

Övervakning och underhåll av luftarsystem

Tillståndsbaserat underhåll för ökad energieffektivitet på
avloppsreningsverk

Simon Bengtsson
Oscar Samuelsson

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

RAPPORTENS TITEL	Övervakning och underhåll av luftarsystem. Tillståndsbaserat underhåll för ökad energieffektivitet på avloppsreningsverk
TITLE OF THE REPORT	Diffuser monitoring and maintenance. Condition-based maintenance at wastewater treatment plants
FÖRFATTARE	Simon Bengtsson, VA SYD/Sweden Water Research, Oscar Samuelsson, IVL Svenska Miljöinstitutet
RAPPORTNUMMER	2024-12
ANTAL SIDOR	69
SAMMANDRAG	Den här undersökningen är den första i sitt slag där prestandan för använda luftare från svenska avloppsreningsverk har testats. Resultaten visar att både igensättning och åldrande av luftare sker på svenska reningsverk och resulterar i ökad elanvändning för luftning. Samtidigt finns det möjligheter med tillståndsbaserat underhåll som kan minska den onödiga elanvändningen.
SUMMARY	In this study, the performance of aeration diffusers from Swedish wastewater treatment plants were tested for the first time. The results showed that fouling as well as ageing of diffusers occur at Swedish treatment plants which leads to increased electricity usage for aeration. At the same time, there are opportunities with condition-based maintenance that can reduce unnecessary electricity use.
SÖKORD	Luftare, underhåll, tillståndsbaserat underhåll, energieffektivitet
KEYWORDS	Fouling, diffuser membrane, diffuser monitoring, dynamic wet pressure
MÅLGRUPPER	Process-, drift- och underhållsingenjörer, drifttekniker, driftchefer
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGÅR	2024
UTGIVARE	©Svenskt Vatten AB
REFERENS	Bengtsson S. och Samuelsson O. (2024). <i>Övervakning och underhåll av luftarsystem. Tillståndsbaserat underhåll för ökad energieffektivitet på avloppsreningsverk</i> . SVU-rapport 2024-12. Stockholm: Svenskt Vatten.
RAPPORTNUMMER IVL	B2492 (ISBN 978-91-7883-599-7)

Om projektet

PROJEKTNUMMER	22-107
PROJEKTETS NAMN	Rent blås – övervakning och underhåll av luftare
PROJEKTETS FINANSIERING	Stiftelsen för IVL (SIVL), Svenskt Vatten Utveckling (SVU), Gryaab, Tekniska Verken i Linköping, Motala kommun, Stockholm Vatten och Avfall, Nodra, Uppsala Vatten och Avfall och VA SYD.

Förord

I denna rapport presenteras resultat och erfarenheter från projektet Rent Blås, som pågick från maj 2022 till mars 2024, tillsammans med de råd som projektgruppen kom fram till. Initiativet till Rent Blås kom från oss författare: Oscar Samuelsson, IVL Svenska Miljöinstitutet, och Simon Bengtsson, VA SYD och Sweden Water Research. Vi hade på olika håll arbetat med luftning på kommunala avloppsreningsverk, och hade båda insett att övervakning och underhåll av luftarsystem var ett område som förtjänade mer uppmärksamhet. En workshop för behovsinventering med ett antal VA-organisationer bekräftade att detta var ett viktigt område för branschen. Rent Blås finansierades av Stiftelsen för IVL, Svenskt Vatten Utveckling och de deltagande VA-organisationerna Gryaab, Motala kommun, NODRA, Stockholm Vatten och Avfall, Tekniska Verken i Linköping, Uppsala Vatten och Avfall och VA SYD.

Projektet leddes av Oscar med Simon som biträdande projektledare och senior rådgivare. Ett flertal personer bidrog till att konstruera och bygga den pilotanläggning som användes för renvattenförsök. Referensgruppen bidrog med värdefulla råd om pilotanläggningens utformning. Från IVL bidrog Anders Björk med att implementera automation och datainsamling och Jens Wilhelmsson med dataöverföring. Stålkonstruktion genomfördes av Göran Käck, och Göran Samuelsson bidrog vid installation och uppstart av pilotanläggningen. Erik Lindblom bidrog med kunskapsstöd vid modellsimuleringarna. Deltagare från VA-organisationerna medverkade vid projektmöten, workshoppar och genom egna undersökningar på sina reningsverk, inklusive nedtappning och insamling av luftare. Vi vill rikta ett stort tack till dessa medverkande för engagerade och viktiga bidrag till projektet.

En referensgrupp med internationella experter var knuten till projektet och bidrog med synpunkter på försöksplanering, tolkning av resultat och omvärldsbevakning. Vi tog tacksamt emot dessa synpunkter från Diego Rosso, University of California, Irvine, Bengt Carlsson, Uppsala universitet, Christian Fliegner och Angela Seipel, Xylem Services GmbH, Jenny Riit, Xylem Water Solutions Sweden, och Don Jones, Xylem Inc.

Som komplement till denna rapport hänvisas till SVU-rapporten *Effektiv luftning – design, drift, underhåll och upphandling av luftningsutrustning för kommunala avloppsreningsverk* (2019-23). Den behandlar luftning i ett bredare perspektiv och ger en mer allmän bild av hur VA-aktörer kan arbeta mot energieffektiv luftning, medan föreliggande rapport är fokuserad på underhåll och tillhörande övervakning.

Vi hoppas att denna rapport kommer bli ett användbart stöd på vägen för de VA-aktörer som vill arbeta proaktivt med ett mera tillståndsbaserat underhåll av luftarsystem och i förlängningen bidra till minskad energianvändning och bättre effektivitet vid avloppsreningen.

Simon Bengtsson & Oscar Samuelsson

Maj 2024

Innehåll

Förord.....	2
Sammanfattning.....	4
Summary	5
1 Inledning.....	6
1.1 Syfte.....	7
1.2 Läsanvisningar	7
2 Bakgrund	8
2.1 Syreöverföringseffektivitet (SOTE) och tryckfall (DWP).....	8
2.2 Förlust av luftningsprestanda över tid	8
2.3 Rengöring av luftare	11
2.4 Test av luftares prestanda i rent vatten	13
2.5 Prestandaövervakning under drift.....	15
2.6 Sammanfattning av bakgrund.....	18
3 Metoder vid renvattenförsök, prestandaövervakning och simuleringar	19
3.1 Renvattenförsök.....	19
3.2 Prestandaövervakning.....	24
3.3 Simulering av optimerat underhåll	28
4 Resultat från renvattenförsök	31
4.1 Erfarenheter från renvattenförsök	31
4.2 Rengöring	31
4.3 Dynamiskt våttryck	32
4.4 Syreöverföringseffektivitet	35
4.5 Påverkan av betingelser på igensättning och åldrande	38
5 Resultat från prestandaövervakning.....	42
5.1 Uppskattad syreöverföringseffektivitet genom nyckeltalsberäkningar.....	42
5.2 Tryckövervakning genom mottrycksuppskattning	46
6 Simulerade kostnader och koldioxidutsläpp vid olika underhållsstrategier.....	48
7 Diskussion	51
8 Råd och fortsatt forskning	54
8.1 Underhållsstrategi	54
8.2 Prestandaövervakning.....	54
8.3 Behov och fortsatt forskning.....	55
9 Slutsatser	56
Referenser.....	57
Bilaga A Beräkning av LSI	62
Bilaga B Beräkning av syrebehov i avloppsvatten (AOR)	63
Bilaga C Uppskattning av syreöverföringseffektivitet med trappmetoden.....	65
Bilaga D Fler exempel på uppskattad syreöverföringseffektivitet genom nyckeltalsberäkningar.....	67

Sammanfattning

Den här undersökningen är den första i sitt slag där prestandan för använda luftare från svenska avloppsreningsverk har testats. Resultaten visar att både igensättning och åldrande av luftare sker på svenska reningsverk och resulterar i ökad elanvändning för luftning. Samtidigt finns det möjligheter med tillståndsbaserat underhåll som kan minska den onödiga elanvändningen.

Med ökande koldioxidutsläpp och ökande elpriser har energieffektivisering blivit viktigt, inte minst för att uppnå målet om en klimatneutral VA-bransch. I de kommunala avloppsreningsverken kan luftning av de biologiska bassängerna stå för hälften av reningsverkets totala elanvändning. Internationella studier indikerar att upp till 40 % av denna elanvändning är onödig och beror på igensättning och åldrande membran. Men de svenska erfarenheterna är begränsade. Att kunskapen är begränsad beror troligen på att det inte är allmänt känt i VA-Sverige hur prestandan i luftningsanläggningar kan övervakas på bästa sätt, hur rengöring av luftare utförs och hur stor potentialen för besparingar är.

Projektet har undersökt olika membranluftare från sex svenska reningsverk i en specialbyggd försöksanläggning med renvatten och analyserat deras syreöverförings-effektivitet (SOTE) och tryckfallet över luftarna (DWP).

Till skillnad från tidigare studier skilde det här projektet på effekter av åldrande av membranmaterialet och igensättning av membranen, vilket är avgörande för att kunna välja rätt underhållsåtgärd. Två metoder för att övervaka luftarnas tillstånd implementerades på projektdeltagarnas reningsverk. Även om det fanns vissa praktiska utmaningar med implementeringen så visar resultaten att det är fullt möjligt att övervaka förändringar i SOTE och DWP, antingen genom direkta mätningar eller med beräkningar utifrån befintliga data.

Resultaten från renvattenförsöken visade att igensättning framför allt påverkade DWP (upp till 40 mbar ökning) som därför är en lämplig parameter att övervaka för att optimera rengöringsintervallet. Åldrande uppvisade däremot en större påverkan på SOTE (upp till 25 % försämring) jämfört med igensättning (upp till 10 % försämring). Sammantaget var de uppmätta effekterna något lägre än vad litteraturen visar.

De procentuella värdena ger dock inte den faktiska påverkan på elanvändningen. Därför simulerades de sammanlagda effekterna av åldrande och igensättning i en modell, där underhållsintervallen för rengöring och membranbyte varierades. Slutsatsen var att det för den specifika modellen var både ekonomiskt och klimatmässigt fördelaktigt med intensivt underhåll med membranbyte vart femte år i kombination med två rengöringar per år.

Rådet från rapportförfattarna är därför att underlätta för nedtömning av bassänger och membranbyte så att det kan genomföras på ett kostnadseffektivt sätt. Luftarnas prestanda bör övervakas med någon av de föreslagna metoderna. Det är också viktigt att faktiskt genomföra underhållsåtgärder så ofta som det är ekonomiskt motiverat, där de lokala förutsättningarna påverkar den ekonomiska brytpunkten.

Summary

In this study, the performance of aeration diffusers from Swedish wastewater treatment plants were tested for the first time. The results showed that fouling as well as ageing of diffusers occur at Swedish treatment plants which leads to increased electricity usage for aeration. At the same time, there are opportunities with condition-based maintenance that can reduce unnecessary electricity use.

With increasing CO₂ emissions and electricity prices, energy efficiency has become important, not least to achieve the goal of a climate-neutral water industry. At the municipal wastewater treatment plants, aeration of the biological treatment basins typically accounts for half of the treatment plant's total electricity usage, and international studies indicate that up to 40 % of this electricity is wastage due to fouling and ageing of membranes. But the Swedish experiences are limited. The limited knowledge is likely related to that it is not commonly known in the Swedish water sector how the performance of aeration systems can best be monitored, how maintenance cleaning can be done and how large the potential savings are. In the project, membrane diffusers from six Swedish treatment plants were tested in a purposely built test facility with clean water and analysed with respect to oxygen transfer efficiency (SOTE) and dynamic wet pressure (DWP). Unlike previous studies, the effects of ageing of the membrane material and fouling of the membranes were assessed separately, which is crucial to choose the right mitigation action.

Two methods for diffuser condition monitoring were implemented at treatment plants within the participating organisations. Although there were some practical challenges with implementation, the results show that it is feasible to monitor changes in SOTE and DWP, either with direct measurements or calculations based on available data.

The results from the clean water tests showed that fouling primarily affected DWP (up to 40 mbar increase) which is therefore a suitable parameter to monitor, in order to set the cleaning interval. Ageing, on the other hand, showed a greater impact on SOTE (up to 25 % decrease) compared to fouling (up to 10 % decrease). Overall, the measured effects are somewhat lower than what the literature indicates.

However, the percentage values do not reflect the actual impact on electricity usage. Therefore, the combined effects of ageing and fouling were simulated in a model, with varying maintenance intervals for cleaning and membrane replacement. The conclusion of the simulations was that it was both economically and climatically advantageous with frequent maintenance (membrane replacement every five years in combination with two cleanings per year).

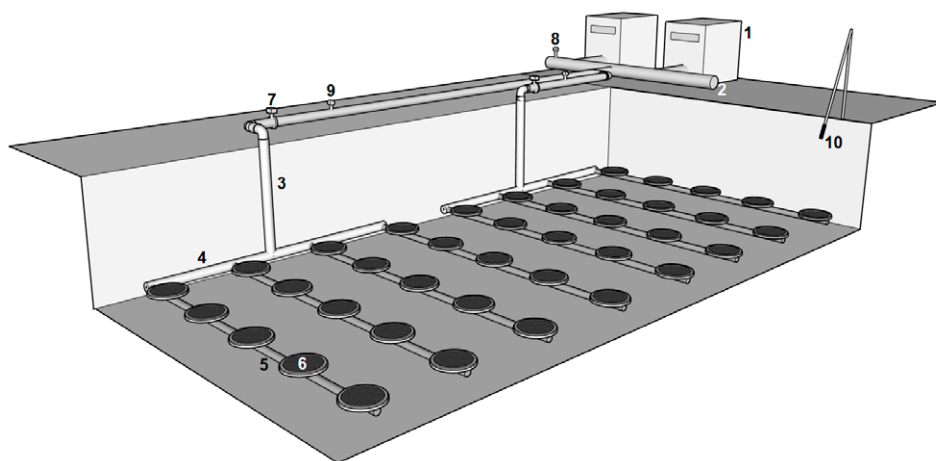
The advice of the authors is therefore to facilitate membrane replacement so that it can be carried out in a cost-effective manner. The performance of the diffusers should be monitored using any of the suggested methods. It is furthermore important to actually carry out maintenance measures as often as economically justified, where local conditions affect the economic optimum.

1 Inledning

Kommunala avloppsreningsverk strävar mot att minska sin energianvändning för att på så sätt minska kostnader och miljöpåverkan. Den ekonomiska aspekten är hög-aktuell med ett högt och ökande elpris. Energieffektivisering drivs även av den ständiga brådskan att bekämpa klimatkrisen, med en strävan mot energineutralitet eller en positiv energibalans. Det återspeglas även i att metodutveckling för ett minskat klimatavtryck är ett av Svenskt Vatten Utvecklings prioriterade områden.

Energianvändningen vid svenska avloppsreningsverk över 20 000 personekvivalenter (pe) är i genomsnitt 50–60 kWh/(pe, år) (Lingsten et al. 2013; Svenskt Vatten 2021). Spridningen är dock stor, där mindre reningsverk ofta har en högre energianvändning i förhållande till sin belastning än större verk. Det har uppskattats att luftningen i den biologiska reningen utgör 30–50 % av elanvändningen vid svenska reningsverk (Lingsten et al. 2013; Olsson 2008; Svenskt Vatten 2021). Liknande siffror har rapporterats från andra länder (Guo et al. 2016; Rosso 2018; WEF 2010). Samtidigt finns det reningsverk i Sverige och utomlands som är väl energioptimerade och har betydligt lägre energianvändning än det svenska genomsnittet (Svenskt Vatten 2021). Sammantaget visar detta att många svenska reningsverk har potential att minska sin energianvändning, i synnerhet gällande luftningen.

I de finblåsiga luftarsystem som används för luftning (Figur 1.1) försämras prestandan över tid, vilket gör att elanvändningen successivt ökar (Stenstrom 1990). I projektet *Effektiv luftning på svenska reningsverk* (ELSA) observerade 20 % av de verk som undersöktes en tydlig försämring och 53 % en möjlig försämring av luftarnas effektivitet över tiden (Bengtsson et al. 2019). Amerikanska undersökningar har visat att syreöverföringseffektiviteten (andelen av luftens syre som kommer processen till del) har minskat med upp till 40 % vid vissa reningsverk efter bara några års drift (Garrido-Baserba et al. 2016; Krampe 2011a; US EPA 1989). Den minskade effektiviteten beror på åldrande av membranen och/eller på igensättning av dess perforeringar.



Figur 1.1

Luftningssystem bestående av blåsmaskiner (1), huvudledning (2), nedledningsrör (3), grenrör (4), fördelarrör (5), luftare (6), ventiler (7) samt givare för tryck (8), luftflöde (9) och löst syre (10). Från Bengtsson et al. (2019).

Ifall det förhåller sig på liknande sätt vid Sveriges kommunala reningsverk som internationellt, kan den extra energianvändningen på grund av igensättning och åldrande vara omfattande. I Sverige råder dock brist på kunskap och erfarenheter kring åldrande, igensättning och rengöring av luftare. Under ELSA-projektet rapporterades ett fåtal exempel på verk som identifierat åldrande och igensättning medan inga sådana effekter observerades på andra verk (Bengtsson et al. 2019). Det visade sig att det är ovanligt att

luftningssystemens prestanda övervakas och följs upp systematiskt. Detta hade annars kunnat ge värdefull information om det finns behov av rengöring eller byte av membran. Troliga orsaker till att detta arbete är eftersatt är att det inte är allmänt känt i VA-Sverige hur prestandan i luftningsanläggningar på bästa sätt övervakas, hur rengöring av luftare utförs och hur stor potentialen för besparingar är.

1.1 Syfte

Syftet med denna rapport är att öka förståelsen för hur tillståndsbaserat underhåll av luftare generellt kan implementeras på svenska avloppsreningsverk, och bedöma dess nytta ur ett energi- och systemperspektiv. Rapporten sammanfattar resultaten från projektet *Rent Blås* vars mål har varit att:

1. Sammanställa och utvärdera metoder för att övervaka luftarnas prestanda (syreöverföringseffektivitet och mottryck) under drift, samt implementera några av dessa vid fyra representativa reningsverk.
2. Utvärdera omfattningen av åldrande och igensättning av luftare på sex reningsverk genom renvattentester.
3. Utvärdera nyttan med tillståndsbaserat underhåll med avseende på minskad energianvändning, kostnad, arbetsinsats och kemikalieanvändning med dynamiska simuleringar.
4. Sammanställa och sprida resultaten tillsammans med praktiska råd till Svenskt Vattens medlemmar och även internationellt.

1.2 Läsanvisningar

Denna rapport är strukturerad på följande sätt: I kapitel 2 ges en sammanfattande översikt av vad som är känt sedan tidigare från forskningslitteraturen kring hur prestandan för luftarsystem påverkas över tid, hur de kan rengöras och olika sätt för hur prestandan kan testas och övervakas. I kapitel 3 beskrivs hur experimentella försök för renvattentester i föreliggande studie och undersökningar för prestandaövervakning under drift genomfördes med avseende på utrustning och tillvägagångssätt. I kapitel 4–5 presenteras sedan resultaten från dessa olika delstudier. I kapitel 6 används resultaten för att med hjälp av simuleringar uppskatta potentialen för olika underhållsstrategier. Slutligen diskuteras resultaten i kapitel 7 som mynnar ut i råd för hur VA-organisationer bör arbeta med prestandaövervakning och tillståndsbaserat underhåll av luftarsystem på kommunala avloppsreningsverk. Rapporten avslutas med en summering av projektets slutsatser.

Här följer några förslag på läsordning utifrån intresse:

- Praktiska aspekter med att genomföra renvattenförsök: Avsnitt 2.4, 3.1 och 4.1.
- Behovet av underhåll av luftare och tekniker för rengöring: Avsnitt 2.3 och Kapitel 6.
- Praktiska tekniker för att övervaka luftarnas prestanda: Avsnitt 3.2 och Kapitel 5.

2 Bakgrund

Det finns en rad faktorer som påverkar energianvändningen för luftning såsom avloppsvattnets sammansättning, reningsprocessens utformning, luftarsystemets design, blåsmaskinernas effektivitet, styrstrategier och underhåll. Denna sammanställning fokuserar på den gradvisa minskning av effektivitet som vid många anläggningar sker på grund av förändringar av de finblåsiga luftarna över tid. För en mer omfattande beskrivning av luftningssystem och dess design, drift, styrning och upphandling hänvisas till ELSA-rapporten (Bengtsson et al. 2019). Där framgår också mer allmänt hur olika faktorer påverkar energianvändningen vid luftning.

Detta kapitel omfattar vad som är känt utifrån litteraturen gällande igensättning och åldrande av membranluftare vid kommunala avloppsreningsverk internationellt, vad som kan göras i form av underhåll för att förbättra eller återställa prestandan samt de metoder som finns för att testa och övervaka prestandan. I första hand har granskade forskningsartiklar, böcker och standarder använts som källor. I kapitlets sista avsnitt ges en kort sammanfattning över hela kapitlet.

2.1 Syreöverföringseffektivitet (SOTE) och tryckfall (DWP)

De viktigaste parametrarna gällande prestandan för ett luftarsystem är dess syreöverföringseffektivitet och dess mottryck eller tryckfall. Syreöverföringseffektiviteten anger hur stor andel av det syre som tillsätts med luften som överförs till vattnet (i exempelvis % eller $\text{kg O}_2/\text{kg O}_2$). Syreöverföringseffektiviteten påverkas av många olika faktorer och för att göra parametern jämförbar definieras den ofta vid så kallade standardförhållanden. Standardförhållanden innebär rent vatten, 20 °C vattentemperatur, 0 mg/l löst syre och 1 atm lufttryck. Syreöverföringseffektiviteten vid standardförhållanden förkortas SOTE (*standard oxygen transfer efficiency*). Ett lägre SOTE påverkar energianvändningen negativt. Eftersom en lägre andel av tillfört syre överförs till processen, måste detta kompenseras med ett högre luftflöde vilket leder till högre elanvändning för blåsmaskinerna.

Tryckfallet över luftarna, även kallat det dynamiska våttrycket (DWP, *dynamic wet pressure*), bidrar till det totala mottrycket som uppstår i luftningssystemet. Det totala mottrycket utgörs till största delen av den statiska delen som vattenpelaren i bassängerna utgör. Därutöver tillkommer DWP samt tryckförluster från rörsystem och reglerventiler. Ett ökat DWP leder till ett högre totalt mottryck i systemet vilket leder till högre energianvändning för blåsmaskinerna.

2.2 Förlust av luftningsprestanda över tid

I många finblåsiga luftarsystem förändras SOTE över tiden till det sämre (Stenstrom 1990). Internationella undersökningar har visat 20–40 % minskning av SOTE under de första årens drift, varefter effektiviteten planat ut och blivit stabil på denna lägre nivå (Garrido-Baserba et al. 2017, 2016; Gori et al. 2014; Groves et al. 1992; Krampe 2011a; Rosso et al. 2012; Rosso & Stenstrom 2006; US EPA 1989).

Det är också vanligt att DWP ökar med tiden. I undersökningar av ett stort antal avloppsreningsverk observerades att luftarnas DWP ungefär fördubblades jämfört med ursprunglig nivå (Krampe 2011b; Rosso et al. 2008; Jiang et al. 2020). Dessa försämringar i form av minskad syreöverföringseffektivitet och ökat mottryck har visat sig ske med olika typer av luftare och med membran av olika material.

I vissa anläggningar tycks relativt liten försämring av syreöverföringseffektiviteten

ske (Redmon et al. 1994; Warriner & Rooney 1992). I Sverige har det inte skett några omfattande undersökningar kring detta, men det finns exempel rapporterade med såväl väsentlig försämring som bibehållen prestanda efter många år (Bengtsson et al. 2019). Det visar att tendenserna till minskad effektivitet med tiden är anläggningsspecifika och kan variera stort beroende på förhållanden.

Försämrade prestanda för finblåsiga luftarsystem kan bero på igensättning och/eller åldrande av membranen. Det är viktigt att skilja på dessa orsaker eftersom de åtgärdas och förebyggs på olika sätt. Minskad effektivitet kan även orsakas av en rad andra orsaker, däribland igensättning av syregivare (Samuelsson et al. 2018) och ammoniumgivare (Cecconi et al. 2020), brott på luftledningar, ej fungerande reglerventiler, eftersatt underhåll av blåsmaskiner med mera (Bengtsson et al. 2019).

2.2.1 Igensättning

Igensättning av luftare innebär att en del av öppningarna i membranen blir helt eller delvis blockerade. Vanligen delas igensättning upp i två huvudtyper baserat på deras olika ursprung och sätt att påverka luftningen (US EPA 1989):

- Typ I igensättning: Utfällningar av exempelvis karbonater och hydroxider på luftarens yta.
- Typ II igensättning: Tillväxt av en biofilm på luftarens yta som består av mikroorganismer inbäddade i extracellulära polymerer.

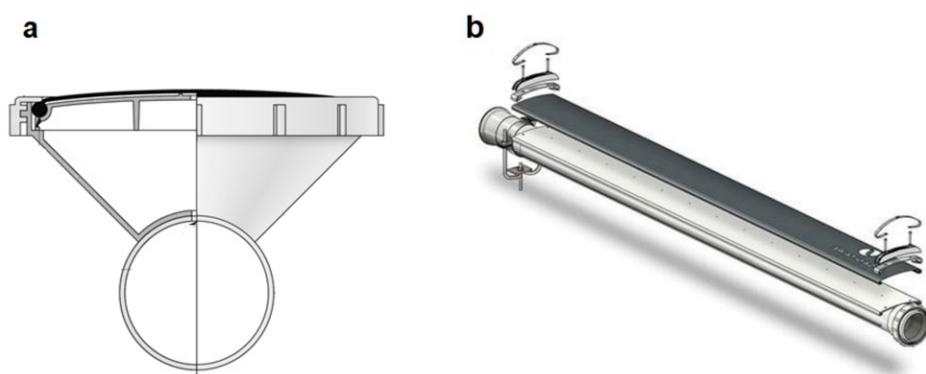
De oorganiska utfällningarna som orsakar igensättning av Typ I leder till en successiv ökning av DWP (US EPA 1989). Det högre mottrycket leder till högre energianvändning för blåsmaskinerna. Utfällning av kalciumkarbonat (CaCO_3) har visat sig kunna vara en viktig faktor bakom Typ I igensättning men utfällningar har också visat sig innehålla järn, magnesium, svavel, kisel och fosfor (Jiang et al. 2020; Kim & Boyle 1993; Rosso et al. 2008). I en anläggning rapporterades kalciumfosfat vara den dominerande utfällningen på luftarna (Hung & Boyle 2001). Det har observerats att en ökad hårdhet på avloppsvattnet, som kan bero på en högre koncentration kalciumkarbonat, leder till snabbare utfällning på membranen som ger större ökning av DWP och större minskning av SOTE (Wang et al. 2020). Även om både ökningen i DWP och minskningen i SOTE bidrar till ökad energianvändning, var det i detta fall DWP-ökningen som bidrog mest (Wang et al. 2020).

Utfällning av kalciumkarbonat sker särskilt vid kontaktytan mellan vatten och luft (Drewnowski et al. 2019). Den höga temperaturen till följd av den varma, komprimerade luften leder till avdrivning av koldioxid som gynnar utfällning. Koldioxid diffunderar från vatten till luft vilket ökar pH, vilket i sin tur sänker lösligheten för CaCO_3 . Utfällning sker därför särskilt kring membranens öppningar (Rosso et al. 2008; Wagner & von Hoessle 2004; Wang et al. 2020) och kan påverka storlek på bubblorna som frisätts och därigenom SOTE.

Biofilm som växer på membranen vid igensättning av Typ II kan påverka bildandet av bubblor om den blir alltför tjock. Luftbubblor som lämnar membranets yta fångas upp på vägen i håligheter i biofilmen och slås samman (Garrido-Baserba et al. 2016). Det leder till att större bubblor frisätts från luftaren än vad som annars skulle ha skett (Jansen et al. 1994). De större bubblorna gör att igensättning av Typ II framför allt leder till att syreöverföringseffektiviteten minskar (US EPA 1989). Däremot behöver inte biofilmen orsaka en nämnvärd ökning av DWP.

De två typerna av igensättning uppträder vanligtvis tillsammans. Utfällningar som bildas och inkommande oorganiskt material som finkornig sand kan fångas upp av biofilmens slem av extracellulära polymerer. Denna kombination betraktas ibland som en tredje typ av igensättning (Kim & Boyle 1993). Andelen VS (*volatile solids*) av torrsubstansen (TS) kan användas som mått på organiskt innehåll i biofilmen och har ofta visat sig vara låg (5–50 %) även när materialet visuellt bedömts som biologiskt (US EPA 1989).

Biologisk igensättning observerades i USA redan på 1930-talet, med de finblåsiga keramiska luftarna som då användes (Boyle & Redmon 1983). I de fall där igensättningen är omfattande kan stora bubblor observeras vid bassängytan. Igensättning har visat sig ske med olika typer av luftare (Figur 2.1), som rör och tallrikar, och oberoende av vilket material membranerna består av, som etenpropengummi (EPDM), polyuretan eller silikon (Garrido-Baserba et al. 2016; Krampe 2011b; Rosso et al. 2008). Det finns indikationer på att igensättning blir mindre med membran av silikon, men underlaget är inte tillräckligt för att veta om det generellt förhåller sig så (Garrido-Baserba et al. 2016; Wagner & von Hoessle 2004; Wang et al. 2020).



