

Effektiv luftning

Design, drift, underhåll och
upphandling av luftningsutrustning
för kommunala avloppsreningsverk

Simon Bengtsson

Dan Fujii

Magnus Arnell

Sofia Andersson

Bengt Carlsson

Henrik Held

David Gustavsson



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.

Författaren är ensam ansvarig för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 14057
167 14 Bromma
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se
Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Effektiv luftning – Design, drift, underhåll och upphandling av luftningsutrustning för kommunala avloppsreningsverk
Title of the report:	Efficient aeration – Design, operation, maintenance and procurement of aeration equipment for municipal wastewater treatment plants
Författare:	Simon Bengtsson (Promiko), Dan Fujii (Stockholm Vatten och Avfall), Magnus Arnell (RISE Research Institutes of Sweden), Sofia Andersson (IVL Svenska Miljöinstitutet), Bengt Carlsson (Uppsala universitet), Henrik Held (Varim), David Gustavsson (Sweden Water Research/VA SYD)
Rapportnummer:	2019-23
Antal sidor:	270
Sammandrag:	Rapporten beskriver luftning vid kommunala avloppsreningsverk med fokus på energieffektivitet. Den tar upp design av luftningsanläggningar samt lämpliga metoder för styrning, drift, uppföljning och underhåll – med exempel från verkligheten och modellsimuleringar. Rapporten ger också vägledning för upphandling av luftningsanläggningen.
Abstract:	In this report, aeration at municipal wastewater treatment plants is described with focus on energy efficiency. Design of aeration systems is described as well as methods for control, operation, follow-up and maintenance with real examples and model simulations. Guidance for procurement of aeration systems is also provided.
Sökord:	Energieffektivitet, luftning, luftare, blåsmaskiner, upphandling
Keywords:	Energy efficiency, aeration, diffusers, blowers, procurement
Målgrupper:	Anställda på avloppsreningsverk samt teknikleverantörer, entreprenörer och konsulter inom avloppsvattenrening
Omslagsbild:	Luftat biosteg vid Källby avloppsreningsverk. Foto: Simon Bengtsson, Promiko
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens webbplats www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2019
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB
Om projektet	
Projektnummer:	17-112
Projektets namn:	Design, drift, underhåll och upphandling av luftningsutrustning för kommunala avloppsreningsverk
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling, Aerzen Scandinavia, Atlas Copco Compressor, ATEK Avvattningsteknik, Gryaab, Kaeser Kompressorer, Käppalaförbundet, MIVA, NSVA, Promiko, Purac, Stockholm Vatten och Avfall, Sulzer Pumps Sweden, Sweco Environment, Sweden Water Research, Uppsala universitet, VA SYD, Varim, Veolia Water Technologies och Xylem Water Solutions

Förord

Detta projekt tog delvis avstamp i min resa gällande luftning på avloppsreningsverk med till exempel egna felberäkningar av luftflöden, erfarenhet av att icke rengjorda syregivare ökade ett reningsverks elanvändning med minst 5 % och att leverantörer av luftningsutrustning efterfrågade olika uppgifter vid design.

Idén till att ta fram en svensk handbok med all nödvändig information om luftningsanläggningar för biologisk rening på svenska kommunala avloppsreningsverk uppskattades på VA SYD vid diskussioner om prioriterade projekt för Sweden Water Research. Jag tog kontakt med Dan Fujii på Stockholm Vatten och Avfall som har jobbat både på Xylem och Ramböll med luftning och frågade om han hade lust att driva detta projekt tillsammans med mig. Det ville han, och snart var projektet Effektiv Luftning på Svenska Avloppsreningsverk – ELSA formerat.

ELSA hade inte blivit till på samma sätt om inte andra i branschen också såg behovet av öka och samla in kunskapen om luftning. Vi har varit 21 partners i detta projekt, men antalet engagerade personer har varit fler. Det stora engagemanget inom projektgruppen har varit en ovärderlig tillgång för att genomföra ELSA. Dessutom har vi haft en referensgrupp med ytterligare sex representanter från andra organisationer inblandade.

Projektet hade heller inte blivit verklighet utan det finansiella stödet från Svenskt Vatten Utveckling. Dessutom har alla företag (utom RISE) samt större VA-organisationerna bidragit med en kontantinsats och alla (utom RISE) har bidragit med hela eller delar av sin tid i projektet som in-kind-finansiering.

Huvudförfattaren Simon Bengtsson har gjort det allra mesta i detta projekt, från att samla in och sammanställa information till att driva projektet framåt i dess olika delar. Han är den som har skrivit den största delen av rapporten, och också den som har noggrant redigerat den text som andra har skrivit. Simon, som jag lärde känna mer under ett annat kunskapssammanställningsprojekt med SVU-flagg, har gjort detta arbete på ett mycket bra sätt, vilket också har gjort att alla vi andra i projektet är mycket nöjda med resultatet. På köpet har han nog blivit en av Sveriges främsta luftningsexperter.

Vi hoppas och tror på att denna rapport nu kommer till direkt nytta för att minska energianvändningen på svenska avloppsreningsverk. Slit den med hälsan, men återkoppla mer än gärna till mig via epost (david.gustavsson@vasyd.se) om ni har synpunkter på rapporten. Vi har en förhoppning om att kunna jobba vidare med ELSA på något sätt.

Jag vill tacka alla som har varit inblandade i samarbetsprojektet ELSA genom att lista de viktigaste personerna på respektive organisation nedan.

Simon Bengtsson, Promiko

Dan Fujii, Stockholm Vatten och Avfall

Ola Fredriksson, Eva-Li Saarväli, Emma Nivert och Joana Nunes, Gryaab

Magnus Arnell, RISE Research Institutes of Sweden

Sofia Andersson, IVL Svenska Miljöinstitutet

Henrik Held, Varim

Bengt Carlsson, Uppsala universitet

Stefan Erikstam, Sofia Bramstedt, Michael Medoc och

Linda Åmand, Käppalaförbundet

Sten Lundberg, MIVA

Leif Persson, Aerzen Scandinavia

Jenny Riit och Dan Jedenfeldt, Xylem Water Solutions

Johan Eriksson och Niklas Svanberg, ATEK Avvattningsteknik

Lars Rosén, Kaeser Kompressorer

Johan Löthberg, Atlas Copco Compressor

Jonas Anderström, Sulzer Pumps Sweden

Carl Dahlberg, Sweco Environment

Håkan Enocksson, Purac

Christian Rosén, Veolia Water Technologies

Anna Kristiansson, Sweden Water Research

Referensgruppen:

Anneli Andersson Chan, Växjö kommun

Bengt Göran Hellström, BG Hellström VA-process

P-O Johansson, Pumpteknik

Gustaf Olsson, Lunds Universitet

Robert Sehlén, Tekniska Verken i Linköping

Regine Ullman

David Gustavsson, projektledare ELSA och
forskningsledare på Sweden Water Research/VA SYD

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	8
Summary	11
1 Inledning	14
1.1 Läsanvisningar	15
2 Metoder	18
2.1 Inhämtning av information	18
2.2 Modellsimuleringar	20
3 Luftning på kommunala avloppsreningsverk: En nuläges- och behovsanalys	21
3.1 Hur arbetas det med luftning på avloppsreningsverken idag?	21
3.2 Vilka roller och vilken typ av kunskap har de olika aktörerna?	22
3.3 Vilka kunskapsluckor och behov finns?.....	24
3.4 Sammanfattning.....	26
4 Biologiska reningsprocesser som kräver syre	27
4.1 Avskiljning av organiska ämnen, kväve och fosfor	27
4.2 Kontinuerliga aktivslamprocesser	29
4.3 Sekventiella satsvisa reaktorer	31
4.4 Biofilmsprocesser	32
4.5 Aerobt granulärt slam	32
4.6 Membranbioreaktorer.....	33
4.7 Sammanfattning.....	33
5 Luftningssystemets uppbyggnad	34
5.1 Luftare för bottenluftning.....	35
5.2 Mekaniska luftare.....	39
5.3 Luftledningssystem.....	40
5.4 Ventiler	42
5.5 Blåsmaskiner	43
5.6 Sammanfattning.....	52
6 Masstransport av syre från gas till vätska	54
6.1 Sammanfattning.....	60
7 Luftning och energianvändning	61
7.1 Avloppsvattnets sammansättning	61
7.2 Påverkan av olika biologiska processalternativ.....	62
7.3 Påverkan av utrustning och driftsätt	63
7.4 Sammanfattning	78

8	Design och utformning av luftningssystem	79
8.1	När behövs ett nytt luftningssystem?	79
8.2	Dimensionering	80
8.3	Utformning av luftarsystem	96
8.4	Sekventiella satsvisa reaktorer (SBR)	106
8.5	Intermittent luftad process	109
8.6	Processer med suspenderade bärare (MBBR)	110
8.7	Dimensionering och val av blåsmaskiner	112
8.8	Sammanfattning	117
9	Instrumentering, styrning och reglering.....	118
9.1	Reglerteknik	118
9.2	Syrereglering.....	121
9.3	Ammoniumstyrning.....	123
9.4	Volymreglering.....	127
9.5	Styrning av SBR och intermittent luftning	128
9.6	Styrning av högbelastade aktivslamprocesser	131
9.7	Styrning av MBBR-processer	132
9.8	Styrning baserad på utgående luft från bassängen	132
9.9	Minimering av lustgas	133
9.10	Styrning av blåsmaskiner	134
9.11	Instrumentering	141
9.12	Sammanfattning.....	145
10	Drift och underhåll.....	147
10.1	Drift.....	147
10.2	Uppstart	150
10.3	Uppföljning	152
10.4	Underhåll	158
10.5	Sammanfattning.....	167
11	Test av luftningssystemets prestanda	168
11.1	Prestandatest av blåsmaskiner.....	168
11.2	Test av syreöverföring i renvatten.....	170
11.3	Test av syreöverföring i processvatten.....	175
11.4	Sammanfattning.....	180

12 Upphandling	181
12.1 Entreprenadform och upphandlingsform	181
12.2 Resurser, roller och organisation	182
12.3 Upphandlingsförfarande	185
12.4 Upphandlingsformer.....	185
12.5 Entreprenadformer (avtalsformer).....	186
12.6 Entreprenadformer under ett projekt	188
12.7 Val av entreprenadform	189
12.8 Samverkan	192
12.9 Upphandling av ett energieffektivt luftarsystem.....	195
12.10 Utvärderingskriterier	196
12.11 Prestandakrav, garantier och funktionsprovning	197
12.12 Sammanfattning.....	198
13 Modellering av luftningssystem	200
13.1 Modell för bottenluftare.....	202
13.2 Modell för luftdistribution.....	203
13.3 Modell för blåsmaskiner	203
13.4 Modell för energikostnad	204
13.5 Sammanfattning.....	204
14 Beräkningsexempel och fallstudier med erfarenheter från luftningsprojekt.....	206
14.1 Beräkningsexempel - val av blåsmaskinteknik.....	207
14.2 Fallstudie 1 - Byte av luftare på Sjölanda avloppsreningsverk i Malmö	215
14.3 Fallstudie 2 - Byte av blåsmaskiner på Bromma avloppsreningsverk.....	220
14.4 Fallstudie 3 - Luftare till Bålsta nya avloppsreningsverk och prestandatest i renvatten	227
14.5 Fallstudie 4 - Energieffektivisering vid Sternö avloppsreningsverk med ny blåsmaskin, luftare och styrning	231
15 Referenser.....	235
Bildrättigheter.....	249
Förkortningar	250
Variabler	252
Ordlista	254
Bilaga A - Processmodellering	260
Bilaga B - Enkät svar	261
Bilaga C - Syres mättnadskoncentration.....	265

Sammanfattning

När avloppsvatten renas krävs det elenergi i de olika processer som minskar vattnets föroreningsgrad innan det kan släppas ut till recipient. Vanligen står luftningen i de biologiska reningsstegen för 30–50 procent av avloppsreningsverkens totala elenergianvändning. Många svenska avloppsreningsverk har potential att minska sin energianvändning, och luftningen är en viktig del att fokusera på.

Denna rapport beskriver luftningsanläggningar vid avloppsreningsverk ur en rad olika perspektiv, samtliga med energieffektivitet i fokus. Vägledning ges för design av luftningsanläggningar samt för lämpliga metoder för styrning, drift, uppföljning och underhåll. Principerna som beskrivs illustreras med exempel och fallstudier från verkligheten samt modellsimuleringar. Vägledning ges också för upphandling av hela eller delar av luftningsanläggningen.

Det övergripande syftet med rapporten är att bidra till att svenska VA-huvudmän, konsulter och leverantörer ska kunna höja kunskapsnivån när det gäller luftningen, effektivisera befintliga anläggningar, erhålla väl designade luftningsanläggningar och upphandla så energieffektiva luftningssystem som möjligt. En viktig aspekt är att uppnå en bredare samsyn i VA-branschen kring luftningsfrågor vilket kan bidra till mer effektiva upphandlingar och bättre samspel mellan beställare, leverantörer, entreprenörer och konsulter.

De luftare för syresättning som är vanligast på kommunala avloppsreningsverk är finblåsiga luftare med flexibla perforerade membran formade som rör, tallrikar eller paneler. Ett *luftningssystem* består även av luftledningar, reglerventiler, givare, en eller flera blåsmaskiner och styrsystem. Blåsmaskiner bör ha låg energianvändning per enhet luft och vara väl anpassade för variationer i belastning vid det aktuella reningsverket. Med effektiva luftare minskar luftflödesbehovet och tillsammans kan hög luftningseffektivitet ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$) uppnås. Luftningssystemets livscykelkostnad utgörs ofta till 80–90 procent av den elenergi som används under dess livstid. Därför är det viktigt att hela luftningssystemet är energieffektivt.

Energianvändningen vid luftning påverkas av många olika faktorer. En av dessa är avloppsvattnets sammansättning, i synnerhet med avseende på ytaktiva ämnen som hindrar syreöverföring från gas till vätska. Den biologiska processens konfiguration påverkar energianvändningen genom att olika syrebehov kan uppstå och genom att de ytaktiva ämnena i vattnet får olika stort inflytande på syresättningen. Energianvändningen påverkas också av vilken utrustning som används, eftersom det exempelvis kan påverka storleken på bubblorna och turbulensen i bassängen. Med membranluftare ska såväl drift som design sträva efter att så låga luftflöden per luftare som möjligt tillämpas eftersom syreöverföringseffektiviteten då blir som högst.

Design av ett luftarsystem bör baseras på varaktighet med en bedömning av vilken maximal kapacitet som behövs för att uppnå anläggningens mål och vilken minsta kapacitet som är rimlig. Energieffektivitet kan stå i motsats till storleken på reglerområdet varför storleken för reglerutrymmet nog bör värderas mot de vinster som kan finnas med ett brett reglerutrymme. Generellt bör ett alltför brett reglerområde undvikas. Vid dimensionering av luftarsystem omvandlas belastning i form av syrebehov till standardförhållanden som innebär rent vatten, 20 °C, 1 atm lufttryck och 0 mg/l löst syre. I detta sammanhang bör beställaren fastställa de omvandlingsfaktorer som behövs och i synnerhet alfa-värdet för att anbuden ska bli jämförbara. Leverantörer utformar normalt anbud baserat på syrebehovet vid standardförhållanden.

Dimensionering av blåsmaskiner sker också med hänsyn till reglerområdet och gärna baserat på fördelningen av drifttid vid olika luftflöden. Möjligheten att reglera kapaciteten är central men de allra flesta blåsmaskiner förlorar i effektivitet när de regleras ned i kapacitet. Det är därför mycket viktigt att inte överdimensionera blåsmaskiner i onödan. De bör kunna drivas effektivt vid den belastning som är aktuell i dagsläget med utrymme att utvidga kapaciteten med fler maskiner om behov uppstår i framtiden.

Ändamålsenlig och väl fungerande *styrning* är mycket viktig för energieffektiv luftning. Utformning och instrumentering måste göra det möjligt att reglera mängden luft till anläggningen. I anläggningar som består av flera zoner behöver varje zon kunna regleras separat. Styrning av luftning mot önskad koncentration av löst syre är vanligast. De onlinegivare för ammonium som blir allt vanligare kan användas för att reglera börvärden för syrehalten vid kväverening och därmed spara energi när belastningen av kväve är låg. En ökad grad av styrning baserad på givardata leder samtidigt till att behovet av kvalitetskontroll och underhåll av givare blir större.

Vid *drift av en befintlig luftningsanläggning* kan energianvändningen reduceras genom att sänka slamåldern ifall det finns utrymme med avseende på reningsresultaten. Lägre koncentrationer av löst syre minskar också energianvändningen liksom en anpassning av profilen i löst syrehalt över anläggningens olika zoner så att lägsta möjliga luftflöden per luftare uppnås. Regelbunden motionering av membran rekommenderas och vid tecken på igensättning kan rengöring ske genom tillsats av syra i luftningssystemet.

Uppföljning av luftningssystemets prestanda ger viktig vägledning vid energieffektivisering. De parametrar som är viktigast att följa upp är trycket i systemet i förhållande till flöde och ventilöppningsgrad, lufflödet i förhållande till belastning av syrebehov och effektanvändningen för blåsmaskinerna i förhållande till syrebehov.

Upphandling av ett luftningssystem måste få ta tid och då särskilt anbuds-tiden för att säkerställa att en energieffektiv lösning hinner tas fram. En ordentlig dialog med flera konsulter, leverantörer och entreprenörer under planeringsfasen av ett projekt är ofta värdefull för att få så mycket information som möjligt innan själva upphandlingsfasen. Lämplig entreprenad-

form väljs utifrån omfattning och typ av projekt, eget ansvars-/risktagande och påverkansmöjlighet samt tillgång till kompetens och resurser. Det finns flera möjligheter att kontrollera prestandan för blåsmaskiner och luftarsystem. Garantivärden för luftarsystem kontrolleras i rent vatten och detta kan göras i en fullskalig anläggning eller i en mindre testtank.

Summary

Treatment of wastewater require electric energy to remove pollutants before the water can be discharged to a recipient. Typically, aeration represents 30–50 percent of the total electricity usage at a wastewater treatment plant. Many Swedish wastewater treatment plants have potential to decrease their electricity usage and aeration is an important aspect to focus on.

In this report, aeration at municipal wastewater treatment plants is described from different perspectives with focus on energy efficiency. Design of aeration systems is described as well as methods for control, operation, follow-up and maintenance. The outlined principles are illustrated with case studies, examples and model simulations. Guidance for procurement of aeration systems is also provided.

The overall purpose with the report is to contribute to an increased level of knowledge on aeration among Swedish wastewater treatment plants, consultants and suppliers, improved energy efficiency at existing plants, obtain well-designed aeration systems and procure as efficient systems as possible. An important aspect is to reach a broader common view in the water sector around aeration which can contribute to more efficient procurements and improved interplay between clients, suppliers, contractors and consultants.

The equipment that is most common for aeration at municipal treatment plants is fine-pore diffusers with flexible perforated membranes in form of tubes, discs or panels. *The aeration system* also comprises air distribution pipes, control valves, instruments and one or several blowers and control systems. Blowers should have low energy usage per unit of air and be conform with the variations in loading to the treatment plant. Efficient diffusers contribute to a decreased required air flow and with both together, high aeration efficiency ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$) can be obtained. The cost of electricity represents typically 80–90 percent of the life cycle cost of an aeration system. Therefore, it is most important that the entire aeration system is energy efficient.

The electricity usage for aeration is affected by a number of factors. One of these is the wastewater composition, in particular with respect to surface active compounds that hinder oxygen transfer from gas to liquid. The configuration of the biological process impacts the electricity usage since different configuration leads to different oxygen requirements and different extents of negative influence from the surface active compounds. The energy usage is also influenced by the type of equipment used since that may affect bubble size and turbulence in the tank. When using membrane diffusers, both system design and operation should aim at applying lowest possible air flow rate per diffuser since this leads to highest possible oxygen transfer efficiency.

Design of aeration systems should be based on loading durations with an assessment of which maximum capacity that is required to achieve the treatment goals with a reasonable minimum turndown capacity. A wide control range may counteract energy efficiency and thus, the size of the control range should be carefully evaluated against the potential benefits of a wide control range. An undue large control range should generally be avoided. For design of aeration systems, the contaminant loading in form of oxygen requirement is converted into standard conditions which implies clean water, 20 °C, 1 atm air pressure and 0 mg/l of dissolved oxygen. The conversion factors that should be used, and in particular the alpha-factors, should be specified by the client in order to obtain tenders that are comparable. Suppliers normally base their tenders on oxygen requirement at standard conditions.

Sizing of blowers is also based on the desired control range and preferably on the distribution of run time at different air flow rates. The ability to control the capacity is important but most blowers lose in efficiency when the capacity is turned down. It is therefore very important to avoid undue over-sizing of blowers. Blowers should run efficiently at the current loading with space available to expand the capacity in the future, if required.

Appropriate and effective *control* is very important for energy efficient aeration. The configuration and sensors should facilitate control of the rate of air flow to the system. In plants comprising several zones, each zone should have separate control. Aeration control to achieve a target concentration of dissolved oxygen is the most common strategy. The online sensors for ammonium that are increasingly installed at treatment plants can be used to regulate oxygen level set-points in nitrification plants and thereby save electricity during periods of low nitrogen loading. At the same time, an increased level of control based on instrument data leads to an increased demand for quality control and instrument maintenance.

The energy usage for *operation of existing aeration systems* can be reduced by decreasing the sludge age if there is room with respect to the treatment capacity. Lower concentrations of dissolved oxygen will also decrease the electricity usage as well as adjusting the profile of dissolved oxygen levels to achieve the lowest possible air flow rates per diffuser. Regular flexing of membranes is recommended and cleaning by acid addition to the aeration system is possible upon indications of diffuser fouling.

Following up the performance of the aeration system provides guidance for measures for improved energy efficiency. The most relevant parameters to follow up are the system pressure in relation to the flow rate and valve position, the air flow rate in relation to the loading of oxygen requirement and the blower power relative to the oxygen requirement.

In *procurement* of an aeration system, sufficient time should be allowed for suppliers to be able to develop tenders with energy efficiency solutions. A thorough dialog with several consultants, suppliers and contractors during the planning phase of a project is often valuable to obtain as much information as possible before the actual procurement. A suitable standard

contract is selected based on scope and type of project, own responsibility and risk and impact potential as well as availability of competence and resources. There are several possibilities to verify the performance of blowers and aeration systems. Warranty compliance for aeration systems can be tested in clean water at full scale or in a smaller dedicated test facility.

1 Inledning

På de kommunala avloppsreningsverken arbetas det i första hand med att åstadkomma en tillfredsställande rening av avloppsvatten så att hälsa och miljö skyddas. Detta låter sig inte göras utan användning av energi. Som alla industrier jobbar VA-huvudmännen med att minska sin energianvändning för att på så sätt minska kostnader och miljöpåverkan i strävan efter en ekonomiskt och miljömässigt hållbar verksamhet.

Det har uppskattats att elenergianvändningen vid de svenska avloppsreningsverken är minst 67 kWh/(pe·år) eller 59 kWh/(pe·år) om in- och utloppspumpar exkluderas (Balmér & Hellström, 2011; Lingsten et al., 2013). Mindre reningsverk har ofta högre energianvändning i förhållande till sin belastning. Generellt har verk med en belastning på mindre än 10 000 pe en elanvändning på över 100 kWh/(pe·år), medan större verk ligger under 100 kWh/(pe·år) (Lingsten et al., 2011).

Luftningen i den biologiska reningen står för en stor del av reningsverkens energianvändning. Det har uppskattats att luftningen står för mellan 30 % och 50 % av elanvändningen vid svenska avloppsreningsverk (Balmér & Hellström, 2011; Lingsten et al., 2013; Olsson, 2008). Liknande siffror har rapporterats från andra länder (Guo et al., 2016; Rosso, 2018; WEF, 2010).

Vid en del reningsverk är elanvändningen väsentligt under vad som är genomsnittligt. En undersökning av 11 svenska avloppsreningsverk visade att de flesta var väl energioptimerade och hade mycket låg energianvändning totalt (44 kWh/(pe·år)). För luftning var medeltalet (15 kWh/(pe·år)) med variationer mellan 5 och 25 kWh/(pe·år). Om anläggningar har krav på kväverening eller ej spelar roll (Balmér & Hellström, 2011). I Tyskland, där incitamenten för energieffektiviseringar är stora, finns riktlinjer som anger maximalt 35 kWh/(pe·år) totalt och 16 kWh/(pe·år) för luftning (Balmér & Hellström, 2011).

Sammantaget visar detta att även om vissa svenska avloppsreningsverk är väl energioptimerade, finns det många som har potential att minska sin energianvändning och i detta sammanhang är den biologiska reningen i allmänhet och luftningen i synnerhet en viktig del att fokusera på.

En luftningsanläggning består normalt av en blåsmaskin, luftledningsrör, ventiler, luftare i botten av en biobassäng, tillhörande instrument och styr- och reglerteknik. Vid anläggande av ett helt nytt reningsverk installeras en helt ny luftningsanläggning. Vid renoverings- och uppgraderingsbehov byts och/eller kompletteras normalt enbart delar av anläggningen, vilket kan leda till att förändringen kanske inte uppnår den effektivitet som systemet skulle kunna uppnå om hela anläggningen hade bytts ut. Dessa behov uppkommer med glesa intervall – ungefär vart 10:e till 20:e år – vilket innebär särskilda utmaningar. Det kan därför, i vissa fall, vara svårt för VA-huvudmännen att upprätthålla uppföljning och dokumentation men

också kunskap om luftningsanläggningens olika funktioner och bakomliggande design, liksom vilka krav som är relevanta för att säkerställa att en energieffektiv luftningsanläggning erhålls vid upphandling.

Regelbunden eller kontinuerlig uppföljning av anläggningens prestanda är en nyckel till att åstadkomma en energieffektiv luftning. Sådan information kan ge vägledning om hur anläggningen bör drivas men kan också vara värdefull vid design av om- och tillbyggnad.

I denna rapport beskrivs luftningsanläggningen vid den biologiska reningen vid avloppsreningsverk. Vägledning ges för hur design av luftningsanläggningar utförs. Lämplig tillvägagång och metoder för drift, uppföljning och underhåll beskrivs. Tidigare publicerad information angående styrning och reglering av aktivslamanläggningar (Åmand, 2013; Carlsson & Hallin, 2010; Olsson, 2008) sammanfattas och utökas med ny information om fler processlösningar och styrstrategier. Vägledning ges också för hur upphandlingar av hela eller delar av luftningsanläggningen kan gå till.

De övergripande syftena med föreliggande rapport är att bidra till att svenska VA-huvudmän, konsulter och leverantörer ska kunna:

- Höja kunskapsnivån gällande luftningen
- Hitta enkla effektiviseringsåtgärder i befintliga luftningsanläggningar
- Erhålla luftningsanläggningar som är väl designade så att de möjliggör energieffektiv drift och uppfyller övriga syften
- Föreslå riktlinjer för upphandling av luftningssystem

En viktig aspekt är att uppnå mer transparens och samsyn i VA-branschen, i synnerhet mellan dem som fastställer kapacitetsbehov och leverantörer vars utrustning ska möta denna kapacitet. Detta tillsammans med större kunskap kan förhoppningsvis bidra till mer jämförbara anbud vid upphandlingar av luftningsutrustning.

1.1 Läsanvisningar

Här följer en förklaring till rapportens struktur och några råd kring hur den kan läsas beroende på vilken typ av information som efterfrågas.

1.1.1 Rapportens struktur

En del av informationen som presenteras härstammar från annan litteratur, framförallt internationellt publicerade böcker och forskningsartiklar. Detta refereras löpande i texten och referenserna är listade i slutet av rapporten. Den största delen av innehållet är dock inhämtad på andra sätt, bland annat genom diskussioner med branschens aktörer. Hur detta har gått till, vilka organisationer som diskussioner har förts med och andra sätt som information har inhämtats på, beskrivs i *Metoder* (Kapitel 2).

En översikt över vad som framkommit när det gäller hur arbetet med luftning fungerar på avloppsreningsverken idag och vilka behov som finns i branschen, utifrån VA-huvudmännens och övriga aktörers perspektiv, ges i *Luftning på kommunala avloppsreningsverk: En nuläges- och behovsanalys* (Kapitel 3). Som inledande bakgrund beskrivs också de grundläggande

processer där syre används i reningsverket samt olika processlösningar i kapitlet *Biologiska reningsprocesser som kräver syre* (Kapitel 4).

Därefter beskrivs uppbyggnad och funktion för den utrustning som typiskt används för luftningssystem i *Luftningssystemets uppbyggnad* (Kapitel 5). I kapitlet *Masstransport av syre från gas till vätska* (Kapitel 6) ges en teoretisk bakgrund till beräkningar kring syreöverföring som bland annat behövs vid dimensionering av luftningssystem. En grundlig genomgång av hur olika faktorer med avseende på processlösning, utrustning och driftsätt påverkar energianvändningen vid luftning presenteras i *Luftning och energianvändning* (Kapitel 7). Denna sammanställning är baserad på observationer från reningsverk världen över som publicerats i litteraturen.

I kapitlet *Design och utformning av luftningssystem* (Kapitel 8) beskrivs hur dimensionering av luftningssystem med luftare och/eller blåsmaskiner går till. Här beskrivs även utformning av luftarsystemet beroende på typ av process. Principerna illustreras med beräkningsexempel och modellsimuleringar. I det följande kapitlet *Instrumentering, styrning och reglering* (Kapitel 9) presenteras de vanligaste strategierna för reglering och fördelning av luft till anläggningen samt styrning av blåsmaskiner och de instrument som behövs.

Hur en befintlig anläggning kan drivas för energieffektiv luftning samt hur den kan följas upp och underhållas beskrivs i *Drift och underhåll* (Kapitel 10). En översikt och jämförelser av de standardiserade metoder som finns för utvärdering av prestanda som lämpar sig för garantitester ges i *Test av luftningssystemets prestanda* (Kapitel 11). I kapitlet *Upphandling* (Kapitel 12) ges vägledning kring val av upphandlings- och entreprenadform samt utvärdering, garanti och prestandakrav vid införskaffande av ett energieffektivt luftningssystem.

Därefter beskriver kapitlet *Modellering* (Kapitel 13) hur och i vilka sammanhang processmodellering kan vara användbart vid design, uppföljning och utredning. Avslutningsvis, i kapitlet *Beräkningsexempel och fallstudier med erfarenheter från luftningsprojekt* (Kapitel 14), finns ett beräknings-exempel kring blåsmaskiner och fyra fallstudier som exemplifierar hur principerna har tillämpats i några konkreta situationer på reningsverk i Sverige. Listor på använda förkortningar, variabler och en ordlista med termer kring luftning tillhandahålls i slutet av rapporten.

1.1.2 Läsrekommendationer utifrån syfte

Kapitel 3–6 är tänkta som inledande bakgrund och rekommenderas för den som önskar *introduktion till luftning* med avseende på grundläggande principer och utrustning som används i dagsläget.

För den som vill *fördjupa sig i principerna* för hur olika faktorer påverkar energianvändningen vid luftning lämpar sig även Kapitel 7. Den typen av kunskap kan omsättas praktiskt för många olika syften såsom vid drift och design.

För den som vill *bättre förstå och ta hand om* sin befintliga anläggning hänvisas sedan till Kapitel 9 och 10. Dessa delar ger också vägledning till den som vill *effektivisera driften* av sin anläggning.

Inför ett *byte av hela eller en del av luftningssystemet* rekommenderas Kapitel 8 samt Kapitel 11–12 för vägledning kring design och upphandling.

Den som önskar *konkreta exempel och erfarenheter* kring hur samtliga dessa aspekter har hanterats i praktiken hänvisas slutligen till Kapitel 14.

2 Metoder

2.1 *Inhämtning av information*

Denna rapport sammanfattar resultat från projektet Effektiv Luftning på Svenska Avloppsreningsverk – ELSA, Svenskt Vatten Utveckling projekt nr. 17-112. Information har genererats och inhämtats genom litteraturstudier, diskussioner med VA-branschens aktörer, workshops med projektdeltagarna och enkätundersökningar.

Kunskap och erfarenheter har inhämtats från litteratur gällande luftning i form av böcker, rapporter, standarder och vetenskapliga artiklar på svenska och engelska.

En stor del av kunskapen har också inhämtats i samtal med ett brett urval av branschens aktörer. Information som inhämtats har diskuterats inom projektgruppen, kritiskt granskats, jämförts med andra källor innan den presenterats i föreliggande rapport. Detta för att, så långt som det är möjligt, säkerställa att information som presenteras är väl underbyggd.

Ett antal studiebesök har genomförts vid olika VA-organisationer och deras avloppsreningsverk. Vid dessa har uppbyggnad, funktion, drift och underhåll av den aktuella luftningsanläggningen diskuterats. Likaså har det diskuterats hur arbetet kring luftning är organiserat på verket liksom hur det allmänt fungerar i branschen i dagsläget. De organisationer och avloppsreningsverk som besökts är: Gryaab (Ryaverket), Kalmar kommun (Kalmar avloppsreningsverk), Karlshamns kommun (Sternö avloppsreningsverk), Karlskrona kommun (Koholmen avloppsreningsverk), Käppalaförbundet (Käppalaverket), NSVA (Öresundsverket), Stockholm Vatten och Avfall (Henriksdals och Bromma avloppsreningsverk), Tekniska verken i Linköping (Nykvarnsverket), VA SYD (Källby, Sjölunda, Ellinge, Revingeby och Flyinge avloppsreningsverk), Växjö kommun (Sundets reningsverk) och Örebro kommun (Skebäcksverket). Möte har genomförts med MIVA i Örnsköldsvik (Bodum, Knorthem, Prästbordet, Köpmanholmen och Husum avloppsreningsverk).

Diskussioner har genomförts med branschens övriga aktörer som arbetar med luftning. Inom projektgruppen inkluderar dessa entreprenörer (Purac och Veolia Water Technologies), leverantörer (Aerzen Scandinavia, ATEK Avvattningsteknik, Atlas Copco Compressor, Kaeser Kompressorer, Sulzer Pumps Sweden och Xylem Water Solutions), konsulter (Promiko och Sweco), branschorganisation (Varim) och forskningsinstitut (IVL Svenska Miljöinstitutet och RISE Research Institutes of Sweden). Därutöver har diskussioner skett med relevanta aktörer utanför projektgruppen (e-Vatek, Embreco, Erivac Konsult, GL-Turbo, H2OLAND, Hydria Water, Körting, SSI Aeration, Ventim Ventil & Instrument, Zander & Ingeström med flera).

Följande workshops har genomförts för att stimulera utbyte av kunskap inom projektgruppen:

- Design och utformning av luftningssystem (2 st)
- Instrumentering, styrning och reglering (tillsammans med projektet Instrumentera rätt på avloppsreningsverk, IRPA, Svenskt Vatten Utveckling projekt nr. 16-112)
- Upphandling av luftningsutrustning (2 st)
- Drift och underhåll av luftningsutrustning
- Fallstudier

Besök har genomförts på IFAT-mässan i München (maj 2017) där luftningsutrustning diskuterades med leverantörer av membranluftare (Aeroflex, AeroStrip, Bioworks, EDI, Ekoton, Grundfos, Invent, Jäger, Messner, SSI Aeration och Supratec), mekaniska luftare (Aeration Industries International och AquaTurbo) och blåsmaskiner (Aerosys, Aerzener, APG Neuros, Haus, NextTurbo, PillAerator och Gardner Denver).

Besök har genomförts på VA-mässan i Jönköping (september 2017) där luftningsutrustning diskuterades med ytterligare svenska leverantörer (MAF, Malmbergs, Järven, Scandia Pumps och AxFlow).

Nuläges- och behovsanalysen är baserad på intervjuer med personer som arbetar med luftning, antingen praktiskt i VA-organisationer (drifttekniker och processingenjörer) eller som entreprenörer eller leverantörer av utrustning.

En enkätundersökning bland reningsverk har genomförts för att kartlägga hur det arbetas med drift och underhåll av luftningsutrustning i dagsläget. Denna enkät skickades till 16 st reningsverk och besvarades av 15 st. Enkäten skickades till reningsverk som var representerade i projekt- och referensgrupperna med flera, och utgjorde en blandning gällande storlek, utformning och utsläpssvillkor. Två enkätundersökningar genomfördes också för att klarlägga leverantörernas rekommendationer av underhåll för blåsmaskiner respektive luftare.

Fallstudierna som finns beskrivna är baserade på intervjuer med och dokument från de aktuella VA-bolagen samt involverade entreprenörer, leverantörer och konsulter.

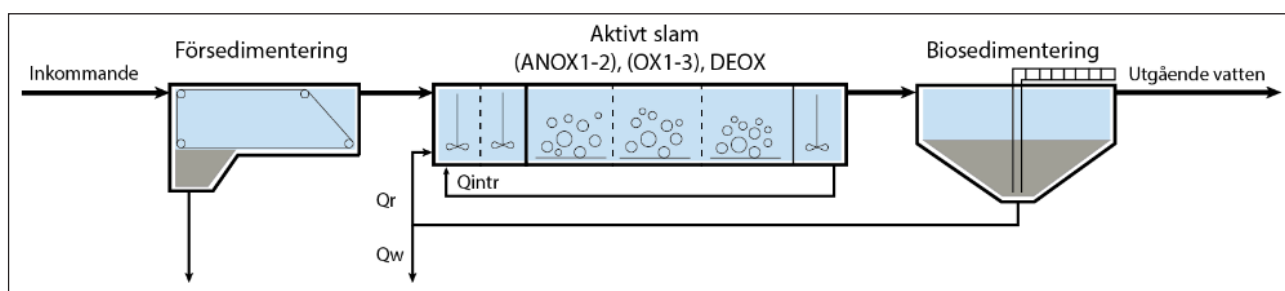
2.1.1 Avgränsningar

Denna rapport fokuserar på luftning vid den biologiska reningen och således inkluderas inte luftning som kan förekomma på övriga delar av avloppsreningsverk såsom sandfång, kanaler, flotation med mera. Rapporten inkluderar inte ”membrane aerated biofilm reactors” (MABRs). Endast luftning med luft från omgivningen ingår och alltså inte tillsats av ren syrgas. Ytluftning berörs endast översiktligt eftersom denna teknik är relativt ovanlig på svenska kommunala avloppsreningsverk. Biobäddar och biorotorer inkluderas inte. Behandling av industriavloppsvatten ingår inte, men vissa viktiga faktorer som behöver beaktas för kommunala anläggningar med hög andel industribelastning beskrivs.

