

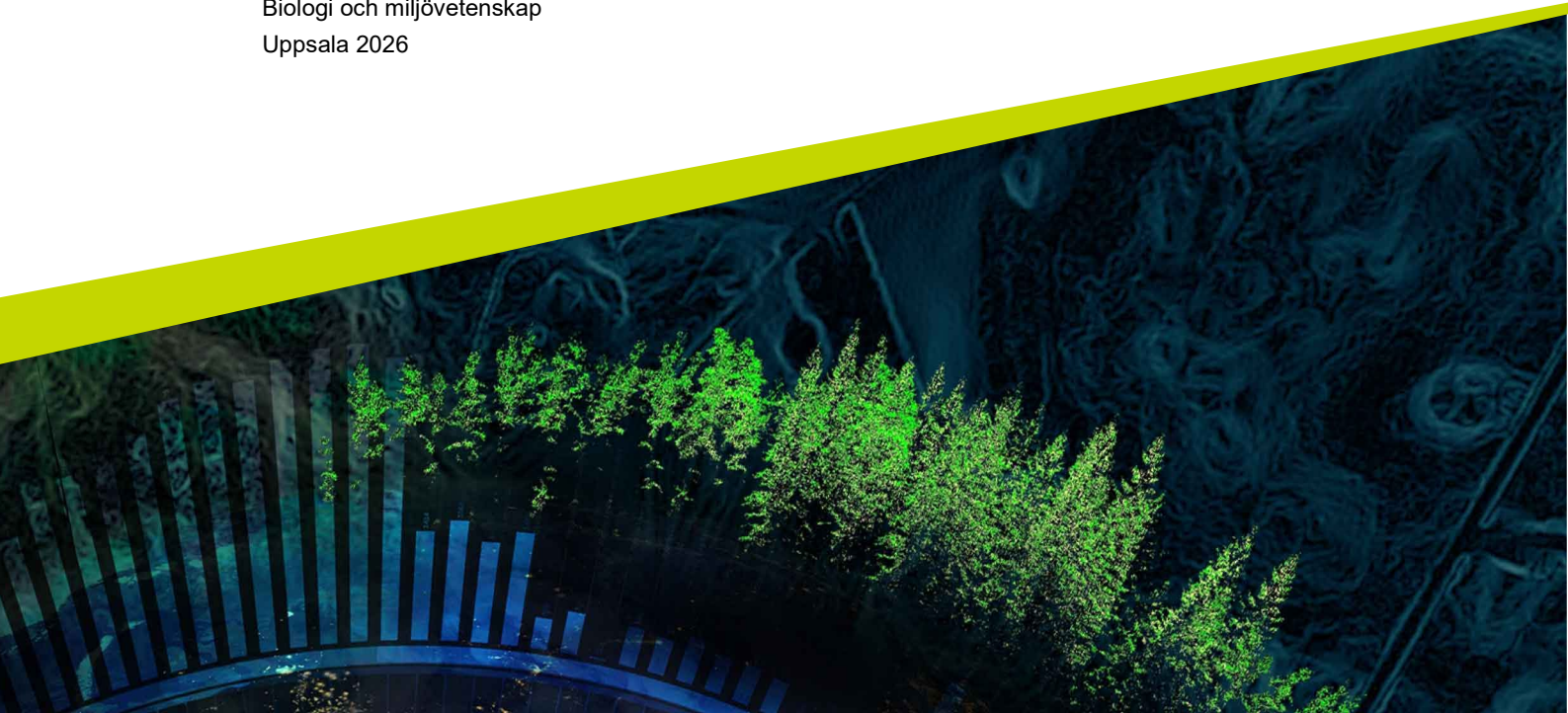


Organiskt kol i markvatten och bäckvatten vid Gårdsjön

Långsiktiga förändringar och samband

Elin Johansson

Examensarbete/Självständigt arbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för vatten och miljö
Biologi och miljövetenskap
Uppsala 2026



Organiskt kol i markvatten och bäckvatten vid Gårdsjön

Långsiktiga förändringar och samband

Elin Johansson

Handledare: Kevin Bishop, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för vatten och miljö

Examinator: Jens Fölster, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för vatten och miljö

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E

Kurstitel: Självständigt arbete i miljövetenskap

Kurskod: EX0896

Program/utbildning: Biologi och miljövetenskap - kandidatprogram

Kursansvarig inst.: Institutionen för vatten och miljö

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2026

Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.

Nyckelord: Brunifiering, löst organiskt kol (DOC), markvatten, bäckvatten, återhämtning från försurning

Sveriges lantbruksuniversitet

NJ-fakulteten

Institutionen för vatten och miljö

Sammanfattning

Sedan 1980-talet har utsläppen av svavel i Europa minskat kraftigt, vilket har bidragit till en gradvis återhämtning från försurning i mark- och ytvatten. Samtidigt har många sjöar och vattendrag blivit brunare till följd av ökade halter av löst organiskt kol (DOC). Sambandet mellan återhämtning från försurning och ökade halter av DOC är dock inte alltid tydligt, särskilt i markvatten.

Syftet med denna studie var att undersöka långsiktiga förändringar i DOC, pH och sulfat i markvatten och bäckvatten från avrinningsområdet F1 i Gårdsjön, samt analysera samband mellan dessa variabler. Studien fokuserade särskilt på hur utvecklingen av DOC i markvattnet förhåller sig till förändringar i bäckvattnet under återhämtningen från försurning.

Data från två lysimeterprofiler (LY1 och LY2) och bäckvatten analyserades för perioden 1996–2023. Tidsserier, Seasonal Kendall-test och sambandsdiagram användes för att undersöka långsiktiga trender och samband mellan DOC, pH och sulfat i olika jorddjup och i bäckvattnet.

Resultaten visade att sulfathalterna generellt minskade över tid i både markvatten och bäckvatten, samtidigt som pH ökade, vilket tyder på en återhämtning från försurning. De tydligaste förändringarna observerades för sulfat där flera trender uppvisade signifikanta minskningar. DOC uppvisade däremot få signifikanta förändringar i markvattnet trots de förändringar som observerades för pH och sulfat. I bäckvattnet observerades däremot en signifikant ökande trend för DOC över tid. Sambandsdiagrammen visade generellt svaga och varierande samband mellan DOC, pH och sulfat, och sambanden skiljde sig mellan olika jorddjup och mellan markvatten och bäckvatten.

Skillnaderna mellan markvatten och bäckvatten visar att utvecklingen av DOC inte kan förklaras av enbart förändringar i sulfat och pH. Studien visar även att sambandet mellan markvatten och bäckvatten är mer komplext än vad som först kunde förväntas. Hydrologiska processer och olika flödesvägar verkar sannolikt ha stor betydelse för transport av DOC i boreala skogslandskap. Studien visar därmed att återhämtning från försurning inte automatiskt leder till ökade halter DOC i markvatten och att sambandet mellan försurning, hydrologi och transport av DOC är komplext.

Nyckelord: brunifiering, löst organiskt kol (DOC), markvatten, bäckvatten, återhämtning från försurning

Abstract

Since the 1980s, sulfur emissions in Europe have decreased substantially, contributing to the recovery of soils and surface waters from acidification. At the same time, many lakes and streams have become increasingly brown due to rising concentrations of dissolved organic carbon (DOC). However, the relationship between recovery from acidification and increasing DOC concentrations is not always clear, particularly in soil water.

The aim of this study was to investigate long-term changes in DOC, pH and sulfate concentrations in soil water and stream water from the F1 catchment in Gårdsjön, Sweden, and to examine relationships among these variables. Special focus was placed on how DOC dynamics in soil water relate to changes observed in stream water during recovery from acidification.

Data from two lysimeter profiles (LY1 and LY2) and stream water were analyzed for the period 1996–2023. Time-series analyses, Seasonal Kendall tests, and correlation diagrams were used to examine long-term trends and relationships between DOC, pH, and sulfate concentrations at different soil depths and in stream water.

The results showed that sulfate concentrations generally decreased over time in both soil water and stream water, while pH increased, indicating recovery from acidification. The clearest trends were observed for sulfate, with several significant decreases over time. In contrast, DOC showed few significant trends in soil water despite the observed changes in sulfate and pH. Stream water, however, exhibited a significant increase in DOC over time. Correlation analyses revealed generally weak and variable relationships between DOC, pH and sulfate, with patterns differing among soil depths and between soil water and stream water.

The differences observed between soil water and stream water indicate that DOC dynamics cannot be explained solely by changes in sulfate concentrations and pH. The study also suggests that the relationship between soil water and stream water is more complex than initially expected. Hydrological processes and flow pathways likely play an important role in controlling DOC transport in boreal forest landscapes. These findings demonstrate that recovery from acidification does not necessarily lead to increased DOC concentrations in soil water and that the relationship between acidification recovery, hydrology and DOC transport is complex.

Keywords: brownification, dissolved organic carbon (DOC), soil water, stream water, recovery from acidification

Innehållsförteckning

| | |
|--|-----------|
| Tabellförteckning | 6 |
| Figurförteckning | 7 |
| Förkortningar | 8 |
| 1. Inledning | 9 |
| 1.1 Bakgrund | 10 |
| 1.1.1 DOC, brunifiering och markens organiska material | 10 |
| 1.1.2 DOC, pH och jonstyrka | 10 |
| 1.1.3 Försurning och återhämtning | 10 |
| 1.1.4 Transport av DOC från markvatten till bäckvatten | 11 |
| 1.1.5 Tidigare forskning | 11 |
| 1.2 Syfte och frågeställningar | 12 |
| 2. Metod | 13 |
| 2.1 Områdesbeskrivning | 13 |
| 2.2 Datainsamling | 14 |
| 2.3 Databearbetning och analys | 15 |
| 2.4 Statistisk analys | 15 |
| 3. Resultat | 16 |
| 3.1 Sammanfattande statistik och trender | 16 |
| 3.2 tidsserier | 18 |
| 3.2.1 pH 18 | |
| 3.2.2 DOC | 20 |
| 3.2.3 Sulfat | 22 |
| 3.1 sambandsdiagram | 24 |
| 3.1.1 DOC och pH | 24 |
| 3.1.2 Sulfat och pH | 26 |
| 3.5.3 Sulfat och DOC | 28 |
| 3.1.3 DOC och SAA | 30 |
| 4. Diskussion | 32 |
| 4.1 Analys av resultatet | 32 |
| 4.2 Begränsningar och förbättringsförslag | 34 |
| 4.3 Slutsats | 34 |
| Referenser | 35 |

Tabellförteckning

| | |
|--|----|
| Tabell 1. Medianvärden, interkvartilintervall (Q1–Q3) och p-värden för pH, DOC och SO_4^{2-} i olika djup för LY1, LY2 och bäckvatten. | 17 |
|--|----|

Figurförteckning

| | |
|--|----|
| Figur 1. Avrinningsområdet F1 i Gårdsjön..... | 13 |
| Figur 2. Tidsserie för pH i olika jorddjup i LY1..... | 19 |
| Figur 3. Tidsserie för pH i olika jorddjup i LY2..... | 19 |
| Figur 4. Tidsserie för pH i bäckvatten..... | 19 |
| Figur 5. Tidsserie för DOC i olika jorddjup i LY1 | 21 |
| Figur 6. Tidsserie för DOC i olika jorddjup i LY2 | 21 |
| Figur 7. Tidsserie för DOC i bäckvatten | 21 |
| Figur 8. Tidsserie för sulfat i olika jorddjup i LY1..... | 23 |
| Figur 9. Tidsserie för sulfat i olika jorddjup i LY2 | 23 |
| Figur 10. Tidsserie för sulfat i bäckvatten mellan 1996 och 2023. | 23 |
| Figur 11. Sambandsdiagram mellan DOC och pH i olika jorddjup för LY1. | 25 |
| Figur 12. Sambandsdiagram mellan DOC och pH i olika jorddjup för LY2. | 25 |
| Figur 13. Sambandsdiagram mellan DOC och pH i bäckvatten..... | 25 |
| Figur 14. Sambandsdiagram mellan sulfat och pH i olika jorddjup för LY1. | 27 |
| Figur 15. Sambandsdiagram mellan sulfat och pH i olika jorddjup för LY2. | 27 |
| Figur 16. Sambandsdiagram mellan sulfat och pH i bäckvatten | 27 |
| Figur 17. Sambandsdiagram mellan sulfat och DOC i olika jorddjup för LY1. | 29 |
| Figur 18. Sambandsdiagram mellan sulfat och DOC i olika jorddjup för LY2 | 29 |
| Figur 19. Sambandsdiagram mellan sulfat och DOC i bäckvatten..... | 29 |
| Figur 20. Sambandsdiagram mellan SAA och DOC i olika jorddjup för LY1. | 31 |
| Figur 21. Sambandsdiagram mellan SAA och DOC i olika jorddjup för LY2 | 31 |
| Figur 22. Sambandsdiagram mellan SAA och DOC i bäckvatten | 31 |

Förkortningar

| Förkortning | Betydelse |
|-------------|--|
| DOC | Löst organiskt kol (Dissolved Organic Carbon) |
| TOC | Totalt organiskt kol (Total Organic Carbon) |
| SAA | Starka syrabildande anjoner (Strong Acid Anions) |
| IM | Integrerad miljöövervakning |
| LY1 | Lysimeterprofil 1 |
| LY2 | Lysimeterprofil 2 |

1. Inledning

Under 1900-talet påverkades många svenska sjöar och vattendrag av försurning orsakad av atmosfäriskt nedfall av svavel från främst fossila bränslen. När svaveldioxid i atmosfären reagerar med vatten bildas svavelsyra som kan sänka pH-värdet i mark och vatten.