Figur 2.1

Tallriksluftare av plast med EPDM-membran (a) och panelluftare med polyuretanmembran (b) (Bengtsson et al. 2019).

På marknaden förekommer också membran av EPDM med beläggning av polytetrafluoreten (PTFE). Syftet är både att hindra igensättning och läckage av mjukgörare. Indikationer på minskad igensättning med PTFE-belagda luftare finns men det är ännu osäkert hur stor effekten är (Rosso & Shaw 2014). I anläggningar där tendensen till igensättning är särskilt hög, till exempel på grund av hög hårdhet, kan det vara extra motiverat att överväga alternativa membranmaterial.

Vissa samband mellan driftsätt och omfattningen av igensättning har kunnat observeras. Hög organisk belastning tenderar att öka igensättningen vilket exempelvis märkts i form av mer biofilm på luftare som befinner sig i början av reningsprocessen, närmare inkommande avloppsvatten (Boyle & Redmon 1983; Garrido-Baserba et al. 2018; US EPA 1989). Detta beror på mikroorganismernas högre tillgänglighet på lättnedbrytbart organiskt material vid högre belastning (Rieth et al. 1990). I likhet med hög belastning, tenderar en låg slamålder att öka hastigheten för igensättning (Leu et al. 2012).

Det har observerats att mer omfattande igensättning skett vid högre temperatur under sommartid än under vintertid (Boyle & Redmon 1983) vilket stämmer överens med igensättning av syregivare (Samuelsson et al. 2018). Lägre luftflöden tenderade också att leda till snabbare igensättning (Boyle & Redmon 1983).

Om igensättning sker, kan det lätt leda till en negativ spiral av ökad energianvändning. Igensättning av en del av luftarna leder till att ett högre luftflöde krävs genom de luftare som fortfarande är aktiva. Dessa kommer då att producera större bubblor med lägre SOTE som följd. I delvis igensatta luftare blir luftflödet lägre med ökad risk för ytterligare igensättning som följd. Ojämn luftning med avseende på bassängens olika delar leder till vertikala recirkulationsflöden som minskar SOTE.

2.2.2 Åldrande

Åldrande innebär att membranens materialegenskaper förändras över tiden när de är i drift. Sådana materialförändringar har visat sig kunna påverka luftarnas funktion så att DWP ökat eller SOTE minskat (Kaliman et al. 2008; Krampe 2011a; Rosso et al. 2008). Membranen kan till exempel krympa, töjas ut eller få förändrad hårdhet. På vilket sätt ett specifikt membran åldras under drift beror dels på de förhållanden som det utsätts för, i

form av till exempel föroreningarna i avloppsvatten och temperatur, dels på materialets beskaffenhet såsom huvudingredienser, tillsatser (mjukgörare/hårdgörare), dimensioner med mera. Den exakta materialsammansättningen är specifik för varje produkt och vanligen bara känd av tillverkaren.

I ett flertal studier har det observerats att membranens hårdhet ökar med tiden (Kaliman et al. 2008; Krampe 2011a; Wagner & von Hoessle 2004). Membran av EPDM innehåller ofta mjukgörande ämnen som ska förbättra materialets egenskaper. Dessa mjukgörare kan läcka från membranet under drift vilket leder till ökad hårdhet (Krampe 2011a). En undersökning av EPDM-membran visade exempelvis att halten mjukgörare hade minskat med 26 % efter två års drift (Wagner & von Hoessle 2004). Denna typ av åldrande har visat sig kunna ge ett signifikant bidrag till ökad DWP och minskad SOTE (Krampe 2011a) även om det kan vara svårt att helt särskilja dessa effekter från vad som orsakats av igensättning.

För rörluftare med membran kan funktionen påverkas mycket kraftigt av förlust av mjukgörare. En undersökning visade att membran från rörluftare efter tio års drift hade krympt fast på sina plathållare vid ett svenskt avloppsreningsverk. Detta ledde till drastiskt försämrade prestanda med en ökning i DWP motsvarande 0,5–0,7 meter vattenpelare och 18 % lägre SOTE än nya luftare (Bengtsson et al. 2019).

En hypotes som förts fram är att biologisk igensättning i form av en biofilm kan påverka membranens materialegenskaper. Ett sådant biologiskt inducerat åldrande verkar ske genom att specialiserade mikroorganismer koloniserar membranet och förändrar dess ytegenskaper som jämnhet och hydrofobicitet eller påskyndar urlakningen av mjukgörare (Garrido-Baserba et al. 2018; Wagner & von Hoessle 2004). Härvidlag verkar det finnas vissa skillnader mellan olika material (EPDM, polyuretan och silikon) men det är ännu oklart om det går att generalisera kring detta.

Igensättning kan i princip återställas genom rengöring medan åldrande är irreversibelt. Därför är det mycket viktigt att kunna särskilja dessa två fenomen för att kunna avgöra om rengöring eller byte av membran är den mest lämpliga underhållsåtgärden.

2.3 Rengöring av luftare

En försämring av prestandan som beror på igensättning kan helt eller delvis avhjälpas genom rengöring. Vissa metoder för rengöring kan tillämpas under drift medan andra kräver driftavbrott och nedtömning av bassängen.

2.3.1 Motionering av membran

Mekanisk motionering av luftarmembranen är den enklaste av de åtgärder som har tillämpats och rekommenderas av många leverantörer. Motionering kan ske på olika sätt men principen är att ändra luftflödet en kort tid för att variera hur utspända membranerna är. Detta kan leda till att löst sittande igensättning, som biofilm, lossnar.

En metod för motionering innebär att luftflödet ökas till det för luftarna maximala flödet, eller 20 % över detta under 5–10 minuter någon eller några gånger per vecka (Samuelsson et al. 2021). Därefter kan luftflödet återgå till det normala eller stängas av under en stund, eventuellt i kombination med en trycksänkning genom att en separat ventil i luftledningen öppnas (Bengtsson et al. 2019). En annan metod är att direkt orsaka en trycksänkning genom att antingen bara stänga av luftflödet eller genom att stänga av luftflödet och öppna en separat ventil för att sedan tillämpa ett högt luftflöde under en stund (Odize et al. 2017; Schwarz et al. 2021; US EPA 1989). Samtliga dessa varianter åstadkommer att membranerna på kort tid omväxlande spänns ut och sjunker ihop vilket syftar till att mekaniskt avlägsna den vidhäftande biofilmen.

En studie har visat att regelbunden motionering förhindrade att tryckökning skedde över tid på grund av igensättning. Däremot kunde inte en minskning i

syreöverföringseffektivitet förhindras (Odize et al. 2017). Modellbaserad övervakning av luftningen på Bromma avloppsreningsverk visade att motioneringen av membran hade en positiv effekt för att begränsa ökningen i DWP, men ingen tydlig effekt på SOTE (Samuelsson et al. 2021).

En undersökning bland svenska avloppsreningsverk visade att 8 av 15 tillämpade automatisk motionering av membranen (Bengtsson et al. 2019). Tillämpningen av motionering gynnas av att när metoden väl är implementerad, kräver den ingen ytterligare arbetsinsats. Det finns dock fortfarande begränsat med information om hur stora effekterna är och ifall det finns några skillnader beträffande de olika varianterna av motionering som beskrivs ovan.

En fördel med motionering är att det går att anpassa själva motioneringssekvensen så att den samtidigt samlar in mätdata om luftarnas mottryck och syreöverföringseffektivitet (Avsnitt 3.2.2).

2.3.2 Kemisk rengöring under drift

Luftare kan rengöras genom att tillsätta syra i luftningssystemet. Saltsyra, myrsyra eller ättiksyra kan användas och eftersom dessa är flyktiga transporteras de i gasform med luftflödet till luftarna (Henze et al. 2008; Schmit et al. 1989). Syrorna löser många av de oorganiska utfällningar som kan uppstå (Typ I), såsom kalciumkarbonat, magnesiumkarbonat och järnhydroxid (US EPA 1989). Däremot är de inte så effektiva när det gäller att avlägsna biologisk igensättning (Mueller et al. 2001). Vid en spansk anläggning med tallriksluftare med EPDM-membran resulterade dosering av myrsyra i två omgångar i en 20-procentig förbättring av SOTE (Aviles et al. 2020).

Enligt en alternativ variant fylls det avstängda luftarsystemet med en svagare lösning av flytande saltsyra i lämplig koncentration (Bengtsson et al. 2019). Syran får sedan verka under några timmar. Därefter startas luftflödet och den komprimerade luften pressar ut syran genom porerna som då rengörs.

En annan metod innebär tillsats av alkalisk tvättlösning i luftningssystemet. Lösningen tillsätts innan nedledaren och pressas genom luftarna med hjälp av den komprimerade luften (Frey & Thonhauser 2004). Tömningsystemet för kondensvatten kan också användas för att avlägsna tvättlösning och sköljvatten. Metoden anses effektiv mot organiskt material och kiselsyra. Kiselsyra är en utfällning som inte löser sig vid behandling med syra.

Kemisk rengöring under drift är relativt enkelt eftersom det inte kräver driftavbrott och nedtömning. Det finns allmänna uppgifter om att metoderna kan vara effektiva mot Typ I igensättning men litteraturen innehåller inte så mycket detaljerad information om de resultat som uppnåtts (Mueller et al. 2001; US EPA 1989). En begränsning med dessa metoder är att de bara är verksamma på de öppningar som fortfarande är aktiva. Helt igensatta porer släpper inte igenom den rengörande gasen eller lösningen. Det innebär att dessa metoder sannolikt fungerar bäst vid proaktiv användning, genom att utföra rengöring regelbundet innan igensättningen har hunnit gå alltför långt.

2.3.3 Rengöring vid driftavbrott

Efter nedtömning av en bassäng kan luftarna rengöras genom avspolning med låg- eller högtrycksstråle, borstning, ånga eller kemikalier (Frey & Thonhauser 2004; Mueller et al. 2001; US EPA 1989). Avspolning, borstning och ånga kan avlägsna biofilm (Typ II) medan kemikalier normalt krävs för att få bort utfällningar (Typ I).

Rengöring av keramiska och porösa luftare av plast kan ske genom tvätt med 14 % saltsyra. Det sker genom att varje luftare tvättas med en bärbar spruta. Därefter spolas luftarna av med vatten eller ånga (Mueller et al. 2001).

Vid en kinesisk anläggning (Shanghai, 500 000 m³/d) tillämpades under tio år årlig rengöring av de porösa rörluftarna i plast genom avspolning och sprayning med saltsyra (Jiang et al. 2020). Efter en rengöring kunde vanligen en minskad luftförbrukning i

förhållande till volym behandlat vatten observeras. Graden av igensättning var över tid lägre än vad som annars är typiskt efter så lång tid. Tester visade att medan saltsyra avlägsnade oorganiskt material, kunde detta kombineras med hypoklorit för att även avlägsna organiskt material och återställa mer av luftarnas ursprungliga prestanda (Jiang et al. 2020).

Vid en italiensk anläggning med panelluftare med membran observerades en halvering av SOTE efter två år på grund av igensättning. Den ursprungliga prestandan kunde återställas genom tvätt med perättiksyra (Gori et al. 2014). Det beräknades vara ekonomiskt lönsamt med regelbunden rengöring trots att reningsverket var så litet som 3 500 pe.

En metod som utvärderats i litteraturen för keramiska luftare består av avspolning med högtryck (415 kPa) med luftflöde genom luftarna, sprayning med 16 % saltsyra med luften avstängd följt av avspolning med högtryck igen. Denna metod har för vissa anläggningar uppvisat goda resultat med luftningsprestanda som återgått till den ursprungliga nivån (Redmon et al. 1994; US EPA 1989). Vid andra anläggningar har en tydlig förbättring skett men inte så stor att den ursprungliga prestandan uppnåtts (US EPA 1989). När igensättningen exempelvis varit dominerad av kalciumfosfat visade sig behandling med 16 % saltsyra bara avlägsna en del av igensättningen (Hung & Boyle 2001). En stor del av de publicerade resultaten kring effekter av rengöring gäller keramiska luftare och det är lite oklart i vilken omfattning dessa erfarenheter kan överföras till membranluftare. Det ska också nämnas att vilka metoder och kemikalier som lämpar sig för rengöring är specifikt för varje luftarprodukt och bör därför stämmas av med aktuell leverantör.

Ekonomin kring igensättning och rengöring har analyserats. Extra energianvändning förknippad med typisk igensättning jämfördes med kostnader för arbete och material för rengöring (Rosso & Stenstrom 2006). Resultaten pekade på att vid de amerikanska anläggningarna som låg till grund för studien, vore det ekonomiskt fördelaktigt att utföra rengöring ungefär en gång per år.

På svenska avloppsreningsverk är det relativt ovanligt med rengöring av luftare (Bengtsson et al. 2019). Med tanke på de positiva effekterna som observerats i internationella studier verkar det finnas stor potential att minska energianvändningen vid svenska avloppsreningsverk genom mer frekvent rengöring.

2.4 Test av luftares prestanda i rent vatten

Mätning av SOTE behöver göras i rent vatten. Det finns standardiserade metoder för renvattentester som underlättar att göra rättvisa jämförelser mellan system.

Renvattentest av SOTE kan utföras för att kontrollera att ett levererat luftarsystem uppnår garanterade värden (Jolly et al. 2010), antingen i fullskala eller i en särskild testtank på några hundra kubikmeter (Bengtsson et al. 2019). Med detta förfarande kan luftarsystemet testas vid aktuell botten täckningsgrad och vattendjup och därmed kan den absoluta SOTE-nivån fastställas.

Om syftet med renvattentester är att parallellt jämföra olika membran, som nya membran mot använda, är det vanligen mer relevant att mäta relativa skillnader i SOTE än absoluta SOTE-värden. I dessa fall kan renvattentester utföras i mindre volymer som några kubikmeter eller mindre, med plats för en eller ett fåtal luftare. Förhållandena blir då inte särskilt representativa för en anläggning i fullskala men det går utan vidare att fastställa förhållandet mellan prestandan för nya och använda luftare. I litteraturen har uppställningar beskrivits som varit cylindriska eller rektangulära med 0,07–8 m³ volym och 0,6–6 m vattendjup (Amaral et al. 2018; Ashley et al. 1991; Garrido-Baserba et al. 2017, 2016, 2020; Jiang et al. 2020; Rosso et al. 2013, 2008; Schwarz et al. 2021; Wang et al. 2020).

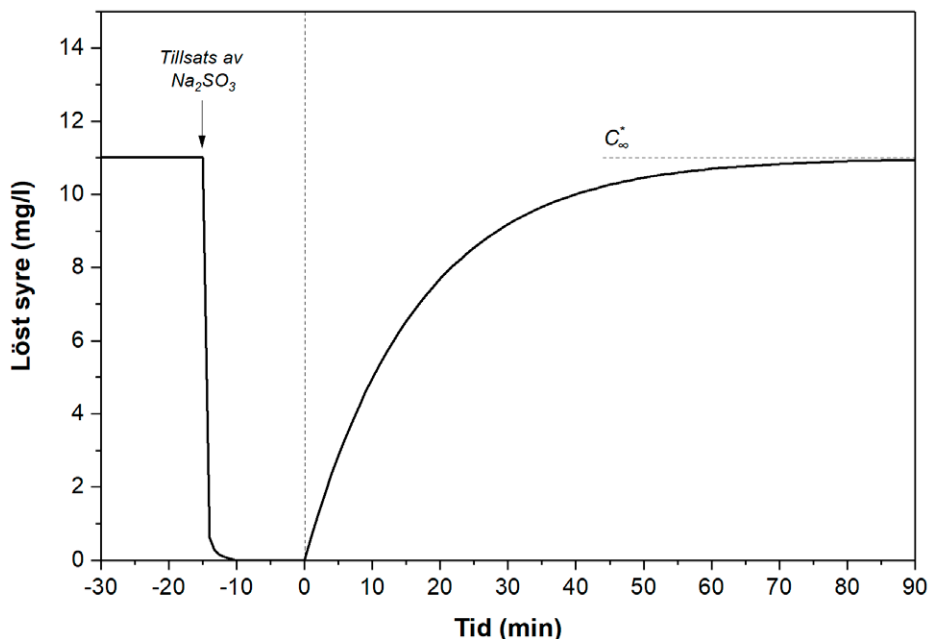
Bestämning av DWP kan göras vid valfritt vattendjup. Enklast är därför att göra mätningar i en mindre tank med en tryckgivare för luft placerad före membranet och en i vattenfasen efter membranet (Rosso et al. 2008).

2.4.1 Metoder

En vanlig metod för att mäta SOTR i rent vatten innebär att koncentrationen av syre i vattnet först sänks till nära noll. Genom att tillsätta natriumsulfit (Na_2SO_3) förbrukas syret i bassängen när sulfit oxideras till sulfat (ASCE 2022). Koboltklorid eller kobolt-sulfat tillsätts också som katalysator för att reaktionen ska gå snabbare. När all sulfit har förbrukats stiger syrehalten mot mättnadsvärdet vilket visas i Figur 2.2.

Genom anpassning med icke-linjär regression kan masstransportkoefficienten ($K_L a_{20}$, h^{-1}) och syrets mättnadskoncentration ($C_{\infty 20}$, kg/m^3) bestämmas vilket gör det möjligt att beräkna syreöverföringshastigheten (SOTR, *standard oxygen transfer rate*, $\text{kg O}_2/\text{h}$). Genom att också mäta luftflödet (Q_L , Nm^3/h) med god noggrannhet kan sedan SOTE (%) bestämmas. Testet behöver inte utföras vid 20°C utan $K_L a_{20}$ och $C_{\infty 20}$ beräknas genom korrigering för temperaturen och lufttrycket.

Som alternativ till att tillsätta kemikalier för att åstadkomma den inledande sänkningen i syrehalt kan kvävgas användas för att driva av löst syre. Som ytterligare ett alternativ kan i stället syrenivån ökas genom att ren syrgas tillsätts (ATV 1996; Wagner et al. 1998).



Figur 2.2

Exempel på resultat från renvattentest med kemikalier för att avlägsna syre (Bengtsson et al. 2019).

2.4.2 Standarder

För att öka reproducerbarhet och jämförbarhet från renvattentester har standarder utvecklats som anger hur testerna ska utföras, utvärderas och rapporteras (Jiang & Stenstrom 2012). I forskningslitteraturen är den amerikanska standarden från ASCE (*American Society of Civil Engineers*) vanligast använd, vilken nyligen blev uppdaterad (ASCE 2022). Det finns även en tysk (ATV 1996; DWA 2007) och en europeisk standard (CEN 2004), varav den senare även är en svensk standard (SIS 2004).

Numera finns det två aktuella standarder: den amerikanska (ASCE) och den europeiska (CEN). De allra flesta aspekter av dessa är likvärdiga men det finns också några skillnader (Tabell 2.1). Antalet tester vid ett visst förhållande ska enligt den amerikanska standarden vara tre, medan den europeiska anger minst två.

	Amerikansk (ASCE 2022)	Europeisk (CEN 2004)
Korrigerig för salthalt	Ja	Inkluderas ej
Syrets mätnadskoncentration	Bestäms experimentellt	Bestäms experimentellt eller beräknas baserat på djup
Antal experiment	Minst tre	Minst två
Rekommenderad temperatur	10–30 °C	> 4 °C
Mätosäkerhet	En mätning kan vara ± 15 % från genomsnittlig SOTR	SOTR ± 5 % i små och ± 10 % i stora bassängar

Vattnets salthalt påverkar SOTE genom att salt minskar bubblornas benägenhet att slå sig samman så att bubblorna blir större, vilket leder till en ökande SOTE med ökande salthalt (Bengtsson et al. 2019). Detta är särskilt relevant när den variant av metoden används där kemikalier tillsätts för att sänka syrehalten. Om flera experiment utförs i samma vatten kommer salthalten successivt att öka. Både ASCE och CEN tillåter att samma vatten återanvänds så länge den totala koncentrationen av lösta ämnen är lägre än 2 000 mg/l TDS (*total dissolved solids*). Enligt ASCE ska $K_L a$ korrigeras för salthalten till referensnivån 1 000 mg/l TDS.

Olika standarder skiljer sig också när det gäller hur C_∞^* bestäms. Enligt ASCE ska C_∞^* bestämmas experimentellt genom att försöket pågår så länge att den uppmätta syrekonzentrationen motsvarar åtminstone 98 % av C_∞^* . Enligt CEN kan C_∞^* i stället uppskattas utifrån trycket vid halva djupet. En sådan uppskattning besparar tid vid utförandet och gör att resultaten blir mindre känsliga för syregivarnas kalibrering. En uppskattning av C_∞^* baserad på halva djupet ($d_e = 0,5$) leder dock ofta till överskattade C_∞^* . Då SOTR är direkt proportionell mot C_∞^* kan det leda till över 10 % överskattning av prestandan (Xylem 2011).

Tabell 2.1

Exempel på skillnader i de två olika standarderna för renvattentest (Bengtsson et al. 2019).

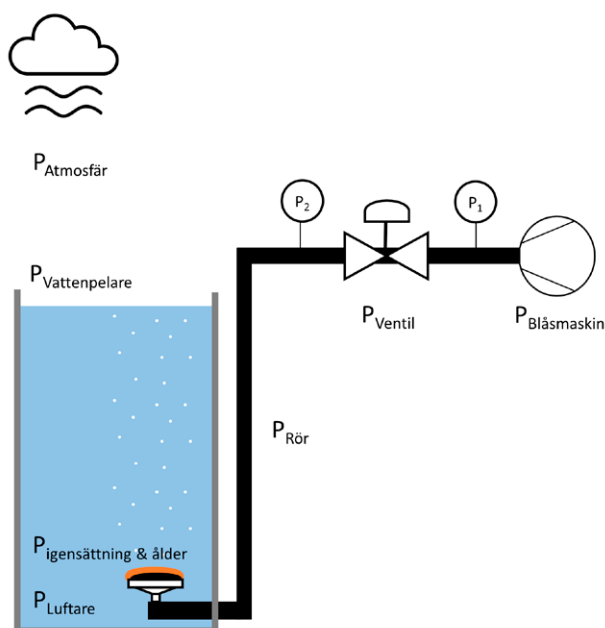
2.5 Prestandaövervakning under drift

Test av luftares prestanda i renvatten ger tillförlitliga resultat men kräver att luftaren eller luftarsystemet tas ur drift. Det finns stora fördelar om prestandan i stället kan övervakas under drift. Flera metoder har utvecklats för att övervaka mottryck och syreöverföringseffektiviteten under drift. Syreöverföringseffektiviteten som mäts är under de aktuella förhållandena i processen med avseende på avloppsvatten, syrehalt, temperatur och tryck (OTE, *oxygen transfer efficiency*). Genom att korrigera OTE för alla faktorer utom avloppsvattnets påverkan på syreöverföringen (α) och påverkan av igensättning och åldrande av luftarna (F) kan $\alpha F(SOTE)$ beräknas (Bengtsson et al. 2019). Vanligen är SOTE känt från leverantörens design och då kan förändringar i αF över tiden användas för att indikera förändringar i luftarsystemets funktion på grund av till exempel igensättning.

Det är värt att påpeka att kraftiga försämringar i OTE vanligen syns vid bassängytan som stora bubblor eller ojämnt luftningsmönster. En regelbunden visuell inspektion, i all enkelhet, ska därför inte bortses ifrån.

2.5.1 Tryckövervakning

Trycket i luftningssystemet mäts och loggas vanligtvis vilket gör det möjligt att bevaka och följa upp eventuella förändringar. Tryckgivaren sitter oftast i luftningssystemets huvudledning (Figur 2.3), och därmed är det summan av tryckfallet över rör, givare, ventiler, luftare och vattenpelaren som mäts.



Figur 2.3

Illustration över de faktorer som tillsammans ger upphov till mottrycket i luftningssystemet som blåsmaskinen behöver övervinna för att tillföra luft till vattenfasen.

På vissa anläggningar sker styrning av blåsmaskinerna mot ett variabelt tryck som anpassas efter den mest öppna ventilen, MOV-styrning (Jenkins 2014). Vid sådan drift kan trycket följas upp vid ett givet flöde och ventilöppningsgrad, till exempel i samband med regelbunden motionering av membranen. Ifall mottrycket vid ett visst flöde och ventilöppningsgrad ökar över tiden, tyder detta på någon förändring i luftningssystemet som till exempel kan röra sig om åldrande eller igensättning av membran (Aviles et al. 2020).

I ett system som styrs mot ett konstant tryck blir det i stället relevant att följa sambandet mellan luftflöde och ventilläge över tiden. Vid Bromma avloppsreningsverk utvärderades en metod där ventilläget justerades till tio förutbestämda lägen i en sekvens som upprepades två gånger per vecka (Samuelsson et al. 2021). Membranens DWP beräknades utifrån trycket i luftledningen, ventilernas öppningsgrad och tillverkarens uppgifter om ventilernas karaktäristik. På så sätt kunde DWP övervakas under drift med endast befintliga givare. Resultaten visade att igensättning på grund av utebliven motionering kunde observeras under drift med denna metod (Samuelsson et al. 2021).

Principen bygger på att de olika bidragen i Figur 2.3 till det totala trycket bestäms. Vid normalt inflöde är vattennivån konstant och en relativ tryckmätning av vattenpelaren korregerar automatiskt för variationer i lufttrycket. Mäts dessutom mottrycket vid ett specifikt luftflöde och givet ventilläge är mottrycket från igensättning den enda variabeln som varierar över tid. Det går därmed att följa den relativa tryckförändringen över membranet genom att mäta trycket vid blåsmaskinen (p_1).

Ett alternativ är att göra en direkt mätning av trycket efter reglerventilen vid en nedledare (p_2) vid ett konstant drifttillstånd för att beräkna DWP. I Figur 2.3 illustreras enbart en luftledning, vilket är en förenkling av verkligheten som i stället kan innehålla flertalet bassänger och zoner med separata nedledare och reglerventiler. Placering av tryckgivare påverkar hur detaljerad information som fås om luftarnas mottryck. Vid direkt mätning av trycket kan det krävas lika många tryckgivare som antalet nedledare för att kunna följa DWP i olika zoner.

2.5.2 Syreöverföring utifrån belastning

I princip kan OTE beräknas utifrån förhållandet mellan luftflödet och syrebehovet i processen (AOR, *actual oxygen demand*, kg O_2 /h). AOR kan beräknas på några olika sätt utifrån belastning till anläggningen och reningsgrad (Bengtsson et al. 2019). Beräkningen av AOR kräver data från laboratorieanalyser såsom BOD vilket innebär en fördröjning.

Denna metod innebär därför en viss eftersläpning. Upplösningen beror på vilken typ av provtagning som sker för labbanalyser (dygns- eller veckoprover). Det finns begränsat med publicerad information kring hur användbar denna metodik är för övervakning av igensättning och åldrande (Bengtsson et al. 2019; US EPA 1989).

Övervakning/uppföljning kan också ske baserat på blåsmaskinernas effekt i stället för luftflöde. Då erhålls luftningseffektiviteten (AE, *aeration efficiency*, kg O₂/kWh) som anger hur mycket syre som tillförts processen i förhållanden till energianvändningen.

2.5.3 Mätning av syreöverföring vid stationärt tillstånd (*Off-gas*)

Den mest flitigt använda metoden för att mäta syreöverföring i processvatten är en metod som sker vid stationärt tillstånd (konstant halt av löst syre) och analys av in- och utgående halt syre i luften (Redmon et al. 1983). Denna metod kallas off-gas-metoden och utgående luft samlas upp vid bassängytan med en flytande huv så att syrehalten i in- och utgående luft kan bestämmas. Metodiken för off-gas-testning är standardiserad (ASCE 2018, 1997; ATV 1996; DWA 2007).

Den flytande huven täcker typiskt en yta av en till några kvadratmeter. Huven ska vara något nedsänkt i vattnet (ungefär 10 cm) och ha en viss volym för att förhindra att vatten eller skum förs med provet. Luften som samlas under huven leds till en analysator med en givare för syrehalt och en luftflödesmätare. Koldioxid och vattenånga kan behöva antingen mätas eller avlägsnas från luften innan mätning.

Vid tester med off-gas-metoden ska ett antal mätningar göras representativt fördelade över bassängens yta. Standarderna anger att minst 10 mätningar ska göras (ATV 1996) respektive att minst 2 % av bassängens ytan ska analyseras (ASCE 2018). Varje mätning i frånluften sker under 5–10 min med utgående luft. Före och efter varje sådan mätning mäts även syrehalten i inkommande luft. Syrehalten i in- och utgående luft används för att beräkna OTE på varje plats. Huven flyttas och en ny mätning görs tills hela analysplanen är genomförd. Sedan beräknas en genomsnittlig OTE som kan korrigeras till αF (SOTE).

Off-gas-metoden är väl beprövad och anses tillförlitlig (Amerlinck et al. 2016; Caivano et al. 2017; Libra et al. 2005, 2002; Rosso et al. 2005; Schuchardt et al. 2007). Den har exempelvis använts för att övervaka igensättning, fastställa variationer i OTE över dygnet relaterade till variationer i belastning, energioptimering av driftbetingelser och styrning av luftningen (Gori et al. 2014; Leu et al. 2009; Sahlmann et al. 2004; Schuchardt et al. 2007; Trillo et al. 2004; Trillo & Smith 2015).

