

# Långtidseffekter av underbevattning med suspensioner av kalk, kalciumhydroxid och torv i sura sulfatjordar

Pro gradu-avhandling i geologi och mineralogi

Handledare: Peter Österholm

Fakulteten för naturvetenskaper och teknik

Åbo Akademi, hösten 2022

Fanny Ahonen

## Abstrakt

Sulfidrika leror kan hittas runtom i världen längs kustområden i bl.a. Australien och Östersjön. Intensiv dränering gör att grundvattennivån sjunker, som i sin tur leder till att dessa sulfidrika leror oxideras och sura sulfatjordar bildas. Sura sulfatjordar har lågt pH (>4), hög aciditet och höga upplösta metallhalter som rinner ut i vattendragen och orsakar en stor miljöbelastning, bl.a. fiskdöd. Sulfidrika jordar är kända för att vara bördiga jordbruksjordar och det är viktigt att hitta en lösning för att minska på de höga metallhalterna och aciditeten som lakas ur jorden.

Denna pro gradu-avhandling fokuserar på PRECIKEM-projektet som undersöker effekten av precisionsbehandlingar på sura sulfatjordar och dess påverkan på miljön. Projektets mål är att utveckla en metod som kan minska på de negativa effekterna sura sulfatjordar har på vattendragen och hitta en lösning för att kunna använda sura sulfatjordar som odlingsmarker på ett mer miljömässigt hållbart sätt. Studieområdet befinner sig i Risöfladan utanför Vasa och består av 12 delfält som via täckdikensrören på ca 1,3 m djup injiceras med suspensioner av kalciumkarbonat och kalciumkarbonat med torv. Detta möjliggör behandling av de hydrologiskt aktiva makroporerna i det suraste markskiktet som är det mest avgörande för vattenkvaliteten. I denna avhandling var syftet att se precisionsbehandlingarnas effekter på pH, aciditet, elektrisk konduktivitet, Cl, S och metallerna (Al, Ca, Cd, Co, Cu, Zn, Ni och Fe) i dräneringsvattnet under studieperioden 2017–2019.

Precisionsbehandlingarna med kalciumkarbonat och kalciumkarbonat med torv höjde pH, sänkte metallhalterna men påverkade inte aciditeten. Tillsatsen av torv i kalciumkarbonat-behandlingen höjde endast pH-värdet och pH hölls högre en längre tid. Behandlingarna hade en tydlig effekt som kunde ses i upp till fyra år. Bättre vattenkvalitet över en längre tid kräver upprepning av behandlingen med jämna mellanrum.

**Nyckelord:** Geokemisk precisionsbehandling, underbevattning, metaller, sura sulfatjordar, Risöfladan

# Innehållsförteckning

1. Inledning .....	1
2. Bakgrund.....	3
2.1. Sura sulfatjordar .....	3
2.1.1. Sura sulfatjordars miljöpåverkan .....	5
2.2. Förebyggandet av uppkomsten av sura sulfatjordar .....	6
2.2.1. Reglerad dränering.....	6
2.2.2. Installation av plastfilm.....	6
3. Studieområde .....	7
4. Material och metoder .....	9
4.1. Behandlingar .....	9
4.2. Provtagning och analys .....	11
5. Resultat .....	12
5.1 pH.....	12
5.2 Aciditet .....	15
5.3 Elektrisk konduktivitet .....	17
5.4 Svavel .....	20
5.5 Klor.....	22
5.6 S/Cl.....	25
5.7 Aluminium.....	28
5.8 Kalcium .....	30
5.9 Ca/Sr.....	33
5.10 Kadmium .....	36
5.11 Kobolt.....	38
5.12 Koppar .....	41
5.13 Zink .....	44
5.14 Nickel .....	46
5.15 Järn .....	49
5.16 Tvåvärt järn .....	52
5.17 Andelen tvåvärt järn .....	55
5.18 Kalciumbudget .....	58
5. Diskussion.....	59
6. Slutsatser.....	68
7. Erkännande .....	69

Litteraturförteckning .....	69
-----------------------------	----

# 1. Inledning

När sulfidrika leror kommer i kontakt med syre dvs. oxideras sjunker pH och aciditet frigörs och sura sulfatjordar bildas. Oxidationen har skett p.g.a. intensiv dränering av jordbruksmarker och i samband med dräneringen kan syre tränga sig i marken och därmed oxideras (Sundström m.fl. 2002). Från de sura sulfatjordarna urlakas höga halter metaller (Al, Cd, Co, Cu, Ni och Zn) och aciditet som leds till vattendrag och kustnära områden. För sura sulfatjordar är  $\text{pH} < 4$  (Österholm & Åström 2004).

Sulfidjordar är i orört tillstånd inte en miljöfara, men i och med dränering av jordbruksmarker oxideras de och frigör aciditet och metaller som rinner ut i vattendragen och blir en oerhörd belastning för miljön (Toivinen & Österholm 2011). Konsekvenserna har varit sura förhållanden och höga metallkoncentrationer som bland annat lett till enorm fiskdöd (Sutela m.fl. 2012).

Genom att använda reglerad dränering och underbevattning kan grundvattennivån kontrolleras och därmed minska på sulfidlerornas oxidering under torra perioder, men ger också möjligheten att sänka grundvattennivån under våta perioder. Installering av plastfilm längs kanterna av ett fält förhindrar passering av vatten och fältet blir därmed hydrologiskt isolerat. Detta görs ner till 1,8 m djup (Österholm m.fl. 2015).

I studieområdet har man tidigare med hjälp av ytkalkning försökt minska på surheten, men detta har inte lyckats eftersom kalken stannar kvar i markens plöjskikt (Åström m.fl. 2007). År 2010 inleddes PRECIKEM-projektet där avsikten var att möjliggöra en direkt behandling av det mest kritiska markskiktet genom att använda precisionsbehandlingar bestående av kalciumkarbonat-, kalciumhydroxid- och torvsuspensioner som injicerades i dräneringssystemet. Under studieperioden 2017–2019 bestod behandlingarna av kalciumkarbonat- och torvsuspensioner, där torv användes för första gången. Behandlingarna är specifikt riktade mot de hydrologiskt aktiva markporerna i det kritiska markskiktet, där det metallrika och sura vattnet från de sura sulfatjordarna transporteras genom innan det når vattendragen (Wu m.fl. 2015).

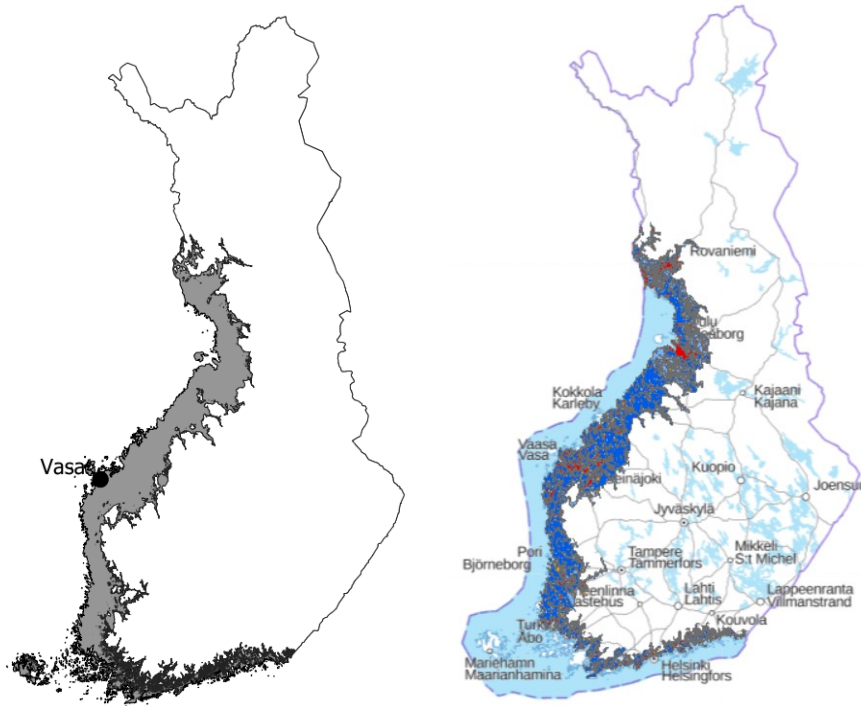
Projektets mål är att med kemiska metoder minska på sura sulfatjordars negativa miljöbelastning och samtidigt kunna fortsätta använda de bördiga jordarna för odling. Fokus ligger på dräneringsvattnets kvalité var den negativa miljöbelastningen syns innan dräneringsvattnet förs vidare till vattendragen. Projektet är viktigt från både jordbruks- och miljösynvinkel. Avhandlingens mål är att utvärdera vilken effekt behandlingarna har och hur lång effekt de har. Hypotesen är att precisionsbehandlingarna för en längre period höjer pH i de hydrologiskt aktiva markporerna och därmed minskar på den mikrobiologiska oxidationen samt immobiliserar metaller i marken innan de når vattendragen. Detta förväntas synas som högre pH samt lägre aciditet, svavel- och metallhalter i dräneringsvatten.

## 2. Bakgrund

### 2.1. Sura sulfatjordar

Längs den finländska kusten finns finkorniga sulfidrika sediment som huvudsakligen har formats under anoxiska förhållanden i Littorinahavets botten för 8000–3000 år sedan (Toivonen & Österholm 2011).

Sulfatjordar är utspridda över hela världen i områden med låga kustområden bl.a. i Australien, Asien och Europa. De största områdena med sura sulfatjordar i Europa är över 1000 km<sup>2</sup> och finns längs Finlands hela kustlinje, främst i Österbotten (Beucher m.fl. 2013; Boman m.fl. 2008). Stor del av sulfatjordarna i Finland har inte varit i kontakt med syre och kallas därför för potentiella sura sulfatjordar (Wu m.fl. 2015). Potentiella sura sulfatjordar är jordar som innehåller sulfider och har inte oxiderats och därför har ingen aciditet bildats (Boman m.fl. 2008). När de potentiella sura sulfatjordarna oxideras blir jordarna sura sulfatjordar, men kan skyddas från oxidation genom att hållas under grundvattennivån (Wu m.fl. 2015; Boman m.fl. 2008). De potentiella sura sulfatjordarna har en massiv struktur och har en mörkgrå eller svart färg (Erviö 1975; Boman m.fl. 2008).



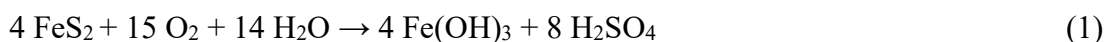
Figur 1. Till vänster: en karta över Finland med Littorinahavets f.d. havsbotten i grått. Den svarta bollen markerar studieområdets läge. Till höger: en karta över områden med potentiella sulfatsjordar och sura sulfatjordar i Finland (Geologiska forskningscentralen, 2021).

Den isostatiska landhöjningen lyfter upp sulfidrika sediment över havsytan från anoxiska havsförhållanden till potentiellt oxiska förhållanden (Toivonen & Österholm, 2011). I centrala och norra Skandinavien kan den isostatiska landhöjningen vara upp till 9 mm per år (Johansson m.fl. 2004; Eronen 2005). Därför kan sura sulfatjordar idag finnas upp till 100 m över havsnivån. Den största delen av sura sulfatjordar finns oftast på 0–45 m höjd över havsnivån (Erviö, 1975). I och med att det efter 1950-talet blivit allt vanligare med dränering av fält och användning av jordbruksmaskiner, har grundvattennivån sjunkit som tillåter syre att trängas in i jorden och oxiderar sulfider (Österholm m.fl. 2005).

När sulfidrika sediment oxideras blir sulfid till sulfat genom kemiska reaktioner (Erviö 1975). Svavel i sedimenten förekommer som järnsulfid som vanligtvis är i form av pyrit ( $\text{FeS}_2$ ). När sulfidjorden oxideras sker kemiska och biokemiska reaktioner som leder till aciditet. Svavel och järn i sedimenten oxideras till svavelsyra ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) och järnhydroxid ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) (reaktion 1) (Boman 2010). Syran gör jorden sur och pH-värdet



i jorden sjunker oftast till omkring 4,5 eller lägre (Erviö, 1975). Oxidationen av pyrit enligt Boman m.fl. 2010:



Identifiering av sura sulfatjordar kräver normalt provtagning ner till 1,5–2 m djup för att identifiera både det sura oxiderade jordlagret och det underliggande orörda sulfidlagret.

En potentiell sur sulfatjord har ett pH-värde som sjunker under 4,0. Pseudosulfatjord är ett förslag till en ny term för jordar med betydande aciditet (pH 4,0–4,5), metallakning och som har en hög produktion av syra till följd av oxidation av sulfider, men som inte klassas som sulfatjordar (Visuri m.fl. 2021). Termen uppnår inte internationella kriterier. Egentliga sura sulfatjordar har pH <4,0 och sulfiden som jorden innehöll har omvandlats till svavelsyra och järnet till järnoxider (Boman m.fl. 2008).

När sulfiderna i sura sulfatjordar oxiderar bildas det svavelsyra som försurar både jorden och vattnet. Vid försurning av jord och vatten sjunker pH till under 5–6 även i den översta matjorden, pga. kapillär uppstigning av surt vatten, som förorsakar problem för växtodling. Sura sulfatjordar är kända i Finland för att vara goda och bördiga odlingsmarker, men det kräver att matjorden kalkas kraftigt. Kalkningen av matjorden påverkar endast matjordens pH och har ingen inverkan i den underliggande sura jorden eller vattnets aciditet (Åström m.fl. 2007).

### 2.1.1. Sura sulfatjordars miljöpåverkan

Potentiellt giftiga metaller från sura sulfatjordar kan orsaka stora miljöproblem (Åström m.fl. 2007). Höga metallkoncentrationer av bl.a. Al, Cd, Co, Mn, Ni och Zn urlakas från sura sulfatjordar (Sundström m.fl. 2002). Försurningen av sulfatjordar orsakar förekomsten av metaller i löslig form, som frigörs lätt till vattendrag. Detta sker dock inte när sulfidjorden är vattenmättad. Kortvariga försurningar i vatten kan förorsaka fiskdöd då aluminium och andra giftiga element fastnar i fiskars andningsorgan. Långvariga försurningar kan leda till förändringar i vattnets ekosystem (Dent & Pons 1995).

Utanför Vasa befinner sig Söderfjärden som är ett provfält för sura sulfatjordar, där den årliga kväveoxidulbelastningen ( $N_2O$ ) uppskattades vara två eller till och med tre gånger större jämfört med finska torvmarker. Mikroberna i matjorden frigör kväve i organisk form och gör kvävet till en oorganisk form, ammoniumkväve ( $NH_4^+-N$ ) och nitratkväve ( $NO_3^- -N$ ). Kvävet kan frigöras från marken till luften som molekylärt kväve ( $N_2$ ) eller som kväveoxidul ( $N_2O$ ), eller så kan det sköljas ut till vattendrag som nitrat ( $NO_3^-$ ). Växthusgaser frigörs från sura sulfatjordar som kväveoxidul ( $N_2O$ ) (Yli-Halla m.fl. 2020).

## 2.2. Förebyggandet av uppkomsten av sura sulfatjordar

### 2.2.1. Reglerad dränering

Reglerad vattenhantering är en viktig faktor när det kommer till sura sulfatjordar. Finland har ett varierande klimat som orsakar varierande grundvattennivåer under olika årstider. För att undvika en djup oxidation under torra sommarmånader eller för att reglera avrinningsvatten under vår och höst har man sedan 90-talet använt sig av reglerad dränering för att hålla grundvattennivån på en hög nivå (Rosendahl & Wikman 2009; Österholm m.fl. 2015). Genom att övervaka grundvattennivån kontrollerar man på samma gång hur mycket syre som tränger sig in i marken och bildning av nya aktiva sura sulfatjordar (Österholm m.fl. 2005). Reglerad dränering minskar sköljning av starka koncentrationer av metaller och aciditet i vattendrag (Rosendahl & Wikman 2009). Grundvattennivån på jordbruksmarker kontrolleras via reglerbrunnar och övervakas via grundvattenrör med hjälp av en ”antenn” med en flottör var vattennivån kan avläsas (Österholm m.fl. 2015). Vid tillgång till vatten, ex. en närliggande å eller bäck, kan dräneringssystemet också användas för underbevattning, där vatten pumpas in i dräneringssystemets rör för att höja grundvattennivån under torra och varma perioder då grundvattennivån sjunker (Rosendahl & Wikman 2009).

### 2.2.2. Installation av plastfilm

Genom installation av plastfilm kan man utföra en hydrologisk isolation, som hindrar vattnets rörelse förbi reglersystemet. Plastfilmen installeras vertikalt ner till ca 1,8 m

djup för att hindra att vatten ska kunna passera under sulfidjorden (Rosendahl m.fl. 2012).

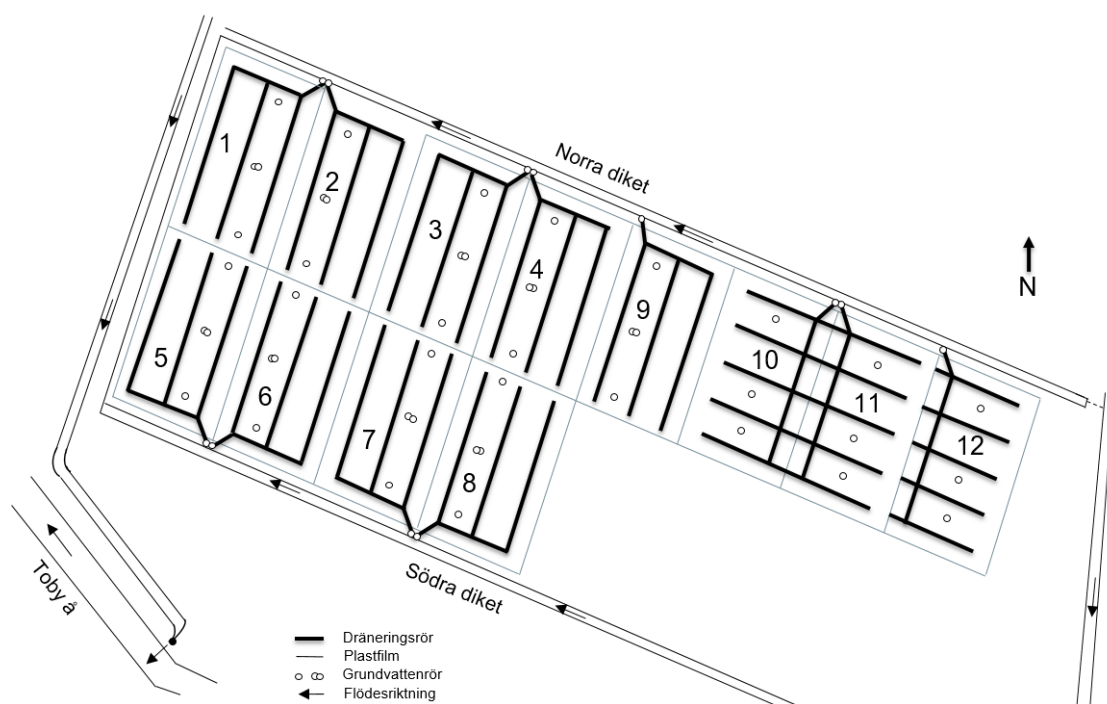
### 3. Studieområde

Studieområdet för PRECIKEM-projektet befinner sig i Risöfladan (63°01'45,8"N 21°39'54.9"E), ca. 8 km söder om Vasa, Österbotten (Figur 1). I slutet av 1950-talet blev Risöfladan odlingsmark, efter att ha varit vattentäkt. Det överflödiga vattnet pumpades bort till närliggande Toby å, vilket görs än idag. Toby å rinner ut till Bottniska viken. Området befinner sig idag 0,5 m under havsytan (Dalhem m.fl. 2019). Ett dräneringssystem installerades 1969 på 1,1 m djup (Boman m.fl. 2008). Studieområdet består av 12 delfält, alla har en yta på 1,0 ha (figur 2). Alla delfält, utom delfält 2, är hydrologiskt separerade med plastfilm som har installerats på kanten till det öppna diket, 0,4–1,9 m under markytan. Varje delfält har en kontrollbrunn. Delfälten 1–9 har egna identiska täckdikningssystem med tre dräneringsrör på ca 1,3 m djup. I delfälten 10–12 som byggdes 2016, installerades extra injiceringsrör i kontrollbrunnarna för att åstadkomma ett jämnare tryck och för att förbättra spridningen av suspensionerna till täckdikningssystemet (figur 4).

Varje delfält har tre grundvattenrör för övervakning och provtagning installerade på 2,5 m djup (Rosendahl m.fl. 2012). I dessa rör finns det flottörer där en ”antenn” har fastgjorts. Flottören och ”antennen” ger en snabb översikt över grundvattennivån i delfältet. I mitten av fälten monitoreras dessutom grundvattenytan med en logger. Grundvattennivån höjdes manuellt genom underbevattning med hjälp av kontrollbrunnen. För att sänka grundvattennivån sänktes dräneringsnivån i kontrollbrunnen för ett naturligt flöde i dräneringsbrunnarna (Dalhem m.fl. 2019). Vid behandling pumpas vatten från Toby å via kontrollbrunnen till dräneringsrören i delfälten.

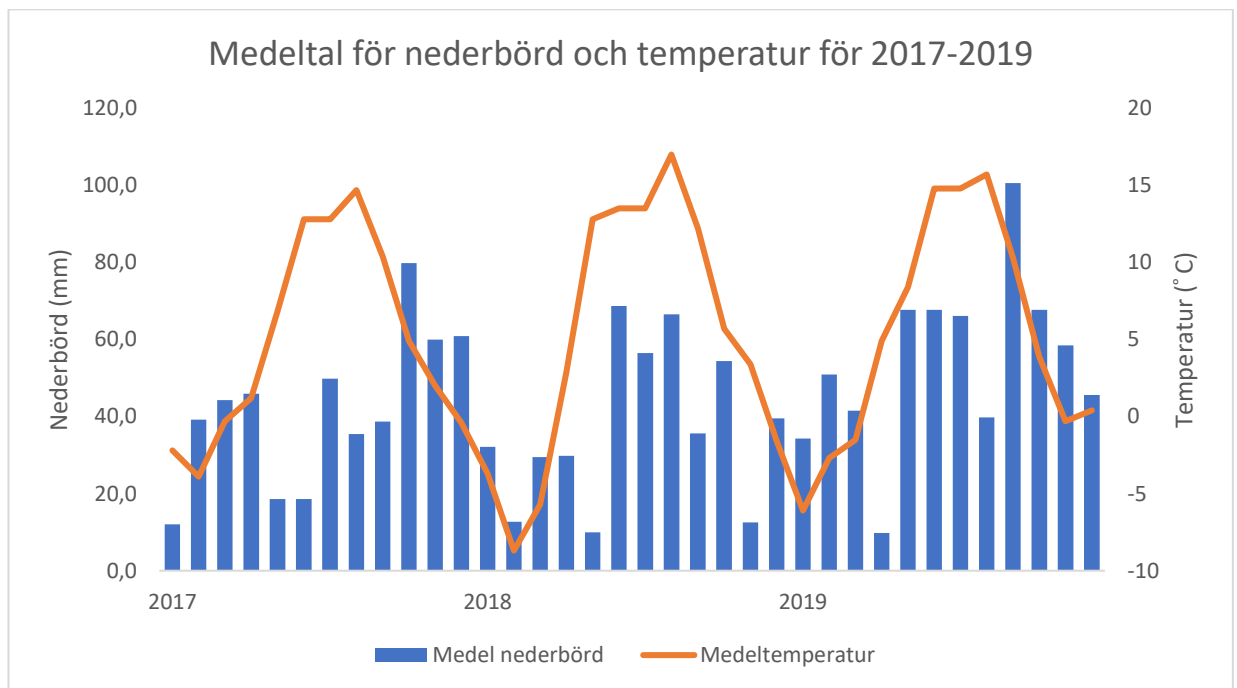
Studieområdet är indelat i den ”norra” och den ”södra” delen. Delfält 1, 2, 3 och 4 samt 9, 10, 11 och 12 finns i den norra delen av området och gränsar mot det norra dräneringsdiket. Delfält 5, 6, 7 och 8 finns i den södra delen av området och gränsar mot det södra dräneringsdiket (figur 2).

Delfälten på den norra delen har delfält 4 som referensfält och den södra delens delfält har delfält 7 som referensfält. Referensfälten har inte behandlats för att kunna jämföras med de behandlade delfälten. Delfält 2 är ett referensfält för alla delfält och har ingen plastfilm mot norra dräneringsdiket som möjliggör undersökning av eventuellt bypassflöde förbi reglersystemet.



Figur 2. Figur över PRECIKEM-projektets studieområde på Risöfladan, Vasa. Simplifierad version av Dalhem m.fl. 2019. Studieområdet är indelat i 12 delfält som har individuella dräneringssystem och är isolerade från varandra med plastfilm. Undantagsvis har delfält 2 ingen plastfilm och är öppet mot det norra diket. Varje delfält har tre grundvattenrör samt en kontrollbrunn.

Studieområdet befinner sig i den tempererade klimatzonen där det årliga medeltalet för temperaturen är 5,1 °C, med fyra månader (december till mars) under 0 °C (figur 3). Det årliga medeltalet för nederbörden är 534 mm, med högst nederbörd i oktober (67 mm). Det lägsta årliga medeltalet för nederbörden under studieperioden var år 2018 (447 mm). Medeltemperaturen för sommarperioden 2018 var som högst under hela studieperioden (18 °C). Största delen av nederbörden kommer på hösten och även i studieområdet var fallet så, men undantagsvis var nederbörden också hög våren 2018 och 2019 (maj-juli) (figur 3; Meteorologiska institutet, 2022).



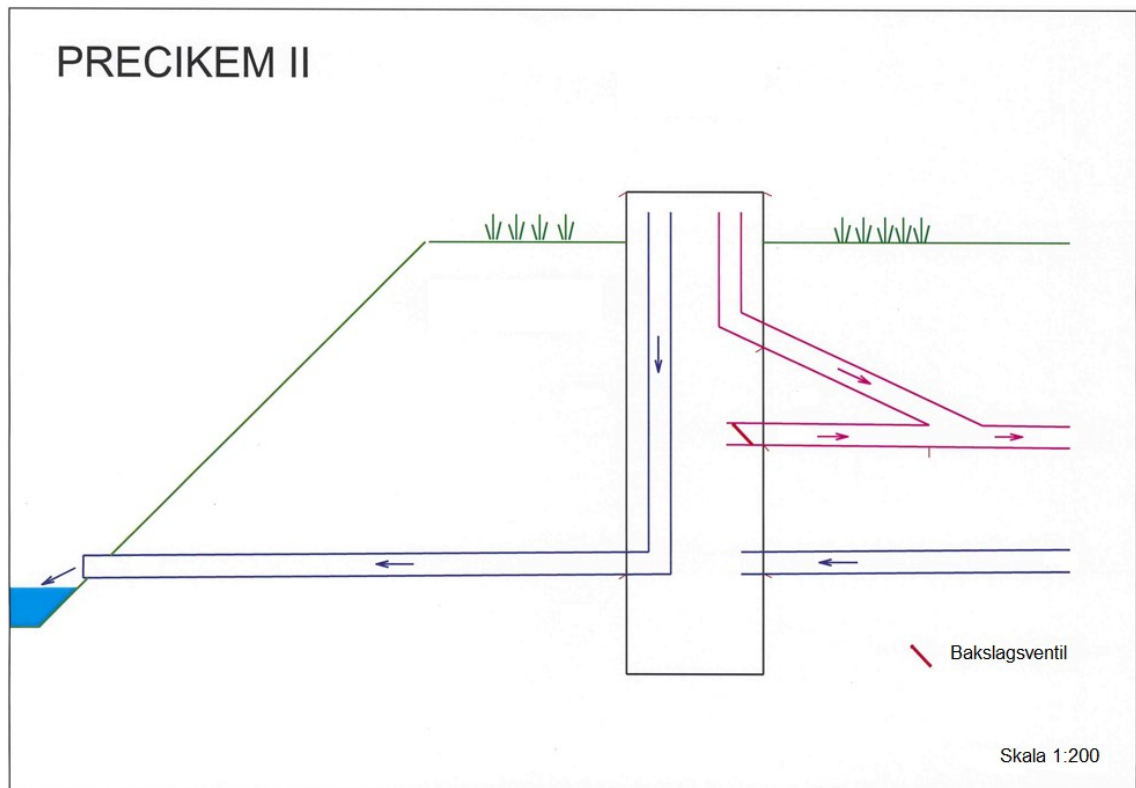
Figur 3. Mätningar för nederbörd (blåa staplar) och temperatur (orange linje) för studieperioden 2017-2019 vid Vasa flygfälts mätningstation som ligger ca 3 km från studieområdet (Meteorologiska institutet, 2022).

## 4. Material och metoder

### 4.1. Behandlingar

Suspensioner av kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) och torv pumpades in i delfälten under studieperioden år 2017–2019. Torv användes för första gången i behandlingen. Torven var finmalen och hade en låg förmultningsgrad. För suspensionerna används vatten från närliggande Toby å. Rör har installerats så att vatten från Toby å når till varje delfält (Rosendahl m.fl. 2012). Kalciumkarbonat- och torvsuspensionerna pumpas in i dräneringssystemen genom delfältens kontrollbrunnar. I delfält 1–9 injicerades suspensionerna direkt i täckdiketsrörssystemet. I delfält 10–12 injicerades suspensionerna genom effektiviserad injicering där ett extra injiceringsrör med bakslagsventil

installerades och möjliggjorde inflöde då suspensionen i brunnen låg under det övre röret som var det huvudsakliga injiceringsröret (figur 4).