Svavelutsläppen minskade kraftigt i Sverige och Europa efter 1980-talet. Denna minskning beror på flera faktorer. De mest betydande faktorerna är övergången till bränslen med lägre svavelinnehåll samt effektivare rening. Trots denna minskning av svavelutsläppen efter 1980-talet så finns det faktorer som fortfarande bidrar med ökad försurningseffekt. Försurningen från skogsbruk har ökat i Sverige under 2000-talet, då uttaget av skogsråvaror ökat och bortförseln av grenar och toppar (GROT) bidrar med ökad försurningseffekt (Löfgren et al. 2017).

I samband med återhämtningen från försurning har även andra förändringar observerats i vattenkemin. I många boreala områden i Sverige har koncentrationen av löst organiskt kol (DOC) ökat över tid. DOC består av organiska kolhaltiga ämnen som är upplösta i vatten och kommer främst från nedbrytning av växter, löv, barr, rötter och torv i marken. Dessa organiska ämnen lakas ut och transporteras vidare till ytvatten när regn och smältvatten rinner genom marken. I Sverige finns stora mängder organiskt material lagrat främst i boreala områden som våtmarker, torvmarker och barrskogar. DOC kan ge vatten en brunaktig färg, då det består av humusämnen som ger vattnet dess mörkare färg. Detta fenomen kallas brunifiering (Kritzberg et al. 2020).

Brunifiering av sjöar och vattendrag är ett stort problem då det bland annat påverkar akvatiska näringsvävans strukturer, näringsstillgänglighet och pH. Ökade halter organiskt material kan även mobilisera föroreningar och bidra till ökade utsläpp av växthusgaser från akvatiska miljöer och brunifieringen påverkar därför både kemiska och biologiska processer i vattenekosystem (Eklöf et al. 2021).

När vattnet blir brunare ändras ljusförhållanden i sjöar och vattendrag och mindre ljus kan tränga ner i vattnet eftersom det lösta organiska materialet kan absorbera ljus och göra vattnet mörkare, vilket leder till att primärproduktionen hos växtplankton och vattenväxter minskar. Brunifiering kan även leda till att viktiga näringsämnen som kväve och fosfor begränsas vilket gör det svårare för organismer att överleva. (Eklöf et al. 2021).

En ökad mängd DOC och brunifiering kan även påverka människor genom dricksvattenkvalitén. Då brunare vatten innehåller mer organiskt material blir vattenreningen svårare och detta ökar kostnaderna för dricksvattenproduktionen (Evans et al. 2024). Det finns därför ett stort intresse av att förstå de processer som styr transporten av DOC i landskapet och vilka faktorer som ligger bakom den observerade brunifieringen.

1.1 Bakgrund

1.1.1 DOC, brunifiering och markens organiska material

Markens organiska material utgör ett stort förråd av näringsämnen och har stor betydelse för markens kemiska, fysikaliska och biologiska processer. Det organiska materialet finns lagrat i form av förna, humus och torv och finns i stora mängder i boreala skogsmarker. Organiskt material i marken spelar även en viktig roll för markens vattenhållande förmåga och transport av ämnen i markvatten (Eriksson et al. 2011).

När växtmaterial bryts ned av mikroorganismer bildas organiska ämnen som kan lösas ut i markvattnet och sedan kan detta transporteras vidare till bäckar och sjöar. De abiotiska faktorerna som styr nedbrytningen är temperatur, markfuktighet och tillgång på organiskt material (Eriksson et al. 2011). I boreala skogsekosystem utgör organiska jordlager nära vattendrag viktiga källor för DOC till ytvatten och transporten sker främst via markvattenflöden och hydrologiska processer. Koncentrationen av DOC är ofta högre i ytliga organiska jordlager där innehållet av organiskt material är stort, medan lägre koncentrationer vanligtvis observeras i djupare mineraljordar. Transporten av DOC från mark till ytvatten är därför en viktig process bakom brunifiering i boreala skogslandskap (Fork et al. 2020).

1.1.2 DOC, pH och jonstyrka

Nedbrytningen av markens organiska material sker långsamt vilket gör att det kan lagras länge i marken. Det innehåller olika funktionella grupper, främst karboxylgrupper och hydroxylgrupper som ger marken dess kemiska egenskaper. Dessa grupper påverkas av markens pH. När marken har högre pH-värden kan dessa karboxylgrupper avge vätejoner och få en negativ laddning. Denna omvandling innebär att det organiska materialet kan fungera som en katjonbytare och binda positivt laddade joner i marken. Det organiska materialet bidrar därför både till reglering av markens pH och till markens katjonbyteskapacitet. Detta har också stor betydelse för lösligheten och transporten av ämnen i marken, då de organiska molekylerna stöter bort varandra och lättare hålls lösta i markvattnet som DOC (Eriksson et al. 2011). Organiskt material har även en viktig roll för markens fysikaliska egenskaper då organiskt material har en hög vattenhållande förmåga och på så sätt påverkar markens aggregatstruktur, genomluftning samt porositet. Detta påverkar i sin tur vattenrörelser och transport av lösta ämnen genom markprofilen (Eriksson et al. 2011).

Lösligheten hos det organiska materialet styrs av kemiska laddningar och jonstyrkan i markvattnet. Organiska molekylers löslighet påverkas av mängden joner i lösningen. Vid större koncentrationer av sulfat, neutraliseras laddningarna runt organiska molekyler lättare. Detta gör att dem kan koagulera och bindas till markpartiklar i stället för att hållas lösta i vatten. När jonstyrkan minskar blir de organiska molekylerna mer lösliga och mer DOC kan transporteras ut i markvatten och vidare till sjöar och vattendrag (Monteith et al. 2007).

1.1.3 Försurning och återhämtning

Återhämtningen från försurning har lett till flera förändringar i mark-och vattenkemin i boreala ekosystem. När försurningen minskar förändras både pH och jonstyrka i markvattnet,

vilket kan påverka laddningen hos organiskt material och påverka dess löslighet (Löfgren et al. 2010).

Under försurningsperioden var depositionen av svavel hög vilket ledde till höga sulfathalter och lågt pH i mark och ytvatten. Den höga surheten bidrog till att organiskt material i marken blev mindre lösligt och därmed hölls kvar i humuslagret i stället för att transporteras vidare till ytvatten. När svaveldepositionen sedan minskade och markvattnet blev mindre surt förändrades dessa kemiska förhållanden. Den minskade surheten och jonstyrkan ökade lösligheten hos organiskt material, vilket möjliggjorde en större transport av DOC från marken till sjöar och vattendrag. Detta har kopplats till den ökade brunifiering som observerats i många boreala vatten under de senaste decennierna (Evans et al. 2024)

1.1.4 Transport av DOC från markvattnet till bäckvattnet

DOC rör sig från mark till bäckvattnet i boreala landskap. Detta styrs av samspelet mellan organiska jordar, hydrologiska flöden och landskapets uppbyggnad. Jordar nära vattendrag, så kallade bäcknära jordar (riparian soils), lagrar stora mängder organiskt material. I dessa jordar har vattenflöden stor kontakt med markens organiska lager och dessa jordar är därför den viktigaste källan till DOC i boreala skogslandskap. Transporten av DOC i dessa jordar beror på grunda markvattenflöden som rör sig genom de organiska jordlagren mot bäckarna (Fork et al. 2020).

Vattenflöden i boreala skogsavrinningsområden koncentreras ofta till ytliga och hydrologiskt aktiva jordlager nära bäckarna, särskilt under perioder med hög avrinning. Olika flödesvägar kan därför bidra med vatten av olika kemisk sammansättning till bäckvattnet beroende på vilka delar av landskapet som är hydrologiskt aktiva (Nyberg et al. 1993).

Transporten av DOC i landskapet är även starkt kopplat till hydrologi och olika årstider. När vattenflöden och avrinning ökar, exempelvis under snösmältning eller perioder med mycket nederbörd aktiveras ytliga marklager med höga DOC-koncentrationer. Större mängder organiskt material kan därför under dessa perioder transporteras till bäckarna. (Fork et al. 2020). Mängden DOC som transporteras till ytvatten påverkas dock inte enbart av hydrologiska förhållanden och försurning. Även mängden organiskt material i marken kan påverka produktionen och transporten av DOC till vattendrag (Löfgren et al. 2010).

1.1.5 Tidigare forskning

Flera studier inom detta område har gjorts genom åren med varierande resultat. Studierna visar generellt på återhämtning från försurning med högre pH, minskade sulfathalter och lägre jonstyrka vilket tyder på att mark och vatten successivt återhämtat sig från försurning. Det som dock förvånade i en tidigare studie var att DOC inte ökade tydligt utan i stället minskade i flera lysimetrar eller inte visade någon tydlig förändring alls. Förklaringen som studien kom fram till var att pH inte är det enda som styr DOC utan att även jonstyrka och laddningar i markvattnet påverkar lösligheten av DOC mycket. Högre pH gör vanligtvis humusämnen mer negativt laddade och därmed mer lösliga vilket kan ge högre halter av DOC. Samtidigt kan en lägre jonstyrka bidra till att DOC blir mindre lösligt vilket gör att processerna kan motverka varandra. En av slutsatserna i studien var därför att minskad försurning inte automatiskt leder till högre halter av DOC i markvattnet (Löfgren et al. 2010).

Studien undersökte även sambandet mellan markvatten och bäckvatten och resultaten visade att markvattnet och bäckvattnet inte alltid följde samma utveckling över tid. Markvattnet kunde uppvisa minskande eller relativt stabila halter av DOC samtidigt som bäckvattnet blev brunare. Det visade sig att vattnet som når bäcken främst kommer från blöta jordar nära bäcken, organiska marker och bäcknära zoner (riparian zones) snarare än från torrare podsoljordar högre upp i skogen där vissa lysimetrar var placerade (Löfgren et al. 2010).

Sambandet mellan bäckvatten och hydrologiskt aktiva jordar har även undersökts i andra studier där resultaten visat att blöta och organiska jordar nära vattendrag har stor betydelse för transporten av DOC till ytvatten (Fork et al. 2020). Tidigare hydrologiska studier från området runt Gårdsjön har även visat att vattenflöden ofta koncentreras till ytliga och hydrologiskt aktiva zoner nära bäckarna, särskilt under perioder med hög avrinning. Studierna visade även att olika flödesvägar kan bidra med vatten av olika kemisk sammansättning till bäckarna (Nyberg et al. 1993).

Ett tidigare kandidatarbete vid Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) undersökte långsiktiga förändringar av organiskt kol i svenskt markvatten med hjälp av data från Krondroppsnätet och IM-områden över en cirka 30 år lång tidsperiod. Resultaten visade att pH ökade samtidigt som sulfathalterna minskade vilket tyder på återhämtning från försurning. Trots detta visade halterna av totalt organiskt kol (TOC) ingen konstant ökande trend över tid. Höga koncentrationer av TOC observerades före år 2000 medan en minskning av TOC observerades under tidsperioden 2000–2010. Efter år 2010 observerades återigen en ökning. Hypotesen för studien var att högre pH leder till ökad löslighet av organiskt material, men resultaten visade att sambandet mellan pH och TOC varierade beroende på jorddjup och jordmån och att sambanden i vissa fall i stället var negativa. Slutsatsen för studien var därför att utvecklingen av organiskt kol i markvatten påverkas av flera samverkande faktorer och att sambanden mellan återhämtning från försurning och brunifiering är komplexa (Eliasson, 2024).

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna studie är att undersöka sambandet mellan DOC, pH och sulfat i markvatten och bäckvatten vid Gårdsjön F1 och analysera hur dessa samband varierar mellan olika jorddjup, samt mellan två olika lysimeterprofiler och bäckvatten. Studien fokuserar särskilt på hur utvecklingen av DOC i markvattnet förhåller sig till förändringar i bäckvattnet i samband med återhämtning från försurning. Gårdsjön är ett av Sveriges fyra områden inom integrerad miljöövervakning och har under lång tid varit påverkat av surt nedfall, vilket har resulterat i stora förändringar i sulfathalter under den period som övervakningen pågått.

För att undersöka detta analyseras tidsserier och sambandsdiagram för DOC, pH och sulfat i olika jorddjup samt i bäckvatten.

Studien utgår från följande frågeställningar: hur DOC, pH och sulfat varierar mellan olika jorddjup, vilka samband som finns mellan variablerna samt om utvecklingen skiljer sig mellan markvatten och bäckvatten.