Metoden används ibland även *ex situ*, det vill säga på en mindre tank med luftarsystem vid sidan av anläggningen. Sådana uppställningar har till exempel använts för att utvärdera olika luftare i mindre skala på några kubikmeter (Garrido-Baserba et al. 2016; Rosso et al. 2013, 2012). Först utförs ett renvattentest med luftarna. Sedan pumpas processvatten med slam från anläggningen till tanken kontinuerligt och mätningar utförs med off-gas-metoden för att fastställa αF .

2.5.4 Mätning av syreöverföring vid icke-stationärt tillstånd

Ett sätt att bestämma OTE under drift är att orsaka en medveten sänkning eller ökning av syrehalten, varefter återgången till jämviktskoncentrationen registreras. Utifrån denna trend kan OTE bestämmas genom kurvanpassning. Flöden av avloppsvatten genom processen kan vara igång men testet ska utföras under en period när belastningen är någorlunda konstant (ASCE 2018). Alternativt kan flödena stängas av genom den del av processen där mätningar sker, och slammets respiration tillåtas sjunka till endogen nivå innan mätning (ATV 1996).

Förändringen i löst syrehalt kan till exempel åstadkommas genom en plötslig ökning av luftflödet. En utmaning är att orsaka en tillräckligt stor ökning i syrehalt så att både respirationshastigheten och OTE kan bestämmas. En alltför plötslig förändring av luftflödet kan dock påverka flödesmönstret i bassängen och därmed påverka mätningen (ASCE 2018; ATV 1996). Ökningen i syrehalt kan också ske med ren syrgas eller genom

tillsats av väteperoxid i bassängen. Väteperoxid sönderfaller till syre och vatten och leder till att vattnet blir övermättat med syre. Denna metod har förts fram som mer tillförlitlig än förändrat luftflöde (ASCE 2018).

För metoderna ovan har det, från anläggningar i fullskala, framför allt publicerats demonstrationer som pågått under kortare tid. Vid Bromma avloppsreningsverk testades dock en metod baserat på förändrat luftflöde som utfördes två gånger per vecka under 18 månader (Samuelsson et al. 2021). Det visade sig möjligt att följa förändringar i αF över tiden. Däremot var det svårt att skilja förändringar i avloppsvattnets karaktär (α) från förändringar i luftarnas prestanda (F). Samma grundläggande svårighet att åtskilja α och F finns dock även med off-gas-mätningar. Det kan vara viktigt att utvärdera metoden direkt från start med nya luftare för att undvika att förändringar i prestandan redan har skett när mätningarna börjar.

2.6 Sammanfattning av bakgrund

Utifrån publicerade studier genomförda i olika delar av världen kan det konstateras att det är vanligt att prestandan för finblåsiga luftarsystem, i form av syreöverföringseffektivitet, minskar med 20–40 % under de första 1–2 åren i drift för att sedan stabilisera sig på denna nivå. Det är också vanligt med ungefär en dubblering av DWP efter en tids drift.

Omfattningen av både igensättning och åldrande av membran skiljer sig mellan anläggningar. Orsakssambanden är bara delvis kända. Hög belastning leder exempelvis till mer biologisk igensättning och hårt avloppsvatten leder till mer utfällning av kalciumkarbonat. I tidigare forskning är det ovanligt att effekterna av igensättning separerats från åldrande (materialförändringar). Detta är väl värt att göra genom rengöring av membranen för att kunna fastställa inverkan av både igensättning och åldrande.

Det finns etablerade metoder för mekanisk och kemisk rengöring av membran. Vilken metod för rengöring som är effektiv beror på typ av igensättning, såsom typ av kemisk utfällning, och kan därför variera mellan anläggningar.

För övervakning av DWP finns metoder som visat sig fungera och är redo att implementera. För mätning av OTE kräver den mest etablerade metoden (*off-gas*) extra utrustning och arbete. Det finns stora fördelar med att i stället kunna utföra övervakning med befintliga givare. Vidare anpassning och utveckling av denna typ av metoder kan behövas för att göra dem tillförlitliga. Det kan även vara viktigt att utföra utvärdering direkt från start med nya membran, med tanke på den inledningsvis snabba igensättningen som kan ske. Uppskattning av OTE utifrån luftflöde och syrebehov (AOR) är också ett sätt att använda befintliga data, om än med viss eftersläpning, som är relevant att utvärdera.

3 Metoder vid renvattenförsök, prestandaövervakning och simuleringar

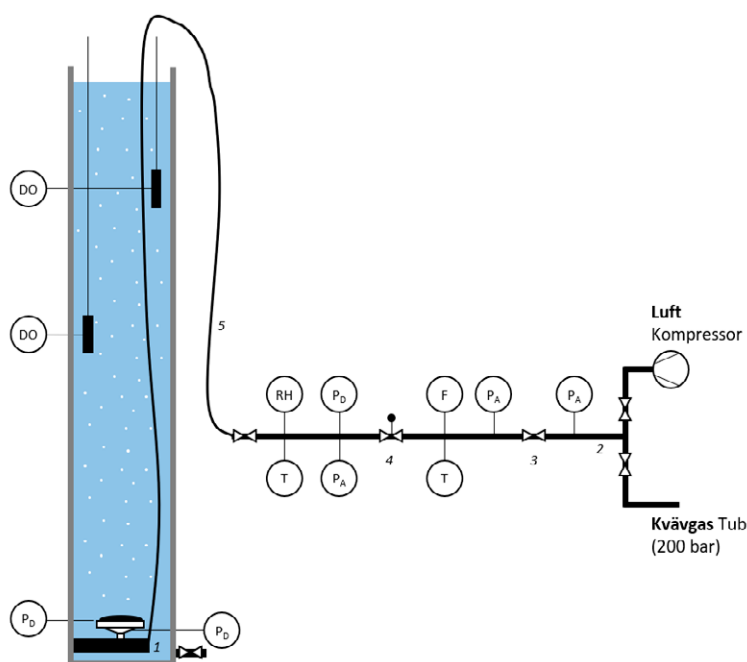
Detta kapitel beskriver hur renvattentesterna i denna studie genomfördes med syftet att jämföra prestandan för smutsiga, rengjorda och nya membran från olika reningsverk. Sedan beskrivs utförandet vid utvärdering av två metoder för att övervaka luftarnas prestanda under drift. Kapitlet avslutas med en beskrivning av metoderna för de modell-simuleringar som genomfördes för att bedöma nyttan med tillståndsbaserat underhåll.

3.1 Renvattenförsök

3.1.1 Pilotuppställning

En testanläggning konstruerades för att mäta prestandan för luftarmembran i rent vatten. Anläggningen bestod av en tank i rostfritt stål med tillhörande utrustning för bland annat mätning och databehandling. Ståltanken som visas i Figur 3.1 och 3.2 var cylindrisk med diametern 0,9 m, höjden 3,6 m och vattendjupet 3,35 m.

Varje typ av membran testades med den för det aktuella membranet avsedda luftaren, vilket innebär en luftarkropp/hållare i form av en tallrik, panel eller rör av plast var utformade för att hålla membranet på plats och fördela luften till den. Luftarna monterades på en särskilt utformad stålkonstruktion som möjliggjorde smidiga skiften mellan olika typer av luftare. Efter montage av luftaren läckagetestades den i ett vattenfyllt badkar med ett luftflöde under två timmar för att även låta löst vidhäftad biofilm lossna. Därefter sänktes stålkonstruktionen med luftaren ned i tanken med en vinsch (Figur 3.2a). Vinschen gjorde det möjligt byta membran och/eller luftare utan att behöva tömma tanken mellan efterföljande tester. Luftaren justerades manuellt till en och samma position vid alla tester med hjälp av en justeringsvajer och en lampa.



Figur 3.1

Försökuppställning med instrumentering. Testtanken med konstruktion för montage av luftare (1), rostfritt rör med instrument (2), tryckreduceringsventil (3), reglerventil för luft med ventillägesgivare (4) och flexibel slang (5) till luftaren.



Figur 3.2

Försökupställning för renvattentester med (a) testtanken, (b) konstruktion för luftarmontage och (c) rörledning för luftflödesmätningar.

Trycksatt luft tillhandahålls med en oljefri industrikompressor (Nardi, Extreme 4). Luftflödet, som mättes med en termisk massflödesgivare (Endress+Hausser, Proline t-mass A150), hölls konstant vid den önskade nivån genom automatisk reglering av en ventil med elektriskt ställdon (Bürkert 3361) med hjälp av en PI-regulator implementerad i en PLC (ABB, PM851). Instrumenten var monterade på ett rostfritt rör (DN15) och komponenternas placering framgår av Figur 3.1 och 3.2c. Luftledningens raksträcka före och efter luftflödesmätaren motsvarade 60 respektive 15 rördiametrar.

Eftersom kondensat kan orsaka överskattning av luftflödet med termiska massflödesmätare tömdes kondensat vid tre positioner: vid kompressorn, vid kompressorns anslutningsslang och vid det kombinerade partikelfiltret (25 µm porstorlek) och tryckreduceringsventilen.

Två elektrokemiska givare för löst syrehalt (Cerlic O2X Duo) var placerade i centrum av testtanken på 0,75 respektive 1,5 m djup. Utöver givare för löst syre och luftflöde var anläggningen utrustad med följande onlinegivare: temperatur och fuktighet för luft (E+E EE310), ventilläge (Bürkert 3361), lufttryck (Gems 5000), vattentryck (Gems 2600), vattentemperatur (Cerlic O2X Duo). I samband med givarkalibrering mättes temperaturen på vattnet och den omgivande luften (Greisinger GMH2710-F) samt luftens relativa fuktighet och tryck (Rubicson). Vattnets temperatur verifierades med samma givare och övervakades med avseende på konduktivitet med en handhållen givare (Greisinger G1410). Instrumentens placering framgår av Figur 3.1 med avseende på digitala tryckgivare (P_D) för vatten i tanken respektive luft i luftaren, analoga tryckgivare (P_A) före och efter reglerventil, luftflödesmätare (F), temperaturgivare (T) och givare för relativ luftfuktighet (RH).

Det gick inte att se någon påverkan från varierande luftfuktighet, med avseende på luftflödesmätningarna. Syregivarna kalibrerades minst en gång i veckan. Tryckgivarna för vatten validerades genom jämförelse med uppmätt vattendjup. Vattentemperaturen mättes med syregivarna som i sin tur kalibrerades mot den externa

högpresionstermometern (Greisinger GMH2710-F). Lufttrycksmätare valideras mot en extern högpresionsmätare efter slutförda försök (Greisinger G1110).

3.1.2 Testprocedur

Testtanken fylldes med rent vatten av dricksvattenkvalitet, antingen från en lokal råvattenbrunn eller från det kommunala dricksvattensystemet. Vattnet analyserades av ett externt laboratorium för att säkerställa dricksvattenkvalitet.

Dynamiskt våttryck

Det dynamiska våttrycket (DWP), som motsvarar tryckfallet över luftaren inklusive dess membran, beräknades som skillnaden mellan det statiska vattentrycket i nivå med membranet och lufttrycket inne i luftaren. För varje membran mättes DWP vid tre olika luftflöden:

- Högt luftflöde motsvarande det högsta tillåtna flödet för den aktuella luftaren.
- Lågt luftflöde motsvarande det lägsta praktiskt tillämpbara luftflödet, dock lägst det rekommenderade lägsta flödet för luftaren.
- Medium luftflöde ungefär mitt emellan de högsta och lägsta flödena.

Vid mätningarna av DWP tillämpades aktuellt luftflöde under 10 min för att uppnå ett stabilt DWP varav de sista 60 sekunderna användes för beräkning av DWP. De tre nivåerna av luftflöde repeterades slumpvis ungefär 30 gånger.

Syreöverföringseffektivitet

Tester av syreöverföringseffektivitet genomfördes till stor del enligt den amerikanska standarden (ASCE 2022). Några avvikelser från standarden förekom. Vissa av dessa berodde på att standarden är anpassad för luftningsbassänger i fullskala, där fullständig omblandning är svårare att uppnå. Med mindre testtankar i pilotskala kan vissa förenklingar göras utan att det påverkar resultaten negativt. Avvikelserna gentemot standarden var följande:

- Det i tillåtna temperaturintervallet (10–30 °C) utvidgades nedåt till 4 °C. För att möjliggöra detta utfördes separata försök för att etablera en pålitlig temperaturkorrigering.
- Natriumsulfit tillsattes i fast form (i enlighet med Annex C i standarden) i stället för upplöst i vatten, eftersom det kunde konstateras att tillsats i fast form under bubbling av kvävgas ledde till snabb och jämn upplösning i den aktuella, relativt begränsade, volymen.
- Den begränsade testvolymen gjorde att det var tillräckligt med två syregivare (i stället för fyra) eftersom fullständig omblandning och homogena förhållanden förelåg.
- Givarna placerades inte 0,6 m från tankens vägg eftersom detta inte var möjligt, eller nödvändigt, med tanke på tankens storlek.

Koncentrationen av löst syre sänktes först till ungefär 6 mg/l genom att tillsätta kvävgas till luftledningen och låta denna bubbla genom luftaren. Därefter tillsattes en molär mängd natriumsulfit för att avlägsna resterande syre (ca 8 kg Na₂SO₃ per kg O₂) och uppnå en löst syrehalt omkring 0,3 mg/l innan testet påbörjades i och med att luftning startades.

Erforderlig tillsats av koboltklorid fastställdes genom att testa vilken halt som gav upphov till en snabb minskning av syrehalt efter tillsats av sulfit enligt vad som tidigare föreslagits (ATV 1996). Den tillämpade koncentrationen av kobolt var 0,1–0,25 mg/l vilket var i den nedre delen av intervallet i standarden.

Vattnet i tanken återanvändes till efterföljande tester upp till 30 gånger, tills koncentrationen av lösta ämnen uppgick till ungefär 2 000 mg/l.

3.1.3 Hantering och rengöring av membran

Luftarmembran från aktivslamprocesserna vid följande avloppsreningsverk testades:

- Ryaverket (Gryaab)
- Karshult avloppsreningsverk (Motala kommun)
- Slottshagens avloppsreningsverk (Nodra)
- Nykvarnsverket (Tekniska Verken i Linköping)
- Kungsängsverket (Uppsala Vatten och Avfall)
- Sjölundavloppsreningsverk (VA SYD).

Data om anläggningarna och dess luftare finns i Tabell 4.1 och 4.2.

Valet av vilka membran som skulle testas baserades på observerade bubbelmönster i anläggningen. Vid nedtömning av respektive luftningsbassäng tillämpades ett lågt luftflöde och vid 0,5–1 m vattennivå över luftarna valdes luftare ut som hade typiska bubbelmönster vilket indikerade att de inte var igensatta eller trasiga. Efter att membranen hade monterats loss från sina hållare avlägsnades överskott av suspenderat material genom försiktig sköljning med kranvatten.

Tre till fem membran monterades loss från olika positioner på varje anläggning, sköljdes försiktigt, packades i en försluten plastsäck och skickades till den ort där test-tanken befann sig. Membranen anlände inom ett par dagar och förvarades kylda i slutna plastsäckar fram till testningstillfället. I samråd med leverantörer med erfarenhet av liknande tester antogs att membran kunde förvaras på detta sätt i upp till ett par månader utan att testresultaten påverkades.

För varje typ av använt membran som testades, testades även ett nytt exemplar av samma fabrikat. Använda membran rengjordes också och testades igen. På så sätt kunde membran jämföras i tre tillstånd, nämligen: nytt, använt och rengjort.

Rengöringen av membran syftade till att avlägsna så mycket som möjligt av kemiska utfällningar och vidhäftande biofilm för att återställa så mycket som möjligt av membranets ursprungliga tillstånd. Rengjorda membran speglade därför största möjliga återställning av prestandan, i detta läge utan hänsyn till om denna insats vore praktiskt och ekonomiskt försvarbar att genomföra i en anläggning.

De använda luftarna rengjordes i fyra steg för att säkerställa att eventuella igensättningar avlägsnades inuti och omkring öppningarna:

1. Manuell borstning och sköljning med kranvatten.
2. Upprepad sprayning med saltsyra (15–30 %), följt av försiktig borstning på båda sidor av membranet, i 5–15 minuter tills synliga rester avlägsnats.
3. Sköljning med kranvatten.
4. Rengöring av öppningarna med myrsyra (85 %) tillsatt till den trycksatta luften med det högsta rekommenderade luftflödet under 2 timmar i rent vatten. Den totala tillsatta myrsyran per luftare var 0,2 l, vilket motsvarar en hög syradosis i praktiken.

Rengjorda membran mättes med en digital hårdhetsmätare (Bareiss HP III) för Shore A enligt DIN ISO 48-4 med minsta materialtjocklek 6 mm.

Fällningspotentialen uppskattades i anläggningarna varifrån luftare inhämtats baserat på ett beräknat LSI (*Langelier saturation index*). Prover tagna i de luftade bassängerna vid tre tillfällen (med undantag för Nykvarn med ett prov) analyserades av externa laboratorier med avseende på pH, TDS, konduktivitet, kalcium och alkalinitet. LSI beräknades som differensen mellan aktuellt pH och mättnads-pH enligt Bilaga A.

3.1.4 Databehandling

Vid renvattenförsöken beräknades SOTE utifrån ekvationerna nedan. SOTE fastställdes genom att bestämma masstransportkoefficienten ($K_L a_{20}$, h⁻¹) och syrets mättnadskoncentration ($C_{\infty 20}$, kg/m³) vilket gör det möjligt att beräkna syreöverföringshastigheten

(SOTR, *standard oxygen transfer rate*, kg O₂/h) med hjälp av volymen (V, m³):

$$SOTR = K_L a_{20} C_{\infty 20}^* V \quad (3.1)$$

Med hjälp av luftflödet (Q_L , Nm³/h) kunde sedan SOTE (%) bestämmas enligt:

$$SOTE = \frac{SOTR}{0.298 Q_L} \quad (3.2)$$

Normaltillstånd för luft (Nm³) definieras i denna rapport som 0 °C, 1 atm och 0 % luftfuktighet. Faktorn 0,298 omvandlar luftflödet vid normaltillstånd till ett massflöde av syre (kg O₂/h). Efter att koncentrationen av syre i vattnet sänkts till nära noll och syrehalten steg mot mättnadsvärdet beskrevs koncentrationen av löst syre vid tiden t enligt:

$$C_t = C_{\infty}^* - (C_{\infty}^* - C_0) e^{-K_L a t} \quad (3.3)$$

Genom anpassning med icke-linjär regression bestämdes $K_L a$ och C_{∞}^* . $K_L a_{20}$ och $C_{\infty 20}^*$ beräknades genom korrigering för temperaturen (T) enligt nedan där $C_{\infty 20}^*$ även korrigerades för lufttrycket med faktorn Ω :

$$K_L a_{20} = K_L a \theta^{(20-T)} \quad (3.4)$$

$$C_{\infty 20}^* = \frac{1}{\Omega \tau \beta} C_{\infty}^* \quad (3.5)$$

$$\tau = \frac{C_{sT}^*}{C_{s20}^*} \quad (3.6)$$

$$\Omega = \frac{P_b}{P_s} \quad (3.7)$$

där C_{sT}^* och C_{s20}^* är tabellvärden för mättnadskoncentrationen för syre vid ytan vid temperaturerna T respektive 20 °C, vid atmosfärstryck och 100 % luftfuktighet, och P_b och P_s är det rådande lufttrycket i omgivningen respektive standardtrycket (1 atm).

$K_L a$ korrigerades även för salthalten till 1 000 mg/l TDS enligt följande samband:

$$K_L a_{1000} = K_L a e^{(\varepsilon(1000-TDS))} \quad (3.8)$$

Av anledningar som beskrivs i Avsnitt 4.4 beräknades syrets mättnadskoncentration enligt formeln nedan i stället för att använda uppmätta värden enligt standarden:

$$C_{\infty}^* = C_{sT}^* \left(1 + d_e \left(\frac{D_f}{P_s} \right) \right) \quad (3.9)$$

där:

- d_e = Korrektionsfaktor för medelvattendjupet
- D_f = Luftarnas installationsdjup (m)
- P_s = Standardtrycket (1 atm = 10,33 m)

Syrets mättnadshalt påverkas av salthalten i vattnet. För att ta hänsyn till denna effekt inkluderades korrektionsfaktorn β . Mättnadskoncentrationen korrigerades, utöver tryck och temperatur, därför även för salthalt enligt ekvation 3.5 där β beräknades utifrån salthalten (TDS i mg/l) enligt:

$$\beta = 1 - 0,01 \cdot \frac{TDS}{1000} \quad (3.10)$$

3.2 Prestandaövervakning

3.2.1 Uppskattad syreöverföringseffektivitet genom nyckeltalsberäkningar

En metod utvecklades för att uppskatta syreöverföringseffektiviteten med hjälp av beräkning av nyckeltal för det biologiska reningssteget. Metoden utvärderades med data från flera reningsverk. Enligt denna metod uppskattas OTE genom att luftflödet (Q_L , Nm³/h) relateras till syrebehovet i processen (AOR, kg O₂/h). Därefter korrigeras OTE till standardförhållanden (1 atm, 20 °C och 0 mg/l löst syre) med undantag för påverkan av avloppsvattnets sammansättning (α) och eventuell igensättning/åldrande (F). Då erhålls en uppskattning av $\alpha F(SOTE)$.

Först behövde syrebehovet i processen (AOR) beräknas baserat på dygnsprover och dygnsmedelvärden. Detta gjordes genom att summera syrebehoven för nedbrytning av organiskt material (plus endogent behov) och nitrifikation och subtrahera det negativa syrebehovet som denitrifikation ger upphov till. Detaljer kring beräkning av AOR ges i Bilaga B.

OTE (kg O₂/kg O₂) uppskattades enligt:

$$OTE = \frac{AOR}{Q_L \cdot 0,298} \quad (3.11)$$

För att få mer jämförbara värden omvandlades OTE till $\alpha F(SOTE)$ med följande samband:

$$\alpha F(SOTE) = (OTE) \cdot 1,024^{(20-T)} \left(\frac{C_{\infty 20}^*}{0,98 \tau C_{\infty 20}^* - C} \right) \quad (3.12)$$

$$C_{\infty 20}^* = 9,077 + 0,343 D_f \quad (3.13)$$

$$\tau = \frac{14,45 - 0,3651 T + 0,004864 T^2}{9,077} \quad (3.14)$$

där:

T = Vattnets temperatur (°C)

$C_{\infty 20}^*$ = Syrets mättnadskoncentration i bassängen vid 20 °C som beräknas enligt 3.13 (mg/l)

τ = Temperaturkorrigeringsfaktor som beräknas enligt 3.14

C = Koncentrationen av löst syre (mg/l)

D_f = Luftarnas installationsdjup (m)

Värdet på τ beräknas för varje datapunkt (dygn) eftersom det påverkas av temperaturen. För temperaturen och syrehalten används dygnsmedelvärden. $C_{\infty 20}^*$ är en konstant som är anläggningsspecifik.

För syrehalten finns ofta flera mätpunkter från olika zoner. Ett sätt att ta hänsyn till dem är att vikta dem baserat på den uppskattade andelen av syrebehovet i varje zon. En vanlig tumregel är att syrebehovet i tre på varandra följande zoner fördelar sig med 50 % i den första, 30 % i den andra och 20 % i den tredje zonen. Då kan ett viktat värde på syrehalten (C) beräknas genom att summera 50 % av syrehalten i zon 1, 30 % av syrehalten i zon 2 och 20 % syrehalten i zon 3. Viktningen kan även göras baserat på andelen av luftflödet som går till respektive zon. Båda dessa varianter användes vid beräkningarna.

På liknande sätt som för OTE beräknades även luftningseffektiviteten (AE, kg O₂/kWh) som anger hur mycket syre som kommer processen till del i förhållande till hur mycket elenergi som tillförs. AE beräknades som kvoten mellan AOR och tillförd

elenergi per dygn (kWh/d). AE omvandlades till $\alpha F(\text{SAE})$ på motsvarande sätt som OTE omvandlades till $\alpha F(\text{SOTE})$ enligt ekvation 3.12.

3.2.2 Tryckövervakning genom mottrycksuppskattning

För att följa förändringar i luftarnas mottryck kan direkta tryckmätningar efter regler-ventil tillämpas (se Avsnitt 2.5.1). I denna studie uppskattades i stället mottrycket utifrån luftflöde och ventilöppningsgrad. Skattningarna kan göras utifrån givardata som ofta finns tillgängliga och kräver då inga ytterligare instrument. Uppskattningen av mottryck kan implementeras som en del av en motioneringssekvens.

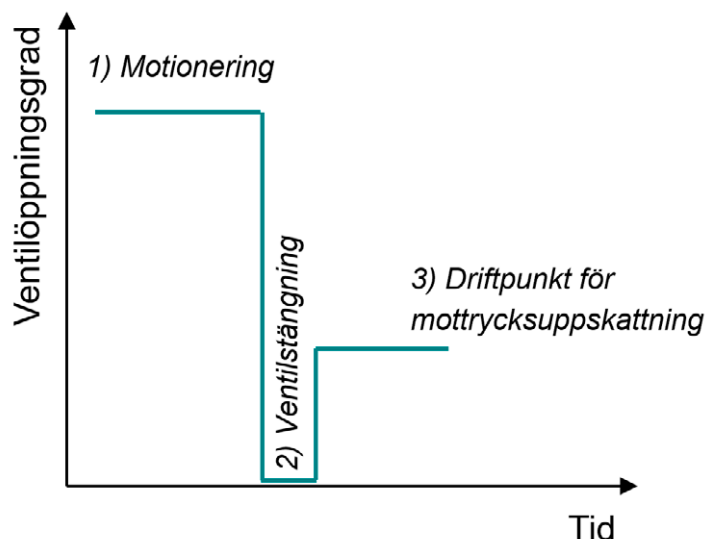
En metod för att uppskatta luftarnas mottryck implementerades på Henriksdals reningsverk (Stockholm Vatten och Avfall). I enlighet med denna metod beräknades DWP utifrån kända fysikaliska samband för luftflöde och tryckfall över en ventil. Trycket efter ventilen uppskattades enligt:

$$p_2 = \frac{p_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p_1}{2}\right)^2 - \frac{Q^2}{514^2} \frac{\rho T}{k_v^2}}, \quad (3.15)$$

där p_1 är trycket vid blåsmaskinen, Q är luftflödet, ρ och T är luftens densitet och temperatur, och k_v är en ventilspecifik konstant. Konstanten k_v beskriver ventilens karakteristik och anges normalt i en tabell med olika k_v -värden för givna ventillägen. Dessa tabelldata tas fram empiriskt av ventiltillverkaren genom att mäta vattenflödet genom ventilen vid olika öppningsgrader och standardiserade tryck och temperaturförhållanden. Trots att dessa tabeller baseras på mätningar med vattenflöden så är värdena tillämpliga även med luftflöden när sambandet (3.15) används. Sedan beräknades DWP utifrån p_2 genom att subtrahera de andra beståndsdelarna (däribland vattenpelarens bidrag) från det totala mottrycket (Figur 2.3).

Produkten ρT är konstant vid normala driftstemperatur i luftningssystemet och behövde därför inte mätas. Vid 0 °C (273,15 K) är luftens densitet 1,29 kg/m³ och produkten då 352 K kg/m³.

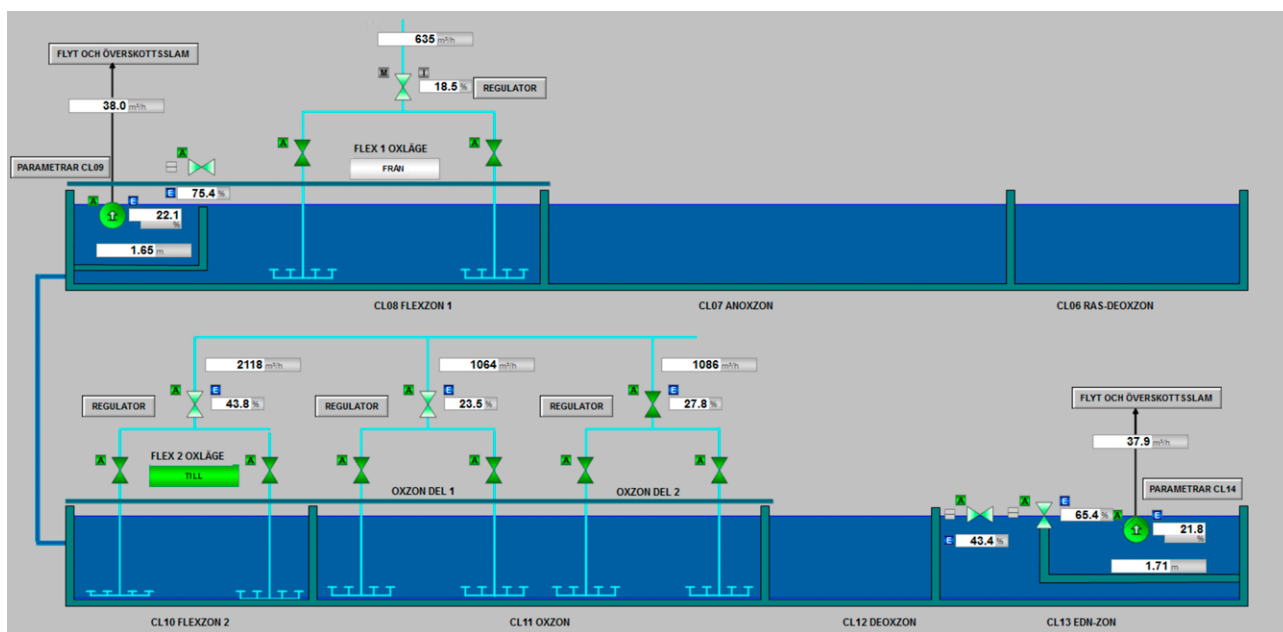
För att öka noggrannheten i uppskattningen varierades ventilläget enligt ett antal förutbestämda lägen som liknar en trappa (Figur 3.3). Denna sekvens säkerställde att eventuell hysteres i ventilposition undveks. En hysteres i detta fall innebär att luftflödet blir olika högt beroende på om ventilen genomför en stängande respektive öppnande rörelse. Som exempel kan ventilpositionen 20 % ge 1 000 Nm³/h om ventilen går från stängt till öppet läge. Men om ventilen varit fullt öppen och efter det når 20 % så blir luftflödet i stället 1 200 Nm³/h. Denna hysteres kan bero på att ventilen i sin konstruktion har olika luftmotstånd (k_v -värden) beroende på om den stänger eller öppnar. Även glapp i ventilen eller positionsmätningen kan ge upphov till hysteres. Oavsett orsak undveks denna störning genom att en förutbestämd ventillägesändring repeterades såsom Figur 3.3 illustrerar.



