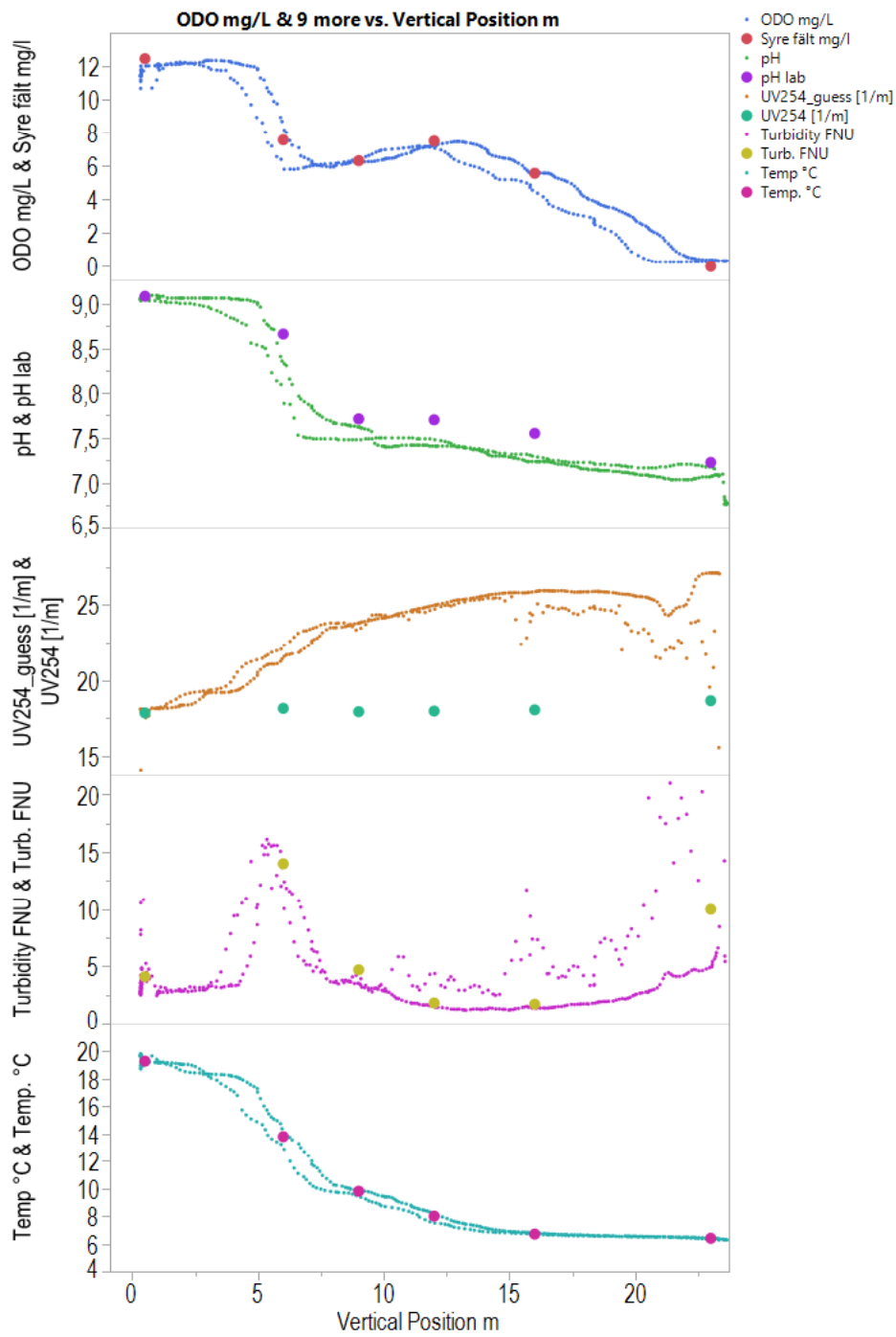


April 2022 (stabila förhållanden, ingen skiktning).