2.2 Modellsimuleringar

För att illustrera vissa av de principer som beskrivs kring design och drift av luftningssystem har processsimuleringar genomförts. Exempel baserade på dessa simuleringar återfinns i Kapitel 8 (Design och utformning av luftningssystem) och Kapitel 10 (Drift och underhåll).

Som grund för simuleringarna designades ett ”exempelreningsverk” med belastning och bassängvolym. Belastningen till reningsverket motsvarade ungefär 40 000 personequivallenter (pe). Konfigurationen i två parallella linjer hade försedimentering med förfällning samt ett biosteg baserat på fördenitrifikation med tillhörande biosedimentering. Reningsverket i modellen designades utifrån givna förutsättningar om belastning och önskad reningsprestanda. En schematisk bild över modellens uppbyggnad och inkluderade processer redovisas i Figur 2.1.



Figur 2.1 Schematisk bild över det modellerade reningsverket.

En modell för exempelreningsverket byggdes upp baserat på Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2; Gernaey et al., 2014). Biosteget delades in i sex reaktorer i serie varav två oluftade (ANOX1 & 2), tre luftade (OX1, 2 och 3) samt en avslutande avluftningszon (DEOX). Luftningssystemen modellerades efter principen beskriven av Arnell (2016). Alfavärdet antogs variera längs reaktorlängden och för OX1 till OX3 användes 0,6, 0,8 och 0,9. Detaljer kring processmodellen finns i Bilaga A.

3 Luftning på kommunala avloppsreningsverk: En nuläges- och behovsanalys

3.1 *Hur arbetas det med luftning på avloppsreningsverken idag?*

De flesta kommunala avloppsreningsverken i Sverige har ett biologiskt reningssteg som luftas. Undantag är vissa verk som istället använder biobäddar där avloppsvattnet sprids över en fast bädd med bärarmaterial. I denna process syresätts vattnet i samband med spridningen över bädden och luftning behövs därmed inte. Istället behövs pumpning för att cirkulera vattnet över bädden, och det blir då istället detta som kräver energi.

En enkätundersökning genomfördes bland 16 avloppsreningsverk, varav 15 inkom med svar. Framställningen nedan bygger på dessa svar, som finns presenterade i närmare detalj i Bilaga B, och har kompletterats med intervjuer. Information inhämtad från VA-branschens övriga aktörer ligger också till grund.

Bland de reningsverk som tillämpar luftning dominerar finblåsigt luftning med blåsmaskin och någon form av membranluftare. Av dessa verk hade endast 1 av 15 (7 %) en annan typ av luftning, nämligen ytluftning. Hade underlaget varit större hade antagligen andelen med ytluftning varit ännu lägre då detta är ovanligt vid svenska kommunala avloppsreningsverk.

Den dagliga driften och bevakningen av luftningssystemet utförs oftast av en drifttekniker eller driftingenjör tillsammans med en processingenjör. Den dagliga bevakningen av luftningssystemet innefattar vanligtvis:

- Kontroll av syrehalt, utgående ammoniumhalt, luftflöden, ventilöppningsgrad, lufttryck och blåsmaskinens frekvens.
- Dränering av kondensvatten från luftarsystemet.
- Visuellt översyn av lufttillförsel och bubblor.
- Tillsyn av mekanisk utrustning.

Eventuella behov av justering av börvärden för löst syrehalt, ammoniumhalt och antal luftade zoner sker sedan ofta av en drift- eller processingenjör.

Arbete med effektivisering av energianvändning förekommer, men har en större plats vid införskaffande av ny utrustning än i den dagliga driften. Vid driften arbetas det på vissa verk med att till exempel utvärdera drift vid lägsta möjliga halt av löst syre. Ammoniumstyrning användes på 27 % av verken för att kontinuerligt anpassa luftningen efter kvävereningen. Bland de övriga hade en stor andel manuellt anpassade börvärden för att uppnå tillräcklig kväverening (47 %) eller annat mål som halten av biokemiskt syreförbrukande ämnen (BOD) (7 %) medan 20 % använde en löst syrekonzentration enligt konvention eller tumregel som 2 mg/l. Drift vid lägre koncentrationer av löst syre än vad som nu tillämpades hade utvärderats av 60 %.

Vanligtvis mäts avloppsreningsverkens totala elanvändning och rapporteras i den årliga miljörapporten. Vid en del verk rapporteras även total elanvändning i förhållande till avskild eller ingående kväve eller mängden BOD. Årlig uppföljning av elanvändningen för luftning (per pe och per kg syrebehov) har föreslagits som ett nyckeltal (Balmér & Hellström, 2011), men gjordes inte vid så många av de tillfrågade reningsverken. Av de undersökta verken var det 73 % som aldrig följer upp elanvändning för luftning i förhållande till syrebehovet i processen. Uppföljning av luftflödet i förhållande till syrebehovet utförs aldrig av 67 % och mer sällan än vart 5:e år av resterande. Detta är därmed något som i första hand utförs för att skapa underlag inför byte av utrustning. Det tycks däremot vara sällsynt med regelbunden uppföljning av elanvändning och luftflöde i förhållande till syrebehov i syfte att säkerställa en energieffektiv drift eller optimera driften. Trender i luftflöden och tryck över tiden eller mellan linjer följs oftare upp. Detta kan indikera förändringar i effektiviteten, men kan inte direkt särskiljas från förändringar i belastningen. Anledningar till att noggrannare uppföljning i form av elanvändning eller luftflöde i förhållande till syrebehov inte utförs kan vara att dessa nyckeltal inte har lyfts upp och prioriterats inom VA-organisationerna.

En leverantör av blåsmaskiner uttryckte sig så här drastiskt:

”Kunderna på reningsverken är ofta nöjda med sina blåsmaskiner ifall de kan tillgodose syrebehovet i processen och ljudvolymen är någorlunda låg. De vet sällan om systemet faktiskt fungerar energieffektivt eller inte.”

Någon form av styrning mot halten av löst syre eller ammonium har förekommit på alla de 22 reningsverk som kontaktats i samband med denna studie (de 16 som ingick i enkätstudien plus 6 ytterligare reningsverk) utom det allra minsta (1 500 pe). Många reningsverk strävar efter en mer styrningsintensiv drift. Ammoniumåterkoppling för automatisk reglering av börvärden för löst syrehalt är ett exempel på detta. Mer automation kan potentiellt ge en säkrare, mer energieffektiv och mindre arbetsintensiv drift. Samtidigt leder det till ett större beroende av instrument och att dessa kontrolleras, underhålls och kalibreras i tillräcklig grad. Rengöring av syrehaltsmätare sker i första hand manuellt, och endast automatiskt på 20 % av de undersökta verken. Manuell rengöring av syregivare sker vanligtvis en gång per vecka (40 %), varannan vecka (20 %) eller en gång per månad (27 %).

3.2 Vilka roller och vilken typ av kunskap har de olika aktörerna?

Det är stor skillnad när det gäller vilken kunskapsnivå gällande luftning som olika VA-huvudmän och avloppsreningsverk har möjlighet att upprätthålla. En viktig faktor är att de tillfällen då det arbetas mer intensivt med luftning, det vill säga i samband med projekt som ombyggnad eller byte av utrustning, infaller så sällan som var 10–20:e år. Däremellan finns risk att detaljkunskap hinner falla i glömska eller påverkas av personalomsättning. Det kan därför vara en utmaning att bibehålla fundamental

kunskap om luftning, veta vad som är viktigt för energieffektiviteten och hålla sig à jour angående tekniken som erbjuds på marknaden.

Hos större VA-huvudmän, som större kommuner eller flerägda VA-organisationer (flerägda kommunala bolag eller kommunalförbund), blir volymen av projekt som rör luftning liksom energikostnaderna större på grund av fler och/eller större reningsverk. Stordriftsfördelarna avseende personal och investering gör också att de påverkbara kostnaderna utgör en större andel av den totala driftkostnaden. Därmed blir det också mer motiverat att avsätta resurser för att minska energikostnaderna. Dessa resurser kan antingen vara en del av drift- eller processavdelningen inom organisationen eller en separat, central projektavdelning.

En centralt placerad projektledning inom VA-organisationen kan innebära bra förutsättningar att upprätthålla hög teknisk kompetens om luftning. Samtidigt finns risken att en sådan avdelning hamnar en bit ifrån driften, vilket kan vara en brist när de gäller kopplingen till erfarenheter av dagens anläggning. Det har nämnts som en faktor för lyckade luftningsprojekt att det finns en eller flera personer som är nära kopplade till driften men ändå har utrymme att driva projekt. Under dessa förutsättningar, om det exempelvis finns flera processingenjörer, kan erfarenhet av dagens anläggning och hög specifik teknisk kompetens om luftning finnas hos samma person eller personer.

På ett av de besökta reningsverken finns en driftsorganisation med sex personer där de dagliga arbetsuppgifterna roterar med en vecka i taget. Utöver det finns personliga ansvarsområden där energianvändning är ett av dessa. Ansvaret för energi inkluderar då såväl användning för luftning, omrörning, pumpning med mera som generering av fordonsgas och el från biogas. Att samla ett sådant övergripande ansvar hos en person kan vara ett bra sätt att prioritera en effektiv energianvändning.

Citat från ett enkätsvar:

”Luftningssystem kan vara hur avancerade som helst men finns det inte kompetent personal får man inte tillbaka de vinster man tror sig se vid en upphandling.”

För de VA-huvudmän som behöver stöd inför luftningsprojekt finns såväl större som mindre konsultfirmor att anlita. Många av dessa har kunskap och erfarenheter kring luftning när det gäller dimensionering och utformning, val av utrustning och upphandling. Tidigare arbete med det aktuella reningsverket kan vara en fördel eftersom de lokala förutsättningarna då är bekanta.

De entreprenörer som tillhandahåller genomförande av luftningsprojekt på reningsverk kan också ha rollen som konsulter i samverkansprojekt. Entreprenörer kan erbjuda processgaranti och därmed ta ansvar för anläggningens övergripande funktion såsom utsläppvärden.

Leverantörer av luftare har gedigen kunskap om hur ett visst syrebehov i processen kan mötas med lämpliga produkter i form av luftare i ett väl utformat system. Luftarsystemets design och utformning kommer att bero

på processens behov av syre, dynamiken i detta behov, det vill säga reglerområdet mellan min- och maxbehovet, och fysiska förutsättningar som bassängernas och zonernas dimensioner. Vissa leverantörer av luftarsystem erbjuder även blåsmaskiner.

Leverantörer vars huvudsakliga inriktning är blåsmaskiner (utan tillhörande luftarsystem) har ofta ett lite annorlunda fokus. För vissa leverantörer av blåsmaskiner är luftning vid avloppsvattenrening ett betydande marknadssegment. För andra leverantörer kan det vara ett mer marginellt segment, jämte andra tillämpningar för maskinerna som pneumatisk transport inom tillverknings- och livsmedelsindustrin eller kompression för tryckluft. Leverantörer av endast blåsmaskiner avgränsar vanligtvis sitt fokus till dessa och lämnar vad som sker i övriga delar av luftningssystemet därhän.

Leverantörer av blåsmaskiner utgår från ett behov i form av önskat luftflöde och tryck i processen tillsammans med omgivningsförhållanden i form av temperatur, lufttryck och kanske begränsning i fysisk plats. Utifrån detta behov och dynamiken i detsamma, som varaktighet vid olika luftflöden, kan de föreslå en eller flera maskiner och lämplig samordning i form av styrning för dessa. Detta bygger således på att reningsverket, konsult eller entreprenör, eventuellt i samverkan med leverantör av luftare, har samlat in data för belastningen och gjort antaganden och beräkningar för att fastställa behovet av luft.

Det finns en trend mot att fler leverantörer erbjuder både blåsmaskiner och luftare. Detta gör det möjligt att ta hänsyn till hela kedjan från processens behov till generering av luftflödet. Sannolikt är detta en positiv utveckling då det kan leda till bättre möjlighet till optimering och mindre risk för överdimensionering. När det som i detta sammanhang finns en kedja av aktörer (till exempel VA-huvudman, konsult, entreprenör, luftarleverantör och blåsmaskinleverantör) finns en allmän risk för överdimensionering. Detta på grund av att varje aktör lägger på en viss marginal i sin design eftersom det finns ett litet incitament att ta risken för att få ett underdimensionerat system. Konsekvensen vid en underdimensionering är större än vid överdimensionering. Den sammanlagda marginalen kan då i slutänden bli onödigt stor.

3.3 *Vilka kunskapsluckor och behov finns?*

Baserat på samtal med branschens aktörer som VA-huvudmän, konsulter, entreprenörer och leverantörer har en mängd behov identifierats, som är hindrande för implementering av energieffektiv luftning. Ett axplock av de aspekter som varit återkommande presenteras nedan:

Utrustning och teknisk utformning:

- På den internationella marknaden finns ett större utbud av luftningsutrustning än vad som erbjuds i Sverige. Ett exempel på detta är panel-luftare som är vanliga på kontinenten men än så länge sällsynta i Sverige. Att beakta ett bredare utbud av produkter kan öka möjligheterna till energieffektiva lösningar.

- Alfa-värdet har en betydande inverkan på dimensioneringen av luftningsanläggningen. Samtidigt råder stor osäkerhet om denna parameter då den sällan mäts och ofta varierar över tid och längs reningsanläggningen.
- En utveckling har skett från blåsmaskiner med fasta varvtal eller två hastigheter (hög/låg-reglering) till maskiner med frekvensomriktare för variabel hastighet. Det kan fortfarande finnas utrymme för fastvarviga maskiner i kombination med frekvensstyrda.
- Det är vanligt att använda flera lika stora blåsmaskiner. Ofta kan det istället vara fördelaktigt att kombinera maskiner med olika storlekar.
- Den ljudvolym som luftningssystemet ger upphov till påverkar arbetsmiljön. Den volym som maskinerna i sig orsakar är ofta väl definierad, men i praktiken uppstår ljudet i samverkan med luftningssystemets andra delar som rörsystemet. Av denna och andra anledningar är rördragning en viktig aspekt.
- Ibland baseras dimensionering på befolkningsprognoser som har en betydande osäkerhet.

Skilda förutsättningar för små och stora reningsverk:

- Valet av dimensionerande belastning för processen är komplex. En väl tilltagen dimensionering gör det svårare att reglera ned anläggningen vid låg belastning vilket påverkar energieffektiviteten. Det finns i synnerhet många mindre anläggningar som har höga syrehalter under nästan varje dygn.
- Små reningsverk utsätts ofta för större belastningsvariationer och därför större reglerområde vilket också är en nackdel energimässigt.
- Många åtgärder för energieffektivisering är kända men hur bör prioritering ske mellan dessa? Vilka åtgärder har rimlig återbetalningstid även på ett mindre reningsverk? Under vilka förutsättningar är det till exempel rimligt att implementera mer avancerad styrning som ammoniumåterkoppling?
- Många mindre reningsverk har bara en eller två parallella linjer. Färre linjer gör det svårare med byte av luftare men även att göra jämförelser med olika utrustning eller driftsätt.

Drift och styrning:

- Utveckling av styrstrategier har ofta fokuserat på kväveavskiljning. Men många aktivslamanläggningar i Sverige drivs utan kväverening, antingen i avsaknad av utsläppskrav för kväve eller eftersom kväverening sker nedströms. Styrstrategier för optimal energieffektivitet vid avskiljning av i huvudsak organiskt material är mindre välkända. Hur lågt kan exempelvis löst syrehalt hållas i dessa anläggningar?
- Styrstrategier för aktivslamprocesser som är kontinuerliga med avseende på flöde och luftning är relativt väldokumenterade. Detta gäller inte i samma grad styrstrategier för sekventiella satsvisa reaktorer (SBR), intermittent luftning och processer med suspenderade bärare.

Upphandling:

- Ibland förekommer alltför fixerade villkor i upphandlingar vilket då kan förhindra leverantörerna att föreslå de mest energieffektiva lösningarna. Vilka krav ska ställas på utrustningen beroende på typ av projekt och behov?
- Ofta saknas kontroll och uppföljning av den garanterade prestandan vilket kan lämna utrymme att leverera utrustning som inte uppnår vad som utlovats. Möjligheter att verifiera prestandan finns men kunskap kring hur detta görs är inte allmänt spridd.
- Det finns en bred samsyn om att livscykelkostnad (LCC) är ett bra kriterium för utvärdering av anbud. Likaså är det relativt vanligt med upphandlingar som inte baseras på LCC. Användning av LCC ökar samtidigt behovet av prestandakontroll.
- I ett projekt med stor volym, som en total- eller funktionsentreprenad som inkluderar bygg, är luftningen enbart en liten del. I dessa sammanhang finns en risk att drivkrafterna att välja en energieffektiv teknik inte är tillräckligt starka.

3.4 Sammanfattning

Mer kunskap om luftningsanläggningar och dess design, drift, underhåll och upphandling hos VA-huvudmännen kan leda till högre energieffektivitet på flera sätt. Kunskap om drift och styrning kan användas för att förbättra användningen av den befintliga anläggningen. Men bättre kunskaper om luftningssystem och dess principer kan också leda till högre kompetens i rollen som beställare. Genom att förstå hur kravställning, utvärdering och garantier bör utformas kan samspelen mellan beställare, leverantörer, entreprenörer och konsulter förbättras med effektivare tekniska lösningar som följd. Exempelvis kan onödigt överdimensionering minskas, vilket annars tenderar att ske när varje aktör i en kedja lägger på en viss marginal i sin design. Både incitament och förutsättningar för att prioritera arbetet med energieffektivitet skiljer stort mellan stora och små avloppsreningsverk.

4 Biologiska reningsprocesser som kräver syre

Biologisk rening av kommunalt avloppsvatten sker normalt i ett steg som är luftat, det vill säga att det drivs under syresatta, *aeroba*, förhållanden. Mikroorganismer i form av till exempel bakterier och protozoer tillgodo- gör sig föroreningar såsom organiska ämnen och närsalter i avloppsvattnet. Dessa mikroorganismer bildar en biomassa som genom att växa till (öka i mängd), för att sedan avskiljas, renar avloppsvattnet. Många föroreningar kan också brytas ned under syrefria, så kallade *anaeroba*, förhållanden. Att aerob avloppsvattenrening istället tillämpas så ofta beror på att aeroba processer är robusta, tåliga och fungerar effektivt även vid låga temperaturer, samt att låga koncentrationer av föroreningar i det behandlade vattnet kan uppnås. Att mikroorganismerna kan använda syre vid oxidering av organiskt material ger dem relativt mycket energi vilket är anledningen till att de även kan växa till vid låga temperaturer, men för också med sig bieffekten att de kan öka rejält i mängd och därmed bilda rikligt med överskottsslam.

4.1 Avskiljning av organiska ämnen, kväve och fosfor

När bakterier och andra mikroorganismer använder syre kan de oxidera organiska ämnen till koldioxid och samtidigt reducera syret till vatten. På så sätt får mikroorganismerna den energi de behöver för att kunna nybilda cellmaterial och växa till. Detta kallas *heterotrof* nedbrytning och resulterar framförallt i att organiska ämnen och syre omvandlas till koldioxid och biomassa (slam). Eftersom de nya bakterierna som bildas också behöver innehålla en del andra typer av ämnen som kväve (N) och fosfor (P) för att fungera och växa till, avskiljs samtidigt en viss del av dessa ämnen från avloppsvattnet vid sidan av de organiska ämnena (Tabell 4.1). Denna avskiljning av N och P för tillväxt av slam kallas för *assimilering*.

Det organiska materialet i avloppsvatten består av en mycket stor mängd olika typer av ämnen. Istället för att mäta halterna av enskilda ämnen individuellt, mäts därför vanligtvis det organiska innehållet med någon metod som ger ett mått på den sammanlagda koncentrationen av organiska ämnen. De vanligaste parametrarna för att uppskatta mängden av organiska ämnen är:

- Biokemisk syreförbrukning, BOD ("biochemical oxygen demand")
- Kemisk syreförbrukning, COD ("chemical oxygen demand")
- Totalt organiskt kol, TOC ("total organic carbon")

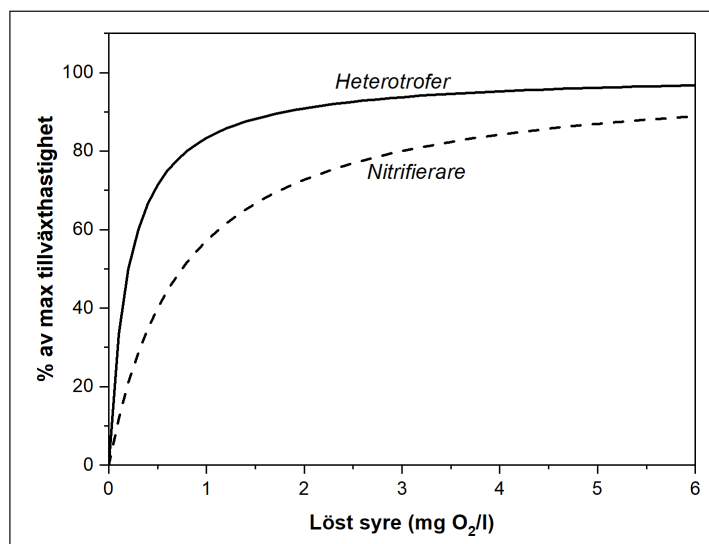
BOD och COD anger indirekt koncentrationen av organiska ämnen genom att visa hur mycket syre som går åt för att oxidera dem, antingen biologiskt (till koldioxid och biomassa) eller kemiskt (till endast koldi-

oxid). TOC anger hur mycket kol som finns närvarande i form av organiska ämnen.

Vissa bakterier kan utföra *nitrifikation* vilket innebär att de med hjälp av syre oxiderar ammonium till nitrit och sedan vidare till nitrat. Medan en del av dessa bakterier oxiderar ammonium till nitrit (NO_2^-), kan andra oxidera nitrit till nitrat (NO_3^-). Nyligen har det också visat sig att det finns bakterier som kan oxidera ammonium hela vägen till nitrat. Nitrifikation är en *autotrof* process vilket innebär att bakterierna tar upp koldioxid som kolkälla och reducerar den för att skapa ny biomassa. Inga organiska ämnen tas därför upp från avloppsvattnet.

Mikroorganismer har ett visst behov av syre även när inga föroreningar (= näringsämnen) finns närvarande och de därför inte kan växa till. Detta syrebehov är relaterat till att cellerna ska överleva och hålla sina system för ämnesomsättning aktiva tills det blir möjligt att växa till igen. En mindre del av biomassan sönderfaller också i mindre molekyler som blir tillgängliga för tillväxt av nya celler. Summan av dessa processer ger upphov till *endogen respiration* som utgör en bakgrunds nivå av syrebehov i frånvaro av andra ämnen som mikroorganismerna kan använda.

I jämförelse med de heterotrofa mikroorganismerna kräver nitrifierarna högre koncentrationer av löst syre för att fungera optimalt, det vill säga växa till med sin högsta möjliga hastighet (Figur 4.1). Nitrifierande mikroorganismer har lägre *affinitet* för syre, det vill säga lägre förmåga att tillgodogöra sig syre vid låga koncentrationer.



Figur 4.1 Nitrifierande mikroorganismer har lägre affinitet för syre än heterotrofer och kräver därför högre koncentrationer av löst syre för att uppnå sin maximala tillväxthastighet.

Nitrifierarna växer till långsamt relativt heterotrofer på grund av deras autotrofa livssätt och låga energivinst vid oxideringen av ammonium. Därför krävs en högre slamålder för att behålla dem i reningssystemet i jämförelse med avskiljning av endast organiskt material. Slamåldern är ett mått på mikroorganismernas genomsnittliga uppehållstid i anläggningen.

Nitrifierarna har också en högre temperaturkänslighet vilket leder till att extra lång slamålder krävs vintertid då vattnets temperatur är som lägst.

Om inget syre finns tillgängligt, kan vissa heterotrofa mikroorganismer istället använda nitrat för att bryta ner organiskt material. Förhållanden utan syre men med nitrat närvarande kallas *anoxiska*. Under sådana förhållanden omvandlas nitrat till kvävgas som avges till atmosfären. Denna process kallas *denitrifikation*. Vid låg syrehalt kan ibland nitrifikation och denitrifikation ske simultant genom att anoxiska områden bildas inne i flockarna samtidigt som nitrifikation sker i flockarnas ytskikt.

Biologisk fosforavskiljning bygger på att mikroorganismerna utsätts för omväxlande anaeroba och aeroba förhållanden. Vid aeroba förhållande använder de polyfosfatackumulerande mikroorganismerna syre som energikälla för att lagra fosfor inuti cellerna i form av polyfosfat.

Förutom de biologiska processerna kan även kemisk oxidering ske i luftningsbassängen vilket också kräver syre. Ett exempel på detta är oxidation av tvåvärt järn vid användning av järnsulfat vid simultanfällning. Svavelväte i inkommande avloppsvatten kan också förbruka syre för kemisk oxidation medan metan i inkommande vatten kan förbruka syre via biologisk metanoxidation.

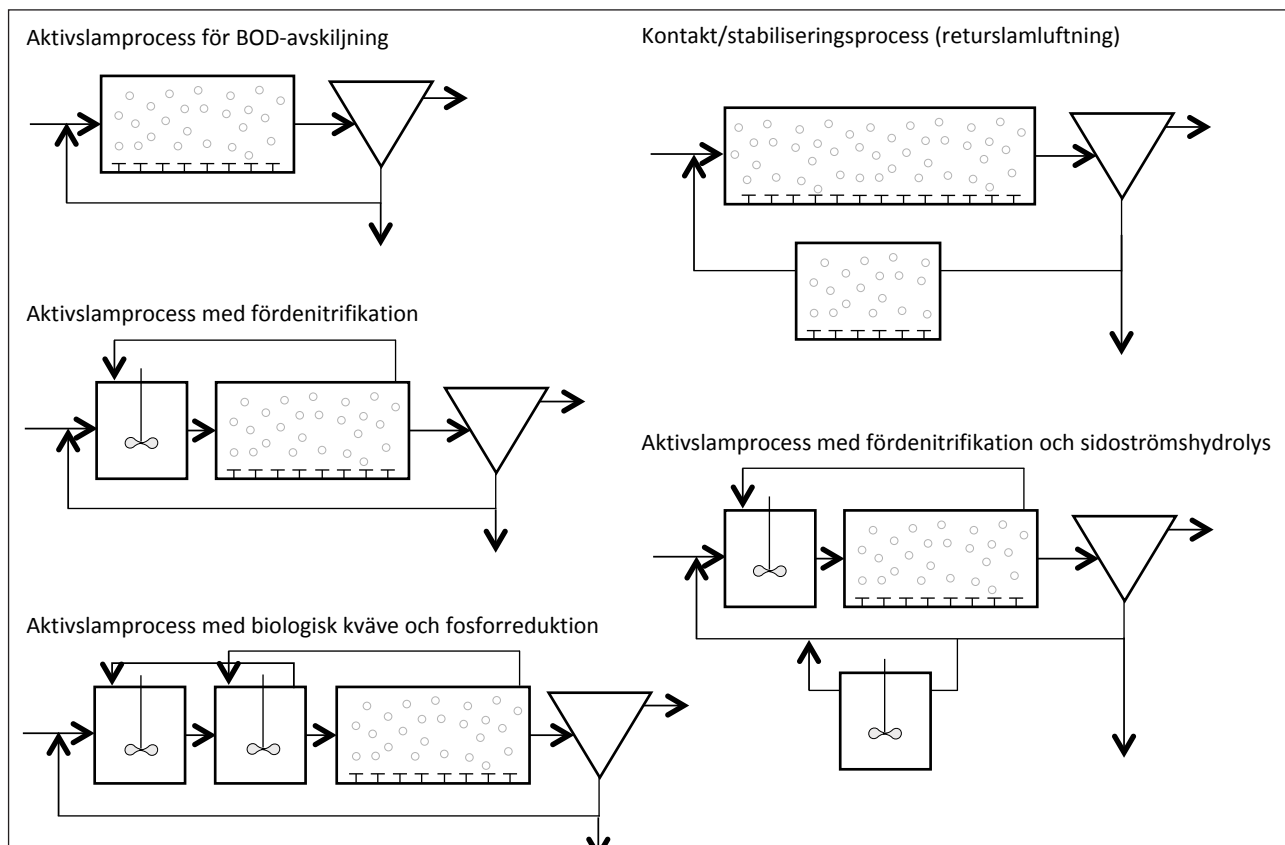
Tabell 4.1 Sammanställning av de vanligaste reaktionerna som sker i aktivt slam som kräver syresatt vatten. Organiskt material i avloppsvatten kan beskrivas med denna genomsnittliga formel: $C_{18}H_{19}O_9N$ (Henze et al., 2010).

Heterotrof tillväxt:
$C_{18}H_{19}O_9N + 17,5 O_2 + H^+ \rightarrow 18 CO_2 + 8 H_2O + NH_4^+$
Heterotrof tillväxt med produktion av biomassa ($C_5H_7NO_2$):
$C_{18}H_{19}O_9N + 0,74 NH_3 + 8,8 O_2 \rightarrow 1,74 C_5H_7NO_2 + 9,3 CO_2 + 4,52 H_2O$
Nitrifikation, oxidation av ammonium:
$NH_4^+ + 3/2 O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+$
Nitrifikation, oxidation av nitrit:
$NO_2^- + 1/2 O_2 \rightarrow NO_3^-$
Oxidation av järn:
$4 Fe^{2+} + O_2 + 4 H^+ \rightarrow 4 Fe^{3+} + 2 H_2O$
Oxidation av vätesulfid:
$2 H_2S + O_2 \rightarrow 2 H_2O + 2 S$
Oxidation av metan:
$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$

4.2 Kontinuerliga aktivslamprocesser

I aktivslamprocessen tillsätts syre i överskott för att skapa aeroba förhållanden för BOD-nedbrytning och eventuellt nitrifikation. Mikroorganismerna sedimenterar i en separat sedimenteringsbassäng och återförs

till reaktorvolymen. Sedimentering av mikroorganismerna är möjlig tack vare att de växer till i form av flockar. Aktivslamprocessen har varit känd i mer än 100 år och används fortfarande flitigt världen över eftersom den är väl beprövad och anses robust. Det finns en uppsjö av olika varianter av aktivslamprocessen med olika syften såsom endast avskiljning av organiskt material (BOD), BOD-rening och nitrifikation, BOD- och kväverening med för- eller efterdenitrifikation, biologisk fosforavskiljning med mera. Några av dessa processer finns avbildade i Figur 4.2.



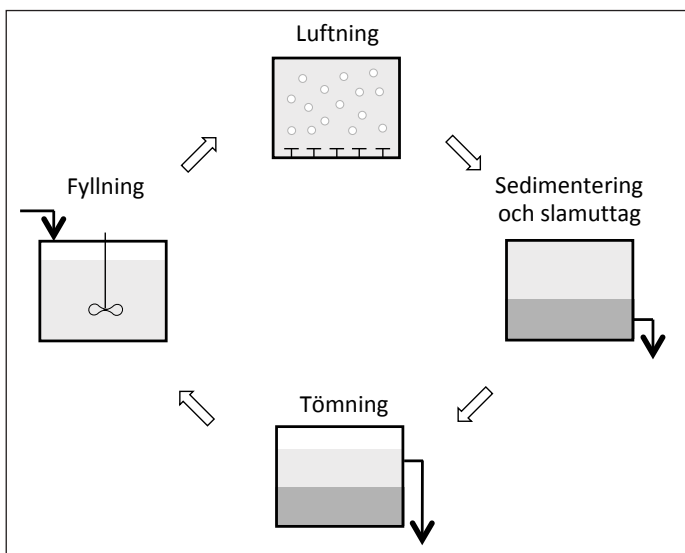
Figur 4.2 Exempel på processkonfigurationer för aktivslamprocessen.

Det mest typiska i en kontinuerlig aktivslamprocess för kväveavskiljning är att nitrifikation och denitrifikation sker i separata volymer som är luftade respektive endast omrörda. Men en kontinuerlig aktivslamprocess kan även vara intermittert luftad. Då erhålls nitrifikation och denitrifikation omväxlande i samma volym genom att luftningen omväxlande är igång och avstängd. Dessa faser kan typiskt vara från några minuter till några timmar. I en särskild variant av intermittert luftad process används två volymer som alternerande tar emot flödet av ingående avloppsvatten (Biodenitro™). De två volymerna drivs så att den som för tillfället tar emot avloppsvatten oftast är oluftad samtidigt som den andra är luftad och levererar behandlat utgående vatten. Sedan växlas förhållandena så att nitrat i den tidigare luftade bassängen kan denitrifieras.

4.3 Sekventiella satsvisa reaktorer

Aktivslamprocessen drivs ofta med ett kontinuerligt flöde genom processen. Men det förekommer också processer där reningen sker satsvis vilket är fallet i sekventiella satsvisa reaktorer (SBR, "sequencing batch reactor"). Dessa drivs i en sekvens där inmatning till reaktorn sker under en viss del av sekvensen (Figur 4.3). När inmatningen är utförd följer nästa fas som kan vara att reaktorn luftas utan att någon inmatning sker. Därefter följer en fas av sedimentering med avstängd luftning och omrörning, där slammet tillåts sjunka till reaktorns botten. I en efterföljande fas dekanteras klarfasen av det behandlade vattnet ut från reaktorn och därefter kan nästa cykel starta genom att obehandlat vatten återigen matas in. En typisk cykellängd är någon eller några timmar. Behandling av kommunalt avloppsvatten med SBR:er kräver antingen att flera parallella reaktorer finns, så att någon reaktor hela tiden befinner sig i fyllnadsfas, eller att inkommande vatten lagras i buffertvolym mellan fyllningarna.

På grund av den satsvisa driften blir syrebehovet i SBR:er dynamiskt med avseende på tid, även om belastningen skulle vara konstant. Under fyllning och strax därefter föreligger de högsta koncentrationerna av föroreningar i reaktorn. Eftersom hastigheterna med vilka mikroorganismerna konsumerar föroreningarna beror på föroreningarnas koncentrationer leder det till höga reaktionshastigheter. Det leder till ett stort syrebehov under denna del av cykeln. Efterhand som koncentrationerna sjunker på grund av mikroorganismernas aktivitet, sjunker också reaktionshastigheterna och därmed syrebehovet. Dynamiken i syrebehov är densamma som i en kontinuerlig process även om den sker i tid istället för längs reaktorn, vilket är fallet om den kontinuerliga processen har en lång-smal utformning (pluggflöde).

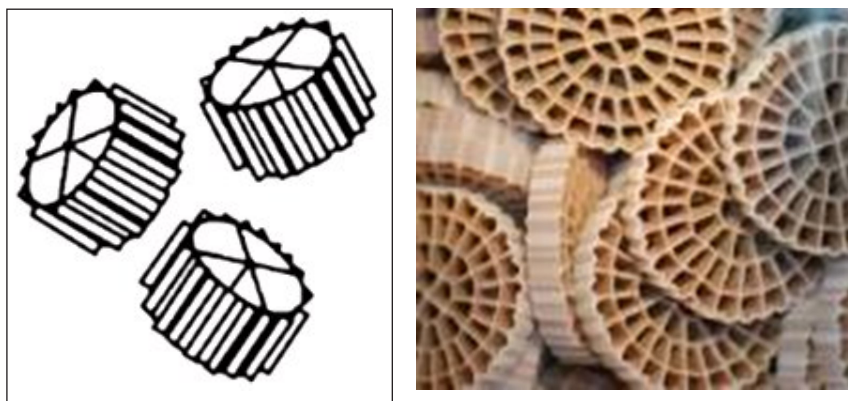


Figur 4.3 Typiska faser för en cykel vid drift av en SBR.

4.4 Biofilmsprocesser

Som ett alternativ till att låta mikroorganismerna sedimentera för att behålla dem i reningsprocessen, finns också processer där mikroorganismerna tillåts växa på någon form av bärmaterial och där bilda en biofilm. Genom att bärmaterialet kvarhålls i reaktorn kan en hög koncentration av mikroorganismer hållas och därmed en process utan återföring av slam till reaktorvolymen. Överskottsslammet som bildas avskiljs från det behandlade vattnet genom exempelvis sedimentering, flotation eller filtrering.

I så kallade suspenderade bärarprocesser eller MBBR ("moving-bed biofilm reactors") används biofilmsbärare av plast (Figur 4.4) som hålls omrörda i reaktorn med hjälp av luftningen eller omrörare. Bärarna kvarhålls i reaktorn med hjälp av silar monterade vid reaktorns utlopp. MBBR kan också kombineras med aktivt slam genom en efterföljande sedimentering och slamrecirkulering vilket gör att mikroorganismerna både kan växa på bärmaterialet och suspenderade i vätskan. Denna process brukar kallas IFAS ("integrated fixed-film activated sludge").



Figur 4.4 Bärare av plast för suspenderade biofilmsprocesser.

I biobäddar sprids avloppsvattnet över en bädd med ett fast bärmaterial. Vattnet syresätts i samband med att det sprids ovanifrån och tillåts sippra ned genom bädden där biofilmen på bärmaterialet bryter ned föroreningarna. Luftning och ventilation av biobäddar skiljer sig markant från de tekniker som behandlas i denna rapport och är därför inte inkluderad. Biorotorer är biofilmsprocesser där bärmaterialet roterar mekaniskt så att biofilmen syresätts i kontakt med atmosfärens syre under passagen genom luften. Dessa inkluderas inte heller i denna rapport.

4.5 Aerobt granulärt slam

Biologisk behandling med aerobt granulärt slam är en relativt ny teknik som nyligen har börjat implementeras i större skala. Aeroba granuler skiljer sig från traditionella aktivslamflockar genom att de är större, kompaktare och mer sfäriska. Det gör att de sedimenterar betydligt snabbare, vilket bidrar till kompakta reningsprocesser eftersom slamhalten kan bli hög och sedimenteringstiden kort (Bengtsson et al., 2017). Processer baserade på aerobt granulärt slam realiseras vanligen med SBR:er.

Under den luftade fasen av SBR:ens cykel kan simultan nitrifikation och denitrifikation ske. Granulernas storlek gynnar att anoxiska förhållanden uppstår i granulernas inre och leder till denitrifikation av det nitrat och nitrit som bildas under luftningen (Bengtsson et al., 2017).

