

*Hydrologins, markegenskapernas och sulfatjordsförekomstens  
inverkan på vattenkvaliteten i Toby å och dess  
delavrinningsområden*

Pro gradu-avhandling i geologi och mineralogi

Handledare: Peter Österholm och Miriam Nystrand

Fakultet för naturvetenskaper och teknik

Åbo Akademi, 2023

Jarkko Linnamaa

## Abstrakt

Sulfidrika jordar hittas runt om i hela världen och i Finland förekommer de mestadels i kustområdena. I Finland har sulfidlerorna efter den senaste istiden bildats i Östersjön varefter de har höjts ovanför havsnivån på grund av landhöjning. Till följd av bl.a. intensiv dränering har sulfidlerorna kommit i kontakt med syre som leder till att de oxideras till sura sulfatjordar ( $\text{pH} < 4$ ). Sura sulfatjordarna orsakar miljöskador genom att läcka ut tungmetaller och syra i vattendragen.

Denna pro gradu-avhandling handlar om att förstå hur förekomsten av sura sulfatjordar och flödesskillnaderna mellan olika typer av delavrinningsområden under olika årstider påverkar vattenkvaliteten i Toby å. I arbetet provtogs vatten från 71 olika provpunkter i Toby ås avrinningsområde av vilka 16 vattenprov togs från huvudfåran samt 47 prov från inflödesdiken/bäckar. För 8 inflöden togs därtill prov längre uppströms där andelen skogsmark var betydligt större. Provtagningen gjordes under olika hydrologiska förhållanden vid fyra olika provtagningstillfällen som var i augusti, oktober, november och april. Från alla vattenprov mättes pH och elektrisk konduktivitet samt halterna av metaller och anjoner. Vid de flesta provpunkterna mättes flödet; inflöden med korresponderande skogsdominerade provtagningspunkter prioriterades.

Vattenkvaliteten försämrades märkbart när flödet steg. Områdena med hög andel sura sulfatjordar hade större variation i specifik avrinning medan skogsområdena var hydrologiskt stabilare. Vattenkvaliteten i avrinningsområdet var mycket dåligt i oktober, november och april på grund av sura sulfatjordarna som blev hydrologiskt aktiverade i de höjda flödesförhållandena och sköljde ut aciditet och tungmetaller. Vattenkvaliteten i Toby å försämrades tydligt vid 40 meters höjd över havet och en markant försämring skedde vid 20 meter över havet. Försämringen korrelerade tydligt med ökning i andelen sura sulfatjordar.

**Nyckelord:** basflöde, flöde, metaller, specifik avrinning, sura sulfatjordar

# Innehållsförteckning

1. Inledning .....	1
2. Områdesbeskrivning .....	3
3. Material och metoder .....	7
3.1 Karakterisering av avrinningsområdet .....	7
3.2 Flödesmätningar och hydrologiska uträkningar .....	12
3.3 Provtagning inför kemiska analyser .....	14
4. Resultat .....	15
4.1 Sura sulfatjordarnas utbredning i avrinningsområdet .....	15
4.2 Hydrologi .....	16
4.3 Topografiska lutningen och specifika avrinningen .....	21
4.4 Finkorniga jordarter mot den relativa specifika avrinningen .....	23
5. Vattenkvalitet .....	24
5.1 Toby å .....	24
5.2 Delavrinningsområdena .....	28
.....	40
6. Diskussion .....	40
7. Slutsatser .....	44
Erkännanden .....	45
Litteraturförteckning .....	45

# 1. Inledning

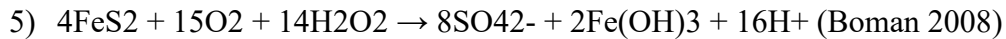
Sura sulfatjordar består av sulfidrika sediment som orsakar allvarliga miljöskador i närliggande vattendrag. Enligt den senaste opublicerade uppskattningen förekommer det ungefär 10 000 km<sup>2</sup> sura sulfatjordar i Finlands kustområden av vilka en stor del förekommer i Österbotten (Österholm, personlig kommunikation). I Finlands kustområden har sura sulfatjordarna bildats i Östersjön och i dess tidigare former efter den senaste istiden (Palko 1994). Dessa sulfidrika sediment har senare höjts upp ovanför havsnivån på grund av landupphöjning som ligger kring 4–9 mm i året i centrala och norra Skandinavien (Palko 1994). När sulfidjordarna kommer i kontakt med atmosfäriskt syre oxideras de till sulfat och kan potentiellt läcka ut aciditet och tungmetaller som aluminium, kadmium, kobolt, koppar, mangan, nickel och zink. Det här gör att sura sulfatjordar orsakar allvarliga miljöproblem i deras närliggande vattendrag (Åström & Björklund 1997).

Svavlet i de sura sulfatjordarna i Finland förekommer för det mesta i form av järnsulfider av vilka det vanligaste är pyrit (FeS<sub>2</sub>) och metastabila järnsulfider (FeS). I Finland kan andelen metastabila järnsulfider vara upp till 50 % av andelen sulfider på grund av brackvatten-sedimenten i Östersjön (Boman 2008). Sulfiderna i sedimenten bildas i syrefattiga marina sediment via bakteriell reduktion av sulfider i havsvatten (Boman 2008). Reduktionen bildar vätesulfider (reaktion 1) som sedan reagerar med järn och faller ut som metastabila järnsulfider (FeS) (reaktion 2; Boman 2008). Efter detta kan pyrit (FeS<sub>2</sub>) bildas med hjälp av vätesulfiderna (H<sub>2</sub>S) (reaktion 3; Rickard 1997; Rickard & Luther 1997) eller polysulfider (S<sub>n</sub><sup>2-</sup>) (reaktion 4) (Rickard 1975; Luther 1991).

*Sulfidbildande reaktioner:*

- 1)  $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS} + 2\text{H}^+$
- 2)  $\text{Fe}^{2+} + 2\text{HS}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{HS})_2 \rightarrow \text{FeS} + \text{H}_2\text{S}$
- 3)  $\text{FeS} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS}_2 + \text{H}_2$
- 4)  $\text{FeS} + \text{S}_n^{2-} \rightarrow \text{FeS}_2 + \text{S}_{n-1}^{2-}$

Pyriten reagerar med syre och vatten och bildar järn(III)oxidhydroxid ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) och aciditet ( $\text{H}^+$ ) i reaktionen (5):



Reaktionen från pyrit till järn(III)oxidhydroxid ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) och aciditet ( $\text{H}^+$ ) leder till att pH sjunker i jorden, ofta till 4,5 eller lägre (Erviö 1975). Aciditeten löser upp metaller i jorden som sedan sköls ut i högflödesförhållanden till närliggande vattendrag. Aluminium är speciellt farligt och förekommer i lös, biotillgänglig form i dessa låga pH-förhållanden och fastnar på fiskarnas gälar som leder till fiskdöd (Sutela m.fl. 2012).

Orsaker som leder till oxidation av sura sulfatjordar kan vara naturliga eller antropogena, det vill säga orsakade av människoaktivitet. Naturliga orsaker är postglacial landhöjning (Palko 1994). Antropogena orsaker till oxidation är t.ex. konstgjord dränering i jordbruk och skogsbruk. I Finland orsakas oxidationen av sura sulfatjordar till största del av konstgjord dränering (Österholm & Åström 2004). Till antropogena förändringar kan klimatförändringen beräknas eftersom den orsakar ändringar i hydrologiska omständigheter. Klimatförändringens effekter har redan observerats i Finland genom att vintrarna blivit varmare och vårens översvämningar förekommer allt tidigare på våren (Toivonen 2013).

Sura sulfatjordarnas effekt är som värst vid höga flödesförhållanden på hösten och våren. I områden med sura sulfatjordar har sulfiderna oxiderat under sommaren och sköls sedan ut i vattendragen vid höga flödesförhållanden. Effekten förstärks ifall sommaren har varit speciellt torr och följs av stark avrinning (Toivonen 2013). För att vidare förstå vad som bidrar till dåliga vattenkvaliteten på hösten och våren behöver man en noggrannare undersökning av delavrinningsområdena med sura sulfatjordar och vilka faktorer som styr vattenkvaliteten i dem. Delavrinningsområdena varierar inom ett avrinningsområde och det finns vidare behov till att förstå vad som påverkar vattenkvaliteten och de hydrologiska processerna i dessa områden.

Syftet med avhandlingen var att undersöka hur olika hydrologiska förhållandena påverkar vattenkvaliteten i ett avrinningsområde (Toby ås avrinningsområdet i västra Finland) och vad som bidrar till de olika hydrologiska förhållandena inom avrinningsområdet. Hypotesen är att delavrinningsområdenas vattenkvalitet styrs av sura sulfatjordar och att de belastar vattendragen som mest i höga flödesförhållanden. Målsättningen för avhandlingen är att öka

förståelse av hur variationer i hydrologin, markegenskaper och sulfatförekomst mellan delavrinningsområdena påverkar vattenkvaliteten i Toby å.

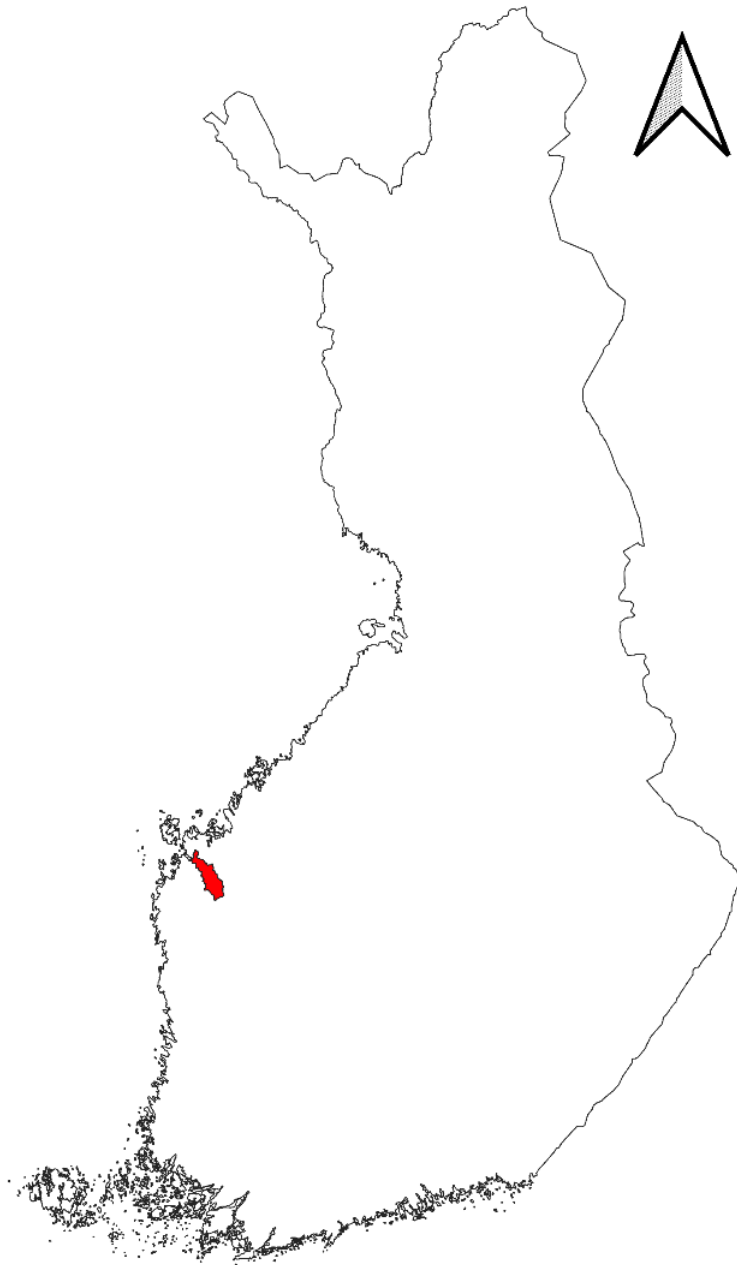
## 2. Områdesbeskrivning

Toby å rinner ut i Stadsfjärden söder om Vasa stad i Österbotten (figur 1). Ån består av en tydlig huvudfåra som rinner i mitten av avrinningsområdet med varierande storlekar inflöden. Avrinningsområdets storlek är 506 kvadratkilometer och markanvändningen består för det mesta av jordbruk och skogsbruk (Markanvändningskarta Corine 2018, Finland miljöcentral).

Sedan 1972 har flödet mätts i ån från en mätstation som ligger i Karkmo, några kilometer från åmynningen. Ån hade mellan 1991 och 2010 ett medelflöde på 3,1 m<sup>3</sup>/s per år (Närings-, trafik- och miljöcentralen 2021) vilket är betydligt lägre jämfört med de stora älvarna i Österbotten som Kyröälv med medelflödet 43 m<sup>3</sup>/s per år (Korhonen 2007). Nedre delarna av avrinningsområdet har en stor risk för översvämningar och de största översvämningarna har skett åren 1953, 1966, 1984 och 2013 (Närings-, trafik- och miljöcentralen 2021).

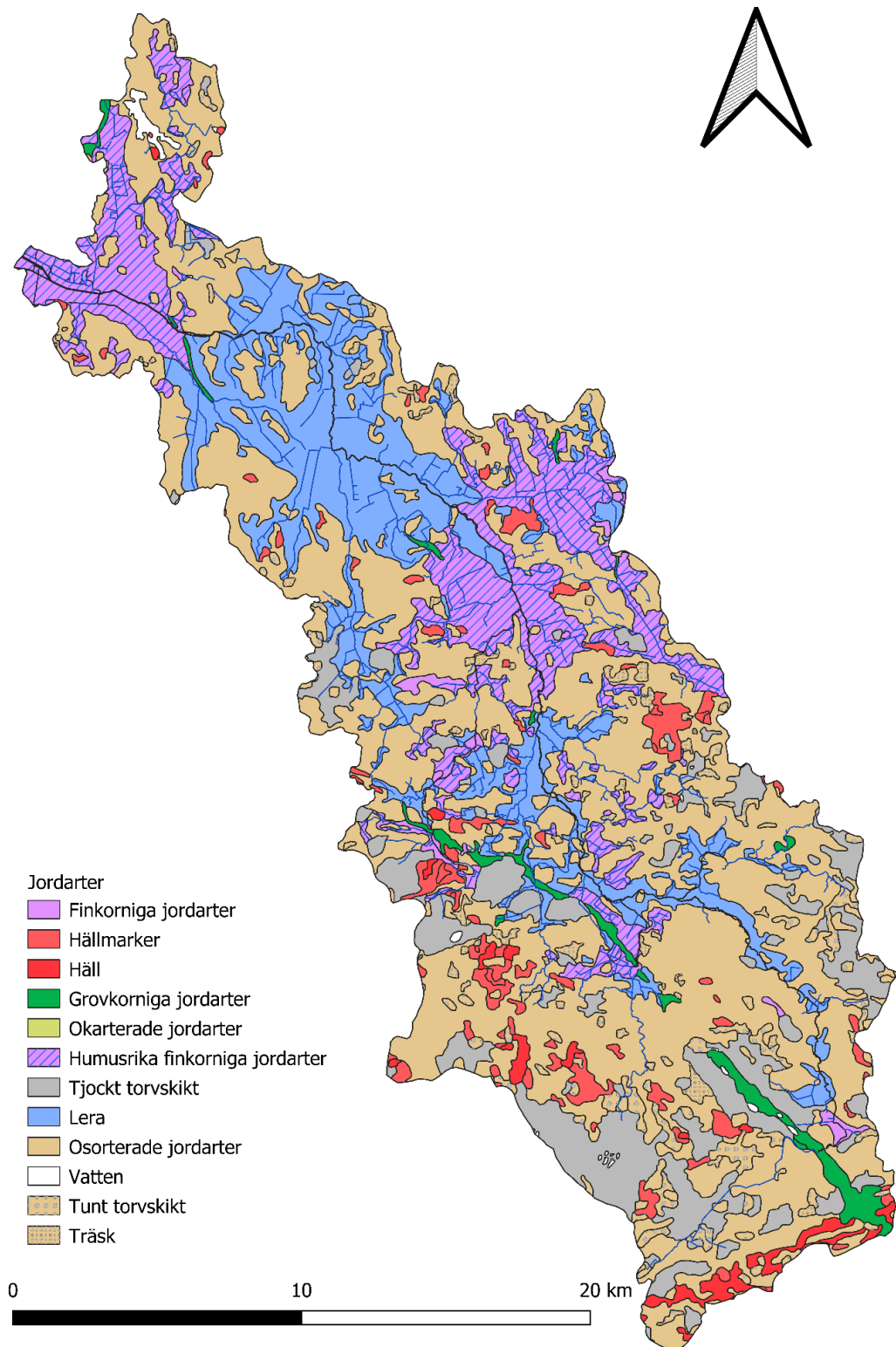
Avrinningsområdets jordarter består för det mesta av finkorniga sediment och osorterade jordarter (figur 2). Jordartsfördelningen i Toby ås avrinningsområde är: finkorniga jordarter med oklassificerad huvudart (0,9 %), humusrika finkorniga jordarter (14 %), lera (17 %), tunt torvskikt (2,6 %), tjockt torvskikt (11 %), träsk (1,4 %), grovkorniga jordarter (1,7 %), osorterade jordarter (47 %), håll (4,7 %), vatten (0,3 %) och okarterade jordarter (0,0006 %) (figur 2). De tre olika finkorniga jordarterna (finkorniga jordarter med oklassificerad huvudart, lera och humusrika finkorniga jordarter) kombinerades i detta arbete och klassificerades som en jordart (finkorniga jordarter). Andelen finkorniga jordarter ökar nedströms i avrinningsområdet (figur 2), samtidigt ökar också andelen sura sulfatjordar (figur 3). Avrinningsområdet uppströms domineras däremot av osorterade jordarter och andelen finkorniga jordarter är liten (figur 2). Andelen myrmark, torvområden och hållar ökar också uppströms (figur 2). I hela avrinningsområdet förekommer endast lite sjöar och deras area är endast två kvadratkilometer (figur 2). Berggrunden i avrinningsområdet består för det mesta av biotitparagnejs (1910–1880 Ma) men också till en del av granodioriter (1910–1840 Ma; Bergartskarta 1:200 000, GTK).

Hela avrinningsområdet är flackt, speciellt de områdena som ligger under 40 meter över havet och medelhöjden för hela avrinningsområdet är 38 meter över havet (DEM kartan för området). Hela avrinningsområdets högsta punkt är 162 meter över havet (Höjdmmodell 2 m, Lantmäteriverket)



*Figur 1. Toby ås avrinningsområde utplacerad i Finlands karta.*





Figur 2. Jordarter i Toby ås avrinningsområde. (jordarter 1:200 000, Geologiska forskningscentralen (2010).