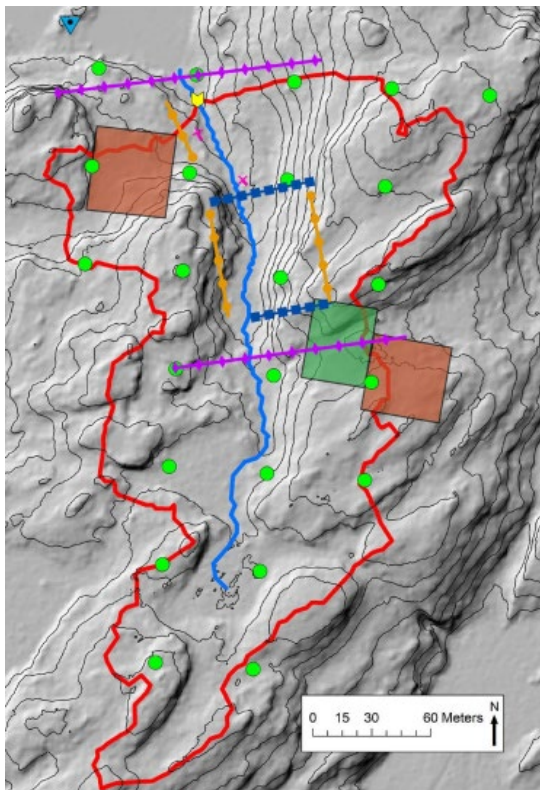
2. Metod

I denna studie analyserades långsiktiga förändringar i markvatten och bäckvatten från avrinningsområdet F1 i Gårdsjön. Fokus låg på att undersöka utvecklingen av DOC, pH och sulfathalter över tid samt samband mellan dessa parametrar i olika jorddjup och i bäckvattnet. Data bearbetades och analyserades med hjälp av statistiska och grafiska metoder för att identifiera långsiktiga trender och samband mellan variablerna.

2.1 Områdesbeskrivning

Området för studien är Gårdsjön som är belägen i Bohuslän på Sveriges Västkust. Området ingår i Naturvårdsverkets program för integrerad miljöövervakning (IM), som syftar till att långsiktigt följa miljötillstånd för förändringar i svenska skogsekosystem genom studier av bland annat hydrologi, markprocesser och vattenkemi. Integrerad miljöövervakning används för att öka förståelsen för effekter av försurning, atmosfärisk deposition och andra miljöförändringar. Gårdsjön är ett av fyra svenska IM-områden och har undersökts under lång tid (Weldon et al. 2024).

Området har under lång tid varit påverkat av surt nedfall av framför allt svavel och kväve och används därför som ett viktigt forskningsområde för att studera försurning och återhämtning i boreala skogslandskap (Olsson & Andersson, 1985). I denna studie har både markvatten och bäckvatten analyserats från avrinningsområdet F1 (figur 1), som är ett litet skogligt avrinningsområde med en yta på cirka 3,7 ha (Weldon et al. 2024).



Figur 1. Avrinningsområdet F1 i Gårdsjön med placering av provtagningspunkter och hydrologisk instrumentering inom området. Den röda linjen visar avrinningsområdets gräns och den blå linjen visar bäcksystemet. Rosa kryss markerar markvattenprovtagning. Källa: Weldon et al. 2024.

Studieområdet domineras av tunna moräntäckan på 0–0,7m och dessa har en hög frekvens av sten och block. Områdets berggrund består av yngre gnejsiga granodioriter. Jordarna är huvudsakligen podsolerade och naturligt sura, vilket är typiskt för boreala skogsmarker i området (Olsson & Andersson, 1985; Weldon et al. 2024). Podsoljordar är vanliga i barrskogsområden och bildas främst i grovkorniga och näringsfattiga jordar med mycket nederbörd. Podsoljordar kännetecknas av urlakning från de övre jordlagren vilket ofta leder till lågt pH och begränsad buffringsförmåga mot försurning (Eriksson et al. 2011).

Området innehåller både torrare moränjordar och blötare organiska jordar nära bäckarna och våtmarkerna. De blöta och vattenmättade områdena nära bäckarna fungerar som hydrologiskt aktiva zoner där grundvatten och markvatten transporteras vidare mot bäckarna (Olsson & Andersson, 1985). Tidigare hydrologiska studier från Gårdsjön, genomförda i ett närliggande avrinningsområde, har visat att vattenflöden ofta koncentreras till ytliga jordlager nära bäckarna där stora delar av transporten till ytvatten sker (Bishop et al. 2011).

Skogsmarken består av främst tall och gran och har varit skogsklädd under lång tid men har påverkats av tidigare avverkning och gallring. Delar av området har återplanterats med tall efter avverkning (Weldon et al. 2024).

Gårdsjön har en årsmedeltemperatur på cirka 6,7°C och en årlig nederbörd på omkring 1000 mm. Den årliga avrinningen har uppmätts till cirka 520 mm (Weldon et al. 2024). Tidigare hydrologiska studier från området har visat att de tunna jordarna och den höga nederbörden gör att grundvattennivån ofta ligger nära markytan, vilket bidrar till snabb transport av vatten genom marken och vidare till bäckarna. En stor del av vattenflödet i bäckarna består av grundvatten och vatten som passerat genom marken snarare än ytavrinning direkt från nederbörd (Olsson & Andersson, 1985).

2.2 Datainsamling

I denna studie användes både mark- och bäckvattendata från området Gårdsjön F1. Markvattendata tillhandahölls av handledaren medan bäckvattendata hämtades från Miljödata-MVM vid SLU (Miljödata-MVM, u.å.)

Markvatten samlades in från två lysimeterprofiler (LY1 och LY2) med lysimetrar installerade på djupen 5, 10, 20, 40, 70 cm samt 5S. 5S utgjorde ett omblandat samlingsprov från djupen 5 och 10 cm. LY1 var placerad i ett torrare område längre bort från bäcken medan LY2 var placerad i ett blötare område i direkt anslutning till bäcken (Filip Moldan, personlig kommunikation). Bäckvattendatan hämtades från avrinningsområdets utlopp.

De parametrar som analyserades i studien inkluderade DOC, pH och sulfathalter. Dataserierna omfattade tidsserier från år 1996 fram till och med år 2023. Utrustningen för insamlingen av markvattendata havererade år 2024 och därför saknades data för markvatten under år 2024 och 2025. Samma tidsperiod valdes därför för både markvatten och bäckvatten för att få jämförbara data. Antalet mätvärden varierade mellan olika parametrar och jorddjup beroende på tillgången på vattenprov och förekomst av saknade värden i dataserierna.

2.3 Databearbetning och analys

Data bearbetades och analyserades i Microsoft Excel där tabeller, tidsseriegrafer och sambandsdiagram skapades. Sulfathalterna rapporterades ursprungligen som SO₄-S (mg/L), vilket innebär sulfat uttryckt som svavel. Värdena omvandlades därför till sulfathalter (SO₄²⁻) före vidare beräkningar och analyser. För att möjliggöra jämförelser mellan olika joner omvandlades utvalda koncentrationer från mg/L till mekv/L (ekvation 1).

Ekvation 1.

$$\text{mekv/l} = \frac{\frac{\text{mg}}{\text{l}} \times \text{jonens valens}}{\text{molmassa}}$$

Strong acid anions (SAA) beräknades som summan av sulfater, nitrat och klorid uttryckt i mekv/L enligt ekvation 2.

Ekvation 2.

$$\text{SAA} = \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$$

Medianvärden och interkvartilintervall (Q1-Q3) beräknades för samtliga parametrar och jorddjup för att beskriva variationen i data och minska påverkan från extrema värden. För att undersöka variationer mellan markvatten och bäckvatten samt mellan olika jorddjup skapades tidsserier för samtliga parametrar. Samband mellan kemiska variabler analyserades med hjälp av scatterplots och linjära trendlinjer.

2.4 Statistisk analys

Seasonal Kendall-Test användes för att undersöka om tidsserierna visade statistiskt signifikanta trender över tid. Metoden är en icke-parametrisk vidareutveckling av Mann-Kendall-testet som tar hänsyn till säsongsvariation i data och är därför lämplig för miljödata då den inte kräver att data är normalfördelad.

Signifikansnivån sattes till 0,05 och p-värden användes för att bedöma om trenderna var signifikanta. Positiva trender tolkades som ökande värden över tid medan negativa trender tolkades som minskande värden över tid.

3. Resultat

3.1 Sammanfattande statistik och trender

pH ökade generellt med djupet i både LY1 och LY2 och flera av värdena uppvisade signifikanta ökande trender över tid (tabell 1). LY2 hade generellt något högre pH-värden nära markytan jämfört med LY1, medan bäckvatten uppvisade relativt lågt pH. Koncentrationen av DOC var högst nära markytan och minskade med djupet, detta samband var extra tydligt i LY1. DOC uppvisade större variation jämfört med övriga variabler och endast få signifikanta tidsmässiga förändringar observerades. Sulfathalten visade främst minskande trender över tid, särskilt mellan djupen 20 och 70cm där flera trender var signifikanta. Sulfathalterna i bäckvattnet var betydligt lägre än i markvattnet och uppvisade en signifikant trend över tid.

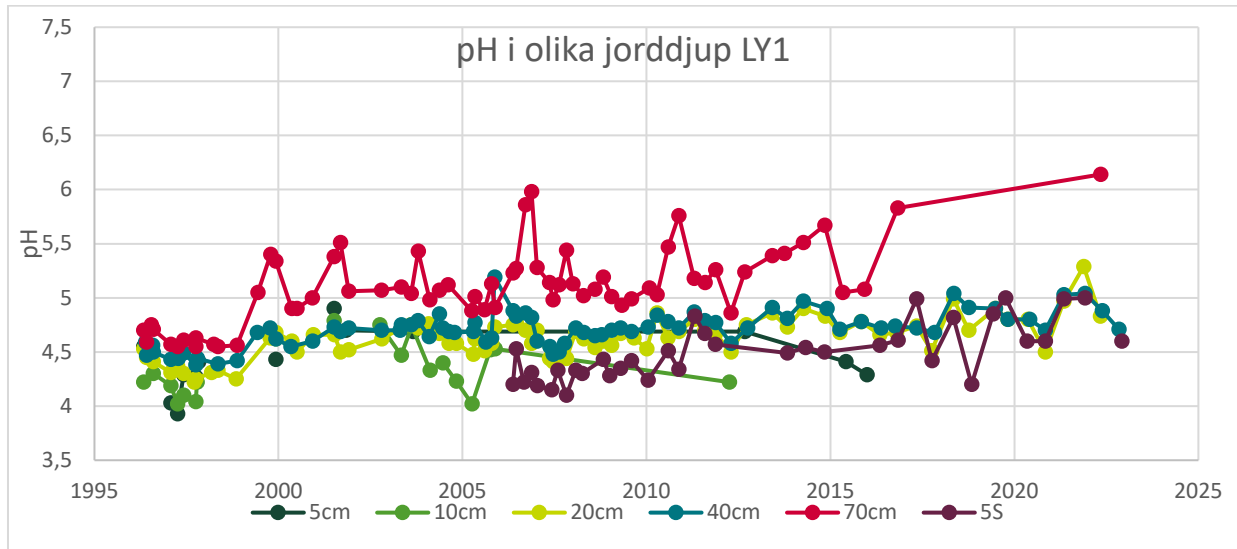
Tabell 1. Medianvärden, interkvartilintervall (Q1–Q3) och p-värden för pH, DOC och Sulfat i olika djup för LY1, LY2 och bäckvatten. Gröna markeringar visar signifikant ökande trender, röda markeringar visar signifikant minskande trender och grå markeringar visar icke signifikanta trender.

| Lysimeter | Djup | pH | | | DOC (mg/l) | | | Sulfat (mg/l) | | |
|------------|----------|------------------------|---------------------|-------------|--------------------|----------------------------|-------------|------------------------|--------------------------|-------------|
| | | Antal mätvärde n | Median (Q1–Q3) | p- värde | Antal mätvärden | Median (Q1–Q3) | p- värde | Antal mätvärde n | Median (Q1–Q3) | p- värde |
| LY1 | 5 cm | 13 | 4,41 (4,29–4,52) | 0,02 | 5 | 36,40 (25,84– 37,00) | 0,6 | 12 | 8,81 (6,37– 10,07) | 0,01 |
| LY1 | 10 cm | 19 | 4,30 (4,21–4,53) | 0,4 | 6 | 15,54 (10,97– 22,65) | 0,6 | 19 | 8,94 (6,56– 11,30) | 0,1 |
| LY1 | 20 cm | 78 | 4,65 (4,51–4,73) | <0,001 | 63 | 12,34 (10,22– 14,38) | 0,5 | 78 | 5,45 (4,18– 7,61) | <0,00 1 |
| LY1 | 40 cm | 81 | 4,72 (4,62–4,80) | <0,001 | 68 | 7,99 (7,25–8,64) | 0,8 | 81 | 6,46 (5,24– 8,64) | <0,00 1 |
| LY1 | 70 cm | 66 | 5,08 (4,90–5,28) | <0,001 | 49 | 4,58 (3,90–5,10) | 0,8 | 67 | 8,63 (6,73– 11,15) | <0,00 1 |
| LY1 | 5S | 38 | 4,83 (4,67–5,03) | <0,001 | 22 | 4,72 (3,60–8,36) | 0,3 | 37 | 2,46 (1,47– 3,33) | 0,07 |
| LY2 | 5 cm | 25 | 4,73 (4,63–4,87) | 1 | 11 | 7,24 (3,83–8,69) | 0,3 | 19 | 9,27 (6,24– 11,07) | 0,05 |
| LY2 | 10 cm | 23 | 4,73 (4,54–4,83) | 0,6 | 8 | 9,00 (6,16– 11,88) | 0,9 | 21 | 9,30 (7,89– 10,32) | 0,6 |
| LY2 | 20 cm | 74 | 4,86 (4,70–5,06) | 0,001 | 63 | 3,80 (3,50–4,50) | 0,3 | 75 | 5,45 (4,17– 7,39) | <0,00 1 |
| LY2 | 40 cm | 76 | 4,80 (4,70–5,05) | 0,001 | 64 | 6,20 (4,60–7,40) | 0,9 | 76 | 6,46 (5,25– 8,52) | <0,00 1 |
| LY2 | 70 cm | 76 | 4,95 (4,82–5,06) | 0,002 | 66 | 3,52 (3,10–4,70) | 0,1 | 77 | 7,40 (5,87– 9,90) | <0,00 1 |
| LY2 | 5S | 44 | 5,03 (4,80–5,41) | 0,005 | 40 | 10,78 (6,81– 16,57) | 0,2 | 38 | 3,25 (1,54– 7,17) | 0,5 |
| Bäckvatten | 20cm | 468 | 4,34 (4,26–4,26) | <0,001 | 466 | 13,00 (10,00– 16,04) | <0,001 | 467 | 1,58 (-) | <0,00 1 |