Figur 4. Illustration av effektiviserad injicering av suspensionerna till täckdikningssystemet i delfält 10–12 (ProAgria). Av de två injiceringsrören (röd färg) i brunnen sker den huvudsakliga injiceringen i det övre röret. Det undre injiceringsröret har en bakslagsventil som förhindrar utflöde, men där inflöde (injicering) är möjligt då suspensionen i brunnen ligger under det övre röret.

Suspensionerna pumpas in i dräneringssystemet då grundvattennivån är som lägst, oftast i augusti eller under tidig höst, för att maximera spridningen genom makroporerna (sprickor och aggregat). Kalkprodukterna neutraliserar aciditeten på makroporens ytor och pH-värdet stiger. Genom ett förhöjt pH minskar aciderofila mikrobers verksamhet i sedimenten. Dessa aciderofila mikrober trivs i sura förhållanden och genom behandlingarna minskar man bildningen av aciditet i sedimenten (Salaojayhdistys Ry 2014).

Under studieperioden 2017–2019 behandlades delfälten endast en gång år 2017 (tabell I). I delfält 2 och 11 pumpades endast vatten (120/240 m<sup>3</sup>) från Toby å in i

dräneringssystemet. Delfält 3 och 5 behandlades med CaCO<sub>3</sub> (0.3 µm) (610/690 kg) i suspension i vatten (130/130 m<sup>3</sup>) från Toby å. Referensfälten 4 och 7 har endast fått vatten (120/120 m<sup>3</sup>). Delfält 10 och 12 behandlades med en suspension på CaCO<sub>3</sub> (2.5 µm) (550/570 kg) och torv (160/160 kg). Delfält 1–9 har under tidigare år (2012–2016) behandlats med kalk, som också bör beaktas, eftersom effekten (från 2016) syns under studieperioden (tabell I).

*Tabell I. De gjorda behandlingarna under åren 2012–2017. Tidigare behandlingar i fält 1–9 gjordes åren 2012–2016. Inga behandlingar gjordes år 2015. Under studieperioden 2017–2019 gjordes behandlingar på delfält 1–12 år 2017.*

Behandlingar 2012-2017	Delfält	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vatten, Tobyå m <sup>3</sup>	2012	100	90	110	120	110		110	100				
	2013	130	140		170		130	140	120	130			
	2014		460		480		460	430		430			
	2015												
	2016	130	130		130			130	130				
	2017		120	130	120	130		120			250	240	240
CaCO <sub>3</sub> (2.5 µm)/kg	2012			680		770							
	2013						350			400			
	2014						1640			1590			
	2015												
	2016	660							820				
	2017												
CaCO <sub>3</sub> (0.3 µm)/kg	2017			610		690							
Ca(OH) <sub>2</sub>	2012	150							110				
	2013	380							360				
	2014												
	2015												
	2016												
	2017										550		570
Torv /kg	2017									160		160	

## 4.2. Provtagning och analys

Under tidsperioden 20.04.2017–19.12.2019 utfördes provtagningen i delfältens dräneringsbrunnar. Proven togs under sensvåren (april-maj) samt under senhösten (november-december). Provanalyser från högsommaren (juni-juli) och vinterhalvåret (januari-mars) har inte tagits i beaktan i denna avhandling pga. att de hydrologiska förhållandena under de årstiderna inte är representativa, framför allt pga. lågt flöde och tjäle.

Grundämnesanalys på vattenprover utfördes i Åbo Akademis laboratorium i Geohuset och analyserades med ICP-OES och SO<sub>4</sub> och Cl analyserades med jonkromatografi (IC) i Vasa. Totalt analyserades 78 grundämnen varav 9 grundämnen (aluminium, kalcium, kadmium, klor, kobolt, koppar, järn, svavel, och zink) behandlas i denna avhandling. Elektrisk konduktivitet (EC) och pH mättes samma dag som provtagning utfördes.

Aciditeten är uppmätt genom titrering av vattenprov med natriumhydroxidlösning (0,0015 M) till pH 8,3 vid Yrkesskolan Novia av Eva Högfors-Rönholm. Aciditetmätningen berättar om vattnets förmåga att neutralisera en bas (natriumhydroxid) till ett visst pH. Tvåvärt järn (Fe<sup>2+</sup>) analyserades också vid Novia med fenantrolinmetoden (Fadrus & Malý 1975) av Sten Engblom. Till provet tillsattes 1,10-fenantrolin för färgreaktion med Fe<sup>2+</sup>, glycinbuffer för att bibehålla pH 2,5 samt kelatkomplexbildare NTA för att binda upp (maskera) trevärt järn (Fe<sup>3+</sup>). Absorbansen, som är direkt proportionerlig med halten, mättes med spektrofotometer vid 510 nm våglängd.

Detaljerad och regelbunden övervakning i alla grundvattenrör i varje delfält gjordes med en automatisk vatten- och temperatursensor (Solinst Levelogger Junior Edge 3001). Hydrologin i Toby å monitoreras i en automatisk mätstation ca 8 km uppströms i Karkmo var bl.a. flödesmängden mäts (Dalhem m.fl. 2019).

## 5. Resultat

### 5.1 pH

Referensfälten 4 och 7 på den norra och den södra sidan hade lågt och stabilt pH, kring pH 4 under både vår- och höstperioderna (figur 5). I delfält 2 och 11, till vilka inga substanser tillförts, var pH också på samma nivå (figur 6).

#### 5.1.1 Effekter av tidigare behandlingar

I delfält 1 och 8 som behandlades år 2012 och 2013 med Ca(OH)<sub>2</sub> och med CaCO<sub>3</sub> år 2016 (figur 7), var pH 1–1,6 enheter högre än i referensfälten (pH 5–5,5) i början av studieperioden (2017), men sjönk följande år och var då bara 0,2–0,6 enheter högre än

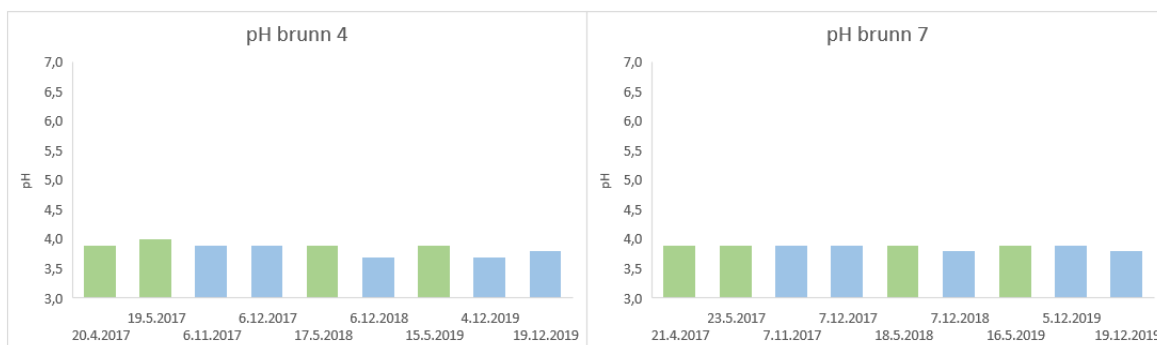


referensfälten (pH ca 4) i slutet av studieperioden (2019). Delfält 6 och 9 som behandlades år 2013 och 2014 med  $\text{CaCO}_3$  hade 0,3–0,9 enheter högre pH än referensfälten och följde referensfältens variationer (figur 8).

### 5.1.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  i början av studieperioden var pH 0,2–0,4 enheter högre än referensfälten innan behandlingen (figur 9). Efter  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen steg pH betydligt och var 1,4–1,9 enheter högre än referensfälten (ca pH 5,5–6,0). Behandlingens effekt sjönk successivt mot studieperiodens slut och trots det var pH 0,3–0,4 enheter högre än referensfälten.

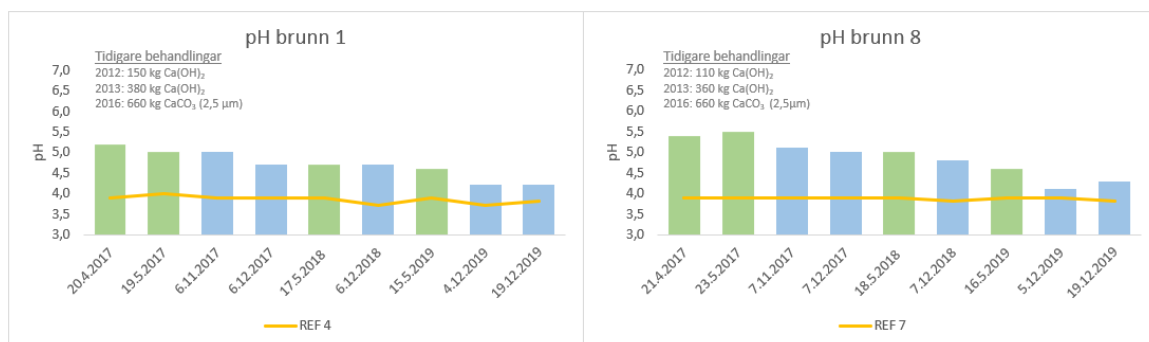
I delfält 10 och 12 som behandlades i början av studieperioden med  $\text{CaCO}_3$  och torv var pH 0,2–0,3 enheter högre än referensfälten innan behandlingen (figur 10). Efter behandlingen steg pH betydligt till 1,6–2,1 enheter högre än referensfälten, varefter behandlingens effekt sjönk mot slutet av studieperioden då pH fortfarande var 0,8–0,9 enheter högre än referensfälten (ca pH 4,5–5,0).



Figur 5. pH i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



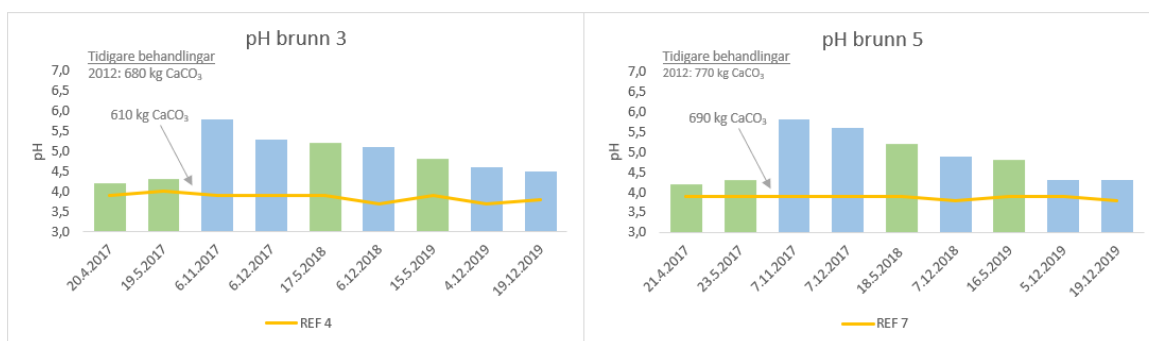
Figur 6. pH i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets pH.



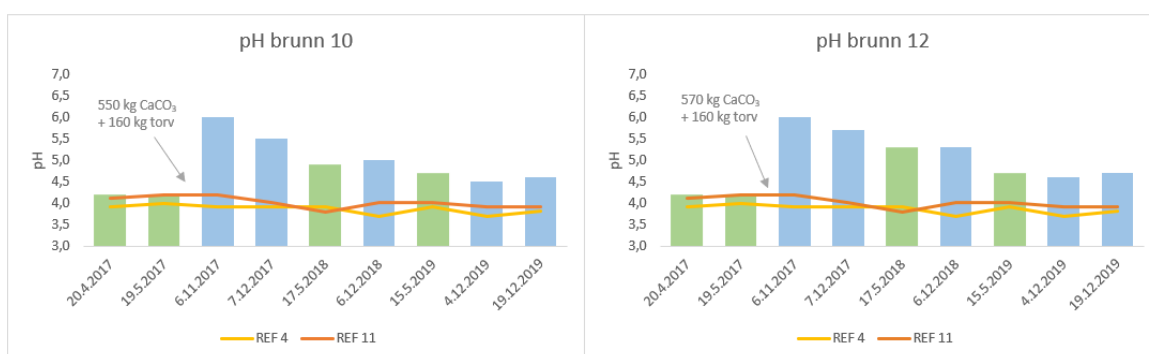
Figur 7. pH i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 8. pH i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 9. pH i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 10. pH i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens pH.

## 5.2. Aciditet

I referensfälten 4 och 7 varierade aciditeten mellan 3,3 och 5,4 mmol/l under vårperioderna och mellan 4,4 och 6,5 mmol/l under höstperioderna (figur 11). I början av studieperioden var aciditeten lägst (3,3 mmol/l), men steg till 6,5 mmol/l på hösten efter den torra sommaren 2018. Mot våren och hösten 2019 sjönk aciditeten, men var fortfarande högre än tidigare år (figur 11).

Aciditeten i delfält 2 och 11 följde variationerna i referensfälten, men var 10–20 % lägre; mellan 3,2 och 5,1 mmol/l under vårperioden och mellan 3,9 och 5,1 mmol/l under höstperioden (figur 12).

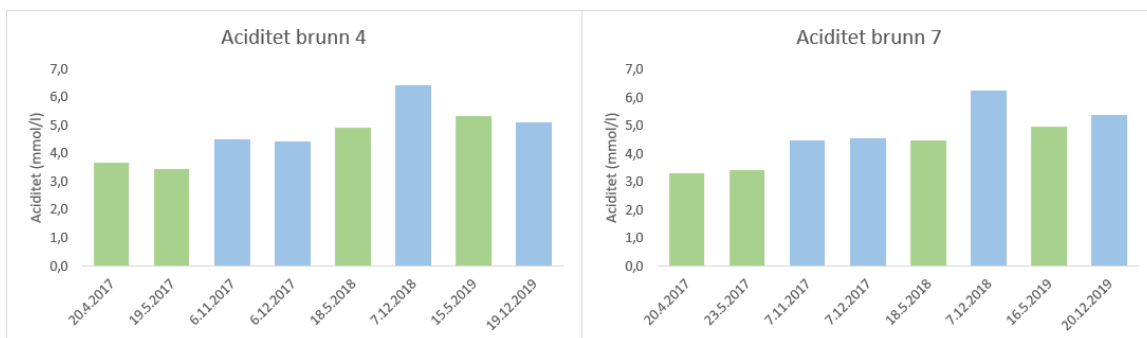
### 5.2.1 Effekter av tidigare behandlingar

Delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och år 2016 med  $\text{CaCO}_3$  följde referensfältens variationer, men var i början av studieperioden ca 50 % lägre (figur 13). Efter hösten 2017 var aciditeten 20–30 % lägre än referensfälten resten av studieperioden. Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 följde variationerna i referensfälten, men var 10–20 % lägre (figur 14).

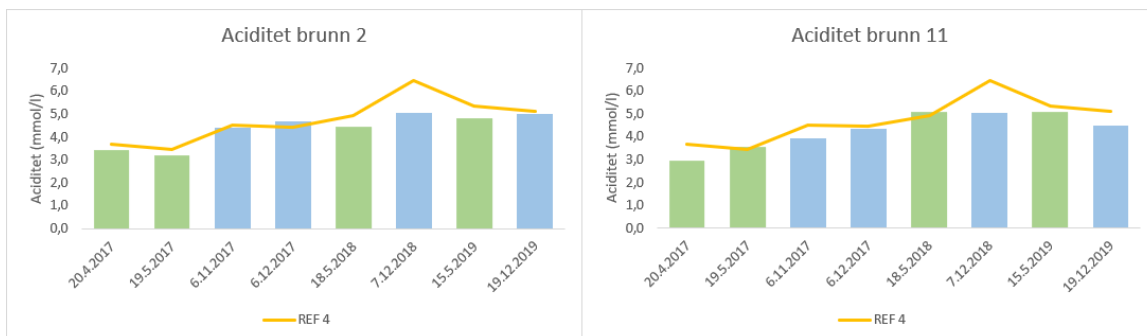
### 5.2.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var aciditeten ca 10 % lägre än referensfälten innan behandlingen och sjönk till 20–50 % lägre än referensfälten efter behandlingen (figur 15). I slutet av studieperioden var aciditeten fortfarande 20–30 % lägre än referensfälten.

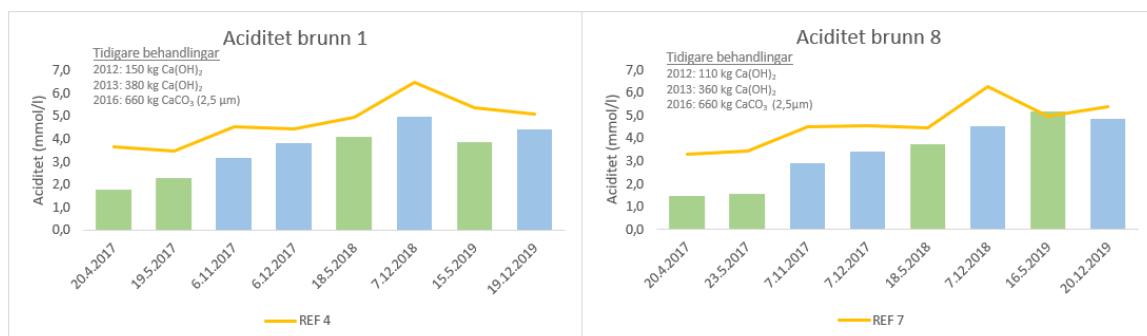
Delfält 10 och 12 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 hade 10–20 % lägre aciditet än referensfälten innan behandlingen, och efter sjönk den ytterligare till 20–50 % lägre än referensfälten (figur 16). Behandlingens effekt minskade mot slutet av studieperioden, men aciditeten var fortfarande 10–30 % lägre än referensfälten.



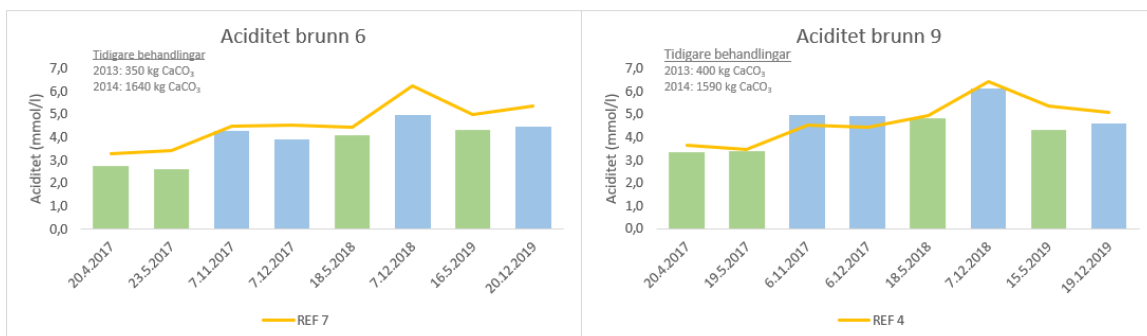
Figur 11. Aciditet i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



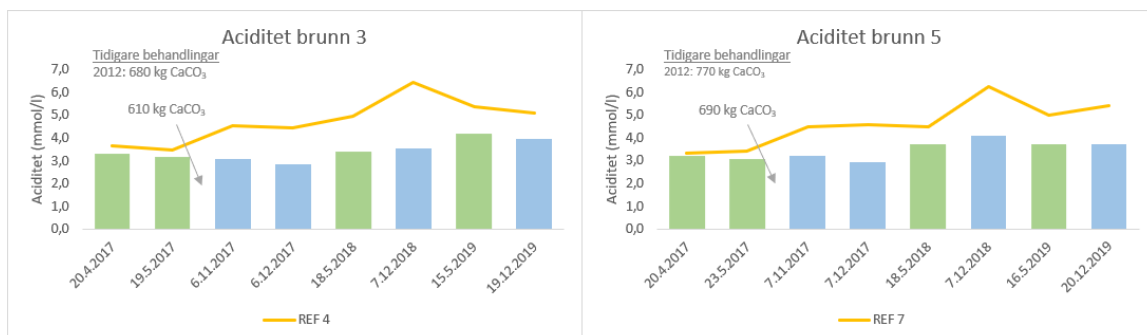
Figur 12. Aciditet i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets aciditet.



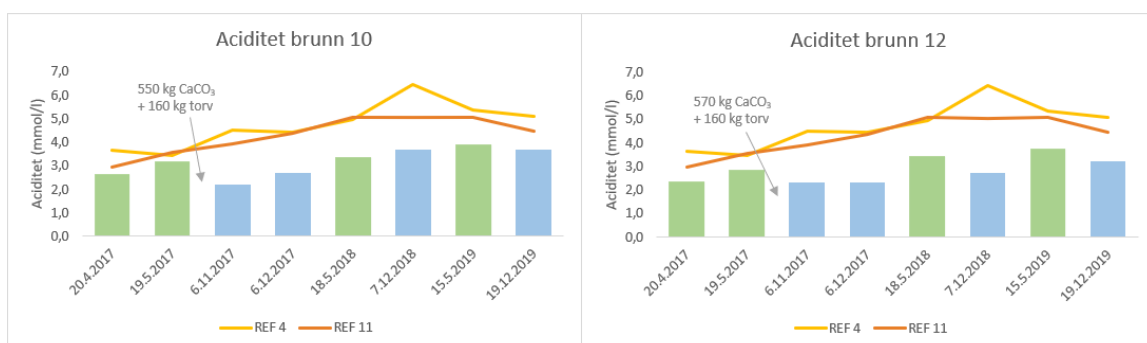
Figur 13. Aciditet i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 14. Aciditet i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 15. Aciditet i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 16. Aciditet i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens aciditet.

### 5.3. Elektrisk konduktivitet

Referensfälten 4 och 7 hade varierade EC, mellan 1200 och 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  under vårperioderna och mellan 1300 och 1900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  under höstperioderna (figur 17). Konduktiviteten var stabil fram till våren 2018 och efter den torra sommaren 2018 höjdes EC under höstperioderna i båda fälten. Delfält 2 och 11 följde referensfältens variationer med EC på samma nivå (figur 18).

#### 5.3.1 Effekter av tidigare behandlingar

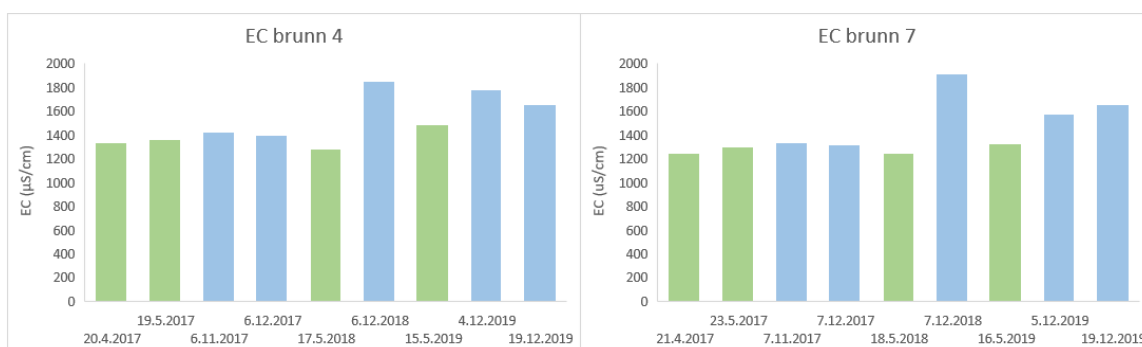
Delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och  $\text{CaCO}_3$  år 2016 följde referensfältens variationer under hela studieperioden, men den norra sidan hade till och med 20 % lägre EC än referensfältet och den södra sidan upp till 20 % högre EC (figur 19).

Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 följde i stora drag referensfältens variationer (figur 20). Den norra sidan hade ca 10 % högre EC än referensfältet, men mot slutet av studieperioden sjönk den till 10–20 % lägre än referensfältet. Den södra sidan hade ca 10 % lägre halter än referensfältet under hela studieperioden (figur 20).

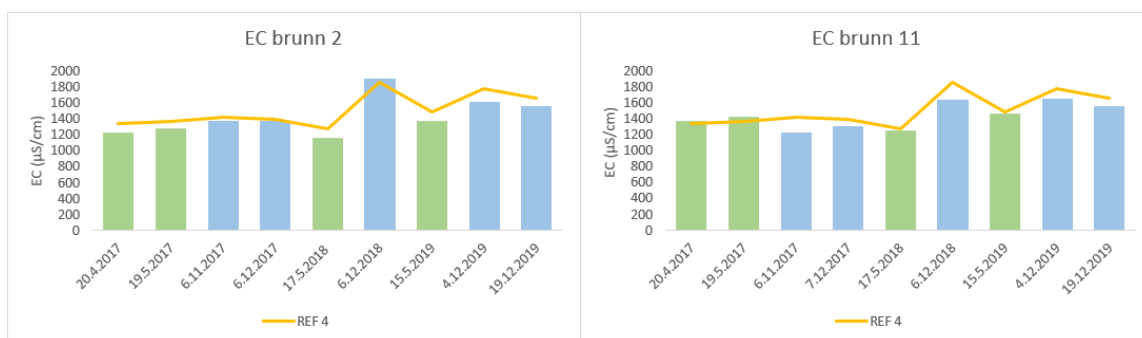
### 5.3.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var EC 10–20 % lägre än referensfälten under hela studieperioden (figur 21).

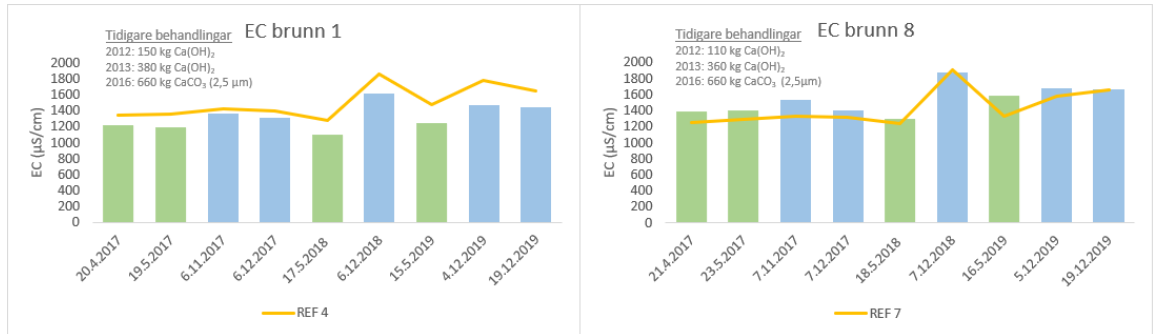
Delfält 10 och 12 som behandlades år 2017 med  $\text{CaCO}_3$  och torv var EC ca 10 % lägre än referensfälten i början av studieperioden, och steg till ca 10 % högre än referensfälten efter behandlingen (figur 22). Konduktiviteten var i båda delfälten hög hösten 2018, efter den torra sommaren 2018, och sjönk därefter till 10–20 % lägre än referensfälten.



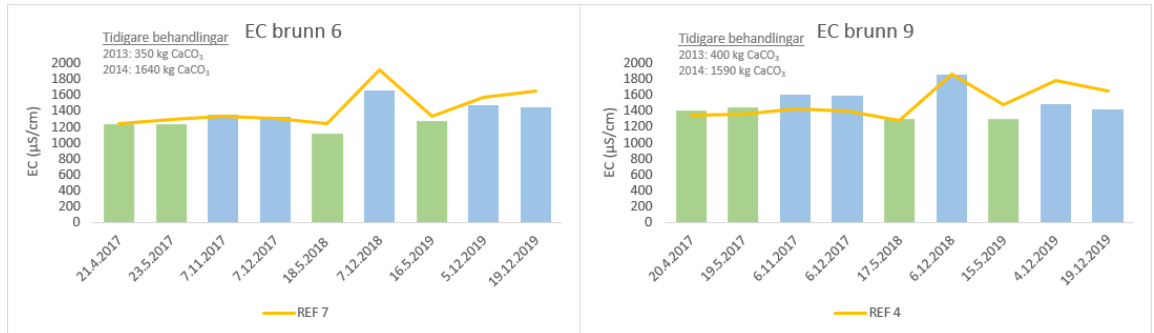
Figur 17. EC i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



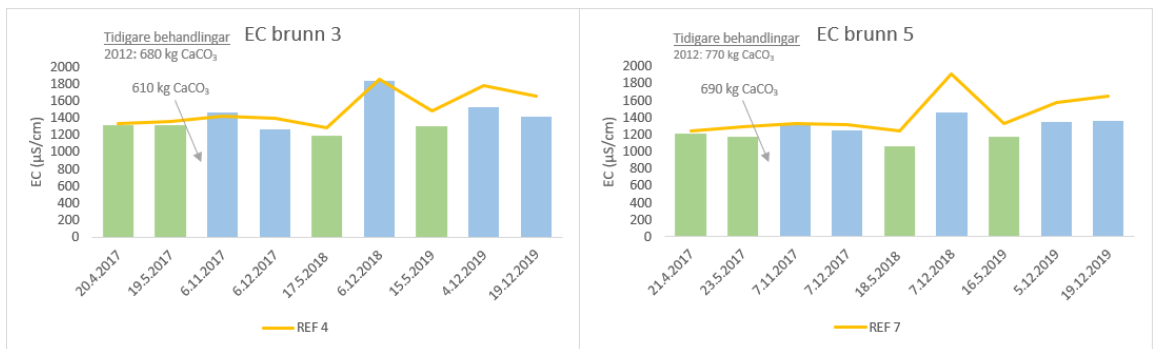
Figur 18. EC i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets EC.