## 3. Material och metoder

### 3.1 Karakterisering av avrinningsområdet

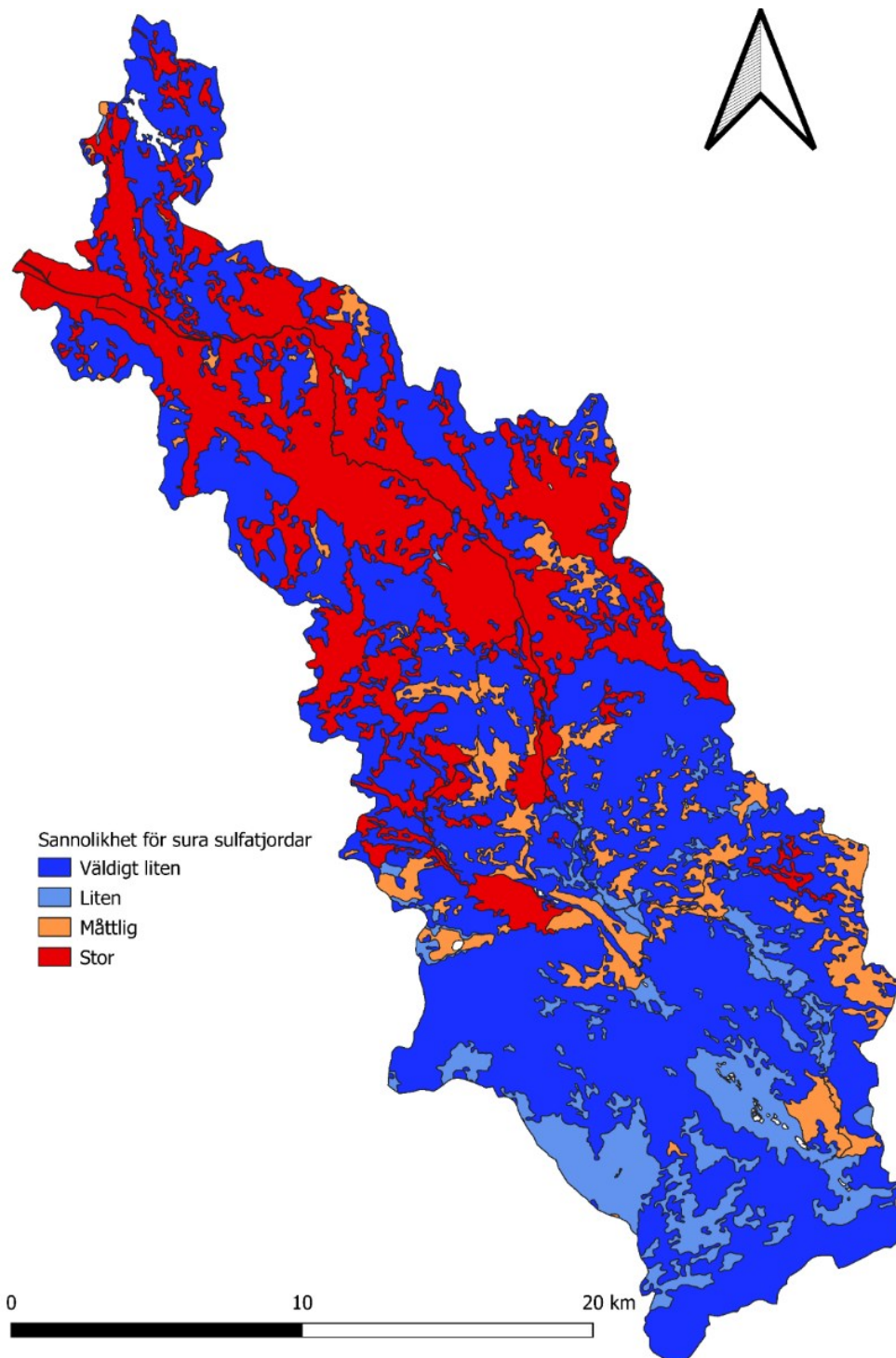
Hela Toby ås avrinningsområde och dess delavrinningsområden karakteriserades för jordarter, andel sura sulfatjordar, medelhöjd över havet och lutningsprocent. Detta gjordes för att bättre kunna undersöka/förstå hydrologins, markegenskapernas och sulfatjordarnas inverkan på vattenkvaliteten i Toby å och dess delavrinningsområden.

För att beräkna delavrinningsområdenas area användes en höjdmodellskarta (DEM) från lantmäteriverket. Höjdmodellskartan baseras på laserskanningsdata och har resolutionen 2 x 2 m och 30 cm djuphetsintervall. DEM-kartan jämnades ut med fill sinks-verktyget som jämnar ut groparna i höjdmodellskartan men behåller dess allmänna lutning (Wang & Liu 2006). Med hjälp av den utjämnade DEM-kartan bestämdes delavrinningsområdena med hjälp av Upslope area-verktyget som räknar ut avrinningsområdet för punkterna (Upslope area, SAGA Terrain Analysis). Vissa avrinningsområden behövdes korrigeras på grund av felaktiga resultat. Dessa problem orsakades av att metoden inte tog i beaktande vattentrummor under vägar.

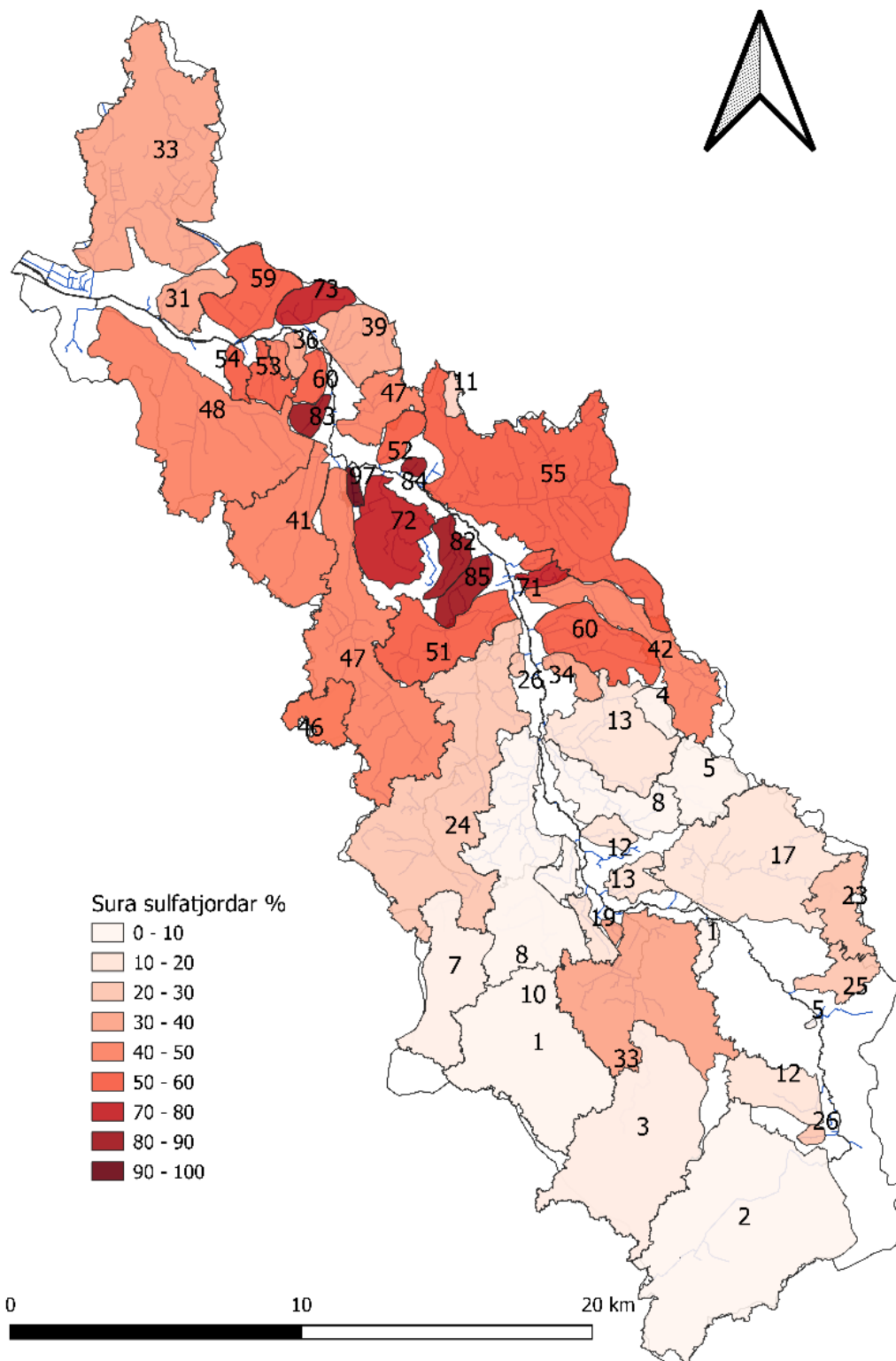
För att karakterisera jordarterna i de olika delavrinningsområdena användes en jordartskarta från Geologiska forskningscentralen (figur 2; jordarter 1:200 000, Geologiska forskningscentralen 2010). Kartan är producerad 2002–2009 och baseras på tolkningar och jordartskarteringar. De tre olika finkorniga jordarterna (se kap. 2 s. 3) kombinerades i detta arbete och klassificerades som en jordart som kallas finkorniga jordarter.

För att karakterisera de sura sulfatjordarna i Toby ås avrinningsområde användes Finlands geologiska forskningscentralens karta för sura sulfatjordar (figur 3; Sura sulfatjordar 1:250 000, Geologiska forskningscentralen 2018). Kartan visar en modell med fyra olika sannolikheter över hur sura sulfatjordarna förekommer i området. Kartan är baserad på fältundersökningar, laboratorieanalyser och tolkningar av jordartskartor. Kategorierna visar med vilken sannolikhet sura sulfatjordar förekommer i området. Genom att jämföra provtagningspunkter med sannolikhetskartan i Toby å, har GTK (Boman, personlig kommunikation) räknat ut de egentliga sannolikheterna för de olika kategorierna i procent (figur 4). I Toby ås avrinningsområde motsvarar de olika sannolikhetskategorierna dessa procentenheter: väldigt liten 0 %, liten 6 %, måttlig 44 % och stor 97 %. Dessa procentenheter användes för att uträkna den totala procenten sura sulfatjordar i hela avrinningsområdet och delavrinningsområdena. Andelen sura sulfatjordar i hela avrinningsområdet blev 29 %.

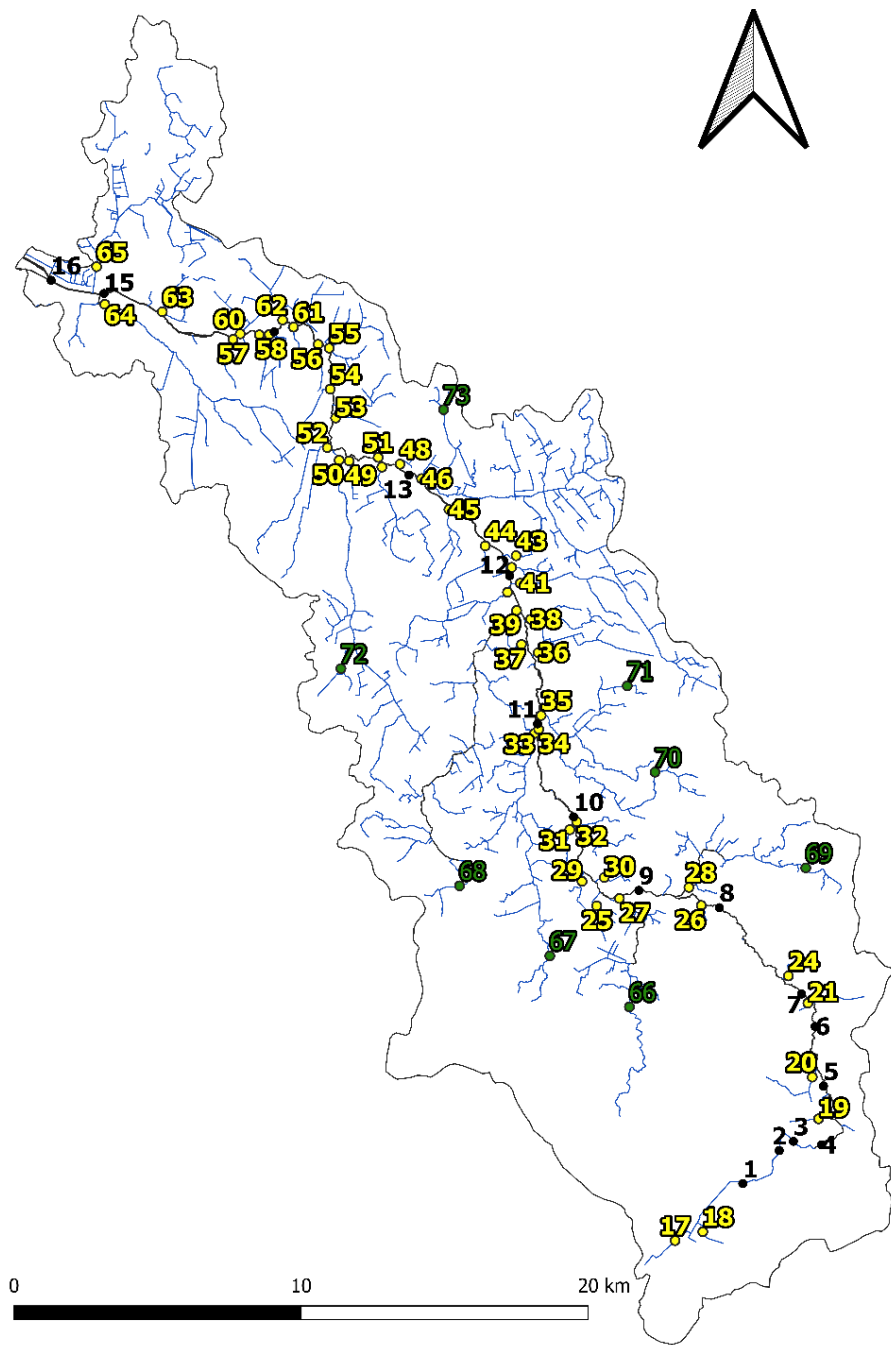
För undersökningen provtogs vatten från 73 olika punkter i Toby ås avrinningsområde (figur 5). Provpunkterna 1–16 togs från huvudfåran med ca fem meters höjdskillnad, punkt 1 var längst uppströms och punkt 16 vid åmynningen. Provpunkterna 17–65 består av punkter vid inflöden som rinner in i huvudfåran. Åtta av inflödena valdes för att jämföras med korresponderande skogspunkter uppströms, punkterna 66–73. Punkterna 22 och 23 lämnades bort efter första provtagningen på grund av svåråtkomlig terräng.



*Figur 3. Sura sulfatjordars sannolikhetskarta i Toby ås avrinningsområde (Geologiska forskningscentralen, 2021).*



Figur 4. Uträknade andel sura sulfatjordar i delavrinningsområdena.



Figur 5. Vattenprovtagningsspunkterna i Toby ås avrinningsområde. Provpunkterna 1–16 var från huvudfåran. Provpunkterna 17–65 var från inflödena. Provpunkterna 66–73 var från skogsdominerade diken.

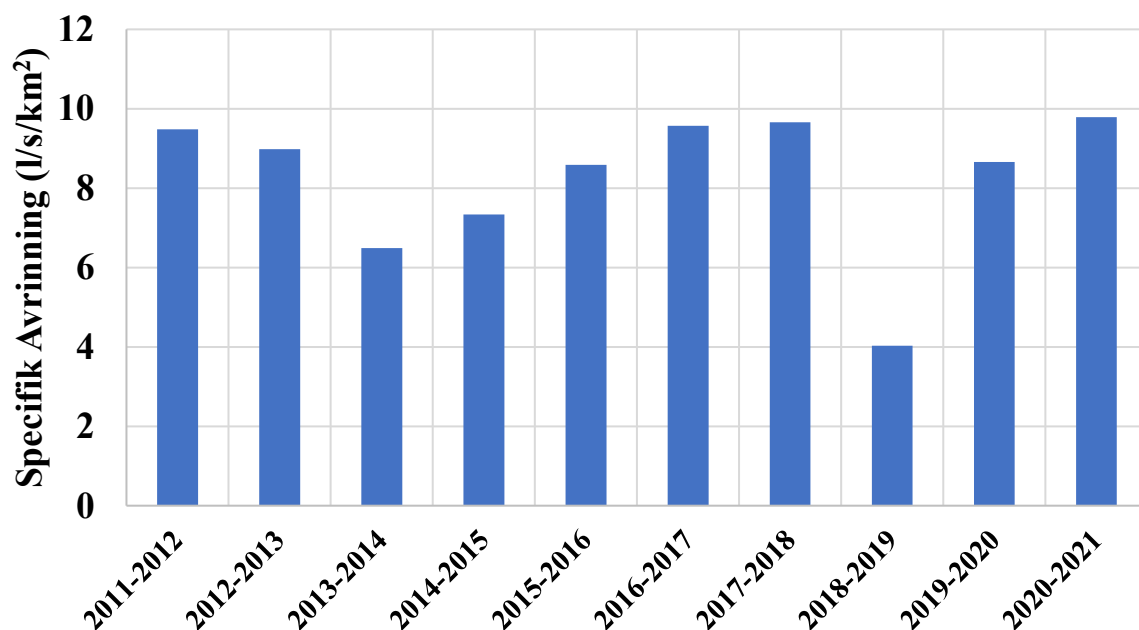
## 3.2 Flödesmätningar och hydrologiska uträkningar

Flödesmätningarna mättes med en SonTek FlowTracker Handheld ADV. På grund av att det var tillgång till endast en mätare mättes flödets också med en uppskattning av ytflödet. För att mäta flödet med flödesmätaren mättes medeldjupet, bredden samt vattnets medelhastighet för vattendraget. Mätningarna delades i kolumner med 25 cm mellanrum och djup på ca 1/3 av vattendjupet från botten (Geopacks, bruksanvisningar). Om djupet av mättningspunkten var över 60 cm, togs två mätningar vid samma punkt vid djupen 1/3 och 2/3 från botten. Om djupet var över 100 cm togs tre mätningar vid samma punkt vid djupen 1/4, 2/4 och 3/4 från botten. Vid flödesmätningarna utan mätaren uppskattades flödet genom att mäta medeldjupet och vattnets bredd samt med att uppskatta flödet på ytan av vattendraget. Ytflödet uppskattades med hjälp av att observera hur länge det tog för ett objekt att flyta en bestämd strecka. På grund av att vattnet generellt flyter snabbare på ytan så korrigerades mätningarna med en koefficient som varierade på basis av botten av vattendraget. Utifrån mätningarna och jämförelsen konstaterades att båda metoderna gav pålitliga resultat.

