



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 21049

Examensarbete 30 hp
November 2021

Undersökning av tidigt varningssystem för algblomning

-en studie genom vattenkvalitetsmätningar
med EXO2 sond, fjärranalys och vattenprovtagning

Harald Löf

Referat

Undersökning av tidigt varningssystem för algblooming

-En studie genom vattenkvalitetsmätningar med EXO2 sond, fjärranalys och vattenprovtagning i Stora Ullfjärden, Håbo kommun.

Harald Löf

Algblooming kan vara farligt för både människor och djur som nyttjar sjöar för dricksvatten eller rekreation om blomningen består av toxinproducerande cyanobakterier. För att tidigt få varning om algblooming är på väg att ske behövs system som med hög temporal upplösning övervakar om blomning är aktiv eller annalkandes. CyanoAlert från Brookman Geomatics är ett fjärranalyssystem där bildinformation från satelliter från Eus Copernicusprogram används för att bland annat räkna fram klorofyllkoncentration.

För att förbättra CyanoAlert undersöks i det här projektet vid vilka förhållanden i Stora Ullfjärden som klorofyllmätningar med satellit stämmer överens med in situ provtagning. Som referensvärden togs in situ klorofylldata fram via profilmätningar med kalibrerad multisensor och vattenprover från bestämda djup.

Vattenproverna visade bland annat låga klorofyllnivåer, låg turbiditet, för sjön normalt pH i början av mars. Under perioden steg dessa för att nå ett maximum vid algblooming i slutet av maj. Algbloomingen föregicks av bildandet av en termoklin, stigande vattentemperatur och stigande pH vilket skulle vara lämpligt att övervaka som indikator på att algblooming kan ske.

Den erhållna datan och styrande effekter analyserades med multivariat statistik (PLSR). VIP-plottar visade att turbiditet har störst påverkan på satellitmätningarnas noggrannhet, även siktdjup och löst organiskt kol har enligt regressionen påverkan. Det innebär att vid hög turbiditet i vattnet har mätningarna av klorofyll med satellit sämre noggrannhet.

Ett förslag på varningssystem för algblooming använder fjärranalys med satelliter för klorofyllkoncentration och turbiditet i kombination av in situ sensorer för att övervaka vattentemperatur, phycocyanin och pH.

Nyckelord: Fjärranalys, algblooming, cyanobakterier, varningssystem, multiparametersond.

Abstract

Investigating early warning system for algal blooms

-a study by in situ measurement of water quality using the EXO2 probe, remote sensing and water sampling in Stora Ullfjärden, Håbo kommun

Harald Löf

Algal blooms can pose a serious threat to humans and animals in lakes used for drinking water and recreation in the bloom contains toxin producing cyanobacteria. Early warning of impending algal blooms requires systems with high temporal resolution. Cyanoalert from Brookman Geomatics is such a system that uses remote sensing satellites from the Eu Copernicus program to supervise amongst others chlorophyll in water systems.

Measurements of chlorophyll are studied in this project to identify water quality parameters and conditions affecting the reliability. Biweekly sampling is conducted during the spring of 2021 obtaining chlorophyll data from profile measurements using water sampling a calibrated multiparameter probe. Water samples are then used as accurate reference for satellite measurement comparison.

The water samples showed low levels of chlorophyll, turbidity, and pH in the beginning of the sampling in March. During the sampling period the levels rose until reaching a maximum during algae bloom in the end of May. The bloom was preceded by rising water temperatures and the formation of a thermocline and rising pH levels that could be used as suitable indicators for imminent bloom formation.

Obtained data and governing effects were analyzed by multivariate regression (PLSR). VIP-plots showing that turbidity had the largest influence on the projected chlorophyll and thereby the measured chlorophyll levels. Also, Secci depth was identified as having strong influence. This indicates that high turbidity is a factor causing accuracy of chlorophyll measurements to deteriorate.

A proposed warning system for algal blooms should use remote sensing satellites for detecting chlorophyll and turbidity combined with in situ sensors for the surveillance of water temperature, phycocyanin and pH.

Keywords: Remote sensing, algal blooms, cyanobacteria, warning system, multiparameter sonde.

Förord

Det här arbetet är skrivet som examensarbete för civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet och omfattar 30 högskolepoäng.Handledare har varit Stephan Köhler vid institutionen för vatten och miljö, Sveriges Lantbruksuniversitet och ämnesgranskare var Dolly Kothawala vid institutionen för ekologi och genetik, Uppsala universitet.

Först vill jag tacka min handledare Stephan som har varit till stor hjälp i arbetets alla delar och som haft stort tålamod när arbetet dragit ut på tiden. Jag vill även tacka min ämnesgranskare Dolly Kothawala som har varit stöttande och tålmodig.

Jag vill även tacka Jing och DiCyano för att jag fått vara en del av projektet, Enna och Salome för provtagningen över sommaren och efterberäkningar av EXO2-data samt Petra för hjälpen med satellitdata.

Övriga personer jag vill tacka är; Fredrik för hjälpen med provtagning och provtagningsmetodik, Maja, Linnea och Calle för hjälpen med provtagning, Marcus och Roger för hjälpen i labbet, Lugnets plantskola som lät mig låna båtplats och Maria på Håbo kommun som lät mig låna båt.

Harald Löf, oktober 2021

Populärvetenskaplig sammanfattning

Algblomning är ett fenomen som kan utgöra ett hot mot dricksvattenförsörjning och rekreation i sjöar och hav. Algblomning kan ibland bestå av cyanobakterier som kan bidra med gifter i vattnet och som kan vara skadligt för människor och djur som använder vattnet. För att tidigt upptäcka algblomning är det viktigt att få information om vattnets status och om risken för algblomning är hög. En sådan metod är satellitbaserad miljöövervakning som tillhandahålls av exempelvis CyanoAlert genom Brockmann Geomatics. Det fungerar så att flera satelliter som ligger i omloppsbanan runt jorden tar bilder av jordens yta. Från bilderna beräknas sedan viktig information som exempelvis halten av klorofyll i vattnet. Klorofyll är ett ämne som finns i alla gröna växter som använder solens ljus för att leva. Även planktonalger i sjöar och hav har klorofyll och det är därför ett bra ämne att övervaka för att se när algblomning förekommer.

När satelliter gör mätningar av klorofyll påverkas resultatet av störningar i atmosfären och i vattnet. Det kan vara exempelvis moln eller grumlighet i vattnet som stör signalen. För att förbättra varningssystemen för algblomning undersöks i det här projektet vilka faktorer i vattnet som påverkar satelliternas mätningar och under vilka förhållanden som överensstämmelsen mellan mätningarna och verkligheten är bra.

För att få värden på klorofyll och vattenparametrar i Stora Ullfjärden användes i det här projektet en sond som kallas EXO2 från YSI. Den mäter flera olika parametrar däribland klorofyllkoncentration, turbiditet, pH och temperatur. Sonden kan sänkas ner i vattnet och mäta hela vägen ner till botten och på så vis skapa en profil över hur vattenkvaliteten ser ut i hela vattenpelaren. Det togs även vattenprover som analyserades på SLU:s ackrediterade laboratorium. Provtagningen för det här projektet började i mars och pågick till början av juni med två veckors mellanrum. När provtagning planerades kollades prognosen för att det skulle vara klart väder så satelliterna kunde ta bilder att koppla till mätningarna.

Vattenproverna visade att halten av klorofyll var låg i början av perioden och ökade ganska jämnt fram till provtagningen den 25 maj då det blev en kraftig algblomning med höga klorofyllvärden. Även turbiditet och pH var först låga för att sedan öka mot slutet av perioden vilket har att göra med tillväxten av alger i vattnet.

Från satellitdatat kunde ses att klorofyllkoncentrationen var låg i början av perioden för att sedan öka kraftigt i slutet av maj. Efter det sjönk den under sommaren för att sedan visa tendenser till att börja öka igen.

Profilerna över vattnet som togs fram med EXO2 sonden visade att klorofyll, temperatur, turbiditet och pH var lågt i början av perioden. Längre fram började alla parametrar stiga och vid utbrottet av blomningen den 25 maj hade det börjat bildas skiktning i vattnet med kallare vatten under och varmare över. pH hade stigit till 9 och grumligheten mer än dubblerades.

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. För Sentinel 3-satelliten togs klorofyll fram med olika beräkningsmetoder beroende på om vattentypen har mycket näringsämnen i sig eller inte. Den beräkningsmetod som kallas alternativ 2 hade ganska god överensstämmelse med de uppmätta värdena.

För att undersöka vilka faktorer i vattnet som påverkar hur noggranna mätningarna blir användes en statistisk metod som heter Partial Least Squares Regression (PLSR). Därifrån kunde de styrande faktorerna som har störst inverkan på prediktionen av klorofyllvärden identifieras. Det visade sig att grumligheten i vattnet hade störst inverkan och att siktdjup kom sen. Det innebär att mätningarna av klorofyll blir mer osäkra ju mer grumlighet och siktdjup det är i vattnet.

Ett förslag på system som kan varna för algblomning har uppkopplade sensorer som mäter temperatur, phycocyanin och pH. Där temperaturen varnar när det blir tillräckligt varmt för algblomning, phycocyanin om blomningen består av cyanobakterier och pH varnar för pågående blomning. Systemet bör även ha satelliter som kan mäta klorofyllkoncentration och även grumlighet för att se när klorofyllmätningarna är mindre säkra.

Ordlista

Fytoplankton – Växtplankton som exempelvis kiselalger. Äts av zooplankton och utgör grunden i näringspyramiden i hav och sjöar.

Kiselalg - Kallas även diatomeér och är en grupp av encelliga eukaryota organismer som utgör en stor del av världens alger. Gemensamt för dem är att de har skal av kisel.

Siktdjup- Är ett mått på hur klart vattnet är och mäts oftast genom att sänka ner en skiva i vattnet tills den försvinner.

Fotisk zon- Den zon där det finns tillräckligt med solljus för fotosyntes. Kan beräknas som två gånger siktdjupet.

Lysera - Betyder att en cell dör genom att cellmembranet blir upplöst eller går sönder.

Råvatten - Obehandlat vatten från grundvatten eller ytvatten som används till dricksvattenproduktion.

Stratifiering- Är då lager i sjö eller hav har olika salthalt eller temperatur som inte blandas om. Dessa lager bildar då skikt där det sker mycket liten transport av vatten mellan lagren. Gränsen mellan lagren kallas termoklin.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Syfte	2
1.2	Frågeställningar	2
1.3	Avgränsningar	2
2	Bakgrund och teori	3
2.1	Platsbeskrivning Ullfjärdarna.....	3
2.1.1	Stora Ullfjärden	3
2.1.2	Lilla Ullfjärden	3
2.2	Övergödning och algbloomning.....	4
2.2.1	Problem orsakat av övergödning.....	5
2.2.2	Cyanobakterier	5
2.2.3	Några vanligt förekommande arter av cyanobakterier	5
2.3	Dricksvatten	6
2.3.1	Kort om vattenreningsprocessen	6
2.3.2	Negativa effekter av cyanobakterier i dricksvatten.....	7
2.3.3	Cyanotoxiner	7
2.3.4	Metoder att rena eller inaktivera cyanotoxiner.....	7
2.4	Satellitbaserad miljöövervakning	7
2.4.1	Grundläggande om fjärranalys	8
3	Material och Metod	9
3.1	Material	9
3.1.1	Utrustning för vattenprovtagning	9
3.1.2	EXO2 multiparametersond.....	9
3.2	Metod	10
3.2.1	Vattenprovtagning	10
3.2.2	EXO2 användning	10
3.3	Vattenprovtagningar 12 mars- 2 juni 2021	11
3.4	Satellitdata.....	11
3.5	Jämförelser mellan EXO2, labb och satellitvärden	11
3.5.1	Jämförelse medelvärde EXO2 till Seccidjup.	11
3.5.2	Jämförelse klorofyllmätning vid Seccidjup.....	12
3.6	Undersökning av påverkan av vattenkvalitetsparametrar genom ”Partial Least Squares Regression” (PLSR)	12
3.6.1	Utförande PLSR	13

4 Resultat.....	14
4.1 Analysresultat vattenprovtagningar 12 mars- 2 juni 2021	14
4.2 Satellitdata mellan 12 Mars- 2 Juni 2021	15
4.3 EXO2 profiler 23 Mars- 2 Juni 2021	17
4.3.1 Jämförelser EXO2 med labresultat.	21
4.3.2 Jämförelser EXO2 med Sentinel 2.	22
4.3.3 Jämförelser EXO2 med Sentinel 3 alt 1 (S31) och 2 (S32).	24
4.4. PLRS Påverkan av vattenparametrar på satellitmätningar	26
4.4.1 VIP för satellitmätningarna	26
4.4.2 VIP för felet jämfört med analysresultat i satellitmätningarna	27
5 Diskussion	28
5.1 Vattenprovtagningar 12 mars – 2 juni.....	28
5.2 Satellitdata.....	28
5.3 EXO2 profiler.....	28
5.3.1 Jämförelser EXO2 med labresultat	29
5.3.2 Jämförelser EXO2 med Sentinel 2	30
5.3.3 Jämförelser EXO2 med Sentinel 3 alternativ 1 (S31) och alternativ 2 (S32)	30
5.4 Vattenparametrars påverkan på satellitmätningar av klorofyll	31
5.5 Varningssystem för algblomning	31
5.6 Felkällor och osäkerhet	32
5.7 Förslag på vidare undersökningar och studier.....	33
6 Slutsats	34
7 Källor.....	35
Appendix	1

1 Introduktion

En viktig källa till dricksvatten i Sveriges dricksvattenförsörjning är ytvattentäkter så som sjöar. Att ta vatten från ytvattentäkter är dock förenat med problem, bland annat att kvaliteten på vattnet kan förändras mycket under säsongen eller av aktiviteter i avrinningsområdet (Svenskt Vatten 2021). Ett allvarligt problem för dricksvattenproduktion med ytvatten är algbloomningar som är ett naturligt förekommande fenomen som sker då planktonartade alger i vatten tillväxer fort i ett vattendrag. När begreppet algbloomning används syftas det vanligtvis på massstillväxt av cyanobakterier som förr kallades för blågröna alger. Dessa är bakterier som har många liknande egenskaper som kiselalger, bland annat förmågan till fotosyntes. Det finns ett stort antal olika arter cyanobakterier och vissa av dem kan producera olika toxiner som biprodukter vid sin metabolism som kan vara skadliga för människor och djur (Livsmedelsverket 2021). För vattenverk är det viktigt att tidigt få vetskap om algbloomningar så att driften kan anpassas och god kvalitet på dricksvattnet bibehållas. Då skadliga algbloomningar väntas bli allt vanligare med klimatförändringarna är det viktigt för dricksvattenproducenter med system som kan varna när dessa är aktiva eller på väg att ske (Livsmedelsverket 2018, Ho & Michalak 2019).

En metod för att tidigt få varning för algbloomning är genom fjärranalys. Det går ut på att använda satelliter som tar bilder av jordytan på daglig basis och genom att analysera dessa kan relevanta parametrar beräknas, som kan ge information om algbloomning vattnet. Ett sådant system finns redan i Cyanoalert som är en tjänst från Brockman Geomatics. Cyanoalert är en tjänst som kan användas av såväl privatpersoner som myndigheter och företag och kan ge aktuell vattenkvalitetsinformation om vattendrag, sjöar och hav. För privatpersoner kan det exempelvis vara hundägare som vill veta om vattnet är säkert för hunden att bada i och för myndigheter kan det handla om att få utökad information i sitt arbete med miljöövervakning (CyanoAlert u. å.).

Signalen som satelliter tar emot består, förutom störningar från atmosfären, till viss del av strålning som reflekteras i vattenytan och till viss del av strålning som reflekteras djupare i vattenpelaren (Philipson née Ammenberg 2003). När cyanobakterier eller alger inte befinner sig i ytvattnet ökar risken att de inte detekteras av satelliterna. Det finns även oklarheter om hur vattenkvalitetsparametrar påverkar mätningarna och hur koncentrationen av klorofyll ser ut djupare i vattenpelaren. Hur djupt i vattnet signalen som satelliterna fångar upp når beror bland annat på vattnets grumlighet, som kan skattas av den fysikaliska parametern turbiditet. Förhöjd turbiditet kan orsakas av partiklar från omkringliggande mark, till exempel från plogad åkermark där lerpartiklar eroderas och hamnar i vattnet. Det kan även orsakas av algbloomning där själva algerna grumlar vattnet. En aspekt som komplicerar ytterligare är att vissa cyanobakterier har förmågan att reglera sin flytförmåga och på så vis röra sig upp och ner i vattenpelaren över dygnet. Det kan medföra att höga koncentrationer av cyanobakterier kan döljas i djupare vatten och sedan stiga upp till ytan efter att satellitbilden är tagen (Granéli & Turner 2006).

Vid tidigare studier har det visats att användningen av multiparametersond kan vara ett värdefullt komplement till den vanliga miljöövervakningen för att erhålla fler parametrar och fler mätpunkter i vattenkolumnen Studien utvärderar användningen av en EXO2- sond från YSI för användning inom miljöövervakning av vattendrag, men undersöker inte klorofyllmätningarna närmre (Köhler et. al. 2019). Klorofyllvärden från vattenprover visar

diskreta värden vid bestämda djup. Det finns en risk att detta ej ger en korrekt bild av algernas förekomst i vattenpelaren.

I det här examensarbetet undersöks om användning av EXO2- sonden kan ge en bredare bild av algers förekomst i vattenkolumnen. Det undersöks även om användning av EXO2-sonden kan ge ett mervärde till användning av fjärranalys som varningssystem för algblomning. Detta sker genom profilmätningar i Stora Ullfjärden under våren 2021 med EXO2- sond och vattenprovtagning.

1.1 Syfte

Det övergripande syftet med det här projektet är att undersöka förutsättningar för ett tidigt varningssystem för algblomning vilket i projektet åstadkoms genom att:

- 1) Utreda vilka vattenkvalitetsparametrar som inverkar mest på noggrannheten hos mätningar av klorofyll med satellit.
- 2) Undersöka hur multiparametersond kan användas som komplement till fjärranalys för att förutsäga och varna för algblomning.
- 3) Undersöka hur klorofyllmätningar med multiparametersond skiljer sig från vattenprover vid diskreta djup.

Detta i syfte att förbättra varningssystem för algblomning så att vattenverk kan anpassa driften och så att privatpersoner som nyttjar badvatten kan få varning om skadliga blomningar är på väg att ske eller är aktiva.

1.2 Frågeställningar

Några frågeställningar som behandlas i rapporten är:

- Hur är överensstämmelsen mellan klorofyllmätningar med satellit jämfört med vattenprover analyserade i labb?
- Hur är överensstämmelsen mellan klorofyllmätningar med satellit jämfört med mätningar med EXO2-sonden?
- Hur påverkas mätning av klorofyll, genom analys av satellitbilder, av vattnets olika fysikaliska och kemiska egenskaper?
- Finns det någon egenskap hos vattnet som har särskilt stor påverkan?
- Kan EXO2 sensorn användas som komplement till satellitövervakning i ett varningssystem för algblomning?

1.3 Avgränsningar

Provtagning har skett vid flera platser än mitten av sjön, men dessa behandlas ej i det här projektet. Även satelliterna har gjort mätningar vid fler platser i både Stora och Lilla Ullfjärden, men det är bara den punkt som benämns mitten av sjön som behandlas. Satelliterna ger fler parametrar än bara klorofyll, men dessa behandlas ej i det här projektet. Analyserna i projektet har bara utförts med data fram till 2/6-21, därefter är bedömningar endast utifrån grafiskt material.

2 Bakgrund och teori

2.1 Platsbeskrivning Ullfjärdarna

Stora och Lilla Ullfjärden, figur 1, är två sjöar som ligger norr om Bålsta i Håbo kommun. De två sjöarna är innersta delen av en Mälarvik som tillhör Norrströms avrinningsområde som mynnar i Östersjön genom centrala Stockholm. Sjöarna, särskilt Lilla ullfjärden, är speciella ur flera hänseenden. De är båda avgränsade från dels varandra och dels från nästa bassäng Ryssviken, appendix 1, genom smala sund där djupet är litet och endast ett mindre vattenflöde kan passera vilket gör att de nästan kan anses vara självständiga sjöar istället för vik till Mälaren. De får en stor del av sin tillrinning genom grundvatten, särskilt Lilla Ullfjärden, vilket ger själva vattnet speciella karaktärer med bland annat högt pH, hög kalciumhalt och historiskt sett, dock ej längre, låg fosforhalt. Det förekommer sällsynta relikarter i fjärdarna, vilka är rester från senaste istiden, som exempelvis fyra arter av kräftdjur: hoppkräfta, pungräka, märkräfta och skorv som normalt är brackvattenarter. Det finns även arter av tång som brunalgen *Pleurocladia lacustris* och grönalgen *Enteromorpha pilifera*. Det förekommer småsvalting i sjöarna som är en mycket ovanlig vattenväxt som utvecklats i Östersjön efter senaste istiden (Jacobson 2005). Området kring och själva Ullfjärdarna själva är till följd av de speciella karaktärerna utsett till Natura 2000 område och riksintresse för naturvården enligt 3 kapitlet, 6§ MB vilket ger ett stärkt skydd för miljön (Carlsson, 2001). Sedan 2014 gäller även utökat strandskydd till 300 meter på land och i vattnet (Länsstyrelsen Uppsala Län 2014).

2.1.1 Stora Ullfjärden

Norr om Bålsta och Lilla Ullfjärden ligger Stora Ullfjärden som är en relativt djup fjärd med största djupet på 27 meter och medeldjup på 15,2 meter. Stora Ullfjärdens area är 2,8 km² och dess avrinningsområde är 48 km². Avrinningsområdet består dels av Lilla Ullfjärden och dess avrinningsområde, men även ca 50 % åkermark och 30 % skogsmark. Tillrinning sker främst från diken och en bäck som rinner ut nära Ekillabadet (Atterlöf et. al. 2009). Dess omsättningstid är på 4 år vilket gör sjön känslig för tillförsel av föroreningar (Gustafsson 2015a). I Stora Ullfjärden finns det småsvalting och sjön ingår i det naturskyddsområde och natura 2000 område som innefattar Stora och Lilla Ullfjärden (Jacobson 2005). Stora Ullfjärden fick vid den senaste statusklassningen från VISS dålig ekologisk status på grund av övergödning och uppnår ej god för kemisk status på grund av kvicksilver och polybromerade difenyletrar (VISS u.å. a). Sjön har kraftigt förhöjda halter av näringsämnen efter tillförsel från omkringliggande små avlopp och jordbruk där eutrofiering pågått från slutet av 1800-talet med kraftig försämring från mitten av 1900-talet och kan idag betraktas som eutrof (Atterlöf et. al. 2009).

