



Respirationsanalys för bedömning av processavloppsvattens behandlingsbarhet i aktivt slam från Perstorp industripark

INSTITUTIONEN FÖR PROCESSTEKNIK OCH TILLÄMPAD BIOVETENSKAP | LUNDS UNIVERSITET

CLARA JELLBOM | EXAMENSARBETE 2026



Respirationsanalys för bedömning av processavloppsvattens behandlingsbarhet i aktivt slam från Perstorp industripark

av

Clara Jellbom

Examensarbete nr: 2026-10

Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik
Avdelningen för kemiteknik
Lunds universitet

Juni 2026

Handledare: **Michael Cimbritz**
Biträdande handledare: **Jonatan Eliasson**
Examinator: **Åsa Davidsson**

Bild på framsidan: Håkantorps övre damm. Foto av Clara Jellbom.

Postadress	Besöksadress	Telefon
Box 124	Naturvetarvägen 14	046-222 82 85
221 00 Lund		046-222 00 00
Hemsida		
www.ple.lth.se		

Förord

Examensarbetet har genomförts på avdelningen för kemiteknik vid institutionen för process-teknik och tillämpad biovetenskap på Lunds Tekniska Högskola tillsammans med Perstorp Specialty Chemicals AB under våren 2026. Förhoppningen är att studien utgör en start i ett fortsatt arbete med metodutveckling och -implementering för att öka driftsäkerheten på avloppsreningsverket. Arbetet markerar också slutet för min civilingenjörsutbildning i bioteknik, och en utvecklande, utmanande och rolig tid i Lund.

Jag vill först och främst tacka Michael Cimbritz för handledning och uppmuntran under arbetets gång, och min examiner Åsa Davidsson för värdefulla kommentarer. Jag vill också rikta ett stort tack till Jonatan Eliasson för handledning, stöd och givande diskussioner, samt sällskap och hjälp med det laborativa arbetet. Tack till Alexander Nielsen för utvecklande frågor, uppmuntran och korrekturläsning, samt sporadisk laboratorieassistans. Jag vill också framföra min uppskattning till Torbjörn Amilon för alla samtal om ordval och formuleringar, och för allt stöd jag fått. Tack till Niklas, Lars och Stefan för att jag fått dela driftlaboratoriet med er, och övriga kollegor på Perstorp som på olika sätt bidragit och hjälpt mig under arbetets gång.

Slutligen ett varmt tack till familj och vänner för stöd och uppmuntran under arbetets gång. Det största av tack till Simon för ovärderligt stöd och förtroende.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Skydda avloppsreningsverket! Så kan vi upptäcka skadliga ämnen i avloppsvatten

Reningen av avloppsvatten bygger på att mikroorganismer får arbeta ostört. När industrins avloppsvatten innehåller skadliga ämnen kan reningsprocessen störas – och det kan i sin tur leda till ökade utsläpp av föroreningar med allvarliga miljökonsekvenser.

Avloppsvatten kommer från allt vi människor gör – från att duscha och diska till att tvätta bilen. När vi spolar ned det i avloppsbrunnen förs det i ledningar till avloppsreningsverk, där miljarder mikroorganismer samarbetar för att bryta ned de föroreningar som avloppsvattnet innehåller. Hur lång tid det tar att bryta ned ett ämne varierar; vissa föroreningar är väldigt små och lätta för biologin att bryta ner, medan andra tar lång tid. Några ämnen kan till och med vara skadliga.

Perstorp industripark är ett företagsområde med kemisk industri där kemikalier tillverkas dygnet runt. Från fabrikerna släpps avloppsvatten ut, och detta renas i industriparkens egna avloppsreningsverk. Eftersom det finns många fabriker som tillverkar olika produkter är sammansättningen i det samlade avloppsvattnet aldrig densamma – och mikroorganismerna anpassar sig därför hela tiden efter de ämnen som de exponeras för. Det finns också många föroreningar i dessa avloppsvatten som kan vara skadliga för biologin och skapa störningar i reningsprocessen. Då försämras reningen och utsläppen av föroreningar ökar, vilket belastar miljön och kan leda till allvarliga miljökonsekvenser. Därför måste störningar undvikas!

Ett sätt att förhindra störningar är att endast ta emot de avloppsvattenströmmar som inte innehåller skadliga halter av föroreningar, eller ta emot dem tillräckligt långsamt så att mikroorganismerna inte tar skada. Det innebär att avloppsvattnets påverkan på mikrobiologin behöver undersökas innan det är där i verkligheten och riskerar att skapa störningar. Då mikrobiologin, precis som vi människor, behöver syre för att fungera, kan man undersöka påverkan genom att mäta hur snabbt mikroorganismerna tar upp syre från sin omgivning – vattnet. Det kan man göra genom att mäta syrehalten i vattnet över tid; ju snabbare den sjunker, desto mer syre förbrukar biologin och desto snabbare bryts föroreningarna ned.

För att avgöra om en avloppsvattenström är skadlig för mikroorganismerna behöver man jämföra syreupptaget med en föroreningsfri referens och med resultat från försök med olika mängder avloppsvatten. En bra referens är den syreupptagningshastighet som biologin har när inga föroreningar finns närvarande – då bryts bara döda celldelar ned för att hålla mikroorganismerna vid liv, vilket går långsamt. Om syreupptagningshastigheten efter tillsats av en avloppsvattenström är lägre än denna, tyder det på att halten skadliga föroreningar är hög och att risken för störningar är stor. Avloppsvatten kan dock hämma nedbrytningsprocessen även om referensnivån inte underskrids. Det är därför rekommenderat att göra minst två försök med olika mängder avloppsvatten. Om syreupptagningshastigheten minskar när mängden föroreningar ökar, visar det att vattnet innehåller skadliga ämnen som försämrar nedbrytningens effektivitet.

Metoden har hittills bara testats på två olika avloppsvattenströmmar, och det finns fortfarande osäkerheter kring vilka faktorer som påverkar resultaten. Trots detta visar studien att metoden fungerar väl som indikator på om – och i vilken omfattning – olika avloppsvatten kan renas i Perstorps avloppsreningsverk utan att störa mikroorganismerna. Ett rutinemässigt användande av metoden kan därför sannolikt minska risken för driftsstörningar och bidra till en mer stabil reningsprocess med lägre utsläpp av föroreningar, vilket gynnar miljön.

Sammanfattning

Avloppsreningsverk som hanterar industriellt avloppsvatten ställs inför särskilda utmaningar, eftersom sammansättningen ofta varierar kraftigt och kan innehålla toxiska ämnen. Störningar i reningsprocessen kan därför leda till ökade utsläpp och betydande miljöpåverkan, vilket gör det avgörande att undvika sådana störningar. Avloppsreningsverket vid Perstorp industripark renar processavloppsvatten från ett femtontal kemitekniska fabriker och kringliggande verksamheter genom aktivslammetoden. Totalt organiskt kol (TOC) är den främsta föroreningen, men halterna och sammansättningen varierar kraftigt, vilket leder till en anpassad och föränderlig biologi. Många föroreningar har potential att vara toxiska, och TOC-halt är inte en tillräcklig indikator på toxicitet eftersom även oorganiska ämnen och kombinationseffekter kan bidra. Det finns därför ett behov av en analysmetod som kan bedöma hur specifika processavloppsvatten påverkar respirationen hos den aktuella slamsammansättningen, som underlag vid beslut om hantering av enskilda processavloppsvatten och för att skydda reningsprocessen.

I det här examensarbetet har därför en enkel respirationsanalys för toxicitetsutvärdering av enskilda delströmmar utformats. Metoden baserades på kontinuerlig mätning av syreupptagningshastigheten i aktivt slam före och efter tillsats av utvalda processavloppsvatten. En representativ delström och en inhiberande referenslösning analyserades för att verifiera analysmetodens användbarhet och begränsningar. Vidare utvärderades två stimulerande referenssubstrat för att möjliggöra utvärdering av processprestandan över tid.

Resultaten visade att en enkel experimentuppställning med tillförlitlig syrehaltsmätning kunde utformas med den utrustning som fanns tillgänglig i driftslaboratoriet vid Perstorp industriparks avloppsreningsverk. Det framkom att den endogena syreupptagningshastigheten inte är tillräcklig som ensam referensnivå för att bedöma hämning, om optimal processprestanda eftersträvas. Kompletterande mätningar med olika provvolymerna visade sig vara nödvändigt för att analysmetoden skulle vara användbar för identifiering av hämmande halter. Vidare konstaterades att metanol i en halt motsvarande 50 mg TOC/l är lämpligt för regelbundna respirationsanalyser, för utvärdering av aktivslamanläggningens processprestanda över tid. För att erhålla mer tillförlitliga resultat bör osäkerheter i analysen av slammets SS-halt utredas och kombinationseffekter undersökas genom kompletterande respirationsförsök med det samlade inkommande processavloppsvattnet från utjämningsbassängen uppströms luftningsbassängerna. Sammantaget bedöms analysmetoden kunna användas för att indikera behandlingsbarheten i enskilda delströmmar, men främst som ett vägledande underlag.

Nyckelord: respirometri, respirationsanalys, OUR, aktivt slam, processavloppsvatten, toxicitet

Abstract

Wastewater treatment plants that treat industrial wastewater face particular challenges, as the composition is highly variable and often contains toxic compounds. Process disturbances can thus result in increased effluent loads and significant environmental impact, highlighting the importance of avoiding interference. The wastewater treatment plant at the Perstorp site treats industrial wastewater originating from around fifteen chemical production plants and other facilities within the industrial park using the conventional activated sludge process. The main contaminant is total organic carbon (TOC), but both the concentration and composition of the combined influent vary substantially, resulting in a continuously adapting and changing microbial community. Various compounds have the potential to be toxic, and TOC concentration alone is not a sufficient indicator of toxicity, as inorganic compounds and combination effects may also contribute. Thus, there is a need for an analytical method capable of determining the respiratory effects of specific process wastewater streams on the current sludge composition. The results could serve as supporting material for decisions regarding the handling of individual wastewater streams, in order to protect the biological treatment process.

In this master's thesis, a simple respirometric analysis for toxicity evaluation of specific process wastewater streams was therefore developed. The method is based on continuous measurements of the oxygen uptake rate (OUR) in activated sludge before and after the addition of selected wastewater streams. A representative process wastewater stream and an inhibitory reference solution were analyzed to verify the applicability and limitations of the analytical method. Furthermore, two potential stimulating reference substrates were evaluated to enable assessment of process performance over time.

The results showed that a simple experimental setup with reliable measurements of dissolved oxygen could be designed using the equipment available in the laboratory of the wastewater treatment plant at the Perstorp site. It was found that the endogenous OUR alone was not sufficient as a reference level for evaluating inhibition, when aiming for optimal process performance. Complementary measurements using different sample dilutions proved necessary for the analytical method to be useful for identifying inhibitory concentrations. Furthermore, methanol at a concentration of 50 mg TOC/L was determined to be appropriate for periodic respirometric measurements aimed at assessing the performance of the activated sludge process. To obtain more reliable results, uncertainties in the analysis of the suspended solids (SS) require further investigation, and combination effects should be evaluated using complementary respirometric measurements of the combined influent process wastewater from the equalization basins upstream of the aeration basins. Overall, the respirometric analysis method developed is considered useful for indicating the treatability of specific process wastewater streams, but primarily as decision-support guidance.

Keywords: respirometry, respirometric analysis, OUR, activated sludge, process wastewater, toxicity

Förkortningar

ATP	Adenosintrifosfat
BOD	Biokemisk syreförbrukning (Biochemical Oxygen Demand)
DO-sensor	Löst syre-sensor (Dissolved Oxygen sensor)
MLSS	Halten suspenderat material i luftningsbassäng (Mixed Liquor Suspended Solids)
MLVSS	Halten organiskt suspenderat material i luftningsbassäng (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids)
OUR	Syreupptagningshastighet (Oxygen Uptake Rate)
Penta	Pentaerytritol
RS1	Returslam från reningslinje 1
SOUR	Specifik syreupptagningshastighet (Specific Oxygen Uptake Rate)
SS	Suspenderat material (Suspended Solids)
TOC	Totalt organiskt kol (Total Organic Carbon)
UB1	Utjämningsbassäng 1
UB2	Utjämningsbassäng 2
VSS	Organiskt suspenderat material (Volatile Suspended Solids)

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Syfte.....	2
2	Perstorp industripark	3
2.1	Avloppsreningsverket.....	3
3	Respirometri	7
3.1	Mikrobiell respiration.....	7
3.2	Respirometriska analyser.....	8
3.3	Påverkande parametrar	9
3.4	Tolkning och utvärdering av respirometriska resultat.....	10
4	Metodik.....	15
4.1	Experimentuppställning och övergripande förfarande	15
4.2	Metodutformning.....	16
4.3	Provmaterial	18
4.4	Genomförande	20
4.5	Tillämpning av AI för textbearbetning.....	21
5	Resultat och diskussion	23
5.1	Utvärdering av experimentuppställning	23
5.2	Referenssubstrat	29
5.3	Metodutvärdering	37
6	Slutsats.....	43
7	Framtida studier.....	45
8	Referenser.....	47
	Bilaga A – Beräkningsprotokoll inför försök.....	49
	Bilaga B – Respirogram för endogen respiration	51
	Bilaga C – Respirogram för referenssubstrat	53

1 Inledning

All mänsklig aktivitet ger upphov till avfall av olika sammansättning och karaktär. En del av avfallet sker till vatten, varför avloppsreningsverk med anpassad teknik för behandling av de särskilda föroreningarna är viktigt för att undvika utsläpp till miljön. Utsläpp från avloppsreningsverk regleras av tillståndsvillkor enligt miljöbalken, samtidigt som miljökvalitetsnormerna för recipienten liksom flertalet andra föreskrifter måste efterföljas (Svenskt Vatten, 2019). Utsläppsvillkoren är formulerade för att minimera miljöpåverkan från renat avloppsvatten, då ett överskott av närsalter – fosfor (P) och kväve (N) – liksom syreförbrukande organiskt material kan leda till övergödning respektive syrebrist (Havs- och vattenmyndigheten, 2019). Föroreningar kan också vara toxiska, persistenta och/eller bioackumulerbara, varför specifika utsläppsvillkor eller utsläppsbegränsande åtgärder kan krävas för att skydda den akvatiska miljön i recipienten från negativ påverkan (Naturvårdsverket, 2011).

Industriella verksamheter är samhällsviktiga ur flera perspektiv och står för närmare 20 % av Sveriges BNP enligt Tillväxtverket (2025), men de är också en stor utsläppskälla. Det är därför avgörande att industriellt genererat processavloppsvatten hanteras och behandlas korrekt för att minimera påverkan på det akvatiska ekosystemet. Industriella avloppsvatten kan, till skillnad från hushållsspillvatten, variera kraftigt i bland annat pH samt kol- och närsaltssammansättning. Ytterligare utmaningar med dessa avloppsvatten kan associeras med höga halter metaller och andra skadliga ämnen. Industriella avloppsreningsverk, samt kommunala avloppsreningsverk med industriell belastning, möter därmed andra utmaningar i reningsprocessen än vad anläggningar som behandlar enbart hushållsspillvatten gör. Därtill kan stora variationer i inkommande flöde, beroende på produktionskonfiguration, ytterligare utmana reningsanläggningen.

Perstorp industripark samlar kemiteknisk industri och har ett industriellt avloppsreningsverk för biologisk rening av genererat processavloppsvatten. Anläggningen är utformad enligt aktivslammetoden med syfte att reducera totalt organiskt kol (TOC), som är den främsta föroreningen i industriparkens avloppsvatten. Den specifika sammansättningen av processavloppsvattnet ger upphov till en anpassad biologi, med stor variation i slammets sammansättning till följd av produktionsvariationer, vilket i sin tur påverkar reningsförmågan. Toxiska utsläpp till avloppsreningsverket kan leda till hämning av respirationen hos mikroorganismerna i slammet (Hagman & la Cour Jansen, 2007), vilket kan få förödande konsekvenser för reningsprocessen. Toxicitet är dosberoende och TOC kan utgöras av olika organiska föreningar med varierande egenskaper samtidigt som kombinationseffekter kan uppkomma när ämnen blandas (Naturvårdsverket, 2011). Dessutom kan oorganiska ämnen som salter och metaller vara toxiska för mikroorganismer. Att basera hanteringen av processavloppsvatten på uppmätt TOC-halt och eventuell information om kända ingående ämnen, riskerar därför att leda till felaktiga beslut. Därtill förbises slammets aktuella aktivitet i bedömningen, vilket har stor påverkan på reningsprocessens känslighet och tolerans.

Det finns således ett behov av en driftsanalysmetod för utvärdering av specifika processavloppsvattens förmåga att påverka respirationen hos det aktuella slammet. I OECD (2010) testnummer 209 presenteras en internationell rekommendation för hur respirationshämningstester på aktivt slam ska genomföras för utvärdering av en substans effekt på mikroorganismerna i ett avloppsreningsverk. Förutom omrörning, luftning och en löst syre-sensor (DO-sensor) betonas behovet av en respirationsinhiberande referenssubstans och avsaknad av en luftspalt i bägaren för pålitliga resultat. Hagman och la Cour Jansen (2007) presenterar en enklare uppställning för

applikation i avloppsreningsverk med acetat som föreslagen respirationsstimulerande referenssubstans. Vidare lyfter de att slammets sammansättning och egenskaper härrör från karaktären på det avloppsvatten som det exponerats för, vilket indikerar att referenssubstratet bör väljas med hänsyn till det specifika avloppsreningsverk där testet ska genomföras.

För att metoden ska vara användbar och praktiskt genomförbar på driftlaboratoriet vid avloppsreningsverket behöver den ha en enkel uppställning, bestå av få steg och ge relativt snabba resultat. Fördelen är att toxiciteten hade bedömts baserat på den verkliga effekten av delströmmens processavloppsvatten, samtidigt som den biologiska aktiviteten hade inkluderats i bedömningen. Metoden vore ett användbart verktyg i arbetet med reningsprocessen och som underlag för beslut om hantering vid utsläpp, läckage eller andra incidenter. Detta hade i sin tur skyddat biologin genom att minska risken för störningar som kan leda till försämrad reningsgrad, ökade driftskostnader och eventuellt överskridande av utsläppsvillkor.

1.1 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att utforma en enkel metod för analys av enskilda processavloppsvattens påverkan på syreupptagningsförmågan hos mikroorganismerna i industriparkens avloppsreningsverk, med de resurser och den kemiprofil som redan finns inom Perstorp industripark. Arbetet utgör en första ansats till att utveckla en användbar metodik, för att bedöma den biologiska behandlingsbarheten hos processavloppsvatten med okänd sammansättning. Syftet omfattar även att identifiera en lämplig referenssubstans för att följa reningsprocessens prestanda över tid. Metoden kommer att utformas för att möta behoven inom Perstorps industripark, men resultatet kan till viss del tillämpas även på andra industriparker och avloppsreningsverk med liknande problematik.

Metoden förväntas, i kombination med nuvarande analyser och övrig känd information, leda till mer välgrundade beslut om hantering av enskilda processavloppsvatten och därigenom öka driftssäkerheten. Färre störningar i reningsprocessen kan i sin tur resultera i minskade utsläpp från avloppsreningsverket, större marginal till gällande utsläppsvillkor och lägre driftskostnader.

2 Perstorp industripark

Perstorp industripark är belägen i norra Skåne och namngiven efter den intelligande tätorten Perstorp. Den industriella verksamheten startade 1881 med tillverkning av träkol och kort därefter ättika, och har därefter ständigt utvecklats för att idag producera främst specialkemikalier. Inom industriparken är ett femtontal tillverkande fabriker samt ett större antal serviceföretag verksamma. För att tillgodose verksamheternas renvattenbehov produceras processvatten från ytvatten taget från Ybbarpsån, som i sin tur förses med vatten från ett tiotal reglerade dammar. Avloppsvatten som uppkommer i verksamheterna hanteras och renas i industriparkens eget avloppsreningsverk innan det återförs till recipienten, Ybbarpsån.

2.1 Avloppsreningsverket

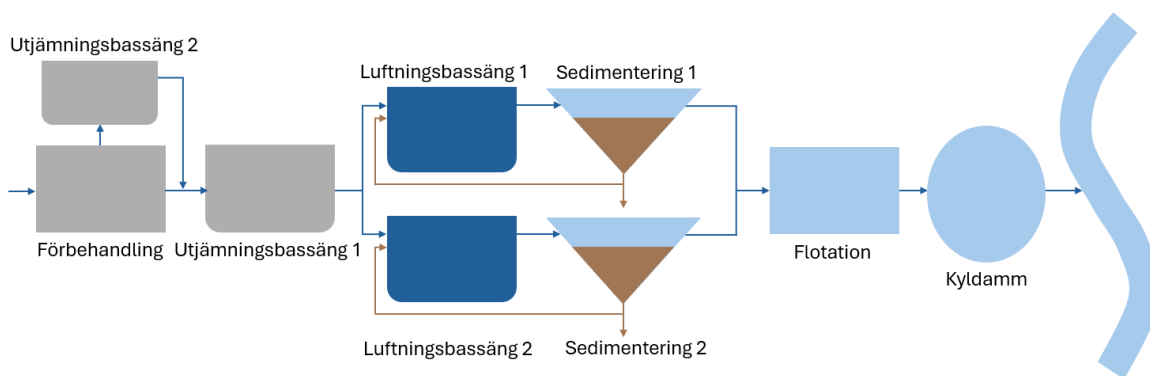
Avloppsreningsverket renar processavloppsvatten samt sanitärt avloppsvatten från verksamheterna inom industriparken. Avloppsvattnet har en komplex och kraftigt varierande sammansättning, där råvaror, produkter och biprodukter från tillverkningsprocesserna i stor utsträckning ingår som föroreningar. Närsaltsinnehållet är dock inte komplett, kväve tillförs från ett fåtal delströmmar men halten fosfor är mycket låg. Avloppsreningsverket är därför utformat med aktivslamprocessen för TOC-reduktion, med kontinuerlig dosering av fosforsyra och intermittent tillsats av urea för att uppfylla biologins närsaltsbehov.