4.6 Membranbioreaktorer

Membranbioreaktorer (MBR) bygger på att slammet behålls i reaktorn med hjälp av mikro- eller ultrafiltrering (membranporstorlek 0,03–0,4 µm). Sedimenteringsbassängen i en konventionell aktivslamprocess ersätts här alltså med ett filtreringssteg. Funktionerna i reaktorvolymerna i en MBR är i stort sätt desamma som i en konventionell aktivslamprocess med skillnaden att en högre slamhalt kan hållas. Vid filtreringen i membranbassängerna tenderar slam att byggas upp på membranens ytor. Detta orsakar ett minskat flöde genom membranen och för att behålla genomströmningen måste membranen luftas för att avlägsna den vidhäftande biomassan. En MBR kräver således luftning både i bioprocessens aeroba steg och i membrantanken för att bibehålla filtreringens funktionalitet.

4.7 Sammanfattning

Behov av syre uppstår framförallt när mikroorganismerna oxiderar organiskt material (BOD) och ammonium (nitrifikation). Mikroorganismerna har också ett visst bakgrundsbehov av syre för att hålla sig vid liv så länge de befinner sig i processen. De biologiska processlösningarna där dessa omvandlingar sker kan se ut på olika sätt med kontinuerliga aktivslamprocesser i olika konfigurationer, sekventiella satsvisa reaktorer, biofilmsprocesser med bärarmaterial, aeroba granuler och membranbioreaktorer som exempel. Såväl design som styrning och drift kan skilja sig beroende på processalternativ.

5 Luftningssystemets uppbyggnad

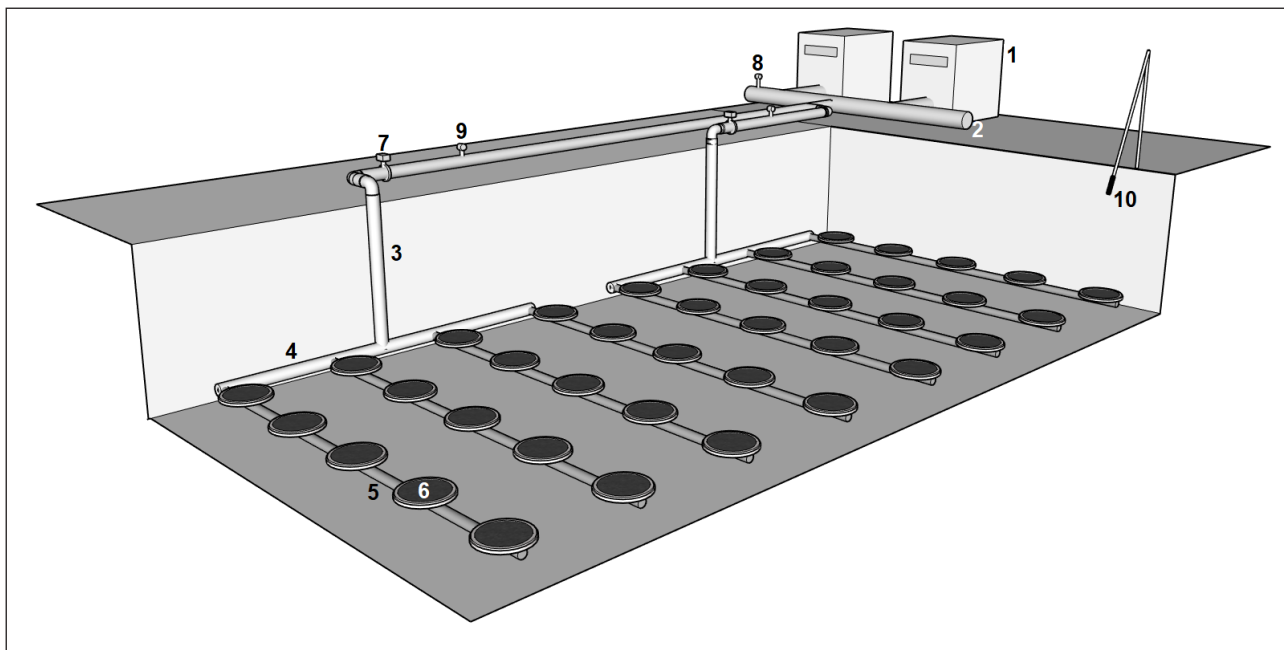
I detta kapitel beskrivs den luftningsutrustning som vanligen används för luftning vid biologisk behandling av avloppsvatten. Principer och egenskaper för olika typer av luftare beskrivs liksom olika typer av blåsmaskiner.

Luftningssystem kan delas in i två huvudkategorier baserat på vilken princip deras funktion bygger på. Bottenluftning innebär att luft tillsätts avloppsvattnet via nedsänkta luftare. Ytluftning, å andra sidan, innebär att avloppsvattnet blandas mekaniskt på så sätt att syre från atmosfären löser sig i vattnet. Bottenluftning är det i särklass mest vanligt förekommande systemet vid svenska kommunala avloppsreningsverk på grund av att ett sådant medför en betydligt lägre energianvändning än ytluftning. Bottenluftningssystem kan i sin tur delas in i följande varianter:

- Bottenluftning med fin- eller grovblåsiga luftare: Bubblor skapas då luften passerar genom luftare som kan vara av dessa två typer:
 - Finblåsiga, som kan vara porösa (keramiska eller av plast) eller ha perforerade flexibla membran av till exempel gummi eller mjukplast.
 - Grovblåsiga, som kan bestå av rör med öppningar, munstycken eller skjuvplattor.
- Mekaniska bottenluftningssystem:
 - Kombinerade omrörare och luftare: Dessa har en motordriven rotor med vilken luft blandas med avloppsvattnet för att sedan spridas över bassängbotten.
 - Jetluftare (ejektorluftare): En pump som pumpar reaktorns innehåll, blandar det med luft och sprider det genom ett munstycke.

Ett bottenluftningssystem består vanligtvis av följande delar, som är numrerade enligt Figur 5.1:

- Blåsmaskiner som genererar tryck och flöde av luften (1).
- Huvudledning som även kallas manifold och leder fram luften till bassängerna (2).
- Nedledningsrör som leder luften från bassängkanten ned till botten av bassängerna (3)
- Grenrör (4) och fördelarrör (5) vid bassängbotten.
- Luftarna som är monterade på fördelarrören, nedsänkta i bassängerna och vid vilka luftbubblorna skapas (6).
- Ventiler som används för att reglera luftflöden till bassängerna (7).
- Givare för att mäta olika parametrar som tryck (8), luftflöde (9), koncentration av löst syre (10) med mera.
- Ett eller flera samverkande styrsystem.



Figur 5.1 Översikt över luftningssystem baserat på bottenluftning. Se texten för benämning av delarna 1–10.

5.1 Luftare för bottenluftning

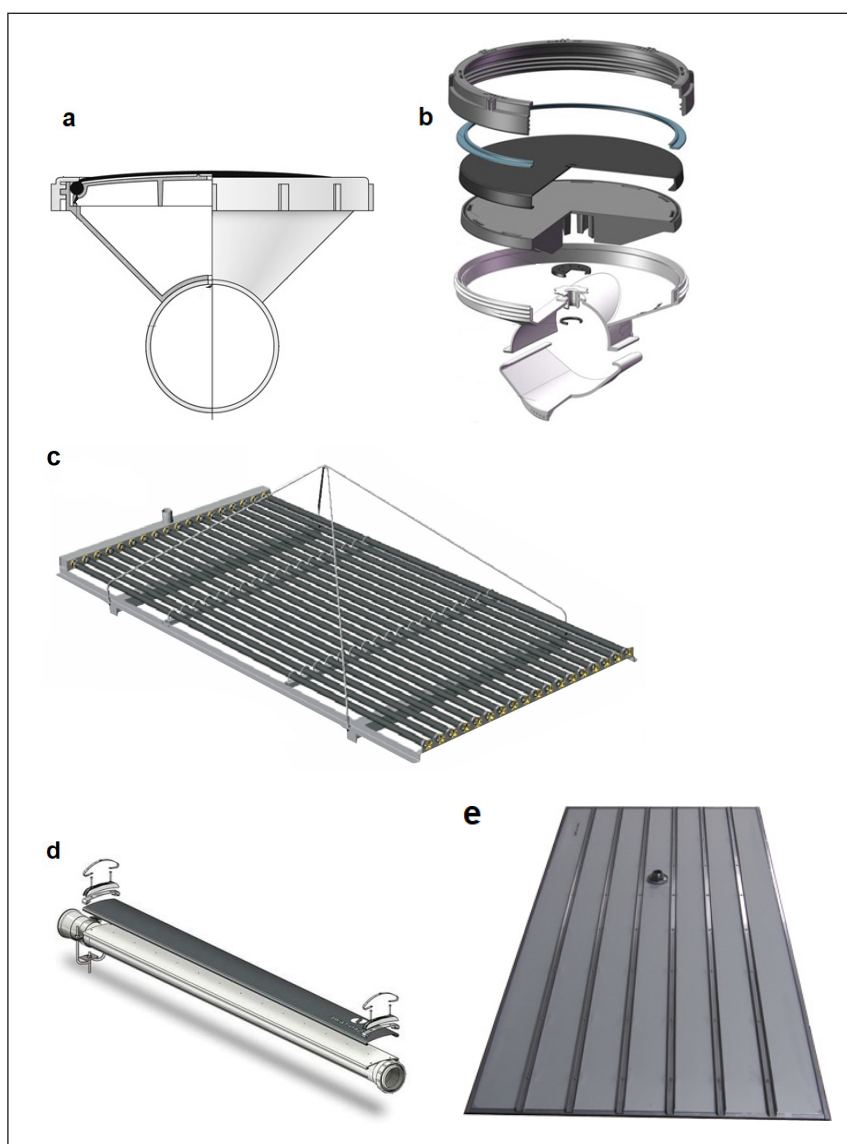
5.1.1 Finblåsiga

Porösa och perforerade luftare skapar vanligtvis små bubblor (2–5 mm; (US EPA, 1989)) och kallas därför finblåsiga. De kan vara formade som tallrikar, kupoler, paneler, slangar eller rör. Tidigare användes ofta keramiska luftare men dessa är inte lika vanliga numera. Det finns också rigida, porösa luftare av plastmaterial. Rigida luftare av keramik eller plast fungerar enligt liknade principer då de har håligheter genom vilka luften passerar. När luften lämnar den porösa ytan bildas bubblor vars storlek påverkas av porstorlek, ytspänning och luftflöde. Rigida luftare har vanligtvis ingen backventil som hindrar vatten från att rinna in i dem. Det innebär att då luftningen stängs av i en zon rinner vatten och slam genom luftarna och in i luftarledningen.

Numera är det vanligast med luftare med ytor av flexibla material som syntetiskt gummi, mjukplast eller silikon. Den vanligaste formen av syntetiskt gummi är EPDM ("ethylene propylene diene M-class" även kallat etenpropengummi). Mjukplast av polyuretan är också ett vanligt material till luftarmembran. Ibland används också silikon, som är en oorganisk polymer baserad på kedjor av kisel. Alla dessa material kan ha olika egenskaper beroende på sammansättning och bearbetning. De skiljer sig därmed mellan olika leverantörer. Bland de material som används till luftare anses generellt EPDM ha mer varierande egenskaper beroende på tillverkare och mindre beständiga egenskaper över tid. Det finns också tillverkare som erbjuder luftare med membran av EPDM bestrukna med polytetrafluoreten (PTFE, känt från varumärket teflon). Detta påstås kunna förhindra både åldrande av materialet och igensättning (se Avsnitt 7.3.11).

Vissa material är utvecklade för att vara särskilt tåliga i mer besvärliga miljöer och kan därför vara extra lämpliga när avloppsvattnet har betydande inslag av industriellt processavloppsvatten. Olika material har olika tålighet med avseende på temperatur. Därför är det viktigt att materialet är anpassat för den högsta temperaturen som kan uppstå i den aktuella processen.

Det flexibla materialet fästs som ett hölje på luftarens hållare och har stansade eller nålade hål. Membran av EPDM stansas medan membran av polyuretan ofta nålas. Luftare med flexibla membran kan vara tallriks-, rör-, slang- eller panelformade och hållaren består ofta av plast (Figur 5.2). När luftflödet är på expanderar membranet och hålen öppnas och blir större ju högre flödet är. När luftflödet stängs, sjunker membranet ihop till ursprunglig position och hålen täpps till vilket förhindrar att vatten rinner in i luftarna.



Figur 5.2 Olika typer av finblåsiga luftare. Tallriksluftare av plast med gummimembran (a och b), slangluftare (c) och paneler (d och e).

Rörluftare kan ha gängade anslutningar med vilka de kan fästas i luftarnätets grenrör eller fördelarrör. Den gängade anslutningen är ofta fäst i ett rör av polyvinylklorid (PVC) med hål i. Ett flexibelt membran sitter som ett hölje runt röret och när luften tränger igenom hålen i PVC-röret spänns membranet ut och släpper igenom luft genom dess hål. I rörets ändar sitter ofta ringklämmor som håller membranet på plats.

Tallriksluftare består vanligtvis av en hållare, en basplatta, ett membran av gummi och en hållarring för att hålla membranet på plats. Ibland finns också en backventil inbyggd i hållaren som extra säkerhet för att förhindra inläckage. Backventilen kan vara en kula eller ett litet gummimembran som täpper igen öppningen när inget flöde är på. Membranen på tallriksluftare tenderar att expandera mer i mitten än i periferin vilket kan skapa större öppningar och bubblor i mitten. Detta kan dock motverkas genom att membranen görs tjockare i mitten än vid kanterna eller att hålen är olika stora så att enhetliga bubblor ändå skapas (WEF, 2018). På vissa luftare tillsätts luften runt hela luftaren nära dess kant istället för i mitten vilket också anses motverka att bubblorna blir större i mitten.

Tallriksluftare monteras ofta på ca 0,3 m höjd från botten. Rörluftare kan i vissa fall monteras närmare bassängens botten (WEF, 2018) vilket gynnar syreöverföringseffektiviteten, i synnerhet i relativt grunda bassänger. Syreöverföringseffektiviteten innebär den andel av syret i den ingående luften som absorberas i vattnet och därmed tillförs processen.

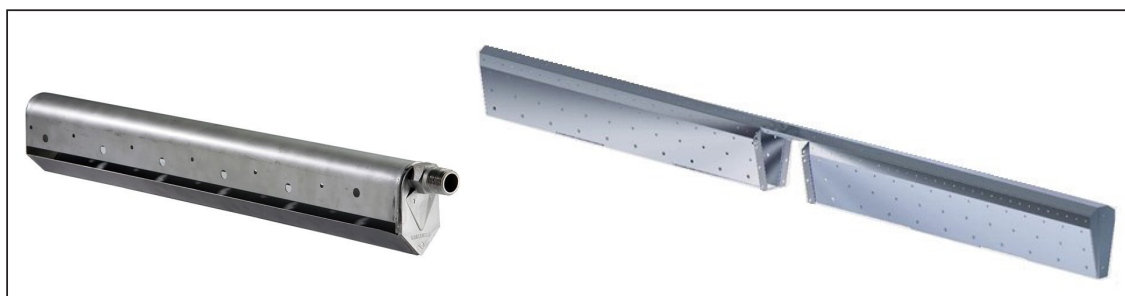
Panelluftare består ofta av flexibla ark av polyuretan på ramar av plast eller rostfritt stål som monteras direkt på eller nära botten. Fördelar som har nämnts med dessa luftare är att mycket små bubblor bildas vilket gynnar en hög syreöverföringseffektivitet, och att en hög bottentäckningsgrad kan tillämpas vilket gynnar effektiv omblandning och syreöverföring. De små bubblorna möjliggörs av att hålen i polyuretan kan nås. Mindre hål kan dock medföra att dessa luftare har ett högre tryckfall än andra membranluftare.

Ett lågt tryckfall över luftaren är önskvärt eftersom större tryckförluster leder till högre energianvändning i blåsmaskinerna. För många membranluftare ökar tryckfallet ungefär linjärt med flödet och finns dels över membranet och dels över öppningen till luftarkroppen från luftarröret. Typiska tryckfall för tallriksluftare ligger i intervallet 0,2 till 0,5 meter vattenpelare (mVp).

För alla finblåsiga luftare är det viktigt att den tillförda luften är ren och fri från partiklar som annars kan sätta igen luftaren. Mindre öppningar i membranen kan ställa högre krav på filtreringen av den ingående luften. Luftfilter behövs också för att skydda blåsmaskinen från slitage på grund av skavande partiklar. Någon typ av luftfilter behövs därför för den till blåsmaskinerna ingående luften. Vanligaste filtren är porösa och består av fibermattor. Ofta är dessa veckade för att ge en stor yta och en liten tryckförlust (US EPA, 1989). Filtrering av luften kan också ske efter blåsmaskinerna men behövs i normalfallet inte då blåsmaskinernas insugsfilter är tillräckliga (Jenkins, 2014).

5.1.2 Grovblåsiga

Grovblåsiga luftarsystem kan bestå av rör av rostfritt stål eller plast med hål i eller luftare som har ett utseende som i Figur 5.3. Luften beger sig genom nedledaren och förgrenas ut till luftarna som är fördelade över bottenytan. Grovblåsiga luftare finns också i form av bultar av rostfritt stål eller plast med en skiva och några hål placerade under skivan. Skivans uppgift är att öka skjuvkrafterna och förhindra att det skapas luftkanaler i form av bubblor på långa rader (Henze et al., 2008).



Figur 5.3 Två olika typer av grovblåsiga luftare.

Öppningarna kan vara omkring 5–10 mm och de större bubblorna som bildas leder till en lägre syreöverföringseffektivitet än för ett finblåsig system. Fördelarna är lägre investeringskostnader, lägre mottryck, mindre underhåll, längre livslängd och lägre krav på renhet för ingående luft. De stora bubblorna blir snarare formade som lock än som sfärer och skapar hög turbulens omkring sig. Det leder till att syreöverföringen påverkas mindre av ytaktiva ämnen och därför bidrar grovblåsiga system till högre alfa-värden (α) än finblåsiga (se Avsnitt 7.3.6). En vanlig utformning av grovblåsiga luftare är att hålen är mindre överst på luftaren och att hålens storlek blir större och större längre ner på luftaren. Det gör att en högre syreöverföringseffektivitet kan uppnås vid låga luftflöden, men att bubblorna sedan blir större med ökat luftflöde.

Den låga syreöverföringen relativt använd energi leder till att grovblåsiga system vanligtvis inte är attraktiva vid behandling av kommunalt avloppsvatten med aktivt slam. Å andra sidan kan grovblåsiga system överföra en stor mängd syre i en begränsad volym eftersom det maximala luftflödet inte är lika begränsat som i ett finblåsig system. Det kan göra ett grovblåsig system med hög botten täckningsgrad relevant för ett avloppsvatten med höga koncentrationer av föroreningar, till exempel på grund av ett stort inslag av industriellt avloppsvatten (Henze et al., 2008).

Grovblåsiga system är vanliga för reaktorer med suspenderade bärare (MBBR) på grund av det låga underhållsbehovet. Även om finblåsiga system kan användas för MBBR är det förenat med vissa svårigheter med avseende på underhåll eftersom biofilmbärarna måste avlägsnas från tanken för att ge tillträde till luftarna. Bärarna i tanken bidrar till att syreöverföringseffektiviteten blir något högre än den annars skulle vara med ett grovblåsig system genom att påverka bubblornas storlek och hastighet genom tanken (se Avsnitt 7.3.9).

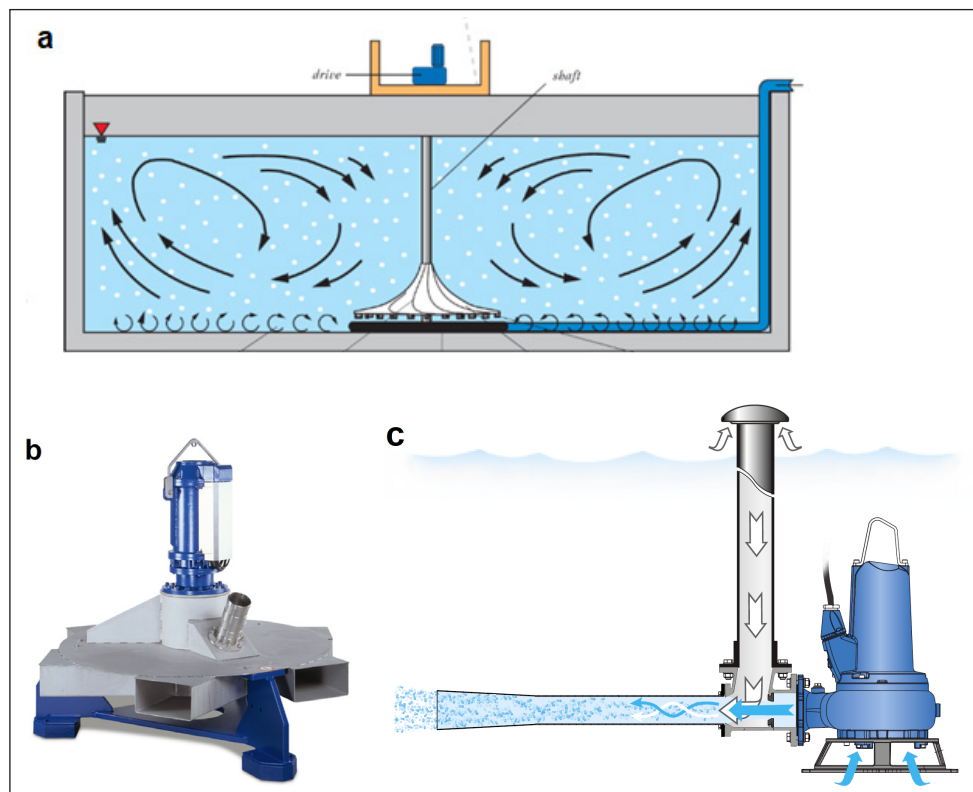
Luftning av membranen i membrantanken för en MBR sker också med grovblåst system eftersom det åstadkommer den mekaniska påverkan som krävs för att avlägsna vidhäftande biomassa från membranen.

5.2 Mekaniska luftare

Det finns olika typer av mekaniska bottenluftare och de vanligaste av dessa är kombinerade omrörare/luftare och jetluftare (ejektorluftare) (Figur 5.4).

Kombinerade omrörare och luftare har det gemensamt att de innehåller en rotor som blandar det omgivande vattnet med luft och sprider denna blandning kring luftaren. Omrörning sker samtidigt. De flesta mekaniska bottenluftare försörjs med luft av en blåsmaskin men det finns också själv-sugande varianter som används utan blåsmaskin. En hyperbol kombinerad omrörare och luftare har en roterande omrörarkropp som skapar en rörelse i vattnet som är nedåtgående längs axeln och sedan horisontell (radiell) längs bassängens botten. Luftbubblorna skapas i en perforerad ring under omröraren.

En jetluftare består i huvudsak av en pump som pumpar reaktorns innehåll och samtidigt blandar det med luft som antingen självsugs eller tillhandahålls från en blåsmaskin. Blandningen av vatten och luft leds genom ett munstycke (ejektor) som ger den en hög hastighet (jetstråle) samtidigt som undertryck skapas som bidrar till att luft dras ned genom luftsugröret. Den höga hastigheten gör att blandningen av vatten med luftbubblor slungas ut i bassängen.



Figur 5.4 Mekaniska bottenluftare. Hyperbol kombinerad omrörare och luftare (a), kombinerad omrörare och luftare (b) och jetluftare (c).

Luftning med mekaniska bottenluftare innebär vissa skillnader jämfört med konventionell bottenluftning med grov- eller finblåsiga luftare. Istället för att stiga rakt upp från luftaren sprids bubblorna först horisontellt längs botten för att sedan stiga uppåt. För kombinerade omrörare och luftare sprids bubblorna runt omkring luftaren, medan för jetluftare sker spridningen i en riktning. Dimensionering av ett mekaniskt luftarsystem baseras ofta på bassängens utformning och volym med hänsyn till både syrebehovet och omrörningen.

Storleken på bubblorna från mekaniska bottenluftare kan variera. De flesta brukar räknas som grovblåsiga men vissa typer av luftare har skjuvfenor som slår sönder bubblorna till mindre storlek. Fördelar med mekaniska bottenluftare som brukar nämnas inkluderar lågt mottryck, relativt lågt behov av underhåll och en prestanda som inte påverkas över tiden av igen-sättning eller åldrande. Samma utrustning kan användas för luftning och endast omrörning. Liksom för grovblåsiga luftarsystem kan hög turbulens skapas vilket bidrar till höga α -värden. Energieffektiviteten för dessa typer av luftare varierar med typ av luftare och omständigheter såsom bassäng-utformning.

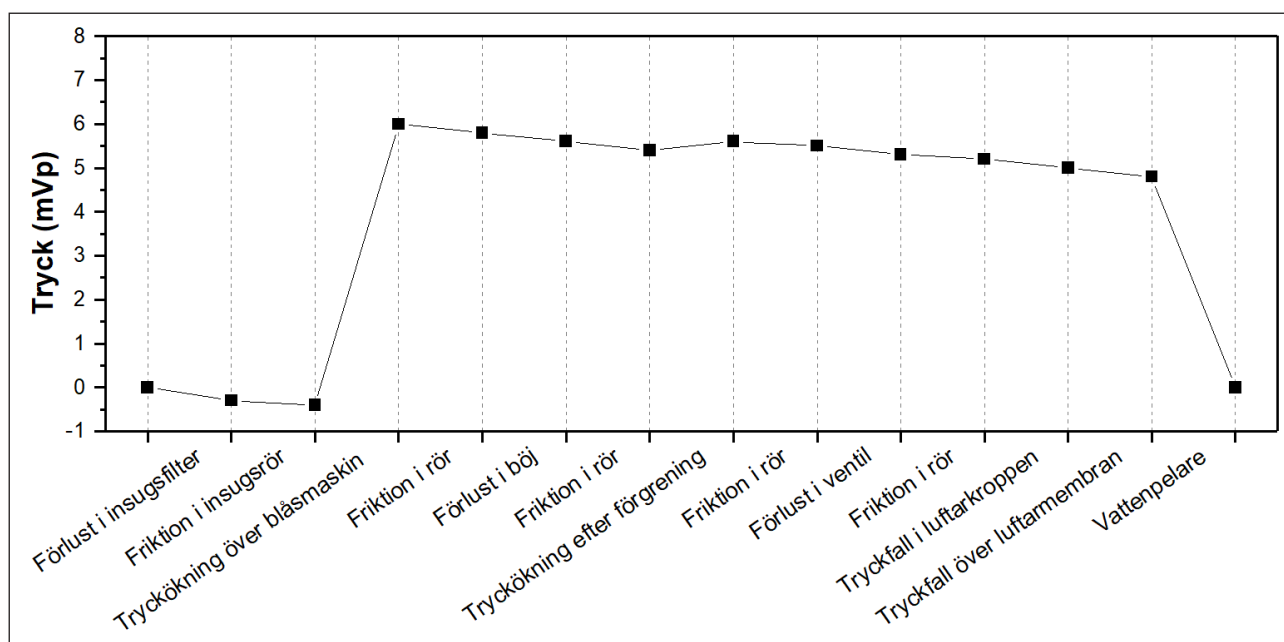
Ytluftare är också mekaniska och representerar första generationens teknik för syreöverföring med relativt låg energieffektivitet. Ytluftare skapar små vattendroppar som sprids i luften och därigenom syresätts från atmosfären. De syresatta dropparna blandar sig med reaktorinnehållet som sedan cirkulerar tillbaka till luftaren. Samtidigt skapas omblandning i reaktorn. Axeln till omröraren kan antingen vara horisontell (så kallade borst- eller valsluftare) eller vertikal med en impeller som är helt eller delvis nedsänkt i vattnet. Ytluftare delas in i hög- och låghastighetstyper vilka är direkt-drivna respektive växlade.

5.3 Luftledningssystem

Distributionssystemet för luften består av en huvudledning (manifold) som leder luften från blåsmaskiner till bassängerna, nedledningsrör, grenrör och fördelarrören. Grenrör och fördelarrör är monterade nära bassängbotten och distribuerar luften till luftarna som är monterade på fördelarrören. Nedledningsrör, grenrör, fördelarrör och luftare kallas tillsammans för luftarnät. Luftarnätet är oftast fast förankrade i bassängbotten.

Rören ska designas och dimensioneras så att tryckförlusterna i systemet är små i förhållande till tryckförlusterna i luftarna. Tryckförluster i systemet uppkommer dels på grund av friktion i rör och dels på grund av turbulens vid böjar, förgreningar och ventiler. Den största delen av systemets mottryck består av vattenpelaren i bassängen och tryckförlusterna tillkommer därutöver. En typisk tryckprofil kan se ut som i Figur 5.5. Tryckförluster i systemet inklusive över luftarna ökar med flödet.

Vilket material som väljs till rören kan bero på tålighet och risk för slitage på grund av korrosion, termiska effekter och övriga betingelser (WEF, 2018). Rören består oftast av rostfritt stål, kolstål eller PVC. Mindre vanligt är flexibelt järn, glasfiberarmerad plast och HDPE. Fördelarrör av



Figur 5.5 Typisk tryckprofil över luftningssystemet. Efter Jenkins (2014).

PVC är vanliga men temperaturen måste då särskilt beaktas eftersom den inte får överstiga den som materialet tål, omkring 60 °C. Rör av PVC är vanliga tillsammans med tallriksluftare och rostfritt är mer vanligt tillsammans med rörluftare. Anledningen är att rörluftare, på grund av sin längd, kan ge upphov till större vridmoment vilket ibland kräver högre hållfasthet hos fördelarrören. Ifall luftarna ska kunna rengöras från luftsidan, med exempelvis syra, måste rörsystemet vara av ett slag som tål detta. I de flesta fall är de aktuella trycken inte högre än att tunnväggiga rör kan användas.

Temperaturen på den levererade luften är högre ju högre tryck som levereras. Enligt en tumregel ökar temperaturen med ungefär 10 °C per meter vattenpelare. I ett system med exempelvis 7 meter vattendjup och 8 mVp totalt mottryck, ökar då temperaturen med 80 °C. Om den ingående luften är 30 °C blir således luften ut från bläskmaskinerna ungefär 110 °C. Hela luftarnätet inklusive ventiler, packningar med mera måste vara anpassade för de temperaturer som kan uppstå. Hela rörsystemet måste också vara anpassat för de expansioner och kontraktioner som kan ske när temperaturen varierar. Ibland förekommer kylning av luften med värmeväxlare (se Avsnitt 8.7.5). Rör av PVC ska skyddas från UV-strålning vilket bör beaktas vid tömda bassänger, till exempel genom att delvis fylla bassängerna med vatten för att undvika direkt solljus. Ifall bassängerna ska kunna stå tomma kan det också vara nödvändigt att rörsystemet är designat för att tåla frysning och tining.

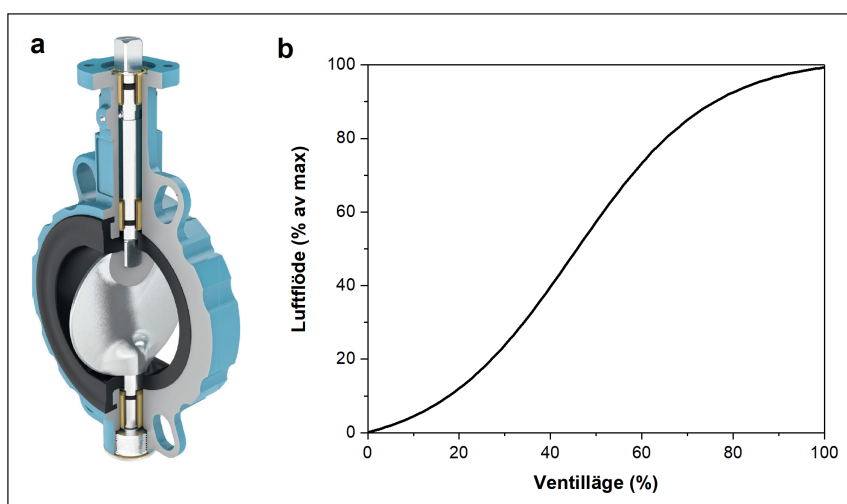
Rören ska luta något nedåt i riktning från bläskmaskinerna. Kondens kan bildas i rören och därför måste ett system för tömning av kondens finnas. Rör för tömning av kondens ansluts till en låg punkt i luftarnätet och avslutas ofta med en handventil vid bassängkanten. Genom att öppna ventilen när luftning sker, kan kondens tömmas och samtidigt kan brott på luftarnätet indikeras eftersom det i så fall ger upphov till slam i kondensvattnet.

Luftarnätet kan också utformas som lyftbara enheter. De kan lyftas ur bassängen för underhåll, vilket gör att bassängen inte behöver tömmas. Detta kan vara särskilt lämpligt om det inte finns flera parallella linjer i den biologiska behandlingen och möjligheterna att tömma bassänger därmed är begränsade. Ett lyftbart system behöver normalt bestå av rostfritt stål för att klara belastningarna i samband med lyft. Det gör lyftbara system generellt mer kostsamma jämfört med fast monterade nät som till stor del kan bestå av PVC.

5.4 Ventiler

För att kunna reglera luftflödet i en anläggning krävs ventiler. Ventilerna kan användas för att stänga av luftflödet helt till en del av luftningsanläggningen eller för att reglera luftflödet till en del, genom att strypa och därmed öka tryckfallet över ventilen. Eftersom strypning ökar mottrycket och därmed energianvändningen för blåsmaskinerna ska det inte ske mer än nödvändigt för att åstadkomma den reglering som krävs.

I huvudsak kan tre typer av ventiler vara aktuella för luftning, nämligen vridspjällventiler, skjutspjällsventiler och kulsektorventiler. Vridspjällventiler som även kallas fjärilsventiler är de som anses mest lämpliga och används i de allra flesta fall (Figur 5.6). Det är det relativt låga priset i kombination med en tillräckligt god reglerfunktion som gör dem så vanligt förekommande. En vridspjällventil består av en rund skiva monterad på en axel tvärs genom en rörformad hållare. Axeln kan vridas och på så sätt stängs eller öppnas ventilen genom att skivan hindrar luftflödet i större eller mindre utsträckning. Vridspjäll lämpar sig för frekvent reglering eftersom de klarar av att manövreras ofta och under lång tid. Vridspjällventiler är kompakta medan skjutspjällen kräver mer utrymme på höjden. Kulsektorventiler är kompakta och fungerar väl till luftning men väljs ofta bort på grund av ett högre pris.



Figur 5.6 Vridspjällventil (a) är den vanligaste typen av ventil för luftning. Sambandet mellan öppningsgrad och flöde genom en vridspjällventil är icke-linjärt (b).

Till ventilen behövs också ett ställdon som utför själva ändringen i ventilläget baserat på signalen från styrsystemet. Ett ställdon kan vara antingen elektriskt med en motor eller pneumatiskt, det vill säga styrt av tryckluft. Elektriska ställdon är vanligast förekommande på avloppsreningsverk. Pneumatisk styrning har högre driftskostnad för energianvändning till tryckluft och större behov av underhåll. Pneumatisk styrning kan medge mycket snabb öppning/stängning, men i VA-sammanhang är detta sällan önskvärt.

Elektriska don för reglerventiler har ingång för kommunikationskabel. De flesta elektriska don kan också handvevas. Vid pneumatisk styrning av en reglerventil krävs även en lägesställare ("positioner"). Vissa lägesställare har (nära) nollförbrukning av luft när ventilen står still medan andra förbrukar luft även när ventilen står still. Många ventiler har ventillägesgivare som kan användas för att ange ventilens position till styrsystemet.

Olika ventiltyper har olika ventilkaraktäristik, det vill säga samband mellan dess öppningsgrad och flödet genom den. Detta samband kan vara linjärt men ofta används ventiler med olinjär ventilkaraktäristik. Linjära ventiler är oftast dyrare. Vanliga vridspjällventiler har en olinjär ventilkaraktäristik som innebär att i början och slutet av reglerområdet är regleringen mindre effektiv än i mitten (Figur 5.6b). Regleringen är mest effektiv när ventilen är ca 20–70 % öppen. Det är viktigt att ventilen är rätt dimensionerad för det aktuella flödet för att god reglering ska kunna ske. Vissa vridspjällventiler har en så kallad dubbelexcentrisk utformning. Det innebär att axeln som spjällbladet sitter på är förskjuten från mitten i både djup- och sidled vilket gör att ventilen får en mer linjär ventilkaraktäristik.

5.5 Blåsmaskiner

I luftningssystemet ingår en eller flera blåsmaskiner som ska leverera luft vid önskat tryck och flöde. I vissa sammanhang används ibland termen kompressor istället för blåsmaskin. Enligt en uppdelning används termen blåsmaskin för enheter som kan leverera ett övertryck upp till 1 bar (10,2 mVp) och termen kompressor för maskiner som kan leverera övertryck över 1 bar (US EPA, 1989). Ibland används termen kompressor för maskiner som utför intern kompression av luften, såsom skruv- och centrifugalmaskiner. I denna rapport används termen blåsmaskin för samtliga maskiner som levererar luft till ett luftningssystem, då detta är termen som normalt används i VA-branschen.

Blåsmaskinerna ska kunna leverera luft med det tryck och flöde som krävs av processen under de dynamiska förhållanden som råder i anläggningen. Det är därför väldigt viktigt att blåsmaskinernas kapacitet är rätt anpassade för det verkliga behovet och att kapaciteten kan regleras allt eftersom dessa behov förändras i samband med att belastningen till anläggningen varierar. Hänsyn måste också tas till att samma blåsmaskiner som används till den biologiska reningen eventuellt också används till andra syften på anläggningen som till exempel luftade sandfång och slamstabilisering. Det finns fördelar med att ha dedikerade blåsmaskiner till den biologiska reningen

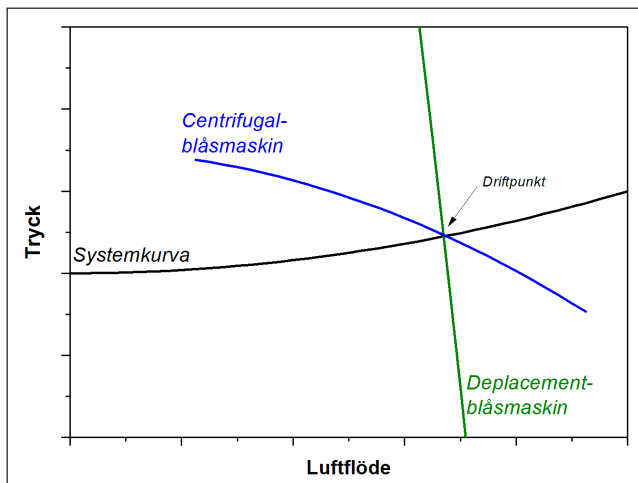
eftersom mottryck och reglerbehov ofta skiljer sig mot till exempel luftningen vid förbehandling. Men vid mindre anläggningar kan investering i separata maskiner ibland inte motiveras av dessa fördelar och ett gemensamt system måste därför försörja flera processer med olika behov.