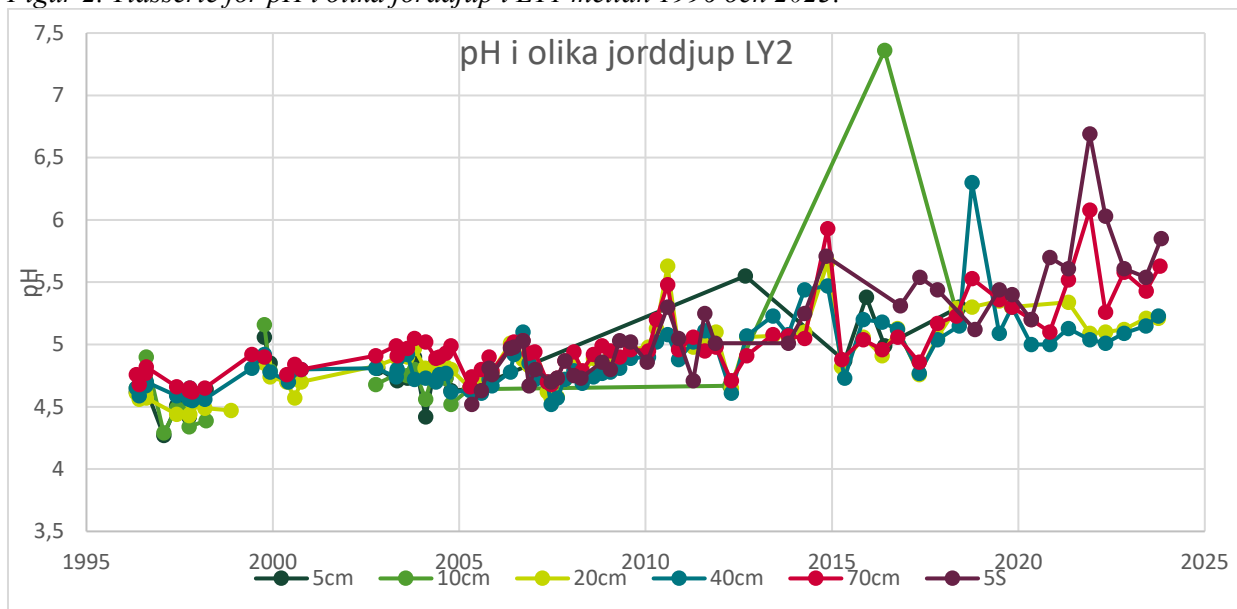
3.2 Tidsserier

3.2.1 pH

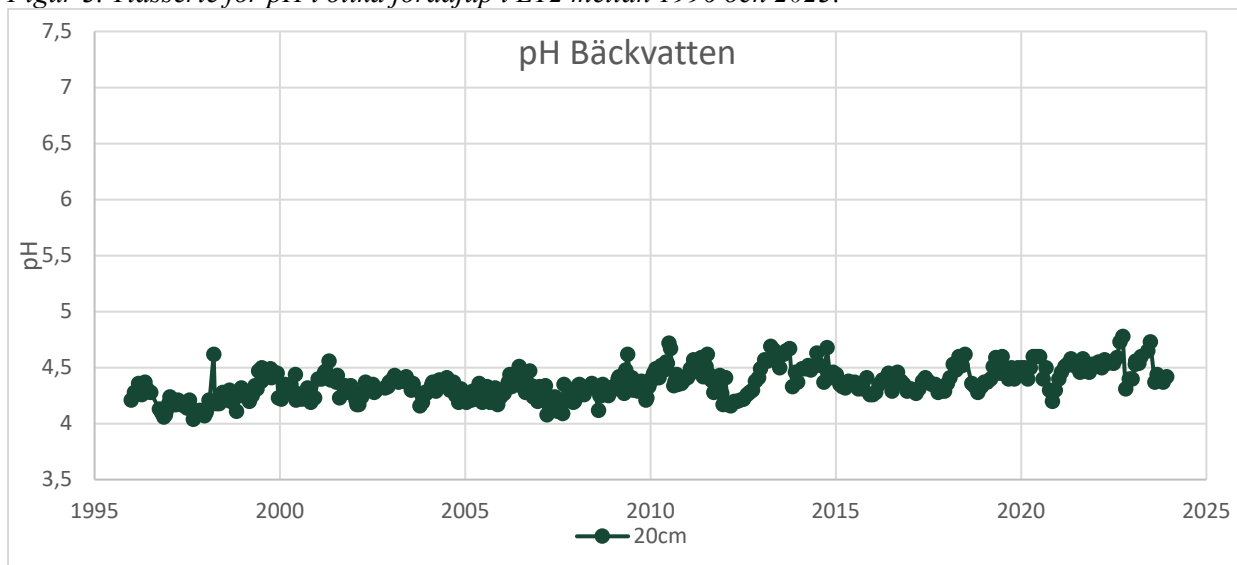
pH ökade generellt över tid i både LY1 och LY2 för markvatten, samt i bäckvattnet. I LY1 var ökningen tydligast vid större djup där 70 cm uppvisade de högsta pH-värdena över tiden (figur 2). LY2 uppvisade större variation mellan mätningarna och flera tillfälliga höga pH-värden observerades under senare år (figur 3). Även bäckvattnet visade en svagt ökande men relativt stabil trend över tid (figur 4).



Figur 2. Tidsserie för pH i olika jorddjup i LY1 mellan 1996 och 2023.



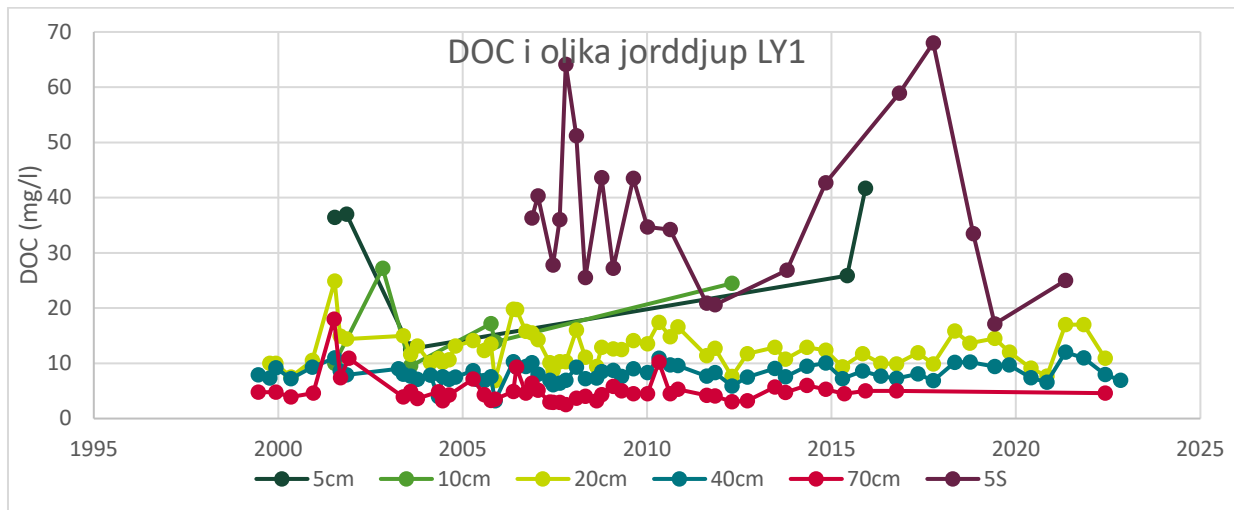
Figur 3. Tidsserie för pH i olika jorddjup i LY2 mellan 1996 och 2023.



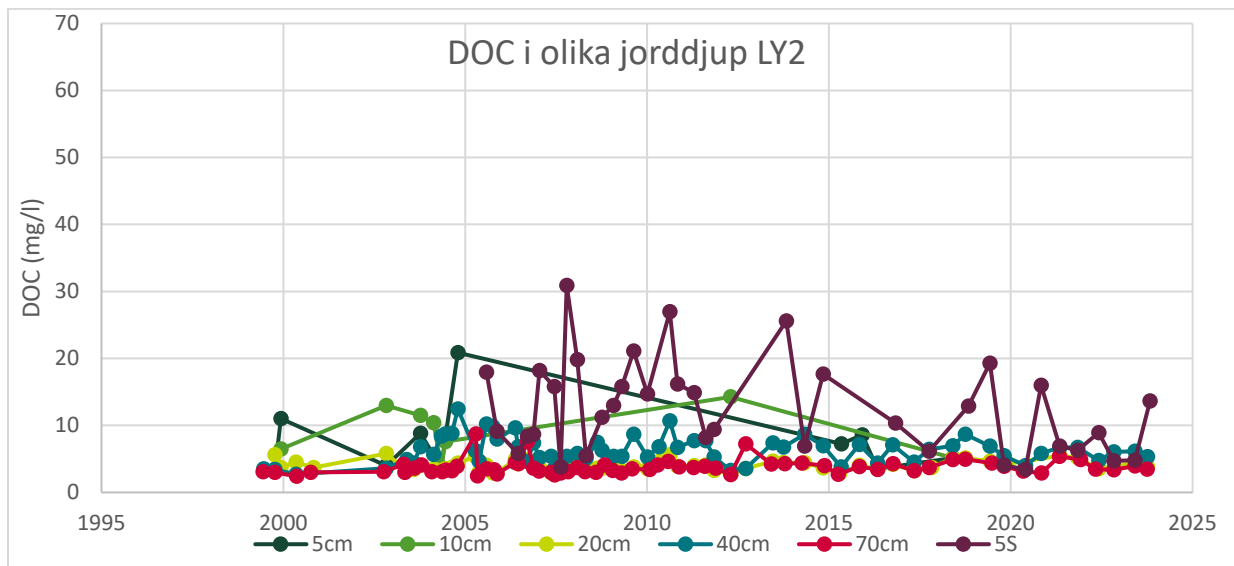
Figur 4. Tidsserie för pH i bäckvatten mellan 1996 och 2023.

3.2.2 DOC

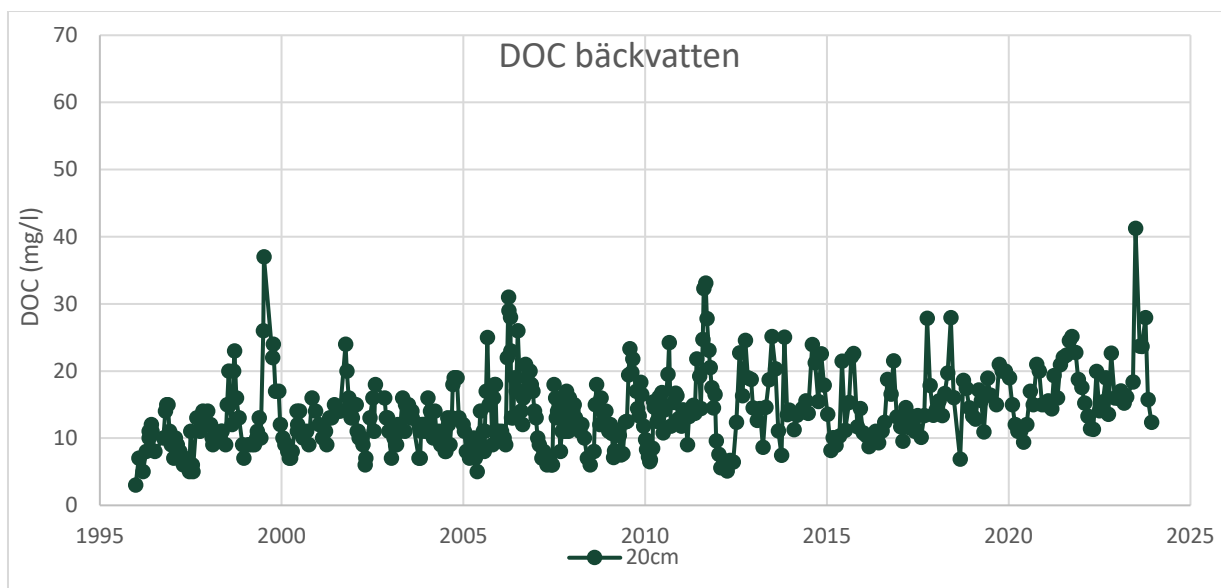
DOC uppvisade större variation över tid i både LY1 och LY2 samt i bäckvattnet. I markvattnet observerades generellt högre koncentrationer av DOC i de ytliga djupen medan koncentrationen minskade med djupet (figur 5 och 6). LY1 uppvisade generellt högre och mer varierande halter av DOC jämfört med LY2. Bäckvattnet uppvisade relativt stabila halter av DOC över tid men med vissa enskilda högre värden under senare år (figur 7).