Avloppsreningsverket är dimensionerat för ett inkommande flöde på 2 775 m³/dygn och en TOC-belastning på 3 000 kg/dygn. I tabell 2.1 redovisas den genomsnittliga hydrauliska respektive TOC-belastningen liksom TOC-reduktionen som uppnåts under åren 2023-2025. Som framgår har belastningen varit betydligt lägre än dimensioneringsvärdena, vilket till stor del beror på produktionsvariationer men också förbättringsarbete i fabrikerna. Den hydrauliska belastningen varierar dessutom med väderleken, vilket inte framgår av dygnsmedelvärdet för ett år. Trots det har TOC-reduktionen i avloppsreningsverket varit stabil på 96 %.

Tabell 2.1. Sammanställning av dygnsmedelvärdena för inkommande flöde och TOC samt uppnådd TOC-reduktion i Perstorp industriparks avloppsreningsverk under de tre senaste åren.

År	Flöde (m ³ /dygn)	TOC (kg/dygn)	TOC-reduktion (%)
2023	2 207	1 874	96
2024	2 173	1 879	96
2025	2 177	1 630	96

Avloppsreningsverket har tre behandlingssteg: mekanisk rening, biologisk rening samt efterpo-
lering med möjlighet till tillsats av fällningskemikalier. Den huvudsakliga reningen sker i det biologiska reningssteget, som för en hög grad av driftsäkerhet är uppdelat i två parallella linjer. I figur 2.1 illustreras det förenklade flödesschemat genom avloppsreningsverket.



Figur 2.1. Förenklat flödesschema över avloppsvattnets väg genom reningsprocessen på avloppsreningsverket vid Perstorp industripark. Bruna pilar visar retur- och överskottsslam från det biologiska reningssteget.

I det första reningssteget avskiljs skräp och fasta partiklar med ett rengaller följt av ett luftat sandfång. Förutom flödesmätning analyseras också pH, konduktivitet och TOC kontinuerligt på det inkommande avloppsvattnet. Vid avvikelse från uppsatta gränsvärden för pH respektive TOC dirigeras flödet automatiskt från sandfånget till utjämningsbassäng 2 (UB2). Det är en säkerhetsåtgärd för hantering och ytterligare utjämning av avvikande processavloppsvatten, uppkomna vid exempelvis utsläpp, rengöring och haveri i produktionsprocesserna. Från UB2 pumpas avloppsvattnet kontrollerat till utjämningsbassäng 1 (UB1), dit flödet normalt leds från förbehandlingen. I UB1 sker utjämning av flöde, temperatur, pH samt TOC- och salthalt med en uppehållstid på cirka ett dygn, och vid behov tillsätts natriumlut för pH-justerings.

Från UB1 pumpas avloppsvattnet till de två parallella luftningsbassängerna (LB1 respektive LB2). LB1 är en pluggflödesreaktor och LB2 är en totalomblandad reaktor, vilket ger upphov till differentiering av biologins sammansättning och egenskaper. Syresättning och omblandning sker genom membranluftare på bassängernas botten. Trots avsaknad av en anoxisk zon sker både nitrifikation och denitrifikation utöver nedbrytning av det organiska materialet. I de efterföljande sedimenteringsbassängerna avskiljs slammet från klarfasen, som i sin tur leds till det avslutande reningssteget. I flotationen avskiljs suspenderade partiklar som inte sedimenterat med hjälp av dispersionsvatten. Vid behov tillsätts aluminiumbaserade fällningskemikalier för utfällning av fosfor och i viss mån organiskt material. Överskottsslam från den biologiska reningen, liksom kemiskt slam från flotationen, avvattnas och förbränns i industriparkens biobränslepanna.

Slutligen passerar det renade avloppsvattnet mätpunkten för utgående vatten, där online-mätning liksom provtagning sker för analys av parametrar med utsläppsvillkor. För att minska den termiska belastningen på recipienten rinner det renade avloppsvattnet till en konstgjord kyldamm. I dess tre sektioner sker successiv temperatursänkning och viss avdunstning, och utloppet mynnar ut i recipienten Ybbarsån.

2.1.1 Analyser

Driftnalyser genomförs på stickprov från utvalda positioner i avloppsreningsverket som komplement till online-mätningar och som underlag för regleringen av reningsprocessen. TOC- och närsaltshalter mäts i utjämnings- och sedimenteringsbassängerna samt i utgående vatten. Sus-

penderat material (SS), som för luftningsbassänger ofta benämns slamhalt eller MLSS från engelskans mixed liquor suspended solids, bestäms gravimetriskt genom sugfiltrering följt av torkning vid 105 °C. Filterpapper med porstorleken 30 µm används för prover från luftningsbassängerna och returslammet medan klarfasen i sedimenteringsbassängerna och utgående vatten filtreras genom glasfiberfilter med 1,6 µm i partikelretention. Dessutom mäts slamsedimenteringsvolymen i luftningsbassängerna, och sammantaget fångar dessa analyser variationer och egenskaper hos biologin. Vidare utförs ackrediterade TOC-analyser på flödesproportionellt uttagna dygnsprover på inkommande avloppsvatten till och utgående vatten från avloppsreningsverket samt minst var tredje dag på samtliga fabrikers processavloppsvatten.

Var tredje år genomförs ett omfattande karakteriserings- och kartlägningsprogram av de stora delströmmarna för att undersöka deras behandlingsbarhet i industriparkens avloppsreningsverk respektive påverkan på recipienten. Ett flertal kemiska och mikrobiella analyser genomförs hos ett externt bolag. En av analyserna de genomför på varje delström är ett heterotroft respirationshämningsförsök med tre olika provspädningar och aktivt slam från industriparkens avloppsreningsverk enligt SS-EN ISO 8192-2007. Ett nedbrytbarhetstest genomförs också på varje delström samt på produkten pentaerytritol, enligt OECD 301A/302B.

3 Respirometri

Respirometri syftar generellt till mätningen av organismers konsumtionshastighet av en slutgiltig elektronacceptor som uppskattning på hastigheten av deras metabolism (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Elektronacceptorn varierar beroende på studerad organism och dess metabolism. I vissa fall kan produktionshastigheten av koldioxid mätas istället, men dess association med karbonatsystemet kräver ytterligare mätningar för tillförlitliga resultat. Respirometriska mätningar utförs genom att mäta halten av vald elektronacceptor över tid, antingen i luft eller löst i vatten beroende på organism, för att förstå i vilken hastighet som den förbrukas, eller produceras. Denna hastighet kan sedan kopplas till hastigheten av de metabola processerna som sker i organismen; en högre upptagnings- respektive produktionshastighet indikerar en högre aktivitet (Hagman & la Cour Jansen, 2007). Genom att göra upprepade försök under samma experimentförhållande kan man se förändringar i aktiviteten mellan populationer, över tid och som respons på yttre faktorer.

När respirometriska mätningar görs på aktivt slam är det inte metabolismen hos en enskild organism som undersöks, utan den sammanlagda metabola aktiviteten för hela det mikrobiella samhället som utgör slammet (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Den vanligast förekommande respirometriska analysen på aktivt slam är att mäta syreupptagningshastigheten, vanligtvis kallad OUR efter engelskans oxygen uptake rate, för att fastställa den aeroba nedbrytningsprocessen av TOC (Hagman & la Cour Jansen, 2007).

3.1 Mikrobiell respiration

Mikrobiell respiration är den metabola process som genererar adenosintrifosfat (ATP) genom att förflytta elektroner från en elektrondonator genom elektrontransportkedjan till en slutgiltig oorganisk elektronacceptor (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Energin som lagrats i de energirika fosfatbindningarna i ATP-molekylen frigörs sedan genom hydrolys, och används i cellen för att driva andra metabola processer samt till biosyntes och cellulärt underhåll. För heterotrofa bakterier är elektrondonatorn organiska kolföreningar som oxideras till koldioxid, och elektronacceptorn utgörs av molekyllärt syre som reduceras till vatten (Davis, 2010, s. 22-15). Nitrifierare är kemoautotrofa aeroba mikroorganismer vars elektrondonatorer utgörs av oorganiska kväveföreningar – ammonium och nitrit – som oxideras. Förutom heterotrof biomassa och nitrifierare består aktivt slam av protozoer, svampar och metazoer liksom andra autotrofa bakterier som alla bidrar till den totala syreförbrukningen (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Dessutom kan viss syreförbrukning härledas till kemisk oxidation av oorganiska elektrondonatorer. Detta gör det svårt att särskilja de involverade syreförbrukande processerna ifrån varandra, med undantag för nitrifikation som kan inhiberas med effektiva nitrifikationshämmare (OECD, 2010; Hagman & la Cour Jansen, 2007).

3.1.1 Endogen och exogen respiration

Vidare kan respirationen delas in i två huvudtyper – endogen och exogen – beroende på substratets ursprung. Exogen respiration innebär att organismer tar upp och oxiderar substrat från sin omgivning, och deras metabola aktivitet samt syreupptagningsförmåga är proportionell till mängden tillgängligt substrat och hur lättnedbrytbart det är (Hagman & la Cour Jansen, 2007). Endogen respiration inträffar i frånvaro av externt substrat, då intracellulära reserver eller död biomassa oxideras för att tillgodose energibehovet och bibehålla livsuppehållande metabola processer, vilket resulterar i avsevärt lägre syreförbrukning (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Dessa två typer av respiration kan användas vid utvärdering av respirometriska analyser, för

jämförelse av aktiviteten hos aktivt slam över tid, eller mellan olika avloppsreningsverk, förutsatt att samma substrat används (Hagman & la Cour Jansen, 2007).

3.2 Respiometriska analyser

Respiometriska analyser kan genomföras på en mängd olika sätt, från enkla uppställningar med manuell avläsning till komplexa instrument med full automation. Spanjers och Vanrolleghem (2016) förklarar att alla aeroba respiometriska mätningar av aktivt slam kan klassificeras i åtta grupper utifrån vilken fas – gas eller vätska – som mätningen görs i samt huruvida någon av, eller båda, faserna är statiska. Gemensamt för alla analyserna är behovet av en reaktor eller bägare med omrörning att utföra testet i samt ett anpassat mätinstrument (Hagman & la Cour Jansen, 2007). För respirationsanalys av aktivt slam är det vanligaste förfarandet att mäta halten löst syre i vätskefasen med en DO-sensor, efter engelskans dissolved oxygen, och därefter lösa massbalansen av syre i vätskefasen (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Då båda faserna är statiska och masstransport från luft till vätska försummas, kan syreupptagningshastigheten, r_{O_2} , beräknas genom att mäta hur syrehalten, c_{O_2} , sjunker i vätskan över tid, t , enligt ekvation 1.

$$\frac{\Delta c_{O_2}}{\Delta t} = -r_{O_2} \quad (1)$$

Syrehalten minskar normalt linjärt i intervallet 2,0-7,0 mg O₂/l till följd av respirationen, men utanför dessa gränsvärden kan syrekonzentrationen i sig själv inverka på syreupptagningshastigheten (OECD, 2010). För låga halter substrat kan också begränsa respirationen vilket leder till avvikelser från linjäriteten (Spanjers & Vanrolleghem, 2016), och sektioner med lutningsförändring ska därför inte användas för beräkning av syreupptagningshastigheten (OECD, 2010). Enligt rekommendationerna från OECD (2010) får syrehalter som ligger utanför gränsvärdena inkluderas i beräkningarna, förutsatt att syrehalten avtar linjärt och att inga lutningsförändringar observeras vid gränsvärdespassagen. En annan möjlighet är att mäta syrehalten i ett snävare intervall med marginal till gränsvärdena, Wentzel m. fl. (1995) valde exempelvis att enbart mäta mellan 4-6 mg O₂/l. För kontinuerliga respirationsmätningar över en längre tid kan luftning behöva ske intermittent för att öka syrehalten i vätskan (Hagman & la Cour Jansen, 2007).

3.2.1 Strategier för begränsad syretransport

I praktiken kan experimentuppställningen utformas utan luftspalt för att undkomma antagandet om försummad masstransport av syre (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Ett annat sätt att minska syretransporten från luft till vätska under respiometriska mätningar presenteras av Wentzel m. fl. (1995). De utvecklade en enkel OUR-metod utan aktivt slam för att kvantifiera koncentrationen heterotrof aktiv biomassa och biologiskt lättnedbrytbar COD (kemiskt oxiderbart material) i obehandlat kommunalt avloppsvatten. För att minimera syretransporten mellan vätska och omgivande luft under mätningarna täckte de vattenytan med plastkolor, som utöver enkel hantering möjliggör ytrörelse vid omrörning och intermittent luftning. Av samma anledning använde Wärff m. fl. (2025) frigolitbitar för sina respiometriska försök. Fall m. fl. (2006) uteslöt däremot flytande material på vattenytan och begränsade syretransporten från luften genom att använda smalhalsade bägare och låg omrörningshastighet, vilket förhindrade vortexbildning vid ytan.

3.2.2 Respirometri i gasfas och kombinerade metoder

För experimentuppställningar med minst en dynamisk fas blir termerna i massbalansen fler, och kompletterande mätningar alternativt mer komplex utrustning krävs för att beräkna syreupptagningshastigheten i slammet (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Mätningar i gasfasen är också ett alternativ, som främst används för att undkomma interferenser i vätskefasen såsom biofilmstillväxt på DO-sensorn. För att beräkna syreupptagningshastigheten hos det aktiva slammet krävs då en kompletterande massbalans av syre i gasfasen, vilket medför fler mätningar eller introduktion av ytterligare antaganden. De fysikaliska gasmätningarna riskerar dock att störas av halten koldioxid som frigörs, något som kan motverkas genom kemisk absorption. Slutligen lyfter författarna fram att mätningar av vätske- och gasfasen kan kombineras för mer pålitliga beräkningar av syreupptagningshastigheten, om än med en ökad tidsåtgång som följd.

3.2.3 Analystid

Respirometriska analyser kan utöver uppställning och mätteknik också skilja sig i längd. Hagman och la Cour Jansen (2007) utförde sina mätningar mellan frekvent återluftning under cirka 4 timmar, varav en femtedel bestod av endogen respirationsanalys. Kristensen m. fl. (1992) bibehöll istället en syrehalt på 6-8 mg O₂/l genom kontinuerlig luftning av reaktorn och tog regelbundet ut en delmängd för mätning av syreförbrukningen. För att fastställa den endogena respektive exogena respirationen utfördes parallella försök där kolkälla enbart var tillsatt i en av reaktorerna. Wentzel m. fl. (1995) mätte syreförbrukningen kontinuerligt under 20 timmar i ett system med automatisk luftning då syrehalten nått 4 mg O₂/l. En välkänd respirometrisk analys är mätning av biokemisk syreförbrukning (BOD) i avloppsvatten som indikation på föroreningsnivå (Wärff m. fl., 2025), där analysen pågår i flera dygn upp till månader (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). OECD (2010) föreslår i sin metod för akut respirationshämningstest att syrehalten ska mätas i reaktorn efter 3 timmars kontaktid, men framhåller att längre tid kan vara lämpligt likväl som kortare, exempelvis för flyktiga eller lättnedbrytbara ämnen.

3.3 Påverkande parametrar

Förutom tillgång till en primär elektrondonator och en slutgiltig elektronacceptor krävs tillräckligt med närsalter och mikronäringsämnen samt en gynnsam miljö för mikrobiell tillväxt (Davis, 2010, s. 22-10). Således kan respirationshastigheten i aktivt slam påverkas negativt om en bristsituation uppstår, syrehalten är för låg eller avvikelser från optimalt pH eller temperatur uppstår, trots ett överskott av substrat.

3.3.1 Temperatur och pH

Den heterotrofa nedbrytningsprocessen av organiskt material har ett pH-optimum vid 7, men fungerar normalt i intervallet 6-9 (Hagman & la Cour Jansen, 2007), medan nitrifikationen är känsligare och sker mellan pH 6,8-8,0 (Davis, 2010, s. 22-19). Båda processerna är aeroba, men heterotrof biomassa begränsas först vid syrehalter under 2,0 mg O₂/l, medan nitrifikationshastigheten ökar med syrehalten upp till omkring 3-4 mg O₂/l (Davis, 2010, s. 22-17–22-19). Mikrobiologin i aktivslamanläggningar uppvisar generellt optimal aktivitet vid 25-35 °C. Högre temperaturer leder till termisk stress och kraftigt försämrad rening samtidigt som syrets löslighet i vattnet sjunker, medan aktiviteten sjunker successivt med lägre temperaturer. Nitrifiering upphör vid cirka 5 °C och vid omkring 2 °C förblir även den heterotrofa biomassan vilande (Krzeminski m. fl., 2012).

Eftersom dessa parametrar har en inverkan på syreupptagningshastigheten som mäts i respirometriska analyser är det viktigt att beakta dem i experimentuppställningen. Hagman och la Cour Jansen (2007) pH-reglerade enbart avloppsvatten som föll utanför intervallet 6-9 och ansåg inte

att någon justering behövdes under testgenomförandet trots att koldioxidproduktionen tenderar att öka pH-värdet något. Spanjers och Vanrolleghem (2010) rekommenderar att prov förbehandlas innan BOD-analys genom att pH-justeras till mellan 6,5 och 7,5. I respirationsanalysen utförd av Wentzel m. fl. (1995) övervakades och reglerades pH-värdet kontinuerligt till $7,5 \pm 0,2$. Trots olika perspektiv på pH-reglering genomfördes samtliga försök i alla tre studier med konstant temperatur på 20 °C, vilket är i enlighet med rekommendationerna från OECD (2010). Samtidigt lyfter Hagman och la Cour Jansen (2007) att det kan vara värdefullt att utföra försöken vid samma temperatur som i den verkliga anläggningen, särskilt då resultaten tillämpas för driftskontroll.

3.3.2 Närsalter

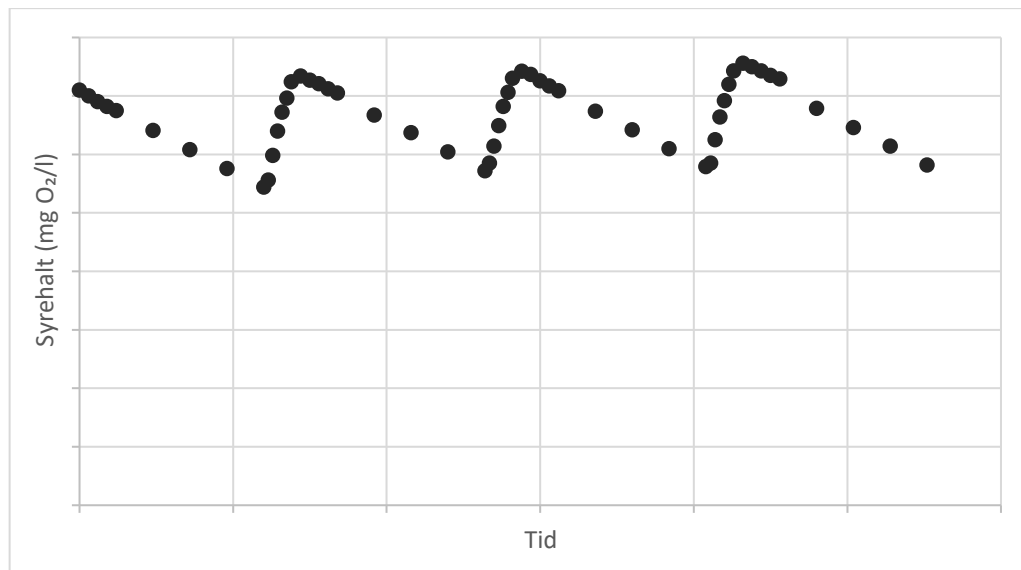
Respirationshämmning kan uppstå till följd av näringsbrist, vilket kan leda till felaktiga slutsatser om det analyserade provet. I rekommendationerna från OECD (2010) beskrivs ett syntetiskt avloppsvatten bestående av bland annat köttextrakt, urea och flertalet salter, som ska användas i samtliga försök för att tillgodose mikrobiologins behov av mikronäringsämnen och närsalter. Dock är respirationshämmningstestet utformat för att utvärdera substansers påverkan på aktivt slam, vilket medför att dessa provlösningar har ett mindre komplett innehåll jämfört med avloppsvatten, och därmed uppstår ett behov av tillsats av ett syntetiskt medium. Wentzel m. fl. (1995) som undersökte obehandlat kommunalt avloppsvatten tillsatte inga näringsämnen alls, och trots att försöken pågick i 20 timmar erhöles goda resultat. Baserat på samma metod, men kortare tid och med tillsats av fosfatbuffert, karakteriserade Wärff m. fl. (2025) inkommande avloppsvatten till flertalet svenska avloppsreningsverk. Hagman och la Cour Jansen (2007) adderade ammoniumsulfat och kaliumdivätefosfat för att tillgodose närsaltsbehovet under sina respirationsförsök med aktivt slam, vilket visar att behovet av näringstillsats varierar beroende på provtyp och metodik.

3.3.3 Aktivt slam – förberedelser och slamhalt

Förutom mikroorganismernas aktivitet i det aktiva slammet påverkar även mängden aktivt slam i reaktorn den totala syreförbrukningen, och därmed den syreupptagningshastighet som beräknas enligt ekvation 1. Kristensen m. fl. (1992) genomför därför respirationsanalyser för fastställande av maximal specifik syreupptagningshastighet (SOUR) med 2-3 g SS/l och ett överskott av acetat. OECD (2010) rekommenderar istället 1,5 g SS/l i sitt metodförslag och föreslår att slammet tas vid, eller i närhet av, utloppet från luftningsbassängen och används samma dag. Vidare förespråkar de att tvätta slammet före analys genom upprepade centrifugering, dekantering och återsuspendering. Det gjorde varken Hagman och la Cour Jansen (2007) eller Fall m. fl. (2006); istället luftades slammet i 30 minuter respektive 3-4 timmar före påbörjad analys för att nå endogen respiration. Under denna luftning sker nedbrytning av lättnedbrytbart organiskt material som har frigjorts genom hydrolys i slammet, och som annars hade bidragit till en högre syreförbrukning.