Den specifika avrinningen räknades ut genom att dividera flödet med avrinningsområdets area  $\frac{(l/s)}{(km^2)}$ . Den specifika avrinning beskriver hur många liter vatten per sekund som det rinner per kvadratkilometer. Genom att jämföra den specifika avrinningen i delavrinningsområdena med den specifika avrinningen i huvudfåran fick man den relativa specifika avrinningskvoten. Den visar skillnaderna i den specifika avrinningen mellan de olika delavrinningsområdena samt förhållandet till huvudfårans specifika avrinning. I avhandlingen användes både specifika avrinningen och den relativa specifika avrinningskvoten.

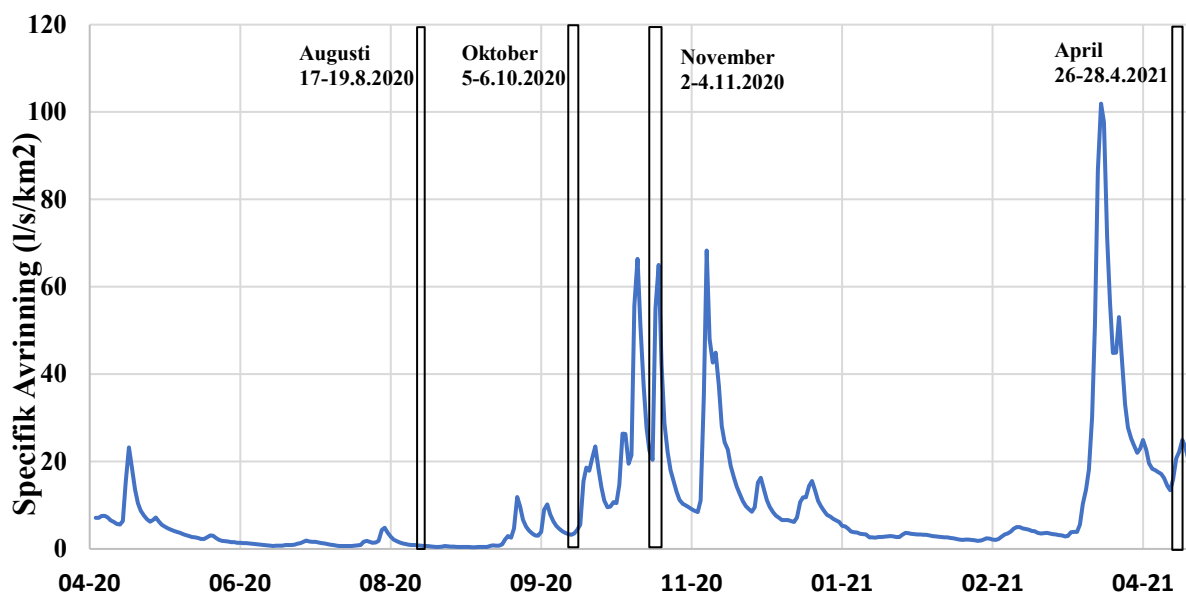
Vid Karkmo mätstation har man mätt flödet i Toby å sedan 1972 och den ligger ungefär 10 km uppström från åmynningen. Medeltalet för den specifika avrinningen i hela Toby å mellan 2011 och 2021 var 8,3 l/s/km<sup>2</sup> per år (räknat från 1.5 till 30.4 för varje år; Figur 6; Hertta databas, Finlands miljöcentral). Åren 2020–2021 var den specifika avrinningen 9,8 l/s/km<sup>2</sup> (1.5.2020-31.4.2021) vilket var det högsta under de senaste 10 åren, men kan anses som ett relativt vanligt år hydrologiskt (figur 6). Den lägsta specifika avrinningen var 2018–2019 med 4,0 l/s/km<sup>2</sup> (1.5.2018-31.4.2019). Detta år hade exceptionellt lågt flöde (figur 6).

Under provtagningsåret var flödet lågt under augustiprovtagningen 17-19.8.2020 med en specifik avrinning på 0,7 l/s/km<sup>2</sup> i huvudfåran vid mätstationen (medeltalet för provtagningsdagarna; figur 7). Vid oktoberprovtagningen 5-6.10.2020 hade specifik avrinningen höjts till 3,3 l/s/km<sup>2</sup> (medeltalet för provtagningsdagarna; figur 7). Under novemberprovtagningen 2-4.11.2020 var flödet som högst av alla provtagningar med en specifik avrinning på 47 l/s/km<sup>2</sup> (medeltal för alla dagar; figur 7). Under provtagningen i april (26-28.4.2021) var den specifik avrinningen 23 l/s/km<sup>2</sup> (medeltalet för provtagningsdagarna; figur 7). Den högsta flödestoppen mellan 1.5.2020 och 30.4.2021 uppmättes den 30.3.2021 med specifik avrinningen 102 l/s/km<sup>2</sup>. Detta var ungefär tre veckor innan provtagningen i april (figur 7).



Figur 6. Årsmedeltal för specifik avrinning (l/s/km<sup>2</sup>) i Toby ås huvudfåra från maj till april mellan åren 2011–2021. Karkmo mätstation, Hertta-databas.





Figur 7. Specifik avrinning (l/s/km<sup>2</sup>) från Toby å huvudfåran mellan 1.5.2020-30.4.2021. Data från Karkmo mätstation. Provtagningsstillfällena inkluderade.

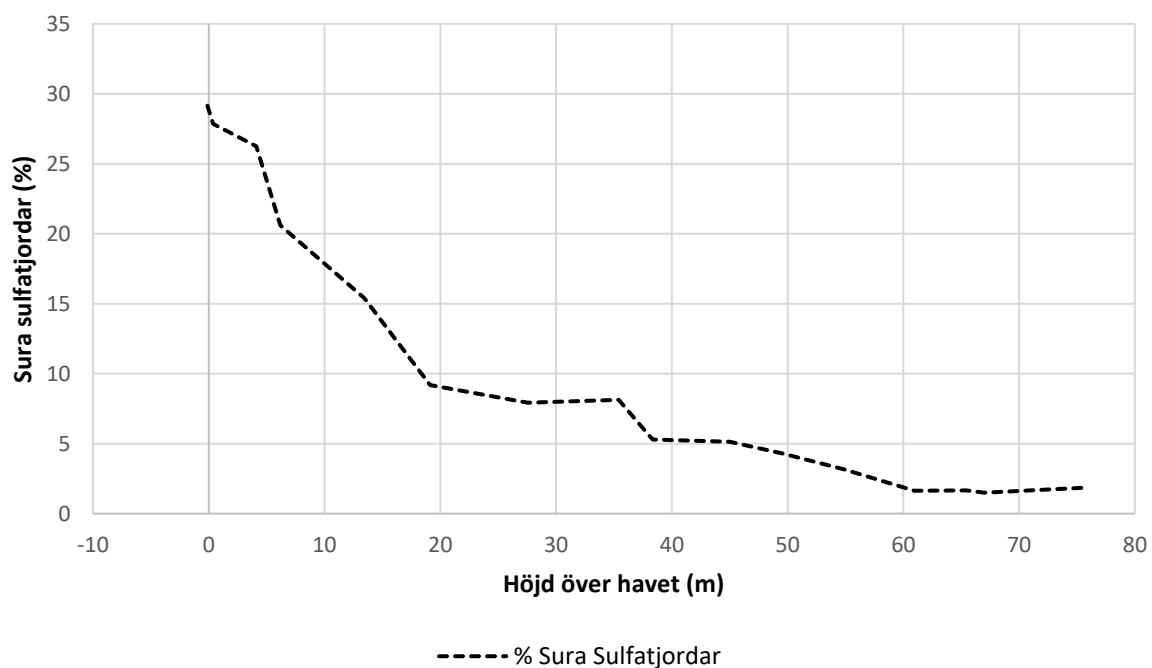
### 3.3 Provtagning inför kemiska analyser

Vid varje provtagningspunkt togs filtrerade och ofiltrerade vattenprov och gjordes pH- och EC-mätningar. Från delavrinningsområdena mättes också flödet. Vattenproven filtrerades på plats med 0,45 µm filter. I april mättes pH från provrör i rumstemperatur på grund av det kalla vädret som gjorde mätningarna opålitliga i fält. Proven för ICP-OES-analyser sursgjordes med koncentrerat salpetersyra. Vattenproven förbereddes inför ICP-OES- och jonbyteskromatografi(IC)-analyser i Åbo Akademis laboratorium. ICP-OES står för induktivt kopplad plasma optisk emissionsspektroskopi. ICP-OES-analyserna användes för att analysera provens metallkoncentrationer och IC för vattenlösliga anjoner.

## 4. Resultat

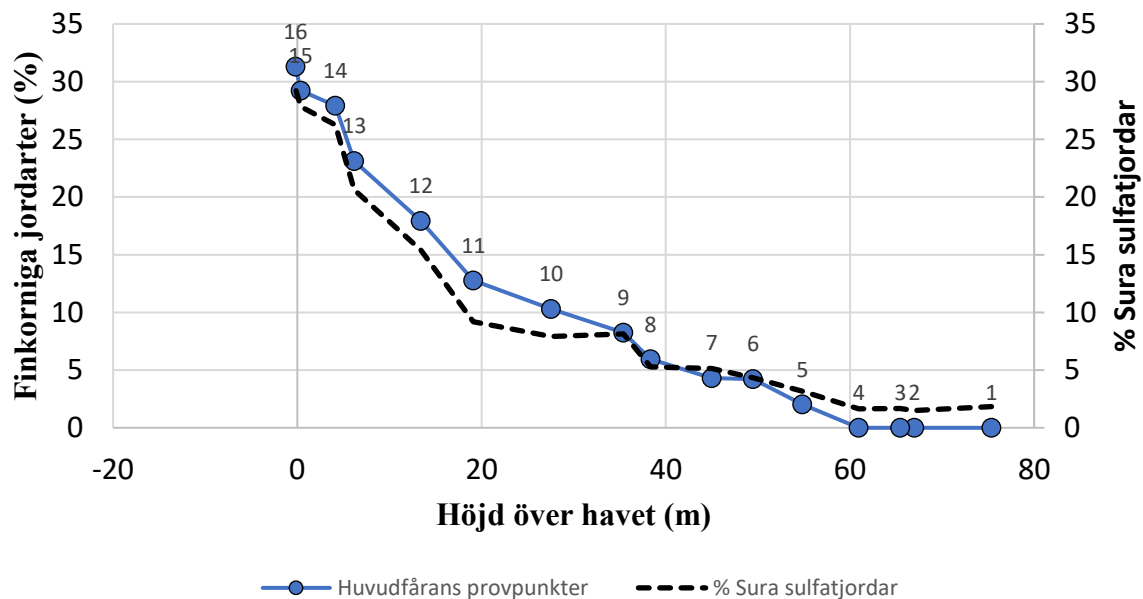
### 4.1 Sura sulfatjordarnas utbredning i avrinningsområdet

Andelen sura sulfatjordar ökade i Toby ås avrinningsområde nedströms. En drastisk ökning började vid ca 20 meter över havet var andelen steg från 9 % till 29 % vid åmynningen (figur 8). Ca 70 % av alla sulfatjordar i Toby ås avrinningsområde ligger under 20 meter över havet.



Figur 8. Andelen sura sulfatjordar i Toby å.

Andelen finkorniga jordarter ökar nedströms i avrinningsområdet och en märkvärdig ökning i andelen skedde vid 20 meter över havet och andelen ökar kraftigt till åmynningen (figur 9). Andelen finkorniga jordarter och andelen sura sulfatjordar förekommer nästan identiskt i avrinningsområdet (Figur 9).



Figur 9. Finkorniga jordarter (%) i Toby å samt andelen sura sulfatjordar (%).

## 4.2 Hydrologi

Det förekom tydliga skillnader i flödet mellan de olika provtagningstillfällena (figur 11). Som förväntat, ökade flödet (l/s) i delavrinningsområdena lineärt i samband med ökning i arean (figur 12). I augusti saknade flesta av delavrinningsområdena flöde (figur 11 och 12). I oktober ökade flödet jämfört med augusti, men en del av delavrinningsområdena var ännu hydrologiskt inaktiva (figur 11 och 12). I november var flödet som högst av alla provtagningstillfällena och hela avrinningsområdet var hydrologiskt aktivt (figur 11 och 12). I april var det höga flödena men aningen lägre jämfört med november (figur 11 och 12).

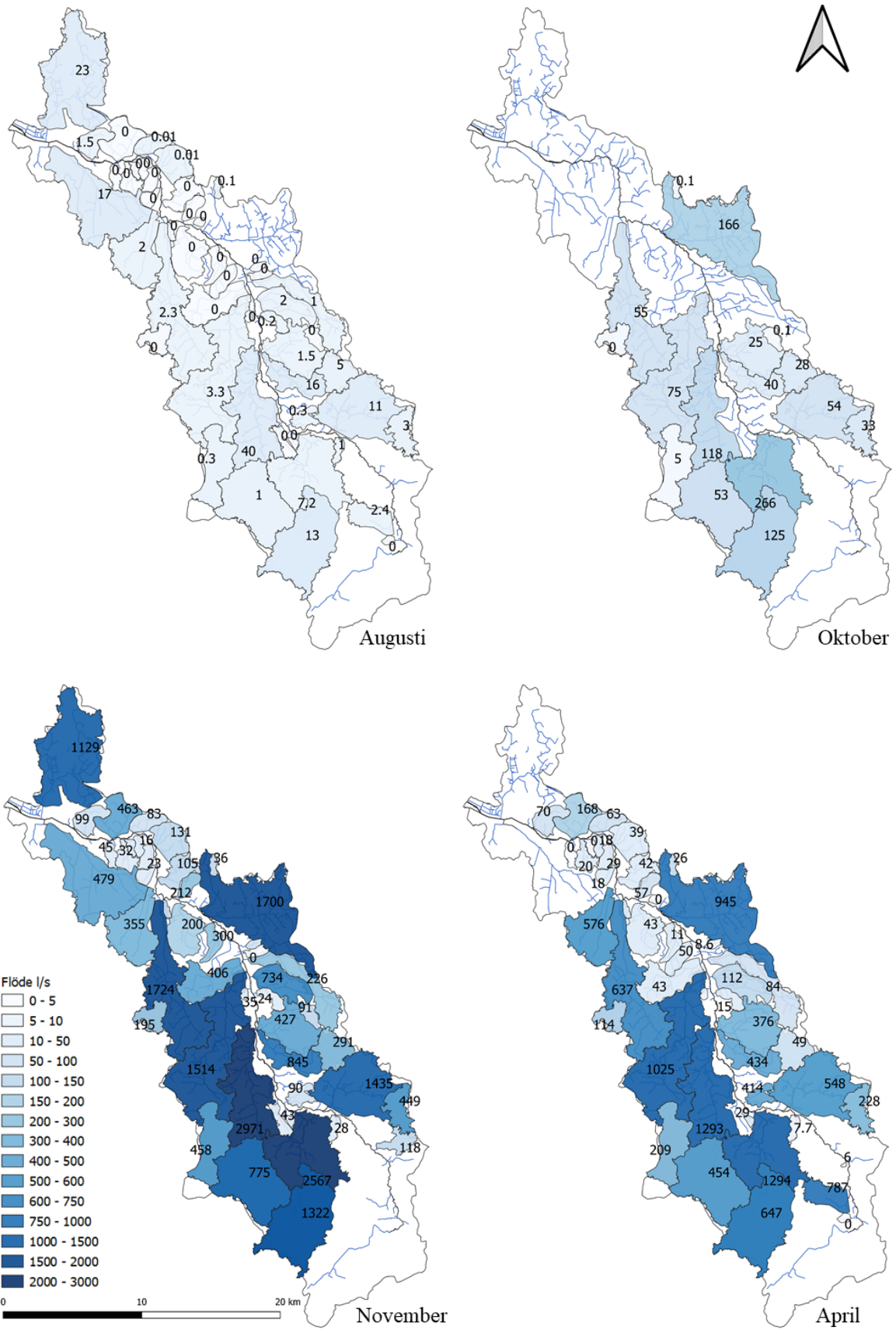
Medeltalet av specifika avrinningen i delavrinningsområdena varierade jämfört med specifika avrinningen i Toby å mellan de olika provtagningstillfällena (figur 10). Den specifika avrinningen var lägre i delavrinningsområdena jämfört med huvudfåran i augusti och oktober men högre i november och april (figur 10).

Den relativa specifika avrinningen visar kvoten mellan delavrinningsområdenas specifika avrinning och huvudfåran (figur 13 och 14). Kvoten visar att den specifika avrinningen var betydligt lägre i delavrinningsområdena i augusti jämfört med huvudfåran (figur 13 och 14). I oktober, november och april var fördelningen jämnare och delavrinningsområdena hade både högre och lägre specifik avrinning jämfört med huvudfåran. I november förekom det skillnader i den specifika avrinningen mellan dikena uppströms och nedströms (figur 13).

