



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 24025

Examensarbete 30 hp

Maj 2024

Nedbrytning av totalt organiskt kol i dagvatten på Stockholm Arlanda flygplats

Moa Lorin



Abstract

Swedavia is a state-owned company that owns and operates ten airports in Sweden, of which Stockholm Arlanda Airport is one. The airport has an environmental permit where an investigation condition called U4 exists. The investigation condition primarily aims to evaluate the treatment of stormwater at the airport, with final conditions regarding emissions of e.g. organic compounds and nutrients. Snow and ice deposits form on airplanes and runways during winter, this affects the aerodynamic ability of the airplanes and cause insufficient friction between the airplane tires and the ground. To prevent crashes or planes not taking off, anti-icing agents such as mono propylene glycol and potassium formate are being used. The consequence of using these agents is increased levels of dissolved organic material in the stormwater and in the worst case this can lead to oxygen depletion in the recipient, which in this case is Märstaån.

Swedavia has, with the primary purpose of purifying stormwater, built several stormwater facilities in the airport area. These consist of ponds that through biological decomposition depletes the water of the dissolved organic material. According to the trial period investigation, the final conditions for the storm water should be decided and the potential TOC-removal efficiency from the storm water needs to be evaluated. However, it has been hard to establish how well the ponds reduction of TOC work since water continuously fills up the ponds and because water sometimes gets bypassed when there are high flows. Since the reduction of TOC in the ponds is still not determined, the the purpose of this study was to evaluate the TOC-removal effect and whether it can be improved. In this study, the Kättstabäcken stormwater facility (KDA) was the study object.

Experimental incubations for degradation of TOC where conducted with water samples from Arlanda, incubated at 3 different temperatures (5°C, 10°C and 23°C) with the categories low/high TOC content and with/without addition of nutrients, according to the Redfield ratio 106:16:1. The experiment lasted 33 days and continuous water samples were taken to then analyze the TOC content at SLU's lab. The result showed that nutrient addition according to the Redfield ratio had no statistically significant influence on the degradation, except at 23°C, which suggests that nutrient addition is beneficial at higher temperatures. When comparing the degradation rates at different temperatures, there was a statistically significant difference between the samples, except for the high initial content category without added nutrients.



UPPSALA
UNIVERSITET

At a low initial content and a temperature of 5°C, 10°C and 23°C, a TOC-reduction of 65-73%, 83-86% and 80-90% was observed for the respective temperature after 33 days of incubation. For the samples that started with a high initial content in the temperatures 5°C, 10°C, a TOC-removal of 4-42% and 11-16% was observed and for 23°C, the TOC-removal differed between the samples without and with addition of nutrients. Without added nutrient, the TOC content increased by 38% and with added nutrient, it was reduced by 88 % after 33 days of incubation. An increase in the TOC content indicates sources of error in the method. The degradation rate and time to 100% degradation at low and high initial content for different conditions and the entire test period was between 0.34-1.02 mg/l respectively 8.45-11.47 mg/l TOC per day and 30-47 and 39-84 days respectively. After a week the range of degradation rates for low and high initial concentrations was 1.63-6.98 mg/l respectively 33.21-83.28 mg/l TOC per day and the TOC-removal capacity after one week was 33-100% respectively 30-83%.

The improvements suggested, based on the results of the study, is to investigate the possibility of having a cost-effective heated pond system, possibly if there is waste heat to use from the airport. When heating, an alternative may be to add nutrient-rich wastewater, to maintain efficient degradation. If this is not possible, consideration should be given to the possibility of introducing an additional step for TOC-removal, such as a biofilter that reduces the TOC content before the water is stored in the ponds. However, more studies are required to draw well-founded conclusions from the work, as there were uncertainties in the results of this study.

Keywords: TOC-removal, airport stormwater, aircraft deicing fluid, potassium formate, propylene glycol, stormwater management

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Emil Andersson Cada Ämnesgranskare: Stefan Bertilsson

Examinator: Sahar Dalahmeh

Referat

Nedbrytning av totalt organiskt kol i dagvatten på Stockholm Arlanda flygplats

- Moa Lorin

Swedavia är ett statligt ägt bolag som äger och driver tio flygplatser i Sverige, varav Stockholm Arlanda Airport är en. Flygplatsen har ett miljötillstånd där ett utredningsvillkor kallat U4 finns. Prövotidsutredningen syftar främst till att utvärdera reningseffekten hos dagvattenanläggningarna vid flygplatsen, med slutgiltiga villkor om utsläpp av bl.a. organiska föreningar och näringsämnen. När det under vintertid bildas snö- och isbeläggningar på flygplanen och banorna riskerar det att delvis påverka den aerodynamiska förmågan men också orsaka otillräcklig friktion mellan flygplansdäcken och marken. För att förhindra att olyckor sker eller att plan inte lyfter används framför allt kaliumformiat och propylenglykol som av-isning och halkbekämpningsmedel. Följden av att använda dessa blir förhöjda halter löst TOC (Total Organic Carbon) i dagvattnet och kan leda till syrefria förhållanden i recipienten, vilket i detta fall är Märstaån.

Swedavia har, med det primära syftet att rena dagvattnet på av-isning-och halkbekämpningsmedel, anlagt flera dagvattenanläggningar på flygplatsområdet. Dessa består av dammar som genom biologisk nedbrytning och sedimentering ska rena vattnet med avseende på TOC. Enligt ett prövotidsvillkor som uppkom i samband med miljödomen för flygplatsen ska slutgiltiga halter bestämmas och den potentiella reningseffektiviteten av dagvattnet ska undersökas. Reningseffektiviteten har dock visat sig vara svår att fastställa då dammarna kontinuerligt fylls på med vatten och att vatten ibland leds förbi dammarna via bypassfunktion vid för stora vattenflöden. Då reningseffektiviteten i dammarna fortfarande inte är fastställd är denna studies syfte att utvärdera reningseffekten och om den kan förbättras.

Ett inkubationsförsök för nedbrytning gjordes med en experimentuppställning där vattenprover från Arlanda inkuberades i 3 olika temperaturer (5°C, 10°C och 23°C) med kategorierna låg/hög TOC-halt och med/utan tillsats av makronäringsämnena fosfor och kväve (N och P), enligt Redfield förhållandet 106:16:1. Försöket pågick i 33 dagar och kontinuerliga vattenprover togs för att sedan analysera TOC-halten. Resultatet visade att näringstillsats, enligt Redfieldförhållandet, inte hade någon statistisk signifikant påverkan på nedbrytningshastigheten vid 5°C och 10°C. Det fanns dock en statistisk signifikant skillnad vid 23°C. Vilket tyder på att näringstillsats är gynnsamt för nedbrytningen vid högre temperaturer. Vid jämförelser mellan nedbrytningshastigheterna vid olika temperaturer fanns det en statistisk signifikant skillnad mellan proverna, förutom för kategorin med hög initialhalt utan näring. Vid låg initialhalt och en temperatur på 5°C, 10°C och 23°C kunde en reduktion av TOC på 65-73%, 83-86% samt 80-90% för respektive temperatur observeras efter en inkubationstid på 33 dagar. För proverna som startade med hög initialhalt i temperaturerna 5°C, 10°C reducerades TOC med 4-42% och 11-16%, och för 23°C skiljde sig nedbrytningen mellan kategorierna näringstillsats/ingen näringstillsats. Utan näring ökade TOC-halten med 38% och med näring reducerades den med 88 % efter 33 inkubationsdagar.

En ökning av halten tyder på felkällor i metoden. Nedbrytningshastigheten och tiden för 100% nedbrytning vid låg och hög initialhalt för olika förutsättningar för hela perioden var mellan 0.34-1.02 mg/l respektive 8.45-11.47 mg/l TOC per dag samt 30-47 respektive 39-84 dagar. Efter en vecka var spannet mellan nedbrytningshastigheter för låga och höga initialhalter 1.63-6.98 mg/l respektive 33.21-83.28 mg/l TOC per dag och reningskapaciteten efter en vecka var 33-100% respektive 30-81%.

De förbättringar som kan föreslås, baserat på resultatet i studien, är att se över möjligheten att ha ett kostnadseffektivt uppvärmt system, eventuellt genom att nyttja spillvärme på flygplatsen. Vid uppvärmning kan ett alternativ vara att tillföra näringsrikt avloppsvatten, för att upprätthålla en effektiv nedbrytning. Om detta inte är möjligt bör man överväga möjligheten att introducera ett ytterligare reningssteg, som ett biofilter som reducerar TOC-halten innan vattnet lagras i dammarna. Mer studier krävs dock för att kunna dra välgrundade slutsatser från arbetet, eftersom det i studien uppkommit osäkerheter i resultatet.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Vid en flygstart från Arlanda den 27 december 1991 sögs is från flygplanets vingar in i luftintagen på motorerna och de slutade fungera. Mirkakulöst nog omkom inga människor, men krascher med katastrofala konsekvenser har förekommit förut inom den globala flygsektorn. Användning av av-isningsmedel är av den anledning a och o på flygplatser och varje år används det mängder på flera tusentals ton runt om i världen.

Syftet med av-isningsmedlen är att sänka vattnets fryspunkt och på Arlanda görs detta främst genom användning av propylenglykol och kaliumformiat. Av-isningsmedlen bildar en beläggning på flygplan och flygplatsytor och förhindrar eventuell snö och is från att ansamlas. Det finns dock en baksida med detta, när av-isningsmedlen hamnar i dagvattnet ökar halten av löst organiskt kol. Mikroorganismer som livnär sig på kolet förbrukar syre när de bryter ner medlet, vilket leder till att syrehalterna i recipienten kan sjunka till mycket låga nivåer. Det är en allvarlig konsekvens då syre har en livsviktig funktion för många organismer.

För att tackla detta problem upprättar flygplatser runt om i världen reningsanläggningar. På Stockholm Arlanda flygplats har flera reningsanläggningar bestående av dammsystem utformats. Det är dock osäkert hur god reningseffekten är för av-isningsmedlen. Via ett utredningsvillkor som uppkom i samband med flygplatsens miljödom behöver den potentiella reningseffekten utvärderas.

Med syfte att försöka ta reda på reningseffekten provtogs vatten från en av dammarna på Arlanda. Två vattenprover, varav ett anrikades med kaliumformiat för att öka TOC-halten, togs från en av dammarna. Därefter gjordes ett nedbrytningsförsök med tre inkubationstemperaturer på 5°C, 10°C och 23°C. En dosering av fosfor och kväve enligt Redfieldförhållandet (106:16:1) gjordes för hälften av proverna för att se om näring gav någon effekt på nedbrytningen. Nedbrytningsförsöket pågick i 33 dagar och nedbrytningen mättes i TOC. En kompletterande litteraturgenomgång gjordes för att komma med förslag på förbättringar, med utgångspunkt från temperatur och näring.

Resultatet visade att nedbrytning ägde rum i majoriteten av kategorierna av prover sett till starthalten och sluthalten av TOC. Det visade sig att temperatur var viktigt då den högsta temperaturen skilde sig statistiskt från de andra två temperaturerna. En högre temperatur leder till ökad biologisk aktivitet och för att växa använder mikroorganismerna det organiska kolet, vilket påskyndar nedbrytningen. Näringstillsatsen visade sig vara värdefull vid högre temperaturer och en hög initialhalt, vilket med största sannolikhet beror på att den förhöjda mikrobiella aktiviteten ökar risken för att näringsämnen tar slut. Vid de lägre temperaturerna 5°C och 10°C fanns det ingen statistisk signifikant skillnad utan näring och med näringstillsats.

De ändringar som kunde förelås från resultatet var att se över ett kostnadseffektivt uppvärmningssätt av dammarna som exempelvis användning av spillvärme från anläggningen. Vid

uppvärmning kan ett alternativ vara att tillföra näringsrikt avloppsvatten, för att upprätthålla en effektiv nedbrytning. Andra lösningar att överväga är ett reningssteg för dammarna, exempelvis biofilter, för att snabbt reducera TOC-halten. Detta borde dock följas upp med fler studier av nedbrytningen, eftersom det uppkom osäkerheter i denna studies resultat.

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 HP inom civilingenjörsprogrammet inom miljö- och vattenteknik, vid Uppsala Universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet. Det har utförts vid Swedavia med handledning av Emil Andersson Cada och ämnesgranskare Stefan Bertilsson, Professor vid Institutionen för vatten och miljö; Avdelningen för mikrobiell ekologi.

Jag vill först och främst tacka Jonathan Arnlund på WRS som var till stor hjälp i början av arbetet som handledare och introducerade mig för Swedavia.

Jag vill även tacka Emil Andersson Cada för välkommandet till Swedavia, stöd, handledning och visat engagemang under examensarbetets gång. Tack till Zhoujun Li för given information om dammar och stöd med data, Johan Ström för kontinuerligt stöttande och engagemang samt tack till övrig personal på Swedavia som har hjälpt mig under arbetet med provtagning och informationsutbyte.

Jag vill även tacka Stefan Bertilsson för hjälp och svar under arbetet och för stöttningen i att genomföra laborationerna på SLU. Stort tack till all personal på SLU som har hjälpt mig med svar på frågor, det praktiska utförandet av nedbrytningsförsöket och TOC-analyser. Speciellt tack till Prune Leroy och Marcus Korvela för all hjälp.

Stort tack till Emil Fredricsson för all hjälp med R vid de statistiska analyserna.

Sist men inte minst vill jag tacka min familj och vänner för stöttning genom examensarbetet och hela utbildningen. Stort tack till min klass och tack till mina studievänner för alla fina minnen tillsammans, vad hade jag gjort utan er?

Moa Lorin, Uppsala 2023

Copyright © Moa Lorin och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet. UPTEC W 24025 ISSN 1401-5765. Publicerad digitalt hos Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2024.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	2
2	Frågeställningar	2
3	Avgränsningar	2
4	Bakgrund	3
4.1	Av-isning	3
4.1.1	Isbildning och av-isning på flygplatser	3
4.1.2	Av-isning och halkbekämpning på Arlanda flygplats	3
4.1.3	Av-isningsmedels påverkan på recipient och nedbrytbarhet i låga temperaturer	3
4.2	Rekommenderade reningsmetoder av av-isning och halkbekämpningsmedel på flygplatser - global översikt	4
4.3	Kättstabäckens dagvattenhantering	6
4.3.1	Anläggningen	6
4.3.2	Dammarnas funktion och uppföljning	8
5	Teori	8
5.1	Mikroorganismers metabolism och tillväxt	8
5.1.1	Upptag av makronäringsämnen	9
5.1.2	Upptag av mikronäringsämnen	10
5.2	Miljöfaktorerers påverkan på mikroorganismers metabolism	10
5.2.1	Syre	10
5.2.2	Temperatur	10
5.2.3	pH	11
5.2.4	Förhållandet mellan näringsämnen spelar roll - Redfields förhållande	11
5.2.5	Bakteriella tillväxtkurvan	11
5.2.6	Konkurrens om bristfälliga resurser	13
5.2.7	Tillväxtytor	13
6	TOC-, kväve- och fosforhalter under våren - nulägesanalys av Kättstabäcken ..	13
7	Metod	15
7.1	Litteraturgenomgång	15
7.2	Nedbrytningsförsök	15
7.3	Provtagning	16
7.4	Nedbrytningsförsök	18
7.4.1	Förberedelse av inkubationsflaskor	18

	7.4.2	Analysresultat och mängd tillsatt kväve och fosfor	18
	7.4.3	Val och dosering av kväve och fosfortillsats	19
	7.4.4	Uppställning av nedbrytningsförsöket	19
7.5		Provtagning av TOC ur experimentflaskorna.....	20
7.6		TOC-mätningar.....	21
	7.6.1	Instrumentförberedelse.....	21
	7.6.2	Förberedelse av prover för analys och körning av instrument..	21
7.7		Statistiska analyser mellan provkategorierna	22
	7.7.1	Test för normalfördelning.....	22
	7.7.2	Wilcoxon rangsummetest och t-test	23
7.8		Beräkningar	23
8		Resultat	24
	8.0.1	Nedbrytningskurvor vid 5 °C.....	24
	8.0.2	Nedbrytningskurvor vid 10 °C	26
	8.0.3	Nedbrytningskurvor vid 23 °C	28
8.1		Nedbrytning under hela inkubationsperioden - jämförelse mellan start och slutvärde.....	29
8.2		Nedbrytning efter en veckas inkubation	33
8.3		Kväve och fosforhalter efter avslutat nedbrytningsförsök	35
8.4		Jämförelser mellan analyser på SLU och SGS analytics	36
9		Diskussion	39
	9.1	Reningskapaciteter vid olika temperaturer	39
	9.2	Påverkan av näringstillsats.....	40
	9.3	Förbättringspotential i anläggningen.....	41
	9.4	Osäkerheter med studien.....	41
10		Slutsats	43
	10.1	Framtida studier	44
		Referenser	45
11		Bilagor.....	47
	11.1	Rådata från nedbrytningsförsöket	47
	11.2	Processad data från nedbrytningsförsöket	52
	11.3	Regressionsanalyser.....	54
	11.4	TOC, fosfor och kvävehalter i slutet av experimentet.....	60

Ordlista

- Av-isning - Process där is eller frost tas bort från ytor
- Dagvattendammar - Dammar som har byggts för att kontrollera flödestoppar av regnvatten och för att förbättra dagvattnets kvalitet innan det släpps ut i recipienten
- Nedbrytning - Process där organiskt material omvandlas till oorganiska molekyler som koldioxid, vatten och mineralsalter
- Näringsämne - En oorganisk eller organisk förening som en organism tar upp från sin omgivning för att överleva, fortsätta växa och fortplanta sig
- TOC - Totalt organiskt kol
- BOD - Biokemisk syreförbrukning
- COD - Kemisk syreförbrukning

1 Inledning

Stora mängder av-isningsmedel används på flygplatser runt om i världen för att förhindra isbildning på flygplan (Switzenbaum et al. 2001). Det brukar krävas upp mot 4 m³ för ett enda flygplan och majoriteten av alla av-isningsmedel har ett betydande syrebehov. Detta har resulterat i att myndigheter behöver kontrollera den avrinning som sker från de hårdgjorda ytorna på flygplatsen. Problematiken blir att flygplatserna behöver hantera kontaminerat vatten, eftersom utan av-isningsmedel kan inte en säker flygresor utlovas (Switzenbaum et al. 2001).

Det finns flera sätt att minska risken att av-isningsmedlet hamnar i dagvatten, och detta kan göras i olika steg i av-isningsprocessen (Switzenbaum et al. 2001). Medlen kan exempelvis spädas på ett sådant sätt att de fortfarande uppfyller sin funktion, som är att sänka fryspunkten på vattnet, men mängden använt medel minskar. En svårighet med spädningen är dock att flygplatserna då måste följa variationer i temperatur i området. Utöver det finns det olika sätt att utföra av-isning på, för att minska miljöpåverkan. Ett sätt är att ha en bestämd plats för av-isning för att minimera risken att kontaminera ett större område. Dessutom finns det speciella av-isningsfordon som kan suga upp överbliven vätska från av-isningsplatsen, eller så kan flygplatsen utforma en speciell lagring av det specifika av-isningskontaminerade dagvattnet (Switzenbaum et al. 2001).

I nuläget finns det flera rekommenderade lösningar för att ta hand om och rena dagvatten med av-isningsmedel, bland annat luftade laguner och grusbäddar, omvänd osmos och våtmarker (National Academies of Sciences 2013). På Arlanda flygplats används retentionsdammar med biologisk nedbrytning och sedimentering (Li 2022), vilket inte är vanligt förekommande metod för rening av dagvatten från flygplatser i världen (Rodziewicz et al. 2020).

Dammarnas reningseffektivitet är mycket starkt beroende av den mikrobiella aktiviteten, då det är mikroorganismerna som utgör nedbrytningen av löst organiskt material (Chamy 2013), som tillkommer från av-isningsmedlen. Mikroorganismerna använder kol som en byggsten för tillväxt i sin metabolism (Duncan 2003), vilket gör att kolkällan från av-isningsmedlen inte är något problem så länge kolet är tillgängligt för organismen (K. Carlsson et al. 2020). Genom nedbrytningen utvinns energi för att kunna bedriva viktiga tillväxtprocesser och ta upp näringsämnen. Näringsämnena fosfor och kväve har en väsentlig roll för nedbrytningen (Duncan 2003), då de inte sällan har en tillväxtbegränsande funktion i aktiva miljöer (Larm & Pirard 2010). Förhållandet mellan kol, kväve och fosfor spelar också roll för nedbrytningen av det organiska materialet (Nagata 2008). En av de absolut viktigaste komponenterna för nedbrytning är även temperatur (Bitton 2011). En gynnsam temperatur påskyndar processen för biokemiska reaktioner och därmed ökar den mikrobiella aktiviteten (Rose 1976).

Swedavia har via ett utredningsvillkor fått i uppdrag att utvärdera deras dagvattenanläggningars potentiella reningskapacitet, vilket har lagt grunden för detta examensarbete. Av-

isningen sker under årets kallaste månader, vilket leder till att temperatur är en viktig faktor att undersöka. Dagvattnet som rinner till dammarna har också generellt väldigt låga näringsnivåer, vilket kan vara begränsande för nedbrytningen. Dessa två faktorer lyfts i litteraturen fram som essentiella när det gäller nedbrytningen i akvatiska miljöer. Detta examensarbete har därför riktat in sig på dessa två potentiella påverkansfaktorer genom att undersöka hur reningseffekten i dammarna skiljer sig i olika temperaturer och huruvida tillsats av näringsämnen kväve och fosfor kan gynna nedbrytningen i dammarna.

1.1 Syfte

Syftet med studien är att försöka klargöra vilken reningseffekt dammarna kan uppnå vid olika temperaturer och TOC-halter, men även se hur reningseffekten påverkas vid tillsatts av näringsämnen. Detta kan bidra till en större förståelse för dagvattenanläggningen, vara betydande för Utredningsvillkor 4 och kan ge en möjlighet till förbättring av dagvattenreningen. Studien kommer rikta in sig på Kättstabäckens dagvattenanläggning, mer specifikt damm 5, som under vintertid tar emot de högsta flödena och mängderna av organiskt material (TOC).

2 Frågeställningar

- Hur effektivt avlägsnas TOC i befintliga dammsystem vid Kättstabäckens dagvattenanläggning i olika temperaturer?
- Hur påverkar tillsats av näringsämnen fosfor och kväve reningseffekten?
- Vilka förbättringar kan göras i befintlig anläggning, för att optimera nedbrytningen av TOC, baserat på de undersökta faktorerna temperatur och näringstillsatts?

3 Avgränsningar

Studien har begränsats till Kättstabäckens dagvattenanläggning (KDA), då det är den som tar emot de högsta TOC-halterna under vintertid. Provvatten togs från damm 5, men den kan även representera övriga dammar på anläggningen. Studiens nedbrytningsförsök undersöker endast hur halter av näringsämnen kväve och fosfor samt temperaturen påverkar nedbrytningshastigheten av TOC. Andra eventuella påverkansfaktorer som syre, pH och övriga mikro och makronäringsämnen som mikroorganismer behöver undersöks inte på grund av studiens tidsbegränsning.

4 Bakgrund

4.1 Av-isning

4.1.1 Isbildning och av-isning på flygplatser

När flygplan utformas baseras designen på effekten av luftflödet på vingar utan is, frost eller snö (Switzenbaum et al. 2001). Om beläggningar bildas kan detta skapa störningar i den aerodynamiska prestandan. Det kan bland annat leda till svårigheter att lyfta på grund av ökat luftmotstånd, därför är det viktigt att flygplanen av-isas under vintertid.

För att göra flygplan resilienta mot isbildning appliceras av-isningsmedel på rena flygplansytor (Switzenbaum et al. 2001). Dessa vätskor består av antingen etylenglykol eller propylenglykol samt förtjockningsmedel. På Arlanda flygplats används propylenglykol (Swedavia uå).

Av-isning sker under kalla årstider, då risk finns att beläggningar av is bildas på flygplanen eller om det redan finns befintlig is på ytorna (Naturvårdsverket 2008). Beroende på flygplats så sker detta antingen där flygplanen står innan start eller vid en särskild ordnad plats för ändamålet. Vätskan, som ska sänka fryspunkten, sprutas på flygplanen med hjälp av en av-isningsbil. Av-isningsmedlen delas upp i olika typer (1-4). Användningsområdet för typ 1 är borttagande av snö och is, typ 2-4 hindrar istället återfrysning under ett längre tidsspann.

Även landningsbanor och taxibanor halkbekämpas för att säkerställa god friktion mellan bland annat däck och landningsbana (Naturvårdsverket 2008). Det finns både flytande och fasta halkbekämpningsmedel och på Arlanda används främst kaliumformiat, vilket är ett fast medel (Swedavia uå). Förbrukningen av både av-isnings och halkbekämpningsmedel styrs av vädret vintertid (Naturvårdsverket 2008).

4.1.2 Av-isning och halkbekämpning på Arlanda flygplats

Avisning på Arlanda flygplats sker på speciella platser (Swedavia 2021). Medel som används är då monopropylenglykol av typ 1 och typ 2, och mängden medel som används varierar. Propylenglykolet leds till ett separat lagringssystem på flygplatsen, det uppskattas dock att ungefär 1-10 procent av glykolet inte samlas upp och därmed hamnar i dagvattenssystemet (Forsberg 2012). Droppar av medlet kan också falla från flygplanet vid start.