Figur 5. Tidsserie för DOC i olika jorddjup i LY1 mellan 1996 och 2023.



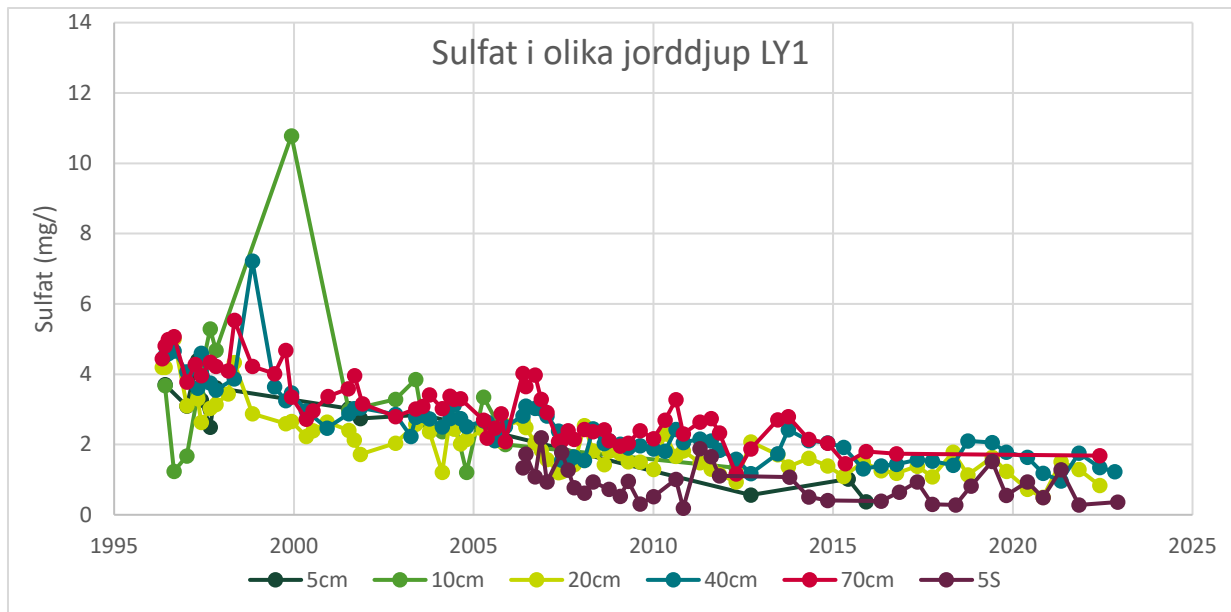
Figur 6. Tidsserie för DOC i olika jorddjup i LY2 mellan 1996 och 2023.



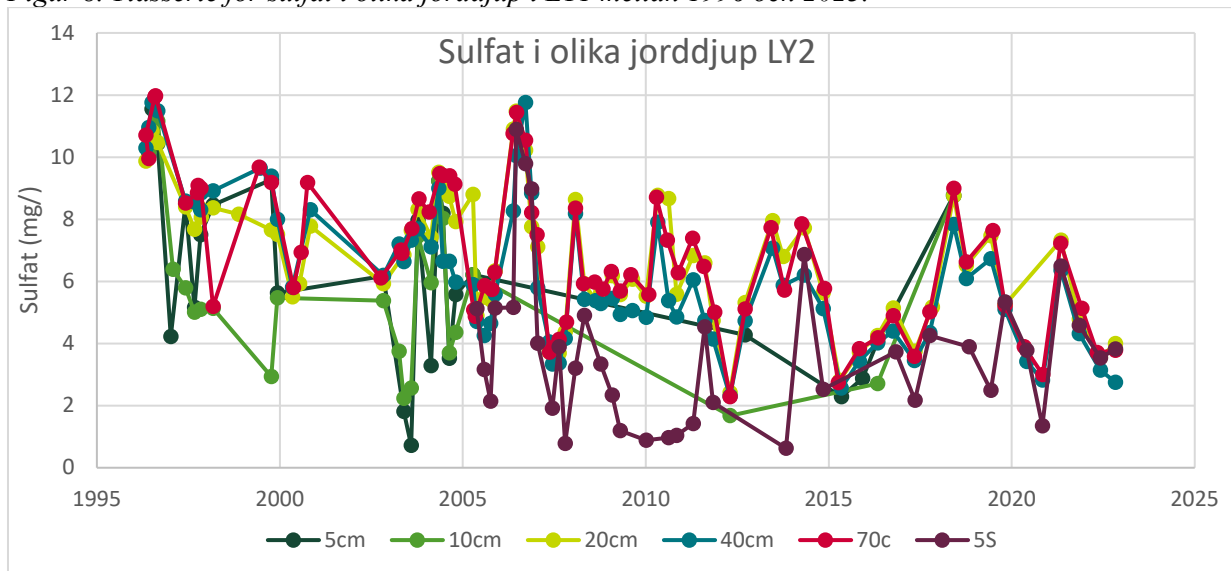
Figur 7. Tidsserie för DOC i bäckvatten mellan 1996 och 2023.

3.2.3 Sulfat

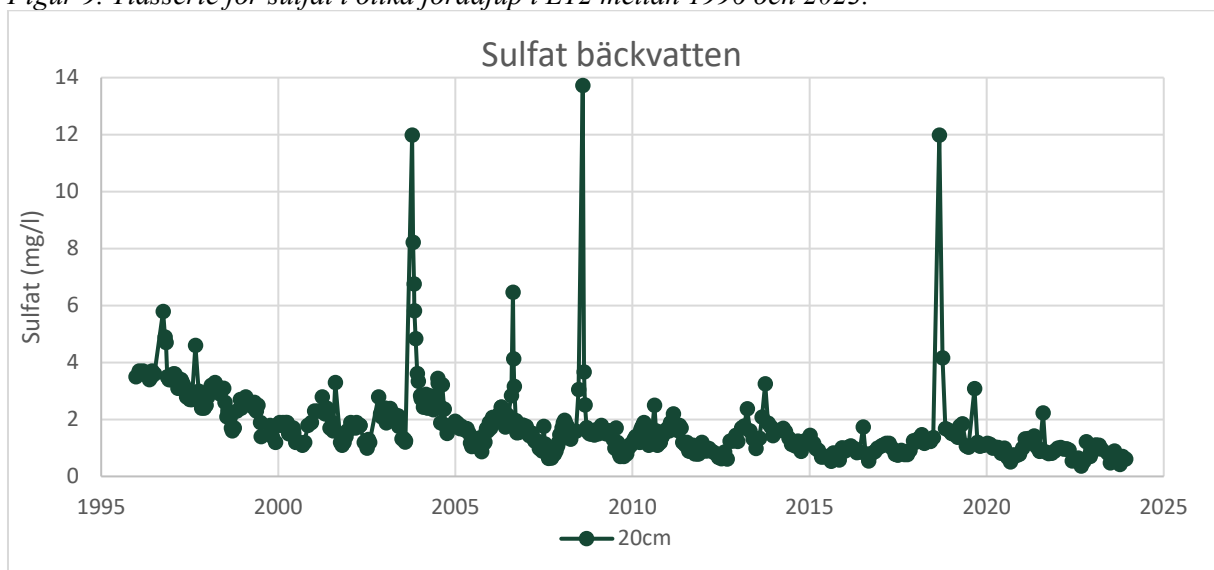
Sulfathalterna uppvisade generellt minskande trender i både LY1 och LY2 för markvatten, samt i bäckvattnet. I LY1 var minskningen tydligast efter början av 2000-talet där samtliga jorddjup successivt uppvisade lägre sulfathalter över tid (figur 8). LY2 uppvisade större variation mellan mätningarna och flera tillfälliga höga sulfathalter observerades under mätperioden, men även här kunde en övergripande minskande trend observeras (figur 9). Sulfathalterna i bäckvattnet minskade successivt över tid och de högsta värdena observerades främst under den tidigare delen av tidsserien (figur 10).



Figur 8. Tidsserie för sulfat i olika jorddjup i LY1 mellan 1996 och 2023.



Figur 9. Tidsserie för sulfat i olika jorddjup i LY2 mellan 1996 och 2023.



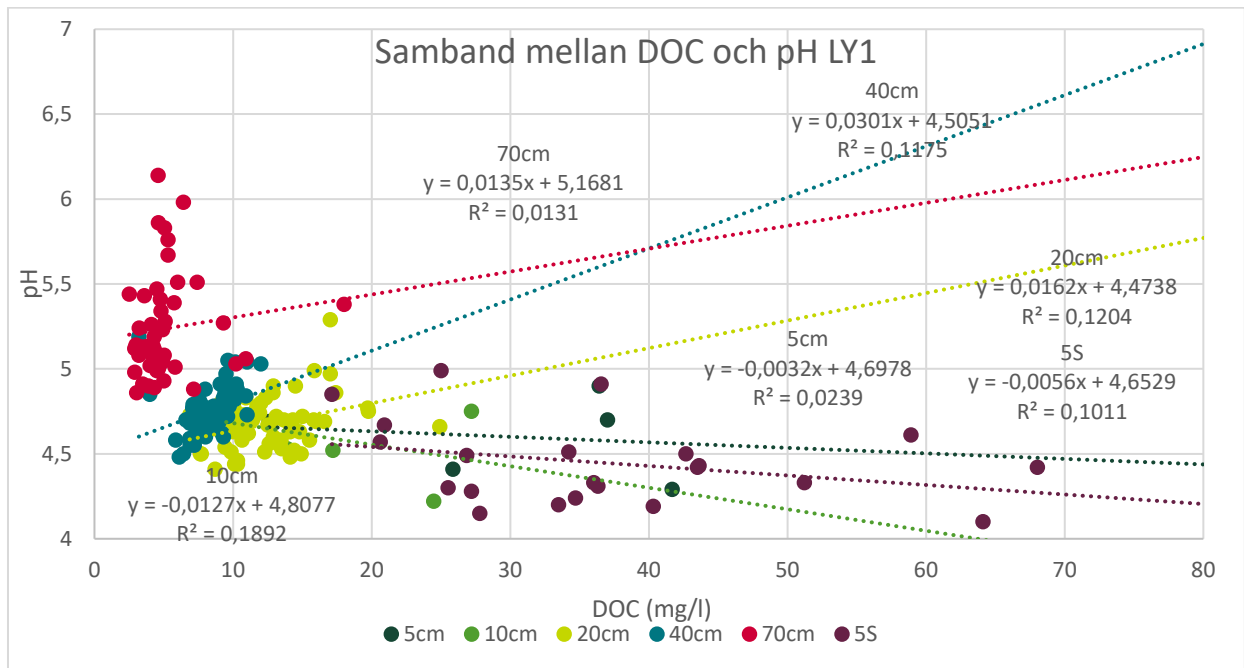
Figur 10. Tidsserie för sulfat i bäckvatten mellan 1996 och 2023.

3.1 Sambandsdiagram

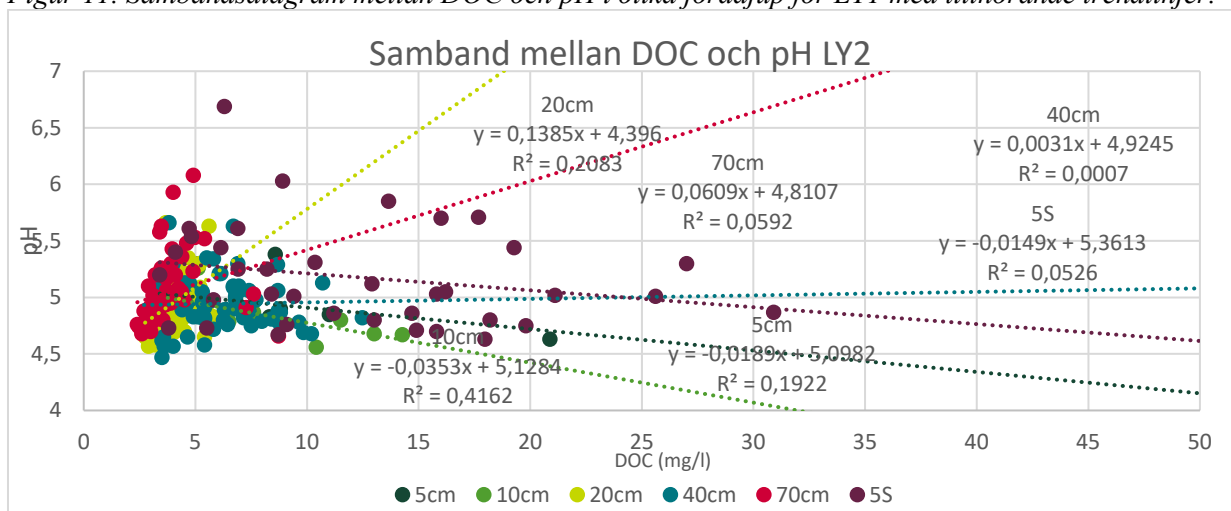
Samband mellan de undersökta variablerna analyserades med hjälp av sambandsdiagram och trendlinjer.