Figur 3.3

Illustration av en trappsekvens för att uppskatta mottryck. Det första trappsteget, motionering, utförs vanligen en eller några gånger per vecka för att motverka igensättning.

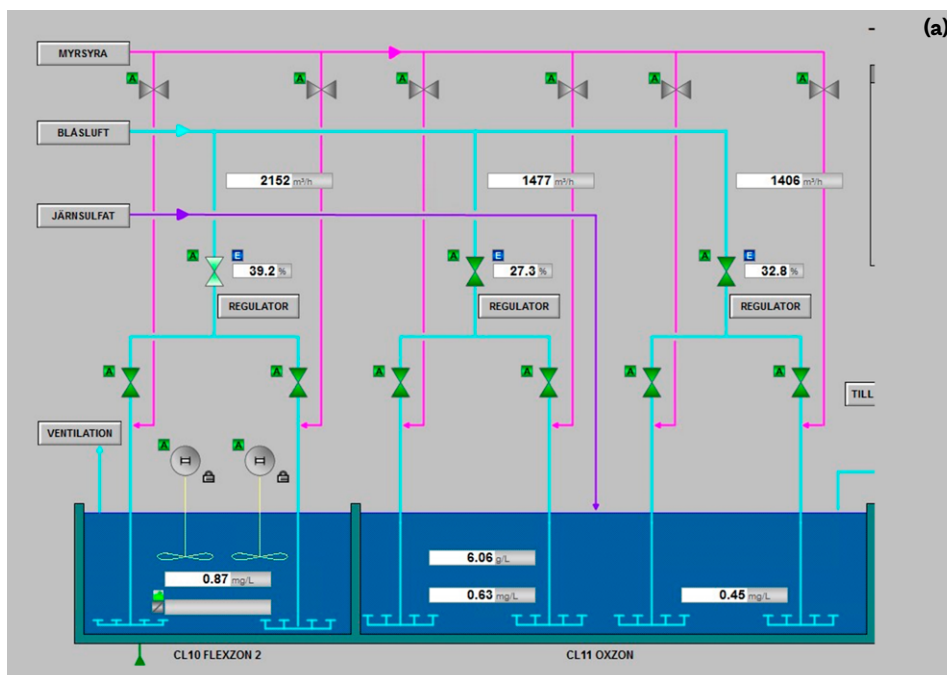
Trappsekvensen implementerades på Henriksdals reningsverk i två zoner (flexzon 2 och oxzon) på linje 1 genom att den programmerades i styrsystemet för att automatiskt genomföras 1–2 gånger per vecka (Figur 3.4). Detta är en fullt tillräcklig tidsupplösning för att följa förändringar i DWP. Även datainsamling och beräkning av DWP bör automatiseras för att kunna analysera resultaten över lång tid (typiskt flera år).



Figur 3.4

Processavsnitt på Henriksdals reningsverk där mottrycksuppskattning implementerades.

Luften reglerades med en gemensam ventil för två nedledare. För att kunna särskilja det individuella mottrycket för respektive nedledare ströps lufttillförseln med avstängningsventilen (röd cirkel, Figur 3.5a). Själva trappsekvensen och öppning/stängning av avstängningsventilerna programmerades som en sekvens i styrsystemet, där öppningsgrader och tider för de olika trappstegen var valbara (Figur 3.5b).



Figur 3.5

(a) Reglering av lufttillförsel vid mottrycksuppskattnig krävde växelvis luftavstängning för att kunna separera mottrycket till de båda nedledarna. (b) Användargränssnitt för att välja utformning på trappsekvens i styrsystemet.

(b)

Trappsekvensen kan utnyttjas för att samtidigt uppskatta OTE och $\alpha F(SOTE)$ under drift. Denna metod tillämpades inte som en del av denna studie men metodiken beskrivs i detalj i Bilaga C.

3.3 Simulering av optimerat underhåll

För att undersöka den miljömässiga och ekonomiska nyttan med underhåll av luftare simulerades olika underhållsstrategier med en processmodell. Resultat från renvattenförsöken användes för att modellera igensättning och åldrande, och effekten av olika utbytes- och rengöringsintervall analyserades i termer av förändrad elförbrukning, koldioxidutsläpp och totalkostnad.

3.3.1 Simulerat reningsverk och luftarsystem

En konventionell aktivslamprocess med för- och efterdenitrifikation simulerades med vad som kan antas vara normala drifts- och anläggningsparametrar (Tabell 3.1). Ett dynamiskt inkommande flöde simulerades. Modellen simulerades i mjukvaran Sumo 22.1 (Dynamita) med en standardmodell för aktivt slam (Sumo1).

En optimal luftförsörjning simulerades genom att anta sex blåsmaskiner av typen turboblåsmaskin vilket innebär att syresättningen aldrig begränsades av blåsmaskinernas kapacitet. På samma sätt valdes blåsmaskinerna med kapacitet att hantera tryckökning orsakat av igensättning på luftarna.

I praktiken kan det vara svårt att välja rätt antal blåsmaskiner och deras kapacitet. Exempelvis kan låg belastning nattetid innebära att blåsmaskinens minimala luftflöde nås, med en oönskat hög syrehalt som effekt. Även om dessa utmaningar är viktiga att hantera i praktiken var målet med dessa simuleringar att analysera nyttan med luftarunderhåll. Därför antogs en optimal luftförsörjning som kunde hantera både låg- och högbelastade driftfall.

	Parameter	Värde
Process och anläggning	Djup (m)	5,0
	Luftad volym (m ³)	3 x 2 639
	Syrehalt (mg/l)	2,0
	α -värde	0,70 (konstant)
Luftarsystem	Luftartyp	Tallriksluftare
	Luftararea (m ²)	0,0263 (9")
	Bottentäckningsgrad (%)	15
	Antal luftare	9 000
	Blåsmaskinstyp	Turboblåsmaskin
Belastning	Personekvivalenter	250 000
	Inflöde medel (m ³ /h)	66 500
	Koncentrationer (mg/l)	Konstanta koncentrationer av COD, kväve och fosfor
	Temperatur (°C)	12 °C (konstant)

Tabell 3.1

Drifts- och anläggningsparametrar för den modellerade aktivslamprocessen.

3.3.2 Modell för igensättning och åldrande

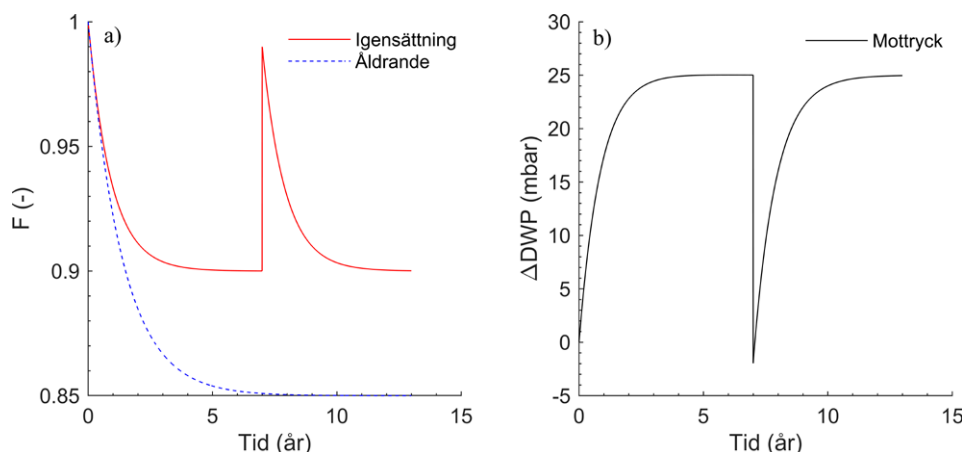
Då det i dag saknas beprövade modeller för igensättning och åldrande utvecklades en modell inom projektet för att simulera dessa effekter. Modellen baserades på resultaten från renvattenförsöken (Kapitel 4) och antagandet att en förändring i syreöverförings-effektivitet var proportionell mot förändringen i mottryck.

Dosering av syra till luftningssystemet simulerades som rengöringsmetod, vilken är den metod som kan genomföras under drift och i viss mån redan tillämpas i Sverige. Effekten av en rengöring är dock osäker och svår att prediktera. Typ och mängd av syra, i kombination med typ och omfattning av igensättning, avgör troligen hur effektiv en rengöring är. Rengöringseffekten kan i sin tur mätas i termer av återställningsgrad och

andelen kvarvarande irreversibel igensättning. I simuleringarna antogs en rengöring återställa 90 % av total igensättning. Detta innebär att modellen utgick från en konstant irreversibel igensättning som enbart går att återställa genom membranbyte.

Det finns indikationer i praktiken på att andelen irreversibel igensättning ökar med minskad rengöringsfrekvens. Alltså att rengöringseffekten minskar om luftarna tillåts sätta igen utan rengöring. Omvänt innebär det att återkommande rengöringar bibehåller öppna membranporer vilket därmed ger en lägre andel irreversibel igensättning. Ovan resonemang är tekniskt rimligt och har stöd i praktiken, men det saknas data på hur mycket och hur snabbt denna irreversibla igensättning sker. Modellen avgränsades och inkluderade inte detta fenomen. I stället antogs att varje rengöring återställde SOTE till ett visst värde, oavsett när i tiden den genomfördes. Notera att den omfattande rengöringsprocedur som användes i renvattenförsöken (Avsnitt 3.1.3) enbart syftade till att skilja på åldrande och igensättning, och inte är tänkt att tillämpas som återkommande rengöringsmetod i praktiken.

Figur 3.6 illustrerar hur faktorn F för igensättning och åldrande med avseende på SOTE och DWP förändrades över tid samt vid en rengöring. Notera att denna modell är baserad på data från renvattenförsöken i Kapitel 4 som i sin tur är en slags medeluppskattning som baseras på mätningar av flera olika luftare. I praktiken är det troligt att olika luftare både åldras och sätter igen med andra hastigheter än de som simuleras här. För att kalibrera in modellen för ett specifikt reningsverk med en viss typ av luftare så krävs upprepade SOTE och DWP-mätningar under en längre period (se tiden till mättnad i Figur 3.6).



Figur 3.6

Illustration över hur modellen beskriver förändringar i SOTE och faktorn F (a) samt DWP (b) vid igensättning, åldrande och en rengöring efter 7 år.

Slutvärdet för igensättning i Figur 3.6a är 0,9 vilket innebar att SOTE som mest försämrades med 10 %. Detta skedde på cirka 3 år, där halva effekten (5 %) uppnåddes efter cirka 1 år. Igensättningens effekt på mottrycket skedde med motsvarande dynamik, där slutvärdet 30 mbar tryckökning även nåddes efter 3 år. Notera effekten av en rengöring vid tiden 7 år, där effekterna av igensättning till stor del återställs (Figur 3.6).

Parallellt med igensättningen skedde det modellerade åldrandet, men med en något långsammare dynamik. Den fulla effekten av åldrande nåddes efter cirka 5 år och hälften av denna nåddes efter cirka 1 år. Den största skillnaden mot igensättning var att slutvärdet var lägre och alltså stod för en större effekt än igensättning i denna modell.

Parametervärden för att beskriva effekterna av åldrande och igensättning baserades på resultaten av renvattenförsöken i Kapitel 4, vilka även justerades för att underlätta tolkning av olika underhållsintervall. Det är värt att notera att de valda parametervärdena innebär en betydligt lägre effekt av igensättning och samtidigt en högre effekt av åldrande än vad som redovisats i litteraturen (Avsnitt 2.2). Sammanlagt så gav de dock en total effekt som är i linje med, eller något lägre än, resultaten i litteraturen.

3.3.3 Miljöpåverkan och kostnadsberäkningar

Miljöpåverkan från rengöring och membranbyte beräknades utifrån nyckeltalen i Tabell 3.2 som baseras på värden i olika livscykeldata-baser. Tabellen innehåller värden för både PU och EPDM, men enbart det sistnämnda och vanligaste materialet har analyserats i simuleringarna. På samma sätt redovisas koldioxidutsläpp från både saltsyra och myrsyra, där enbart myrsyra har analyserats. Koldioxidutsläppen från en nordisk elmix har använts i simuleringarna. De är betydligt högre än från den befintliga elmixen Sverige i dag har.

Kostnaderna för membranbyte och rengöring varierar stort beroende på reningsverkets organisatoriska och tekniska förutsättningar. Förutsättningar att ställa av delar av reningsverket kan vara avgörande för att kunna tappa ned bassängen och byta luftare. I Tabell 3.3 visas kostnader för ett membranbyte på ett medelstort reningsverk med 2023 års siffror som har använts som underlag för att beräkna livscykelkostnaden med olika underhållsstrategier. Räntekostnad ingick inte i kostnadsberäkningarna.

Tabell 3.2

Nyckeltal för utsläpp av koldioxidekvivalenter som användes för att analysera luftarunderhållets miljöpåverkan.

		CO ₂ -ekvivalenter (massa)	Enhet	Referens
Luftarmembran				
Etenpropengummi (EPDM)	Tillverkning	3,1	kg CO ₂ /kg	Sphera (2023) tyskt medelvärde
	Förbränning	2,6		
Polyuretan (PU)	Tillverkning	3,2		EUROPUR (2015)
	Förbränning	2,2		Sphera (2023) tyskt medelvärde
Rengöringssyror				
Myrsyra (90 %)		2,5	–	IVL:s interna LCA-databas
	Rengöringsdos	0,25	kg/luftare, rengöringstillfälle	0,1–0,4 l/rengöring och luftare enligt leverantörer
Saltsyra (15 %)		0,6	–	Svenskt Vatten (2024)
El				
Nordisk residualelmix		0,468	kg/kWh	Svenskt Vatten (2024)

Tabell 3.3

Drift- och underhållskostnader som användes för att simulera livscykelkostnad för luftarunderhåll.

	Avser	Kostnad	Kommentar
Membranbyte (kostnader avser byte av 1 200 luftare i en linje)	Arbetskostnad	310 000 kr	Inkluderar tömning, slam-sugning ställningar, hyror, eget och externt arbete (470 h)
	Materialkostnad	85 000 kr	Luftare
	Totalkostnad per luftare	329 kr	
	Renoveringsåtgärder	190 000 kr	Byte av trasiga luftarrör som ej ingår i byteskostnad
Rengöring	Myrsyra (85 %)	6,00 kr/luftare och rengöring	Kostnad utifrån inköp av 1 000 liter
	Arbets- och materialkostnad	10,00 kr/luftare och rengöring	Avser mobil doseringsutrustning och dess hantering
Elkostnad		1,50 kr/kWh	

4 Resultat från renvattenförsök

I detta kapitel redovisas resultaten från de utförda renvattenförsöken. Inledningsvis presenteras övergripande erfarenheter och därefter resultat från mätningar av DWP och SOTE. Resultat från de olika mätningarna jämförs med varandra och med de förhållanden som rådde vid anläggningarna som luftarna togs ifrån.

4.1 Erfarenheter från renvattenförsök

Pilotanläggningen som uppfördes hade en testtank med en volym på omkring 2 m³ och ett vattendjup på drygt 3 m. Denna storlek var tillräcklig för att testa en luftare i taget och för att kunna göra parallella jämförelser mellan nya, använda och rengjorda membran. Förmodligen kan relativa jämförelser även göras med en något mindre tank än den som användes i denna studie utan att noggrannheten skulle drabbas. Dock bör vattendjupet sannolikt vara minst 2–3 m för att ha en tillräcklig totalvolym och syresättningstid. En större tank än nödvändigt bör undvikas eftersom det ger ökad tidsåtgång för fyllning och tömning och ökad kemikalieförbrukning. Om syftet är att få absoluta prestandadata krävs dock en större testtank där fler luftare kan installeras med representativ botten täckningsgrad och vattendjup.

Valet gjordes att utrusta pilotanläggningen med en högre grad av automation än vad som är typiskt vid den här typen av tester. Detta för att minska mängden manuella arbetsinsatser i samband med varje försök, för att öka tillförlitligheten genom att minska risken för mänskliga fel och för att förenkla en automatisk behandling av den data som genererades. Exempelvis skedde en automatisk reglering av luftflödet mot ett inställbart börvärde för luftflödet. Automation gjorde det också möjligt att utföra en stor mängd tryckmätningar vid olika luftflöden utan tillsyn nattetid.

Mätningar av DWP och SOTE utfördes vid tre olika luftflöden: vid det lägsta respektive högsta i driftområdet och mitt emellan dessa. Genom att först avlägsna en del av det lösta syret (ned till 6 mg/l) med kvävgas vid SOTE-mätningar, minskades den mängd kemikalier som behövde tillsättas. Efter knappt 30 SOTE-försök i testtanken hade salthalten ökat till ca 2 000 mg/l TDS och vattnet behövde bytas ut. Under en normal arbetsdag kunde fyra SOTE-försök genomföras, typiskt med en luftare vid fyra olika luftflöden.

4.2 Rengöring

De använda luftarna hade samtliga ett lager av biofilm över ytan när de ankom till testplatsen. Detta var vidhäftande biofilm eftersom löst sittande biomassa och slam som sedimenterat under nedtömning av bassänger hade avlägsnats genom försiktig avspolning. De flesta luftare hade även vad som såg ut att vara kemisk utfällning på ytan och/eller kring porerna. För vissa luftare syntes även utfällningar på undersidan av membranet. Exempel på fram- och baksida på en smutsig tallriksluftare med EPDM-membran samt efter rengöring visas i Figur 4.1.

Foton på en panelluftare med PU-membran visas i Figur 4.2. Även denna luftare hade ett mycket tydligt lager av vidhäftande biofilm. En inledande rengöring med myrsyra tillsatt till den trycksatta luften hade ingen synbar effekt på biofilmen (Figur 4.2) men metoden brukar vara effektiv mot vissa typer av utfällningar, exempelvis kalciumkarbonat, kring porerna, såvida de är åtminstone delvis öppna. Efter den fullständiga mekaniska och kemiska rengöringen såg membranet näst intill ut som ett nytt, trots ungefär 10 år i drift.

Vid rengöring av rörluftarna noterades att det förekom sandkorn på luftarnas insidor. Det tyder på att det varit brott på luftarsystemet och att slam läckt in.

Visuellt kunde det inte observeras någon skillnad på bubblornas mönster efter inledande test genom behandling med endast tillsats av myrsyra till luftningen. Efter mekanisk och kemisk rengöring med saltsyra och myrsyra blev det däremot tydligt att porernas igensättning löstes upp och hela luftaren blev aktiv. För en del av luftarna förändrades bubblornas mönster vid denna typ av rengöring från att de bara bildades vid en del av ytan till att de i stället bildades vid hela luftarytan.



Figur 4.1

Tallriksluftare med EPDM-membran i smutsigt skick (vänster), sedd underifrån (mitten) och efter fullständig mekanisk och kemisk rengöring (höger).

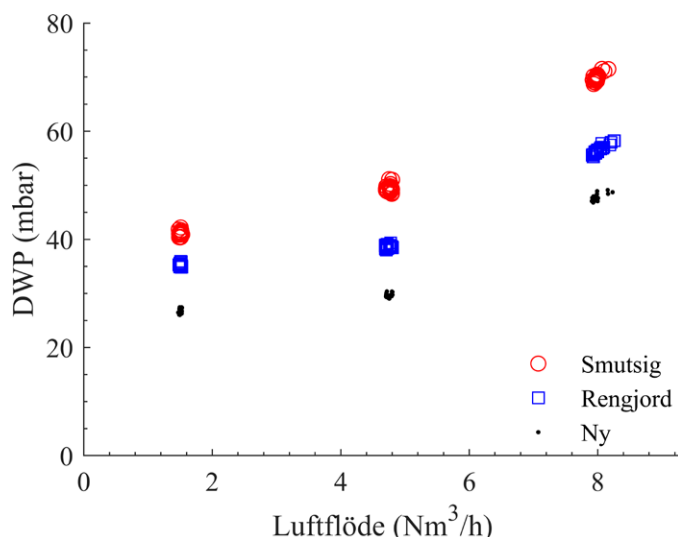


Figur 4.2

Panelluftare med PU-membran (avkortad för att rymmas i testtanken) i smutsigt skick (vänster), efter rengöring med myrsyra tillsatt till den trycksatta luften (mitten) och efter fullständig mekanisk och kemisk rengöring med saltsyra (höger).

4.3 Dynamiskt våttryck

För varje membran gjordes ungefär 30 mätningar av DWP vid lågt, medium och högt luftflöde. Samma mätserie utfördes för smutsig, rengjord och ny luftare av samma typ för att kunna skilja igensättning från åldrande. Rengöringen var både mekanisk och kemisk och representerade den mest omfattande rengöring som skulle kunna utföras på ett luftarsystem. Ett exempel på erhållna mätresultat visas i Figur 4.3. Effekten av igensättning beräknades utifrån skillnaden mellan smutsig och rengjord luftare som genomsnitt vid de tre luftflödena. Åldrande beräknades som skillnaden mellan rengjord och ny luftare.



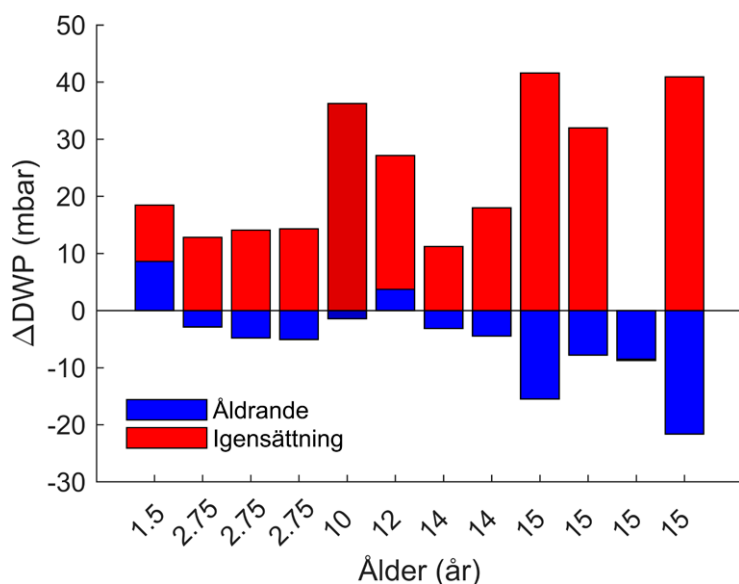
Figur 4.3

Exempel på mätresultat från ett av membranen som ingick i studien. Dynamiskt vättryck (DWP) vid tre olika luftflöden för smutsigt, rengjort och nytt membran.

För samtliga luftare orsakade igensättning en tydlig ökning av DWP (Figur 4.4). Ökningen i DWP var större vid högre luftflöden (Figur 4.3). Ökningen av DWP till följd av igensättning var generellt högre för membran som varit länge i drift (10–15 år) än de som varit i drift kortare tid (1,5–3 år) (Figur 4.4). Resultaten för membranet av PU var i detta avseende liknande som för övriga membran av EPDM. Därmed kunde det konstateras att igensättning orsakat ökning av mottrycket och att denna effekt tycks ha försämrat luftarna kontinuerligt över lång tid.

Ett av reningsverken i studien hade rörluftare med EPDM-membran. Dessa luftare hade varit i drift i upp till 15 år, men ca 2 % av luftarna hade bytts vart tredje år för att ersätta trasiga exemplar. På grund av detta kan det ha varit olika ålder på de luftare som testades. Av de fyra luftarna som testades hade tre en tydlig effekt av igensättning medan en inte uppvisade någon igensättning. Detta skulle kunna bero på att just den luftaren nyligen hade ersatt en trasig luftare och därför var relativt ny.

Effekten av åldrande varierade mer mellan de olika luftarna. För de flesta luftarna var DWP i stället *lägre* eller ungefär samma efter rengöring som för ett nytt membran (Figur 4.4). Lägre DWP efter rengöring innebär att åldrandet orsakade en sänkning av mottrycket. Detta kan sannolikt förklaras med att det elastiska materialet får en bestående töjning vid långvarig kontinuerlig användning. En följd effekt kan då vara att töjningen leder till något större öppningar i membranen och därmed lägre DWP. Två av membranen (1,5 respektive 12 år i drift) uppvisade däremot ökat DWP av åldrande. För membranet av PU var DWP i princip samma efter rengöring som för ett nytt vilket indikerar att inget åldrande skett. Genom att även utföra samma typ av rengöring på ett nytt membran kunde det bekräftas att själva rengöringen inte hade någon påverkan på luftarens DWP.

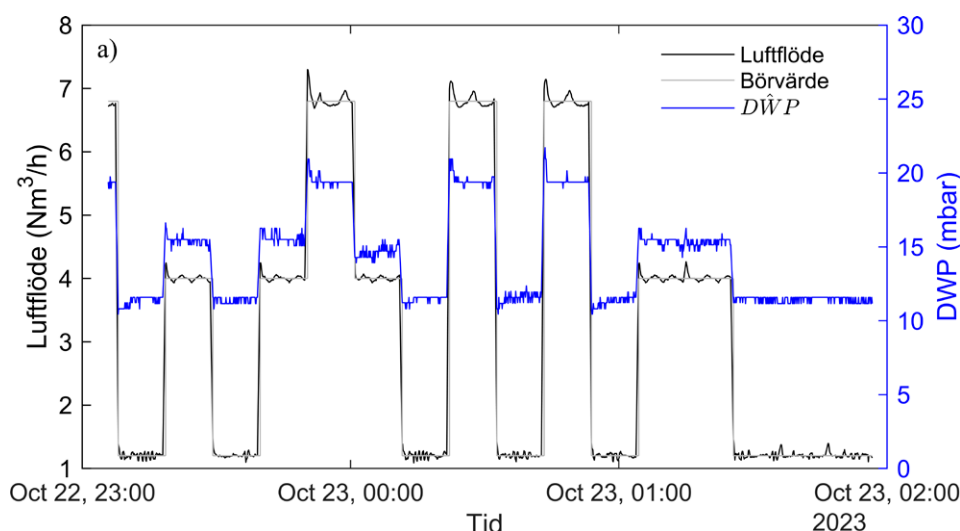


Figur 4.4

Effekten av igensättning och åldrande på membranens dynamiska våttryck (DWP). Den mörkare stapeln representerar ett membran av PU (10 år) medan övriga membran var gjorda av EPDM.

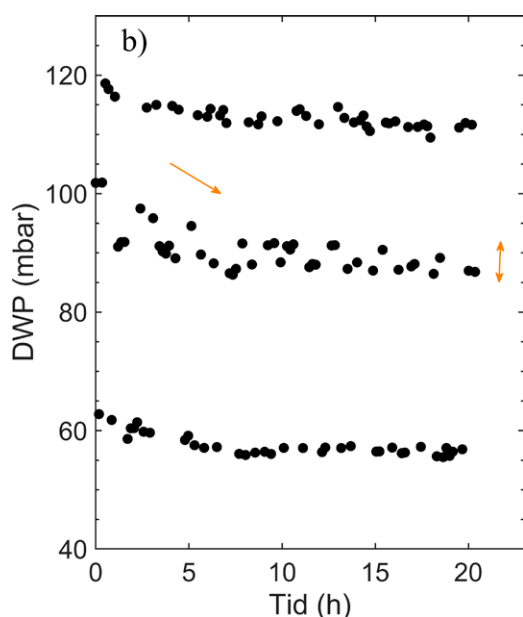
Vid mätningarna av mottryck tog det några minuter för DWP att stabilisera sig (Figur 4.5a). Detta var särskilt tydligt när luftflödet ändrades mellan högt och lågt. Därför tillämpades varje luftflöde under tio minuter innan beräkningen av DWP, som baserades på mätningarna under den sista minuten. Styrning av luftflödet till önskat börvärde fungerade väl med en variation på max $\pm 5\%$ under tiominutersperioden.