4.1.3 Av-isningsmedels påverkan på recipient och nedbrytbarhet i låga temperaturer

Ett miljöproblem som förknippas med glykolbaserade av-isningsmedel är ökad BOD-halt i recipient (Fay & Shi 2012). De typer av glykol som används på flygplatser är propylenglykol och etylenglykol, och risken med att använda dessa medel är att de ökar BOD hos mottagande vatten. Propylenglykol har störst påverkan på BOD-halten (Fay & Shi 2012, Yakovlieva et al. 2022, Corsi, Mericas & Bowman 2012). BOD5-halten för propylenglykol

typ 1 och etyleglykol typ 1 är 961,000 mg/l respektive 439,000 mg/l (Corsi, Mericas & Bowman 2012). Därutöver kan etylenglykol vara mycket giftigt för däggdjur och människor om medlet konsumeras. (Fay & Shi 2012). Propylenglykol är i sin tur giftfri.

Kaliumformiat har låg giftighet och bryts lätt ner i miljön (Bergensstierna & Josefsson 2009). När mikroorganismerna bryter ner medlet förbrukas syre. Stora, icke omhändertagna, mängder av halkbekämpningsmedlet kan därför leda till låga syrenivåer i recipienten. Den initiala halten av BOD är dock lägre för kaliumformiat än för propylenglykol (Fay & Shi 2012).

Det har gjorts studier på huruvida nedbrytning av av-isningsmedel och halkbekämpningsmedel förekommer eller inte i kallare klimat. En studie genomförd på Oslos flygplats där man undersökte propylenförorenad jord visade på att under aeroba förhållanden, utan tillsatts av näringsämnen (kväve och fosfor), växte biomassan minimalt eller inte alls (Toscano et al. 2014). Men vid tillsatts av näringsämnen påvisades goda resultat då biomassan ökade och propylenglykolen bröts ner även i så låg temperatur som 4°C (Toscano et al. 2014).

En studie gjord av Revitt & Worrall 2003 studerade bionedbrytbarheten hos olika typer av-isningsmedel på flygplansytor i temperaturerna 1°C, 4°C och 8°C. Resultatet visade att det finns en potential för en betydande biologisk nedbrytning även när medlen endast ytlagras. Nedbrytning skedde även i den kallaste temperaturen på 1°C (Revitt & Worrall 2003).

En studie i Finland testade nedbrytningshastigheten av formiat i jord under låga temperaturer (Hellstén et al. 2005). Resultatet visade att det skedde både aerobisk och anaerobisk nedbrytning även vid mycket låg temperatur (-2°C) och att mikroorganismerna återhämtade sig snabbt även efter en kortare nedfrysningsperiod. Resultatet visade också att den biologiska aktiviteten ökade snabbt när temperaturen gick från minusgrader till plusgrader. I studien skedde den snabbaste nedbrytningen i det test där näringsämneskoncentrationen var högre än andra test.

4.2 Rekommenderade reningsmetoder av av-isning och halkbekämpningsmedel på flygplatser - global översikt

Att hantera dagvatten på flygplatser i kalla klimat är ett kostnadskrävande problem då vattnet är påverkat av av-isningsmedel och halkbekämpningsmedel (Shi et al. 2017). I bland annat USA finns det en stor variation rekommenderade lösningar för att hantera problemet, antingen behandlas vattnet på plats eller så hanteras vatten på externa anläggningar.

De rekommenderade metoderna för att hantera dagvatten påverkat av av-isningsmedel och halkbekämpningsmedel listas nedan (National Academies of Sciences 2013, Shi et al. 2017):

- Aktiverad slamprocess, luftade grusbäddar och luftade laguner - sker under aeroba förhållanden och fungerar som biologiska reningsmetoder vid flygplatsen
- Anaeroba fluidiserade bäddar - sker under anaeroba förhållanden och fungerar som biologisk reningsmetod på flygplatsen
- Biofilmreaktorer med rörlig bädd, passiva fakultativa behandlingssystem - en luftad respektive aerob metod som fungerar som reningsmetod på flygplatsen
- Avdunstning: destillation, mekanisk ångkompression. Membranfiltrering: Omvänd Osmos - fysiska reningsmetoder på flygplatsen
- Reningsanläggningar för avloppsvatten - Biologiska reningsmetoder på externa anläggningar
- Privata återvinningsanläggningar - Fysiska reningsmetoder på externa anläggningar.

Det finns även ytterligare reningssystem, som kan lämpa sig väl för vatten som kontaminerats med av-isning- och halkbekämpningsmedel med höga halter av COD och BOD5 (Shi et al. 2017). Dessa är exempelvis aeroba retentionsdammar (används av Swedavia), laguner, fluidiserade bäddar med biologiska reaktorer samt våtmarker. Systemen är dock inte lika vanliga och förekommer endast på några flygplatser i världen (Rodziewicz et al. 2020).

Det förekommer också en del forskning på området. I en studie har en ny typ av konstruerad våtmark testats på Buffalo Niagara International Airport i New York, där kunde en rening av föroreningar i flygplatsens dagvatten på över 95% för exempelvis BOD5 åstadkommas (Higgins & Maclean 2002). En annan studie som också testade en liknande reningsbehandling, en konstruerad artificiellt luftad våtmark, visade en procentuell nedbrytning av TOC mellan 51-92% (Freeman et al. 2018) när tekniken testades med olika luftningsinställningar. Utan någon inställd luftning bröts även 46% av den initiala TOC-halten ner. Problem som dock kan uppkomma med dessa system är delvis att kall temperatur kan hämma biologiska processer och att öppna vattenspeglar kan attrahera fåglar (Rodziewicz et al. 2020). Fåglar utgör ett stort problem när det gäller flygsäkerheten (Fox et al. 2013).

Ännu en biologisk reningsmetod för att ta hand om av-isningsmedel och halkbekämpningsmedel är biofilter. I en studie testades ett så kallat passivt jordbaserat filter för att behandla kontaminerat vatten på flygplatser (Pressl et al. 2019). Orsaken var att forskarna ville rena vattnet från både urea och kaliumacetat. Det jordbaserade filtret bestod av zeolit och perlit och fungerade som komplettering till den ursprungliga jorden på platsen. Vid temperaturer mellan 3°C och 5°C uppnåddes en reduktion på 76-98% för initialkoncentrationer mellan intervallet 18 mg/l till 870 mg/l.

En annan typ av biofilter som testats i Norge är ett filter bestående av filtermedia gjord av aktivt kol och krossad lera (Raspati et al. 2018). Filtret testades för reduktion av propylenglykol och kaliumformiat, samt med och utan näringstillägg av kväve och fosfor. Resultatet visade att för en C:N:P-kvot på 24:7:1 kunde 50-60% av DOC-halten reduceras.

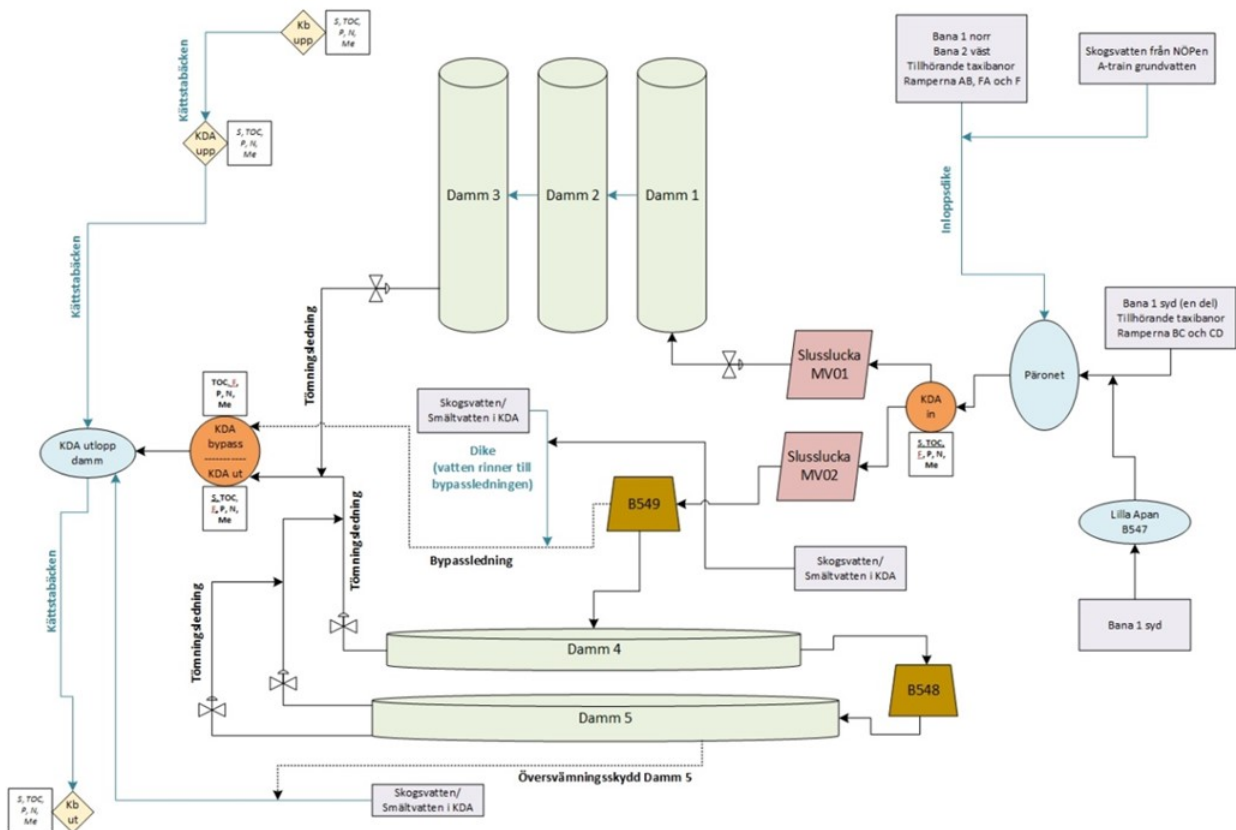
Det visade sig också att tillsats av näringsämnen var viktigt för reningskapaciteten.

Ännu en typ av biofilter som har studerats är ett gjort av flygaska från termisk behandling av avloppsslam (FASST LWA) (Rodziewicz et al. 2020). Detta är en metod som enligt studiens författare kan vara bättre ur ett ekonomiskt och ekologiskt perspektiv då den använder biprodukter. Filtret testades på vatten som hade låga temperaturer på 0, 4 och 8 °C och med olika hydraulisk belastning, tester gjordes även vid 25°C. Resultatet visade att avlägsnandet av organiskt material för de olika materialen ökade med ökad temperatur. Vid lägre hydraulisk belastning var det procentuella avlägsnandet av COD mellan 52-61% mellan temperaturerna 0°C and 25°C och vid högre hydraulisk belastning kunde 66-82% reduceras.

4.3 Kättstabäckens dagvattenhantering

4.3.1 Anläggningen

Det finns flera dagvattenanläggningar på Arlanda flygplats, men i denna studie har vattenprover tagit från Kättstabäckens anläggning. I figur 1 går det att se hur den konceptuella bilden av anläggningen ser ut (Li 2022). Kättstabäckens anläggning består av en inlopps-damm, fem dagvattendammar och en utloppsdamm. Volymen för damm 1-3 är totalt 100 000 m^3 , volymen för damm 4 är 20 000 m^3 och lagringsdamm 5 har volymen 43 000 m^3 (Li 2022).



Figur 1: Konceptuell modell över Kättstabäckens anläggning. Bild från (Swedavia 2022). Dagvattnet som tas emot i Kättstabäcken är från hela bana 1, västra delen av bana 2 samt tillhörande taxibanor och ramper. Päronet, dammen som är lokaliserad till höger i figuren, omhändertar dagvatten som rinner genom inloppsdiken (blå pilar) från norra och södra delen av bana 1, västra delen av bana 2, från taxibanor samt ramperna AB, FA och F, BC, CD (Swedavia 2022). Nödvärningsplatsens (markerad som NÖP) dagvatten rinner från intilliggande skog till inloppsdiket, medan grundvatten med PFOS i första hand pumpas till en annan damm som inte finns med i illustrationen, och sedan till inloppsdiket. När det regnar på södra delen av bana 1 kommer dagvattnet främst ledas till Lilla apan, vilket är ett utjämningsmagasin, innan det når Päronet. Vid KDA in, mätstationen vid inloppet, mäts flöde, syrehalter och TOC på dagvattnet som tagit sig till anläggningen. Förkortningarna MV01 och MV02 representerar de två slussluckor som leder vattnet vidare, och B549 samt B548 är pumpar. Lucka MV02 används vid låga inkommande halter TOC. Då leds vattnet till B549 och sedan vidare till en bypassledning, där flödet mäts kontinuerligt. Vattnet hamnar sedan i KDA:s utloppsdamm. När det i stället är höga halter av TOC i vattnet så kan antingen slusslucka MV01 och/eller slusslucka MV02 pumpa vattnet med hjälp B549 och/eller B548 till damm 1-3 respektive damm 4-5. När dammarna behöver tömmas sker det via de ventiler som är lokaliserade efter damm 3, damm 4 och damm 5. Flödesmätningar görs också vid KDA ut innan det hamnar i utloppsdammen

4.3.2 Dammarnas funktion och uppföljning

Vid höga halter av TOC behandlas vattnet i dammarna på anläggningen (Li 2023). Vattnet styrs då via två slussluckor, sedan via pumpstationer. Vart det styrs beror på om det finns plats i dammarna, hur TOC halter för inkommande vatten ser ut och vad TOC halterna är i dammarna. Principen är att vattnet med hög/högsta TOC halten ska lagras, det vill säga att om inkommande vatten har högre halter än vattnet i dammarna och det inte finns något utrymme i dammarna, ska dammen som har lägsta TOC halten tömmas kontrollerat till en viss grad. Detta för att skapa utrymme i dammen och lagra det tillförda vattnet med höga TOC halter.

Även vädret kontrolleras för att kunna göra en bedömning om nederbördsmängd och förväntade halter av TOC, för att sedan besluta om dammar som ska tömmas kontrollerat på förhand för att skapa utrymme. Anläggningen driftas alltså i enlighet med väder och de förutsättningar som är kända på Arlanda. Luftare finns även tillgängligt till dammarna för att säkerställa att vattnet inte blir syrefattigt. Vattnet får sedan lagras i dammarna och biologisk nedbrytning får pågå tills dammen töms. TOC-halten i dammarna mäts kontinuerligt via en onlinemätning som görs av en LAR-maskin vid KDA ett par gånger i timmen. Veckovis sker även analyser av SGS, där TOC-, tot-P och tot-N-halt undersöks (Li 2023).

5 Teori

När biologisk nedbrytning äger rum innebär det att organiska substrat bryts ner till mindre föreningar, vilket görs av mikroorganismer (Chamy 2013). Dessa mikroorganismer är svampar och bakterier. I denna studie är det sötvatten, dammar, som är i fokus, vilket gör att bakterier är de mikroorganismer som berörs.

5.1 Mikroorganismers metabolism och tillväxt

Något unikt med mikroorganismer är att de har en stor variation i metabolism jämfört med växter och djur (K. Carlsson et al. 2020). Vissa mikroorganismer kan variera sin metabolism och vissa använder enbart en metabol process. De funktionellt variabla mikroorganismerna, som har variabel metabolsim, kallas fakultativa, medan de som är begränsade till en typ av metabolism kallas obligata. Mikroorganismernas metabolism har dessutom två indelningar, katabolism och anabolism. Då detta examensarbete berör nedbrytning, är katabolism den metaboliska väg som berörs.

Under nedbrytning använder mikroorganismer kopplade redoxreaktioner för att tillgodose sig energi i form av ATP. När det finns externa elektronacceptorer, vilket i detta fall är syre då dammarna är aeroba, är det fördelaktigt eftersom mikroorganismerna kan oxidera ett överskott av NADH, som i sin tur genererar ATP. Då kan de dra nytta av flera av de ämnen som bildas vid nedbrytningen, samtidigt som födoämnenas energiinnehåll kan nyttjas bättre. Via den här processen formas även reduktionskraft, där redoxbärare förser mikroorganismen med väten och elektroner som är behövs för uppbyggnad (K. Carlsson et al. 2020).

5.1.1 Upptag av makronäringsämnen

Majoriteten av bakterier kan endast ta upp lösta näringsämnen (K. Carlsson et al. 2020). Det finns ett flertal upptagssystem hos bakterierna som drivs genom energi. Makronäringsämnen är väsentliga för cellens tillväxt, varav kol, kväve, fosfor och svavel krävs i större mängder. Av dessa makronäringsämnen har både kväve och fosfor en tillväxtbegränsande funktion i akvatiska miljöer (Larm & Pirard 2010). Andra viktiga ämnen är syre och väte, men jämfört med de andra makronäringsämnena är dessa två vanligtvis lättare för cellerna att tillgodose sig i olika typer av miljöer (K. Carlsson et al. 2020).

Kol

Alla levande organismer är uppbyggda av kolföreningar (B. Carlsson & Hallin 2003). Kol är en av de viktigaste elementen för mikrobiell tillväxt (Duncan 2003). Beroende på bakterietyp kan bakterier antingen samla kol från koldioxiden i luften, medan andra använder sig av organiska kolföreningar i omgivningen (K. Carlsson et al. 2020). Inom biologisk rening använder sig mikroorganismerna av organiska föreningar som kolkälla och för energiutvinning, vilket leder till nedbrytning (Chamy 2013).

Kväve

Förutom kol finns det fler byggstenar, kväve är en av dem (Rose 1976). Det är väsentligt att kvävet finns som en tillgänglig källa för mikroorganismer då det har en central roll för bland annat syntetisering av aminosyror och proteiner (K. Carlsson et al. 2020, Duncan 2003). Kväveatomen förekommer i naturliga föreningar, som exempelvis nitrat och ammonium (Rose 1976).

Fosfor

Utöver kol och kväve är fosfor ett viktigt makronäringsämne för mikroorganismernas tillväxt (Rose 1976). Organismerna innehåller fosfor av den kemiska formen fosfat, som spelar roll för cellulära beståndsdelar som exempelvis DNA och ATP. Fosfor är därför nödvändig för mikroorganismens metabolism (Rose 1976) och vanligtvis tillhandahålls makronäringsämnet genom oorganiskt fosfat i löslig form (K. Carlsson et al. 2020). Bakterier kan därutöver frisätta syror som bryter loss fosfat ur mineral.

Svavel

I miljön finns det ofta gedigna mängder oorganiskt sulfat, som mikroorganismerna kan tillgodogöra sig (K. Carlsson et al. 2020). En del organismer kan sedan reducera svavlet till sulfid, medan många vanligt förekommande bakterier inte har kapacitet att göra det. Bakterierna förlitar sig i stället på att det finns reducerat svavel i organiska föreningar i miljön, något som kan bli ett problem vid bakterieodling.

5.1.2 Upptag av mikronäringsämnen

Mikronäringsämnen brukar finnas i fullgoda mängder i bakteriernas livsmiljö, dock kan bland annat järn vara en tillväxtbegränsande faktor om miljön är aerob (K. Carlsson et al. 2020). Järnet bildar svårslösliga oxider och hydroxider, vilket kan vara svårt för bakterierna att ta upp. Många organismer har därför utvecklat förmåga att producera föreningar som binder till metalljoner. Det är en funktion som ger bakterierna möjlighet att tillgodose sig mikronäringsämnet även när det bara förekommer i små mängder i miljön.

5.2 Miljöfaktors påverkan på mikroorganismers metabolism

Det finns flera olika miljöfaktorer som spelar roll för mikrobiell tillväxt.

5.2.1 Syre

Mikroorganismer har en förmåga att växa både i syrerika och syrefattiga miljöer, vilket beror på att de har anpassat olika strategier för andning (Bitton 2011, Gupta 2021). Mikroorganismerna kallas för strikta aerober och fakultativa anaerober. De strikta aroberna växer i syrerika miljöer (Bitton 2011), och de använder syre som elektronacceptor i respirationen (Duncan 2003). Syre är därför väsentligt för metabolismen och därmed tillväxten.

5.2.2 Temperatur

Temperatur är en av de viktigaste faktorerna för mikroorganismernas tillväxt och överlevnad (Bitton 2011). Tillväxten kan ske inom ett stort temperaturintervall, både i över 100°C och under 0°C. Vilken temperatur organismerna behöver varierar beroende på vilken sorts organism det är, och är betydande för cellulära processer och tillväxt (Rose 1976). De organismer som behöver varmare temperatur kan få det både genom miljön men också när värme genereras under metabolismen.

Allmänt ökar hastigheten för biokemiska reaktioner vid ökad temperatur (Rose 1976). Processen kan beskrivas som en ekvation i termer av temperaturkoefficienten Q_{10} .

$$Q_{10} = \frac{k_{t+10}}{k_t} \quad (1)$$

I ekvationen står k för hastighetskonstanten och t är temperaturen. Denna koefficient brukar minska när temperaturen höjs.

Mikroorganismerna har traditionellt delats in i grupper baserat på optimal- och minimumtemperatur för tillväxt (K. Carlsson et al. 2020, Rose 1976). En av mikroorganismgrupperna kallas psykofiler och deras metabolism fungerar i temperaturer mellan -5°C till 15°C (K. Carlsson et al. 2020), de har förmågan att växa relativt snabbt vid 0 till 5°C (Rose 1976).

Mesofiler, en annan typ av grupp, trivs däremot när temperaturen ligger mellan ca 10°C och 45°C. Det finns också termofila och hypertermofila mikroorganismer, dessa har en minimum- och optimaltemperatur vid ca 40°C till 70°C respektive cirka 65°C till 90°C (K. Carlsson et al. 2020).

5.2.3 pH

Mikroorganismers tillväxt sker inom ett brett pH-område, däremot ligger det optimala pH-värdet mellan 4-9 (Gupta 2021). När vatten renas biologiskt så är vanligtvis pH-värdet vid en neutral nivå, cirka 7 (Bitton 2011). Det finns dock en sorts organismer, kallade extremofiler, som kan växa vid både lägre och högre pH-värden än det optimala pH-området (Gupta 2021). För bakteriearter ligger det optimala pH-värdet mellan 3 och 8 (Gupta 2021), men alla organismer behöver ha ett neutralt pH inne i cellen (K. Carlsson et al. 2020).

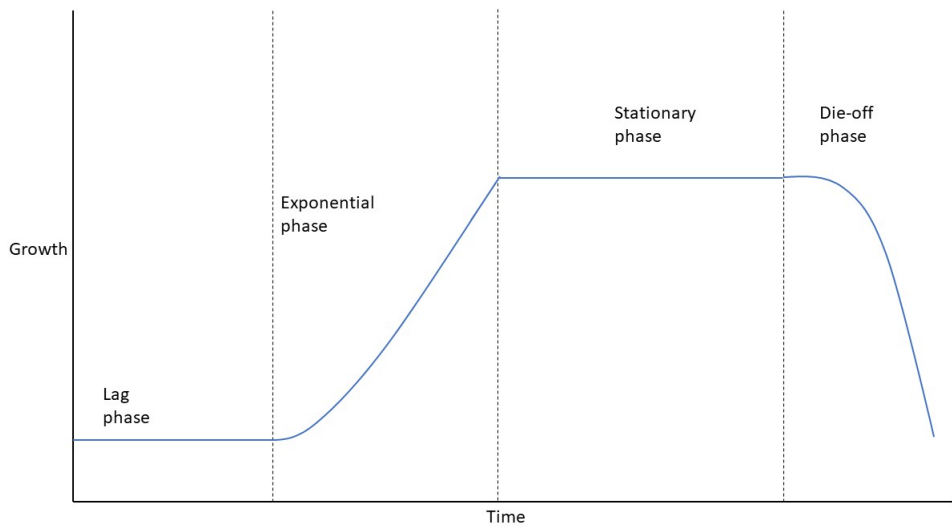
En förändring i vätejonkoncentration i miljön kan orsaka störningar i de cellulära processer som påverkar den mikrobiella tillväxten (Gupta 2021). Det påverkar även i vilken utsträckning jonisering av näringsämnen sker, vilket kan leda till näringsbristförhållanden. I sötvatten påverkar nedbrytning till koldioxid pH-halten via karbonatsystemet (Bertilsson 2023). I syrefria förhållanden påverkas även pH-halten vid utsöndrande av organiska syror. Det är även så att vissa mikroorganismer kan öka pH-värdet i dess omgivning, exempelvis denitrifierare och alger (Bitton 2011).

5.2.4 Förhållandet mellan näringsämnen spelar roll - Redfields förhållande

Mängden kväve och fosfor som finns i våra hav spelar roll för nedbrytningen av organiskt material (Nagata 2008). Dessa näringsämnens stökiometriska förhållande i marin biomassa och växtplankton kan beskrivas med en approximation som kallas för Redfields förhållande, där molförhållandet mellan kol, kväve och fosfor är 106:16:1. Detta förhållande används när man beskriver den begränsande näringsämnet i akvatiska ekosystem (Håkanson, Bryhn & Hytteborn 2007). Kvävefixering och denitrifiering stabiliserar detta förhållande (Bertilsson 2023). Kommer det in mer fosfor triggar detta kvävefixering vilket bevarar förhållandet 16:1. Om det blir brist på fosfor används kvävet till andra processer och förloras via exempelvis denitrifikation .

5.2.5 Bakteriella tillväxtkurvan

I en experimentsituation finns det en generell bild över hur bakteriers tillväxtkurva ser ut. När bakterier placeras i ett flytande medium, med tillväxtmedie, påbörjar bakterierna processer som utnyttjar näringsämnena, vilket gör att de växer (Gupta 2021). När detta sker i ett slutet system, och bakterierna inte får tillgång till ny media eller ingen media tas bort, kommer de genomgå olika faser. I allmänhet sker detta i fyra steg, se figur 2.



Figur 2: Förenklad illustration av tillväxtkurvan med lag phase, exponential phase, stationary phase och die-off phase.

