

## Examensarbete ACEX20

### Effekt av elektrolys på sediment och Tributyltenn (TBT)

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet kemiteknik 180 hp

Samuel Lorentzson



Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för Vatten Miljö Teknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, 2024

Effekt av elektrolys på sediment och Tributyltenn (TBT)

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Kemiteknik

Samuel Lorentzson

© SAMUEL LORENTZSON 2024

Examensarbete ACEX20  
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för Vatten Miljö Teknik  
Chalmers tekniska högskola 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för Vatten Miljö Teknik  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Telefon: 031-772 10 00

# Sammanfattning

Idag anses tributyltenn (TBT) vara en av de mest toxiska föreningar som släppts ut i den marina miljön och i Sverige infördes år 1993 ett totalförbud mot användandet av TBT på båtar och fartyg. Regelbundet sker muddring av Göta älv för att se till att stora båtar ska kunna lägga an vid hamnarna samt passera upp till Vänern. Vid provtagning i dessa områden ser man fortfarande höga halter av TBT. Eftersom sedimentmassor som tas upp vid muddring är kontaminerade går de inte att använda till någonting, och hamnar därför på deponi i stället för att exempelvis användas inom byggindustrin.

Detta examensarbete syftar till att utforska hur väl elektrolys med bor-dopad diamant-anod (BDD) och titankatod påverkar nedbrytningen av tributyltenn (TBT), dibutyltenn (DBT) och monobutyltenn (MBT). Dessutom syftar rapporten till att undersöka hur metoden vid olika elektrisk spänning påverkar sedimentpartiklars stabilitet i vattenfasen.

För att studera elektrolysens inverkan på sedimentpartiklars stabilitet i vattenfasen utförs massbalans- och zeta-potentialanalys. Resultaten visar att elektrolys har en stabiliserande inverkan på sedimentpartiklar i vattenfasen jämfört med kontrollprover som inte genomgått elektrolys. Elektrolysmetoden utfördes på spikade saltvattenprover och resultaten visar att 97% av den ursprungliga halt TBT brutits ned. Man kan också se att DBT och MBT bryts ned i samband med elektrolys.

# Innehållsförteckning

1 Inledning	
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte	8
1.3 Mål	8
1.4 Avgränsningar	8
2 Teoretisk bakgrund	
2.1 Muddring	9
2.2 Tenn och organiska tennföreningar (OTC)	9
2.3 Tributyltenn (TBT), struktur och nedbrytningsprodukter	9
2.3.1 TBT i luft	10
2.3.2 TBT i vatten	10
2.3.3 TBT i sediment	10
2.4 Nedbrytning av TBT i det marina	10
2.5 Vad är elektrolys	11
2.5.1 Elektrolys av TBT	11
2.6 Elektriskt dubbellager	12
2.7 Zeta-potential	12
2.8 pH-värdets inverkan på suspensionens stabilitet	13
2.9 Konduktivitet	13
2.10 Massbalans (VSS och TSS)	13
3 Metod	
3.1 Riskbedömning och material	14
3.1.1 Skyddsutrustning och försiktighetsåtgärder	14
3.1.2 Filteranordning	15
3.1.3 Elektrolysanordning	15
3.2 Prov- och materialberedning	16
3.3 Elektrolys av sediment	16
3.4 Massbalans	18
3.5 Zeta-potential och konduktivitet	18
3.6 Elektrolys av spikat prov	19
3.6.1 Förberedelse av spikat prov	19
3.6.2 Uppsättning och genomförande	19
4 Resultat	
4.1 Elektrolys av spikat saltvatten	20
4.2 Massbalans	21
4.3 Zeta-potential	23
5 Diskussion	25
6 Slutsats	26
7 Referenslista	27
Bilaga	29

# Lista över förkortningar

## **Kemiska begrepp:**

OTC: Organisk tenn-förening

TBT: Tributyltenn

DBT: Dibutyltenn

MBT: Monobutyltenn

TSS: totala suspenderade fasta partiklar

VSS: flyktiga suspenderade fasta partiklar

BDD: Boron Doped Diamond

TOC: Totalt organiskt kol

ZP: Zeta-potential

PAH: Polycykliska aromatiska kolväten

PCB: Polyklorerade bifenyler

Agglomerering: process där partiklar i ett kolloidalt system klumpar ihop sig

## **Benämning av prover vid olika spänningsnivåer (V):**

E21V, E15V, E10V och E8V: Elektrolysprov (E)

K21V, K15V, K10V och K8V: Kontrollprov (K)

EB21V, EB15V, EB10V och EB8V: Elektrolysprov Blandad (EB)

KB21V, KB15V, KB10V och KB8V: Kontrollprov Blandad (KB)

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Den internationella sjöfartsindustrin står idag för cirka 90% av all frakt av världens export och import [19]. Det finns därför ett stort incitament att underhålla farleders och hamnars vattendjup för att kunna ta emot större fartyg. Samlingsnamnet för denna underhållningsmetod kallas muddring och ser olika ut beroende på platsens specifika förutsättningar, såsom sedimentvolym, vattendjup och kostnad. Många av dagens hamnar och farleder ligger på platser där sedimenten innehåller förhöjda halter tungmetaller, TBT, PAH, PCB och andra svårnedbrytbara eller bioackumulerande ämnen. En av baksidorna med muddring och dumpning av upptaget sediment är att det leder till att föroreningar som funnits i sedimentet sprids till omgivningen [18].

För den marina miljön anses TBT vara en av de mest toxiska föreningarna som släppts ut [15]. I en studie beskrivs TBT:s negativa påverkan på odlade ostron i Frankrike och Storbritannien. Där såg man att ostron fått missbildade skal som effekt av föroreningen, dessutom förekom imposex på ostronhonor samt att reproduktionen helt avstannade [11].

Under 1997 gjordes mätningar i åtta länder, däribland Sverige, av olika fiskarters och skaldjurs TBT-innehåll. I denna mätning kunde man se att alla prover innehöll TBT och den högsta halten fanns i musslor (40 µg/kg) [13]. Några år senare gjordes estimat för hur mycket TBT människor i olika länder får i sig via fisk- och skaldjurskost där nivåerna skiftade från minsta värdet, 0.8 (England), till högsta, 2.6 (Korea) µg/dag/person [13].

TBT togs initialt fram som ett bekämpningsmedel i kampen mot bilharzia (tropisk magsjukdom). På 1960-talet började man blanda in TBT i båtbottnfärg med syfte att skydda båtskrov mot påväxt av levande organismer såsom alger och havstulpaner [15]. Fördelen att motverka påväxt är att man behåller en låg friktion mellan båtens skrov och det omgivande vattnet. Ökad påväxt leder till ökad friktion, vilket gör båten långsammare och svårare att manövrera. Det leder även till ökat bränslebehov [1][2][15].

År 1989 började IMO (International Maritime Organization) hitta skadliga effekter av organiska tennföreningar men det var inte förrän 2008 som ett internationellt förbud infördes på alla typer av båtar och fartyg [2]. I Sverige infördes ett förbud mot användandet på båtar under 25 meter från och med år 1989 och år 1993 infördes ett förbud för alla typer av båtar [6].

Under hösten 2010 gjordes en studie vid 41 småbåtshamnar i Västra Götaland med avsikt att mäta halterna TBT vid 0-2 cm samt 8-10 cm sedimentdjup. Resultatet visade att det i en tredjedel av fallen var högre halter vid ytan än längre ner. Samtidigt var kvoten jämfört med DBT och MBT större vid en tredjedel av hamnarna vilket tyder på att det vid denna period fortfarande fanns en spridning av TBT [6].

I studien ser man tydliga indikationer på att utsläpp av TBT till den marina miljön beror på avrinning vid kraftig nederbörd, damm vid torka och konstant via grundvattenavrinning från båtupptagningsplatser. Här tvättas båtarna rena innan de vinterförvaras. Det presenteras att man i vissa fall kan se alarmerande höga halter i dagvattenbrunnar, till och med så högt att de klassas som miljöfarligt avfall [6] [8].

## **1.2 Syfte**

Syftet med denna rapport är att verifiera om elektrolys är en kvalificerad metod att använda för att bryta ned TBT, DBT och MBT. Främst kommer fokus att ligga på TBT. Samtidigt syftar rapporten till att undersöka om det finns någon koppling mellan elektrolys av sediment vid omrörning och om denna process ökar risken att organiska tennföreningar (OTC) förs ut i vattenfasen. Detta är en direkt koppling till hur stabila sedimentpartiklar är i saltvatten efter att ha utsatts för elektrolys.