Generellt var spridningen i DWP högre för smutsiga membran än för rengjorda och nya. Det visade sig också att DWP påverkades av historiken i vilket luftflöde som hade tillämpats tidigare, vilket illustreras av Figur 4.5b. För denna rörluftare syntes minskade DWP för smutsigt membran under de första 6 timmarna vilket sedan planade ut. Minskningen över tid bidrog till spridning för DWP-mätningarna. Denna spridning var störst vid luftflödet medium eftersom detta luftflöde tillämpades efter antingen högt eller lågt luftflöde vilket innebar störst variation i historik.



Figur 4.5

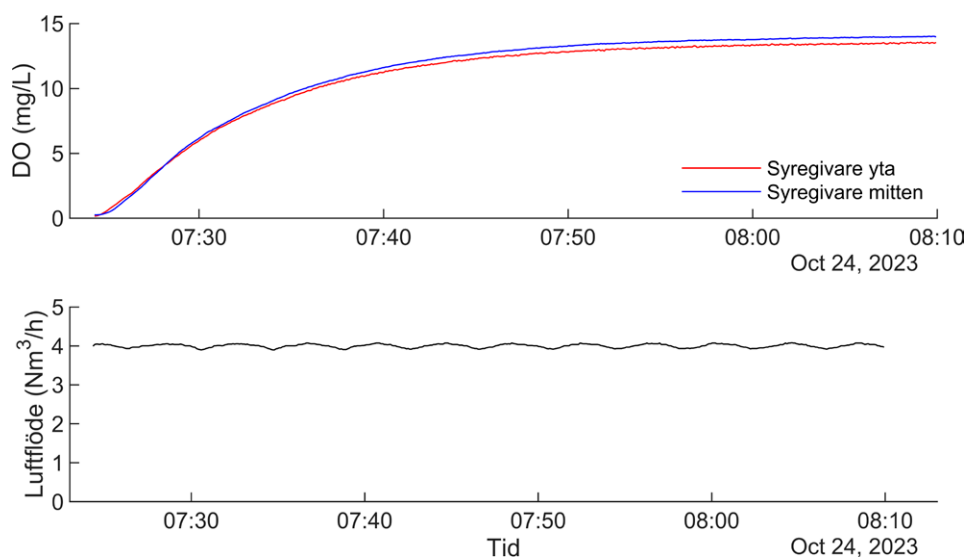
Resultat från mätningar av dynamiskt våttryck (DWP). (a) Reglering av luftflödet mot dess börvärde och DWP. (b) DWP vid lågt, medium och högt luftflöde över tid under en mätserie. Pilen visar den initiala nedåtgående trenden i DWP och dubbelpilen visar variationen i DWP vid medium luftflöde.



4.4 Syreöverföringseffektivitet

Försöken för att bestämma SOTE utfördes, i likhet med DWP-testerna, för smutsigt, rengjort och nytt membran. SOTE-experiment är betydligt mer arbets- och tidkrävande och därför kunde inte lika många repetitioner av försöken utföras. För varje membran gjordes minst två försök vid medium luftflöde och minst ett vardera vid lågt respektive högt luftflöde. Det gjordes även ett stort antal försök med nya membran för att säkerställa att de korrigeringar som gjordes för att omvandla resultaten till standardförhållanden var giltiga för de lokala förutsättningarna.

Ett exempel på resultat erhållna från ett av försöken visas i Figur 4.6. Halten av löst syre startade nära noll efter tillsats av kvävgas och natriumsulfit. Därefter ökade syrehalten för att stabilisera sig kring syrets mättnadshalt i testtanken. Figuren visar också regleringen av luftflödet mot ett angivet börvärde.

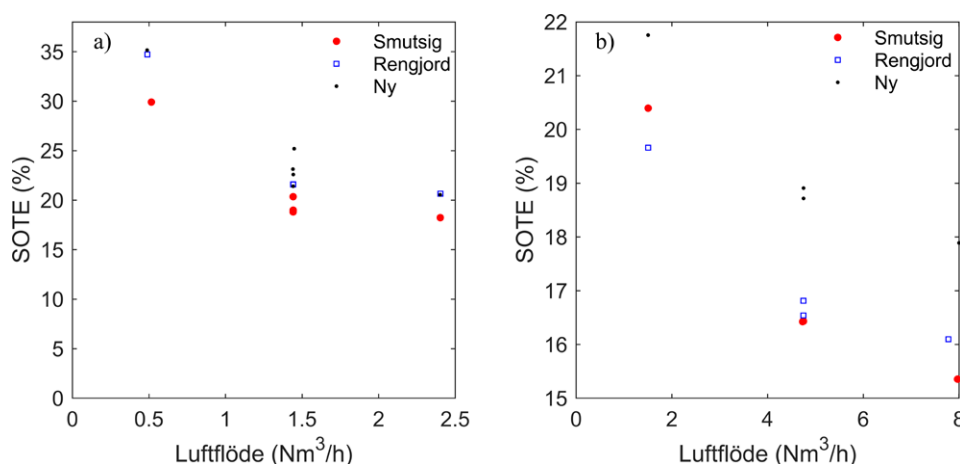


Figur 4.6

Exempel på data från renvattentest för mätning av syreöverföringseffektivitet. Halten av löst syre enligt de två givarna i testtanken (ovan) och luftflöde (nedan).

Efter omvandling av tidsserien i syrehalt till SOTE för varje genomfört test erhöles data av det slag som visas i Figur 4.7. Denna figur visar SOTE för två olika luftarter med olika membran. SOTE för dessa luftare var 20–36 % i testtanken vid låga luftflöden och 16–21 % vid höga luftflöden. Detta återspeglar andelen av den tillförda luften som överfördes till vattnet under standardförhållanden. Dessa SOTE-värden skiljer sig från de som gäller i de anläggningar som luftarna kommer ifrån eftersom förhållande såsom installationsdjup och botten täckningsgrad skiljer sig.

Resultaten för SOTE i Figur 4.7 visar att de smutsiga luftarna hade sämre prestanda (lägre SOTE) än de nya för båda luftarterna. Däremot påverkade rengöring membranen på olika sätt. Tallriksluftarna med EPDM-membran hade i stort sett samma SOTE efter rengöring medan SOTE för panelluftarna med PU-membran kunde återställas till samma nivå som för ett nytt membran. Således var SOTE för tallriksluftaren mest påverkat av åldrande medan SOTE för panelluftaren framförallt var påverkat av igensättning.



Figur 4.7

Syreöverföringseffektivitet vid olika luftflöden för smutsiga, rengjorda och nya luftare. Panelluftare med PU-membran (a) och tallriksluftare med EPDM-membran (b).

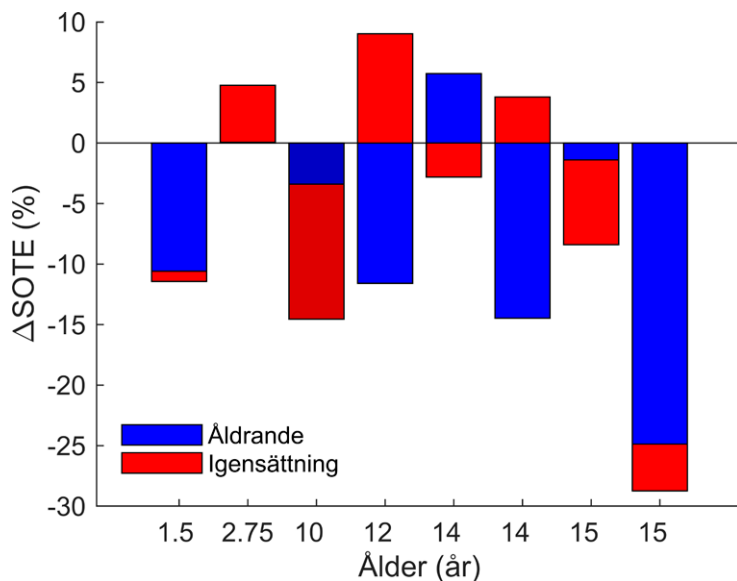
Effekten av igensättning och åldrande på SOTE uppskattades för sju luftare från fem olika reningsverk. I beräkningen av ett medelvärde viktades SOTE vid medium luftflöde högre med sina två tester medan SOTE vid lågt och högt luftflöde hade ett värde var. Sammanställningen av dessa resultat visas i Figur 4.8. Liksom för DWP gjordes ett särskilt försök för att bekräfta att tvättproceduren, i sig, inte påverkade SOTE.

Figur 4.8 visar förändringarna i procent av SOTE för ren luftare vid medium luftflöde. Det ska beaktas att repeterbarheten för SOTE-testerna uppskattades till fem procentenheter. Det gör att de små ökningarna i SOTE som observerades för två av luftarna kan betraktas vara inom mätosäkerhetens normalvariation. Det innebär att av de sju luftarna kan två betraktas ha haft oförändrat SOTE medan resterade fem uppvisade en försämrade SOTE på mellan 8 % och 28 %.

Fyra av luftarna var tallriksluftare med EPDM-membran. Bland dessa ingick två med oförändrad SOTE (3 och 14 år i drift). De två andra hade SOTE-värden som låg 8 och 15 % under SOTE för nya membran (efter 2 respektive 14 år i drift). Denna påverkan var på grund av åldrande eftersom prestandan inte kunde återställas med rengöring.

Panelluftaren med PU-membran uppvisade en SOTE-försämring på 15 %. Denna utgjordes framförallt av igensättning.

För de två rörluftare som testades observerades en sänkning av SOTE med 8 % respektive 28 %. Detta var en relativt stor skillnad för luftare från samma anläggning. Det kan bero på de olika åldrarna på luftarna i denna anläggning som nämnts ovan.



Figur 4.8

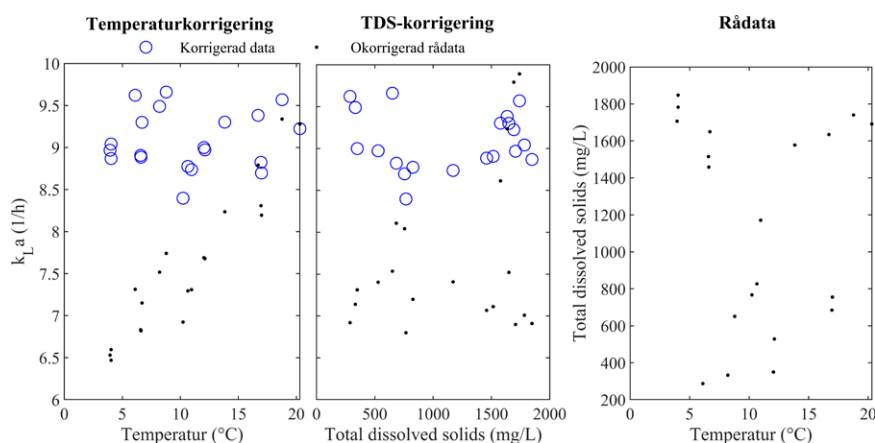
Effekten av igensättning och åldrande på membranens syreöverföringseffektivitet. Den mörkare stapeln representerar ett membran av PU (10 år) medan övriga membran var av EPDM.

För att få en uppfattning om den potentiella inverkan på resultaten från osäkerheten i olika faktorer, utfördes en förenklad osäkerhetsanalys. Den uppskattade totala osäkerheten för jämförelsen mellan två tillstånd och fyra SOTE-mätningar var cirka 5 %, där följande faktorer hade störst påverkan på resultaten:

- **Mättnadssyrehalt.** Beräkningen av $k_L a$ påverkas inte av om syregivaren är korrekt kalibrerad. Däremot påverkas uppskattningen av syrets mättnadshalt som i sin tur påverkar SOTE.
- **Temperaturkorrigering.** Eftersom resultaten räknas om till 20 °C från den temperatur som försöken utfördes vid, är det viktigt att den faktor som används är korrekt. Felet riskerar att bli särskilt stort vid stora temperaturavvikelser från 20 °C.
- **Saltkorrigering.** Resultaten räknas också om till salthalten 1 000 mg/l upplösta ämnen (TDS) och på liknande sätt kan denna korrigering orsaka fel om den inte är korrekt.

På grund av detta lades extra fokus på att säkerställa tillförlitligheten på just dessa faktorer. Omkring 20 valideringsförsök utfördes med ett nytt membran för att erhålla tillförlitliga data för korrigeringarna. Dessa försök utfördes vid temperaturer mellan 6 och 20 °C, och salthalter mellan 200 och 2 000 mg/l TDS. Data före och efter korrigering visas i Figur 4.9.

Det visade sig att korrektionsfaktorerna för temperatur (θ) och salthalt (ϵ) behövde justeras något jämfört med vad som angivits som typiska värden i standarden. Faktorerna θ och ϵ fastställdes till 1,0199 respektive $7,75 \cdot 10^{-5}$ jämfört med 1,024 respektive $9,65 \cdot 10^{-5}$ enligt den amerikanska standarden (ASCE 2022). I synnerhet temperaturkorrigeringen visade sig påverka resultaten. Eftersom korrigeringen för temperatur är exponentiell (ekvation 3.4), blir den stor vid temperaturer långt ifrån 20 °C. Detta kan exempelvis vara fallet när försök utförs med kallt vatten vintertid. Samtidigt korrigeras även mättnadskoncentrationen för syrehalten för temperaturen vilket ger en motsatt effekt. Till stor del tar därför dessa två korrigeringar för temperaturen ut varandra. När försök utförs vid temperaturer långt under 20 °C kan det ändå vara bra att bekräfta temperaturkorrektionsfaktorn. För försök i mindre skala kan det vara aktuellt att värma vattnet för att komma närmare 20 °C och minska inverkan av korrigeringarna.



Figur 4.9

Syreöverföringen vid aktuella förhållanden under försöken och efterkorrigering med avseende på temperatur och salthalt.

Under försöken upptäcktes att den skillnad i temperatur som rådde mellan luften i vilken syregivarna kalibrerades och vattnet i testtanken gav upphov till en avvikelse i den absoluta mättnadshalten av syre som uppmättes (C_{∞}). För att kompensera för detta användes beräknade värden för mättnadshalten av syre baserat på det effektiva djupet som hade uppskattats med hjälp av ekvation 3.9 ovan (Avsnitt 3.1.4), i stället för att använda uppmätta värden.

4.5 Påverkan av betingelser på igensättning och åldrande

I Tabell 4.1 sammanställs förhållanden vid de anläggningar som luftarna togs ifrån med avseende på typ av biologisk reningsprocess och slamålder (SRT) samt luftarnas typ, membranmaterial och ålder med mera. I Tabell 4.2 sammanställs placeringen av de utvärderade luftarna i respektive anläggning tillsammans med de observerade förändringarna i DWP och SOTE till följd av igensättning respektive åldrande. Här anges även den uppmätta hårdheten.

Vid en jämförelse av förändringarna i DWP och SOTE (Tabell 4.2) kunde det konstateras att det inte fanns något signifikant samband med dessa vad gäller de förändringar som kunde hänföras till åldrande eller de totala förändringarna (summan av igensättning och åldrande). Däremot fanns ett visst, om än svagt ($R^2 = 0,50$), samband mellan förändring i DWP och SOTE gällande igensättning. En större ökning i DWP för igensättning var generellt förknippad med en större minskning i SOTE för igensättning. Det tyder på att igensättning orsakar både DWP-ökning och SOTE-minskning. Motsvarande samband tycktes inte finnas för åldrande. Det skulle delvis kunna bero på att förändringar i materialegenskaper påverkar luftarnas funktion på olika sätt beroende på typ av luftare. Med endast tallriks- och panelluftare inkluderade fanns tydligare samband mellan DWP-ökning och SOTE-minskning för igensättning ($R^2 = 0,68$) och de totala förändringarna ($R^2 = 0,81$). Det är inte orimligt att anta att rörluftare påverkas på ett annat sätt än tallrikar av om membranen förändras, genom exempelvis krympning, eftersom dessa membran omsluter sina hållare.

Membranens hårdhet undersöktes med en digital hårdhetsmätare. Hårdheten, som anges enligt Shore A, mättes för nya och använda membran (Tabell 4.1). Vid jämförelse av hårdheten på använda membran med nya membran av samma typ visade det sig att hårdheten hade ökat för alla membran av EPDM. Det använda membranet av PU hade däremot samma hårdhet som ett nytt. Det bekräftar att PU-membranet inte hade åldrats på samma sätt som de av EPDM. Resultaten visade också att det fanns ett samband ($R^2 = 0,61$) mellan åldrandet med avseende på minskning i DWP och ökningen i hårdhet för EPDM-membranen. Åldrandet tycktes därmed parallellt ha orsakat minskad DWP och ökad hårdhet.

Slamåldern användes för att illustrera den organiska belastningen vid de olika anläggningarna. En låg slamålder innebär generellt en hög belastning. En jämförelse gjordes för anläggningar med luftare av jämförbar ålder (10–15 år i drift). Det fanns ett samband mellan slamålder och DWP-ökning på grund av igensättning ($R^2 = 0,81$ exklusive rörluftaren med misstänkt lägre ålder), och ett svagt samband ($R^2 = 0,56$) mellan slamålder och SOTE-minskning på grund av igensättning. I tidigare internationella studier har det observerats att hög belastning leder till mer igensättning (se Avsnitt 2.2.1) och det var intressant med en indikation på att så även var fallet för de svenska anläggningarna.

Däremot kunde inga tydliga samband observeras mellan placeringen av luftarna i bassängen och prestandan (Tabell 4.2). Det skulle annars kunna antas att luftare placerade närmare inkommande avloppsvatten skulle drabbas av mer igensättning på grund av högre belastning. Luftare från olika positioner på två reningsverk (Rya och Karshult) kan ha varit för litet underlag för att fastställa någon sådan effekt.

En metod som är vanlig för att bedöma risken för utfällningar av kalciumkarbonat är LSI. Metoden bygger på att ett mättnads-pH beräknas utifrån koncentrationen av kalciumjoner, alkaliniteten, TDS och temperaturen. Faktorn LSI beräknas sedan som skillnaden mellan aktuellt pH och mättnads-pH. Ett positivt LSI indikerar att kalciumkarbonat tenderar att fällas ut i vattnet och bilda utfällningar på ytor. Ett negativt LSI indikerar i stället att vattnet har en tendens att lösa upp kalciumkarbonat.

LSI beräknades vid de olika reningsverken baserat på analyser på prover tagna vid tre tillfällen i samma bassänger som luftarna. Vid ett reningsverk (Sjölunda) var LSI positivt medan för övriga var LSI negativt eller nära noll. Det fanns inget samband mellan omfattningen av igensättning (DWP-ökning eller SOTE-minskning) och LSI. Detta kan vara relaterat till att alla utom en anläggning indikerade låg risk för utfällningar. Det är också sannolikt att det är de lokala förhållandena vid porernas öppningar som till stor del avgör om utfällning sker (se Avsnitt 2.2.1).

Vid tre av de sju reningsverken tillämpades motionering av luftarna (Tabell 4.1). Vid ett av verken hade rengöring av luftarna med myrsyra utförts. Det gick inte att dra några slutsatser gällande effekten av dessa insatser på grund av det begränsade underlaget och att flera parametrar skiljde sig.

Reningsverk	Belastning (pe)	Förbehandling	Bioprocess	SRT (d)	Luftartyp	Membran	Motionering	Rengöring	LSI	Ålder luftare (år)
Rya	1 miljon	Försed.	Högbelastad aktivslam	5	Rör	EPDM	1 gång/dygn	Nej	-0,53 ± 0,16	15 ¹
Karshult	30 000	Fällning FeCl ₃	Fördenitrifikation kontaktprocess	10–20	Tallrikar	EPDM	Nej	Nej	-0,98 ± 0,61	14
Slottshagen	150 000	Fällning FeCl ₃	Fördenitrifikation modifierad kontaktprocess	15	Tallrikar	EPDM	1 gång/dygn	Nej	-0,15 ± 0,11	12
Nykvarn	235 000	Fällning FeSO ₄	Intermittent luftning, stegbeskickning	4–7	Paneler	PU	Nej ²	Myrsyra 1–2 ggr	-0,21	10
Kungsängen	190 000	Fällning FeCl ₃	Kaskadkväverening	15	Tallrikar	EPDM	Nej	Nej	0,01 ± 0,13	2,75
Sjölunda	450 000	Fällning FeSO ₄	Högbelastad aktivslam	2	Tallrikar	EPDM	1 gång/vecka	Nej	0,69 ± 0,07	1,5

¹ Ungefär 2 % av luftarna hade bytts vart tredje år och därför hade en del av luftarna lägre ålder.

² Notera att anläggningen dock drivs med intermittent luftning.

Tabell 4.1

Egenskaper för de avloppsreningsverk vars luftare testades i renvattenförsök.

Luftare	Placering	Δ DWP-igensättning (mbar)	Δ DWP-åldrande (mbar)	Δ SOTE- igensättning (%)	Δ SOTE- åldrande (%)	Δ Hårdhet (Shore A)
Rya 1	Början av luftad zon (högre belastad halva).	41,6	-15,5	–	–	12,7
Rya 2	Början av luftad zon (lägre belastad halva).	32,0	-7,8	-7,0	-1,4	7,9
Rya 3	Slutet av luftad zon (högre belastad halva).	-0,2	-8,5	–	–	13,2
Rya 4	Slutet av luftad zon (lägre belastad halva).	40,9	-21,6	-3,9	-24,9	11,4
Karshult 1	Början av luftad zon.	11,2	-3,1	-2,8	5,7	1,1
Karshult 2	Slutet av luftad zon.	18,0	-4,5	3,8	-14,5	1,1
Slottshagen	Luftad zon med returslam (slamox). Relativt låg organisk belastning.	25,2	4,5	–	–	1,5
Nykvarn	Slutet av första bassänghalvan.	36,3	-1,4	-11,2	-3,4	0
Kungsängen 1	Första luftade zonen. Mitt i bassängen.	13,2	-2,5	–	–	4,3
Kungsängen 2	Första luftade zonen. Mitt i bassängen.	14,7	-4,3	–	–	6,4
Kungsängen 3	Första luftade zonen. Mitt i bassängen.	14,7	-4,7	4,7	0,1	4,9
Sjölunda	Första permanent luftade zonen (zon 3 av 5).	9,8	8,6	-0,9	-10,6	2,0

Tabell 4.2

Förändringar i DWP, SOTE och hårdhet till följd av igensättning respektive åldrande för luftarna som testades.

5 Resultat från prestandaövervakning

5.1 Uppskattad syreöverföringseffektivitet genom nyckeltalsberäkningar

För att få information om luftningsanläggningens prestanda under drift, utan att behöva tömma ned bassänger och montera av och testa luftarmembran, utvecklades metoder för att utvärdera data som vanligtvis samlas in på reningsverk. En uppskattning av syreöverföringseffektiviteten erhöles genom att relatera belastningen i form av syrebehovet i processen (som speglar hur mycket syre som används) till hur mycket syre som tillsätts från inblåst luft. Detta kapitel beskriver representativa exempel på denna övervakning från två anläggningar. Resultat från ytterligare tre anläggningar beskrivs i Bilaga D.

Belastningen i form av syrebehov beräknas genom att uppskatta omfattningen nitrifikation, denitrifikation och nedbrytning av organiskt material utifrån de analysdata som fanns tillgängliga. Syrebehovet kunde sedan relateras till syretillsatsen med hjälp av uppmätt luftflöde, och detta förhållande speglar luftarsystemets prestanda. Denna prestanda gäller vid processförhållanden, alltså de aktuella betingelserna i anläggningen. Det innebär att de påverkas av exempelvis vilken syrehalt som tillämpas och vilken temperatur som råder. För att få en mer jämförbar parameter räknades den om till standardförhållanden med avseende på de förhållanden som var enkelt mätbara (temperatur, syrehalt och lufttryck) men inte med avseende på avloppsvattnets påverkan och luftarnas åldrande/ingesättning (αF). Då erhålls en uppskattning av $\alpha F(SOTE)$, syreöverföringseffektiviteten för luftarsystemet som andel av tillsatt syre som överfördes till processen ($\text{kg O}_2/\text{kg O}_2$). En beskrivning av beräkningarna finns i Avsnitt 3.2.1.

5.1.1 Erfarenheter av beräkningarna

För att beräkna syrebehovet i processen behövdes uppgifter om BOD (eller COD) och kvävefraktioner (totalkväve, ammonium och nitrat) för inkommande och utgående vatten till det biologiska reningssteget. Labbanalyser för dygnsprover och dygnsmedelvärden för flöde, temperatur och syrehalter användes. För slamhalt användes stickprover eller onlinedata. En uppskattning av slamproduktion och slamålder behövdes också. Vidare behövdes anläggningsdata i form av bassängvolym och luftarnas installationsdjup.

För anläggningar med flera parallella linjer var det värdefullt att kunna övervaka linjerna separat. Detta var möjligt om det fanns luftflödesmätning till varje linje. Om inte inkommande vattenflöde till linjerna mättes separat antogs att flödet var jämnt fördelat mellan linjerna.

Syrehalter och temperatur mättes online i anläggningar och kunde beräknas som dygnsmedelvärden. Då det fanns flera syregivare per linje räknades halterna samman till ett viktat medelvärde.

I vissa fall saknades mätvärden för vissa koncentrationer på inkommande eller utgående från den biologiska behandlingen. Detta gällde exempelvis efter försedimentering på vissa anläggningar. I dessa fall uppskattades avskiljningen utifrån stickprover. Ett annat sätt är att uppskatta avskiljningsgraden utifrån belastning och uppehållstid (Tchobanoglous et al. 2014). Typiskt brukar avskiljningsgraden utan förfällning vara 45–60 % av suspenderade ämnen eller 25–40 % av BOD.

5.1.2 Exempel nyckeltal Slottshagen

Slottshagens reningsverk (Nodra) i Norrköping behandlar avloppsvatten motsvarande ungefär 150 000 pe. Avloppsvattnet behandlas först med rensgaller (3 mm), sandfång

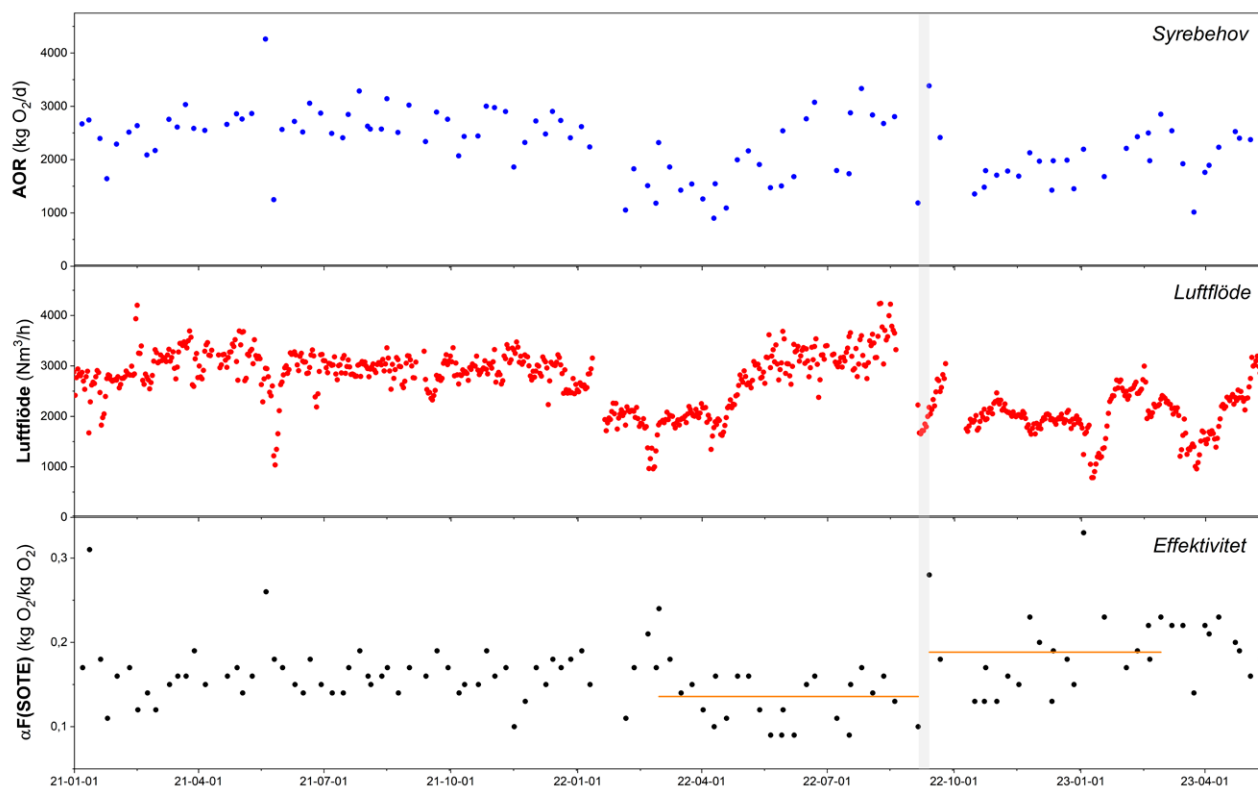
och försedimentering med förfällning. Därefter fördelas flödet på fyra linjer för biologisk behandling där linje 1–3 har likartad utformning och tar emot ungefär 50 % av flödet. Den biologiska behandlingen sker i en aktivslamprocess utformad som en modifierad kontaktstabilisering med fördenitrifikation. I linje 4 finns inledningsvis luftade och oluftade zoner med returslam och därefter sker fördenitrifikation och nitrifikation i oluftade och luftade zoner där returslam blandas med inkommande avloppsvatten.