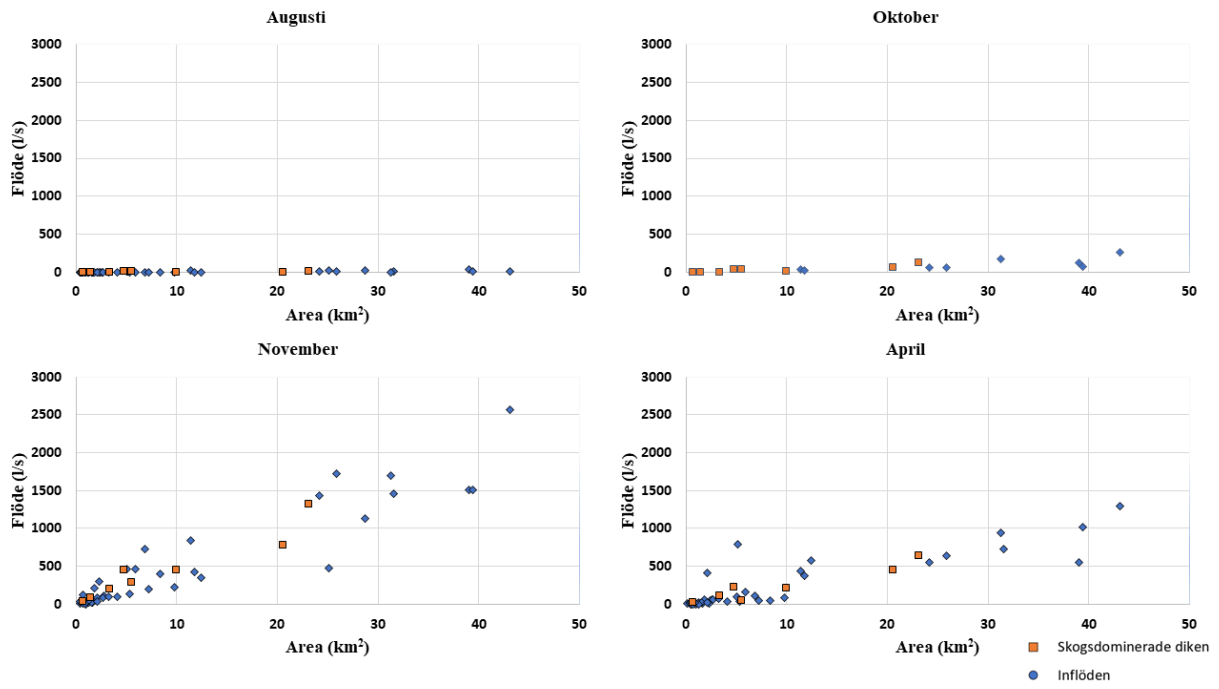
	Augusti	Oktober	November	April
	l/s/km <sub>2</sub>	l/s/km <sub>2</sub>	l/s/km <sub>2</sub>	l/s/km <sub>2</sub>
<b>Karkmo Mätstation</b>	<b>0.69</b>	<b>3.3</b>	<b>47</b>	<b>23</b>
Medeltal Delavrinningsområdena	0.2	2.9	50	27

*Figur 10. Specifika avrinningen i huvudfåran och delavrinningsområdena. Data från huvudfåran taget från Karkmo mätstation.*

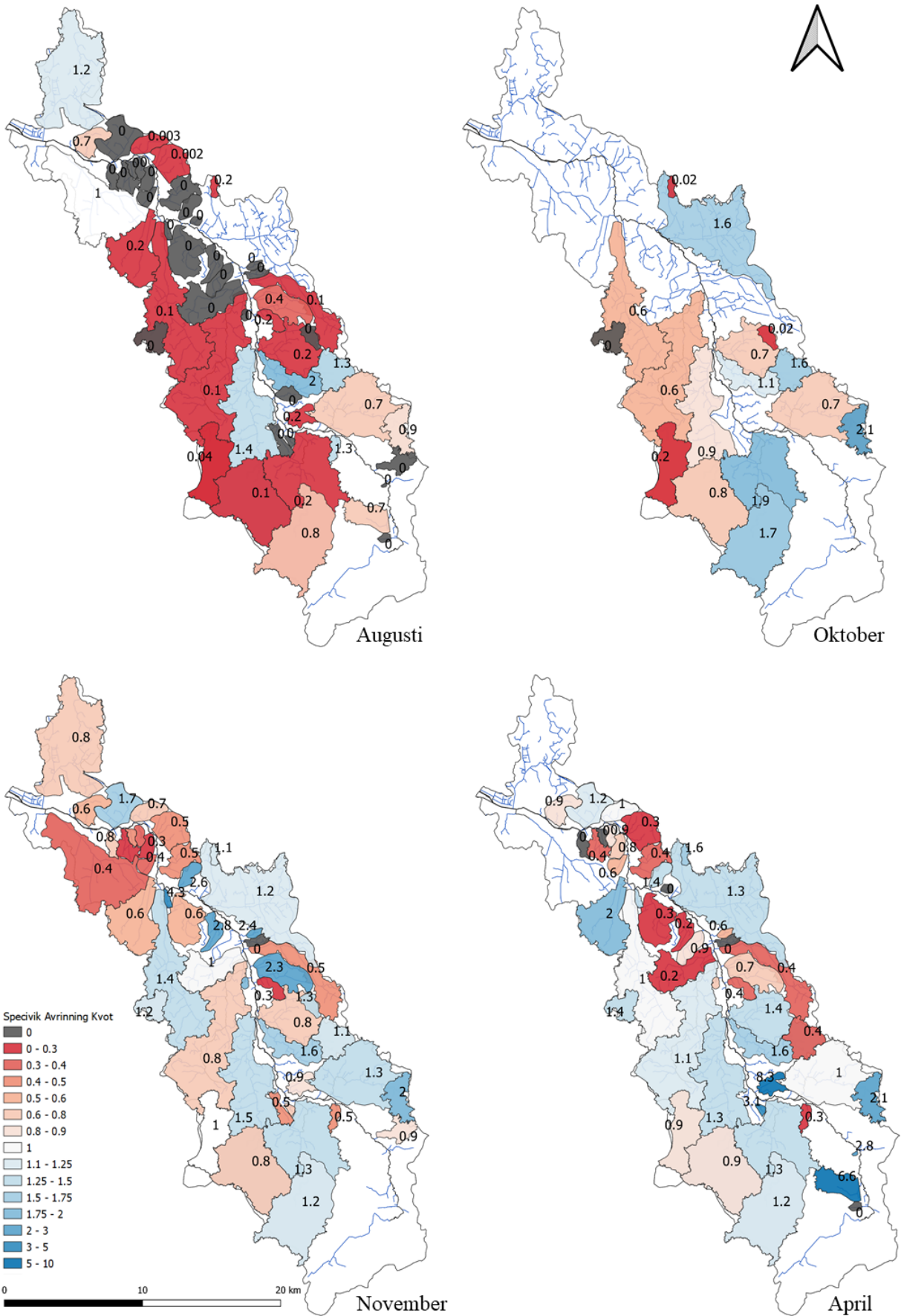
I augusti hade inflöden och deras korresponderande skogspunkter ovanför medelhöjden 40 meter över havet allmänt högre specifik avrinning jämfört med paren lägre ner i avrinningsområdet (figur 14). I oktober hade inflödena aktiverats i områden under 40 meter över havet men deras korresponderande skogspunkter var inaktiva. I november och april hade alla inflöden och skogspunkter aktiverats (figur 14).



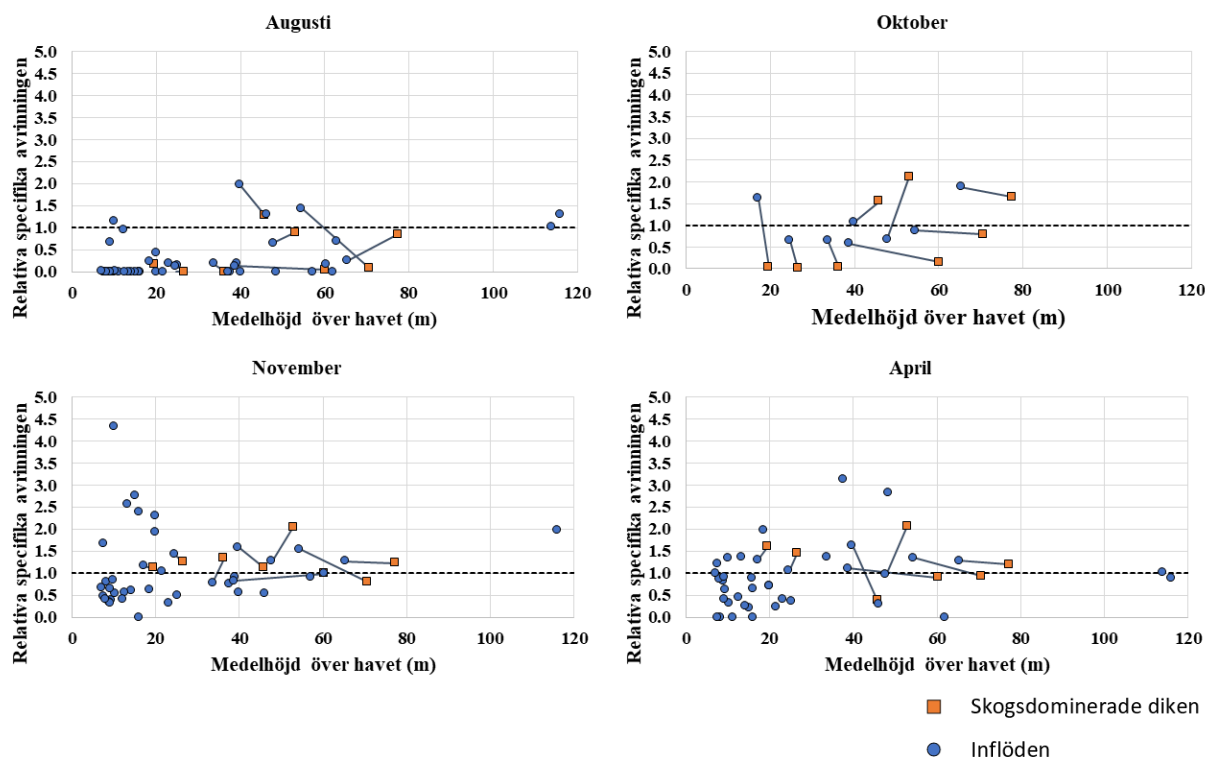
Figur 11. Flöde (l/s) i delavrinningsområdena vid korresponderande provtagningstillfällen.



Figur 12. Area (km<sup>2</sup>) mot flöde (l/s) I delavrinningsområdena.



Figur 13. Specifika avrinningen i delavrinningsområdena jämfört med specifika avrinningen i huvudfåran. 1 = huvudfårans specifika avrinning.

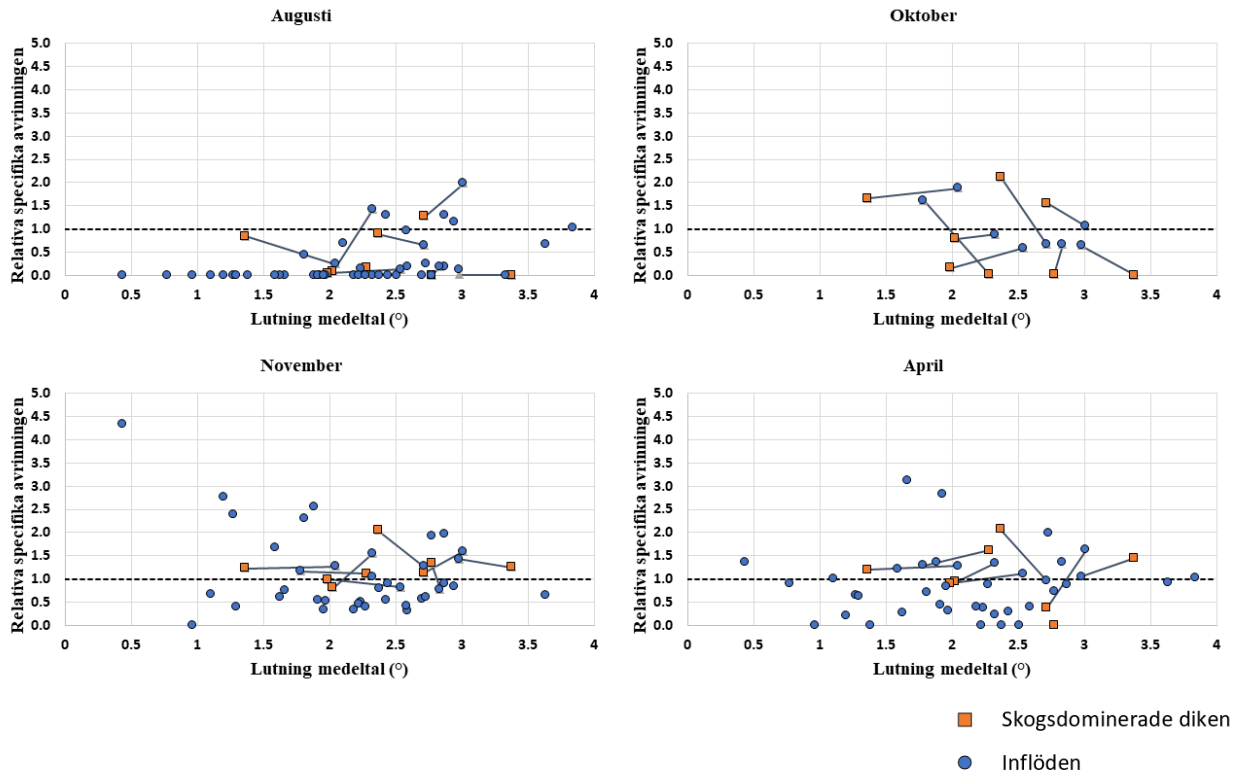


Figur 14. Den relativa specifika avrinningen (kvoten mellan specifika avrinningen i diken och hela Toby ås avrinningsområde mätt vid Karkmo mätstation) i delavrinningsområdena i Toby å. Den streckade linjen vid 1,0 motsvarar en situation där den specifika avrinningen i delavrinningsområde motsvarar den för hela avrinningsområdet. Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöde nedströms.

### 4.3 Topografiska lutningen och specifika avrinningen

En ökning i lutningen ökade inte specifika avrinningen i delavrinningsområdena (figur 15). I augusti var större del av punkterna med högre lutning ( $>2$  grader) hydrologiskt aktiva (figur 15). I november och april kan en större spridning observeras i områden med lägre lutning ( $<2$  grader; figur 15).

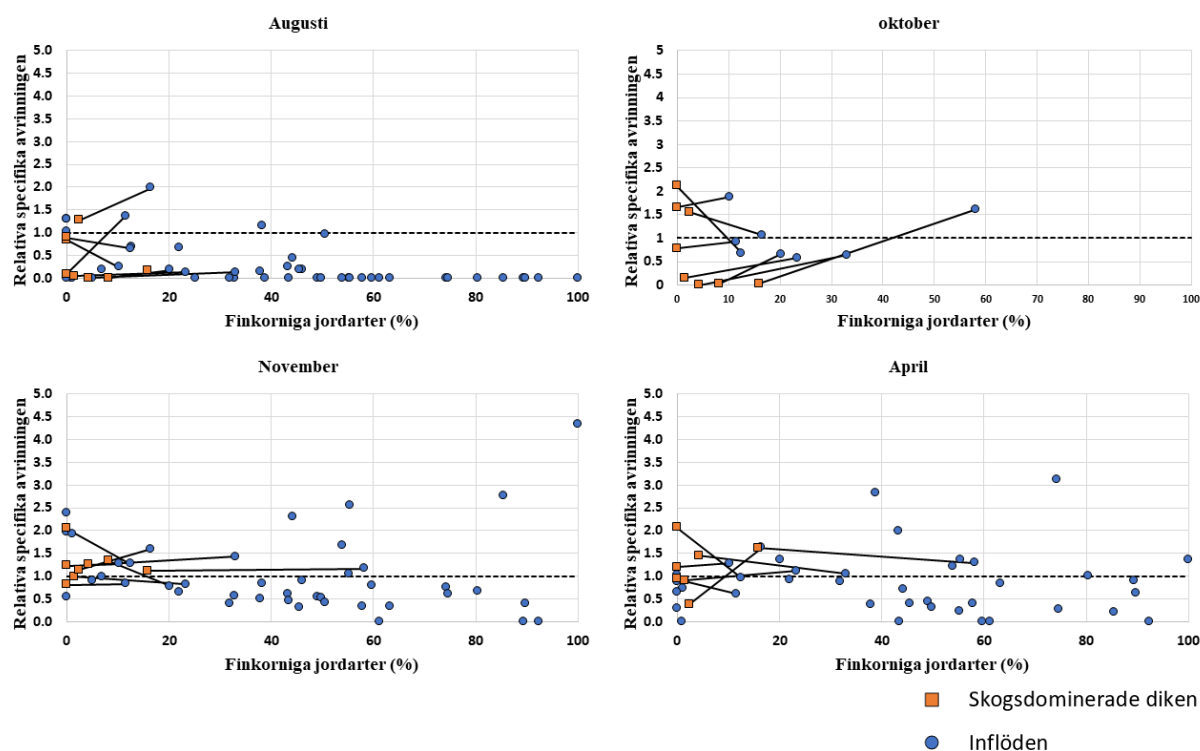




Figur 15. Lutning mot den relativa specifika avrinningen (kvoten mellan specifika avrinningen i diken och hela Toby ås avrinningsområde mätt vid Karkmo mätstation). Den streckade linjen vid 1,0 motsvarar en situation där den specifika avrinningen i delavrinningsområde motsvarar den för hela avrinningsområdet. Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöde nedströms.

#### 4.4 Finkorniga jordarter mot den relativa specifika avrinningen

I områden med hög andel finkorniga jordarter var variationen för specifika avrinningen stor (figur 16). I november och april förekom stora variationer i specifika avrinningen i delavrinningsområdena med över 40 % finkorniga jordarter (figur 16). Mellan skogspunkterna (osorterade jordarter) och inflödespunkterna syntes inget tydligt mönster i specifika avrinningen.



Figur 16. Finkorniga jordarter mot den relativa specifika avrinningen (kvoten mellan specifika avrinningen i diken och hela Toby ås avrinningsområde mätt vid Karkmo mätstation). Den streckade linjen vid 1,0 motsvarar en situation där den specifika avrinningen i delavrinningsområde motsvarar den för hela avrinningsområdet. Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöde nedströms.

## 5. Vattenkvalitet

### 5.1 Toby å

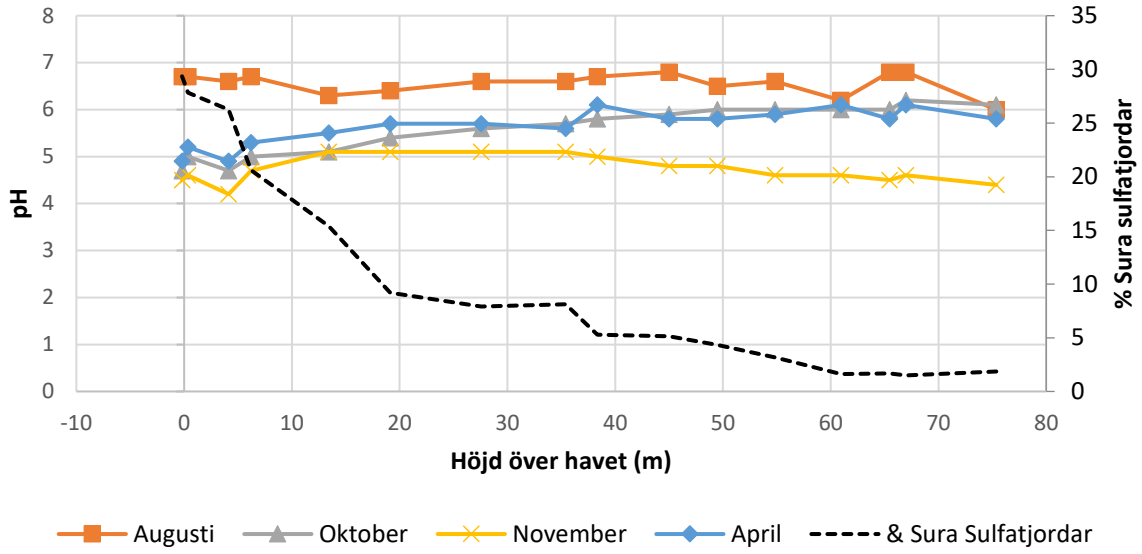
I augusti var pH neutralt (6–6,7) i huvudfåran och vid de höga flödesförhållanden i oktober, november och april var pH väldigt lågt (figur 17). I november var pH lägst med väldigt låga pH-värden (4,4–5,1; figur 24). pH sjönk från uppströms till nedströms i oktober och april. I november steg pH i mitten av avrinningsområdet men sjönk i slutet igen. I oktober, november och april var pH-sänkningen särskilt stark under 20 meter över havet var andelen sura sulfatjordar började öka (figur 17). I augusti var pH-värdet relativt stabilt i hela ån.