3.1.1 DOC och pH

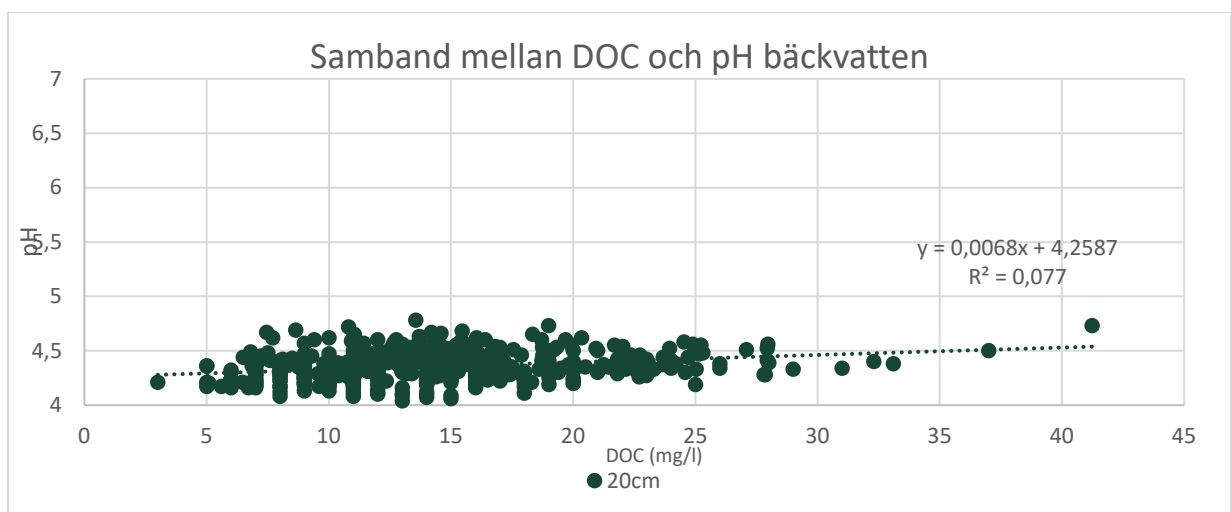
Sambandsdiagrammen mellan sulfat och DOC visade varierande samband mellan jorddjupen i markvattnet för både LY1 och LY2 (figur 11 och 12). I flera jorddjup observerades svaga negativa samband där högre sulfathalter generellt förekom tillsammans med lägre DOC-halter. Samtidigt uppvisade vissa jorddjup svagt positiva samband mellan sulfat och DOC. De tydligaste negativa sambanden observerades i 5S för både LY1 och LY2. Generellt var sambanden svaga och stor variation förekom mellan mätvärdena. LY2 uppvisade dessutom större spridning och fler avvikande värden jämfört med LY1. För bäckvattnet observerades även ett svagt negativt samband mellan sulfat och DOC där högre sulfathalter generellt sammanföll med lägre halter av DOC (figur 13).



Figur 11. Sambandsdiagram mellan DOC och pH i olika jorddjup för LY1 med tillhörande trendlinjer.



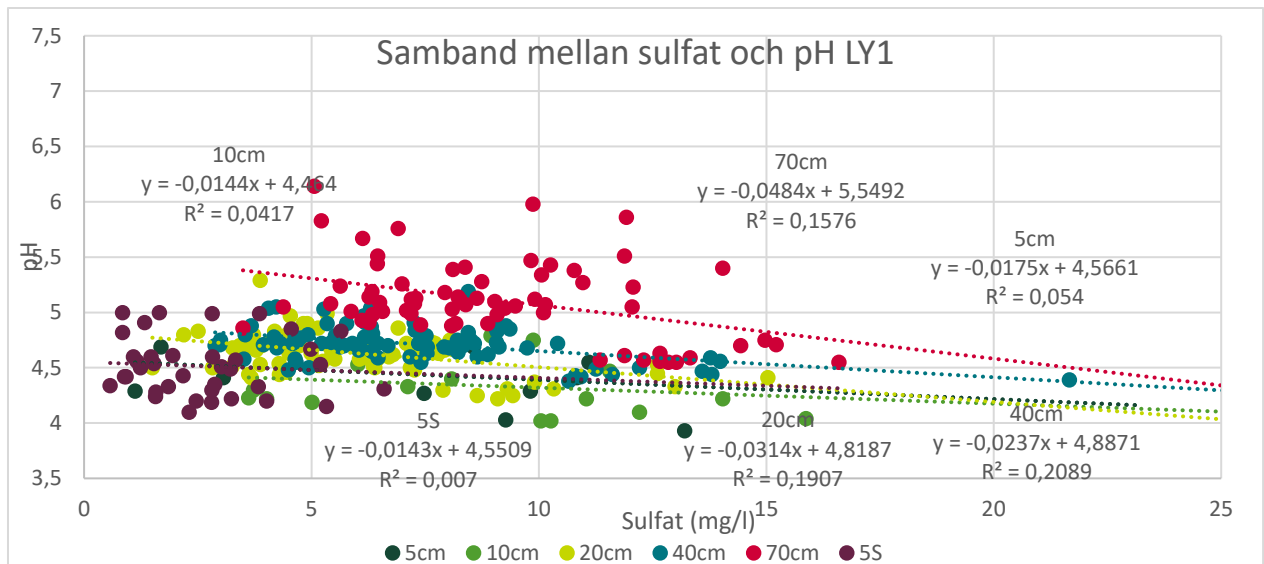
Figur 12. Sambandsdiagram mellan DOC och pH i olika jorddjup för LY2 med tillhörande trendlinjer.



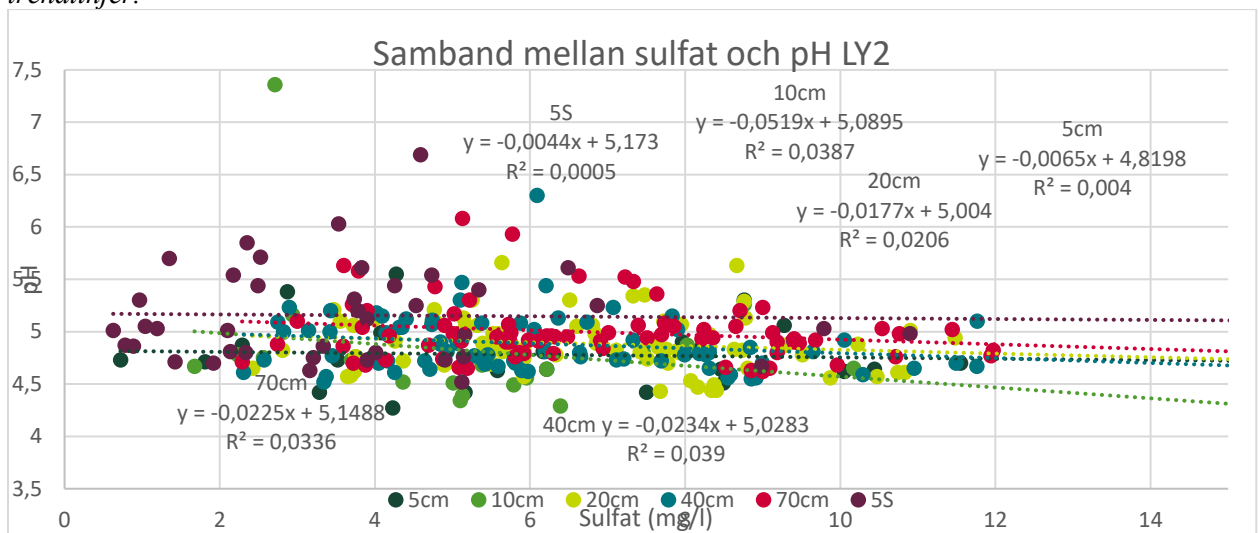
Figur 13. Sambandsdiagram mellan DOC och pH i bäckvatten med tillhörande trendlinje.

3.1.2 Sulfat och pH

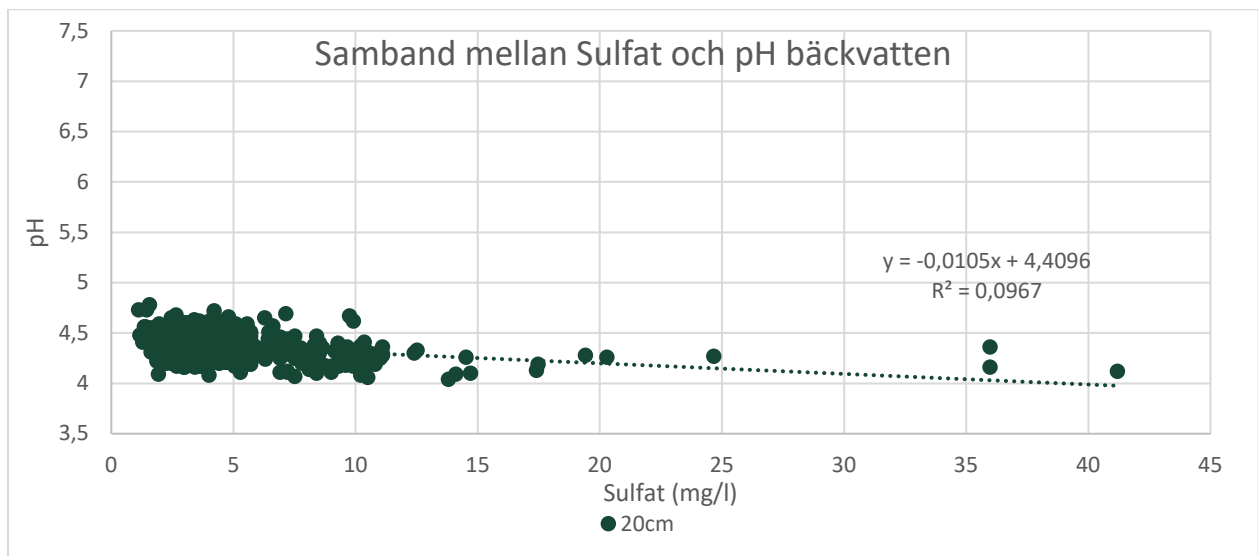
Sambandsdiagrammen mellan sulfat och pH visade generellt svaga negativa samband mellan variablerna i flera jorddjup för både LY1 och LY2 (figur 14 och 15). Detta innebär att högre sulfathalter i många fall förekom tillsammans med lägre pH-värden. Sambanden varierade dock mellan jorddjupen och stor spridning observerades mellan mätvärdena. I LY1 framträdde de tydligaste negativa sambanden i de djupare jordlagren, medan LY2 generellt uppvisade större variation och fler extrema värden. För bäckvattnet observerades även ett svagt negativt samband mellan sulfat och pH där högre sulfathalter generellt sammanföll med lägre pH-värden (figur 16).



Figur 14. Sambandsdiagram mellan sulfat och pH i olika jorddjup för LY1 med tillhörande trendlinjer.



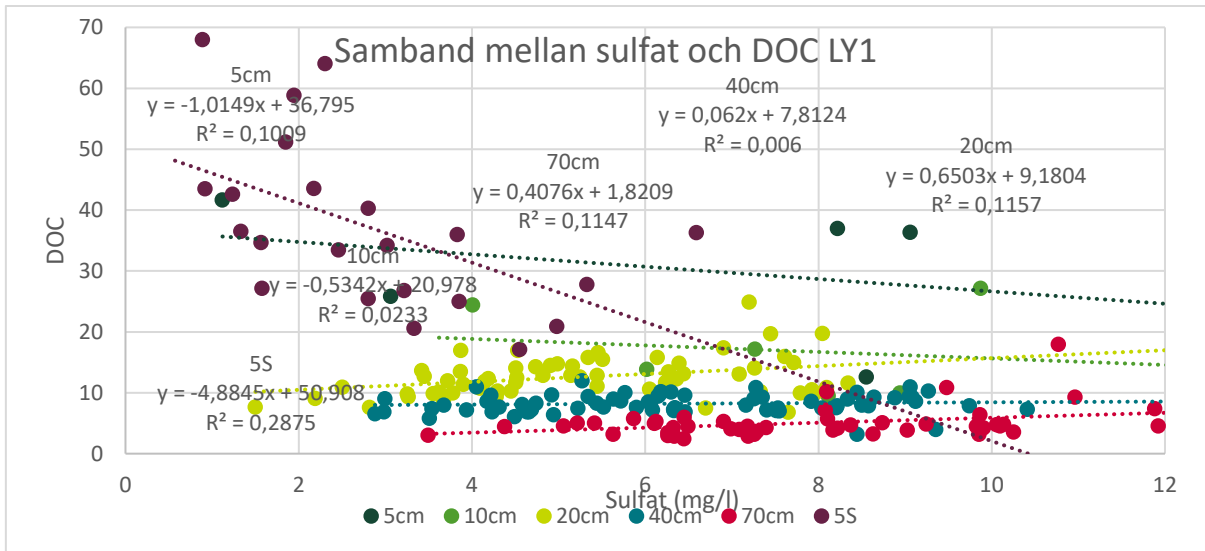
Figur 15. Sambandsdiagram mellan sulfat och pH i olika jorddjup för LY2 med tillhörande trendlinjer.