2.1.2 Lilla Ullfjärden

Lilla Ullfjärden är en av de djupaste fjärdarna i Mälarens med största djupet på 53 meter och ett medeldjup på 22 meter. Fjärden är avgränsad från Stora Ullfjärden av Skälsund som endast är någon meter brett och några decimeter djupt. Sjöns area är 1,88 km², dess avrinningsområde är 8,51 km² och omsättningstiden är 8-10 år. I avrinningsområdet är 9 % odlad mark, 60 % skogsmark och 20% av ytan i avrinningsområdet utgörs av Uppsalaåsen. Kanterna runt sjön är branta med skogsklädda höjder uppåt 60 meter längs den östra stranden (Carlsson, 2001).

Under tidigt 1900-tal började Lilla Ullfjärden tillföras stora mängder växtnäringsämnen från jordbruk och avlopp i avrinningsområdet, men även från bakvatten som strömmade in från

Stora Ullfjärden då vattenståndet var lågt. Tidigare var Lilla Ullfjärden dricksvattentäkt för Bålsta, men det stoppades 1986. Den historiska tillförseln av fosfor har dock bidragit till att sjön har mycket fosforrikt sediment vilket i kombination med det stora medeldjupet bidrar till internbelastning av fosfor och syrefria förhållanden på djupa bottenar (Willén & Tillén 1984, Gustafsson 2015b). Sjön klassas enligt VISS som måttlig ekologisk status och uppnår ej god för kemisk status (Viss u. å. b).



Figur 1a-1b. 1a visar en satellitbild tagen av Sentinel 2A 21/8-2021. Det går att se mörkt vatten utan algblomning i norra delen, viss algblomning i Stora Ullfjärden i mitten och mer algblomning i Lilla Ullfjärden (SYKE 2021). 1b visar kartbild över Ullfjärdarna från lantmäteriet (Lantmäteriet 2021). Innehåller Copernicus Sentinel data (2021), SYKE.

2.2 Övergödning och algblomning

Flödet av organiskt material och näringsämnen från skog och mark är basen i näringsväven som bygger upp livet i sjöar och vattendrag. Det organiska materialet bryts ner av mikroorganismer som omvandlar detta till kemisk form vilket är tillgängligt för växtplankton och sjöväxter att ta upp. Fytoplankton bygger genom sin fotosyntes upp grunden i näringspyramiden i de flesta vatten, dessa betas av djurplankton som i sin tur äts upp av insekter och fisk. När aktiviteter på land leder till att för mycket näringsämnen tillförs vatten kan den naturliga balansen störas så att det sker massstillväxt av växtplankton eller cyanobakterier, så kallad algblomning (Bernes 2005). Algblomning sker naturligt i många vatten, men de extrema och långvariga algblomningar som nu sker i många vatten är en direkt följd av mänskliga utsläpp av växtnäringsämnena fosfor och kväve (Granéli & Turner 2006). I akvatiska ekosystem är normalt ett eller flera näringsämnen begränsande för tillväxten av växter och alger. De näringsämnen som vanligen är begränsande är kväve och fosfor och relationen som växter och alger behöver är 16 kväve:1 fosfor. I sötvatten är vanligtvis fosfor

det begränsande ämnet, medan kväve är begränsande faktor i exempelvis Östersjön. Algblomning följer normalt säsongsmönster där blomningar av kiselalger sker på våren och följs av blomningarna av cyanobakterier på högsommaren när det är som varmast och vattnet är stratifierat. (Bernes 2005).

2.2.1 Problem orsakat av övergödning

Algblomning kan ha ett flertal negativa följder för akvatiska ekosystem utöver de gifter och påverkan på dricksvattenproduktion det för med sig. Vid sin tillväxt konsumerar cyanobakterier och kiselalger löst koldioxid från vattnet vilket höjer pH värdet. När blomningen sedan ebbar ut kommer algerna eller cyanobakterierna att sjunka till botten där de bryts ner av mikroorganismer. Nedbrytningsprocessen förbrukar det tillgängliga syret i vattnet vilket kan leda till syrefria botten i djupa sjöar och hav där strömmar och vågor inte blandar om vattnet. Vid kraftiga blomningar kan alger fastna i fiskars gälar så de kvävs. Fiskar kan även dö av syrebrist i exempelvis grunda övergödda sjöar där syret förbrukas efter algblomning. Eutrofiering bidrar även till artskiften då förhållanden blir mer gynnsamma för exempelvis bentiska fiskarter (Ansari et. al. 2011).

2.2.2 Cyanobakterier

Cyanobakterier är en blandad grupp av bakterier som har förmågan att genom fotosyntes med solljus binda koldioxid och omvandla detta till biomassa och syre som växter. Forskning visar att de första organismerna med fotosyntes var cyanobakterier och att det var dessa som syresatte jordens atmosfär för ca 3 miljarder år sedan i det som kallas det stora oxidationseventet. Från symbios med cyanobakterier har sedan kloroplaster utvecklats som ger växter och alger förmågan till fotosyntes (Schirmer et. al. 2015).

Cyanobakterier har tidigare kallats för blågröna alger vilket inte är en korrekt beskrivning då de inte är alger och inte heller alltid blågröna. Den blågröna cyanofärgen kommer från hjälppigmentet phycocyanin, men det kan ofta döljas av klorofyll a eller ett annat hjälppigment phycoerythrin eller av gul-orangea karotenämnen. De kan ha stor variation i utseende och variera från grön, till röd, gult, brunt och rosa (Granéli & Turner 2006).

Då det råder begränsad tillgång på kväve har vissa arter av cyanobakterier en konkurrensfördel gentemot andra cyanobakterier och diatoméer då dessa har förmågan att fixera kväve från luften vilket bara gör dem beroende av fosfortillgången. Ytterligare en konkurrensfördel som vissa cyanobakterier har är att de har gasfyllda vakuoler som gör att de kan reglera sin flytförmåga. De kan då sjunka ner till djupare och mer näringsrika vattenskikt där de lagrar näringsämnen och sedan flyta upp mot ytan där mer ljus är tillgängligt för fotosyntes. Generellt har cyanobakterier blivit framgångsrika genom att utveckla egenskaper som gör att de kan frodas när andra arter i deras miljö utsätts för stress av omvärldsfaktorer (Ansari et. Al. 2011).

2.2.3 Några vanligt förekommande arter av cyanobakterier

- *Microcystis*- Encellig kolonibildande vanligt förekommande sötvattenart. Bildar hepatotoxinet microcystin. Ej kvävefixerande. Har gasfyllda vakuoler (Granéli & Turner 2006) & (Ansari et. al. 2011) & (Huisman et. al. 2005)
- *Plankthotrix rubescens*- Filamentartad flockbildande rödaktig sötvattenart. Ej kvävefixerande art som bildar nervgiftet saxitoxin och har gasfyllda (Granéli & Turner 2006) & (Ansari et. al. 2011) & (Huisman et. al. 2005).

- *Nodularia spumigena*- Filamentartad brackvattenart som är vanligt förekommande i Östersjön. Bildar hepatotoxinet nodularia. Kan få kraftiga oftast gröna blomningar och kan fixera kväve från luften och har gasfyllda vakuoler. Kallas på svenska för katthårsalg (Granéli & Turner 2006) & (SMHI 2021b) & (Huisman et. Al. 2005).
- *Aphanizomenon* - Filamentartad brackvattenart som är vanligt förekommande i Östersjön. Kan få kraftiga oftast gröna blomningar och kan fixera kväve från luften och har gasfyllda vakuoler. Ej toxinbildande enligt SMHI, men kan producera anatoxin-A enligt Huisman et. al. (2005) (Granéli & Turner 2006) (SMHI 2021b) & (Ansari et. al. 2011) & (Huisman et. Al. 2005).
- *Cylindrospermopsis raciborskii*- Kvävefixerande sötvattenart som bildar bland annat hepatotoxinet cylindrospermopsin. Troddes tidigare bara förekomma i tropiskt klimat, men har nu konstaterats i USA, Europa och Australien. Har gasfyllda vakuoler (Granéli & Turner 2006) & (Ansari et. al. 2011) & (Huisman et. al. 2005).

2.3 Dricksvatten

Dricksvatten är det viktigaste livsmedlet på jorden och i Sverige ett ofta förbiset livsmedel då tillgången är god, kvaliteten hög och priset lågt. Ungefär hälften av råvattnet som används i Sverige till produktion av dricksvatten kommer från ytvattentäkter, alltså från sjöar och vattendrag. Den andra hälften kommer från grundvatten som pumpas från rullstensåsar och djupa underjordiska magasin. Råvatten från grundvattentäkter har ofta jämn och god kvalitet då det sker naturlig rening när vattnet passerar genom marken under lång tid. Råvatten som kommer från ytvattentäkter är dock generellt av mer ojämn, sämre, kvalitet då det påverkas av aktiviteter på land i avrinningsområdet, väder och vattendragets biologiska processer (Svenskt Vatten 2021). Exempelvis bidrar avlopp och jordbruk med växtnäringsämnen till sjöar och vattendrag som kan orsaka övergödning med algblooming som konsekvens (Huisman et al 2005). Dricksvatten som produceras från ytvattentäkter vid ca 170 vattenverk förser ungefär hälften av landets innevånare särskilt i de större städerna. De kvalitetskrav som vattenverk måste följa ställs av livsmedelsverket och går att finna i LIVSFS 2001:30. Där finns gränsvärden för skadliga ämnen så som virus och bakterier, men även halter av tungmetaller och miljöföroreningar. Det finns även krav på vattnets färg och lukt så att vattnet ska vara trevligt att dricka och inte väcka anstöt (Svenskt Vatten 2021).

2.3.1 Kort om vattenreningsprocessen

För att vatten från ytvattentäkter ska få tillräckligt hög kvalitet enligt livsmedelsverkets föreskrifter (LIVSFS 2001:30) genomgår det ett antal reningssteg som ska avhjälpa olika problem som vattnet har. Ett övergripande syfte med reningen är att förhindra sjukdomsframkallande organismer från att finnas i det färdiga vattnet. För detta ska reningen ha ett visst antal barriärer som ska ta bort eller inaktivera den absoluta majoriteten av organismer som exempelvis E-coli och norovirus.

Ytvatten genomgår normalt följande reningssteg innan det kommer till konsumenten: Grovfiltrering för att avskilja större partiklar och pH justering, tillsats av flockuleringsmedel som får organiskt material och mindre partiklar att bilda flockar, sedimentering eller flotation där det mesta av flockarna avskiljs, snabbfiltrering för att avskilja resten av flockarna, desinficering för att döda kvarvarande mikroorganismer innan vattnet skickas till vattenreservoarer (Svenskt Vatten 2021).

2.3.2 Negativa effekter av cyanobakterier i dricksvatten

Vid höga algkoncentrationer ökar halten alger som kommer förbi förbehandling och flockuleringssteg. Det kan leda till att filterbäddarna vid snabbfiltrering mättas snabbare så att de måste backspolas oftare. Alger i råvatten är en av de främsta anledningarna till dålig lukt och smak på vattnet vilket kan göra dricksvatten otjänligt (Crittenden et. al. 2012). Ett av de största problemen som kommer från blomning av cyanobakterier är dock cyanotoxiner som är direkt skadliga att dricka och som är svåra att rena ur vattnet (Livsmedelsverket 2007).

2.3.3 Cyanotoxiner

Alla cyanobakterier bildar inte toxiner, men då det kräver analys av vattnet för att påvisa toxiner är det bäst att utgå från att toxiner finns i vattnet när det sker algblomning. Toxiner frigörs från cyanobakterier när dessa dör eller förstörs och det är därför viktigt att använda rätt metoder vid beredningen eller ha möjlighet att anpassa driften. Toxin från exempelvis cyanobakterien microcystis kan frigöras vid oxidering eller kemisk fällning då bakterien bryts ner eller går sönder (Livsmedelsverket 2007).

2.3.4 Metoder att rena eller inaktivera cyanotoxiner

För att avskilja hela cyanobakterier och deras toxiner ur dricksvattnet kan kemisk fällning med flockulering, sedimentering eller flotation och snabbfiltrering (3-6 meter per timme) användas. Kemisk fällning syftar till att ta bort organiskt material och partiklar ut vattnet och då avskiljs även hela cyanobakterier. Om trycket under sandfiltreringen blir för stort vid filtreringen kan dock cyanobakterierna lysa vilket kan frigöra toxinerna (Livsmedelsverket 2018).

Långsamfiltrering är filtrering då vattnet filtreras genom en sandbädd över längre tid. Hastigheten kan vara ca 0,1-0,2 meter per timme och under transporten bryts organiskt material ned av biofilm utöver att det avskiljs genom filtrering. Långsamfiltrering kan ha god avskiljande förmåga för även microcystiner och cylinderspermopsiner (Livsmedelsverket 2018).

Desinficering och oxidering används för att inaktivera mikroorganismer, men kan även användas för att bryta ner algtoxiner så dessa blir mindre farliga. Oxidering kan även användas för att neutralisera dålig lukt och smak från cyanobakterier (Crittenden et. al. 2012).

2.4 Satellitbaserad miljöövervakning

Algblomning är ett ökande problem i stora delar av världen. Det är dock svårt att övervaka utbredningen av många algblomningar utan luft och rymdbaserade övervakningssystem. Ett internationellt system för miljöövervakning genom satelliter och markstationer är Eus jordövervakningsprogram Copernicus. I programmet finns ett flertal satelliter med olika egenskaper som övervakar bland annat atmosfär, land och havsmiljö (Copernicus 2021a).

I det här projektet har data från satellitprogrammen Sentinel 2 och 3 använts. Sentinel 2 består av två satelliter, Sentinel 2a och 2b, som kretsar kring polerna med 180 graders fasförskjutning på en genomsnittlig höjd av 786 km. Varje satellit har en återkomsttid på 10 dagar och med fasförskjutningen blir detta i stället var femte dag en satellit passerar. Då banorna med teleskopets synfält på 290 km till viss del överlappar kan återkomsttiden bli 2-3 dagar på våra breddgrader. Satelliternas uppdrag är bland annat att bevaka förändringar på markytan och leverera högupplösta bilder i flera olika spektrala band med kort återkomsttid. De har 13 olika spektrala band mellan 10 och 60 meters upplösning (ESA 2021a). Även

Sentinel 3 programmet har två identiska satelliter, 3A och 3B, som kretsar kring jorden på en höjd av 814,5 km. De är har samma omlopps bana fast förskjutet 140 grader och har en kort återkomsttid på en till två dagar. Pixelupplösningen är på 300 meter (ESA 2021b, ESA 2021c).

2.4.1 Grundläggande om fjärranalys

Fjärranalys är en metod att få information om ett fenomen eller objekt genom att göra mätningar av det från långt håll. Det sker vanligtvis genom flygbilder eller genom satellitbilder. Mätningar med satellit fångar upp elektromagnetisk strålning som reflekteras från jordens yta. Strålningen kommer från solen och består av ett brett spektrum av signaler som det synliga ljuset, ultraviolett strålning och microvågstrålning. Satelliter för fjärranalys har sensorer som kan detektera ett flertal av dessa olika strålningar i olika våglängder (Philipson née Ammenberg 2003).

När solens strålning träffar en vattenyta kommer en viss del absorberas, en viss del reflekteras och en viss del transmittas. Den delen av strålningen som transmittas djupare i vattenpelaren kommer sedan även den reflekteras, absorberas eller transmittas tills det inte finns någon strålning kvar som kan färdas djupare i vattnet. Hur djupt strålningen går beror på vattnets egenskaper så som partiklar, alger och färg, men även strålningens egenskaper så som dess våglängd och intensitet. Den signal som fångas upp av satelliten är sedan till en del strålningen som reflekterats från vattnet i dess olika lager och till del strålning som studsar och reflekterats från andra källor (Philipson née Ammenberg 2003). En uppskattning av vid vilket djup det mesta av signalen kommer från är mellan ytan och halva siktdjupet eftersom mycket av den ursprungliga strålningen reflekteras i ytvattnet. Det är en grov uppskattning och beror även på vilken typ av vatten det mäts på (Philipson née Ammenberg 2021).

3 Material och Metod

Provtagning gjordes i Stora Ullfjärden dels med en multiparametersond och dels genom att ta vattenprover vid koordinat N6612210 E641922, med SWEREFF99s koordinatsystem under perioden 12 mars till 2 juni. Målsättningen var att provtagning skulle ske varannan vecka fram till augusti 2021 där första halvan av perioden ingår i det här projektet. Provtagningen försökte förläggas så långt som möjligt till dagar utan molntäcke för att kunna koppla proverna till satellitmätningar. Detta eftersom satelliterna ej kan se jordytan under skymmande molntäcken. Provtagning i mars och början av april skedde med hjälp av provtagningspersonal från SLU, sedan med hjälp av två studenter från miljö och vattenteknikprogrammet och sedan med hjälp av två erasmusstudenter som även fortsatte provtagningen över sommaren 2021.

3.1 Material

Vid vattenprovtagning har material för vattenprovtagning enligt provtagningsinstruktion använts. För vattenprofil har en EXO2 multiparametersond använts. För bestämning av djup användes ett handburet ekolod (Institutionen för vatten och miljö 2009).

3.1.1 Utrustning för vattenprovtagning

För vattenprovtagningen användes en Fyrishämtare för att ta ytvattenprov och en Ruttnerhämtare med metalldelar för att ta prov av vatten från djupare i sjön. I Fyrishämtaren sattes en 500 ml plastflaska som vattnet därefter hölls från till provflaskorna. För varje prov togs vatten i två 500 ml plastflaskor för klorofyllanalys, en vit 250 ml plastflask, en blå 250 ml plastflaska, en rund 100 ml plastflaska, en fyrkantig 100 ml plastflaska och en rund 50 ml plastflaska (Institutionen för vatten och miljö 2018).

3.1.2 EXO2 multiparametersond

EXO2-sonden användes tidigare under 2018 vid ett utvärderingsprojekt i Mälaren, även då i Stora Ullfjärden (Mälarseminariet 2020). Då upptäcktes bland annat hur cyanobakterier och alger kan vara dolda från traditionell miljöövervakning genom att de uppehåller sig i djupare skikt än ytvattnet (Köhler et. al. 2019).

EXO2 sonden är en multiparametersonde med 7 ingångar för olika sensorer. Sonden som användes var monterad med sex sensorer: en elektrod i glas med kombinerad konduktivitet/temperatur, en kombinerad elektrod för pH/ORP (oxidation reduktionspotential), en elektrod för löst syrgas, optisk sensor för mätning av fluorescens, optisk sensor för mätning av turbiditet och en optisk sensor för klorofyll/phycoocyanin. I den sjunde instrumentplatsen satt en borstmodul som är till för att borsta rent sensorerna vid långvarig mätning i vattendrag då påväxt annars är ett problem för mätningarna (Köhler et. al. 2019, Xylem 2020).

Den kombinerade klorofyllsensorn har ett mätspann mellan 0 till 400 $\mu\text{g/l}$ och en upplösning på 0,01 $\mu\text{g/l}$. Excitation för klorofyll sker vid 470 ± 15 nm och emission vid 685 ± 20 nm där klorofyll a absorberar starkt vid 438 nm och 676 nm. Svarstiden är mindre än två sekunder (Xylem 2020).

Klorofyllsensorn ger mätvärden i flera enheter, bland annat $\mu\text{g/l}$ och RFU (Relative Fluorescence Unit). För att omvandla från RFU till $\mu\text{g/l}$ kan man använda omvandlingsfaktorn 4,04 (Brunel 2021, Coignard 2021).

3.2 Metod

3.2.1 Vattenprovtagning

Provtagning skedde vid samma koordinat som vid tidigare provtagningar (Miljödata MVM u. å.) i sjön där målet varit att ta prover över största djupet och så centralt i sjön som möjligt.

Provtagning skedde enligt Institutionen för vatten och miljö provtagningsmanual (2009), metodreferens SS-EN 25667 - 2, utgåva 1 och SS 028194, utgåva 1 och enligt instruktion av provtagningspersonal. Ackreditering för provtagningen enligt ISO/IEC 17025 med ackrediteringsnummer 1208 gäller bara då Institutionen för vatten och miljö ansvarat för provtagningen (Östlund 2021, Wallman 2021). Från och med provtagningstillfället 16 april var ej personal från Institutionen för vatten och miljö med.

Vid provtagningarna fram till och med 20 april skedde filtrering av klorofyllproverna i SLUs laboratorium med deras utrustning och sedan med lånad fältutrustning i fält när båten kom in till land.

3.2.2 EXO2 användning

Sensorerna förvarades i en skyddskopp med kranvatten. Vid ankomst till provplatsen byttes vattnet till sjövattnet för att temperera sonden. Vid provtagningsplatsen initierades en mätningssession med den handburna datorn, benämns handheld, där det valdes att mätning skulle ske var femte sekund. Sensorerna doppades sedan ner i vattnet och för att temperera sonden hölls den i ytan ett litet tag. Därefter sänktes sonden ner i vattnet med målhastigheten 1,5 - 2 meter per minut (Köhler 2019). Med markeringar på linan bedömdes när sonden var strax ovanför botten. Det var svårt att bedöma från markeringarna och sonden gick i botten vid flera provtagningstillfällen. Därefter drogs sonden upp med samma målhastighet. När sonden kom till ytan avslutades mätningen med handheld. I labbet laddades data ner från sonden med kabel till dator med hanteringsprogrammet KorExo (Xylem 2020).

3.2.2.1 Efterbehandling EXO2 data

Klorofyllsensorn påverkas av temperatur och turbiditet vilka varierar över vattenpelaren och därför behöver klorofyllvärden efterbehandlas. Vid utvärdering har Brunel (2021) & Coignard (2021) kommit fram till att de uppmätta klorofyllvärdena i enheten RFU kan omvandlas till µg/l genom att multipliceras med faktorn 4,04.

Temperaturen korrigeras för enligt ekvation 1.

$$K_{fyll_{Tempkorr}} = K_{fyll_m} + K_{fyll_m} * a(T_m - 25) \quad (1)$$

Där $K_{fyll_{tempkorr}}$ är klorofyllkoncentrationen korrigerad för temperatur, K_{fyll_m} är uppmätt klorofyll i enheten RFU multiplicerat med 4,04 för att få det till µg/l, $a=0,012$ och T_m är den uppmätta temperaturen.

Därefter korrigeras för turbiditeten genom ekvation 2.

$$K_{fyll_{TempTurbkorr}} = \frac{K_{fyll_{Tempkorr}}}{b * \exp(c * Turb_m) + d * \exp(e * Turb_m)} \quad (2)$$

Där $K_{fyll_{TempTurbkorr}}$ är den korrigerade klorofyllkoncentrationen, $Turb_m$ den uppmätta turbiditeten, $b=0,7225$, $c=-0,004687$, $d=0,3041$ och $e=-0,0003624$.

För att korrigera för att sonden ej var kalibrerad under första mätperioden beräknades en korrektionskoefficient av Coignard (2021) och Brunel (2021) till 1,85. Som de efterbehandlade värdena från innan 25/5 multiplicerades med.