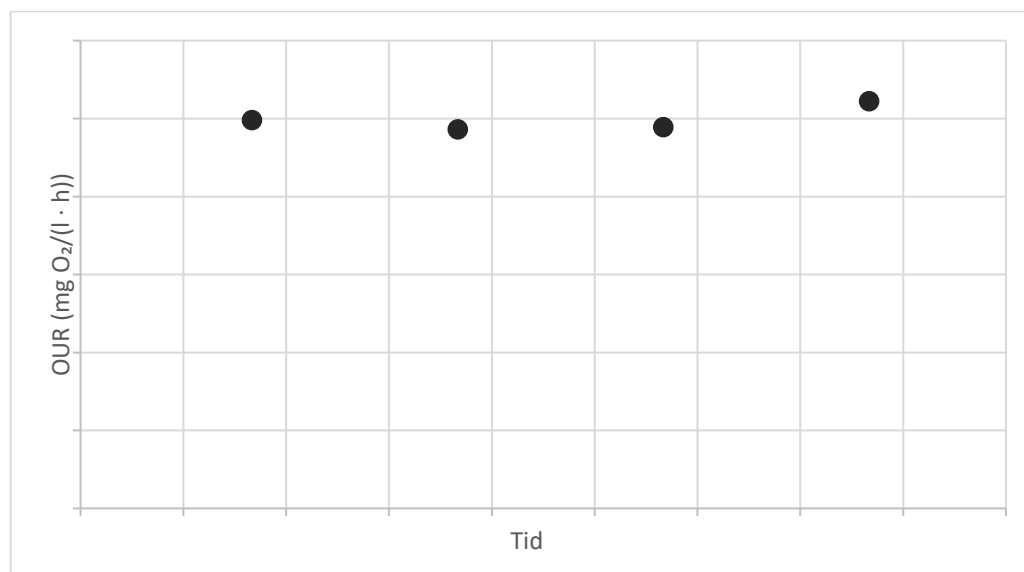
3.4 Tolkning och utvärdering av respirometriska resultat

Resultatet av en aerob respirationsanalys utgörs av uppmätta syrehalter vid olika tidpunkter, vanligtvis presenterade i form av en graf. Om intermittent luftning har använts får grafen ett karakteristiskt sågtandsmönster, vilket illustreras i figur 3.1: de linjärt avtagande syrehalterna motsvarar syreupptaget kopplat till respirationen, medan de stigande syrehalterna beror på återluftningen.



Figur 3.1. Illustration av syrehaltskurva vid intermittent luftning. Stigande syrehalt motsvarar perioder med luftning, medan avtagande syrehalt beror på syreupptag kopplat till respiration.

Ur de linjärt minskande sektionerna i syrehaltskurvan kan syreupptagningshastigheten beräknas enligt ekvation 1. Förändringar i OUR under analysens gång kan därefter visualiseras i en graf, ett så kallat respirogram (Hagman & la Cour Jansen, 2007). En illustration ges i figur 3.2.



Figur 3.2. Illustration av respirogram som motsvarar syrehaltsmätningen i figur 3.1 och anger syreupptagningshastigheten (OUR) över tid.

3.4.1 Specifik syreupptagningshastighet

Den specifika syreupptagningshastigheten, s_{O_2} , erhålls genom att normalisera syreupptagningshastigheten med halten organiskt suspenderat material, vanligtvis uttryckt som VSS efter engelskans volatile suspended solids, enligt ekvation 2 (Hagman & la Cour Jansen, 2007).

$$s_{O_2} = \frac{r_{O_2}}{VSS} \quad (2)$$

Halten organiskt suspenderat material översätts ofta till halten aktiv biomassa, men det är endast en god approximation som kräver kompletterande analyser för att fastställas (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Vidare antas VSS generellt utgöra 60-80 % av SS, och för luftningsbassänger kan halten aktiv biomassa, MLVSS efter engelskans mixed liquor volatile suspended solids, således uppskattas från analys av MLSS (Davis, 2010, s. 23-27). SOUR är framför allt användbar vid utvärderingar och jämförelser mellan analyser eftersom den korregerar för variationer i halten aktiv biomassa, vilket har en direkt inverkan på den uppmätta syreupptagningshastigheten (Spanjers & Vanrolleghem, 2016).

3.4.2 Respirometriska referenser och tolkning av resultat

För att kunna dra tillförlitliga slutsatser av resultaten från respirometrin krävs en eller flera kompletterande referenser. I flera studier används den endogena respirationen som en referens vid utvärdering av toxicitet, där en ökad OUR efter tillsats av provlösning indikerar stimulering av respirationen medan en minskning tyder på hämning (Hagman & la Cour Jansen, 2007; Fall m. fl., 2006). Eftersom den endogena respirationsprofilen är relativt stabil framträder avvikelser efter provtillsats tydligt. Hagman och la Cour Jansen (2007) observerade en tydlig hämning av respirationen vid tillsats av toxiskt avloppsvatten och framhöll att de snabbt erhållna resultaten är en fördel med denna typ av respirometrisk toxicitetsutvärdering. Metoden är dock inte lämplig för en kvantitativ beskrivning av den toxiska effekten, och provlösningar som endast är svagt hämmande kan vara svåra att detektera.

Spanjers och Vanrolleghem (2016) påpekar dock att aktivt slam är mindre känsligt vid endogen respiration, och att exogen respiration kan inträffa om provlösningen innehåller organiskt material vilket gör testet oanvändbart. De presenterar därför en exogen toxicitetsutvärdering, där OUR mäts efter tillsats av ett referenssubstrat – förslagsvis acetat – följt av tillsats av en provlösning. Efter en tid tillsätts ytterligare referenssubstrat och toxiciteten i provlösningen utvärderas genom att jämföra OUR före respektive efter tillsatsen av provlösning. Mikroorganismernas exponeringstid för provlösningen kan dock påverka resultatet, då långtidsexponering kan öka den toxiska effekten eller leda till att biomassan anpassar sig. Det finns således ingen indikation på en optimal exponeringstid, och i vissa fall uppstår stimulering som en konsekvens av ökat energibehov för att hantera toxiciteten.

OECD (2010) förespråkar både en referensinhibitor och en referenslösning – det syntetiska avloppsvattnet som, förutom närsalter och mikronäringsämnen, innehåller organiskt material. 3,5-diklorfenol, en vanligt förekommande substans vid toxicitetstest som hämmar genereringen av ATP, föreslås som referensinhibitor. Referenslösningen används i alla försök medan referensinhibitorn endast tillsätts i referensanalysen för att kontrollera det aktiva slammets känslighet, som fluktuerar över tid och därför måste uppfylla förutbestämda krav för att få användas. För testsubstanser med starkt reducerande egenskaper föreslås också abiotiska kontrollanalyser, där OUR mäts i frånvaro av aktivt slam för att fastställa den abiotiska syreförbrukningen. Testsubstansens toxicitet beräknas sedan som den procentuella relativa skillnaden mellan OUR för försöket (slam + referenslösning + provlösning), exklusive eventuell abiotisk OUR, och en blank (slam + referenslösning). För att fastställa den halvmaximala effektiva koncentrationen (EC₅₀) av testsubstansen genomförs upprepade försök med olika halter, följt av att den procentuella inhiberingen visualiseras som funktion av testsubstansens halt. EC₅₀-värdet kan sedan avläsas eller interpoleras från inhiberingskurvan, men OECD (2010) föreslår att det presenteras

som ett intervall med hänsyn till analysens osäkerheter. Dessutom framhåller de att alla avvikelser från det rekommenderade förfarandet kan påverka resultatet och därmed tillförlitligheten.

För jämförelser mellan respirometriska analyser på aktivt slam över tid och från olika avloppsreningsverk anser Hagman och la Cour Jansen (2007) att enbart en referenslösning behövs. Författarna betonar behovet av att använda samma referenssubstrat eftersom OUR, bortsett från sammansättningen av mikroorganismer, varierar beroende på tillgängligt organiskt material. De föreslår acetat eftersom det är biologiskt lättnedbrytbart, men använder också metanol, etanol respektive etylenglykol för att utvärdera maximal SOUR för aktivt slam från tre svenska avloppsreningsverk. Resultaten varierar mellan både slammen och referenssubstraten, vilket indikerar att nedbrytningskapaciteten och därmed slamsammansättningen skiljer sig – en konsekvens av anpassning till det avloppsvatten som mikrobiologin exponerats för. På samma vis kan regelbundna maximala SOUR-försök med ett referenssubstrat användas för att följa förändringar i processprestandan på ett avloppsreningsverk (Hagman & la Cour Jansen, 2007).

Gemensamt för samtliga nämnda studier och rekommendationerna från OECD (2010) är användningen av nitrifikationsinhibitorn allyltiourea i aktivt slam med nitrifikation, för att enbart mäta syreupptaget från de heterotrofa mikroorganismerna. Syreupptagningshastigheten som härrör från nitrifikationen kan vid behov fastställas genom att jämföra OUR mellan två identiska försök, ett med och ett utan tillsatt nitrifikationsinhibitor (OECD, 2010).

4 Metodik

De respirometriska analysmetodernas principer, styrkor och begränsningar har varit vägledande i metodutformningen. Med utgångspunkt i examensarbetets syfte och tillgängliga resurser utformades en experimentuppställning. Därefter provtogs en representativ delström, och både stimulerande och inhiberande referenslösningar bereddes för de respirometriska mätningarna.

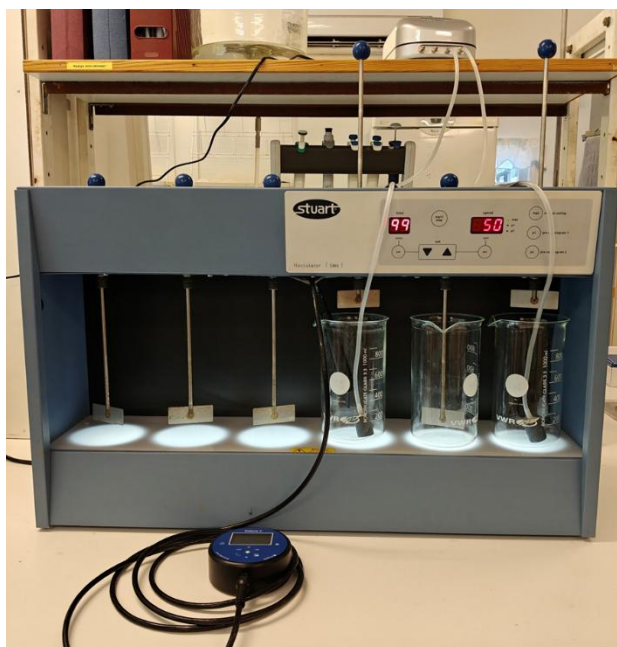
4.1 Experimentuppställning och övergripande förfarande

De respirometriska försöken genomfördes med utrustning för omrörning, luftning och syremätning samt ett förfarande utformat för att mäta både endogen och exogen respiration.

4.1.1 Utrustning och inställningar

En elektrokemisk DO-sensor (Polaris C DO, OxyGuard), inklusive temperaturmätning, med manuell avläsning användes för de respirometriska mätningarna, och kalibrerades enligt medföljande instruktion inför varje försöksdag. För att säkerställa en homogen suspension under mätningarna placerades en liter glasbägare i en flockulator (flockulator SW6, Stuart) med sex mekaniska omrörare inställda på 50 rpm. Den totala volymen i respektive försök var 900 ml för att lämna marginal till kanten, vilket förhindrade att skum och ytturbulens vid luftning orsakade spill. Luftning skedde genom porösa luftstenar kopplade med slang till en luftpump (ACO-9610, Hailea) med en maximal kapacitet på 600 l/h. Pumpen har fyra fasta luftuttag som luftflödet fördelas mellan, men endast två luftstenar var anslutna. Det effektiva maximala luftflödet per sten var därför troligen lägre än 150 l/h, eftersom de okopplade uttagen hade lägre motstånd.

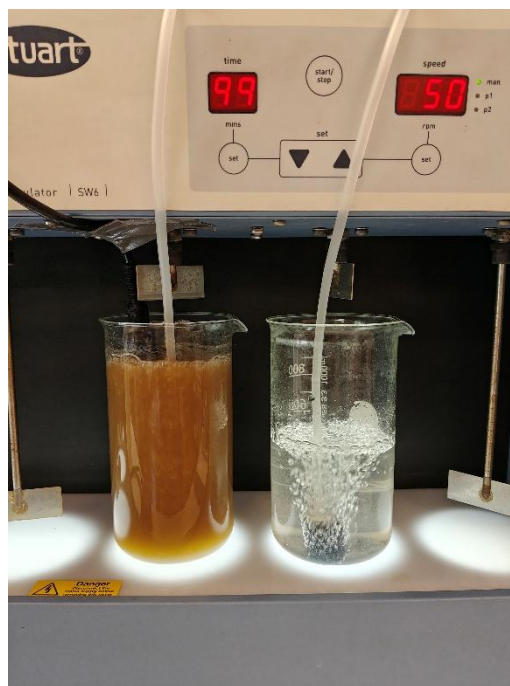
Eftersom kontinuerliga OUR-mätningar genomfördes och endast en DO-sensor fanns tillgänglig genomfördes inga parallella försök. Den kompletta experimentuppställningen, före analys, illustreras i figur 4.1.



Figur 4.1. Översikt av experimentuppställningen, inklusive luftpump med två luftstenar, DO-sensor samt tre glasbägare i flockulatorn som användes för omrörning.

4.1.2 Övergripande experimentförfarande

Försöken genomfördes i en statisk vätskefas med mekanisk omrörning och intermitternt luftning. Luftningssteget illustreras i figur 4.2. Slammet förluftades initialt för att uppnå endogena förhållanden, varefter syrehalten mättes mellan 7,0-2,0 mg O₂/l för minst två cykler. Därefter tillsattes antingen processavloppsvatten eller referenslösning för att uppnå önskad TOC-halt, och den exogena respirationshastigheten följdes genom kontinuerliga avläsningar av syrehalten. Luftningen återupptogs när syrehalten nådde det undre gränsvärdet och mätningen upprepades i minst tre cykler. Den specifika syreupptagningshastigheten beräknades därefter från de linjära sektionerna i syrehaltskurvan och resultaten visualiserades i respirogram.



Figur 4.2. Fotografi av luftning av slammet.

4.2 Metodutformning

Då syftet med examensarbetet var att utforma en relativt snabb och simpel respirometrisk analysmetod med de resurser som industriparken har, föll valet på mätning av löst syre i en statisk vätskefas. Det primära skälet var att driftslaboratoriet är utrustat med en DO-sensor men inte ett instrument för gasmätning, men fördelarna är flera: massbalansen blir enklare, koldioxidproduktionen kan ignoreras och färre mätningar krävs. Risken för biofilmstillväxt på DO-sensorn som kan interferera med syremätningarna anses minimal med hänsyn till den begränsade tid som försöken utförs under. Enligt rekommendationen från OECD (2010) inkluderas enbart avläsningar mellan 2,0-7,0 mg O₂/l i beräkningarna, förutsatt att syrehalten minskar linjärt. Avläsningar utanför gränsvärdena exkluderas, även om lutningen ser ut att vara oförändrad vid passagen, för att underlätta databearbetningen och undvika att introducera felkällor genom subjektiva bedömningar.

Den enklaste experimentuppställningen erhålls då båda faserna är statiska, eftersom det innebär att inget in- eller utflöde av varken luft eller vätska sker till reaktorn under de respirometriska mätningarna. Med hänsyn till detta, examensarbetets syfte och att övriga metodutformningar är

mer tidskrävande, valdes därför att hålla båda faserna statiska i denna analysmetod. Syreupptagningshastigheten erhålls således genom att lösa massbalansen i ekvation 1, förutsatt att mass-transport av syre mellan faserna kan försummas. Antagandet hade varit mest korrekt om syremätningen genomförts i Winklerflaskor (Spanjers & Vanrolleghem, 2016) eller bägare med lock och expansionskärl (Hagman & la Cour Jansen, 2007), eftersom utbytet med omgivande luft då minimeras. Det var dock inte möjligt att utforma analysmetoden utan en luftspalt med den utrustning som fanns tillgänglig, eftersom DO-sensor, mekanisk omrörare och luftsten måste få plats i reaktorn. Samtliga tillgängliga bägare med avsmalnad hals var för smala för DO-sensorn och omröraren. Den magnetiska omröraren var dessutom ur funktion, vilket innebar att cylindriska glasbägare fick användas. Flytande material på ytan exkluderades för att minimera antalet moment samt svårigheter med efterföljande rengöring för återanvändning. I stället undersöktes behovet av ett lock, och omrörningshastighet valdes med omsorg för att undvika vortexbildning vid ytan samtidigt som slammet hölls i suspension.

Instrumentet som finns tillgängligt för syremätning saknar funktion för att registrera och lagra mätdata, vilket innebär att avläsning måste göras manuellt. Det är därför inte möjligt att genomföra längre försök, och endast akut toxicitetshämning kan undersökas med denna analysmetod. För att följa hur OUR förändras över tid efter provtillsats utförs kontinuerliga mätningar med intermittent luftning, i enlighet med tillvägagångssättet som föreslås av Hagman och la Cour Jansen (2007). Dessutom rekommenderar OECD (2010) kortare kontakttider än 3 timmar vid analys av lättnedbrytbara eller flyktiga ämnen, vilka ofta förekommer i industriparkens processavloppsvatten och därmed ytterligare motiverar kontinuerlig mätning.

4.2.1 Processparametrar

Temperaturen i reaktorn justeras varken före eller under försöken, då driftslaboratoriet saknar utrustning för temperaturreglering. Mikrobiologins aktivitet avtar med sjunkande temperatur, men med hänsyn till att avloppsreningsverket alltid håller över 20 °C till följd av varmt inkommande processavloppsvatten finns det ingen risk för att den heterotrofa biomassan är vilande. Slammet håller konsekvent en temperatur över 20 °C vid uttag och späds till önskad SS-halt med rumstempererat vatten, således genomförs alla försök vid minst 20 °C men med ett större temperaturintervall än OECD (2010) förespråkar. Fördelen med att utföra försöken vid den temperatur som anläggningen håller är att resultaten blir mer representativa för verkliga driftsförhållanden (Hagman & la Cour Jansen, 2007). Dock är proven som tillsätts kyllda, men volymen är relativt liten och temperatursänkningen till följd av tillsatsen bedöms vara minimal.

Eftersom den heterotrofa nedbrytningsprocessen av organiskt material generellt fungerar opåverkat mellan pH 6-9 (Davis, 2010, s. 22-17) pH-justeras inte prover inom dessa gränsvärden, i enlighet med förfarandet presenterat av Hagman och la Cour Jansen (2007). Detta minimerar antalet moment i analysmetoden och förhindrar att pH-justering orsakar kemiska reaktioner som förändrar provsammansättningen. Vidare tillsätts inget syntetiskt näringsmedium till reaktorn för att hålla analysmetoden så enkel som möjligt i enlighet med syftet. Slammet antas innehålla tillräckliga mängder närsalter och mikronäringsämnen för att dessa inte ska vara respirationsbegränsande under försöket, särskilt eftersom analysmetoden avser akut och inte kronisk toxicitetshämning.

I motsats till nämnda studier och rekommendationerna från OECD (2010) tillsattes ingen nitrifikationsinhibitor till slammet, och därmed mättes syreupptagningshastigheten för den totala respirationen i försöken. Förutom att allyltiourea inte fanns tillgängligt innebar avsaknaden av inhibitor också att analysmetoden blev mer representativ för anläggningens verkliga driftförhållanden. Dessutom hade övriga syreförbrukande organismer och eventuell kemisk oxidation

av oorganiska elektrondonatorer fortsatt bidragit till den uppmätta syreupptagningshastigheten (Spanjers & Vanrolleghem, 2016), vilket innebär att OUR för enbart den heterotrofa nedbrytningsprocessen inte hade kunnat fastställas.

4.2.2 Aktivt slam och försöksförutsättningar

Slammet som används i analysmetoden är returslam från linje 1 (RS1), som tas ut via en provtagningsventil på returslamledningen. Returslam från linje 1 används även i andra analyser och har lägre kvarvarande TOC samt högre MLSS än slam från luftningsbassängerna. Alla försök i analysmetoden görs vid 3 000 mg SS/l, eftersom det motsvarar den lägsta halten som används i luftningsbassängerna och därmed ger en så representativ metod som möjligt – samtidigt som halten alltid är praktiskt nåbar. Kristensen m. fl. (1992) erhöll goda resultat med samma halt, medan OECD (2010) rekommenderar en lägre slamhalt och att slammet ska tvättas före analys. Tvättning genomförs dock inte, då det är tidskrävande, ökar metodens komplexitet och kan introducera felkällor. Dessutom skulle det kräva tillsats av syntetiskt näringsmedium baserat på tidigare antaganden och göra analysmetoden mindre representativ för driftsförhållandena. Eftersom Hagman och la Cour Jansen (2007) samt Fall m. fl. (2006) uppnår endogen respiration genom att enbart lufta slammet innan försöken inleds valdes denna metod i stället.

Gravimetrisk mätning av SS-halten i slammet genomförs i driftslaboratoriet tre dagar per vecka. På grund av analysens tidsåtgång var det inte möjligt att genomföra ytterligare mätningar inför eller under varje respirometriskt försök, och volymen slam beräknades därför utifrån den senast uppmätta halten för att få 3 000 mg SS/l i reaktorn. Detta, tillsammans med antagandet att VSS motsvarar 70 % av uppmätt SS (Davis, 2010, s. 23-27) vid beräkning av SOUR, introducerar felkällor i analysmetoden. Antagandet är oundvikligt eftersom driftslaboratoriet saknar muffelugn, vilket innebär att VSS inte kan analyseras och relationen VSS/SS därför inte kan fastställas.

4.2.3 Metodreferenser

För toxicitetsutvärdering krävs en referens, och eftersom det inte finns ett behov av en kvantitativ toxicitetsbeskrivning samt en önskan om snabba resultat valdes den endogena respirationen som referens, i enlighet med vad Hagman och la Cour Jansen (2007) samt Fall m. fl. (2006) beskriver. Metodrekommendationen av OECD (2010) är tidskrävande, och användningen av referensinhibitorn 3,5-diklorfenol hade inneburit introduktion av nya kemikalier till industriparken, vilket inte är förenligt med syftet och därför valdes bort. För att kunna följa förändringar i processprestandan i anläggningen över tid föreslår Hagman och la Cour Jansen (2007) användningen av ett biologiskt lättnedbrytbart referenssubstrat, och eftersom detta är önskvärt undersöktes ett lämpligt referenssubstrat baserat på det samlade processavloppsvattens normala sammansättning.