Lag phase: Kännetecknas som perioden då ingen ökning sker hos antalet bakterier, de samlar då på sig bland annat de näringsämnen som behövs för tillväxt (Gupta 2021). Bakterierna förbereder sig för att bli livskraftiga (Gupta 2021) och ackumulerar de cellulära delar som behövs innan metabolismen börjar (Gotō 1992).

Exponential phase: Vid denna fas ökar bakteriernas tillväxt maximalt (Gupta 2021) och generationstiden är konstant (Gotō 1992). Ökningen av celler sker exponentiellt. Hur stor ökningen blir styrs av de förhållanden som bakterierna befinner sig i, om miljön på något sätt förändras under denna fas kan tillväxthastigheten påverkas (Gupta 2021).

Stationary phase: I den här fasen är tillväxthastigheten och hur snabbt bakterierna dör likvärdig, vilket resulterar i att mängden bakterier stannar av (Gupta 2021). Detta kan orsakas av att en ogynnsam miljö utvecklats, exempelvis om det inte finns syre, näringsämnesnivåerna har tömts, pH:t har förändrats (Gotō 1992, Gupta 2021) eller att ackumulering av giftigt avfall har skett (Gupta 2021). När bakterier odlas och är i stationärfas har de dock en förmåga att anpassa sig till den miljö de befinner sig i. De kan fysiologiskt anpassa sig till bland annat näringsbrist och stress (K. Carlsson et al. 2020).

Die off phase: Denna fas kännetecknas av en nedåtgående kurva av antalet celler. Varför det sker beror oftast på liknande orsak som i föregående fas, som exempelvis ansamling av giftigt avfall (Gupta 2021). Det kan också bero på förlust av näringsämnen och energi. Hur länge en population av bakterier kan överleva sådana förhållanden varierar beroende på typ av bakterie.

5.2.6 Konkurrens om bristfälliga resurser

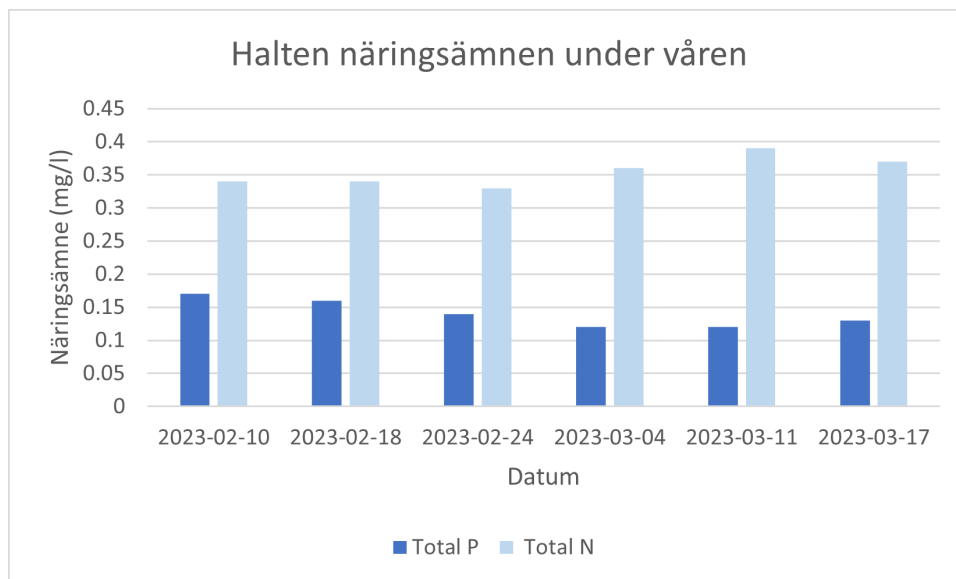
Experimentsammanhang och naturlig miljö är två skilda saker när det kommer till bakteriers beteende, efter som de i naturen behöver konkurrera om bristfälliga resurser (K. Carlsson et al. 2020). Mångfalden av organismer med olika typer av metabolism och de olika typer av miljöer som finns gör att verkligheten inte går att generalisera på det sätt som görs i föregående sektion om den bakteriella tillväxtkurvan.

5.2.7 Tillväxtytor

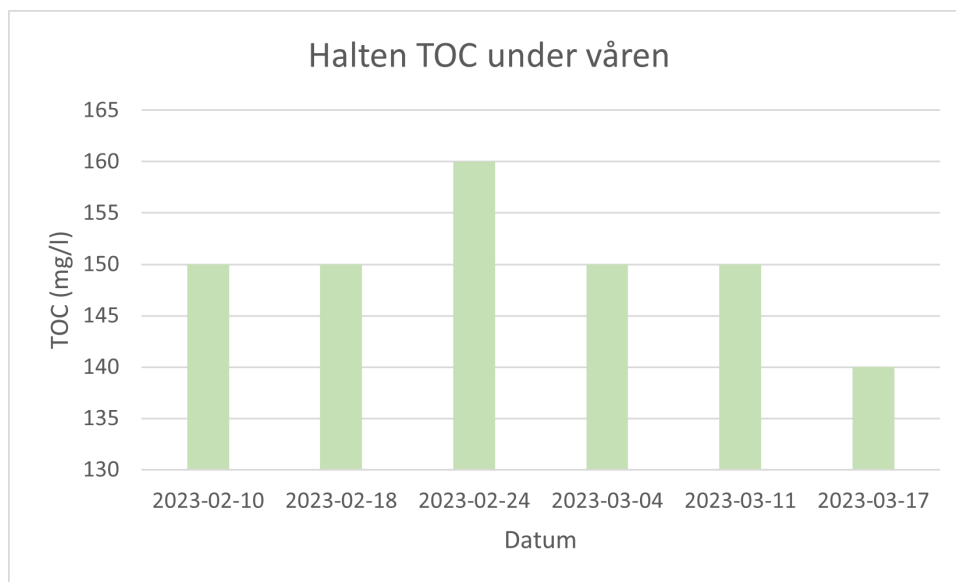
Det förefaller sig naturligt att bakterier binder sig till varandra eller ytor i naturlig miljö. Ytorna kallas generellt för biofilm och består av små kolonier av bakterier. Dessa skapas med hjälp av att de bakterier som rör sig fritt fäster sig någonstans och bildar mikrokolonier. Resultatet blir ett slemlager och via detta binder sig bakterierna till varandra och ytan (K. Carlsson et al. 2020).

6 TOC-, kväve- och fosforhalter under våren - nulägesanalys av Kättstabäcken

Under våren har flera mätningar kontinuerligt gjorts av SGS Analytics i damm 5 på Arlanda, som får beskriva nuläget på anläggningen. Hur reningskapaciteten sett ut i dammarna under våren är det dock svårt att säga något om, eftersom vatten kontinuerligt fyllts på eller tömts. Mätningar av kvävehalter, fosforhalter (figur 3) och TOC-halter (figur 4) i damm 5 har dock genomförts.



Figur 3: Analyser över halten totalfosfor och totalkväve i damm 5 under våren.



Figur 4: Analyser över halten TOC i damm 5 under våren.

Fler mätningar har gjorts under våren men några av dem har inte tagits med i tabellerna då mätparametrar saknas av okänd anledning. TOC-halten har generellt legat mellan 140-160 mg/l, så några högre toppar av TOC observerades inte under perioden. Temperaturen har legat mellan 0.75-2.1°C.

Genom att studera kvoten mellan TOC, kväve och fosfor med Redfieldförhållandet jag dra slutsatsen att mängden näringsämnen är låg, se tabell 1 nedan.

Tabell 1: Jämförelse mellan kvoten av TOC, kväve och fosfor för de uppmätta värdena i damm 5 och Redfieldförhållandet

Datum	TOC:N:P	Jämförelse Redfield
2023-02-10	106:0.24:0.12	106:16:1.0
2023-02-18	106:0.24:0.11	106:16:1.0
2023-02-24	106:0.22:0.09	106:16:1.0
2023-03-04	106:0.25:0.08	106:16:1.0
2023-03-11	106:0.28:0.08	106:16:1.0
2023-03-17	106:0.28:0.10	106:16:1.0

Viktigt att notera är att det inte är klargjort om de uppmätta näringsämnena är biotillgängliga eller inte.

7 Metod

I den här sektionen beskrivs undersökningens metodik inklusive, litteraturgenomgång, provtagning, analys av TOC, fosfor, och kväve samt statistiska metoder för analys av resultat.

7.1 Litteraturgenomgång

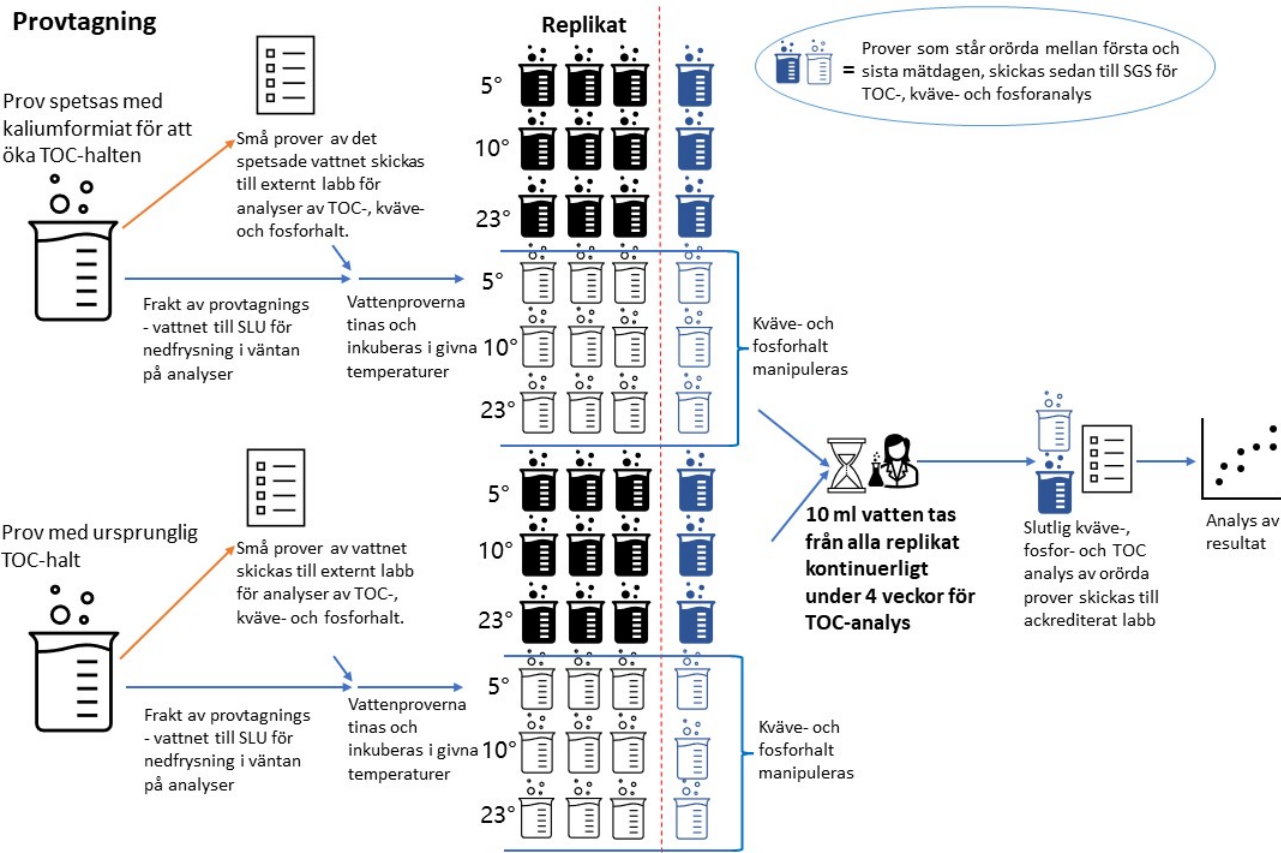
Litteraturgenomgången genomfördes för att kunna ta reda på mekanismerna bakom nedbrytningen och för att hitta vilka reningsmetoder som används på flygplatser i kalla klimat på global skala. Databaser/sökmotorer som användes för att hitta relevanta källor var Scopus och Google Scholar och Uppsala universitetsbibliotek. Exempel på sökord som användes var:

- Biological degradation
- Av-isning på flygplatser
- Stormwater management airports
- Degradation of deicing agents
- Microbiology
- TOC-removal at airports
- Environmental factors limiting biodegradation

Från sökningarna valdes studier ut beroende på relevansen och information hämtades för att kunna skriva i bakgrunden. Utifrån sökningarna valdes olika studier ut och därefter togs relevant information fram för att kunna skriva bakgrunden och teorin.

7.2 Nedbrytningsförsök

Nedbrytningsförsökets övergripande upplägg beskrivs i figur 5.



Figur 5: Illustration över tillvägagångsprocessen för nedbrytningsförsöket. De blå och orangea pilarna beskriver vattenprovernas flöde från och med när provtagning gjordes, vidare till inkubering och slutligen till analys av TOC. De vita bägarna omslutna av blå linjer representerar de replikat där kväve och fosforhalten manipulerades till Redfield-förhållandet och de svarta bägarna representerar de icke-manipulerade replikaten. De bägarna som är blå eller har blå detaljer (till höger om den streckade orangea linjen) är prover som var orörda från och med första mättillfället fram till sista

7.3 Provtagning

En första provtagning genomfördes i början av mars och var tänkt att representera en medelhalt av TOC. TOC-halterna i vattnet på KDA beror av väder och framförallt användningsfrekvens samt mängd halkbekämpningsmedel som används. Halterna blev dock inte markant högre än vid tidigare provtagning. Då vattnet från den första provtagningen då hade legat mycket länge i frysen bestämdes det vara bättre att göra en andra provtagning och att då istället ta två vattenprover, samt manipulera TOC-halten på ett av dessa för att sedan påbörja försöket.

Provtagningen genomfördes genom att 2 dunkar fylldes med vatten från damm 5 samt att en av dunkarna manipulerades till förhöjd TOC-halt med hjälp av kaliumformiat

(figur 6). Denna anrikning användes på grund av att det främst är detta medel som hamnar i dagvattnet i KDA. Som nämnt i tidigare kapitel är det bara ca 1-10 procent av propylenglykolen som inte fångas upp i glykolsystemet.



Figur 6: Provtagning vid KDA damm 5, två stycken 2-litersdunkar sänktes ner under ytan på damm 5.

Ännu ett prov togs på samma sätt med en mindre flaska (150 ml). Därefter användes LAR-maskinen (se bild 7) som finns på plats vid KDA för att mäta TOC-koncentrationen på vattnet. Denna analyserar det vatten som är vid inloppsdammen som leds in i dammanläggningen. Genom onlinemätningar uppdateras TOC-halterna några gånger varje timme.



Figur 7: LAR-maskinen som användes för TOC-mätningar.

LAR-maskinen använder högtemperaturförbränning med en temperatur på 1200°C som oxiderar vattnets kol till koldioxid, som sedan mäts med en NDIR detektor för att få ut TOC-halten. Maskinen gör 3 enskilda mätningar och tar sedan ett medelvärde på TOC-halten som i detta fall var 147 mg/l. Det gav en uppfattning om TOC-halten och efter det anrikades vattnet i en av dunkarna. Det anrikade vattnet analyserades sedan i LAR-maskinen för att se hur stor ökning av TOC-halt det blev, vilket blev 1725 mg/l TOC. Vid några fåtal tillfällen så kan mycket höga halter TOC nå dammarna vid av-isning, vilket är orsaken till att en så hög halt användes.

Vattenprover på ca 150 ml från båda dunkarna skickades sedan till analys på SGS Analytics i Linköping för att erhålla den initiala TOC-halten, fosforhalten och kvävehalten i proverna. Dunkarna med vatten forslades till SLU för att frysas i -20 °C under en kortare period innan nedbrytningsförsökets start och det mindre provet, som tidigare nämnt, hölls ofryst på SLU till nedbrytningsförsökets start. Det ofrysta provets flaska hölls öppen och skakades varje dag för att syresättas.

7.4 Nedbrytningsförsök

7.4.1 Förberedelse av inkubationsflaskor

Inför försöket beställdes flaskor (VWR Tissue Culture Falsk) med ventilerade lock för att aerob nedbrytning skulle kunna äga rum i flaskorna. Locken har ett filter som tillåter gasutbyte och minimerar risken för kontaminering av provet från laboratoriemiljön. Innan användning tvättades flaskorna med hjälp av en blandning av 1 M saltsyra (HCl), flaskorna skakades med denna syra och sköljdes därefter minst fem gånger med milliQ-vatten.

7.4.2 Analysresultat och mängd tillsatt kväve och fosfor

Analysresultatet från provtagningen gav svar på vad den exakta TOC, fosfor och kvävehalten låg på, se tabell 2. Detta var av vikt för att ta reda på de doseringsmängder av fosfor och kväve som behövdes för de experimentella inkubationerna.

Tabell 2: Analysresultat för de olika parametrarna från SGS analytics.

Parametrar	Orört prov (mätosäkerhet)	Manipulerat prov (mätosäkerhet)
TOC (mg/l)	76 (± 11)	1900 (± 290)
tot-N (mg/l)	1.1 (± 0.22)	1.1 (± 0.22)
tot-P (mg/l)	0.14 (± 0.014)	13 (± 1.3)
Fosfatfosfor	< 0.01 (± 0.005)	13 (± 1.3)
Ammoniumkväve	< 0.01 (± 0.005)	< 0.01 (± 0.005)
Nitrat + nitritkväve	< 0.01 (± 0.005)	< 0.01 (± 0.005)

Analysmetoderna för respektive parameter var SS-EN ISO 20236:2021 för TOC, SS-EN ISO 20236:2021 för totalkväve (N), ISO 15923-1:2013 B för ammoniumkväve (NH₄-N), SS-EN ISO 15681-2:2018 för totalfosfor (P) och ISO 15923-1:2013 F för fosfatfosfor (PO₄-P).

7.4.3 Val och dosering av kväve och fosfortillsats

Valet av hur mycket kväve och fosfor som skulle tillsättas i hälften av falskorna baserades på den ursprungliga TOC-halten i de två provdunkarna. Eftersträvat förhållande mellan TOC, kväve och fosfor bestämdes till 106:16:1 (mol:mol), baserat på Redfield förhållandet beskrivet i bakgrunden. Kväve och fosfor doserades som ammonium, nitrat och fosfat i de kemiska sammansättningarna dinatriumfosfat (NaH₂PO₄), natriumnitrat (NaNO₃) och ammoniumklorid (NH₄Cl). Vid dosering av kväve bestämdes det att 50 procent av vardera kemiska former av ammonium och nitrat skulle användas.

Inför doseringen fylldes två stycken 2-litersflaskor upp med provvatten från dunkarna, en med vattnet med hög TOC-halt och den andra med den lägre halten TOC. Båda flaskorna tvättades innan på samma sätt inkubationsflaskorna som beskrivs i sektion 7.4.1. Resten av provvattnet behölls i dunkarna.

Doseringen av kväve och fosfor beräknades från den ursprungliga TOC-halten i proverna och 1 M lösningar på 50 ml av dinatriumfosfat, ammoniumklorid och natriumnitrat förbereddes och filtrerades. Därefter tillsattes dessa i flaskorna med provvatten (tabell 3).

Tabell 3: Mängd tillsatt fosfat, nitrat och ammonium till proverna.

Parametrar	Orört prov	Manipulerat prov
NaH ₂ PO ₄ (1 M)	0.11 <i>ml</i>	2.15 <i>ml</i>
50% NaNO ₃ och 50% NH ₄ Cl (1 M)	1.75 <i>ml</i>	47.6 <i>ml</i>

7.4.4 Uppställning av nedbrytningsförsöket

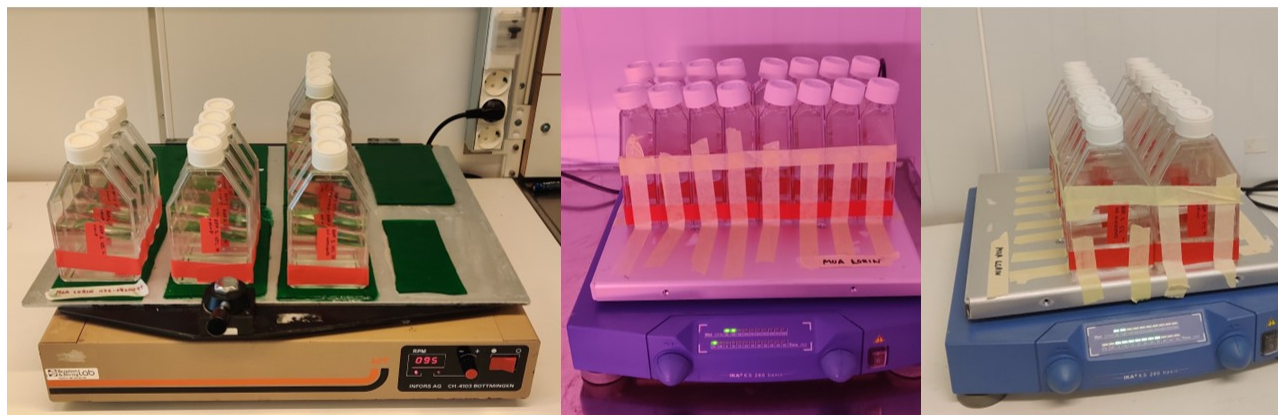
I uppställningen av labbförsöket användes 48 flaskor, 16 stycken per temperatur, se uppställningsillustrationen i 7.2. Av de 16 olika flaskorna var det 4 stycken replikat per kategori:

- Låg initial TOC-halt utan näringstillsats
- Låg initial TOC-halt med näringstillsats
- Hög initial TOC-halt utan näringstillsats
- Hög initial TOC-halt med näringstillsats

För varje temperatur gjordes 4 replikat per kategori, tre av dem innehöll 120 ml vatten från börjar och ett av dem innehöll 130 ml. Det blev då 36 stycken flaskor som hade 120 ml i sig vid start och 12 stycken som hade 130 ml. De 12 flaskorna med 130 ml representerade

de fyra olika kategorierna (fjärde replikaten) av prover i de tre olika temperaturerna. Dessa replikat provtogs bara första dagen och sista dagen på SLU. Sista provtagningsdagen skickades de till SGS Analytics för att mäta TOC, kväve och fosforhalt.

När alla flaskorna var fyllda placerades de enligt kategorierna på tre skakmaskiner som ställdes i vardera temperatur, med 16 stycken flaskor på varje. Skakmaskinerna fick vara igång under hela periodens, se figur 8.



Figur 8: Uppställning av nedbrytningsförsöket, till vänster är flaskorna i 23°C, mitten är flaskorna i 10°C och till vänster är flaskorna i 5°C.

Alla tre skakmaskiner sattes på 100 rpm, då högre rotationshastighet ledde till att vattnet träffade locket vilket hade kunnat påverka möjligheten till gasutbyte genom filtret.

7.5 Provtagning av TOC ur experimentflaskorna

Vid varje provtagning användes falconrör (15 ml) som hade tvättats på samma sätt som inkubationsflaskorna, se sektion 7.4.1. Första och sista provtagningsdagen provtogs alla flaskor. Vid alla provtagningar mellan första och sista dagen provtogs endast vatten från de flaskor som hade 120 ml vatten i sig. Provtagningen pågick under 4 veckor (33 dagar) och 10 ml vatten togs kontinuerligt från replikaten med hjälp av en 10 milliliters-pipett. När provtagning hade gjorts placerades flaskorna i en frys på -20°C i väntan på TOC-analys.

Sista dagen tömdes alla flaskor som startade med 130 ml till nya flaskor (SGS-provtagningsflaskor) och skickades på analys till SGS-analytics.

7.6 TOC-mätningar

7.6.1 Instrumentförberedelse

För TOC-mätningarna som utfördes på labbet på SLU användes en Total Organic Carbon Analyzer (TOC-VCN), se figur 9.



Figur 9: Instrumentet som användes för att mäta TOC-halterna.

Instrumentet förbereddes med påfyllning saltsyra (2M) och milli-Q vatten. Sedan kalibrerades instrumentet med stamlösningar bestående av etylendiamintetraättiksyra (EDTA) och kaliumvätefosfat (KPH), instruktionerna för att förbereda dessa erhöles via ett instruktionsblad på labbet. Kalibreringen utfördes med metoden NPOC (enligt instruktionsbladet) och koncentrationerna som användes av stamlösningarna var 10 mg/l TOC, 20 mg/l TOC och 100 mg/l TOC.

Via metoden NPOC surgörs proverna till ett pH-värde på 2, de bubblas sedan för att avlägsna koldioxiden och det oorganiska kolet. Koldioxiden avlägsnas via spridning med en bärargas, vilket lämnar kvar en lösning av icke-flyktiga organiska kolföreningar. För efterföljande mätning är användning av magnetomrörare viktigt för att proverna ska vara homogena under provtagningen. En del av den kvarvarande lösningen oxideras sedan till koldioxid och TOC detekteras via NDIR. NDIR-sensorn detekterar koldioxid i luft baserat på absorptionen av infrarött (IR) ljus vid en given våglängd.

7.6.2 Förberedelse av prover för analys och körning av instrument

När kalibreringskurvan var gjord tvättades 20 ml-vialer i diskmaskin, för att sedan sköljas 5 gånger med milliQ-vatten. Vialernas magneter lades i saltsyra under minst en natt för att sedan tvättas med milliQ-vatten. Provvialerna förbereddes sedan med en magnet i varje och i varje vial tillsattes 2 µl saltsyra.