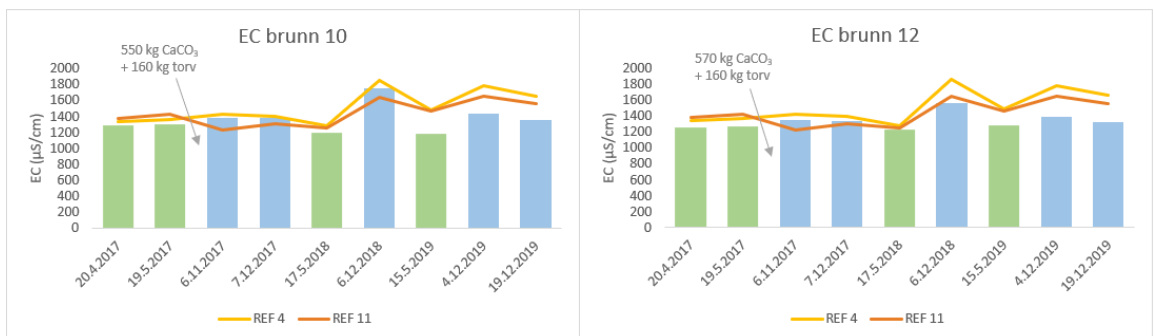
Figur 19. EC i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 20. EC i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 21. EC i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 22. EC i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens EC.

## 5.4. Svavel

I referensfälten 4 och 7 varierade S-halterna mellan 140 och 170 mg/l under vårperioderna och mellan 150 och 230 mg/l under höstperioderna (figur 23). Halterna var stabila (140–160 mg/l) fram till våren 2018, men den torra sommaren 2018 höjde halterna betydligt (230 mg/l) till hösten. Halterna sjönk en aning mot slutet av studieperioden, men var fortfarande höga (190–210 mg/l). Delfält 2 och 11 följde referensfältens haltvariationer med 10–20 % lägre halter (figur 24).

### 5.4.1 Effekter av tidigare behandlingar

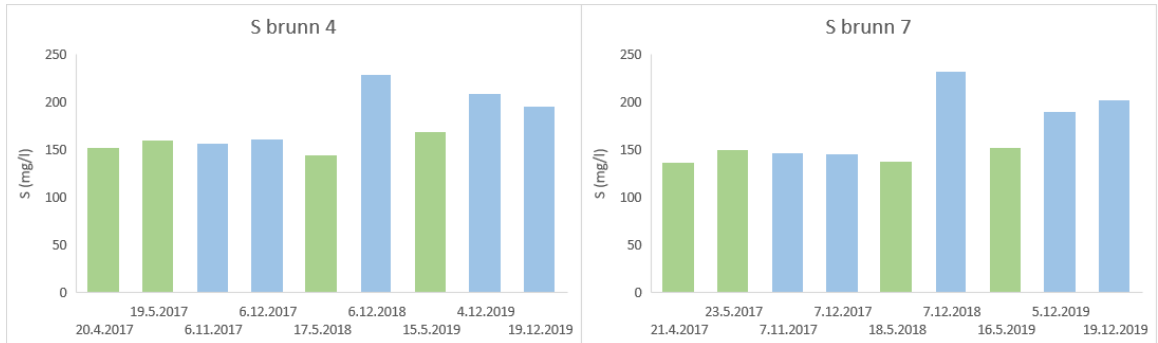
Delfält 1 och 8 som behandlades år 2012 och 2013 med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och år 2016 med  $\text{CaCO}_3$  följde referensfältens haltvariationer under hela studieperioden, men den norra sidan hade till och med 20 % lägre halter än referensfältet och den södra sidan upp till 20 % högre halter (figur 25). Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 följde referensfältens haltvariationer, den södra sidan hade i stort sett samma halter, men på den norra sidan var halterna stundvis 20 % högre än referensfältet (figur 26).

### 5.4.2 Fält som behandlats under studieperioden

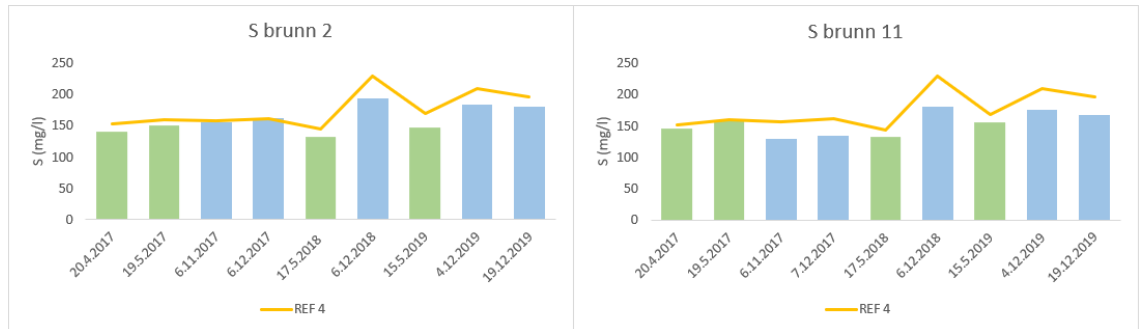
I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 hade båda delfälten S-halter på samma nivå som referensfälten innan behandlingen (figur 27). Efter behandlingen var halterna på den norra sidan på samma nivå som referensfältet och på den södra sidan halterna 20–30 % lägre än referensfältet resten av studieperioden.

Delfält 10 och 12 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 hade olika S-halter (figur 28). Delfält 10 hade halter på samma nivå som referensfältet innan och efter  $\text{CaCO}_3$ - och torvbehandlingen, men hade låga halter efter den torra sommaren 2018. Delfält 12 hade 20–40 % lägre halter än referensfältet både innan och efter behandlingen.

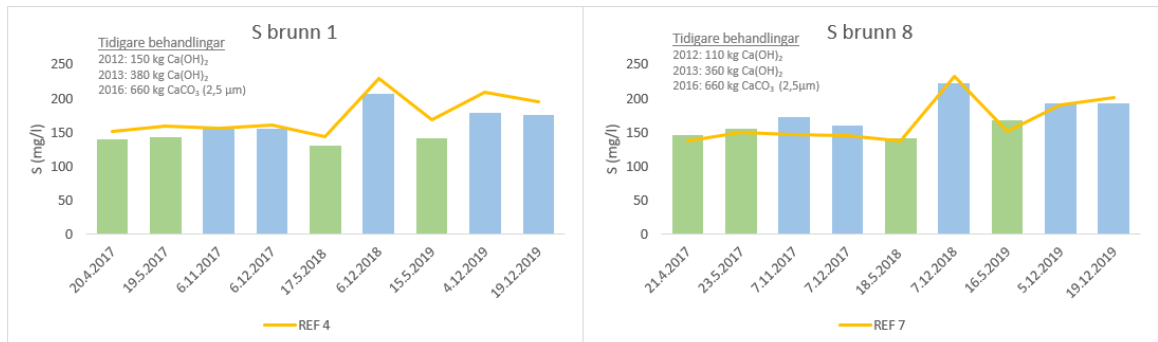




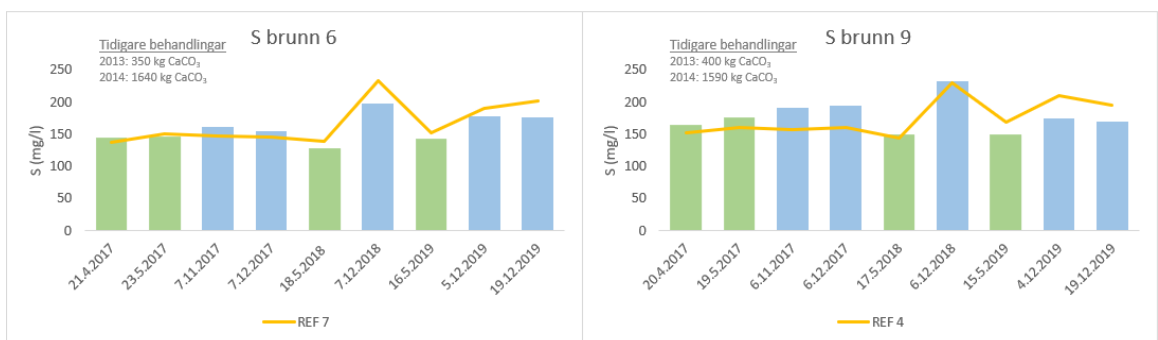
Figur 23. S-halterna i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



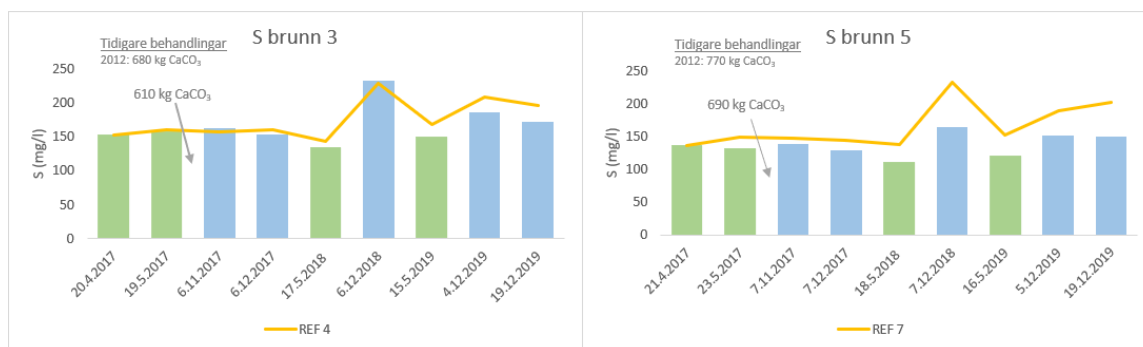
Figur 24. S-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets S-halt.



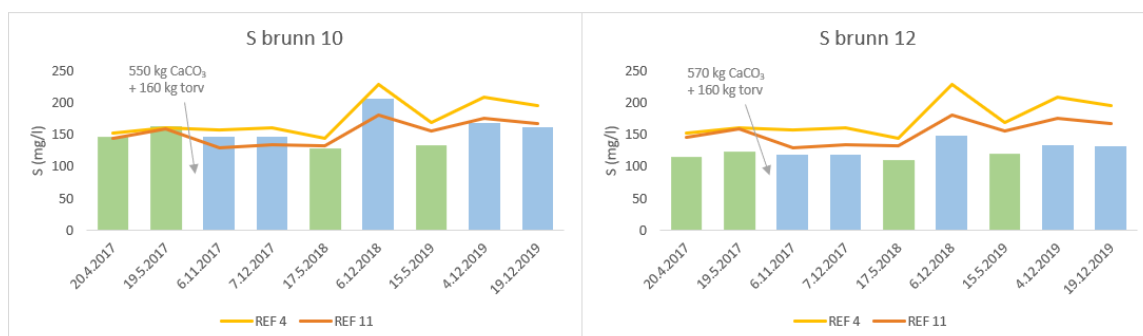
Figur 25. S-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 26. S-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 27. S-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 28. S-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens S-halter.

## 5.5 Klor

I referensfälten 4 och 7 varierade Cl-halterna mellan 115 och 140 mg/l under vårperioderna och mellan 130 och 200 mg/l under höstperioderna (figur 29). Studieperioden började med stabila halter som fördubblades efter den torra sommaren 2018, varefter halterna sjönk och var återigen stabila mot slutet av studieperioden.

I delfält 2 och 11 följde Cl-halterna referensfältens haltvariationer under hela studieperioden, men efter den torra sommaren var Cl-halten på den norra sidan ca 30 % högre än i referensfältet (figur 30).

### 5.5.1 Effekter av tidigare behandlingar

Delfält 1 och 8 som behandlades med Ca(OH)<sub>2</sub> år 2012 och 2013 och CaCO<sub>3</sub> år 2016 följde referensfältens haltvariationer under hela studieperioden, men den norra sidan

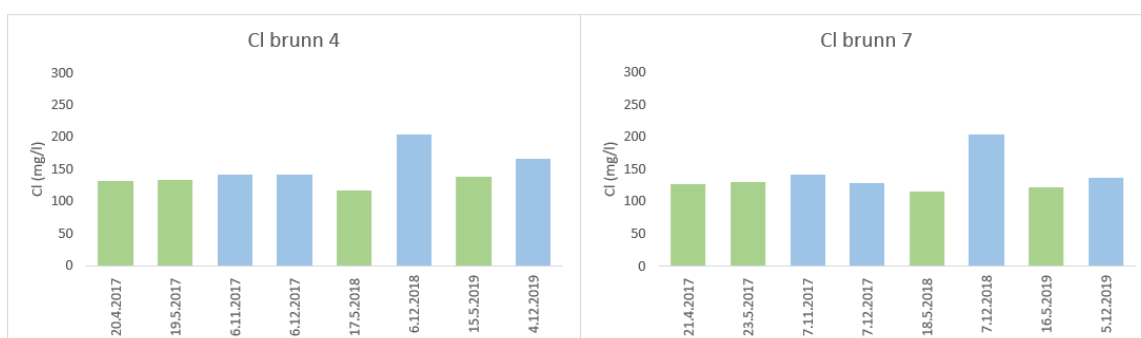
hade 10–20 % lägre Cl-halter än referensfältet och den södra sidan hade 30–40 % högre halter än referensfältet i slutet av perioden (figur 31).

Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 följde referensfältens haltvariationer, men på den norra sidan var halten 10–30 % högre än referensfältet hösten 2017 (figur 32).

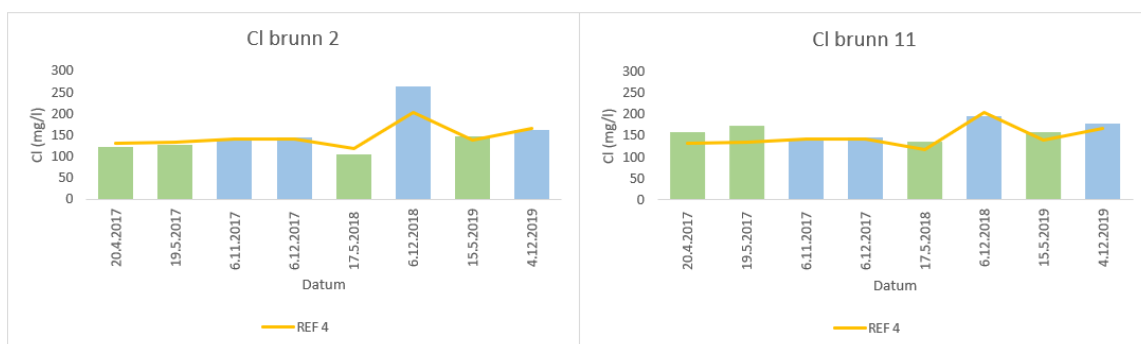
### 5.5.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var Cl-halterna på samma nivå som i referensfälten och någon direkt effekt av  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen 2017 syns inte (figur 33). Både på våren och hösten 2018 var Cl-halten lägre än referensfälten, på den norra sidan ca 10 % lägre och på den södra sidan 10–30 % lägre. Mot slutet av studieperioden var Cl-halterna på den norra sidan ca 20 % lägre än referensfältet och på den södra sidan på samma nivå som referensfältet.

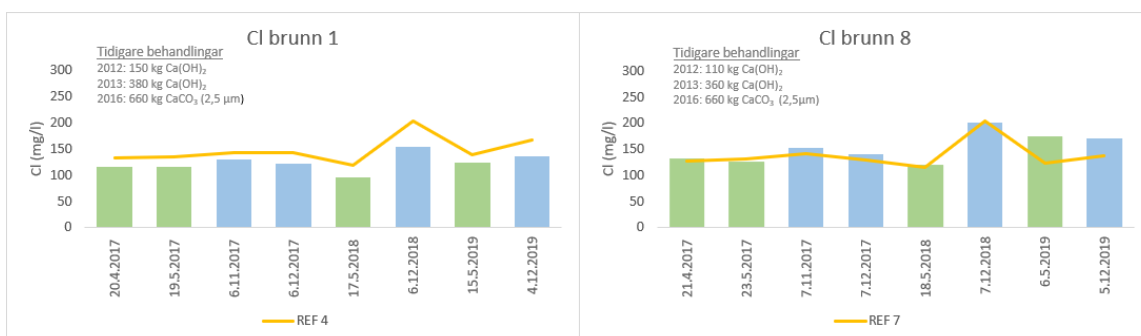
Delfält 10 och 12 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 följde referensfältens haltvariationer, men innan behandlingen hade delfält 10 ca 20 % lägre halter än referensfältet och delfält 12 följde referensfältet nästintill identiskt (figur 34). Efter behandlingen sjönk halterna en aning (10 %) i båda delfälten och resten av studieperioden följde delfält 12 referensfältet med halter på samma nivå. I delfält 10 sjönk halterna mot slutet av perioden till 20–30 % lägre än referensfältet.



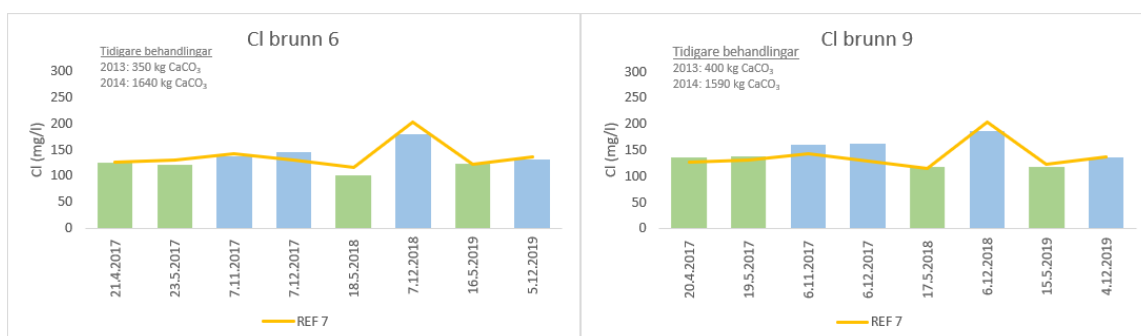
Figur 29. Cl-halterna i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



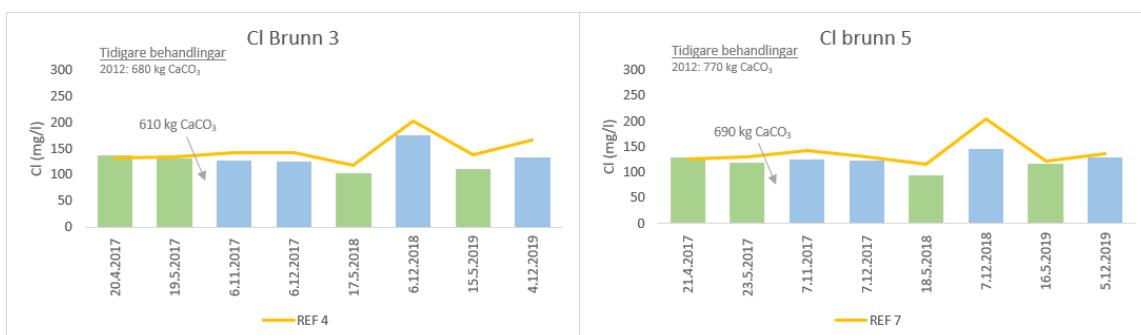
Figur 30. Cl-halterna i delfält 2 (utan plast) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Cl-halt.



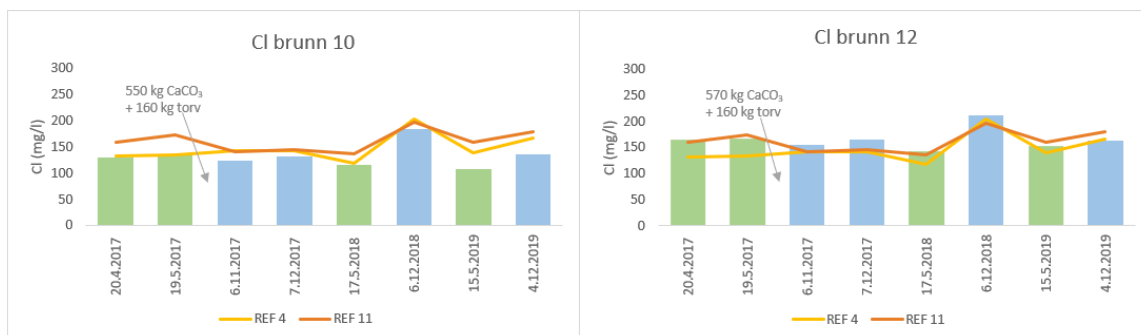
Figur 31. Cl-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 32. Cl-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 33. Cl-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 34. Cl-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Cl-halter.

## 5.6 S/Cl

I referensfälten 4 och 7 varierade S/Cl-förhållandet mellan 1100 och 1200 mg/l under vårperioderna och mellan 1100 och 1400 mg/l under höstperioderna (figur 35). I början av studieperioden var S/Cl-förhållandet 1100–1200 mg/l, men höjdes sakta till 1200–1400 mg/l mot slutet av perioden.

Delält 2 och 11 följde referensfältens variationer under hela studieperioden (figur 36). Delfält 2 hade nästintill identiska halter med referensfältet, men efter den torra sommaren 2018 sjönk halten undantagsvis till 40 % lägre än referensfältet. Delfält 11 hade under hela studieperioden 20 % lägre S/Cl-förhållande än referensfältet.

### 5.6.1 Effekter av tidigare behandlingar

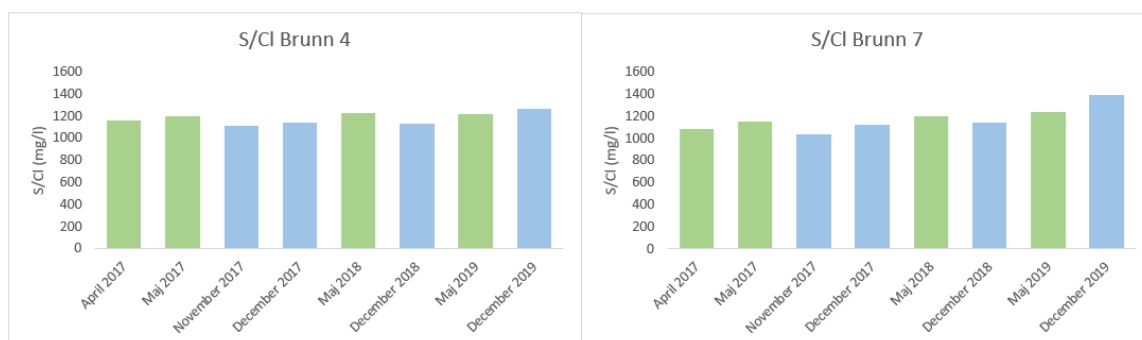
Delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 följde referensfältens variationer (figur 37). Den norra sidan var ca 10 % högre än referensfältet under hela studieperioden och var till och med 20 % högre än referensfältet efter den torra sommaren 2018. Den södra sidans S/Cl-förhållande var på samma nivå som referensfältet fram till hösten 2018, varefter halterna sjönk till 20 % lägre än referensfältet.

Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 följde referensfältens variationer och halterna var stundvis ungefär 10 % högre än referensfälten (figur 38).

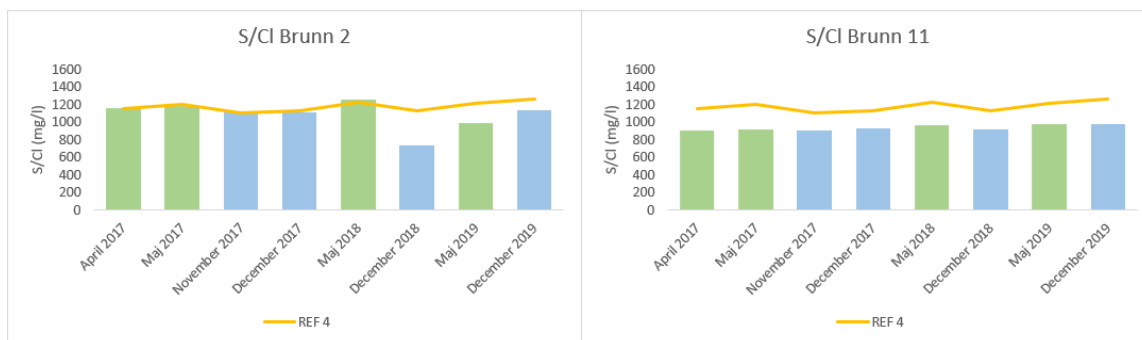
### 5.6.2 Fält som behandlats under studieperioden

Delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 följde referensfältens variationer under hela studieperioden och behandlingens effekt var inte synlig i S/Cl-förhållandet (figur 39). I det norra delfältet var S/Cl-förhållandet 10–20 % högre än referensfältet och det södra delfältet hade liknande S/Cl-förhållande som referensfältet fram till hösten 2018, varefter halterna sjönk till 20 % lägre än referensfältet.

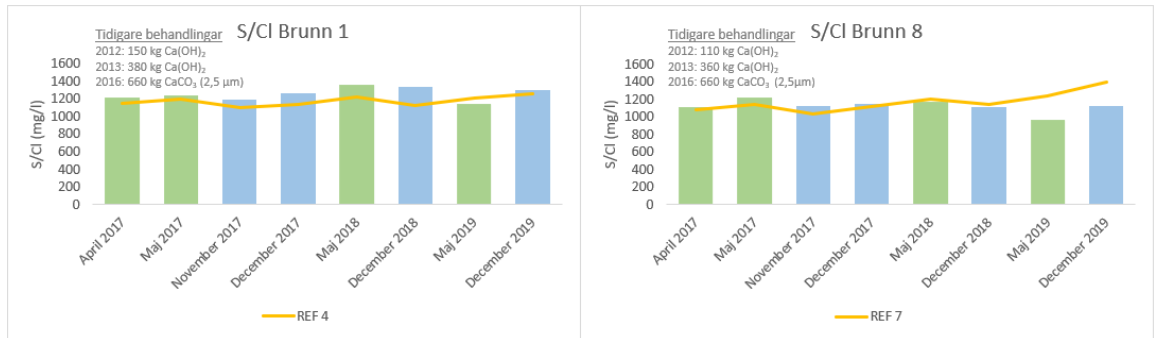
Delfält 10 och 12 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 följde referensfältens variationer (figur 40). Delfält 10 hade 20–30 % högre S/Cl-förhållande än referensfältet och delfält 12 var däremot ungefär 20 % lägre än referensfältet under hela studieperioden. Behandlingens effekt var inte synlig i delfälten.



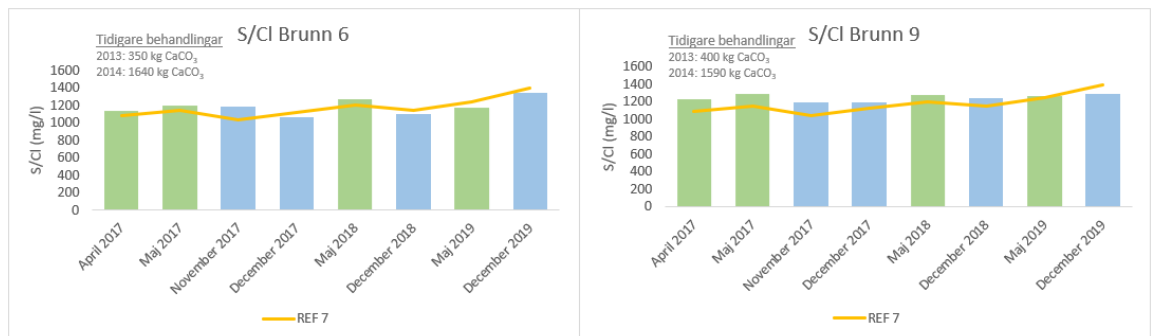
Figur 35. S/Cl-förhållandet i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



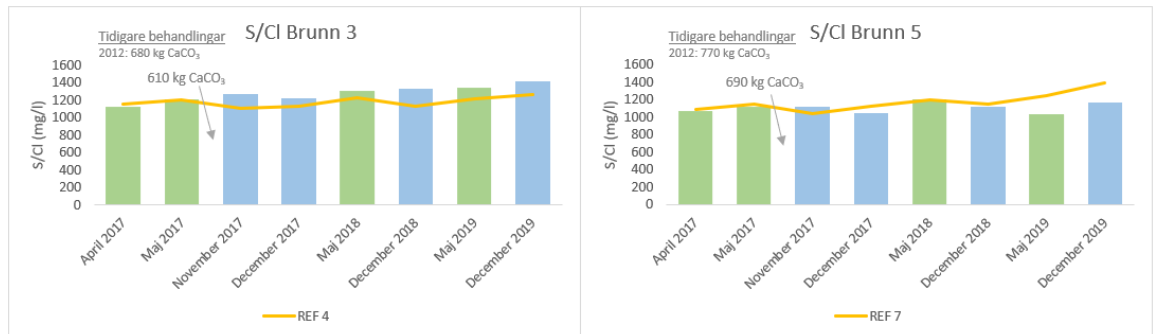
Figur 36. S/Cl-förhållandet i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets S/Cl-förhållande.