## **1.3 Mål**

Målet är att nå en så låg halt av TBT som möjligt genom att utsätta substansen och dess nedbrytningsprodukter DBT och MBT för elektrolys. I samband med denna mätning är ett delmål att undersöka hur vattnets salthalt påverkar nedbrytningen. Målet är också att genom mätningar av zeta-potential, totala suspenderade fasta partiklar (TSS) och flyktiga suspenderade fasta partiklar (VSS) verifiera hur elektrolys vid olika spänningsnivåer har påverkat sedimentets förmåga att stanna kvar i vattenfasen.

## **1.4 Avgränsningar**

De organiska tennföreningar som undersöks i denna rapport är tributyltenn (TBT), dibutyltenn (DBT) och monobutyltenn (MBT). Mätning av zeta-potential gjordes på utvalda prover.

## 2 Teoretisk bakgrund

Detta avsnitt tar upp all teoretisk fakta som behövs för att förstå de experimentella delarna.

### 2.1 Muddring

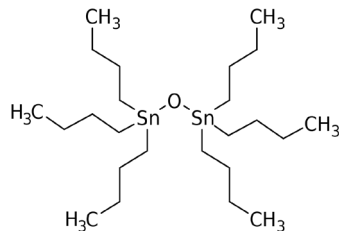
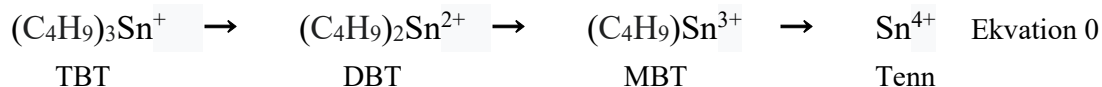
Vid muddring tas bottenmaterial bort från ett vattenområde där det önskas få ett visst djup eller läge i samband med att man ska kunna bygga eller få bättre framkomlighet för båtar vid en hamn eller farled. Ytterligare skäl till muddring är för att utvinna material såsom grus och sand, men det används också för att ta bort förorenade sediment [18]. Vid muddring finns lite olika typer av muddring; mekanisk och hydraulisk muddring är de mest använda. Mekanisk muddring använder en grävmaskin monterad på en ponton och skopar upp bottenmaterialet. Vid hydraulisk muddring sugas sedimentet upp tillsammans med vatten genom ett rör och fungerar bäst på homogena bottenmaterial. Denna metod används mest då det finns risk för spridning av förorenat material eftersom metoden endast orsakar begränsad spridning av uppgrumlat sediment jämfört med den mekaniska metoden. Dock behövs ofta denna metod kompletteras med grävmaskin för att ta sig ned på djup lägre än 16 meter eller om botten innehåller många stora stenar eller skräp. Det vattenblandade sedimentet samlas efter uppsugning på en pråm och förs till deponi om det är förorenat (vilket kräver tillstånd), annars används det till exempelvis vägbyggen eller anläggningar på land [18].

### 2.2 Tenn och organiska tennföreningar (OTC)

Tenn (CAS: 7440-31-5) finns i många organiska och icke-organiska substanser. Genom tiden har tenn främst använts som legering inom bronstillverkning. Som sig själv anses tenn inte vara akut toxisk men organiskatennföreningar (OTC) klassificeras som irriterande för ögon-, hud- och andningsvägar [3]. Organiska tennföreningar (OTC) används både inom industri, biomedicin och lantbruk. Det finns många typer av funktionaliteter såsom katalysator vid tillverkningen av silikon och polyuretanskum, stabilisator i PVC-plaster, biocider, olika typer av desinfektionsmedel och bekämpningsmedel [4].

### 2.3 Tributyltenn (TBT), struktur och nedbrytningsprodukter

Tributyltenn (TBT) ingår i kategorin OTC och kan se ut på lite olika sätt, den generella formeln för TBT är  $(n-C_4H_9)_3Sn - X$  där X kan vara en anjon såsom  $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$  eller en bindning med en heteroatom [13]. En av de vanligaste formerna är Tributyltennoxid (TBTO) där en syrebrygga länkar samman två TBT-molekyler, se Figur 1. Tributyltenns nedbrytningsprodukter dibutyltenn (DBT) och monobutyltenn (MBT) används bland annat som mjukgörare i PVC-plast.



Figur 1: Tributyltennoxid (TBTO)

### 2.3.1 TBT i luft

Det finns inga tecken på att TBT skulle utsöndras till luften via exempelvis förångning, detta tack vare dess låga ångtryck [13].

### 2.3.2 TBT i vatten

TBT är en hydrofob molekyl med en låg löslighet i vatten på 0.0758 g/l vid 20°C och har en fördelningskoefficient ( $\log P_{OW}$ ) på 2.31 [4]. Dessa egenskaper gör att man sällan hittar TBT löst i vatten, utan bunden till suspenderade partiklar eller anknuten till upplöst organiskt material. Man beräknar att cirka 10-90% av TBTO som har släppts ut till havet finns adsorberade på suspenderade partiklar. Skillnaderna i var TBT återfinns beror på temperatur, salthalt, partiklarnas storlek och hur mycket upplöst organiskt material som finns tillgängligt [13].

Halveringstiden för TBT i vattenfas skiljer sig beroende på temperatur, pH, grumlighet och ljusinsläpp men beräknas ligga mellan en dag och ett antal veckor [13].

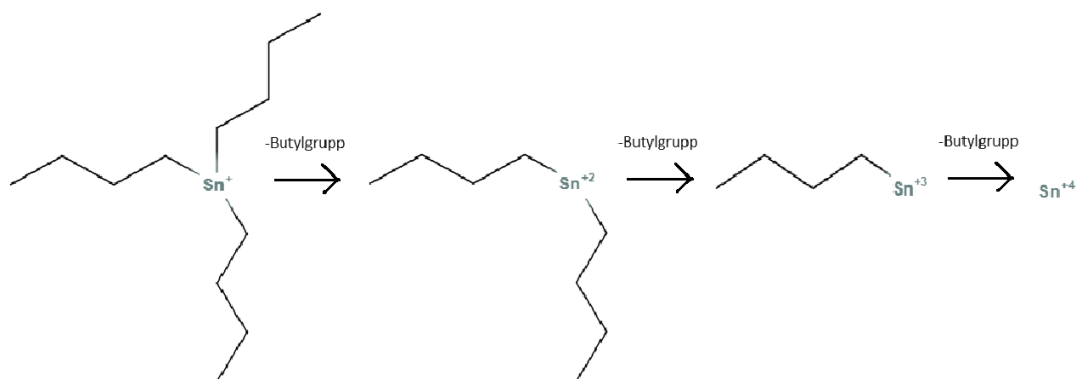
### 2.3.3 TBT i sediment

TBT har en hög affinitet att lagras på suspenderade partiklar och i sediment [16]. Det är tydligt att de högre TBT-halterna i sediment finns vid hamnar och platser där det förekommer många båtar, halterna är inte alls lika stora vid mer avlägsna områden [13].

## 2.4 Nedbrytning av TBT i det marina

I det marina kan TBT brytas ned abiotiskt genom direkt fotolys (UV-strålning), hydrolys eller genom biotisk nedbrytning. Vid nedbrytning bryts tenn- och kolbindning i en så kallad stegvis debutylering, varvid en butylgrupp faller bort i taget, se Ekvation 0. TBT spjälkas till DBT, MBT och sedan återstår olika former av oorganiskt tenn, se Figur 2 [7]. Av de två abiotiska metoderna är fotolys den vanligaste och drivs av solens UV-strålning. Den direkta fotolysen har sina begränsningar i och med att butylgrupperna absorberar ljus vid våglängder 190-250 nm, solljus i sin tur har ett våglängdsspektrum vid 295-320 nm [12]. Hydrolys förekommer endast vid extrema pH-värden och är därför väldigt ovanligt förekommande i vatten [13].

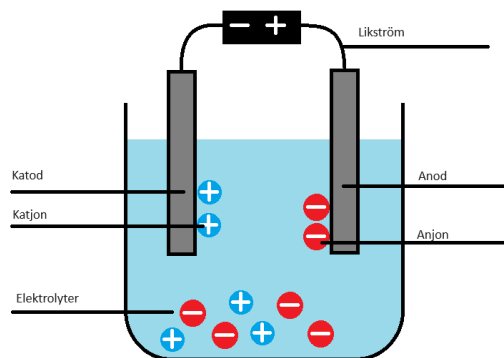
För nedbrytning av TBT i sediment behövs en aerob miljö, dvs tillgång till syre. Vid höga temperaturer ökar reaktionshastigheten vilket gör nedbrytningsprocessen kortare. Vid en hög temperatur och god syretillgång beräknas TBT i sediment ha en halveringstid på ett år. Däremot med låga vattentemperaturer och låg syresättning beräknas halveringstiden vara över 80 år [15].