3.3 Vattenprovtagningar 12 mars- 2 juni 2021

Ett vattenprov vid provtagningen, tabell 1, i det här projektet innefattar vattenprovet för analys av klorofyll, N-tot (totalt kväve), P-tot (total fosfor), P-PO4 (fosfat), Si (kisel), Turb (turbiditet), pH, DOC (löst organiskt kol), Abs254 (absorbans vid 254nm). Anmärkningar angående provtagningen återfinns i appendix.

Tabell 1 visar provtagningsdatum samt vid vilka djup vattenprov togs.

Datum	Djup Vattenprover
12/03-21	0,5 m
23/03-21	0,5 m
16/04-21	0,5 m, 16 m
20/04-21	0,5 m, 16 m
11/05-21	0,5 m, 6 m, 9 m, 12 m, 16 m, 1 meter över botten
25/05-21	0,5 m
02/06-21	0,5 m, 6 m, 9 m, 12 m, 16 m, 1 meter över botten

3.4 Satellitdata

Data från satelliterna processas av Brockman Geomatics och levererades i excelformat. Då vattenprovtagning skedde i mitten av Stora Ullfjärden valdes de mätningar som gjordes över denna punkt. Varje mätvärde består av ett medelvärde av nio pixlar som det tas ett medelvärde från.

3.5 Jämförelser mellan EXO2, labb och satellitvärden

För att undersöka vid vilka förhållanden satelliternas mätningar av klorofyll ger bra respektive dåliga resultat jämfördes dessa mot klorofyllmätningar från EXO2-sonden djupare i vattenpelaren. Jämförelserna mellan EXO2-värdena och labbvärdena används för att se om det kan vara bra jämförelser för motsvarande jämförelser för satellitvärdena.

För att indikera om det är bra eller dålig överensstämmelse för jämförelserna färgmarkeras kvoterna enligt tabell 2.

Tabell 2. Visar klassificeringsintervall för de jämförande kvoterna där 1 är bäst överensstämmelse och större avvikelse från 1 innebär sämre överensstämmelse.

Kvot	Färgkod
0,8-1: 1-1,2	Bra överensstämmelse
0,5-0,8: 1,2-1,5	Acceptabel överensstämmelse
0-0,5: 1,5-∞	Dålig överensstämmelse

3.5.1 Jämförelse medelvärde EXO2 till Seccidjup.

Den här jämförelsen gjordes då satelliternas mätning antas vara ett medelvärde av den reflekterade strålningen från vattenkolumnen. Ljuset kan då som längst ha nått ner till siktdjupet för att fortfarande kunna detekteras när det kommer upp. Därför togs ett medelvärde över EXO2-profilen för att undersöka om ett medelvärde över hela

vattenkolumnen ner till siktdjupet ger en bra representation av klorofyllmätningen. Vid nedsänkning av EXO2-sonden var nedsänkingshastigheten konstant vilket borde ge lika många mätvärden vid varje djup. De siktdjup som användes var det i fält uppmätta siktdjupet, benämns "Secci-lab", och siktdjupen från respektive Sentinel 2 och 3, benämns "Secci-S2 & Secci- S3.

3.5.2 Jämförelse klorofyllmätning vid Seccidjup

För att vidare undersöka hur mätningarna överensstämmer med klorofyllkoncentrationerna i profilen jämfördes satelliternas mätningar även med EXO2- sondens mätvärden från respektive Seccidjup. Samma jämförelse gjordes även för halva Seccidjupet och för 0,5 meter vilket var djupet där ytvattenproverna togs.

3.6 Undersökning av påverkan av vattenkvalitetsparametrar genom "Partial Least Squares Regression" (PLSR)

För att undersöka vilken parameter som har störst inverkan på mätningarna av klorofyll används en multivariat regressionsmetod som heter PLSR. Metoden har utvecklats för att fungera då många andra metoder har problem. Exempelvis är inte PLSR begränsad av att; datasett består av prediktorvariabler som är inbördes beroende; det finns inneboende mätfel i data; antalet datapunkter är litet, vilket gör metoden lämplig att använda i den här studien (Mevik & Wehrens 2021).

Modellen för PLSR ser ut enligt 3.

$$Y = XB + E \quad (3)$$

Där Y är responsmatrisen med dimension $n \times m$, X är prediktormatrisen med dimension $n \times m$, B är koefficientmatrisen med dimension $p \times m$ och där E är störningstermer med dimension $n \times m$. p är antalet prediktionsvariabler, n är antalet observationer och m är antalet responsvariabler (Mevik & Wehrens 2021). I PLSR delas variationer mellan variabler in i två kategorier som beskriver yttre inre relationer. De yttre relationerna är inom X och Y individuell, alltså mellan varje prediktorvariabel och mellan varje responsvariabel vilket genom att bryta ner X och Y till score och vikter ger 4 & 5 (Haenlein & Kaplan 2004).

$$X = TP' \quad (4)$$

$$Y = UQ' \quad (5)$$

Där T är X-score, P är X-vikt, U är Y-score och Q är Y-vikt.

De inre relationerna är mellan X och Y blocken, alltså hur prediktionsvariablerna påverkar responsvariablerna och fås genom regression av T och U. Prediktionen av modellen beräknas sedan genom scores och vikter för att ge en prediktion av Y (Mevik & Wehrens 2021).

För att kunna tolka resultatet är för det här projektet VIP-plotten (Variable Importance in Projection) viktig. Den är ett mått på hur stor inverkan varje parameter har på resultatet av modellen och är ett relativt mått (Mukherjee et. al. 2015).

3.6.1 Utförande PLSR

För analysen användes statistikprogrammet R-studio där paketet PLS och VIP användes (Mevik & Wehrens 2021).

I X-matrisen sattes vattenkvalitetsparametrarna från vattenprovtagningen, alltså turbiditet, siktdjup, absorbans, DOC, Tot-P, pH, TotN, PO4_P och Si. Y matrisen utgjordes först av satellitmätningarna av klorofyll för S2, S3_alt1 och S3_alt2. Sen gjordes samma PLS där Y i stället var skillnaden mellan satellitmätningarna och labanalyserna av klorofyll. Vid PLSR användes ”leave one out” (LOO) som metod för korsvalidering.

Från PLS regressionerna användes funktionen VIP för att ta fram en graf över den relativa påverkan varje variabel har på först klorofyllmätningar och sedan på avvikelserna från labanalyserna.

4 Resultat

4.1 Analysresultat vattenprovtagningar 12 mars- 2 juni 2021

Resultaten för ytvattenproverna var de som främst användes i projektet och dessa visas i tabell 3a och 3b där det bland annat går att se hur halterna av klorofyll är låga i början av mars för att sedan öka betydligt mot slutet av maj. Fullständiga analysresultat fram till 8/7-21 för provtagningen i mitten av Stora Ullfjärden går att se i appendix 4, tabell 1. Det går även att se analysresultat för djupare klorofyllprov i figur 5-10.

Tabell 3a. Visar analysresultat för ytvattenprover (0,5 m) från mitten av Stora Ullfjärden under perioden 12 mars 2021 till 2 juni 2021. Resultaten för övriga djup återfinns i appendix 4, tabell 1.

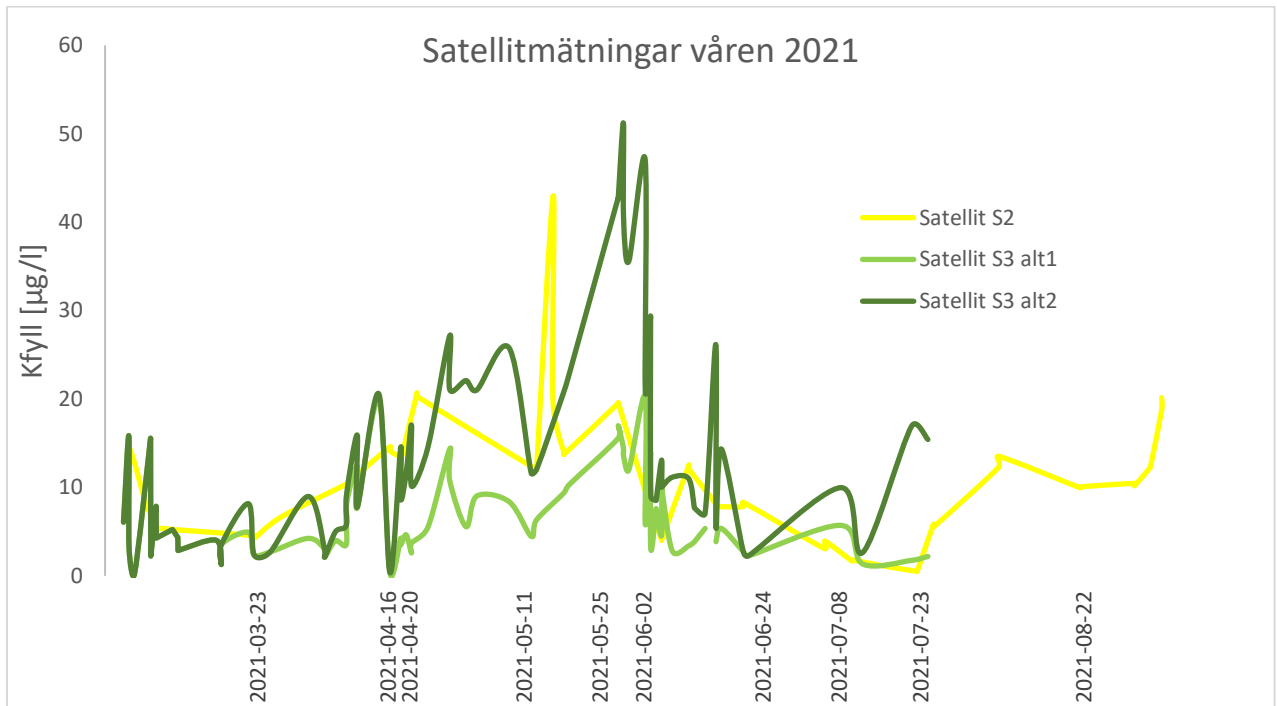
Datum	Tot-N_TNb [µg/l]	PO4_P [µg/l]	Tot_P [µg/l]	Si [mg/l]	pH	Turb [FNU]	AbsorbansF 254/5	DOC [mg/l]
12-03-2021	1180	34	51	1,7	7,77	2,4	0,933	8
23-03-2021	1140	33	50,2	1,7	7,82	2,4	0,927	8
16-04-2021	1150	15	44,4	1,3	8,16	2,7	0,909	8,4
20-04-2021	1120	7	42,2	0,91	8,31	2,6	0,889	8,1
11-05-2021	892	<1	31,3	0,08	8,59	2,8	0,915	8,3
25-05-2021	740	1	32,9	0,16	9,06	5,7	0,949	8,8
02-06-2021	706	<1	26,8	0,2	9,03	4,8	0,946	8,6

Tabell 3b Visar Temperatur från EXO2-sonden vid 0,5 meters djup, siktdjup och klorofyll från provtagningen i Stora Ullfjärden.

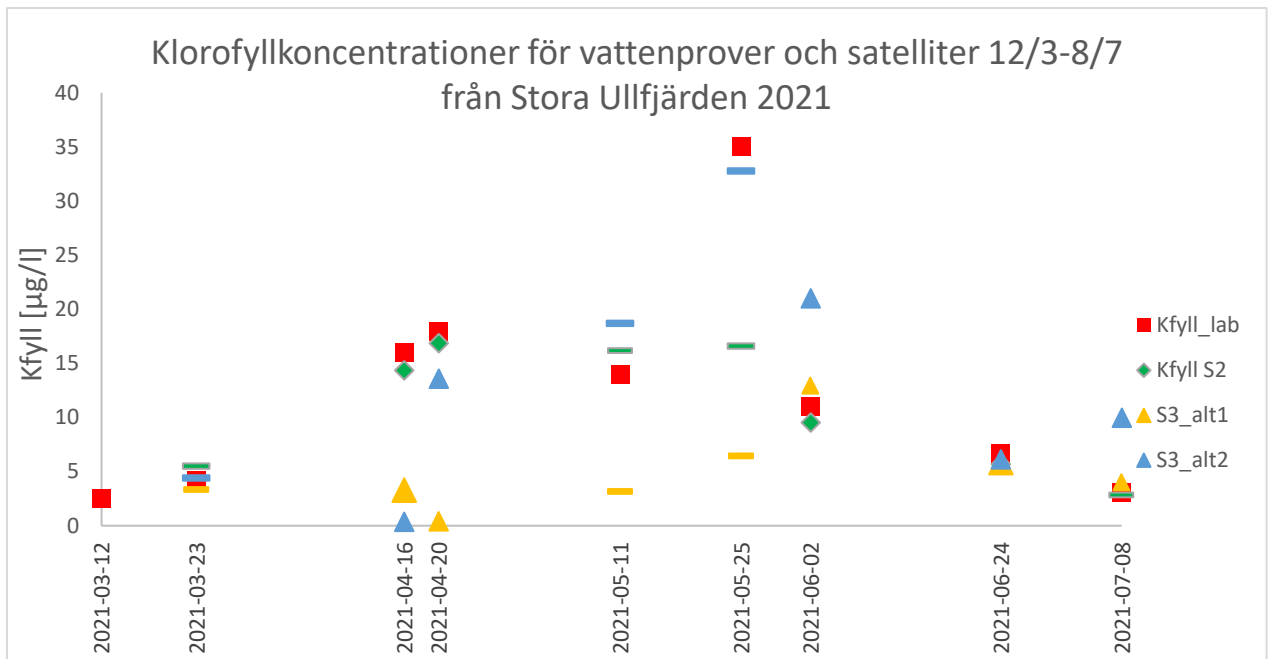
Datum	Temperatur [C°]	Siktdjup [m]	Kfyll [µg/l]
12-03-2021	1,5	3,1	2,5
23-03-2021	1,9	3	4,2
16-04-2021	4,5	2,8	16
20-04-2021	5,4	2	18
11-05-2021	7,2	2,1	14
25-05-2021	13,1	1,3	35
02-06-2021	14,7	1,45	11

4.2 Satellitdata mellan 12 Mars- 2 Juni 2021

Data som levererades av Brockman Geomatics visas i figur 2 som linjgraf och figur 3 där provtagningsdagarna markerats som punkter och där även klorofyllkoncentrationen från vattenproverna inkluderats. Det går att se hur algkoncentrationen i början av våren ligger under 10 $\mu\text{g/l}$ för att öka mot som mest 51 $\mu\text{g/l}$ för Sentinell 3 alternativ 2 den 29 maj. Mätningarna för Sentinel 3 alternativ 1 ligger alltid under eller på samma nivå som Sentinel 2 och Sentinel 3 alternativ 2. Sentinel 3 alternativ 2 fångar i stora drag samma rörelser för klorofyllkoncentrationen som Sentinel 2. För provtagningsdagarna 23 mars, 11 maj och 25 maj fanns ingen satellitdata så de värden som presenteras från de dagarna är medelvärden av intilliggande dagar och är gulmarkerade i tabell 4 och markören är utbytt till streck i figur 3.

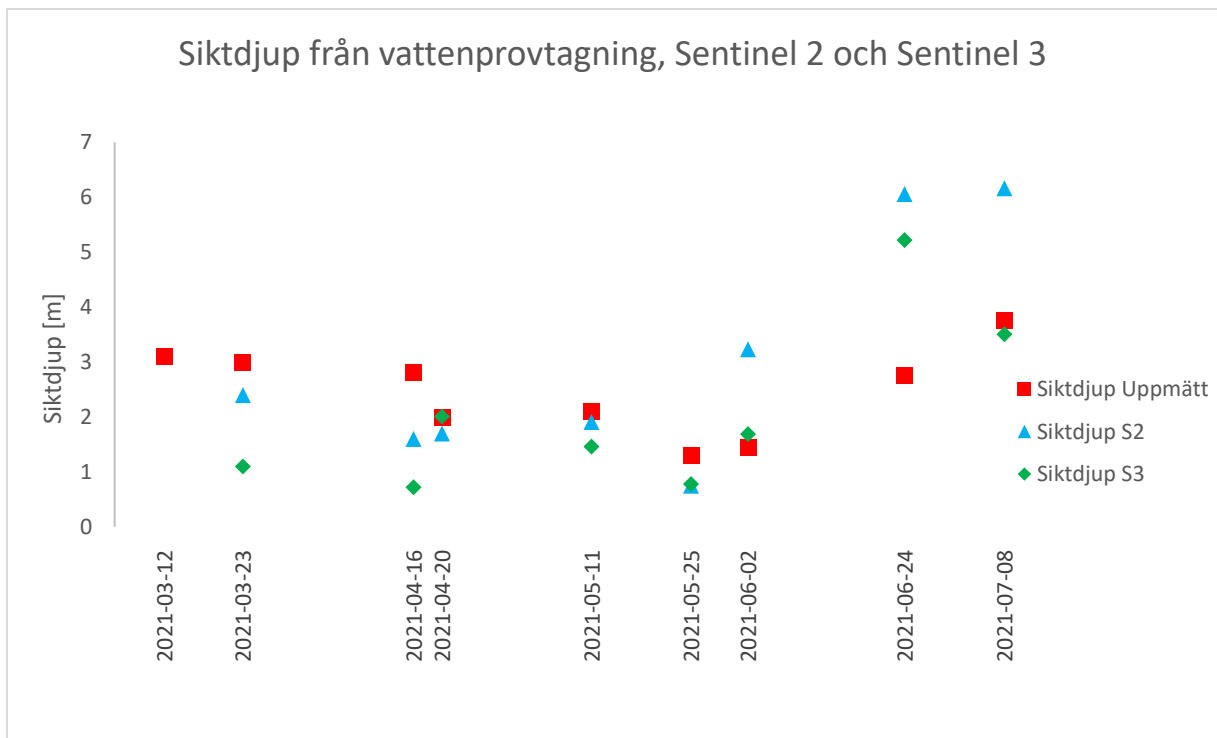


Figur 2. Visar alla mätningarna för satelliterna Sentinel 2 och 3. För Sentinel tre visas klorofyllberäkningarna för alternativ 1 och 2 där det går att se att alternativ 2 ger högre klorofyllvärden. Sentinel 2 har fler mätpunkter än Sentinel 3 i det tillgängliga data och fortsätter in i september där ser ut som att klorofyllkoncentrationen stiger efter att ha varit låg under juli.



Figur 3. Visar de satellitmätningar då provtagning har genomförts. För värdena den 23 mars, 11 maj och 25 maj fanns inte mätningar från samma dag så dessa värden är medelvärden av senaste värdet innan och efter. Klorofyllvärden som kommer från medelvärden representeras av streck i figuren.

För att visa hur siktdjupet från provtagningen förhåller sig jämfört med siktdjupen från satelliterna visas i figur 4 dessa under perioden fram till 8 juli. Det går att se hur siktdjupen från provtagningen är högre än satelliterna i början för att sedan ligga under. Siktdjupet från satelliterna är stort i slutet av perioden och nästan dubbelt mot det uppmätta.



Figur 4 visar siktdjup från vattenprovtagningen, från Sentinel 2 och från Sentinel 3.

Tabell 4 visar klorofyllkoncentrationer för satelliternas mätningar på provtagningsdagarna. Gulmarkerade värden betyder att det inte finns satellitmätningar den aktuella dagen och värdet som anges är då ett medelvärde av intelligande dagar. Klorofyllvärden från ytvattenprover visas för referens.

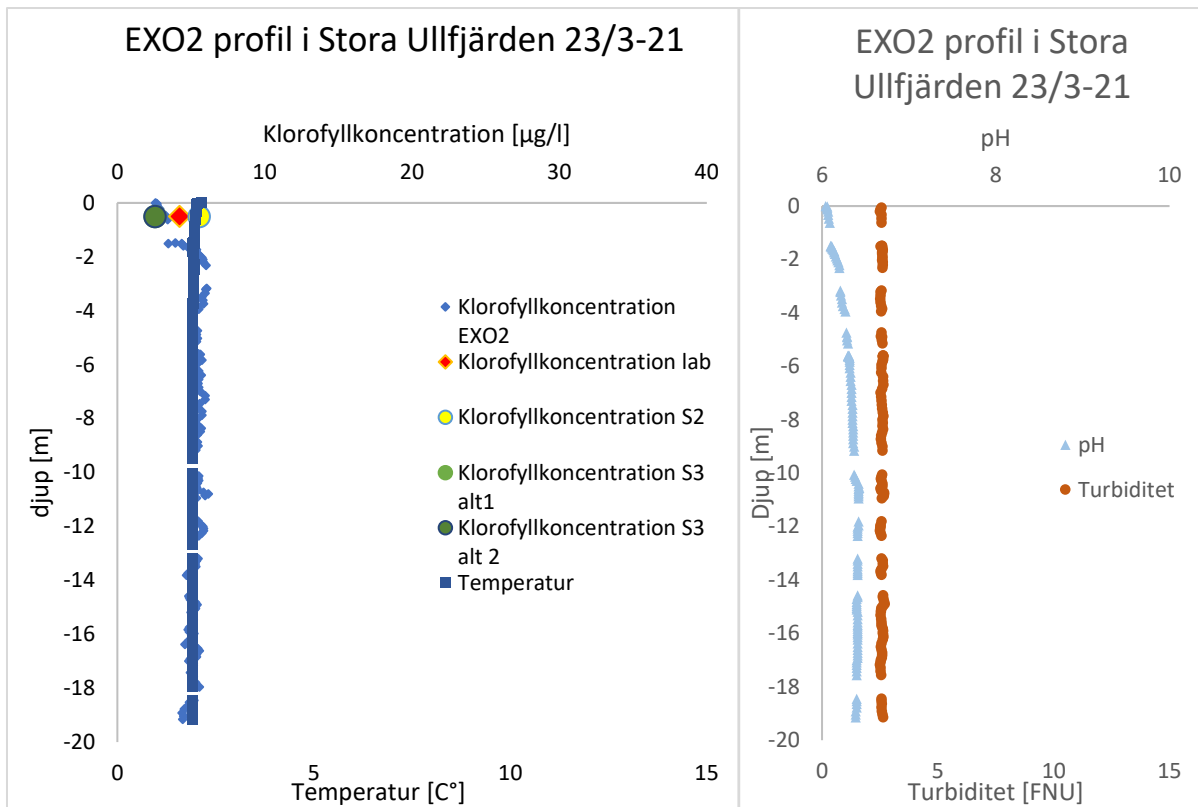
Datum	Klorofyll Lab [µg/l]	Klorofyll_S2 [µg/l]	Klorofyll_S3_alt1 [µg/l]	Klorofyll_S3_alt2 [µg/l]
2021-03-12	2,5	-	-	-
2021-03-23	4,2	5,5	3,3	4,4
2021-04-16	16	14,4	0,4	0,4
2021-04-20	18	16,9	3,2	13,6
2021-05-11	14	16,2	6,4	18,7
2021-05-25	35	16,6	12,9	32,8
2021-06-02	11	9,6	5,9	21,0
2021-06-24	6,7	5,7	4,0	6,1
2021-07-08	3,1	2,8	5,7	10,0