4.3 Provmaterial

Under provuttagsperioden pågick revisionsstopp vid flera fabriker i industriparken, vilket innebar att dessa fabriker antingen inte producerade något processavloppsvatten eller att det som genererades hade en kraftigt förändrad sammansättning. För att säkerställa representativa prov valdes därför delströmmen från fabrik I, som hade normal drift och vars processavloppsvatten innehåller två ämnen med välkänd toxicitet för mikroorganismer.

Som komplement bereddes två stimulerande referenslösningar för utvärdering av ämnens lämplighet som referenssubstrat för att följa processprestandan över tid, i enlighet med examensarbetets syfte. Dessutom bereddes en inhiberande referenslösning baserad på formaldehyd för att utvärdera metodens förmåga att identifiera respirationshämning.

4.3.1 Processavloppsvatten från fabrik I

Flödesproportionella prover av den totala delströmmen av processavloppsvatten från fabrik I samlades in vid tre tillfällen: den 6, 15 respektive 22 april 2026. Respektive prov motsvarar utsläppen under de två föregående dygnen, med undantag för provet från den 6 april 2026 som motsvarar de tre föregående dygnen.

Halten TOC i proverna fastställdes genom ackrediterad analys på internt laboratorium enligt metod SS-EN ISO 20236:2021 på ett Shimadzu TOC-L instrument. Proverna förvarades i kylskåp (2 ± 2 °C) från provuttag tills de användes, för att undvika förändringar i provsammansättningen.

4.3.2 Stimulerande referenslösningar

Två stimulerande referenslösningar med metanol respektive pentaerytritol, hädanefter benämnt penta, bereddes den 17 februari 2026. Referenslösningarna justerades till en TOC-halt på 5 000 mg TOC/l, och mängden av respektive referenssubstans beräknades för en slutlig volym av två liter, där resterande volym utgjordes av destillerat vatten.

TOC-halt fastställdes genom analys med kyvett från Hach Lange (LCK387). Lösningarna spädades 1:2 för att säkerställa att halten låg inom mätområdet. Två analyser gjordes vid olika tillfällen och presenteras tillsammans med respektive medelvärde i tabell 4.1.

Tabell 4.1. Uppmätt TOC-halt i de två beredda referenslösningarna vid två tillfällen, samt medelvärdet av mätningarna.

Referenslösning	TOC-halt (mg TOC/l)		
	2026-04-15	2026-05-06	Medelvärde
Metanol	4 902	4 894	4 898
Penta	5 024	5 046	5 035

4.3.3 Inhiberande referenslösning

Eftersom examensarbetets syfte avsåg att utforma en respirationsanalys för utvärdering av behandlingsbarheten av processavloppsvatten i aktivslamanläggningen bereddes en referenslösning med toxiska egenskaper. Då formalin – en vattenlösning av formaldehyd – tillverkas och används i industriparken samt är ett känt toxiskt ämne, användes en utspädd formalinlösning som inhiberande referenslösning. TOC-halten i provet fastställdes med kyvett från Hach Lange (LCK387) till 22 000 mg TOC/l (mer exakt 22 360 mg TOC/l). Motsvarande formalinhalt i lösningen var 55 000 mg/l, eftersom förhållandet är 0,4 mg TOC/mg formalin.

Formaldehyd är en liten och reaktiv aldehyd vars toxicitet beror på dess ospecifika bindning till makromolekyler i cellen, vilket inaktiverar deras biologiska funktioner och slutligen resulterar i celldöd (Klein m. fl., 2022). Det är biologiskt nedbrytbart, framför allt av metylotrofa bakterier

som tillgodoser sig enkolsföreningar eftersom formaldehyd utgör en viktig metabolit i deras ämnesomsättning (Klein m. fl., 2022). Ricco m. fl. (2004) fastställde EC₅₀-värdet för formaldehyd i kommunalt aktivt slam till 63 mg/l enligt metoden beskriven i OECD testnummer 209. Samma metod gav ett EC₅₀-värde på 19 mg/l för kommunalt aktivt slam enligt säkerhetsdatabladet från Perstorp (2026), vilket tydliggör att betydande variationer kan förekomma. Det finns flera cellulära mekanismer som hanterar formaldehydens toxicitet (Klein m. fl., 2022), och toleransen hos aktivt slam kan dessutom öka vid exponering för gradvis högre halter.

4.4 Genomförande

Totalt genomfördes 23 respirometriska försök mellan den 26 mars och den 6 maj 2026. Det generella förfarandet beskrivs nedan, men avvikelser mellan försöken uppstod på grund av parameterutvärdering under metodutvecklingen och naturlig variation.

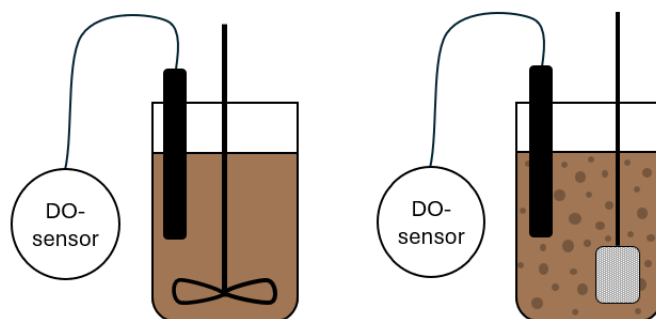
4.4.1 Förberedelser

För en totalvolym på 900 ml beräknades först den volym RS1 som krävdes för att uppnå 3 000 mg SS/l i bägaren, baserat på den senast tillgängliga mätningen av SS-halten. Därefter beräknades volymen av processavloppsvatten eller referenslösning utifrån dess TOC-halt och den önskade TOC-halten för den exogena mätningen. Resterande volym utgjordes av rumstempererat kranvatten, se bilaga A för beräkningsprotokoll.

I enlighet med beräkningarna mättes slam och kranvatten upp, placerades i flockulatoren tillsammans med en luftsten och förluftades på maximal lufthastighet i 25 minuter. Om inga tidigare mätningar hade genomförts kalibrerades DO-sensorn innan den placerades i bägaren, på ett djup mitt mellan ytan och botten, så att den varken slog i omröraren eller låg för nära ytan.

4.4.2 Respirometri

Förluftningen avslutades genom att luftstenen avlägsnades och omrörningen startades, eftersom dessa annars fastnade i varandra och luftningen var tillräcklig turbulent för att hålla slammet i suspension. När syrehalten nått 7,0 mg O₂/l påbörjades mätningen av den endogena respirationshastigheten. Under de två första minuterna avlästes syrehalten var 30:e sekund och sedan varannan minut i åtta minuter. Därefter stängdes omröraren av, luftstenen återfördes till bägaren och återluftning skedde med avläsningen var 15:e sekund tills syrehalten åter nådde minst 7,0 mg O₂/l. Avläsningen upprepades sedan på samma sätt, men i vissa fall i tio minuter istället för åtta då syrehalten låg över 7,0 mg O₂/l i flera minuter. Två cykler av mätning genomfördes som minimum för analysmetoden. Uppställningen vid syremätning under respiration respektive vid luftning med luftsten illustreras i figur 4.3.



Figur 4.3. Illustration av uppställningen vid mätning av syrehalten under respiration, då omrörning används (till vänster), respektive vid luftning med luftsten (till höger).

Efter ytterligare en återluftning påbörjades mätningen av den exogena respirationshastigheten genom tillsats av antingen referenslösning eller processavloppsvatten när syrehalten åter nått 7,0 mg O₂/l. Syrehalten avläses var 15:e sekund genom hela försöket. Återluftning inleddes vid 2,0 mg O₂/l och pågick till 7,0 mg O₂/l åter uppnåddes, med undantag för några försök där en plåt i syrehalten inträffade och återluftningen därför avbröts tidigare. Minst två mätningar genomfördes per försök.

Under metodutvecklingen genomfördes initialt försök med enbart endogen respiration samt upprepade mätningar av två referenslösningar i varierande TOC-halter för utvärdering. Vid försöksdagarna med processavloppsvatten genomfördes det kompletta förfarandet – endogen följt av exogen mätning – för både processavloppsvattnet och den utvald referenslösningen.

4.4.3 Databearbetning

Från den erhållna syrehaltsskurvan beräknades OUR för respektive cykel enligt ekvation 1. Endast linjära sektioner och avläsningar i intervallet 2,0-7,0 mg O₂/l inkluderades, med undantag för den första minuten efter provtillsats och de första 30 sekunderna efter varje återluftning, för att möjliggöra homogenisering respektive stabilisering av DO-sensorn. Därefter beräknades SOUR för respektive cykel enligt ekvation 3, vilket utgör en sammanslagning av ekvation 2 och antagandet att VSS motsvarar 70 % av uppmätt SS-halt. Slutligen visualiserades resultaten i respirogram.

$$s_{O_2} = \frac{r_{O_2}}{0,70 \cdot SS} \quad (3)$$

4.5 Tillämpning av AI för textbearbetning

Generativa AI-verktyg, framför allt Microsoft Copilot, har enbart använts för språklig bearbetning av text som redan var författad. Verktöget har använts för att identifiera felsyftningar, korrigera stavfel och förbättra språket för att öka rapportens läsbarhet. Det har inte använts för att söka litteratur, sammanställa eller tolka data, eller generera nytt innehåll som inte redan fanns i originalmaterialet. Samtliga förslag har granskats och kritiskt bedömts innan det införts i rapporten.

5 Resultat och diskussion

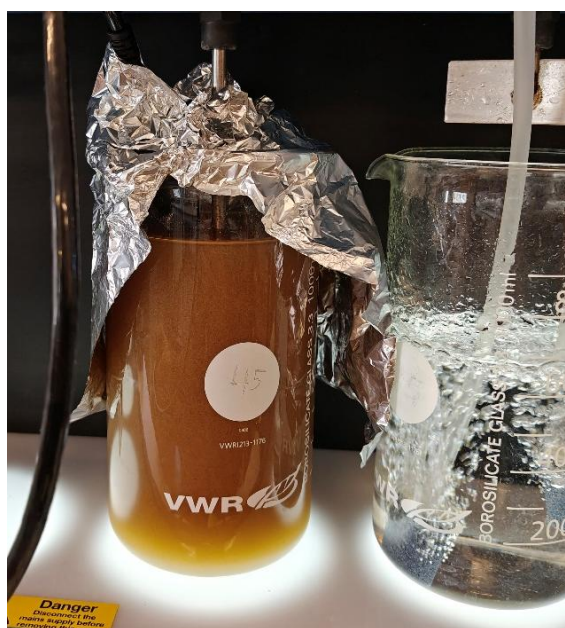
Det laborativa arbetet omfattade tre delar: verifiering av experimentuppställning och processparametrar, urval och utvärdering av referenssubstanser samt respirometriska försök med processavloppsvatten för metodutvärdering.

5.1 Utvärdering av experimentuppställning

Två parametrar i analysmetodens experimentuppställning utvärderades genom upprepade försök, dels med och utan lock, dels med olika långa förflutningsperioder. Dessutom analyserades möjliga felkällor i den gravimetriska mätningen av slamhalten.

5.1.1 Försök med lock

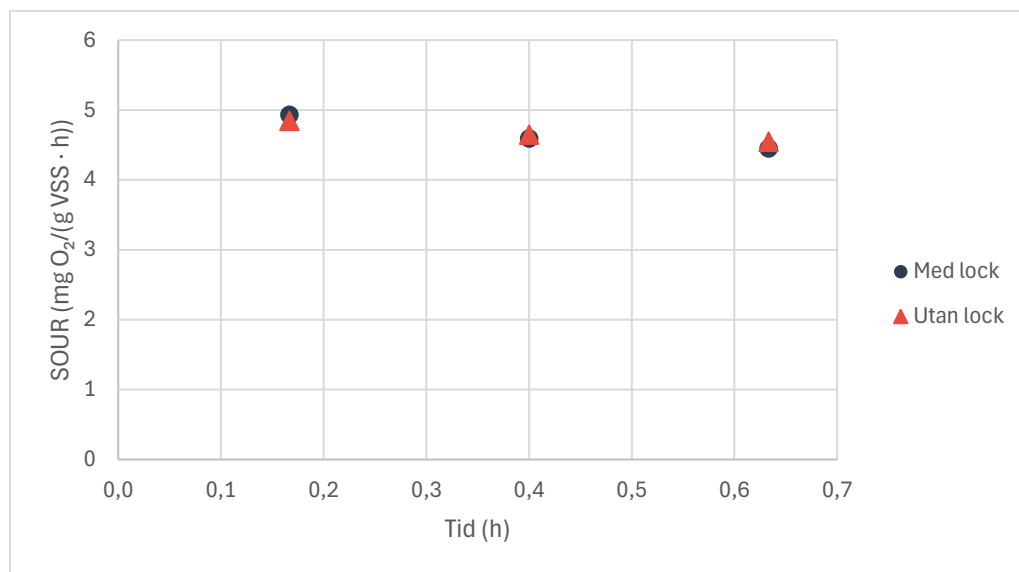
För att begränsa masstransport av syre från luft till vätska föreslås flera olika reaktorlösningar av OECD (2010), Spanjers och Vanrolleghem (2016) samt Hagman och la Cour Jansen (2007). Dessa var dock inte tillgängliga eller kompatibla med den övriga utrustningen och mätinstrumentet, vilket innebar att cylindriska glasbägare användes. Det var därför av intresse att undersöka om ett lock över bägaren, som kunde minska utbytet med omgivande luft, fyllde någon funktion i att reducera masstransporten av syre mellan faserna. För att möjliggöra omrörning och förflyttning av luftstenen och samtidigt uppnå en relativt tät förslutning, valdes aluminiumfolie som material till locket, vilket visas i figur 5.1.



Figur 5.1. Cylindrisk glasbägare med lock av aluminiumfolie.

För att skillnader i tillsatt mängd TOC inte skulle påverka jämförelsen av försök med respektive utan lock, jämfördes tre cykler av SOUR för den endogena respirationen efter 25 minuters förflutning. Eftersom endast en respirationsmätning kan utföras i taget skedde slamuttaget med cirka 45 minuters mellanrum – först försöket med lock och därefter utan lock. Samma temperatur erhöles i båda försöken (21,8 °C), och ingen relevant skillnad i SOUR observerades mellan

dem, vilket framgår av figur 5.2. Resultatet är i samma storleksordning som Hagman och la Cour Jansen (2007) redovisar för kommunalt slam efter en halvtimmes förluftning.

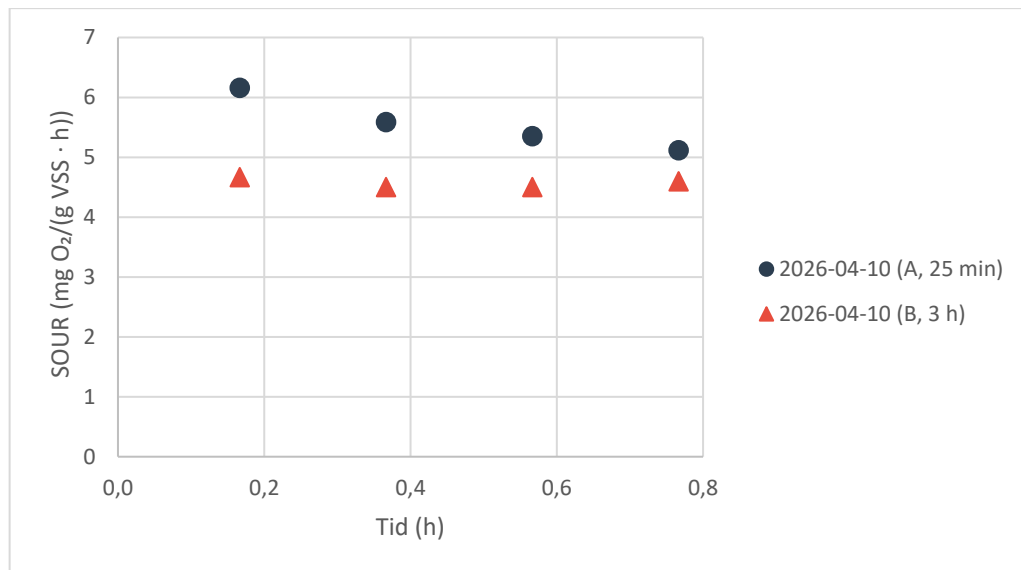


Figur 5.2. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration för upprepade försök med respektive utan lock.

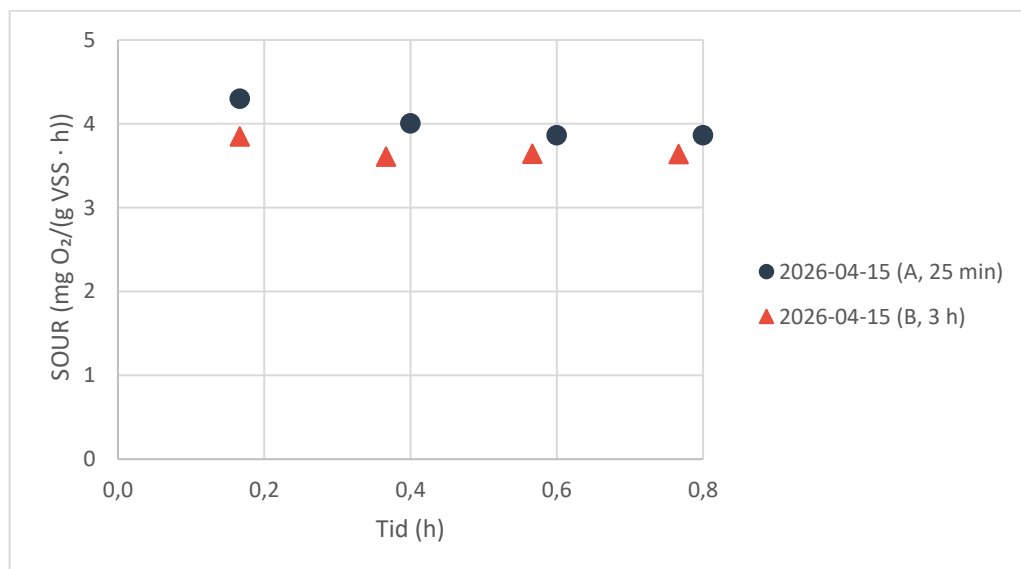
En svagt avtagande tendens kan observeras i figur 5.2, vilket även Hagman och la Cour Jansen (2007) redovisar för ett parallellt triplikat. Fall m. fl. (2006) noterar samma mönster vid kontinuerlig mätning av den endogena respirationen under åtta timmar, och kommenterar att visst brus sannolikt beror på temperaturregleringen. Således tycks detta vara karakteristiskt för den endogena respirationen, vilket framstår som rimligt då de intracellulära reserverna, eller tillgänglig död biomassa, förbrukas successivt. Eftersom samma tendens observeras i båda försöken i figur 5.2, tycks masstransporten av syre från luften inte ha påverkats märkbart av locket. Därmed dras slutsatsen att ett lock av aluminiumfolie inte tillför analysmetoden något, och eftersom det dessutom komplicerar utförandet används det inte i experimentupställningen.

5.1.2 Endogen respiration

För att mätning av den endogena respirationshastigheten ska vara möjlig måste externt substrat vara avlägsnat. Eftersom slammet inte tvättas och det lättnedbrytbara organiska materialet därför inte avlägsnas fysiskt, behöver slammet luftas innan mätningen påbörjas för att det ska brytas ned mikrobiellt. Hagman och la Cour Jansen (2007) förluftade sitt kommunala slam i 30 minuter, medan Fall m. fl. (2006) lät det pågå i 3-4 timmar. För att fastställa hur lång förluftningstid som krävdes för att nå endogen respiration i RS1 från Perstorp industri-parks avloppsreningsverk genomfördes försök vid två tillfällen, där endogen SOUR jämfördes efter 25 minuters respektive tre timmars förluftning. Resultaten presenteras i figurerna 5.3 och 5.4.



Figur 5.3. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration för upprepade försök vid 21,6 °C, efter 25 minuters respektive tre timmars förluftning. Resultat från försök A och B utförda 2026-04-10.



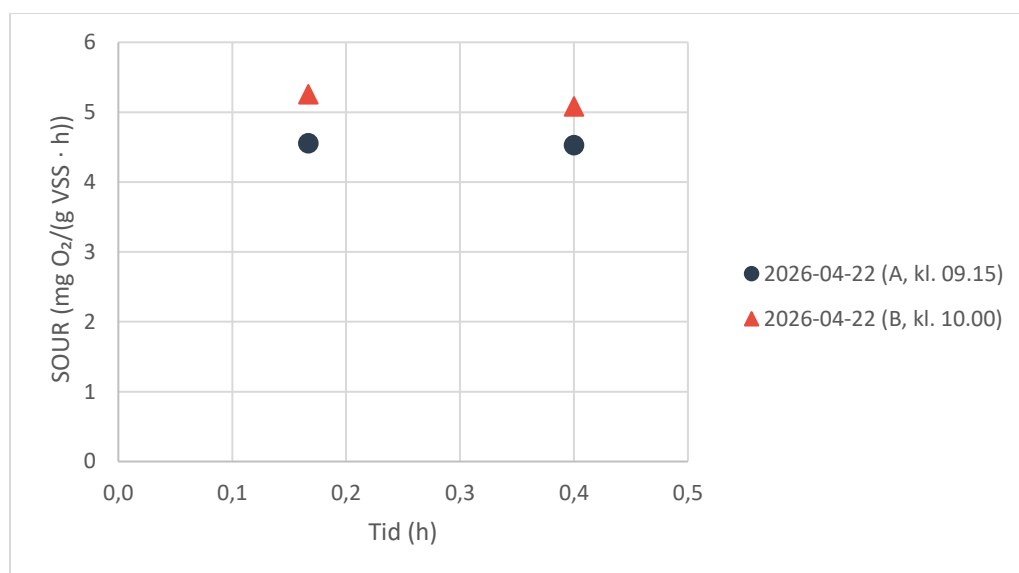
Figur 5.4. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration för upprepade försök, efter 25 minuters (20,9 °C) respektive tre timmars (20,6 °C) förluftning. Resultat från försök A och B utförda 2026-04-15.