Figur 2: Stegvis debutylering av TBT, DBT och MBT till oorganiskt tenn.

## 2.5 Vad är elektrolys

Elektrolys är en metod där elektrisk ström skickas genom en substans med målet att få till en kemisk förändring för annars icke spontana reaktioner. Förändringen sker när substansen förlorar eller vinner elektroner (oxidation och reduktion). Generellt brukar en elektrolytisk cell vara uppbyggd av en anod och katod som ligger täckta av en vätska och kopplad till en strömkälla. Vätskan innehåller positiva och negativa joner (även kallade elektrolyter) som leder elektronerna vidare från anod och katod via vätskan och sluter därmed strömmens kretslopp. Katjoner (+) från lösningen rör sig mot katoden och avger elektroner (reduceras) medan anjonerna (-) rör sig mot anoden och tar upp elektroner (oxideras). Oxidationen och reduktionen av jonerna leder till att de antingen bildar nya molekyler eller att befintliga molekyler bryts ner till sina beståndsdelar [5].



Figur 3: Elektrolytisk cell

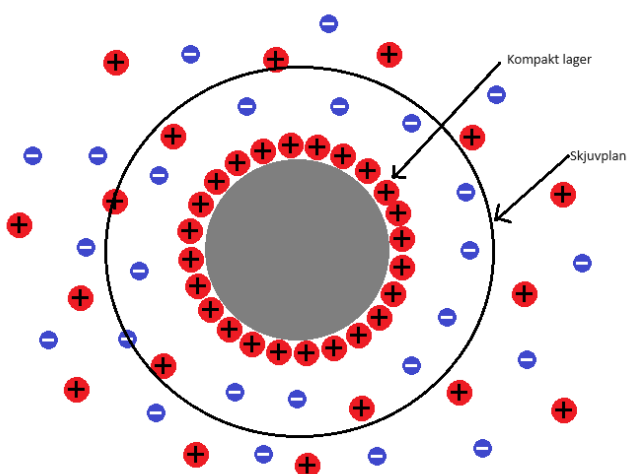
### 2.5.1 Elektrolys av TBT

Vid anoden oxideras vatten och kloridjoner medan vätejoner reduceras vid katoden och bildar vätegas, se Ekvation 1,2 och 3. Det är inte helt klarlagt vilka reaktioner som förekommer vid elektrolys av sediment men man vet att organiska tennföreningar bryts ned genom direkt oxidation vid anoden, se Ekvation 4, eller av oxidanter genererade av anoden. Nedbrytningen av organiska tennföreningar är starkt hjälpt om det finns tillgång till oxidanter såsom kloridjoner, se Ekvation 7. Ytterligare oxidanter som skulle kunna hjälpa till med nedbrytandet av organiska tennföreningar är hypoklorit ( $\text{ClO}^-$ ) som vid rätta pH-förhållanden bildas enligt Ekvation 5 och oxiderar TBT enligt Ekvation 6 [1][24].

$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^-$	Oxidation vid anod	Ekvation 1
$H_2O \rightarrow OH \cdot + e^- + H^+$	Oxidation vid anod	Ekvation 2
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2(g)$	Reduktion vid katod	Ekvation 3
$BDD + H_2O \rightarrow BDD(OH \cdot) + H^+ + e^-$	Oxidation vid anod	Ekvation 4
$Cl_2 + 2OH^- \rightarrow ClO^- + Cl^- + H_2O$	Oxidation vid anod	Ekvation 5
$2(C_4H_9)_3Sn^+ + 3ClO^- + 2O_2 + 3H_2O \rightarrow 2SnO_2 + 6(C_4H_9)OH + 3Cl^-$	Oxidation vid anod	Ekvation 6
$(C_4H_9)_3Sn^+ + 4Cl^- + 5/2H_2 \rightarrow SnCl_2 + 3C_4H_{10} + 2HCl$	Reduktion vid katod	Ekvation 7

## 2.6 Elektriskt dubbellaager

I en suspension med tillräckligt hög jonkoncentration kan så kallade elektriskt dubbellaager bildas kring partiklar. Ett dubbellaager består av ett kompakt lager (stern layer) och ett skjuvplan (slipping plane). En negativt laddad partikel i en suspension kommer att attrahera katjoner (+) från lösningen till partikelns yta och bilda ett kompakt lager. Mellan det kompakta lagret och skjuvplanet ligger ett diffust lager av rörliga joner, det är i detta mellanrum zeta-potentialen mäts [22].



Figur 4: Negativt laddad partikel i en suspension omgiven av ett kompakt lager (stern layer) av katjoner samt ett skjuvplan av rörliga joner.

## 2.7 Zeta-potential

Zeta-potential (ZP,  $\zeta$ ) är den elektriska potentialen vid skjuvplanet, se Figur 4, och används för att bedöma en dispersions kolloidala stabilitet. Enheten för ZP är mV, och brukar ha ett intervall på mellan -100 och +100 mV. Potentialen kan antingen vara positiv (+) eller negativ (-) beroende på hur stor andel an- eller katjoner som ligger i skjuvplanet. Ett värde på ZP närmare noll betyder att det finns en låg koncentration an- eller katjoner i skjuvplanet medan ett högt absolutvärde tyder på rikligt med an- eller katjoner [10].

Man brukar säga att ett ZP större än +30 och mindre än -30 anses vara tecken på en stabil dispersion. Suspensioner med värden som är mindre än +30 och större än -30 är mer benägna att agglomerera på grund av van der Waal-bindningar mellan partiklar i dispersionen [20].

Ett större värde på ZP ger en större repulsiv kraft mot lika laddade partiklar i dispersionen och hämmar på så sätt partiklar från att agglomerera, det vill säga suspensionen är stabil. Med ett mindre ZP kommer de repulsiva krafterna vara mindre än de attraherande krafterna från andra partiklar i dispersionen och partiklarna kommer att agglomerera och till slut falla ned till botten/sedimentera [20][23].

Den isoelektriska punkten är då zeta-potentialen är noll; normalt är det då suspensionen är som minst stabil [20].

## 2.8 pH-värdets inverkan på suspensionens stabilitet

En av de viktigaste faktorerna för en suspensions zeta-potential och stabilitet är dess pH-värde. Tillsats av antingen en bas eller syra till en suspension ökar mängden an- eller katjoner i skjuvplanet och gör partikeln mer eller mindre repulsiv mot sin omgivning vilket påverkar suspensionens stabilitet. Ett lågt pH och ett överskott på katjoner (+) ger höga ZP-värden medan höga pH och ett överskott på anjoner (-) ger ett lägre värde på ZP [20] [21].

## 2.9 Konduktivitet

Konduktiviteten (S/m, Siemens per meter) är ett mått på mängden fria joner i en lösning. En hög konduktivitet komprimerar tjockleken på det elektriska dubbellagret och gör att repulsionskrafterna och därmed stabiliteten minskar i suspensionen. Detta resulterar i att partiklar i suspensionen kommer att slumpmässigt närma sig varandra genom Brownsk rörelse och kopplas samman med hjälp av van der Waals-krafter. När tillräckligt många partiklar förts samman i suspensionen och densiteten för partikelklustret är större än bulkfasens densitet kommer klustret att sedimentera ty gravitation [21][22][23].

## 2.10 Massbalans (VSS och TSS)

För att ta reda på hur mycket totala suspenderade fasta partiklar (TSS) som finns i en lösning filtreras en suspension genom ett glasfilter och sedan förånga bort den vätska som fastnat i filtret så att enbart solida material finns kvar. Förångningen görs i en ugn vid mellan 103-105°C i cirka 45-60 minuter. Därefter beräknas värdet på TSS genom att dividera massan torr filterkaka genom mängden vätska som filtrerades, se Ekvation 8. Höga TSS-värden är ett tecken på att det finns ett stort antal icke-lösligt material i vattenfasen och beroende på metod kan detta vara en indikation på långsam sedimentering [17].

$$TSS = ((m_{filter} + m_{filterkaka}) - m_{filter})/V_{filtratvatska}$$

Ekvation 8

Att beräkna mängden flyktiga suspenderade fasta partiklar (VSS) är ett naturligt steg efter att man utfört en mätning av suspensionens TSS-värde. Metoden går ut på att bränna bort organiskt material från samma filter som använts till TSS-mätningen. Filtret bränns i 550°C i 15-30 minuter och på så sätt kan man ta reda på hur stor andel icke-löst organiskt material som fanns i suspensionen som man initialt filtrerade. Se Ekvation 9 för beräkning av VSS [17].

$$VSS = ((m_{filter} + m_{filterkaka} + m_{organiskt\ material}) - (m_{filter} + m_{filterkaka} - m_{organiskt\ material}))/V_{filtratvatska}$$

Ekvation 9

## 3 Metod

Detta avsnitt tar upp hur metoden och material förbereddes, genomfördes och analyserades. Dessutom presenteras den riskbedömning som gjordes initialt.