Proverna från nedbrytningsförsöket som skulle analyseras i maskinen tinades upp. När prover som hade låg initialhalt av TOC skulle köras späddes de 4 gånger, med 5 ml prov och 15 ml milli-Q vatten som tillsattes i vialen med hjälp av pipett. Proverna med hög initialhalt späddes 40 gånger med 0.5 ml prov och 19.5 ml milli-Q vatten med hjälp av pipett. Spädningen gjordes för att TOC-halterna inte skulle överskrida kalibreringskurvan. Mellan varje prov rengjordes pipettens tipp med milliQ-vatten.

Vid varje analystillfälle förbereddes det även kontrollprover som placerades innan första proverna och efter var 20:e prov. Kontrollproverna användes för att se att inget blivit fel i analyserna. En vial med EDTA och en med milliQ-vatten användes och skulle representera 10 mg/l TOC respektive 0 mg/l TOC. En färdig blandning med EDTA på 10 mg/l TOC erhöles från SLU-labbet och milli-Q vatten fylldes upp i vialerna via en kran på labbet. Hur många kontrollprover som gjordes per analysomgång berodde på hur många nedbrytningsprover som hann bli iordninggjorda under dagen. Om det exempelvis var 60 prover som skulle analyseras behövdes 4 vialer med milliQ-vatten och 4 vialer med EDTA. En milliQ och en EDTA placerades som vial 1 och 2 och efter placerades en milliQ och en EDTA efter var 20:e nedbrytningsprov.

När proverna och kontrollösningarna hade blandats klart placerades de i instrumentet, i den runda plastberedaren som kan ses till vänster av instrumentet (se figur 9). Instrumentet startades sedan och innan det lämnades för att köras under natten kontrollerades de 2 första kontrollproverna för att se att TOC-halten var ca 0 mg/l och 10 mg/l.

Efter färdig provkörning tvättades vialerna och magneterna på samma sätt som i sektion 7.6.2 för att sedan användas i nästa körning. Analyssvaren multiplicerades sedan med spädningfaktor 4 och 40 beroende på om det var låg eller hög starthalt, och noterades i Excel.

7.7 Statistiska analyser mellan provkategorierna

7.7.1 Test för normalfördelning

Innan det beslutades om vilken typ av statistisk jämförelse som skulle göras undersöktes det om värdena erhållna för replikaten i de olika förutsättningarna var normalfördelade. Analyserna utfördes i R. Detta gjordes genom Shapiro Wilks test. Shapiro Wilk-testet är ett hypotestest som kan hjälpa till att avgöra om prover har tagits från en normalfördelning (Baldock 2014). Nollhypotesen är att urvalet tas från en normalfördelning och den alternativa hypotesen är att det inte är det. Den valda signifikansnivån är 5 %. Om p-värdet för testet är över 0.05 betyder det att nollhypotesen inte kan förkastas och det finns därmed inga bevis för att nedbrytningskurvorna inte följer en normalfördelning.

Då jämförelser behövde göras mellan alla olika kategorier av prover och normalfördelningstestet visade på både normal och icke-normalfördelad data beslutades det att användas två typer av statistiska analyser, t-test om två kategorier som skulle analyseras var normalfördelade enligt Shapiro Wilks, och Wilcox test om datan inte var normalfördelad eller om en av två kategorier inte var normalfördelade.

7.7.2 Wilcoxon rangsummetest och t-test

t-test är användbart för att testa hypoteser om medelvärdet för en eller två populationer (i detta fall två dataserier) (Baldock 2014). Denna typ av test är lämpligt om datan är normalfördelad. Vid tillräckligt stora prov (minst 30 värden per kategori), kan detta test användas. Då det endast var 10 datapunkter per kategori beslutades det i fallet där datan inte var normalfördelad att använda Wilcoxons rangsummetest.

Wilcoxons rangsummetest (även kallat Mann-Whitney U-testet), används för att testa hypoteser om ett eller två provmedelvärden. Det är ett icke-parametriskt alternativ till t-testet, och lämpar sig när fördelningen av data är okänd och när det är små urval.

Nollhypotesen i båda fallen är att det finns en statistisk signifikant skillnad mellan kategorierna. p-värdet för båda testmetoderna säger att om $p < 0.05$ (vald signifikansnivå i detta fall), förkastas nollhypotesen och bevisen för att det finns en signifikant skillnad mellan kategorierna är tillräckliga. Om p-värdet > 0.05 betyder det att det inte finns tillräckligt med bevis att kategorierna uppvisar en statistisk signifikant skillnad (Baldock 2014).

7.8 Beräkningar

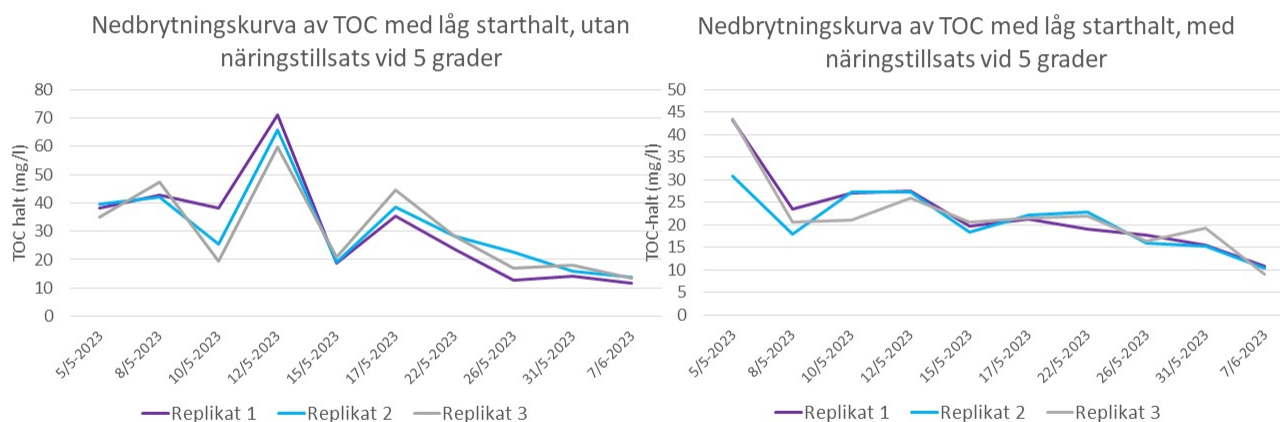
Alla beräkningar för nedbrytningshastighet och procentuell nedbrytning gjordes i Excel. Tabellerna gjordes även i Excel. Boxplotar, regressionsanalys och statistiska analyser gjordes i programmet R.

8 Resultat

I avsnittet nedan presenteras resultatet av nedbrytningsförsöket där det framgår hur mycket TOC som bryts ner under perioden 5/5-2023 till 7/6-2023 i olika förutsättningar. Statistiska analyser för påverkan från de olika förutsättningarna visas. TOC, fosfor och kvävenivåer analyserade på SGS Analytics presenteras. Även provresultat mellan analysvärdena erhållna från SLU och SGS jämförs.

Nedbrytningskurvor för hela tidsserien visas och då flera av kurvorna har mätpunkter med ökad TOC-halt från initialhalten visas även boxplotar med startvärdet och slutvärdet för två olika tidsserier. Boxplotarna visar medianvärdet för samtliga mätpunkter och det färgade området runt visar konfidensintervallet. Konfidensintervallet skattar inom vilket område mätpunkten kommer hamna, med hög sannolikhet. De punkter som har ett större konfidensintervall hade en högre variation mellan replikatens värden.

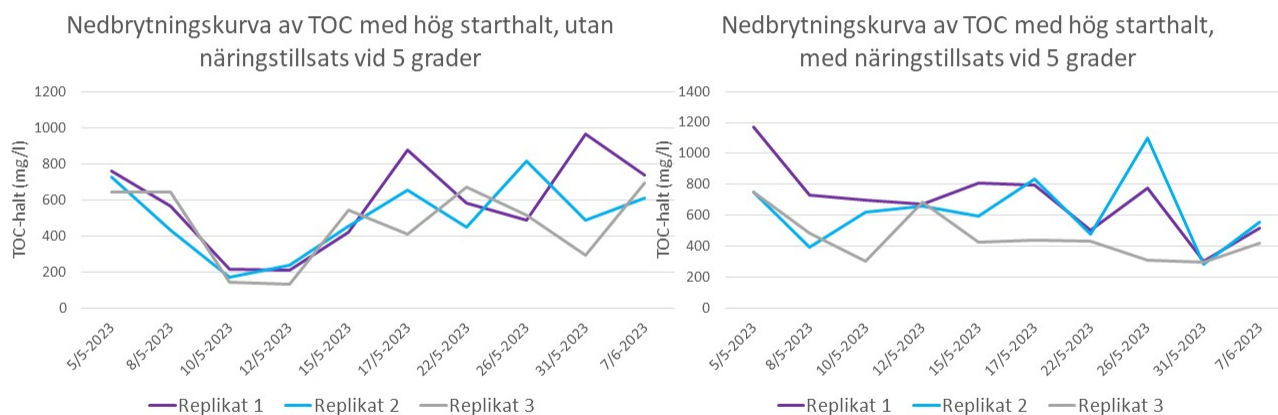
8.0.1 Nedbrytningskurvor vid 5 °C



Figur 10: Vänster: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 5 °C, med låg starthalt av TOC och utan näringstilläts. Höger: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 5 °C, med låg starthalt av TOC och med näringstilläts.

Samtliga nedbrytningskurvor från proverna som inkuberats med låg starthalt av TOC, med och utan näringstilläts som stått i 5 °C under perioden 5/5-7/6 visade på en nedåtgående

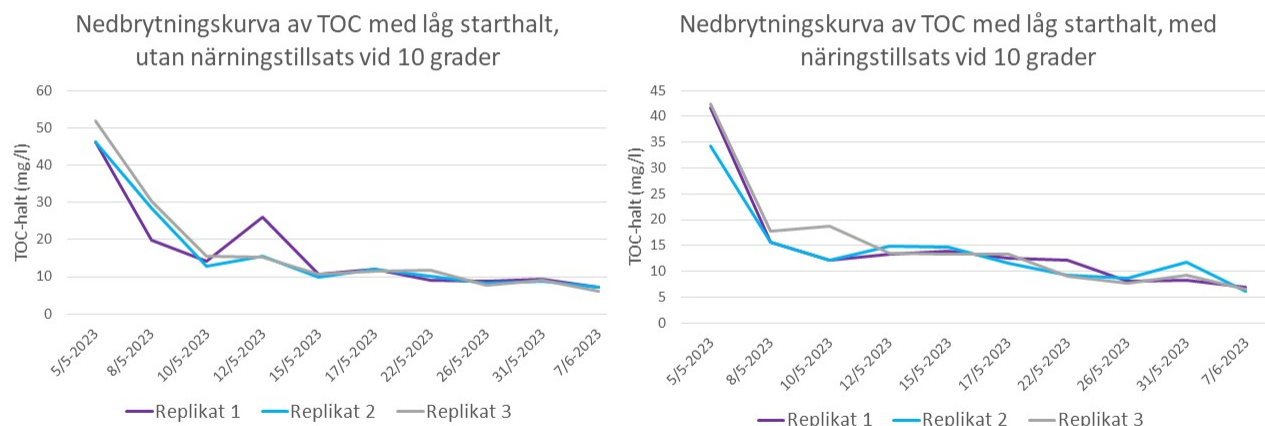
TOC-halt sett till hela mätperioden (se figur 10). Mellan några datum fluktuerar TOC-värdena för alla replikat med nedåtgående halter som sedan ökar för att sedan återigen minska. Jämfört med startvärdet som erhöles via SGS labb på 76 (± 11) mg/l TOC så startade nedbrytningsförsöket med en halt på 38.2 mg/l, 39.5 mg/l samt 35.1 mg/l TOC för replikat 1, 2 respektive 3 utan näring. För replikaten med näring var starthalten 43.2 mg/l, 30.8 mg/l samt 43.5 mg/l.



Figur 11: Vänster: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 5 °C, med hög starthalt av TOC och utan näringstillfats. Höger: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 5 °C, med hög starthalt av TOC och med näringstillfats.

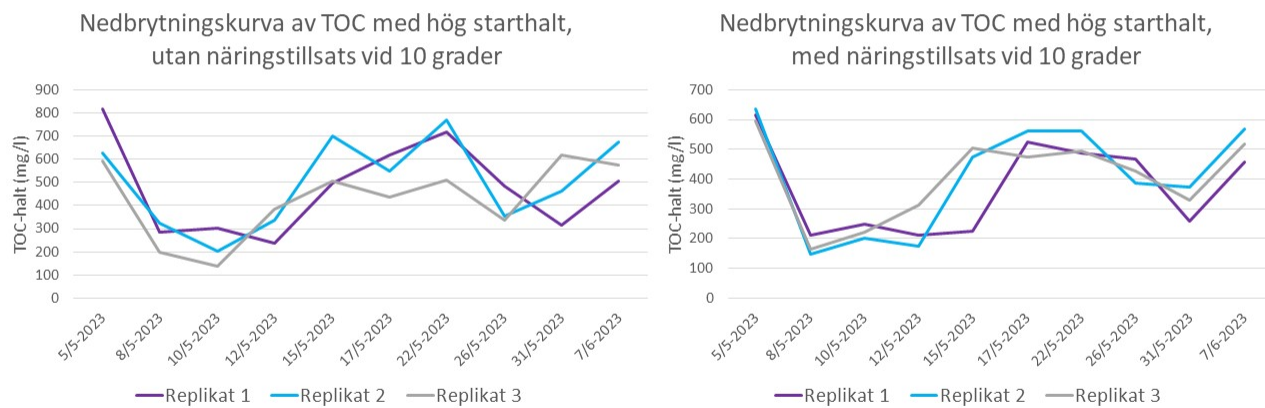
För de replikat som startade med en högre initialhalt av TOC utan näringstillfats i 5 °C minskade TOC-halterna till sin lägsta nivå inom de första två mätilfällena (se figur 11), för att sedan fluktuerar mellan högre värden. Starthalterna i början av experimentet låg på 758, 726 och 644 mg/l TOC för replikat 1, 2 respektive 3. Dessa startvärden skiljer sig från initialvärdet från SGS på 1900 (± 290) mg/l TOC. Flaskorna som innehöll hög initialhalt av TOC samt tillförd näring visade startvärdet 1171 mg/l TOC, 751 mg/l TOC och 752 mg/l för replikat 1 2 respektive 3.

8.0.2 Nedbrytningskurvor vid 10 °C



Figur 12: Vänster: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 10°C, med låg starthalt av TOC och utan näringstillförsats. Höger: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 10°C, med låg starthalt av TOC och med näringstillförsats.

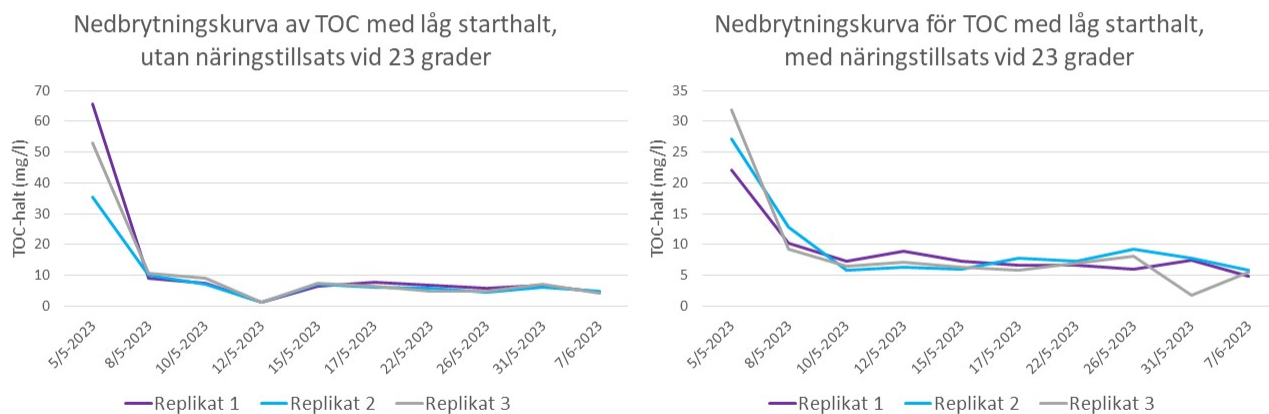
Kurvorna för replikaten vid 10 °C, med låg starthalt av TOC, utan näringstillförsats påvisade en nedåtgående trend för nedbrytningen sett till hela perioden (se figur 12). Starthalten här skiljde sig även här från den starthalten given av SGS på 76 (± 11) mg/l och ligger på 46.1, 46.2 och 51.76 mg/l TOC för replikat 1, 2 respektive 3. Nedbrytningen i replikaten med låg starthalt av TOC, med tillförd näring, vid 10 °C visade en liknande trend som proverna utan näring i samma temperatur. Starthalterna för replikaten låg på 41.6, 34.2 samt 42.4 mg/l TOC för replikat 1, 2 respektive 3.



Figur 13: Vänster: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 10°C, med hög starthalt av TOC och utan näringstillsats. Höger: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 10°C, med hög starthalt av TOC och med näringstillsats.

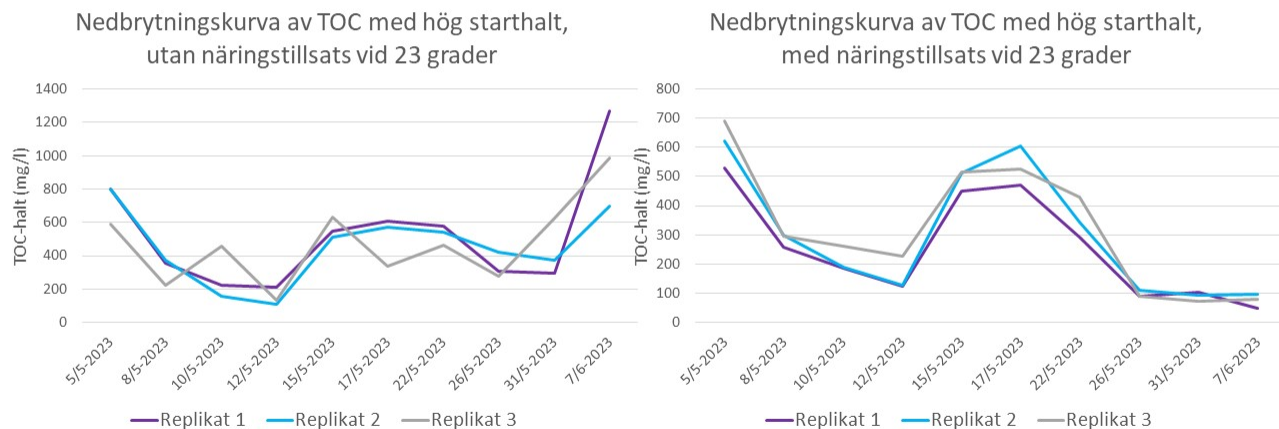
Vid ändrade förutsättningar till högre starthalt av TOC, utan näringstillsats vid 10 °C så låg starthalterna på 815.2, 626.8 samt 590.4 för replikat 1, 2 respektive 3 och skiljer sig därmed även från initialhalten 1900 (± 290) given från SGS, se figur 13. Den lägsta halten TOC uppnåddes tidigt under försöket i alla replikat, för att sedan fluktuera i med högre värden. Även för nästa kurva, med samma förutsättningar förutom att näring har tillförts, så antog kurvorna för replikaten sina lägsta värden i början av försöket. Starthalterna för replikaten var 614.4, 635.6 samt 596 mg/l TOC för replikat 1, 2 respektive 3, vilket visar att även dessa skiljer sig från starthalten given av SGS.

8.0.3 Nedbrytningskurvor vid 23 °C



Figur 14: Vänster: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 23°C, med låg starthalt av TOC och utan näringstillförsats. Höger: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 23°C, med låg starthalt av TOC och med näringstillförsats.

När vattenproverna fick ännu varmare förutsättningar, 23 °C Celsius, så hamnade startvärdena för nedbrytningsförsöket på 65.8, 35.5 och 53.0 mg/l TOC för replikat 1, 2 respektive 3 för de prover som hade låga startvärden av TOC utan näringstillförsats (se figur 14). Den största reduceringen av TOC skedde vid försökets första mättilfällen. I vattenproverna som hade samma förutsättningar, dock med tillförd näring, så startade replikaten på 22.0, 27.1 31.8 mg/l TOC för replikat 1, 2 respektive 3.



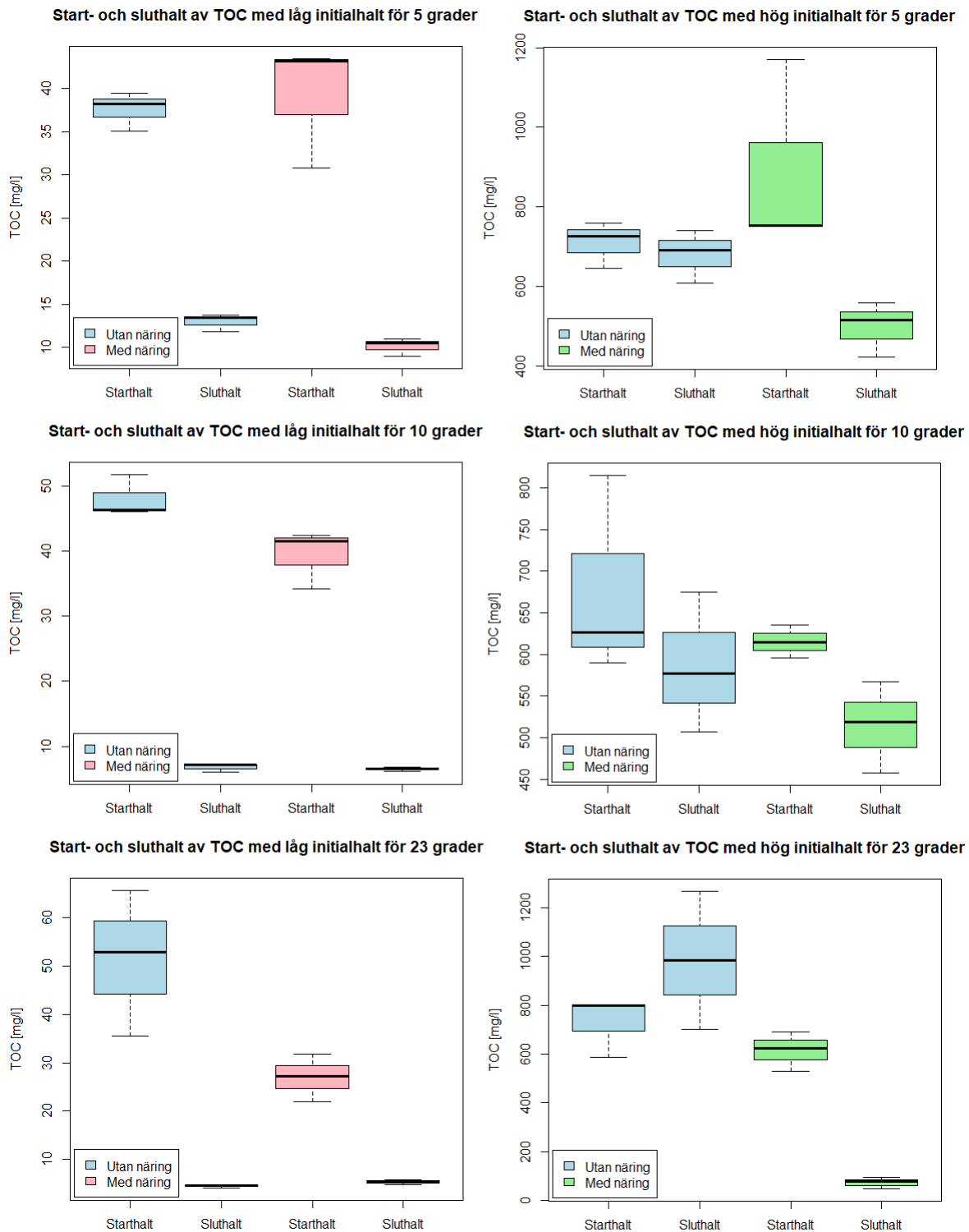
Figur 15: Vänster: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 23°C, med hög starthalt av TOC och utan näringstillförs. Höger: Nedbrytningskurvorna för de tre replikaten som stod i 23°C, med hög starthalt av TOC och med näringstillförs.

För de vattenprover som stod i 23°C med hög starthalt, utan tillförd näring, var initialvärdena för TOC 801, 800, 586 mg/L TOC, se figur 15. Samtliga provreplikat nådde sitt minsta värde i början av experimentet. För samtliga replikat gick nedbrytningen snabbast de första dagarna av experimentet. Sedan varierar TOC-halten för att i slutet öka till en halt som överskrider initialhalten. I de prover med näringstillförs i 23°C var starthalten 529, 622 och 692 mg/l TOC för respektive replikat 1, 2 och 3. Halterna av TOC minskade snabbast i starten av experimentet.

8.1 Nedbrytning under hela inkubationsperioden - jämförelse mellan start och slutvärde

Eftersom nedbrytningskurvorna var varierande och halterna ibland ökade för att sedan minska analyseras resultatet i form av startvärde och slutvärde via boxplotar i figur 16.

Starthalt och sluthalt av TOC för hela perioden



Figur 16: Boxplotar mellan start och sluthalt av TOC för de olika förutsättningarna, för hela perioden.

Sett till hela inkubationsperioden, baserat på start och sluthalt av TOC, kan det observeras att nedbrytning har ägt rum i samtliga behandlingar förutom för proverna som stod i 23°C, utan näringstillsats och hög initialhalt av TOC, se figur 16). För värdena där boxplotarna är stora, är konfidensintervallet större, vilket då innebär att vid dessa analyser varierade replikatens värden mer.