Luftens huvudsakliga beståndsdelar är kväve, syre och vattenånga. Torr luft består av syre till 21 % av volymen och 23 % av vikten. Luftens egenskaper är starkt beroende av temperatur, tryck och fuktighet och därför måste dessa förhållanden anges i samband med en viss volym eller volymsflöde. Det är vanligt att ange volym i så kallade *normalkubikmeter* (Nm^3) och detta innebär ofta atmosfärstryck, 0 °C och torr luft. Men även andra förhållanden förekommer som definition på normalkubikmeter (till exempel 1 bar, 15 °C, 20 °C och/eller 36 % relativ luftfuktighet) så försiktighet bör iakttagas angående vilka förhållanden som avses. I denna rapport avses med normalkubikmeter 1 atm, 0 °C och 0 % relativ fuktighet. Ibland förekommer det att luftvolym uttrycks som *standardkubikmeter* (Sm^3) vilket ofta avser 20 °C men även denna definition kan variera. Luftens volym är ca 7 % större vid 20 °C än vid 0 °C, vilket då måste beaktas. Det är också viktigt att beakta att om fukthalten ökar, minskar syrets andel av luften.

Varje typ av blåsmaskin karaktäriseras av en så kallad *prestandakurva* som anger trycket på den luft som levereras som funktion av luftflödet. Det finns flera typer av blåsmaskiner som är vanliga vid luftning av biologiska reningsprocesser. Prestandakurvans utseende påverkas av vilken teknik som blåsmaskinens funktion bygger på. Mottrycket i luftningssystemet kan också beskrivas som en funktion av flödet vilket kallas för *systemkurvan*. Systemkurvan består dels av det statiska mottrycket som domineras av vattenpelaren som luften behöver övervinna från luftare till vattenytan. Därutöver finns ett dynamiskt mottryck som består av de olika friktionsförlusterna som uppstår i systemet. Dessa friktionsförluster är proportionella mot kvadraten av flödet och därför böjer systemkurvan av uppåt med ökade flöden som i Figur 5.7. Vid drift kommer förhållandena att motsvara skärningspunkten mellan prestandakurvan och systemkurvan, vilket kallas för *driftpunkten*. I Figur 5.7 visas exempel på system- och prestandakurvor.

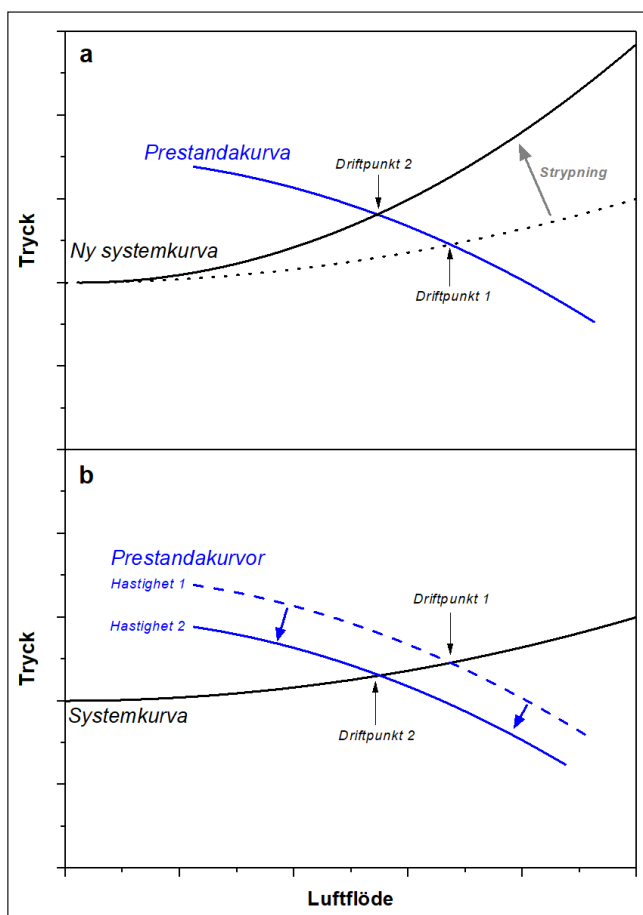
Om strypning sker i systemet, till exempel genom att en reglerventil delvis stängs, kommer det dynamiska mottrycket öka. Systemkurvan böjer då av brantare uppåt vilket illustreras i Figur 5.8a. Det statiska mottrycket förblir detsamma och ökningen i dynamiskt mottryck leder till en ökning av det totala trycket i systemet. En ny driftpunkt uppstår vid skärning av blåsmaskinens prestandakurva och den nya systemkurvan. Den nya driftpunkten ligger vid ett lägre luftflöde vilket innebär att strypningen har resulterat i ett minskat flöde.

En förändring i systemet kan också ske genom att blåsmaskinens kapacitet regleras. Detta illustreras i Figur 5.8b. Om kapaciteten regleras ned förflyttas prestandakurvan nedåt. Systemkurvan förblir oförändrad om ingen reglerventil ändras och en ny driftpunkt uppstår vid skärningen mellan systemkurvan och den nya prestandakurvan. I detta fall har flödet minskat genom att blåsmaskinens kapacitet har reglerats. Systemkurvan för ett



Figur 5.7 Exempel på hur ett samband mellan tryck och flöde för ett luftningssystem (systemkurva) och prestandakurvor för centrifugalblåsmaskiner (som till exempel turboblåsmaskiner) och displacementblåsmaskiner (vridkolvs- och skruvblåsmaskiner) kan se ut.

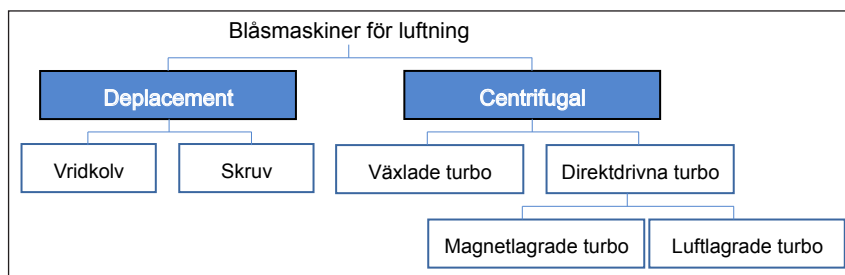
luftningssystem kan fastställas genom att relationen mellan flöde och tryck registreras när blåsmaskinernas kapacitet regleras samtidigt som reglerventilerna ställs helt öppna.



Figur 5.8 Exempel på hur nya driftpunkter uppstår då systemkurvan ändras på grund av vid strypning (a) eller då prestandakurvan ändras för att en blåsmaskin regleras (b).

De blåsmaskiner som används till luftning vid avloppsreningsverk är av två huvudtyper: displacementblåsmaskiner och centrifugalblåsmaskiner. Displacementblåsmaskinerna som används kan i sin tur delas in i vridkolvs- och skruvblåsmaskiner. Centrifugalblåsmaskinerna som används är framförallt turboblåsmaskiner som delas in i växlade och direktdrivna, där de direktdrivna i sin tur kan vara magnet- eller luftlagrade (Figur 5.9).

Kostnaderna för en blåsmaskin under dess livstid består vanligtvis till 10–20 % av investering och 80–90 % av driftskostnader, framförallt för energianvändning (se Beräkningsexempel – val av blåsmaskinsteknik och Fallstudie 2, Avsnitt 14.1 och 14.3). Det gör att maskinernas förmåga att fungera energieffektivt i en viss tillämpning är en mycket viktig aspekt.



Figur 5.9 Indelning av de typer av blåsmaskiner som används till luftning på kommunala avloppsreningsverk.

5.5.1 Displacementblåsmaskiner

De båda displacementblåsmaskiner som används för luftning av vattenreningssystem, vridkolvsblåsmaskiner och skruvblåsmaskiner, är båda så kallade roterande displacementblåsmaskiner.

Vridkolvsblåsmaskiner

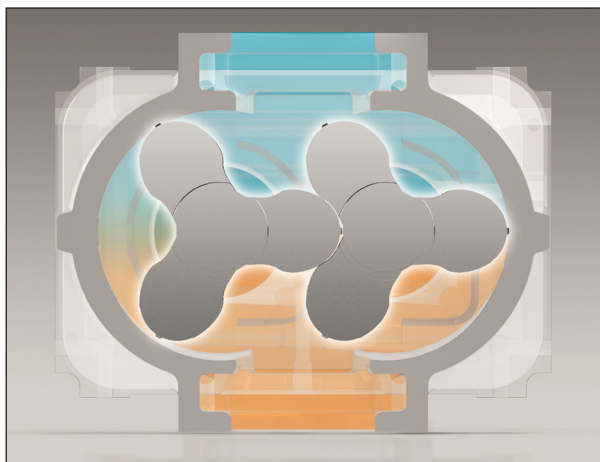
Vridkolvsblåsmaskiner är maskiner i vilka två roterande kolvar förflyttar luften (Figur 5.10). Kolvarna har antingen två eller tre lobber och när de roterar förflyttas diskreta ”portioner” av luft för varje varv. När lobbarna roterar förbi inloppet sugas ingående luft in i maskinen. I samband med rotationen förflyttas luften genom kompressorhuset till utloppet där den trycks ut. Genom att lobbarna ligger an mot varandra och insidan av kompressorhuset förhindras att luften flödar bakåt. Maskinens motor kan antingen vara direkt ansluten till kolvarna eller ansluten via en rem och remskiva (Keskar, 2006). I en vridkolvsmaskin komprimeras inte luften, den förflyttas bara genom maskinen, och trycket uppstår när luften möter ett mottryck från systemet på trycksidan.

En vridkolvsmaskin arbetar med ett i det närmaste konstant flöde vid varierande tryck. Det innebär att prestandakurvan har en brant lutning vilket visas i Figur 5.7. Vridkolvsmaskinens flöde kan inte strypas (Keskar, 2006; WEF, 2010). Den branta prestandakurvan (Figur 5.7) innebär att om trycket skulle ökas genom strypning, med en kraftigare böjning på systemkurvan som följd (se Figur 5.8a), skulle flödet endast minska mycket lite.

Reglering av kapaciteten bör ske genom styrning av blåsmaskinens hastighet med hjälp av en frekvensomformare och genom att flera maskiner används parallellt. Det är möjligt att leda av ett delflöde av luft som inte behövs, men detta innebär en förlust av energi. Därför är reglering av luftflödet med frekvensomformare att föredra, eftersom det innebär en reglering av maskinens effektbehov och därmed energianvändning. Det ska dock noteras att maskinens verkningsgrad minskar vid en sänkning av hastigheten. Det innebär att minskningen i energianvändning inte nödvändigtvis blir proportionell mot minskningen i flöde.

Fördelarna med vridkolvmaskiner som brukar framhållas är relativt låga investeringskostnader och förmågan att arbeta i ett brett tryckspann. Dock är verkningsgraden låg jämfört med andra typer av blåsmaskiner (Keskar, 2006). Reglering nedåt av kapaciteten innebär en minskning i verkningsgrad. Energianvändningen är generellt högre än för andra typer av blåsmaskiner vid samma luftflöde, vilket leder till högre driftkostnader. En annan nackdel kan vara hög ljudvolym. Det lågfrekventa ljudet som de vridande kolvarna ger upphov till är svårt att dämpa. För de maskiner som har tre lobber, vilket är vanligast numera, är detta problem mindre än för de som har två lobber (Henze et al., 2008). Deplacementblåsmaskiner kylvanligtvis av luft med hjälp av en kylfläkt. Även frekvensomriktaren brukar kylas med en fläkt.

Vridkolvslobsblåsmaskiner har varit flitigt använda för luftning under en lång tid. De anses lämpliga på mindre reningsverk, vid lägre bassängdjup och när större vikt läggs vid låg investering än vid låg driftkostnad.

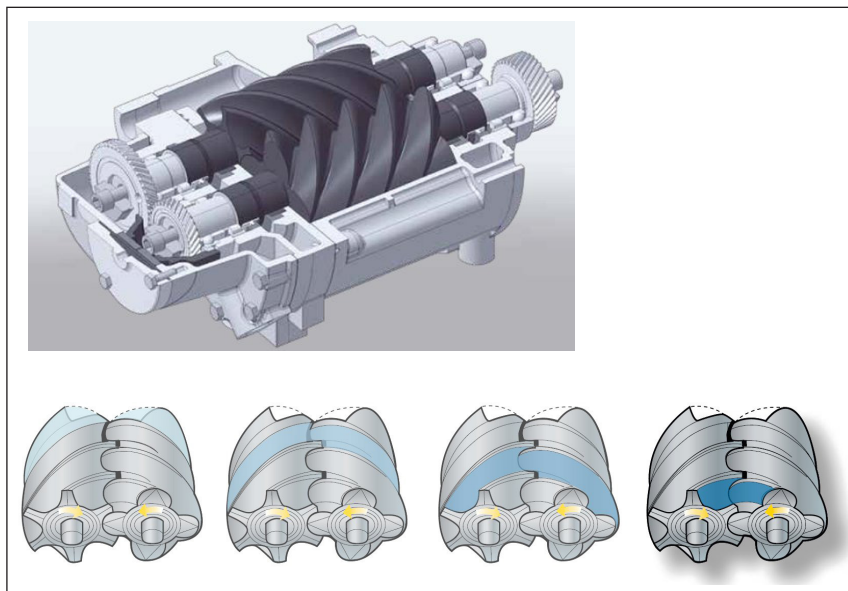


Figur 5.10 Vridkolvsblåsmaskiner har två roterande kolvar med vanligen tre lobber som förflyttar luften genom maskinen.

Skruvblåsmaskiner

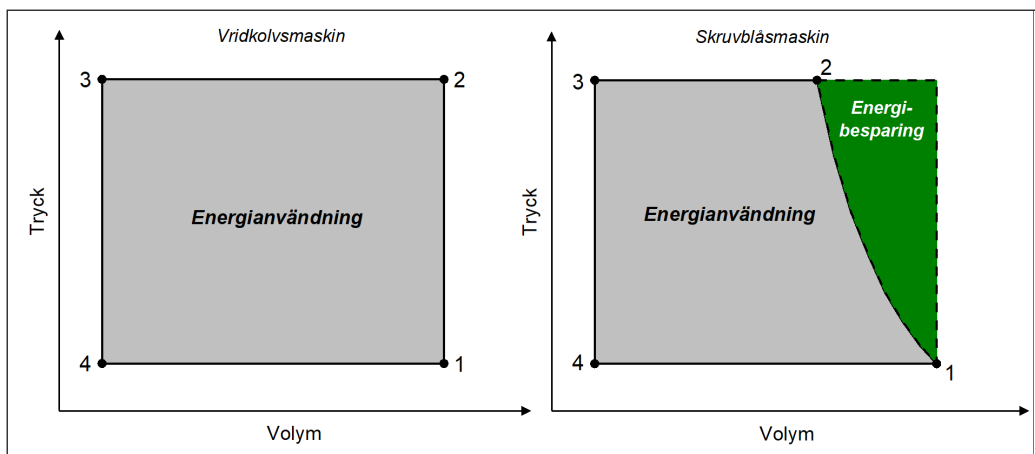
Skruvblåsmaskiner är också en typ av roterande deplacementblåsmaskiner och har många likheter med vridkolvsblåsmaskiner. Utformning och funktion är dock något mer komplex. Liksom vridkolvsblåsmaskiner har skruvblåsmaskiner två axlar som roterar mot varandra och är sammankopplade med kugghjul i dess ena ändar. Rotorerna på axlarna är dock spiralformade, där en skruv är honformad och en är hanformad (Figur

5.11). Rotorerna har olika antal spiraler och vrids med olika hastigheter. Ingående luft hamnar i den honformade spiralens enda ände och i samband med rotationen flyttar hanrotorn fram luften längs axlarnas riktning genom att trycka ihop och komprimera luften då kammaren blir allt mindre. När luften kommit till rotorernas andra ände lämnar den blåsmaskinen genom dess utloppsport. På många skruvblåsmaskiner är motorn kopplad direkt till axlarna, i vissa fall via växlar. På andra varianter är motorn ansluten till axlarna via en rem.



Figur 5.11 I skruvblåsmaskiner komprimeras luften med spiralformade rotor.

Till skillnad från vridkolvslåsmaskiner sker en intern kompression av luften i skruvblåsmaskiner. Detta bidrar till att de kan vara mer energieffektiva än vridkolvsmaskiner. Skillnaden i energianvändning med och utan intern kompression kan illustreras med tryck-volym-diagram. I ett tryck-volym-diagram kan förändringarna i luftens tillstånd följas. Arbetet (energin) som behöver tillföras systemet motsvaras av ytan i diagrammet som förändringarna ger upphov till. Till att börja med kan förändringarna i luftens tillstånd i en vridkolvsmaskin följas (Figur 5.12). I vridkolvsmaskinen tas först luft in vilket innebär att volymen ökar vid konstant tryck ($4 \rightarrow 1$), sedan ökar trycket utan förändring i volymen när luften möter ett mottryck från systemet ($1 \rightarrow 2$) och slutligen levereras luften till systemet ($2 \rightarrow 3$). Den använda energin motsvaras av kvadraten som bildas av punkterna 1–4. För en skruvblåsmaskin tas luften in ($4 \rightarrow 1$), varefter den komprimeras vilket innebär att trycket ökar och volymen minskar samtidigt ($1 \rightarrow 2$) innan luften levereras ($2 \rightarrow 3$). Som synes innebär komprimeringen en mindre yta (mindre energianvändning). Ju större skillnad i tryck från punkt 1 till 2, desto större blir den minskade energianvändningen jämfört med en vridkolvsmaskin. Det innebär att vid högre mottryck ökar skillnaden i energieffektivitet mellan en skruv- och vridkolvsmaskiner.



Figur 5.12 Skillnaden i energieffektivitet mellan vridkolvsblåsmaskiner och skruvblåsmaskiner enligt tryck-volym-diagram. Det teoretiska arbetet (energianvändningen) som krävs när luften passerar respektive typ av maskin motsvaras av den grå ytan. Den gröna ytan motsvarar den minskade energianvändningen för skruvmaskiner jämfört med vridkolvmaskiner.

Liksom för vridkolvmaskiner, bör hastigheten för skruvblåsmaskiner regleras med hjälp av frekvensomformare. Även för skruvblåsmaskiner innebär en minskning av hastigheten en viss förlust i verkningsgrad. Men skruvblåsmaskiner kan regleras ned till lägre hastigheter med frekvensomformare utan samma förlust i verkningsgrad som för vridkolvmaskiner (Jenkins, 2014).

Både vridkolvs- och skruvblåsmaskiner kan vanligen regleras ned till ungefär 20 % av sin maximala kapacitet (ATV, 2000a). Den högre effektiviteten och goda reglermöjligheten gör att en skruvblåsmaskin i många tillämpningar kan få en lägre livscykelkostnad än en vridkolvmaskin, trots en högre investeringskostnad (se beräkningsexempel i Avsnitt 14.1). Skruvblåsmaskiner skapar inte lika mycket pulsationer som vridkolvmaskiner och ger därför inte upphov till lika mycket ljud, men dämpning är ändå viktigt och normalt integrerad i maskinen.

Det finns även så kallade hybridblåsmaskiner som är mellanting mellan vridkolvs- och skruvblåsmaskiner. Dessa kan till exempel ha lober som är något vridna för att skapa bättre effektivitet.

5.5.2 Centrifugalblåsmaskiner

Centrifugalblåsmaskiner (även kallade dynamiska blåsmaskiner) fungerar på så sätt att en motor sätter en axel med ett fläkthjul i rotation. Intag av luft sker i rotationsaxelns riktning och luften sätts i rörelse av fläkthjulet. Luftens hastighet och rörelseenergi ökar då och luften släpps kontinuerligt ut i tvärgående riktning gentemot rotationsaxeln. Rörelseenergi som skapats omvandlas till ett högre tryck när luftens hastighet minskas genom att luften passerar en så kallad diffusor (Figur 5.13). Principen för en centrifugalblåsmaskin är därmed densamma som för en centrifugalpump med skillnaden att det är en kompressibel gas istället för vätska som pumpas. En typisk prestandakurva visas i Figur 5.7. Till skillnad mot displacementblåsmaskiner, levererar centrifugalblåsmaskiner luft vid ett relativt konstant

tryck men med variabelt flöde. Centrifugalblåsmaskiner finns i enstegs- och flerstegsutförande där flerstegsutförande kan innebära att upp till 12 fläkthjul sitter på axeln.

Även för centrifugalblåsmaskiner är det vanligt att flera parallella maskiner används för att öka möjligheterna att reglera kapaciteten. Utöver detta finns det några olika principer för hur kapaciteten kan regleras för en enskild maskin, men vilka metoder som är tillämpbara varierar med typ av centrifugalblåsmaskin. De vanligaste sätten att reglera kapaciteten är att använda (1) reglerbara ledskenor för ingående luft (2) ställbara blad i diffusorn, och/eller (3) frekvensomformare som möjliggör reglering av motorns hastighet. Ledskenor kan användas för att reglera vinkeln på den ingående luften innan den når fläkthjulet (Figur 5.13a). Det skapar virvlar som minskar trycket på den levererade luften samtidigt som energianvändningen minskar (WEF, 2010). De ställbara bladen i diffusorn används för att reglera hur den utgående luftens kinetiska energi omvandlas till potentiell energi. När bladen stängs minskar flödet och energianvändningen vid konstant tryck (WEF, 2010). Vissa blåsmaskiner använder både ledskenor och diffusorblad som regleras tillsammans.

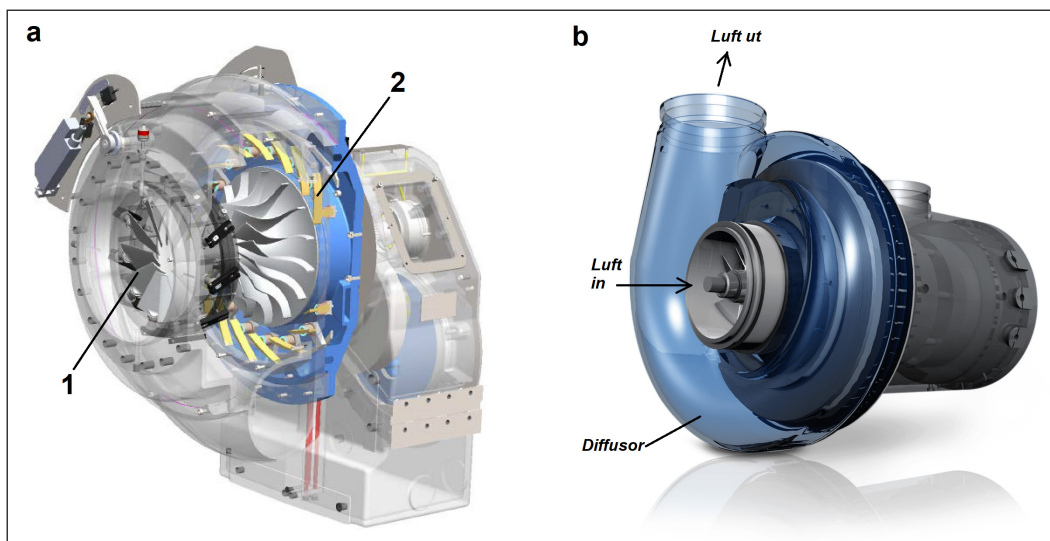
Centrifugalblåsmaskiner har ett minsta flöde under vilket driften blir instabil. Under detta flöde kan systemet hamna i överstegring eller *stall* ("surge" eller "stalling" på engelska) eftersom pulsationer uppstår då tryck och flöde börjar svänga snabbt. Dessa svängningar kan skada blåsmaskinen till den grad att den havererar. Därför måste stall undvikas genom att flödet alltid överstiger det minsta tillåtna flödet. Genom en särskild ventil på trycksidan kan ett delflöde ledas av (fribläsning) för att undvika stall då luftflödesbehovet är lägre än maskinens minsta flöde, som när maskinen startas upp från stillastående.

De flesta typer av centrifugalblåsmaskiner kan regleras från omkring 40 % till 100 % av sin maximala kapacitet (ATV, 2000a). På grund av risken för stall under detta område är reglerområdet för centrifugalblåsmaskiner generellt mindre än för displacementblåsmaskiner.

Växlade turboblåsmaskiner

En variant av centrifugalblåsmaskiner är så kallade turboblåsmaskiner som under senare år kommit att användas alltmer i samband med avloppsvattenrening. En turboblåsmaskin är en typ av centrifugalblåsmaskin men med vidareutvecklad teknik som anpassats från flygplansteknik. De grundläggande principerna för funktion är därför snarlika, med skillnaderna att turboblåsmaskiner har fläkthjul som är aerodynamiskt utformade med turbinmotorteknik (Figur 5.13).

På växlade turboblåsmaskiner är motorn mekaniskt förbunden med fläkthjulet via en växellåda så att axelns hastighet har en betydligt högre hastighet än motorn. Lagren på maskinen och dess växellåda behöver kontinuerlig smörjning med olja. Motorn arbetar vid ett konstant varvtal och kapaciteten regleras med hjälp av ledskenor för ingående luft och ställbara blad i diffusorn.



Figur 5.13 Växlad turboblåsmaskin (a) med ledskenor (1) och ställbara blad i diffusorn (2). Fläkthjul och höghastighets-permanentmagnetmotor till en direktdriven turboblåsmaskin (b).

Luftlagrade och magnetlagrade turboblåsmaskiner

De mest nyligen utvecklade turboblåsmaskinerna har direktdrivande höghastighets-permanentmagnetmotorer. Dessa motorer driver fläkthjulets axel utan mekanisk kontakt och kan ha hastigheter på upp till 75 000 varv/min (Tchobanoglous et al., 2014). Prestandakurvan för en turboblåsmaskin har ett snarlikt utseende som för andra centrifugalblåsmaskiner (Figur 5.7). Direktdrivna turboblåsmaskiner har antingen luft- eller magnetlager som gör att inga kugghjul eller mekanisk kontakt behövs mellan motorns stator och den drivande axeln. Avsaknaden av mekanisk kontakt under drift möjliggör de höga hastigheterna och leder till små energiförluster. De har också integrerade frekvensomformare som möjliggör att motorns hastighet kan regleras.

I luftlagrade turboblåsmaskiner kan axeln rotera utan mekanisk kontakt genom att en luftkudde skapas när motoraxeln roterar över ett visst varvtal. Vid start och stopp används ett stödlager som har kontakt med axeln vid låga varvtal då luftkudden inte bär. Tekniken bakom magnetlager innebär aktiva magneter som kontinuerligt placerar motorns axel i rätt läge med hjälp av mätsensorer och ett regelsystem.

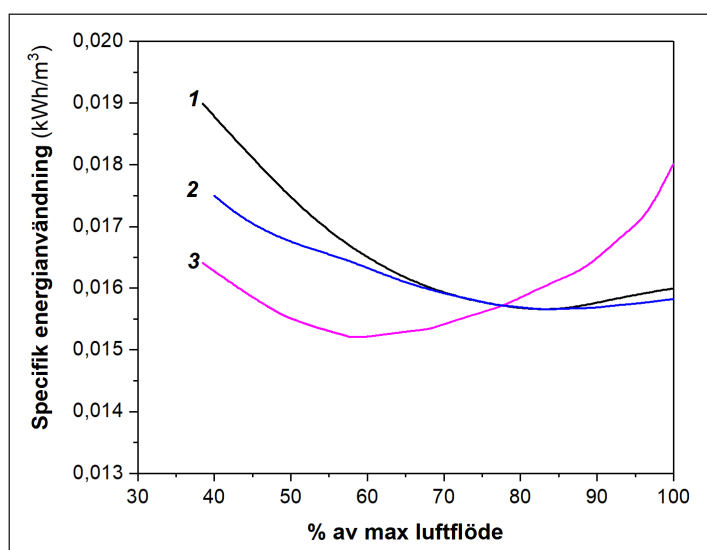
Reglerområdet för luftlagrade och magnetlagrade turboblåsmaskiner kan variera relativt mycket beroende på tillämpning och fabrikat. Vid optimal driftpunkt är effektiviteten allmänt sett högre än för displacementblåsmaskiner. Turboblåsmaskiner medför en större investering och lämpar sig därför oftast vid relativt stora luftbehov där driftkostnaden blir en större del av livscykelkostnaden (se beräkningsexempel i Avsnitt 14.1).

Kylning kan ske med luft eller vatten och så kallad direktkylning med luft innebär att ett fläkthjul för kylning finns i ena änden av axeln.

Vid ett eventuellt strömbrott används stödlagren i luftlagrade turboblåsmaskiner när maskinen stannar. I magnetlagrade turboblåsmaskiner finns andra system för att hantera säker avstängning. Olika leverantörer har

olika lösningar för detta. Vissa maskiner har exempelvis batteribackup för att kunna drivas en kortare stund medan säker avstängning sker. En annan lösning är att motorn, vid ett eventuellt elavbrott, går in i ett generatorläge och på så sätt kan leverera strömförsörjning under några sekunder, vilket är tillräckligt för att stanna maskinen på ett säkert sätt.

I Figur 5.14 ges exempel på hur energianvändningen per Nm^3 luft kan variera i reglerområdet för några turboblåsmaskiner. Detta exempel inkluderar en växlad turboblåsmaskin med fast varvtal på motorn och reglering av kapaciteten med ledskenor och ställbara blad i diffusorn och två direkt-drivna turboblåsmaskiner med integrerade frekvensomformare. Alla de tre maskinerna har liknande reglerområden från ca 40 % till max oberoende av typ av reglering. Det är också värt att notera att energieffektiviteten för den äldre typen av maskin, som regleras utan frekvensomformare, är högst jämförbar med de modernare direkt-drivna maskinerna.



Figur 5.14 Exempel på energianvändning per Nm^3 luft för olika typer av centrifugalblåsmaskiner: en växlad turboblåsmaskin med fast varvtal reglerad med ställbara ledskenor och diffusorblad (2) och två direkt-drivna turboblåsmaskiner med frekvensomformare (1 och 3).

5.6 Sammanfattning

Luftare för syresättning av reningsprocesser finns i form av grov- och finblåsiga bottenluftare samt mekaniska yt- och bottenluftare. Finblåsiga luftare med flexibla perforerade membran formade som rör, tallrikar eller paneler är de vanligast förekommande på kommunala avloppsreningsverk och har uppvisat hög syreöverföringseffektivitet.

Ett luftningssystem består även av luftledningar, reglerventiler, givare, en eller flera blåsmaskiner och styrsystem. Blåsmaskiners livscykelkostnad utgörs ofta till 80–90 % av den elenergi som används under dess livstid. Det gör det viktigt att hela luftningssystemet är energieffektivt. Blåsmaskiner bör ha låg energianvändning per enhet luft och vara väl

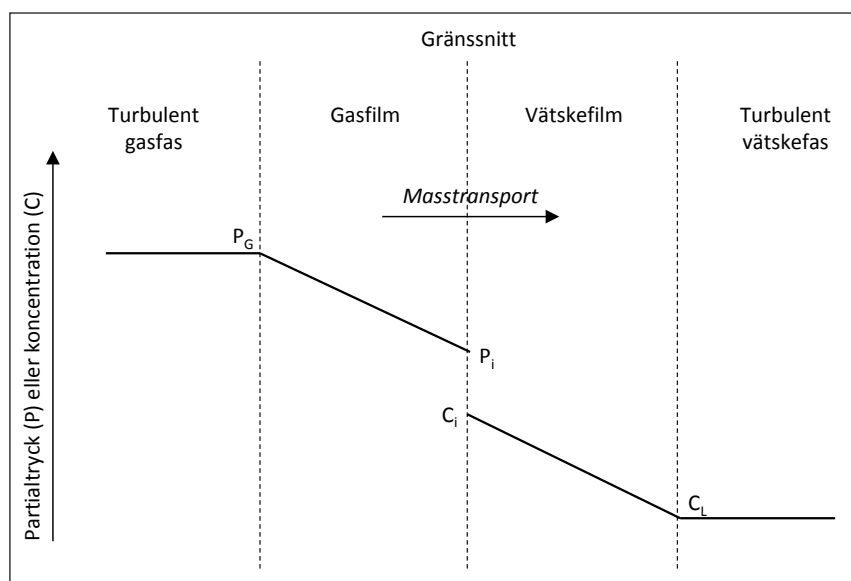
anpassade för variationer i belastning vid det aktuella reningsverket. Med effektiva luftare minskar luftflödesbehovet och tillsammans kan hög luftningseffektivitet ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$) uppnås.

De blåsmaskiner som används för luftning är av olika typer där displacementblåsmaskiner (vridkolv- och skruvmaskiner) i första hand ”flyttar” luften genom maskinen och centrifugalblåsmaskiner (exempelvis turboblåsmaskiner) ”sätter fart på luften”. Detta gör att de har olika egenskaper som reglerområde och förhållande mellan tryck och flöde. Generellt kan vridkolv- och skruvmaskiner regleras från ca 20 till 100 % medan turboblåsmaskiner kan regleras från ca 40 till 100 %.

6 Masstransport av syre från gas till vätska

I detta kapitel belyses teori kring hur gas löser sig i vätska och då i synnerhet hur syre löser sig i vatten. Genom att härleda hur olika förhållanden påverkar denna masstransport kan slutligen ett samband mellan syreöverföring vid de förhållanden som råder i processen och de som råder vid så kallade standardförhållanden uttryckas. Detta samband är viktigt vid dimensionering av luftningssystem.

För att mikroorganismerna ska få tillgång till syret måste det vara löst i det omgivande vattnet. Syret måste då först transporteras från luften i dess gasform till vattnets vätskeform genom absorption. Transporten från gas till vätska kan beskrivas med flera olika teorier av vilka tvåfilmsteorin ofta används (Figur 6.1). Tvåfilmsteorin är baserad på en fysikalisk modell enligt vilken två filmer finns vid övergången mellan gas och vätska. Ett ämne rör sig alltid spontant från ett ställe med hög koncentration till ett ställe med låg koncentration. Ju större skillnaden i koncentration är, desto högre hastighet rör sig ämnet med. Det innebär att koncentrationsgradienter leder till diffusion, vilken beskrivs av Ficks lag som anger att diffusionens hastighet är proportionell mot gradienten. Enligt tvåfilmsteorin transporteras syremolekyler från bulken av gasfasen genom gasfilmen till gränssnittet mellan gas och vätska. Där löser sig en del av syret i vattnet och transporteras sedan vidare genom vätskefilmen till bulken av vätskefasen. Drivkraften för den spontana transporten, det vill säga diffusionen, på både gas- och vätskesidan är de koncentrationsgradienter som finns i de två filmerna.



Figur 6.1 Koncentrationsgradienter för syre under masstransport från gasbubbla till vätskefas enligt tvåfilmsteorin.

Ett grundläggande antagande när tvåfilmsteorin tillämpas för syreöverföring är att systemet är så väl omblandat att omblandning kan antas vara perfekt. Det innebär till exempel att koncentrationen av löst syre antas vara densamma i hela den aktuella volymen (zonen). För en anläggning som befinner sig långt från detta tillstånd – där gradienter i syrehalter är tydliga i en och samma zon – kan detta behöva tas i särskilt beaktande.

Vid stationärt tillstånd måste hastigheten för masstransport av gas genom gasfilmen vara lika hög som hastigheten för transport genom vätskefilmen. Genom att använda Ficks lag kan masstransporten skrivas enligt:

$$r = k_G \cdot (P_G - P_i) = k_L \cdot (C_i - C_L) \quad (6.1)$$

där

r = masstransporthastighet per ytenhet per tidsenhet

k_G = masstransportkoefficient för gasfilmen

P_G = partialtryck av ämne A i bulken av gasfasen

P_i = partialtryck av ämne A vid gränsskiktet i jämvikt med koncentration C_i av ämne A i vätska

k_L = masstransportkoefficient för vätskefilmen

C_i = koncentration av ämne A vid gränsskiktet i jämvikt med partialtryck P_i av ämne A i gasfas

C_L = koncentration av ämne A i bulken av vätskan

De två koefficienterna för masstransport, k_G och k_L , beror på förhållandena vid gränsskiktet. De två termerna $(P_G - P_i)$ och $(C_i - C_L)$ representerar koncentrationsskillnaderna och utgör därmed drivkrafterna för transporten genom gas- respektive vätskefilmen. Gaser som har relativt låg löslighet i vatten, däribland syre, upplever ett mycket större motstånd mot diffusion i vätskefasen än i gasfasen. Ifall det antas att motståndet mot diffusion i gasfasen är försumbart jämfört med motståndet i vätskefasen, gäller följande förenklade samband där koncentrationen på vätskesidan istället antas vara i jämvikt med koncentrationen i bulken på gassidan:

$$r = K_L \cdot (C_s - C) \quad (6.2)$$

där

r = masstransporthastighet per ytenhet per tidsenhet

K_L = masstransportkoefficient för vätska

C_s = koncentration av löst syre i vattnet vid gränsskiktet i jämvikt med bulken av gasfasen

C = koncentration av löst syre i bulken av vätskan

Genom att multiplicera hastigheten per ytenhet (r) med ytan (A) och dividera med volymen (V) erhålls en volymetrisk hastighet för masstransporten:

$$r_v = K_L \frac{A}{V} \cdot (C_s - C) = K_L a \cdot (C_s - C) \quad 6.3$$

där

r_v = masstransporthastighet per volymsenhet per tidsenhet
(kg O₂ m⁻³ d⁻¹)

A = gränssnittsytan vid vilken masstransport sker från gas och vätska (m²)

V = Volym i vilken masstransporten sker, det vill säga bassängens volym
(m³)

a = specifik yta per volymsenhet (m⁻¹)

K_La = volymetrisk masstransportkoefficient (d⁻¹)

C_s = koncentration av löst syre i vattnet vid gränsskiktet i jämvikt med
bulken av gasfasen (kg O₂ m⁻³)

C = koncentration av löst syre i bulken av vätskan (kg O₂ m⁻³)

Faktorn K_La, som kallas den volymetriska masstransportkoefficienten, används för att beskriva syreöverföringens effektivitet. K_La påverkas av luftflödet. Ett högre luftflöde leder till högre K_La men sambandet är icke-linjärt så att den ökning i K_La som en viss ökning i luftflöde orsakar, är mindre vid ett högre luftflöde (Lindberg, 1997). K_La beror också på en rad andra faktorer som avloppsvattnets och luftarsystemets egenskaper.