4.3 EXO2 profiler 23 Mars- 2 Juni 2021

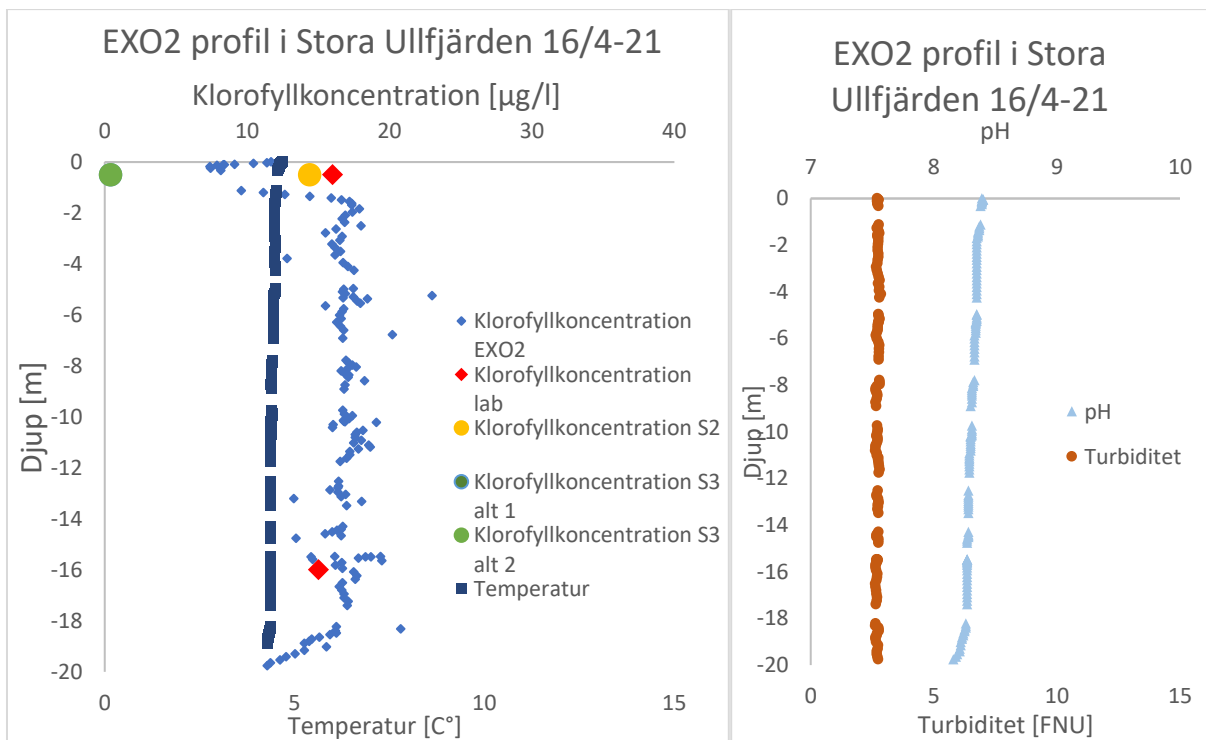
Från EXO2 sonden erhöles bland annat klorofyllprofiler, vattentemperatur, turbiditet och pH för vattenkolumnen i mitten av Stora Ullfjärden. Profilerna med efterberäkningen för klorofyll enligt Brunel (2021) visas i figur 5-10 medan tidigare använda efterberäkning återfinns i appendix 5. I figur 5 kan ses att klorofyllkoncentrationen i ytan ligger kring 2,5 för att snabbt gå upp till 6 µg/l vid 2 meters djup. I figurerna 5-10 visas även vattenproverna och mätningarna av klorofyll för Sentinel 2 och Sentinel 3 med dessa markerade vid samma djup som ytvattenproven. Det går att se hur vattentemperaturen stiger under perioden och att en termoklin börjar formas i slutet av maj samtidigt som klorofyllkoncentrationen stiger kraftigt. Det går att se hur pH stiger från särskilt under perioden då klorofyllkoncentrationen stiger. Den 23 mars är pH betydligt mindre än värdet från vattenprov, men elektroden är då okalibrerad. pH-värdet från EXO2-sonden var mycket mer korrekt efter bytet av elektrod. pH värdet är alltid högst i ytvattnet för att sedan gradvis minska längre ner i vattenpelaren. Det går att se att turbiditeten de första fyra provtagningsstillfällena är konstant över profilen och sedan sker ökning 25 maj och 2 juni.

I efterhand har även tillkommit profiler för 24/6, figur 20, och 8/7, figur 21, vilka går att se i appendix 6. De visar hur tydliga toppar i klorofyll har bildats vid termoklinen som även den har blivit mer tydlig. De visar att även turbiditeten och pH är kraftigt förhöjt vid samma djup som termoklinen. För turbiditeten i figur 21 finns även en topp djupare i vattenmassan. Analysresultaten från vattenprovtagningen visar på mycket höga klorofyllkoncentrationer vid termoklinen, vilka satelliternas mätningar är många storleksordningar mindre än.

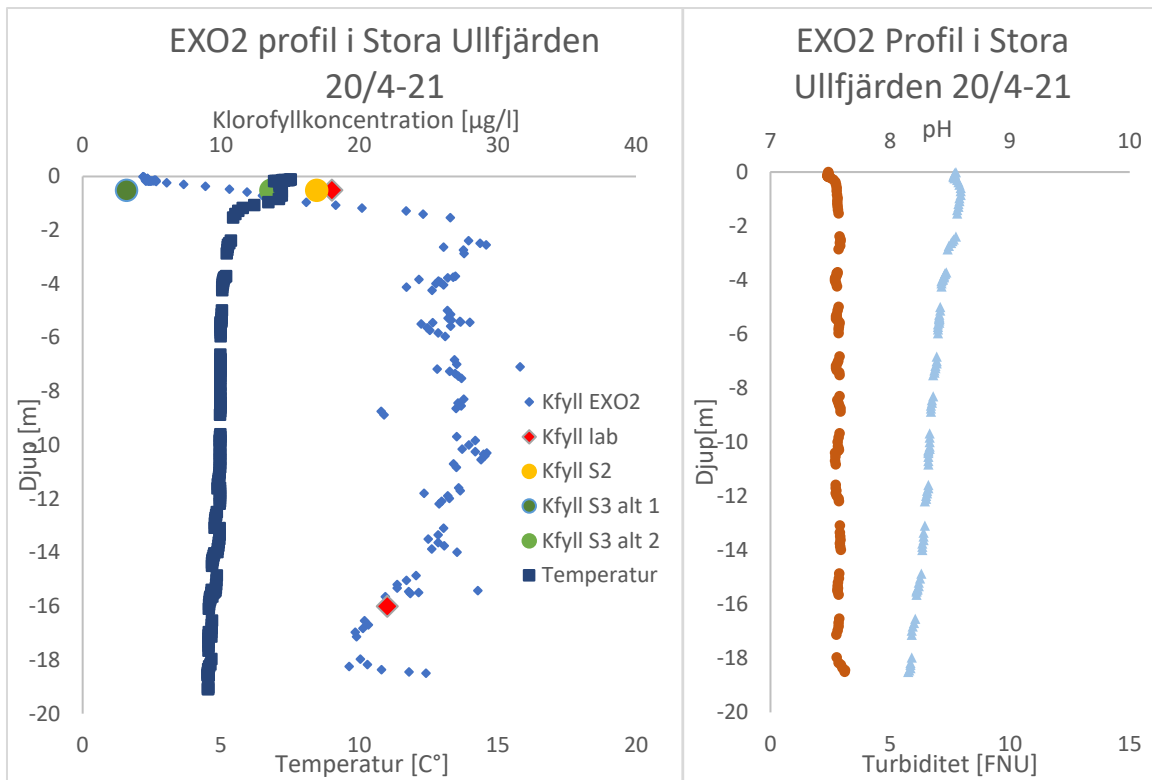
I appendix 7 visas phycocyaninprofiler som togs fram till Mälarseminariet. De visar hur phycocyanin är nära noll fram till 25 maj och sedan ökar vid klorofylltoppar. Topparna ligger sedan vid samma djup som klorofylltopparna under sommarprovtagningarna.



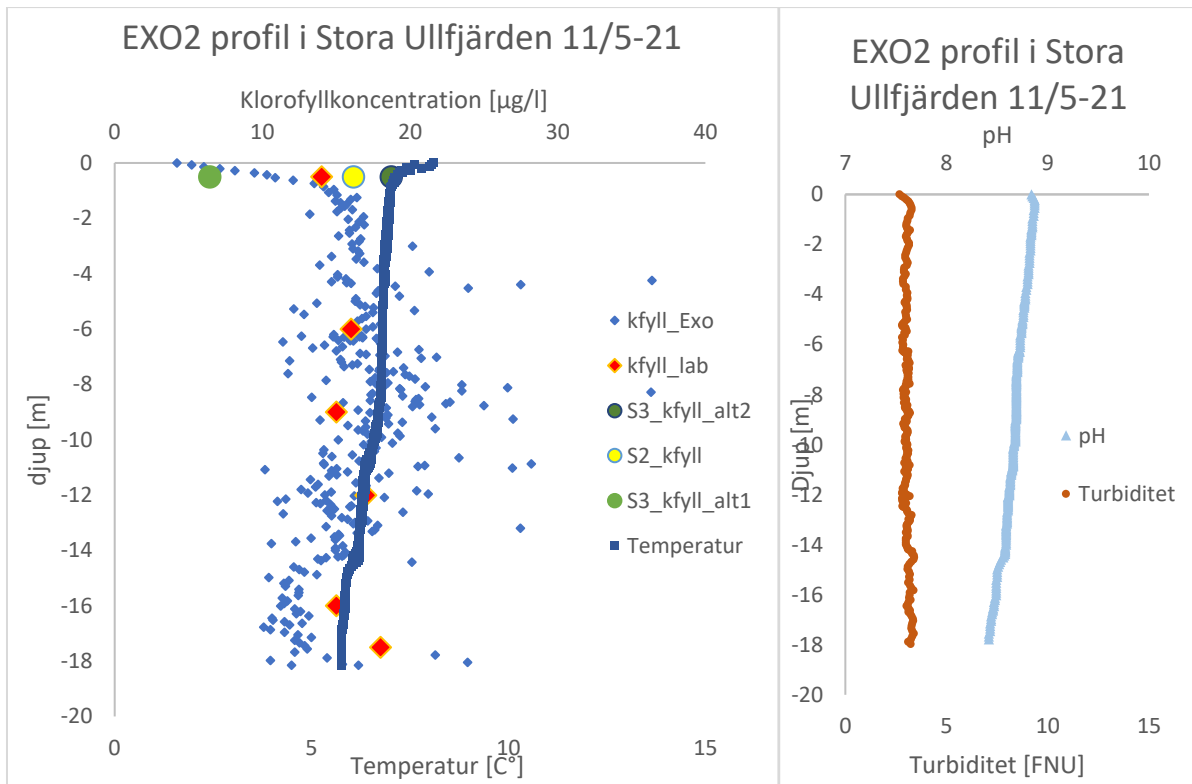
Figur 5. Visar profiler över klorofyllkoncentration, temperatur, pH och turbiditet i mitten av Stora Ullfjärden 23 mars 2021. Visar även klorofyllmätningarna från Sentinel 2 och 3 och analysresultatet från labbet.



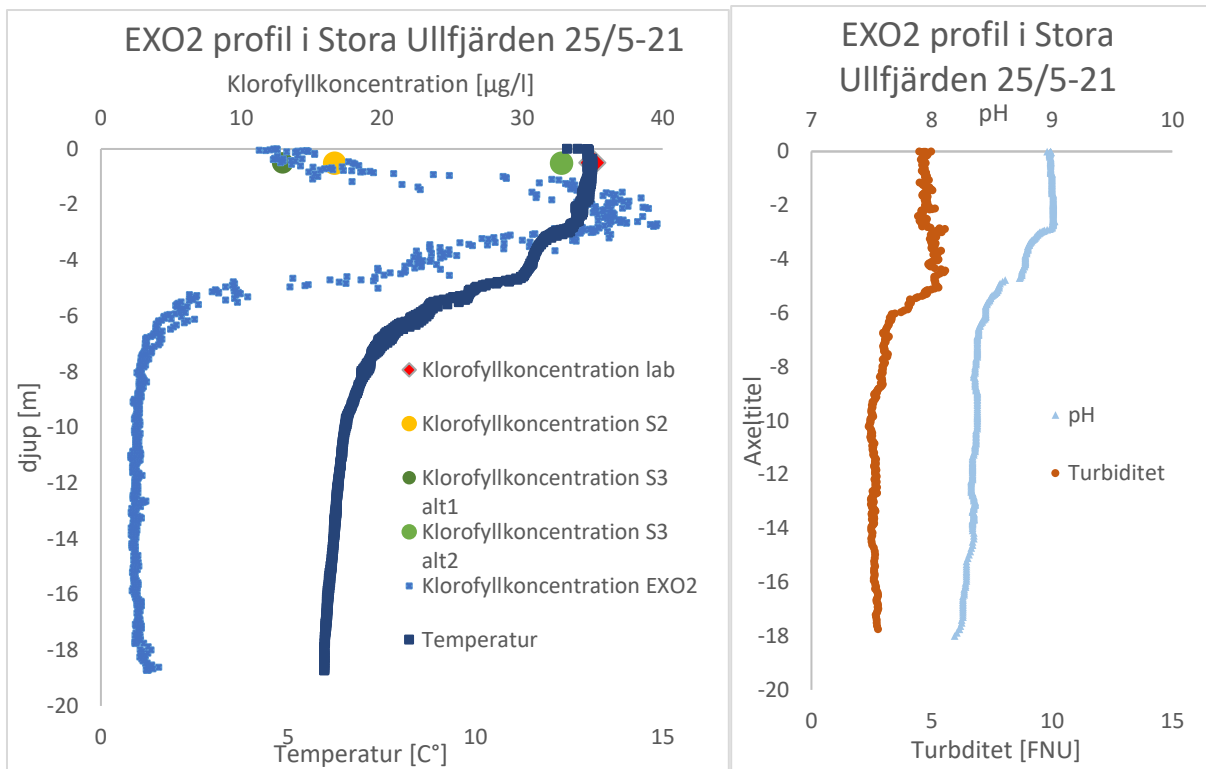
Figur 6. Visar profiler över klorofyllkoncentration, temperatur, pH och turbiditet i mitten av Stora Ullfjärden 16 april 2021. Visar även klorofyllmätningarna från Sentinel 2 och 3 och analysresultatet från labbet.



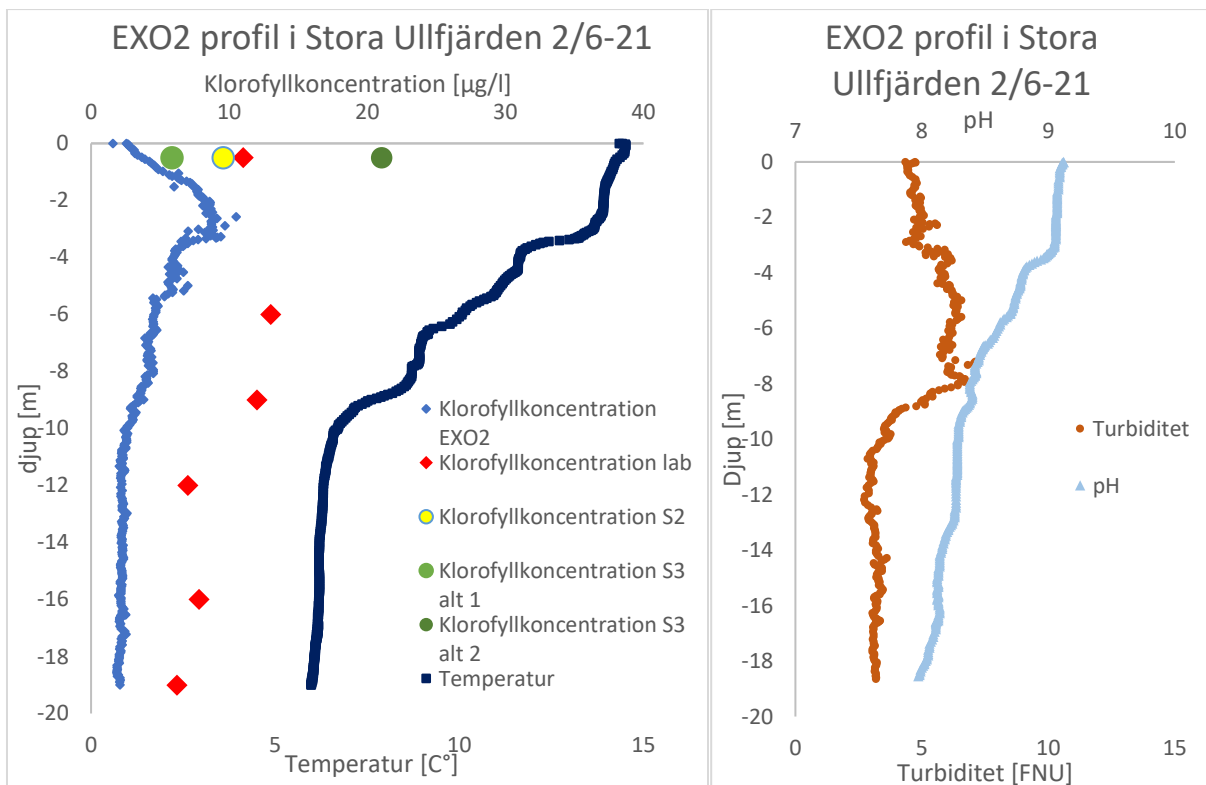
Figur 7. Visar profiler över klorofyllkoncentration, temperatur, pH och turbiditet i mitten av Stora Ullfjärden 20 april 2021. Visar även klorofyllmätningarna från Sentinel 2 och 3 och analysresultatet från labbet.



Figur 8. Visar profiler över klorofyllkoncentration, temperatur, pH och turbiditet i mitten av Stora Ullfjärden 11 maj 2021. Visar även klorofyllmätningarna från Sentinel 2 och 3 och analysresultatet från labbet.



Figur 9. Visar profiler över klorofyllkoncentration, temperatur, pH och turbiditet i mitten av Stora Ullfjärden 25 maj 2021. Visar även klorofyllmätningarna från Sentinel 2 och 3 och analysresultatet från labbet.



Figur 10. Visar profiler över klorofyllkoncentration, temperatur, pH och turbiditet i mitten av Stora Ullfjärden 2 juni 2021. Visar även klorofyllmätningarna från Sentinel 2 och 3 och analysresultatet från labbet.

4.3.1 Jämförelser EXO2 med labresultat.

För att kunna göra relevanta jämförelser presenteras klorofyllvärden från EXO2-sonden vid Seccidjup och halva Seccidjupet för det i fält uppmätta Seccidjupet i tabell 5. Från dessa värden är kvoterna i tabell 6 beräknade.

Klorofyllkoncentrationen från EXO2-sonden vid halva lab-Seccidjupet och de uppmätta klorofyllkoncentrationerna har god överensstämmelse vilket går att se i tabell 5. I tabell 5 redovisas även det djup där det från EXO2-sonden uppmätta klorofyllkoncentrationen först är samma som det från labbet och det har god överensstämmelse med hälften av Seccidjupet som uppmättes i fält. Överensstämmelsen mellan klorofyllkoncentrationen från EXO2 och vattenproverna vid 0,5 meter är acceptabel vid fyra tillfällen och dålig vid två tillfällen.

Tabell 5 visar klorofyllkoncentrationen för ytvattenproverna, Seccidjupet från provtagningen, medelvärde av EXO2 klorofyllprofilerna ner till Seccidjupet, klorofyllkoncentrationen vid Seccidjupet, klorofyllkoncentrationen vid halva Seccidjupet och djupet där klorofyllkoncentrationen från lab matchar den från EXO2.

Datum	Kfyll_lab [µg/l]	Secci_lab [m]	Medel kfyll över profil vid secci_lab[µg/l]	Kfyll vid secci_lab [µg/l]	Kfyll vid halva secci [µg/l]	Djup där kfyll_exo = kfyll_lab	EXO2 kfyll vid 0,5m [µg/l]
23-03- 2021	4,2	3	5	6	4	1,6	3
16-04- 2021	16	2,8	14	16	16	1,4	9
20-04- 2021	18	2	19	27	18	1	12
11-05- 2021	14	2,1	13	16	15	0,9	10
25-05- 2021	35	1,3	20	33	18	1,2	15
02-06- 2021	11	1,45	5	7	4	2,6	4

Tabell 6 visar jämförelser mellan klorofyllkoncentrationen för exosonden vid det i fält uppmätta Seccidjupet och vid halva Seccidjupet. Visar även djupet där vattenprovets klorofyllkoncentration först överensstämmer med exosondens och kvoten mellan det djupet och halva Seccidjupet.

Datum	Kvot mellan kfyll exo och kfyll lab vid secci_lab	Kvot mellan kfyll exo och kfyll lab vid halva secci_lab	Kvot mellan djupet där kfyll exo = kfyll lab och halva secci_lab	Kvot mellan medel kfyll över profil till secci_lab och kfyll lab	Kvot EXO2 vid 0,5m och Kfyll lab
23-03-2021	1,4	1,0	1,1	1,1	0,8
16-04-2021	1,0	1,0	1,0	0,9	0,6
20-04-2021	1,5	1,0	1,0	1,0	0,7
11-05-2021	1,1	1,0	0,9	0,9	0,7
25-05-2021	0,9	0,5	1,8	0,6	0,4
02-06-2021	0,7	0,4	3,5	0,4	0,3

4.3.2 Jämförelser EXO2 med Sentinel 2.

För att kunna göra relevanta jämförelser för klorofyllmätningarna från Sentinel 2 presenteras klorofyllvärden från EXO2-sonden vid Seccidjup och halva Seccidjupet för Sentinel 2 i tabell 7. Från dessa värden är kvoterna i tabell 8 beräknade.

Det går bland annat att se i tabell 8 att överensstämmelsen för EXO2 mätningarna vid Sentinel 2s Seccidjup stämmer bra överens med klorofyllkoncentrationerna som är uppmätta av Sentinel 2, med flera värden runt 20% överensstämmelse eller bättre.

Tabell 7 visar klorofyllkoncentrationerna för Sentinel 2, Seccidjupet från mätningen, medelvärde av EXO2 klorofyllprofilerna ner till Seccidjupet för S2, klorofyllkoncentrationen vid Seccidjupet, klorofyllkoncentrationen vid halva Seccidjupet och djupet där Sentinel 2s mätning först matchar EXO2-mätningens.