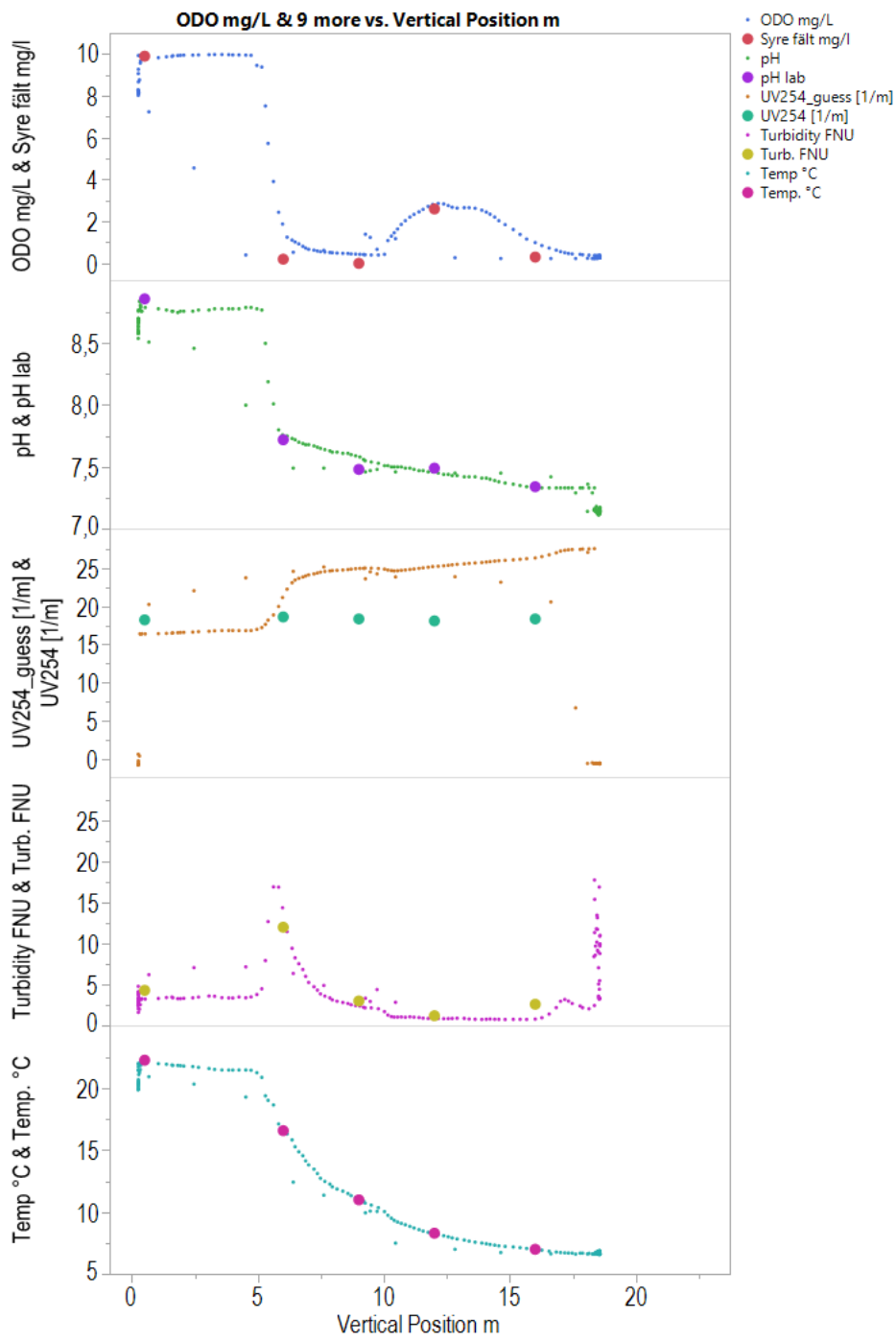
Täta punkter anger mätvärden vid en långsam nedsänkningen och mindre täta punkter mätvärden vid en snabb upptagning.