Under alla årstider steg konduktiviteten kraftigt från cirka 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  uppströms till 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  nedströms (figur 18 och 25). Konduktiviteten började stiga särskilt starkt vid 20 meter över havet samtidigt som andelen sura sulfatjordar ökade (Figur 18). Högsta konduktiviteten (343  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) i Toby å uppmättes i oktober vid åmynningen.

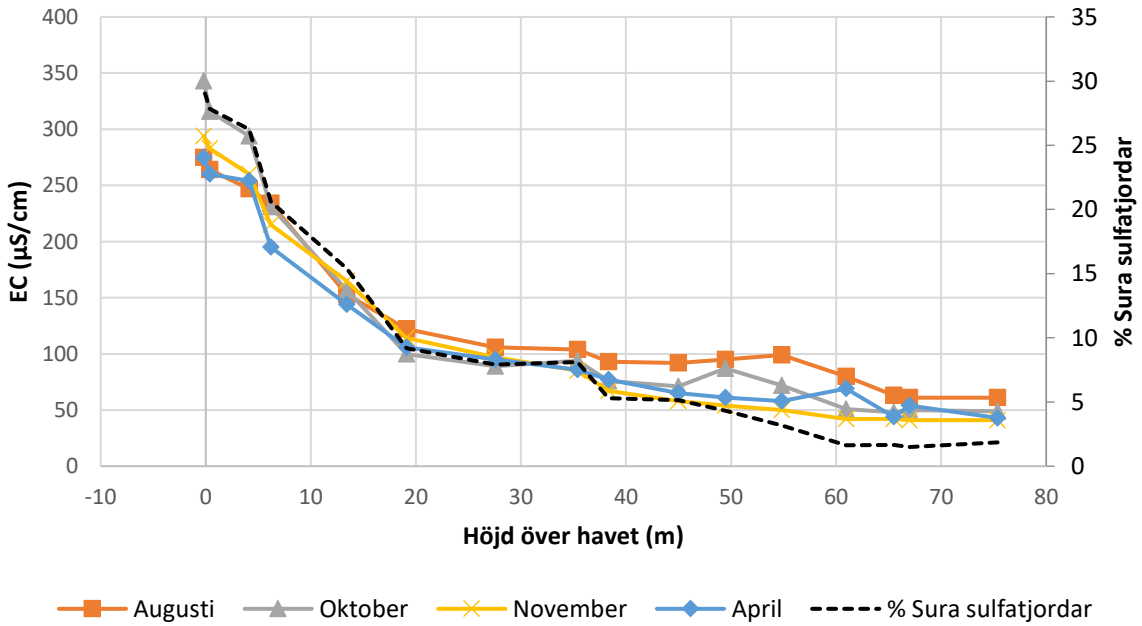
Sulfathalten ökade nedströms i huvudfåran vid alla provtagningstillfällena Halterna steg drastiskt vid 20 meter över havet, samtidigt som andelen sura sulfatjordar ökade (figur 19). I augusti slutade sulfathalten stiga vid 5 meter över havet. Sulfathalterna betar sig lika mellan de olika provtagningstillfällena ända tills 20 meter över havet, efter vilket halterna höjdes olikt (figur 19). I oktober uppmättes de högsta sulfathalterna vid åmynningen (146 ppm) men även i november (105 ppm) och april (111 ppm) var sulfathalterna höga. Halterna var som lägst i augusti (48 ppm).

I oktober, november och april steg sulfat/klorid förhållandet ( $\text{SO}_4/\text{Cl}$ ) nedströms (figur 20). Förhållandet följde inte tydligt andelen sura sulfatjordar även om en stark förhöjningen skedde vid 20 meter över havet i oktober, november och april (figur 20). I augusti var sulfat/klorid förhållandet under 5 i hela ån (figur 20). Stora kastningarna i förhållandet nedströms i november och april (figur 20) misstänks ha berott på analysfel som förekom på grund av de höga kloridhalterna och ansågs inte vara trovärdiga.

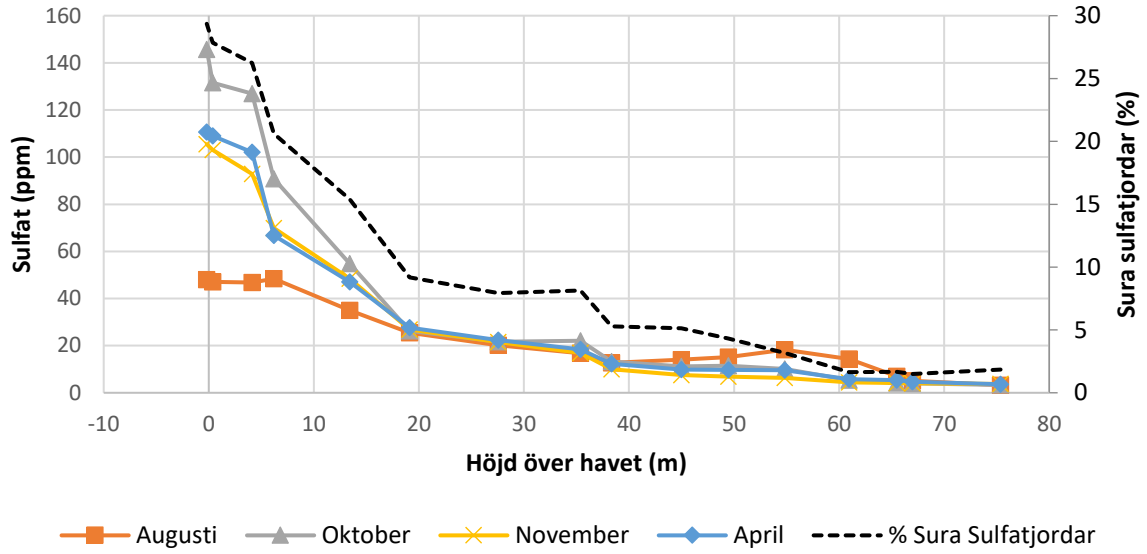
Sulfathalten och elektriska konduktiviteten korrelerade med varandra i Toby å huvudfåra vid höga flödesförhållanden (figur 21). I augusti skiljde sig förhållandet från resten av provtagningarna med att konduktiviteten steg nedströms mera jämfört med sulfathalten.



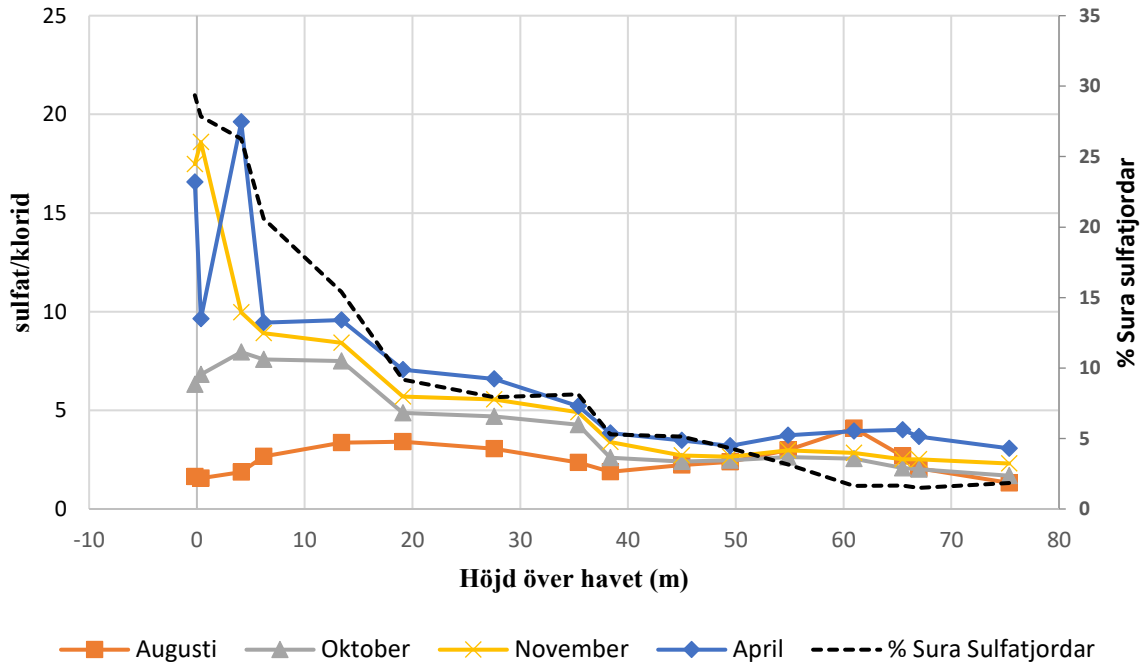
Figur 17. pH i Toby å samt andelen sura sulfatjordar (%).



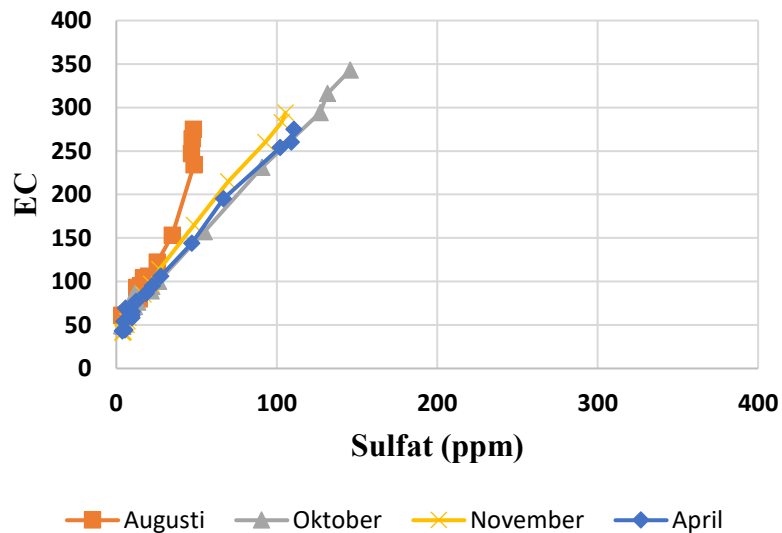
Figur 17. Elektriska konduktiviteten (μS/cm) i Toby å samt andelen sura sulfatjordar (%).



Figur 19. sulfathalten (ppm) i Toby å samt andelen sura sulfatjordar (%).

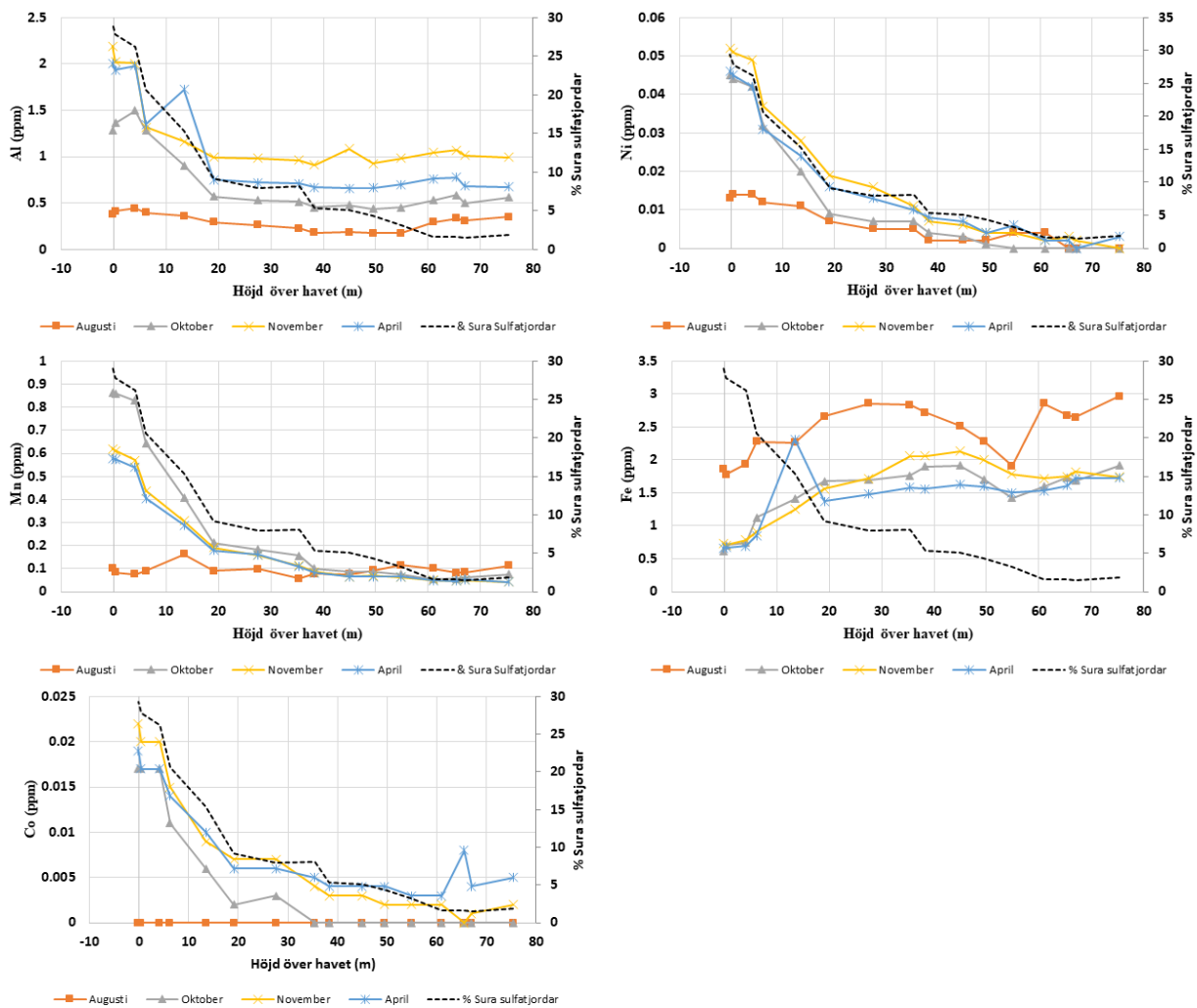


Figur 20. Sulfat/klorid förhållandet i Toby å samt andelen sura sulfatjordar (%).



Figur 21. Sulfat (ppm) mot elektrisk konduktivitet ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) i huvudfärans provpunkter.

Metallhalterna var betydligt högre i oktober, november och april jämfört med de i augusti (figur 22). I november, oktober och april steg metallhalterna (aluminium, mangan, nickel och kobolt) nedströms och en stor ökning i halterna förekom under 20 meter över havet (figur 22). Däremot i augusti kunde samma mönster inte observeras, utan metallhalterna hölls konstanta och steg endast lite eller inte alls. Järn betedde sig annorlunda jämfört med resten av metallerna genom att halten sjönk nedströms i huvudfåran.

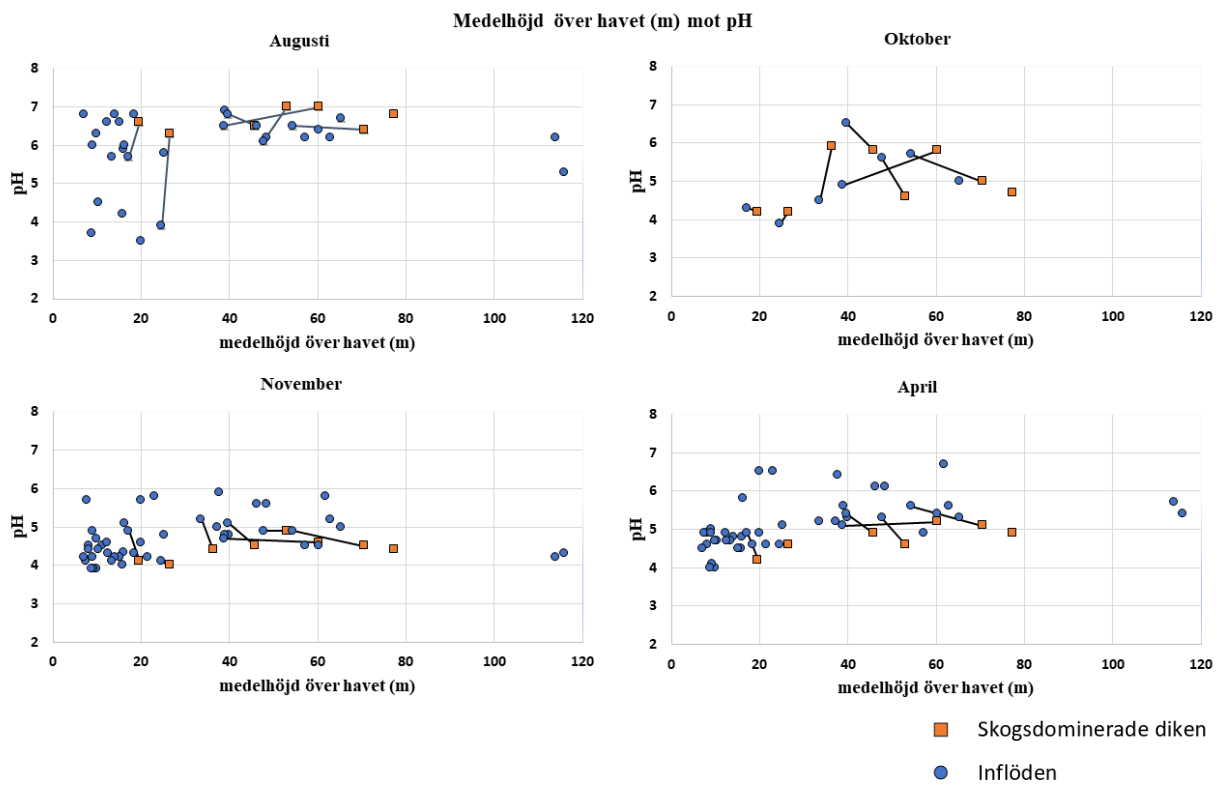


Figur 22. Aluminium, nickel, mangan, järn, och kobolt (ppm) längs med huvudfåran samt andelen sura sulfatjordar (%).