Den tydligaste skillnaden mellan förluftningstiderna är att SOUR avtar snabbare vid försöken med kortare förluftning. En möjlig förklaring till detta kan vara att oxidationen av de intracellulära reserverna utgör en större del av syreförbrukningen vid den kortare förluftningen, och att dessa reserver – och därmed förbrukningshastigheten – successivt minskar för varje cykel som mäts. Efter tre timmar återstår sannolikt endast små mängder intracellulära reserver, och syreförbrukningen kan istället härledas till nedbrytningen av lättnedbrytbart organiskt material som

frigjorts genom hydrolys av död biomassa. Eftersom hydrolysen är det hastighetsbegränsande steget (Spanjers & Vanrolleghem, 2016), skulle detta kunna vara en förklaring till varför den endogena specifika syreupptagningshastigheten förblir relativt konstant efter tre timmars förflutning.

Vidare noteras en märkbar skillnad i SOUR mellan förflutningstiderna i figur 5.3 jämfört med figur 5.4, framför allt initialt. Detta trots att temperaturen – som påverkar den biologiska aktiviteten – i försöken i figur 5.3 var densamma, men skiljde sig marginellt i figur 5.4. Eftersom försöken i respektive figur genomfördes med RS1 uttaget vid samma tidpunkt är det inte troligt att förändringar i slamsammansättningen kan förklara de observerade skillnaderna. Det är i stället sannolikt att variationerna beror på mindre skillnader i VSS-halt mellan bågarna samt biologisk variation.

Ytterligare en observation i jämförelsen mellan figurerna 5.3 och 5.4 är att SOUR skiljer sig mellan försöksdagarna. Värdena är fortfarande i samma storleksordning och i paritet med de värden Hagman och la Cour Jansen (2007) uppmätte för kommunalt slam. Skillnader i försökstemperatur och förändringar i slamsammansättning, liksom variation i mängd och aktivitet hos de hydrolytiska enzymerna, är möjliga förklaringar till observationen. I figur 5.5 redovisas två försök från samma dag, där temperatur, förflutningstid och slamsammansättning är desamma.



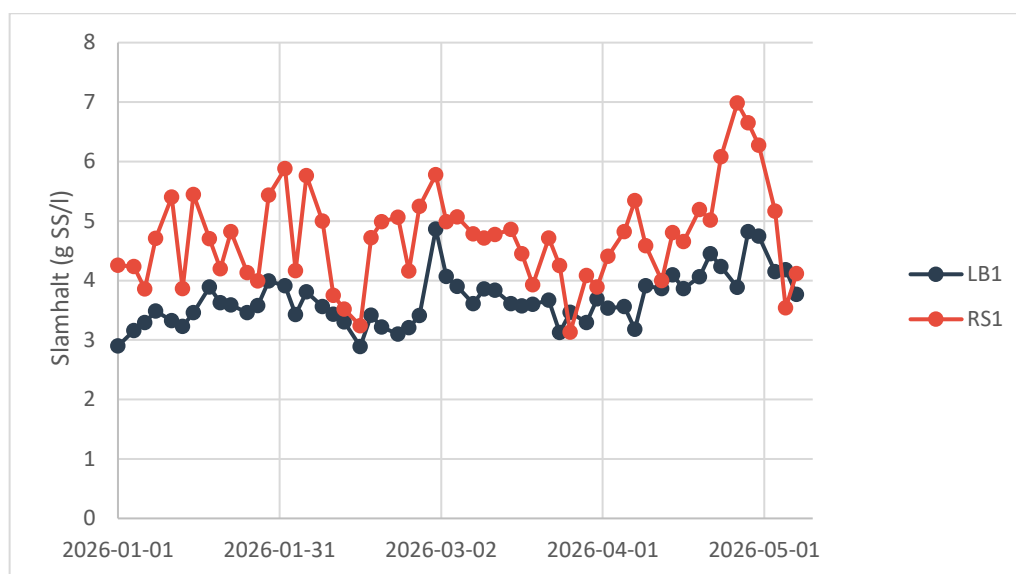
Figur 5.5. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration vid 21,5 °C efter 25 minuters förflutning. Resultat från försök A och B utförda 2026-04-22.

Provuttaget skedde med 45 minuters mellanrum och en tydlig – om än liten – skillnad i endogen SOUR observeras mellan försöken. Hagman och la Cour Jansen (2007) presenterar liknande resultat för ett identiskt parallellt triplikat. Utöver resultaten i figur 5.5 visar försök vid samma temperaturer men med varierande slamsammansättningar – provuttag med 7 respektive 23 dagars mellanrum – både större skillnader än i figur 5.5 och i andra fall endast marginella skillnader i endogen SOUR, se bilaga B för respektive respirogram. Sammantaget tyder resultaten på att ingen enskild faktor kan förklara variationen i SOUR. Samtliga mätningar är dock i samma storleksordning och intervallet är relativt snävt, vilket gör slumpartad variation till en sannolik förklaring.

Mot bakgrund av detta, och i enlighet med syftet, bedöms en förluftningstid på 25 minuter vara tillräcklig för analysmetoden. Vidare visade kontinuerlig mätning av syrehalten mellan gränsvärdena ett linjärt avtagande samband, vilket bekräftar teorin. Eftersom den endogena respirationen är långsam och minst två cykler önskas per försök, beslutades att mäta endogen respirationshastighet under fasta tidsperioder istället för mellan gränsvärdena. Detta möjliggör en snabbare analysmetod utan att antalet endogena replikat reduceras.

5.1.3 Analys av slamhalt

En metodbegränsning i den respirometriska analysen är osäkerheten i den gravimetriska mätningen av SS. Stora variationer observeras mellan mätningarna, och slamhalten i RS1 är vid flera tillfällen nära eller lägre än i LB1, se figur 5.6.



Figur 5.6. Gravimetriskt uppmätt halt suspenderat material (SS) i luftningsbassäng 1 (LB1) respektive returslam 1 (RS1) från den 1 januari till den 7 maj 2026.

De snabba förändringarna som observeras kan varken förklaras ur ett biologiskt perspektiv eller med hänsyn till hur reningsprocessen reglerats under tidsperioden, med undantag för den markanta toppen i RS1 i slutet av april till följd av avstängt överskottsslam under revisionsstopp på biobränslepannan. Samtidigt uppvisar LB1 en nedgång under samma period, vilket inte kan vara möjligt och ytterligare understryker osäkerheterna i analysen.

Stickproven tas på samma platser vid varje analys, och proven tas från ett väl omblandat flöde. Det finns varken närliggande inlopp eller skrapsekvenser i sedimenteringsbassängen som kan påverka provsammansättningen eller SS-halten. Höga salthalter och en påtaglig variation har föreslagits som en möjlig orsak, men utjämningsbassängernas funktion i kombination med fortsatt hög biologisk aktivitet tyder på att detta inte är hela förklaringen till de fluktuerande SS-halterna. Samtidigt har tester med en IR-våg – där full retention av allt fast material sker genom evaporering av vatten och flyktiga ämnen, inte filtrering – gett konsekvent högre halter torrsustans, vilket tyder på att saltet kan påverka mätresultatet.

En annan möjlig orsak är felaktig temperatur i ugnen samt för kort torktid, vilket skulle kunna innebära att provet inte är helt torrt när det tas ut ur ugnen. För att undersöka detta gjordes en

analys där filtret efter ordinarie vägning vid 2 h, torkades i ytterligare 30 minuter. Skillnaden i vikt, se tabell 5.1, var minimal och ytterligare torktid ansågs inte behövas.

Tabell 5.1. Filtrervikt före filtrering respektive torrsvikt efter filtrering av prov och torkning vid 105 °C i 2 h respektive 2,5 h. 100 ml prov filtrerades från luftningsbassäng 1 (LB1) och 50 ml från returslam 1 (RS1). MLSS beräknades för de två proven samt de två tiderna.

Tid (h)	LB1			RS1		
	Filtrervikt (g)	Torrsvikt (g)	MLSS (g SS/l)	Filtrervikt (g)	Torrsvikt (g)	MLSS (g SS/l)
2,0	2,0497	2,4004	3,507	2,1459	2,4684	3,225
2,5	2,0497	2,3956	3,459	2,1459	2,4685	3,226

Däremot var uppmätt temperatur i ugnen endast 98 °C när inställningen var 105 °C, vilket justerades innan analysen påbörjades men troligen inte gjorts för mätningarna i figur 5.6. Det går dock inte att utesluta att avsteg från instruktionerna gjorts vid något tillfälle, och att kortare torktid kan ha resulterat i avvikande SS-halter i figur 5.6.

Vid analysen noterades det däremot att exsickatorn som filterna förvaras i saknade vakuumfett – det fett som appliceras på lockets kant för att det ska bli tätt. Det innebär att luft kan ta sig in i exsickatorn och en atmosfär utan luftfuktighet kan därmed inte uppnås. För att fastställa om filterna var fria från fukt genomfördes torkningsförsök vid 105 °C med oanvända filter från exsickatorn. Resultaten, presenterade i tabell 5.2, visar att exsickatorn inte lyckats uppnå en atmosfär fri från luftfuktighet, vilket resulterat i att filterna i exsickatorn absorberat fukt och därmed fått en högre vikt. Det i sin tur medför att den gravimetriska SS-analysen underskattar halten SS.

Tabell 5.2. Filtrervikt efter förvaring i exsickator samt efter torkning vid 105 °C i 30 min, och differensen mellan dessa vägningar för fyra filter.

Filter	Vikt före ugn (g)	Vikt efter ugn (g)	Differens (g)
1	2,1544	2,0193	0,1351
2	2,1573	2,0157	0,1416
3	2,1647	2,0231	0,1416
4	2,1687	2,0232	0,1455

Det går trots resultaten i tabell 5.2 inte att fastställa att differensen beroende på absorberad fukt är konstant. Dessutom hade det inte förklarat de stora variationer i slamhalt som observerats på kort tid. Adsorptionsförmågan hos torkmedlet – kiselgel – har troligen försämrats under perioden utan vakuumfett, men en konsekvent avtagande trend i halten SS går inte att notera i figur

5.6. Således krävs vidare utredning av metoden för att identifiera källorna till de stora variationerna, och användningen av SS-halten i de respirometriska beräkningarna bör göras med dessa osäkerheter beaktade.

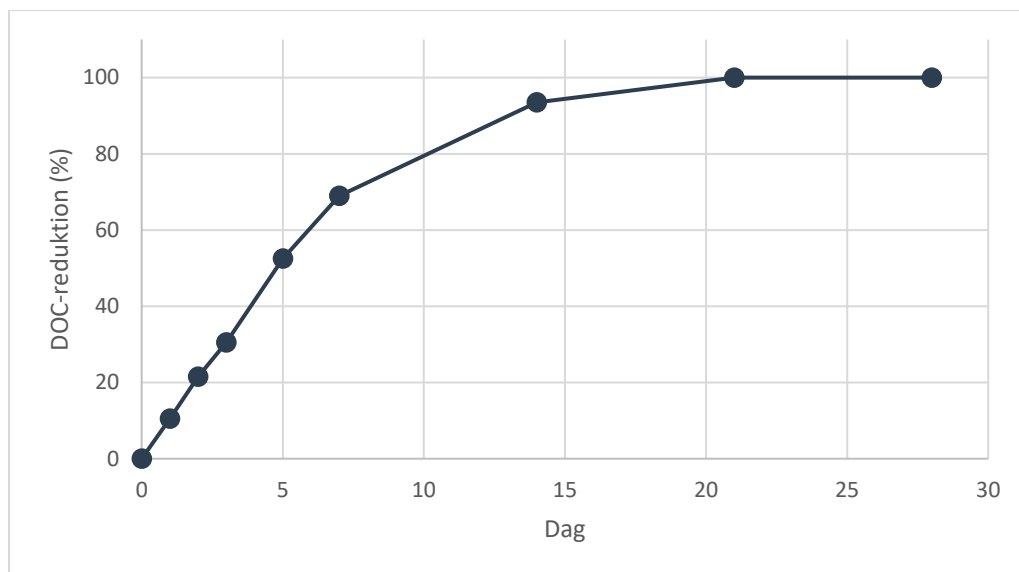
5.2 Referenssubstrat

En stimulerande referenssubstans – ett referenssubstrat – valdes framför en referensinhibitor i analysmetoden, då den utöver att kontrollera slammets aktivitet inför försöken också kan användas för att följa förändringar i processprestandan vid avloppsreningsverket. Hagman och la Cour Jansen (2007) presenterar SOUR-värden för fyra olika biologiskt lättnedbrytbara substrat i tre kommunala slam, och resultaten visade tydligt att mikrobiologin anpassar sig efter de substrat den exponeras för.

Belastningen på avloppsreningsverket vid Perstorp industripark skiljer sig markant från den som ett kommunalt avloppsreningsverk normalt har, eftersom processvattensammansättningen varierar med produktionen i fabrikena. Varken det samlade inkommande processavloppsvattnet eller det utjämnade avloppsvattnet från UB1 är lämpligt att använda som referens eftersom sammansättningen – TOC, salter och oorganiska ämnen – varierar kontinuerligt. Då respirationshastigheten kan påverkas av samtliga ingående ämnen är det inte möjligt att utvärdera processprestandan med det samlade inkommande processavloppsvattnet. I stället studerades dess sammansättning för att identifiera möjliga referenssubstrat. En stor del av inkommande TOC utgörs av flyktiga fettsyror. Dessa valdes dock bort som referenssubstrat på grund av deras låga pH och därmed behov av pH-justering. Varierande mängder råvaror, produkter och biprodukter belastar också avloppsreningsverket. Av dessa bedömdes penta vara mest lämplig att utvärdera, eftersom det både tillförs kontinuerligt till avloppsreningsverket och det finns tillgänglig nedbrytbarhetsdata för ämnet. Det andra substratet som prioriterades var metanol, som förutom att vara en av basråvarorna i industriparken även är väl beskrivet i litteraturen.

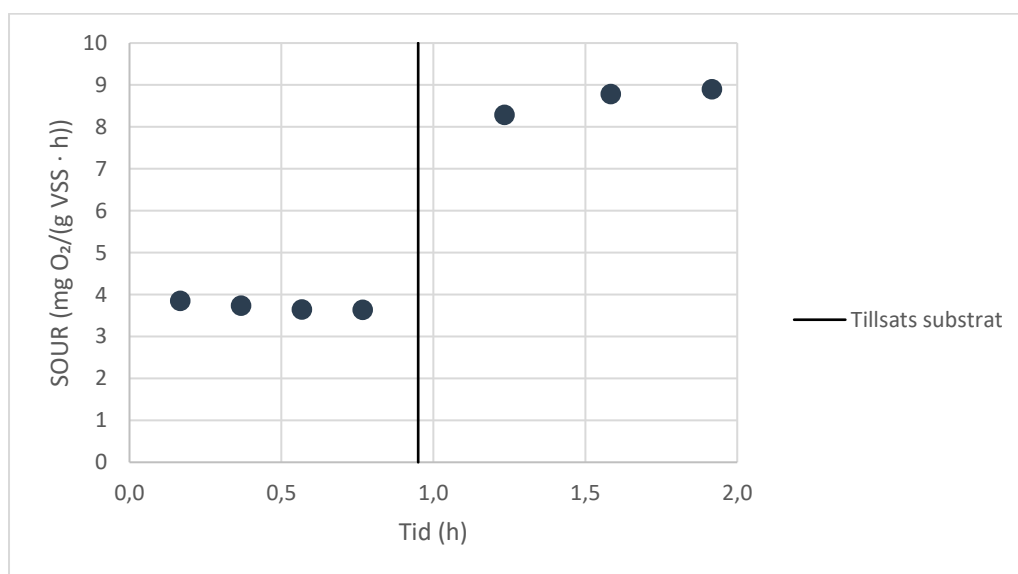
5.2.1 Pentaerytritol

Penta är en vattenlöslig symmetrisk polyol med fem kolatomer och fyra hydroxidgrupper. Det är biologiskt nedbrytbart i slam från Perstorp industriarks avloppsreningsverk, vilket verifierats genom försök utförda hösten 2025 av ett externt laboratorium enligt SS-EN ISO 9888/OECD 302B. Nedbrytningskurvan illustreras i figur 5.7, och som framgår uppnås 100 % nedbrytning efter 21 dygn.



Figur 5.7. Nedbrytningskurva för pentaerytritol i slam från avloppsreningsverket i Perstorp industripark, uppmätt som reduktion av löst organiskt kol (DOC) och baserad på medelvärdet av två replikat. Analyser utförda av externt laboratorium hösten 2025 enligt SS-EN ISO 9888/OECD 302B.

Två respirometriska försök genomfördes med penta som referenssubstrat med fem dagars mellanrum. Trots att den endogena SOUR skiljer sig mellan försöken uppnås samma SOUR efter tillsats av substrat – fastän försöken genomfördes med penta motsvarande 25 respektive 50 mg TOC/l. I figur 5.7 redovisas respirogrammet för det senare försöket.

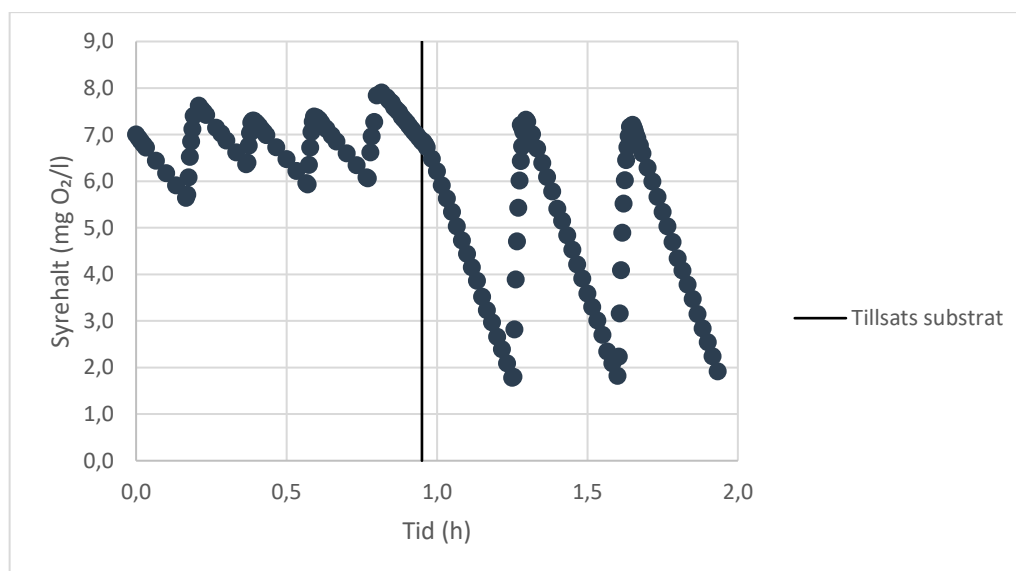


Figur 5.7. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av pentaerytritol motsvarande 50 mg TOC/l. Resultat från försök B utfört 2026-04-15.

En mycket svagt ökande exogen SOUR kan noteras per cykel. Samma mönster observeras i försöket med 25 mg TOC/l, se figur C.1 i bilaga C.

Eftersom en fördubbling i TOC-halt inte påverkade uppmätt SOUR är det troligt att maximal SOUR för penta uppnåddes redan vid den lägre halten. Det kan dock inte uteslutas att syreförbrukningen ökar över en längre tid, men då analysmetoden är en akut toxicitetsutvärdering undersöktes detta inte. Det är troligt att nedbrytning sker eftersom SOUR fördubblas efter substrattillsats, och Hagman och la Cour Jansen (2007) redovisar både högre och lägre värden i sin utvärdering av fyra organiska substrat. Eftersom penta är en större molekyl än de alkoholer och flyktiga fettsyror som vanligtvis används som extern lättnedbrytbar kolkälla i avloppsreningsverk, är det sannolikt att dess biologiska nedbrytning går långsammare. Detta styrks av nedbrytningskurvan i figur 5.6, där en linjär reduktion av löst organiskt kol (DOC) observeras fram till dag 7. Samtidigt påverkas nedbrytningen av mikrobiologins sammansättning, vilket innebär att figur 5.6 främst bör ses som en indikation på nedbrytningsförloppet.

En fördel med detta substrat är att en relativt konstant SOUR kan förväntas, vilket underlättar tolkningen av resultaten. Den förhållandevis långsamma nedbrytningshastigheten medför dock att syrehalten avtar långsamt, vilket visualiseras i figur 5.8.



Figur 5.8. Syrehalt som funktion av tid under endogen respiration samt efter tillsats av pentaerytritol motsvarande 50 mg TOC/l. Data från försök B utfört 2026-04-15.

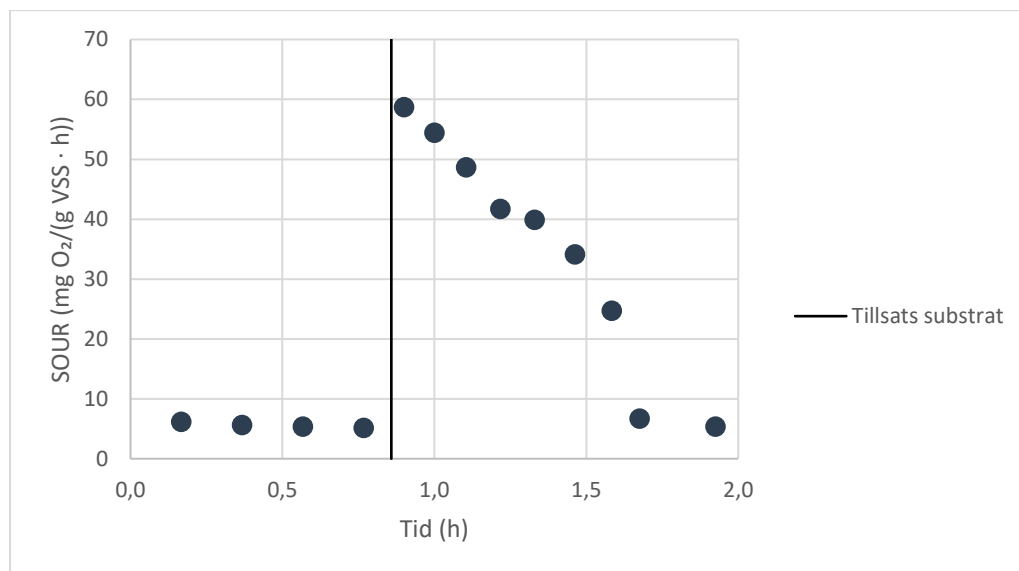
Syreupptagningshastigheten är linjärt och kurvan tydlig, men analysen blir tidskrävande om minst två cykler – från övre till nedre gränsvärdet – ska mätas. En möjlig lösning för att effektivisera metoden hade varit att mäta syrehalten i fasta tidsintervall, som för den endogena respirationen. Detta implementerades dock inte, eftersom en nackdel med penta som referenssubstant är att det är ett kristallint pulver som i vattenlösning faller ut vid förvaring i kylskåp. För att analysmetoden ska vara användbar behöver referenslösningen vara förberedd och TOC-halten fastställd, och förvaring i kylskåp är att föredra för att minska risken för förändring av provsammansättningen. Eftersom penta är ett fast material går det inte att använda det ouplöst på ett enkelt sätt, och en heterogen referenslösning på grund av utfällning riskerar att resultera i

avvikande TOC-halter i försöken, vilket i sin tur kan leda till felaktiga slutsatser. Således bedömdes penta inte vara ett lämpligt referenssubstrat för denna analysmetod.