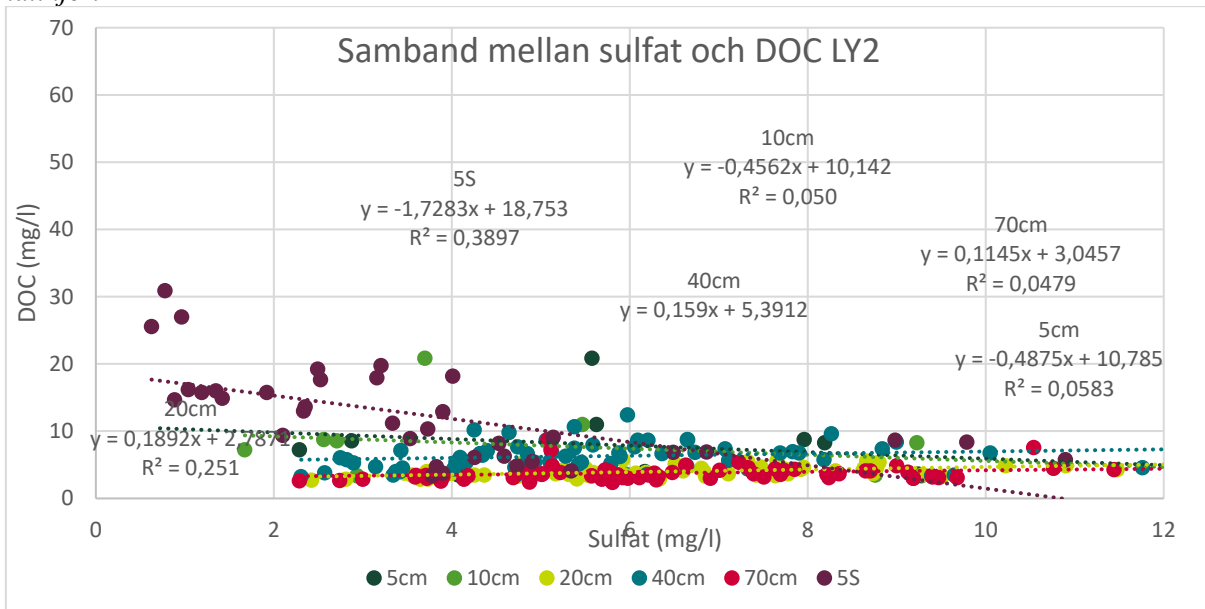
Figur 16. Sambandsdiagram mellan sulfat och pH i bäckvatten med tillhörande trendlinje.

3.5.3 Sulfat och DOC

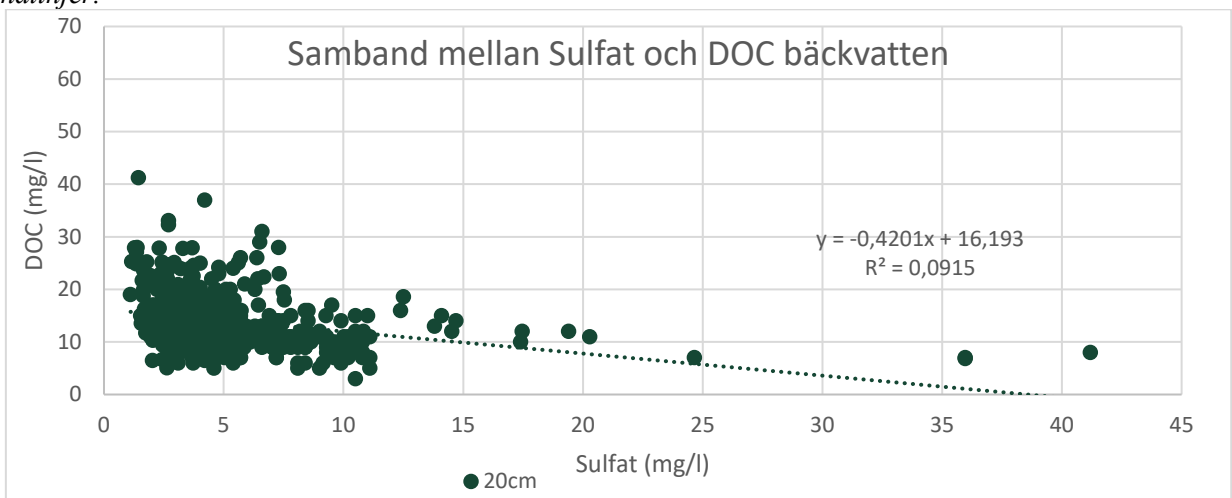
Sambandsdiagrammen mellan sulfat och DOC visade generellt svaga och varierande samband mellan jorddjupen i markvattnet för både LY1 och LY2 (figur 17 och 18). I flera jorddjup observerades svagt positiva samband där högre sulfathalter generellt förekom vid högre halter av DOC, medan 5S uppvisade negativa samband mellan sulfat och DOC. I både LY1 och LY2 var sambanden generellt svaga och stor variation observerades mellan mätvärdena. LY2 uppvisade större variation mellan mätvärdena jämfört med LY1. För bäckvattnet observerades ett svagt negativt samband mellan sulfat och DOC där högre sulfathalter generellt förekom vid lägre DOC-halter (figur 19).



Figur 17. Sambandsdiagram mellan sulfat och DOC i olika jorddjup för LY1 med tillhörande trendlinjer.



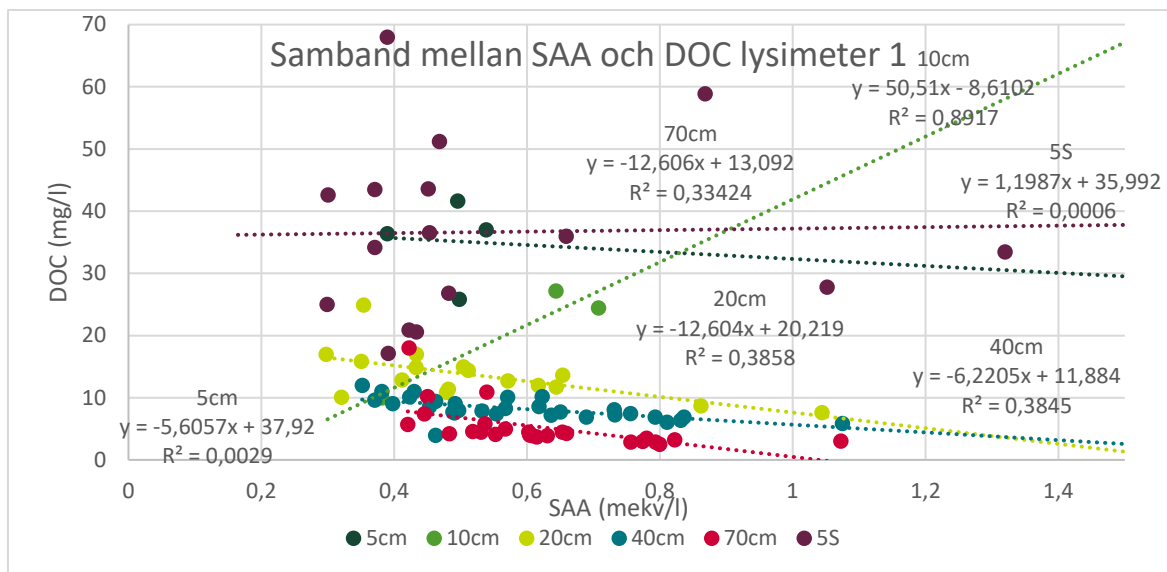
Figur 18. Sambandsdiagram mellan sulfat och DOC i olika jorddjup för LY2 med tillhörande trendlinjer.



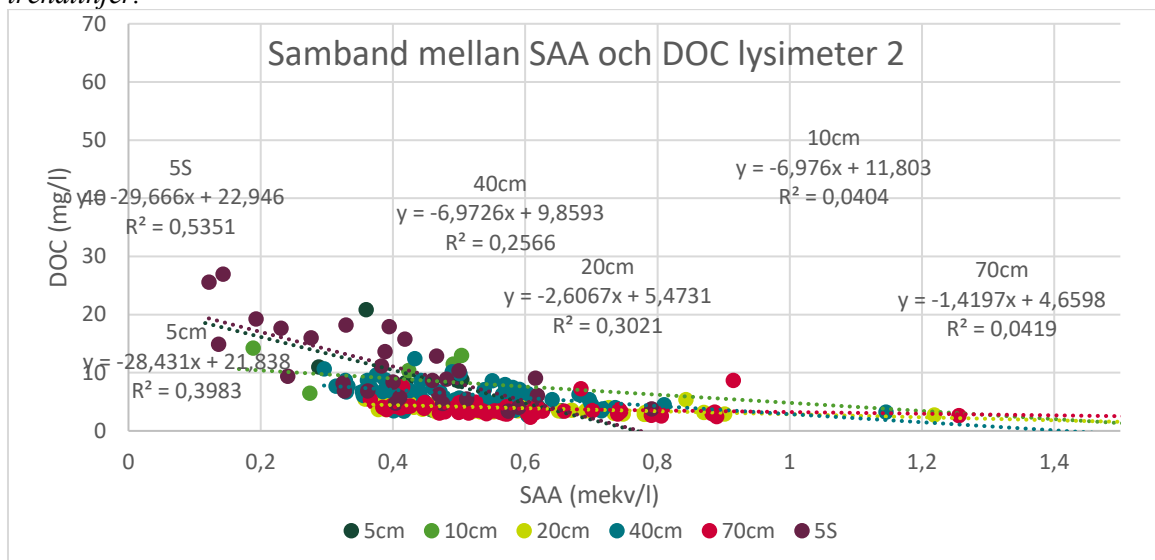
Figur 19. Sambandsdiagram mellan sulfat och DOC i bäckvatten med tillhörande trendlinje.

3.1.3 DOC och SAA

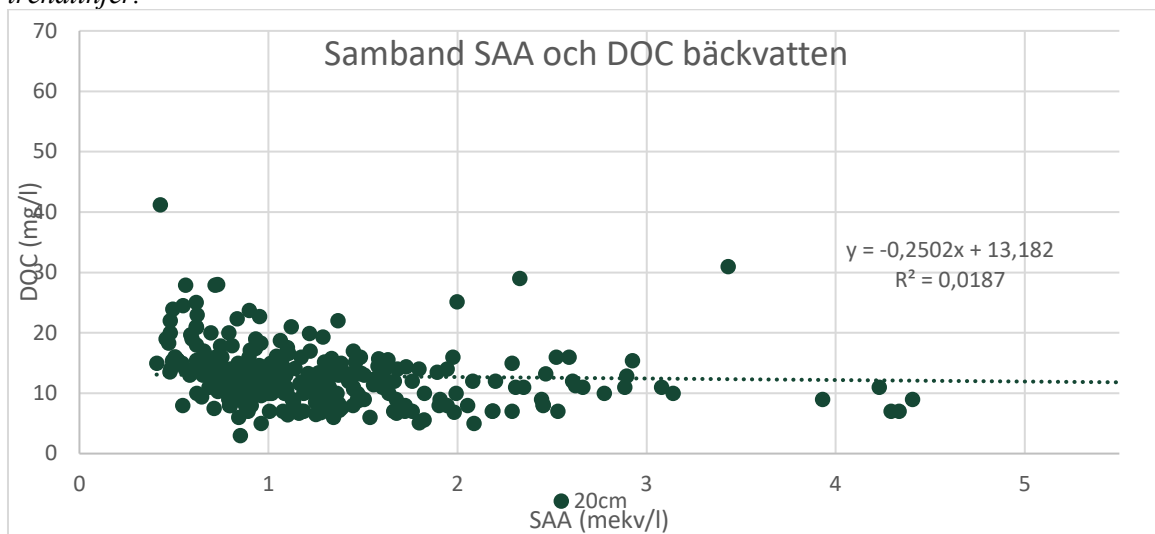
Sambandsdiagrammen mellan SAA och DOC visade generellt negativa samband mellan jorddjupen i markvattnet för både LY1 och LY2 (figur 20 och 21). I flera jorddjup observerades att högre SAA-värde generellt förekom vid lägre DOC-halter. Sambanden var tydligast i LY2 där flera jorddjup uppvisade negativa trendlinjer. I LY1 observerades även positiva samband i vissa jordlager, särskilt vid 10 cm där DOC ökade med ökande SAA-värde. Variation förekom mellan jorddjupen och flera samband uppvisade stor spridning mellan mätvärdena. För bäckvattnet observerades ett svagt negativt samband mellan SAA och DOC (figur 22).



Figur 20. Sambandsdiagram mellan SAA och DOC i olika jorddjup för LY1 med tillhörande trendlinjer.