## 5.2 Delavrinningsområdena

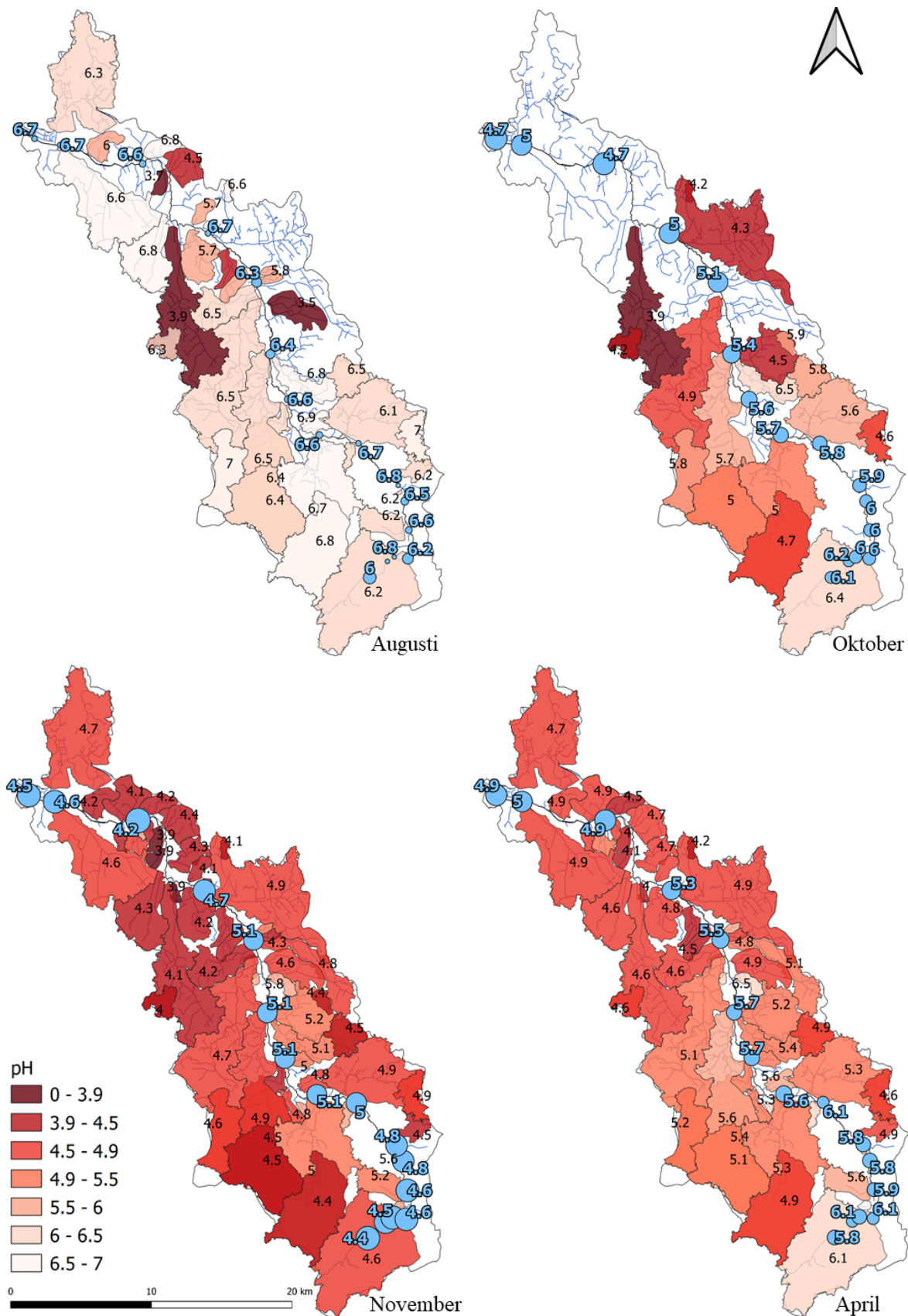
I delavrinningsområdena i augusti var pH genomgående nära neutralt med enstaka sura områden. (figur 23 och 24). Vid alla provtagningstillfällen var pH allmänt lägre i delavrinningsområdena nedströms (figur 23 och 24) med högre andel sulfatjordar (figur 4). I november och april var skillnaden liten mellan de olika områdena och pH var lågt i hela avrinningsområdet (figur 23 och 24).

Vid alla provtagningstillfällen förekom en tydlig skillnad i elektriska konduktiviteten; den var lägre uppströms (ca 30–200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; figur 25) och mycket hög nedströms (ca 200–2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; figur 25). Konduktiviteten varierade relativt lite mellan de olika provtagningstillfällena men var som högst i oktober och november (figur 25).

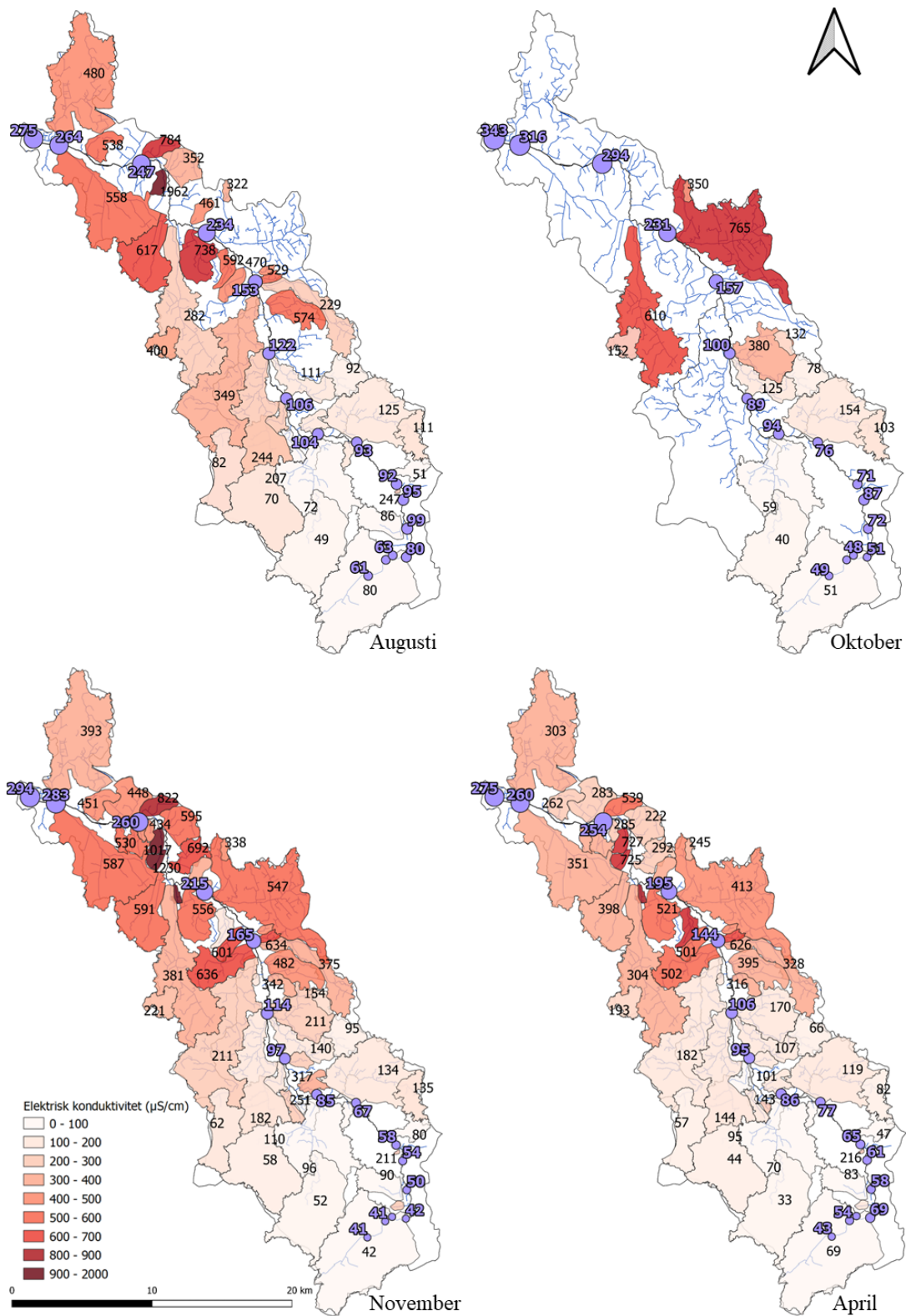


Figur 23. pH i delavrinningsområdena i Toby å. Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöden nedströms.





Figur 24. pH i delavrinningsområdena samt huvudfåran vid korresponderande provtagningsstillfällena.

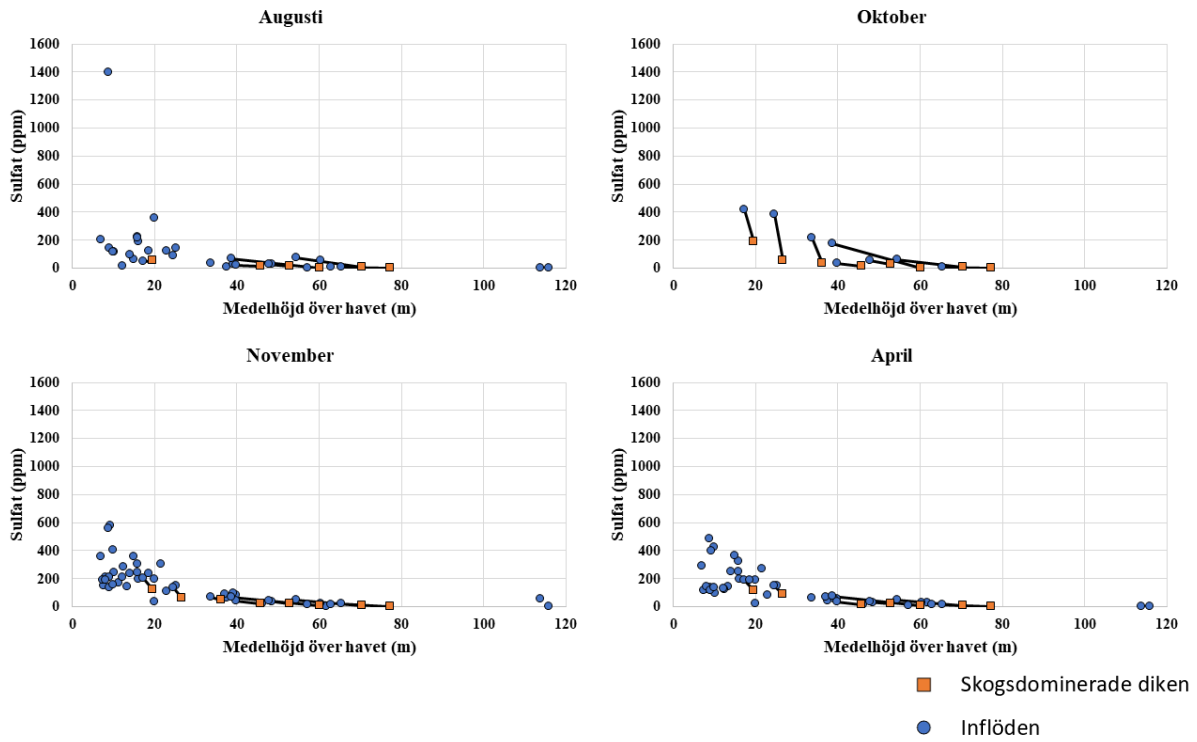


Figur 25. Elektriska konduktiviteten ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) i delavrinningsområdena samt huvudfåran vid korresponderande provtagningstillfällen.

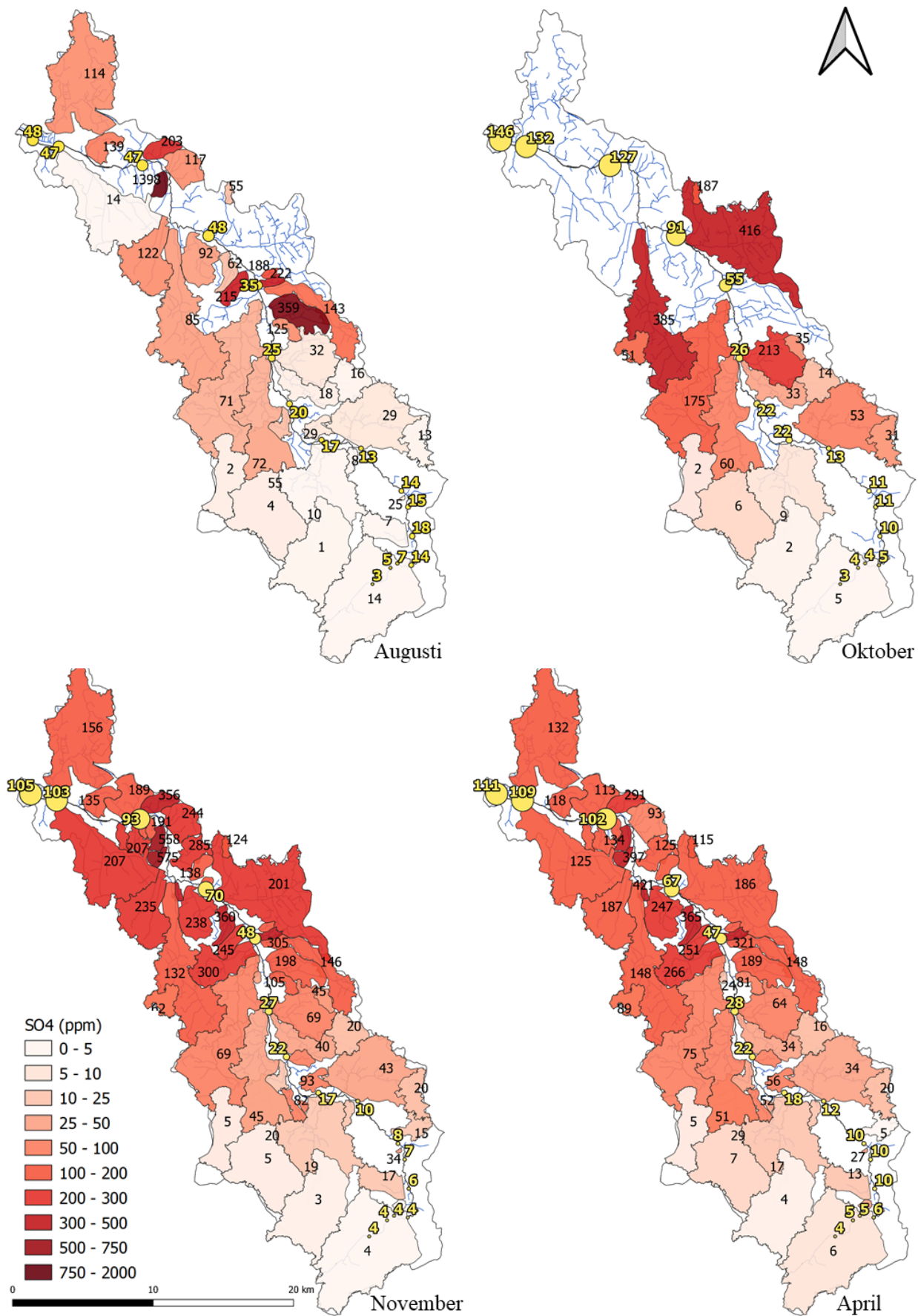
Delavrinningsområdena hade höga sulfathalter vid varje provtagningstillfälle (figur 26 och 27). Vid alla provtagningstillfällen var sulfathalterna höga i områden med sura sulfatjordar (14–1400 SO<sub>4</sub> ppm; figur 26, 27 och 4) och betydligt lägre (1–50 ppm) uppströms i de skogsdominerade områdena med medelhöjd över 40 meter (figur 26 och 27). Sulfathalterna var allmänt högst i oktober, speciellt i de större delavrinningsområdena nedströms. Skillnaderna i sulfathalterna mellan skogsdominerade diken och inflöden var tydligast i oktober och då var också sulfathalterna i inflöden som högst (figur 26).

Mängden sulfat i provpunkterna var som lägst i augusti (0–2,6 SO<sub>4</sub> g/s; figur 28), ökade till oktober (0–69 SO<sub>4</sub> g/s; figur 28) och var betydligt högre i november (2–342 SO<sub>4</sub> g/s; figur 28) och april (0–176 SO<sub>4</sub> g/s; figur 28). Även om sulfathalterna var höga i augusti, var mängden sulfat låg. Vid alla provtagningstillfällen släppte de största delavrinningsområdena största mängden sulfat och de områdena befann sig i mitten eller nedströms i avrinningsområdet (figur 28).