Koncentrationen av syre i vattnet vid gränsskiktet (C_s) bestäms av Henrys lag som anger hur mycket av en gas som löser sig i en vätska vid ett visst partialtryck av gasen. Koncentrationen beror också på temperatur och salthalt i vattnet och kallas även syrets mättnadskoncentration. Eftersom mättnadskoncentrationen beror på syrets tryck påverkas den av höjd över havet och vattendjupet. I praktiken beror alltså hastigheten för syreöverföringen dels på den volymetriska masstransportkoefficienten och dels på skillnaden (C_s - C) mellan syrets mättnadskoncentration och dess faktiska koncentration vilket utgör drivkraften för transporten. Det innebär att en lägre koncentration av syre i vätskan skapar en större drivkraft för syreöverföring och således en högre överföringshastighet. En högre mättnadskoncentration på grund av ett större vattendjup eller en lägre temperatur leder också till en högre överföringshastighet.

Av sambanden framgår att masstransporthastigheten för syre är proportionell mot ytan på gas-vätskegränsskiktet. Eftersom små bubblor innebär en större yta per volym, leder mindre bubblor till en högre masstransporthastighet.

Vid syresättning av rent vatten kan förändringen i syrets koncentration (C_i) vid tiden t beskrivas enligt:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_\infty^* - C_i) \quad (6.4)$$

där C_∞^{*} är syrets mättnadskoncentration (jämviktsskoncentration efter lång tids luftning). Sambandet ovan kan också skrivas i integrerad form enligt:

$$C_t = C_{\infty}^* - (C_{\infty}^* - C_0) e^{-K_L a t} \quad (6.5)$$

där C_0 är den initiala syrekonscentrationen när testet påbörjas. Detta samband kan användas för att anpassa empiriska data från syresättningstest och därmed bestämma $K_L a$.

Syreöverföringshastigheten (OTR, "oxygen transfer rate", kg O_2 /h) i ett system är produkten av dC/dt och den luftade vätskevolymen:

$$OTR = K_L a \cdot (C_{\infty}^* - C_t) \cdot V \quad (6.6)$$

Eftersom masstransporten av syre påverkas av en rad faktorer som koncentration av löst syre, tryck, temperatur, vattnets och luftarsystemets egenskaper, är det vanligt att ange syreöverföringsprestanda vid standardförhållanden. Detta gör det möjligt att specificera prestandan för luftningsutrustning på ett jämförbart sätt. Standardförhållanden har definierats enligt följande:

- Rent vatten (kranvatten) som medium
- Vattnets temperatur = 20 °C
- Lufttrycket = 1 atm
- Koncentration av löst syre = 0 mg/l

Genom att tillämpa standardförhållandena på föregående ekvation kan syreöverföringshastigheten vid standardförhållanden (SOTR, "standard oxygen transfer rate") uttryckas enligt:

$$SOTR = K_L a_{20} \cdot C_{\infty 20}^* \cdot V \quad (6.7)$$

där $C_{\infty 20}^*$ är syrets jämviktskoncentration efter lång tids luftning vid 20 °C. Eftersom trycket i tanken är högre än vid ytan på grund av vattenpelaren, är denna jämviktskoncentration högre än den mättnadskoncentration som kan hittas i typiska tabeller för atmosfärstryck.

Masstransportkoefficienten $K_L a$ ökar med temperaturen. Sambandet mellan dess värde vid temperaturen T ($K_L a_T$) och vid 20 °C beskrivs av följande uttryck:

$$K_L a_{20} = K_L a_T \cdot \theta^{(20 - T)} \quad (6.8)$$

där

T = vattnets temperatur (°C)

θ = temperaturkorrigeringsfaktor som vanligtvis antas vara 1,024 (ASCE, 2007; US EPA, 1989)

Syrets jämviktskoncentration påverkas också av temperatur och tryck. Sambandet mellan dess värde vid rådande vattentemperatur och lufttryck och vid standardförhållanden är:

$$C_{\infty 20}^* = C_{\infty T}^* \cdot \left(\frac{1}{\tau \cdot \Omega} \right) \quad (6.9)$$

där τ är en temperaturkorrigeringsfaktor och Ω är en tryckkorrigeringsfaktor. För temperaturkorrigeringsfaktorn gäller:

$$\tau = \frac{C_{sT}^*}{C_{s20}^*} \quad (6.10)$$

där C_{sT}^* och C_{s20}^* är tabellvärden för mättnadskoncentrationen för syre vid ytan vid temperaturerna T respektive 20 °C, båda vid atmosfärstryck och 100 % luftfuktighet.

$$\Omega = \frac{P_b}{P_s} \quad (6.11)$$

där P_b är det rådande lufttrycket i omgivningen (atm) och P_s är standardtrycket 1 atm.

Masstransporten påverkas inte bara av koncentrationen av syre, temperatur och tryck, utan även av faktorer som turbulens, tankgeometri, typ av luftarsystem och karaktären på avloppsvattnet. För att ta hänsyn till dessa faktorer används de två korregeringsfaktorerna alfa (α) och beta (β). För faktorn α gäller:

$$\alpha = \frac{K_L a \text{ (avloppsvatten)}}{K_L a \text{ (renvatten)}} \quad (6.12)$$

Detta samband innebär att masstransportkoefficienten för rent vatten multipliceras med α för att erhålla motsvarande koefficient vid avloppsvatten. En viktig del av denna korrektion är att ta hänsyn till de ytaktiva ämnen som finns i avloppsvattnet och tenderar att anrikas vid gas-vätskegränsskiktet och påverka masstransporten (Rosso et al., 2006; Rosso & Stenstrom, 2006a; Wagner & Pöpel, 1996). Ofta är denna påverkan negativ, det vill säga masstransporten är mindre effektiv i avloppsvatten än i rent vatten, vilket leder till att α -värdet är lägre än ett. Typiska α -värden ligger mellan 0,4 och 0,8 vid bottenluftning.

Faktorn β används för att korrigera syrets mättnadskoncentration för den påverkan som sker på grund av lösta ämnen i avloppsvattnet, däribland salter och ytaktiva ämnen.

$$\beta = \frac{C_s \text{ (avloppsvatten)}}{C_s \text{ (renvatten)}} \quad (6.13)$$

Genom att kombinera ekvation 6.6, 6.9, 6.12 och 6.13 kan syreöverföring vid de faktiska processförhållandena skrivas enligt:

$$OTR = \alpha \cdot K_L a_T \text{ (renvatten)} \cdot (\tau \cdot \beta \cdot \Omega \cdot C_{\infty 20}^* - C) \cdot V \quad (6.14)$$

Genom att kombinera ekvation 6.7 och 6.8 kan syreöverföring vid standardförhållanden skrivas enligt:

$$SOTR = K_L a_T \text{ (renvatten)} \cdot \theta^{(20-T)} \cdot C_{\infty 20}^* \cdot V \quad (6.15)$$

Ekvation 6.14 och 6.15 kan kombineras till ett övergripande samband mellan syreöverföring vid standardförhållanden och syreöverföring vid de faktiska förhållandena enligt:

$$\text{OTR} = \alpha \cdot (\text{SOTR}) \cdot \theta^{(T-20)} \left(\frac{\tau \cdot \beta \cdot \Omega \cdot C_{\infty 20}^* - C}{C_{\infty 20}^*} \right) \quad (6.16)$$

där

OTR = Syreöverföringshastighet vid verkliga förhållanden i processen med koncentration av löst syre C vid temperaturen T ($\text{kg O}_2/\text{h}$)

SOTR = Syreöverföringshastighet vid standardförhållanden 20°C , 1 atm och $C = 0\text{ mg/l}$ ($\text{kg O}_2/\text{h}$)

Utöver syreöverföringshastigheten definieras också följande parametrar vid standardförhållanden:

SOTE = Syreöverföringseffektiviteten vid standardförhållanden ("standard oxygen transfer efficiency") som anger hur stor andel av det ingående syret som absorberas vid luftningen, i %, i %/m vattendjup eller i $\text{g O}_2/(\text{Nm}^3)$.

SAE = Standardluftningseffektivitet ("standard aeration efficiency") som anger SOTR relativt använd effekt som $\text{kg O}_2/\text{kWh}$.

Standardsyreöverföringseffektiviteten definieras som:

$$\text{SOTE} = \frac{\text{SOTR} \cdot 100}{q_{\text{O}_2, \text{in}}} [\%] \quad (6.17)$$

där $q_{\text{O}_2, \text{in}}$ är massflödet av syre in till systemet (i $\text{kg O}_2/\text{h}$). Genom att använda andelen syre i luft (23,1 vikt-%) och luftens densitet vid 0°C ($\rho = 1,292\text{ kg/m}^3$) erhålls ett samband mellan luftflödet Q_L i normalkubikmeter per timme (Nm^3/h), SOTR ($\text{kg O}_2/\text{h}$), SOTE ($\% \cdot 100$) och konstanten $0,298\text{ kg O}_2/\text{Nm}^3$. Här används 0°C eftersom denna temperatur används för att definiera normalkubikmeter.

$$Q_L = \frac{\text{SOTR}}{0,231 \cdot \rho \cdot \text{SOTE}} = \frac{\text{SOTR}}{0,298 \cdot \text{SOTE}} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \quad (6.18)$$

I praktiken är det vanligtvis α -faktorn som är den mest svårdefinierade. Omvandlingar för att ta hänsyn till temperatur och tryck kan utföras relativt enkelt och β -faktorn varierar inom ett relativt snävt spann för de flesta avloppsvatten (0,95–0,99). Genom att korrigera OTR för samtliga faktorer utom α , det vill säga temperatur, lufttryck, syrehalt, mättnadskoncentration och β , erhålls αSOTR ($\alpha \cdot \text{SOTR}$). Denna parameter innebär syreöverföringshastigheten i avloppsvatten men i alla övriga hänseenden under standardförhållanden. På motsvarande sätt kan också αSOTE och αSAE användas för syreöverföringseffektiviteten respektive luftningseffektivitet i avloppsvatten men i övrigt under standardförhållanden.

Parametrarna SOTR och OTR anger hur mycket syre ($\text{kg O}_2/\text{h}$) som luftningssystemet förmår att överföra. Denna mängd ska motsvara det behovet av syre som finns i processen. Behovet av syre i processen benämns AOR ("actual oxygen requirement") och beror på belastning och reduktion av föroreningar i anläggningen samt driftsätt. Beräkning av AOR beskrivs i Kapitel 8. Behovet av syre kan också uttryckas vid standardförhållanden och kallas då SOR ("standard oxygen requirement"). Sambandet mellan AOR och SOR ser således likadant ut som mellan OTR och SOTR:

$$AOR = \alpha \cdot (SOR) \cdot \theta^{(T-20)} \left(\frac{\tau \cdot \beta \cdot \Omega \cdot C_{\infty 20}^* - C}{C_{\infty 20}^*} \right) \quad (6.19)$$

Eftersom SOR och SOTR ska vara lika i ett fungerande system, kan luftflödet beräknas om SOTE är känt enligt:

$$Q_L = \frac{SOR}{0,298 \cdot SOTE} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] \quad (6.20)$$

6.1 Sammanfattning

Den process då syre löser sig i vatten kan beskrivas med ett enkelt samband som produkten mellan den volymetriska masstransportkoefficienten $K_L a$ och skillnaden mellan syrets mättnadskoncentration och faktiska koncentration. Masstransportkoefficienten påverkas av temperatur samt vattnets och luftningssystemets egenskaper (α -faktorn). Syrets mättnadskoncentration påverkas av temperatur, lufttryck och vattnets sammansättning. Genom att ta hänsyn till hur dessa faktorer påverkar syreöverföringen kan syrebehovet och syreöverföringen omvandlas från processförhållandena (AOR och OTR) till standardförhållanden (SOR och SOTR) som innebär rent vatten, 20 °C, 1 atm lufttryck och 0 mg/l löst syre. Denna omvandling behövs vid design av ett luftningssystem för att kunna uttrycka vilken kapacitet som behövs på ett sätt som går att relatera till utrustningens prestanda oberoende av förhållandena i processen. Andra viktiga termer i sammanhanget är syreöverföringseffektiviteten (SOTE) och luftningseffektiviteten (SAE) vid standardförhållanden vilka anger hur stor andel syret som överförs till vattnet respektive hur mycket syre som överförs relativt energianvändningen.

7 Luftning och energianvändning

Luftningsanläggningens effektivitet kan påverkas av en lång rad faktorer som kan vara relaterade till såväl anläggningens processkonfiguration och driftförhållanden som till utrustningen och dess utformning och användning (Stenstrom, 1990). Olika biologiska processalternativ kan också resultera i olika behov av syre. Detta kapitel beskriver hur olika faktorer i en anläggning påverkar behovet av syre och effektiviteten i syreöverföring med fokus på energianvändning. En sammanställning över olika parametrars påverkan på luftningseffektiviteten ges i Avsnitt 7.4 (Tabell 7.2).

Följande faktorer är viktiga att ta hänsyn till: AOR ("actual oxygen uptake rate"; kg O₂/h; mikroorganismernas verkliga behov av syre för att utföra omvandlingarna i processen), α -värdet (negativ inverkan från ytaktiva ämnen i avloppsvattnet) och syreöverföringseffektiviteten (SOTE och α SOTE, i %, andel av tillfört syre som används i processen under standardförhållanden i rent vatten respektive avloppsvatten). Vid jämförelse av energianvändning för olika luftarsystem används också ofta SAE och α SAE (kg O₂/kWh) vilka anger mängd tillfört syre som SOTR eller α SOTR i förhållande till använd effekt.

7.1 Avloppsvattnets sammansättning

Den mest svårförutsägbara faktorn som påverkar luftningseffektiviteten är avloppsvattnets sammansättning. Som nämnts ovan påverkar ytaktiva ämnen i avloppsvattnet masstransporten negativt vid gas-vätskegränsskiktet.

Faktorn α kan bestämmas experimentellt med flera olika metoder (Avsnitt 11.3). Samtidigt som α -faktorn har stor påverkan på luftningens effektivitet är dess värde ofta starkt varierande mellan olika anläggningar, över tid för en och samma anläggning (Leu et al., 2009), över anläggningens olika delar (Iranpour et al., 2000) och så vidare. En undersökning vid fem svenska avloppsreningsverk bekräftade att α -faktorn ofta varierar över tiden och över anläggningarnas delar (Röttorp et al., 1999). Svårigheterna med att bestämma ett "genomsnittligt" värde på α för en anläggning eller avgöra vilket värde som ska användas för dimensionering är uppenbara och har varit uppmärksammade under lång tid (Stenstrom & Gilbert, 1981).

Vissa försök har gjorts att på ett systematiskt sätt relatera α -faktorn till olika betingelser för att på så sätt kunna förutsäga värdet utifrån aktuella förutsättningar. Exempelvis har luftflöde och slamålder använts (Rosso et al., 2005) vilket har utvidgats med hänsyn till geometrin för den luftade tanken (Gillot et al., 2005; Gillot & Heduit, 2008), hydrodynamiska förhållanden i tanken (Amaral et al., 2017) och slamhalt (Henkel et al., 2009). Även ett så enkelt tillvägagångssätt som att relatera α direkt till belastning av total COD har använts med viss framgång (Jiang et al., 2017). Icke desto mindre består fortfarande svårigheterna i att entydigt

bestämma värdet på α vilket måste tas hänsyn till vid dimensionering och design av luftningsanläggningar.

7.2 Påverkan av olika biologiska processalternativ

Avloppsvatten innehåller en stor mängd organiska ämnen som påverkar syreöverföringen negativt vilket speglas i α -värdet. I samband med att föroreningarna bryts ned och avlägsnas från vattnet ökar α -värdet (Hwang & Stenstrom, 1985). Därför observeras ofta en ökande trend för α -värdet, zon för zon över en anläggning (Stenstrom, 1990). Detta innebär också att α -värdet påverkas negativt av belastningen. Det leder till att syreöverföringen tyvärr ofta är som sämst i samband med att mikroorganismernas behov av syre är som störst (Jiang et al., 2017; Leu et al., 2009; US EPA, 1989).

7.2.1 Nitrifikation och denitrifikation

För avskiljning av organiskt material krävs en viss mängd syre som är nära relaterad till mängden avskild BOD. En process som dessutom drivs för nitrifikation av inkommande ammonium kräver därutöver syre för denna omvandling. Ifall processen även drivs för denitrifikation av det bildade nitraten med BOD från avloppsvattnet som kolkälla, "återanvänds" en del av syret. Det gör att syrebehovet minskar något i förhållande till endast BOD-avskiljning och nitrifikation. Mikroorganismernas behov av syre är därför störst vid nitrifikation, lägre vid nitrifikation och denitrifikation och lägst vid endast BOD-reduktion.

7.2.2 Slamålder

Slamåldern har stor påverkan på både behovet av syre och effektiviteten för syreöverföringen. Samtidigt som mikroorganismerna växer till, sker också en konstant nedbrytning av den bildade biomassan. Ju längre slammet befinner sig i processen, det vill säga ju högre slamåldern är, desto mer nedbrytning hinner ske. Det leder till att slamproduktionen blir lägre vid en hög slamålder men medför också att syrebehovet blir högre.

Nitrifikation kräver längre slamålder än nedbrytning av organiskt material eftersom de nitrifierande mikroorganismerna växer till långsamt. I ett nitrifierande system kräver mikroorganismerna således mer syre både för att kunna oxidera ammonium till nitrat och som en följd av den högre slamålder som krävs för att behålla de nitrifierande mikroorganismerna i systemet.

Slamåldern påverkar också syreöverföringseffektiviteten på ett sätt som ger motsatt effekt. Vid en hög slamålder sker en mer effektiv syreöverföring vilket syns som ett högre α -värde (Leu et al., 2012; Rieth et al., 1995; Rosso et al., 2005). Det innebär att även om det i en nitrifierande process behövs mer syre, används en så mycket högre andel av syret i den tillförda luften att mängden luft till processen inte behöver ökas i samma utsträckning.

Anledningen till det högre α -värdet är att vid en högre slamålder kan fler typer av mikroorganismer få en möjlighet att bryta ned de organiska ämnen i avloppsvattnet som har negativ inverkan på α -värdet. Detta är

framförallt ytaktiva ämnen. Vissa av de ytaktiva ämnena är lättnedbrytbara och avskiljs även vid låga slamåldrar. Men vissa kräver längre slamåldrar för att brytas ned och ofta tycks denna sammanfalla på ett ungefär med slamåldern som krävs för nitrifikation (Rieth et al., 1995).

7.2.3 Fördenitrifikation

En selektor är en första, mindre zon i processen där returslammet möter inkommande avloppsvatten. Här uppstår en lokalt hög belastning av föroreningar. Selektorer kan drivas aerobt (med syre från luftning), anoxiskt (utan syre men i närvaro av nitrat) eller anaerobt (utan syre eller nitrat) och leder i allmänhet till slam med bättre sedimenteringsegenskaper jämfört med en stor totalomblandad tank (Martins et al., 2004).

I en anoxisk selektor sker fördenitrifikation, vilken sänker behovet av syre jämfört med nitrifikation utan fördenitrifikation, vilket nämnt ovan. Fördenitrifikation har också följden att en del av de ytaktiva ämnena i avloppsvattnet som påverkar α -värdet bryts ned under anoxiska förhållanden innan de når luftningen (Rosso et al., 2008a). När avloppsvattnet sedan når den första luftade zonen har en del av dessa ämnen redan avskilts och α -värdet blir därför högre än det annars skulle varit.

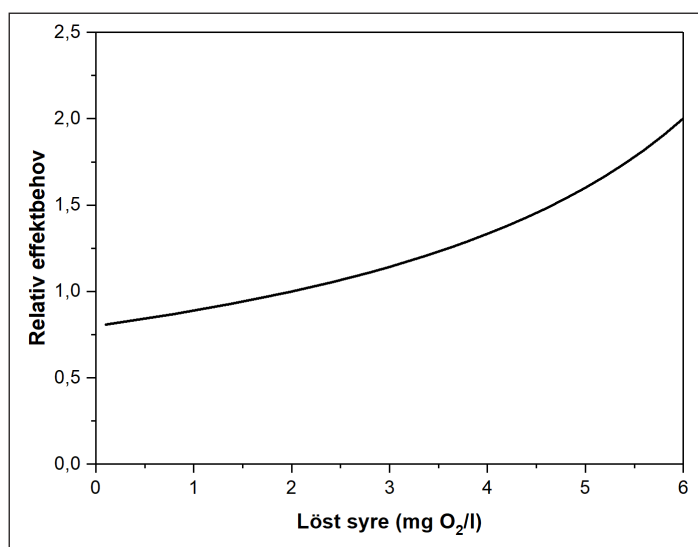
En process med fördenitrifikation och nitrifikation kan därför mycket väl kräva mindre luft än en process med bara BOD-reduktion, trots att den högre slamåldern orsakar ett större behov av syre. En ekonomisk jämförelse under amerikanska förutsättningar pekade på att en process med fördenitrifikation och nitrifikation kan innebära lägre driftkostnader än en process med bara BOD-reduktion (Rosso & Stenstrom, 2005). Den högre syreöverföringseffektiviteten tillsammans med en lägre kostnad för att bli av med det rötade slammet vägde i detta fall tyngre än ett större syrebehov och en lägre biogasproduktion.

7.3 Påverkan av utrustning och driftsätt

7.3.1 Koncentration av löst syre

Koncentrationen av löst syre som används under reningen har en kraftig påverkan på syreöverföringen och därmed på vilket luftflöde som behöver tillämpas. Sambandet är icke-linjärt (Figur 7.1) eftersom luftflödet har en icke-linjär påverkan på $K_L a$. Det krävs ungefär dubbelt så mycket luftning för att upprätthålla 6 mg/l som 2 mg/l.

Av detta följer att, för att minimera energianvändningen, bör den lägsta möjliga koncentration av löst syre som leder till tillfredställande reningsresultat tillämpas. Vid nitrifikation måste naturligtvis särskild hänsyn tas till att de nitrifierande mikroorganismerna har relativt låg affinitet för syre och måste ges möjlighet att växa till tillräckligt snabbt för att behållas i systemet. Detta gäller i synnerhet vintertid då tillväxthastigheten är extra låg på grund av låg temperatur. Men det finns även andra risker med drift vid en alltför låg syrehalt. Låga syrehalter kan leda till att filamentbildande bakterier växer till. Detta kan ske på grund av att mikrogradients lätt uppstår i flockarna vid låga syrehalter, vilket ger filament fördelar i konkurrensen



Figur 7.1 Effekt av koncentration löst syre på syreöverföringen vid mättnadskoncentrationen 10 mg/l. Relativt effektbehov jämfört med drift vid 2 mg/l.

med flockbildande bakterier (Martins et al., 2004, 2003). Då filament växer i alltför hög grad försämrar slammets sedimenteringsegenskaper, vilket riskerar att leda till ökade utsläpp av suspenderade ämnen från sedimenteringsbassängerna. Även destabilisering av flockar kan ske vid alltför låg halt löst syre med liknande risker.

En mer svårförutsägbar risk med låg syrehalt är risken för förhöjda lustgasutsläpp (Arnell, 2013). Den lägsta halten av löst syre som kan tillämpas utan att det medför problem beror på många faktorer och är därför tämligen specifik för varje anläggning och årstid. Traditionellt har koncentrationen 2 mg/l ansetts vara en "säker" nivå men ofta kan denna understigas, åtminstone i någon del av anläggningen, utan negativ inverkan (Arnaldos & Pagilla, 2014; Guo et al., 2010). På så sätt kan onödig energianvändning undvikas.

I en process med suspenderade bärare (MBBR) blir relationen till halten av löst syre annorlunda. Eftersom kraftigare diffusionsbegränsningar uppstår i biofilmen kan hastigheten i en sådan process öka med halten av löst syre upp till mättnadskoncentrationen och ännu högre (Hem et al., 1994). Eftersom syftet med MBBR ofta är att uppnå en kompakt process drivs en sådan vanligtvis vid ett större syreöverskott än en aktivslamprocess (se Avsnitt 7.3.9)

7.3.2 Temperatur och lufttryck

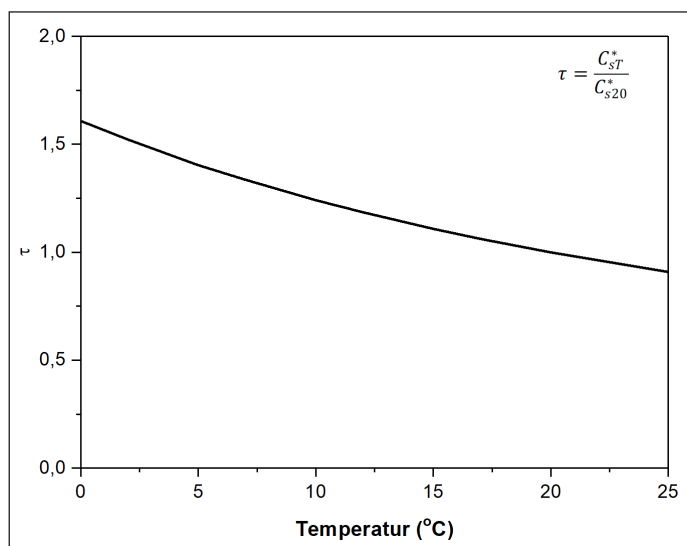
Syreöverföringen påverkas på flera olika sätt av vattnets temperatur i anläggningen. Masstransportens hastighet ökar med temperaturen vilket tas hänsyn till med en temperaturkorrigeringsfaktor. Samtidigt minskar lösligheten för alla gaser vid ökad temperatur, tvärt emot vad som är fallet med fasta ämnen. Det innebär att syrets mättnadskoncentration är lägre vid en högre temperatur (Figur 7.2) vilket leder till motsatt effekt, nämligen minskad syreöverföringshastighet. Dessa effekter motverkar alltså var-

andra men summan är att något mer syre behövs vid en högre temperatur, eftersom syrets minskade löslighet är den effekt som dominerar.

Temperaturen på den ingående luften påverkar också energianvändningen. Varmare luft har lägre densitet och innehåller därför lägre halt av syre. Vid en högre temperatur på luften behövs därför mer luft för att tillgodose samma syrebehov i processen. En låg lufttemperatur gynnar därför en lägre energianvändning.

Eftersom både syreöverföringseffektivitet och blåsmaskinernas kapacitet minskar vid högre temperaturer är det vanligtvis vid varma förhållanden som problem med begränsningar i luftningskapacitet uppkommer.

En annan effekt av en ökad temperatur i vattnet är att mikroorganismernas tillväxthastighet ökar. De allmänt ökade hastigheterna kan vara gynnsamma för processen i stort. Men högre hastigheter av syreupptag leder också till en ändrad profil för syrebehovet över anläggningen. Luftbehovet kan i synnerhet öka i början av anläggningen. När de syreförbrukande ämnena sedan är förbrukade, kan luftbehovet vara mindre i slutet av anläggningen.



Figur 7.2 Syrets löslighet minskar med ökad temperatur. Faktorn τ innebär kvoten mellan mättnadskoncentrationen vid aktuell temperatur och mättnadskoncentrationen vid 20°C.

Ett lägre lufttryck uppstår med ökad höjd över havsnivån. Lägre lufttryck leder till en lägre mättnadskoncentration av syre och därmed svagare drivkraft för syreöverföring (skillnad mellan mättnadskoncentration och verklig koncentration). För de flesta platser i Sverige har dock detta en liten inverkan. Men eftersom korrigeringen är enkel att utföra, bör den ändå göras.

7.3.3 Salthalt

En förhöjd salthalt i avloppsvattnet påverkar syreöverföringen positivt. Normalt slår bubblor ihop sig på väg upp genom bassängen så att små bubblor efterhand blir större men färre bubblor. Salt tenderar att förhin-

dra denna sammanslagning genom att öka ytspänningen vilket leder till mindre bubblor vid högre salthalter (Behnisch et al., 2018). Det gör att syreöverföringseffektiviteten ökar med saltkoncentrationen upp till ungefär 10 g/l TDS ("total dissolved solids"), vid vilken sammanslagningen är helt förhindrad (Sander et al., 2017a). Syreöverföringen i form av KLa eller SOTE ökar med ungefär 20 % vid 2 000 mg/l TDS och ungefär 35 % vid 3 000 mg/l TDS (ASCE, 2007; Sander et al., 2017a).

Vid låga salthalter i typiskt kommunalt avloppsvatten är effekten så liten att den inte behöver tas hänsyn till. Men ifall salthalten är förhöjd, till exempel på inläckage av havsvatten, kan det vara märkbart. Salthalten kan också vara förhöjd på grund av bidrag från industrier. Men i dessa fall kan den positiva effekten av salt ofta maskeras av en motverkande negativ påverkan på α -värdet från ytaktiva ämnen i samma vatten. Effekten av salt är viktig att ta hänsyn till när det gäller prestandan för ett luftarsystem i rent vatten (Avsnitt 11.2) vilket ibland har förbisetts.

Salthalten påverkar också mättnadskoncentrationen av löst syre. En ökad salthalt minskar syrets mättnadskoncentration vilket uttrycks med faktorn β . I de flesta fall är denna effekt mycket liten på grund av låga salthalter i normalt avloppsvatten. Faktorn β är kvoten mellan syrets mättnadskoncentrationer i processvatten och renvatten, men kan också uppskattas genom följande approximation där koncentrationen av lösta ämnen (TDS) anges i mg/l (ASCE, 1997):

$$\beta = 1 - 0,01 \cdot \frac{\text{TDS}}{1000 \text{ mg/l}} \quad (7.1)$$

För kommunala avloppsvatten är det vanligt β antas vara 0,98. Med bidrag från något saltrikt industriellt processavloppsvatten eller inläckage av havsvatten kan faktorn vara lägre.

7.3.4 Slamhalt

Slamhalten i en anläggning påverkas av vilken slamålder som systemet drivs vid. Påverkan av slamåldern har diskuterats ovan (Avsnitt 7.2.2). Slamhalten kan också ha en direkt effekt på syreöverföringen, oberoende av vilken slamålder som tillämpas.

Höga koncentrationer av aktivt slam kan leda till sämre syreöverföring vilket då speglas i lägre α -värden. Effekten i form av minskade α -värden är inte alltför kraftig vid de måttliga koncentrationer av slam som vanligtvis tillämpas i aktivslamprocessen, det vill säga 2–5 g/l (Muller et al., 1995). Men vid de höga slamkoncentrationer (> 5 g/l) som tillämpas med MBR blir minskningen avsevärd och kan leda till hög energianvändning för luftning (Henkel et al., 2009; Krampe & Krauth, 2003; Schwarz et al., 2006; WEF, 2012). En slamkoncentration på 10 g/l har visat sig kunna leda till ungefär 40 % lägre α -värde än vid 2–4 g/l (Fan et al., 2014; Muller et al., 1995). Detta är en viktig anledning till att det numera är vanligt vid design av MBR att undvika alltför höga slamhalter som kompromiss mellan kompaktitet och energieffektivitet (WEF, 2012). Orsaken till slamhaltens påverkan är att viskositeten ökar med slamhalten (Krampe & Krauth,

2003), vilket leder till en ökad sannolikhet för att bubblorna ska kollidera och slå ihop sig till större bubblor med lägre specifik yta och därmed lägre effektivitet (Schwarz et al., 2006).

De större och mer kompakta aggregat som aeroba granuler utgör (Avsnitt 4.6) ger inte upphov till lika ökande viskositet vid höga halter av biomassa. Därför kan en process med aerobt granulärt slam drivas vid höga koncentrationer av slam (8–12 g/l) utan en påtaglig minskning i syreöverföring (Mota et al., 2018). Processen kan således bli både kompakt och energieffektiv.

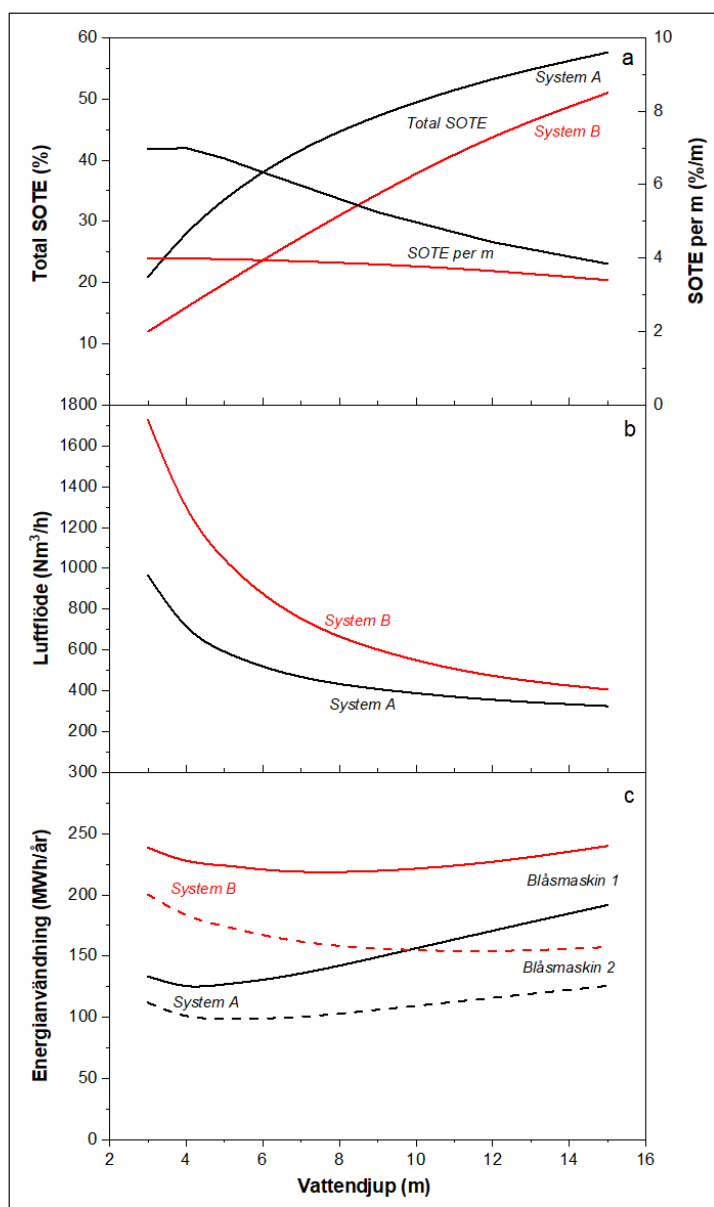
7.3.5 Bassängdjup

Syreöverföringseffektiviteten ökar med djupet på bassängen, det vill säga installationsdjupet från luftare till ytan (Al-Ahmady, 2006; Fernandez-Alvarez et al., 2014). Bubblorna når en mer eller mindre konstant hastighet när de stiger genom vätskan och en högre stighöjd medför därför en längre uppehållstid för bubblorna i vattnet. Längre tid gör att mer av syret i bubblorna hinner lösa sig i vattnet innan de når ytan. Detta är anledningen till att syreöverföringseffektiviteten vid standardförhållanden ofta anges per meter (%/m). Men syreöverföringseffektiviteten ökar inte linjärt med avseende på djupet (Wagner & Popel, 1998). Vid ökat djup minskar effektiviteten per ytterligare meter vilket beror på två faktorer. Dels ökar sannolikheten för att bubblorna ska slå ihop sig till större bubblor på vägen upp. Dels kan partialtrycket av syre i bubblorna vid höga djup bli så pass lågt att det påverkar masstransporten negativt. Det senare inträffar om en så stor andel av luftens syre hinner förbrukas på vägen upp att överföringshastigheten sjunker.

I Figur 7.3a illustreras hur total SOTE och SOTE per meter vattendjup varierar med djupet i en reaktorvolym med två olika luftningssystem med olika effektivitet (System A och B). Den stora relativa skillnaden som råder mellan de två systemen vid låga djup minskar vid ökat djup. SOTE per meter minskar inte lika snabbt för det mindre effektiva systemet eftersom syret i bubblorna inte förbrukas lika snabbt här.

En djupare bassäng innebär också att det genomsnittliga trycket är högre på grund av vattenpelaren. Det leder till att mättnadskoncentrationen av syre blir högre. Eftersom drivkraften för masstransport är skillnaden mellan mättnadskoncentrationen och den faktiska koncentrationen av syre blir drivkraften större, vilket leder till syreöverföringen också går snabbare.

Vid ett högre vattendjup räcker det alltså med ett betydligt mindre luftflöde eftersom en större del av luftens syre används, givet samma processvolym (Figur 7.3b). Energin för att tillföra luften minskar däremot inte lika drastiskt. Det beror på att ett högre djup samtidigt innebär ett större mottryck som blåsmaskinen behöver leverera (Pöpel & Wagner, 1994). Upp till ett visst djup minskar energianvändningen för luftning, för att sedan plana ut eller till och med öka vid ännu högre djup. Detta illustreras i Figur 7.3c där energianvändningen (MWh/år) har uppskattats för samma exempel baserat på data för två olika typer av blåsmaskiner. Med det mer effektiva luftningssystemet (System A), uppnås lägst energianvändning vid



Figur 7.3 Exempel på design och energianvändning för en konstant processvolym vid olika vattendjup (installationsdjup) med två olika luftningssystem varav ett med högre (System A) och ett med lägre (System B) syreöverföringseffektivitet. (a) Total syreöverföringseffektivitet och SOTE per meter, (b) luftflöde och (c) energianvändning beräknad med två olika typer av blåsmaskiner enligt Pöpel & Wagner (1994). Beräkningsexempel med data från Xylem Water Solutions (System A) och litteraturen (System B) (Pöpel & Wagner, 1994).