För 5°C, utan näring med låg initialhalt var det procentuella nedbrytningen 65% efter hela perioden och med näringstillsats var den 73%. Detta beräknades från medelvärdet av procentuella nedbrytningen för de 3 replikaten. För 10°C, utan näring med låg initialhalt var det procentuella nedbrytningen 86% efter hela perioden och med näringstillsats var den 83%. För 23°C, utan näring med låg initialhalt var det procentuella nedbrytningen 91% efter hela perioden och med näringstillsats var den 80%.

När TOC-halten istället var hög från start var den procentuella nedbrytningen för 5°C, utan näringstillsats 4% och med näringstillsats 42%. För 10°C, utan näringstillsats var den procentuella nedbrytningen 11% och med näringstillsats 16%. För 23°C, utan näringstillsats var den procentuella ökningen av TOC-halt 38% och med näringstillsats var den procentuella nedbrytningen 88%.

De följande statistiska analyserna tar hänsyn till hela tidsserien. Alla replikat i 5 °C hade enligt Shapiro Wilks test ett p-värde > 0.05 , vilket säger att det inte finns tillräckligt med bevis för att säga att datan inte är normalfördelad, däremot var det ett replikat, replikat 3 som startade med lågt initialvärde, med näring, som hade ett p-värde som var < 0.05 och var därför inte normalfördelad. För 10 °C var de replikat med lågt initialvärde, med och utan näring, inte normalfördelade med ett p-värde < 0.05 . De replikat med högt initialvärde var däremot normalfördelade med ett p-värde > 0.05 . På samma sätt som för 10 °C uppvisade proverna som stod i 23 °C, med lågt initialvärde, ingen normalfördelning eftersom p-värdet < 0.05 . De prover med högt initialvärde påvisade en normalfördelning med ett p-värde > 0.05 .

För att se om näring hade någon statistisk signifikant påverkan på nedbrytningen gjordes Wilcoxon rangsummetest då datan för samtliga prover både var normal och icke-normalfördelad enligt Shapiro Wilks, se tabell 4.

Tabell 4: Resultat från statistiska tester, Wilcox samt t-test, som gjordes med R mellan prover med näring och utan näring

Näring och utan näring	Låg starthalt p-värde	Signifikant skillnad?	Test	Hög starthalt p-värde	Signifikant skillnad?	Test
5 °C	$p > 0.05$	Nej	Wilcox	$p > 0.05$	Nej	t-test
10 °C	$p > 0.05$	Nej	Wilcox	$p > 0.05$	Nej	t-test
23 °C	$p > 0.05$	Nej	Wilcox	$p < 0.05$	Ja	t-test

För 5°C och 10°C resulterade testen i p-värden > 0.05 , vilket betyder att det inte finns tillräckligt med bevis för att förkasta nollhypotesen och det går därför inte att säga att det finns någon statistisk signifikant skillnad mellan de proverna som fick näringstillsats och de som inte fick tillsatt näring i de temperaturerna. Vid 23°C var $p < 0.05$ och det går därför att förkasta nollhypotesen och det finns tillräckliga bevis för att säga att näringstillsats

resulterade att det blev en statistisk signifikant skillnad mellan de olika kategorierna.

För att se om temperaturen hade någon statistisk påverkan gjordes både Wilcoxon's rangsummetest och t-test beroende på om datan var normalfördelad eller inte.

Tabell 5: Resultat från statistiska tester, Wilcoxon's rangsummetest samt t-test, som gjordes med R mellan prover med olika temperaturer

Skillnad mellan temperaturer	Låg starthalt, utan näring p-värde	Signifikat skillnad?	Test
5 °C jämfört med 10 °C	$p < 0.05$	Ja	Wilcox
5 °C jämfört 23 °C	$p < 0.05$	Ja	Wilcox
10 °C jämfört 23 °C	$p < 0.05$	Ja	Wilcox
	Lågstarthalt, med näring p-värde	Signifikant skillnad?	Test
5 °C jämfört 23 °C	$p < 0.05$	Ja	Wilcox
10 °C jämfört 23 °C	$p < 0.05$	Ja	Wilcox
5 °C jämfört 10 °C	$p < 0.05$	Ja	Wilcox
	Hög starthalt, utan näring p-värde	Signifikant skillnad?	Test
10 °C jämfört 23 °C	$p > 0.05$	Nej	t-test
5 °C jämfört 10 °C	$p > 0.05$	Nej	t-test
5 °C jämfört 23 °C	$p > 0.05$	Nej	t-test
	Hög starthalt, med näring p-värde	Signifikant skillnad?	Test
5 °C jämfört 10 °C	$p < 0.05$	Ja	t-test
5 °C jämfört 23 °C	$p < 0.05$	Ja	t-test
10 °C jämfört 23 °C	$p < 0.05$	Ja	t-test

Alla temperaturjämförelser med hög starthalt, utan näring, visade att det inte fanns någon statistisk signifikant skillnad mellan temperaturerna vid just den kategorin då p-värdet > 0.05 och nollhypotesen kunde därför inte förkastas.

Vid jämförelsen hur temperatur påverkade nedbrytningen användes både t-test och Wilcoxon rangsummetest. För samtliga analyser, förutom för de prover som startade med hög TOC-halt, utan näring, hamnade p-värdet på < 0.05 , se tabell 5. Nollhypotesen kan därför förkastas och det finns tillräckligt med bevis att det finns en statistisk signifikant skillnad mellan proverna.

Genom regressionsanalys (se appendix 11.3) erhöles ekvationer för nedbrytningen räknat över hela perioden, se tabell 6. För de ekvationer där TOC-halt ökar ($x > 0$) gjordes inga beräkningar då ökning av TOC påvisar något fel i metoden.

Tabell 6: Ekvationen från regressionsanalysen, nedbrytningshastigheten och antalet dagar för 100% rening av TOC för olika initialhalter av TOC

Låg initialhalt av TOC	Ekvation	Nedbrutet TOC [mg/l per dag]	100% nedbrytning av TOC [dagar]
5 °C, utan näring	44.4-1.02x	1.02	44
5 °C, med näring	29.74-0.59x	0.59	47
10 °C, utan näring	27.64-0.84x	0.84	33
10 °C, med näring	22.64-0.61x	0.61	37
23 °C, utan näring	19.31-0.65x	0.65	30
23 °C, med näring	13.61-0.34x	0.34	40
Hög initialhalt av TOC	Ekvation	Nedbrutet TOC [mg/l per dag]	100% nedbrytning av TOC [dagar]
5 °C, utan näring	427.99 + 6.69x	-	-
5 °C, med näring	706.45-8.45x	8.45	84
10 °C, utan näring	412.97 + 4.18x	-	-
10 °C, med näring	345.87 + 3.61x	-	-
23 °C, utan näring	350.79 + 98.87x	-	-
23 °C, med näring	444.38-11.47x	11.47	39

Den högsta nedbrytningshastigheten vid låg starthalt kan var för 5°C utan näring medan den högsta nedbrytningshastigheten vid hög initialhalt var för 23°C med näring. Den lägsta nedbrytningshastigheten vid låg starthalt var för 23°C med näring och för hög starthalt var det för 5°C med näring. Dock var det bara två kategorier som räknades med vid hög initialhalt.

8.2 Nedbrytning efter en veckas inkubation

Nedbrytningen gick snabbast för majoriteten av replikaten i början av experimentet och för vissa ökade halterna för att sedan minska. Nedbrytningshastigheten för hela perioden för de

olika förutsättningarna observeras från ekvationen i kurvorna för linjär regression (se figur 20, 21 och 22) i appendix 11.3.

Ekvationerna från regressionsanalysen med nedbrytningshastighet och procentuell rening av TOC av en vecka sammanställs, se tabell 7. För de ekvationer där TOC-halten ökar ($x > 0$) gjordes inga beräkningar då något blivit fel i mätmetoden.

Tabell 7: Ekvationen från regressionsanalysen för en vecka, nedbrytningshastigheten och procentuell rening efter en vecka.

Låg initialhalt av TOC	Ekvation	Nedbrutet TOC [mg/l per dag]	Nedbrutet TOC efter 1 vecka [%]
5 °C, utan näring	33.9+2.75x	-	-
5 °C, med näring	34.1-1.63x	1.63	33
10 °C, utan näring	43.71-4.5x	4.5	72
10 °C, med näring	34.59-3.62x	3.62	73
23 °C, utan näring	43.73-6.98x	6.98	100
23 °C, med näring	23.72-2.68x	2.68	79
Hög initialhalt av TOC	Ekvation	Nedbrutet TOC [mg/l per dag]	Nedbrutet TOC efter 1 vecka [%]
5 °C, utan näring	718.12-83.28x	83.28	81
5 °C, med näring	784.08-33.21x	33.21	30
10 °C, utan näring	571.94-53.79x	53.79	66
10 °C, med näring	508.13-52.44x	52.44	72
23 °C, utan näring	668.25-79.53x	79.53	83
23 °C, med näring	559.78-64.8x	64.8	81

Den högsta nedbrytningshastigheten vid låg starthalt kan var för 23°C utan näring medan den högsta nedbrytningshastigheten vid hög initialhalt var för 5°C utan näring. Den lägsta nedbrytningshastigheten vid låg starthalt var för 5°C utan näring och för hög starthalt var

det för 5°C med näring.

8.3 Kväve och fosforhalter efter avslutat nedbrytningsförsök

TOC, kväve och fosforanalyserna som gjordes på SGS, se tabell 9, visar en jämförelse mellan hur mycket TOC, totalfosfor och totalkväve som fanns kvar efter avslutat experiment samt hur kvoten mellan TOC, kväve och fosfor ändrats. Alla enskilda parametrar som mättes (ammoniumkväve, fosfatfosfor och nitrat+nitritkväve) finns i appendix 10.6.

Tabell 8: Jämförelse av TOC, kväve och fosforhalter i slutet av nedbrytningsförsöket samt TOC:N:P kvoter för proverna med låg starthalt

Förutsättning	Starthalt - sluthalt TOC [mg/l]	Starthalt - sluthalt totalfosfor (P) [mg/l]	Starthalt - sluthalt totalkväve (N) [mg/l]	Start - slutkvot TOC:N:P
5 grader, ingen näring, låg starthalt	76 (± 11) - 34 (± 5.1)	0.14 (± 0.014) - 0.017 (± 0.0035)	1.1 (± 0.22) - 0.41 (± 0.15)	10:0.07:0.004 - 106:1.1:0.02
10 grader, ingen näring, låg starthalt	76 (± 11) - 8.5 (± 1.3)	0.14 (± 0.014) - 0.038 (± 0.0038)	1.1 (± 0.22) - 0.56 (± 0.15)	10:0.07:0.004 - 106:6.0:0.2
23 grader, ingen näring, låg starthalt	76 (± 11) - 6.3 (± 0.95)	0.14 (± 0.014) - 0.065 (± 0.0065)	1.1 (± 0.22) - 0.70 (± 0.15)	10:0.07:0.004 - 106:11.8:0.4
5 grader, med näring, låg starthalt	76 (± 11) - 9.6 (± 1.4)	1.85 - 1.2 (± 0.12)	76 - 10 (± 2.0)	106:16:01 - 106:94.6:5.1
10 grader, med näring, låg starthalt	76 (± 11) - 8.4 (± 1.3)	1.85 - 1.8 (± 0.18)	76 - 10 (± 2.0)	106:16:01 - 106:108.2:8.8
23 grader, med näring, låg starthalt	76 (± 11) - 6.9 (± 1.0)	1.85 - 1.7 (± 0.17)	76 - 8.9 (± 1.8)	106:16:01 - 106:9.2:10.1

Tabell 9: Jämförelse av TOC, kväve och fosforhalter i slutet av nedbrytningsförsöket samt TOC:N:P kvoter för proverna med hög starthalt

Förutsättning	Starthalt - sluthalt TOC [mg/l]	Starthalt - sluthalt totalfosfor (P) [mg/l]	Starthalt - sluthalt totalkväve (N) [mg/l]	Start - slutkvot TOC:N:P
5 grader, ingen näring, hög starthalt	1900 (± 290) - 1900 (± 290)	13 (± 1.3) - 14 (± 1.4)	1.1 (± 0.22) - 0.54 (± 0.15)	106:0.05:0.28 - 106:0.03:0.3
10 grader, ingen näring, hög starthalt	1900 (± 290) - 1500 (± 230)	13 (± 1.3) - 14 (± 1.4)	1.1 (± 0.22) - 2.8 (± 0.56)	106:0.05:0.28 - 106:0.2:0.4
23 grader, ingen näring, hög starthalt	1900 (± 290) - 1300 (± 200)	13 (± 1.3) - 14 (± 1.4)	1.1 (± 0.22) - 3.3 (± 0.66)	106:0.05:0.28 - 106:0.2:0.4
5 grader, med näring, hög starthalt	1900 (± 290) - 1300 (± 200)	46.3 - 44 (± 4.4)	334.6 - 260 (± 52)	106:16:01 - 106:18.2:1.4
10 grader, med näring, hög starthalt	1900 (± 290) - 1300 (± 200)	46.3 - 46 (± 4.6)	334.6 - < 0.1 (± 0.15)	106:16:01 - 106:0.006:1.5
23 grader, med näring, hög starthalt	1900 (± 290) - 33 (± 5.0)	46.3 - 48 (± 4.8)	334.6 - 250 (± 50)	106:16:01 - 106:688.3:59.7

Viktigt att notera här är att starthalterna från SGS antogs vara samma som vid provtagningen vid dammarna, då proverna frystes efter försöket och att provsvaret för totalkväve från SGS för provet i 10 grader, med näring och hög starthalt, är fel. I appendix kan man se att det finns en halt av de olika kemiska formerna av kväve. För provet som stod i 23 grader, med näring och låg starthalt, kan man se att kvävet var begränsande i slutet av försöket (enligt Redfieldförhållandet) men för alla andra prover med tillsatt näring fanns det ett överskott av näringsämnen i slutet enligt Redfield-förhållandet.

8.4 Jämförelser mellan analyser på SLU och SGS analytics

De fjärde replikaten (med 130 ml som startvolym) som hölls orörda från nedbrytningsexperimentets start till slutet av experimentet analyserades både på SLU och på SGS. Detta för att få en bild av hur halterna skiljer sig mellan de olika analysmetoderna som använts i nedbrytningsförsöket (se tabell 10).

Tabell 10: Jämförelse mellan start och sluthalt för mätningar samt procentuell nedbrytning av TOC på SLU och SGS Analytics.

Förutsättning	SLU 5/5-2023 (mg/l) - SLU 7/6-2023 (mg/l)	SGS initialhalt (mg/l) - SGS 7/6-2023 (mg/l)	%-nedbrytning av TOC SLU	%-nedbrytning av TOC SGS
5 °C, lågt startvärde, utan näring	37.4 - 22.528	76 - 34	40	55
5 °C, lågt startvärde, med näring	35.6 - 10.5	76 - 9.6	71	87
10 °C, lågt startvärde, utan näring	47.84 - 8.292	76 - 8.5	83	89
10 °C, lågt startvärde, med näring	39.93 - 7.912	76 - 8.4	80	89
23 °C, lågt startvärde, utan näring	44.91 - 4.864	76 - 6.3	89	92
23 °C, lågt startvärde, med näring	34.332 - 5.424	76 - 6.9	84	91
5 °C, högt startvärde, utan näring	722 - 750	1900 - 1900	-4	0
5 °C, högt startvärde, med näring	736.6 - 419.6	1900 - 1300	43	32
10 °C, högt startvärde, utan näring	604.2 - 640.8	1900 - 1500	-6	21
10 °C, högt startvärde, med näring	638.4 - 527.2	1900 - 1300	17	32
23 °C, högt startvärde, utan näring	794 - 267.72	1900 - 1300	66	32
23 °C, högt startvärde, med näring	598.5 - 132.16	1900 - 33	78	98

Vid låg initialhalt följer den procentuella nedbrytningen för SGS och SLU varandra med variationer, mellan 7-16 %-enheter. Större variationer kan ses i resultatet för de prover som hade högt initialvärde som har mellan 4-34 %-enheters variationer.

För provet med högt startvärde som stod i 10 °C, utan näring, var det en stor variation då det enligt analysen på SLU hade en större sluthalt än starthalt, men enligt SGS analys hade

det en minskning i TOC-halt på 21 %. Provet som stod i 23 °C, med högt startvärde, utan näring, var den procentuella nedbrytningen enligt SLU-analysen 66 % medan SGS-analys visade på endast 32 % nedbrytning.

Värdena för de 4:e replikaten enligt SLU:s analys följer ungefär samma procentuella nedbrytning som medelvärdet av den procentuella nedbrytningen för övriga 3 replikat för varje kategori med mindre variationer, cirka 2-10 %-enheter förutom för 5 °C, lågt startvärde, utan näring och för 23 °C, högt startvärde, utan näring, se tabell 11.

Tabell 11: Jämförelse mellan den procentuella nedbrytningen i specialproverna (de fjärde replikaten) från SLU och medelvärdet för replikat 1-3 från SLU.

Förutsättning	SLU special (%-nedbrytning av TOC)	SLU replikat (%-nedbrytning av TOC)
5 °C, lågt startvärde, utan näring	40	65
5 °C, lågt startvärde, med näring	71	73
10 °C, lågt startvärde, utan näring	83	86
10 °C, lågt startvärde, med näring	80	83
23 °C, lågt startvärde, utan näring	89	91
23 °C, lågt startvärde, med näring	84	80
5 °C, högt startvärde, utan näring	-4	4
5 °C, högt startvärde, med näring	43	42
10 °C, högt startvärde, utan näring	-6	11
10 °C, högt startvärde, med näring	17	16
23 °C, högt startvärde, utan näring	66	-38
23 °C, högt startvärde, med näring	78	88

För dessa två kategorier är det en anmärkningsvärd skillnad på 25 % enheter för 5 °C, lågt startvärde, utan näring och över 100 %-enheters skillnad för 23 °C, högt startvärde, utan näring.

9 Diskussion

9.1 Reningskapaciteter vid olika temperaturer

Enligt de statistiska testen i tabell 5 finns det en signifikant skillnad mellan de olika temperaturerna, förutom för de prover som hade hög starthalt, utan näring. Det innebär att i de flesta kategorier kan man säga att ökad temperatur påverkar reningskapaciteten i av-isningskontaminerade dammar.

Att temperaturen visade på en statistisk signifikant skillnad stämmer överens med vad litteraturen säger, att temperatur påverkar nedbrytningsprocesserna (K. Carlsson et al. 2020, Bitton 2011). Jämförelsen mellan de olika kategoriernas starthalt och sluthalt för hela inkubationsperioden (se figur 16) visade på en på en nedbrytning i alla prover förutom proven i 23°C, utan näring med hög initialhalt. Den procentuella nedbrytningen för proven med låg initialhalt samt utan näring i 5°C var 65% samt 73% i proven med näringstillsats. För låg initialhalt 10°C reducerades halten med 86% i proverna utan näring och 83% för proven med näring. I 23°C med låg starthalt reducerades halten med 91% efter hela perioden i proverna utan näring reducerades halten med 80%.

För proverna som startade med en hög halt TOC, utan näring, kunde inte någon statistisk signifikant skillnad bevisas mellan temperaturerna, se tabell 5. Den procentuella nedbrytningen för hela perioden i 5°C utan näring och med näring var 4% respektive 42%. För 10°C utan näringstillsats uppnåddes en procentuell nedbrytning på 11% respektive 16% för proven utan näring respektive med näring. Vid 23°C, utan näringstillsats, ökade den procentuella nedbrytningen med 38%, medan den procentuella nedbrytningen minskade med 88% vid tillsats av näring.

Andra studier har också visat att av-isningsmedel bryts ner även i låga temperaturer i olika medier (Wejden & Øvstedal 2006, Revitt & Worrall 2003, Hellstén et al. 2005). I den omättade zonen av en akvifär i Norge mättes exempelvis en initialhalt på 1000 mg/l för propylenglykol och formiat upp och efter en retentionstid på 20 dagar reducerades halterna med 95% (Wejden & Øvstedal 2006). En annan studie visade en procentuell nedbrytning av olika av-isningsvätskor vid flygplatsytor på 20.1-27.4% även i låga temperaturer som 1°C (Revitt & Worrall 2003).

Nedbrytningshastigheten vid låg initialhalt av TOC för olika förutsättningar för hela perioden var mellan 0.34-1.02 mg/l per dag och tiden för att uppnå en nedbrytning av TOC på 100% varierade mellan 30-47 dagar, se tabell 6. Nedbrytningshastigheten och tiden för 100% nedbrytning av TOC vid hög initialhalt beräknades endast för kategorierna 5°C med näring och 23°C med näring då övriga kategorier hade en ökning enligt ekvationen från den linjära regressionen. För 5°C med näring var nedbrytningshastigheten 8.45 mg/l per dag och tiden för att uppnå en nedbrytning av TOC på 100% varierade mellan var 84 dagar. För 23°C med näring var nedbrytningshastigheten 11.47 mg/l per dag och tiden för att uppnå en nedbrytning av TOC på 100% varierade mellan var 39 dagar.

Nedbrytningshastigheterna vid en veckas tidsspann skilde sig (se tabell 7) från de nedbrytningshastigheter som omfattade hela försöksperioden. Vid låga initialhalter var spannet mellan nedbrytningshastigheter 1.63-6.98 mg/l per dag och reningskapaciteten efter en vecka var mellan 33-100%. Däribland räknades inte 5°C grader med då den hade en ökande TOC-halt enligt regressionsanalysen. Vid höga initialhalter av TOC var spannet mellan nedbrytningshastigheterna istället 33.21-83.28 mg/l per dag och reningskapaciteten efter en vecka var mellan 30-83%. Att nedbrytningshastigheterna ökar med ökad halt TOC stämmer väl överens med litteraturen, då kol är en viktigt källa för mikroorganismernas tillväxt (K. Carlsson et al. 2020, B. Carlsson & Hallin 2003, Chamy 2013). Så ju mer biotillgängligt kol det finns desto bättre trivs mikroorganismerna.

Ett tidigare examensarbete på Swedavia undersökte om propylenglykol bröts ner i uppsamlingsystemet för av-isningsmedlet på Swedavia (Forsberg 2012). Under försöket testades nedbrytningen av TOC under 14 dagar i de tre olika temperaturerna 0°C, 5,2°C och 14,7°C. Medelvärdet av nedbrytningen för de två proverna som stod i 0°C var 14.3 mg/l per dag och 14 mg/l/dag, för proverna i 5.2°C var nedbrytningen 4.3 mg/l per dag och 7.2 mg/l per dag, för 14,7°C var det 13,6 mg/l per dag och 21,4 mg/l/dag. Startvärdena låg mellan 750 och 930 mg/l TOC. Vid jämförelse med nedbrytningshastigheterna i dammarna i min studie kan det konstateras att nedbrytningshastigheterna är liknande, om man tar i beaktning att det är för olika tidsspann och temperaturer.

9.2 Påverkan av näringstillförsätt

Det framgick i resultatet från de statistiska testerna i tabell 4 att det inte fanns någon statistisk signifikant skillnad mellan proverna med näring och utan näring förutom för de prover som stod i 23°C. Det visar på att vid högre temperaturer gör det skillnad att tillsätta näring men i lägre temperaturer spelar detta ingen roll. Det gick inte att se något klart mönster mellan hur de olika näringsämnen förbrukades och nedbruten TOC-halt i proverna från tabell 9 och 6. Detta tyder på att bakterierna vid de lägre temperaturerna har haft en tillräcklig mängd näringsämnen redan innan näringstillförsätt, vilket antagligen beror på att bakteriernas tillväxt har begränsats av temperaturen. Det går därför inte att säga att näringstillförsätt enligt Redfield förhållandet gav något förbättrat resultat för reningskapaciteten i de lägre temperaturerna. Detta resultat skiljer sig från en undersökning som gjordes i propylenförorenad jord, där det visade sig att biomassan nästintill inte växte utan näringstillförsätt, men tillsatt näring gav goda resultat med en nedbrytning av propylenglykol vid låg temperatur (4°C) (Toscano et al. 2014), i en finsk studie visade även ett test med hög näringsämneskoncentration på bättre nedbrytning av formiat i jord än utan tillsatt näring (Hellstén et al. 2005).

Från tabell 9 gick det dock att dra slutsatsen att kväve hade förbrukats i sån mängd att Redfieldförhållandet inte längre uppnåddes vid 23°C, med näring och med låg initialhalt. Detta kan ha begränsat nedbrytningen för replikaten i de förutsättningarna, då kväve är en viktig byggsten hos mikroorganismerna (K. Carlsson et al. 2020).

9.3 Förbättringspotential i anläggningen

Då av-isning och halkbekämpning förekommer under årets kallaste månader är temperatur en avgörande faktor för reningskapaciteten i dammen. Utifrån studiens resultat finns det indikationer att nedbrytningen påverkas av temperatur och att högre temperaturer resulterar i en större reduktion av TOC över tid. Det betyder att om det kommer in en betydande halt TOC som behöver lagras i dammarna, är det värdefullt att säkerställa att det finns tid för vattnet att ligga i dammen under en längre period vid kallare temperaturer.