Datum	Kfyll_S2 [µg/l]	Secci_S2 [m]	Medel kfyll över profil vid secci_S2 [µg/l]	Kfyll vid secci_S2 [µg/l]	Kfyll vid halva secci_S2 [µg/l]	Djup där kfyll_exo = kfyll_S2
23-03-2021	5,5	2,4	4	6	3	1,8
16-04-2021	14,36	1,6	11	17	9	1,3

20-04-2021	16,88	1,7	16	27	14	1
11-05-2021	16,15	1,9	13	13	14	1,3
25-05-2021	16,6	0,75	15	17	13	0,6
02-06-2021	9,55	3,23	7	8	7	2,6

Tabell 8 visar jämförelser mellan klorofyllkoncentrationen för EXO2-sonden vid Sentinell 2s Seccidjup och vid halva Seccidjupet. Visar även djupet där Sentinell 2s uppmätta klorofyllkoncentration först överensstämmer med EXO2-sondens och avvikelserna mellan det djupet och halva Seccidjupet.

Datum	Kvot mellan kfyll S2 och kfyll lab	Kvot mellan kfyll exo och kfyll S2 vid seccidjup S2	Kvot mellan kfyll exo och kfyll S2 vid halva secci S2	Kvot mellan djup där kfyll exo = kfyll S2 vid halva seccidjupet	Kvot mellan medel kfyll över profil och kfyll S2
23-03-2021	1,3	1,1	0,6	0,7	0,8
16-04-2021	0,9	1,2	0,6	0,6	0,8
20-04-2021	0,9	1,6	0,9	0,9	1,0
11-05-2021	1,2	0,8	0,9	0,7	0,8
25-05-2021	0,5	1,0	0,8	0,6	0,9
02-06-2021	0,9	0,9	0,7	0,6	0,7

4.3.3 Jämförelser EXO2 med Sentinel 3 alt 1 (S31) och 2 (S32).

Data för jämförelser mellan satellit och labklorofyll visas i tabell 9. Det går att se i tabell 10 att överensstämmelsen för de jämförelser som gjordes är dålig. Överensstämmelsen för klorofyllkoncentrationen från mätningen för S32 är dock relativt god med vattenproverna.

Tabell 9 visar klorofyllkoncentrationerna för Sentinel 3, Seccidjupet från mätningen, medelvärde av EXO2 klorofyllprofilerna ner till Seccidjupet för Sentinell 3, klorofyllkoncentrationen vid Seccidjupet, klorofyllkoncentrationen vid halva Seccidjupet och djupet där Sentinell 3s mätning först matchar EXO2-mätningens.

Datum	Kfyll S3 alt 1 [µg/l]	Kfyll S3 alt 2 [µg/l]	Secci S3 [m]	Medel kfyll över profil vid secci_S3 [µg/l]	Kfyll vid secci [µg/l]	Kfyll vid halva secci [µg/l]	Djup där kfyll_exo = kfyll_s31	Djup där kfyll_exo = kfyll_s32
23-03-2021	3,3	4,4	1,26	3	3	3	0,6	1,5
16-04-2021	0,38	0,38	0,72	9	9	7	-	-
20-04-2021	3,15	13,6	2,01	19	27	18	0,0	0,8
11-05-2021	6,43	18,7	1,46	12	15	12	0,2	3
25-05-2021	12,93	32,77	0,78	15	17	13	0,0	1,2
02-06-2021	5,85	21,02	1,69	5	8	5	1,1	-

Tabell 10 visar jämförelser mellan klorofyllkoncentrationen för exosonden vid Sentinell 3s Seccidjup och vid halva Seccidjupet. Visar även djupet där Sentinell 3 alternativ 1 uppmätta klorofyllkoncentration först överensstämmer med exosondens och avvikelserna mellan det djupet och halva Seccidjupet. När det inte finns något djup där klorofyllkoncentrationen från EXO2 sonden matchar det från satelliten blir kvoten noll.

Datum	Kvot mellan kfyll S31 och kfyll lab	Kvot mellan kfyll exo och kfyll s31 vid secci_S3	Kvot mellan kfyll exo och kfyll S31 vid halva seccidjup S3	Kvot mellan djup där kfyll exo = kfyll S31 och halva seccidjupet	Kvot mellan medel kfyll över profil och kfyll S31
23-03-2021	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0
16-04-2021	0,0	23,4	19,6	0,00	23,2
20-04-2021	0,2	8,6	5,8	0,00	5,9

11-05-2021	0,5	2,4	1,9	0,3	1,9
25-05-2021	0,4	1,3	1,0	0,00	1,2
02-06-2021	0,5	1,3	0,8	1,3	0,9

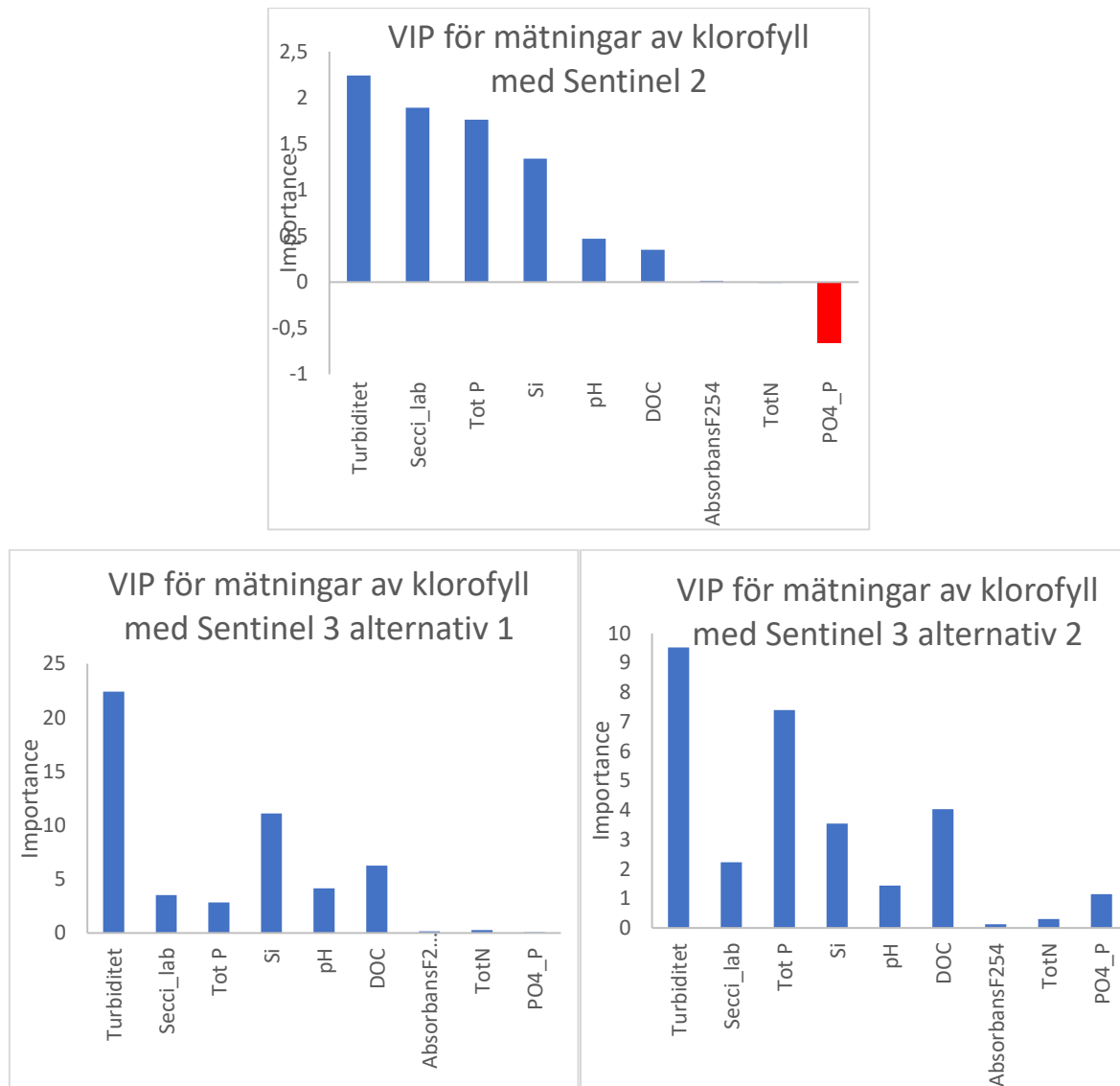
Tabell 11 visar jämförelser mellan klorofyllkoncentrationen för exosonden vid sentinell 3s seccidjup och vid halva seccidjupet. Visar även djupet där Sentinell 3 alternativ 2 uppmätta klorofyllkoncentration först överrensstämmer med exosondens och avvikelser mellan det djupet och halva seccidjupet. När det inte finns något djup där klorofyllkoncentrationen från EXO2 sonden matchar det från satelliten blir kvoten noll.

Datum	Kvot mellan kfyll S32 och kfyll lab	Kvot mellan kfyll exo och kfyll s32 vid secci_S3	Kvot mellan kfyll exo och kfyll S32 vid halva seccidjup S3	Kvot mellan djup där kfyll exo = kfyll S32 och halva seccidjup	Kvot mellan medel kfyll över profil och kfyll S32
23-03-2021	1,1	0,8	0,8	2,4	0,7
16-04-2021	0,0	23,4	19,6	0,0	6,5
20-04-2021	0,8	2,0	1,3	0,8	0,4
11-05-2021	1,3	0,8	0,7	4,1	0,6
25-05-2021	1,0	0,5	0,4	3,1	0,5
02-06-2021	1,9	0,4	0,2	0,0	0,2

4.4. PLS Påverkan av vattenparametrar på satellitmätningar

4.4.1 VIP för satellitmätningarna

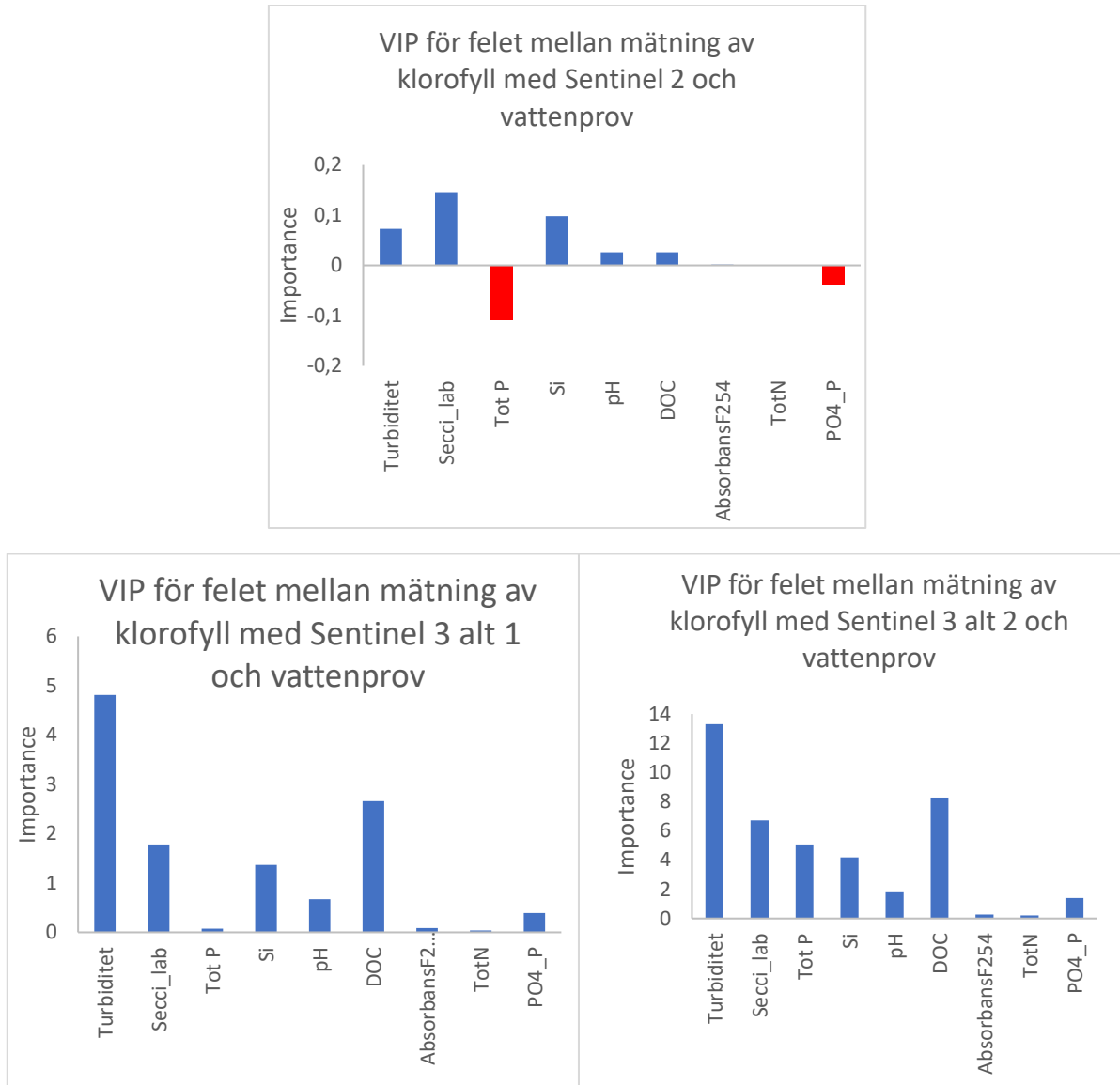
PLS-regression ger modellerade klorofyllkoncentrationer för satellitmätningarna från analysresultaten från vattenprovtagningarna. Därifrån har sedan figurerna med variabelinverkan i projektionen tagits fram. VIP-plotten är viktigaste resultatet från PLS-regressionen för att bedöma inverkan av olika vattenkvalitetsparametrar på mätningarna. I figur 11 kan ses att turbiditet är den viktigaste parametern, medan den näst viktigaste parametern varierar mellan figurerna. För Sentinel 2 är näst viktigast siktdjup, för Sentinel 3 alternativ 1 är det kisel och för Sentinel 3 alternativ 2 är det total fosforhalt.



Figur 11a-11c visar "Variabel Importance in Projection" där den modellerade variabeln är klorofyllkoncentration för Sentinel 2 och 3 beräknat med alternativ 1 och 2. Variablerna är vattenparametrar från provtagningen.

4.4.2 VIP för felet jämfört med analysresultat i satellitmätningarna

För att undersöka hur vattenparametrarna påverkar noggrannheten hos mätningarna gjordes PLSR även mot felet mellan satellitmätningarna och labbanalyserna. VIP-plottarna för dessa i figur 12 visar att turbiditet den är viktigaste parametern för Sentinel 3, medan i Seccidjupet är viktigast för felet hos Sentinel 2.



Figur 12 visar "Variabel Importance in Projection" där den modellerade variabeln är skillnaden mellan uppmätt klorofyllkoncentration av Sentinel 2 och 3 alternativ 1 och 2 och klorofyllkoncentrationen från vattenprovtagningen. Variablerna är vattenparametrar från provtagningen.

5 Diskussion

5.1 Vattenprovtagningar 12 mars – 2 juni

Vattenprovtagningen fortlöpte bra och kunde ske med relativt bra mellanrum. Det blev dock ett uppehåll och fördröjning i provtagningen över påsken vilket resulterade i att det blev nästan tre och en halv vecka mellan provtagningen i början av april. Från figur 2 där satellitmätningarna är plottade gör det att se att under den perioden började klorofyllkoncentrationerna i vattnet stiga och det hade därför varit intressant med ett prov i den stigningsfasen. Proverna i början av mätningarna har lagt en bra baslinje för klorofyllkoncentrationen i perioden innan blomning och borde kunna extrapoleras till större delen av vinterperioden.

Andra vattenkemiska parametrar som är intressanta att nämna är Kisel (Si) i tabell 3a som minskar till låga nivåer under perioden vilket kan tyda på att en stor del av algiomassan består av kiselalger i början av perioden. Kiselhalten är sedan fortsatt låg trots att klorofyllkoncentrationen når sitt maximum vilket kan tyda på att cyanobakterier då utgör större del. Även pH är intressant att notera då det vid de inledande mätningarna ligger kring 7,7 men stiger sedan till som högst 9,06 samtidigt som toppen i klorofyll. Det visar det tydliga samband pH har med tillväxten vid algblomning och motiverar att använda pH som indikator för algblomning.

5.2 Satellitdata

Från tidsserien av satellitmätningarna, figur 3, kan vi se att toppen för klorofyllkoncentrationen var endera 16 maj enligt S2 eller 29 maj enligt S32. Provtagningen som skedde 25 maj kommer därmed ganska bra i mitten av dessa mätningar och borde ge en bra bild om klorofyllkoncentrationernas högsta värde under perioden. En intressant aspekt av mätningarna med satellit den 16 maj och 29 maj är att vid ena tillfället visar S2 högst och vid det andra tillfället visar S32 högst. Det skiljer visserligen en dag emellan närmsta mätning av den andra satelliten, men att det ska vara så stor skillnad är anmärkningsvärt. Enligt uppgift ska de två olika algoritmerna för Sentinel 3 vara anpassade för olika förhållanden, eutrofierat och ej eutrofierat, men det förklarar inte skillnaden gentemot Sentinel 2.

Då satelliterna inte kan ta bilder av jordytan när det ligger moln i vägen för objektet som studeras så tillkommer vissa begränsningar för tekniken. Även om ambitionen har varit att åka ut på dagar då det ska bli soligt och klart så infaller inte sådana dagar med tillräcklig frekvens för att tillåta molnfri provtagning vid varje tillfälle under provtagningsperioden. Vid provtagningarna 23 mars, 11 och 25 maj var det molnigt och mätningarna som presenteras för de dagarna är medelvärden av närliggande dagar. Det kan medföra en del osäkerhet, särskilt för den 25 maj vilket är perioden då maximum i klorofyll nås. Att Sentinel 3 alternativ 2 ändå ligger väldigt nära vattenprovet den dagen tyder på att medelvärdesbildningen för S3 är representativ, medan det för Sentinel 2 är mer osäkert.

5.3 EXO2 profiler

Från profilerna som tagits fram med EXO2- sonden går att göra många intressanta observationer, bland annat hur koncentrationen av klorofyll inledningsvis är låg i början av perioden till att bli hög i slutet. Det går att se från temperaturprofilerna hur en termoklin utformas under perioden mellan 11 maj och 25 maj och att ytvattnet värmts upp och att det följs av kraftig algblomning. Det här visar på vilken stor inverkan temperaturen har för att

algblooming ska kunna ske. När ytvattnet och djupare vattenskikt sedan är uppvärmt bildas tydliga skikt med klorofyll även i djupare vatten ner till termoklinen, appendix 6.

Från EXO2-profilerna kan ses att förhöjd klorofyllkoncentration inte nödvändigtvis följas av förhöjd turbiditet, figur 6-8. Koncentrationen av klorofyll stiger under större delen av perioden medan turbiditeten är relativt jämn. Vid den stora blomningen den 25 maj kommer en topp i turbiditeten, men den verkar inte vara vid samma djup som klorofylltoppen. Den 2 juni går samma fenomen att se där toppen i turbiditet ligger djupare än toppen i klorofyll. För profilerna 24/6 och 8/7 följer dock toppen i turbiditet toppen i klorofyll väl. De ligger båda vid djupet för termoklinen vilket kan förklaras av att en stor del av turbiditeten då utgörs av cyanobakterier eller alger. I appendix 6, figur 2, kan även noteras en djupare topp som kan vara tidigare episoder av masstillväxt som dött och nu sjunker till botten.

Kurvan för pH verkar följa toppen för klorofyll i stor utsträckning och det är intressant att notera att pH i ytan i stort är konstant och sedan sjunker pH när toppen för klorofyll passerats. Det innebär alltså att provtagning där bara ytprov tas kommer fånga upp de högsta pH-värden för vattendraget. Figur 1 & 2, appendix 6, visar dock att det här utseendet inte fortsätter längre in på säsongen då toppen i pH i stället följer toppen i klorofyll.

Efter att projektet blev färdigt togs profiler för pigmentet phycocyanin fram. Det går att se i appendix 7 att vid blomningen 25 maj stiger halterna kraftigt vilket tyder på att det är cyanobakterier som blommar. För alla följande klorofylltoppar finns det sen även en topp för phycocyanin vilket tyder på att blomningen då är av just cyanobakterier. Tillsammans med resultaten från vattenproverna som visade att kisel tog slut i början av maj och phycocyaninprofilerna går det tydligt att konstatera skiftet från diatoméer till cyanobakterier i Stora ullfjärden under perioden.

Hantering av EXO2 sonden har varit något olika under provtagningen då provtagare och teknik har bytts. I början av projektet var klorofyllsensorn okalibrerad och en lina användes för att sänka ner sonden. I slutet användes en kabel på vinda som var kopplad till handdatorn ”handheld” när sonden sänktes ner. En skillnad mellan data före och efter, förutom förskjutningen nedåt i värden för de tidigare provtagningarna, är att det förekommer hopp i data. I de hoppen är det som vanligt fem sekunder mellan varje analyspunkt, men djupsensorn ger ett hopp på 0,9 meter mellan punkterna. För provtagningarna 23 mars till 20 april, figur 5-7, kan man se ett flertal sådana hopp per provtagning. Det skulle kunna bero på hur linan har hanterats och att det getts mycket slacklina under kort tid. Från hur provtagningen utfördes är det dock osannolikt då nedsänkningen skedde i jämnt tempo. Det skulle kunna bero på eventuellt glapp med instrumenten som kan ha fixats när sonden hanterats på labb eller vid kalibrering. Från 11 maj syns inte dessa hack i data längre, vilket tyder på att det sannolikt har att göra med att handheld och kabelvinda började användas.

För övervakning av ett vatten för att detektera algblooming är temperatur och pH två lovande parametrar för övervakning av algblooming. Temperatur för att se när förutsättningarna börjar bli tillräckliga och pH för att se när blomning sker. Även phycocyanin, appendix 7, är god indikator som kan visa om blomningen utgörs av cyanobakterier.

5.3.1 Jämförelser EXO2 med labbresultat

Vid jämförelse av kvoterna går att se att många har god överensstämmelse, särskilt de fyra första provtagningarna. Närmst bland dessa ligger jämförelserna för klorofyllkoncentrationen

vid halva Seccidjupet och klorofyllkoncentrationen från labb vilket kan anses styrka att mätningarna dessa dagar är relativt korrekta och att vattenförhållandena dessa dagar har gett bra mätningar med EXO2 sonden. Att överensstämmelsen är mindre god mellan EXO2 värdena för klorofyll och klorofyllkoncentrationen från vattenprov den 2 juni indikerar att EXO2 profilen kan vara en mindre bra representation den dagen. Från jämförelsen mellan vattenproverna och medelvärdet över profilen ner till Seccidjupet kan konstateras att den jämförelsen bara ger ett relevant värde om klorofyllkoncentrationen är relativt konstant över kolumnen. Det förklarar varför den jämförelsen ger så stor avvikelse den 25 maj och 2 juni.