I studien utfördes fyra experiment för att se på hur elektrolys i kombination med omrörning påverkar sedimentens förmåga eller oförmåga att suspendera i vattenfasen, skillnaden i vardera test var varierande elektrisk spänning (21V, 15V, 10V och 8V). Initialt valdes att starta det första försöket vid 21V, följande försök skedde med minskade spänningsnivåer.

För att mäta och verifiera om elektrolys kan ha påverkat sedimentets förmåga eller oförmåga att skapa större mängd suspenderat sediment i vattenfasen utfördes massbalans- och Zeta potential-mätningar. Som kvalitetssäkerhet för resultaten och för jämförbarhetens skull utfördes kontrolltester parallellt med elektrolysförsöken för alla spänningsnivåer, dessa kontroller behandlas enligt samma metod med den enda skillnad att de inte genomgick någon elektrolys.

Utöver tester på sediment utfördes elektrolys på två saltvattenprover spikade med TBT för att undersöka elektrolysens effekt på nedbrytningen av TBT, DBT och MBT och om det fanns någon koppling till vattnets konduktivitet/salthalt, 43.6 mS/cm och 4.34 mS/cm.

### 3.1 Riskbedömning och material

Innan projektets start gjordes en riskbedömning utifrån de moment som skulle genomföras och kemikalier som skulle användas. Främsta riskmoment var att exponeras för TBT genom inandning, förtäring eller hud-/ögonkontakt. Detta genom direkt kontakt med substansen eller att utsättas via spridning av kontaminerade ytor. Därför gjordes bedömningen att hålla all verksamhet som direkt involverade TBT och dess nedbrytningsprodukter till ett och samma dragskåp. Dragskåpet täcktes invärtes med aluminiumfolie, avlopp inuti dragskåpet täcktes över för att hindra spill.

#### 3.1.1 Skyddsutrustning och försiktighetsåtgärder

Vid arbete inuti dragskåpet användes alltid nitrilhandskar samt ett par tjocka latexhandskar utanpå. Latexhandskarna fick aldrig lämna dragskåpet i och med att de var i direktkontakt med TBT och skulle därför alltid ligga lättillgängligt så att det var enkelt att sätta på sig utan att behöva vidröra utsidan på handskarna.

Dragskåpsluckan var alltid neddragen till lägsta nivå när ingen laborativ verksamhet utfördes, dessutom tejpades en pappersbit vid luckans botten för att ge en indikation på att det alltid var ett utsug av eventuellt farliga gaser från dragskåpet. Utöver dubbla handsklager användes labbrock och skyddsglasögon vid arbete i dragskåpet.

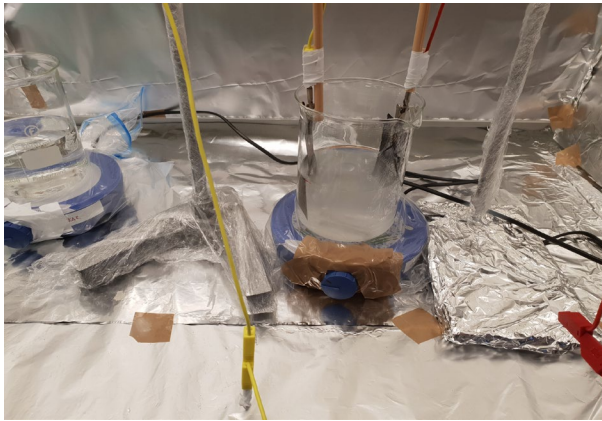
De två magnetomrörare som användes samt elektrolysanordningen plastades in för att minska risken för kontamination. Det enda som fick vara utanför dragskåpet var filteranordning och voltmeter.

### 3.1.2 Filteranordning

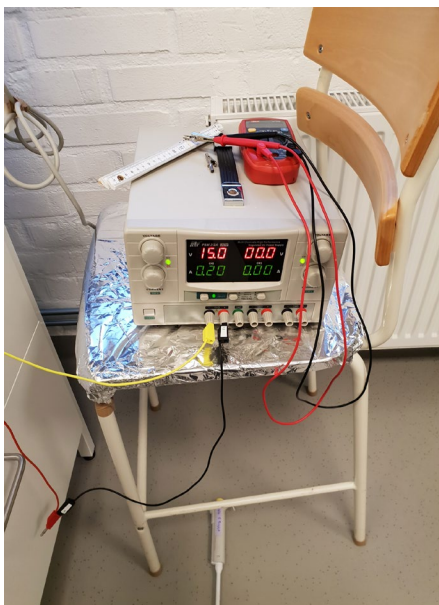
Filteranordningen bestod av en filterkolv kopplad till vattensug/vakuum via filterkolvens arm. Till filterkolven användes glasfilter med en porstorlek på  $1\mu\text{m}$  och en diameter på 47 mm. Filtren som användes tvättades först med avjonat vatten och torkades sedan i ugn innan de noggrant vägdes.

### 3.1.3 Elektrolysanordning

Elektrolysanordningen bestod av en ställning för att hålla anod (BDD/Nb) och katod (Ti) på plats med cirka 10 cm avstånd från varandra, som kan ses i Figur 5. Magnetomrörare användes för både kontroll- och elektrolysover för att få en jämn distribution.



Figur 5: Elektrolysanordning, bild tagen under pågående nedbrytning av spikade prover. Till vänster i bild ses kontroll (K) och höger i bild elektrolys (E).



Figur 6: Potentiostat placerad på stol utanför dragskåp för att minska risk för kontamination. I bild ses även den voltmeter (i rött) som användes för att mäta den elektriska potentialen.

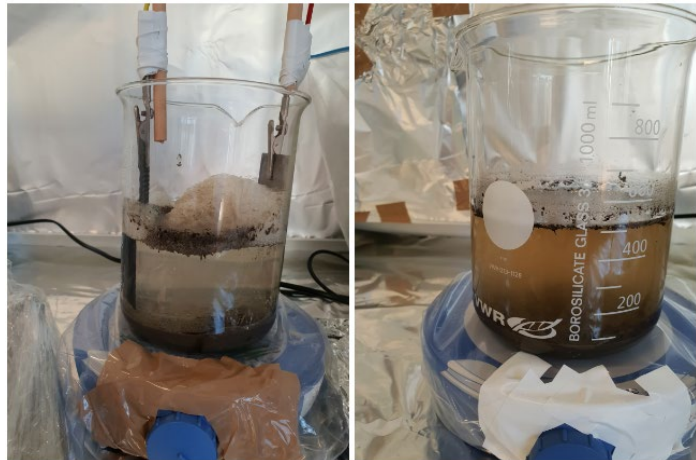
Sedimentet som användes i studien grävdes ur från Göta Älvs botten i samband med en muddring. Sedimentet innehöll initialt många större objekt såsom musslor och annat organiskt material. Merparten av dessa togs bort innan det genom omrörning homogeniserades och förvarades vid  $-22^{\circ}\text{C}$  i plastbehållare. I en tidigare studie [9] analyserades det sediment som även använts i denna studie. Då gjordes analyser för kornstorlek, metallinnehåll, TOC och mängd OTC. Vid upptag uppmättes halten TBT till  $80\ \mu\text{g}/\text{kg}$  sediment, ny mätning utfördes inte inför denna studie, ett år senare.

### 3.2 Prov- och materialberedning

Sediment torkades i aluminiumformar i ugn över natt på  $105^{\circ}\text{C}$  för att bli av med så mycket vatten som möjligt. Den hårda sedimentkakan som bildades vid torksteget krossas försiktigt i en zip-lock-bag för att motverka spridning av damm.