I dagsläget finns det ingen bestämd maximumhalt av TOC som får släppas ut i recipienten men om det bestäms bör man fundera på om det finns ett sätt att värma upp det befintliga dammsystemet för att gynna den biologiska nedbrytningen. För att ta tillvara på resurser skulle det kanske vara möjligt att använda spillvärme från flygplatsen. När det gäller näringsämnen finns det inga bevis, enligt denna studie, att Redfieldförhållandet på 106:16:1 är optimalt för denna typ av vatten, dock är det generellt väldigt låga halter av kväve och fosfor i vattnet. Vid låg initialhalt av TOC, med näring i 23°C hade dock kväve förbrukats i sådan mängd att det kan ha reducerat möjligheten till nedbrytning, vilket indikerar att vid uppvärmning kan ett alternativ vara att tillföra näringsrikt avloppsvatten, för att upprätthålla en effektiv nedbrytning.

Om det inte finns något kostnadseffektivt sätt att värma upp systemet bör man överväga att introducera ett nytt steg i reningen, exempelvis ett biofilter som reducerar TOC-halten som ett behandlingssteg när dammarna inte klarar av att lagra tillräcklig mängd vatten, alternativ för filtermaterial återfinns i 4.2. Ett annat alternativ är att överväga om någon annan metod än dammarna kan vara aktuell, de rekommenderade metoderna för just denna typ av kontaminerat vatten kan återfinnas i sektion 4.2 tillsammans med möjligheten till reningssystem som konstruerade våtmarker (luftade/icke-luftade) som beskrivs i samma sektion. Med tanke på dammarnas storlek, att de har tillgång till syre och vad litteraturen säger är tillväxttytor något som borde försöka integreras mer i dammarna.

9.4 Osäkerheter med studien

Den största osäkerheten av resultatet i den här studien är vad som orsakat att det blivit en stor ökning av TOC-halt i flera av proverna. Detta beror med största sannolikhet på metodfel vid det laborativa arbetet innan proverna blev klara för analys. Spädningen var antagligen en stor bidragande faktor till detta då en kontaminering av TOC kan leda till dramatisk skillnad i halterna vid spädningsfaktorn 40. Det kan också skett pipetteringsfel på grund av skakningar eller feltryckningar, vilket också skulle leda till stora skillnader i halterna vid spädning.

En annan potentiell orsak till den varierande halten är att vid surgörning av kaliumformiat, som gjordes via NPOC-metoden, övergår kaliumformiatet till en mycket flyktig organisk form som blir dominerande i vattenlösningen (Bertilsson 2023). Vid bubbling så avgår det bland annat koldioxid, men även flyktiga organiska föreningar. Det har antagligen lett till att en varierande mängd av kaliumformiat har bubblats bort under själva analysen.

Frysningen kan eventuellt ha påverkat den mikrobiella aktiviteten i proverna då inga bakterier trivs i temperaturer under -5°C (K. Carlsson et al. 2020, Rose 1976). Dock kunde det observeras att nedbrytning skedde inom 3 dagar från experimentets start, vilket tyder på att om det var en lag phase, var den kortare än 3 dagar. Den lilla tillsatsen av ofruset vatten borde också gett en knuff med mikrobiell aktivitet, vilket borde minska osäkerheten från denna faktor.

Initialhalterna för proverna som tillhandahölls från SGS var på ofruset vatten, vilket kan ha påverkat då frysning kan göra att DOC koagulerar och faller ut (Bertilsson 2023) och att det är därför som halterna skiljer sig så mycket. Detta borde dock kommit med i TOC-analyserna på SLU, om det inte fastnat på plastväggarna i proverna. Jämförelsen mellan nedbrytningen av TOC från SLU och SGS Analytics visade på variationer mellan värdena för de fjärde replikaten i varje kategori. Den procentuella nedbrytningen i proverna som jämfördes mellan SGS och SLU (tabell 11) kan man se att den procentuella nedbrytningen efter hela perioden är högre för SGS i alla fall förutom för två replikat. Något som är viktigt att tänka på är att mätosäkerheten för SGS analyser av TOC låg på ca 15 %, vilket kan betyda att variationerna mellan analysresultaten kan vara relativt lika vid en minskning av SGS värden på 15%. Det kan även betyda att det finns ännu större variation mellan mätresultaten.

Tyvärr kunde inte datan från testerna exporteras från datorn på labbet och skrevs därför upp för hand när analyserna blev klara. Vid tillfällena skrevs dock inte värdet på blankarna upp utan det säkerställdes endast att dessa var under 0,2 mg/l. Under första labbtillfället uppvisade dock blankarna ett värde över 0,2 mg/l, vilket medförde att de prover med hög initialhalt analyserades igen eftersom de skulle multipliceras med en spädningsfaktor på 40. Blankarna visar bakgrundshalt av TOC i milliQ-vattnet. Vid några tillfällen togs bild på analyserna och där finns värdena för blankarna med i rådatan i appendix. Vid sista labbtillfället skedde det tyvärr ett teknikfel vilket ledde till att det inte gick att få tillgång till alla datafiler och bilder kunde därför inte tas på resterande data. Därmed saknas värdet på alla blankar från datan efter proverna från 12/5.

Varför detta kan vara en osäkerhet är att bakgrundshalten för TOC kan ha en effekt när datan multipliceras med spädningsfaktorn, speciellt om den är hög. MilliQ-vatten hämtades dock vid ett flertal tillfällen under dagen vid provförberedelser, och vattnet för blankarna hämtades sist. Det medför att det vatten som användes vid provförberedelserna kan ha haft en annan bakgrundshalt av TOC än blankarna. MilliQ-vattnet provkördes inte heller efter varje nytt tillfälle som det fylldes på vid provförberedelserna. Avsaknaden av värden på blankarna och det faktum att milliQ-vattnet som användes vid provförberedelse inte togs vid samma tidpunkt som milliQ-vattnet för blankarna har gjort att bakgrundshalten inte tas hänsyn till. Felmarginalerna för de olika starthalterna av TOC, med blankarnas bakgrundshalt på max 0,2 mg/l TOC, är 0-0,8 mg/l TOC och 0-8 mg/l TOC för låg initialhalt av TOC respektive hög initialhalt av TOC. Detta är en mätosäkerhet för resultatet och påverkar främst de prover med högt startvärde.

10 Slutsats

Syftet med studien var att ta reda på reningskapaciteten för dagvattenanläggningen Kättstabäcken vid Arlanda flygplats vid olika temperaturer, hur tillsats av näring påverkade nedbrytningen och att utifrån detta komma med förslag på förbättringsåtgärder.

Enligt de statistiska testerna fanns det en signifikant skillnad mellan temperaturerna, förutom för de prover som hade en hög starthalt, utan näring. Det visar på att ökad temperatur påverkar reningskapaciteten i av-isningskontaminerade dammar. Skillnaden mellan start och sluthalt av proverna visade på en nedbrytning i samtliga kategorier förutom för proven med hög initialhalt, utan näringstillsats, i 23°C. Vid låg initialhalt i 5°C var den procentuella nedbrytningen av TOC på 65%-73%. För låg initialhalt 10°C reducerades halten med 83-86%. I 23°C med låg starthalt reducerades halten med 79-91% efter hela perioden. För proverna som startade med en hög halt TOC, utan näring, kunde inte någon statistisk signifikant skillnad bevisas mellan temperaturerna. Den procentuella nedbrytningen för hela perioden i 5°C var 4-42%. För 10°C utan näringstillsats uppnåddes en procentuell nedbrytning på 11-16% för proven. Vid 23°C, utan näringstillsats, ökade den procentuella nedbrytningen med 38%, medan den procentuella nedbrytningen minskade med 88% vid tillsats av näring.

Nedbrytningshastigheten av TOC vid låg initialhalt för olika förutsättningar för hela perioden var mellan 0.34-1.02 mg/l TOC per dag och tiden för att uppnå en nedbrytning av TOC på 100% varierade mellan 30-47 dagar. Vid hög initialhalt var nedbrytningshastigheten 8.45-11.47 mg/l TOC per dag, och tiden för 100%-nedbrytning av TOC varierade mellan 39-84 dagar. Nedbrytningshastigheterna vid en veckas tidsspann skilde sig från de nedbrytningshastigheter som var sett till hela perioden. Vid låga initialhalter var spannet mellan nedbrytningshastigheter 1.63-6.98 mg/l per dag och reningskapaciteten efter en vecka var mellan 33-100%. Vid höga initialhalter av TOC var spannet mellan nedbrytningshastigheterna istället 33.21-83.28 mg/l per dag. Den procentuella nedbrytningen efter en vecka var mellan 30-83%.

Resultatet visade att näringstillsats enligt Redfieldförhållandet inte hade någon statistisk signifikant påverkan på nedbrytningen, förutom vid 23°C. Vilket tyder på att det vid högre temperaturer kan vara värdefullt att tillsätta näring.

De förbättringar som kan föreslås baserat på resultatet i studien är att se över möjligheten att ha ett kostnadseffektivt uppvärmt system, eventuellt kanske det finns spillvärme att använda sig på flygplatsen. Om detta inte är möjligt bör man överväga möjligheten att introducera ett ytterligare reningssteg, som exempelvis ett biofilter som reducerar TOC-halten innan vattnet lagras i dammarna. Dock krävs det mer analyser av nedbrytningshastigheten för att kunna dra välgrundade slutsatser från arbetet, eftersom det i studien uppkommit osäkerheter i resultatet.

10.1 Framtida studier

Från början var det tänkt att metoden skulle innefatta en analys av flera andra parametrar, som exempelvis om det fanns några toxiska ämnen i vattnet som skulle kunna hämma den biologiska nedbrytningen. Detta blev inte av på grund av tidsperspektivet av arbetet och på grund av kostnader. Detta är något som bör undersökas vidare.

Det var också tänkt att hela Kättstabäckens dagvattenanläggning skulle utvärderas, men då det hade lett till för många prover för studiens tidsbegränsning. Det beslutades därför att endast damm 5 skulle analyseras, då den var av störst intresse hos Swedavia. Den får därför representera övriga dammar på anläggningen då de i stort sett har samma förutsättningar, förutom en skillnad i volym. I en framtida studie kan det vara värdefullt att alla dammar utvärderas.

Det var också tänkt att de olika TOC-halterna som analyserades skulle tas vid två olika provtagningstillfällen. Det blev inte av eftersom det inte blev några särskilt höga halter under perioden då provtagningen skulle genomföras. Att det ena provet istället spetsades med kaliumformiat gav istället en ungefärlig jämförelse med hur det sker naturligt när mycket halkbekämpningsmedel rinner till dammarna. I framtiden föreslås det att en jämförelse med vatten från dammen utan manipulering görs för att få ett mer verklighetsbaserat resultat.

Det kan även vara värdefullt att genomföra ett nedbrytningsförsök med ännu lägre temperaturer då det under vintern, när av-isning och halkbekämpning sker, kan vara kallare än lägsta temperaturen (5°C) i detta försök.

Då vattnet generellt sett är näringsfattigt i Kättstabäcken bör det även vidare undersökas om det finns någon annan kvot mellan TOC, kväve och fosfor som gynnar nedbrytningen mer än Redfield-förhållandet. Ytterligare en anledning är också att man då minskar risken att näringsämnen rinner vidare till recipient.

Referenser

- Baldock, S. (2014). *Using R for Statistics*. Utgåva 1. Berkeley, CA: Apress. Tillgänglig: <https://link-springer-com.ezproxy.its.uu.se/book/10.1007/978-1-4842-0139-8>.
- Bergenstierna, C.-M. & Josefsson, T. (2009). *Inventering, analys och värdering av olycksrisker ur miljö-, hälso-och PR-perspektiv-En fallstudie på Stockholm-Arlanda Airport*. Tillgänglig: <https://www.lu.se/lup/publication/1689188>.
- Bitton, G. (2011). *Wastewater Microbiology*. Fjärde utgåvan. Hoboken, N.J: Wiley-Blackwell. Tillgänglig: https://books.google.se/books?hl=sv&lr=&id=udw_K4RGUCAC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Wastewater+microbiology&ots=PdgVymascT&sig=V2qxSIwLzU_sQugaIIk_jwJlqJU&redir_esc=y#v=onepage&q=temperature&f=false.
- Carlsson, B. & Hallin, S. (2003). *Reglerteknik och mikrobiologi i avloppsreningsverk VA-Forsk*. Tillgänglig: <https://www.yumpu.com/sv/document/view/50412718/reglerteknik-och-mikrobiologi-i-avloppsreningsverk-boffecom>.
- Carlsson, K., Linder, C., Flärdh, K., Bertilsson, S., Lundgren, M. & Svärd, S. (2020). *Introduktion till mikrobiologi, tryckt källa*. Utgåva 3, s. 75–107.
- Chamy, R. (2013). *Biodegradation : Life of Science*. Utgåva 1. Rijeka, Croatia: IntechOpen. Tillgänglig: https://books.google.se/books?id=sRMlnQAACAAJ&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- Corsi, S., Mericas, D. & Bowman, G. T. (2012). *Oxygen Demand of Aircraft and Airfield Pavement Deicers and Alternative Freezing Point Depressants*. Dordrecht. Tillgänglig: <https://link-springer-com.ezproxy.its.uu.se/article/10.1007/s11270-011-1036-x>.
- Duncan, D. (2003). *Handbook of water and wastewater microbiology*. London ; Academic Press. Tillgänglig: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.its.uu.se/book/9780124701007/handbook-of-water-and-wastewater-microbiology>.
- Fay, L. & Shi, X. (2012). *Environmental Impacts of Chemicals for Snow and Ice Control: State of the Knowledge*. Dordrecht. Tillgänglig: <https://link-springer-com.ezproxy.its.uu.se/article/10.1007/s11270-011-1064-6>.
- Forsberg, E. (2012). *Nedbrytning av propylenglykol i uppsamlingssystem för avisningsvätskor*. Tekn. rapport. Uppsala: Institutionen för geovetenskaper. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:724150/FULLTEXT01.pdf>.
- Fox, B. J., Holland, W. B., Boyd, F. L., Blackwell, B. F. & Armstrong, J. B. (2013). Use of stormwater impoundments near airports by birds recognized as hazardous to aviation safety. *Landscape and urban planning*, vol. 119, ss. 64–73. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204613001138>.
- Freeman, A. I., Surridge, B. W., Matthews, M., Stewart, M. & Haygarth, P. M. (2018). New approaches to enhance pollutant removal in artificially aerated wastewater treatment systems. *The Science of the total environment*, vol. 627, ss. 1182–1194. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718303036>.
- Gotō, M. (1992). *Fundamentals of bacterial plant pathology*. San Diego: Academic Press, Inc. Tillgänglig: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.its.uu.se/book/9780122934650/fundamentals-of-bacterial-plant-pathology>.
- Gupta, R. (2021). *Fundamentals of bacterial physiology and metabolism*. Singapore: Springer. Tillgänglig: <https://link-springer-com.ezproxy.its.uu.se/book/10.1007/978-981-16-0723-3>.

- Hellstén, P. P., Salminen, J. M., Jørgensen, K. S. & Nystén, T. H. (2005). Use of Potassium Formate in Road Winter Deicing Can Reduce Groundwater Deterioration. Tillgänglig: <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>.
- Higgins, J. & Maclean, M. (2002). *Technical note - the use of a very large constructed sub-surface flow wetland to treat glycol-contaminated stormwater from aircraft de-icing operations*. Tillgänglig: <https://iwaponline.com/wqrj/article/37/4/785/39487/Technical-Note-The-Use-of-a-Very-Large-Constructed>.
- Håkanson, L., Bryhn, A. C. & Hytteborn, J. K. (2007). On the issue of limiting nutrient and predictions of cyanobacteria in aquatic systems. *The Science of the total environment*, vol. 379 (1), ss. 89–108. Tillgänglig: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.its.uu.se/science/article/pii/S0048969707003087>.
- Larm, T. & Pirard, P. (2010). *Utredning av föroreningsinnehåller i Stockholms dagvatten*. Tillgänglig: <https://www.stockholmvgattenochavfall.se/dagvatten/hallbar-dagvattenhantering2/dagvattnet-i-staden/nulage-och-risker/fororeningar/>.
- Li, Z. (2022). *Prövotidsutredning Stockholm Arlanda Airport (U4) Delrapport 1 september 2020 – maj 2022*.
- Nagata, T. (2008). *Organic Matter–Bacteria Interactions in Seawater*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, s. 207–241. Tillgänglig: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/uu/detail.action?docID=353553&pq-origsite=primo>.
- National Academies of Sciences, E. M. (2013). *Guidance for Treatment of Airport Stormwater Containing Deicers*. Utg. av Smith & P. Gresham. Washington, DC: The National Academies Press. Tillgänglig: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/22440/guidance-for-treatment-of-airport-stormwater-containing-deicers%22>.
- Naturvårdsverket (2008). *Handbok med allmänna råd för flygplatser*, ss. 46–47. Tillgänglig: www.naturvardsverket.se.
- Pressl, A., Pucher, B., Scharf, B. & Langergraber, G. (2019). Treatment of de-icing contaminated surface water runoff along an airport runway using in-situ soil enriched with structural filter materials. *The Science of the total environment*, vol. 660, ss. 321–328. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718353361>.
- Raspati, G., Lindseth, H., Muthanna, T. & Azrague, K. (2018). Potential of Biofilters for Treatment of De-Icing Chemicals. *Water (Basel)*, vol. 10 (5), ss. 620–645. Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/5/620>.
- Revitt, D. M. & Worrall, P. (2003). Low temperature biodegradation of airport de-icing fluids. *Water Science and Technology*, vol. 48 (9), ss. 103–111. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/8936860_Low_temperature_biodegradation_of_airport_de-icing_fluids.
- Rodziewicz, J., Mielcarek, A., Janczukowicz, W., Ostrowska, K., Józwiakowski, K., Bugajski, P. & Jucherski, A. (2020). Biofilter with innovative filling for low-temperature treatment of sewage from de-icing airport runways. *Separation and purification technology*, vol. 242, ss. 116761–. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620300265>.
- Rose, A. H. (1976). *Chemical microbiology : an introduction to microbial physiology*. 3rd ed. Norwich, England: Butterworths. Tillgänglig: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.its.uu.se/book/9780408706834/chemical-microbiology>.
- Shi, X., Quilty, S. M., Long, T., Jayakaran, A., Fay, L. & Xu, G. (2017). Managing airport stormwater containing deicers: challenges and opportunities. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 11 (1), ss. 35–46. Tillgänglig: <https://link-springer-com.ezproxy.its.uu.se/article/10.1007/s11709-016-0366-6>.
- Swedavia (2021). *Miljörapport 2021 Stockholm Arlanda Airport Swedavia AB Stockholm Arlanda Airport*. Tekn. rapport. Swedavia.
- Swedavia (uå). *Miljö*. <https://www.swedavia.se/arlanda/miljo/>. Hämtad: (23/3/2023).
- Switzenbaum, M. S., Veltman, S., Mericas, D., Wagoner, B. & Schoenberg, T. (2001). Best management practices for airport deicing stormwater. *Chemosphere*, vol. 43 (8), ss. 1051–1062. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653500001995>.

- Toscano, G., Colarieti, M. L., Anton, A., Greco, G. & Biró, B. (2014). Natural and enhanced biodegradation of propylene glycol in airport soil. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 21 (15), ss. 9028–9035. Tillgänglig: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-013-1952-y>.
- Wejden, B. & Øvstedal, J. (2006). "Contamination and degradation of de-icing chemicals in the unsaturated and saturated zones at Oslo Airport, Gardermoen, Norway". *Urban Groundwater Management and Sustainability*. NATO Science Series. Dordrecht: Springer Netherlands, s. 205–218. Tillgänglig: [https://link-springer-com.ezproxy.its.uu.se/chapter/10.1007/1-4020-5175-1_16](https://link.springer-com.ezproxy.its.uu.se/chapter/10.1007/1-4020-5175-1_16).
- Yakovlieva, A., Boichenko, S., Shkilniuk, I., Bakhtyn, A., Kale, U. & Nagy, A. (2022). Assessment of influence of anti-icing fluids based on ethylene and propylene glycol on environment and airport infrastructure. *International Journal of Sustainable Aviation*, vol. 8 (1), ss. 54. Tillgänglig: <https://www.inderscience.com/jhome.php?jcode=ijsa>.

Muntliga referenser

Li, Z. (2023), VA-förvaltare, Mark och VA, Personlig kommunikation, [2023-03-27]

Bertilsson, S. (2023), Professor vid Institutionen för vatten och miljö; Avdelningen för mikrobiell ekologi., Personlig kommunikation, [2023-08-21]

11 Bilagor

11.1 Rådata från nedbrytningsförsöket

Teckenförklaring: L=låg initialhalt, H=hög initialhalt, NN=ingen näring, NP=med näring, siffrorna står för temperaturen.

Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result
MQ	NPOC:0,2051mg/L	8/5_5_L_NP_1	NPOC:5,895mg/L	8/5_5_H_NP_1	NPOC:18,33mg/L	EDTA 10	NPOC:9,595mg/L
EDTA 10	NPOC:9,920mg/L	8/5_5_L_NP_2	NPOC:4,487mg/L	MQ	NPOC:0,09979mg/L	8/5_23_H_NN_1	NPOC:8,911mg/L
5/5_5_L_NN_1	NPOC:9,552mg/L	8/5_5_L_NP_3	NPOC:5,174mg/L	EDTA 10	NPOC:9,618mg/L	8/5_23_H_NN_2	NPOC:9,278mg/L
5/5_5_L_NN_2	NPOC:9,865mg/L	MQ	NPOC:0,09044mg/L	8/5_5_H_NP_2	NPOC:9,796mg/L	8/5_23_H_NN_3	NPOC:5,641mg/L
5/5_5_L_NN_3	NPOC:8,775mg/L	EDTA 10	NPOC:9,021mg/L	8/5_5_H_NP_3	NPOC:12,10mg/L	8/5_23_H_NP_1	NPOC:6,399mg/L
5/5_5_L_NP_2	NPOC:7,707mg/L	5/5_5_L_NP_1	NPOC:10,8mg/L	8/5_10_L_NN_1	NPOC:4,950mg/L	8/5_23_H_NP_2	NPOC:7,455mg/L
5/5_5_L_NP_3	NPOC:10,87mg/L	5/5_5_H_NN_1	NPOC:10,74mg/L	8/5_10_L_NN_2	NPOC:7,095mg/L	8/5_23_H_NP_3	NPOC:7,344mg/L
5/5_10_L_NN_1	NPOC:11,52mg/L	5/5_5_H_NN_2	NPOC:18,15mg/L	8/5_10_L_NN_3	NPOC:7,572mg/L	12/5_5_L_NN_1	NPOC:17,74mg/L
5/5_10_L_NN_2	NPOC:11,56mg/L	5/5_5_H_NN_3	NPOC:16,11mg/L	8/5_10_L_NP_1	NPOC:3,916mg/L	12/5_5_L_NN_2	NPOC:16,41mg/L
5/5_10_L_NN_3	NPOC:12,94mg/L	5/5_5_H_NP_1	NPOC:29,27mg/L	8/5_10_L_NP_2	NPOC:3,930mg/L	12/5_5_L_NN_3	NPOC:14,97mg/L
5/5_10_L_NP_1	NPOC:10,39mg/L	5/5_5_H_NP_2	NPOC:18,77mg/L	8/5_10_L_NP_3	NPOC:4,441mg/L	12/5_5_L_NP_1	NPOC:6,868mg/L
5/5_10_L_NP_2	NPOC:8,546mg/L	5/5_5_H_NP_3	NPOC:18,80mg/L	8/5_10_H_NN_1	NPOC:7,167mg/L	12/5_5_L_NP_2	NPOC:6,813mg/L
5/5_10_L_NP_3	NPOC:10,61mg/L	5/5_10_H_NN_1	NPOC:20,38mg/L	8/5_10_H_NN_2	NPOC:8,131mg/L	12/5_5_L_NP_3	NPOC:6,490mg/L
MQ	NPOC:0,2799mg/L	5/5_10_H_NN_2	NPOC:15,67mg/L	8/5_10_H_NN_3	NPOC:4,977mg/L	12/5_5_H_NN_1	NPOC:5,222mg/L
EDTA 10	NPOC:10,10mg/L	5/5_10_H_NN_3	NPOC:14,76mg/L	8/5_10_H_NP_1	NPOC:5,300mg/L	12/5_5_H_NN_2	NPOC:5,886mg/L
5/5_23_L_NN_1	NPOC:16,43mg/L	5/5_10_H_NP_1	NPOC:15,36mg/L	8/5_10_H_NP_2	NPOC:3,687mg/L	12/5_5_H_NN_3	NPOC:3,275mg/L
5/5_23_L_NN_2	NPOC:8,887mg/L	5/5_10_H_NP_2	NPOC:15,89mg/L	8/5_10_H_NP_3	NPOC:4,090mg/L	12/5_5_H_NP_1	NPOC:16,73mg/L
5/5_23_L_NN_3	NPOC:13,24mg/L	5/5_10_H_NP_3	NPOC:14,90mg/L	8/5_23_L_NN_1	NPOC:2,298mg/L	12/5_5_H_NP_2	NPOC:16,46mg/L
5/5_23_L_NP_1	NPOC:5,507mg/L	5/5_23_H_NN_1	NPOC:20,03mg/L	8/5_23_L_NN_2	NPOC:2,500mg/L	12/5_5_H_NP_3	NPOC:17,16mg/L
5/5_23_L_NP_2	NPOC:6,791mg/L	5/5_23_H_NN_2	NPOC:20,00mg/L	8/5_23_L_NN_3	NPOC:2,640mg/L	12/5_10_L_NN_1	NPOC:mg/L
5/5_23_L_NP_3	NPOC:7,958mg/L	5/5_23_H_NN_3	NPOC:14,66mg/L	8/5_23_L_NP_1	NPOC:2,555mg/L	12/5_10_L_NN_2	NPOC:mg/L
8/5_5_L_NN_1	NPOC:10,68mg/L	8/5_5_H_NN_1	NPOC:14,13mg/L	8/5_23_L_NP_2	NPOC:3,192mg/L	MQ	NPOC:0,1121mg/L
8/5_5_L_NN_2	NPOC:10,50mg/L	8/5_5_H_NN_2	NPOC:10,78mg/L	8/5_23_L_NP_3	NPOC:2,307mg/L	EDTA 10	NPOC:9,712mg/L
8/5_5_L_NN_3	NPOC:11,83mg/L	8/5_5_H_NN_3	NPOC:16,08mg/L	MQ	NPOC:0,1235mg/L	12/5_10_L_NN_3	NPOC:3,800mg/L
Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result
12/5_10_L_NP_1	NPOC:3,344mg/L	10/5_5_L_NN_2	NPOC:6,345mg/L	10/5_10_H_NP_3	NPOC:5,546mg/L	15/5_5_L_NP_1	NPOC:4,935mg/L
12/5_10_L_NP_2	NPOC:3,716mg/L	10/5_5_L_NN_3	NPOC:4,820mg/L	10/5_23_L_NN_1	NPOC:1,848mg/L	15/5_5_L_NP_2	NPOC:4,603mg/L
12/5_10_L_NP_3	NPOC:3,368mg/L	10/5_5_L_NP_1	NPOC:6,776mg/L	10/5_23_L_NN_2	NPOC:1,744mg/L	15/5_5_L_NP_3	NPOC:5,145mg/L
12/5_10_H_NN_1	NPOC:5,942mg/L	10/5_5_L_NP_2	NPOC:6,847mg/L	10/5_23_L_NN_3	NPOC:2,224mg/L	15/5_5_H_NN_1	NPOC:10,54mg/L
12/5_10_H_NN_2	NPOC:8,395mg/L	10/5_5_L_NP_3	NPOC:5,257mg/L	10/5_23_L_NP_1	NPOC:1,828mg/L	15/5_5_H_NN_2	NPOC:11,4mg/L
12/5_10_H_NN_3	NPOC:9,587mg/L	10/5_5_H_NN_1	NPOC:7,308mg/L	10/5_23_L_NP_2	NPOC:1,465mg/L	15/5_5_H_NN_3	NPOC:13,51mg/L
12/5_10_H_NP_1	NPOC:5,284mg/L	10/5_5_H_NN_2	NPOC:4,241mg/L	10/5_23_L_NP_3	NPOC:1,629mg/L	15/5_5_H_NP_1	NPOC:20,23mg/L
12/5_10_H_NP_2	NPOC:4,388mg/L	10/5_5_H_NN_3	NPOC:14,41mg/L	10/5_23_H_NN_1	NPOC:5,609mg/L	15/5_5_H_NP_2	NPOC:14,86mg/L