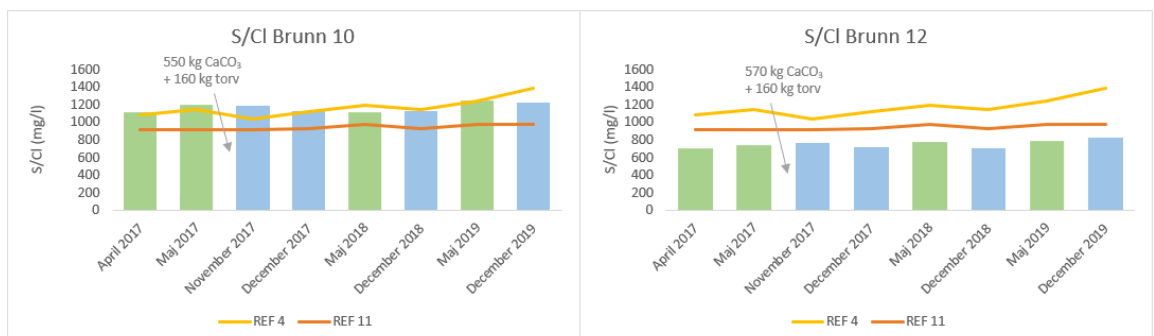
Figur 37. S/Cl-förhållandet i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 38. S/Cl-förhållandet i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 39. S/Cl-förhållandet i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



*Figur 40. S/Cl-förhållandet i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens S/Cl-förhållande.*

## 5.7 Aluminium

I referensfält 4 och 7 varierade Al-halterna mellan 15 och 20 mg/l under vårperioderna och mellan 17 och 34 mg/l under höstperioderna (figur 41). Halterna var stabila (17–18 mg/l) fram till den torra sommaren 2018, varefter halterna fördubblades och förblev höga resten av studieperioden.

Delfält 2 och 11 följde referensfältens haltvariationer och hade halter på samma nivå som referensfälten, men efter den torra sommaren 2018 var halterna 10–20 % lägre än referensfälten resten av studieperioden (figur 42).

### 5.7.1 Effekter av tidigare behandlingar

I delfält 1 och 8 som behandlades tidigare med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013, och med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 var Al-halterna 60–80 % lägre än referensfälten efter  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen 2016 (figur 43). På den norra sidan var Al-halterna ca 30 % lägre än referensfältet resten av studieperioden och på den södra sidan var halterna på samma nivå som i referensfältet.

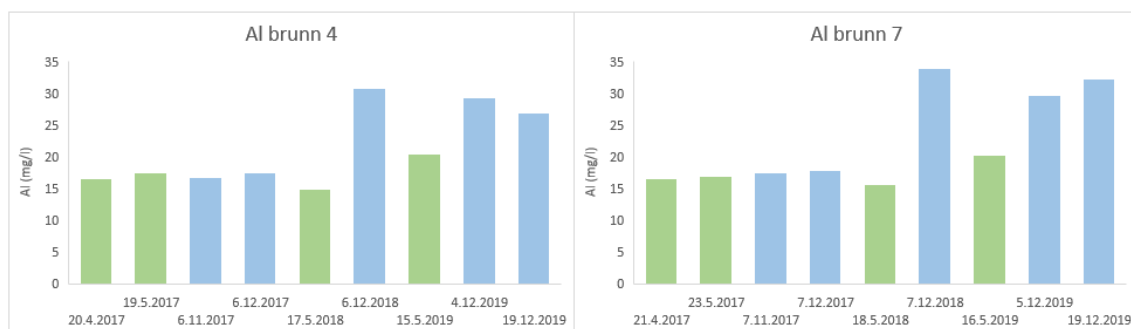
Delfält 6 och 9 som behandlades år 2013 och 2014 med  $\text{CaCO}_3$  följde referensfältens haltvariationer och var relativt stabila fram till våren 2018, varefter halterna steg, men var fortfarande 20–30 % lägre än referensfälten (figur 44).

### 5.7.2 Fält som behandlats under studieperioden

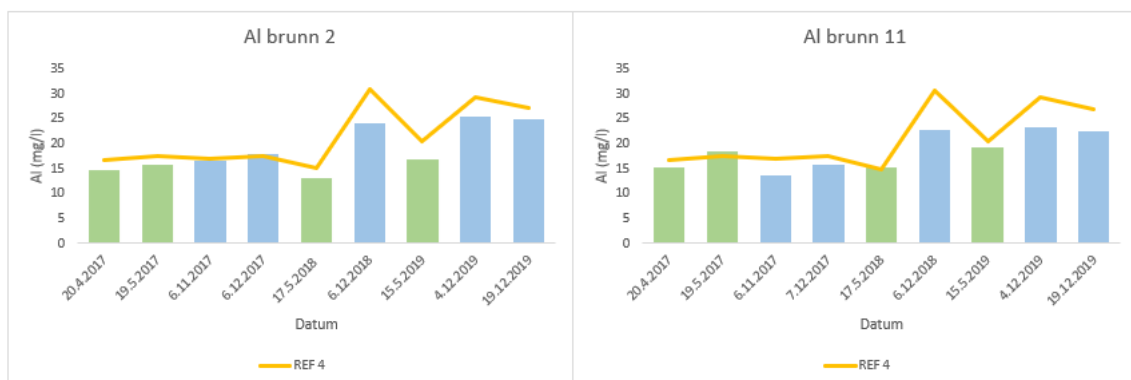
I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var halterna på samma nivå som referensfälten innan  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen 2017 (figur 45). Efter behandlingen sjönk halterna betydligt till ca 90 % lägre än referensfälten. Behandlingens effekt minskade mot slutet av studieperioden, men halterna var fortfarande 30–50 % lägre än referensfälten hösten 2019.



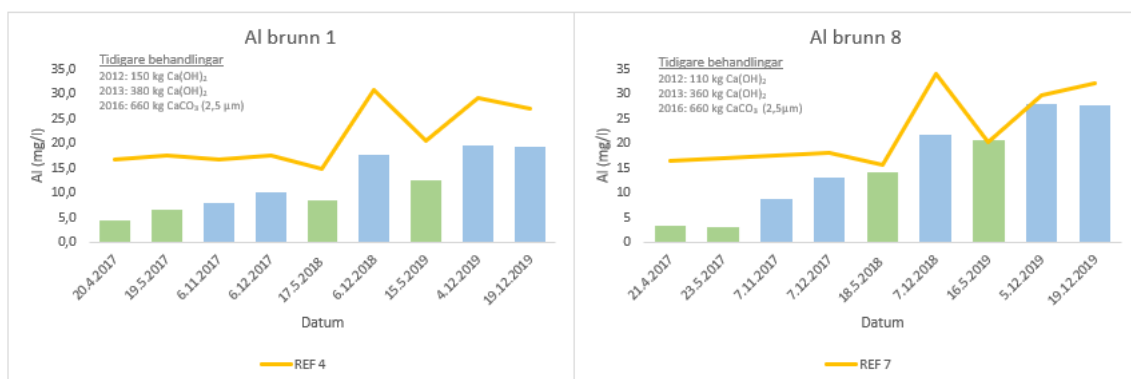
I delfält 10 och 12 som behandlades år 2017 med  $\text{CaCO}_3$  och torv var halterna i delfält 10 på samma nivå som referensfälten och i delfält 12 var halterna 20–30 % lägre än referensfältet innan behandlingen (figur 46). Efter  $\text{CaCO}_3$ - och torvbehandlingen sjönk halterna betydligt till 80–90 % lägre än referensfälten. Mot slutet av studieperioden minskade behandlingens effekt, men halterna var fortfarande 30–60 % lägre än referensfälten.



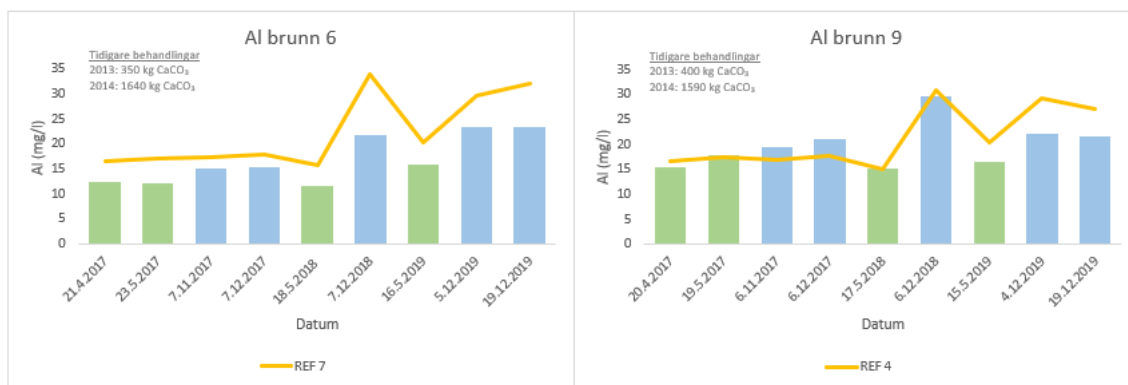
Figur 41. Al-halterna i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



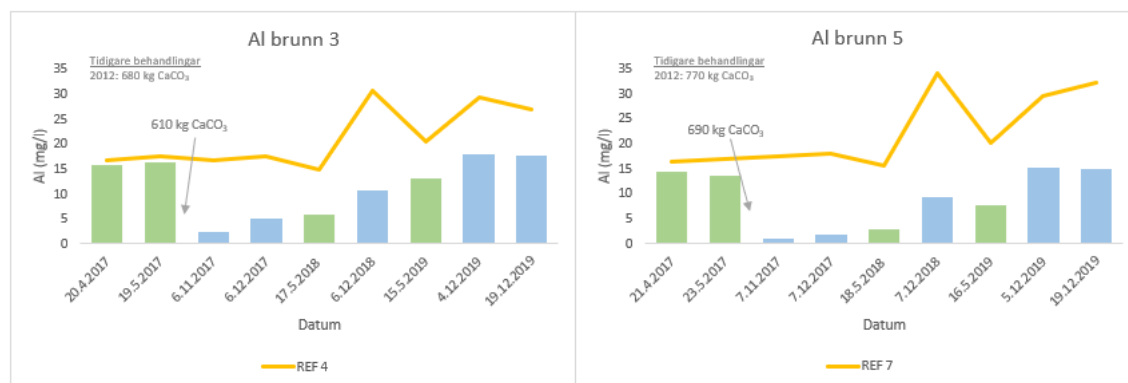
Figur 42. Al-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017-2019. Den gula linjen representerar referensfältets pH.



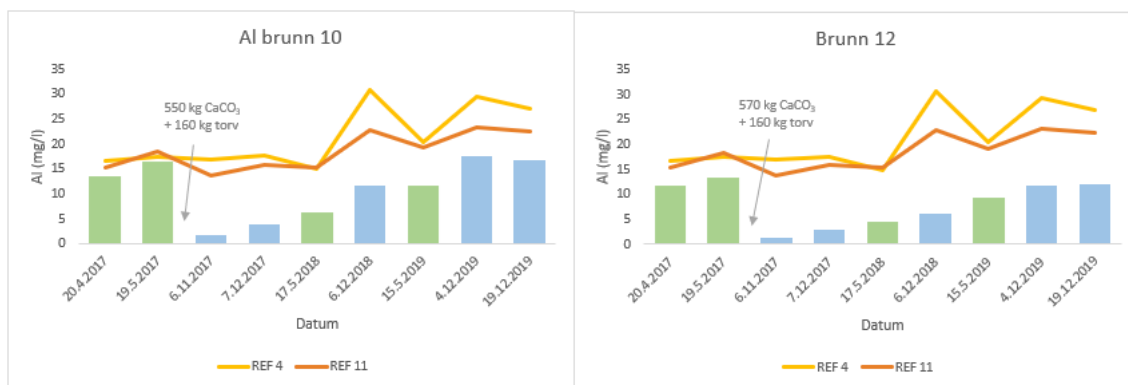
Figur 43. Al-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017-2019.



Figur 44. Al-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017-2019.



Figur 45. Al-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017-2019.



Figur 46. Al-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017-2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Al-halter.

## 5.8. Kalcium

I referensfälten 4 och 7 var Ca-halterna stabila, men steg efter den torra sommaren 2018 (figur 47). Halterna varierande mellan 60 och 80 mg/l under vårperioderna och mellan

65 och 100 mg/l under höstperioderna. I delfält 2 och 11 var Ca-halterna på samma nivå som referensfälten, men var stundvis 10–20 % lägre (figur 48).

#### 5.8.1 Effekter av tidigare behandlingar

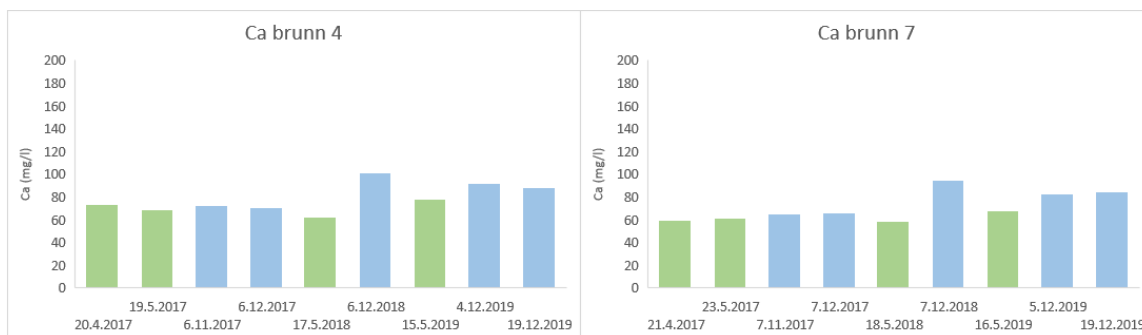
Delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 samt med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 hade höga halter i början av studieperioden p.g.a.  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen år 2016 (figur 49). På den norra sidan var halterna 30–50 % högre än referensfältet och på den södra sidan 50–110 % högre än referensfältet. Behandlingens effekt avtog våren 2018, varefter halterna steg till 30–50 % högre än referensfälten till hösten 2018. Efter den torra sommaren 2018 följde delfälten referensfältens haltvariationer, på den norra sidan var de på samma nivå som i referensfältet och på den södra sidan ca 20 % högre än referensfältet.

Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 följde båda fälten referensfältens haltvariationer, men tenderade att vara 10–30 % högre än referensfälten fram till våren 2018 (figur 50). Efter den torra sommaren 2018 steg halterna till 20–40 % högre än referensfälten, men sjönk snabbt till referensfältens nivå resten av studieperioden.

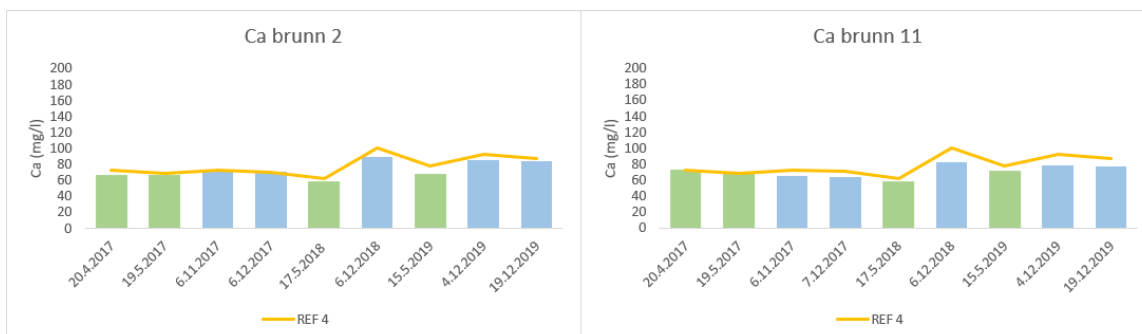
#### 5.8.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var Ca-halterna på den norra sidan samma som i referensfältet och på den södra sidan ca 20 % lägre än referensfältet innan behandlingen 2017 (figur 51). Efter behandlingen fördubblades halterna och var ungefär 120 % högre än referensfälten. Halterna fortsatte att vara 30–80 % högre än referensfälten fram till hösten 2018. Behandlingens effekt avtog våren 2019 i båda delfälten och halterna sjönk då till referensfältens nivå.

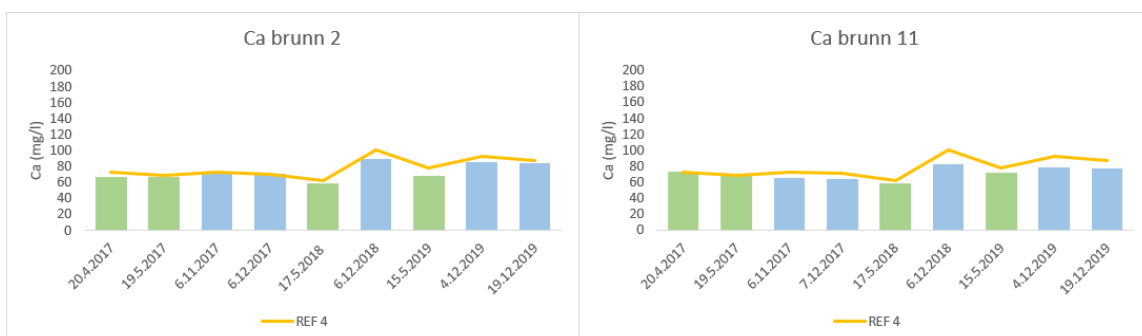
Delfält 10 och 12 behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 och hade halter på referensfältets nivå i delfält 10 och ca 20 % lägre än referensfältet i delfält 12 (figur 52). Efter behandlingen fördubblades Ca-halterna och effekten avtog våren 2019. Halterna sjönk därefter till referensfältens nivå.



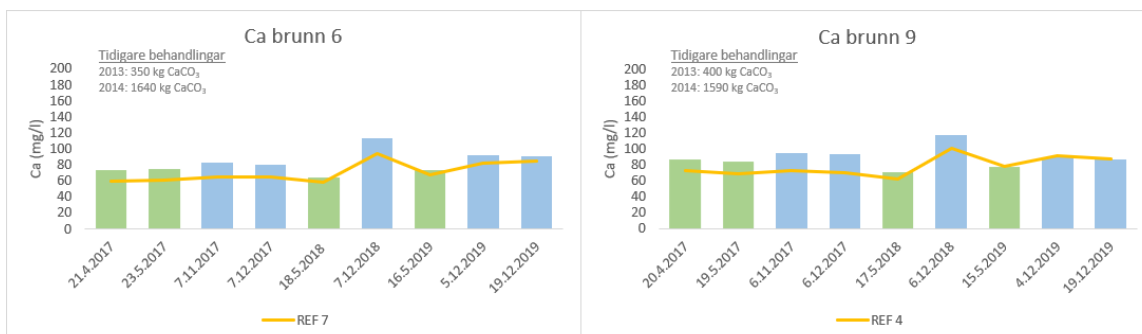
Figur 47. Ca-halterna i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



Figur 48. Ca-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Ca-halt.



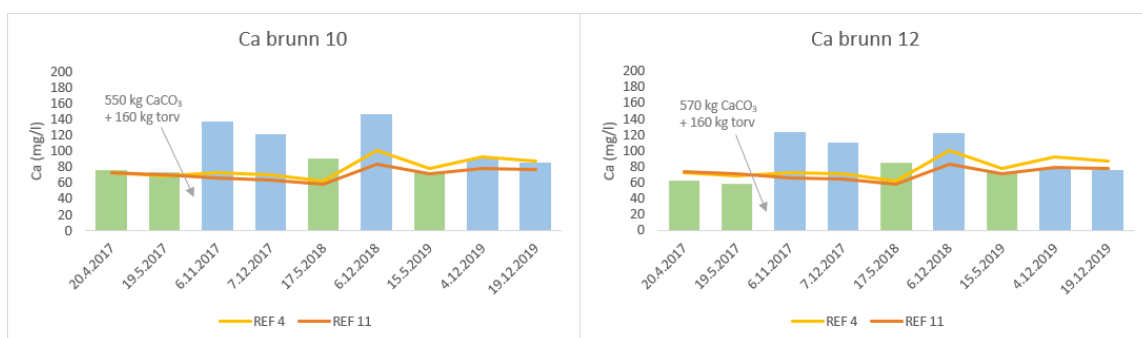
Figur 49. Ca-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 50. Ca-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 51. Ca-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 52. Ca-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältets Ca-halter.

## 5.9 Ca/Sr

I referensfälten 4 och 7 varierade Ca/Sr-förhållandet mellan 140 och 200 mg/l under vårperioden och mellan 140 och 190 mg/l under höstperioderna (figur 53). Halterna var stabila, men tenderade att stiga lite mot slutet av studieperioden.

Delfält 11 hade nästintill identiskt Ca/Sr-förhållande med referensfälten under hela studieperioden och delfält 2 var 10–20 % högre än referensfältet (figur 54).

### 5.9.1 Effekter av tidigare behandlingar

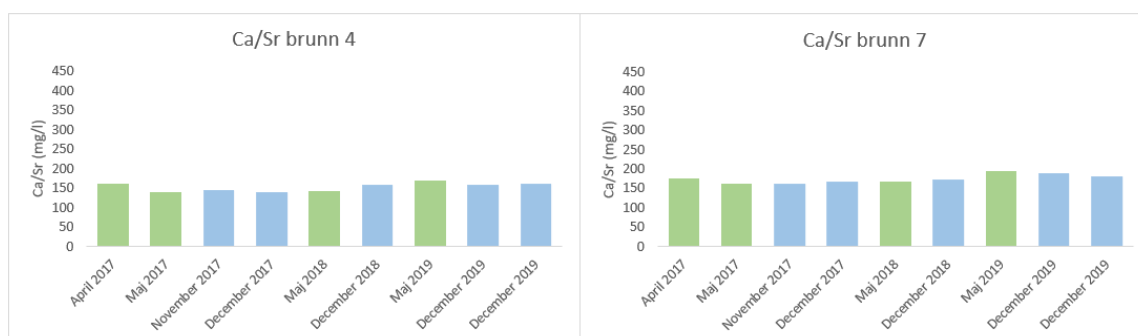
Delfält 1 och 8 om behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 följde referensfältets variationer, men halterna på den norra sidan var 30–50 % högre än referensfältets under hela studieperioden och på den södra sidan var halterna i stora drag på samma nivå som referensfältets (figur 55). I delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 hade den norra sidan 30–50 % lägre halter

än referensfältet under hela studieperioden och på den södra sidan var halterna på samma nivå som referensfältet (figur 56).

### 5.9.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var halterna identiska med referensfälten innan behandlingen (figur 57). Efter behandlingen fördubblades halterna i båda delfälten och behandlingens effekt minskade mot slutet av studieperioden, men var ännu ca 30 % högre än referensfälten.

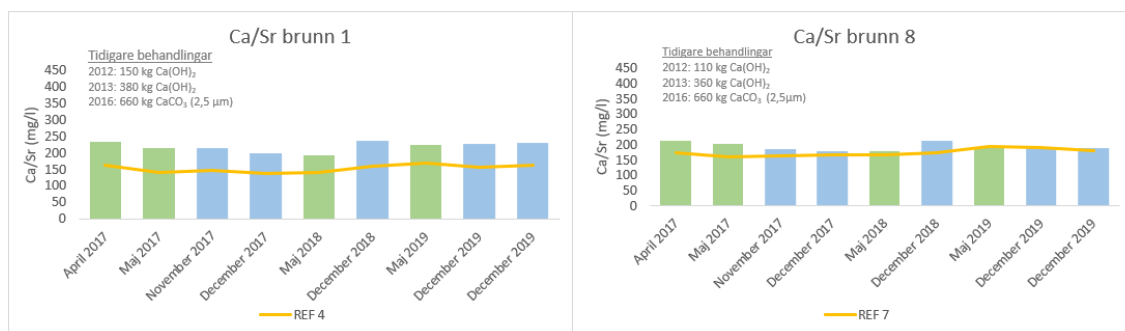
I delfält 10 och 12 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 var halterna på samma nivå som referensfälten innan behandlingen, men steg till 30–50 % högre än referensfälten efter behandlingen (figur 58). Behandlingen avtog våren 2019, varefter halterna sjönk till referensfältens nivå för resten av perioden.



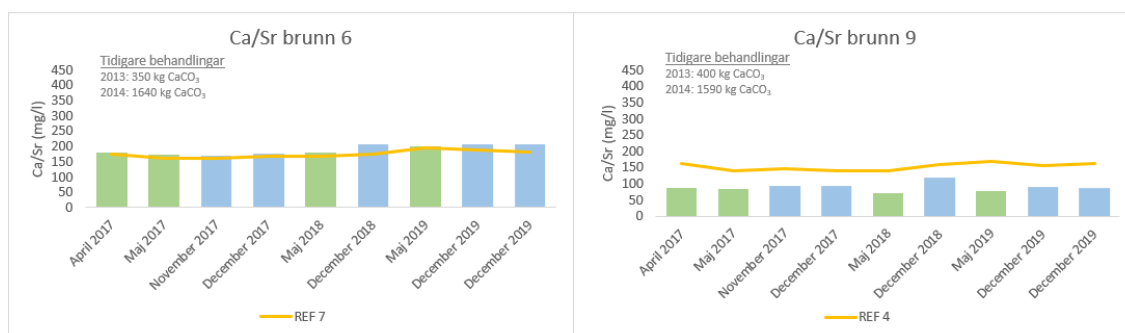
Figur 53. Ca/Sr-förhållandet i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



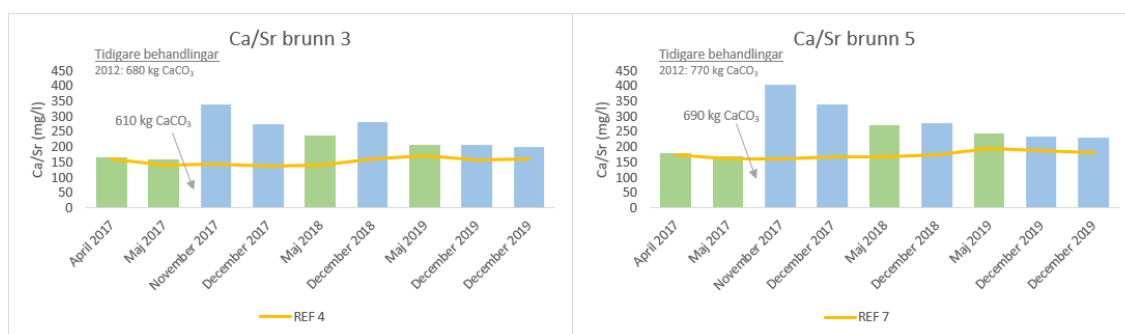
Figur 54. Ca/Sr-förhållandet i delfält 2 (utan plastfilm) (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Ca/Sr-förhållande.



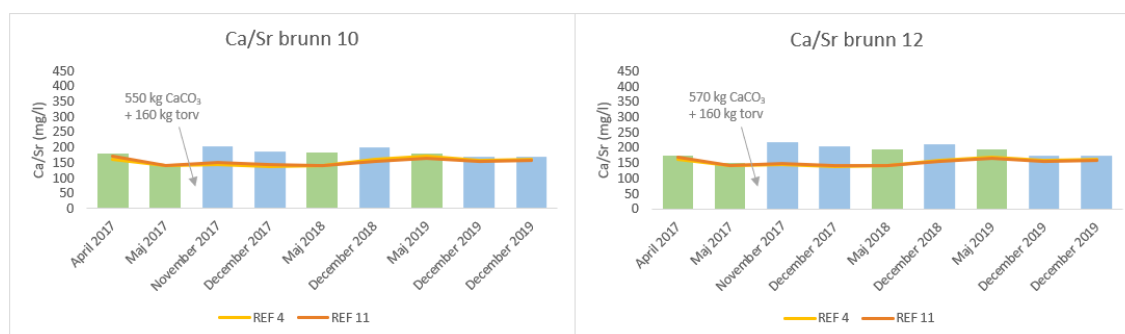
Figur 55. Ca/Sr-förhållandet i delfält 1 och 8 som behandlats endast före studieperioden 2017–2019.



Figur 56. Ca/Sr-förhållandet i delfält 6 och 9 som endast behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 57. Ca/Sr-förhållandet i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



*Figur 58. Ca/Sr-förhållandet i delfält 10 och 12 som endast behandlats under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Ca/Sr-förhållande.*

## 5.10 Kadmium

I referensfälten 4 och 7 varierade Cd-halterna mellan  $>2$  och  $3 \mu\text{g/l}$  under vår- och höstperioderna (figur 59). Halterna var  $>2 \mu\text{g/l}$  fram till hösten 2018 och våren 2019, varefter halterna var  $2\text{--}3 \mu\text{g/l}$ .

I delfält 2 var Cd-halterna under detektion ( $>2 \mu\text{g/l}$ ) och i delfält 11 var alla halter  $2 \mu\text{g/l}$ , utom våren 2017 och våren 2018 då halterna var under detektion (figur 60).

### 5.10.1 Effekter av tidigare behandlingar

I delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 följde inte referensfältens haltvariationer (figur 61). På den norra sidan var halterna under detektion under hela studieperioden och på den södra sidan varierade halterna mellan  $>2$  och  $3 \mu\text{g/l}$  och tenderade att vara högre på hösten.

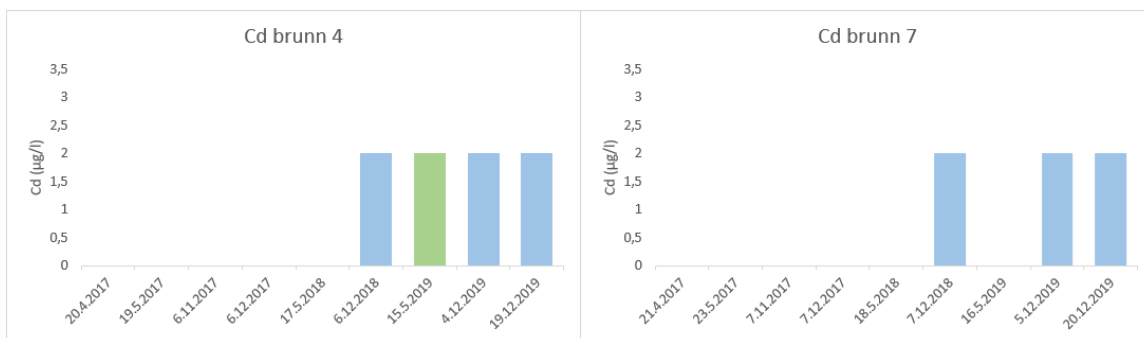
I delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 var halterna i båda fälten under detektion under vårperioderna (figur 62). Den norra sidan följde knappt referensfältets haltvariationer. Höstperiodernas Cd-halter varierade mellan  $2$  och  $3 \mu\text{g/l}$  på den norra sidan. Den södra sidan följde referensfältets haltvariationer med ett undantag hösten 2017, då halten var högre än referensfältets.