### 3.3 Elektrolys av sediment

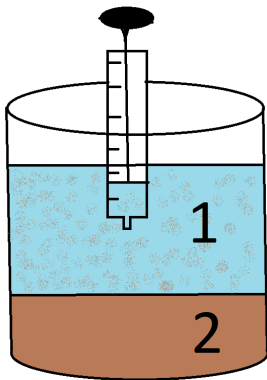
Till en bägare (1000 ml) tillsattes 80 gram torrt sediment samt 500 ml vatten (Milli-Q). Anod (BDD/Nb) och katod (Ti) placerades i bägaren med 10 centimeters mellanrum. Under experimenten var anod och katod täckta av sediment/vatten-blandning, upp till cirka 6 centimeter vilket skapade en elektrodarea på  $30\ \text{cm}^2$ . Till systemet kopplades en potentiostat och en digital multimeter. Under experimentet skedde omrörning med magnetomrörare i 24 timmar. Parallellt prepareras en kontroll där 80 gram torrt sediment och 500 ml vatten (Milli-Q) tillsattes till en bägare (1000 ml). Därefter skedde omrörning med magnetomrörare i 24 timmar, utan elektrolys. Efter 24 timmar togs suspensionsprov från vattenfasen (50ml) från vardera bägare. Detta gjordes för både kontroll- och elektrolysproverna.



Figur 7: Till vänster i bild elektrolys (E10V) och till höger kontroll (K10V). Bilderna tagna 24 timmar efter påbörjad elektrolys/magnetomrörning.



Figur 8: Till vänster i bild elektrolys (E8V) och till höger kontroll (K8V). Bilderna tagna 24 timmar efter påbörjad elektrolys/magnetomrörning.



Figur 9: Tillvägagångssätt att ta ut suspensionsprov från bägare för filtrering. Uttag gjordes två gånger per prov, ett efter 30 minuter efter att ha stängt av magnetomrörning och elektrolys. Det andra togs 30 minuter efter att med en metallsked ha blandat sediment + vatten i fem minuter.



Figur 10: Bild tagen ovanifrån på E10V, bilden visar gasbildning, högst troligt är det vätgas som har bildats från reduktionsreaktionen vid katoden, se Ekvation 3.

Direkt efter att de första suspensionsproverna var insamlade blandades innehållet i bägarna kraftfullt i 5 minuter med en spatel. Detta gjordes för att efterlikna hur sediment sprids till vattenfasen vid muddring. Efter 30 minuter av sedimentering samlades nya suspensionsprov in, något grumligare än de första.

### **3.4 Massbalans**

De insamlade suspensionsproverna från vardera försök filtrerades genom ett glasfilter med porstorlek på 1µm. Mestadelen av de fasta partiklar som fanns i suspensionen fastnade i glasfiltret, de tillräckligt små partiklarna tog sig igenom med filtratet.

De numera blöta glasfilter med en filterkaka bestående av fasta partiklarna från suspensionen vägdes innan de lades på aluminiumfolie och torkades i ugn i två timmar på 105°C. För att se hur mycket vatten som avdunstat vägdes de torkade filtren. Därefter brändes de torkade filtren med filterkaka i ugn på 550°C i 15 minuter. Detta gjordes för att bränna bort organiskt material, varefter filtren vägdes på nytt. Med denna data kunde TSS och VSS beräknas genom att använda Ekvation 8 och 9, se Tabell 3 i bilaga för data som gett underlag till värden på TSS och VSS.

Det filtrat som erhöles efter filtreringen lagrades i falconrör för vidare analys av Zeta-potential och konduktivitet i ett senare steg.

För de prover som genomgick 21V spänning användes 80g blött sediment i stället för torrt vilket i jämförelse med de andra försöken gav fel ratio sediment/vatten.

### **3.5 Zeta-potential och konduktivitet**

Metoden gick ut på att tillsätta 1 ml filtrat till en kyvett, och placera i instrumentet. Innan kyvetten fylldes med filtrat var det viktigt att filtratet var homogeniserat genom varsam omskakning i ett par minuter, utan att bilda små luftbubblor.

Från instrumentet erhöles en mängd olika typer av datavariabler listade i ett excelark. De variabler som var intressant för detta projekt var vardera filtrats Zeta Potential-medelvärde, "Mean Zeta Potential", samt dess konduktivitet. För de prover som genomgick Zeta-potential-analys gjordes tyvärr aldrig någon pH-mätning. Instrumentet som användes för att beräkna Zeta-potential var en Anton Paar Lifesizer 500 med inställningen ISO 13099-2:2021.

### **3.6 Elektrolys av spikat prov**

Med målet att utföra elektrolys på två spikade saltvattenprover, med olika salthalt/konduktivitet, krävdes först att förbereda en utspädning av koncentrerad TBT. Målkoncentrationen TBT i vardera saltvattenlösning skulle vara 1000 ng/l TBT.

#### **3.6.1 Förberedelse av spikat prov**

En TBT-lösning tillreddes genom att väga upp 0.0116 g koncentrerad TBT i en färgad glasflaska "Bottle 1" (B1). Till denna glasflaska tillsattes 232 ml metanol vilket gav en koncentration av TBT på 0.05 mg/ml. Enligt beräkningar från Ekvation 11 togs 48 µl av lösningen från B1 och späddes med 200 ml metanol ner i en ny färgad flaska benämnd "Bottle 2" (B2).

Till fyra olika bägare tillsattes 500 ml saltvatten samt 50 ml av innehållet från B2. Två för vardera konduktivitet (4.34 och 43.6 mS/cm) så att tillräckligt många bägare fanns tillgängliga för att utföra elektrolys i en bägare och en kontroll vid vardera konduktivitet.

#### **3.6.2 Uppsättning och genomförande**

Två saltvattenblandningar tillreddes genom att blanda avjonat vatten och tillsätta godtycklig mängd laboratorieklassat havssalt för att uppnå en vattenblandning där konduktiviteten är lägre (4.34 mS/cm) och en där den är högre (43.6 mS/cm). Till dessa saltvattenblandningar tillsattes sedan metanol spikat med TBT för att uppnå 10% metanol-/vattenblandning. Katod och anod tillfördes de bägare som skulle genomgå elektrolys vid en spänning på 15V, medan kontrollproverna blev utan. Både elektrolys- och kontrollprovsbägare kördes med magnetomrörning i 24 timmar.

En så kallad mörk kontroll samlades in innan utförd elektrolys för att veta de initiala koncentrationerna av TBT, DBT och MBT i lösningarna. Dessa kontrollprover skyddades med aluminiumfolie för att motverka nedbrytning genom fotolys. Även elektrolysproverna var UV-skyddade under hela försöket för att motverka inblandning av fotolysens effekt på nedbrytningen. Efter 24 timmar samlades nya prover in, både för de två prover som genomgått elektrolys samt två ljusa kontrollprover som enbart utsatts för magnetomrörning, utan UV-skydd. Samtliga prover skickades in till ALS Scandinavia där de kunde analysera provernas TBT-, DBT- och MBT-koncentrationer. Se Tabell 1 och 2.

## 4 Resultat

I detta avsnitt presenteras resultaten för massbalans, zeta-potential och nedbrytningen av TBT i spikat vatten.

### 4.1 Elektrolys av spikat saltvatten

Analys av spikade prover utfördes av ALS Scandinavia.

I Tabell 1 och 2 kan vi se att elektrolys vid 15V, oavsett konduktivitet, har reducerat halten TBT i saltvattnet med 97%. Även på de prover som inte genomgick elektrolys kan man se en reduktion i halten TBT. I det fall då konduktiviteten på saltvattnet var hög kan man se en minskning med 21% och vid lägre konduktivitet en minskning med 50%. Detta är ett tecken på att det sker en naturlig nedbrytning, troligen i form av fotolys.

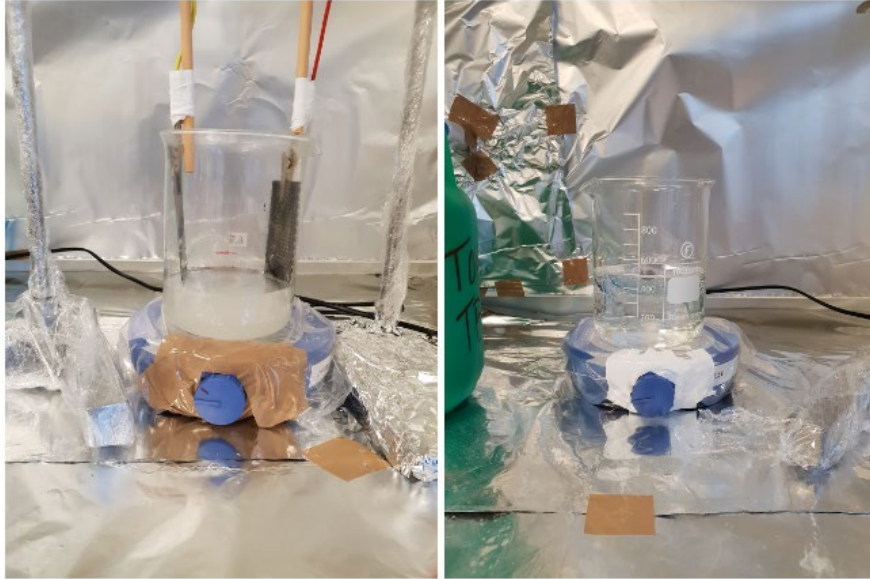
De initiala halterna DBT och MBT analyserade av ALS Scandinavia är inte precisa, utan angivna att ligga någonstans under 100 ng/l. Detta gör det svårt att veta exakt hur elektrolysen har påverkat dessa halter i jämförelse med kontrollproverna. Det vi vet är att debutyleringen sker stegvis, och därmed ökar halten DBT utefter att TBT bryts ned. Likväl sker samma då DBT bryts ned till MBT.