12/5_10_H_NP_3	NPOC:7,773mg/L	10/5_5_H_NP_1	NPOC:17,43mg/L	10/5_23_H_NN_2	NPOC:3,987mg/L	15/5_5_H_NP_3	NPOC:10,69mg/L
12/5_23_L_NN_1	NPOC:0,2864mg/L	10/5_5_H_NP_2	NPOC:15,50mg/L	MQ	NPOC:0,06110mg/L	15/5_10_L_NN_1	NPOC:2,705mg/L
12/5_23_L_NN_2	NPOC:0,3143mg/L	10/5_5_H_NP_3	NPOC:7,052mg/L	EDTA 10	NPOC:9,572mg/L	15/5_10_L_NN_2	NPOC:2,504mg/L
12/5_23_L_NN_3	NPOC:0,3021mg/L	10/5_10_L_NN_1	NPOC:3.545mg/L	10/5_23_H_NN_3	NPOC:11,49mg/L	15/5_10_L_NN_3	NPOC:2,68mg/L
12/5_23_L_NP_1	NPOC:2,226mg/L	MQ	NPOC:0,05759mg/L	10/5_23_H_NP_1	NPOC:4,613mg/L	15/5_10_L_NP_1	NPOC:3,479mg/L
12/5_23_L_NP_2	NPOC:1,563mg/L	EDTA 10	NPOC:9,565mg/L	10/5_23_H_NP_2	NPOC:4,697mg/L	15/5_10_L_NP_2	NPOC:3,683mg/L
12/5_23_L_NP_3	NPOC:1,791mg/L	10/5_10_L_NN_2	NPOC:3,197mg/L	10/5_23_H_NP_3	NPOC:4,487mg/L	15/5_10_L_NP_3	NPOC:3,31mg/L
MQ	NPOC:0,04760mg/L	10/5_10_L_NN_3	NPOC:3,891mg/L	5/5_5_H_NN_1	NPOC:18,95mg/L	15/5_10_H_NN_1	NPOC:12,42mg/L
EDTA 10	NPOC:9,387mg/L	10/5_10_L_NP_1	NPOC:3,054mg/L	5/5_5_H_NN_2	NPOC:18,15mg/L	15/5_10_H_NN_2	NPOC:17,55mg/L
12/5_23_H_NN_1	NPOC:5,338mg/L	10/5_10_L_NP_2	NPOC:3,025mg/L	5/5_5_H_NN_3	NPOC:16.11mg/L	15/5_10_H_NN_3	NPOC:12,66mg/L
12/5_23_H_NN_2	NPOC:2,699mg/L	10/5_10_L_NP_3	NPOC:4,680mg/L	5/5_23_H_NP_1	NPOC:13,22mg/L	15/5_10_H_NP_1	NPOC:5,604mg/L
12/5_23_H_NN_3	NPOC:3,363mg/L	10/5_10_H_NN_1	NPOC:7,547mg/L	5/5_23_H_NP_2	NPOC:15,56mg/L	15/5_10_H_NP_2	NPOC:11,82mg/L
12/5_23_H_NP_1	NPOC:3,132mg/L	10/5_10_H_NN_2	NPOC:5,035mg/L	5/5_23_H_NP_3	NPOC:17,29mg/L	15/5_10_H_NP_3	NPOC:12,62mg/L
12/5_23_H_NP_2	NPOC:3,181mg/L	10/5_10_H_NN_3	NPOC:3,479mg/L	15/5_5_L_NN_1	NPOC:4,772mg/L	15/5_23_L_NN_1	NPOC:1,631mg/L
12/5_23_H_NP_3	NPOC:5,622mg/L	10/5_10_H_NP_1	NPOC:6,225mg/L	15/5_5_L_NN_2	NPOC:4,789mg/L	15/5_23_L_NN_2	NPOC:1,772mg/L
10/5_5_L_NN_1	NPOC:9,581mg/L	10/5_10_H_NP_2	NPOC:4,999mg/L	15/5_5_L_NN_3	NPOC:5,202mg/L	15/5_23_L_NN_3	NPOC:1,888mg/L
Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result
15/5_23_L_NP_1	NPOC:1,824mg/L	17/5_10_L_NN_3	NPOC:2,874mg/L	22/5_5_L_NN_1	NPOC:5,911mg/L	22/5_10_H_NP_3	NPOC:12,38mg/L
15/5_23_L_NP_2	NPOC:1,488mg/L	17/5_10_L_NN_1	NPOC:3,158mg/L	22/5_5_L_NN_2	NPOC:7,046mg/L	22/5_23_L_NN_1	NPOC:1,682mg/L
15/5_23_L_NP_3	NPOC:1,595mg/L	17/5_10_L_NP_2	NPOC:2,875mg/L	22/5_5_L_NN_3	NPOC:7,053mg/L	22/5_23_L_NN_2	NPOC:1,429mg/L
15/5_23_H_NN_1	NPOC:13,75mg/L	17/5_10_L_NP_3	NPOC:3,333mg/L	22/5_5_L_NP_1	NPOC:4,751mg/L	22/5_23_L_NN_3	NPOC:1,246mg/L
15/5_23_H_NN_2	NPOC:12,83mg/L	17/5_10_H_NN_1	NPOC:15,47mg/L	22/5_5_L_NP_2	NPOC:5,732mg/L	22/5_23_L_NP_1	NPOC:1,642mg/L
15/5_23_H_NN_3	NPOC:15,77mg/L	17/5_10_H_NN_2	NPOC:13,77mg/L	22/5_5_L_NP_3	NPOC:5,516mg/L	22/5_23_L_NP_2	NPOC:1,804mg/L
15/5_23_H_NP_1	NPOC:11,21mg/L	17/5_10_H_NN_3	NPOC:10,89mg/L	22/5_5_H_NN_1	NPOC:14,5mg/L	22/5_23_L_NP_3	NPOC:1,725mg/L
15/5_23_H_NP_2	NPOC:12,75mg/L	17/5_10_H_NP_1	NPOC:13,08mg/L	22/5_5_H_NN_2	NPOC:11,23mg/L	22/5_23_H_NN_1	NPOC:14,45mg/L
15/5_23_H_NP_3	NPOC:12,85mg/L	17/5_10_H_NP_2	NPOC:14,05mg/L	22/5_5_H_NN_3	NPOC:16,75mg/L	22/5_23_H_NN_2	NPOC:13,53mg/L
17/5_5_L_NN_1	NPOC:8,819mg/L	17/5_10_H_NP_3	NPOC:11,82mg/L	22/5_5_H_NP_1	NPOC:12,52mg/L	22/5_23_H_NN_3	NPOC:11,61mg/L
17/5_5_L_NN_2	NPOC:9,671mg/L	17/5_23_L_NN_1	NPOC:1,924mg/L	22/5_5_H_NP_2	NPOC:11,97mg/L	22/5_23_H_NP_1	NPOC:7,304mg/L
17/5_5_L_NN_3	NPOC:11,12mg/L	17/5_23_L_NN_2	NPOC:1,529mg/L	22/5_5_H_NP_3	NPOC:10,88mg/L	22/5_23_H_NP_2	NPOC:8,557mg/L
17/5_5_L_NP_1	NPOC:5,302mg/L	17/5_23_L_NN_3	NPOC:1,575mg/L	22/5_10_L_NN_1	NPOC:2,256mg/L	22/5_23_H_NP_3	NPOC:10,77mg/L
17/5_5_L_NP_2	NPOC:5,535mg/L	17/5_23_L_NP_1	NPOC:1,651mg/L	22/5_10_L_NN_2	NPOC:2,547mg/L	26/5_5_L_NN_1	NPOC:3,217mg/L
17/5_5_L_NP_3	NPOC:5,402mg/L	17/5_23_L_NP_2	NPOC:1,964mg/L	22/5_10_L_NN_3	NPOC:2,943mg/L	26/5_5_L_NN_2	NPOC:5,619mg/L
17/5_5_H_NN_1	NPOC:21,94mg/L	17/5_23_L_NP_3	NPOC:1,469mg/L	22/5_10_L_NP_1	NPOC:3,015mg/L	26/5_5_L_NN_3	NPOC:4,283mg/L
17/5_5_H_NN_2	NPOC:16,37mg/L	17/5_23_H_NN_1	NPOC:15,25mg/L	22/5_10_L_NP_2	NPOC:2,295mg/L	26/5_5_L_NP_1	NPOC:4,436mg/L
17/5_5_H_NN_3	NPOC:10,29mg/L	17/5_23_H_NN_2	NPOC:14,34mg/L	22/5_10_L_NP_3	NPOC:2,244mg/L	26/5_5_L_NP_2	NPOC:4,008mg/L

17/5_5_H_NP_1	NPOC:19,86mg/L	17/5_23_H_NN_3	NPOC:8,484mg/L	22/5_10_H_NN_1	NPOC:17,89mg/L	26/5_5_L_NP_3	NPOC:4,108mg/L
17/5_5_H_NP_2	NPOC:20,91mg/L	17/5_23_H_NP_1	NPOC:11,78mg/L	22/5_10_H_NN_2	NPOC:19,19mg/L	26/5_5_H_NN_1	NPOC:12,22mg/L
17/5_5_H_NP_3	NPOC:10,99mg/L	17/5_23_H_NP_2	NPOC:15,07mg/L	22/5_10_H_NN_3	NPOC:12,71mg/L	26/5_5_H_NN_2	NPOC:20,37mg/L
17/5_10_L_NN_1	NPOC:2,984mg/L	17/5_23_H_NP_3	NPOC:13,09mg/L	22/5_10_H_NP_1	NPOC:12,15mg/L	26/5_5_H_NN_3	NPOC:12,89mg/L
17/5_10_L_NN_2	NPOC:2,99mg/L	22/5_5_L_NN_1	NPOC:5,911mg/L	22/5_10_H_NP_2	NPOC:14,07mg/L	26/5_5_H_NP_1	NPOC:19,41mg/L
Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result
26/5_5_H_NP_2	NPOC:27,49mg/L	26/5_23_H_NP_2	NPOC:2,741mg/L	31/5_10_H_NP_2	NPOC:9,306mg/L	7/6_5_H_NP_2	NPOC:13,94mg/L
26/5_5_H_NP_3	NPOC:7,801mg/L	26/5_23_H_NP_3	NPOC:2,245mg/L	31/5_10_H_NP_3	NPOC:8,248mg/L	7/6_5_H_NP_3	NPOC:10,55mg/L
26/5_10_L_NN_1	NPOC:2,19mg/L	31/5_5_L_NN_1	NPOC:3,539mg/L	31/5_23_L_NN_1	NPOC:1,666mg/L	7/6_10_L_NN_1	NPOC:1,805mg/L
26/5_10_L_NN_2	NPOC:2,059mg/L	31/5_5_L_NN_2	NPOC:3,962mg/L	31/5_23_L_NN_2	NPOC:1,552mg/L	7/6_10_L_NN_2	NPOC:1,793mg/L
26/5_10_L_NN_3	NPOC:1,91mg/L	31/5_5_L_NN_3	NPOC:4,537mg/L	31/5_23_L_NN_3	NPOC:1,757mg/L	7/6_10_L_NN_3	NPOC:1,505mg/L
26/5_10_L_NP_1	NPOC:2,01mg/L	31/5_5_L_NP_1	NPOC:3,9mg/L	31/5_23_L_NP_1	NPOC:1,88mg/L	7/6_10_L_NP_1	NPOC:1,708mg/L
26/5_10_L_NP_2	NPOC:2,16mg/L	31/5_5_L_NP_2	NPOC:3,822mg/L	31/5_23_L_NP_2	NPOC:1,962mg/L	7/6_10_L_NP_2	NPOC:1,539mg/L
26/5_10_L_NP_3	NPOC:1,936mg/L	31/5_5_L_NP_3	NPOC:4,841mg/L	31/5_23_L_NP_3	NPOC:0,42975mg/L	7/6_10_L_NP_3	NPOC:1,642mg/L
26/5_10_H_NN_1	NPOC:12,08mg/L	31/5_5_H_NN_1	NPOC:24,07mg/L	31/5_23_H_NN_1	NPOC:7,432mg/L	7/6_10_H_NN_1	NPOC:12,67mg/L
26/5_10_H_NN_2	NPOC:8,858mg/L	31/5_5_H_NN_2	NPOC:12,12mg/L	31/5_23_H_NN_2	NPOC:9,332mg/L	7/6_10_H_NN_2	NPOC:16,88mg/L
26/5_10_H_NN_3	NPOC:8,432mg/L	31/5_5_H_NN_3	NPOC:7,322mg/L	31/5_23_H_NN_3	NPOC:15,7mg/L	7/6_10_H_NN_3	NPOC:14,42mg/L
26/5_10_H_NP_1	NPOC:11,68mg/L	31/5_5_H_NP_1	NPOC:7,581mg/L	31/5_23_H_NP_1	NPOC:2,613mg/L	7/6_10_H_NP_1	NPOC:11,44mg/L
26/5_10_H_NP_2	NPOC:9,671mg/L	31/5_5_H_NP_2	NPOC:7,07mg/L	31/5_23_H_NP_2	NPOC:2,229mg/L	7/6_10_H_NP_2	NPOC:14,17mg/L
26/5_10_H_NP_3	NPOC:10,65mg/L	31/5_5_H_NP_3	NPOC:7,464mg/L	31/5_23_H_NP_3	NPOC:1,844mg/L	7/6_10_H_NP_3	NPOC:12,98mg/L
26/5_23_L_NN_1	NPOC:1,418mg/L	31/5_10_L_NN_1	NPOC:2,326mg/L	7/6_5_L_NN_1	NPOC:2,949mg/L	7/6_23_L_NN_1	NPOC:1,164mg/L
26/5_23_L_NN_2	NPOC:1,128mg/L	31/5_10_L_NN_2	NPOC:2,192mg/L	7/6_5_L_NN_2	NPOC:3,346mg/L	7/6_23_L_NN_2	NPOC:1,214mg/L
26/5_23_L_NN_3	NPOC:1,244mg/L	31/5_10_L_NN_3	NPOC:2,271mg/L	7/6_5_L_NN_3	NPOC:3,36mg/L	7/6_23_L_NN_3	NPOC:1,02mg/L
26/5_23_L_NP_1	NPOC:1,516mg/L	31/5_10_L_NP_1	NPOC:2,087mg/L	7/6_5_L_NP_1	NPOC:2,74mg/L	7/6_23_L_NP_1	NPOC:1,202mg/L
26/5_23_L_NP_2	NPOC:2,315mg/L	31/5_10_L_NP_2	NPOC:2,963mg/L	7/6_5_L_NP_2	NPOC:2,626mg/L	7/6_23_L_NP_2	NPOC:1,442mg/L
26/5_23_L_NP_3	NPOC:2,044mg/L	31/5_10_L_NP_3	NPOC:2,334mg/L	7/6_5_L_NP_3	NPOC:2,243mg/L	7/6_23_L_NP_3	NPOC:1,383mg/L
26/5_23_H_NN_1	NPOC:7,616mg/L	31/5_10_H_NN_1	NPOC:7,832mg/L	7/6_5_H_NN_1	NPOC:18,49mg/L	7/6_23_H_NN_1	NPOC:31,67mg/L
26/5_23_H_NN_2	NPOC:10,5mg/L	31/5_10_H_NN_2	NPOC:11,51mg/L	7/6_5_H_NN_2	NPOC:15,19mg/L	7/6_23_H_NN_2	NPOC:17,5mg/L
26/5_23_H_NN_3	NPOC6,88:mg/L	31/5_10_H_NN_3	NPOC:15,47mg/L	7/6_5_H_NN_3	NPOC:17,26mg/L	7/6_23_H_NN_3	NPOC:24,61mg/L
26/5_23_H_NP_1	NPOC:2,256mg/L	31/5_10_H_NP_1	NPOC:6,474mg/L	7/6_5_H_NP_1	NPOC:12,87mg/L	7/6_23_H_NP_1	NPOC:1,208mg/L
Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result	Sample ID	Result
7/6_23_H_NP_2	NPOC:2,407mg/L						
7/6_23_H_NP_3	NPOC:1,945mg/L						
Specialprover:							
5/5_5_L_NN	NPOC:9,35mg/L						

5/5_5_L_NP	NPOC:8,9mg/L
5/5_5_H_NN	NPOC:18,05mg/L
5/5_5_H_NP	NPOC:18,415mg/L
5/5_10_L_NN	NPOC:11,96mg/L
5/5_10_L_NP	NPOC:9,9825mg/L
5/5_10_H_NN	NPOC:15,105mg/L
5/5_10_H_NP	NPOC:15,96mg/L
5/5_23_L_NN	NPOC:11,2275mg/L
5/5_23_L_NP	NPOC:8,583mg/L
5/5_23_H_NN	NPOC:19,85mg/L
5/5_23_H_NP	NPOC:14,96mg/L
7/5_5_L_NN	NPOC:5,632mg/L
7/5_5_L_NP	NPOC:2,625mg/L
7/5_5_H_NN	NPOC:18,75mg/L
7/5_5_H_NP	NPOC:10,49mg/L
7/5_10_L_NN	NPOC:2,073mg/L
7/5_10_L_NP	NPOC:1,978mg/L
7/5_10_H_NN	NPOC:16,02mg/L
7/5_10_H_NP	NPOC:13,18mg/L
7/5_23_L_NN	NPOC:1,216mg/L
7/5_23_L_NP	NPOC:1,356mg/L
7/5_23_H_NN	NPOC:6,694mg/L
7/5_23_H_NP	NPOC:3,304mg/L

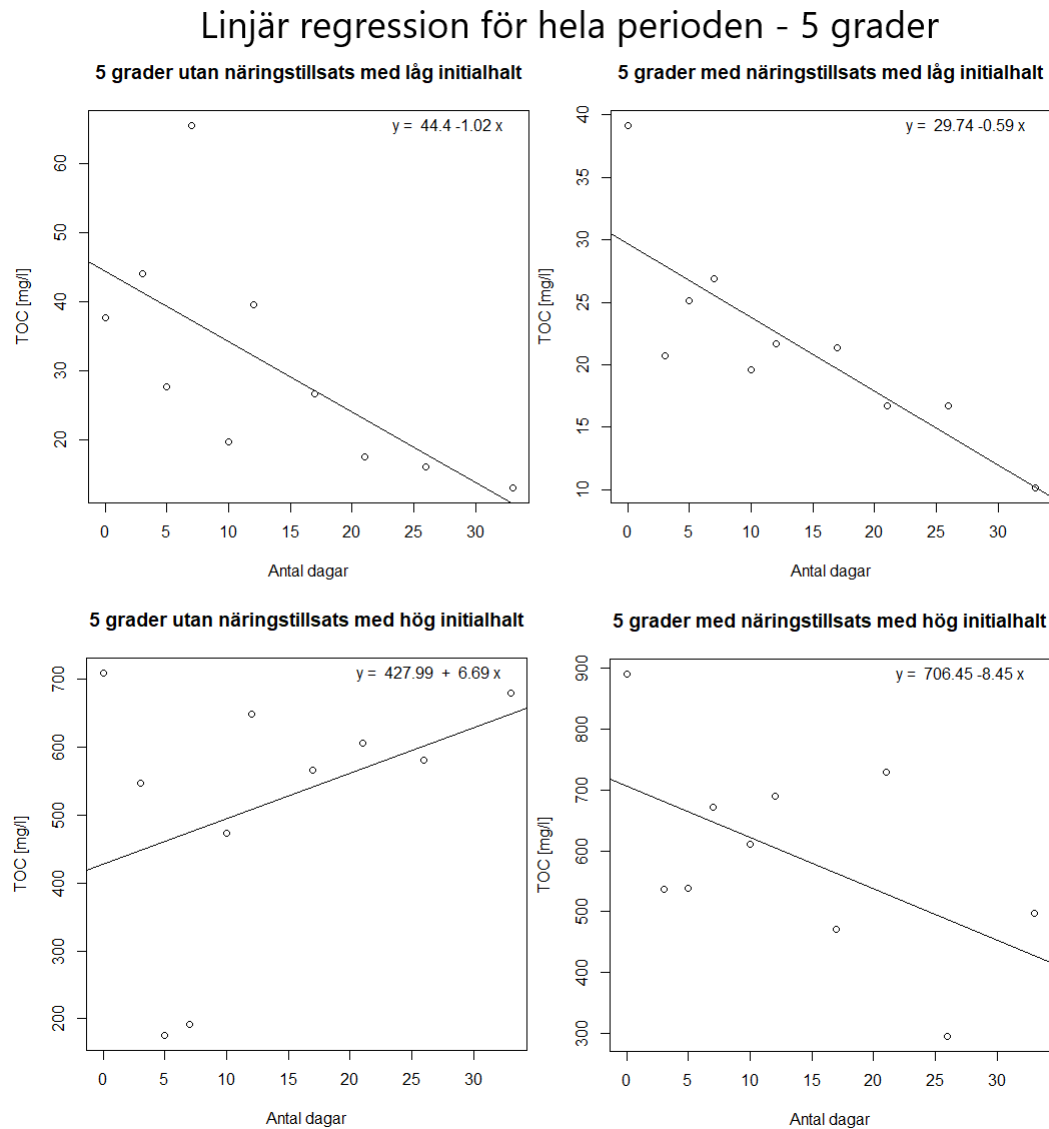
11.2 Processad data från nedbrytningsförsöket