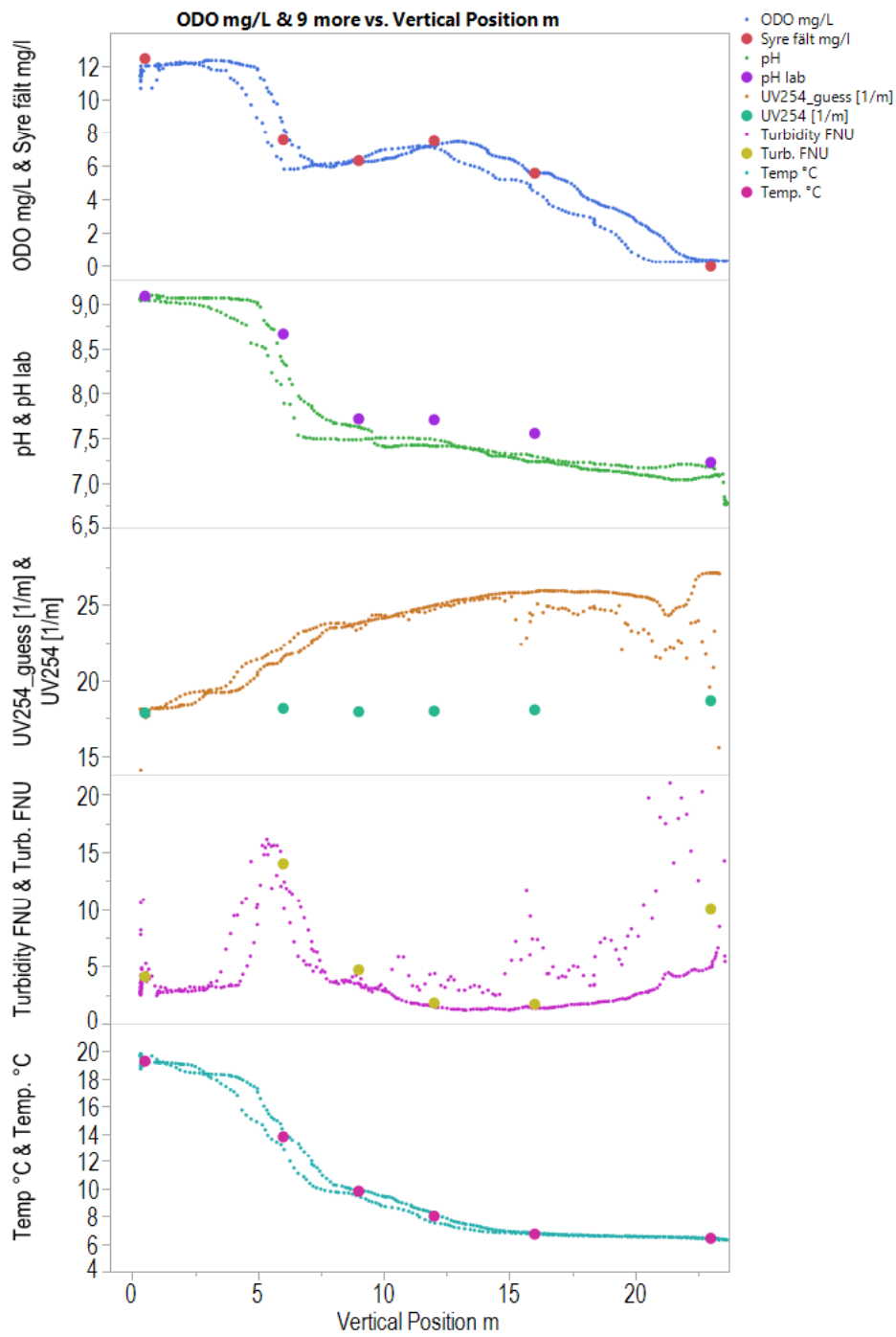
Maj 2022