Syrebehovet beräknades med hänsyn till avskiljning av organiskt material, nitrifikation och denitrifikation. Vissa värden för BOD efter förfällning saknades och dessa uppskattades med hjälp av den genomsnittliga avskiljningen över försedimenteringen. Dygnsmedelvärden för syrehalterna i de luftade zonerna sammanräknades till ett värde per dygn genom viktning mot den uppskattade andelen av det totala luftflödet för respektive zon.

Nyckeltalen beräknades för linje 4 en tid före och en tid efter byte av luftarmembran. Dessa membran hade vid det tillfället varit i drift under 12 år. Resultaten från beräkningar visas i Figur 5.1. Den uppmätta effektiviteten varierade relativt kraftigt över tiden. Det kan konstateras att det krävs ett antal mätningar över tiden för att erhålla tillförlitliga medelvärden. Trots det var det tydligt att den genomsnittliga effektiviteten ökade markant efter byte av luftarmembran. Under halvåret före membranbytet var effektiviteten i genomsnitt 0,14 kg/kg för sedan öka till 0,19 som genomsnitt under halvåret efter bytet. Det innebär en ökning av effektiviteten med 39 % vilket motsvarar ett minskat luftbehov med minst 28 %. Notera att den temporära ökningen av luftflödet innan membranbyte (22-04-01–22-09-01) beror på ett ökande syrebehov (AOR), som återgår till en lägre nivå vid samma tidpunkt som membranbytet. Skillnaden i effektivitet kvarstår om perioder med likvärdiga AOR jämförs (jämför perioden 22-04-01 med 22-11-01). Denna skillnad är dock inte lika tydlig om enbart luftflödet utvärderas under motsvarande period, vilket visar på nyttan med att analysera prestandan utifrån nyckeltal.

Figur 5.1

Syrebehov (AOR), luftflöde och effektivitet för Slottshagens avloppsreningsverk. Det vertikala gråa strecket visar tidpunkten för membranbyte. Orangea linjer visar medelvärde före och efter bytet.



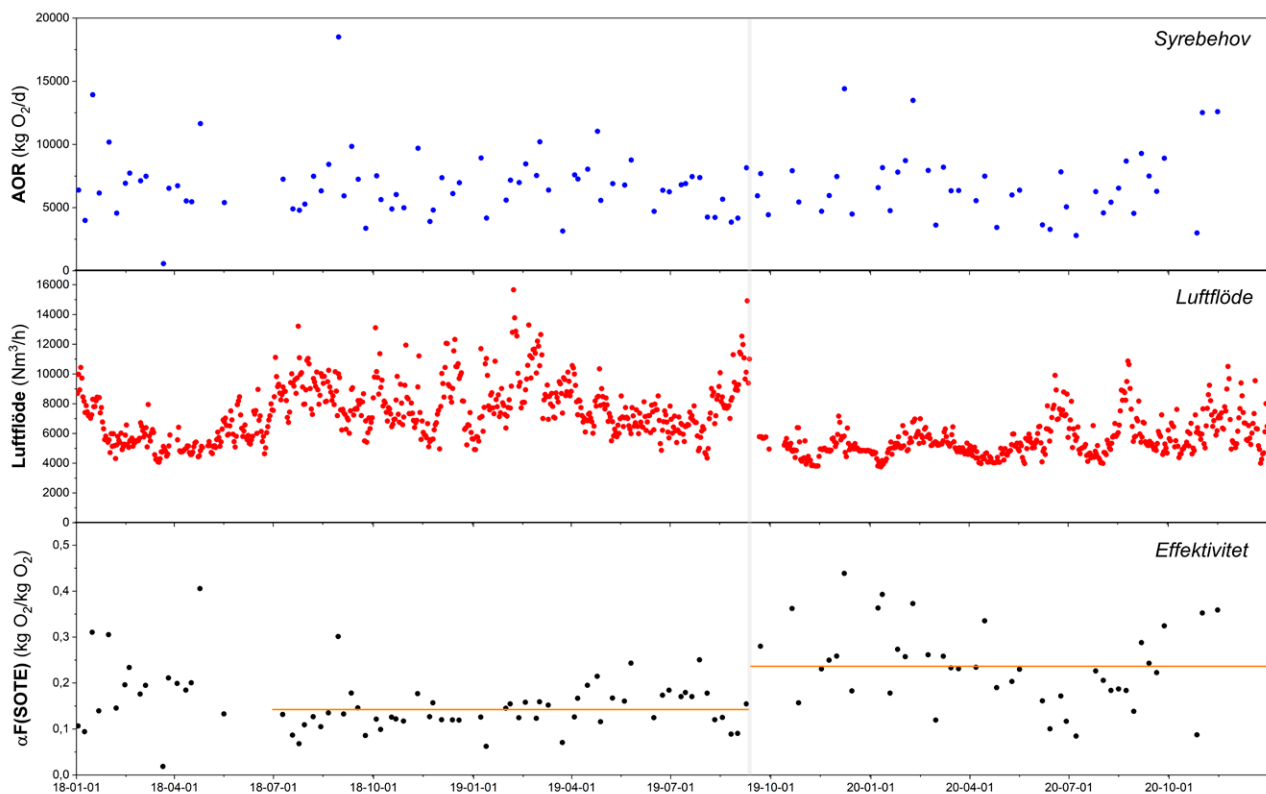
5.1.3 Exempel nyckeltal Sjölunda

På Sjölunda avloppsreningsverk (VA SYD) behandlas avloppsvatten från delar av Malmö och angränsande kommuner. Den biologiska behandlingen sker med en högbelastad aktivslamanläggning, biobäddar för nitrifikation och rörliga bärare för denitrifikation. I aktivslamanläggningarna G1 och G2 behandlas ungefär en tredjedel av det försedimenterade avloppsvattnet, framförallt för avskiljning av organiskt material. I aktivslamanläggningen G4 behandlas ungefär hälften av det försedimenterade avloppsvattnet för avskiljning av organiskt material och denitrifikation av recirkulerat vatten från biobäddarna. Anläggningarna är indelade i 2–3 linjer med vardera en oluftad zon följt av luftade zoner.

För Sjölunda G4 beräknades syrebehovet med hänsyn till avskiljning av organiskt material, viss nitrifikation sommartid och denitrifikation. Då provtagning skedde på de aktuella strömmarna in till och ut från aktivslamanläggningen kunde syrebehovet beräknas utan att några särskilda antaganden behövdes. Nyckeltalen beräknades under en period före och efter byte av luftarmembran som då hade varit i drift under 10 år.

Resultaten från beräkningar visas i Figur 5.2. Även vid denna anläggning var det relativt stor variation över tiden. Det kunde ändå observeras att den genomsnittliga effektiviteten ökade markant efter byte av luftarmembran, från 0,14 kg/kg som medel året före membranbytet till 0,23 som medel året efter bytet. Detta innebär en större ökning än den som observerades vid Slottshagen och ökningen av effektiviteten var 60 % vilket motsvarar ett minskat luftbehov med minst 38 %.

Att luftbehovet sjönk i samband med membranbytet kunde i viss mån observeras direkt utifrån dygnmedelvärdet för luftflödet (Figur 5.2). Men samtidigt förelåg stora variationer i syrebehovet. Utifrån endast luftflödet hade det därför inte kunnat utslutas att det minskade luftbehovet berodde på andra faktorer än en ökad effektivitet. Detta skulle exempelvis kunnat vara minskad belastning, minskad reningsgrad, lägre temperatur under hösten, lägre syrehalter på grund av ändrade börvärden eller förbättrad reglering. Genom att beräkna och följa effektivitetsfaktorn som tar hänsyn till och kompenserar för alla dessa faktorer, erhålls en parameter som på ett mer tillförlitligt sätt speglar luftarsystemets effektivitet.



Figur 5.2

Syrebehov (AOR), luftflöde och effektivitet för Sjölanda G4. Den vertikala grå linjen visar tidpunkten för membranbyte. Orangea linjer visar medelvärde före och efter bytet.

5.1.4 Jämförelse av nyckeltal och resultat från renvattenförsök

För ett par av anläggningarna fanns möjligheten att beräkna nyckeltal före och efter ett membranbyte och jämföra denna förändring med resultat från renvattenförsök.

För Sjölanda G1 uppskattades $\alpha F(SOTE)$ till 0,19 kg/kg för tiden närmast efter bytet av luftare (Bilaga D). I slutet av den studerade perioden hade $\alpha F(SOTE)$ sjunkit till 0,16 kg/kg, vilket motsvarade en minskning i effektivitet med 13 %. Detta var fyra månader innan luftare inhämtades från anläggningen för renvattenförsök. Renvattenförsöken med luftare från Sjölanda visade en försämring av SOTE med 11,5 % jämfört med en ny luftare. Detta måste betraktas som en god överensstämmelse mellan nyckeltalen uppskattade från driftdata och prestandan uppmätt vid renvattenförsök. Under drift i anläggningen varierade naturligtvis luftflödet per luftare, men i genomsnitt låg det nära det som vid renvattenförsöken definierades som medium (mitt emellan högsta och lägsta luftflödet för luftaren).

För Slottshagens reningsverk uppskattades $\alpha F(SOTE)$ vara 28 % lägre före bytet av luftare än efter. Renvattenförsöken med luftare från detta verk gav inte tillförlitliga resultat. Data visade dock på en betydligt mindre skillnad mellan använd och ny luftare. Det berodde sannolikt på att luftarna testades från *slamox*-steget i aktivslamprocessen. Detta steg utsätts för en relativt låg organisk belastning eftersom det matas med returslam och en intern recirkulation men inte med inkommande avloppsvatten. Enligt en observation från inhämtning av luftarna var dessa membran lättare att spola rena än membran från huvudströmmen vilket ytterligare styrker att den organiska belastningen var låg.

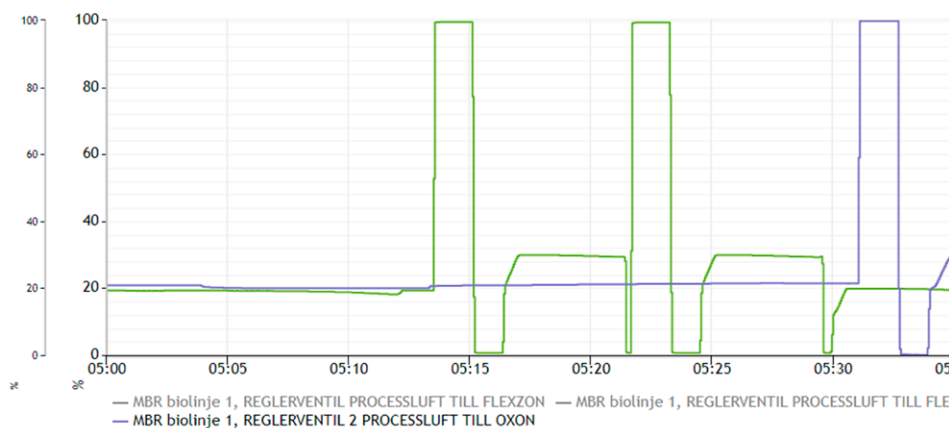
För några anläggningar beräknades även luftningseffektiviteten ($\alpha F(SAE)$, kg O₂/kWh) som anger hur mycket syre som överförs till processen i förhållande till hur mycket elenergi som tillförs. $\alpha F(SAE)$ speglar hela luftningssystemets prestanda inklusive blåsmaskinerna. Eftersom det sällan fanns effektmätning för blåsmaskiner som var avgränsad till endast den enhet som önskade övervakas (en linje), var det svårt att utvärdera denna metod. Den kan dock vara användbar för övervakning av hela den anläggningsdel

som blåsmaskinerna försörjer. Detta kan till exempel vara aktuellt på en mindre anläggning eller för flera linjer på en större anläggning.

5.2 Tryckövervakning genom mottrycksuppskattning

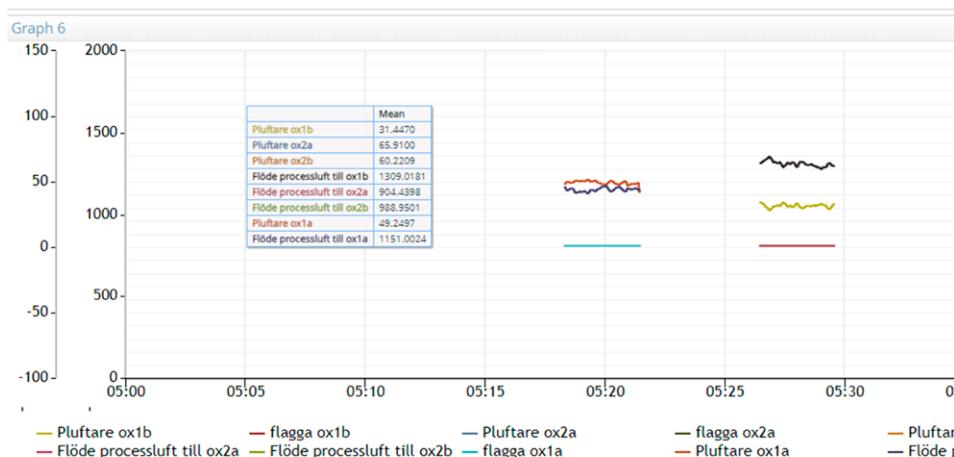
Metoden för uppskattning av DWP med en trappsekvens (Avsnitt 3.2.2) implementerades på Henriksdals avloppsreningsverk. Metoden programmerades i styrsystemet för linje 1 där en membranbioreaktor (MBR) är i drift.

En trappsekvens med tre trappsteg och tillhörande uppskattade mottryck visas i Figur 5.3. Den övre bilden visar en trappsekvens med varierande ventillägen utifrån en förutbestämd sekvens där grön och lila linje visar ventilöppningsgrad (y-axeln) för två olika nedledare till två luftade zoner. Den nedre bilden visar uppskattat mottryck under trappsekvenserna (brusiga röda, lila, gula och svarta linjer med y-axeln längst till vänster med enheten mbar). Röd och blå konstanta linjer illustrerar den signal som användes för att välja ut rätt tidsfönster för mottrycksberäkning. Båda figurerna baseras på skärmsklipp från reningsverkets databearbetningsmjukvara för att visa det gränssnitt som är tillgängligt för operatören.



Figur 5.3

En trappsekvens med tre trappsteg och tillhörande uppskattade mottryck. Förklaringar till bilderna finns i texten här ovanför.



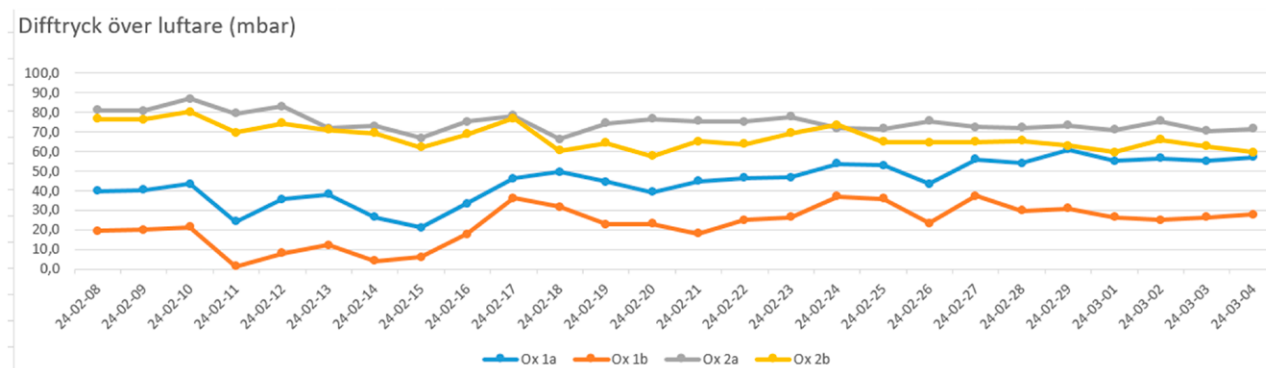
Det beräknade mottrycket sparades sedan manuellt ned i en separat fil för att kunna följa tryckförändringarna över tid (Figur 5.4). För att få bättre dataunderlag från mottrycksuppskattningen genomfördes en trappsekvens varje dag. I framtiden kommer detta intervall att sammanfalla med antalet motioneringstillfällen, vilket är 1–2 gånger per vecka.

Resultaten i Figur 5.4 visar på en stor skillnad i DWP mellan oxzon 1 och 2. Detta kan exempelvis bero på att mottrycket i rörledningen skiljer sig åt, vilket inte korrigerats för i denna beräkning. Görs mottrycksberäkningen med nya luftare går det förstås att korrigera för sådana initiala och konstanta skillnader. Figur 5.4 indikerar även en trend med ökande mottryck för oxzon 1, och det omvända för oxzon 2. Trots att trenden är tydlig är försöksperioden för kort för att dra några slutsatser om luftarnas tillstånd. Det är möjligt att mottrycksuppskattningen har en viss normalvariation, som först efter en längre tid kan kvantifieras. Trots den korta försöksperioden så illustrerar Figur 5.4 hur igensättning på membranen kan övervakas med befintliga givare. På motsvarande sätt kan effekten av en rengöring av luftarna analyseras genom förändringar (förväntad minskning) i uppskattat DWP.

Motsvarande övervakning hade även kunnat göras genom direkt mätning. I så fall hade tryckgivare behövts efter reglerventilerna på vardera nedledare. Båda metoderna mäter samma parameter och det som skiljer metoderna åt är att det kan förväntas att direkta mätningar ger mer exakta mätningar än uppskattningen. Samtidigt kan uppskattningen baseras på befintliga givare och kräver således inte installation av fler instrument.

Figur 5.4

Skärmbild från den fil som används för mottrycksuppskattning på Henriksdals reningsverk. Två zoner med två nedledare ger fyra olika mottryck (y-axeln anger det beräknade mottrycket i mbar).

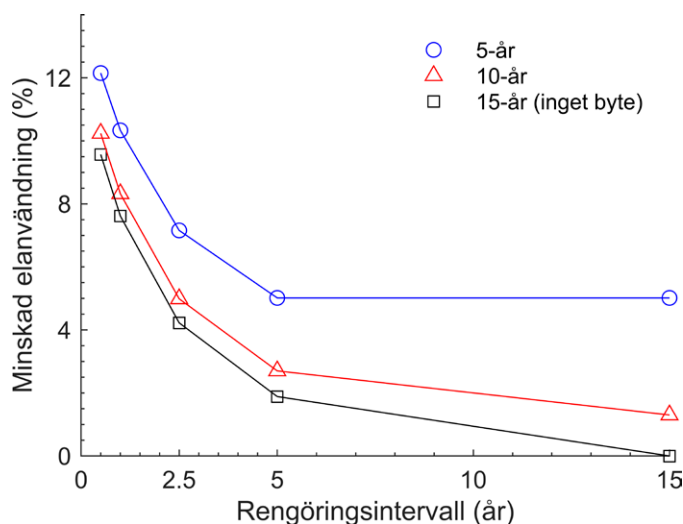


6 Simulerade kostnader och koldioxidutsläpp vid olika underhållsstrategier

Den centrala frågan i detta kapitel är att, med hjälp av simuleringar, förstå hur ett tillståndsbaserat underhåll bör genomföras. Ett tillståndsbaserat underhåll förutsätter att membranens tillstånd är känt, det vill säga att vi kan mäta förändringar i DWP och SOTE med metoderna i Avsnitt 2.4–2.5. Eftersom modellen är en förenkling av verkligheten är membranens tillstånd alltid känt, men det innebär även att alla resultat i detta kapitel behöver tolkas utifrån den specifika modellen (Avsnitt 3.3). I simuleringar antogs åldrande försämra syreöverföringseffektiviteten med maximalt 15 %, respektive 10 % på grund av igensättning. I ett högbelastat reningsverk med större andel fällningskemikalier kan igensättningsproblematiken vara betydligt större och omvänt för ett reningsverk med liten igensättningsproblematik. På samma sätt behöver den antagna *hastigheten* för igensättning och åldrande tolkas i förhållande till rengörings- och utbytesintervall. Exempelvis så motsvarade en utbytesfrekvens på 5 år att membranen byts ut precis när full åldringseffekt uppnått enligt modellen (Avsnitt 3.3.2).

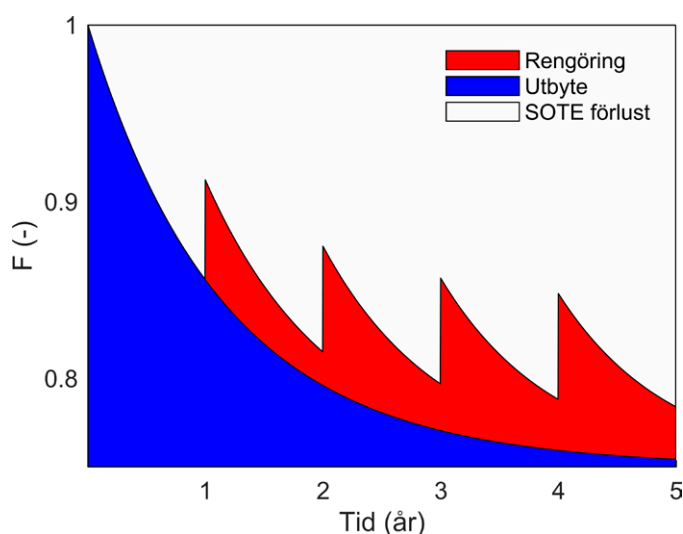
Rent generellt har rengöring och membranbyte alltid en positiv effekt på elanvändningen utifrån det sätt som modellen är uppbyggd. Utmaningen vid tillståndsbaserat underhåll är att sätta in rätt åtgärd i rätt tid, exempelvis rengöring om prestandan försämrats på grund av igensättning. Simuleringarna visar att membranbyte har större inverkan på elförbrukningen än rengöring om båda intervallen sätts till 5 år (Figur 6.1). Det är rimligt då både igensättning och åldrande nått sin fulla effekt efter den tiden, men där åldrandet enligt modellen ger en högre maximal försämring av SOTE än igensättning. Om rengöringsfrekvensen ökas så minskar elanvändningen ytterligare, för att som bäst ge en reduktion på 10–12 % vid två rengöringar per år, jämfört med om inget underhåll utförs. Utifrån modellen i Avsnitt 3.3.2 förloras 3 % SOTE under det första halvåret efter rengöring, för att sedan tappa totalt 7 % under det första året. Detta innebär alltså en dubbelt så stor försämring om rengöringsintervallet dubblas från halvårsvis till årsvis, vilket förklarar den stora effekten med täta (halvårsvisa) rengöringar.

Vid en första anblick kan en maximal energibesparing på 10–12 % tyckas vara lite. Särskilt om man utgår från att den totala effekten för igensättning och åldrande var 25 % försämring av syreöverföringseffektiviteten. Förklaringen till denna skillnad är att både igensättning och åldrande sker succesivt över tid, och med den dynamik som beskrevs i Avsnitt 3.3. Det innebär att även om inget underhåll genomförs på 15 år, så höjer de initialt nya membranerna den genomsnittliga syreöverföringseffektiviteten och F från den avslutande lägre nivån. På samma sätt är det orimligt att bibehålla helt rena och nya membran, vilket skulle krävas för att helt återställa F till ett. Figur 6.2 visar hur F varierar över tid vid en simulerad årlig rengöring och utbyte vart 5:e år.



Figur 6.1.

Procentuell minskning av elförbrukning vid olika simulerade underhållsåtgärder jämfört med ett referensscenario där inget underhåll genomförs på 15 år. Olika intervall för rengöring längs x-axeln och olika intervall för membranbyte för de tre kurvorna.

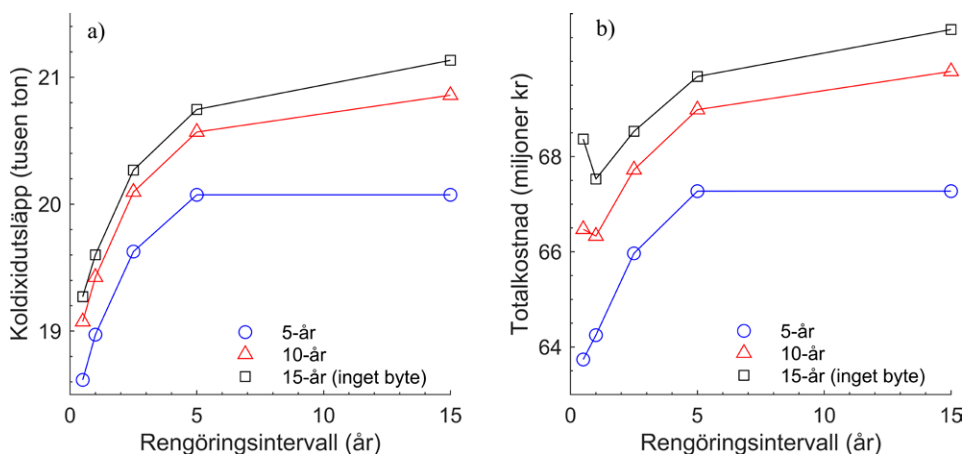


Figur 6.2

Förbättring av F vid rengöring och membranbyte. Vid inget underhåll faller F från initialt 1,0 för nya membran till 0,75 för gamla och igensatta membran.

Eftersom underhåll alltid minskar elanvändningen innebär det att det är kostnaderna för underhållet som begränsar underhållsfrekvensen från att bli oändligt hög. I denna analys studerades klimatkostnaden i termer av koldioxidutsläpp, parallellt med den monetära kostnaden utifrån de kostnadsposter som beskrevs i Avsnitt 3.3. I denna analys var den genomsnittliga kostnaden för ett membranbyte högre än för rengöring (0,91 kg CO₂e och 329 kr respektive 0,61 kg CO₂e och 16 kr), vilket är en förutsättning för att överhuvudtaget överväga rengöring. Notera att merkostnaden för membranbyte jämfört med rengöring var betydligt högre än motsvarande skillnad i koldioxidutsläpp.

Klimatkostnaden för underhåll vägdes upp av nyttan med minskad elanvändning (Figur 6.3a). Utsläppsminskningen av CO₂e var 2,5 miljoner ton för den mest intensiva underhållsstrategin, vilket motsvarar 0,67 kg/pe, år med utsläppsvärdena i Avsnitt 3.3.3. Detta innebär att underhåll ur ett klimatperspektiv alltid är motiverat. Ett undantag är om koldioxidutsläppen för elproduktion antas vara mycket lägre än den nordiska elmix som använts här. Då kommer troligen klimatavtrycket vid mycket frekvent rengöring att överstiga klimatnyttan med elbesparing (av el med lågt koldioxidavtryck).



Figur 6.3

Totalt utsläpp av koldioxidkvivalenter (a) och totalkostnad (b) under 15 år för olika underhållsåtgärder. Olika intervall för rengöring längs x-axeln och olika intervall för membranbyte för de tre kurvorna.

På samma sätt som för klimatkostnaden så visade simuleringarna att underhåll, oavsett frekvens och åtgärd, resulterar i en lägre totalkostnad jämfört med om inget underhåll genomförs (Figur 6.3b). En begränsad nytta med för frekvent rengöring identifierades när membranbytesintervallet var 10–15 år. I de fallen så är totalkostnaden som lägst vid årlig rengöring och tätare rengöringsintervall än så innebär en högre totalkostnad. (Figur 6.3b). Lite förvånande så ökar besparingen med täta rengöringsintervall (2 gånger per år) när även utbytesintervallet är högt (5 års utbytesintervall). (Figur 6.3b). Detta indikerar att snabbare membranbyten gärna kan kombineras med rengöring och inte bör ses som en alternativ insats. Sammanlagt ger resultaten en nettobesparing på knappt 7 miljoner kr (1,85 kr/pe, år) för den mest intensiva underhållsstrategin, vilket är samma storleksordning som Svenskt Vattens årliga utvecklingsavgift (2,21 kr/invånare, år). I kostnadskalkylen ingår dock inte kalkylränta, vilken skulle påverka de mera kostnadskrävande alternativen med hög utbytesfrekvens negativt.

Det är värt att notera att samtliga simuleringar baseras på en modell med en antagen genomsnittlig försämring på grund av igensättning och åldrande för alla de luftare som studerades. En följd effekt av detta är att resultaten kring underhållsintervall inte är direkt tillämpliga för andra igensättnings- och åldringshastigheter. För ett membran med mycket långsamt åldrande (såsom den analyserade PU-luftaren) kommer förstås inte ett membranbyte att bidra till vare sig någon energi- eller kostnadsbesparing. För att kalibrera en modell till att motsvara förutsättningarna hos ett specifikt reningsverk så krävs upprepade SOTE och DWP-mätningar under åtminstone en rengöringsperiod och en fullständig åldrandeprocess (tiden till att SOTE stabiliserats på en lägre nivå såsom i Figur 3.6). Data utifrån en sådan mätning kan användas för att generera en figur motsvarande Figur 6.2, vilken i sin tur kan analyseras för att kvantifiera effekterna av olika underhållsåtgärder.

Ett annat sätt för att få fördjupad förståelse för hur olika igensättnings- och åldringshastigheter påverkar behovet av underhåll är att genomföra en statistisk känslighetsanalys. I en sådan analys studeras hur variationen i hastighet och slutvärde för åldrande och igensättning, i kombination med olika underhållsfrekvenser, påverkar energianvändningen. Resultatet skulle till exempel kunna visa på om det finns positiva synergieffekter (interaktionseffekter) mellan rengöring och membranbyte.