*Tabell 1: Resultat från ALS Scandinavia ABs analys av det spikade prov (1) med en konduktivitet på 4.34 mS/cm. Mörk kontroll = UV skyddat prov taget direkt efter spikning. Ljus kontroll = Ej UV skyddat prov under 24 h. Elektrolys = Prov som har genomgått elektrolys (15V) under 24 h och UV-skydd.*

Konduktivitet: 4.34 mS/cm	Mörk kontroll 1 (ng/l)	Ljus kontroll 1 (ng/l)	Elektrolys 1 (ng/l)
Monobutyltenn (MBT)	<100	<100	<100
Dibutyltenn (DBT)	<100	<100	<100
Tributyltenn (TBT)	619	310	<20

*Tabell 2: Resultat från ALS Scandinavia ABs analys av det spikade prov (2) med en konduktivitet på 43.6 mS/cm. Mörk kontroll = UV skyddat prov taget direkt efter spikning. Ljus kontroll = Ej UV skyddat prov under 24 h. Elektrolys = Prov som har genomgått elektrolys (15V) under 24 h och UV-skydd.*

Konduktivitet: 43.6 mS/cm	Mörk kontroll 2 (ng/l)	Ljus kontroll 2 (ng/l)	Elektrolys 2 (ng/l)
Monobutyltenn (MBT)	<100	<10	<100
Dibutyltenn (DBT)	<100	29.9	<100
Tributyltenn (TBT)	650	514	<20



Figur 11: Elektrolys 2 (till vänster) och Ljus kontroll 2 (till höger), båda bestående av 10% metanol i saltvatten spikad med  $1\mu\text{g/L}$  TBT och vid en konduktivitet på  $43.6\text{ mS/cm}$ .

I Figur 11 kan ses att Elektrolys 2 har reducerats till cirka 50% (se den röda markeringen på bägaren). Mycket av det lösta saltet fanns utfällt i botten av bägaren efter 24 timmars elektrolys. Samma går inte att säga om Ljus kontroll 2, där det knappt skett någon volymsreduktion eller fällning.

#### 4.2 Massbalans

I Diagram 1 ser vi TSS-värdena vid de fyra olika spänningsnivåerna för elektrolys- och kontrollprover plottade mot varandra. Kontrollproverna visar ingen stor varians i TSS, däremot är variansen större för de prover som utsatts för elektrolys. Man kan se en tydlig visuell skillnad på sediment som genomgått elektrolys jämfört med den som enbart varit omrörd (kontroll, K), se Figur 7 och 4. Jämförelsevis har E10V och E8V en relativt klar vattenfas medan K10V och K8V har en tydligt gulaktig grumlig vattenfas. Det visuella resultatet från elektrolysen kan tyckas vara mer gråaktig i färgen jämfört med motsvarande kontrollprov. Elektrolysen har i båda fall bildat ett vitt skum som ligger som ett täcke vid vattenytan, något man inte kan se på kontrollproverna. Detta är troligen vätgas som har bildats vid katoden enligt Ekvation 3.

Tittar man noga på Figur 7 kan också se en stor andel material flytande på vattenytan, både på kontroll- och elektrolysovet, troligen organiskt material från sedimentet som med lägre densitet än vatten stigit till ytan.

Det går inte att dra några slutsatser för hur olika spänning påverkar VSS, varken för de prover som tagits direkt efter elektrolys eller för de prover som genomgått omrörning, se Diagram 2 och 4.



Figur 12: Figur visar två glasfilter med filterkaka efter filtrering av suspensionsprov. Till vänster i bild är kontroll- och till höger elektrolys-suspension.

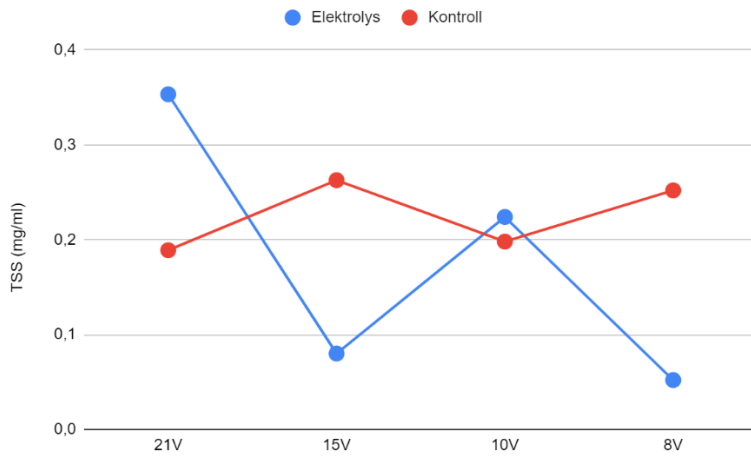


Diagram 1: Jämförelse i TSS (mg/ml) mellan elektrolys och kontroll vid de olika spänningsnivåerna.

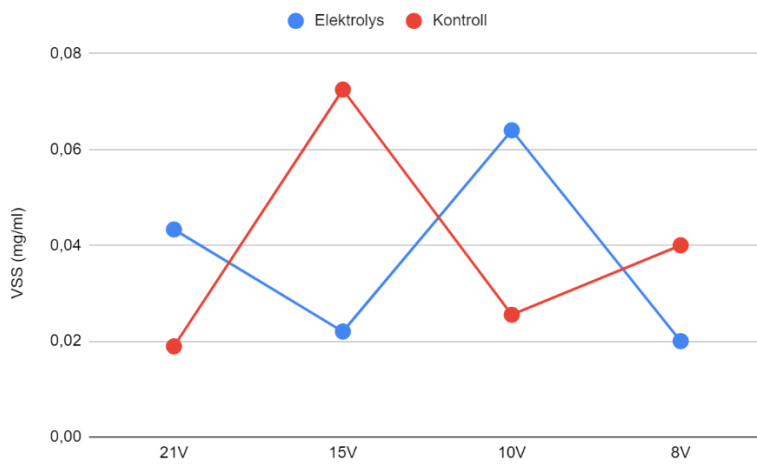


Diagram 2: Jämförelse i VSS (mg/ml) mellan elektrolys och kontroll vid de olika spänningsnivåerna.

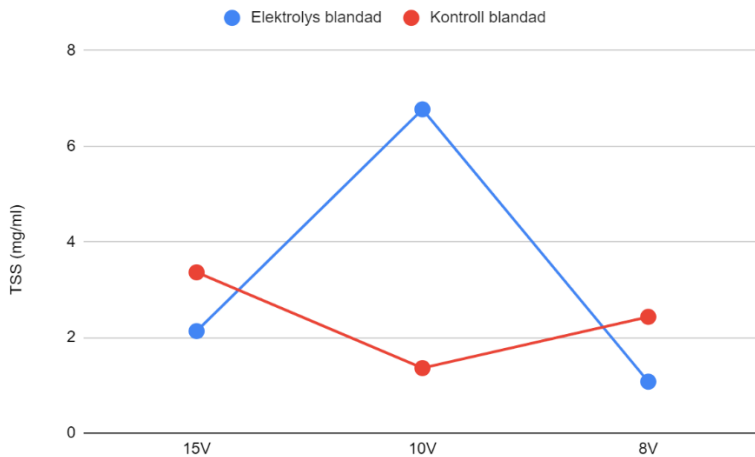


Diagram 3: Jämförelse av TSS (mg/ml) mellan elektrolyt och kontroll vid 15, 10 och 8V. Samtliga prover har blandats i 5 minuter, suspensionsprover samlades in efter 30 minuters sedimentation.