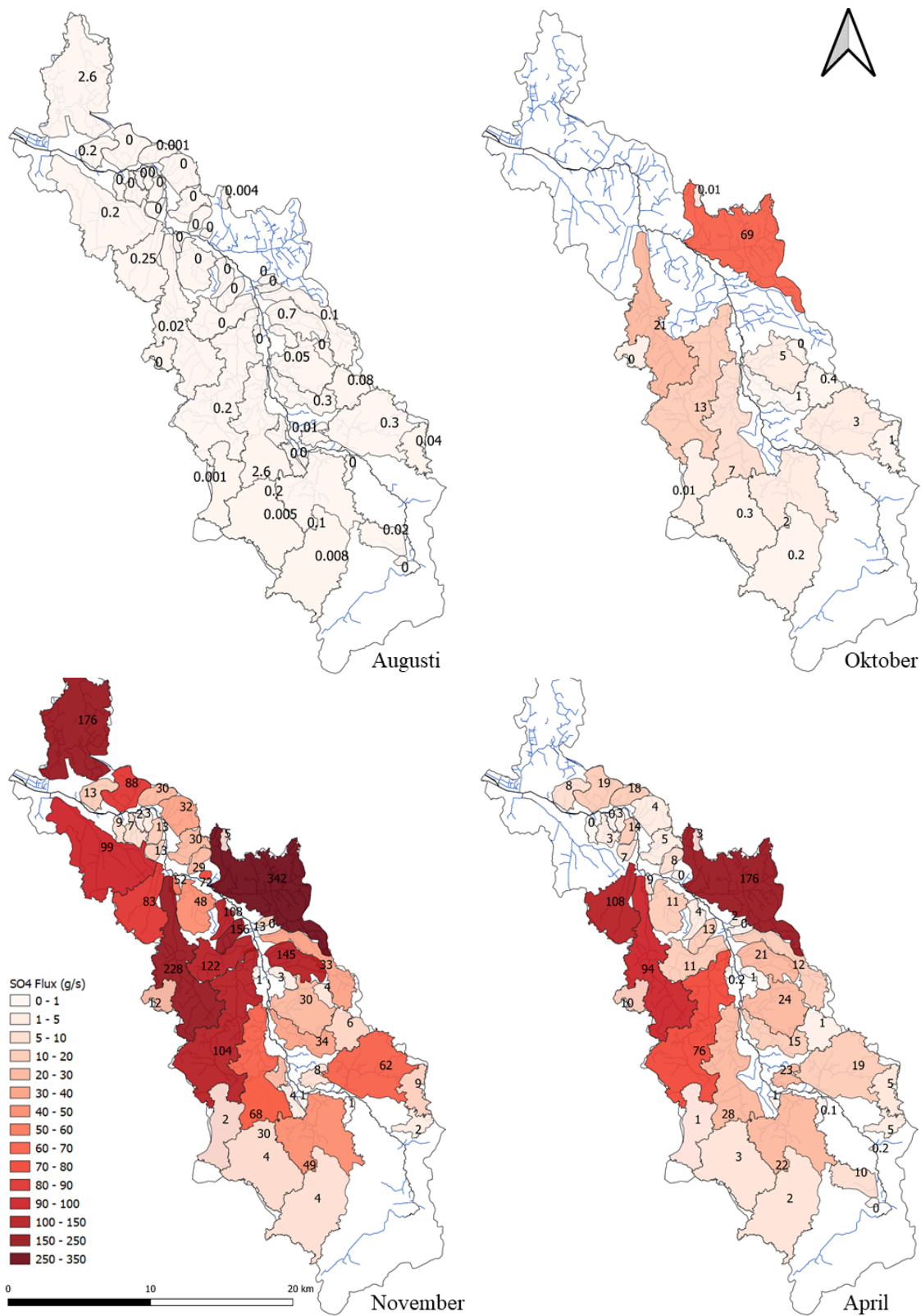
Sulfatmängden normaliserat mot avrinningsområdets storlek var låg i augusti (0–0,1 SO<sub>4</sub> g/s/km<sup>2</sup>; figur 29), men steg i oktober (0–2 SO<sub>4</sub> g/s/km<sup>2</sup>; figur 29) och var som högst i november (0–159 SO<sub>4</sub> g/s/km<sup>2</sup>; figur 29) och april (0–11 SO<sub>4</sub> g/s/km<sup>2</sup>; figur 29). I november vissa av de mindre delavrinningsområdena speciellt höga mängder sulfat per sekund (47–159 SO<sub>4</sub> g/s/km<sup>2</sup>; figur 29). Dessa förekom nedströms i avrinningsområdet och var relativt små i area (<5 km<sup>2</sup>; figur 29)



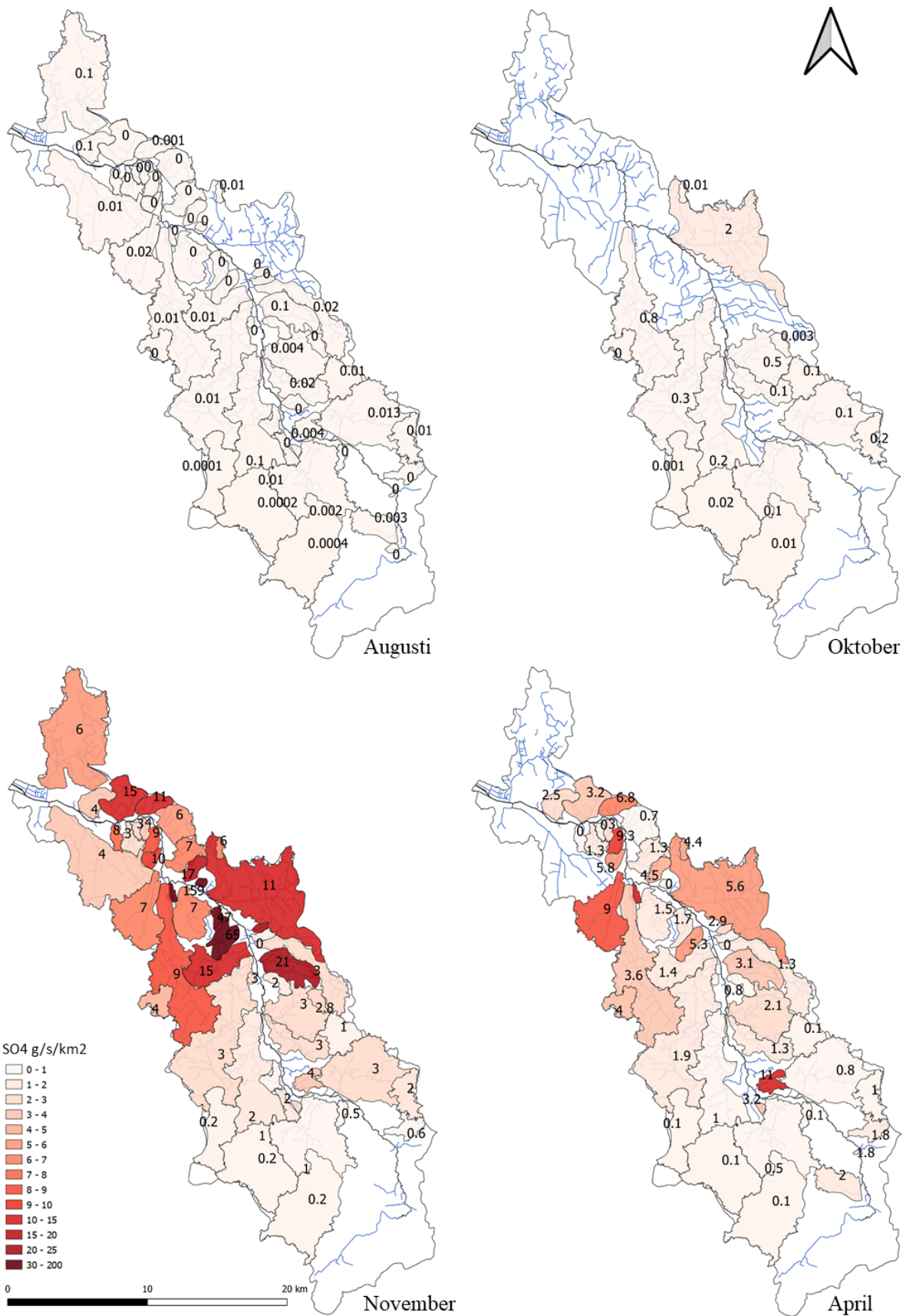
Figur 26. Medelhöjd över havet (m) mot sulfahalten (ppm). Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöden nedströms.



Figur 27. Sulfathalten (ppm) i delavrinningsområdena samt huvudfåran vid korresponderande provtagningstillfållen.



Figur 28. Sulfat (g/s) i delavrinningsområdena vid korresponderande provtagningstillfällena.



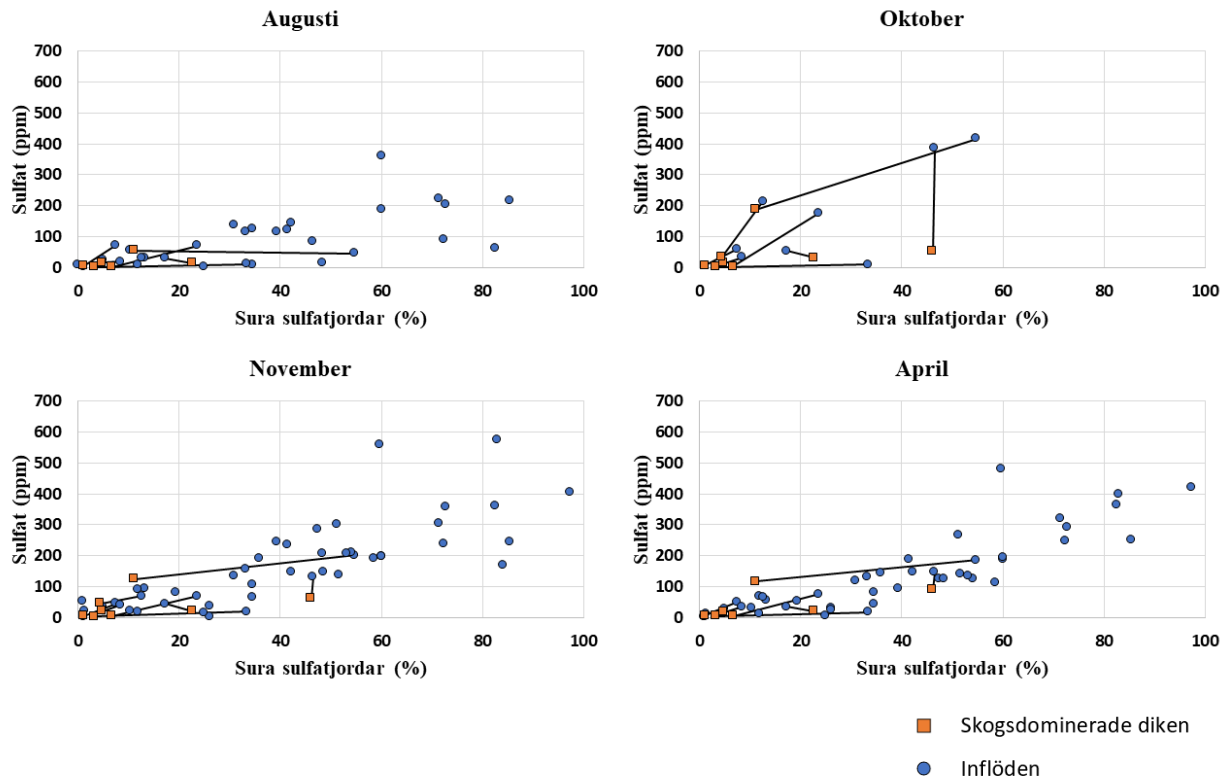
Figur 29. Sulfat (g/s/km<sup>2</sup>) i delavrinningsområdena vid korresponderande provtagningsstillfållen.

Andelen sura sulfatjordar och sulfathalten korrelerade vid varje provtagningstillfällen i delavrinningsområdena (figur 30). I april och november var korrelationen mellan sura sulfatjordar och sulfathalten tydligt med Spearman korrelation 0,89 i april och 0,84 i november. I augusti och oktober var korrelationen svagare med Spearman korrelation 0,68 i augusti och 0,48 i oktober.

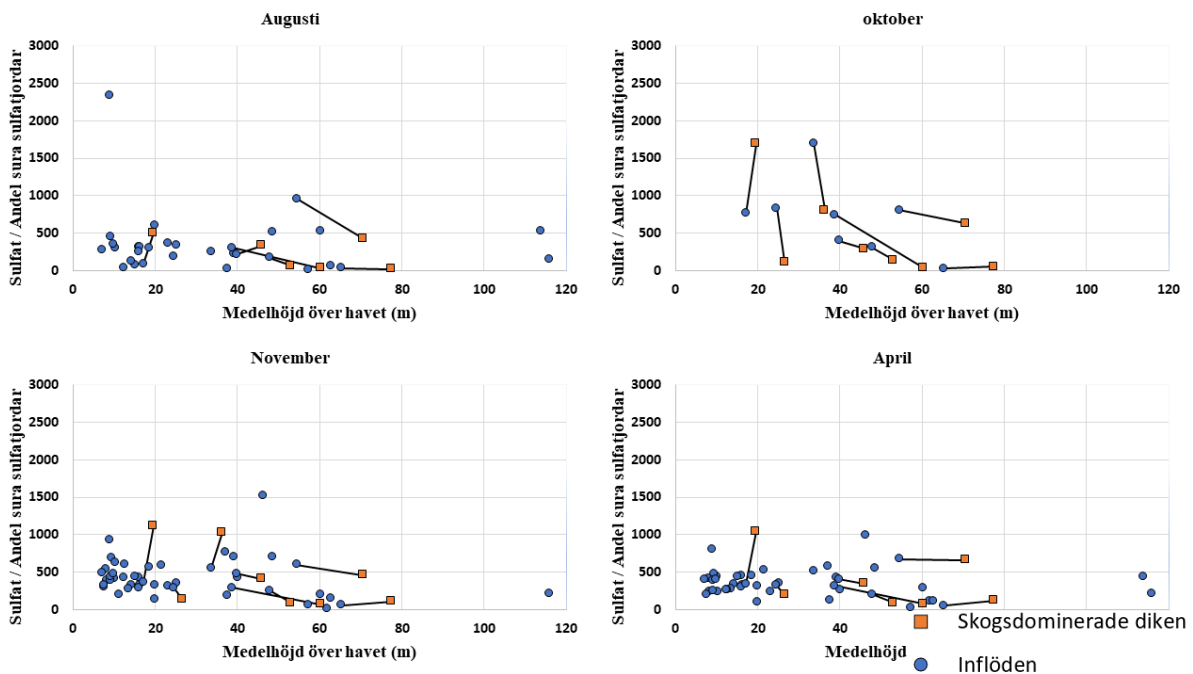
Med att jämföra sulfathalterna med var sura sulfatjordarna befinner sig förekom det variationer beroende på höjden över havet (figur 31). Vid alla provtagningstillfällen var sulfatkoncentrationerna i snitt högre per andel sura sulfatjordar i områden under 40 meter över havet (figur 31).

I oktober, november och april steg sulfat/klorid förhållandet ( $\text{SO}_4/\text{Cl}$ ) nedströms (figur 32). Vid alla provtagningstillfällen var sulfathalten högre jämfört med kloridhalten i hela avrinningsområdet. Halterna steg markant i delavrinningsområdena under 40 meter över havet och vid höga flödesförhållanden uppkom en större spridning i förhållandet.

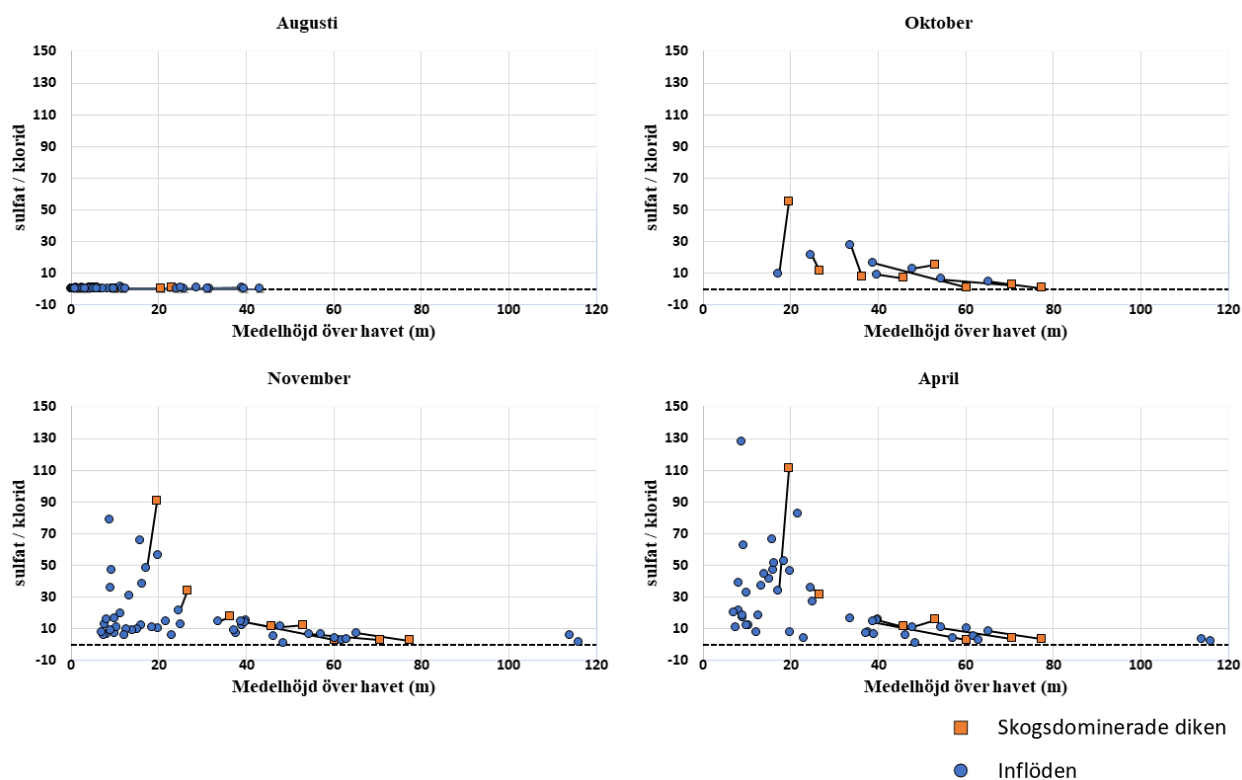




Figur 30. Andelen sura sulfatjordar (%) mot sulfathalten (ppm) i delavrinningsområdena i Toby å. Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöden nedströms.

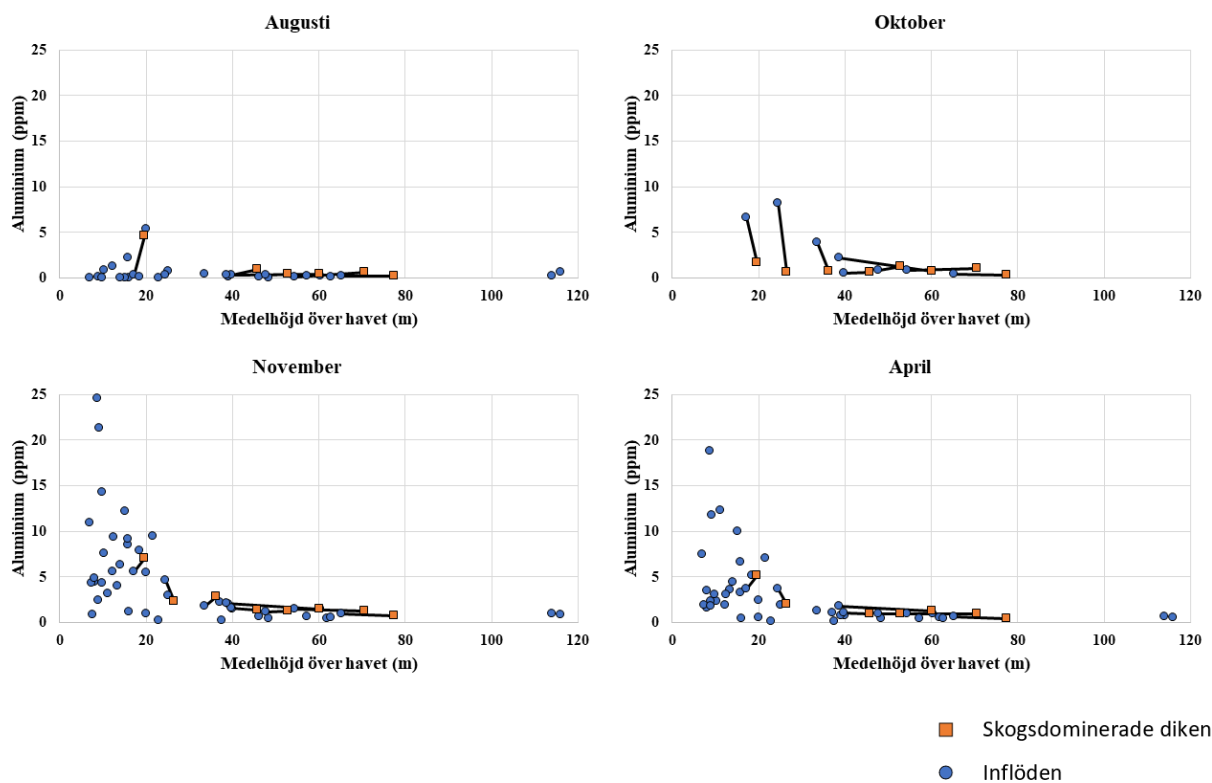


Figur 31. Sulfathalten normaliserad mot andelen sura sulfatjordar i delavrinningsområdena i Toby å. Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöden nedströms.