### 5.10.2 Fälten behandlade under studieperioden

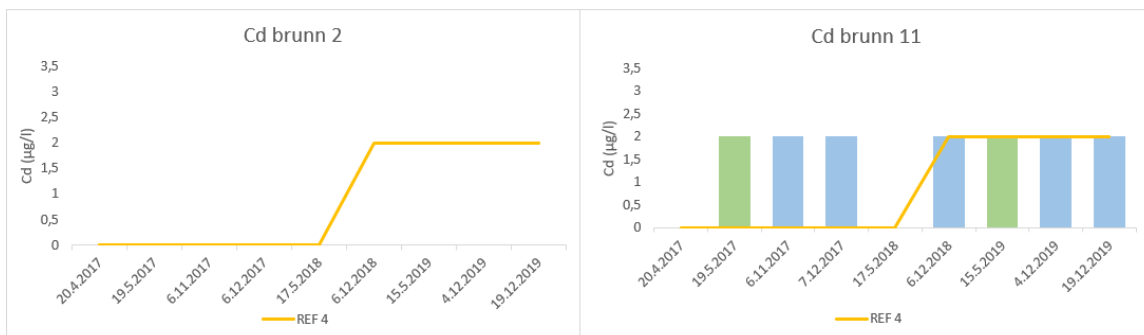
Delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 följde referensfältets haltvariationer och var under detektion endast mot slutet av studieperioden (figur 63).

Delfält 10 och 12 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 följde inte referensfältets haltvariationer, utan varierade och alla utom höstperioderna 2018 och 2019 samt våren 2017 (i delfält 10) var under detektion (figur 64).

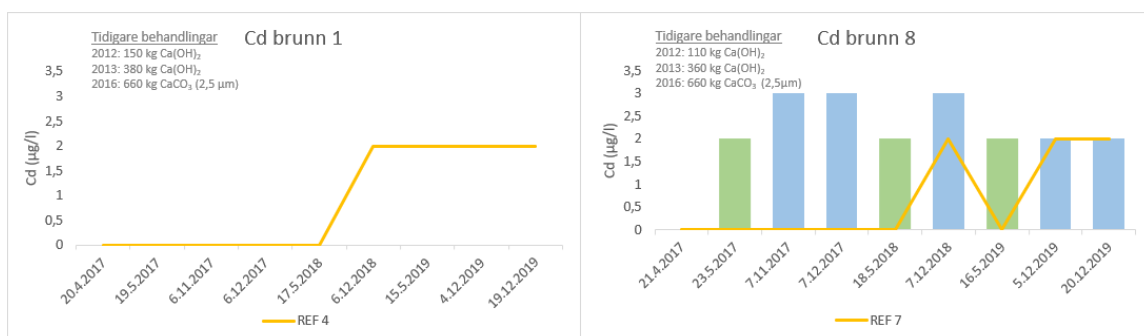




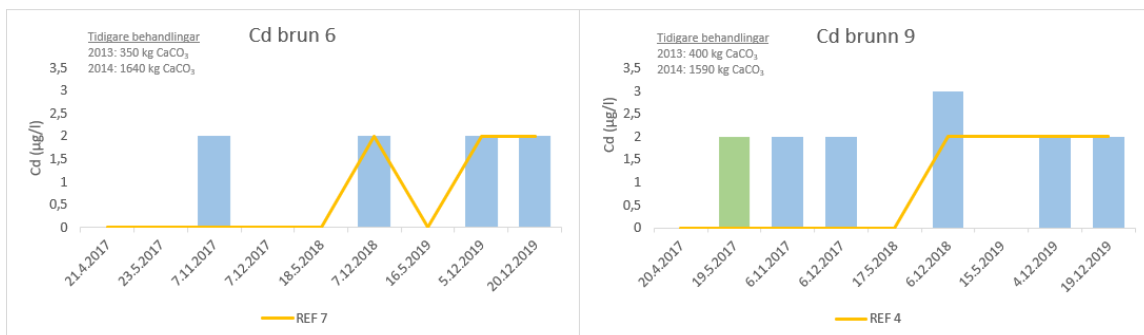
Figur 59. Cd-halterna i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



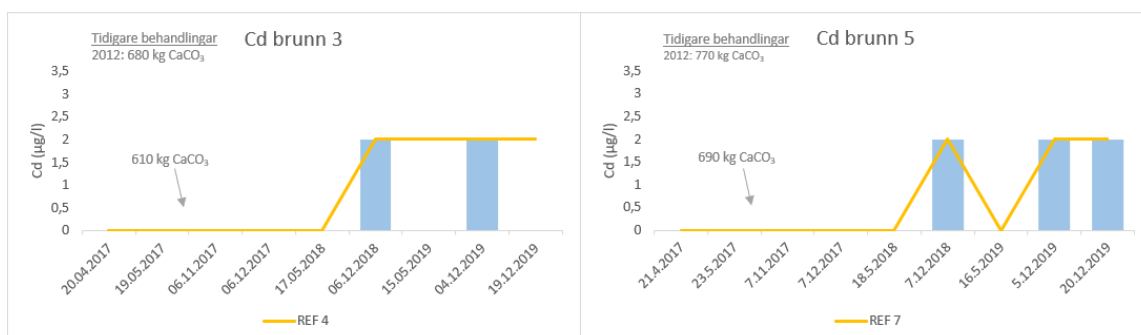
Figur 60. Cd-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Cd-halter.



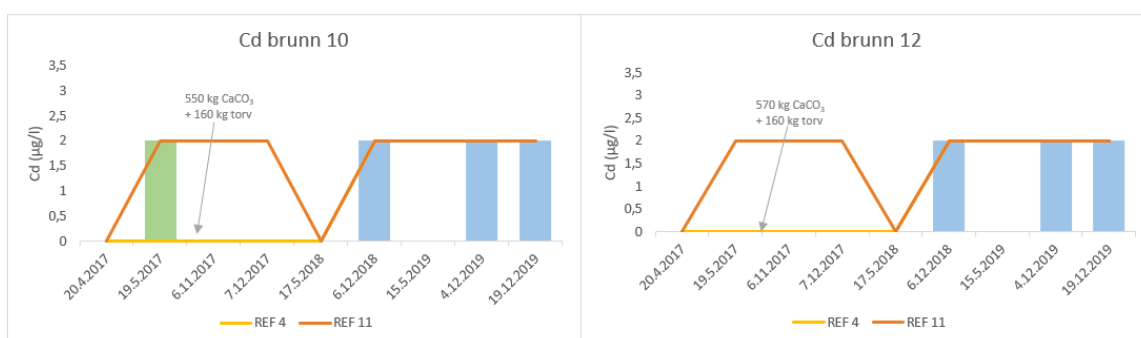
Figur 61. Cd-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 62. Cd-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 63. Cd-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 64. Cd-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Cd-halter.

## 5.11 Kobolt

Referensfälten 4 och 7 hade stabila Co-halter som varierade mellan 0,09 och 0,11 mg/l under vårperioderna och hade något större haltvariationer (0,11–0,15 mg/l) under höstperioderna (figur 65). Kobolthalterna var högre under höstperioderna i jämförelse med vårperioderna och var som högst hösten 2018 efter den torra sommaren 2018 och var även förhöjda hösten 2019.

Halterna var lägre i delfält 2 och var som lägst våren 2019 (30 % lägre än referensfältet; figur 66). Effekter av den torra sommaren 2018 märktes inte. Haltvariationerna i delfält 11 påminde om de i referensfältet, men hade genomgående 50–70 % högre Co-halter i början och 30–40 % högre mot slutet.

### 5.11.1 Effekter av tidigare behandlingar

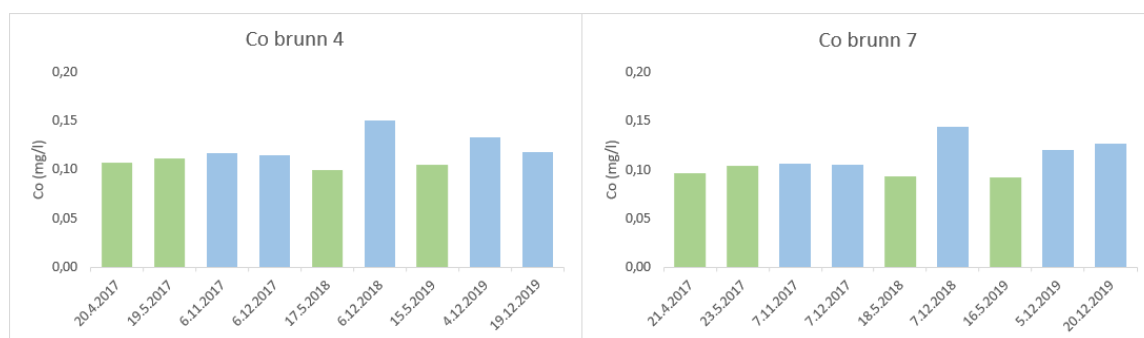
I delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 följde båda delfälten referensfältens haltvariationer (figur 67). På den norra sidan var halterna 20–30 % lägre än i referensfälten under hela studieperioden, medan på den södra sidan var de 20–50 % högre.

Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 hade 30–50 % högre Co-halter än referensfältet på den norra sidan fram till slutet av studieperioden, då halterna sjönk till samma nivå som referensfältets (figur 68). Däremot var halterna på den södra sidan nästintill identiska med referensfältet.

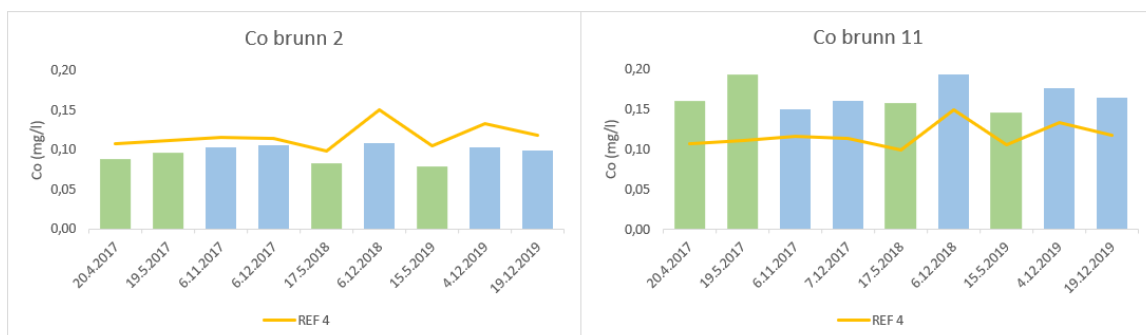
### 5.11.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var halterna på den norra sidan nästan samma som i referensfältet innan  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen 2017 och på den södra sidan aningen högre (figur 69). Efter  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen 2017 sjönk halterna betydligt, på den norra sidan var halterna 30–40 % lägre än referensfältet och på den södra sidan 10–30 % lägre. Behandlingens effekt syntes på den norra sidan fram till våren 2018, varefter halterna följde referensfältets haltvariationer resten av studieperioden men var 20–30% lägre än referensfältet. På den södra sidan var behandlingens effekt kortvarig (under ett år), varefter halterna var på samma nivå som i referensfältet. Mot slutet av studieperioden steg halterna till 10 % högre än referensfältets halter.

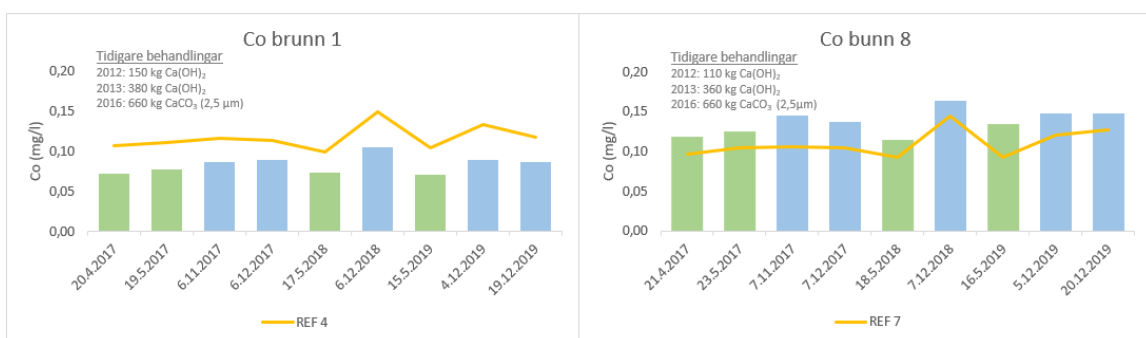
I delfält 10 och 12 som behandlades år 2017 med  $\text{CaCO}_3$  och torv var haltvariationerna i delfälten lika som i referensfälten, men halterna var 40–50 % lägre i delfält 12 (figur 70). Ingen effekt av behandlingen var synlig.



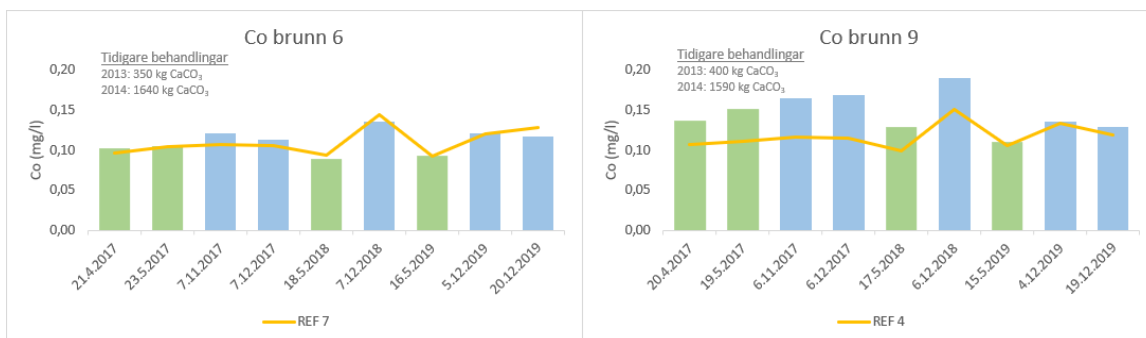
Figur 65. Co-halterna i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



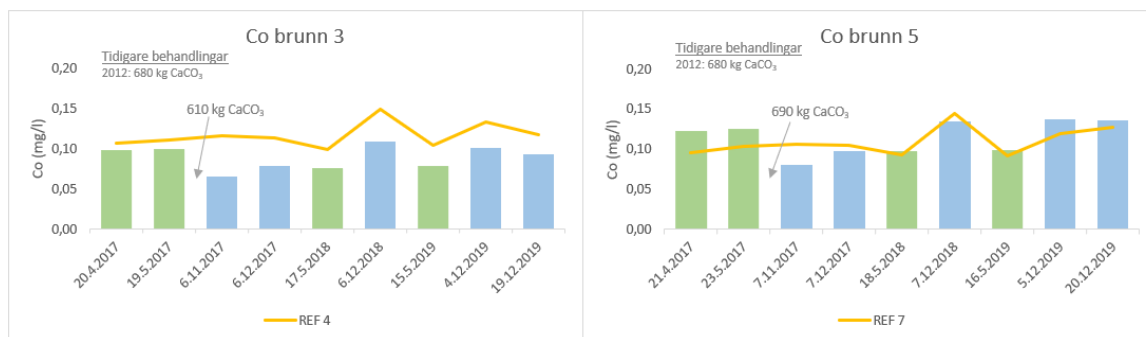
Figur 66. Co-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Co-halter.



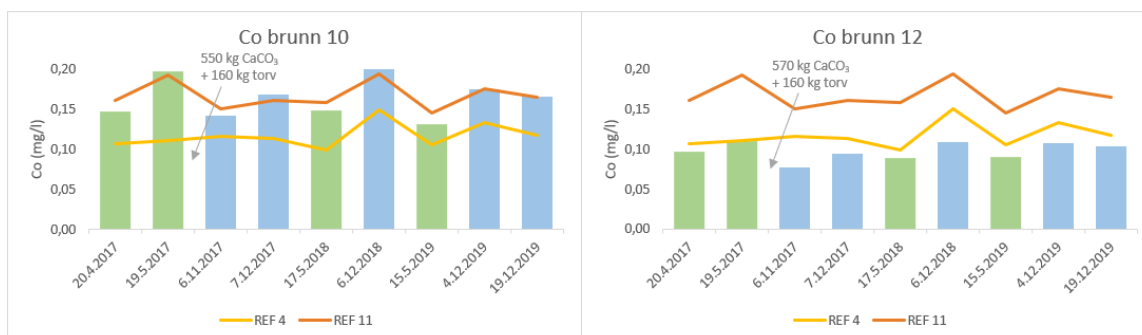
Figur 67. Co-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 68. Co-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 69. Co-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 70. Co-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Co-halter.

## 5.12 Koppar

Referensfälten 4 och 7 hade Cu-halter mellan 4 och 13  $\mu\text{g/l}$  under vårperioderna och mellan 7 och 21  $\mu\text{g/l}$  under höstperioderna (figur 71). Halterna sjönk till våren 2018 och efter den torra sommaren 2018 steg Cu-halterna anmärkningsvärt till ca 20  $\mu\text{g/l}$ . Våren 2019 var Cu-halterna i båda referensfälten samma som starthalterna. I slutet av studieperioden steg halterna återigen betydligt i båda referensfälten.

Delfält 2 och 11 följde referensfältens haltvariationer, i delfält 2 med 20 % lägre halter än referensfältets och i delfält 11 med halter på samma nivå som i referensfältet (figur 72). Undantagsvis hade delfält 11 dubbelt så hög Cu-halt som referensfältet våren 2017 och båda delfälten hade 40–60 % högre halter än referensfälten hösten 2018.

### 5.12.1 Effekter av tidigare behandlingar

I delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och  $\text{CaCO}_3$  år 2016 hade båda delfälten 50–70 % lägre Cu-halter än referensfälten i början av studieperioden p.g.a.  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen 2016 (figur 73). Cu-halterna steg långsamt, och på den södra sidan fortsatte halterna stiga mot slutet av perioden. Däremot sjönk halterna under vårperioderna på den norra sidan, medan de under höstperioderna steg, men var fortfarande låga i jämförelse med referensfältet (hösten 2019 var Cu-halten ca 40 % lägre än referensfältet).

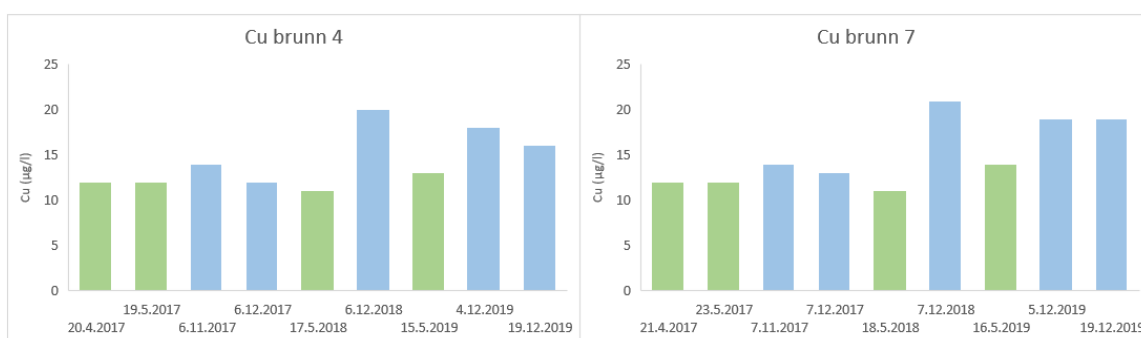
I delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 var Cu-halterna i båda delfälten lägre än referensfälten (figur 74). Kopparhalterna på den norra sidan var

på samma nivå som referensfältet fram till den torra sommaren 2018, varefter Cu-halten sjönk och tenderade att vara 20 % lägre än referensfältet. Den södra sidan följde referensfältets haltvariationer med 20–40 % lägre halter under hela studieperioden.

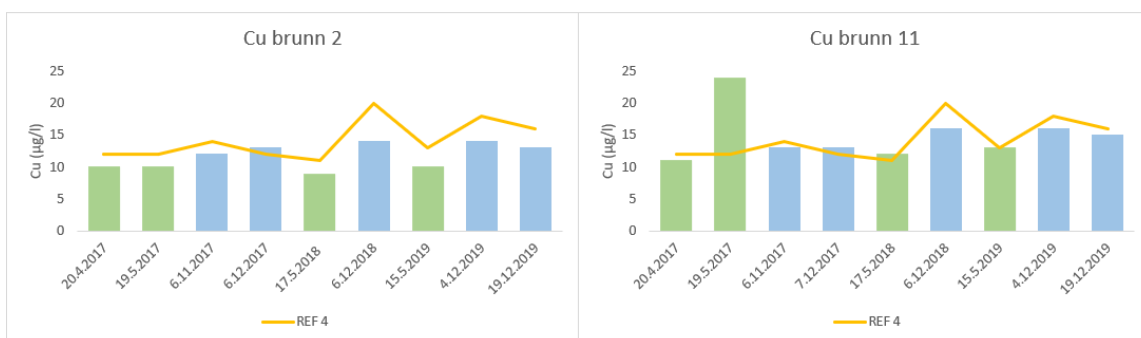
### 5.12.2 Fält som behandlats under studieperioden

Delfält 3 och 5 som behandlades med CaCO<sub>3</sub> år 2017 hade 10–30 % lägre Cu-halter än referensfälten innan CaCO<sub>3</sub>-behandlingen 2017 (figur 75). Efter behandlingen hade båda delfälten till och med 70 % lägre Cu-halter än referensfälten, men de steg successivt mot studieperiodens slut.

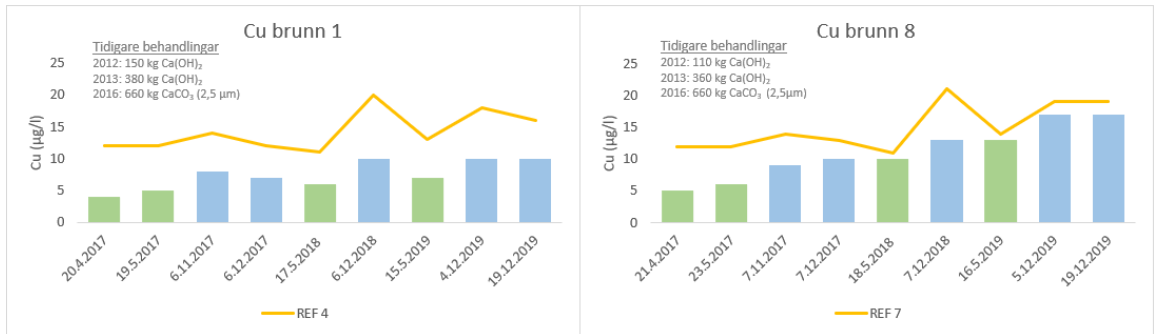
I delfält 10 och 12 som behandlades år 2017 med CaCO<sub>3</sub> och torv var Cu-halterna 10–60 % lägre än referensfälten innan behandlingen och halterna sjönk efteråt betydligt till 80–90 % lägre än referensfälten (figur 76). Behandlingens effekt minskade mot studieperiodens slut men Cu-halterna var ännu 30–50 % lägre än referensfälten.



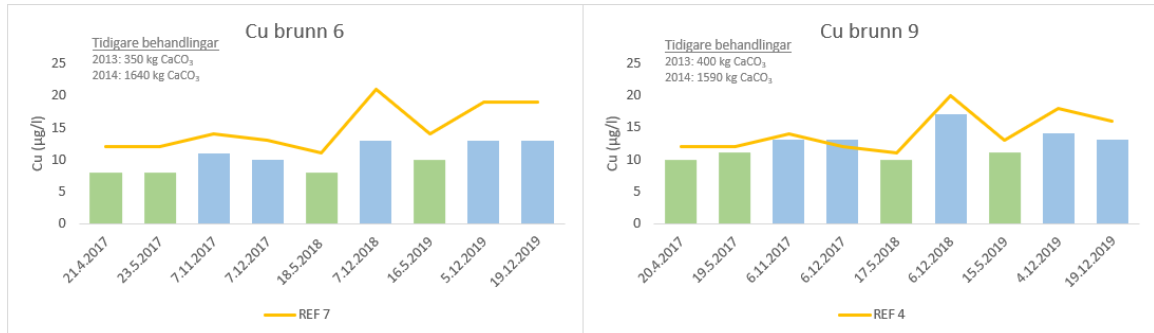
Figur 71. Cu-halterna i referensfälten 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



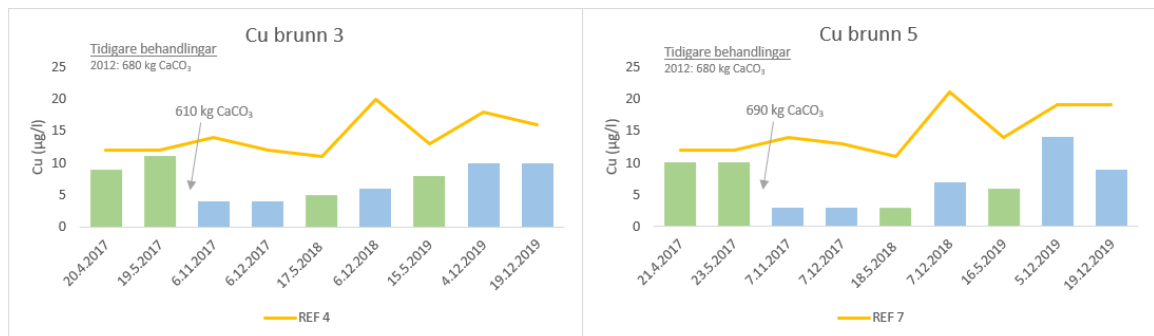
Figur 72. Cu-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Cu-halter.



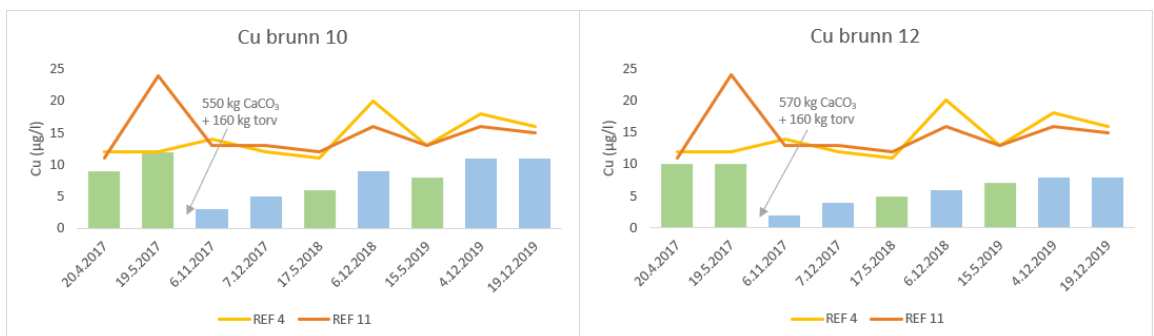
Figur 73. Cu-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 74. Cu-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 75. Cu-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 76. Cu-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Cu-halter.

## 5.13 Zink

Zinkhalterna i referensfälten 4 och 7 varierade mellan 460 och 580 µg/l under vårperioderna och mellan 520 och 790 µg/l under höstperioderna (figur 77). Zinkhalterna var relativt stabila fram till våren 2018. Efter den torra sommaren 2018 steg Zn-halterna betydligt i båda delfälten men sjönk mot slutet av studieperioden.

Delfält 2 och 11 följde referensfältens haltvariationer, men den norra sidan hade 10–30 % lägre Zn-halter än referensfältet under hela studieperioden och den södra sidan hade 20–60 % högre halter än referensfältet (figur 78).

### 5.13.1 Effekter av tidigare behandlingar

Delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och år 2016 med  $\text{CaCO}_3$  följde referensfältens haltvariationer, men hade 20–30 % lägre halter än referensfältet på den norra sidan och 20–50 % högre halter på den södra sidan (figur 79).

I delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 följde båda delfälten referensfältens haltvariationer, den norra sidan med 20–40 % högre halter i början av studieperioden och den södra sidan med nästintill identiska halter som referensfältet (figur 80). Mot slutet av studieperioden var Zn-halterna på den norra sidan på samma nivå som referensfältet.