5.2.2 Metanol

Metanol är den minsta envärda alkoholen och en biologiskt lättnedbrytbar kolkälla för aktivt slam (Davis, 2010, s. 22-20). Eftersom det är en av huvudråvarorna på industriparken, och därmed också en återkommande förorening i det inkommande processavloppsvattnet, förväntas mikrobiologin i avloppsreningsverket vara anpassad för nedbrytning av metanol. Vid försök med en metanoltillsats motsvarande 240 mg TOC/l uppmättes en SOUR på 55 mg O₂/(g VSS · h) och syreförbrukningen var så hög att återluftning med en luftsten och maximal lufttillförsel inte räckte för att höja halten löst syre i bägaren. Fler luftstenar adderades inte, men det är möjligt att det hade gått att möta syrebehovet med ytterligare luftning. Eftersom syreupptagningshastigheten var så omfattande bedömdes det inte lämpligt att använda en så hög metanolhalt i referensförsöken, då de manuella avläsningarna blev få per cykel och osäkra trots avläsningsintervall om 15 sekunder.

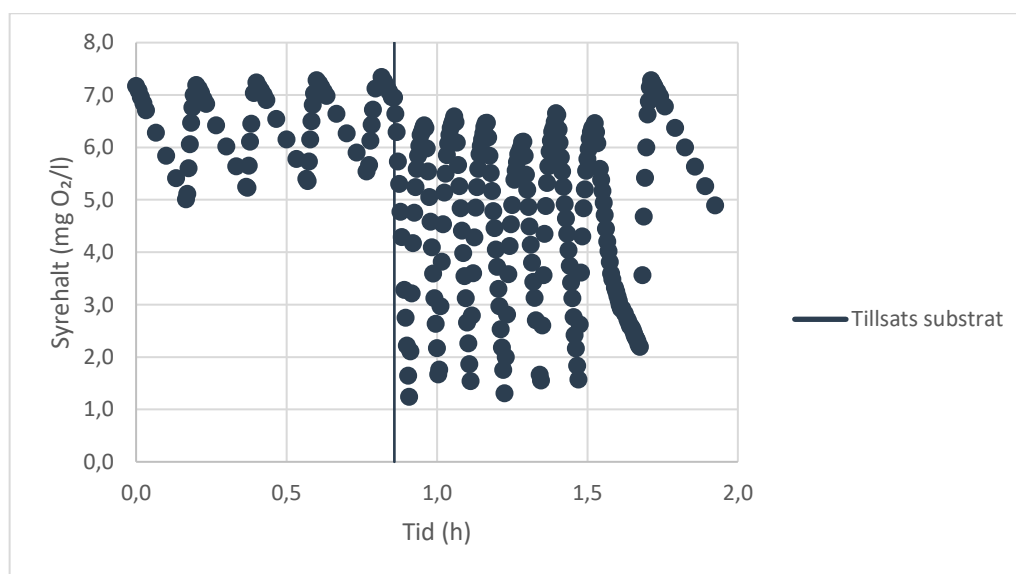
Vidare utfördes försök med ungefär en tiondel av den ursprungliga TOC-halten, vilket presenteras i figur 5.9, och en maximal SOUR på närmare 59 mg O₂/(g VSS · h) uppmättes.



Figur 5.9. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av metanol motsvarande 25 mg TOC/l. Resultat från försök A utfört 2026-04-10.

En tydligt avtagande SOUR kan observeras per cykel och efter ungefär 45 minuter nås endogen respirationshastighet återigen, vilket sannolikt beror på att metanolen då var förbrukad. Respirogrammet i figur 5.9 uppvisar en tydligt avtagande – nästan linjär – trend, vilket indikerar att mängden tillgänglig lättnedbrytbar TOC successivt minskade. Avsaknaden av plåteer tyder på att inga separata fraktioner av olika lättnedbrytbar TOC förekom (Hagman & la Cour Jansen, 2007), vilket är rimligt då enbart metanol tillsattes. Eftersom syreupptagningshastigheten är proportionell mot halten lättnedbrytbar TOC, bortsett från i överskottssituationer då maximal SOUR uppnås, är det förväntat att SOUR minskar på det sätt som observeras i figur 5.9 när substratet successivt förbrukas (Spanjers & Vanrolleghem, 2016).

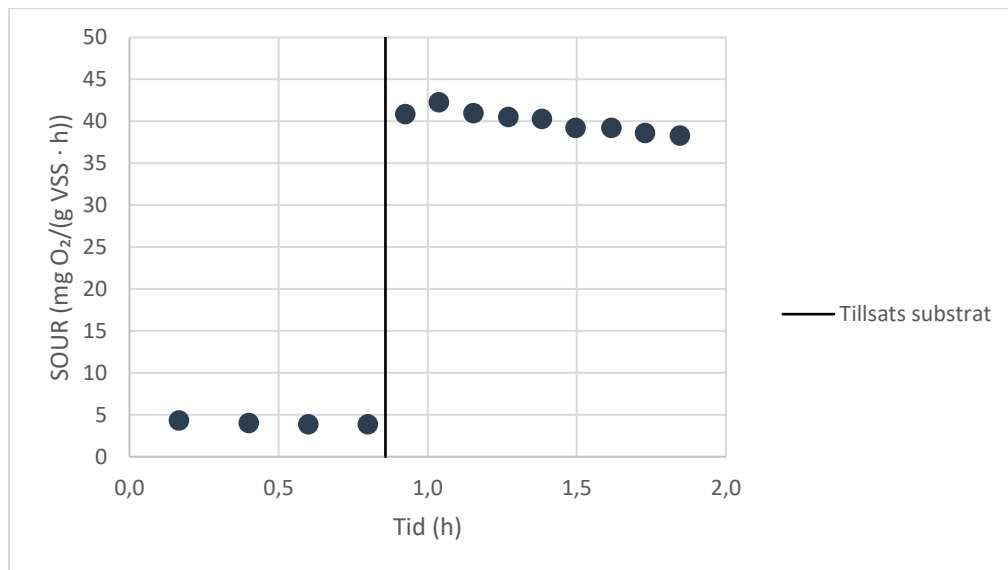
För försöken den 8 och 13 april observerades en avtagande SOUR per cykel, i likhet med resultaten i figur 5.9, och respirogram för dessa försök redovisas i bilaga C (figurena C.2 och C.3). Eftersom färre cykler genomfördes nås inte endogen respiration i dessa försök, men samma syreupptagningstendenser indikeras och en maximal SOUR på 44 respektive 54 mg O₂/(g VSS · h) uppmätts i den första cykeln i respektive försök. Variationerna antas härledas till både förändringar i slamsammansättning och försöksvariationer samt möjligen även pH och temperatur, som kan påverka aktiviteten. Vidare kan lutningsförändringarna i syrehaltsskurvan inte tydligt avgöras mellan cyklerna, men när metanolen antas ta slut framträder en tydlig lutningsförändring, se figur 5.10.



Figur 5.10. Syrehalt som funktion av tid under endogen respiration samt efter tillsats av metanol motsvarande 25 mg TOC/l. Data från försök A utfört 2026-04-10.

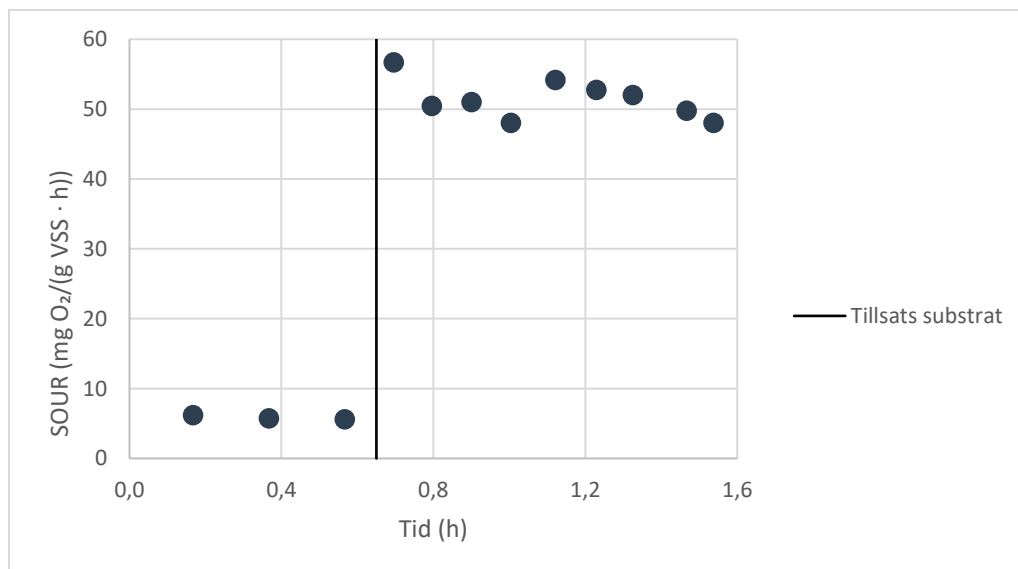
5.2.2.1 Metanolhalt motsvarande 50 mg TOC/l

Eftersom SOUR sjönk tydligt mellan cyklerna vid försöken med 25 mg TOC/l, till följd av snabb substratförbrukning, är dessa mätningarna mindre användbara för utvärdering. För att uppnå ett mer stabilt och jämförbart referensrespirogram genomfördes därför försök med den dubbla metanolhalten, motsvarande 50 mg TOC/l. Respirogrammet från försöket den 15 april återges i figur 5.11.



Figur 5.11. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av metanol motsvarande 50 mg TOC/l. Resultat från försök A utfört 2026-04-15 vid 20,9 °C.

Respirogrammet i figur 5.11 uppvisar en betydligt jämnare SOUR än för den lägre TOC-halten i figur 5.9. En svagt avtagande trend kan urskiljas, men den exogena respirationshastigheten på omkring 40 mg O₂/(g VSS · h) är betydligt högre än den endogena. En något mer avtagande SOUR framträder i försöket från den 13 april, vilket framgår av figur 5.12.



Figur 5.12. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av metanol motsvarande 50 mg TOC/l. Resultat från försök A utfört 2026-04-13 vid 22,9 °C.

Respirogrammet i figur 5.12 uppvisar dessutom små variationer mellan cyklerna. Detta noteras även i de respirogram som redovisas av Hagman och la Cour Jansen (2007), och kan sannolikt betraktas som brus. Betydligt högre SOUR uppmätts dock i försöket som illustreras i figur 5.12, mellan 57 och 48 mg O₂/(g VSS · h). Eftersom det endast skiljer två dygn mellan försöken är det inte troligt att förändringar i den heterotrofa biomassan ensamt förklarar den observerade skillnaden. En mer sannolik förklaring är försöksvariationer, där en av flera möjliga faktorer är en temperaturskillnad på 2 °C som kan ha bidragit till en högre aktivitet i försöket i figur 5.12. Dessutom noterades en effektiv nitrifikation och denitrifikation i anläggningen under denna period, samtidigt som kvävehalterna var högre den 13 april. Eftersom nitrifikationen inte inhiberas i analysmetoden kan den också ha bidragit till den högre totala syreupptagningshastigheten som uppmättes i det senare försöket.

Ytterligare försök, men med färre cykler, genomfördes därefter och redovisas i bilaga C (figurerna C.4 och C.5). Försöken i figur C.5 uppvisar båda en avtagande trend, och i ett av dem förekommer även visst brus, i likhet med figur 5.12. Samtidigt skiljer sig den uppmätta SOUR avsevärt mellan försöken: knappt 30 mg O₂/(g VSS · h) den 29 april jämfört med över 40 mg O₂/(g VSS · h) den 6 maj. I figur C.4 noteras i stället en ökning i SOUR mellan cyklerna, från 32 till 44 mg O₂/(g VSS · h). En möjlig förklaring, utöver försöksvariationer, är att mikrobiologin initialt behöver anpassa sig och att syreupptagningshastigheten ökar när denna anpassning skett.

5.2.2.2 Utvärdering av processprestanda

Hagman och la Cour Jansen (2007) presenterar maximal SOUR för tre olika kommunala slam med metanol som kolkälla, och stora skillnader observeras. Ett av slammen uppvisar en maximal SOUR på cirka 22 mg O₂/(g VSS · h), medan de två andra ligger omkring 6-7 mg O₂/(g VSS · h). Dessa värden är i samma storleksordning som för Perstorp industriparks slam, men på en tydligt lägre nivå. Samtidigt indikerar deras resultat att slammets sammansättning är en direkt följd av det avloppsvatten det exponerats för, och att nedbrytningsförmågan av ett specifikt substrat påverkas av detta.

SOUR för den första cykeln i de fem försöken med metanoltillsats motsvarande 50 mg TOC/l visar tydligt att processprestandan i LB1 försämras från den 13 till den 29 april, vilket framgår av tabell 5.3.

Tabell 5.3. Uppmätt specifik syreupptagningshastighet (SOUR) för den första cykeln och maximalt i respektive försök som genomförts med metanoltillsats motsvarande 50 mg TOC/l.

SOUR (mg O ₂ /(g VSS · h))		
Försök	Första cykeln	Maximal
2026-04-13, A	57	57
2026-04-15, A	41	42
2026-04-22, A	32	44
2026-04-29, A	29	29
2026-05-06, A	49	49

Resultaten i tabell 5.3 visar att den maximalt uppmätta syreupptagningshastigheten inte uppvisar en lika tydlig trend som den första cykeln, även om riktningen är densamma. En möjlig förklaring till skillnaderna mellan SOUR i den första cykeln och den maximalt uppmätta i försöket är att mikrobiologin initialt behöver anpassa sig, och att syreupptagningshastigheten ökar när denna anpassning skett.

Den observerade försämringen i processprestanda sammanfaller med förändringar i belastning och driftförhållanden på avloppsreningsverket. Två fabriker hade revisionsstopp mellan den 10 och 27 april, och genererade därmed inte genererade något processavloppsvatten kopplat till produktionsprocessen. Då en av fabrikerna normalt står för den största delströmmen metanol till avloppsreningsverket innebär detta en minskning på minst 25 % av den totala inkommande mängden metanol. Samtidigt pågick revisionsstopp på biobränslepannan, och inget överskottsslam avskildes mellan den 15 och 29 april, vilket medförde en successivt ökande slamålder.

Sammantaget är det sannolikt att den observerade minskningen i SOUR för metanol beror på både en äldre och mindre aktiv mikrobiologi samt en försämrad anpassning till nedbrytning av metanol till följd av den minskade belastningen. Temperaturen i försöken var $21,9 \pm 1$ °C och uppvisade ingen trend, vilket innebär att den inte kan förklara den SOUR-förändring som observeras. Viss försöksvariation kan förekomma, men den kan inte förklara den tydliga trend som framgår av tabell 5.3 och som förstärks av att SOUR ökar markant en vecka efter att både överskottsslam återupptas och metanolbelastningen ökar.

Sammanfattningsvis visar resultaten att metanol är lämplig som referenssubstans för den respirometriska analysmetoden. En halt motsvarande 50 mg TOC/l ger ett relativt stabilt och utvärderingsbart respirogram, till skillnad från lägre halter där substratet förbrukas för snabbt och högre halter där syreupptagningshastigheten blir begränsande för återluftning och avläsning. Mätserien indikerar dessutom att regelbundna respirometriska mätningar av slammet kan användas för att följa och utvärdera aktivslamanläggningens processprestanda, i enlighet med vad Hagman och la Cour Jansen (2007) förespråkar.

5.2.3 Samlad bedömning

Utifrån resultaten från de respirometriska försöken med penta och metanol bedömdes metanol vid en halt motsvarande 50 mg TOC/l som det mest lämpliga referenssubstratet. Penta gav visserligen stabila respirogram, men den större molekylen resulterade i långsammare nedbrytning och ett lägre SOUR-värde, närmare det endogena SOUR-intervallet. Det främsta skälet till att penta ansågs olämpligt var svårigheterna att förvara pentalösningen utan utfällning, i kombination med att substansen måste vara upplöst för att kunna användas i analysmetoden. Metanollösningen har inga sådana begränsningar och gav vid en halt motsvarande 50 mg TOC/l ett relativt stabilt respirogram, vilket gör den möjlig att använda för utvärdering av processprestandan över tid.

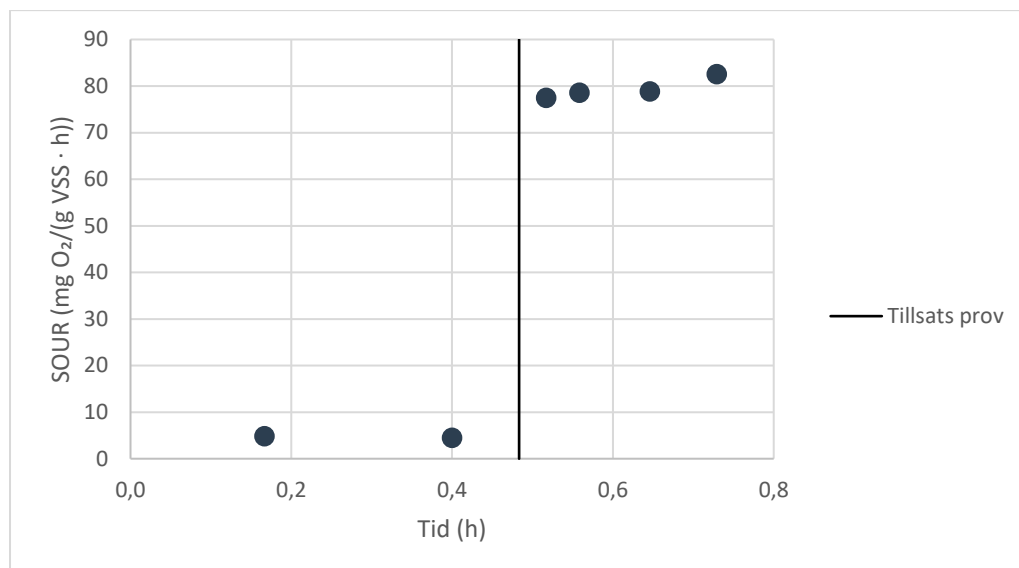
Det går dock inte att avgöra om förändringar i uppmätt SOUR enbart beror på skillnader i den heterotrofa biomassans aktivitet med den metodutformning som valts. Eftersom nitrifikationen inte inhiberas kan den, i kombination med att kvävefraktionerna inte bestäms i försöken, påverka den totala syreupptagningshastigheten som uppmäts. Försöksvariationer, inklusive pH och temperatur som påverkar mikroorganismernas metabolism, kan inte heller uteslutas som bidragande faktorer – även om temperaturen inte kan kopplas till förändringarna i SOUR som noteras i tabell 5.3. Samtidigt finns det fördelar med att bibehålla så många faktorer opåverkade som möjligt, eftersom det gör resultaten mer representativa för verkliga driftsförhållande. I det sammanhanget kan det dock noteras att det processavloppsvatten som tillförs luftningsbassängerna kommer från UB1 och därmed utgörs av en utjämnad sammansättning av alla inkommande delströmmar – inte en enskild delström som i analysmetoden. Det innebär att respirationsresultatet som erhålls inte speglar verkliga resultat fullständigt, men det är ändå användbart. Identifiering av hämmande halter av enskilda delströmmar kan användas för att beräkna vilka flöden eller mängder av dessa som kan accepteras för att säkerställa tillräcklig utspädning i UB1.

5.3 Metodutvärdering

För att utvärdera om analysmetoden är praktiskt användbar för toxicitetsutvärdering och bedömning av behandlingsbarheten av enskilda delströmmar genomfördes försök med processavloppsvatten från fabrik I samt en inhiberande referenslösning.

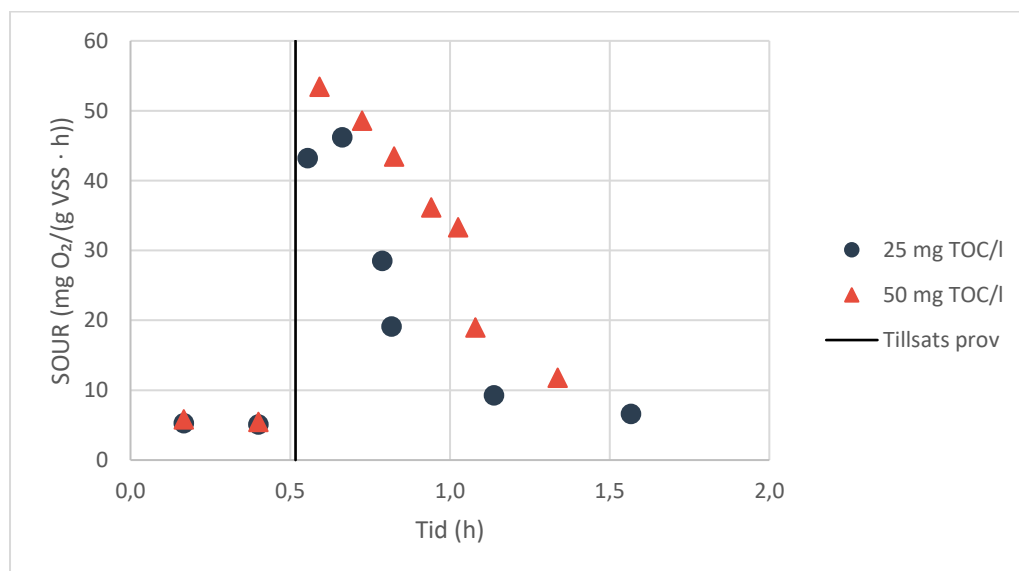
5.3.1 Processavloppsvatten från fabrik I

Processavloppsvattnet från fabrik I har en komplex och varierande TOC-sammansättning, bestående av minst två ämnen som är kända för att kunna uppvisa toxicitet mot mikroorganismer. Delströmmen omfattar både små och större molekyler, däribland envärda alkoholer, samt en begränsad mängd kväve. Respirogrammet från försöket den 15 april, där processavloppsvatten uttaget den 6 april tillsattes i en halt motsvarande 50 mg TOC/l, redovisas i figur 5.13.