	5 grader	5/5-2023	8/5-2023	10/5-2023	12/5-2023	15/5-2023	17/5-2023	22/5-2023	26/5-2023	31/5-2023	7/6-2023
Låg TOC-halt, ingen näring	1	38.208	42.72	38.324	70.96	18.888	35.276	23.644	12.868	14.156	11.796
L_NN	2	39.46	42	25.38	65.64	19.156	38.684	28.184	22.476	15.848	13.744
	3	35.1	47.32	19.28	59.88	20.808	44.48	28.212	17.132	18.148	13.44
Låg TOC-halt, med näring	1	43.2	23.58	27.064	27.472	19.74	21.208	19.004	17.744	15.6	10.96
L_NP	2	30.828	17.948	27.388	27.252	18.412	22.14	22.928	16.032	15.288	10.504
	3	43.48	20.696	21.028	25.96	20.58	21.608	22.064	16.432	19.364	8.972
Hög TOC-halt, ingen näring	1	758	565.2	213.96	208.88	421.6	877.6	580	488.8	962.8	739.6
H_NN	2	726	431.2	169.64	235.44	456	654.8	449.2	814.8	484.8	607.6
	3	644.4	643.2	142.72	131	540.4	411.6	670	515.6	292.88	690.4
Hög TOC-halt, med näring	1	1170.8	733.2	697.2	669.2	809.2	794.4	500.8	776.4	303.24	514.8
H_NP	2	750.8	391.84	620	658.4	594.4	836.4	478.8	1099.6	282.8	557.6
	3	752	484	300.8	686.4	427.6	439.6	435.2	312.04	298.56	422
	10 grader	5/5-2023	8/5-2023	10/5-2023	12/5-2023	15/5-2023	17/5-2023	22/5-2023	26/5-2023	31/5-2023	7/6-2023
Låg TOC-halt, ingen näring	1	46.08	19.8	14.18	26.04	10.82	11.936	9.024	8.76	9.304	7.22
L_NN	2	46.24	28.38	12.788	15.584	10.016	11.96	10.188	8.236	8.768	7.172
	3	51.76	30.288	15.564	15.2	10.72	11.496	11.772	7.64	9.084	6.02
Låg TOC-halt, med näring	1	41.56	15.664	12.216	13.376	13.916	12.632	12.06	8.04	8.348	6.832
L_NP	2	34.184	15.72	12.1	14.864	14.732	11.5	9.18	8.64	11.852	6.156
	3	42.44	17.764	18.72	13.472	13.24	13.332	8.976	7.744	9.336	6.568
Hög TOC-halt, ingen näring	1	815.2	286.68	301.88	237.68	496.8	618.8	715.6	483.2	313.28	506.8
H_NN	2	626.8	325.24	201.4	335.8	702	550.8	767.6	354.32	460	675.2
	3	590.4	199.08	139.16	383.48	506.4	435.6	508.4	337.28	618.8	576.8
Hög TOC-halt, med näring	1	614.4	212	249	211.36	224.16	523.2	486	467.2	258.96	457.6
H_NP	2	635.6	147.48	199.96	175.52	472.8	562	562.8	386.84	372.24	566.8
	3	596	163.6	221.84	310.92	504.8	472.8	495.2	426	329.92	519.2
	23 grader	5/5-2023	8/5-2023	10/5-2023	12/5-2023	15/5-2023	17/5-2023	22/5-2023	26/5-2023	31/5-2023	7/6-2023
Låg TOC-halt, ingen näring	1	65.72	9.192	7.392	1.1456	6.524	7.696	6.728	5.672	6.664	4.656
L_NN	2	35.548	10	6.976	1.2572	7.088	6.116	5.716	4.512	6.208	4.856
	3	52.96	10.56	8.896	1.2084	7.552	6.3	4.984	4.976	7.028	4.08
Låg TOC-halt, med näring	1	22.028	10.22	7.312	8.904	7.296	6.604	6.568	6.064	7.52	4.808
L_NP	2	27.164	12.768	5.86	6.252	5.952	7.856	7.216	9.26	7.848	5.768
	3	31.832	9.228	6.516	7.164	6.38	5.876	6.9	8.176	1.719	5.532
Hög TOC-halt, ingen näring	1	801.2	356.44	224.36	213.52	550	610	578	304.64	297.28	1267
H_NN	2	800	371.12	159.48	107.96	513.2	573.6	541.2	420	373.28	700
	3	586.4	225.64	459.6	134.52	630.8	339.36	464.4	275.2	628	984.4
Hög TOC-halt, med näring	1	528.8	255.96	184.52	125.28	448.4	471.2	292.16	90.24	104.52	48.32
H_NP	2	622.4	298.2	187.88	127.24	510	602.8	342.28	109.64	91.96	96.28
	3	691.6	293.76	259.48	226.48	514	523.6	430.8	89.8	73.76	77.8

SPECIAL	5 grader	5/5-2023	7/6-2023
L_NN		37.4	22.528
L_NP		35.6	10.5
H_NN		722	750
H_NP		736.6	419.6
	10 grader		
L_NN		47.84	8.292
L_NP		39.93	7.912
H_NN		604.2	640.8
H_NP		638.4	527.2
	23 grader		
L_NN		44.91	4.864
L_NP		34.332	5.424
H_NN		794	267.72
H_NP		598.5	132.16

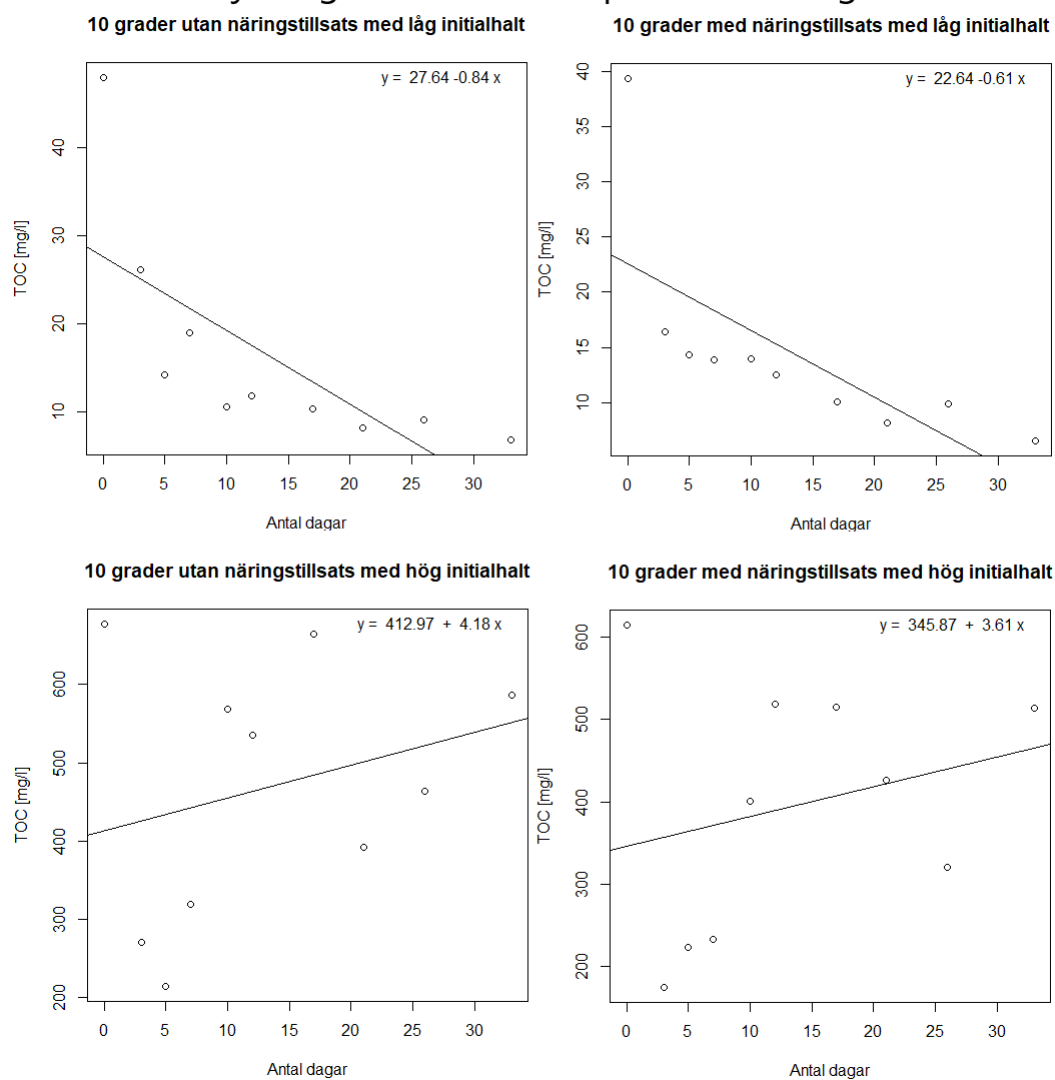
11.3 Regressionsanalyser

Nedbrytningshastigheten för hela perioden för de olika förutsättningarna observeras från ekvationen i kurvorna för linjär regression (se figur 17, 18 och 19).



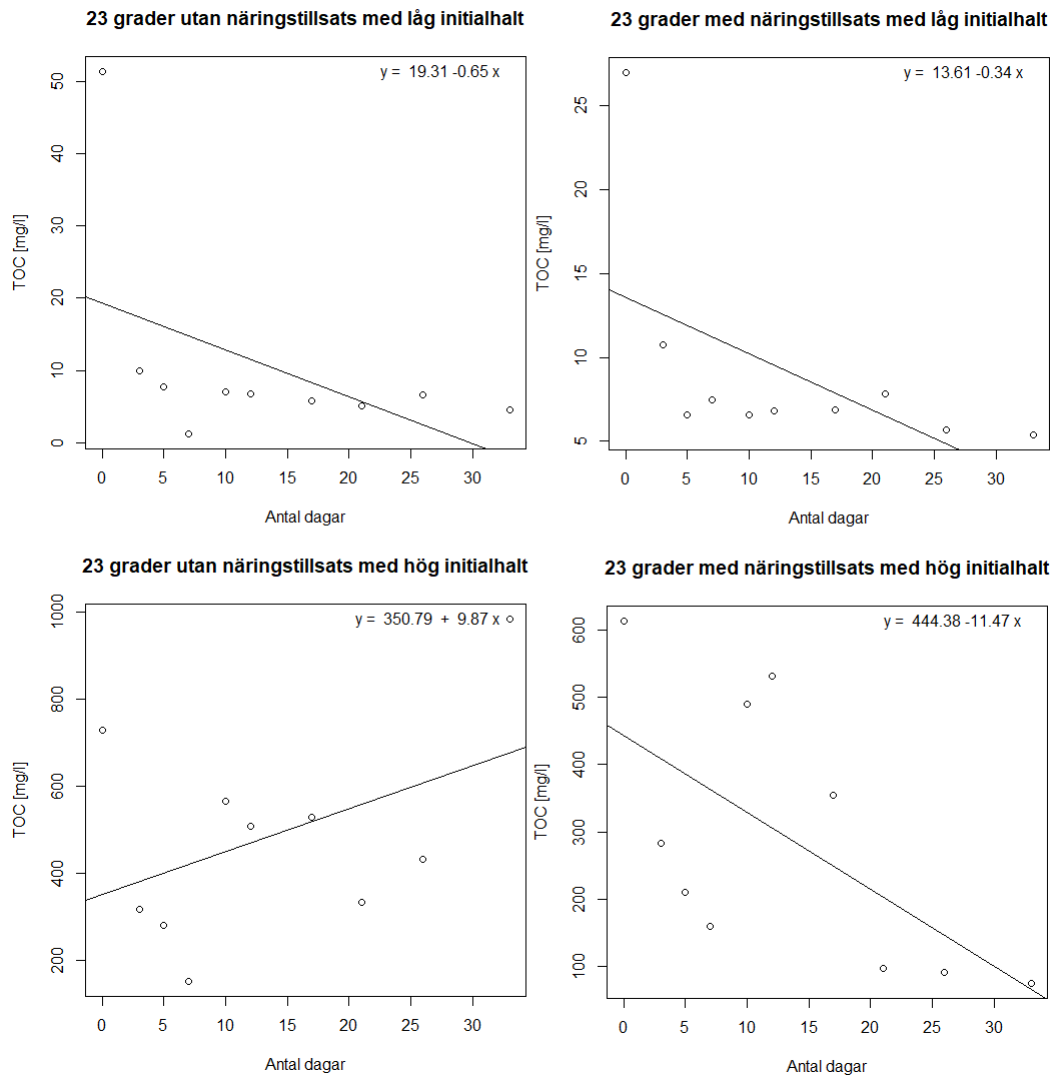
Figur 17: Linjär regression för hela perioden när temperaturen var 5 grader, med olika initialhalter av TOC och olika näringsförhållanden.

Linjär regression för hela perioden - 10 grader



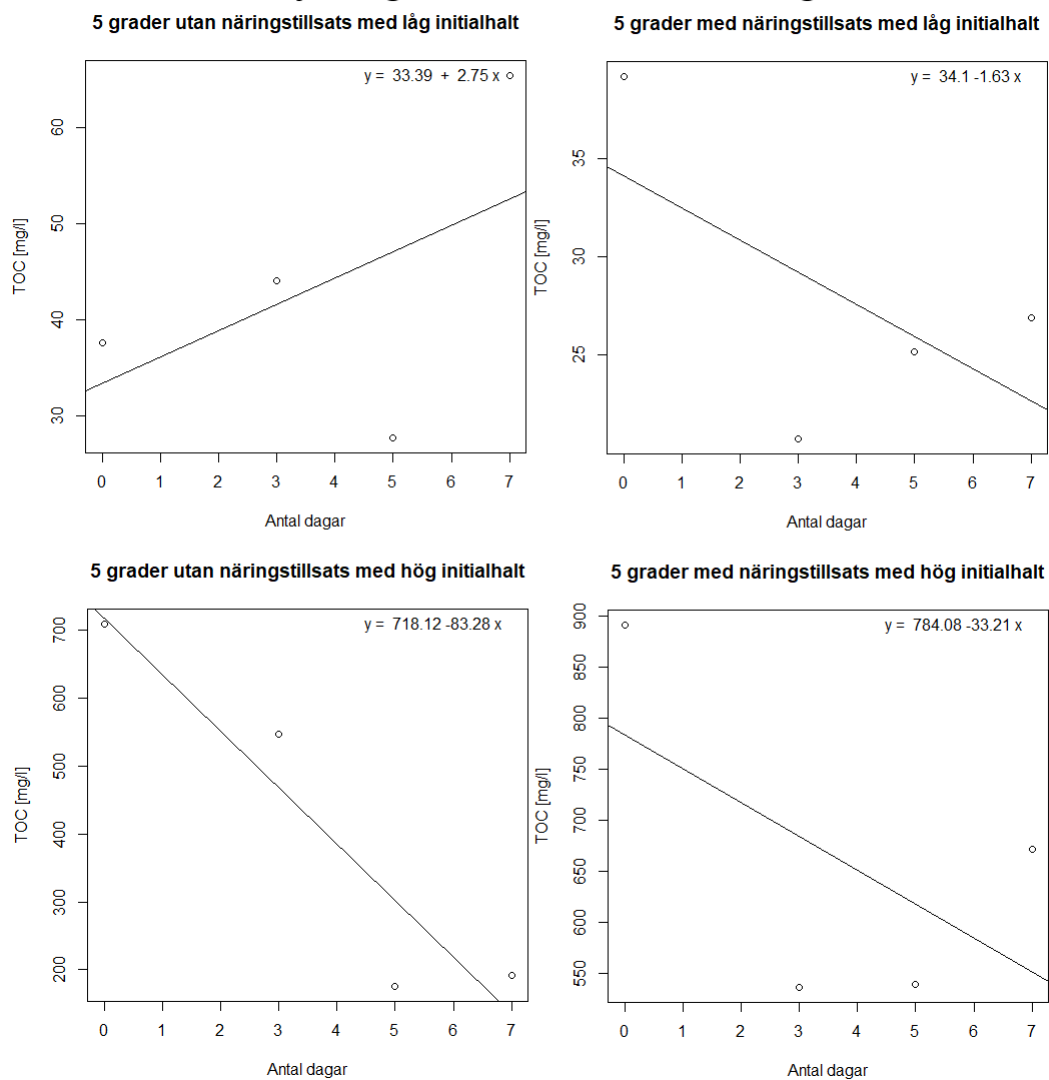
Figur 18: Linjär regression för hela perioden när temperaturen var 10 grader, med olika initialhalter av TOC och olika näringsförhållanden.

Linjär regression för hela perioden - 23 grader



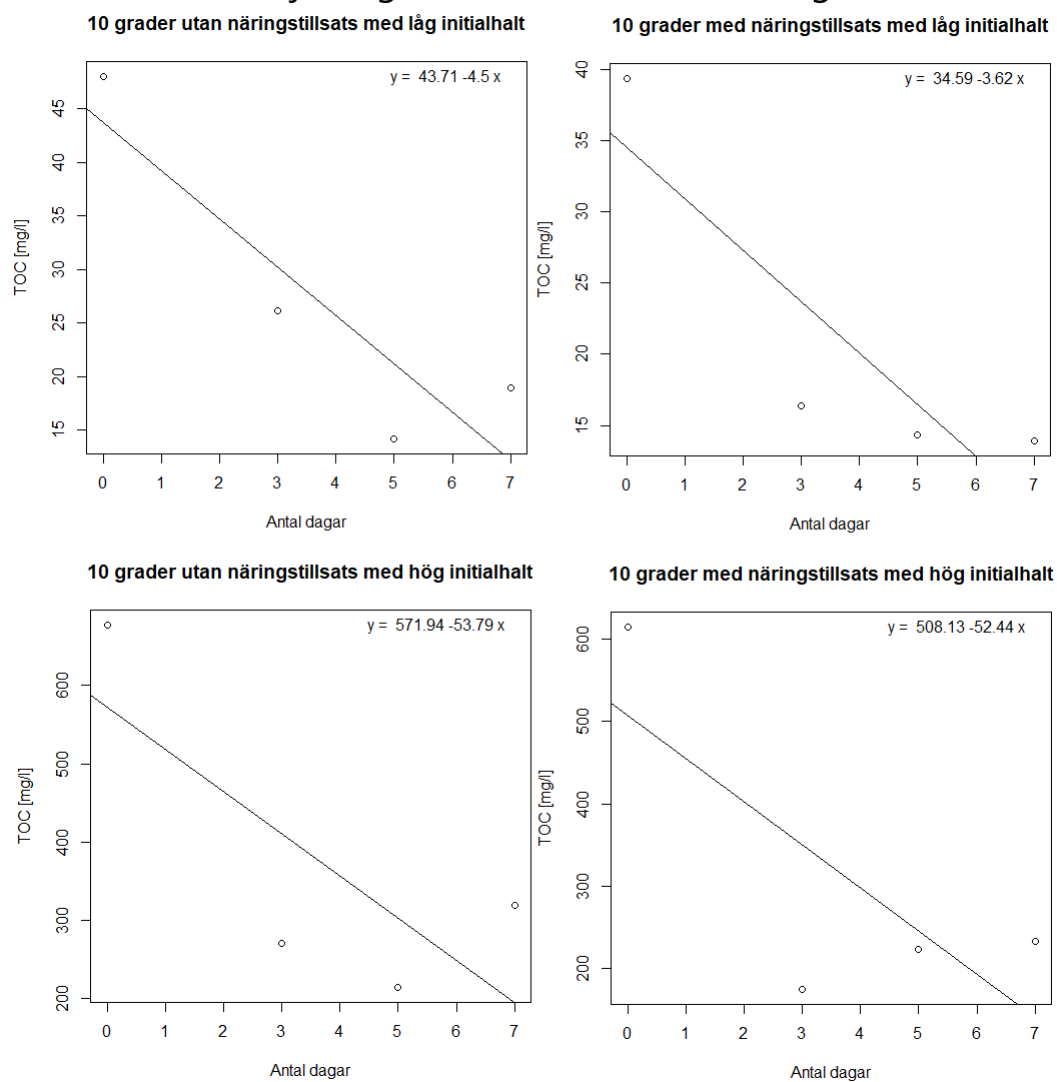
Figur 19: Linjär regression för hela perioden när temperaturen var 23 grader, med olika initialhalter av TOC och olika näringsförhållanden.

Linjär regression för en vecka - 5 grader



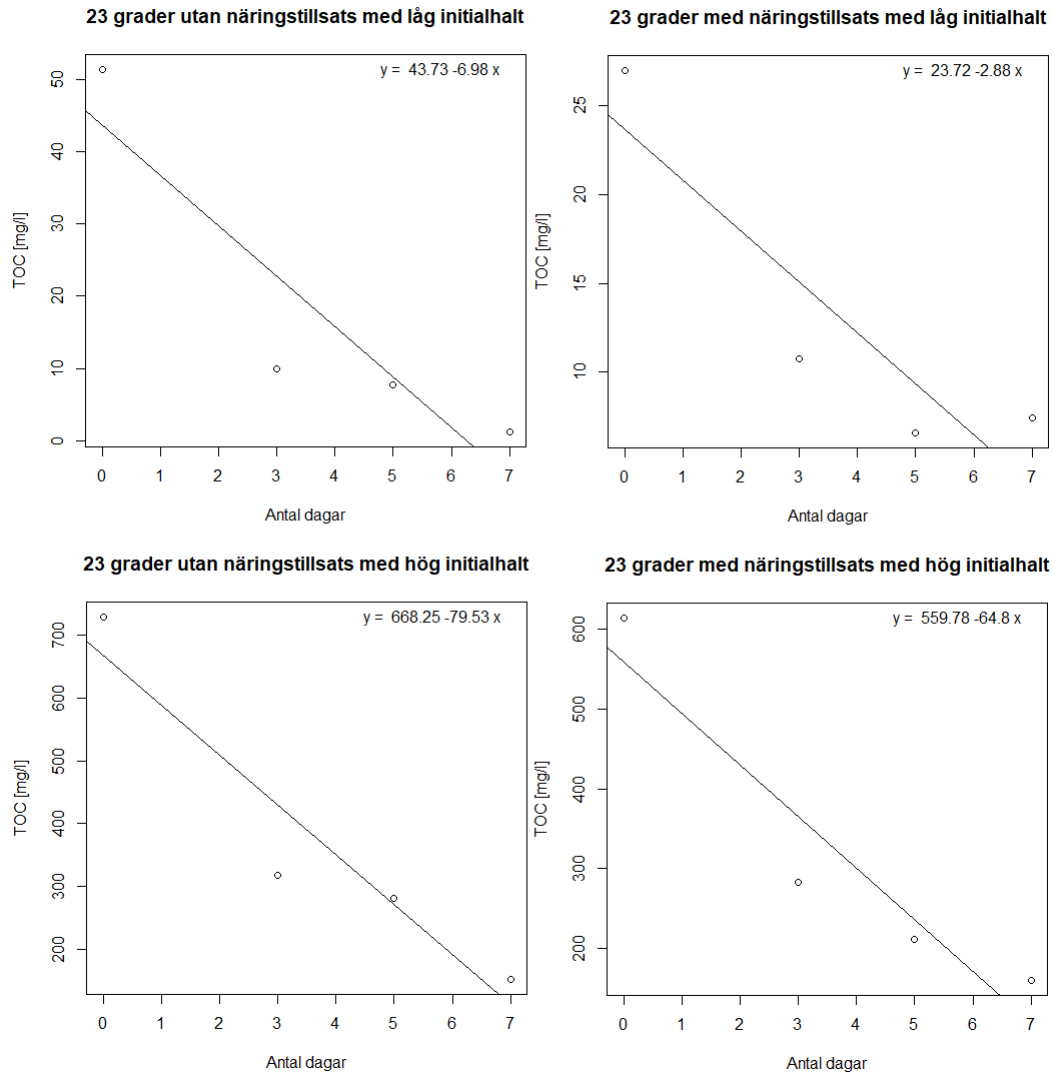
Figur 20: Linjär regression för en vecka när temperaturen var 5 grader, med olika initialhalter av TOC och olika näringsförhållanden.

Linjär regression för en vecka - 10 grader



Figur 21: Linjär regression för en vecka när temperaturen var 10 grader, med olika initialhalter av TOC och olika näringsförhållanden.

Linjär regression för en vecka - 23 grader



Figur 22: Linjär regression för en vecka när temperaturen var 23 grader, med olika initialhalter av TOC och olika näringsförhållanden.

11.4 TOC, fosfor och kvävehalter i slutet av experimentet

Tabell 12: TOC, kväve och fosforhalter i slutet av nedbrytningsförsöket

Förutsättning	TOC [mg/l]	Ammoniumkväve (NH ₄ -N) [mg/l]	Fosfatfosfor (PO ₄ -P) [mg/l]	Fosfor total (P) [mg/l]	Kväve total (N) [mg/l]	Nitrat+nitritkväve (NO ₂ 3-N) [mg/l]
5 °C, ingen näring, låg starthalt	34 (±5.1)	0.067 (± 0.007)	0.011 (± 0.005)	0.017 (± 0.0035)	0.41 (± 0.15)	0.033 (± 0.005)
10 °C, ingen näring, låg starthalt	8.5 (± 1.3)	0.031 (± 0.005)	< 0.01 (± 0.005)	0.038 (± 0.0038)	0.56 (± 0.15)	< 0.01 (± 0.005)
23 °C, ingen näring, låg starthalt	6.3 (± 0.95)	0.31 (± 0.031)	0.061 (± 0.006)	0.065 (± 0.0065)	0.70 (± 0.15)	< 0.01 (± 0.005)
5 °C, med näring, låg starthalt	9.6 (± 1.4)	4.9 (± 0.49)	1.1 (± 0.11)	1.2 (± 0.12)	10 (± 2.0)	3.9 (± 0.39)
10 °C, med näring, låg starthalt	8.4 (± 1.3)	6.0 (± 0.60)	1.5 (± 0.15)	1.8 (± 0.18)	10 (± 2.0)	4.0 (± 0.40)
23 °C, med näring, låg starthalt	6.9 (± 1.0)	3.8 (± 0.38)	1.6 (± 0.16)	1.7 (± 0.17)	8.9 (± 1.8)	4.9 (± 0.49)
5 °C, ingen näring, hög starthalt	1900 (± 290)	0.024 (± 0.005)	14 (± 1.4)	14 (± 1.4)	0.54 (± 0.15)	< 0.02 (± 0.005)
10 °C, ingen näring, hög starthalt	1500 (± 230)	0.77 (± 0.077)	13 (± 1.3)	14 (± 1.4)	2.8 (± 0.56)	< 0.05 (± 0.005)
23 °C, ingen näring, hög starthalt	1300 (± 200)	< 0.05 (± 0.005)	13 (± 1.3)	14 (± 1.4)	3.3 (± 0.66)	< 0.05 (± 0.005)
5 °C, med näring, hög starthalt	1300 (± 200)	140 (± 14)	43 (± 4.3)	44 (± 4.4)	260 (± 52)	160 (± 16)
10 °C, med näring, hög starthalt	1300 (± 200)	120 (± 12)	40 (± 4.0)	46 (± 4.6)	< 0.1 (± 0.15)	170 (± 17)
23 °C, med näring, hög starthalt	33 (± 5.0)	48 (± 4.8)	45 (± 4.5)	48 (± 4.8)	250 (± 50)	180 (±18)