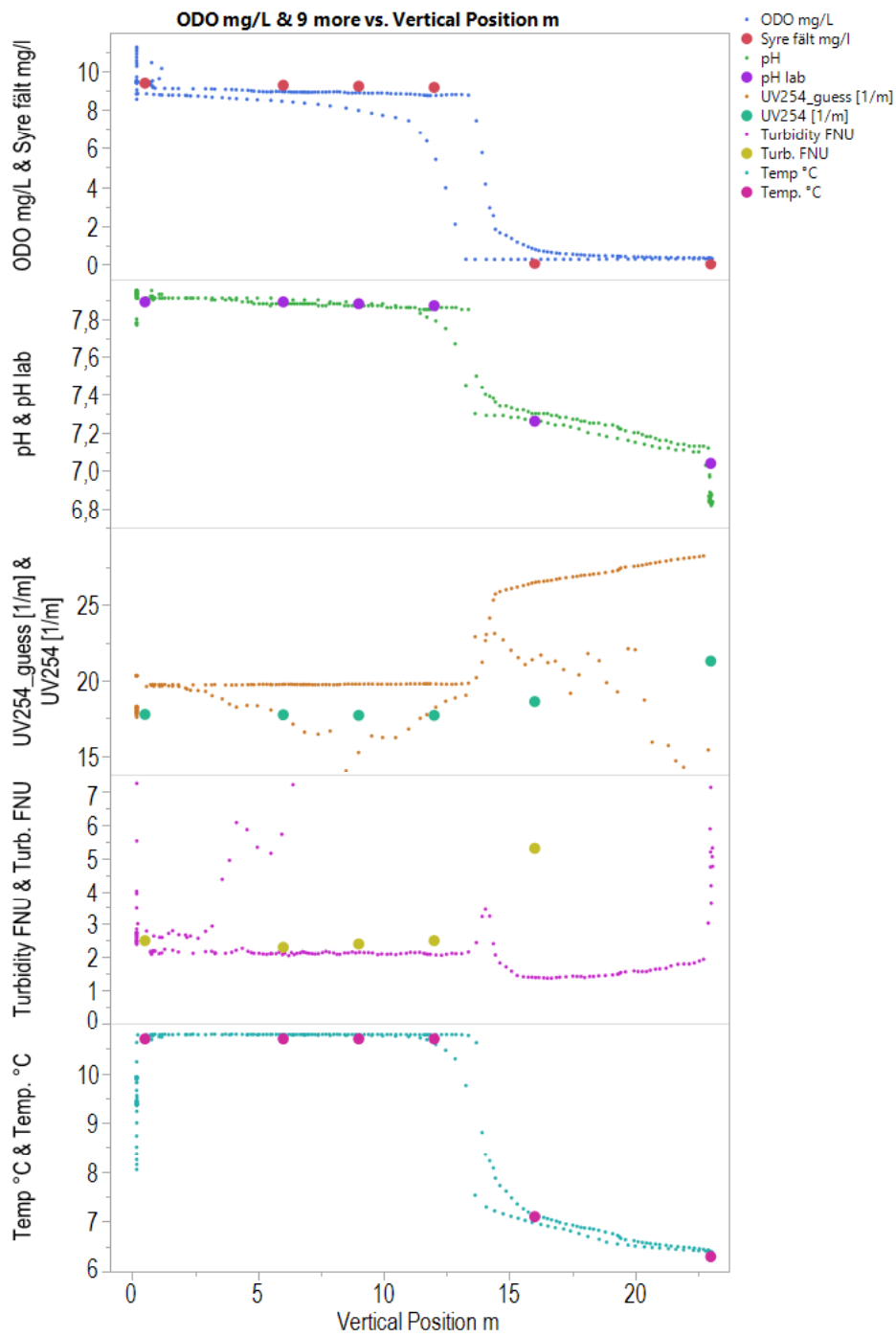
Juni 2022



Juli 2022



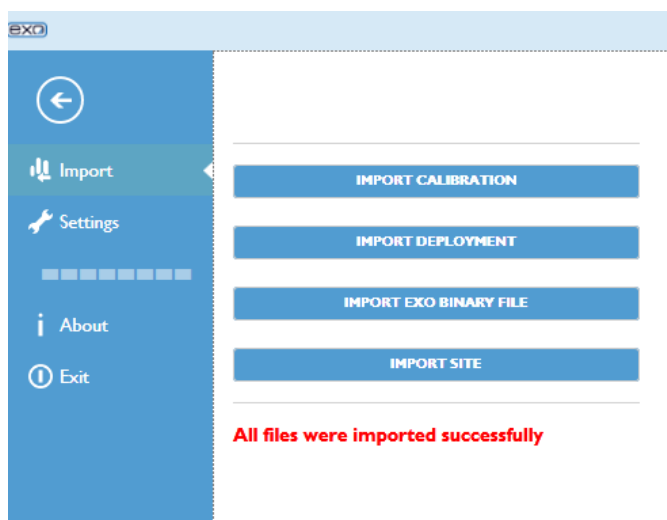