Jämförelsen mellan EXO2 sondens uppmätta klorofyllkoncentration och vattenprovernas klorofyllkoncentrationer vid 0,5 meters djup visar dålig överensstämmelse vilket indikerar viss osäkerhet för EXO2 värdena. Det är rimligt att anta att vid samma djup bör samma värde erhållas, men avvikelsen är genomgående relativt stor. Från figur 2, appendix 6, kan noteras att avvikelsen mellan EXO2-sondens klorofyllvärden och analysresultaten från labb är betydande och större än avvikelsen i figur 10. Det skulle kunna indikera att sonden har börjat avvika från kalibreringen och alltså skulle behöva omkalibreras. Det skulle även kunna indikera att den höga turbiditeten orsakar störningar i mätningarna med sonden som sker med en optisk sensor. Det skulle då kunna röra sig om "inner filter effect" (IFE), men då utspädningsförsök, appendix 8, figur 2, uppvisar god linjäritet är det mindre troligt. Avvikelsen finns även kvar då turbiditeten enligt figur 2, appendix 6, avtagit efter temoklinen, vilket ytterligare indikerar att felet ligger hos EXO2-sonden. Under projektet användes en referenslösning för att kontrollera om kalibreringen hos sonden börjat avvika. Data för dessa är dock inte tillgängligt för perioden maj till juni, men de hade kunnat ge svar på om avvikelsen beror på kalibreringsbehov.

Att medelvärdet av EXO2-sondens klorofyllkoncentrationer ner till seccidjupet ger en god överensstämmelse med labbkoncentrationerna är intressant då signalen som satelliterna fångar är just ett medelvärde av den reflekterade signalen.

5.3.2 Jämförelser EXO2 med Sentinel 2

Mätningarna av klorofyll med Sentinel 2 ger generellt bra uppskattningar av klorofyllkoncentrationen vilket kan ses bland annat i jämförelsen med klorofyllkoncentrationerna från labb där fler mätningar har god överensstämmelse. Mätningen den 25 maj har dålig överensstämmelse vilket även mätningen med S31 har vid det tillfället. Däremot visar Sentinel 3 alternativ 2 god överensstämmelse. Det skulle kunna bero på att Sentinel 32 beräknas med en algoritm anpassad för mer eutrofierade förhållanden vilket rådde de aktuella dagen. Klorofyllkoncentrationerna från Sentinel 2 visar generellt mindre variation över tid än Sentinel 3 där Sentinel 2 har färre riktigt låga värden när det inte enligt vattenprov ska vara låga värden, men inte heller de riktigt höga klorofyllkoncentrationerna 25 maj när det enligt vattenprov ska vara höga värden. För just de värden som presenteras för både Sentinel 2 och 3 är det även viktigt att notera att det var molnigt när satelliterna passerade så de värden som presenteras är medelvärden av intilliggande dagar. För Sentinel 2s del kan det till viss del förklara avvikelsen.

5.3.3 Jämförelser EXO2 med Sentinel 3 alternativ 1 (S31) och alternativ 2 (S32)

För Sentinel 3 alternativ 1 och 2 är överensstämmelsen för de jämförelser som gjordes ganska dålig. Det betyder sannolikt bara att själva jämförelserna inte är relevanta för klorofyllkoncentrationerna som beräknats av respektive algoritm.

Överensstämmelsen mellan de uppmätta klorofyllkoncentrationerna för Sentinel 3 alternativ 1 och klorofyllkoncentrationerna från vattenproverna är generellt ganska dålig. Sentinel 3 alternativ 2 har dock bättre överensstämmelse och vid några dagar riktigt god överensstämmelse.

5.4 Vattenparametrars påverkan på satellitmätningar av klorofyll

Från VIP plottarna i figur 11 går det att se att parametern turbiditet har störst vikt i prediktionen av klorofyllkoncentration och att korrelationen har positiv inverkan. Det innebär alltså att turbiditeten, jämfört med de andra uppmätta vattenparametrarna, har störst påverkan på hur mycket klorofyll som uppmäts i vattnet. Det skulle kunna indikera att osäkerheten i mätningarna ökar med hög turbiditet vilket är fallet i slutet av perioden. I tabell 3 kan noteras att turbiditeten i ytvattnet är nära dubbelt så hög i de två sista mätningarna jämfört med de första mätningarna vilket om man kollar i figur 9 skulle kunna förklara varför Sentinel 2s mätning missar den högsta toppen i klorofyll.

Andra parametrar som sticker ut som viktiga för den modellerade klorofyllkoncentrationen är siktdjup, totalfosfor (Tot-P), kisel (Si) och DOC. Att siktdjup sticker ut som viktig parameter går hand i hand med att även turbiditet gör det då högre turbiditet ger ett lägre siktdjup. Siktdjupet påverkas dock av fler faktorer än bara turbiditeten, men faktorerna är alla kopplade till hur ljus färdas genom vattnet och det är nog däri det viktigaste kring påverkan på mätningarna ligger.

Det är naturligt att även totalfosfor har stor påverkan då det är främsta orsaken till algblomning och förhöjd tillväxt av cyanobakterier. Det skulle dock vara naturligt om då även fosfat hade stor inverkan då det är den form av fosfor som är tillgängligt för organismer att ta upp. Det kan dock vara så att det fosfat som finns tas upp så fort att regressionen blir missvisande. I tabell 1 är fosfat markerat som under 1, medan det i R-studio inmatades som 0.1 för att markera att det vara mycket litet. I figur 10 visar det att fosfat har en inverkan och att den är negativ, men det är underligt att samma mönster inte återfinns för Sentinel 3. Kisel är också naturligt att det har viktig roll för modellen då det nog kan vara mycket kiselalger i början av perioden och kisel minskar då kraftigt till att ligga på låga nivåer i slutet av perioden.

Det är dock viktigt att påpeka att turbiditeten i vattnet påverkas av klorofyllkoncentrationen och att modellering av klorofyll med turbiditet därmed får problematiska implikationer.

Från figur 2, appendix 6, kan noteras att satelliterna får svårare att göra korrekta mätningar när topparna för klorofyll återfinns i djupare vattenskikt, i figur 2, appendix 6, på ca 5,5 meters djup enligt EXO2, vid 6m enligt vattenprov. Sentinel 3 alt 2 har dock relativt bra fångat EXO2-sondens topp. Att mätningarna inte avviker mer kan ha att göra med att turbiditeten är låg i vattnet ovanför klorofylltoppen och därmed inte stör signalen. Det visar dock att större siktdjup ökar osäkerheten, vilket skulle kunna förklaras av att strålningen behöver färdas genom mer vatten där det kan uppstå störningar. Detta medför en stor risk för ytvattenverk då mycket höga klorofyllkoncentrationer kan döljas i djupt vatten och motiverar användning av in situ sensorer nära intagsledningarna för råvatten.

5.5 Varningssystem för algblomning

Ett varningssystem för algblomning bör utformas så det går att få data regelbundet vilket ges av fjärranalys med satelliter. Dock skulle en utplacerad sond som kontinuerligt mäter utvalda

parametrar kunna ge värdefulla data som tillägg. Från EXO2 profilerna, figur 5-10, ser vi att vattnets temperatur är en särskilt viktig och utlösande faktor för algblomning. Det kan även kunna vara så att bildandet av en termoklin är en viktig faktor för algblomning. Att övervaka vattnets temperatur i bestämda vattenskipt kan då vara ett enkelt sätt att få varning om ökad risk för algblomning.

En annan parameter som lätt kan övervakas med sond är vattnets pH värde som enligt mätningarna är en stark indikator på pågående blomning. Fram till 2 juni, figur 10, är koncentrationen högst i ytan för att sedan sjunka i djupare vattenskipt, men under sommaren, appendix 6, har pH tydliga toppar vid klorofylltopparna vid termoklinen.

Fjärranalys med satellit ger regelbundna mätningar av klorofyll och indikation på blomning av cyanobakterier. Begränsningarna som finns är att inga mätningar kan ske då det ligger is på vattnet eller då moln skymmer sikten. I perioder kan molntäcken ligga under lång tid och skymma vilket kan ge långvarig brist på information om klorofylläget. Om det sammanfaller med en varm period skulle algblomning kunna ske utan att det övervakas. Ett kombinerat övervakningssystem med utplacerade uppkopplade sonder och satellitbaserad fjärranalys kan ge ett varningssystem med redundans som kan övervaka flera relevanta parametrar.

En anledning att ha ett kombinerat system med djupare placerad sond kan vara att även om satelliterna lyckas fånga en djup topp i klorofyll så kommer de döda cyanobakterierna sjunka under den nivån. Det gör att de skymms och då vattenintag för dricksvattenverk placeras under termoklinen så riskeras fortfarande dessa tas upp. Då det är när cyanobakterier dör som deras toxin frigörs medför detta en extra risk för kontamination i dricksvattnet. En djupt placerad sond kan övervaka turbiditet och varna för detta.

5.6 Felkällor och osäkerhet

Att det är många olika provtagare som tagit vattenprover medför en felkälla till vattenproverna. Även om provtagare har gått in med samma ingångsvärden så är risken att provtagning genomförs på olika sätt vid de olika tillfällena överhängande.

Huruvida den tidigare efterberäkningen eller den senare är mer korrekt är intressant att resonera kring. I projektet utgås det från att analyserna av vattenprover ger korrekta värden för klorofyll och felmarginalen borde vara liten. Med det resonemanget följer det att de profiler där klorofyllkoncentrationen från sonden överlappar mätningarna av klorofyll i djupare lager bör vara mer korrekta än motsvarande profiler som går att se i appendix 5. Den senare efterberäkningen används dock även för profilerna 25 maj till 8 juli som i profilerna, figur 10 & figur 2, appendix 6, kan ses avvika från vattenproverna. Det kan vara så att även dessa värden behöver multipliceras med en skalfaktor och att de egentligen bör skiftas uppåt. Särskilt profilen i figur 2, appendix 6, avviker kraftigt vilket kan bero på skymmande effekter av höga klorofyllkoncentrationer.

Kring VIP-plottarna finns en osäkerhet i regressionen där datasetet är mycket litet med endast mätningar vid endast sex tillfällen. Det tillför även osäkerhet att det vid varje tillfälle endast är ett fåtal parametrar som analyserats. För PLSR hade det varit bättre med ett något större datasett även om en av styrkorna med metoden är just att det kan hantera små datasett så finns det begränsningar.

Det är även viktigt att komma ihåg gällande modelleringen av klorofyll att det finns en stark koppling mellan klorofyll och turbiditet. Klorofyll beskrivs dock inte entydigt av turbiditet utan turbiditeten påverkas av många andra aspekter också.

Då EXO2-sondens klorofyllsensor har en nedre analytisk gräns, som dock är outforskad, bör låga klorofyllvärden, under 5 µg/l, behandlas med försiktighet. Det gäller särskilt för låga värden i kvotjämförelserna där felet kan förstärkas ytterligare.

5.7 Förslag på vidare undersökningar och studier.

Det finns mycket data som samlats in vid mätningarna som inte analyserats. Exempelvis skulle det kunna undersökas hur turbiditet och absorbans från satelliterna överensstämmer med vattenproverna och EXO2 sonden.

Vidare studier skulle även kunna samla in metrologiska data och undersöka hur olika molntyper, omgivande vegetation och luftfuktighet påverkar hur signalen till satelliterna och därmed mätningen påverkas.

Förslag på vidare studier kring varningssystem för algbloomning kan även vara att kvantifiera konkreta nivåer då varning för algbloomning bör gå ut till dricksvattenproducenter. Exempelvis att anpassa driften när pH stiger över ett visst värde eller ta ett vattenprov för att bekräfta vilka arter som blommar vid höga halter av phycocyanin.

6 Slutsats

Från studien kan noteras att mätningar av klorofyll med satellit, särskilt Sentinel 2 och Sentinel 3 alternativ 2 ger mer korrekta mätvärden då turbiditeten i vattnet är låg, ca <3 FNU. När turbiditeten stiger så ökar även avvikelsen i mätningarna från det verkliga klorofyllvärdet.

Temperatur är en viktig parameter att övervaka för att förutse om algblomning kan ske. Kraftig algblomning föregicks i det här projektet av bildandet av en termoklin vilket skulle kunna övervakas som indikator. Även pH har i studien visat sig vara ett tydligt tecken på pågående algblomning. Phycocyanin kan övervakas för att visa om en blomning består av cyanobakterier.

Variable Importance Plot från Partial least Squares regression indikerar att turbiditet är den parameter som har störst inverkan på mätning av klorofyll med satellit. Andra parametrar som var viktiga för mätningarna var bland annat siktdjupet, vilket i sin tur påverkas starkt av turbiditet, men även av andra faktorer. Båda parametrarna tillsammans indikerar dock att mätningarnas noggrannhet påverkas av parametrar som påverkar hur ljus färdas genom vattnet. Vid mätning kan detta vara viktigt att ha i åtanke då förhöjd turbiditet enligt studien skulle kunna tyda på större osäkerhet i mätningen.

För beredskapen hos ytvattenverk där det finns risk för algblomning är det att rekommendera ett kombinerat övervakningssystem med båda satelliter och sond. Genom fjärranalys övervakas större områden med hög tidsmässig upplösning där klorofyllvärden kan varna för ytliga förekomster av cyanobakterier. Djupare placerade in situ sensorer kan användas för att detektera förhöjda pH-värden, turbiditet, phycocyanin och ökande vattentemperatur. Med endast fjärranalys finns en risk att djupa förekomster av cyanobakterier går obemärkt förbi med hälsorisker för konsument som följd.

För badplatser är varningssystem med satelliter fullgott då detektionen av ytförekomster av cyanobakterier bedöms som god.

För CyanoAlert rekommenderas att när det är hög turbiditet i vattnet så bör klorofyllmätningar behandlas med försiktighet. Exempelvis skulle dessa mätningar kunna flaggas för extra osäkerhet. Vid osäkerheter i mätningarna skulle kontroll med in situ provtagning kunna användas för verifiering av satellitens värden. Vid stort siktdjup kan mätningar flaggas särskilt för ytvattenverk som tar råvatten under termoklin att djupt liggande cyanobakterier möjligen inte detekteras. Risken finns annars att personal lutar för mycket på klorofyllvärden från ytvattnet och missar riskerna därunder.

7 Källor

- Atterlöf, A. Kahn, M. Aronsson, G. (2009) ”Naturvårdsplan för Håbo Kommun- Bevarande och Utveckling” DNR 2009/53
- Ansari et. Al. 2011
- Ansari, A. A., Gill, S. S., Lanza, G. R., Rast, W. (2011) ”*Eutrophication: causes, consequences and control*” Springer Dordrecht Heidelberg London New York, ISBN 978-90-481-9624-1
- Bernes C. (2005) “Förändringar under ytan- Sveriges havsmiljö granskad på djupet” Monitor utgåva 19, Naturvårdsverket.
- Brunel, E., (2021) “Calibration of the EXO2 probe for the detection of chlorophyll and cyanobacteria in the DICYANO project on lake Stora Ullfjärden”
- Carlsson, S.-Å. (2001) ”Ytvattenöversikt för Upplands – Bro kommun” Vattenresurs AB, Swedenvir
- Coignard, S., (2021) ”Engineering practice internship report-Study of the measurement on the Chlorophyll parameters of the lake Stora Ullfjärden by using a multi-electrode probe EXO2”
- Copernicus (2021a) “Copernicus I korthet” Tillgänglig: <https://www.copernicus.eu/sv/om-copernicus/copernicus-i-korthet> Hämtad 2021-07-06
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., Tchobanoglous, G., Borchardt, J. H. (2012) “*MWH’s Water Treatment- Principles and Design*” New Jersey: John Wiley & sons, Incorporated, tredje upplagan.
- CyanoAlert (u. å) ”*about cyanoalert*” Tillgänglig: <https://www.cyanoalert.com/home-en/about-en> Hämtad: 2021-08-25
- Granéli, E., Turner, J. T. (2006). ”*Ecology of harmful algae*” Department of marine sciences, University of Kalmar, Sweden. University of Massachusetts Dartmouth, Biology department and school for marine science and technology, USA. Ecological Studies volume 189, ISSN 0070-8356
- Gustafsson, A. (2015a) ”Objektdatablad för Stora Ullfjärden, tillhörande vattenplan för Upplands-Bro kommun” <https://upplands-bro.se/download/18.7de757dd160d9f1861b752d9/1516720681775/SjoarStoraUllfjarden.pdf> Hämtad: 2021-08-14
- Gustafsson, A. (2015b) ”Objektdatablad för Lilla Ullfjärden, tillhörande vattenplan för Upplands-Bro kommun” <https://www.upplands-bro.se/download/18.56ea77fc1686d89c2f852fa/1548081133208/Sj%C3%B6ar%20-%20Lilla%20Ullfj%C3%A4rden.pdf> Hämtad: 2021-08-14
- Haenlein, M., Kaplan, A. (2004) ”*A beginner’s guide to partial least squares analysis*” Understanding statistics 3(4), Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Havs och vattenmyndigheten (2007) ”Bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag” Bilaga A till handbok 2007:4

Hjälml, L (2005). ”Registerblad, område av riksintresse för Uppsala län, Lilla Ullfjärden med omgivning”

Ho, J. C., Michalak, A. M. (2019). ”Exploring temperature and precipitation impacts on harmful algal blooms across continental U.S. lakes” *Limnology and oceanography* 65, 2020, 992-1009. doi: 10.1002/lno.11365. Department of global ecology, Carnegie institution for science, Stanford, California. Department of civil and environmental engineering, Stanford university. Stanford, California.

Huisman J, Matthijs HCP, Visser P.M. (2005). ”Harmful cyanobacteria” Springer aquatic ecology, Series 3. Dordrecht, The Netherlands: Springer; 2005.

Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M. H., Visser, P. M. (2018), ”Cyanobacterial blooms” *Nature reviews- microbiology*, volume 16.

Institutionen för vatten och miljö (2009) ”Provtagningsmanual” Tillgänglig: <http://info1.ma.slu.se/download/geokemilabb/provtagningsmanual.pdf> Hämtad: 2021-03-01

Institutionen för vatten och miljö (2018) ”Provtagningsanvisning”. Tillgänglig: <https://www.slu.se/globalassets/ew/org/inst/vom/laboratorier/provtagning/enkel-provtagningsanvisning-vom-2018.pdf>. Hämtad: 2021-09-14

Jacobson, A. (2005). ”Åtgärdsprogram för bevarande av småsvalting (*Alisma Wahlenbergii*)” Naturvårdsverket, Rapport 5499.

Köhler, S., Hoffmeister, S., Kikuchi, J., Wallman, K. (2019) ”Utvärdering av användningen av multielektrosonder inom miljöövervakningen av sjöar-Exempel från Mälaren” Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö; Rapport 2019:3

Lantmäteriet (2021) ”Min karta” Tillgänglig: <https://minkarta.lantmateriet.se/> Hämtad:2021-10-14

Livsmedelsverket (2018) ”Handbok dricksvattenrisker- Cyanotoxiner i dricksvatten” Serien för dricksvattenrisker, ett samarbetsprojekt. ISSN 1104-7089.

Livsmedelsverket (2021) ”Algblomning- cyanobakterier” Tillgänglig: <https://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/oonskade-amnen/cyanobakterier-blagrona-alger> Hämtad: 2021-09-14

Länstyrelsen Uppsala Län (2014). ”Beslut om utvidgat strandskydd i Håbo kommun, Uppsala län” Diarienummer:511-2627-14

Mevik, B-H., Wehrens, R. (2021) ”Introduction to the pls package” Tillgänglig: <https://cran.r-project.org/web/packages/pls/vignettes/pls-manual.pdf> Hämtad: 2021-09-21

Miljödata MVM (u. å.) ”Miljödata MVM- En webbtjänst med mark-, vatten- och miljödata” Tillgänglig: <https://miljodata.slu.se/MVM/> Hämtad: 2021-10-13

Miljöstatistik (u.å.a) ”PLS” Tillgänglig: <http://www.miljostatistik.se/PLS.html> Hämtad: 2021-09-21

Miljöstatistik (u.å.b) ”PLS” Tillgänglig: http://www.miljostatistik.se/PLS_exempel1.html Hämtad: 2021-09-21

Mukherjee, R., Sengupta, D., Sikdar, S. K. (2015) ”*Selection of sustainable processes using sustainability footprint method: a case study of methanol production from carbon dioxide*” Computer aided chemical engineering, Volume 35, chapter 12, ISSN 1570-7946, Elsevier B. V.

Mälarseminariet (2020)

Philipson née Ammenberg, P. (2003). “Environmental Applications of Aquatic Remote Sensing”. Acta Universitatis Upsaliensis. *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 812. 80 pp. Uppsala. ISBN 91-554-5542-5.

Philipson née Ammenberg (2021). Personlig kontakt, e-post.

Schirrmeister, B. E., Gugger, M., Donoghue, P. C. J. (2015) ”Cyanobacteria and the great oxidation event: evidence from genes and fossils” *Palaeontology*, Vol. 58, Part 5, 2015, pp. 769–78.

SMHI (2021a) ”*Algblomning*” Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/alger/algblomning-1.1734> Hämtad: 2021-09-14

SMHI (2021b) ”*Algblomningar i Östersjön*” Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/alger/algblomningar-i-ostersjon-1.3008> Hämtad: 2021-09-14

Svenskt Vatten (2021) “Produktion av dricksvatten” <https://www.svensktvatten.se/fakta-om-vatten/dricksvattenfakta/produktion-av-dricksvatten/> Hämtad 2021-07-06

SYKE (2021) ”*Tarkka*” Tillgänglig: <http://www.i4.ymparisto.fi/i4/eng/tarkka/index.html?type=RGB&date=2021-08-31&datespan=1&name=DEFAULT&lang=en&zoom=12&lat=59.60743&lon=17.49178> Hämtad: 2021-09-16. Finnish Environment Institute (SYKE) / Geoinformatics systems and Geoinformatics research units have produced these Remote Sensing products. Satellite products are based on several NASA, NOAA and EU Copernicus program satellite instruments. Currently Sentinel-2 (ESA), Sentinel-3 (ESA), Landsat-8 (NASA) and TERRA MODIS (NASA) satellites are utilized for monitoring. Previously also NOAA-AVHRR (NOAA), AQUA/TERRA MODIS (NASA), ENVISAT MERIS (ESA), RADARSAT (CSA) and AMSR-E (NASA) were utilized. ENVISAT MERIS and Sentinel-2 images have been downloaded from ESA. Landsat-8 and a subset of the AQUA MODIS images have been downloaded from NASA. NOAA-AVHRR and TERRA / AQUA MODIS images have been received by Finnish Meteorological Institute.

The European space agency (ESA) (2021a) “*Sentinel-2*” Tillgänglig:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> Hämtad: 2021-07-06

The European space agency (ESA) (2021b) “*Sentinel-3*” Tillgänglig:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3> Hämtad: 2021-07-06

The European space agency (ESA) (2021c) “*OLCI Instrumental Payload*” Tillgänglig:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3/instrument-payload/olci> Hämtad:
2021-07-06

VISS (u.å. a) “*Stora Ullfjärden*”
<https://viss.lansstyrelsen.se/Waters.aspx?waterMSCD=WA47437003> Hämtad: 2021-08-25

VISS (u.å. b) “*Lilla Ullfjärden*”
<https://viss.lansstyrelsen.se/Waters.aspx?waterMSCD=WA90764558> Hämtad: 2021-08-25

Wallman, K. (2021) Epost, personlig kontakt.