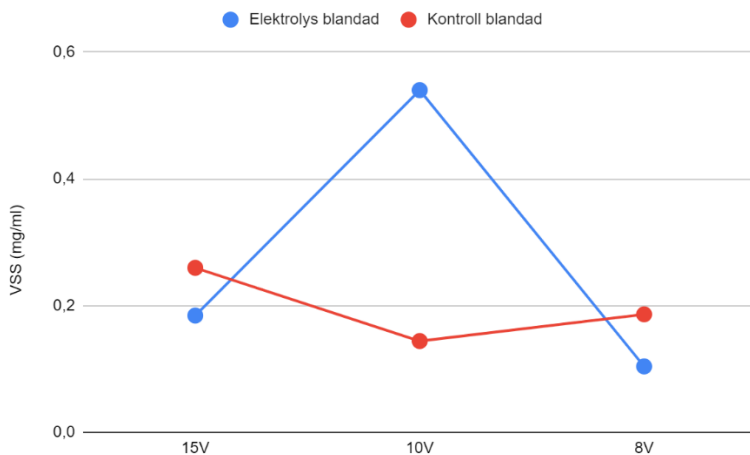


Diagram 4: Jämförelse av VSS (mg/ml) mellan elektrolyt och kontroll vid 15, 10 och 8V. Samtliga prover har blandats i 5 minuter, suspensionsprover samlades in efter 30 minuters sedimentation.

### 4.3 Zeta-potential

I Diagram 5 kan man se att de filtratprover som genomgått elektrolyt har fått ett större negativt ZP-värde jämfört med kontrollproverna, från -8,49 mV till -16,37 mV vid 10V. Vid 10V ser man alltså en skillnad med -7,88641 mV mellan elektrolyt och kontroll, vilket är en ökning med 93%. Vid 8V är skillnaden -2,71544 mV vilket utgör en ökning med cirka 20%. Detta tyder på att i båda fallen har partiklarna i suspensionen efter elektrolyt blivit mer stabila. Dock ligger värdena fortfarande inom intervallet för vad som räknas som ostabila suspensioner.

Konduktiviteten för filtratet ligger marginellt lägre för de prover som genomgått elektrolyt jämfört med kontrollfiltraten; 8% lägre vid 10V och 7% lägre vid 8V. Detta är ett tecken på att det finns färre fria joner i suspensionerna som utsatts för elektrolyt jämfört med kontrollproverna. Detta skulle kunna bero på att kloridjoner från vattenfasen, enligt Ekvation 1, har oxiderat vid anod och bildat  $\text{Cl}_2$ .

Samtidigt är ZP något lägre vid E10V (-16.37 mV) jämfört med E8V (-16.62 mV), något som skulle kunna tyda på att en lägre spänning ger en mer stabil suspension. Konduktiviteten är lägre vid E10V jämfört med E8V vilket är ett tecken på att suspensionen är mer stabil vid 8V än vid 10V.

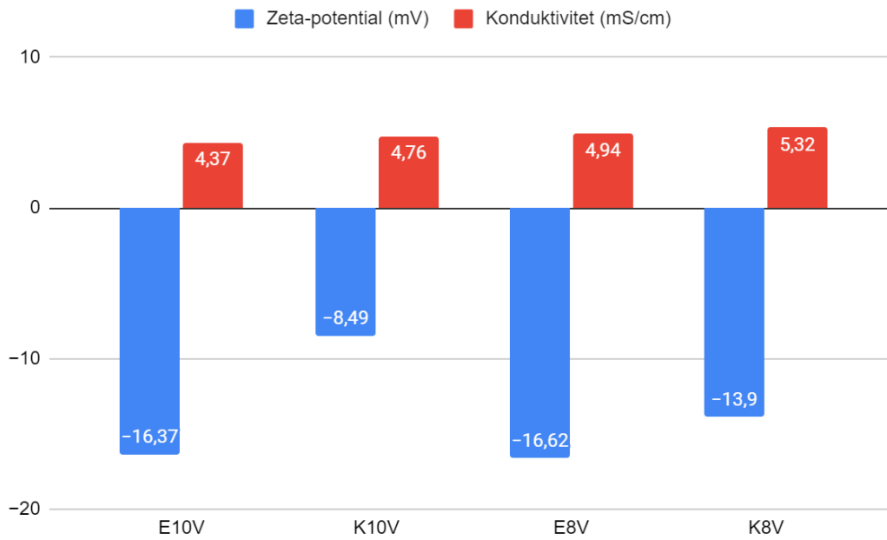


Diagram 5: Skillnaden i zeta-potential i proportion mot skillnad i konduktivitet, med eller utan elektrolys vid 10V och 8V. (E = Elektrolys, K = Kontroll)

## 5 Diskussion

I och med att laborationsdelen av detta projekt utfördes på bara några veckor fick många kompromisser göras. Projektplaneringen inför starten var något kort då projektet behövde sättas i gång för att hinna med tidsplanen. Detta resulterade i att målen för projektet utvecklades parallellt med det laborativa arbetet.

Ett tydligt exempel av detta var att suspensionsprover inte samlades in för de första två elektrolyskörningarna, 21V och 15V utan enbart för 10V och 8V, något som tyvärr i efterhand påverkade den mängd data som fanns tillgänglig för resultatanalys av den elektriska spänningens inverkan på suspensionernas stabilitet. Det hade varit intressant att se om samma trend kunde ses för E21V och E15V som uppstod för E10V och E8V; där en högre spänning minskar stabiliteten för suspensionen.

Det gjordes ingen ny mätning av halten TBT, DBT och MBT i det sediment som användes i denna studie trots att det legat nedfrost i cirka ett år. Dock gjordes heller aldrig någon haltmätning av de sedimentprover som genomgått elektrolysis. I stället valdes att validera elektrolysmetoden genom att utföra elektrolysis på spikade saltvattenprover. Detta är dock inte så representativt för hur det ser ut i verkligheten, med tanke på att TBT inte gärna finns löst i vatten, utan snarare adsorberas till partiklar i vattenfasen, eller lagrat i sediment. Därför hade det varit mer intressant att validera hur elektrolysis som metod bryter ner TBT i en suspension eller ett kontaminerat sediment, för att efterlikna verkligheten.

För de suspensionerprover där Zeta-potentialen analyserades gjordes aldrig någon mätning av provernas pH-värde. Eftersom ZP, pH och konduktivitet alla är variabler som är intressanta för stabiliteten av suspensionen hade det varit en bra utgångspunkt vid resultatanalys att även veta pH-värdet för de olika suspensioner som analyserades.

Trots att det var stor visuell skillnad på suspensionerna som genomgått elektrolysis och kontroller visade resultaten för TSS och VSS ingen tydlig trend eller skillnad. Detta kan bero på att sedimentpartiklar fastnat i det vätgasskum som låg som ett täcke vid ytan på de bägare som genomgått elektrolysis. När suspensionsprover samlades in kan det ha hänt att sedimentpartiklar från skummet kom med in i provet trots att suspensionen i själva verket hade ett lågt TSS. Därför tror jag det hade varit bra att innan provtagning ta bort det skum som samlats vid ytan, för att få en mer representativ massbalans jämfört med de prover som inte utsatts för elektrolysis där det inte fanns något skum vid ytan. Dessutom hade det givit ett mer trovärdigt resultat av massbalansen om man hade tagit fler suspensionsprover från samma suspension för att på dessa beräkna ett medelvärde för TSS och VSS för vardera prov.

## 6 Slutsats

Elektrolys visar sig vara en effektiv metod för att bryta ner TBT i saltvatten, 97% av ordinarie halter bröts ner.

Massbalansen i denna studie var bristfällig i sitt utförande och det kan därför inte dras några slutsatser för hur elektrolys vid olika spänning påverkade värdena för TSS och VSS.

Av de få prover som analyserats för zeta-potential kan man se en stabiliserande effekt på suspensioner som genomgått elektrolys.