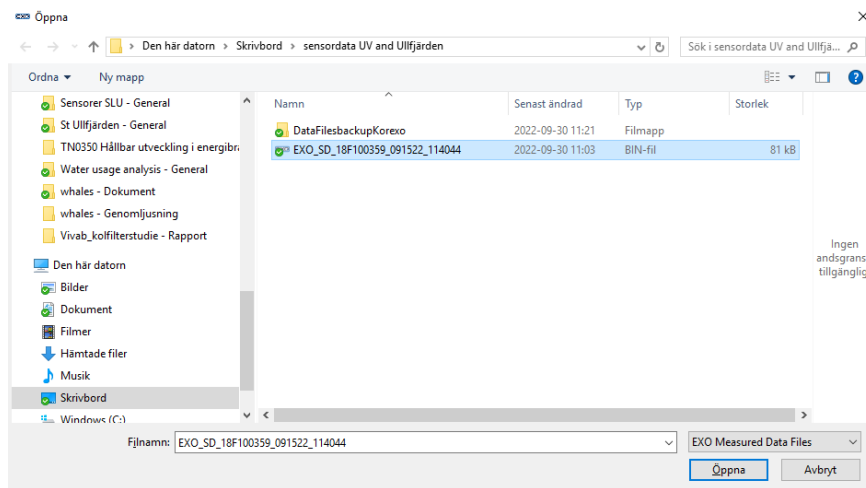
Augusti 2022