4,2 eller 5 m djup, beroende på blåsmaskin. För det mindre effektiva System B uppnås istället lägst energianvändning vid 7,5 respektive 13 m djup.

Vilket som är det optimala installationsdjupet varierar alltså med luftarsystem och typ av blåsmaskin och kan ligga i ett så brett spann som mellan 4 och 13 m. Hur energianvändningen för olika blåsmaskinstekniker påverkas av vattendjupet (mottrycket) illustreras i Beräkningsexempel – val av blåsmaskinsteknik (Avsnitt 14.1).

7.3.6 Luftartyp

Vid bottenluftning leder de mindre bubblorna från finblåsiga luftare till större specifik yta för masstransport och därmed till en högre syreöverföringseffektivitet än för grovblåsiga luftare. De mindre bubblorna stiger också långsammare. Men olika luftarter ger också upphov till olika α -värden, vilket påverkar syreöverföringseffektiviteten. Grovblåsiga luftare skapar generellt högre turbulens kring bubblorna än finblåsiga. Den högre turbulensen gör att ytaktiva ämnen inte får lika stor negativ inverkan på syretransporten från gas till vätska. Detta reflekteras i att grovblåsiga system leder till högre α -värden än finblåsiga. En sammanställning av mätningar från amerikanska avloppsreningsverk visade på α -värden för de finblåsiga system som undersökts på 0,3–0,8 och för de grovblåsiga 0,7–0,8 (Stenstrom & Gilbert, 1981). När det gäller α -värden kan dock alltid stora variationer förekomma mellan olika typer av luftarsystem och avloppsvatten. Totalt sett är de finblåsiga systemen generellt mer energieffektiva än de grovblåsiga trots lägre α -värden (Rosso et al., 2008a).

Mekaniska ytluftare, som syresätter genom att möjliggöra för atmosfärens syre att lösa sig i vattnet, skapar hög turbulens och kan därför ge upphov till α -värden över 1 (Tchobanoglous et al., 2014). Men eftersom ytluftare har hög energianvändning är de totalt sett mindre energieffektiva än bottenluftningssystem. I synnerhet djupare bassänger är svåra att lufta energieffektivt från ytan.

Även mekaniska bottenluftare skapar hög turbulens som är gynnsam för syreöverföringen. Vissa kombinerade (hyperbola) omrörare och luftare har också särskilda skjuvfenor som slår sönder de stora bubblorna till mindre. På så sätt kan potentiellt fördelar från både grovblåsiga (låga α -värden och mottryck) och från finblåsiga system (små bubblor) erhållas. Dock åtgår även energi för omrörningen vilket påverkar den totala energianvändningen. Energieffektiviteten för mekaniska bottenluftare beror också på bassängens form där djupa samt kvadratiska eller runda bassänger är gynnsammare än långsmala.

Nedan sammanställs värden på luftningseffektivitet för olika typer av luftare som rapporterats från olika mätningar (Tabell 7.1). Luftningseffektiviteten vid standardförhållanden anger hur mycket syre som kan överföras till rent vatten (vid 1 atm, 20 °C, 0 mg/l syre) per enhet energi som används. Spannen som anges är breda då luftningseffektiviteten beror på

Tabell 7.1 Exempel på värden för luftningseffektivitet i rent vatten vid standardförhållanden (SAE) som har rapporterats i litteraturen (Henze et al., 2008; Mueller et al., 2001; Rosso, 2018; WEF, 2018). Rent vatten innebär att siffrorna inte speglar att α -värden kan skilja sig för olika typer av luftare.

Typ av luftare	SAE (kg O ₂ /kWh)
Finblåsiga	2,6–7,1
Grovblåsiga	0,6–2,2
Kombinerade omrörare och luftare	1,2–2,1
Jetluftare	1,1–2,2
Ytluftare	0,9–2,1

många faktorer, däribland vilken typ av blåsmaskin som används. Mätningarna har gjorts i system utformade på olika sätt så tabellen ska tolkas med försiktighet. Eftersom siffrorna gäller i rent vatten tar de inte hänsyn till att α -värden kan skilja sig för olika typer av luftare vilket påverkar energianvändningen i avloppsvatten.

7.3.7 Luftflöde

Syreöverföringseffektiviteten vid bottenluftning påverkas av luftflödet per luftare eller per luftaryta. Ett högre luftflöde per luftare leder till större bubblor och därför är effektiviteten högst vid låga flöden vid vilka små bubblor bildas (Ashley et al., 1991; Newbry, 1998; Rosso et al., 2005). Syreöverföringseffektiviteten är som högst vid det minsta luftflödet som luftaren kan drivas vid och sjunker därefter med ökat luftflöde på så sätt som visas i Figur 7.4.

I Figur 7.4 visas också ett exempel på hur SOTE varierar med luftflöde genom luftarna vid Henriksdals avloppsreningsverk i Stockholm. Där är vattendjupet ungefär 12 meter vilket leder till att SOTE är så högt som 50–60 %. SOTE varierar med nästan 10 procentenheter beroende på luftflödet. Påverkan av olika bottentäkningsgrad (luftartäthet) på SOTE kan också ses i Figur 7.4, vilket diskuteras mer nedan.

För finblåsiga luftare med flexibla membran påverkas syreöverföringseffektiviteten mer av luftflödet än för rigida porösa luftare (WEF, 2010). De senare tenderar att skapa små bubblor i ett bredare intervall av flöden. De flexibla membranen spänns ut mer vid höga luftflöden vilket leder till att deras perforeringar blir större med större bubblor som följd.

På grund av luftflödets påverkan på SOTE strävas vid såväl design som drift av luftningssystemet efter att tillämpa så låga luftflöden som möjligt. Eftersom SOTE sjunker vid ökat luftflöde måste detta kompenseras av ett ytterligare högre luftflöde vilket i sin tur sänker SOTE ytterligare och så vidare. Effekten av luftflödet är därför självförstärkande.

SOTE som funktion av luftflödet kan beskrivas enligt:

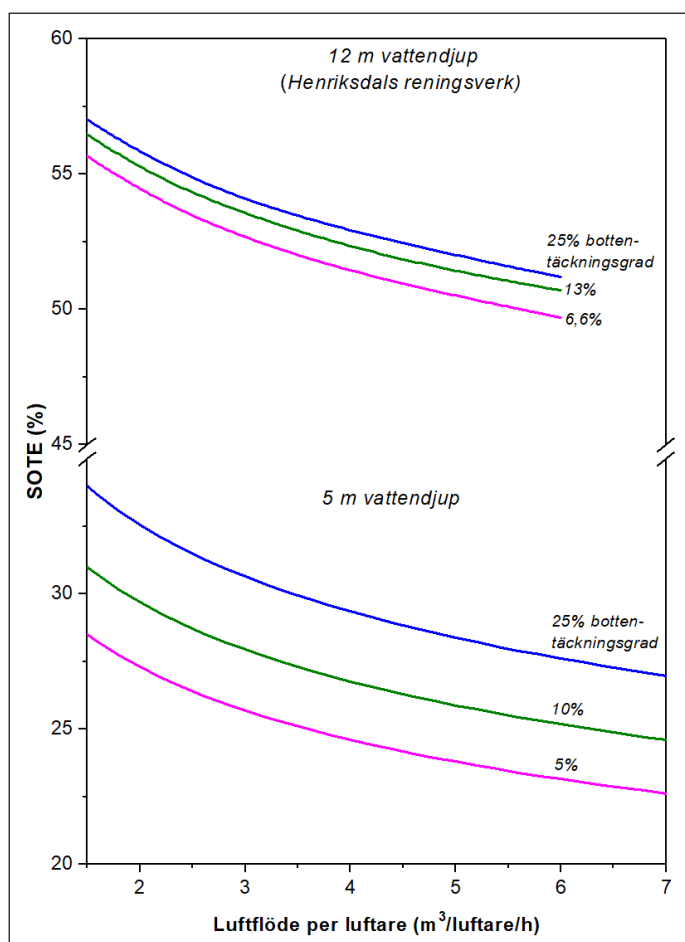
$$\frac{SOTE_a}{SOTE_b} = \left(\frac{q_a}{q_b} \right)^m \quad (7.2)$$

Där $SOTE_a$ och $SOTE_b$ är syreöverföringseffektiviteten vid luftflödena q_a respektive q_b . Den dimensionslösa konstanten m är karaktäristisk för typ av luftare och process och ligger vanligtvis mellan -0,3 och -0,1 (US EPA, 1989).

7.3.8 Bottentäkningsgrad

Bottentäkningsgraden innebär den andel av bottenytan som utgörs av luftarnas aktiva yta. Ofta räknas de delar bort som inte släpper igenom luft, där det till exempel finns bult, ring eller fästen.

En hög bottentäkningsgrad leder generellt till en högre syreöverföringseffektivitet (Ashley et al., 1991; Wagner & Popel, 1998), vilket visas i Figur 7.4. Det beror på att vid en hög bottentäkningsgrad minskar möjlig-



Figur 7.4 Syreöverföringseffektiviteten minskar med ökat luftflöde och ökar med ökad bottentäckningsgrad. Exempel vid 5 m och 12 m vattendjup.

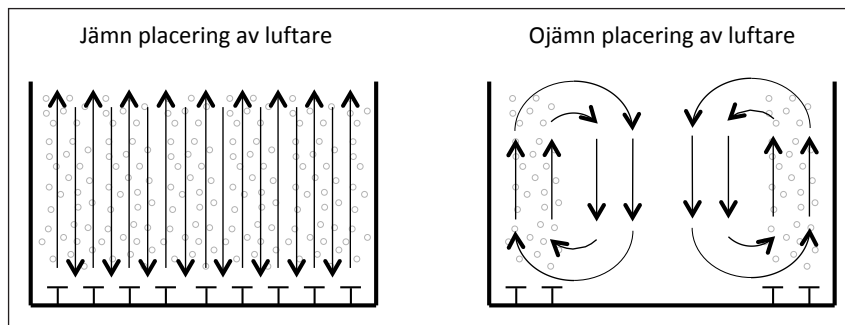
heterna att cirkulationsflöden skapas. Sådana flöden uppstår genom att luften drar med sig vatten till ytan som sedan vänder nedåt (Figur 7.5). På så sätt ökas luftbubblornas hastighet genom bassängen och deras lägre uppehållstid leder till mindre effektiv syreöverföring. Med högre bottentäckningsgrad bildas istället mindre omblandade celler där uppåt- och nedåtströmmande vatten möts. Detta leder till mer kontakt mellan dessa strömmar vilket ökar syreöverföringen.

Av samma anledning undviks numera att placera luftarna i rader med mellanrum (så kallad "spiral roll"), vilket skapar god omblandning men låg syreöverföringseffektivitet på grund av luftens låga uppehållstid i vattnet. Vid en låg bottentäckningsgrad är det fördelaktigare att fördela luftarna jämnt över botten (Groves et al., 1992).

Många äldre bassänger har kanter med voter, vilket betyder att väggarna är sneda närmast botten. Votningen innebär att det inte går att installera luftare hela vägen till bassängkanten utan ett område utan bottentäckning uppstår intill väggarna. Detta kan också ge upphov till cirkulationsflöden som sänker syreöverföringseffektiviteten.

I zoner med både luftare och omrörare lämnas ibland en del av bottenytan tom under omröraren. Detta kan dels göras för att undvika en mekanisk

påverkan från omrörningen på luftarsystemet som det inte är anpassat för, dels för att vissa omrörare inte är lämpliga att drivas i en blandning av luft och vatten om luftning och omrörning ska kunna ske samtidigt (Xylem, 2012). Områden utan luftare kan på liknande sätt som med voter vara negativt för syreöverföringseffektiviteten. Liknande problem kan uppstå ifall luftarna inte är placerade på en jämn höjd i förhållande till vattenytan. Därför är avvägning av höjden (nivellering) viktigt för att skapa en jämn fördelning av luften till alla luftarna i bassängen.



Figur 7.5 Illustration av hur valsar kan uppstå vid ojämn och icke heltäckande placering av luftare.

7.3.9 Biofilmsbärare

Både grovblåsigt och finblåsigt luftningssystem kan användas till suspenderade bärarprocesser (MBBR), men det vanligaste är att ett grovblåsigt system används. Med ett grovblåsigt system påverkar biofilmsbärarnas närvaro i bassängen syreöverföringseffektiviteten. Genom att hindra bubblorna på deras väg uppåt och därmed öka deras uppehållstid i bassängen ökar SOTE. Denna ökning i SOTE blir högre ju högre fyllnadsgraden av bärare är (Jing et al., 2009; Qi et al., 2015). Exempelvis har det observerats att med ett grovblåsigt system med 3 %/m SOTE ökade detta till 5,5 %/m vid 50 % fyllnadsgrad av bärare i tanken (Sander et al., 2017b). Ökningen i SOTE beror förutom på fyllnadsgraden även på typ av bärare och vattendjup. Några exempel anges i Tabell 8.7. Dock blir inte syreöverföringseffektiviteten lika hög som för ett finblåsigt system (Sander et al., 2017b).

I en bärarprocess kan det, till skillnad mot med aktivt slam, bli ett högre SOTE per meter vid ett högre vattendjup (van Haandel & van der Lubbe, 2012). Detta kan bero på att i grunda bassänger uppstår enklare ”skorstenar” där luften passerar uppåt utan att tvingas interagera med bärarna.

Med ett finblåsigt system ökar inte bärarnas närvaro generellt SOTE-talet på samma sätt som med ett grovblåsigt system (Sander et al., 2017b). Men vissa typer av bärare kan påverka SOTE i ett finblåsigt system, antingen positivt eller negativt beroende på fyllnadsgrad och typ av bärare.

Totalt är det följande faktorer som påverkar syreöverföringseffektiviteten i en MBBR-process, utöver valet av grov- eller finblåsigt system:

- Fyllnadsgrad av bärare
- Bassängens djup

- Omrörningsenergi eller luftningsintensitet ($\text{Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ eller $\text{Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$)
- Bärartyp
- Biofilmens karaktär (typ och tjocklek)
- Rörelsemönstret i bassängen

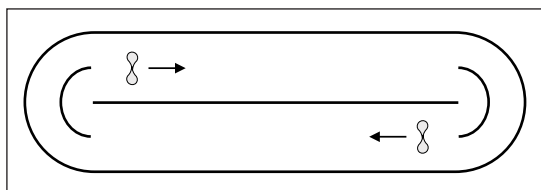
Det är vanligt att energianvändningen är högre i en MBBR-process än för en aktivslamprocess. I en undersökning av parallell drift observerades exempelvis en dubbelt så hög luftförbrukning och energianvändning i en IFAS-process (både aktivt slam och biofilmsbärare) som för en ren aktivslamprocess vid samma kvalitet på utgående vatten (Rosso et al., 2011). En högre energianvändning beror vanligtvis på:

- Grovblåst luftarsystem.
- Högre halt av löst syre tillämpas för att undvika diffusionsbegränsning och åstadkomma en kompakt process (Avsnitt 7.3.1).
- Det minsta luftflödet som krävs för omblandning är högre för bärare än för aktivt slam vilket kräver extra energi vid låg belastning (Avsnitt 8.6.1).
- Extra luftning krävs för att bärarna ska förflyttas från silarna mot vattnets flödesriktning (Avsnitt 8.6.2).

7.3.10 Horisontell omrörning

Om mekanisk omrörning används samtidigt som luftning kan detta påverka syreöverföringseffektiviteten. Detta är framförallt aktuellt i aktivslamanläggningar som är utformade som ringkanaler (Figur 7.6). I dessa finns mekaniska omrörare som sätter blandningen av aktivt slam och avloppsvatten i horisontell rörelse cirkulärt runt anläggningen. Utformningen kallas därför även "racetrack" och en ytterligare engelsk benämning är "oxidation ditch". Avloppsvattnet cirkulerar normalt 20–30 gånger i en ringkanal och passerar då både luftade och oluftade zoner innan det lämnar till en sedimenteringsbassäng. Vattnets horisontella hastighet i ringkanalen är normalt i genomsnitt 0,2 till 0,4 m/s (Xylem, 2012).

Omrörningen påverkar syreöverföringen positivt. Den horisontella hastigheten stör luftbubblornas stigning i bassängen, minskar cirkulationsflöden och ökar därmed luftens uppehållstid i vattnet (Gillot et al., 2000). Det gör att mer syre hinner lösa sig och därmed ökar SOTE jämfört med ett system utan horisontell omrörning (Xylem, 2012).



Figur 7.6 Principskiss för en ringkanal ovanifrån med mekaniska omrörare som gör att vatten och slam cirkulerar i anläggningen.

7.3.11 Åldrande och igensättning

I många finblåsiga luftarsystem förändras syreöverföringseffektiviteten över tiden till det sämre (Stenstrom, 1990). Av de avloppsreningsverk som undersöktes i denna studie observerade 20 % en tydlig försämring och 53 % en möjlig försämring av luftarnas effektivitet över tiden.

Detta kan bero på åldrande och/eller på igensättning. Åldrande kan innebära att membranens fysikaliska egenskaper förändras över tiden så att de antingen blir styvare eller mer elastiska vilket kan påverka öppningarnas storlek och därmed bubbelstorleken (Kaliman et al., 2008; Krampe, 2011a; Rosso et al., 2008b). Detta kan orsaka ökat tryckfall och minskad syreöverföringseffektivitet efter en tids drift.

Membran av EPDM innehåller ofta mjukgörande ämnen som ska förbättra materialets egenskaper. Dessa mjukgörare kan läcka från membranet under drift vilket leder till förändrade egenskaper och prestanda (Krampe, 2011a). En undersökning av EPDM-membran i drift i Tyskland visade att halten mjukgörare minskade med 26 % över tiden (Wagner & von Hoessle, 2004). Eftersom membran av polyuretan och silikon är mindre beroende av mjukgörare för att erhålla sina respektive materialegenskaper anses det ofta att dessa material åtminstone inte åldras i lika stor utsträckning av denna anledning.

Sammansättningen av EPDM kan variera stort mellan olika produkter. I leverantörernas egna beskrivningar är EPDM med hög kvalitet ofta synonymt med låg halt av mjukgörare. Materialet har då fått de önskvärda egenskaperna genom sin sammansättning i övrigt, och kvaliteten på övriga ingredienser. En lägre halt av mjukgörare minskar då risken för läckage och förlust av de ursprungliga egenskaperna över tiden. Membran av EPDM med beläggning av PTFE förekommer. Dess tillverkare hävdar att beläggningen både hindrar åldrande i form av läckage av mjukgörare och igensättning av porerna vilket gör dem särskilt lämpliga i miljöer som är besvärliga för vanliga EPDM-luftare med till exempel hög andel industribelastning. Indikationer på minskad igensättning med PTFE-belagda luftare finns (Rosso & Shaw, 2014) men det är ännu osäkert hur stor effekten är, i synnerhet med typiskt kommunalt avloppsvatten dominerat av hushållspillvatten.

Igensättning av öppningarna i membranen kan också sänka syreöverföringseffektiviteten (Boyle & Redmon, 1983; Kim & Boyle, 1993). Igensättning kan ske från luftsidan exempelvis från smuts i otillräckligt filtrerad luft, läckage av olja från blåsmaskiner eller slam från bassängen vid brott på luftarsystemet. Det vanligast förekommande är dock igensättning från vätskesidan.

Igensättningen har delats upp i två typer med olika ursprung och olika sätt att påverka prestandan (US EPA, 1989):

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

Igensättning av Typ I leder oftast till en gradvis ökning av mottrycket över luftaren, även kallat det dynamiska våttrycket (DWP, ”dynamic wet pressure”), men utan en försämring av syreöverföringseffektiviteten (US EPA, 1989). Detta kan ske genom att fällningarna leder till mindre porer och således mindre luftbubblor. Det högre mottrycket kan dock innebära en högre energianvändning för blåsmaskinerna.

Typ II igensättning tenderar tvärt om att leda till att syreöverföringseffektiviteten minskar utan att mottrycket behöver öka. Ett lager av biofilm på en luftare behöver inte innebära att tryckförlusten över luftaren ökar nämnvärt (US EPA, 1989). Däremot kan en biofilm som växt sig tjock förändra ytan där bubblorna skapas så att håligheter med luftfickor bildas. När de små bubblorna som skapats vid luftarens yta passerar dessa håligheter skapas större bubblor som sedan frisätts (Jansen et al., 1994). Även om de två typerna av igensättning har olika karaktäristik och ursprung uppträder de vanligtvis tillsammans och kan vara svåra att åtskilja i praktiken.

En amerikansk undersökning visade att syreöverföringseffektiviteten hade minskat upp till 40 % efter ett års drift (US EPA, 1989). Andra undersökningar har visat 20-40 % minskning av syreöverföringseffektiviteten efter några års drift, varefter prestandan planat ut och blivit stabil på denna lägre nivå (Garrido-Baserba et al., 2017, 2016; Groves et al., 1992; Krampe, 2011a; Rosso et al., 2012; Rosso & Stenstrom, 2006b). En minskad effektivitet har kunnat sättas i samband med tillväxt av biofilm på membranens ytor (Garrido-Baserba et al., 2016; Noble et al., 2016). Igensättning har visat sig ske med olika typer av luftare, som rör och tallrikar, och med olika material i membranen som EPDM, polyuretan och silikon (Garrido-Baserba et al., 2016; Rosso et al., 2008b).

I en undersökning bland ett stort antal avloppsreningsverk i Tyskland observerades att luftarnas mottryck ungefär fördubblades oberoende av om membranen var av EPDM, polyuretan eller silikon (Krampe, 2011b). Liknande resultat har rapporterats från USA (Rosso et al., 2008b). De ökade mottrycken i dessa studier kan ha varit orsakade av såväl åldrande (materialförändringar) som igensättning (fällningar och biofilm).

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 syreöverföringseffektivitet som följd. I delvis igensatta luftare blir luftflödet lägre med ökad risk för ytterligare igensättning som följd.

I vissa anläggningar tycks relativt lite igensättning ske med påverkan på syreöverföringseffektiviteten (Redmon et al., 1994; Warriner & Rooney, 1992). I Sverige finns såväl fall där igensättning har skett (se Kapitel 10, Exempel 10.3 från Nykvarnsverket i Linköping) som där det inte skett (se Exempel 7.1 från Himmerfjärdsverket i Stockholm). Sammantaget visar detta att fenomen med igensättning och dess effekter är anläggningsspecifika och kan variera stort beroende på förhållanden.

Ofta är det svårt att avgöra ifall orsaken till en minskad syreöverförings-effektivitet är åldrande eller igensättning. Den försämring över tiden som upplevdes bland de avloppsreningsverk som tillfrågades i denna studie antogs oftare bero på åldrande av membran än igensättning, men vanligtvis utan att detta kunde bekräftas. Åldrande av rörluftare med sänkt syreöverföringseffektivitet har observerats på Ryaverket i Göteborg (se Exempel 7.1). Den viktiga skillnaden i praktiken är att igensättning kan åtgärdas med olika metoder för rengöring (Avsnitt 10.4.1), medan åldrandet är irreversibelt. Eftersom det är svårt att förutspå om och i så fall hur snabbt igensättning kan ske under olika processförhållanden är det istället viktigt att övervaka och följa upp luftningssystemets prestanda för att veta om det finns behov av rengöring.

Sammanfattningsvis kan följande konstateras gällande igensättning av membranluftare:

- Igensättning av luftare sker oberoende av typ av luftare och material och förlusten i prestanda är ofta svår att särskilja från åldrande (materialförändringar).
- Graden av igensättning varierar kraftigt mellan anläggningar och är svår att förutspå utifrån driftförhållanden.
- I de fall då igensättning sker, kan syreöverföringseffektiviteten minska kraftigt med ökad energianvändning som följd.
- Igensättning kan till skillnad mot åldrande motverkas genom rengöring, som i princip återställer syreöverföringseffektiviteten till dess ursprungliga nivå.

Exempel 7.1

Åldrande och igensättning på svenska avloppsreningsverk

Vid många av de avloppsreningsverk som tillfrågades i samband med detta projekt hade en försämring av luftarnas prestanda över tiden noterats (20 % en tydlig och 53 % en möjlig försämring). Då det är ont om tillgängliga detaljerade undersökningar kring detta, är det svårt att veta hur vanligt detta är vid svenska avloppsreningsverk. Igensättning konstaterades vid Nykvarnsverket i Linköping (se Exempel 10.3). Nedan beskrivs ytterligare två fall där luftare undersökts efter ett antal års drift.

Himmerfjärdsverket

Membran av EPDM från tallriksluftare som använts vid Himmerfjärdsverket i Stockholm (SYVAB) testades med avseende på syreöverföringseffektivitet och dynamiskt våttryck efter 8 års drift. Membranen kom från två aktivslambassänger i serie där avloppsvatten behandlas efter rensavskiljning, sandfång och försedimentering med förfällning (järnsulfat). Aktivslamanläggningen behandlar avloppsvattnet för BOD-reduktion och nitrifikation, det vill säga ingen fördenitrifikation finns. Testerna utfördes i renvatten i en 2,7 m³ testanläggning hos leverantören enligt ASCEs (2007) standard. Ingen rengöring av

membranen skedde innan test. Membranens hårdhet mättes med shoreprovning (Shore A) vilket innebär att en provspets trycks med en specificerad kraft mot provet och den deformation som uppkommer mäts.

Det visade sig att uppmätt SOTE var snarlik den som membran hade som nya. Det dynamiska våttrycket var oförändrat i luftarna från den andra av de två bassängerna men något (0–10 %, 0–0,03 mVp) högre i de från den första bassängen. Membranens hårdhet var densamma för använda som för nya. Resultaten visar att det i detta fall varken hade skett något åldrande eller igensättning av membran som påverkade prestandan väsentligt.

Ryaverket

Rörluftare från Ryaverket i Göteborg (Gryaab) med EPDM-membran testades med avseende på SOTE och DWP efter 10 års drift. Luftarna hade använts i en högbelastad aktivslamanläggning där organiskt material avskiljs och fördenitrifikation sker med recirkulering av vattnet från efterföljande biobäddar. Aktivslamanläggningen består av tre linjer indelade i två anoxiska zoner (40 % av volymen), tre flexibla zoner (20 %) och fyra luftade zoner (40 %). Bassängerna är ungefär 10 m djupa. Luftarna som undersöktes hade använts i den andra och fjärde av de fyra luftade zonerna. Avloppsvattnet förbehandlas med rensavskiljning, sandfång och försedimentering. Simultanfällning med järnsulfat tillämpas.

Testerna utfördes i renvatten i en 1,6 m³ testanläggning hos en oberoende konsult. Luftarna testades före och efter rengöring med högttryckstvätt och borste. En ny luftare av samma typ testades också för jämförelse. Membranens densitet, hårdhet och tjocklek mättes också.

De använda luftarna visade sig ha 18 % lägre SOTE än den nya luftaren och 0,5–0,7 mVp högre DWP. Detta är stora skillnader som ifall de är representativa för anläggningen innebär att luftningseffektiviteten har minskat signifikant över tiden. Rengöring av luftarna hade en försumbar inverkan på SOTE och DWP vilket tydde på att även om beläggning på luftarna kunde ses, hade ingen igensättning som påverkade prestandan skett. Det innebar också att luftarnas prestanda inte skulle kunna återställas. Däremot hade membranens fysikaliska egenskaper förändrats med 6 % ökad densitet, 8 % ökad hårdhet och 3 % minskad tjocklek. Dessa förändringar tyder på att materialet hade förlorat mjukgörare. Enligt visuella observationer hade detta lett till att membranet krympt fast på sina plasthållare vilket både lett till det höga tryckfallet och ett ojämnt bubbelmönster. Vissa delar av luftarna släppte inte igenom luft medan stora bubblor bildades vid andra delar. Det tycktes vara orsaken till det lägre uppmätta SOTE.

Samtidigt visade parallella analyser av materialet från luftarna (dragprov och hårdhet), som gjorts vid upprepade tillfällen, att nya luftare som tillverkats vid olika tidpunkter kan ha olika egenskaper. Det gör

att det finns osäkerheter kring att använda en ny luftare som referenspunkt för jämförelse. Icke desto mindre visade testerna att luftarnas EPDM med största sannolikhet hade påverkats av åldrande på ett sätt som var negativt för energianvändningen på reningsverket.

7.4 Sammanfattning

Energianvändningen vid luftning kan påverkas av många olika faktorer. De kan huvudsakligen delas in i faktorer som är relaterade till:

- Avloppsvattnets sammansättning, inte minst vad gäller ytaktiva ämnen som hindrar syreöverföring från gas till vätska.
- Hur den biologiska processen är konfigurerad, vilket både påverkar behovet av syre i processen och hur stort inflytande ytaktiva ämnen i vattnet får på syresättningen.
- Vilken utrustning som används, eftersom det exempelvis kan påverka storleken på bubblorna och turbulensen i bassängen.
- Hur utrustningen används, exempelvis hur tätt luftarna är installerade och vilka luftflöden som tillämpas.

I Tabell 7.2 nedan ges en sammanställning över hur de olika parametrarna som diskuterats ovan påverkar luftningseffektiviteten.

Tabell 7.2 Sammanställning av faktorer som på verkar energianvändningen vid luftning.

Faktor	Förändring av energianvändning	Orsak
Ytaktiva ämnen	Ökar	Hindrar transport av syre från gas till vätska
Nitrifikation	Ökar	Ökar syrebehovet
Fördenitrifikation	Minskar	Minskar syrebehovet och ökar α
Högre slamålder	Ökar/Minskar	Ökar syrebehovet och ökar α
Högre löst syrehalt	Ökar	Minskar masstransport
Högre vattendjup	Minskar/ Ökar	Ökar syreöverföring och ökar mottryck
Högre lufttemperatur	Ökar	Lägre syreinhåll i luften
Högre salthalt	Minskar	Mindre bubblor
Högre slamhalt över 5 g/l	Ökar	Högre viskositet, minskar α
Finblåsig system	Minskar	Mindre bubblor, ökar SOTE
Hög turbulens	Minskar	Ökar α
Högre luftflöde (membran)	Ökar	Större bubblor, minskar SOTE, ökar mottrycket
Högre botten täckningsgrad	Minskar	Mindre valsar, ökar SOTE
Biofilmsbärare med grovblås	Minskar	Högre SOTE än utan bärare
Åldrade membran	Ökar	Större bubblor, styvare eller mjukare material
Igensatta membran	Ökar	Större bubblor och/eller högre mottryck

8 Design och utformning av luftningssystem

I detta kapitel sker en genomgång av vad det innebär att designa och utforma ett nytt luftningssystem med luftare och/eller blåsmaskiner. De dimensioneringsunderlag som behövs beskrivs, samt vad som bör beaktas i samband med att förfrågningsunderlag för ett luftningssystem tas fram.

En viktig aspekt vid upphandling av ett nytt luftningssystem är att kunna få tekniskt jämförbara anbud, som också går att verifiera. För att detta ska vara möjligt är det viktigt att vara medveten om vilka dimensioneringsparametrar som bör fastställas av beställaren och vilka som bör överlåtas till anbudsgivaren.

Utformning av bottenluftarsystem belyses inklusive aspekter som särskilt gäller SBR:er, intermittert luftade processer och MBBR. Slutligen beskrivs dimensionering, val och installation av blåsmaskiner.

8.1 När behövs ett nytt luftningssystem?

En vanlig orsak till att ett nytt luftningssystem med blåsmaskiner, luftledningar och/eller luftarsystem behövs är ny-, om- eller utbyggnad av ett avloppsreningsverk. Det kan också finnas anledning att uppgradera ett befintligt luftningssystem. Följande kan vara indikationer på att ett befintligt luftningssystem inte fungerar på bästa möjliga sätt:

- Svårigheter att upprätthålla syrebörvärden föreligger, trots att ventiler står fullt öppna med medföljande svårigheter att nå utsläppskrav gällande BOD eller kväve (ammonium).
- Belastningen till reningsverket har överskridit den dimensionerande belastningen för luftningssystemet.
- Uppmätt syreöverföringseffektivitet (%) eller luftningseffektivitet ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$) har försämrats.
- Systemets mottryck har ökat successivt under åren vid samma luftflöde, trots rengöring av luftare.
- Luftare som är äldre än 10 år.
- Blåsmaskiner som är äldre än 15 år.

Ett tydligt tecken på att luftarsystemet bör ses över är att kapaciteten är otillräcklig för att upprätthålla börvärden i syrehalt, trots att luftventilerna står helt öppna. Kanske leder då detta även till att utsläppskraven gällande BOD eller kväve inte kan uppnås. Orsaken till detta kan till exempel vara att den dimensionerande belastningen för luftarsystemet har överskridits och systemet därmed inte klarar av att tillföra den mängd syre som behövs för reningsprocessen när belastningen är hög.

Uppföljning av syreöverföringseffektiviteten, effektivitetsfaktorn eller luftningseffektiviteten (se Avsnitt 10.3.3 och 10.3.4) kan visa om mängden luft och/eller användningen av elenergi för luftningen är onödigt hög eller har ökat över tiden. Typiska värden för luftningseffektiviteten i renvatten

(SAE) är 4–6 kg O₂/kWh för ett finblåsig luftarsystem och 1–2 kg O₂/kWh för grovblåsiga system (Tabell 7.1). Motsvarande värden i processvatten (AE) är 2,6–3,9 kg O₂/kWh för finblåsig (vid $\alpha = 0,65$) och 0,8–1,6 kg O₂/kWh för grovblåsig (vid $\alpha = 0,8$).

Äldre luftare kan ha sämre syreöverföringseffektivitet på grund av åldrande eller igensättning. För att kontrollera membranens prestanda går det att anlita en leverantör som har utrustning för att genomföra ett renvattentest i laboriemiljö (Avsnitt 11.2.2). Där kan SOTE-värdet bestämmas för några av membranen och jämföras med helt nya. Vid försämring kan byte av endast membran eller hela luftarsystemet övervägas.

Om befintliga blåsmaskiner är av äldre modell och börjar nå sin tekniska livslängd kan det vara dags att överväga byte. En blåsmaskin som har nått eller överskridit sin förväntade tekniska livslängd har en högre risk att haverera. Ibland kan det vara svårt att få tag på reservdelar och servicepersonal till maskiner som är av äldre utgången modell. I ett sådant läge ökar risken att hamna i en situation där luftningssystemet inte klarar av att tillföra tillräckligt med syre till den biologiska reningsprocessen. Äldre blåsmaskiner kan också ha sämre verkningsgrad och arbetsmiljö än nyare maskiner. Om de dessutom har begränsade möjligheter till reglering, till exempel för att de inte är väl anpassade för den aktuella belastningen, kan det vara ytterligare ett incitament för byte.

8.2 Dimensionering

Det första steget vid dimensionering av ett luftningssystem är att utifrån given belastning till reningsverket och reningsgrad beräkna syrebehovet i processen (AOR). Syrebehovet är relaterat till reduktion av BOD och nitrifikation men påverkas också av denitrifikation, temperatur och slamålder. Syrebehovet omvandlas till standardförhållanden i renvatten (SOR) eftersom det är vid dessa förhållanden som luftarsystemens prestanda är angiven. Sedan beräknas hur många luftare som behövs för att kunna tillföra den mängd syre i renvatten som behövs och därefter utformas lämpligt luftarsystem för den tilltänkta processen och bassängen.

Dimensionering av luftningssystem kan sammanfattas i följande steg:

1. Fastställ dimensionerande min-, medel- och maxbelastning till biosteget.
2. Beräkna syrebehov i avloppsvatten (AOR) för min-, medel- och maxbelastningen.
3. Fastställa dimensionerande α -faktorer och övriga parametrar för beräkning av syrebehov i renvatten (SOR).
4. Beräkna SOR för min-, medel- och maxbelastningen.
5. Utforma ett luftarsystem som möter SOR.
6. Fastställ syreöverföringseffektiviteten (SOTE) utifrån valt luftarsystem.
7. Beräkna luftflödesbehovet för min-, medel- och maxbelastningen.
8. Kontrollera att luftflödet vid minbelastning uppfyller omrörningskriteriet så att inte sedimentering kan ske.

Som tidigare visats beror SOTE bland annat av luftflödet. Samtidigt behövs SOTE för att kunna beräkna luftflödet. Det gör att steg 5 till 8 i de flesta fall sker iterativt. Ett första SOTE-tal behöver antas så att ett preliminärt luftflöde kan beräknas. Detta luftflöde används för att beräkna ett nytt SOTE-tal som i sin tur kan användas för att beräkna ett nytt luftflöde vilket upprepas tills värdena inte längre förändras. Iteration kan också behövas för att se till att systemet är möjligt att reglera mellan min- och maxbehovet i varje luftad zon. Det kan också finnas andra aspekter som beaktas vid design som att hamna på en lämplig balans mellan investeringskostnad och energibehov.

8.2.1 Beräkning av syrebehov i avloppsvatten (AOR)

I detta avsnitt beskrivs tillvägagångssättet för hur syrebehovet i processen beräknas.