Figur 21. Sambandsdiagram mellan SAA och DOC i olika jorddjup för LY2 med tillhörande trendlinjer.



Figur 22. Sambandsdiagram mellan SAA och DOC i bäckvatten med tillhörande trendlinje.

4. Diskussion

4.1 Analys av resultatet

Resultatet för denna studie visade generellt minskade sulfathalter och svagt ökande pH i både markvatten och bäckvatten, vilket tyder på återhämtning från försurning. Flera av sulfattrenderna visade signifikant minskade trender över tid, särskilt i de djupare jordlagren. Samma signifikanta minskande trend visades i bäckvattnet. pH ökade i stället signifikant med tiden i de flesta djupen, främst i de djupare jordlagren. Samma signifikanta minskande trend syntes även i bäckvattnet.

Minskningen av sulfathalter kan kopplas till att svavelutsläppen minskade kraftigt i Sverige och Europa efter 1980-talet. När depositionen av svavel minskar reduceras även mängden starka syrabildande anjoner i markvattnet, vilket bidrar till minskad jonstyrka och gradvis högre pH värden i mark och vatten. Detta överensstämmer med tidigare studier från boreala områden där minskade utsläpp av svavel lett till minskad jonstyrka och högre pH i mark- och ytvatten (Löfgren et al. 2010; Eklöf et al. 2021).

Återhämtningen från försurning visades tydligare för sulfat och pH än för DOC. Medan flera sulfattrender och pH-trender var statistiskt signifikanta uppvisade DOC betydligt större variation. I markvattnet uppvisade inget jorddjup någon signifikant DOC-trend trots tydliga förändringar i sulfat och pH. DOC varierade dessutom betydligt mer mellan mätvärdena jämfört med både sulfat och pH, vilket tyder på att utvecklingen av DOC i markvatten är mer komplex och varierande än utvecklingen av försurningsrelaterade parametrar.

I både LY1 och LY2 observerades stora variationer i DOC mellan olika jorddjup, flera djup uppvisade relativt stabila DOC-halter. Detta syntes extra tydligt i de djupare jordlagren som visade relativt stabila nivåer över tid. DOC i markvattnet följde därför inte samma tydliga utveckling över tid som sulfat och pH där trenderna var mer signifikanta över tid. Skillnaderna mellan LY1 och LY2 tyder även på att lokala förhållanden i marken kan ha en stor betydelse för koncentrationen av DOC. LY1 var placerad i ett torrare område längre från bäcken medan LY2 var placerad i ett blötare område i direkt anslutning till bäcken. Detta förklarar de skillnader som observerades mellan LY1 och LY2. I bäckvattnet uppvisade dock DOC en signifikant ökande trend över tid. Detta visar att utvecklingen av DOC i bäckvattnet inte helt speglades i de olika djupen för markvattnet.

Liknande resultat har observerats i tidigare studier där återhämtning från försurning inte automatiskt lett till ökande koncentrationer av DOC i markvatten (Löfgren et al. 2010). I artikeln av Löfgren et al. (2010) lyfts att utvecklingen av DOC i markvatten över tid styrs av flera processer samtidigt, vilket är en rimlig förklaring till resultaten i denna studie. När försurningen minskar så ökar pH, vilket generellt kan öka lösligheten hos organiskt material och bidra till högre DOC-koncentrationer. Samtidigt så minskar sulfathalter och andra joner i markvattnet, vilket leder till lägre jonstyrka. Den lägre jonstyrkan kan motverka effekten av högre pH och bidra till att mindre organiskt material hålls löst i markvattnet. Det organiska materialet stannar då i stället kvar bundet i marken vilket gör att halterna av DOC i markvattnet inte ökar trots återhämtningen från försurning. Detta förklarar varför DOC i

denna studie inte uppvisade samma tydliga utveckling i markvattnet som sulfat och pH trots tydliga tecken på återhämtning från försurning.

Detta syntes även i sambandsdiagrammen där sambanden mellan DOC, pH och sulfat generellt var svaga och varierade mellan olika jorddjup i både LY1 och LY2. I flera av djupen observerades negativa samband mellan DOC och sulfat samt SAA, där högre sulfathalter generellt förekom tillsammans med lägre DOC-halter. Samtidigt uppvisade vissa jorddjup i stället svaga positiva samband. Även sambanden mellan DOC och pH var generellt svaga trots teorin om ökad DOC-löslighet vid högre pH, som dock genom denna studie visade sig vara mer komplex än så.

Liknande variationer mellan jorddjup och marktyper har även observerats i tidigare studier (Löfgren et al. 2010; Eliasson, 2024). Resultaten tyder på att sambanden mellan DOC, pH och sulfat inte är enkla eller linjära utan påverkas av flera samverkande processer samtidigt. Den stora spridningen mellan mätvärdena i denna studie tyder också på att hydrologiska processer och variationer i vattenflöde har stor betydelse för transporten av DOC i markvattnet. Detta skulle kunna förklara varför vissa jorddjup uppvisade negativa samband medan andra visade svagt positiva eller nästan inga samband alls.

En annan viktig observation i denna studie är skillnaden mellan markvatten och bäckvatten. Bäckvattnet uppvisade generellt tydligare långsiktiga trender medan markvattnet varierade mer mellan olika jorddjup. Sulfathalterna i bäckvattnet visade en tydlig och signifikant minskning över tid samtidigt som pH och DOC i bäckvattnet uppvisade en signifikant ökande trend. I markvattnet var utvecklingen däremot mer varierande där flera jorddjup uppvisade relativt stabila halter av DOC över tid. Resultaten visar därför att utvecklingen av DOC i markvattnet inte direkt speglar utvecklingen i bäckvattnet, trots att markvattnet utgör en viktig källa för transport av organiskt material till ytvatten.

De stora skillnaderna mellan markvatten och bäckvatten var ett av de mest intressanta resultaten i denna studie och liknande resultat har observerats i tidigare studier där utvecklingen av DOC i markvatten inte följt samma mönster som i bäckvatten och sjöar (Löfgren et al. 2010). Resultaten tyder på att markvattnet inte fullt representerar de vattenflöden som bidrar till bäckvattnet. Tidigare forskning har visat att bäckvattnet främst påverkas av hydrologiskt aktiva områden nära bäcken (riparian zones), där marken ofta är vattenmättad och rik på organiskt material (Fork et al. 2020). Dessa områden kan bidra med stora mängder DOC till bäckvattnet och har därför sannolikt stor betydelse för bäckens DOC-utveckling. Hydrologiska studier från Gårdsjön har dessutom visat att vattenflöden i stor utsträckning transporteras genom blöta jordar nära bäckarna och att grundvatten utgör en viktig del av vattenflödet till bäckarna (Olsson & Andersson, 1985; Bishop et al. 2011).

Utifrån detta skulle man kunna förvänta sig att markvatten från områden nära bäcken speglar utvecklingen i bäckvattnet bättre än markvattnet från torrare delar av avrinningsområdet. I denna studie var LY1 placerad i ett torrare område längre från bäcken jämfört med LY2 som var placerad i ett blötare område i direkt anslutning till bäcken därmed sannolikt hade viss hydrologisk koppling till bäckvattnet. Trots detta uppvisade inte LY2 samma tydliga utveckling som bäckvattnet. Detta gör resultaten särskilt intressanta eftersom skillnaderna mellan markvatten och bäckvatten inte kan förklaras av enbart lysimetrarnas placering i avrinningsområdet. Trots en tydlig hydrologisk koppling mellan mark och bäck

följde systemen inte samma utveckling över tid. Resultaten visar därför att sambandet mellan markvatten och bäckvatten är mer komplext än vad som först kunde förväntas.

4.2 Begränsningar och förbättringsförslag

En begränsning i denna studie kan vara att markkvattendatan endast baserades på två lysimeterprofiler med flera lysimetrar på olika jorddjup, vilket innebär att resultaten endast representerar specifika delar av markprofilen inom området. Information om lysimetrarnas exakta hydrologiska förhållanden och placering i relation till olika flödesvägar var dessutom begränsad, vilket försvårade tolkningen av sambanden mellan markvatten och bäckvatten.

Metoden som användes för beräkning av signifikans var Seasonal Kendall-Test vilket är en lämplig metod för långsiktiga miljödata eftersom testet inte kräver normalfördelade data. Samtidigt beskriver testet främst övergripande trender över tid och fångar inte alltid kortsiktiga variationer eller mer komplexa förändringsmönster i dataserierna. Då DOC uppvisade stor variation mellan olika provtagningstillfällen kan detta ha påverkat möjligheten att identifiera tydliga statistiska samband. Vissa tidsserier innehöll dessutom saknade värden och varierande antal mätpunkter mellan olika jorddjup vilket också kan ha påverkat resultaten. Framtida studier skulle kunna inkludera mer detaljerad information om hydrologiska flödesvägar och marktyper inom avrinningsområdet för att öka förståelsen för sambanden mellan markvatten, transport av DOC och brunifiering i bäckvatten.

4.3 Slutsats

Resultaten i denna studie visar att DOC i markvatten inte följde samma tydliga utveckling över tid trots minskade sulfathalter och ökande pH, vilket tyder på återhämtning från försurning. DOC i markvattnet visade stora variationer mellan olika jorddjup medan bäckvattnet uppvisade en tydligare ökande trend över tid.

Skillnaderna mellan markvatten och bäckvatten visar att utvecklingen av DOC inte kan förklaras enbart av förändringar i sulfat och pH. Resultaten visar även att sambandet mellan markvatten och bäckvatten är mer komplext än vad som kunde förväntas.

Hydrologiska processer och olika flödesvägar verkar sannolikt ha stor betydelse för transporten av DOC i boreala skogslandskap. För att öka förståelsen för DOC-transport i boreala skogslandskap behövs fortsatt forskning kring hydrologiska flödesvägar, marktypers betydelse och hur olika delar av landskapet bidrar till transporten av organiskt material till ytvatten.

Referenser

Bishop, K., Seibert, J., Nyberg, L. & Rodhe, A. (2011). Water storage in a till catchment. II: Implications of transmissivity feedback for flow paths and turnover times. *Hydrological Processes*, 25(25), 3950–3959.

Eliasson, E. (2024). Organiskt kol i svenskt markvatten – Förändras det och varför? Examensarbete, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU).

Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M. (2011). Marklära. Studentlitteratur.

Evans, C.D., Jutterström, S., Stadmark, J. *et al.* Four decades of changing dissolved organic matter quality and stoichiometry in a Swedish forest stream. *Biogeochemistry* 167, 1139–1157 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10533-024-01166-8>

Fork, M.L., Sponseller, R.A. & Laudon, H. (2020). Changing source-transport dynamics drive differential browning trends in a boreal stream network. *Water Resources Research*, 56, e2019WR026336. <https://doi.org/10.1029/2019WR026336>

Kritzberg, E.S., Hasselquist, E.M., Škerlep, M., Löfgren, S., Olsson, O., Stadmark, J., Valinia, S., Hansson, L.-A. & Laudon, H. (2020). Browning of freshwaters: Consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio*, 49, 375–390. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01227-5>

Löfgren, S., Gustafsson, J.P. & Bringmark, L. (2010). Decreasing DOC trends in soil solution along the hillslopes at two IM sites in southern Sweden – Geochemical modeling of organic matter solubility during acidification recovery. *Science of the Total Environment*, 409, 201–210.

Löfgren, S., Ågren, A., Gustafsson, J.P., Olsson, B.A. & Zetterberg, T. (2017). Impact of whole-tree harvest on soil and stream water acidity in southern Sweden based on HD-MINTEQ simulations and pH-sensitivity. *Forest Ecology and Management*, 383, 49–60.

Miljödata-MVM (u.å.). Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Hämtad 2026-06-05 från <https://miljodata.slu.se/mvm/>

Monteith, D.T., Henrys, P.A., Hruška, J., de Wit, H.A., Krám, P., Moldan, F., Posch, M., Räike, A., Stoddard, J.L., Shilland, E.M., Pereira, M.G. & Evans, C.D. (2023). Long-term rise in riverine dissolved organic carbon concentration is predicted by electrolyte solubility theory. *Science Advances*, 9, eade3491. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ade3491>

Monteith, D.T., Stoddard, J.L., Evans, C.D. *et al.* (2007). Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*, 450, 537–540. <https://doi.org/10.1038/nature06316>

Olsson, B. & Andersson, F. (red.) (1985). Lake Gårdsjön: An acid forest lake and its catchments. *Ecological Bulletins*, 37.

Weldon, J. (red.) (2025). *Integrerad övervakning av miljötilståndet i svensk skogsmark – IM. Årsrapport 2024*. SLU, Vatten och miljö: Rapport 2025:11. Sveriges lantbruksuniversitet (SLU).

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU kan publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver i sådana fall godkänna publiceringen. I samband med att du godkänner publicering kommer SLU även att behandla dina personuppgifter (namn) för att göra arbetet sökbart på internet. Du kan närsomhelst återkalla ditt godkännande genom att kontakta biblioteket.

Även om du väljer att inte publicera arbetet eller återkallar ditt godkännande så kommer det arkiveras digitalt enligt arkivlagstiftningen.

Du hittar länkar till SLU:s publiceringsavtal och SLU:s behandling av personuppgifter och dina rättigheter på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>

JA, jag, Elin Johansson har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse till att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.