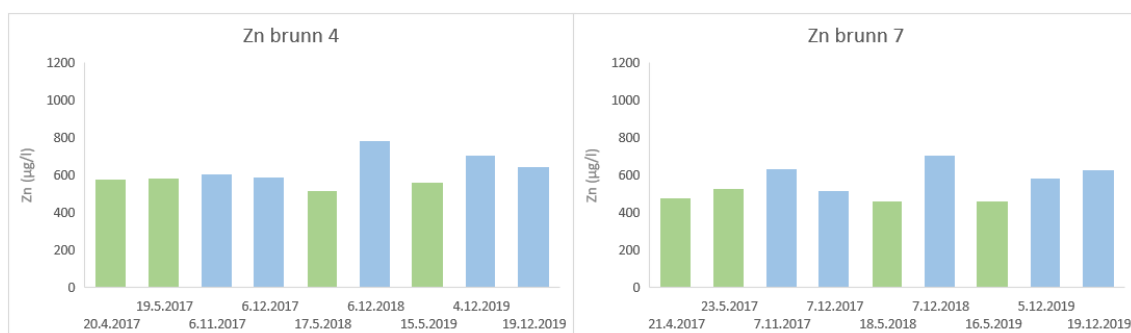
### 5.13.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 hade den norra sidan ca 10 % lägre Zn-halter än referensfältet och den södra sidan 10–20 % högre halter än referensfältet innan behandlingen (figur 81). Efter behandlingen sjönk båda delfältens Zn-halter med ungefär hälften. På den norra sidan steg halterna successivt mot slutet av studieperioden, men var fortfarande ca 20 % lägre än referensfältet. På den södra sidan var behandlingens effekt kortvarig och ingen effekt var synlig våren 2018. På den södra sidan var Zn-halterna identiska med referensfältet och steg mot slutet av perioden till 10–20 % högre än referensfältet.

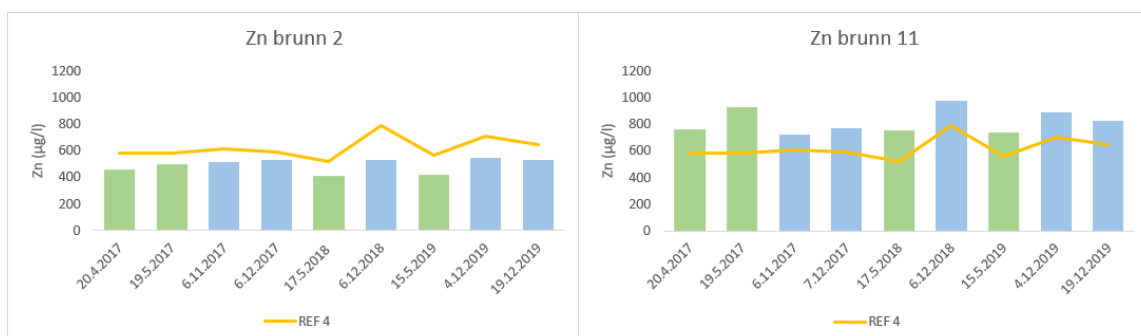
I delfält 10 och 12 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 var Zn-halterna i delfält 10 på samma nivå som referensfältet innan behandlingen och under



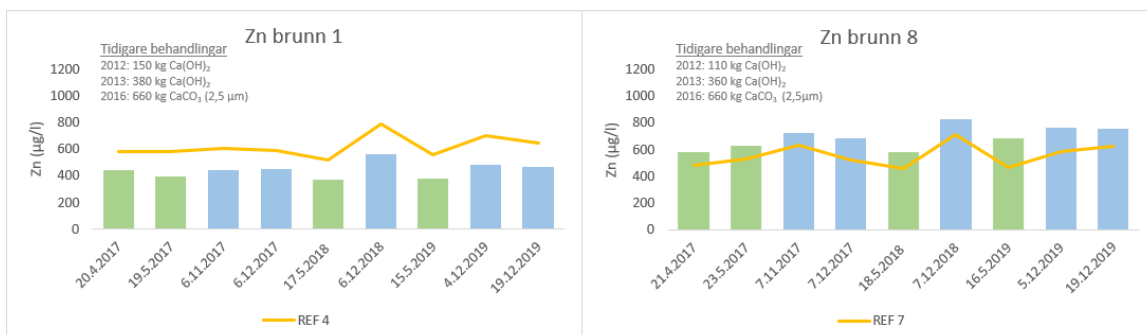
höstperioderna (figur 82). Efter behandlingen sjönk halterna till ca 10 % lägre än referensfältet, men effekten var kortvarig och de steg redan samma höst till referensfältet nivå. I delfält 12 var Zn-halterna innan behandlingen stabila, men ca 40 % lägre än referensfältet. Efter behandlingen var Zn-halterna 50–60 % lägre än referensfältet, men effekten var kortvarig och behandlingens effekt avtog mot slutet av studieperioden och återgick till samma nivå som innan behandlingen (ca 40 % lägre än referensfältet).



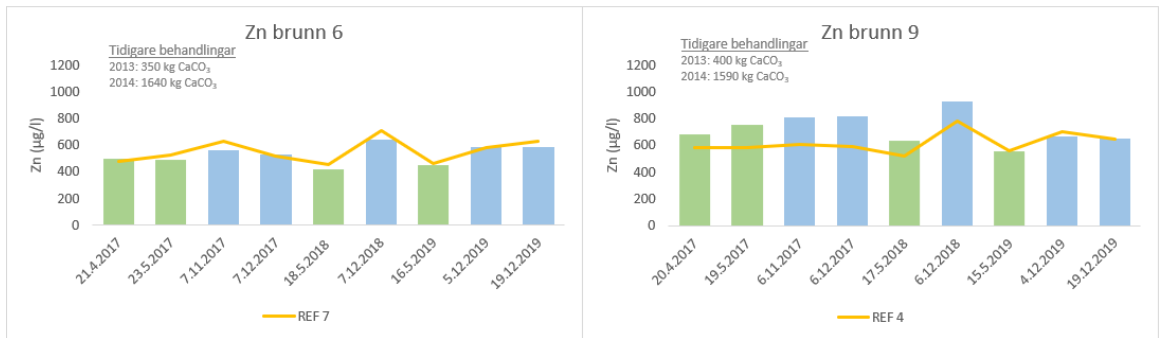
Figur 77. Zn-halterna i referensfält 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



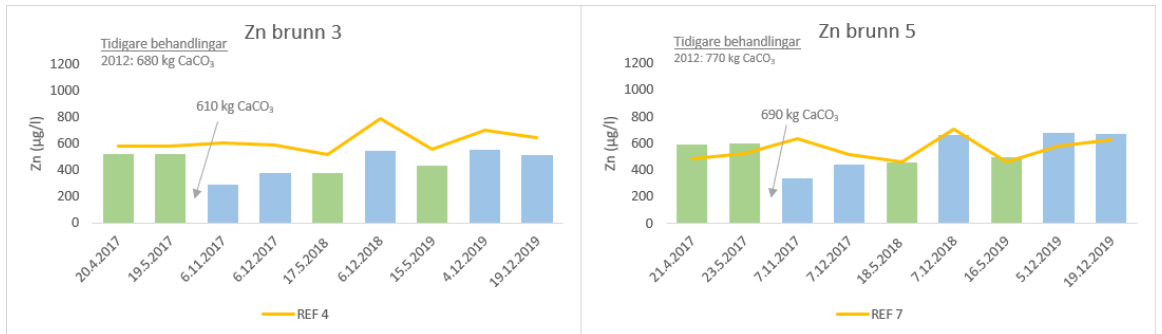
Figur 78. Zn-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Zn-halter.



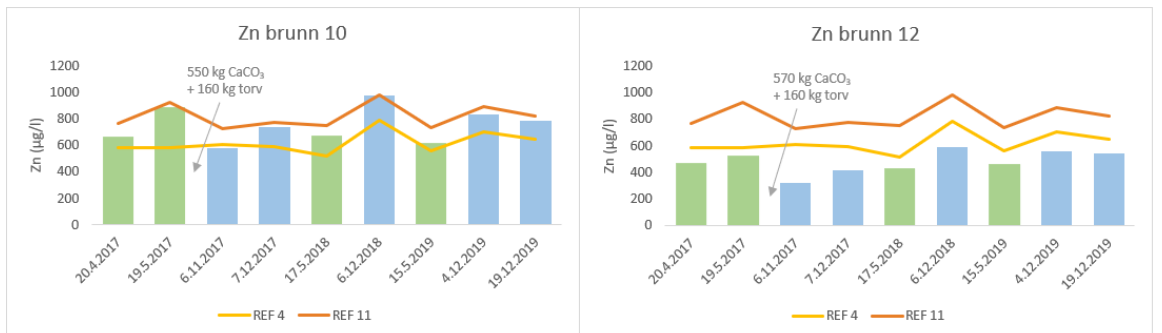
Figur 79. Zn-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 80. Zn-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 81. Zn-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 82. Zn-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Zn-halter.

## 5.14 Nickel

Referensfält 4 och 7 hade varierande Ni-halter som var mellan 170 och 200 µg/l under vårperioderna och mellan 200 och 280 µg/l under höstperioderna (figur 83). Nickelhalterna var relativt stabila fram till hösten 2018, varefter de steg betydligt. Mot slutet av studieperioden sjönk halterna en aning, men var fortfarande relativt höga.

Delfält 2 och 11 följer referensfältens haltvariationer under hela studieperioden med 10–30 % lägre halter än i referensfältet i delfält 2 och 10–20 % högre halter i delfält 11 (figur 84). I delfält 11 var Ni-halten undantagsvis ca 30 % högre än referensfältet i början av studieperioden.

#### 5.14.1 Effekter av tidigare behandlingar

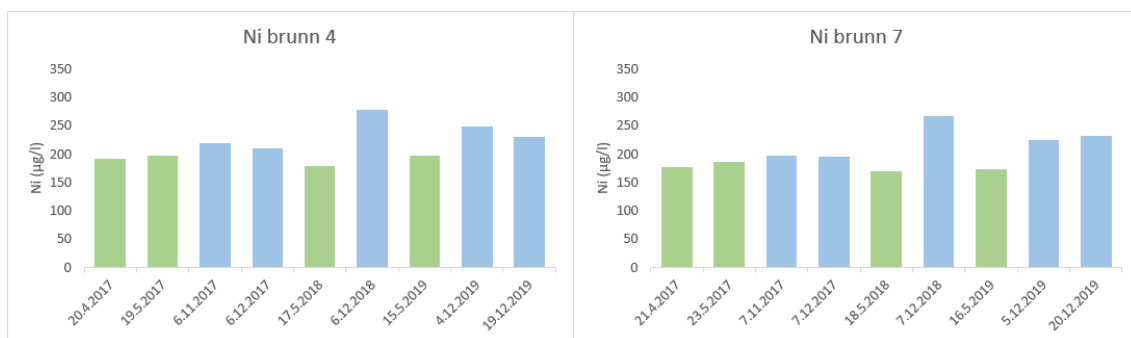
Delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 följde referensfältens haltvariationer med 20–40 % lägre Ni-halter på den norra sidan och 10–30 % högre halter på den södra sidan under hela studieperioden (figur 85). Effekten från  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen 2016 var inte synlig.

Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 följde referensfältets haltvariationer på den norra sidan med 10–30 % högre halter än referensfältet fram till den torra sommaren 2018, varefter halterna sjönk till referensfältets nivå (figur 86). På den södra sidan var Ni-halterna på samma nivå som referensfältet.

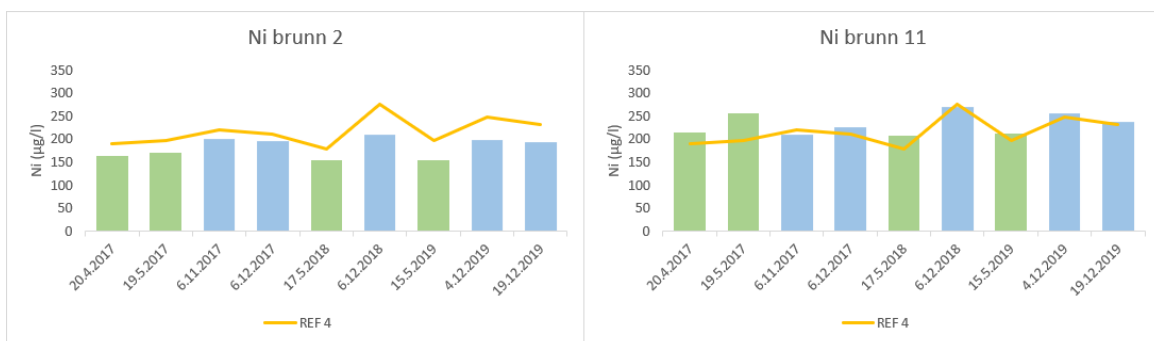
#### 5.14.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var Ni-halterna på samma som i referensfälten innan  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen 2017 (figur 87). Innan behandlingen 2017 var Ni-halterna på samma nivå som i referensfälten. Efter behandlingen sjönk halterna i båda delfälten med ca 50 % och behandlingens effekt hade olika inverkan på delfälten. På norra sidan var halten ännu 20 % lägre än referensfältet i slutet av studieperioden. På den södra sidan var effekten detsamma, men i slutet av studieperioden steg halterna till referensfältets nivå.

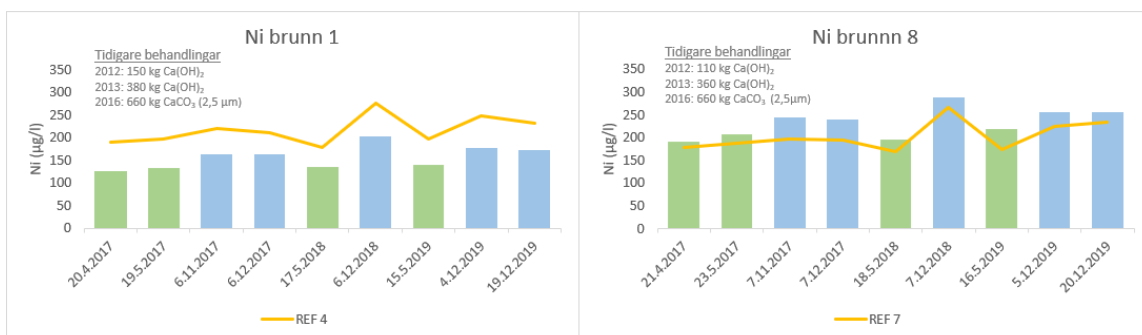
Delfält 10 och 12 som behandlades år 2017 med  $\text{CaCO}_3$  och torv hade varierande Ni-halter (figur 88). Delfält 10 följde referensfältets haltvariationer både innan och efter behandlingen. I delfält 12 var Ni-halten innan behandlingen 30–40 % lägre än referensfältet, och sjönk till 40–50 % lägre än referensfältet efter behandlingen. Behandlingens effekt avtog efter den torra sommaren 2018 i båda delfälten.



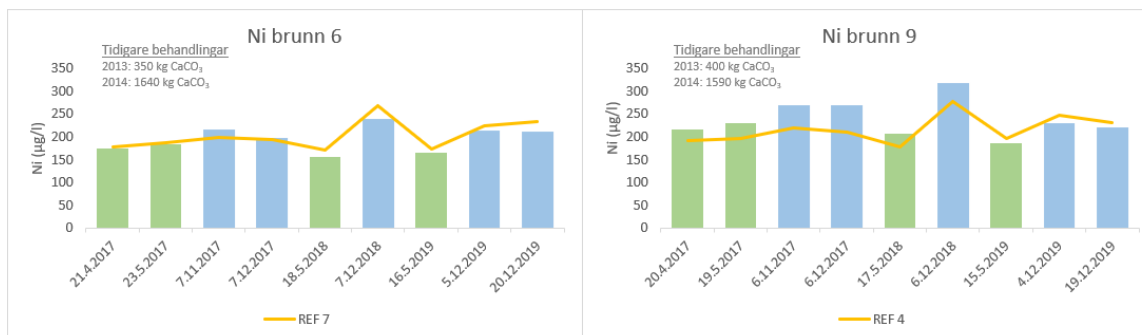
Figur 83. Ni-halterna i referensfält 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



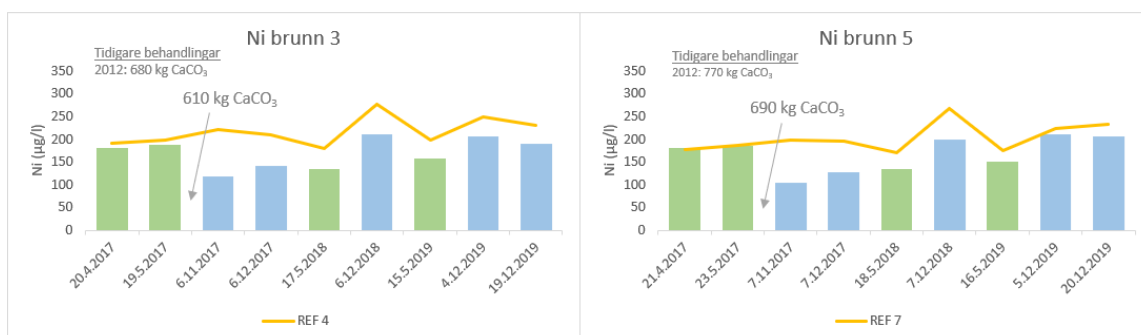
Figur 84. Ni-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Ni-halter.



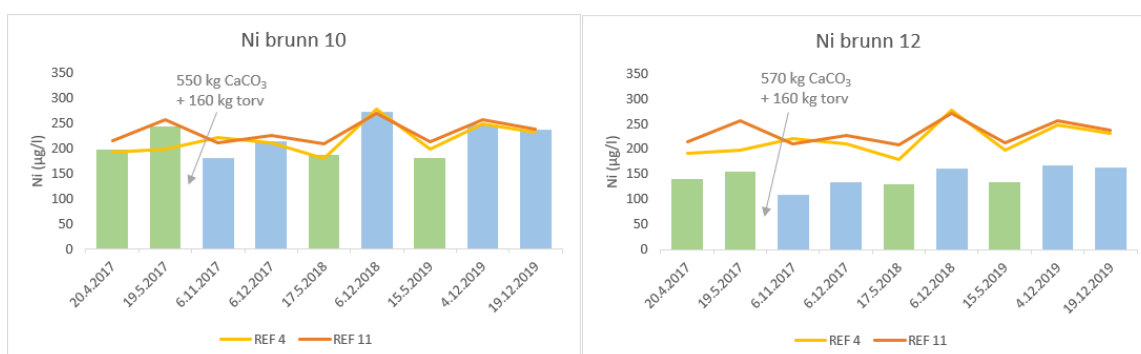
Figur 85. Ni-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 86. Ni-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 87. Ni-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 88. Ni-halterna i delfält 10 och 12 endast behandlats under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Ni-halter.

## 5.15 Järn

I referensfält 4 och 7 var Fe-halterna varierade, mellan 0,4 och 1,2 mg/l under vårperioderna och mellan 0,5 och 1,5 mg/l under höstperioderna (figur 89). Järnhalterna var relativt låga (0,4–0,8 mg/l) fram den torra sommaren 2018, varefter halterna på den norra sidan fördubblades och steg till tre gånger högre på den södra sidan. Halterna sjönk efter detta, men var fortfarande relativt höga i slutet av studieperioden.

Järnhalterna i delfält 2 och 11 var relativt stabila men 20–50 % lägre än referensfälten (figur 90). Järnhalterna steg efter den torra sommaren 2018, liksom i referensfälten, men sjönk och var fortsättningsvis låga mot studieperiodens slut.

### 5.15.1 Effekter av tidigare behandlingar

Delfält 1 och 8 som behandlades med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  år 2012 och 2013 och med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 hade i stort sett låga men varierande halter i jämförelse med referensfälten (figur

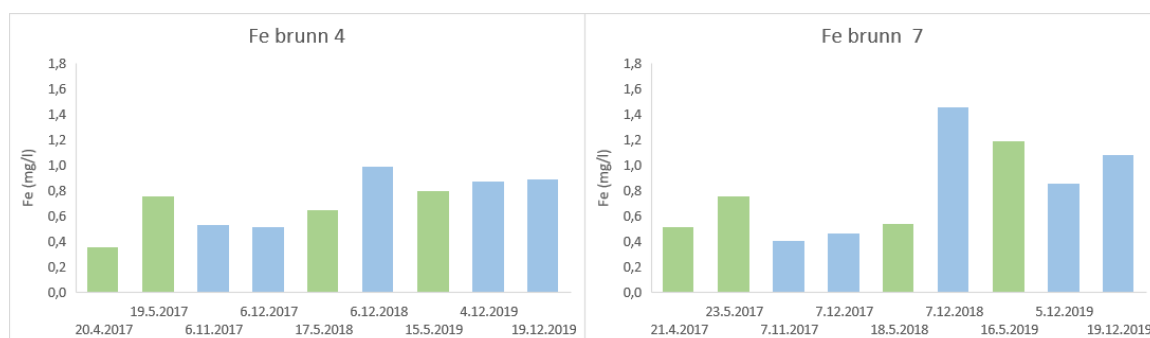
91). Järnhalterna steg efter den torra sommaren 2018 och sjönk till 50–60 % lägre än referensfälten mot slutet av studieperioden.

Delfält 6 och 9 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2013 och 2014 var stabila och hade 30–70 % lägre Fe-halter än referensfälten fram till våren 2018 (figur 92). Efter den torra sommaren 2018 fördubblades Fe-halterna, men sjönk och var 50–70 % lägre än referensfälten mot slutet av studieperioden.

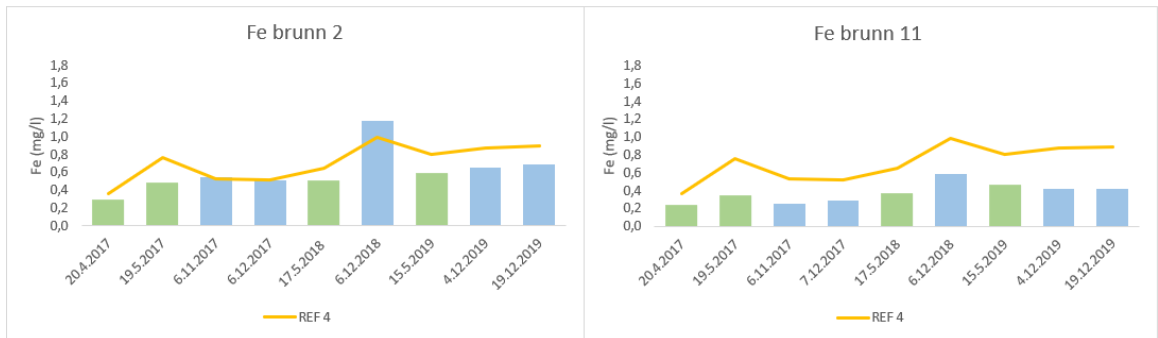
### 5.15.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades år 2012 och 2017 med  $\text{CaCO}_3$  var Fe-halterna innan behandlingen ungefär 20 % lägre än i referensfältet på den norra sidan och ungefär 50 % lägre än referensfältet på den södra sidan (figur 93). Efter behandlingen sjönk Fe-halterna i båda delfälten till 60–80 % lägre än referensfälten och behandlingens effekt varade fram till våren 2018. Efter den torra sommaren 2018 steg Fe-halterna dramatiskt på den södra sidan, men sjönk snabbt mot slutet av studieperioden till 30–50 % lägre än referensfältet. Järnhalterna på den norra sidan steg också efter den torra sommaren 2018 till 20 % lägre än referensfältet, men sjönk snabbt därefter till 60 % lägre än referensfältet.

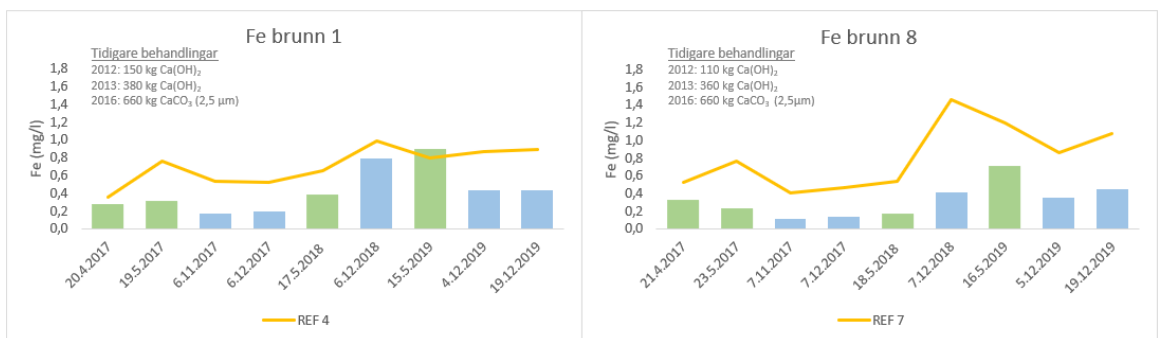
Delfält 10 och 12 behandlades som med  $\text{CaCO}_3$  och torv år 2017 hade nästintill identiska Fe-halter med referensfälten innan behandlingen (figur 94). Efter behandlingen sjönk Fe-halterna i båda delfälten och effekten avtog våren (delfält 10) och hösten (delfält 12) 2018. Direkt efter behandlingens effekt avtog steg Fe-halterna i delfält 10 till 95 % högre än referensfälten våren 2019, medan delfält 12 var halterna 30–50 % lägre än referensfälten resten av studieperioden.



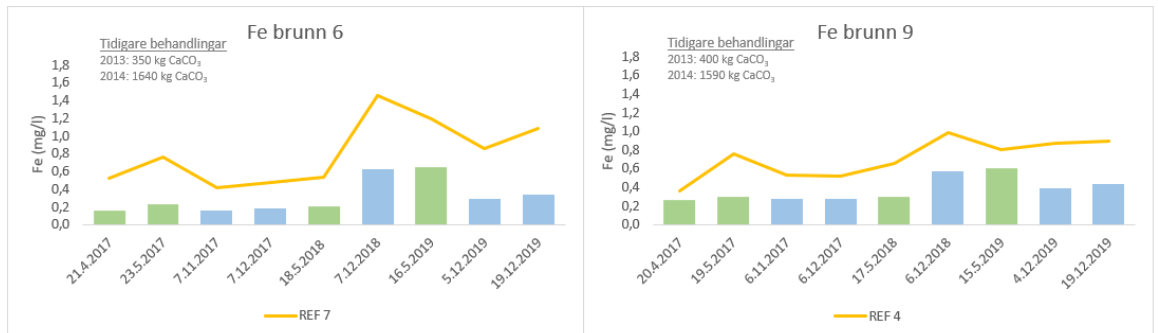
Figur 89. Fe-halterna i referensfält 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



Figur 90. Fe-halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets Fe-halter.



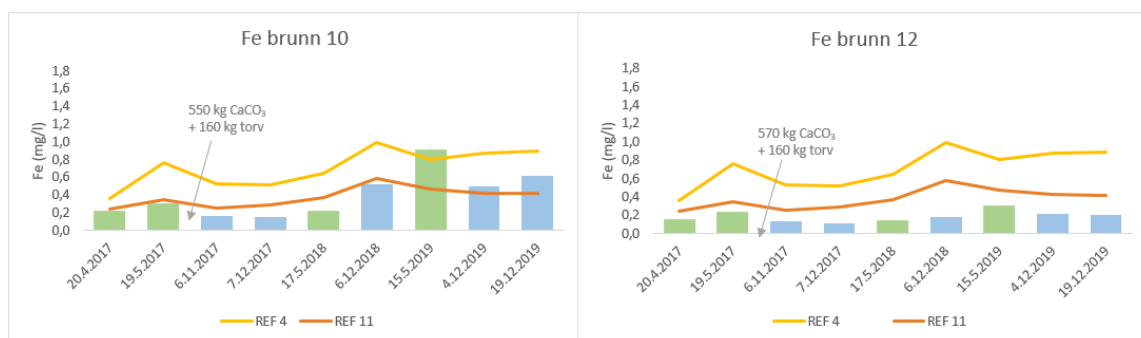
Figur 91. Fe-halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 92. Fe-halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 93. Fe-halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 94. Fe-halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens Fe-halter.

## 5.16 Tvåvärt järn

Halterna för tvåvärt järn varierade i referensfält 4 och 7 mellan 300 och 1300 µg/l under vårperioden och mellan 350 och 1500 µg/l under höstperioden (figur 95). Halterna för tvåvärt järn steg från början av studieperioden till hösten 2018, till ca 800 µg/l i delfält 4 och 1600 µg/l i delfält 7. Halterna sjönk mot slutet av studieperioden, men var fortsättningsvis höga.

Delfält 2 och 11 följde referensfälten haltvariationer med 20–50 % lägre Fe<sup>2+</sup>-halter innan hösten 2018 och 30–60 % lägre efter hösten 2018 (figur 96). Delfält 2 hade undantagsvis Fe<sup>2+</sup>-halter på samma nivå som referensfältet hösten 2017 och 20 % högre halter än referensfältet hösten 2018.

### 5.16.1 Effekter av tidigare behandlingar

I delfält 1 och 8 som behandlades år 2012 och 2013 med Ca(OH)<sub>2</sub> och år 2016 med CaCO<sub>3</sub> var Fe<sup>2+</sup>-halterna 60–80 % lägre än referensfälten i början av studieperioden (figur 97). CaCO<sub>3</sub>-behandlingens effekt avtog hösten 2017 (norra delfältet) och våren 2018 (södra delfältet), varefter Fe<sup>2+</sup>-halterna steg till efter den torra sommaren 2018 fram till våren 2019. I slutet av studieperioden sjönk halterna betydligt till 50–70 % lägre än referensfälten, till samma nivå som efter behandlingen 2017.