Syrebehovet i processen härrör framförallt från mikroorganismernas omvandling av föroreningar. Syre behövs när mikroorganismerna omvandlar föroreningarna och växer till. Därutöver tillkommer det endogena behovet medan de befinner sig i processen. Det endogena syrebehovet blir högre ju längre mikroorganismerna behålls i systemet, det vill säga ju högre slamåldern och därmed slammängden är. Syrebehovet består av följande delar:

- Nedbrytning av organiskt material och endogent syrebehov (AOR_{Org})
- Nitrifikation (AOR_{Nit})
- Kemisk oxidering (AOR_{Kem})
- Skillnad mellan inkommande och utgående syremängd (AOR_{Sy})

Denitrifikation ger upphov till ett minskat syrebehov jämfört med om allt organiskt material bryts ned under aeroba förhållanden. Därför brukar denitrifikation beräknas som en syrekredit i form av ett negativt syrebehov (AOR_{Den}). Det totala syrebehovet ($kg\ O_2/d$) beräknas som summan av dessa bidrag:

$$AOR = AOR_{Org} + AOR_{Nit} + AOR_{Kem} + AOR_{Sy} - AOR_{Den} \quad (8.1)$$

I de flesta sammanhang är inkommande och utgående syremängd försumbara liksom kemisk oxidering. Då förenklas uttrycket till:

$$AOR = AOR_{Org} + AOR_{Nit} - AOR_{Den} \quad (8.2)$$

För beräkning av syrebehov för nedbrytning av organiskt material (AOR_{Org} i $kg\ O_2/d$) finns flera alternativ. En variant består av en term för direkt BOD-nedbrytning och en term för det endogena behovet som beror av mängden slam (Svenskt Vatten, 2007):

$$AOR_{Org} = 0,5 \cdot B_{BOD, red} + 0,1 \cdot SS_m \quad (8.3)$$

där

$B_{BOD, red}$ = Mängd BOD reducerad ($kg\ BOD_7/d$)

SS_m = Medelslammängd i luftningsbassängen (kg)

I en alternativ variant beräknas syrebehovet med hänsyn till temperatur och slamålder enligt följande (ATV, 2000b):

$$F_T = 1,072^{(T-15)} \quad (8.4)$$

$$AOR_{Org} = B_{BOD5} \left(0,56 + \frac{0,15 \cdot SRT \cdot F_T}{1 + 0,17 \cdot SRT \cdot F_T} \right) \quad (8.5)$$

där

F_T = Temperaturkorrigeringsfaktor (-)

T = Temperatur (°C)

B_{BOD5} = Belastning av BOD₅ (kg BOD₅/d)

SRT = Slamålder (d)

För omvandling av BOD₇ till BOD₅ kan kvoten BOD₇/BOD₅ = 1,15 användas (Henze et al., 2010). 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.

Ett tredje alternativ för beräkning av AOR_{Org} är att istället för en beräkning baserad på BOD använda COD. För COD kan en balans över systemet göras för att beräkna syrebehovet. I detta fall inkluderas ingen term för det endogena behovet. Istället summeras 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 (Tchobanoglous et al., 2014). På grund av inert suspenderat material som hamnar i överskottsslammet blir COD-innehållet för slammet vanligtvis något lägre än så. Med beräkning baserad på COD behövs också kunskap eller antagande om hur stor andel av inkommande COD som är biologiskt tillgänglig och bryts ned i processen. Koncentrationen av COD i det utgående vattnet behöver inte vara försumbar på det sätt som BOD ofta är.

För en anläggning där nitrifikation kommer att ske behöver syrebehovet för detta inkluderas. Syrebehovet för nitrifikation (AOR_{Nit}) är i praktiken ungefär 4,3 g O₂/g N (ATV, 2000b; Henze et al., 1999; Tchobanoglous et al., 2014), vilket på grund av tillväxt av nitrifierare är något lägre än det stökiometriska behovet 4,57 g O₂/g N (Tabell 4.1).

$$AOR_{Nit} = 4,3 \cdot N_{Nit} \quad (8.6)$$

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. Bakteriernas cellmassa innehåller ca 12 % N av VSS (Tchobanoglous et al., 2014) men i slammet blir innehållet normalt något lägre, oftast 8–12 % av VSS. Det nitrifierbara kvävet kan sedan beräknas som:

$$N_{\text{Nit}} = N_{\text{In}} - N_{\text{NH}_4, \text{Ut}} - N_{\text{Inert}} - N_{\text{ÖS}} \quad (8.7)$$

där

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

$N_{\text{NH}_4, \text{Ut}}$ = Utgående ammonium (kg N/d)

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

$N_{\text{ÖS}}$ = Kväve i överskottsslammutttag (kg N/d)

Syrekrediten för denitrifikation (AOR_{Den}) motsvarar det behov av syre som undviks genom att nitrat istället används för respiration och beräknas enligt (Tchobanoglous et al., 2014):

$$AOR_{\text{Den}} = 2,86 \cdot N_{\text{Den}} \quad (8.8)$$

$$N_{\text{Den}} = N_{\text{Nit}} - N_{\text{NO}_3, \text{Ut}} \quad (8.9)$$

där

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

$N_{\text{NO}_3, \text{Ut}}$ = Nitrat i utgående vatten (kg N/d)

I vissa fall kan kemisk oxidering behöva inkluderas. Det kan till exempel vara om inkommande avloppsvatten innehåller förhöjda halter av sva-velväte eller om fällning med järnsulfat tillämpas. Syrebehoven för dessa processer beräknas genom stökiometrin för hur mycket syre som åtgår per enhet av respektive ämne. Stökiometrin för oxidering av några ämnen är definierad i Tabell 4.1.

Om biologisk fosforavskiljning tillämpas krävs extra syre för att omvandla löst fosfat till polyfosfat i slammet. För detta ”lyxupptag” av fosfor, utöver det som krävs för normal tillväxt av bioslam, åtgår 2 g $\text{O}_2/\text{g PO}_4\text{-P}$ (Smolders et al., 1994). För att bestämma den mängd fosfor som är tillgänglig för biologisk fosforavskiljning måste en massbalans göras i likhet med bestämning av det nitrifierbara kvävet. Då antas det ofta att slam utan polyfosfat innehåller ca 1,5 % P av VSS.

$$AOR_{\text{BioP}} = 2 \cdot P_{\text{BioP}} \quad (8.10)$$

$$P_{\text{BioP}} = P_{\text{In}} - P_{\text{Ut}} - P_{\text{ÖS}} \quad (8.11)$$

där

AOR_{BioP} = Syrebehov för biologisk fosforavskiljning (kg O_2/d)

P_{BioP} = Fosfor som tas upp som polyfosfat (kg P/d)

P_{In} = Inkommande fosfor (kg P/d)

P_{Ut} = Fosfor som lämnar systemet med utgående vatten (kg P/d)

$P_{\text{ÖS}}$ = Fosfor i överskottsslammutttag utan polyfosfat medräknad (kg P/d)

Exempel 8.1

Beräkning av AOR

AOR ska beräknas för en anläggning med följande förutsättningar:

Flöde	m ³ /d	14 250
Luftad volym	m ³	1 950
Temperatur	°C	15
Slamhalt (VSS)	g/l	2,5
Slamproduktion (VSS)	kg/d	600
Slamålder	d	8
Syrehalt	mg/l	2,0

Koncentrationer i inkommande och utgående vatten är i mg/l:

In (mg/l)		Ut (mg/l)	
BOD ₅	124	NH ₄ -N	1
BOD ₇	143	NO ₃ -N	5
N-tot	40	N _{Inert}	3

Syrebehovet för nedbrytning av organiskt material beräknas enligt ekvation 8.4 och 8.5:

$$F_T = 1,072^{(15-15)} = 1$$

$$AOR_{Org} = 0,124 \cdot 14\,250 \left(0,56 + \frac{0,15 \cdot 8 \cdot 1}{1 + 0,17 \cdot 8 \cdot 1} \right) = 1\,888 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

Kväveinnehållet i överskottsslammet antas vara 8 % av VSS. Sedan kan mängden nitrifierbart kväve (ekv. 8.7) syrebehovet för nitrifikation (ekv. 8.6) beräknas:

$$N_{OS} = 600 \cdot 0,08 = 48 \text{ kg N/d}$$

$$N_{Nit} = 14\,250 \cdot \frac{(40 - 1 - 3)}{1\,000} - 48 = 465 \text{ kg N/d}$$

$$AOR_{Nit} = 4,3 \cdot 465 = 2\,000 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

Därefter beräknas mängden denitrifierat kväve (ekv. 8.9) och syrekrediten för denitrifikation (ekv. 8.8):

$$N_{Den} = 465 - 14\,250 \cdot \frac{5}{1\,000} = 394 \text{ kg N/d}$$

$$AOR_{Den} = 2,86 \cdot 394 = 1\,126 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

Slutligen kan de olika AOR-bidragen summeras ihop (ekv. 8.2):

$$\begin{aligned} AOR &= AOR_{Org} + AOR_{Nit} - AOR_{Den} = \\ &= 1\,888 + 2\,000 - 1\,126 = 2\,762 \text{ kg O}_2/\text{d} \end{aligned}$$

Om systemet ska dimensioneras för att även klara förhållanden utan denitrifikation blir

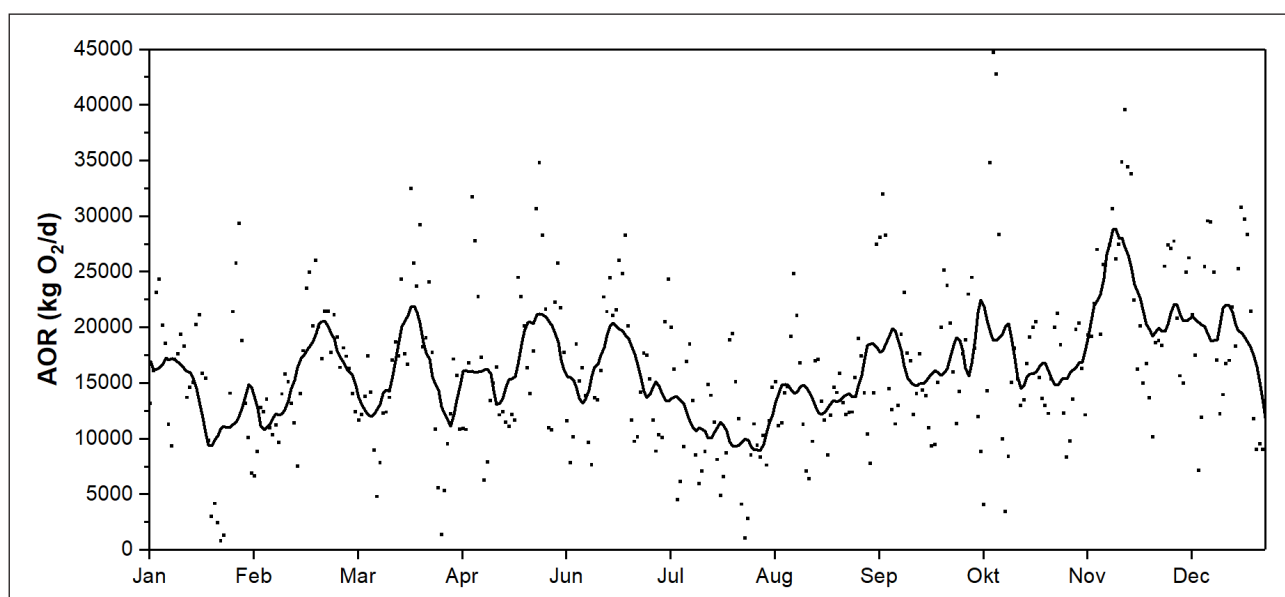
$$\text{AOR} = 1\,888 + 2\,000 = 3\,888 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

Ifall samma system skulle dimensioneras utan kväverening skulle AOR istället bara bli $\text{AOR} = 1\,888 \text{ kg O}_2/\text{d}$. Medvetenhet behöver finnas att om anläggningen sedan drivs vid så hög slamålder, i förhållande till den aktuella temperaturen, att nitrifikation ändå sker, kommer systemet vara underdimensionerat och önskad syrehalt kanske inte kan upprätthållas.

8.2.2 Dimensionerande belastningar

Ett luftningssystem dimensioneras normalt för en max-, min- och medelbelastning. Valet av dessa nivåer är kritiskt för hur systemet kommer att fungera. Ett exempel på hur belastningen i form av AOR till ett biosteg kan variera över ett år ges nedan (Figur 8.1). Ett exempel på en typisk dygnsvariation av såväl koncentrationer som hydraulisk belastning och belastning av AOR ges i Figur 8.2.

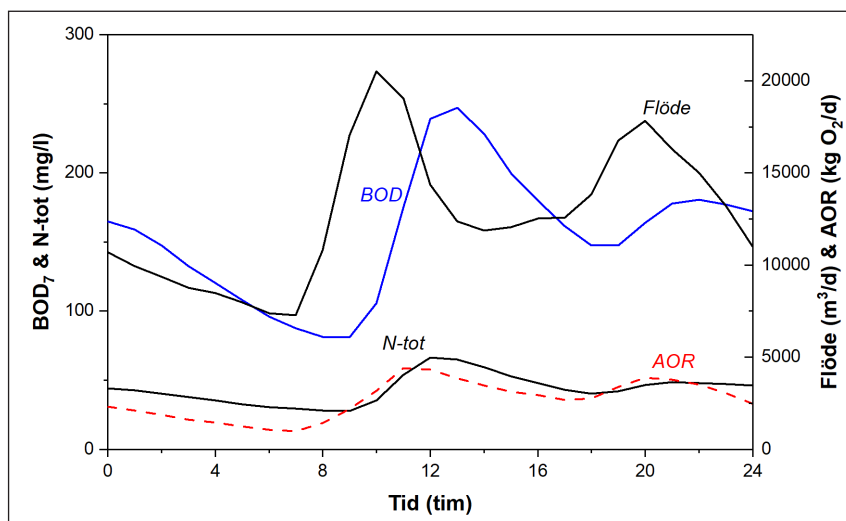
Dimensioneringen av luftningssystemet ska syfta till att ge ett tillräckligt brett reglerområde för att driva anläggningen med de mål som finns. Det kan innebära att hela spannet av belastning under ett år kanske inte behöver klaras av. Beroende på utsläppsvillkorens nivåer och tidsintervall (månads-, kvartals- eller årsmedelvärden) och anläggningens marginaler kan det vara lämpligt att inte dimensionera för de allra högsta och lägsta fallen. Däremot ska det finnas en medvetenhet om hur stor del av tiden systemet i så fall kommer att vara över- respektive underbelastat.



Figur 8.1 Belastning av AOR till biosteget vid Ryaverket i Göteborg (Gryaab) under ett år enligt dygnsprovtagning och labbanalyser efter försedimentering. Den heldragna linjen är två veckors glidande medelvärde.

Om normal drift inkluderar förfällning, måste beslut tas om luftningen ska vara anpassad för att även kunna klara icke förfällt vatten. Dimensioneringen kan också behöva ta hänsyn till att uppstart utan denitrifikation kan krävas.

För anläggningar med försedimentering är en vanlig utmaning vid beräkning av AOR att det inte finns så mycket analysdata för avloppsvattnet efter försedimentering vilket är det som är relevant för luftningen. Om inte avskiljningsgraden över försedimenteringen är känd kan den uppskattas baserat på belastning och uppehållstid enligt samband från litteraturen. Typiskt brukar avskiljningsgraden utan tillsats av fällningskemikalier vara 45–60 % av suspenderade ämnen vilket motsvarar 25–40 % av BOD (Tchobanoglous et al., 2014).

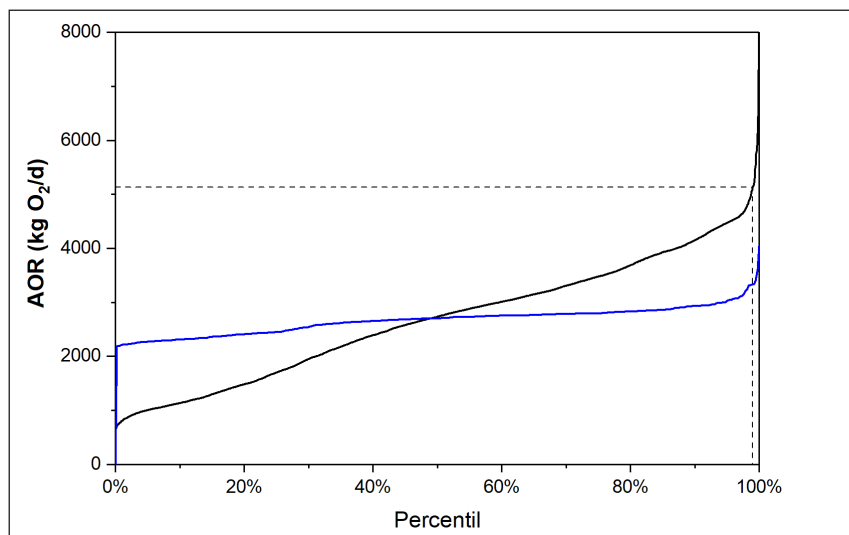


Figur 8.2 Typiska variationer under ett dygn för inkommande koncentrationer av BOD och N-tot samt flöde liksom den AOR-belastning som dessa ger upphov till. Data från simulering som beskrivs i Exempel 8.5.

För att lättare kunna analysera spannet i belastning bör den göras om till ett varaktighetsdiagram. Nedan visas varaktighetsdiagram för AOR-belastning baserad på dygnsmedelvärden respektive timvärden (Figur 8.3). Varaktighetsdiagram ger information om hur stor andel av timmarna under året som belastningen haft ett visst värde eller mindre.

Om det finns underlag med så hög upplösning som en timme, kan varaktighetsdiagrammet användas för att välja en maxnivå baserat på hur stor del av tiden en överbelastning kan tolereras. Om 99-percentilen väljs kommer den verkliga belastningen överstiga den dimensionerande belastningen under i genomsnitt 7 timmar per månad. Denna nivå visas i diagrammet.

För att få till en korrekt luftningsdimensionering behövs även minbehovet fastställas. Tillvägagångssättet är motsvarande som för maxbelastningen. Det behövs en bedömning av hur ofta det kan vara acceptabelt att driva systemet med för mycket luft på samma sätt som bedömningen av hur ofta det kan vara acceptabelt att överskrida luftningskapaciteten.



Figur 8.3 Varaktighetsdiagram baserat på tim-värden (svart) respektive dygnsmedelvärden (blå). Den streckade linjen visar 99-percentilen. Data från simulering som beskrivs i Exempel 8.5.

Det är viktigt att undvika att välja ett alltför lågt dimensionerande minbehov. I vissa fall blir minbehovet dimensionerande. För ett membranluftarsystem innebär det att antalet luftare blir en funktion av minbehovet samt det lägsta luftflödet per luftare som kan tillämpas för den aktuella luftaren. Ett lågt dimensionerande minbehov leder då till ett mindre antal luftare vilket i sin tur leder till att systemet kommer att drivas med höga luftflöden per luftare med sämre syreöverföringseffektivitet som följd. I Exempel 8.6 jämförs energianvändningen för simulerade system med olika antal luftare vilket motsvarar olika dimensionerande minbehov. System som dimensionerades för ett högre minbehov visade sig mer energieffektivt än de som dimensionerades för ett lägre minbehov. Ett högre dimensionerande minbehov ledde här till fler luftare och därmed lägre genomsnittligt luftflöde per luftare (högre SOTE). Den energimässiga vinsten med låga luftflöden per luftare var större än förlusten i att anläggningen luftades med höga koncentrationer av syre (>2 mg/l) vid låg belastning.

Ett alternativ till att fastställa ett minbehov kan därför vara att lämna denna faktor att optimeras vid design av luftarsystemet. I detta fall behöver leverantören information om varaktigheten vid olika luftflöden för att kunna avgöra lämplig balans mellan antal luftare (energieffektivitet vid medelbelastning) och minbehov (acceptabel tid med högre syrehalt). Här måste också eventuella följder av en förhöjd koncentration av löst syre beaktas såsom eventuell störning på fördenitrifikation.

Även vid dimensionering inför en kapacitetsökning av luftningssystemet är det klokt att använda sig av varaktighetsdiagram. I dessa fall utgår från varaktighetsdiagram för dagens belastning och sedan extrapoleras belastningen för den förväntade belastningsökningen.

Vid dimensionering av det biologiska reningssteget vid ett reningsverk används ibland begrepp som maxdygn, medeldygn och mindygn, på vilka maxtimme, medeltimme och mintimme appliceras. Denna metod inne-

bär att de mest extrema belastningarna blir under maxdygnets maxtimme respektive under mindygnets mintimme. I luftningssammanhang rekommenderas dock inte att använda detta tillvägagångssätt då det lätt leder till ett alltför brett reglerområde. Dimensionering för maxdygnets maxtimme innebär en hög investeringskostnad och samtidigt svårigheter att reglera ned till minbelastningen under mindygnets mintimme.

Dataunderlag med en timmes upplösning är sällsynt och i praktiken behövs ofta uppskattningar göras av dynamiken i belastning. Ett sätt att arbeta med dynamiken är att använda kvoter för den maximala timbelastningen relativt dygnsbelastningen. Dessa kvoter kan till exempel uppskattas genom en kortvarig intensiv provtagningskampanj.

Ett annat sätt att fastställa timvariationer är att använda data från luftflödesmätare ifall sådan finns att tillgå. Då kan dygnsmedelvärden för uppmätta koncentrationer användas som grund, och sedan timvariationerna därutöver uppskattas utifrån luftflöden.

I de tyska riktlinjerna för dimensionering av reningsverk föreslås ett tillvägagångssätt för val av kvoter när data saknas. Enligt denna metod definieras separata toppfaktorer för avskiljning av organiskt material och nitrifikation som sedan används för att omvandla dygnsmedelvärdet till ett maxtimvärde (ATV, 2000b):

$$AOR_{Tim} = \frac{f_{Org} \cdot (AOR_{Org, d} - AOR_{Den, d}) + f_{Nit} \cdot AOR_{Nit, d}}{24} [kg O_2/h] \quad (8.12)$$

där

AOR_{Tim} = Maxtimvärde för AOR (kg O₂/h)

$AOR_{Org, d}$, $AOR_{Den, d}$, $AOR_{Nit, d}$ =

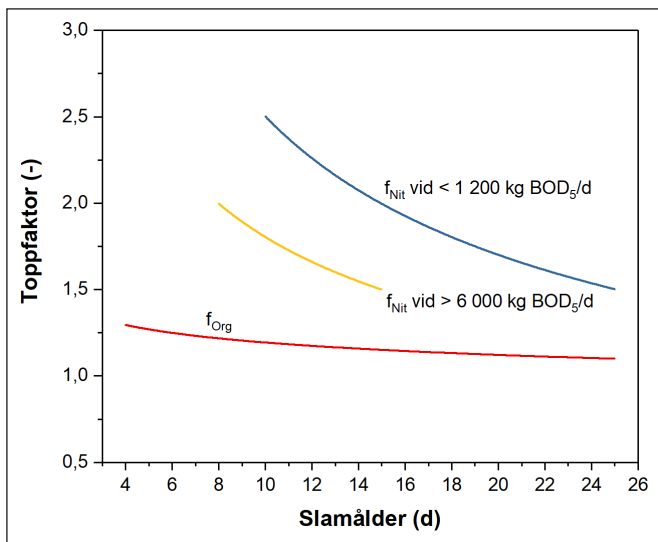
= Dygnsmedelvärden AOR_{Org} , AOR_{Den} , AOR_{Nit} (kg O₂/d)

f_{Org} = Toppfaktor för organiskt material (-)

f_{Nit} = Toppfaktor för nitrifikation (-)

Eftersom högsta belastning av BOD och kväve ofta inte sammanfaller rekommenderas två beräkningar av AOR_{Tim} : en med $f_{Org} = 1$ och antaget/fastställt värde för f_{Nit} , och en med $f_{Nit} = 1$ och antaget/fastställt värde för f_{Org} (ATV, 2000b). Det högsta av dessa två är det som ska användas. I avsaknad av toppfaktorer kan värden från Figur 8.4 antas.

Att bestämma dimensionerande belastning är en process där hänsyn måste tas till hur belastningssituationen ser ut till det specifika reningsverket, vilken säkerhet som önskas och hur utsläppskraven ser ut. Arbetet bör utföras av en person med processkunskap antingen inom den egna organisationen eller hos en konsult. Av resonemanget i detta stycke följer att det är viktigt att som VA-huvudman och beställare av ett luftningsprojekt aktivt delta i fastställande av den dimensionerande belastning som luftningssystemet ska dimensioneras för. Annars finns det en stor risk att felaktiga förutsättningar används i det fortsatta arbetet.



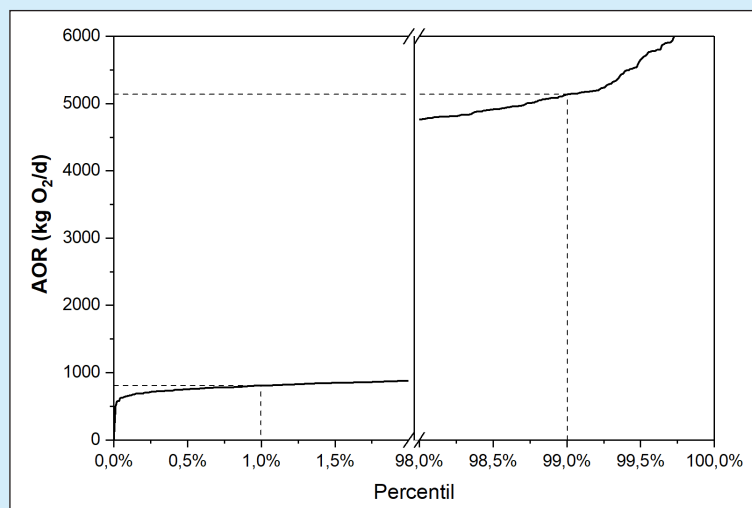
Figur 8.4 Föreslagna toppfaktorer i avsaknad av uppmätta värden (ATV, 2000b). Belastning av BOD_5 gäller in till reningsverket, före eventuell försedimentering.

Exempel 8.2

Fastställande av min- och max-AOR.

Min och maxnivåerna för AOR ska bestämmas utifrån förutsättningarna i Exempel 8.1 och (a) nedanstående varaktighetsdiagram och (b) toppfaktorer enligt Figur 8.4.

Baserat på en bedömning av reningsverkets marginaler i förhållande till utsläppsvillkoren fastställs 1-percentilen respektive 99-percentilen som min- respektive maxnivå för AOR.



Figur 8.5 Varaktighetsdiagrammet från Figur 8.3 förstort i dess nedre och övre del.

(a) Max-AOR avläses vid 99 % i Figur 8.5 och min-AOR avläses vid 1 %. Avläsning ger att max-AOR är 5 140 kg O_2 /d och min-AOR är 805 kg O_2 /d.

(b) Belastningen till anläggningen innan försedimentering motsvarar 3 520 kg BOD₅/d. Avläsning av toppfaktorerna i Figur 8.4 ger $f_{\text{Org}} = 1,2$ och $f_{\text{Nit}} = 2,3$ (extrapolering mellan kurvorna). Timbelastningen av AOR beräknas då enligt högsta värdet av dessa två alternativ (ekv. 8.12):

$$\text{AOR}_{\text{Tim1}} = \frac{1 \cdot (1\,888 - 1\,126) + 2,3 \cdot 2\,000}{24} = 223 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

$$\text{AOR}_{\text{Tim2}} = \frac{1,2 \cdot (1\,888 - 1\,126) + 1 \cdot 2\,000}{24} = 121 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

Toppen i kvävebelastning är bestämmande och max-AOR blir således 223 kg O₂/h vilket motsvarar 5 360 kg O₂/d. Den maximala belastningen beräknad med toppfaktorer är i detta fall alltså nära överensstämmande med 99-percentilen (4 % högre).

8.2.3 Beräkning av syrebehov vid standardförhållanden i renvatten (SOR)

Eftersom prestanda för luftarsystem anges vid standardförhållanden i renvatten behöver syrebehovet vid processförhållanden omvandlas till standardförhållanden. Syrebehovet vid standardförhållanden (SOR) korrigeras då för föroreningarna i avloppsvattnets påverkan på masstransport av syre (α), koncentrationen av löst syre (C), syrets mättnadskoncentration ($C_{\infty 20}^*$) samt påverkan på syrets mättnadskoncentration från föroreningar (β), temperatur (τ) och anläggningens altitud (Ω). SOR kan beräknas från AOR efter ekvation 6.19 i Kapitel 6 skrivits om till:

$$\text{SOR} = (\text{AOR}) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \theta^{20-T} \left(\frac{C_{\infty 20}^*}{\tau \cdot \beta \cdot \Omega \cdot C_{\infty 20}^* - C} \right) \quad (8.13)$$

där

C = Koncentrationen av löst syre (mg/l)

α = Korrektionsfaktorn för masstransport i avloppsvatten

T = Vattnets temperatur (°C)

θ = Temperaturkorrektionsfaktor som vanligtvis antas vara 1,024

τ = Temperaturkorrektionsfaktor som kan beräknas utifrån C_{sT}^* och C_{s20}^* vilka är tabellvärden för mättnadskoncentrationen för syre vid y_{tan} vid temperaturerna T respektive 20 °C, vid atmosfärstryck och 100 % luftfuktighet (se Bilaga C):

$$\tau = \frac{C_{sT}^*}{C_{s20}^*} \quad (6.10)$$

β = Korrektionsfaktorn för syrets mättnadskoncentration i avloppsvatten

Ω = Tryckkorrektionsfaktor som kan beräknas utifrån:

$$\Omega = \frac{P_b}{P_s} \quad (6.11)$$

P_b = Det rådande lufttrycket i omgivningen (atm eller mVp)

P_s = Standardtrycket 1 atm eller 10,33 mVp

$C_{\infty 20}^*$ = Syrets jämviktskoncentration efter lång tids luftning vid 20 °C (mg/l). Detta värde är högre än mättnadskoncentrationen vid ytan eftersom det påverkas av trycket från vattenpelaren i bas sängen. Värdet på $C_{\infty 20}^*$ beror på vattendjup och utrustningen och kan tillhandahållas av leverantören för luftningsutrustningen eller uppskattas utifrån följande:

$$C_{\infty 20}^* = C_{s20}^* \cdot \left(1 + d_e \cdot \left(\frac{D_f}{P_s} \right) \right) \quad (8.14)$$

d_e = Korrektionsfaktor för medelvattendjupet, kan variera mellan 0,25 och 0,45

D_f = Luftarnas installationsdjup (m)

Det som ofta utgör den största utmaningen vid dimensionering av ett luftningssystem är att α -faktorn inte går att fastställa på ett enkelt och tillförlitligt sätt. α -faktorn varierar nämligen bland annat beroende på inkommande belastning och sammansättning på avloppsvattnet, processförhållanden (slamålder och fördenitrifikation), position i luftningsbas-sängen, typ av luftningsutrustning, slamhalt med mera, vilket diskuteras mer i detalj i Kapitel 7. Detta leder till att det i verkligheten är svårt att fastställa vilken α -faktor som gäller. I praktiken används därför ofta värden baserade på erfarenhet och litteraturen. Några exempel på värden på α -faktorn vid olika processförhållanden och luftare anges i Tabell 8.1. Vanliga värden på α -faktorn kan ligga i ett så brett spann som mellan 0,3 och 0,8 för ett finblåsigt system och mellan 0,4 och 0,9 för ett grovblåsigt. Ofta dimensioneras ett finblåsigt system med en α -faktor på 0,6 till 0,7, medan det för grovblåsigt system och mekaniska bottenluftare ofta används ett värde av 0,8 till 0,85. Dessa värden gäller för luftning i en aktivslamprocess med fördenitrifikation och normala slamkoncentrationer (<5 g/l) och nyligen installerad utrustning där ingen igensättning eller åldrande av membran har hunnit ske.

Att definiera vilken α -faktor som ska användas i det specifika luftningsprojektet är nog det mest kritiska valet som beställaren av ett nytt luftningssystem gör. Om fastställande av α -faktorn överläts till en leverantör eller entreprenör kan luftningsdimensioneringen bli baserad på olika värden på α -faktorn. I så fall kommer det vara svårare att jämföra anbuden. I händerna på en leverantör eller entreprenör kan α -faktorn förvandlas till en riskparameter som de kan använda för att lägga in olika nivåer av "risk" eller "marginal" i sina luftningssystem.

Om olika typer av luftare efterfrågas med olika förväntade α -värden, till exempel både membranluftarsystem och mekaniska bottenluftare bör kanske olika α -faktorer definieras av beställaren. Dessa kan till exempel

vara 0,6 till 0,7 för membranluftarsystem och 0,8 för de mekaniska bottenluftarna.

När det α -faktorn för dimensionering fastställs är det också lämpligt att ta hänsyn till om det finns hög andel industribelastning som kan förväntas påverka värdet. Information om industribelastning och typ av industri är också bra att vidarebefordra till de leverantörer som ska lämna anbud på luftarsystemet.

Tabell 8.1 Exempel på typiska värden på α -faktorn som har observerats vid olika processförhållanden och med olika typer av luftningsutrustning i ett nyligen installerat system (Mueller et al., 2001; Rosso, 2018; Rosso et al., 2008a; Stenstrom & Gilbert, 1981; Tchobanoglous et al., 2014; WEF, 2012).

Process	Luftare	α
Aktivt slam, låg slamålder (<7 dygn) utan fördenitrifikation	Finblåsig system	0,2-0,5
Aktivt slam, hög slamålder (>7 dygn) utan fördenitrifikation	Finblåsig system	0,4-0,7
Aktivt slam, hög slamålder (>7 dygn) med fördenitrifikation	Finblåsig system	0,5-0,8
Membranbioreaktor, hög slamålder och hög slamkoncentration (7-10 g/l)	Finblåsig system	0,2-0,7
Aktivt slam, låg slamålder	Grovblåsig system	0,4-0,7
Aktivt slam, hög slamålder	Grovblåsig system	0,6-0,8
Aktivt slam	Mekanisk bottenluftning	0,6-0,9
Aktivt slam	Mekanisk ytluftning	0,6-1,2

Exempel 8.3

Val av α -värde och övriga parametrar och beräkning av SOR

Det AOR som beräknades i Exempel 8.1 ska omvandlas till SOR. Ytterligare förutsättningar anges i tabellen nedan.

Syrehalt	mg/l	2,0
Altitud (höjd över havet)	m	150
Installationsdjup	m	5,0

Parametrarna i ekvation 8.13 behöver bestämmas. Temperaturen (15 °C) och syrehalten ($C = 2,0$ mg/l) är kända. θ sätts till 1,024 eftersom detta rekommenderas om det inte är känt att det verkliga värdet avviker från detta. Anläggningen behandlar kommunalt avloppsvatten så β kan antas vara 0,98. τ beräknas ur tabellvärden för syrets mättnadskoncentration vid 1 atm och 15 °C respektive 20 °C (ekv. 6.10):

$$\tau = \frac{C_{s15}^*}{C_{s20}^*} = \frac{10,07}{9,08} = 1,11$$

Anläggningen är belägen 150 m över havet vilket innebär att lufttrycket (P_b) är 0,98 atm. beräknas enligt (ekv. 6.11):

$$\Omega = \frac{P_b}{P_s} = \frac{0,98 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} = 0,98$$

Ifall syrets mättnadskoncentration i bassängen ($C_{\infty 20}^*$) inte erhålls från leverantören av luftarsystemet kan den uppskattas från ekv. 8.14. Ifall

det antas att mättnadskoncentrationen motsvarar den vid 1/3 av bassängens djup ($d_e = 0,33$), kan $C_{\infty 20}^*$ uppskattas enligt:

$$C_{\infty 20}^* = C_{s20}^* \cdot \left(1 + d_e \cdot \left(\frac{D_f}{P_s} \right) \right) = 9,08 \cdot \left(1 + 0,33 \cdot \left(\frac{5}{10,33} \right) \right) = 10,53 \text{ mg/l}$$

Eftersom det är en process med hög slamålder (nitrifikation) och fördenitrifikation antas i detta fall α till 0,60 (Tabell 8.1). Då kan SOR beräknas enligt (ekv. 8.13):

$$\text{SOR (medel)} = 2\,762 \cdot \frac{1}{0,60} \cdot 1,024^{20-15} \left(\frac{10,53}{1,11 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 10,53 - 2} \right) = 5\,910 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

På samma sätt kan SOR vid min- och maxbelastningen beräknas till 2 067 respektive 13 190 kg O₂/d. Som nedanstående tabell visar, hade SOR-värdena blivit 20 % högre respektive 14 % lägre ifall α -värdet istället hade antagits vara 0,50 eller 0,70.

α	AOR medel (kg O ₂ /d)	SOR medel (kg O ₂ /d)
0,50	2 760	7 090
0,60	2 760	5 910
0,70	2 760	5 070

8.2.4 Syreöverföringseffektiviteten (SOTE)

För att kunna beräkna luftflödesbehovet utifrån ett givet SOR, behövs information om syreöverföringseffektiviteten. SOTE anger hur stor andel av det tillförda syret som överförs till processen. På så sätt kan det betraktas som en slags ”verkningsgrad” i procent för luftningen. SOTE varierar som redan nämnts beroende på främst vattendjup, luftartäthet, luftflödet per luftare och typ av luftare (Avsnitt 7.3).

Om α -faktorn har definierats av beställaren blir det SOR som utgör grunden i förfrågningsunderlaget för ett luftarsystem. Leverantören ska då föreslå ett luftarsystem med en SOTR (se Kapitel 6) som motsvarar SOR. Detta system kommer ha ett samband mellan SOTE och luftflödet som är specifikt för den aktuella designen. Vanligen anges SOTE vid de designvärden för SOR som har angetts i förfrågningsunderlaget, som medel, min och max SOR. Leverantören bestämmer SOTE utifrån luftflöde, luftartäthet, bassängutformning och den specifika luftarens egenskaper. Sådan information har luftarleverantörerna i sina väl bevakade produktdatabaser, som är resultat av många års erfarenheter och syreöverföringstester i renvattenbassänger vid olika förhållanden.

Energianvändningen för luftning med ett visst luftarsystem bestäms dels av SOTE (påverkar luftflödet) och dels av mottrycket. Driftkostnader för luftarsystem från olika anbud kan jämföras genom att beräkna energianvändningen utifrån aktuellt luftflöde och mottryck med hjälp av den specifika energianvändningen (kWh/Nm³). Ett fördelaktigt system har då både ett högt SOTE, som ger lågt luftflöde, och lågt tryckfall (DWP) som ger ett lågt bidrag till systemets totala mottryck (se Exempel 8.4).

För ett typiskt luftningssystem med 4 meters vattendjup kan SOTE-talet vara ca 25–30 % (eller 20 g O₂/Nm³ och meter vattendjup). Några exempel på SOTE vid 4 meters vattendjup och olika betingelser anges i Tabell 8.2. Dessa värden är dock endast avsedda som grov fingervisning då SOTE kan skilja mellan olika produkter, tillverkare och designen av luftarsystemet. Vid behov går det också att göra en mycket grov uppskattning av SOTE baserad på det vattendjup som luftarna är installerade vid. Då används ofta ett värde mellan 4 och 7 % per meter vattendjup (vid 3-6 m djup), vilket motsvarar mellan 12 och 21 g O₂/(Nm³·m). Även om denna metod kan användas för att få en känsla för storleksordningen på luftflödet som kan behövas, är det mycket viktigt att den aldrig används som grund i ett förfrågningsunderlag gentemot luftningsleverantörer eller entreprenörer.