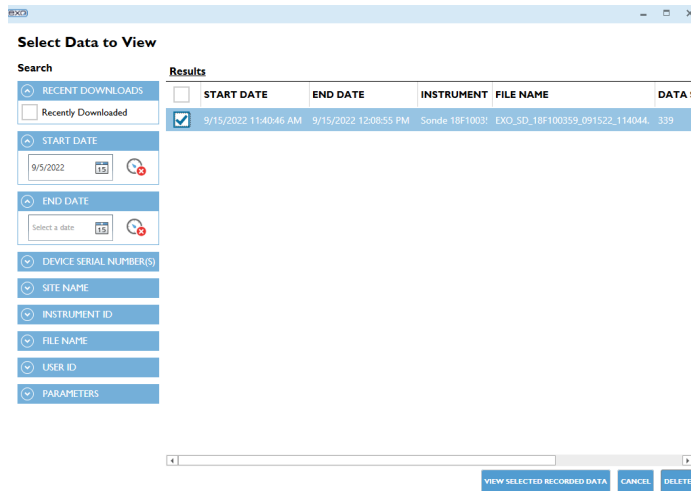
Oktober 2022

## 8.2 Protokoll för läsning av data

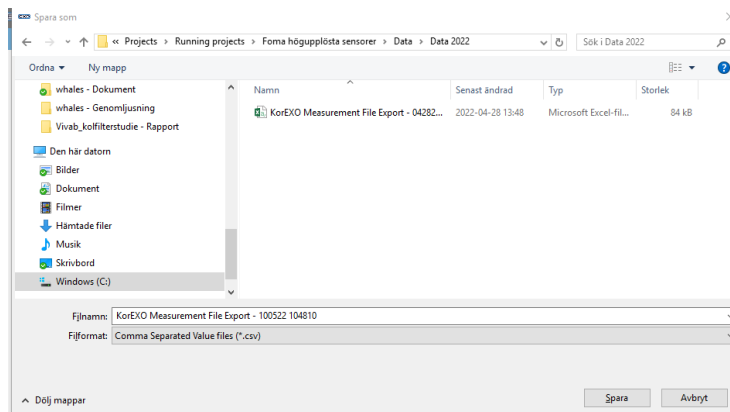
Ladda ner bin filer från EXI på ett lämpligt ställe, t.ex. Teams.  
 Importera bin filer via KorEXO.



Go till menyn **Recorded data** och välj ut fil med rätt datum. Välj sedan menyn **View selected file**



Välj Export ("...som csv.") och spara filen i en folder.



Time	DATE	SITE NAME	CHLOROPHYLL (RFU) 16M102483	CHLOROPHYLL (µg/L) 16M102483	COND (µS/CM) 14E100921	FDOM (QSU) 18E102686	FDOM 18E101
12:08:55 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.19	0.69	9.9	7.46	-6
12:08:49 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.18	0.68	10.0	7.68	-6
12:08:44 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.20	0.76	10.1	7.79	-6
12:08:39 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.22	0.81	10.1	7.90	-6
12:08:34 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.23	0.88	10.2	7.96	-6
12:08:29 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.20	0.77	10.2	7.94	-6
12:08:24 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.20	0.74	10.3	7.87	-6
12:08:19 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.21	0.80	10.3	7.84	-6
12:08:14 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.21	0.78	10.4	7.80	-6
12:08:09 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.22	0.83	10.4	7.80	-6
12:08:04 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.23	0.86	10.5	7.82	-6
12:07:59 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.21	0.79	10.5	7.83	-6
12:07:54 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.22	0.83	10.6	7.85	-6
12:07:49 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.23	0.86	10.9	7.76	-6
12:07:44 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.24	0.92	11.4	7.64	-6
12:07:39 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.24	0.91	12.9	7.67	-6
12:07:34 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.29	1.10	12.6	7.82	-6
12:07:29 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.45	1.70	12.1	8.03	-6
12:07:24 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	0.85	3.23	11.0	8.27	-6
12:07:19 PM	9/15/2022	C0348StoraUllfjärden	1.09	4.13	11.2	8.33	-6

Om csv.\* filer är kopplade till mjukvaran EXCEL borde EXCEL öppnas automatiskt, i annat fall välj EXCEL för att öppna denna nya csv.\* fil.