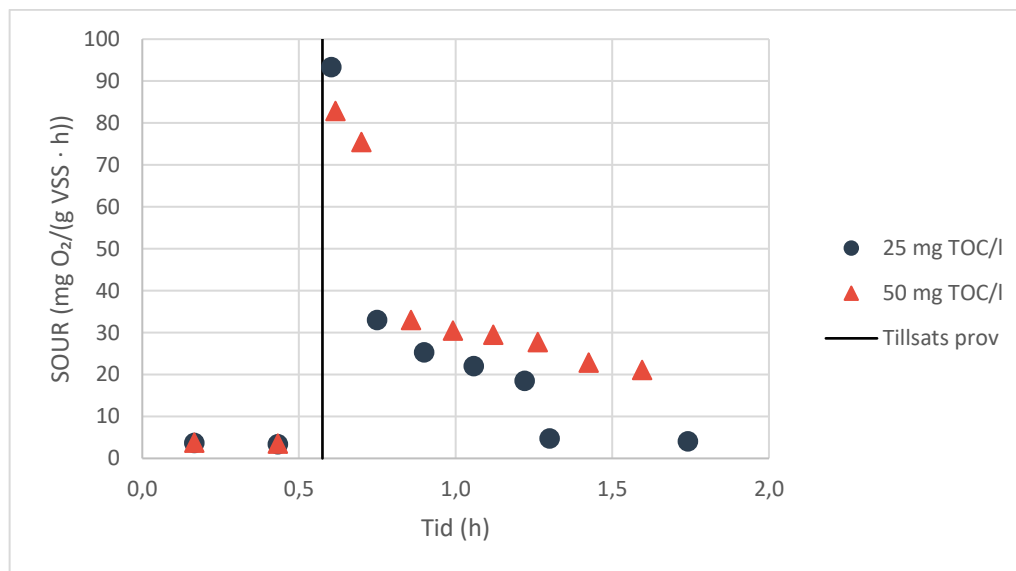
Figur 5.13. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av processavloppsvatten från fabrik I motsvarande 50 mg TOC/l. Resultat från försök C utförd 2026-04-15 vid 22,0 °C, baserat på prov uttaget 2026-04-06.

I figur 5.13 observeras en svagt ökande SOUR per cykel efter tillsats av processavloppsvatten. Respirogrammet indikerar ingen hämning av processavloppsvattnet vid denna halt, men den korta försökstiden till följd av tidsbrist begränsar tolkningen. Till skillnad från resultaten i figur 5.13 observerades en avtagande SOUR i båda försöken som genomfördes den 22 april, med processavloppsvatten uttaget den 15 april. Respirogrammen för de två testade halterna – 25 respektive 50 mg TOC/l – redovisas i figur 5.14.



Figur 5.14. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av processavloppsvatten från fabrik I motsvarande 25 respektive 50 mg TOC/l. Resultat från försök B och C utförda 2026-04-22 och baserade på prov uttaget 2026-04-15. Temperatur uppmättes endast i försök B, till 21,8 °C.

Som framgår av figur 5.14 erhöles konsekvent en högre syreupptagningshastighet för försöket med den högre TOC-halten. En mycket hög initial SOUR för analysen med 50 mg TOC/l noterades, men syrehalten sjönk så snabbt att tillräckligt med data inte hann avläsas innan det undre gränsvärdet passerats med hänsyn till inblandning. Ett beräknat SOUR-värde för denna cykel redovisas därför inte i figur 5.14. En liknande trend mellan halterna, men på en högre SOUR-nivå, redovisas i figur 5.15 för de två försök som genomfördes den 29 april med processavloppsvatten uttaget den 22 april.



Figur 5.15. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av processavloppsvatten från fabrik I motsvarande 25 respektive 50 mg TOC/l. Resultat från försök B och C utförda 2026-04-29 vid 21,8 °C respektive 22,1 °C, baserat på prov uttaget 2026-04-22.

Högst SOUR-värde i figur 5.15 noteras i första cykeln för försöket med 25 mg TOC/l, medan försöket med den dubbla TOC-halten bibehåller en hög nivå även i cykel två. Nivån är betydligt högre än vid föregående försöksdag, se figur 5.14, även om en liknande topp noterades i försöket med 50 mg TOC/l, och högre än vad som tidigare uppmätts i försöken med metanollösning. Förklaringen till den observerade skillnaden mellan försöken med processavloppsvatten från fabrik I är mest sannolikt variationer i sammansättningen till följd av produktionsvariationer, eftersom olika provuttag användes, samt viss variation i slamsammansättning och aktivitet. En möjlig förklaring till den höga SOUR-nivån presenteras av Hagman m. fl. (2006), som visat att OUR är additivt – vid tillsats av flera biologiskt lättnedbrytbara substrat erhålls en högre OUR, ungefär motsvarande summan av syreupptagningshastigheten för respektive substrat. Eftersom processavloppsvattnet från fabrik I innehåller flertalet ämnen är detta en rimlig förklaring till skillnaden i SOUR mellan försöken med delströmmen och metanollösningen.

Vidare observeras en distinkt nivåförändring i SOUR i samtliga försök i figurerna 5.14 och 5.15, även om den inträffar något tidigare och framträder mindre tydligt i försöken med den lägre TOC-halten. En möjlig förklaring till trenden är att processavloppsvattnet innehåller flera TOC-fraktioner med olika nedbrytningshastighet i slammet, och att den abrupta minskningen i SOUR uppstår när den mest lättnedbrytbara TOC-fraktionen förbrukats. Spanjers och Vanrolleghem (2016) observerar ett liknande respirogram, men med tre nivåer och tydligare plattåer,

för ett industriellt avloppsvatten bestående av tre lösningsmedel. Vidare presenterar Hagman och la Cour Jansen (2007) ett illustrativt heterotroft respirogram med tydliga plåtar för ett avloppsvatten bestående av blandat organiskt material med olika nedbrytningshastighet. Författarna betonar att verkliga respirogram oftast är mindre distinkta och inte nödvändigtvis uppvisar plåtar, men att det generella mönstret kan följas, vilket framgår vid jämförelse mellan respirogrammen i figurerna 5.14 och 5.15.

Utöver variationer i TOC-fraktioner kan även kvävemängden och nitrifikationen påverka respirogrammets form. Spanjers och Vanrolleghem (2016) beskriver att en abrupt minskning i OUR också kan uppstå när nitrifierbart kväve förbrukats och nitrifieringen därmed avstannat, vilket minskar den totala syreupptagningshastigheten i slammet. Eftersom delströmmen från fabrik I både innehåller olika organiska ämnen som bidrar till TOC och en begränsad mängd kväve, är båda mekanismerna rimliga förklaringar till observationerna. Vilken mekanism som dominerat kan inte fastställas, och ingen av dem kan uteslutas utan kompletterande analyser med nitrifikationsinhibering av slammet. Det är dock sannolikt att nitrifieringen bidragit till resultatet, vilket styrks av att totalhalten kväve var högre i provet som användes i försöken illustrerade i figur 5.14, där den tydliga nivåförändringen i SOUR inträffar senare än i figur 5.15.

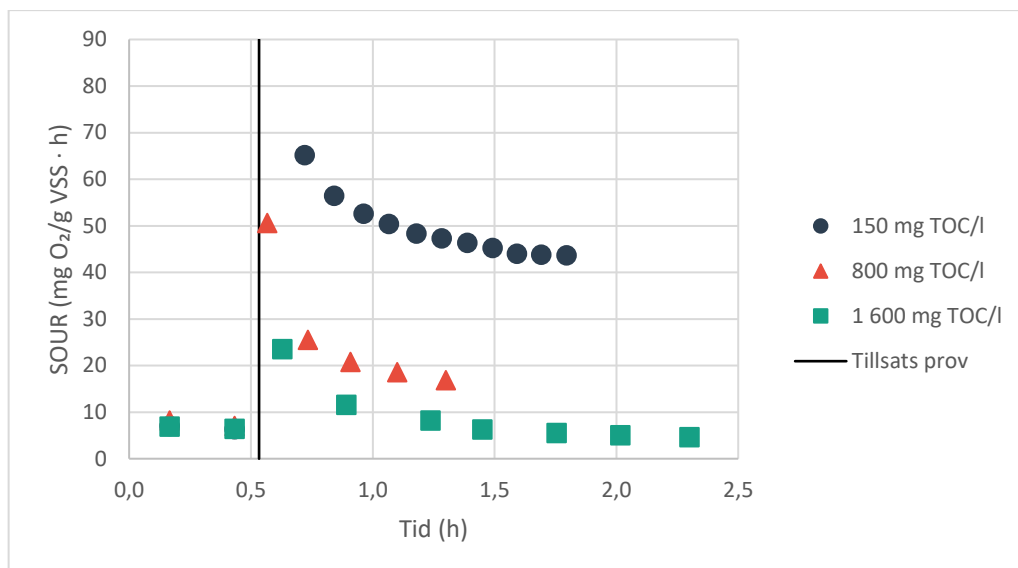
Den specifika syreupptagningshastigheten i figur 5.15 avtar exponentiellt efter den distinkta nivåförändringen i SOUR, och snabbare i försöket med 25 mg TOC/l. Detta tyder på att respirationen är begränsad av mängden substrat, eftersom en plåta – maximal SOUR – hade observerats om förhållanden med substratmättnad uppnåts (Spanjers & Vanrolleghem, 2016). Förklaringen stärks av att nästan endogen SOUR endast nås i försöket med 25 mg TOC/l, då hälften så mycket TOC tillsatts och därmed bör förbrukas tidigare än i det andra försöket.

Sammantaget indikerar försöken i figurerna 5.14 och 5.15 att processavloppsvattnet från fabrik I inte är akuttoxiskt i de halter som undersökts, då ett motsatt samband förväntas för en provsammansättning med hämmande egenskaper – SOUR bör avta med ökad provinspädning om toxicitet föreligger. Det kan dock inte uteslutas att delströmmen uppvisar toxicitet vid högre halter, eftersom vissa ämnen uppvisar ett haltberoende optimum varefter respirationshämning kan observeras. Skillnader i respirogrammen mellan försöksdagarna indikerar att sammansättningen i delströmmen varierar över tid, vilket anses troligt med hänsyn till fabriken.

5.3.2 Formalinlösning

Eftersom försöken med processavloppsvatten från fabrik I inte indikerade någon toxicitet kunde analysmetodens användbarhet för toxicitetsutvärdering inte bedömas. Därför genomfördes försök med en inhiberande referenslösning med definierad toxicitet, bestående av formaldehyd.

Ricco m. fl. (2004) fastställde EC_{50} -värdet för formaldehyd i kommunalt aktivt slam till 63 mg/l, och Fall m. fl. observerade kraftig respirationshämning vid tillsats av 200 mg/l samt ännu lägre OUR vid 1 200 mg/l. Samtidigt beskriver Klein m. fl. (2022) att toleransen för formalin hos aktivt slam kan öka genom gradvis exponering för högre halter. Eftersom processavloppsvattnet vid Perstorp industripark alltid innehåller formalin är en högre tolerans än i kommunalt slam förväntad. Typiskt varierar formaldehydhalten i det samlade inkommande processavloppsvattnet mellan 200-800 mg/l, och halten i utgående vatten är konsekvent under detektionsgränsen på 0,5 mg/l. Det första försöket genomfördes därför med en halt på 375 mg/l, motsvarande 150 mg TOC/l, vilket innebar att ingen hämning förväntades. För att undersöka toxicitetens haltberoende genomfördes därefter försök med 800 och 1 600 mg TOC/l, motsvarande 2 000 respektive 4 000 mg formaldehyd/l, och samtliga tre respirogram redovisas i figur 5.16.



Figur 5.16. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av formalinlösning motsvarande 150, 800 respektive 1 600 mg TOC/l. Resultat från försök B, C och D utförda 2026-05-06 vid $24,3 \pm 0,7$ °C.

Vid 150 mg TOC/l uppmättes en hög initial SOUR ($65 \text{ mg O}_2/(\text{g VSS} \cdot \text{h})$), vilket är högre än i referensförsöket med metanol trots att detta genomfördes vid en tredjedel av TOC-halten, se tabell 5.3 i 5.2.2.2 Utvärdering av processprestanda. Detta indikerar att formaldehyd vid denna halt inte orsakar någon omedelbar hämning. En bidragande förklaring till den höga initiala respirationen, utöver den högre halten organiskt material, kan vara att formalin innehåller en låg halt metanol som rest från tillverkningsprocessen (Perstorp, 2026), vilket är lättnedbrytbart. Metanolhalten är dock betydligt lägre än i referensförsöket, men eftersom OUR är additivt (Hagman m. fl., 2006) kan en kombination av nedbrytning av formaldehyd och metanol möjligen förklara observationen.

Den specifika syreupptagningshastigheten avtar sedan exponentiellt, vilket överensstämmer med substratbegränsad respiration där aktiviteten minskar i takt med att substrathalten minskar. Under de tre sista cyklerna stabiliseras SOUR på en platå, långt över endogen SOUR. Enligt Spanjers och Vanrolleghem (2016) uppstår exogena platåer vid substratmättnad, vilket ytterligare förstärker teorin om att nedbrytning av mer än formaldehyd sker initialt. En sannolik förklaring är därför att halten metanol succesivt sjunker medan halten formaldehyd är i överskott, vilket resulterar i en avtagande SOUR tills endast formaldehyd återstår och en platå infinner sig. Således indikeras inte akuttoxicitet i detta försök, vilket var i enlighet med förväntningen eftersom halten motsvarade normal belastning på avloppsreningsverket.

Vid 800 mg TOC/l observerades ett respirogram liknande det vid 150 mg TOC/l, men vid en betydligt lägre SOUR-nivå trots mer organiskt material, vilket framgår av figur 5.16. Att syreupptagningshastigheten genomgående är avsevärt lägre indikerar att halten formaldehyd är hämmande för mikrobiologin, även om den endogena referensnivån inte passeras. Det framgår tydligt att den exponentiellt avtagande syreupptagningshastigheten inte beror på substratbegränsning, eftersom högre TOC-halt använts än i försöket med 150 mg TOC/l, utan i stället beror på formaldehydens inaktiverande effekt på cellernas metabola funktioner (Klein m. fl., 2022). Då försöket avbröts på grund av tidsbrist efter fyra cykler kan den endogena respirationshastigheten inte användas för att utvärdera toxiciteten, men jämförelsen med försöket med lägre halt är tillräcklig för att kunna dra en slutsats om provhaltens påverkan på mikrobiologin.

Eftersom halten formaldehyd i försöket är mer än dubbelt så hög som den typiska exponeringen är det rimligt att mikroorganismernas tolerans överskrids och att aktiviteten därför sjunker.

I det slutliga försöket var halten 1 600 mg TOC/l, och den högsta specifika syreupptagningshastigheten erhöles i den första cykeln men avtog sedan exponentiellt. Att den första cykeln konsekvent uppvisat högst SOUR är förväntat, eftersom mikroorganismerna initialt har kortast exponeringstid för formaldehyd samtidigt som metanolhalten är som högst. Vid cykel fyra, cirka 55 minuter efter provtillsats, uppmättes lägre SOUR än för den endogena respirationen, vilket framgår av figur 5.16. Formaldehydens effekt avstannar dock inte och respirationshastigheten fortsätter avta därefter. Detta är en stark indikation på att halten sannolikt är akuttoxisk för det aktiva slammet och samtidigt en bekräftelse på att analysmetoden är användbar för toxicitetsutvärdering.

5.3.3 Sammantagen metodutvärdering

Sammantaget visar försöken med formalinlösningen att analysmetodens utformning, där den endogena specifika syreupptagningshastigheten används som referens för att avgöra toxicitet, är användbar men har tydliga begränsningar. Det aktiva slammets tolerans för formaldehyd är under 1 600 mg/l vid försöksdagen, vilket framträdde vid jämförelse med försöket med den lägre halten. Detta indikerar att endogen SOUR inte fungerar som ensam referenspunkt vid toxicitetsutvärdering om optimal processprestanda eftersträvas, utan att upprepade försök med olika halter krävs för att möjliggöra jämförelser. Vidare framgår svårigheter med att bedöma när försöket kan avslutas för att förkasta att processavloppsvattnet i aktuell halt är akuthämmande för mikrobiologin. En trolig avslutningspunkt är när en platå uppstår, förutsatt att den endogena referenspunkten inte passerats, men en maximal försökstid bör också fastställas – möjligen tre timmar, vilket OECD (2010) rekommenderar i sin metod.

Det bör dock betonas att resultaten som erhålls i respirationsanalysen inte fullt ut speglar de verkliga förhållandena i anläggningen. Det inkommande processavloppsvattnet till luftningsbassängerna kommer från UB1 och utgör därmed en utjämnad blandning, inte en enskild delström som i analysmetoden. Eftersom kombinationseffekter kan uppstå kan den uppmätta toxiciteten både reduceras och förstärkas efter inblandning med andra delströmmar. Resultaten från respirationsanalysen bör därför ses som ett vägledande verktyg, snarare än som en direkt avspeglning av den verkliga effekten som hade erhållits i aktivslamanläggningen.

6 Slutsats

Syftet med examensarbetet var att ta fram en användbar experimentuppställning för respirationsanalys av aktivt slam och enskilda processavloppsvattenströmmar från fabriker inom Perstorp industripark. Arbetet visar att det är möjligt att framställa en enkel men fungerande uppställning med den tillgängliga utrustningen vid avloppsreningsverkets driftslaboratorium, och att denna genererar tillförlitliga mätningar av syrehalten. Resultatet visar också att ett reaktorlock inte påverkar masstransporten av syre och därför kan exkluderas, vilket förenklar metodutförandet utan att kompromissa med funktionaliteten. Vidare konstateras att variationer i endogen SOUR främst beror på biologisk variation, och att en kort förluftningstid är tillräcklig för att uppnå en användbar referensnivå. Analysmetoden är dock begränsad av osäkerheterna i analysen av slamhalt och den låga analysfrekvensen, vilket innebär att SS-halten i försöket troligen avviker från den som används i beräkningarna av den specifika syreupptagningshastigheten och därmed utgör en källa till osäkerhet i resultaten.

Resultaten från det laborativa arbetet visar att pentaerytritol bryts ned långsamt, vilket ger en låg men stabil exogen syreupptagningshastighet. Substansen bedöms inte lämplig som referenssubstrat eftersom förvaring av referenslösningen antingen riskerar heterogenitet eller förändrad provsammansättning, vilket kan ge missvisande respirogram. Försöken visar i stället att metanol är lämplig som referenssubstans för att följa aktivslamanläggningens processprestanda över tid. En halt motsvarande 50 mg TOC/l bedöms vara en god avvägning mellan att vara tillräckligt låg för att möjliggöra återluftning och representativa avläsningar, och tillräckligt hög för att ge ett relativt stabilt och utvärderingsbart respirogram. Referensmätningarna bör dock främst ses som en indikation, eftersom det inte kan uteslutas att faktorer som pH, temperatur och närsalt-sammansättning kan påverka syreupptagningshastigheten.

Utvärdering av akuttoxicitet i en delström och en inhiberande referenslösning visar att den endogena specifika syreupptagningshastigheten inte är tillräcklig som ensam referensnivå för att indikera hämning, om optimal processprestanda eftersträvas. Resultaten tydliggör att minst två mätningar med olika provinspädningar krävs för att möjliggöra en användbar toxicitetsutvärdering av analysmetoden. Vidare framträder svårigheter med att avgöra när försöket kan avsluta, och en begränsning i analysmetoden är att den inte tar hänsyn till kombinationseffekter som kan uppstå vid inblandning med övriga processavloppsvatten i anläggningen. Sammantaget visar detta att analysmetoden kan användas för att indikera behandlingsbarheten i enskilda delströmmar, men endast som ett vägledande underlag och inte som ett absolut mått.

7 Framtida studier

Resultaten från det laborativa arbetet illustrerar flera begränsningar i analysmetoden. Metoden är tids- och resurskrävande eftersom syrehalten måste avläsas manuellt och parallella mätningar inte är möjliga då endast en DO-sensor finns tillgänglig. Svårigheter med att avgöra när försöket kan avbrytas för att kunna förkasta eller bekräfta akuttoxicitet gör metoden ytterligare tidskrävande. Det vore därför av intresse att undersöka andra typer av respirationsmätningar, exempelvis rekommendationen från OECD (2010) om kontinuerlig luftning och mätning av syrehalten efter 30 minuter respektive tre timmar, för att utvärdera om metoden kan göras mer resurseffektiv.

Analysmetoden har endast verifierats med en verklig delström och en inhiberande referenslösning baserad på formaldehyd. Det är stora variationer i sammansättning mellan de olika delströmmarna inom industriparken, och analysmetoden bör därför utvärderas med fler delströmmar för att bättre förstå dess begränsningar.

Vidare medför avsaknaden av temperaturreglering och pH-justering att svagare slutsatser kan dras från resultaten, eftersom båda processparametrarna påverkar metabolismen och temperaturen sannolikt även inverkar på masstransporten av syre. Resultaten påvisar inte att temperaturen enskilt påverkar den uppmätta syreupptagningshastigheten, men då flera processparametrar är okontrollerade är det möjligt att variationer i försöksförhållandena maskerar en sådan effekt. Det vore därför intressant att undersöka hur temperaturen påverkar resultaten, och utvärdera om en standardisering av temperatur och pH i analysmetoden kan öka tillförlitligheten. En sådan standardisering kräver dock mer avancerad utrustning och innebär därmed en kostnad. Detta bör vägas mot de potentiella fördelar som kan erhållas, samt mot risken att resultaten blir mindre representativa för verkliga driftsförhållanden.