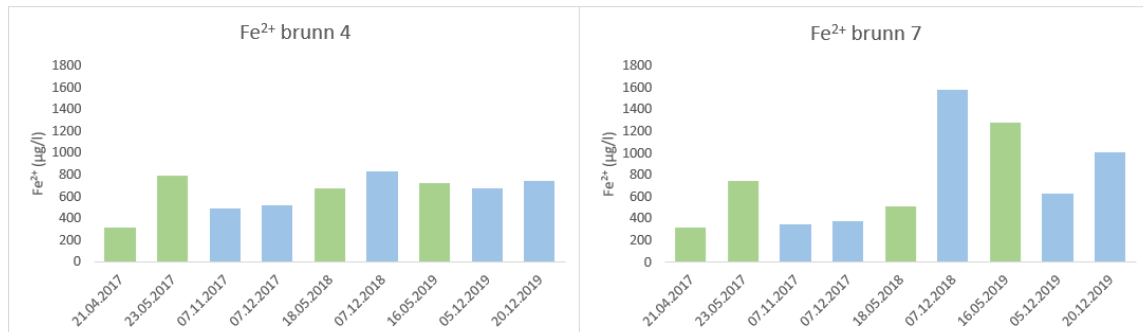
I delfält 6 och 9 som behandlades år 2013 och 2014 med CaCO<sub>3</sub> var halterna för tvåvärt järn var 40–70 % lägre än referensfälten fram till våren 2019, då halterna steg en aning men sjönk därefter till 60–80 % lägre än referensfälten (figur 98).



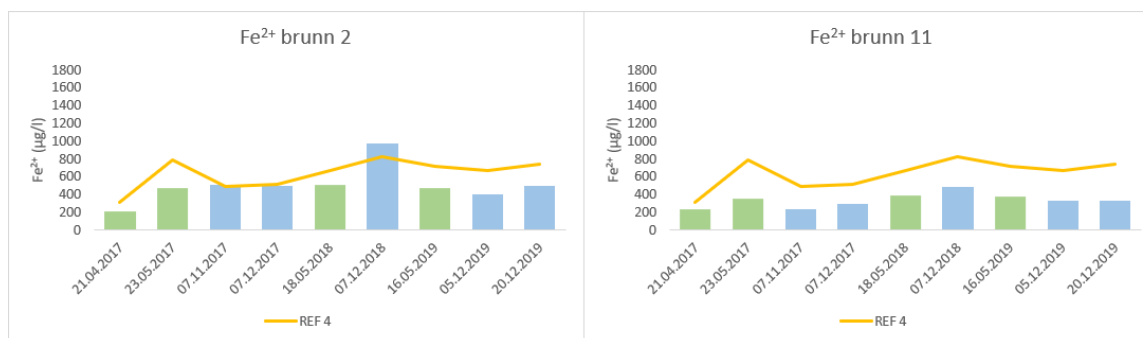
### 5.16.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 var  $\text{Fe}^{2+}$ -halterna i båda delfälten 20–50 % lägre än referensfälten innan behandlingen och efter behandlingen sjönk halterna till 70–80 % lägre än referensfälten (figur 99). Behandlingens effekt avtog våren 2018 (södra delfältet) och hösten 2018 (norra delfältet) och delfälten återgick snabbt till samma tillstånd som innan behandlingen. Våren och hösten 2019 var halterna 20–60 % lägre än referensfälten.

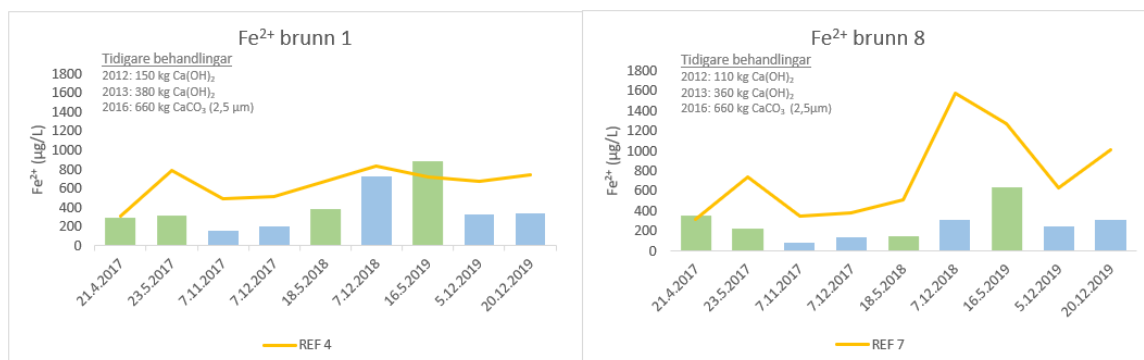
I delfält 10 och 12 som behandlades år 2017 med  $\text{CaCO}_3$  och torv hade båda delfälten 20–40 % lägre  $\text{Fe}^{2+}$ -halter än referensfälten innan behandlingen (figur 100). Efter behandlingen sjönk  $\text{Fe}^{2+}$ -halterna i delfält 10 till 30–50 % lägre än referensfälten fram till hösten 2018 då behandlingens effekt avtog. Halten för tvåvärt järn i delfält 10 steg hastigt våren 2019 till 140 % högre än referensfältet och var 60 % högre än referensfältet i slutet av studieperioden. I delfält 12 sjönk  $\text{Fe}^{2+}$ -halterna efter behandlingen till 40–70 % lägre än referensfältet för resten av studieperioden.



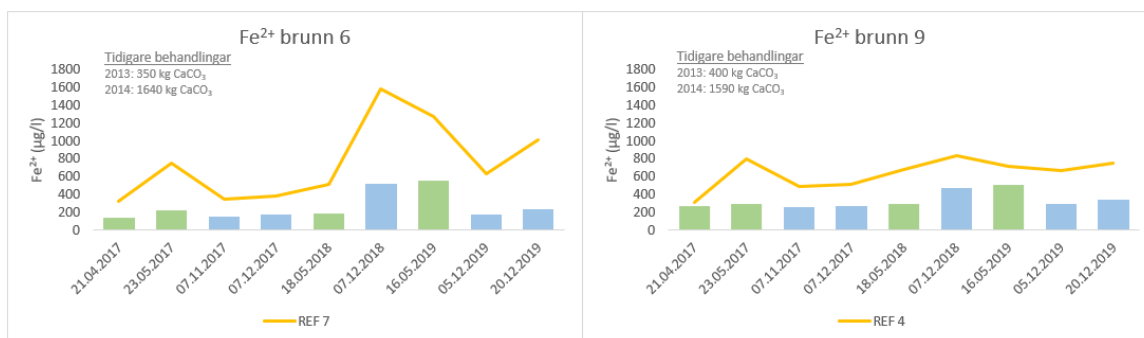
Figur 95.  $\text{Fe}^{2+}$ -halterna i referensfält 4 och 7 under studieperioden 2017–2019.



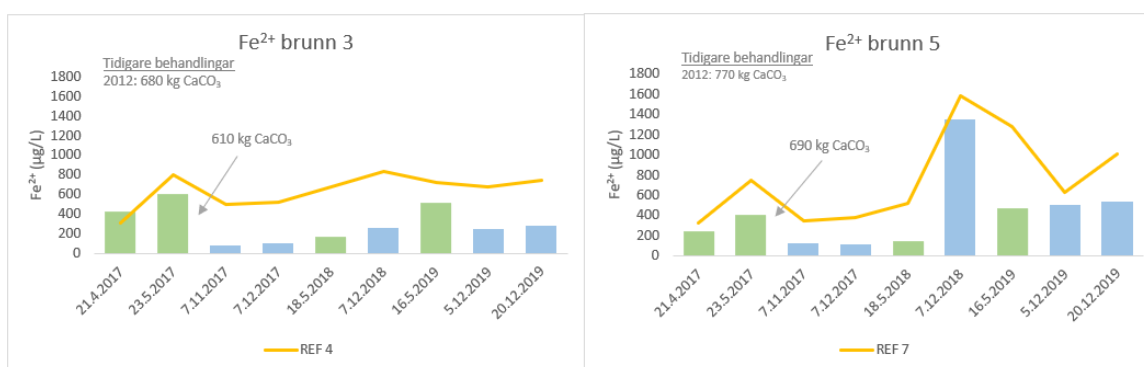
Figur 96.  $Fe^{2+}$ -halterna i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gula linjen representerar referensfältets  $Fe^{2+}$ -halter



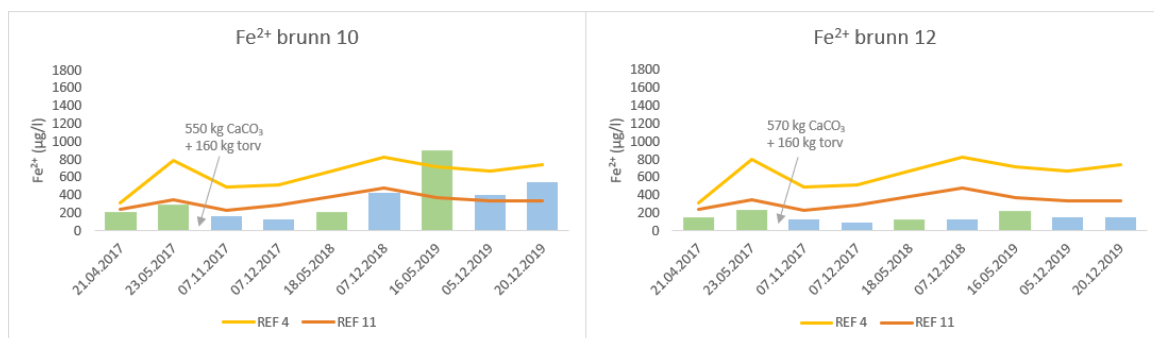
Figur 97.  $Fe^{2+}$ -halterna i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 98.  $Fe^{2+}$ -halterna i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019.



Figur 99.  $Fe^{2+}$ -halterna i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019.



Figur 100.  $Fe^{2+}$ -halterna i delfält 10 och 12 som behandlats endast under studieperioden 2017–2019. Den röda och gula linjen representerar referensfältens  $Fe^{2+}$ -halter.

## 5.17 Andelen tvåvärt järn

Nästa allt järn förekom i tvåvärd form i referensfälten 4 och 7. Våren 2017 och hösten 2019 var andelen tvåvärt järn dock något lägre (61–87% och 73–77%) (figur 101). På den norra sidan steg  $Fe^{TOT}$ -halterna mot slutet av perioden och på den södra sidan steg halterna betydligt våren 2019 och var höga mot slutet av studieperioden.

I delfält 2 och 11 förekom nästan allt järn i tvåvärd form, såsom i referensfälten. Andelen tvåvärt järn sjönk efter den torra sommaren 2018 något lägre (73–83%) för resten av studieperioden (figur 102). Halterna för  $Fe^{TOT}$  var relativt stabila i båda delfälten fram till hösten 2018 då halterna steg (fördubblades i delfält 2 och höjdes betydligt i delfält 11), och efter det sjönk mot slutet av studieperioden.

### 5.17.1 Effekter av tidigare behandlingar

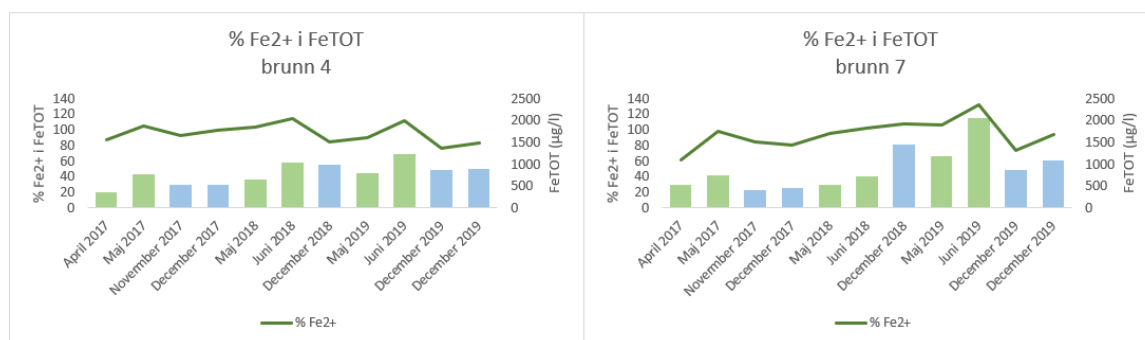
I delfält 1 och 8 som behandlades år 2012 och 2013 med  $Ca(OH)_2$  och år 2016 med  $CaCO_3$  förekom järn i stort sätt i form av tvåvärt järn. På den norra sidan var andelen tvåvärt järn stabilt (99%) fram till hösten 2019, då det sjönk en aning (till 76%) (figur 103). På den södra sidan var andelen tvåvärt järn aningen mer ostabilt och sjönk till höstperioderna (till 70–75 %), men höjdes igen till vårperioderna (figur 103). Båda delfälten relativt låga  $Fe^{TOT}$ -halter jämfört med referensfälten.  $Fe^{TOT}$ -halterna var låga och stabila fram till  $CaCO_3$ -behandlingens effekt avtog efter den torra sommaren 2018, varefter  $Fe^{TOT}$ -halterna steg men sjönk snabbt igen.

I delfält 6 och 9 som behandlades år 2013 och 2014 med  $\text{CaCO}_3$  förekom största delen av järnet i form av tvåvärt järn. Andelen tvåvärt järn sjönk sakta mot slutet av studieperioden (till 70–80 %) (figur 104). Delfälten hade relativt låga  $\text{Fe}^{\text{TOT}}$ -halter under hela perioden, bortsett från höjda halter hösten 2018 och våren 2019.

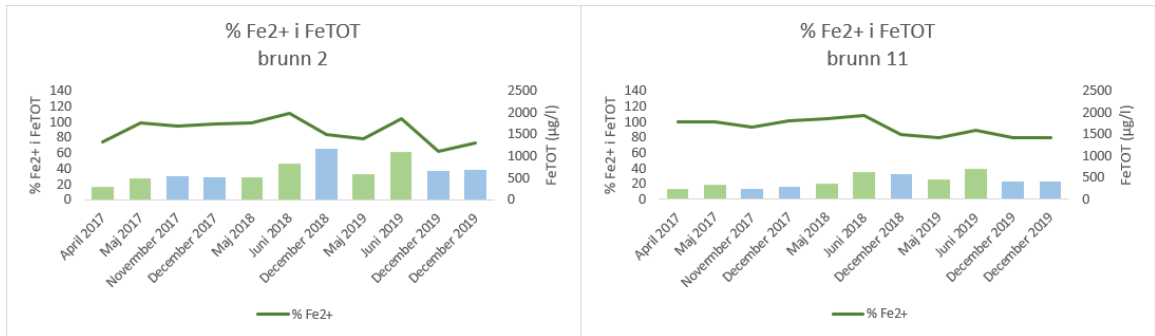
### 5.17.2 Fält som behandlats under studieperioden

I delfält 3 och 5 som behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2012 och 2017 förekom största delen av järnet i form av tvåvärt järn. Andelen tvåvärt järn sjönk (till ca 90%) efter behandlingen och ytterligare (till ca 80%) efter den torra sommaren 2018 (figur 105). Innan behandlingen var  $\text{Fe}^{\text{TOT}}$ -halterna låga, men efter  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen sjönk de ytterligare. Behandlingens effekt avtog våren 2019 på den norra sidan och hösten 2018 på den södra sidan. Halterna för  $\text{Fe}^{\text{TOT}}$  steg betydligt efter att behandlingens effekt avtog och var höga resten av studieperioden.

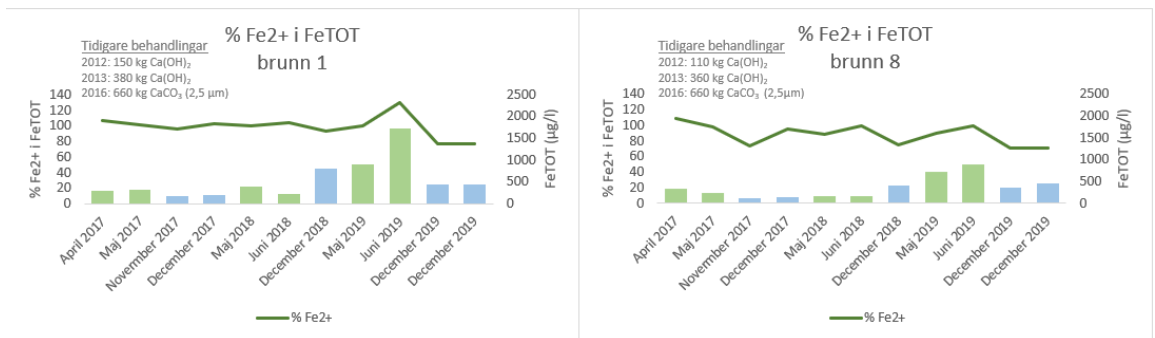
I delfält 10 och 12 som behandlades år 2017 med  $\text{CaCO}_3$  och torv förekom största delen av järnet i form av tvåvärt järn. Andelen tvåvärt järn sjönk efter behandlingen (till 90%) och sjönk ytterligare (till 70–80%) efter den torra sommaren 2018 (figur 106). Båda delfälten hade låga  $\text{Fe}^{\text{TOT}}$ -halter innan behandlingen som fortsatte vara låga efter  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen. I delfält 12 syntes behandlingens effekt under hela studieperioden.



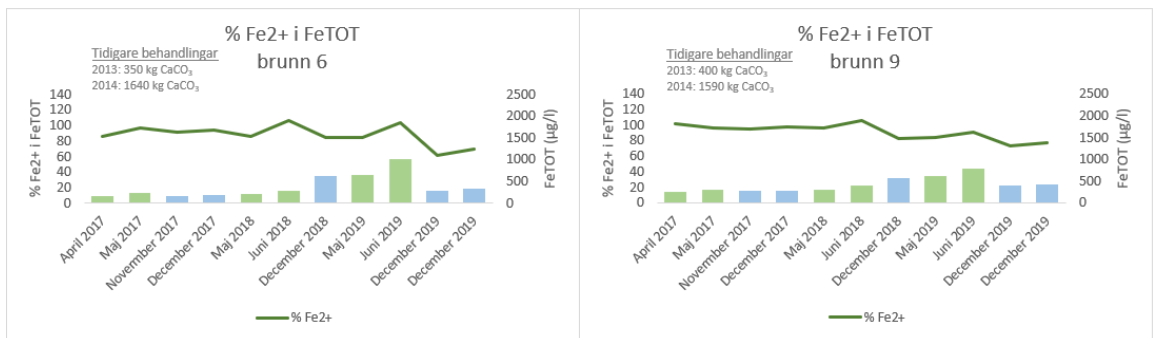
Figur 101. Andelen tvåvärt järn i referensfält 4 och 7 under studieperioden 2017–2019. Den gröna linjen representerar  $\text{Fe}^{\text{TOT}}$ -halten.



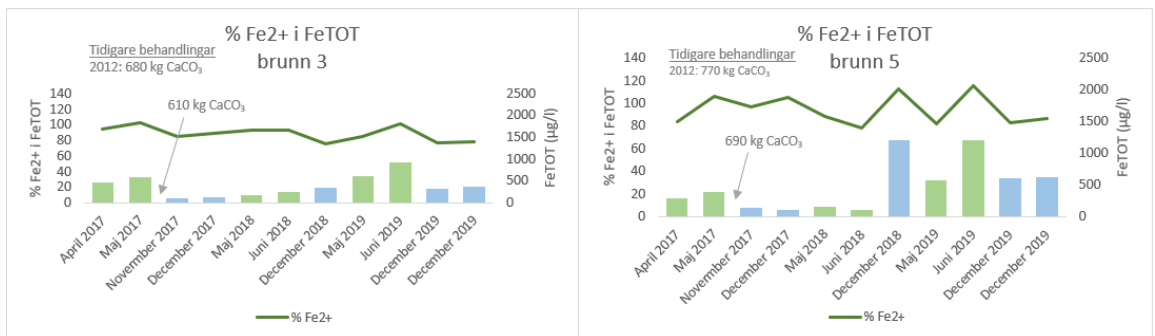
Figur 102. Andelen tvåvärt järn i delfält 2 (utan plastfilm) och 11 (endast behandlats med åvatten) under studieperioden 2017–2019. Den gröna linjen representerar  $Fe^{TOT}$ -halten.



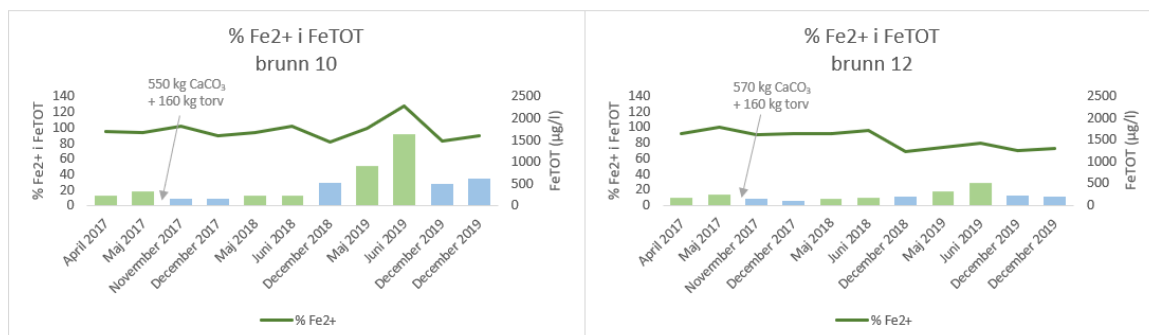
Figur 103. Andelen tvåvärt järn i delfält 1 och 8 som behandlats före studieperioden 2017–2019. Den gröna linjen representerar  $Fe^{TOT}$ -halten.



Figur 104. Andelen tvåvärt järn i delfält 6 och 9 som behandlats före studieperioden 2017–2019. Den gröna linjen representerar  $Fe^{TOT}$ -halten.



Figur 105. Andelen tvåvärt järn i delfält 3 och 5 som behandlats både före och under studieperioden 2017–2019. Den gröna linjen representerar  $Fe^{TOT}$ -halten.



Figur 106. Andelen tvåvärt järn i delfält 10 och 12 som behandlats under studieperioden 2017–2019. Den gröna linjen representerar  $Fe^{TOT}$ -halten.

## 5.18 Kalciumbudget

Från referensfälten 4 och 7 rann det i medeltal för studieperioden 174 kg respektive 160 kg kalcium under studieperioden 2017–2019 (tabell II). I båda delfälten tenderade mängden kalcium att vara högre under höstperioderna.

Delfält 3 behandlades med 610 kg  $CaCO_3$ , varav 244 kg var kalcium och delfält 5 med 690 kg  $CaCO_3$ , varav 276 kg var kalcium. Från delfält 3 rann det 294 kg mer kalcium än från referensfältet under studieperioden 2017–2019. Från delfält 5 rann det 166 kg mer kalcium än från referensfältet. Delfälten följde liknande variationer som i referensfälten (tabell II). I båda delfälten fördubblades mängden kalcium från våren 2017 till hösten 2017 när  $CaCO_3$ -behandlingen injicerades. Kalciummängden fortsatte att vara hög under resten av höstperioderna och i delfält 3 steg mängden kalcium ytterligare till hösten 2018.

Delfält 10 behandlades med 550 kg  $CaCO_3$ , varav 220 kg var kalcium och delfält 12 med 570 kg  $CaCO_3$ , varav 228 kg var kalcium. Från delfält 10 rann det ut 75 kg mer kalcium än från referensfältet under studieperioden 2017–2019. Från delfält 12 rann det 132 kg mer kalcium än från referensfältet (tabell II). Delfält 10 och 12 hade också högre mängder kalcium under höstperioderna 2017 och 2018. Efter behandlingen 2017 fördubblades mängden kalcium som fortsatte vara hög hösten 2018, men sjönk till ursprungsmängden till hösten 2019.

Tabell II. Kalciumbudgeten för delfält 3, 5 10 och 12 som behandlades år 2017 samt för referensfälten för jämförelse. Våren 2017 räknas inte med i det årliga medeltalet då den tidsperioden var innan injiceringen av behandlingen. I den sista kolumnen med överskott kalcium jämfört med referensfältet är beräknat för 3 år (2017–2019).

Brunn	Datum	Ca injuserat år 2017 (kg)	Ca (mg/L)	Medeltal vår / höst (kg)	Medeltal för året (kg)	Medeltal för 2,5 år (kg)	Medeltal Ca kg/år/ha gångr flödet	Överskott jfr med ref. (kg)
BRUNN 3	6.11.2017	244	159	312				
BRUNN 3	6.12.2017		124		312	272	22	154
BRUNN 3	17.5.2018		93	206				
BRUNN 3	6.12.2018		179	395	301		21	121
BRUNN 3	15.5.2019		84	185	204		15	19
BRUNN 3	4.12.2019		107	223				
BRUNN 3	19.12.2019		96					
BRUNN 5	7.11.2017	276	145	288				
BRUNN 5	7.12.2017		116		288	215	20	144
BRUNN 5	18.5.2018		82	181				
BRUNN 5	7.12.2018		118	261	221		15	53
BRUNN 5	16.5.2019		75	165	135		13	-31
BRUNN 5	5.12.2019		88	106				
BRUNN 5	19.12.2019		86					
BRUNN 10	6.11.2017	220	138	287				
BRUNN 10	7.12.2017		122		287	242	20	129
BRUNN 10	17.5.2018		90	199				
BRUNN 10	6.12.2018		146	323	261		18	81
BRUNN 10	15.5.2019		74	163	179		13	-6
BRUNN 10	4.12.2019		91	195				
BRUNN 10	19.12.2019		86					
BRUNN 12	6.11.2017	228	124	259				
BRUNN 12	7.12.2017		111		259	218	18	101
BRUNN 12	17.5.2018		85	188				
BRUNN 12	6.12.2018		122	269	229		16	49
BRUNN 12	15.5.2019		74	163	167		12	-18
BRUNN 12	4.12.2019		79	171				
BRUNN 12	19.12.2019		76					
REF. 4	6.11.2017		73	158				
REF. 4	6.12.2017		71		158	174	11	
REF. 4	17.5.2018		62	137				
REF. 4	6.12.2018		101	223	180		13	
REF. 4	15.5.2019		78	172	185		13	
REF. 4	4.12.2019		92	198				
REF. 4	19.12.2019		88					
REF. 7	7.11.2017		65	144				
REF. 7	7.12.2017		65		144	160	10	
REF. 7	18.5.2018		59	129				
REF. 7	7.12.2018		94	208	169		12	
REF. 7	16.5.2019		68	150	167		12	
REF. 7	5.12.2019		82	184				
REF. 7	19.12.2019		84					

## 5. Diskussion

Sura sulfatjordar används aktivt p.g.a. att de är bördiga odlingsjordar. Detta skapar ett svårlöst problem eftersom det leder till att höga metallkoncentrationer spolats ut i vattendragen och haven och orsakar allvarlig miljöfara (Toivonen & Österholm 2011). PRECIKEM-projektet inleddes 2010 och har pågått sedan dess (PRECIKEM 2010–2014, PRECIKEM II 2015–2018 och ProPRECIKEM 2019–2022). Projektets mål har varit att utveckla kemiska metoder för att odlare i livsmedelsproduktionen ska kunna fortsätta odla på sura sulfatjordar på ett hållbart sätt från ett miljömässigt perspektiv. Precisionsbehandlingar på sura sulfatjordar har gjorts genom att pumpa in suspensioner i studieområdets täckdikningssystem för att kunna påverka de hydrologiskt aktiva makroporerna i det suraste markskiktet. Fokuset i denna avhandling låg på att studera effekten av precisionsbehandlingarna på dräneringsvattnets kvalitet. År 2010–2016 utfördes behandlingar med  $\text{CaCO}_3$  och  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Som resultat av behandlingarna höjdes pH samtidigt som aciditeten och metallhalterna sjönk (Dalhem m.fl. 2019). Dalhem m.fl. (2019) konstaterade att  $\text{CaCO}_3$  som användes lyckades nå hydrologiskt aktiva makroporer och bilda en buffert för det sura grundvattnet.  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen var effektivare än  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -behandlingen (Dalhem m.fl. 2019). Projektet (ProPRECIKEM 2019–2022) fortsätter och fokuserar på behandlingsmetodens praktiska användning och att göra den tillgänglig för jordbruket.

Studieområdet består av 12 lika stora (1 ha) delfält. Av de 12 delfälten befinner sig delfält 1–4 och 9–12 på den norra sidan och 5–8 på den södra sidan. Delfält 4 är referensfält för den norra sidan och delfält 7 referensfält för den södra sidan. Delfält 11 fungerar som referensfält för delfält 10 och 12. Behandlingarna injicerades 2017 i delfält 3, 5, 10 och 12, där delfält 3 och 5 behandlades med  $\text{CaCO}_3$  och delfält 10 och 12 med  $\text{CaCO}_3$  och torv. Samtidigt pumpades enbart vatten från Toby å i delfält 2, 4, 7 och 11. Delfält 1 och 8 behandlades med  $\text{CaCO}_3$  år 2016 och man kan därmed ännu se behandlingens effekt under denna studieperiod.

Delfälten är hydrologiskt isolerade med plastfilm för att förhindra att vattnet från varje enskilt dräneringssystem läcker till närliggande fält eller förbi dräneringssystemet till/från huvuddiket. I delfält 2 saknas det plastfilm mellan huvuddiket och försöksfältet.



Avsaknad av plastfilm mot huvuddiket hade ingen signifikant effekt på haltvariationerna.

Genom anläggning av dräneringssystem med en s.k. kontrollbrunn är det möjligt att kontrollera grundvattennivån i delfälten och leda bort överflödigt markvatten under våta perioder som våren eller leda vatten till studieområdet under torra perioder som hösten. Genom att installera plastfilm isoleras delfälten hydrologiskt genom att förhindra vattnet i det övre jordlagret att läcka förbi reglersystemet (Rosendahl m.fl. 2012). Delfält 1–9 har identiska täckdikessystem där behandlingen injiceras och delfält 10–12 har en effektiviserad injicering för att möjliggöra bättre och jämnare tryck och spridning av behandlingen.