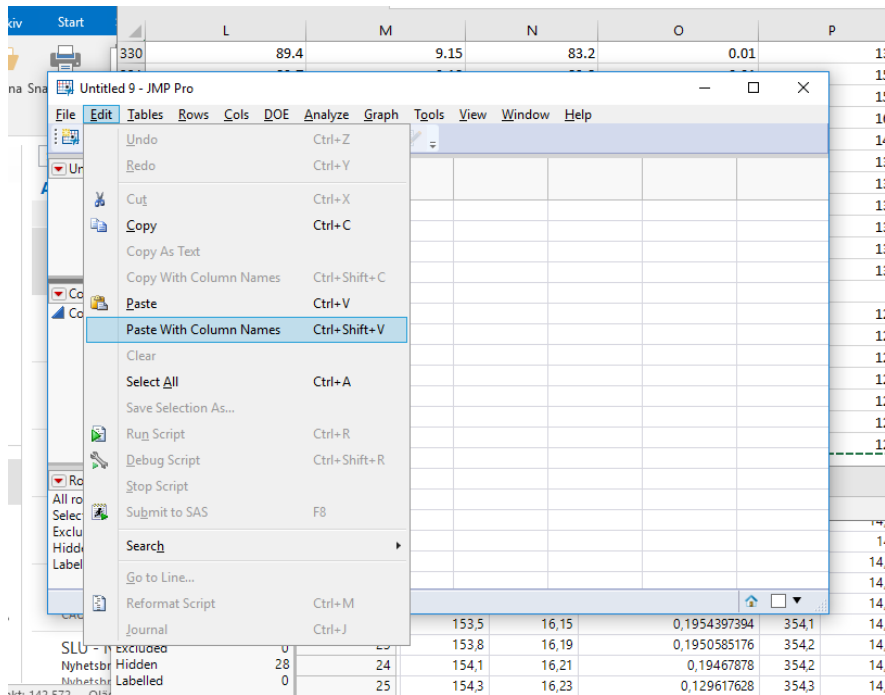


Öppna filen DummyTWOexo.jmp med programmet JMP

Säkerställ att namn på parameternamn är EXAKT lika stavade i JMP- och i EXCEL-filen.

Öppna en ny tom JMP-fil.

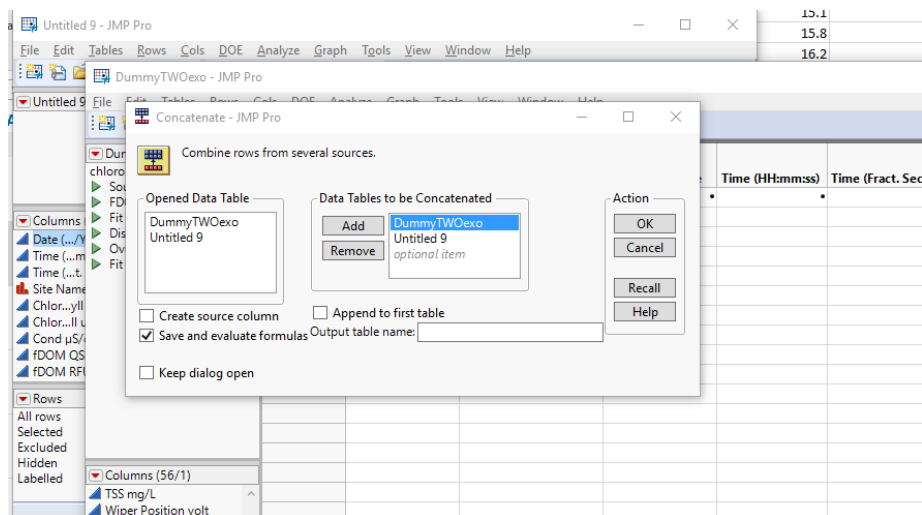
Kopierar alla rader från rad 9 (med variabelnamn) neråt och välj ”paste with column name”



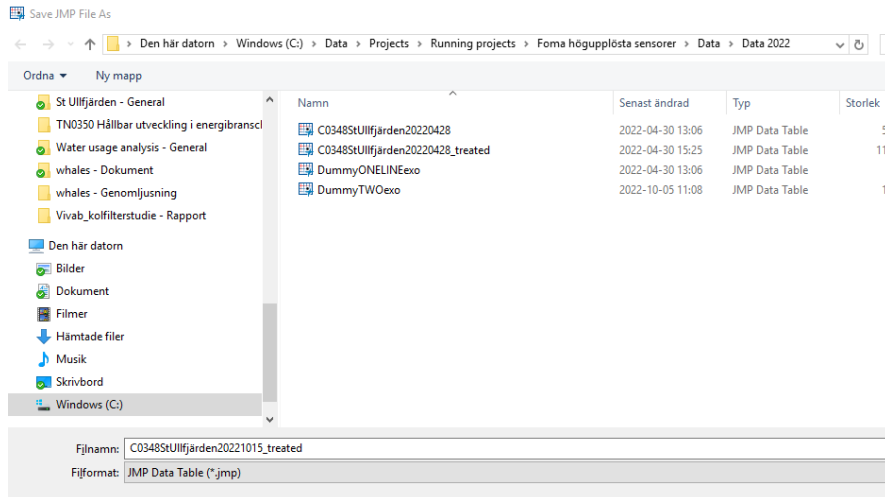
Nu bör JMP filen ser ut på följande vis:

L	Wiper Position volt	pH	pH mV	Temp °C	Battery V	Cable Pwr V
1	0	1,18	8,22	-89,1	15,45	5,87
2	0	1,18	8,22	-89,1	15,45	5,87
3	0	1,18	8,22	-89,1	15,45	5,87
4	0	1,18	8,22	-89,1	15,45	5,87
5	0	1,18	8,22	-89,1	15,451	5,47
6	0	1,18	8,22	-89,1	15,451	5,47
7	0	1,18	8,22	-89,1	15,451	5,53
8	0	1,18	8,22	-88,9	15,453	5,53
9	0	1,18	8,22	-89	15,453	5,53
10	0	1,18	8,22	-89	15,452	5,53
11	0	1,18	8,22	-89,1	15,445	5,52
12	0	1,18	8,23	-89,3	15,436	5,52
13	0	1,18	8,23	-89,4	15,431	5,54
14	0	1,18	8,23	-89,4	15,429	5,54
15	0	1,18	8,23	-89,4	15,428	5,54
16	0	1,18	8,23	-89,4	15,428	5,54
17	0	1,18	8,23	-89,3	15,428	5,54
18	0	1,18	8,23	-89,3	15,43	5,54

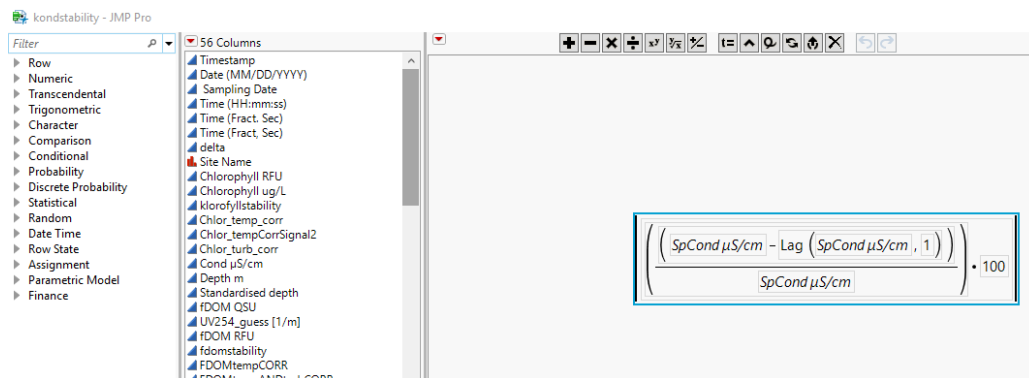
Välj "Concatenate" och lägg ihop den nya filen med DummyTWOexo.jmp med optionerna "Add Save and evaluate formulas".



Spara denna nya fil med ett lämpligt namn.



Nu borde alla formler som beräknar förändring av signaler, korrektioner av temperatur etc. göras automatiskt. Eftersom sensorn för ledningsförmåga är påverkad av temperaturen så visar den rätt värde när sensorn har en stabil temperatur samtidigt som sonden ger en signal. I filen finns det ett antal kolonner som beräknar stabilitet av signalen över tid (se formeln nedan). Möjliga orsaker till en ostabil signal är för snabba rörelse med sensorn, t.ex. den sänks ner för hastigt, eller för stora naturliga förändringar av temperaturen (skiktning). Både klorofyll, pH, fDOM, syrgasmättnad och ledningsförmågan påverkas av temperaturen. Detta beskrivs i (Köhler et al 2021).



I ett sista steg ska denna fil kopplas ihop med ordinarie provtagnings (MÖ) resultat. Innan filerna kopplas behöver vattendjupet i MÖ-filen bytas till variabeln "Nivå" mot samma namn som vattendjupet i den föregående filen ("Vertical Position m") så att alla värden kan ritas ut i figuren mot djupet.