Willén, T., Tillén, T. (1984) “*Lilla Ullfjärden - en sjöbeskrivning*” Naturvårdsverket, Rapport
SNV PM 1769.

World Health Organization (2017) “*Guidelines for drinking-water quality: fourth edition
incorporating the first addendum*”

Xylem (2020) “*EXO User Manual- Advanced water quality monitoring platform*” YSI- a
xylem brand. 1725 Brannum Lane, Yellow Springs, Ohio.

Östlund, M. (2021) “*Aktuella provtagningsmetoder för sjöar och vattendrag*” Tillgänglig:
<https://www.slu.se/institutioner/vatten-miljo/laboratorier/provtagningsmetoder/> Hämtad:
2021-09-17

Appendix

Appendix 1-Översiktsbild Ullfjärdarna



0 800 1600 2400 m

Skala 1:44 400. SWEREF 99 TM. RH 2000.

LANTMÄTERIET

Figur 1. Visar översiktsbild över Ullfjärdarna med omnejd (Lantmäteriet 2021).

Appendix 2-Anmärkningar EXO2

pH/ORP elektroden var dålig vid provtagningarna fram till och med 23 mars, därefter byttes elektrodtopp till en ny.

Vid första provtagningstillfället 12 mars var det problem med sonden så att ingen data sparades, dock togs vattenprover som skickades till analys.

Sonden testades i labb på en referenslösning som använts i tidigare projekt (Köhler 2019) och då överensstämmelsen initialt var god bedömdes det att sonden inte behövde kalibreras. När data senare analyserades i april/maj bedömdes det att kalibrering var nödvändig och det skedde inför provtagningstillfället 25 maj.

Vid provtagningarna fram till och med 20 april användes en repvinda som sonden satt fast i när den sänktes ned, men från 11 maj användes en kabelrulle kopplad till handheld så att kontakt kunde has med sonden hela tiden.

Appendix 3-Anmärkningar provtagning våren 2021

Provtagning 12-03-2021

Vid provtagningen togs ytvattenprov i mitten av sjön. Vid provtillfället var det ett fel med sonden så att inga mätvärden sparades vid mätningen. Siktdjup tog med secciskiva på skuggsidan. Båda provtagarna tog siktdjup och medel av dessa noterades. Provtagning skedde från hydrokopter då det delvis låg is på Stora Ullfjärden. Provtagare var Harald Löf och Fredrik Pilström.

Provtagning 23-03-2021

Provtagning skedde i mitten av sjön. EXO2 sonden nedsänktes med en målshastighet av 1,5 meter per minut ner till botten av sjön och drogs sedan upp med samma målshastighet. Sonden stötte i botten i sitt yttersta läge och sondens borste kunde inte användas till att borsta rent då kabel och handheld ej användes. Siktdjup tog med secciskiva på skuggsidan. Båda provtagarna tog siktdjup och medel av dessa noterades. Provtagare var Harald Löf och Fredrik Pilström.

Provtagning 16-04-2021

Det här provet skulle ha tagits veckan tidigare, men på grund av tekniska problem med båtmotorn kunde provtagning inte genomföras vid rätt tillfälle. Provtagning skedde i mitten av sjön i ytvattnet med fyrishämtare och vid 16 meter med ruttnerhämtare. Sonden nedsänktes för vattenprofil och siktdjup tog med secciskiva. Provtagare var Harald Löf, Maja Sellergren och Linnea Svärd.

Provtagning 20-04-2021

Provtagning skedde i mitten av sjön i ytvattnet med fyrishämtare, samt vid 16 meter med ruttnerhämtare. Sonden nedsänktes för vattenprofil och siktdjup tog med secciskiva. Provtagare var Harald Löf och Calle Helgesson.

Provtagning 11-05-2021

Provtagning skedde i mitten av sjön i flera skikt. Ytvattenprov togs med fyrishämtare och därefter togs prov med ruttnerhämtare på 6, 9, 12, 16 och botten vilket bedömdes vara vid 17,5 meters djup. Sonden nedsänktes för vattenprofil och siktdjup tog med secciskiva. Från och med detta provtagningstillfälle började en kabelvinda användas till sonden så att dess värden kunde övervakas i realtid. Provtagare var Harald Löf, Enna Brunel och Salomé Coignard som kom som utbytesstudenter och deltog i projektet.

Provtagning 25-05-2021

Provtagning skedde i mitten av sjön i ytvatten. Sonden nedsänktes för vattenprofil, dock av annan provtagare vilket gav längre nedsänkningstid än tidigare. Siktdjup togs med secciskiva av två provtagare. Provtagare var Harald Löf, Enna Brunel och Salomé Coignard.

Provtagning 02-06-2021

Provtagning skedde i mitten av sjön i ytvatten, 6, 9, 12, 16 och vid botten vilket bedömdes vara vid 19 meter. Sonden nedsänktes för vattenprofil och siktdjup tog med secciskiva. Provtagare var Enna Brunel och Salomé Coignard.

Appendix 4-Analysresultat från mitten av Stora Ullfjärden 12/3-8/7

Tabell 1. Visar analysresultat för alla djup från provtagning i mitten av Stora Ullfjärden.

Nivå	Provtaget	Klockslag	Siktdjup m	pH	Tot- N_TNb µg/l	PO4_P µg/l
0,5	2021-03-12	10:00	3,1	7,77	1180	34
0,5	2021-03-23	11:30	3	7,82	1140	33
0,5	2021-04-16	11:50	2,8	8,16	1150	15
16	2021-04-16	11:50		8,15	1190	16
0,5	2021-04-20	12:05		8,31	1120	7
16	2021-04-20	12:05		8,27	1130	8
0,5	2021-05-11	10:55	2,1	8,59	892	<1
6	2021-05-11	10:55		8,57	941	<1
9	2021-05-11	10:55		8,55	906	<1
12	2021-05-11	10:55		8,58	953	6
16	2021-05-11	10:55		8,56	930	3
17,5	2021-05-11	10:55		8,59	951	2
0,5	2021-05-25	11:00	1,3	9,06	740	1
0,5	2021-06-02	09:30	1,45	9,03	706	<1
6	2021-06-02	09:30		8,68	905	<1
9	2021-06-02	09:30		8,42	909	<1
12	2021-06-02	09:30		8,36	922	<1
16	2021-06-02	09:30		8,62	870	<1
19	2021-06-02	09:30		8,03	1050	27
0,5	2021-06-27	10:50	2,75	8,93	588	<1
0,5	2021-07-08	10:30	3,75	8,66	518	<1
6	2021-07-08	10:30		8,48	789	<1
9	2021-07-08	10:30		7,79	804	<1
12	2021-07-08	10:30		7,86	961	<1
16	2021-07-08	10:30		7,66	1070	5
	2021-07-08	10:30		8,67	560	<1

Nvå	Provtaget	Klockslag	Tot._P µg/l	Turb. FNU	Si mg/l	Kfyll mg/m3	Abs F 254/5	DOC mg/l
0,5	2021-03-12	10:00	51	2,4	1,7	2,5	0,933	8
0,5	2021-03-23	11:30	50,2	2,4	1,7	4,2	0,927	8
0,5	2021-04-16	11:50	44,4	2,7	1,3	16	0,909	8,4
16	2021-04-16	11:50	44,9	3	1,3	15	0,909	8,6
0,5	2021-04-20	12:05	42,2	2,6	0,91	18	0,889	8,1
16	2021-04-20	12:05	42,9	3,1	1	22	0,933	8,4
0,5	2021-05-11	10:55	31,3	2,8	0,08	14	0,915	8,3
6	2021-05-11	10:55	32,9	3	0,09	16	0,894	7,9
9	2021-05-11	10:55	34,5	3,5	0,1	15	0,911	8,2
12	2021-05-11	10:55	36,4	3,1	0,09	17	0,895	8,4
16	2021-05-11	10:55	32,7	3	0,09	15	0,892	8,2
17,5	2021-05-11	10:55	39,8	3,3	0,09	18	0,896	8,2
0,5	2021-05-25	11:00	32,9	5,7	0,16	35	0,949	8,8
0,5	2021-06-02	09:30	26,8	4,8	0,2	11	0,946	8,6
6	2021-06-02	09:30	32,5	5,8	0,23	13	0,933	9
9	2021-06-02	09:30	26,6	4,4	0,18	12	0,903	8,3
12	2021-06-02	09:30	21,9	3,1	0,16	7	0,896	8,1
16	2021-06-02	09:30	29,5	4,1	0,21	7,8	0,916	8,3
19	2021-06-02	09:30	54,3	3,7	0,3	6,2	0,899	8,2
0,5	2021-06-27	10:50	16,1	1,9	0,24	6,7	0,914	8,8
0,5	2021-07-08	10:30	11,1	1,9	0,28	3,1	0,917	8,6
6	2021-07-08	10:30	67,5	22	0,27	60	0,924	8,4
9	2021-07-08	10:30	25,9	5,2	0,26	18	0,907	8
12	2021-07-08	10:30	20,4	2	0,23	4,5	0,887	8
16	2021-07-08	10:30	30,1	1,9	0,31	2,8	0,891	8,1
	2021-07-08	10:30	10,9	1,9	0,29	3	0,906	8,6

Appendix 4-Tidigare efterbehandling av klorofylldata

Utgår från klorofyllvärden uppmätt i $\mu\text{g/l}$ där temperaturen korrigeras för enligt ekvation 6.

$$Kfyll_{Tempkorr} = Kfyll_m + Kfyll_m * a(T_m - 25) \quad (1)$$

Där $Kfyll_{tempkorr}$ är klorofyllkoncentrationen korrigerad för temperatur, $Kfyll_m$ är den uppmätta klorofyllkoncentrationen, $a=0,015$ och T_m är den uppmätta temperaturen.

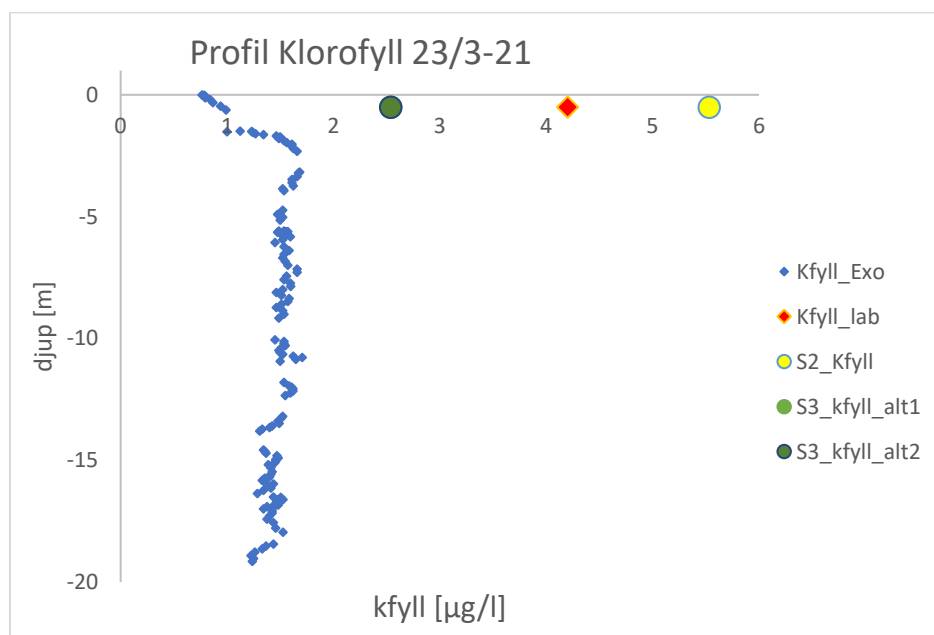
Därefter korrigeras för turbiditeten genom ekvation 7.

$$Kfyll_{TempTurbkorr} = \frac{Kfyll_{Tempkorr}}{Turb_m^{b+1}} \quad (1)$$

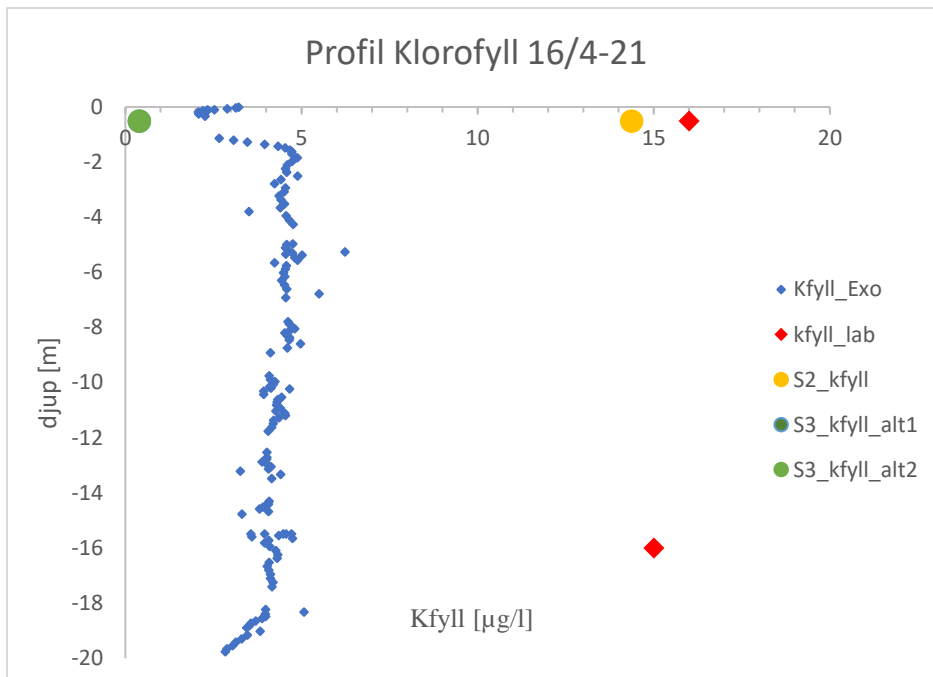
Där $Kfyll_{TempTurbkorr}$ är den korrigerade klorofyllkoncentrationen, $Turb_m$ den uppmätta turbiditeten och $b=-0,00272$

För att korrigera för att sonden ej var kalibrerad beräknades en korrektionskoefficient av Coignard (2021) och Brunel (2021) vilket var 1,85, som de efterbehandlade värdena multiplicerades med.

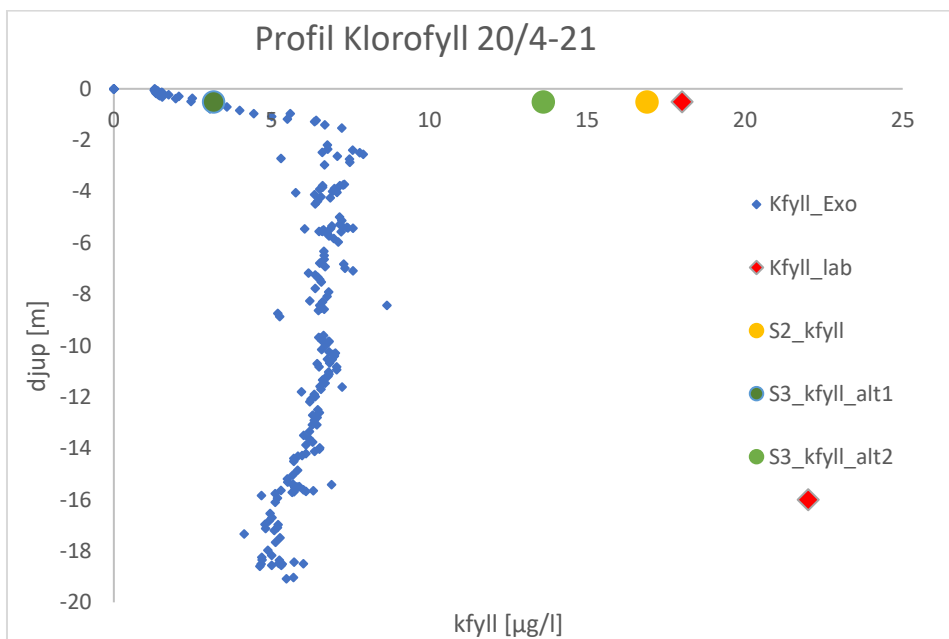
Appendix 5-Profilen enligt tidigare efterbehandling



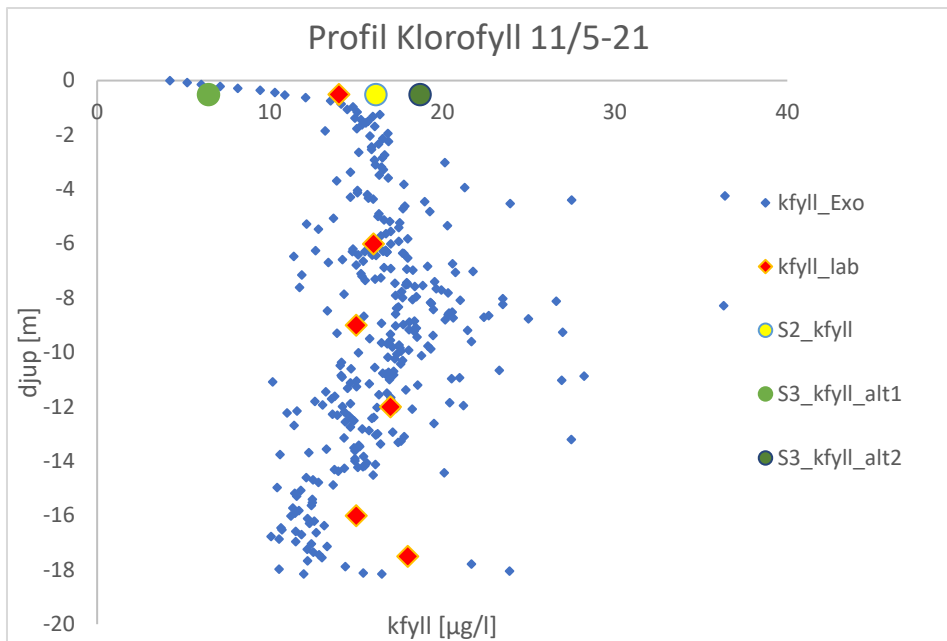
Figur 1 Visar EXO2 profil enligt tidigare efterberäkning



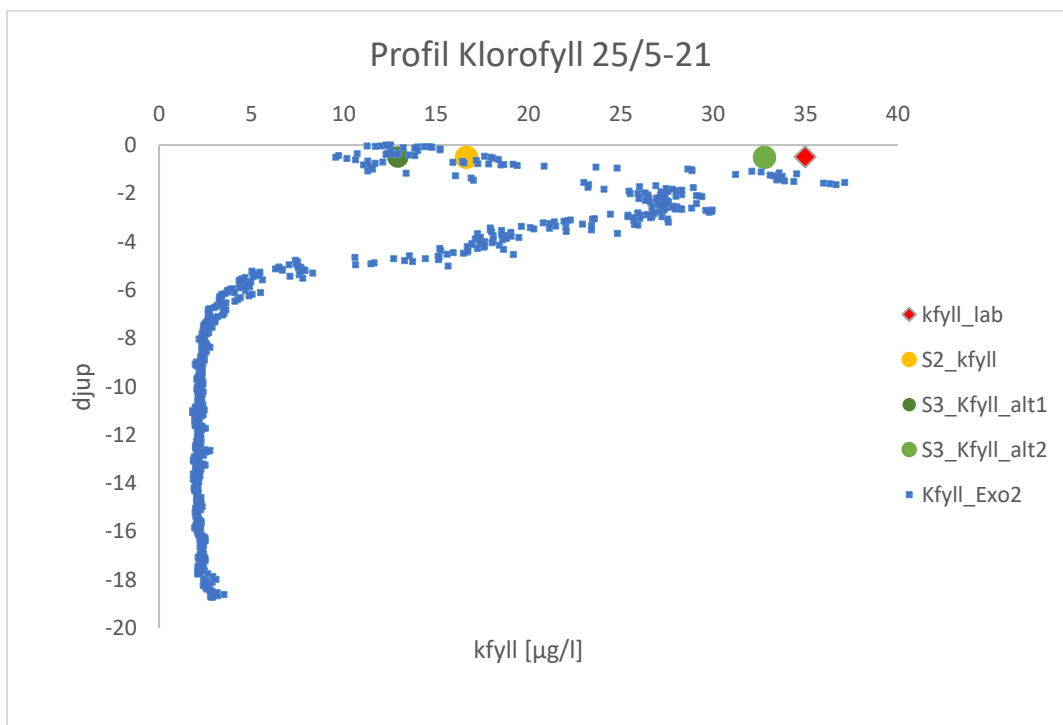
Figur 2 Visar EXO2 profil enligt tidigare efterberäkning



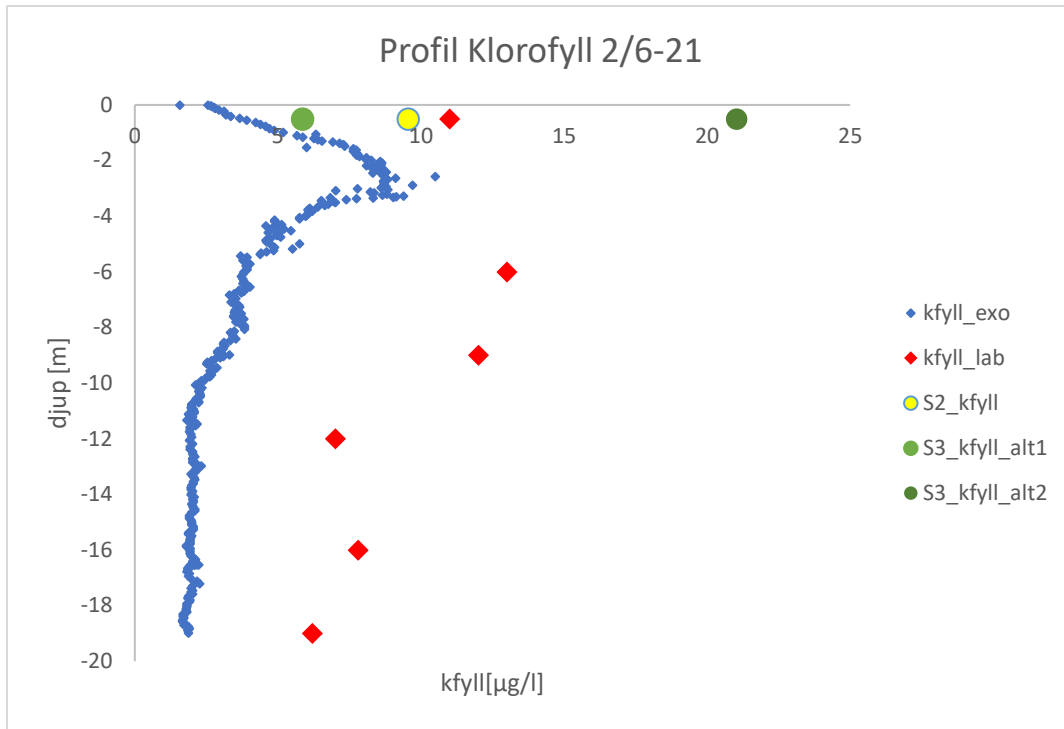
Figur 3 Visar EXO2 profil enligt tidigare efterberäkning