Även om fler mätningar på olika luftare krävs för att få en god förståelse indikerar ändå simuleringarna att underhåll som motverkar en genomsnittlig prestandaförsämring har en positiv påverkan på totalkostnad och koldioxidutsläpp, där både rengöring och membranbyte behöver genomföras för att nå störst effekt.

7 Diskussion

Denna undersökning är den första i sitt slag där prestandan för använda luftare från svenska avloppsreningsverk testats. Resultaten visade att både igensättning och åldrande av luftare sker på svenska reningsverk vilket resulterar i ökad elanvändning för luftning. Samtidigt finns möjligheter med tillståndsbaserat underhåll som kan minska den onödiga elanvändningen.

Den minskning i SOTE som uppmättes (0–28 %) var inom det spann som tidigare rapporterats i internationella studier. Även om omfattningen av SOTE-minskning har varierat i litteraturen är det flera studier som har indikerat större SOTE-minskningar (20–40 % efter några år; Avsnitt 2.2) än vad som har observerats i denna undersökning. Det visar också att det är svårt att generalisera dessa fenomen och att det är viktigt att utföra mätningar vid de specifika anläggningar där det behövs förbättrad förståelse, för att få med de lokala förutsättningarna.

Tidigare studier har indikerat att DWP ungefär fördubblats under luftarens livstid (Avsnitt 2.2) vilket ligger i linje med resultaten från denna undersökning.

En skillnad jämfört med tidigare studier är att vi i denna undersökning har lyckats särskilja igensättning från åldrande med avseende på förändringarna i SOTE och DWP. Detta genom att jämföra rengjorda, smutsiga och nya luftare med varandra. Detta har lett till insikter kring hur dessa olika fenomen påverkar prestandan. Andelarna av SOTE-förlusten som berodde på igensättning respektive åldrande var olika för olika anläggningar men generellt var bidraget från åldrande högre än från igensättning.

Det visade sig att åldrande minskade DWP och därmed maskerade en del av den ökning i DWP som igensättning orsakade (upp till 5 mbar). Detta har inte kunnat påvisas i tidigare studier där igensättning och åldrande i stället har studerats som en sammanlagd effekt.

Högre ålder för luftarna innebar generellt sämre prestanda, både vad gäller DWP och SOTE. Ett visst samband mellan DWP-ökning och SOTE-minskning fanns för tallriksluftare. För en anläggning i drift, tyder det på att det kan vara möjligt att övervaka DWP för att få en uppfattning om den totala prestandaförändringen. Det är en fördel då övervakning av DWP med befintliga instrument är relativt enkel att implementera enligt metodiken som utvärderades på Henriksdals reningsverk (Avsnitt 5.2). De steg som utförs enligt denna metod är i princip bara en variant av den automatiska motionering av luftare som ändå bör genomföras på många anläggningar.

Samtidigt är övervakning med uppskattning av $\alpha F(\text{SOTE})$ utifrån nyckeltal, som utvecklats under projektet, en metod som är direkt tillämpbar på som gott som alla reningsverk. Spridningen i resultaten var dock betydande, särskilt för vissa reningsverk, och metoden kan behöva vidare utvärdering och förfining för att bli ett pålitligt verktyg. Med tanke på att resultat från metoden indikerade överensstämmelse med renvattentesterna, tycks den vara värd att tillämpa. En kontinuerlig automatisk beräkning av $\alpha F(\text{SOTE})$ utifrån labbdata och onlinedata som samlas i ett system för behandling och visualisering av data vore den smidigaste lösningen.

Resultaten visade också att omfattningen av åldrande och igensättning varierar kraftigt mellan anläggningar. En låg slamålder, vilket generellt innebär en hög belastning, leder till mer omfattande igensättning. Men många faktorer i en anläggning påverkar och det är därför inte möjligt att formulera generella tumregler för underhållsintervall. Övervakning behövs på respektive anläggning. Gärna i kombination med renvattentester av luftare då och då, eftersom detta är den enda metoden som kan skilja igensättning från åldrande.

Rengöring med syra genom luftarsystemet är en förhållandevis enkel metod som inte kräver driftavbrott. Metoden tillämpas redan i dag vid vissa reningsverk. Vid

Nykvarnsverket i Linköping har myrsyra doserats vid vissa tillfällen för att åtgärda kapacitetsbrist för luftningen. Resultaten har varierat beroende på anläggningsdel och tillfälle. På anläggningsdelen GC vid Sjölunda reningsverk, som är en IFAS-process (*integrated fixed film activated sludge*), tillsätts ättiksyra för rengöring. Detta måste ske regelbundet för att upprätthålla tillräcklig kapacitet för luftning. Luftarna här är paneler med membran av PU och samma behov har inte uppstått i andra anläggningsdelar med EPDM-membran. En permanent anläggning för dosering av syra är under uppförande. En permanent anläggning för dosering av myrsyra finns på Henriksdals reningsverk men har i skrivande stund inte tagits i drift. Regelbunden förebyggande användning kan minska DWP-förändringar och eventuellt även SOTE-försämring. Det är därför en metod som bedöms ha god nytta i förhållande till arbetsinsats, åtminstone för anläggningar med utfällningsproblematik. Optimal dos och rengöringsfrekvens bör studeras vidare.

Simuleringarna indikerade dessutom att rengöring var fördelaktigt utifrån ett kostnads- och utsläppsperspektiv. På samma sätt indikerade simuleringarna att membranbyte var positivt med avseende på såväl energi som koldioxidutsläpp utifrån de simulerade förutsättningarna. För en specifik anläggning kan förstås nyttan skilja sig från de simulerade förutsättningarna som i detta fall baserades på ett genomsnitt av resultaten från renvattenförsöken. I praktiken behöver även en ekonomisk kalkyl göras för att bedöma hur ofta ett utbyte är ekonomiskt motiverat, utifrån de lokala förutsättningarna och eventuella krav på kalkylränta. En förutsättning är också att det finns kapacitet för att ställa av en del av anläggningen utan att reningen påverkas.

Projektets mål innebar att utvärdera metoder för prestandaövervakning, bedöma omfattningen av åldrande och igensättning på reningsverk och utvärdera nyttan med tillståndsbaserat underhåll. Målen uppnåddes. Den metod som i första hand kunde tillämpas för att följa luftarnas prestanda under drift var uppskattningen av syreöverföringseffektivitet baserat på nyckeltal. Metoderna som krävde installation av nya instrument och/eller ändringar i automationssystemet visade sig svårare att implementera på reningsverken under projektiden. Ofta berodde det på tidsbrist hos de aktuella VA-organisationerna eller svårigheter att prioritera uppgifterna hos process- eller automationspersonal. Sannolikt hängde detta ihop med att vinsterna med insatserna ännu inte var väl kvantifierade.

Baserat på dessa erfarenheter är det inte uppenbart att projektets effektmål kommer att uppnås. Effektmålen var relaterade till antalet reningsverk som tillämpar föreslagna metoder för övervakning och underhåll och att detta sprids till organisationer utöver de deltagande. Övervakningen på Henriksdals reningsverk kommer att fortsätta efter slutförandet av denna rapport. Insatser kommer att ske för att få fler VA-organisationer att tillämpa metoder så att en god praktik sedan kan spridas genom bra exempel mellan reningsverken själva.

Det har dock varit tydligt att projektet i sig har bidragit till att höja medvetandet om betydelsen av luftningen och luftarnas underhåll för energianvändning. På så sätt bidrog projektets aktiviteter till en ökad prioritet för effektivisering av luftning. Samtidigt har det varit tydligt att det finns såväl tekniska som organisatoriska utmaningar med att arbeta med implementering av övervakning och ett mer tillståndsbaserat underhåll för luftning. Dessa utmaningar tillsammans med möjliga lösningar diskuterades i projektgruppen och sammanfattas i Tabell 7.1.

Tabell 7.1

Identifierade tekniska och organisatoriska utmaningar och möjliga lösningar för en effektiv prestandaövervakning och tillståndsbaserat underhåll av luftarsystem.

Utmaningar	Möjliga lösningar
Tekniska	
Vissa metoder (t.ex. renvatten och <i>off-gas</i>) kräver expertis.	Anlita extern part.
Svårt att tömma ned bassänger p.g.a. kapacitetsbrist.	Passa på sommartid. Planera för tillräckligt många parallella linjer vid ombyggnad.
Igensättning av syregivare.	Ronder för kontroll och rengöring. Överväg både manuell och automatisk rengöring.
Osäker tillförlitlighet för onlinemätare (för t.ex. luftflöde, löst syre och susp).	Tillämpa autojustering/kalibrering och larm för orimliga värden.
Provtagningspunkter och labbanalyser inte anpassade för luftningsprestanda.	Utöka och anpassa provtagning och analys.
Komplicerat räkna ut nyckeltal.	Implementera automatisk beräkning i datahanteringssystem eller SCADA.
Låga halter och höga flöden ger osäkra beräkningar.	Kompensera med frekventa provpunkter.
Organisatoriska	
Brist på kvantitativa mål för energieffektivitet.	Lyft energieffektivitet till ett övergripande mål för organisationen och kvantifiera delmål.
Oklart ansvar för energieffektivitet.	Utse ansvariga för prioriterade delmål.
Brist på automationspersonal.	Arbeta långsiktigt med kompetensförsörjning. Delta på arbetsmarknadsmässor. Engagera studenter/examensarbetare. Vidareutbilda egen personal.
Riskfylld arbetsmiljö vid syratvätt.	Bygg fast installation för myrsyratvätt, utför riskanalys och använd skyddsutrustning.
Brist på arbetstid och pengar.	Beräkna den ekonomisk besparingen för att motivera och prioritera. Automatisera arbetet.

8 Råd och fortsatt forskning

Utifrån resultaten och insikterna från detta projekt vill vi ge ett antal råd för övervakning och tillståndsbaserat underhåll av luftarsystem på svenska avloppsreningsverk.

8.1 Underhållsstrategi

Motionering av membran är en metod som generellt bör tillämpas på alla verk då den är enkel att implementera och har påvisad effekt mot igensättning. Utöver denna grundläggande underhållsåtgärd kan vi konstatera att:

- Modellsimuleringar indikerade att frekvent underhåll i form av både rengöring och membranbyte både är energi- och klimatmässigt fördelaktigt, utifrån de simulerade förutsättningarna.
- Ur ekonomisk synvinkel är det i nuläget inte möjligt att generalisera underhållsbehovet i form av byten av membran och rengöring utifrån en anläggnings beskaffenhet och driftförhållanden. Därför behövs övervakning av prestandan på respektive anläggning för att avgöra när och vilken typ av underhåll som behövs.
- Kemisk rengöring med syra (till exempel myrsyra, saltsyra eller ättiksyra) i luftningssystemet är en relativt enkel rengöringsmetod då den inte kräver driftavbrott.
- En permanent och automatiserad anläggning för dosering av syra kan med fördel byggas om rengöringsbehovet är återkommande.
- Mekanisk rengöring, såsom till exempel högtryckstvätt från bassängkant eller borstning av membran, eventuellt i kombination med kemisk rengöring, kan vara motive-rad i särskilda fall men är generellt arbetsam med besvärlig arbetsmiljö. På mindre verk kan det i stället vara enklare att byta membran.

8.2 Prestandaövervakning

Förändringar i syreöverföringseffektivitet bör följas genom att beräkna nyckeltal, där följande parametrar behöver övervakas under drift:

- Löst syrehalt (mg/l)
- Luftflöde (Nm³/h)
- Energianvändning (kWh) och specifik energianvändning (kWh/Nm³)
- Inkommande och utgående massflöden (kg/d) av organiska ämnen och närsalter.

Dessa parametrar behöver övervakas för respektive enhet (linje) som utvärderas.

Tryck bör mätas både i luftstammen samt efter reglerventiler för att kunna följa igensättning och ökande DWP. Som ett alternativ kan luftarnas mottryck uppskattas utifrån andra mätdata enligt ovan (Avsnitt 3.2.2). Mätning eller skattning av mottrycket kan båda fungera men vilket som är enklast att implementera kan variera mellan organisationer.

Renvattenförsök med luftare behövs som komplement till metoderna som kan följa prestandan under drift, eftersom man vid dessa kan skilja mellan igensättning och åldrande. Då det kan vara omständligt att göra nedtömning av bassänger bör man passa på att ta luftare för renvattentester vid de tillfällen när nedtömning ändå sker.

8.3 Behov och fortsatt forskning

Att upprätthålla utrustning och kompetens för att utföra och utvärdera renvattentester kräver resurser på en nivå som gör det motiverat att detta organiseras kollektivt, centraliserat och specialiserat i stället för av enskilda VA-organisationer var för sig. Den testanläggning och kunskap som utvecklats under föreliggande projekt bör i största möjliga mån bevaras för att möjliggöra framtida tester av luftare för svenska reningsverk. Med tanke på att erfarenheten under detta projekt var att använda luftare kan lagras en tid i innan test, skulle det exempelvis kunna arrangeras renvattentester i form av försökskampanjer under några veckor per år. Organisering och finansiering av detta bör undersökas vidare.

Även om inte off-gas-metoden har utvärderats under föreliggande projekt bedöms metoden som pålitlig och värdefull. Den kräver dock också särskild utrustning och kompetens och förväntas därför innebära en initial investering. När det framöver blir mer vanligt med mätning av lustgasutsläpp kan det finnas synergi mellan sådan övervakning och övervakning av luftningseffektivitet. Om lustgasutsläpp övervakas med kan till stor del samma utrustning användas för att mäta syreöverföringseffektivitet. Mätning av lustgasutsläpp vid reningsverk förväntas öka på grund av VA-sektorns klimatambitioner och/eller framtida lagkrav.

För att göra det möjligt att komma åt luftare för renvattentester utan att behöva tömma ned bassänger, vore det bra om luftarsystem kunde utformas med en mindre, avskild del som kunde lyftas upp ur bassängen. Denna del skulle då vara ansluten till luftarsystemets grenrör med flexibel slang så att luftarna erhållit samma driftförhållanden som resten av systemet och vars membran därmed är representativa för bassängen. Genom gejderrör eller liknande skulle denna del enkelt kunna hissas upp för att demontera membran för vidare undersökning utan driftavbrott.

Kunskapen om vilka metoder för rengöring av luftare som är mest effektiva och kostnadseffektiva är bristfällig. En naturlig fortsättning på detta projekt är därför att studera effekten av olika rengöringsmetoder. Framförallt behöver syrarengöring optimeras med avseende på olika typ av kemikalier, koncentration, rengöringsfrekvens, applicering samt förstås i förhållande till vilken typ av igensättning som ska rengöras. Viktigt blir också att förstå omfattningen på irreversibel igensättning, och dess storlek i förhållande till rengöringsmetod. På motsvarande sätt behöver nyttan med motionering kvantifieras.

Slutligen saknas kunskap om hastigheten för igensättning, både för nya och rengjorda luftare. Dynamiken för igensättning skulle vara värdefull att studera under 1 till 2 år, förslagsvis med den lyftbara del av luftarsystemet som föreslås ovan. Genom att studera igensättningshastigheten kan mer förståelse fås kring hur snabbt irreversibel igensättning uppstår och vilken nytta högfrekvent rengöring har.

9 Slutsatser

Resultaten i denna studie visar att både igensättning och åldrande av luftare sker på svenska reningsverk vilket resulterar i ökad elanvändning för luftning. Vid de sex avloppsreningsverk vars luftare undersöktes med renvattenförsök i en testanläggning, minskade syreöverföringseffektiviteten (SOTE) med upp till 28 % medan mottrycket över luftarna (DWP) ungefär fördubblades jämfört med nya luftare.

Genom att jämföra rengjorda, smutsiga och nya luftare gick det att särskilja igensättning från åldrande med avseende på förändringarna SOTE och DWP. Åldrande hade större negativ effekt på SOTE än igensättning. Det visade sig även att åldrande minskade DWP och därmed maskerade en del av den ökning i DWP som igensättning orsakade. Generellt tenderade anläggningar med hög belastning att uppvisa mer igensättning. Det var dock svårt att fastställa samband mellan igensättning och åldrande med driftförhållanden vid anläggningarna. Det är därför viktigt att övervaka prestandan vid den aktuella anläggningen.

Luftarnas effektivitet kan övervakas under drift genom en metodik som bygger på uppskattning av syreöverföringseffektiviteten utifrån belastning och luftflöde. Övervakning av DWP kan göras genom skattning baserad på vanligt förekommande givardata eller genom installation av extra tryckgivare. Rengöringsbehovet kan bestämmas utifrån hur igensättning och DWP ökar över tid.

Modellering är ett användbart verktyg för att optimera en underhållsstrategi. Simuleringarna som genomfördes indikerade att rengöring var fördelaktigt utifrån ett kostnads- och utsläppsperspektiv. Vidare indikerade simuleringarna att membranbyte var positivt ur energi- och utsläppsperspektiv, utifrån de simulerade förutsättningarna. Däremot påverkas den ekonomiska kalkylen av de lokala förutsättningarna för främst membranbyte och kalkylränta som därför behöver anpassas i varje specifikt fall. Mer data från renvattenförsök behövs för att konsolidera modellerna som beskriver effekterna av åldrande och igensättning på SOTE och DWP. Mer kunskap behövs om hastigheterna med vilka åldrande och igensättning sker, vilket har en direkt påverkan på den ekonomiska och miljömässiga nyttan med underhåll.

Eftersom åldrandet av luftarna var betydande, och detta endast kan åtgärdas genom byte av luftarmembran, är det viktigt att på ett kostnadseffektivt sätt kunna tömma ned bassänger och utföra membranbyten. Detta bör tas i beaktande vid utformning av nya anläggningar så att de exempelvis utrustas med tillräckligt många parallella linjer så att en viss del av kapaciteten kan avvaras under en begränsad tid. Projektet har också lyft betydelsen av VA-huvudmännens organisation och prioriteringar för att nå energi-effektivisering genom ett mer tillståndsbaserat underhåll.

Referenser

- Amaral A., Bellandi G., Rehman U., Neves R., Amerlinck Y. och Nopens I. (2018). Towards improved accuracy in modeling aeration efficiency through understanding bubble size distribution dynamics. *Water Res.* 131, 346–355. doi:10.1016/j.watres.2017.10.062
- Amerlinck Y., Bellandi G., Amaral A., Weijers S. och Nopens I. (2016). Detailed off-gas measurements for improved modelling of the aeration performance at the WWTP of Eindhoven. *Water Sci. Technol.* 74, 203–211. doi:10.2166/wst.2016.200
- ASCE (2022). ASCE/EWRI 2-22. *Measurement of oxygen transfer in clean water*.
- ASCE (2018). ASCE/EWRI 18-18. *Standard guidelines for in-process oxygen transfer testing*.
- ASCE (1997). ASCE 18-96. *Standard guidelines for in-process oxygen transfer testing*.
- ASCE (1984). ASCE 2-84. *A standard for the measurement of oxygen transfer in clean water*.
- Ashley K.I., Hall K.J. och Mavinic D.S. (1991). Factors influencing oxygen transfer in fine pore diffused aeration. *Water Res.* 25, 1479–1486. doi:10.1016/0043-1354(91)90178-S
- ATV (1996). ATV M 209E. *Measurement of the oxygen transfer in activated sludge aeration tanks with clean water and in mixed liquor*.
- Aviles A.B.L., Del Cerro Velazquez F. och Pascual Del Riquelme M.L. (2020). Methodology for Energy Optimization in Wastewater Treatment Plants. Phase II: Reduction of Air Requirements and Redesign of the Biological Aeration Installation. *Water* 12. doi:10.3390/w12041143
- Bengtsson S., Fujii D., Arnell M., Andersson S., Carlsson B., Held H. och Gustavsson D. (2019). *Effektiv luftning - Design, drift, underhåll och upphandling av luftningsutrustning för kommunala avloppsreningsverk*. SVU-rapport 2019-23. Stockholm: Svenskt Vatten.
- Boyle W.C. och Redmon D.T. (1983). Biological Fouling of Fine Bubble Diffusers: State-of-Art. *J. Environ. Eng.* 109, 991–1005. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1983)109:5(991)
- Caivano M., Bellandi G., Mancini I.M., Masi S., Brienza R., Panariello S., Gori R. och Caniani D. (2017). Monitoring the aeration efficiency and carbon footprint of a medium-sized WWTP: experimental results on oxidation tank and aerobic digester. *Environ. Technol.* 38, 629–638. doi:10.1080/09593330.2016.1205150
- Cecconi F., Reifsnnyder S., Sobhani R., Cisuella-Serra A., Madou M. och Rosso D. (2020). Functional behaviour and microscopic analysis of ammonium sensors subject to fouling in activated sludge processes. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 6, 2723–2733. doi:10.1039/d0ew00359j
- CEN (2004). DIN EN 12255-15. *Wastewater treatment plants – Part 15: Measurement of the oxygen transfer in clean water in aeration tanks of activated sludge plants*.
- Drewnowski J., Remiszewska-Skwarek A., Duda S. och Lagod G. (2019). Aeration Process in Bioreactors as the Main Energy Consumer in a Wastewater Treatment Plant. Review of Solutions and Methods of Process Optimization. *Processes* 7. doi:10.3390/pr7050311

-
- DWA (2007). DWA-M 209:2007-04. *Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm*.
- EUROPUR (2015). *Flexible Polyurethane (PU) Foam – Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*.
- Frey W. och Thonhauser C. (2004). Clogging and cleaning of fine-pore membrane diffusers. *Water Sci. Technol.* 50, 69–77. doi:10.2166/wst.2004.0419
- Garrido-Baserba M., Asvapathanagul P., McCarthy G.W., Gocke T.E., Olson B.H., Park H.-D., Al-Omari A., Murthy S., Bott C.B., Wett B., Smeraldi J.D., Shaw A.R. och Rosso D. (2016). Linking biofilm growth to fouling and aeration performance of fine-pore diffuser in activated sludge. *Water Res.* 90, 317–328. doi:10.1016/j.watres.2015.12.011
- Garrido-Baserba M., Asvapathanagul P., Park H.-D., Kim T.-S., Andres Baquero-Rodriguez G., Olson B.H. och Rosso D. (2018). Impact of fouling on the decline of aeration efficiency under different operational conditions at WRRFs. *Sci. Total Environ.* 639, 248–257. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.036
- Garrido-Baserba M., Rosso D., Odize V., Rahman A., Van Winckel T., Novak J.T., Al-Omari A., Murthy S., Stenstrom M.K. och De Clippeleir H. (2020). Increasing oxygen transfer efficiency through sorption enhancing strategies. *Water Res.* 183. doi:10.1016/j.watres.2020.116086
- Garrido-Baserba M., Sobhani R., Asvapathanagul P., McCarthy G.W., Olson B.H., Odize V., Al-Omari A., Murthy S., Nifong A., Godwin J., Bott C.B., Stenstrom M.K., Shaw A.R. och Rosso D. (2017). Modelling the link amongst fine-pore diffuser fouling, oxygen transfer efficiency, and aeration energy intensity. *Water Res.* 111, 127–139. doi:10.1016/j.watres.2016.12.027
- Gori R., Balducci A., Caretti C. och Lubello C. (2014). Monitoring the oxygen transfer efficiency of full-scale aeration systems: investigation method and experimental results. *Water Sci. Technol.* 70, 8–14. doi:10.2166/wst.2014.165
- Groves K.P., Daigger G.T., Simpkin T.J., Redmon D.T. och Ewing L. (1992). Evaluation of Oxygen Transfer Efficiency and Alpha-Factor on a Variety of Diffused Aeration Systems. *Water Environ. Res.* 64, 691–698. doi:10.2175/WER.64.5.5
- Guo J., Fu X., Andres Baquero G., Sobhani R., Nolasco D.A. och Rosso D. (2016). Trade-off between carbon emission and effluent quality of activated sludge processes under seasonal variations of wastewater temperature and mean cell retention time.. *Sci. Total Environ.* 547, 331–344. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.102
- Henze M., Gujer W., Mino T. och van Loosdrecht M.C.M. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA Publishing, London.
- Henze M., van Loosdrecht M.C.M., Ekama G.A. och Brdjanovic D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing, London.
- Hung C.H. och Boyle W.C. (2001). The effect of acid cleaning on a fine pore ceramic diffuser aeration system. *Water Sci. Technol.* 44, 211–218.
- Iranpour R., Magallanes A., Zermeno M., Varsh V., Abrishamchi A. och Stenstrom M.K. (2000). Assessment of aeration basin performance efficiency: sampling methods and tank coverage. *Water Res.* 34, 3137–3152. doi:10.1016/S0043-1354(00)00065-8
- Jansen W., Costerton J.W. och Melcer H. (1994). *Investigations into Biofouling Phenomena in Fine Pore Aeration Devices*. EPA/600/R-94/107. Washington D.C.
- Jenkins T.E. (2014). *Aeration Control System Design: A Practical Guide to Energy and Process Optimization*. Wiley, Hoboken.
-

-
- Jiang L.-M., Chen L., Zhou Z., Sun D., Li Y., Zhang M., Liu Y., Du S., Chen G. och Yao J. (2020). Fouling characterization and aeration performance recovery of fine-pore diffusers operated for 10 years in a full-scale wastewater treatment plant. *Bioresour. Technol.* 307. doi:10.1016/j.biortech.2020.123197
- Jiang P. och Stenstrom M.K. (2012). Oxygen Transfer Parameter Estimation: Impact of Methodology. *J. Environ. Eng.* 138, 137–142. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000456
- Jolly M., Green S., Wallis-Lage C. och Buchanan A. (2010). Energy saving in activated sludge plants by the use of more efficient fine bubble diffusers. *Water Environ. J.* 24, 58–64. doi:10.1111/j.1747-6593.2009.00164.x
- Kaliman A., Rosso D., Leu S.-Y. och Stenstrom M.K. (2008). Fine-pore aeration diffusers: Accelerated membrane ageing studies. *Water Res.* 42, 467–475. doi:10.1016/j.watres.2007.07.039
- Kim Y.K. och Boyle W.C. (1993). Mechanisms of fouling in fine-pore diffuser aeration. *J. Environ. Eng.* 119, 1119–1138. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1993)119:6(1119)
- Krampe J. (2011a). Full scale evaluation of diffuser ageing with clean water oxygen transfer tests. *Water Sci. Technol.* 64, 700–707. doi:10.2166/wst.2011.694
- Krampe J. (2011b). Assessment of diffuser pressure loss on WWTPs in Baden-Württemberg. *Water Sci. Technol.* 63, 3027–3033. doi:10.2166/wst.2011.634
- Leu S.-Y., Chan L. och Stenstrom M.K. (2012). Toward Long Solids Retention Time of Activated Sludge Processes: Benefits in Energy Saving, Effluent Quality, and Stability. *Water Environ. Res.* 84, 42–53. doi:10.2175/106143011X12989211841052
- Leu S.-Y., Rosso D., Larson L.E. och Stenstrom M.K. (2009). Real-Time Aeration Efficiency Monitoring in the Activated Sludge Process and Methods to Reduce Energy Consumption and Operating Costs. *Water Environ. Res.* 81, 2471–2481. doi:10.2175/106143009X425906
- Libra J.A., Sahlmann C., Schuchardt A., Handschag J., Wiesmann U. och Gnirss R. (2005). Evaluation of ceramic and membrane diffusers under operating conditions with the dynamic offgas method. *Water Environ. Res.* 77, 447–454. doi:10.2175/106143005X67359
- Libra J.A., Schuchardt A., Sahlmann C., Handschag J., Wiesmann U. och Gnirss R. (2002). Comparison of the efficiency of large-scale ceramic and membrane aeration systems with the dynamic off-gas method. *Water Sci. Technol.* 46, 317–324. doi:10.2166/wst.2002.0615
- Lingsten A., Lundkvist K. och Hellström D. (2013). *VA-verkens energianvändning 2011*. SVU-rapport 2013-17. Stockholm: Svenskt Vatten.
- Mueller J.A., Boyle W.C. och Pöpel H.J. (2001). *Aeration: Principles and Practice*. CRC Press, Boca Raton.
- Odize V.O., Novak J., De Clippeleir H., Al-Omari A., Smeraldi J.D., Murthy S. och Rosso D. (2017). Reverse flexing as a physical/mechanical treatment to mitigate fouling of fine bubble diffusers. *Water Sci. Technol.* 76, 1595–1602. doi:10.2166/wst.2017.171
- Olsson G. (2008). *Effektivare reningsverk. Några steg mot bättre energi- och resursutnyttjande*. SVU-rapport 2008-19. Stockholm: Svenskt Vatten.
- Redmon D., Boyle W.C. och Ewing L. (1983). Oxygen Transfer Efficiency Measurements in Mixed Liquor Using Off-Gas Techniques. *J. Water Pollut. Control Fed.* 55, 1338–1347.
-