# Referenslista

- [1] E Arevalo, W Calmano. Studies on electrochemical treatment of wastewater contaminated with organotin compounds. July 2007. Vol 146(3); 540-545  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407005419?via%3Dihub>
- [2] International Maritime Organisation. Anti-fouling systems. [internet]. London: IMO; okänt år [citerad 2024-05-11]  
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Anti-fouling.aspx>
- [3] Tin. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123864543009416>
- [4] Okoro HK, Fatoki OS, Adekola FA, Ximba BJ, Snyman RG. Organotin Compounds. Encyclopedia of Toxicology. 2014;3:720-725  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123864543001743>
- [5] Atkins P, Jones L. Chemical Principles. (4th ed.) W. H Freeman and Company New York. 2008. 12, Electrochemistry; s 483-528
- [6] Bengtsson H, Wenersson A. TBT, koppar, zink och irgarol i dagvatten, slam och mark i småbåtshamnar. [internet] Göteborg: Havs- och vattenmyndigheten; 2012. [citerad 2024-03-18]  
[https://catalog.lansstyrelsen.se/store/13/resource/2012\\_16](https://catalog.lansstyrelsen.se/store/13/resource/2012_16)
- [7] Ayanda OS, Fatoki OS, Adekola FA, Ximba BJ. Fate and Remediation of Organotin Compounds in Seawaters and Soils. Chem Sci Trans. 2012;1(3)470-481  
[http://digitalknowledge.cput.ac.za/bitstream/11189/3640/1/Ayanda\\_OS\\_Fatoki\\_OS\\_Adekola\\_FA\\_Ximba\\_BJ\\_AppSci\\_2012.pdf](http://digitalknowledge.cput.ac.za/bitstream/11189/3640/1/Ayanda_OS_Fatoki_OS_Adekola_FA_Ximba_BJ_AppSci_2012.pdf)
- [8] Havs- och vattenmyndigheten. Båtbottentvättning av fritidsbåtar [internet]. Göteborg: Havs- och vattenmyndigheten; 2015. 978-91-87025-10-5. [citerad 14 April 2024] Hämtad från:  
<https://www.havochvatten.se/download/18.add3e2114d2537f6a61189f/1430991049916/rapport-2015-reviderade-riktlinjer-batbottentvatt.pdf>
- [9] Lointier C. Degradation of Organotin Compounds in Marine Sediment [masteruppsats på internet]. Göteborg; Chalmers Tekniska Högskola; 2019 [citerad 11 maj 2024]. Hämtad från:  
<https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/5f511cd0-4e28-4bc9-91fd-c2a5b0ec7a85/content>
- [10] Bajpai P. Chapter 19 - Colloid and Surface. Biermann's Handbook of Pulp and Paper. 2018;2:381-400  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128142387000192>
- [11] Alzieu C. Environmental impact of TBT: the French experience. Science of the Total Environment. 2000; 258(1-2):99-102  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969700005106>
- [12] Mailhot G, Austruc M, Bolte M. Degradation of Tributyltin Chloride in Water Photoinduced by Iron(III). Applied Organometallic Chemistry. 1999; 13: s53-61  
[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/\(SICI\)1099-0739\(199901\)13:1%3C53::AID-AOC814%3E3.0.CO;2-5](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/(SICI)1099-0739(199901)13:1%3C53::AID-AOC814%3E3.0.CO;2-5)
- [13] National Food Institute, Technical University of Denmark. Tributyltin compounds (TBT) [internet]. Köpenhamn: The Danish Environmental Protection Agency; 2007. 978-87-93026-80-3. [citerad 7 maj 2024]. Hämtad från: <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2013/12/978-87-93026-80-3.pdf>
- [14] Hassan HA, Dawah SE, El-Sheekh MM. Monitoring the degradation capability of novel haloalkaliphilic tributyltin chloride (TBTCl) resistant bacteria from butyltin-polluted site. Revista

Argentina de Microbiología. 2019 januari-mars;51(1): 39-46

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S032575411830004X#fig0005>

[15] Zeffler A, Samuelsson PO. Sedimentprovtagning i småbåtshamnar i Stenungsund. Stenungsund: Stenungsunds kommun; 2011.

<https://www.stenungsund.se/download/18.bfcc70136be7fac7b8000131/1497357629277/Sedimentprovtagning%20i%20Stenungsund%20111219.pdf>

[16] Hoch M, Schwesig D. Parameters controlling the partitioning of tributyltin (TBT) in aquatic systems. Applied Geochemistry. 2004 Mars;19(3): 323-334

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292703001318>

[17] Environmental Business Specialists. Total Suspended Solids (TSS) & Volatile Suspended Solids (VSS) [internet]. Louisiana; Environmental Business Specialists; 2022 [citerad 2024-05-05]. Hämtad från:

<https://www.ebsbiowizard.com/total-suspended-solids-tss-volatile-suspended-solids-vss-2-1071/>

[18] Havs- och vattenmyndigheten. Muddring och hantering av muddermassor [internet] Göteborg: Havs- och vattenmyndigheten. 2018. 978-91-88727-09-1. [citerad 11 maj 2024]. Hämtad från:

<https://www.havochvatten.se/download/18.4c271c50163bf560e38ec76c/1545057890966/rapport-2018-19-muddring-och-hantering-av-muddermassor.pdf>

[19] International Chamber of Shipping. Shipping and World Trade: World Seaborne Trade [internet]. London: International Chamber of Shipping. [citerad 2024-03-15] Hämtad från: <https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/shipping-and-world-trade-world-seaborne-trade/>

[20] Malvern Instruments Limited. Zeta Potential - An introduction in 30 minutes. [broschyr/tekniskt blad] Worcestershire; Malvern Instruments Limited. 2015. Hämtad från:

<https://www.research.colostate.edu/wp-content/uploads/2018/11/ZetaPotential-Introduction-in-30min-Malvern.pdf>

[21] PTL. Demystifying Zeta Potential. [internet]. Chicago: Particle Technology Lab (PTL); 2022 [publicerad 2022-04-19; citerad 2024-05-13]. Hämtad från: <https://particletechlabs.com/ptl-press/demystifying-zeta-potential-7/>

[22] Johnstone S, Anderson S. What is an Electric Double Layer? [internet]. Wisconsin-Madison: Gebbie Lab; 2023 [publicerad 2023-06-21; citerad 2024-05-05]. Hämtad från:

<https://interfaces.che.wisc.edu/what-is-an-electric-double-layer/>

[23] Wakeman RJ. Sedimentation [internet]. Leicestershire: Thermopedia; 2011 [uppdaterad 2011-02-08; citerad 2024-05-05]. Hämtad från: <https://www.thermopedia.com/content/1114/>

[24] Norén A. Management and Treatment of Organotin and Metal Contaminated Dredged Sediment. Doktorsavhandling. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola; 2021 [citerad 11 maj 2024] Hämtad från:

[https://research.chalmers.se/publication/525021/file/525021\\_Fulltext.pdf](https://research.chalmers.se/publication/525021/file/525021_Fulltext.pdf)

# Bilaga

Tabell 3: Värden för TSS, VSS, filtervattenmängder, E = Elektrolys, B=blandad, K=Kontroll

Ospikat test	Vikt bränt filter (g)	Vikt filter+kaka (2h) (105C) (g)	Vikt efter bränning (550C) (15min) (g)	Mängd torrt sediment	Volym vatten vid filtrering (ml)	TSS (mg/ml)	VSS (mg/ml)
E21V	0.2537	0.2855	0.2816	80.08 g (vått sediment)	90	0.3533	0.0433
K21V	0.2536	0.2706	0.2689	(80.26 g vått sediment)	90	0.1889	0.0189
E15V	0.2576	0.2616	0.2605	80.06	50	0.08	0.022
K15V	0.2567	0.2701	0.2664	80.00	51	0.2627	0.0725
EB15V	0.2572	0.3659	0.3565	80.06	51	2.1313	0.1843
KB15V	0.2566	0.4314	0.4179	80.00	52	3.3615	0.2596
E10V	0.2595	0.2707	0.2675	80.01	50	0.224	0.064
K10V	0.2554	0.2655	0.2642	80.02	51	0.1980	0.0255
EB10V	0.2675	0.6060	0.5790	80.01	50	6.77	0.54
KB10V	0.2655	0.3334	0.3262	80.02	50	1.358	0.144
E8V	0.2567	0.2593	0.2583	80.02	50	0.052	0.02
K8V	0.2543	0.2669	0.2649	80.06	50	0.252	0.04
EB8V	0.2568	0.3105	0.3053	80.02	50	1.074	0.104
KB8V	0.2559	0.3774	0.3681	80.06	50	2.43	0.1862

Tabell 4: Mean Zeta-potential suspensionfiltrat från sediment för 10V och 8V. (K = Kontroll, E = Elektrolys, B = Blandad)

Spänning (V)	Mean Zeta-potential (mV)	Konduktivitet (mS/cm)
K10V	-8.49	4.76
E10V	-16.37	4.37
KB10V	-21.39	3.64
EB10V	-18.26	4.52
K8V	-13.90	5.32
E8V	-16.62	4.94
KB8V	-11.01	5.63
EB8V	-14.50	4.84

Beräkning, mängd TBT i spikat prov

$$C_{B1} = 50\,000 \mu\text{g/L} \text{ (koncentration TBT i "bottle 1")}$$

$$C_{B2} = 10 \mu\text{g/L} \text{ (koncentration TBT i "bottle 2")}$$

$$V_{B1} = 0.232 \text{ L}$$

$$V_{B2} = \frac{(C_{B1} \cdot V_{B1})}{C_{B2}} = 48 \mu\text{g} \text{ (Volym TBT-metanolblandning som förs över från B1 till B2)}$$