Figur 4 Visar EXO2 profil enligt tidigare efterberäkning



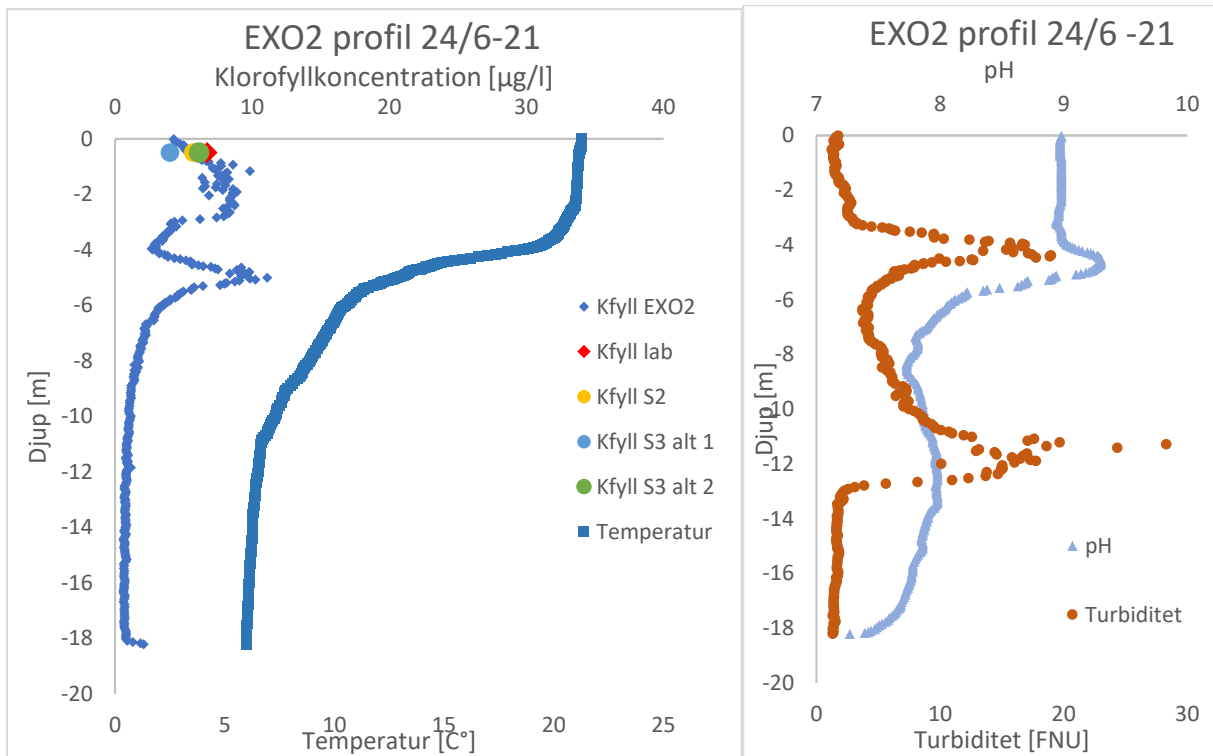
Figur 5 Visar EXO2 profil enligt tidigare efterberäkning



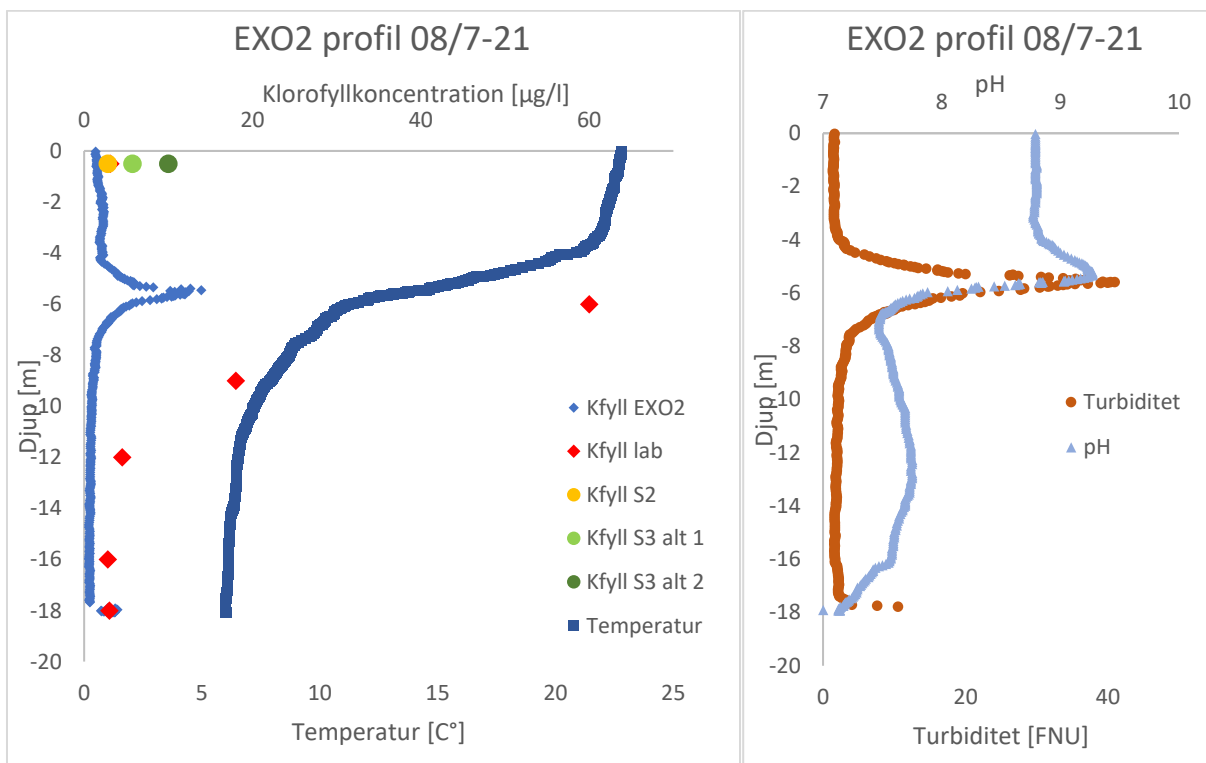
Figur 6 Visar EXO2 profil enligt tidigare efterberäkning

Appendix 6-EXO2 profiler 24/6-8/7 -2021

Dessa profiler framställdes sent i projektet och ingick inte ursprungligen. De visar dock på spännande utveckling av klorofyllkoncentration, turbiditet, pH och temperatur.



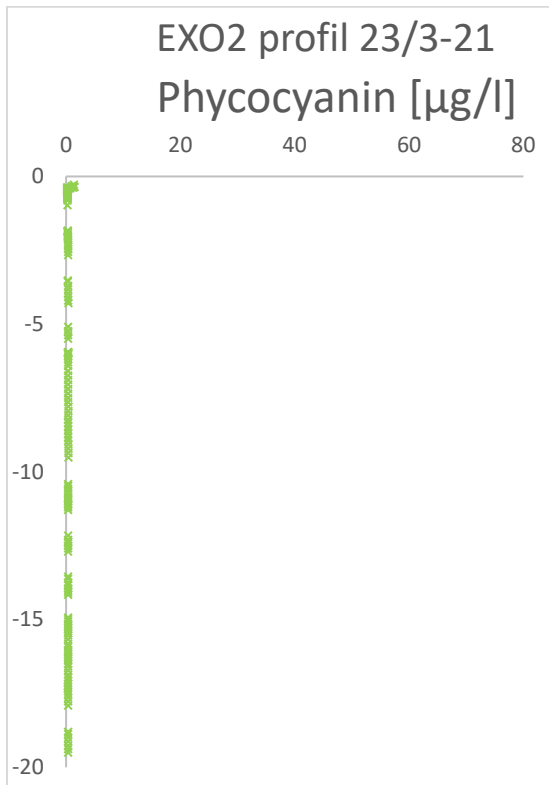
Figur 1. Visar EXO2 profil från Stora Ullfjärden 24/6- 21.



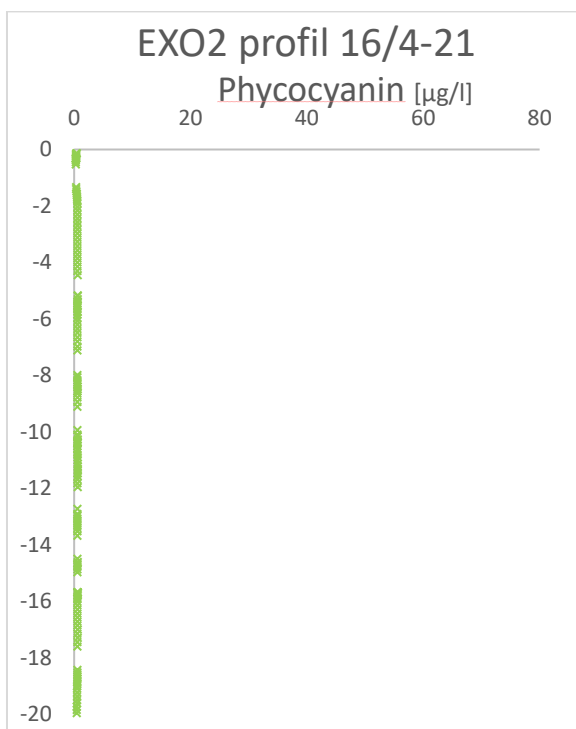
Figur 2. Visar EXO2 profil från Stora Ullfjärden 8/7- 21. Kfyll lab i ytvattnet är skydd av satellitpunkterna.

Appendix 7-Phycocyaninprofiler

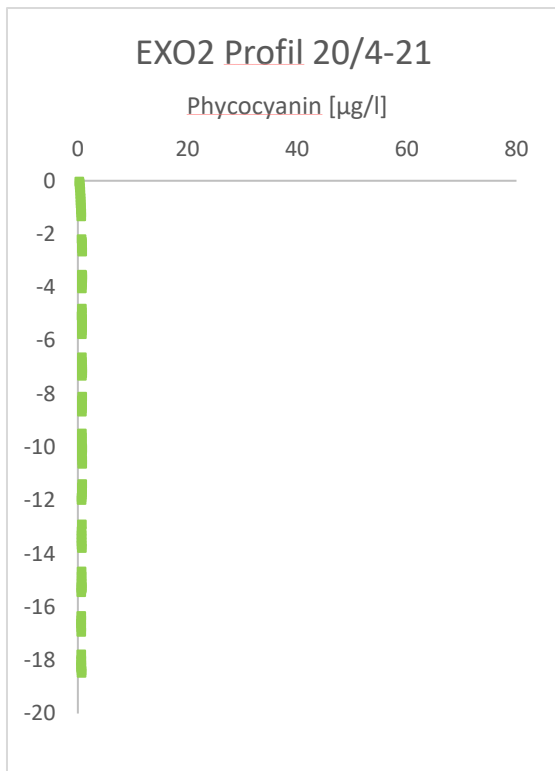
Till Mälarseminariet togs profiler över Phycocyanin fram. Dessa visas i figur 22-29.



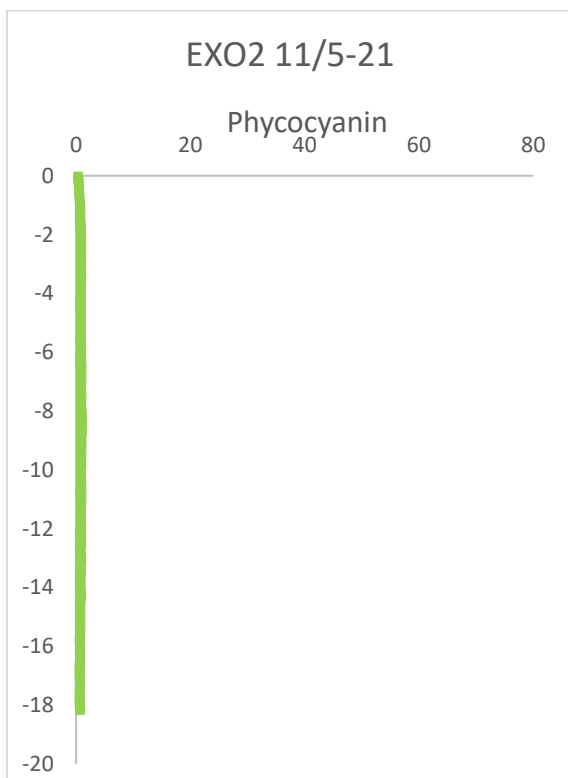
Figur 1 visar profil över phycocyanin i mitten av Stora Ullfjärden.



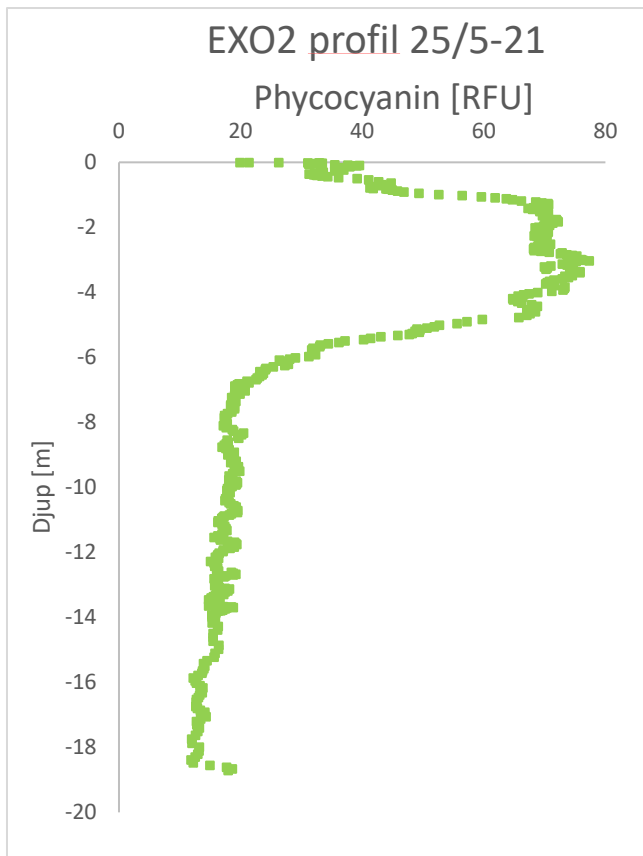
Figur 2 visar profil över phycocyanin i mitten av Stora Ullfjärden.



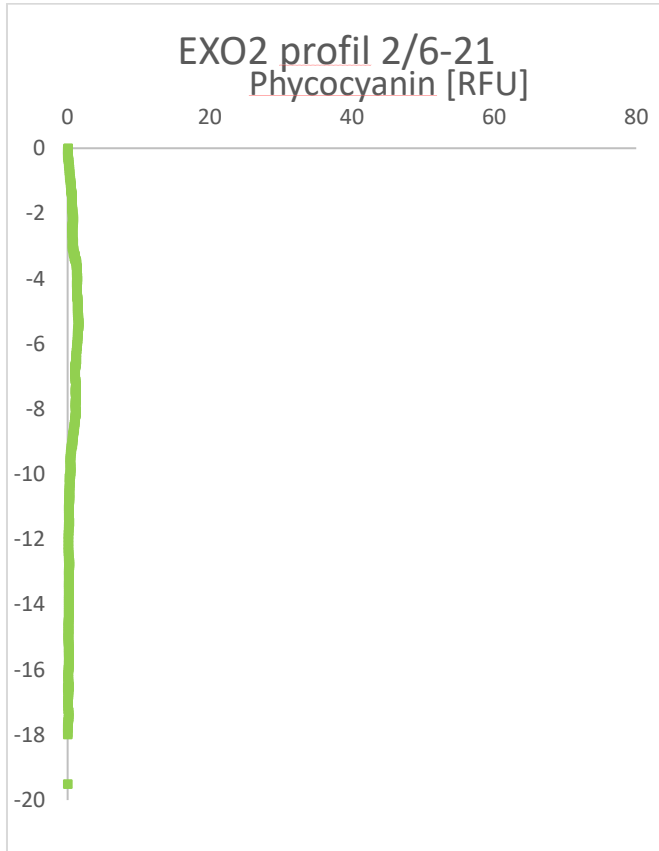
Figur 3 visar profil över phycocyanin i mitten av Stora Ullfjärden.



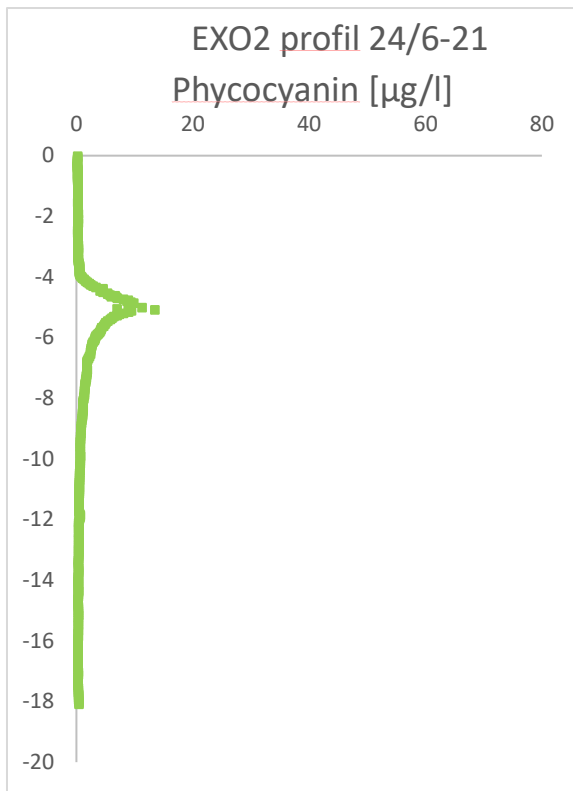
Figur 4 visar profil över phycocyanin i mitten av Stora Ullfjärden.



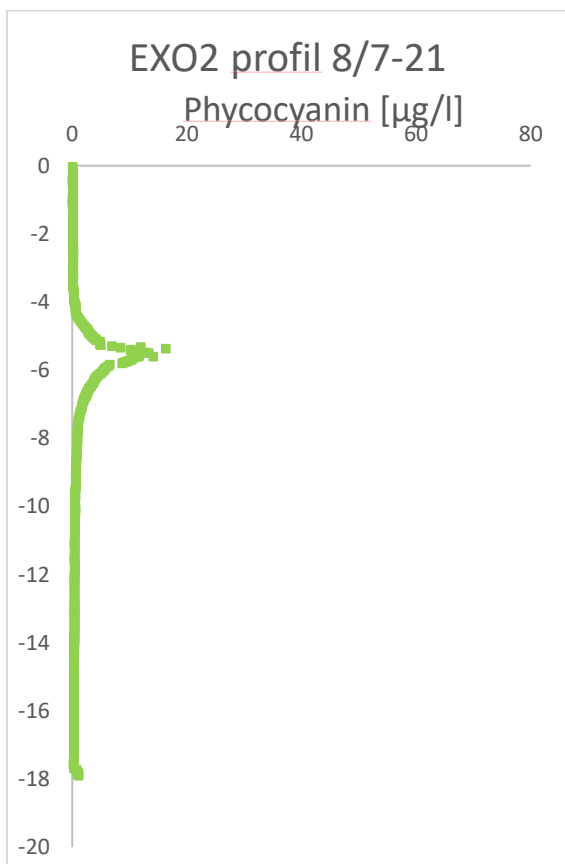
Figur 5 visar profil över phycocyanin i mitten av Stora Ullfjärden.



Figur 6 visar profil över phycocyanin i mitten av Stora Ullfjärden.



Figur 7 visar profil över phycocyanin i mitten av Stora Ulfjärden.

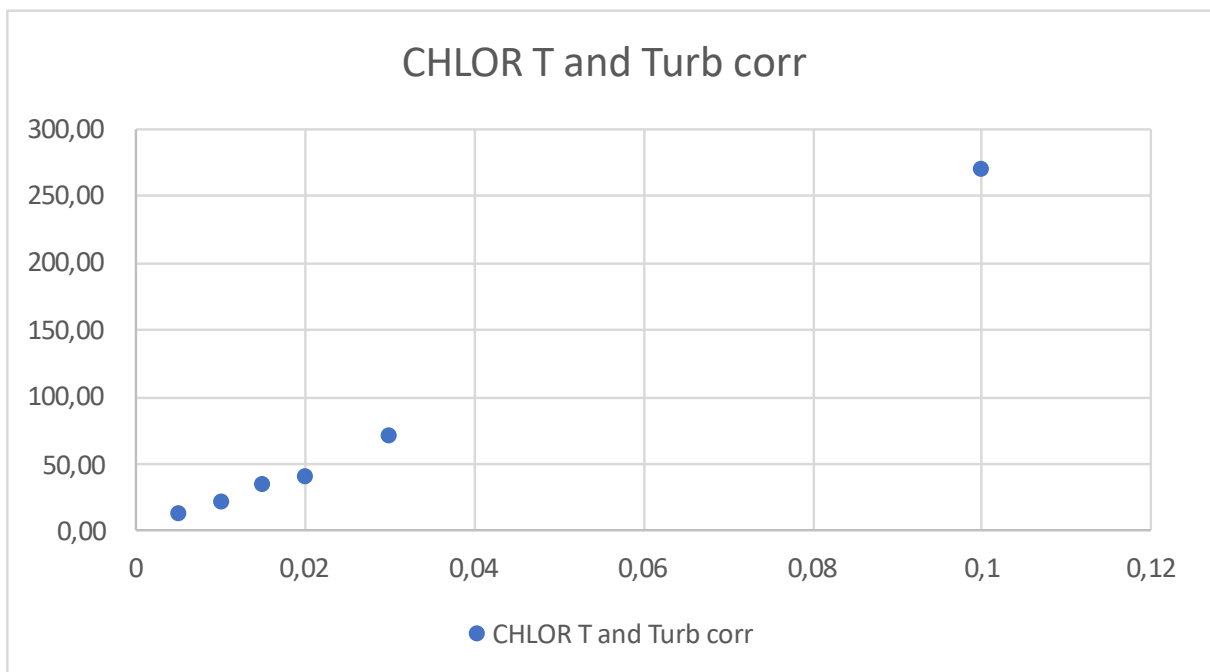


Figur 8 visar profil över phycocyanin i mitten av Stora Ulfjärden.

Appendix 8-Diverse



Figur 1 visar ruttnerhämtaren som användes (Foto: Salomé Coignard).



Figur 2 visar utspädningsförsök med klorofyll där det går att se att även vid höga koncentrationer visar mätningarna linjäritet (Coignard 2021 & Brunel 2021).