-
- Redmon D.T., Melcer H., Ellefson G. V och Ewing L. (1994). The Effect of Pore Size on Transfer Capabilities, Fouling Tendencies, and Cleaning of Ceramic Air Diffusers. *Water Environ. Res.* 66, 868–878. doi:10.2175/WER.66.7.2
- Rieth M.G., Boyle W.C. och Ewing L. (1990). Effects of Selected Design Parameters on the Fouling Characteristics of Ceramic Diffusers. *Res. J. Water Pollut. Control Fed.* 62, 877–886.
- Rosso D. (2018). *Aeration, Mixing, and Energy: Bubbles och Sparks*. IWA Publishing, London.
- Rosso D., Iranpour R. och Stenstrom M.K. (2005). Fifteen years of offgas transfer efficiency measurements on fine-pore aerators: Key role of sludge age and normalized air flux. *Water Environ. Res.* 77, 266–273. doi:10.2175/106143005X41843
- Rosso D., Jiang L.-M., Hayden D.M., Pitt P., Hocking C.S., Murthy S. och Stenstrom M.K. (2012). Towards more accurate design and specification of aeration systems using on-site column testing. *Water Sci. Technol.* 66, 627–634. doi:10.2166/wst.2012.187
- Rosso D., Jiang L.-M., Pitt P., Hocking C.S., Stenstrom M.K., Murthy S., Hayden D.M., Zhong J., Collier D.H., Kim A.Y. och Xu H. (2013). Methodology for In Situ Column Testing to Improve Accuracy during Design and Specification of Aeration Systems. *J. Environ. Eng.* 139, 530–537. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000630
- Rosso D., Libra J.A., Wiehe W. och Stenstrom M.K. (2008). Membrane properties change in fine-pore aeration diffusers: Full-scale variations of transfer efficiency and headloss. *Water Res.* 42, 2640–2648. doi:10.1016/j.watres.2008.01.014
- Rosso D. och Shaw A.R. (2014). *Framework for Energy Neutral Treatment for the 21st Century through Energy Efficient Aeration*. IWA Publishing och Water Environment Research Foundation, London/New York.
- Rosso D. och Stenstrom M.K. (2006). Economic implications of fine-pore diffuser aging. *Water Environ. Res.* 78, 810–815. doi:10.2175/106143006X101683
- Sahlmann C., Libra J.A., Schuchardt A., Wiesmann U. och Gnirss R. (2004). A control strategy for reducing aeration costs during low loading periods. *Water Sci. Technol.* 50, 61–68. doi:10.2166/wst.2004.0417
- Samuelsson O., Björk A. och Carlsson B. (2021). Model-based monitoring of diffuser fouling using standard sensors.. *Water Res. X* 13, 100118. doi:10.1016/j.wroa.2021.100118
- Samuelsson O., Björk A., Zambrano J. och Carlsson B. (2018). Fault signatures and bias progression in dissolved oxygen sensors. *Water Sci. Technol.* 78, 1034–1044. doi:10.2166/wst.2018.350
- Schmit F.L., Redmond D.T. och Ewing L. (1989). In place gas cleaning of diffusion elements, U.S. Patent 4,889,620.
- Schuchardt A., Libra J.A., Sahlmann C., Wiesmann U. och Gnirss R. (2007). Evaluation of oxygen transfer efficiency under process conditions using the dynamic off-gas method. *Environ. Technol.* 28, 479–489. doi:10.1080/09593332808618812
- Schwarz M., Behnisch J., Trippel J., Engelhart M. och Wagner M. (2021). Oxygen Transfer in Two-Stage Activated Sludge Wastewater Treatment Plants. *Water* 13. doi:10.3390/w13141964
- SIS (2004). SS-EN 12255-15:2004. *Avlopp - Reningsanläggning - Del 15: Luftningsbassänger för slam - Mätning av syretransport i rent vatten*.
- Söderström T. och Stoica P. (1989). *System Identification*. Prentice Hall.
- Sphera (2023). *Managed LCA content version 2023.2*.
-

-
- Stenstrom M.K. (1990). Upgrading existing activated sludge treatment plants with fine pore aeration systems. *Water Sci. Technol.* 22, 245–251. doi:10.2166/wst.1990.0251
- Svenskt Vatten (2024). *Klimatberäkningsverktyg för VA-anläggningar, Version 3*. Stockholm: Svenskt Vatten.
- Svenskt Vatten (2021). *VASS Reningsverk – Nyckeltal för år 2020*. Rapport R2021-04. Stockholm: Svenskt Vatten.
- Tchobanoglous G., Stensel H.D., Tsuchihashi R. och Burton F. (2014). *Metcalf och Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education, New York.
- Trillo I., Jenkins T.E., Redmon D., Hilgart T. och Trillo J. (2004). Implementation of Feedforward Aeration Control Using On-Line Offgas Analysis: The Grafton WWTP Experience, in: *Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC*. pp. 27–45.
- Trillo I. och Smith M. (2015). Process and Aeration Optimisation Using Online Offgas Analysis, in: *OZWATER*.
- Uby L. (2019). Next steps in clean water oxygen transfer testing - A critical review of current standards. *Water Res.* 15, 415–434. doi:10.1016/j.watres.2019.03.063
- US EPA (1989). *Design Manual - Fine Pore Aeration Systems*. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Wagner M. och von Hoessle R. (2004). Biological coating of EPDM-membranes of fine bubble diffusers. *Water Sci. Technol.* 50, 79–85. doi:10.2175/193864703784639714
- Wagner M.R., Popel H.J. och Kalte P. (1998). Pure oxygen desorption method - A new and cost-effective method for the determination of oxygen transfer rates in clean water. *Water Sci. Technol.* 38, 103–109. doi:10.2166/wst.1998.0186
- Wang M., Mo H., Liu G., Qi L., Yu Y., Fan H., Xu X., Luo T., Shao Y. och Wang H. (2020). Impact of scaling on aeration performance of fine-pore membrane diffusers based on a pilot-scale study. *Sci. Rep.* 10. doi:10.1038/s41598-020-61814-5
- Warriner R. och Rooney T.C. (1992). Experience with Ceramic Plate Diffusers in Large Activated Sludge Plants. *Water Sci. Technol.* 25, 127–134. doi:10.2166/wst.1992.0487
- WEF (2010). *Energy Conservation in Water and Wastewater Treatment Facilities. Manual of Practice No. 32*. Water Environment Federation, New York.
- Xylem (2011). *White Paper: Comparison of the ASCE and the European EN standards for measurements of oxygen transfer in clean water*.

Bilaga A Beräkning av LSI

Fällningspotentialen baserat på LSI beräknades som differensen mellan aktuellt pH och mättnads-pH enligt:

$$LSI = pH - pH_s \quad (A.1)$$

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D), \text{ där:} \quad (A.2)$$

$$A = (\lg(TDS) - 1)/10 \quad (A.3)$$

$$B = -13,12 \cdot \lg(T + 273) + 34,55 \quad (A.4)$$

$$C = \lg(2,5 \cdot Ca^{2+}) \quad (A.5)$$

$$D = \lg(Alk) \quad (A.6)$$

där TDS är i mg/l, T i °C, Ca^{2+} i mg/l och Alk i mg $CaCO_3$ /l.

Bilaga B Beräkning av syrebehov i avloppsvatten (AOR)

Nedan följer en beskrivning av hur syrebehovet vid processförhållanden (AOR) beräknas. Samtliga beräkningar görs baserat på dygnsprover och dygnsmedelvärden. Beräkningarna bygger på ELSA-rapporten (Bengtsson et al. 2019) men har förenklats på några ställen.

Syrebehovet i processen består i huvudsak av följande delar:

- Nedbrytning av organiskt material och endogent syrebehov (Org)
- Nitrifikation (Nit)
- Denitrifikation ger upphov till ett minskat syrebehov och beräknas som en syrekredit i form av ett negativt syrebehov (Den).

Vanligtvis kan syrebehov för kemisk oxidering och skillnaden mellan inkommande och utgående syremängd försummas. Det totala syrebehovet (kg O₂/d) beräknas så som:

$$AOR = AOR_{Org} + AOR_{Nit} - AOR_{Den} \quad (B.1)$$

Syrebehov för nedbrytning av organiskt material (AOR_{Org} i kg O₂/d) kan beräknas med hänsyn till temperatur och slamålder enligt följande:

$$F_T = 1,072^{(T-15)} \quad (B.2)$$

$$AOR_{Org} = B_{BOD7} \left(0,49 + \frac{0,13 \cdot SRT \cdot F_T}{1 + 0,17 \cdot SRT \cdot F_T} \right) \quad (B.3)$$

där:

F_T	= Temperaturkorrigeringsfaktor (-)
T	= Temperatur (°C)
B_{BOD7}	= Belastning av BOD ₇ (kg BOD ₇ /d)
SRT	= Slamålder, totalt anoxisk och aerob (d)

Koncentrationen av BOD kan ofta antas vara försumbart låg i det utgående vattnet, vilket innebär att mängden reducerad BOD kan antas motsvara belastningen av BOD.

Som ett alternativ kan AOR_{Org} beräknas baserat på COD i stället för BOD. Då beräknas syrebehovet genom en balans över systemet genom att summera inkommande och utgående bidrag till syrebehovet, inklusive överskottsslammet. Det gör att denna metod kräver analys eller antagande för överskottsslammets COD-innehåll. Bakteriers cellmassa har ett COD-innehåll kring 1,42 g COD/g VSS men på grund av inert suspenderat material blir COD-innehållet för slammet vanligtvis något lägre än så. Utgående mängd COD kan behöva inkluderas om det inte är försumbart.

För nitrifikation beräknas syrebehovet genom:

$$AOR_{Nit} = 4,3 \cdot N_{Nit} \quad (B.4)$$

där:

N_{Nit} = Mängd nitrifierat kväve (kg N/d)

För att kunna beräkna den mängd kväve som nitrifieras behöver den mängd som assimileras i slammet på grund av tillväxt tas hänsyn till. Det kan antas att slammet innehåller 10 % kväve av VSS. Det nitrifierbara kvävet kan sedan beräknas som:

$$N_{Nit} = N_{In} - N_{NH_4, Ut} - N_{Inert} - N_{ös} \quad (B.5)$$

där:

N_{In} = Inkommande totalkväve eller kjeldalkväve (kg N/d)

$N_{NH_4, Ut}$ = Utgående ammoniumkväve (kg N/d)

N_{Inert} = Inert kväve i utgående vatten (kg N/d)

$N_{ös}$ = Kväve i överskottsslammutfall (kg N/d)

Inert kväve i utgående vatten (icke tillgängligt för nitrifikation) kan till exempel beräknas som utgående totalkväve minus utgående ammonium och nitrat:

$$N_{Inert} = N_{Ut} - N_{NH_4, Ut} - N_{NO_3, Ut} \quad (B.6)$$

där:

N_{Ut} = Utgående totalkväve eller kjeldalkväve (kg N/d)

$N_{(NO_3, Ut)}$ = Utgående nitratkväve (kg N/d)

Syrekrediten för denitrifikation (AOR_{Den}) motsvarar det behov av syre som undviks genom att nitrat i stället används för respiration och beräknas enligt:

$$AOR_{Den} = 2,86 \cdot N_{Den} \quad (B.7)$$

$$N_{Den} = N_{Nit} - N_{NO_3, Ut} \quad (B.8)$$

där:

N_{Den} = Denitrifierat kväve (kg N/d)

Bilaga C Uppskattning av syreöverföringseffektivitet med trappmetoden

Den trappsekvens som användes för att uppskatta mottrycket i Avsnitt 3.2.2 kan även användas för att uppskatta respirationshastighet (*OUR*) och syreöverföringshastighet ($K_L a$). För att göra dessa uppskattningar används i stället mätningar av syrehalt och vattenflöde i aktivslambassängen.

På samma sätt som med trappsekvens för att uppskatta mottryck, så designas trappan för att göra mätningarna mer tillförlitliga, jämfört med om uppskattningen utförts under normal drift. Målet med trappsekvensen är att temporärt höja syrehalten i en enskild zon (där syreöverföringseffektiviteten uppskattas), följt av en period med avstängd lufttillförsel där syrehalten minskar snabbt och respirationshastigheten kan uppskattas. Genom att genomföra de både förändringarna vid högre syrehalter än 2–3 mg/l så undviks att respirationshastigheten påverkas av syrehalten. Eftersom enbart luftflödet behöver hållas konstant (till skillnad från ventilöppningsgraden i tidigare mottrycksskattning), så går det att använda befintlig luftflödesregulator och ställa ut olika börvärden på luftflödet. För att få en snabb höjning av syrehalten brukar dock det maximala luftflödet vara att föredra. Detta är vanligen det luftflöde som även används vid motioneringen. Ibland anges att det maximala luftflödet kan överskridas med, exempelvis, 20 % under 10 minuter vid motionering. Vilka förutsättningar som gäller behöver undersökas med leverantören.

Ett problem är att både syresättningseffektivitet och syreöverföringshastighet varierar med temperaturen. För att uppskattningarna ska bli jämförbara över tid (sommar och vinter) behöver de uppskattade värdena standardiseras till en konstant vattentemperatur på samma sätt som i renvattenförsök (Avsnitt 2.4). Temperaturmätningen kan dock ske på valfri befintlig mätpunkt på verket och en lägre tidsupplösning (timma eller dygn) är tillräckligt.

Uppskattning av respirationshastighet och syreöverföringseffektivitet med trappmetoden

Respirationshastigheten kan uppskattas genom att mäta hur snabbt syret i en bassäng förbrukas. Förändringen av syrehalten över tid, $\frac{d DO(t)}{dt}$, kan beskrivas med sambandet

$$\frac{d DO(t)}{dt} = \frac{Q(t)}{V} (DO_{in}(t) - DO(t)) + k_L a (DO_{sat} - DO(t)) - r \quad (C.1)$$

där DO avser syrehalten i en totalomrörd bassäng med volym V och mättnadssyrehalt DO_{sat} , med inflödet Q och syrehalt DO_{in} . Syreöverföringskoefficienten $k_L a$ antas här vara konstant för ett givet luftflöde och en trappsekvens, liksom respirationshastigheten r (som i övrigt varierar över tid).

Genom att approximera derivatan $\frac{d DO(t)}{dt} \approx \frac{DO(t+1) - DO(t)}{\Delta t}$ (där Δt är samplingstiden), så går det att uppskatta r och $k_L a$ med linjär regression utifrån data från en trappsekvens genom två steg.

I steg 1 används data från perioden med avstängd lufttillförsel. Under denna period är $k_L a$ noll vilket innebär att förändringen (minskningen) i syrehalt enbart beror av respirationshastigheten samt inblandningen av det inkommande avloppsvattnet. Detta ger att 3.16 kan skrivas som

$$\hat{r} = \frac{Q(t)}{V}(DO_{in}(t) - DO(t)) - \frac{DO(t) - DO(t+1)}{\Delta t} \quad (C.2)$$

där r skattas med linjär regression utifrån den minsta prediktionsfelet ("Prediction Error Method", Söderström & Stoica 1989). På motsvarande sätt kan $k_L a$ uppskattas när $\hat{r}$ är känt enligt

$$\widehat{k_L a} = \frac{1}{DO_{sat} - DO(t)} \left(\hat{r} + \frac{DO(t) - DO(t+1)}{\Delta t} - \frac{Q(t)}{V} DO_{in}(t) - DO(t) \right) \quad (C.3)$$

Beräkningarna C.2–C.3 kan göras i vanliga kalkylark, även om det underlättar att automatisera beräkningen direkt i styrsystemet eller annan mjukvara. Slutligen underlättar en dedikerad signal som indikerar vilket trappsteg som genomförs, så att det enkelt går att skilja ut data från de olika trappstegen. I de försök som genomfördes inom projektet på Henriksdal så nyttjades en s.k. digital flagga som indikerade '1' eller '0' beroende på om trappsekvensen var aktiv eller ej.

Det är möjligt att jämföra det uppskattade värdet på αF med motsvarande värde i renvatten, det s.k. αF -värdet. Genom att följa förändringar i αF över tid, så fås en uppskattning över förändringen i syreöverföringseffektivitet hos membranen, se Samuelsson et al., 2021 för detaljer.

Bilaga D Fler exempel på uppskattad syreöverförings-effektivitet genom nyckeltalsberäkningar

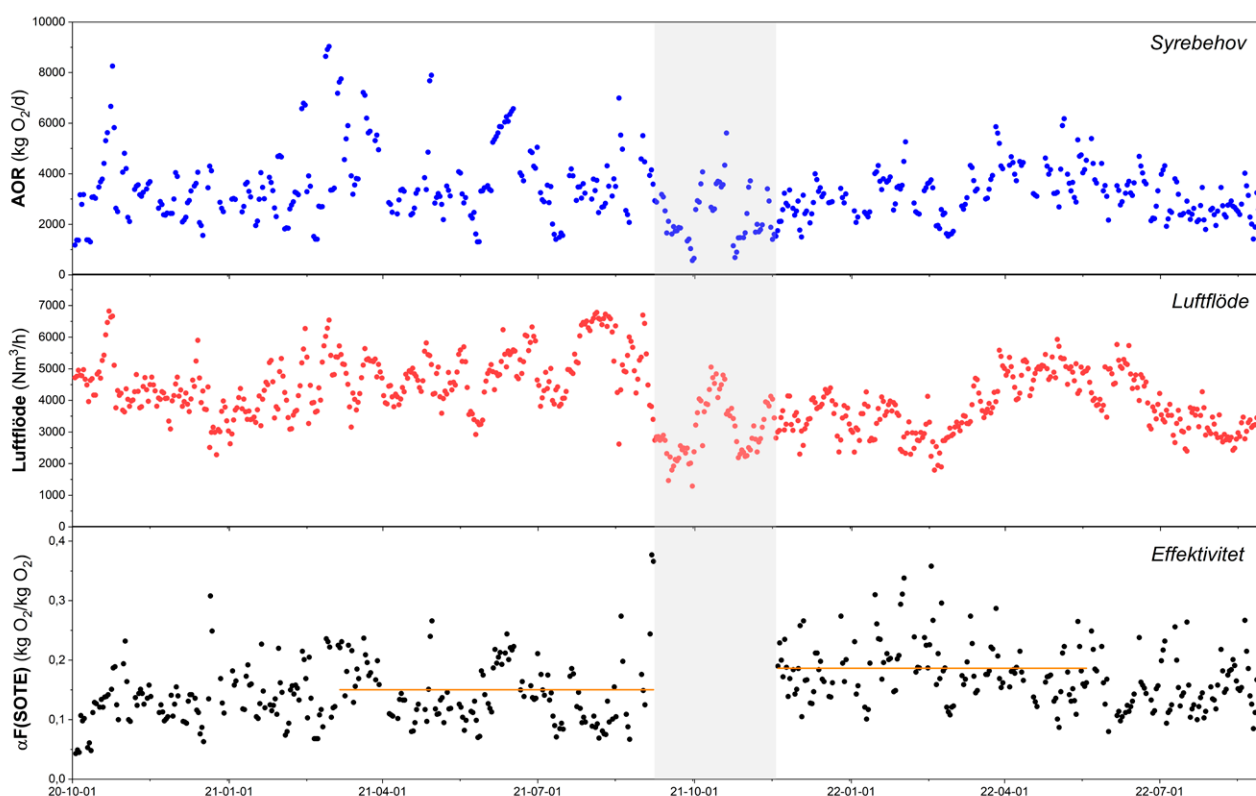
Exempel nyckeltal Sjölunda G1

För Sjölunda G1 beräknades syrebehovet med hänsyn till avskiljning av organiskt material och viss nitrifikation som skedde sommartid. Denitrifikation av små mängder nitrat i inkommande (från rejektvatten) kunde försummas i detta sammanhang. Syrebehovet för G1 beräknades genom en massbalans över flera delar, eftersom provtagning inte skedde separat på denna anläggningsdel. Syrehalterna i de luftade zonerna sammanräknades genom viktning mot andelen av det totala luftflödet för respektive zon.

Resultaten från beräkningar visas i Figur D.1. Även vid denna anläggning var det relativt stor variation över tiden men det kunde ändå observeras att den genomsnittliga effektiviteten ökade efter byte av luftarmembran. Effektiviteten ökade från 0,15 kg/kg som medel halvåret före membranbytet till 0,19 som medel halvåret efter bytet vilket motsvarade en ökning av effektiviteten med 19 %.

Figur D.1

Syrebehov (AOR), luftflöde och effektivitet för Sjölunda G1. Det vertikala grå området visar tidpunkten för membranbyte. Orangea linjer visar medelvärde före och efter bytet.



Exempel nyckeltal Klagshamn

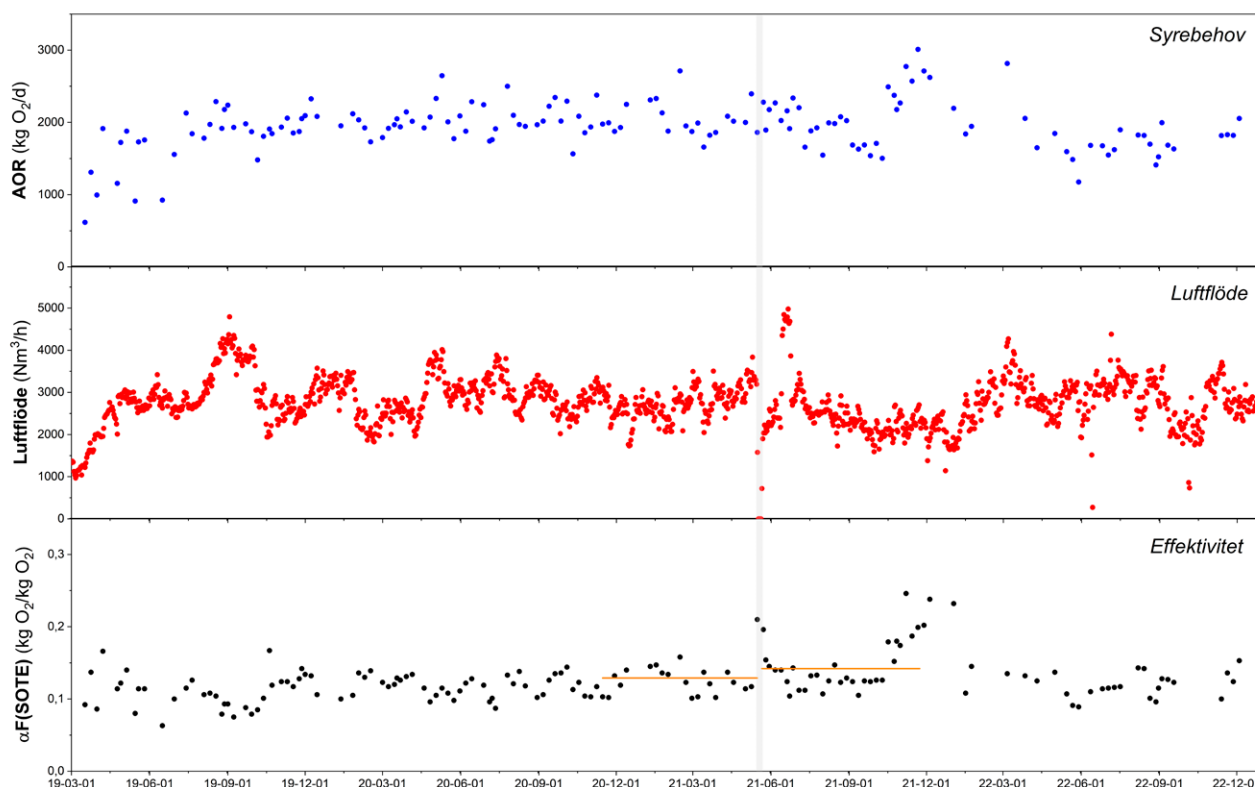
På Klagshamns reningsverk (VA SYD) behandlas avloppsvatten från sydöstra Malmö och Vellinge. Vattnet behandlas med förfällning, försedimentering, aktivt slam för nitrifikation och reduktion av organiskt material samt efterdenitrifikation mer rörliga bärare följt av sandfilter.

Aktivslamanläggningen består av två linjer och nyckeltal beräknades för den ena linjen. Till den andra linjen leds även rektvatten som inte provtas regelbundet och belastningen är därför svår att fastställa. Det antogs att de två linjerna belastas med lika mycket inkommande avloppsvatten eller att fördelningen mellan linjerna i alla fall är konstant. Aktivslamanläggningen är indelad i åtta zoner per linje med varsin syregivare. De åtta syrehalterna räknades samman till ett värde per dygn genom att de viktades med en avtagande faktor från 25 % (i den första zonen) till 6,5 % (i den sista).

Resultaten från beräkningar visas i Figur D.2. I jämförelse med Slottshagen, Sjölanda G1 och Sjölanda G4 var skillnaden i effektivitet som kunde observeras före och efter byte av luftare betydligt mindre. Detta tyder på att de nya luftarna hade ungefär likvärdig effektivitet som de använda. De använda luftarna hade varit i drift under 6 år.

Figur D.2

Syrebehov (AOR),
luftflöde och effektivitet
för Klagshamns
avloppsreningsverk.
Den vertikala grå linjen
visar tidpunkten för
membranbyte. Orangea
linjer visar medelvärde före
och efter bytet.



Exempel nyckeltal Henriksdal

På Henriksdals avloppsreningsverk (Stockholm Vatten och Avfall) är en av de sju linjerna för biologisk behandling nyligen ombyggd till en membranbioreaktor (MBR). I processen tillämpas fördenitrifikation efter förfällning. För denna linje beräknades nyckeltal för de två första årens drift.

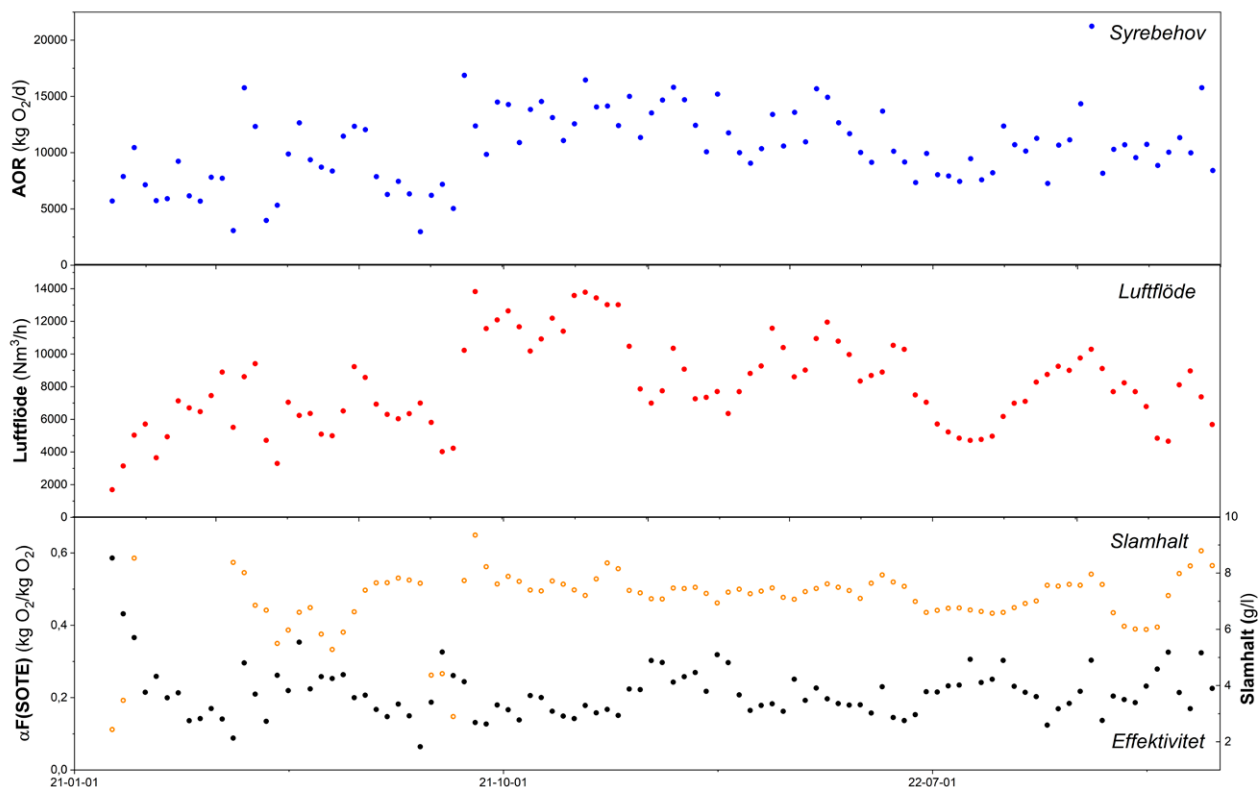
Effektiviteten uppvisade en inledande snabb minskning och sedan vissa variationer över tid (Figur 5.5 i rapporten). Genom att studera hur effektiviteten varierade över tiden

tillsammans med variationer i slamhalten blir det tydligt hur dessa hängde ihop. Hög effektivitet uppmättes ofta i samband med lägre slamhalt ($< 5 \text{ g/l}$). Det är allmänt känt att de mycket höga slamhalter ($> 6 \text{ g/l}$), som ofta tillämpas i MBR:er, ökar viskositeten vilket leder till att bubblorna i högre grad slår ihop sig till större bubblor med lägre effektivitet (Bengtsson et al. 2019).

Resultaten från Henriksdal tyder på att beräkningarna speglar effektiviteten på ett tillförlitligt sätt men att variationerna i detta fall snarare beror på variationer i slamhalt/viskositet än på förändringar av luftarmembranen.

Figur D.3

Syrebehov (AOR), luftflöde, effektivitet och slamhalt för MBR-linjen vid Henriksdals avloppsreningsverk.



Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se