Figur 32. Sulfat/klorid förhållandet i delavrinningsområdena i Toby å. Vid den streckade linjen vid 0 var sulfat- och kloridhalten lika. Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöde nedströms.

Aluminiumhalterna i Toby å inflöden var som lägst i augusti och höga i oktober, november och april (figur 33). I oktober, november och april var aluminiumhalterna högre nedströms i delavrinningsområdena ifall medelhöjden över havet var under 40 meter (figur 33). Aluminiumhalterna var också relativt höga i områdena över 40 meter över havet med halterna 0,1–3 ppm även om skillnaden till områden under 40 meter över havet kunde vara stort (figur 33).



Figur 33. Aluminiumhalten (ppm) i delavrinningsområdena i Toby å. Skogsdominerade diken ( $n = 8$ ) är sammanbundna med linje till korresponderande inflöde nedströms.

## 6. Diskussion

Sura sulfatjordar orsakar miljöproblem genom att försura närliggande vattendrag och belasta dem med metaller och sulfat. För att kunna effektivt motverka dessa miljöskador, är det viktigt att förstå vattenkvalitetsvariationer inom delavrinningsområdena och hur de ändras i olika hydrologiska förhållanden. Från tidigare forskning har det visats att extremt torra somrar följt av kraftiga regn på hösten leder till de värsta vattenkvaliteterna i områden med sura sulfatjordar (Toivonen, 2013). Klimatförändringen kan förändra hydrologiska processerna i Norden genom att torrperioderna och kraftiga regnperioder blir vanligare. Dessa är de starkaste faktorerna som styr vattenkvaliteten i avrinningsområden med sura sulfatjordar (Saarinen 2010). Det finns behov till att förstå vad som styr vattenkvalitetsvariationerna och närmare förstå sambandet mellan vattenkvaliteten och ändringarna i hydrologin (Österholm 2008). I denna avhandling undersöktes hur olika variationer i hydrologin, markegenskaper samt sulfatförekomst

påverkade vattenkvaliteten i Toby å. Toby ås avrinningsområde och dess delavrinningsområden karakteriserades med medelhöjd över havet, lutning och andel sura sulfatjordar. Med hjälp av denna jämförelse var det möjligt att förutsäga vad som påverkade vattenkvaliteten vid de olika hydrologiska omständigheterna.

I Toby å förekom variationer i vattenkvaliteten både geografiskt i avrinningsområdet och mellan de olika provtagningstillfällena. När flödet började öka i oktober försämrades vattenkvaliteten markant i Toby å, speciellt under 20 meter över havet var andelen sura sulfatjordar ökade starkt. Försämringen i vattenkvaliteten syntes i förhöjda metall- och sulfathalter samt i sänkning av pH (figur 17, 18 och 19). Järn betedde sig motsatt från de andra metallerna med att andelen järn var högst uppströms i skogsdominerade områden och sjönk nedströms. Det kan förklaras med att järn förekommer i humusbunden form (Lahermo 1996) och utlöses från skogsområdena. I oktober var sulfathalterna och den elektrisk konduktiviteten som högst, däremot var pH lägre och metallhalterna högst i november och april när vattenflödet hade nått sin topp. Det kan ha berott på att i oktober aktiveras skogsområdena senare jämfört med inflödena (figur 14) som gör att utspädningen från skogsområdena ännu saknades. När flödet ökade i november blev sulfathalterna lägre (figur 19 och 27) men på grund av den starka sänkningen i pH blev de pH beroende metallerna mer mobila i november och april (figur 22, 24). Det syntes till exempel för aluminium (figur 33).

I augusti saknades den markanta försämringen i vattenkvaliteten vid 20 meter över havet. På sensommaren var sura sulfatjordarna i avrinningsområdet hydrologiskt inaktiva som ledde till att deras inverkan på vattenkvaliteten var minimal. I dessa förhållanden var det basflödet som styrde vattenkvaliteten i ån. Sulfat/klorid förhållandet sjönk efter 20 meter över havet i augusti som tyder på ökade kloridhalter (figur 20). Detta kan förklaras med att gammalt havsvatten rinner in från djupliggande sedimenten vilket ökade kloridhalten i ån (Beucher 2015). På hösten sjönk basflödets påverkan på vattenkvaliteten i Toby å genom att grundvattennivån steg och delavrinningsområdena blev hydrologiskt aktiva (figur 10). Då var det delavrinningsområdena som styrde vattenkvaliteten.

Genom att jämföra den specifika avrinningen för de olika provtagningstillfällena kan man uppskatta hur stor andel av flödet bestod av basflöde. I augusti var flödena som lägst i avrinningsområdet (figur 7) och basflödets andel i huvudfåran var som högst. Ifall man antar

att basflödets andel var 100 % i augusti och antar att basflödets andel hölls konstant vid de andra provtagningsstillfällena var det möjligt att uppskatta basflödets andel vid de andra provtagningsstillfällena. På detta sätt uppskattades basflödets andel vara 1/5 av hela flödet i oktober; 1/68 i november och 1/33 i april. Basflödets andel i huvudfåran blir väldigt liten vid högflödesförhållanden och påverkade vattenkvaliteten således minimalt i november och april.

Sambandet mellan andelen sura sulfatjordar och sulfathalterna var förväntat och likheten mellan sura sulfatjordars sannolikhetskarta och sulfathalterna var bra (figur 30). Andelen sura sulfatjordar hade beräknats utgående från sura sulfatjordarnas förekomstskarta (se kap.3 s. 9) som inte tar i beaktan de olika geokemiska variationerna som förekommer mellan sura sulfatjordar, som till exempel aciditetsmängden som anger försurningspotentialen alltså hur stor risk en identifierad sur sulfatjord utgör. Delavrinningsområdenas sura sulfatjordar över 40 meter över havet släppte ut mindre sulfat jämfört med sura sulfatjordar i områden under 40 meter över havet (figur 31). Skillnaden var dock liten och påverkade minimalt korrelationen mellan förekomsten av sura sulfatjordar och vattenkvaliteten (figur 19).

Precis som i huvudfåran, styrde andelen sura sulfatjordar vattenkvaliteten i delavrinningsområdena i oktober, november och april (figur 30). Andelen sura sulfatjordar korrelerade vid alla provtagningsstillfällen (Spearman korrelation; augusti: 0,68; oktober: 0,48; november: 0,84; april: 0,89). Korrelationen i oktober har möjligtvis försämrats på grund av färre provtagna provpunkter (figur 30). Det observerades att även om delavrinningsområden hade endast lite eller inga sura sulfatjordar hade de trots det relativt höga aluminiumhalter och ett lågt pH (figur 22, 24 och 33). Det orsakades av humussyror från podsol-jordarna från skogsområdena. Humussyrorna sköljdes ut från podsol-jordarna i de höga flödesförhållandena i november och april. Dessa humussyror band i sig järn och sänkte pH som igen mobiliserade aluminium (Lahermo 1996). Trots att aluminiumhalterna var överraskande höga i dessa skogsmarker belastar sura sulfatjordarna mångfaldigt mera aluminium i Toby å. Humusen från skogsområdena bidrar däremot till att metallerna från sura sulfatjordar för det mesta blir mindre biotillgängliga (Nystrand 2013).

Jämförelsen i både specifika avrinningen (figur 14) och lutningen (figur 15) mot medelhöjden över havet visade att specifika avrinningen varierade mera i områden med låg lutning (under

1,5 grader) i november och april. Liknande variation syntes i jämförelsen mellan specifika avrinningen och finkorniga jordarter där det förekom större variationer i flödet ifall andelen finkorniga jordarter var över 40 % (figur 16). Dessa stora variationer i flödet kan ha orsakats av täckdikning av jordbruksmarker för att effektivera dräneringen. Ökad lutning orsakade inte ökad specifik avrinning i området.

I specifika avrinningen mellan provpunkterna med skogsområdena och inflödena förekom ett tydligt mönster i oktober var skogsområdena nedströms var hydrologiskt inaktiva (figur 14). Detta tyder på att hela avrinningsområdet inte var hydrologiskt aktivt i oktober utan endast områdena närmast huvudfåran. Hydrologiska inaktiviteten i skogsområden nedströms kan ha påverkat de höga sulfatförhållandena i oktober på grund av saknad utspädning från skogsområdena. Dessa skogsdominerade delavrinningsområden nedströms var dock små i area, vilket kan ha varit orsaken till inaktiviteten och inte läget geografiskt (figur 11 och 12). Med att skogsmarkernas specifika avrinning höjdes i november och april (figur 13 och 14) ökades också utspädningen av vattnen från sura sulfatjordar.

Sulfatutsläppen per kvadratkilometer varierade markant mellan delavrinningsområdena. Områdena som släppte ut mest  $\text{SO}_4/\text{s}/\text{km}^2$  var relativt små i area ( $< 5 \text{ km}^2$ ) med hög andel sura sulfatjordar ( $>90 \%$ ) och saknar totalt utspädning från skogsmarker. Dessa delavrinningsområden släppte ut enorma mängder  $\text{SO}_4/\text{s}/\text{km}^2$  jämfört med resten av delavrinningsområdena och belastade ån enormt jämfört med deras area. Belastningen var stor på grund av att dessa områden hade både höga flöden och sulfathalter (figur 29) samt saknade utspädning från skogsområden. Dessa små delavrinningsområden belastade Toby å med stora mängder aciditet, sulfat och tungmetaller i de höga flödesförhållandena. Belastningen var betydligt starkare i november jämfört med april som kan förklaras med höga flödestoppen i novemberprovtagningen.

## 7. Slutsatser

Vattenkvaliteten och flödet i Toby å varierade mellan de olika provtagningstillfällena som representerar olika hydrologiska omständigheter. På sommaren var vattenkvaliteten bra vid de låga flödesförhållandena och försämrades radikalt till hösten när flödet ökade. Vattenkvaliteten var starkt korrelerad med andelen sura sulfatjordar. En försämring av vattenkvaliteten kan observeras vid områdena under 40 meter över havet och en markant försämring vid områdena under 20 meter över havet. Vid 20 meter över havet började andelen sura sulfatjordar stiga kraftigt från 9 % till 29 % vid åmynningen. Det var tydligt att sura sulfatjordarna försämrade vattenkvaliteten i Toby å i oktober, november och april i de höga flödesförhållandena. I dessa förhållanden sänktes pH och sulfat- och metallhalterna höjdes märkbart i områden påverkade av sura sulfatjordar. Effekten var tydligt kopplad till förekomsten av sura sulfatjordarna både i Toby å och i delavrinningsområdena. Lågt pH förekom också i skogsmarker som var minimalt påverkade av sura sulfatjordar i oktober, november och april. Det låga pH-värdet i skogsområdena orsakades av sura podsol-jordar som sköljer ut humussyror från skogsområdena. I de finkorniga jordarterna som utgör åkermarker varierade flödet mera än i skogsområdena. Lutningen i delavrinningsområdena verkade inte höja flödet. Sulfathalten var högst i oktober. Däremot var metallhalterna högre och pH lägre i november och april när hela avrinningsområdet blivit hydrologiskt aktivt. På grund av sura sulfatjordar och dålig buffring från skogsområdena sjönk pH i hela avrinningsområdet. Delavrinningsområdena med största belastning var relativt små delavrinningsområden (<5 km<sup>2</sup>) nedströms. Dessa områden släppte ut enorma mängder syra och tungmetaller i jämförelse med deras area och bestod så gott som enbart av sura sulfatjordar.

## Erkännanden

Tack till GTK, Miriam Nystrand och alla som deltog i de intensiva och ibland vädermässigt utmanande provtagningarna. Riktat också ett tack till Peter Österholm för handledning och sakkunnighet. Vill även tacka Fanny som stöttat mig oändligt under mina studier och skrivandet av denna avhandling.

## Litteraturförteckning

**Andriessse, W., Van Mensvoort, M.E.F.** (2005). Acid sulfate soils: distribution and extent. I: Lal, R. (red.). *Encyclopaedia of Soil Science*, Marcel Dekker, Inc, New York, ss. 14-19.

**Beucher, A, Fröjdö, S, Österholm, P, Auri, J, Martinkauppi, A & Edén, P** (2015). Assessment of acid sulfate soil mapping utilizing chemical indicators in recipient waters. *Geological Society of Finland*, vol. 87, pp. 5–23.

**Boman, A.** (2008). *Sulphur dynamics in boreal potential and actual acid sulphate soils rich in metastable iron sulphide*. Diss. Åbo Akademi. 70 s.

**Ervio, R.** 1975. Kyrönjoen vesistöalueen rikkipitoiset viljelysmaat. Summary: Cultivated sulphate soils in the drainage basin of river Kyrönjoki. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 47: 550-561.

**Nystrand, M. I., Österholm, P.,** (2013). Metal species in a Boreal River system affected by acid sulfate soils. *Applied Geochemistry* 31, 133-141.

**Geopacks, the geography specialists.** Operation Manual, Stream Flowmeter (MFP51 and MFP126)



**Korhonen, J.** (2007) Suomen vesistöjen virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelut. Suomen Ympäristö 45 (2007). Finlands miljöcentral, 120 s.

**Lahermo, P., Väänänen, P., Tarvainen, T., Salminen, R.** (1996). Suomen geokemian atlas, osa 3: Ympäristögeokemia – purovedet ja sedimentit. Geological Survey of Finland, 149 s.

**Luther, G.W.** 1991. Pyrite synthesis via polysulfide compounds. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55 (10), 2839–2849.

**Närings-, trafik- och miljöcentralen** (2021) Laihianjoen veistöalueen tulvariskien hallintasuunnitelma vuosille 2022-2027. Laihianjoen vesistöalueen tulvaryhmä. Raportteja 47 (2021), 145s.

**Palko, J.** (1994). Acid sulphate soils and their agricultural and environmental problems in Finland. PhD Thesis, University of Oulu, Finland, 58 pp.

**Rickard, D., Luther, G.W.** (1997). Kinetics of pyrite formation by the H<sub>2</sub>S oxidation of iron (II) monosulfide in aqueous solutions between 25 and 125 °C: the mechanism. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61 (1), 135–147.

**Rickard, D.** 1975. Kinetics and mechanism of pyrite formation at low temperatures. *Am. J. Sci.* 275 (6), 636–652.

**Saarinen, T., Vuori, K.M., Alasaarela, E., Klove, B.** (2010). Long-term trends and variation of acidity, CODMn and colour in coastal rivers of Western Finland in relation to climate and hydrology. *Sci. Total Environ.* 408, 5019–5027.

**Sutela, T., Vuori, K.-M., Louhi, P., Hovila, K., Jokela, S., Karjalainen, S. M., Keinänen, M., Rask, M., Teppo, A., Urho, L., Vehanen, T., Vuorinen, P. J., Österholm, P.** (2012).

Happamien sulfaattimaiden aiheuttamat vesistövaikutukset ja kalakuolemat. Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 14/2012. 51 s.

**Toivonen, J. Österholm, P. Fröjdö, S.** (2013). Hydrological processes behind annual and decadal-scale variations in the water quality of runoff in Finnish catchments with acid sulfate soils. *Journal of Hydrology* 487 (2013) 60-69.

**Wang, L. & H. Liu** (2006): An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 20, No. 2: 193-213.

**Åström, M., Björklund, A.** (1997). Geochemistry and acidity of sulphide-bearing postglacial sediments of western Finland. *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 19, s. 155-164.

**Österholm, P. Åströms, M.** (2004). Quantification of current and future leaching of sulfur and metals from Boreal acid sulfate soils, western Finland. *Australian Journal of Soil Research*, 2004, vol 42, s. 547-551.

**Österholm, P. Åströms, M.** (2008). Meteorological impacts on the water quality in the Pajuluoma acid sulphate area, W. Finland. *Applied Geochemistry* 23 (2008) s. 1594-1606.

#### **Elektroniska källor:**

**Geologiska forskningscentralen** (2010) Maaperä 1:200 000 (maalajit) Hakku-nedladdningstjänst.

<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search> (Hämtad 22.4.2021)

**Geologiska forskningscentralen** (2009-2022). Bergartskarta 1:200 000. Hakku-nedladdningstjänst.

<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search> (Hämtad 24.3.2022)

**Geologiska forskningscentralen** (2018). Happamat sulfaattimaat 1:250 000. Hakku-nedladdningstjänst.

<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search> (Hämtad 22.4.2021).

**Finlands miljöcentral** (2018) Corine maanpeite 2018. Latauspalvelu LAPIO nedladdningstjänst.

<https://paikkatiето.ymparisto.fi/lapio/latauspalvelu.html> (Hämtad 22.4.2021)

**Finlands miljöcentral**. Hertta-databas. Flödesdata Toby å. Hämtad 30.4.2021

**Lantmäteriverket** (2008–2020). Höjdmodellkarta 2 m x 2m resolution med 30 cm höjdintervall. Paituli-nedladdningstjänst.

<https://paituli.csc.fi/download.html> (Hämtad 22.4.2021).

**O. Conrad, V. Olaya, V. Wichmann (c) 2001-2022**. SAGA-GIS Terrain Analysis – Hydrology – Upslope Area.

**O. Conrad (c) 2001, V. Wichmann (c) 2003**. SAGA-GIS Terrain Analysis – Preprocessing – Fill Sinks (Wang & Liu)