Syftet med denna avhandling var att göra en uppföljning av de geokemiska effekterna av kemiska precisionsbehandlingar i sura sulfatjordar, inklusive behandlingarnas långtidseffekter.

Avhandlingens hypoteser var att de negativa effekterna av sura sulfatjordar skulle reduceras både på lång sikt, flera år efter behandlingen, samt efter de nya behandlingarna. Det förväntades att behandlingarna skulle ha en neutraliserande effekt och att bland annat pH skulle höjas och aciditeten och metallhalter sjunka.

Under torra perioder töms markporerna på vatten och möjliggör att syre kommer in i marken och en oxidation av sulfidleror som inte tidigare varit i kontakt med syre startar. Oxidationen av sulfidmineraler till järnhydroxider börjar och en hydrolys av  $\text{Fe}^{3+}$ -joner och vätejoner ( $\text{H}^+$ -joner) produceras (Toivonen & Österholm 2011). När  $\text{Fe}^{3+}$ -joner bildats kan oxidationen fortsätta utan syre genom indirekt oxidation med järn (flera magnituder snabbare; Lottermosser 2010).

Samtidigt som  $\text{Fe}^{3+}$ -joner bildas oxideras svavel till svavelsyra ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) och pH sjunker till under fyra eller lägre (Åström m.fl. 2004). De potentiella sura sulfatjordarna blir aktiva sura sulfatjordar, men så länge sulfidjorden är vattenmättad undviks bildning av aktiva sura sulfatjordar. Många metaller är lösliga och frigörs i sura förhållanden.

En kombination av hög temperatur och liten nederbörd under sommaren 2018 orsakade torra delfält. Trots plastfilmen som installerades och möjliggjorde kontrollering av grundvattennivån, kunde en negativ effekt från den torra sommaren 2018 ses. Tjälen och snön som smälter under våren orsakar utspädning och skapar en

snabb genomrinning av vatten som går snabbt igenom marken, och därför är halterna allmänt lägre under vårperioderna. Däremot är aciditeten och metallhalterna högst på hösten efter varmperioden då avdunstningen avtar och avrinningen ökar. Belastningen är som störst om sommaren har varit torr och följs av kraftiga regn. En delorsak till detta är att oxidationen av sulfider blir mera omfattande när marken är torr (Åström m.fl. 2007; Toivonen & Österholm 2011)

Effekten från den torra sommaren 2018 var tydlig och syntes i referensfälten som en höjning i halterna på hösten. Halterna sjönk till normaltillstånd följande vår, men effekten var synlig ännu hösten 2019. Elektriska konduktiviteten och halterna var förhöjda i referensfälten för aciditet, Al, Ca, Cl, Co, Cu, EC, Fe, Fe<sup>2+</sup>, Ni, S och Zn. pH i referensfälten var också som lägst (0,1–0,2 pH-enheter lägre än hösten 2017) hösten 2018 och 2019. Den torra sommaren 2018 hade däremot inte någon signifikant effekt på referensfälten för S/Cl och Ca/Sr, vilket tyder på att torkan gav hydrologiska effekter (vattnets flödesvägar, indunstning, utspädningseffekt) som var viktigare för vattenkvaliteten än ökad oxidation.

Även om halterna var lägre i de behandlade delfälten tenderade de relativa haltvariationerna följa samma väderberoende mönster. Det finns många faktorer som påverkar de enskilda delfälten, som läge, väder och hydrologi. Alla delfält utom delfält 2 har isolerade hydrologiska förhållanden på grund av den installerade plastfilmen. Samma kunde även ses i de delfält som tidigare behandlats med CaCO<sub>3</sub> och Ca(OH)<sub>2</sub>.

Innan behandlingen följde halterna i de behandlade delfälten referensfältens haltvariationer. Effekten var omedelbar i de variabler som påverkades av behandlingarna. CaCO<sub>3</sub>-behandlingen som gjordes år 2017 utfördes i delfält 3 och 5 och i delfält 10 och 12 med CaCO<sub>3</sub> och torv. Enligt Dalhem (m.fl. 2019) hade CaCO<sub>3</sub>-behandlingen tidigare år en neutraliserande effekt. Med ett stigande pH förväntades också sänkta metallhalter.

I både det norra och det södra referensfältet hölls pH kring 4 under hela studieperioden, oberoende av årstid (figur 5). I de behandlade delfälten steg pH omedelbart efter CaCO<sub>3</sub>-behandlingen, som högst upp till 5,8 (figur 9 och 10).

Aciditeten är ett mer rättvisande sätt att mäta sulfatjordarnas försurningsbelastning än pH som är starkt beroende av buffringsreaktioner. Men generellt sätt innebär ett högt pH

låg aciditet och vice versa (Lahermo m.fl. 1996). Både den norra och den södra referensfältens aciditet samt aciditeten i delfält 2 och 11 steg efter den torra sommaren 2018. I delfält 3 och 5 var mängden kalk (610/690 kg) för liten för att åstadkomma en betydande sänkning av aciditeten (sjönk endast 10 %; figur 15).

Elektrisk konduktivitet mäter ledningsförmågan och kan användas för att uppskatta mängden upplösta joner i vatten och således även urlakningen av upplösta joner ur marken (Tenhola m.fl. 2004; Lahermo m.fl. 1996). En riklig mängd elektrolyter leder till en hög elektrisk konduktivitet (Lahermo m.fl. 1996). Både norra och södra referensfältet hade stabilt EC fram till den torra sommaren 2018, varefter EC steg. Resten av delfälten, oavsett behandling, hade liknande EC och variationer som referensfälten. Efter hösten 2018 var EC i de behandlade delfälten 10–20 % lägre än referensfältet, som kan förklaras med att oxidationen kan ha minskat i de behandlade delfälten och jonernas löslighet varit mindre pga. högre pH-värde.

CaCO<sub>3</sub>-behandlingen hade ingen märkbar effekt på S-halten (figur 27 och 28), vilket kan bero på att behandlingen inte har någon effekt på oxidationen. Samtidigt finns det en mycket stor svavelreserv i marken som gör att det nödvändigtvis inte märks i sulfathalterna på kort sikt. Man kan således inte med säkerhet utgå från att oxidationen inte minskat. Den torra sommaren 2018 kan ha ökat oxidationen eftersom sulfathalten steg i alla delfält.

Litorinaleran som finns i området har en hög Cl-halt p.g.a. de sedimenterats i saltvattenhav (Lahermo m.fl. 1996). Lahermo m.fl. har publicerat (1996) medianvärden för 1000 bäckar i Finland där Cl-halterna var kring 0,5–15 mg/l och i Vasatrakten 20–50 mg/l (Lahermo m.fl. 1996). Kloridhalterna i referensfälten samt i delfält 2 var 5–10 gånger högre i jämförelse med resten av landets Cl-halter. Klorid är ett element som inte reagerar med lösliga eller fasta ämnen och deltar inte i oxidations- och reduktionsreaktioner. Därmed är klorid inte ett pH-beroende element och CaCO<sub>3</sub>-behandlingen förväntades inte ha någon effekt på Cl-halten. CaCO<sub>3</sub>-behandlingen hade ingen effekt på Cl-halterna i de behandlade delfälten och det var ingen signifikant skillnad i Cl-halten mellan behandlade och obehandlade delfält. S/Cl-förhållandet påverkades inte av behandlingen.

Aluminium är ett pH-beroende element och det var förväntat att Al-halten skulle sjunka då pH höjdes. Aluminiumjonen (Al<sup>3+</sup>) är löslig vid pH <4. Vid pH >4 börjar Al<sup>3+</sup>-jonen successivt hydrolysera till olika former av hydroxider, t.ex. AlOH<sup>2+</sup>, Al(OH)<sub>2</sub> eller formar komplex med organiska molekyler och blir nästan olös i

hydroxidform ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) vid  $\text{pH} > 5,5$ . När  $\text{pH}$  höjs över 8 börjar aluminium lösa upp sig igen som  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  (Krstic m.fl. 2012). Aluminiumets form påverkar dess rörlighet och formen är viktigare för toxiciteten än koncentrationen (Lahermo m.fl. 1996). Lösligt aluminium är ett av de största hoten mot liv i vattendrag och är kanske det enskilt största problemet med sura sulfatjordar. Aluminium irriterar och fälls ut på fiskarnas gälar som kan leda till fiskdöd (Hudd 2000). Aluminiumhalterna sjönk betydligt med  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen som visar behandlingens neutraliserande effekt (figur 45) som också Dalhem m.fl. (2019) visat efter av tidigare behandlingar. I Finlands bäckar är Al-halten vanligtvis 25–250  $\mu\text{g/l}$  och i studieområdet var Al-halterna i referensfältet hundratals gånger högre (Lahermo m.fl. 1996). Aluminiumhalterna var högst i referensfälten, under höstperioderna, särskilt efter den torra sommaren 2018 (figur 41).  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen hade en omedelbar och dramatisk effekt på de behandlade delfälten. Efter behandlingen höjdes  $\text{pH}$  och de lösta  $\text{Al}^{3+}$ -jonerna hydrolyserades och föll ur lösningen. Aluminiumhalterna sjönk till >90 % lägre än referensfälten till 1–2  $\text{mg/l}$  (figur 45).

I Finlands bäckar är Cu-halten vanligtvis 0,17–2,35  $\mu\text{g/l}$  (Lahermo m.fl. 1996) och i referensfälten var Cu-halterna upp till hundra gånger högre (11–21  $\mu\text{g/l}$ ). Referensfältens Cu-halter varierade och påverkades starkt av den torra sommaren 2018. I de behandlade delfälten sjönk Cu-halterna betydligt efter  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen till fem gånger lägre än referensfältet (från 10–12  $\mu\text{g/l}$  till 2–4  $\mu\text{g/l}$ ) och effekten var långvarig (figur 75).  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen sänkte Cu-halten betydligt, men var trots det hög. En större mängd  $\text{CaCO}_3$  skulle möjligen kunna vara lösningen till för att få lägre Cu-halter.

Kalcium och Ca/Sr-halterna höjdes i och med  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen, vilket var förväntat då en del av kalciumkarbonaten löses upp i markvattnet och dräneringsrören samt eftersom Ca/Sr förhållandet är högre i kalken än i markens naturliga porvatten. Det indikerar även att en del av kalciumet kommer snabbt ut genom marken.

Järn är ett redoxberoende element, som genom oxidation och reduktion har en förmåga att ändra laddningstal till tvåvärt järn ( $\text{Fe}^{2+}$ ) eller trevärt järn ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (Lahermo m.fl. 1996). Järn är lösligt vid  $\text{pH} < 3,5$  eller vid reducerande förhållanden och förekommer då som  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{FeOH}^+$  och  $\text{Fe}^{3+}$  (Boman m.fl. 2008; Hem & Copper 1959). I sura förhållanden är  $\text{Fe}^{2+}$ -jonen löslig i vatten och i extremt sura förhållanden ( $\text{pH} < 3,5$ ) är  $\text{Fe}^{3+}$ -jonen löslig. Som ett redoxberoende element reagerar järn lätt på oxidation och oxidationshastigheten stiger vid lägre  $\text{pH}$ .  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen hade en betydande effekt, och Fe-halterna sjönk till ca 0,1  $\text{mg/l}$  och referensfältet låg inom ramen för Fe-

halterna, jämfört med resten av Finland som vanligtvis har 0,06–2,6 mg/l (Lahermo m.fl. 1996). Fe-halterna var som högst hösten 2018 och våren 2019. Till följd av den torra sommaren 2018 sjönk grundvattennivån och orsakade en redoxreaktion och järn oxiderades. Efter den torra sommaren 2018 kan det ha kommit mer vatten från djupare marklager där det finns mera löst järn pga. mindre syre, som kan ha orsakat höga Fe-halter (figur 89–94).

Halterna för tvåvärt järn var högst under vårperioderna, men var också höga hösten 2018 i delfält 1, 3, 5, 6, 8, 9 och södra referensfältet. Under höstperioderna bildas reducerande förhållanden då sedimenten blir blöta och ventilationen begränsas under vintern p.g.a. snö och tjäle. Dessa förhållanden mobiliserar  $\text{Fe}^{2+}$  och orsakar högre  $\text{Fe}^{2+}$ -halter under våren efter att tjälen tinat. Delfältens järn förekom till största delen som  $\text{Fe}^{2+}$ , vilket stöds av  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{\text{TOT}}$ -korrelationer (figur 101–106) och med lågt pH (<5).  $\text{CaCO}_3$ -behandlings effekt på  $\text{Fe}^{2+}$ -halterna i de behandlade delfälten var omedelbar (figur 99 och 100). I delfält 3 och 5 sjönk  $\text{Fe}^{2+}$ -halterna från 400–600  $\mu\text{g/l}$  våren 2017 till 80–130  $\mu\text{g/l}$  hösten 2018 (figur 99).

Kalkofilerna Cd, Co, Ni och Zn är vanligtvis förknippade med urlakning av sura sulfatjordar, men är mindre pH-beroende än många av de ovannämnda elementen, och därmed hade  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen hade endast en kortvarig effekt eller ingen effekt alls på dessa element (Nordmyr m.fl. 2008). I Finlands bäckar är medianen för Co-halterna 0,003–0,1  $\mu\text{g/l}$ , och de högsta Co-halterna i landet finns i Vasaregionen och är över 2  $\mu\text{g/l}$  (Lahermo m.fl. 1996). Referensfältets Co-halter var tiotals gånger högre (0,09–0,15  $\mu\text{g/l}$ ) än övriga landets halter (figur 65).  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen hade inte en minskande effekt på Co-halterna, eftersom behandlingens effekt avtog samma höst som den injicerades. Kobolthalterna korrelerar med andra element som nickel och zink som har ökad löslighet i sura förhållanden. Likt Co-halterna var också Zn-halterna i referensfältet ca 100 gånger högre än Vasaregionens vanliga halter (figur 77). Liksom för Co, hade  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen inte en minskande effekt på Zn-halterna då den sjönk men steg åter under samma höst som behandlingen gjordes. Kadmiumhalterna var låga och nära detektionsgränsen (2  $\mu\text{l}$ ) och det gick därför inte att se effekter av  $\text{CaCO}_3$ -behandlingen.

Delfält 10 och 12 behandlades med en kombination av  $\text{CaCO}_3$ - och torvsuspension med en effektiviserad injicering. Torv användes för första gången med avsikten att motverka oxidering och i stället skapa reducerande förhållanden. Aeroba bakterier bryter ner

torven och skapar syrebrist i marken, och de aeroba bakterierna kan konvertera sulfater till sulfider (Michael m.fl. 2015). Torv har en hög adsorptionskapacitet och har därmed också en bra kapacitet till att binda metaller (Gupta m.fl. 2009).

Tillsatsen av torv till CaCO<sub>3</sub>-behandlingen medförde inte någon ytterligare minskning av metallhalterna. Däremot hade torvtillsatsen aningen större inverkan på pH i delfält 10 och 12 jämfört med CaCO<sub>3</sub>-behandlingen utan torv hade på delfält 3 och 5. I jämförelse med delfält 3 och 5 hade delfält 10 och 12 ett lägre start-pH (0,1 pH-enhet) innan CaCO<sub>3</sub>- och torvbehandlingen och efteråt var pH högre (0,2 pH-enheter, pH 6), vilket var det högsta pH under studieperioden (figur 10). I slutet av studieperioden var pH också aningen högre (0,1–0,4 pH-enheter), vilket kan betyda att effekten på pH möjligen varar längre än effekten av CaCO<sub>3</sub>-behandlingen.

Torvtillsatsen (delfält 10 och 12) sänkte också aciditeten mer (20–30 %) än behandlingen med enbart CaCO<sub>3</sub> gjorde. Tillsatsen av torv till CaCO<sub>3</sub>-behandlingen förbättrade inte effekten på Al-halterna, utan halterna var nästintill identiska med CaCO<sub>3</sub>-behandlingen.

Totaljärnhalterna sjönk betydligt efter båda behandlingarna (ca 40 % efter CaCO<sub>3</sub>-behandlingen och 70–80 % efter CaCO<sub>3</sub> med torvtillsatsen). Båda behandlingarnas effekter var lika långa (2 år eller längre). Samma gällde för Fe<sup>2+</sup>-halterna. CaCO<sub>3</sub>-behandlingen med torvtillsatsen hade en omedelbar effekt och Fe<sup>2+</sup>-halterna halverades efter behandlingen. Tillsatsen av torv förbättrade inte effekten på Fe<sup>2+</sup>-halterna, utan halterna liknade CaCO<sub>3</sub>-behandlingens halter.

I andra element (EC, S, Cl, Ca, Cd, Co, Cu, Zn och Ni) var det svårt att peka ut någon signifikant skillnad mellan CaCO<sub>3</sub>-behandlingen och tillsatsen av torv, samma gäller för effektens längd.

Allmänt var CaCO<sub>3</sub>-behandlingens effekt och dess längd relativt tydlig, men den torra sommarperioden 2018 och det att delfältens haltvariationer följde referensfältets haltvariationer gjorde det stundvis svårt att se när effekten avtog. Tillsatsen av torv till CaCO<sub>3</sub>-behandlingen förlängde inte effekten av behandlingen. Den effektiviserade injiceringen i delfält 10 och 12 hade därmed heller ingen förlängande effekt på behandlingen.

Behandlingarna hade omedelbar effekt i alla behandlade delfält och syntes tydligt. Effektens längd varierade beroende på element. I pH och de pH-känsliga elementen Al och Cu var effekten långvarig, upp till två år eller längre. I järn var effekten kortvarig

och varade endast 1–2 år, detsamma i Ca/Sr-förhållandet. CaCO<sub>3</sub>-behandlingen eller CaCO<sub>3</sub>-behandlingen med torvtillsats hade ingen eller endast mycket kort effekt på EC, S, Cl, S/Cl, Cd, Co och Zn. I delfält 1 och 8 som behandlades tidigare år 2016 med CaCO<sub>3</sub> tenderade effekten i allmänhet att vara 1–2 år längre än i de andra delfälten för samma element trots att det inte fanns några stora skillnader i mängden CaCO<sub>3</sub> som injicerats. För Fe och Fe<sup>2+</sup> hade CaCO<sub>3</sub>-behandlingen en effekt på två år eller längre i delfält 1 och 8 än i de andra delfälten. Delfält 1 och 8 kan anses vara riktgivande för hur länge CaCO<sub>3</sub>-behandlingsens effekt från 2017 kan vara efter studieperioden 2017–2019.

Det fanns inga signifikanta skillnader mellan referensfältet på den norra och den södra sidan. Skillnaderna i delfältens halter på den norra och södra sidan av studieområdet skulle ha kunnat ge en indikation på de hydrologiska förhållandena. CaCO<sub>3</sub>-behandlingsens effekt hade en liknande inverkan på de behandlade delfälten oavsett nordligt eller sydligt läge och ingen slående trend var synlig. Delfält 10 tenderade att ha högre halter i Co, Ni, Zn och S/Cl-förhållandet jämfört med delfält 12, vilket var oväntat eftersom båda fälten är på den norra sidan.

Genom att jämföra skillnaden mellan behandlade delfält och referensfält då det gäller kalciumurlakningen kan det uppskattas hur stor del av det använda kalciumkarbonatpreparatet som lakades ur under studieperioden. Kalciumbudgeten kan ge en indikation om hur snabbt kalciumservern förbrukas; ett stort överskott av kalcium kan tyda på att det löser upp sig och neutraliserar aciditeten väl, men också att det förbrukas snabbt. Största delen av överskottskalciumet i jämförelse med referensfälten rinner ut under studieperiodens två första år (2017 och 2018) (Tabell II). Under sista året på studieperioden förekommer det inte överskott av kalcium. Största andelen av det injicerade kalciumet har runnit ur marken i slutet av studieperioden i delfält 3 och 10. I delfält 5 och 12 rann det ut en mindre andel av det injicerade kalciumet ur marken, vilket kan betyda att en del av kalciumet har blivit kvar i marken (Tabell II).

Ett tydligt mönster för delfälten var förhöjda mängder kalcium under höstperioderna. I delfält 10 och 12 som behandlades med CaCO<sub>3</sub> och torv sjönk kalciummängderna ett år tidigare i jämförelse med delfälten som behandlats med endast CaCO<sub>3</sub>, vilket kan bero på att kalciumet har bildat komplex med torven (Lahermo, 1996). Det är oklart vart kalciumkarbonatet transporteras och var det lagras efter injiceringen. Efter en tidigare

CaCO<sub>3</sub>-behandling visade en utgrävning två år efter behandlingen att suspensionen endast nått ett fåtal meter bort från underbevattningsrören (Dalhem m.fl. 2019).

## 6. Slutsatser

Syftet med avhandlingen var att undersöka hur injiceringen av CaCO<sub>3</sub>- och torv- via underbevattning till de sura markskikten i sura sulfatjordar påverkar utsläpp av syra och metaller. Behandlingarna förväntades leda till ett höjt pH, sänkt aciditet och lägre metallhalter p.g.a. neutralisation av syran, minskad oxidation och immobilisering av metaller. Angående studieperioden 2017–2019 kan man konstatera att behandlingarna höjde pH och sänkte halterna för pH-känsliga kritiska metaller som Al och Cu, men effekten på kalkofilerna (Cd, Co, Ni och Zn) var obefintlig. Effekten på pH var större än på aciditeten.

Tillsats av torv till CaCO<sub>3</sub>-behandlingen hade aningen större effekt på pH (ca 0,2 pH-enheter högre). För andra variabler hade torvtillsatsen ingen effekt i jämförelse med CaCO<sub>3</sub>-behandlingen utan torv.

Behandlingarnas effekt var tydlig och omedelbar och kunde vara upp till fyra år beroende på variabeln. En långvarig effekt av behandlingen kunde ses i pH och för Al som är starkt pH-beroende medan det inte fanns några tecken på att oxidationen hade minskat med behandlingarna, men detta kan inte heller uteslutas. För att förlänga behandlingens effekt måste behandlingen upprepas med jämna mellanrum, åtminstone till en början.

Med tanke på hur viktiga sura sulfatjordar är ur odlingssynpunkt och hur svårt det är att minska på belastningen är resultaten av PRECIKEM-projekten viktiga för att i framtiden kunna fortsätta odla med en minskad miljöbelastning på områden med sura sulfatjordar.



## 7. Erkännande

Tack till PRECIKEM-projektet för ett intressant ämne som möjliggjorde denna studie. Riktat också ett tack till Peter Österholm för handledning och sakkunnighet. Jag vill även tacka min kära familj och Jarkko som stöttat mig under mina studier och skrivandet av denna avhandling.

## Litteraturförteckning

**Beucher, A., Österholm, P., Martinkauppi, A., Edén, P., Fröjdö, S.** (2013). Artificial neural network for acid sulfate soil mapping: Application to the Sirppujoki River catchment area, south-western Finland. *Journal of Geochemical Exploration* 125, s. 46-55.

**Boman, A., Fröjdö, S., Åström, M.** (2008). Sulfur dynamics in boreal acid sulfate soils rich in metastable iron sulfide – The role of artificial drainage. *Chemical Geology*, vol. 255, s.68-77.

**Boman, A., Fröjdö, S., Backlund, K., Åström, M. E.** (2010). Impact of isostatic land upland and artificial drainage on oxidation of brackish-water sediments rich in metastable iron sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, s. 1268-1281.

**Dalhem, K., Engblom, S., Stén, P., Österholm, P.** (2019). Subsurface hydrochemical precision treatment of coastal acid sulfate soil. *Applied Geochemistry*, vol. 100, s. 352-362.

**Dent, D. L., & Pons, L. J.** (1995). A world perspective on acid sulphate soils. *Geoderma*, 67, s. 263–276.

**Eronen M.** (2005). Land uplift: virgin land from the Sea. In *The Physical Geography of Fennoscandia* (ed. M. Seppälä). Oxford University Press, s. 17–34.

**Erviö, R.** (1975). Kyrönjoen vesistöalueen rikkihaittoiset viljelysmaat. *Journal of the scientific agricultural society of Finland*, vol. 47, s. 550–561.

**Fadrus, H., Malý, J.** (1975). Suppression of iron (III) interference in the determination of iron (II) in water by the 1,10-phenanthroline method. *Analyst*, vol. 100, s. 549–554.

**Gupta, S.B, Curran, M., Hasan, S., Ghosh, T.K.** (2009). Adsorption characteristics of Cu and Ni on Irish peat moss, *Journal of Environmental Management*, vol. 90, Issue 2, s. 954-960.

**Hem & Copper** (1959). Survey of Ferrous-Ferric Chemical Equilibria and Redox Potentials. Geological survey Water-supply paper 1459. Washington, U.S., 29 s.

**Hudd, R.** (2000). Springtime Episodic Acidification as a Regulatory Factory of Estuary Spawning Fish Recruitment. Helsingfors univeristet. 42 s. Doktorsavhandling.

**Johansson, M., Kahma, K., Boman, H., Launiainen, J.** (2004). Scenarios for sea level on the Finnish coast, *Boreal Environment Research* 9, s.152-166.

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

**Lottermoser, B.** (2010). *Mine Wastes Characterization, Treatment and Environmental Impacts*, Springer, Berlin, Heidelberg, vol. 3, 404 s.

**Michael, P.S., Fitzpatrick, R., Reid, R.** (2015). The role of organic matter in ameliorating acid sulfate soils with sulfuric horizons. *Geoderma* (2015), vol. 255-256, s. 42–49.

**Nordmyr, L., Åström, M., Peltola, P.** (2008). Metal pollution of estuarine sediments caused by leaching of acid sulphate soils. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Volume 76, Issue 1, s. 141–152.

**Palko, J., Räsänen, M., Alasaarela, E.** (1985). Happamien sulfaattimaiden esiintyminen ja vaikutus veden laatuun Sirppujoen vesistöalueella. Vesihallituksen tiedotuksia.

**ProAgria**, figur 4. Illustration av effektiviserad injicering i delfält 10–12.

**Rosendahl, R., Lall, K.-E., Engblom, S., Stén, P. and Österholm, P.** (2012). The Risöfladan Experimental field for chemical precision treatment of acid sulfate soils. Geological Survey of Finland, Guide 56, 2012. s. 97-101.

**Rosendahl, R. & Wikman, U.** (2009). Sura sulfatjordar. Lantbyggnätverkets publikation. 12 s.

**Salaojayhdistys Ry** 1/2014.

**Sundström, R., Åström, M., Österholm, P.** (2002). Comparison of the Metal Content in Acid Sulfate Soil Runoff and Industrial Effluents in Finland. *Environmental Science & Technology*, vol. 36 (20), s. 4269–4272.

**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.

**Tenhola, M., Lahermo, P., Väänänen, P. & Lehto, O.** (2004). Alueellisessa geokemiallisessa urovesikartoituksessa todettujen fysikaalisten ominaisuuksien ja 48 alkuainepitoisuuksien vertailu Suomessa vuosina 1990, 1995 ja 2000. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 159, 35 s.

**Toivonen, J. & Österholm, P.** (2011). Characterization of acid sulfate soils and assessing their impact on a humic boreal lake. *Journal of Geochemical Exploration* 110, s. 107-117.

**Uusi-Kämppe, J., Virtanen, S., Rosendahl, R., Österholm, P., Mäensivu, M., Westberg, V., Regina, K., Ylivainio, K., Yli-Halla, M., Edén, P. & Turtola, E.** (2013). Ympäristöriskien vähentäminen happamilla sulfaattimailla - Opas pohjaveden pinnan säätämiseksi. MTT Raportti 74, 24 s.

**Visuri, M., Nystrand, M., Auri, J., Österholm, P., Nilivaara, R., Boman, A., Räisänen, J., Mattbäck, S., Korhonen, A., Ihme, R.** (2021). Maastokäytteen tunnistusmenetelmien kehittäminen happamille sulfaattimaille, Tunnistus-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskus. Raportti 43/2021. 108 s.

**Wu, X., Sten, P., Engblom, S., Nowak, P., Österholm, P., Dopson, M.** (2015). Impact of mitigation strategies on acid sulfate soil chemistry and microbial community. *Science of The Total Environment*, vol. 526, s. 215–221.

**Yli-Halla, M., Virtanen, S., Regina, K., Österholm, P., Ehnvall, B., Uusi-Kämppe, J.** (2020). Nitrogen stocks and flows in an acid sulfate soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 12, 751.

**Åström, M., Österholm, P., Bärlund, I. Tattari, S.** (2007). Hydrochemical Effects of Surface Liming, Controlled Drainage and Lime-Filter Drainage on Boreal Acid Sulfate Soils. *Water Air Soil Pollution* 179, s. 107–116.

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

**Österholm, P., Åström, M., Sundström, R.** (2005). Assessment of aquatic pollution, remedial measures and juridical obligations of an acid sulphate soil area in western Finland. *Agricultural and food science*, vol. 14, s. 44–56.

**Österholm, P., Virtanen, S., Rosendahl, R., Uusi-Kämppe, J., Ylivainio, K., Yli-Halla, M., Mäensivu, M. & Turtola, E.** (2015). Groundwater management of acid sulfate soils using controlled drainage, by-pass flow prevention, and subsurface irrigation on a boreal farmland, Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Science, vol. 65 s.

Elektroniska referenser

Geologiska forskningscentralen (2021). Hakku, Happamat sulfaattimaat 1:250 000. [https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search?location\\_id=68](https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search?location_id=68) (Besökt 15.02.2021)

**Meteorologiska institutet** (2022). Statistics from 1961 onwards - Finnish Meteorological Institute (ilmatieteenlaitos.fi) (Besökt 15.02.2022).