En annan begränsning i analysmetoden är antagandet om att slammet innehåller tillräckliga mängder närsalter och mikronäringsämnen för att dessa inte ska vara respirationsbegränsande under försöket. Trots att resultaten inte tyder på att det är en bristsituation vore det av intresse att genomföra jämförande försök, med och utan tillsatt näringsmedium, för att verifiera antagandet samt undersöka om en standardisering med näringsmedium ökar tillförlitligheten. Eftersom kvävefraktionerna i försöken inte fastställs och den totala respirationen mäts, samtidigt som variationer i slamsammansättningen förekommer, vore det dessutom intressant att genomföra försök med nitrifikationsinhibering. Dels för att undersöka hur mycket nitrifikationsprocessen bidrar till den totala syreupptagningshastigheten, och dels för att fastställa hur nitrifierarnas aktivitet varierar över tid, eftersom de är känsligare än heterotrof biomassa (Davis, 2010, s. 22-19).

En betydande metodbegränsning är osäkerheten i den gravimetriska mätningen av SS, som både används för att standardisera slamhalten i försöken och i beräkningarna av SOUR. Trots att undersökningar genomfördes och felkällor identifierades samt åtgärdades kan dessa inte förklara de stora variationer i SS-halt som observerats på kort tid. Det är därför motiverat att utreda analysmetoden för att identifiera källorna till variationerna, vilket förutom att öka tillförlitligheten i de respirometriska resultaten även kan bidra till förbättrad processtyrning. Dessutom hade det varit värdefullt att analysera VSS för att fastställa förhållandet mellan VSS och SS i luftningsbassängerna vid Perstorp industriparks avloppsreningsverk och därigenom undvika det nuvarande antagandet.

Det hade också varit intressant att genomföra försök med slam från reningslinje 2, eftersom luftningsbassängerna är konstruerade med olika flödesmodeller och mikrobiologin skiljer sig åt – något som bekräftats genom mikroskopering, närsaltsbehov och skillnader i reningsreduktioner. Det är därför sannolikt att respirationshastigheter och känslighet skiljer sig mellan slammen, vilket hade varit värdefull information då det inkommande processavloppsvattnet är detsamma.

Vidare betonas att analysmetoden inte speglar verkliga driftsförhållanden fullständigt, bland annat eftersom enskilda processavloppsvatten inte tillförs luftningsbassängerna utan utjämnas i UB1 först. Det vore därför av intresse att genomföra försök kompletterade med processavloppsvatten från UB1, för att undersöka eventuella kombinationseffekter vid mottagande av en enskild och avvikande delström.

Slutligen undersöker analysmetoden endast akuttoxicitet för det aktiva slammet, men eventuell kronisk toxicitet är också viktig att beakta vid beslut om mottagning av enskilda och avvikande processavloppsvatten, för att skydda reningsprocessen från störningar. Det hade därför varit av intresse att undersöka om analysmetoden kan utvecklas för att inkludera mätning av kronisk toxicitet.

8 Referenser

Davis, L. (2010). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. McGraw-Hill Professional.

Fall, C., Cuenca, F.M., Bâ, K.M. och Solís, C.M. (2006). Respirometry-based evaluation of the fate and possible effects of antifreeze on activated sludge. *Journal of Environmental Management*, 80(1), 83-89.

Hagman, M. och la Cour Jansen, J. (2007). Oxygen uptake rate measurements for application at wastewater treatment plants. *Vatten*, 2, 131-138.

Hagman, M., Nielsen, J.L., Nielsen, P.H. och la Cour Jansen, J. (2006). Identification of functional groups of denitrifiers in activated sludge. I Stuetz, R. och Teik-Thye, L. (red.). *Young Researchers 2006*. Water and Environmental Management Series (WEMS), IWA Publishing.

Havs- och vattenmyndigheten. (2019). Ingen övergödning: Fördjupad utvärdering av miljö-kvalitetsmålen 2019. Rapport 2019:1. Göteborg: Havs- och vattenmyndigheten.

Klein, V.J., Irla, M., Gil López, M., Brautaset, T. och Fernandes Brito, L. (2022). Unravelling Formaldehyde Metabolism in Bacteria: Road Towards Synthetic Methylophony. *Microorganisms*, 10(2), 220.

Kristensen, G.H., Jørgensen, P.E. och Hanze, M. (1992). Characterization of functional microorganism groups and substrate in activated sludge and wastewater by AUR, NUR and OUR. *Water Science and Technology*, 25(6), 43-57.

Krzeminski, P., Iglesias-Obelleiro, A., Madebo, G., Garrido, J.M., van der Graaf, J.H.J.M. och van Lier, J.B. (2012). Impact of temperature on raw wastewater composition and activated sludge filterability in full-scale MBR systems for municipal sewage treatment. *Journal of Membrane Science*, 423-424, 348-361.

Naturvårdsverket. (2011). Kemisk och biologisk karakterisering av punktutsläpp till vatten: En handbok med vägledning om bestämning av egenskaperna hos utsläpp av avloppsvatten. Handbok 2010:3, utgåva 3. Stockholm: Naturvårdsverket.

OECD. (2010). *Test No. 209: Activated Sludge, Respiration Inhibition Test (Carbon and Ammonium Oxidation)*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264070080-en>.

Perstorp. (2026). Formalin 50 LM [Säkerhetsdatablad]. SDB-nummer: 600000000121. Tillgänglig: https://www.perstorp.com/-/media/files/perstorp/ods_import/msds/formalin_lm_50/msds_formalin_lm_50_swe-11653.pdf (Hämtad 2026-05-09).

Ricco, G., Concetta Tomei, M., Ramadori, R. och Laera, G. (2004). Toxicity assessment of common xenobiotic compounds on municipal activated sludge: comparison between respirometry and Microtox®. *Water Research*, 38(8), 2103-2110.

Spanjers, H. och Vanrolleghem, P. (2016). Respirometry. I van Loosdrecht, M., Nielsen, P., Lopez-Vazquez, C. och Brdjanovic, D. (red.). *Experimental Methods in Wastewater Treatment*. IWA Publishing, 133-176.

Svenskt Vatten (2019). Råd vid mottagande av avloppsvatten från industri och annan verksamhet. Publikation P95. Stockholm: Svenskt Vatten.

Tillväxtverket. (2025). Industri och handel i beredskap – Förslag på definition och avgränsningar för området. Rapport 0516. Stockholm: Tillväxtverket.

Wentzel, M.C., Mbewe, A. och Ekama, G.A. (1995). Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal waste waters. *Water SA*, 21(2), 117-124.

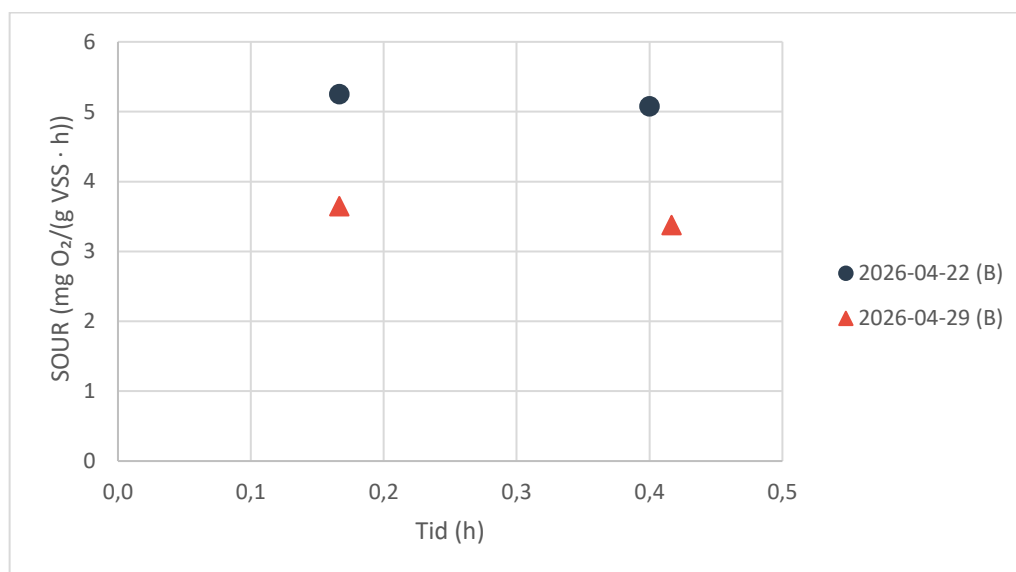
Wärff, C., Lindblom, E., Lundwall, T., Samuelsson, O. och Gustavsson, D. (2025). Karakterisering av kommunalt avloppsvatten för processmodellering och design. SVU-rapport 2025-10. Stockholm: Svenskt Vatten.

Bilaga A – Beräkningsprotokoll inför försök

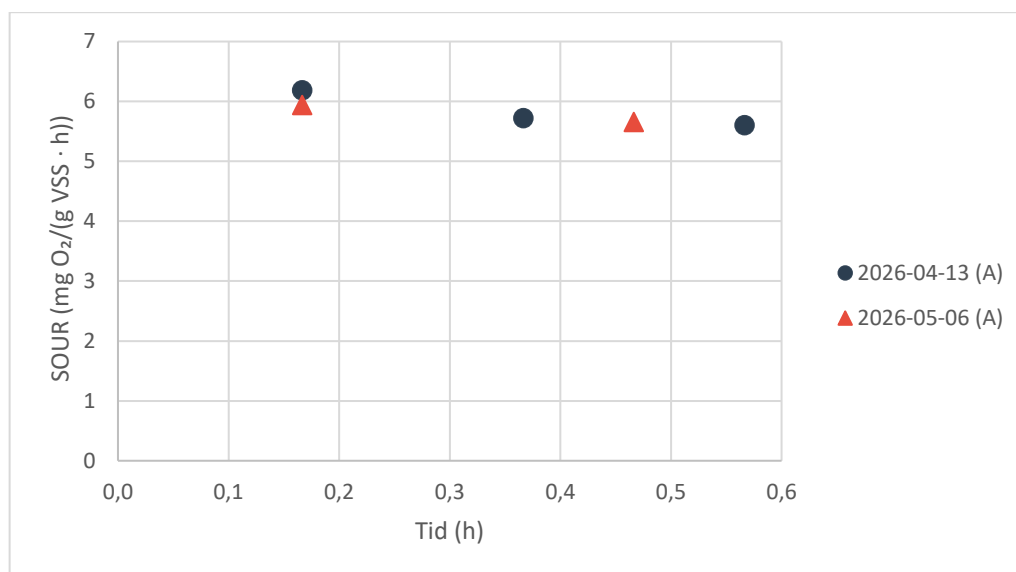
Tabell A.1. Beräkningsprotokoll inför respektive försök, där proceduren framgår från initialt uppmätta halter till beräkningarna av respektive volym utifrån de experimentförhållanden som bestämts.

Initiala halter			
Parameter	Symbol	Enhet	Kommentar
SS-halt i RS1	$c_{SS, initialt}$	mg SS/l	Bestäms gravimetriskt genom sugfiltrering och torkning
TOC-halt i prov	$c_{TOC, initialt}$	mg TOC/l	
Experimentförhållanden			
Parameter	Symbol	Enhet	Kommentar
Totalvolym	V_{tot}	ml	Begränsas av bägarvolym
VSS-halt i försök	$c_{VSS, försök}$	mg VSS/l	
TOC-halt i försök	$c_{TOC, försök}$	mg TOC/l	
Beräkningar			
Parameter	Symbol	Enhet	Formel
VSS-halt i RS1	$c_{VSS, initialt}$	mg VSS/l	$c_{VSS, initialt} = 0,70 \cdot c_{SS, initialt}$
Volym RS1	V_{RS1}	ml	$V_{RS1} = \frac{c_{VSS, försök} \cdot V_{tot}}{c_{VSS, initialt}}$
Volym prov	V_{prov}	ml	$V_{prov} = \frac{c_{TOC, försök} \cdot V_{tot}}{c_{TOC, initialt}}$
Volym vatten	V_{vatten}	ml	$V_{vatten} = V_{tot} - V_{RS1} - V_{prov}$

Bilaga B – Respirogram för endogen respiration

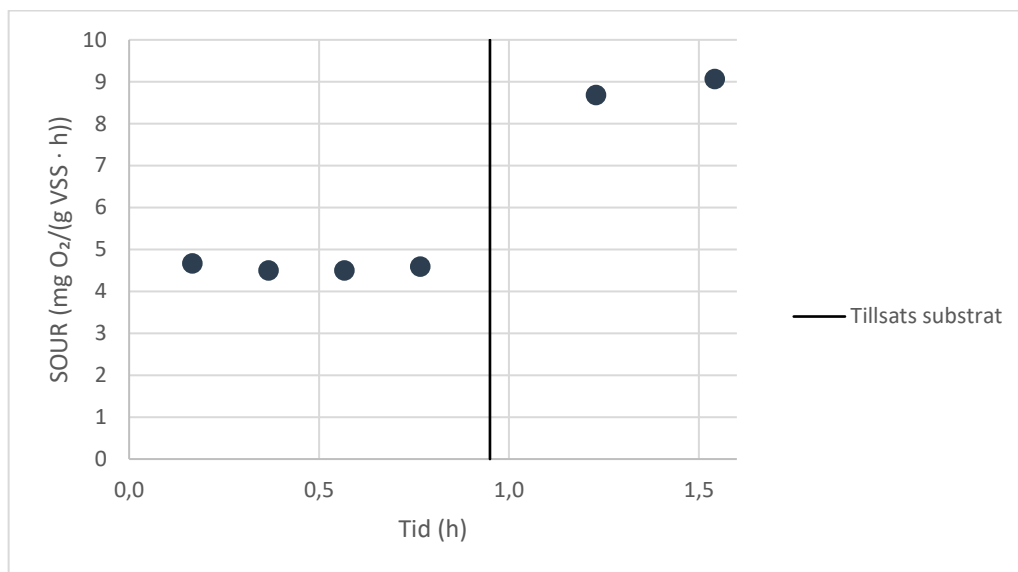


Figur B.1. Den specifika syreupptagningshastigheten (SOUR) under endogen respiration vid 21,5 °C efter 25 minuters förluftning, för försök B utförda 2026-04-22 och 2026-04-29.

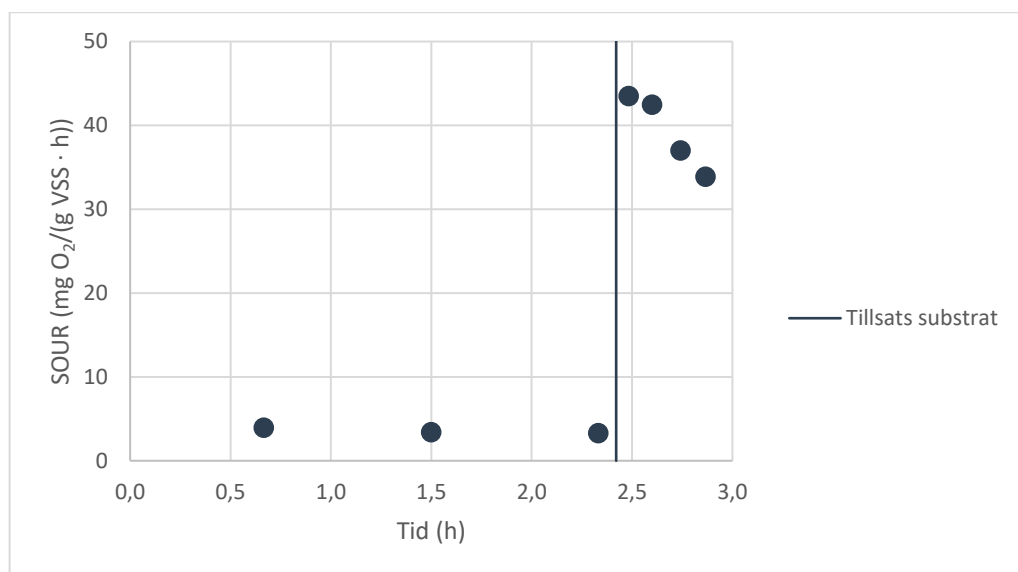


Figur B.2. Den specifika syreupptagningshastigheten (SOUR) under endogen respiration vid 22,9 °C efter 25 minuters förluftning, för försök A utförda 2026-04-13 och 2026-05-06.

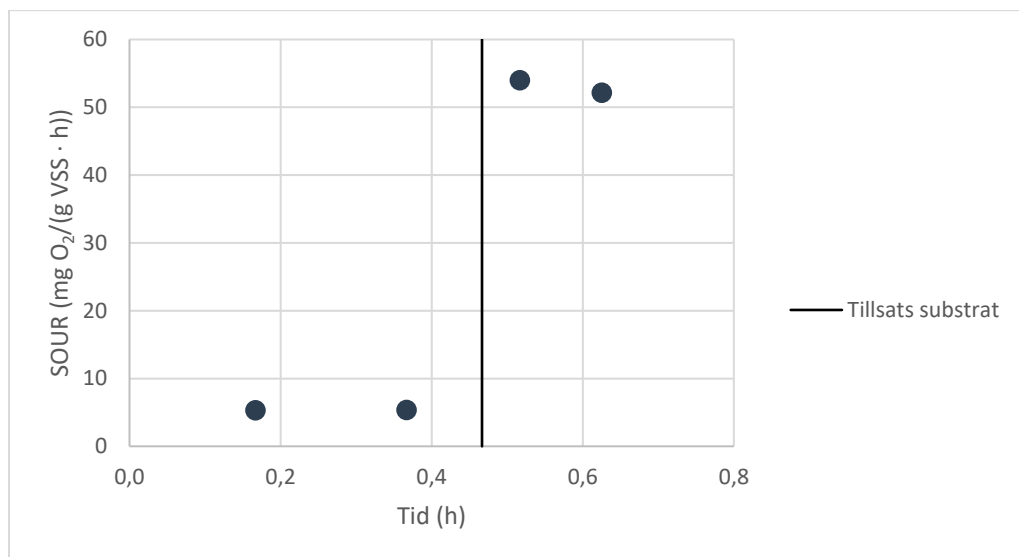
Bilaga C – Respirogram för referenssubstrat



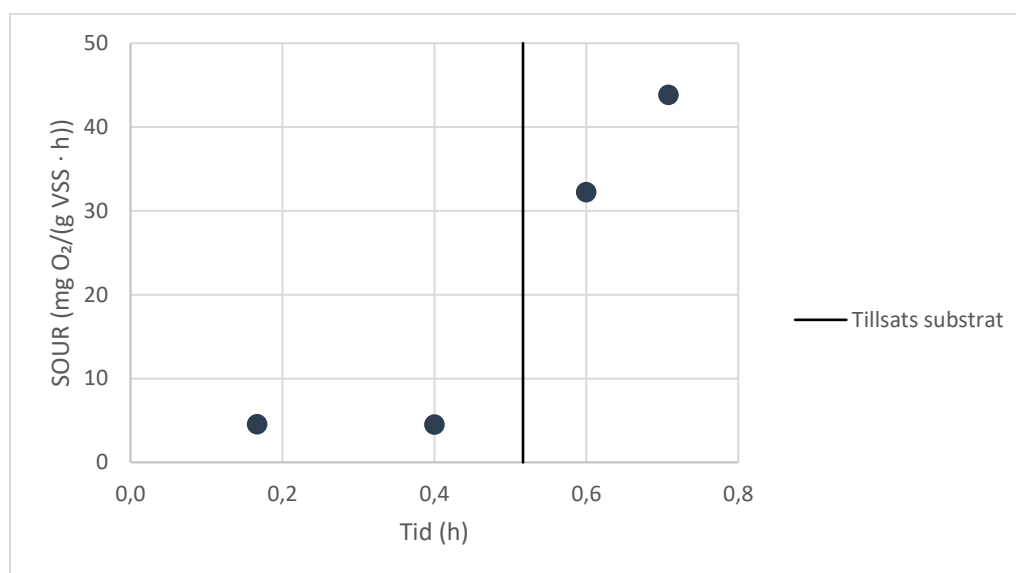
Figur C.1. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av pentaerytritol motsvarande 25 mg TOC/l. Resultat från försök B utfört 2026-04-10.



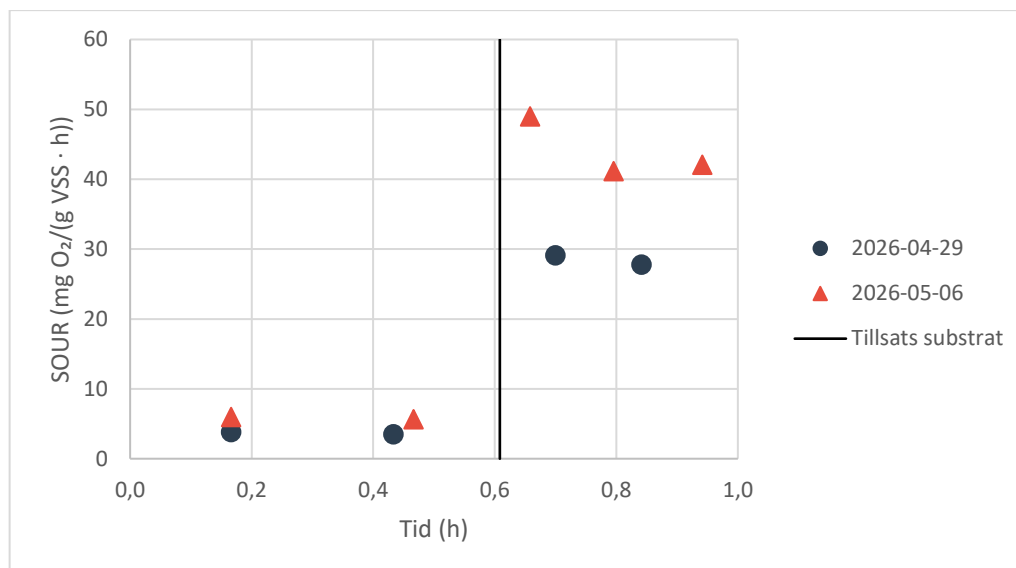
Figur C.2. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av metanol motsvarande 25 mg TOC/l. Resultat från försök utfört 2026-04-08.



Figur C.3. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av metanol motsvarande 25 mg TOC/l. Resultat från försök A utfört 2026-04-13.



Figur C.4. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av metanol motsvarande 50 mg TOC/l. Resultat från försök A utfört 2026-04-22.



Figur C.5. Specifik syreupptagningshastighet (SOUR) under endogen respiration och efter tillsats av metanol motsvarande 50 mg TOC/l. Resultat från försök A utförda 2026-04-29 och 2026-05-06.