De SOTE-värden som leverantören anger för ett föreslaget luftarsystem garanteras i normalfallet för ett nytt system, som inte påverkats av åldrande eller igensättning. Få leverantörer är beredda att ta den risk som det innebär att garantera prestandan (i renvatten) några år in i framtiden för ett system vars drift de inte har fullt inflytande över. I praktiken innebär det att ansvaret för att systemet fungerar som avsett även i framtiden hamnar hos beställaren själv. Beställaren kan till exempel hantera det genom att en viss marginal inkluderas i det angivna α -värdet. Det kan också hanteras genom att konsekvenserna analyseras ifall prestandan skulle försämrats. Förfrågningsunderlaget kan exempelvis inkludera krav på att det ska finnas ett visst utrymme för installation av fler luftare.

Tabell 8.2 Exempel på SOTE-värden vid olika typer av luftare, luftflöde och bottentäckningsgrad angivna vid nedsänkingsdjupet 4 m.

Luftartyp	Luftflöde	SOTE (%)	
		5 % bottentäckningsgrad	25 % bottentäckningsgrad
Tallriksluftare EPDM	2,0 Nm ³ /h/luftare	26-28	31-33
	5,0 Nm ³ /h/luftare	23-25	27-30
Keramiska luftare	2,0 Nm ³ /h/luftare	22	24
	5,0 Nm ³ /h/luftare	26	28
Panelluftare	10 Nm ³ /m ² /h	-	36-45
	30 Nm ³ /m ² /h	-	31-36
	60 Nm ³ /m ² /h	-	28-32

8.2.5 Beräkning av luftflödet

När syrebehovet i renvatten och SOTE-värdet i renvatten har bestämts för ett givet luftningssystem går det att bestämma vilket luftflöde som behövs för att överföra denna mängd syre till renvatten. Detta görs enligt:

$$Q_L = \frac{SOR}{0,298 \cdot SOTE} \left[\frac{\text{Nm}^3}{h} \right] \quad (6.18)$$

där:

Q_L = Luftflödet i normalkubikmeter per timme (Nm³/h)

SOR = Syrebehovet i renvatten (kg O₂/h)

SOTE = Syreöverföringseffektiviteten (%/100 eller kg/kg)

Här definieras normalkubikmeter (Nm³) som volymen vid 0 °C, 1 atm och 0 % relativ luftfuktighet. Rekommendationen är att uttrycka luftflöde vid normalförhållanden enligt denna definition men vara observant på att andra definitioner förekommer. Syreinnehållet i luft 0,298 kg O₂/Nm³ behövs för omvandling från vikt till volym.

Som uttrycket ovan visar finns ett direkt samband mellan luftflöde, SOR och SOTE. Samtidigt beror SOTE-värdet i sig på luftflödet. När leverantörer av luftare dimensionerar ett system sker en iterativ beräkning mellan dessa parametrar för att hitta en bra balans mellan SOTE och luftflödet per luftare för ett givet SOR.

Exempel 8.4

Beräkning av luftflöde och elenergianvändning

Luftflödet och elanvändningen vid medelbelastningen (SOR = 5 910 kg O₂/d) ska beräknas för att kunna jämföra driftkostnader för två luftarsystem med olika SOTE och DWP. Blåsmaskinernas specifika energianvändning antogs enligt nedan baserat på typiska värden vid de aktuella mottrycken.

		System 1	System 2
SOTE	%	34,0	35,0
Tryckfall luftare (DWP)	mVp	0,20	0,40
Totalt mottryck	mVp	5,5	5,7
Specifik energianvändning	kWh/Nm ³	0,0185	0,0192

Luftflödet beräknas med hjälp av ekv. 6.18:

$$Q_L = \frac{5\,910}{0,298 \cdot 0,34} = 58\,330 \text{ Nm}^3/\text{d för System 1}$$

$$Q_L = \frac{5\,910}{0,298 \cdot 0,35} = 56\,663 \text{ Nm}^3/\text{d för System 2}$$

$$\text{Elanvändning} = 58\,330 \cdot 0,0185 = 1\,079 \text{ kWh/d för System 1}$$

$$\text{Elanvändning} = 56\,663 \cdot 0,0192 = 1\,088 \text{ kWh/d för System 2}$$

I denna jämförelse visade sig det system som hade lägst SOTE leda till lägst elanvändning tack vare att även DWP var lägre.

8.2.6 Redundans

Vid installation av nya luftningssystem i flera parallella reningslinjer bör dimensioneringen ske så att en viss redundans erhålls. Utgångspunkten bör vara att anläggningen ska klara att tillgodose syrebehovet medan en reningslinje är avställd för planerat underhåll under en period med låg belastning, vid till exempel semestertid eller lågsäsongperiod.

8.3 Utformning av luftarsystem

I de långsmala bassänger som är vanliga i Sverige är syrebehovet som störst i den första delen av den luftade bassängen för att sedan avta successivt mot slutet av bassänglängden, allt eftersom föroreningarna i vattnet avlägsnas. För att möta denna variation är det vanligt att dela in den luftade volymen i flera zoner. Varje zon har då en separat nedledare med reglerventil som försörjer luftarsystemet i den zonen. Det gör att luftningen kan regleras individuellt till varje zon och anpassas till behovet vilket är viktigt ur energisynpunkt (Avsnitt 9.2). Med undantag för de minsta anläggningarna är det vanligt att dela in den luftade volymen i 3–5 zoner. Därutöver görs ofta 1–2 zoner flexibla med både omrörare och luftare för att kunna reglera den luftade volymen vid behov (Avsnitt 9.4).

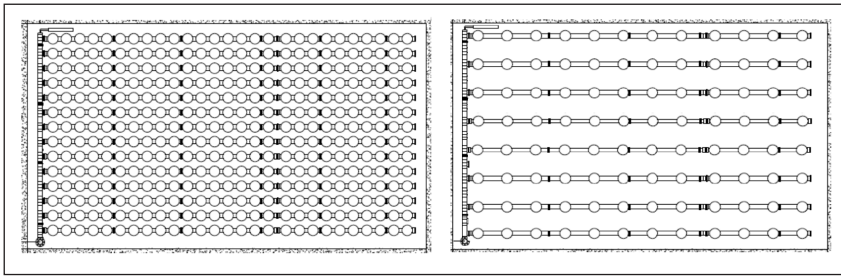
8.3.1 Antal luftare och deras placering

I samband med dimensionering av luftningssystemet kommer leverantörerna rekommendera antalet luftare utifrån angivet SOR och med utgångspunkt i att luftflödet per luftare ska vara inom ett visst intervall där den aktuella luftaren har sin bästa verkningsgrad och minsta mottryck. Ett lägre luftflöde per luftare leder till högre SOTE-tal och mottryck och därmed ett mer energieffektivt luftningssystem (Figur 5.5). Detta blir dock på bekostnad av en högre investeringskostnad eftersom det behövs fler luftare för samma SOR. Samtidigt måste hänsyn tas till reglerområdet så att det går att reglera ned till det luftbehov som råder vid låg belastning. Varje typ av luftare har ett minsta rekommenderat luftflöde som här måste tas i beaktande.

I den lägre delen av reglerområdet måste också hänsyn tas till det så kallade omblandningskriteriet. För att säkerställa att slammet hålls väl omblandat och inte sedimenterar i luftningsbassängen krävs ett visst luftflöde. Detta är oberoende av antal luftare och definieras per kvadratmeter bassängyta. Luftflödet som krävs för omblandning beror på hur effektiv förbehandlingen är. En ofta använd tumregel är att det krävs ett luftflöde relativt ytan på $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ för att upprätthålla tillräcklig omblandning under förutsättning att det finns välfungerande rensavskiljning, sandfång och försedimentering eller förfällning. Utan försedimentering kan det krävas $2\text{--}3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ för att upprätthålla tillräcklig omblandning. Mekaniska bottenluftare kan drivas utan tillsats av luft och därför krävs inget luftflöde för att tillgodose omblandning.

Ifall utformningen görs med ett antal luftare som innebär ett onödigt högt medelluftflöde per luftare kommer SOTE-talet och energieffektiviteten vara lägre. Samtidigt blir investeringskostnaden också lägre. I detta fall blir reglerområdet uppåt kritiskt för att undvika ett alltför högt mottryck över luftarna och därmed ett ökat mottryck i hela systemet med alla dess följder.

Vid utplacering av luftarna på botten av bassängen placeras dessa så jämnt och heltäckande som möjligt (Figur 8.6). Skälet till detta är att en ojämn eller icke heltäckande placering leder till att valsbildning uppstår där luften får en högre hastighet uppåt genom bassängen på grund av att det syresatta vattnet vänder vid ytan och strömmar tillbaka nedåt (Avsnitt 7.3.8).



Figur 8.6 Exempel på hur tallriksluftare kan placeras jämnt och heltäckande med två olika bottentäckningsgrader.

Vid dimensionering av ett luftningssystem i en bassäng med voter (se Avsnitt 7.3.8), är det viktigt att vara medveten om och ta särskild hänsyn till den negativa påverkan på SOTE. Hur stor negativ effekt som uppstår påverkas av förhållandet mellan votens bredd och bassängens totala bredd. Även de dimensioneringsprogram som exempelvis leverantörerna använder kan ha svårt att hantera detta.

8.3.2 Trappade luftarsystem

En så kallad trappad utformning av luftningssystemet är ett sätt att möta variationen i syrebehov längs anläggningen. Ett trappat luftarsystem är anpassat för en stegvist fördelad belastning av syrebehov längs med bassängen. Fördelning av syrebehovet innebär att systemet designas med fler luftare (högre täthet) i den första zonen än i den sista. Fördelen med ett trappat system är att det medger drift vid lägre luftflöde per luftare. Istället för att möta det höga syrebehovet i den första, högbelastade zonen med ett högt luftflöde finns fler luftare med ett var för sig lägre luftflöde.

För att kunna dimensionera ett trappat system krävs någon slags kännedom om hur fördelningen i syrebehovet ser ut. Om det finns ett befintligt luftningssystem med flera zoner med separata nedledare och luftflödesmätare går det att den vägen ta reda på fördelningen i dagsläget och använda det förutsatt att dagens driftsituation är relevant för framtiden. Här måste dock hänsyn tas till en eventuell ändring i SOTE i samband med att luftflödet per luftare ändras.

Den trappade utformningen anpassas för den dimensionerande belastningen. Samtidigt sätter bassängens fysiska dimensioner begränsningar liksom den minsta och maximala möjliga bottentäckningsgraden. Fördelningen av syrebehovet längs luftningsbassängen varierar också med belastningen. Detta gör det viktigt att också kunna reglera luftflödet till de olika sektionerna oberoende av varandra.

I brist på information om fördelningen av luftbehovet längs anläggningen finns några riktlinjer att utgå ifrån. I tre på varandra följande lika stora zoner är det till exempel vanligt att utforma trappningen enligt följande (US EPA, 1989):

- 45–55 % av luftbehovet i den första zonen.
- 25–35 % av luftbehovet i den andra zonen.
- 15–25 % av luftbehovet i den tredje zonen.

Syrebehovets fördelning påverkas av aktivslamanläggningens utformning och vilka processer som sker. I detta sammanhang kan det vara värt att betrakta syrebehovets beståndsdelar var för sig. Det endogena syrebehovet är jämnt fördelat över anläggningen. Syrebehovet för BOD-reduktion är störst i början av reaktorn och avtar snabbt längs anläggningen. Syrebehovet för nitrifikation är jämnt fördelat över anläggningen fram tills nitrifikationen blir begränsad av att all ammonium har konsumerats (US EPA, 1989). Fördelningen av syrebehov över en anläggning med kväverening illustreras i Exempel 8.5.

Det är vanligt att dimensionering sker baserat på ett genomsnittligt antaget α -värde över anläggningen. Om designen även tar hänsyn till att α varierar över anläggningen påverkar det trappningen. Detta visas också i Exempel 8.5.

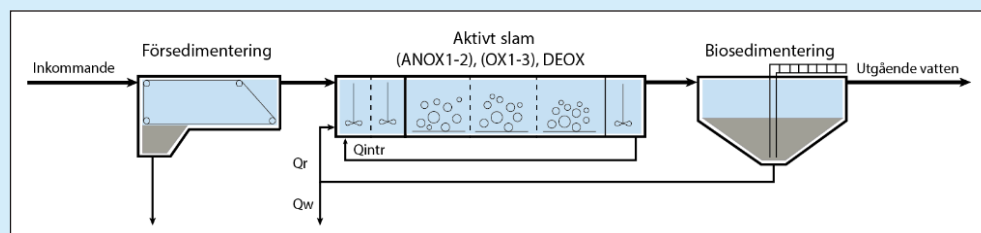
Hur antalet luftare som installeras och valet av trappning av luftarsystemet kan påverka energianvändningen illustreras i Exempel 8.6 och 8.7.

Exempel 8.5

Fördelning av syrebehovet längs anläggningen (simulering)

I de följande exemplen visas med hjälp av simuleringar hur syrebehovet kan variera längs med anläggningens zoner, och hur luftarsystemet kan utformas för att möta denna variation.

Exemplen bygger på simuleringar för en processmodell baserad på ett avloppsreningsverk för 40 000 pe med kväverening bestående av försedimentering, oluftade och luftade zoner samt biosedimentering enligt Figur 8.7 och Tabell 8.3. Reningsverkets två linjer modellerades som en sammanslagen linje. Detaljer kring processmodellens uppbyggnad och simuleringarna återfinns i Avsnitt 2.2 och Bilaga A.

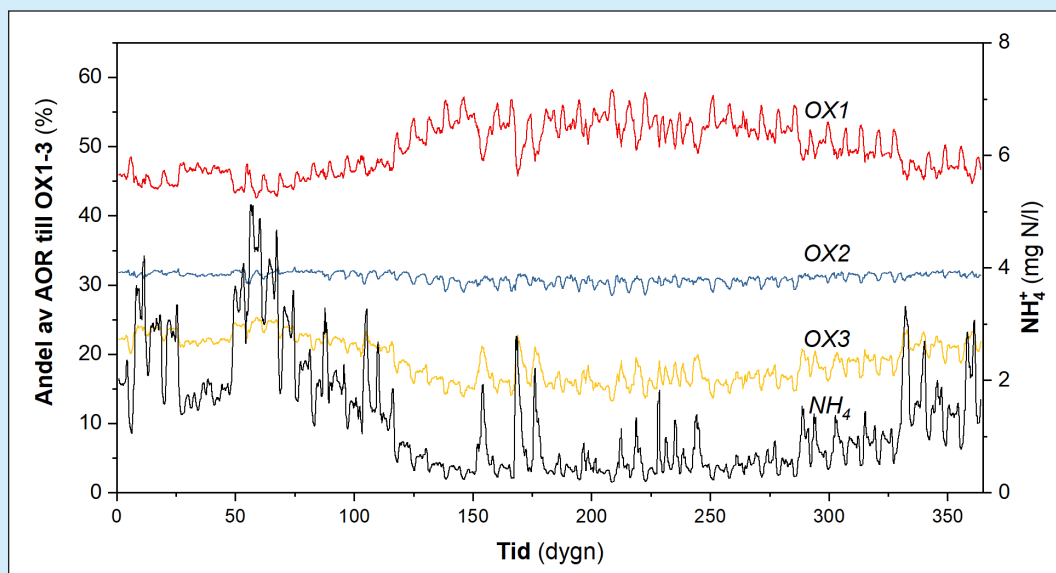


Figur 8.7 Schematisk bild över det modellerade reningsverket.

Tabell 8.3 Dimensioner och antagande för de tre luftade zonerna i processmodellen. Dimensioner är för en av två linjer.

	OX1	OX2	OX3
Längd (m)	13	13	13
Bredd (m)	5	5	5
Djup (m)	5	5	5
Volym (m ³)	325	325	325
Löst syre (mg/l)	2,0	2,0	1,5
α	0,6	0,8	0,9

En simulering med processmodellen över ett år visade att fördelningen av syrebehovet (AOR) i de tre luftade zonerna i genomsnitt fördelade sig som 49/31/20 %. Detta stämmer väl överens med den typiska fördelningen som ofta används som tumregel (US EPA, 1989). I Figur 8.8 visas fördelningen av AOR till zonerna och hur de varierar över året. Under de perioder som den simulerade nitrifikationen var nästan fullständig (sommartid) var fördelningen av AOR till zonerna mer ojämn på så sätt att en större andel av AOR belastade den första och en mindre andel den sista luftade zonen (Figur 8.8). I perioder med icke fullständig nitrifikation (vintertid) var fördelningen jämnare. Det beror på att då temperaturen var högre, var oftare all ammonium förbrukad i den sista zonen och därmed uppstod ingen syreförbrukning för nitrifikation där. Belastningen av AOR till den andra, mellanliggande zonen var i det närmaste konstant över året.

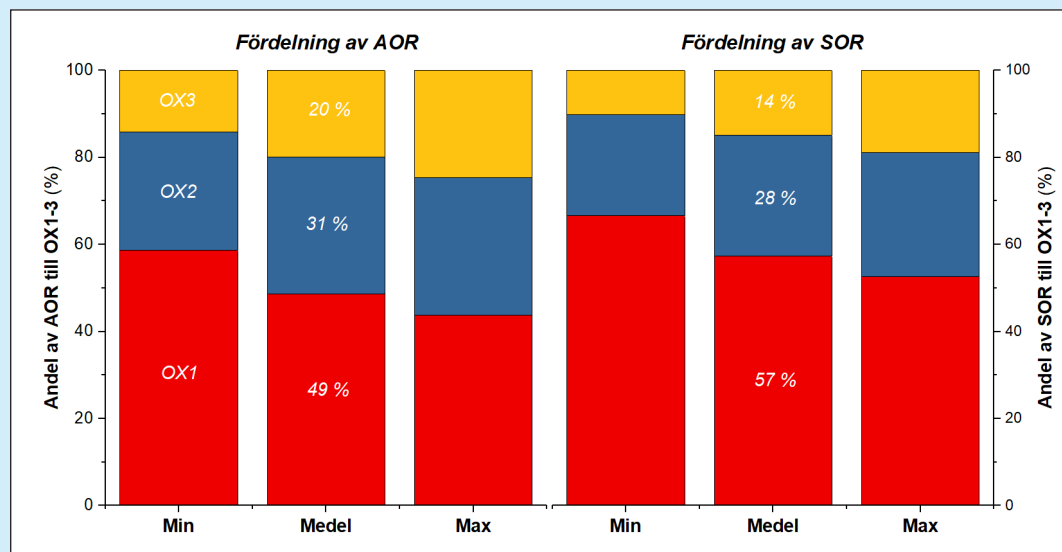


Figur 8.8 Fördelning av AOR till de tre luftade zonerna OX1, OX2 och OX3 enligt simulering samt utgående koncentration av ammonium. Samtliga som glidande dygnsmedelvärden.

Simuleringen visade också att fördelningen av AOR påverkas av belastningen (Figur 8.9). När belastningen är hög förskjuts syrebehovet nedströms. När belastningen är låg är organiska ämnen och ammonium tidigare förbrukade och lägre belastning uppstår nedströms. Därför varierade fördelningen från 57/27/14 % vid den lägsta belastningen till 43/32/25 % vid den maximala belastningen.

Vid simuleringen antogs att α -värdet ökade över anläggningen vilket ofta har visat sig vara fallet i verkligheten. Det innebar att syrebehovet i renvatten (SOR) får en brantare fördelning (Figur 8.9). Det låga syrebehovet i den sista zonen blir ännu lättare att tillgodose eftersom koncentrationen av yttaktiva ämnen där är som lägst. Det omvända gäller för den första zonen. Fördelningen av SOR blev i detta fall

► därför 57/28/14 % vid medelbelastning. Det är denna fördelning av syrebehov som luftarsystemet ska utformas efter.



Figur 8.9 Fördelning av syrebehov vid processförhållanden (AOR) och vid standardförhållanden i renvatten (SOR) vid medel-, min- och maxbelastning.

Exempel 8.6

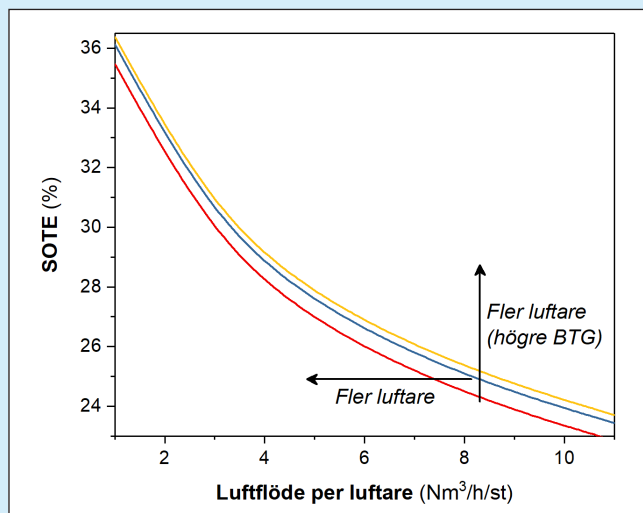
Effekt av antal luftare (simulering)

Ett antal olika luftarsystem med tallriksluftare designades baserat på den erhållna SOR-fördelningen i Exempel 8.5. Dessa system hade snarlik trappning men olika antal luftare. System A designades med minsta möjliga antal luftare (374 st/linje) för en minimerad investering, vilket innebär att dimensioneringen blev begränsad av omblandningskriteriet i OX3. De andra systemen (B-G) hade högre antal luftare, från 542 st/linje (B) till 900 st/linje (G).

Vid simuleringarna togs hänsyn till att SOTE ökar med ökad botten-täckningsgrad. Med framför allt innebär ett högre antal luftare att luftflödet per luftare blir lägre vilket leder till högre SOTE (Figur 8.10).

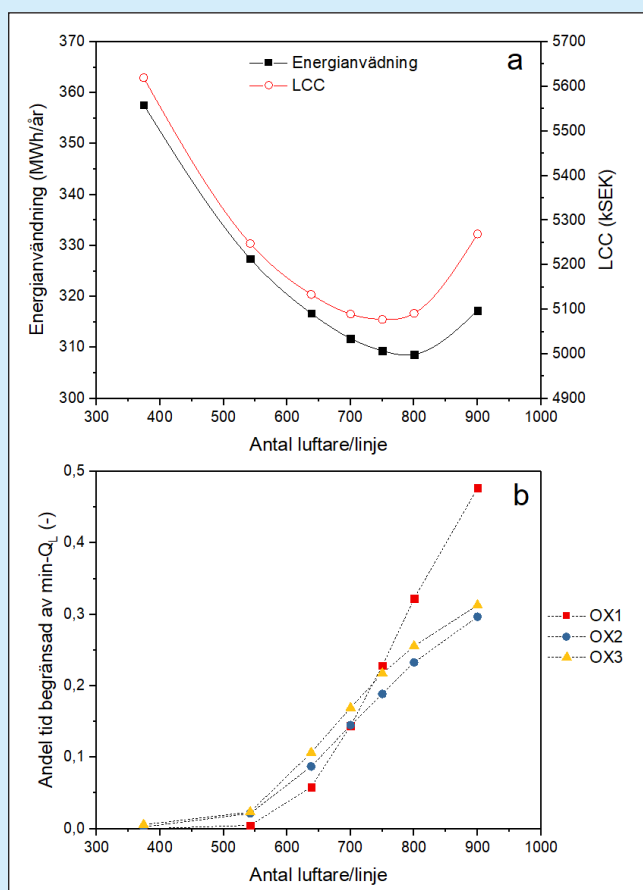
Vid en simulering av System A uppskattades den årliga energianvändningen till 358 MWh/år och det genomsnittliga luftflödet per luftare till 2,9 Nm³/h/st. Med ett högre antal luftare kunde luftning ske vid lägre luftflödet per luftare, 1,9 Nm³/h/st med System B och 1,1 med System G.

Detta bidrog till allt lägre energianvändning (Figur 8.11a). Eftersom det finns ett minsta luftflöde per luftare, för att en membranluftare ska fungera som avsett, innebär samtidigt fler luftare i en zon att det lägsta möjliga luftflödet till zonen blir högre. System A begränsades inte av minimiluftflödet. Med System B begränsades luftflödet av luftarnas minimiluftflödet vid ungefär 2 % av tiden. Denna andel ökade med



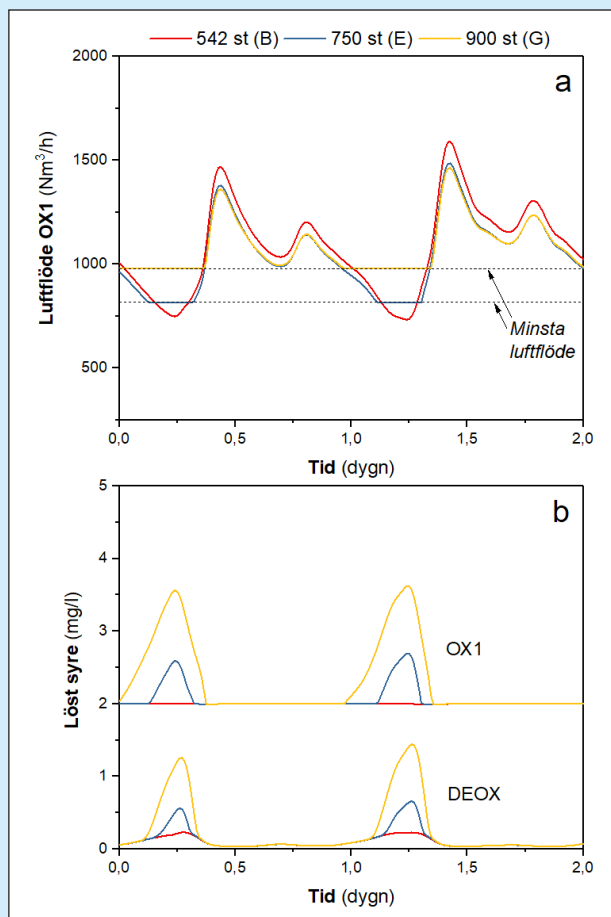
Figur 8.10. SOTE-profiler för de tre luftarsystemen System A (röd), B (blå) och C (gul). BTG = botten täckningsgrad.

antalet luftare upp till 30–50 % vid det högsta antalet luftare (900 st) vilket visas i Figur 8.11b.



Figur 8.11 Simulerad energianvändning under ett år och livscykelkostnad (LCC; investering plus elanvändning 15 år) för de olika luftarsystemen (a) och andel av tiden som luftflödet i respektive system var begränsat av det minsta möjliga flödet (b).

För det högsta antalet luftare ökade energianvändningen vilket berodde på att den begränsade förmågan till nedreglering av systemet var mer negativ än vinsten från ett lågt luftflöde per luftare. Några exempel på tillfällen då luftflödet begränsas av det lägsta möjliga luftflödet kan ses i Figur 8.12. Där kan också ses att koncentrationerna av löst syre i OX1–3 ökade i samband med att luftarsystemet inte kunde regleras längre nedåt (Figur 8.12b). I ingen av simuleringarna ökade utgående koncentration av totalkväve med mer än 0,2 mg/l vilket visar att syretopparna endast försämrade denitrifikationen marginellt.



Figur 8.12 Simulerade luftflöden till OX1 med tre av luftarsystemen (a) och koncentrationer av löst syre i OX1 och DEOX-zonen (b).

Lägst energianvändning uppstod med systemet med 800 luftare/linje. Eftersom fler luftare innebär en större investering beräknades livscykelkostnaden för de olika fallen baserat på investeringskostnad (inklusive ett byte av membran) och energikostnad under 15 år (1 SEK/kWh). Lägst livscykelkostnad beräknades för systemet med 750 luftare/linje (Figur 8.11). Det innebär att investeringskostnaden hade en relativt liten betydelse (–10 %) för den totala livscykelkostnaden.

Slutsatsen av denna jämförelse är att trots att system med många luftare fick en begränsad förmåga till nedreglering, med periodvis högre

syrehalter som följd, var dessa system mer energieffektiva. Den högre energieffektiviteten var framförallt på grund av lägre luftflöde per luftare. Lägst energianvändning uppnåddes med ett system som var överluftat (begränsat av det lägsta luftflödet) under 2–30 % av tiden och lägst livscykelkostnad beräknades för ett system som var överluftat ca 20 % av tiden. Vid design av ett luftarsystem kan det alltså vara bättre att offra vissa driftfall med lågbelastning för att få ett system som kan drivas energieffektivt vid huvuddelen av tiden.

Exempel 8.7

Effekt av fördelning av luftare (simulering)

En simulering gjordes för att undersöka effekten av en trappad utformning vid samma totala antal luftare. System A från Exempel 8.6 jämfördes med ett system där luftarna placerats jämnt med 125 luftare i varje zon.

Den jämna utformningen innebar att luftflödet per luftare i OX1 blev högt (5,8 Nm³/h/st i genomsnitt). Samtidigt ledde det förhållandevis höga antalet luftare i OX3 till att luftningen där väldigt ofta (34 % av tiden) begränsades av minimiluftflödet.

Energianvändningen med systemet med lika många luftare i varje zon uppskattades till 8 % högre än System A med trappad utformning och samma totala antal luftare och 25 % högre än systemen med trappad utformning och 700–800 luftare/linje. En fördel med den trappade utformningen är att ett högre totalt antal luftare kan installeras utan att problem med kapacitetsbrist i den första zonen och begränsad förmåga till nedreglering i den sista zonen. Det högre antalet luftare leder till lägre energianvändning (se Exempel 8.6).

Tabell 8.6 Antal luftare och luftflöde per luftare i de två luftarsystemen.

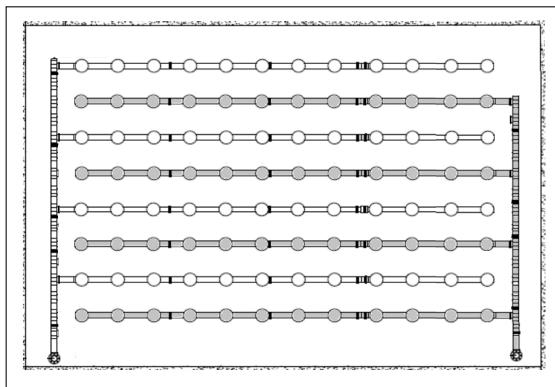
	Antal luftare per zon (st)			Q _L per luftare (Nm ³ /h/st)		
	OX1	OX2	OX3	OX1	OX2	OX3
System A	204	105	65	2,9	2,9	3,1
System H	125	125	125	5,8	2,4	1,4

8.3.3 Gafflade luftarsystem

Ett sätt att öka reglerområdet för ett luftningssystem är att använda en så kallad gafflad utformning (Figur 8.13). Vid en gafflad utformning går två luftarnät in i varandra och utgör i princip varannan rad av fördelarrör i den aktuella zonen. De två luftarnäten har separata nedledare och genom att stänga av luften till den ena nedledaren har luftflödet till zonen halverats och därmed kan syrehalten kontrolleras bättre. Det gafflade luftarsystemet får alltså ett större reglerområde som kan användas för att kontrollera variationer i syrebehovet bättre. Det större reglerområdet blir dock

till priset av en högre investeringskostnad för två nedledare med separata reglerventiler och styrning.

Ett vanligt problem är att man, trots en trappad utformning, har en onödigt hög syrehalt i slutet av bassängen. Detta kan bero på att allt syreförbrukande kväve och BOD har oxiderats samtidigt som antalet luftare gör det svårt att minska på luftflödet ytterligare. I ett sådant läge kan gafflade luftarnät vara en bra lösning att använda sig av. Ibland kan det vara klokt att också kombinera med en omrörare i den sista zonen för att inte begränsas av omblandningskriteriet.

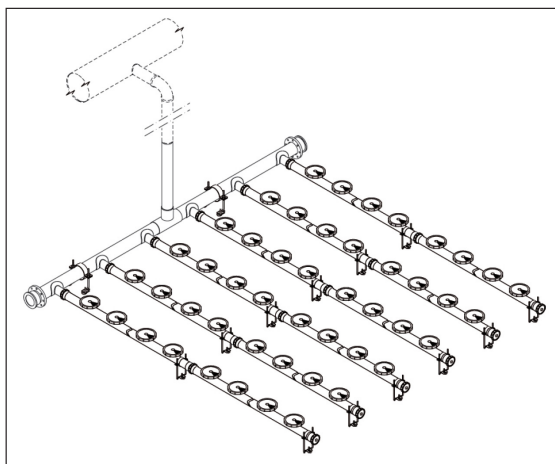


Figur 8.13 Illustration av ett gafflat luftarsystem vilket innebär två nedledare med varsitt överlappande luftarnät.

8.3.4 Luftledningssystemet

Antalet luftarnät bestäms delvis av leverantörens rekommendation gällande maximal längd för fördelarrören där själva luftarna sitter monterade. Om den aktuella luftningszonen är större än vad som kan täckas med ett luftarnät med luft från en nedledare behövs flera luftarnät med respektive nedledare.

En viktig aspekt är att det ska gå att stå mellan raderna med fördelarrör så att det går att arbeta med luftarna vid installation och underhåll (Figur 8.14). Ifall högsta möjliga antal luftare installeras, till exempel ca 25 %



Figur 8.14 Rörsystem med tallriksluftare.

bottentäckningsgrad med 9-tums tallrikar (ca 6 st/m²), blir det trångt och svårt att arbeta mellan raderna.

Rören ska designas och dimensioneras så att tryckförlusterna i systemet är små i förhållande till tryckförlusterna i luftarna. Såväl friktion i rören som turbulens som uppstår vid böjar, förgreningar och ventiler skapar tryckförluster. En tumregel är att ifall tryckförlusterna i rörsystemet mellan den sista flödesfördelningen och den sista luftaren är mindre än 10 % av tryckförlusterna över luftarna, kan en god luftfördelning erhållas i bas-sängen (WEF, 2018).

Friktionsförlusterna i raka rör kan beräknas med följande ekvation:

$$\Delta p = 47,8 \cdot \frac{Q_L^{1,85} \cdot L}{D^5 \cdot P} \quad (8.15)$$

där:

Δp = Friktionsförlust (atm)

Q_L = Luftflödet i normalkubikmeter per timme (Nm³/h)

L = Rörlängd (m)

D = Rördiameter (mm)

P = Absolut lufttryck i röret (atm)

Tryckförluster i böjar, förgreningar, ventiler och dylikt kan beräknas med hjälp av koefficienter för tryckförlust eller som den ekvivalenta längden (L , m) för ett rakt rör med diametern (D) med hjälp av aktuell motståndsfaktor (C) enligt:

$$L = 55,4 \cdot C \cdot D^{1,2} \quad (8.16)$$

Motståndsfaktorn för en böj kan exempelvis vara 0,33 – 0,67 beroende på böjningsradien medan den för en T-förgrening kan vara 1,3 (Tchobanoglous et al., 2014).

Förluster i luftflödesmätare uppskattas ofta som andel av skillnaden i kinetiskt tryck över mätaren. Förluster i luftfilter, blåsmaskinernas ljuddämpare och ventiler kan också erhållas från respektive tillverkare.

Dimensionering av rören kan baseras på målet att åstadkomma en hastighet inom ett önskvärt intervall. I den svenska VA-branschen är det vanligt att dimensionera för en hastighet mellan 10 och 15 m/s vid det maximala luftflödet under standardförhållanden (20 °C och 1 atm). I litteraturen finns också riktlinjer med intervall för lämpliga lufthastigheter som funktion av rörets diameter. Enligt dessa bör hastigheten vid standardförhållanden vara 6–9 m/s för rör med diameter 25–75 mm, 9–15 m/s med diameter 100–250 mm och 13–20 m/s med diameter 300–600 mm (Jenkins, 2014; Tchobanoglous et al., 2014). Vanligtvis är det maximala förväntade luftflödet bestämmande (Jenkins, 2014). Den minsta hastigheten kontrolleras för att säkerställa att det finns möjlighet till tillfredställande flödesmätning och reglering med ventiler.

Alltför höga hastigheter i rören kan, förutom onödiga tryckförluster, ge upphov till höga ljudvolymmer vilka också påverkas av material. Dämpning av ljud kan vara ytterligare en arbetsmiljömässig anledning att isolera luftningsrör, jämte att skydda mot exponering för rörens eventuellt höga temperatur.

Vid design av rörsystemet måste hänsyn tas till att de flesta flödesmätare kräver en viss längd raksträcka före och efter sensorn. För att flödesmätningen ska bli korrekt behöver flödet genom givaren vara laminärt. Efter en böj eller fördelning som skapar turbulens måste tillräcklig sträcka finnas för att flödet ska hinna bli laminärt (se Avsnitt 9.11.2).

Några andra rekommendationer gällande rörsystemet är:

- Använd gärna stor radie för böjar och mjuka övergångar i anslutningar.
- Undvik T-anslutningar.
- Använd anslutningsbeslag med största möjliga fria tvärsnitt.
- Förankra rören tillräckligt för att undvika vibrationer och ljud.

8.3.5 Ventiler

De ventiler som ska användas för reglering i luftningsanläggningen (se även Avsnitt 5.4) behöver vara rätt dimensionerade för att kunna reglera effektivt i det önskade området. Vridspjällventiler som ofta används till luftningsanläggningar kräver extra noggrann dimensionering eftersom de har icke-linjär karaktäristik vid reglering. Leverantörer av ventiler kan dimensionera och föreslå mest lämpliga ventiler beroende på aktuella förutsättningar.

Vid dimensionering av ventiler behövs information om temperatur, dimension på rör, flöde (min, max och medel) och högsta accepterade tryckfallet över ventilen. Eftersom dimensionen på ventilen måste vara anpassad för det aktuella reglerområdet för att regleringen ska fungera bra, kan det ibland vara nödvändigt att anpassa rördimensionen efter reglerområdet. Därför är det viktigt att veta vilket som är det högsta tryckfallet över ventilen som kan tillåtas. Det kan bli nödvändigt att kompromissa mellan tryckfall och reglerområdet. Designen sker ofta iterativt för att hitta mest lämpliga lösningen.

8.4 Sekventiella satsvisa reaktorer (SBR)

SBR-processer skiljer sig från konventionella aktivslamprocesser genom att behandlingsprocessen sker satsvis, i ”batcher”, och inte kontinuerligt (se Avsnitt 4.3). De biologiska processerna är desamma liksom de grundläggande principerna för hur den suspenderade biomassan bildar flockar som behålls i processen genom sedimentering.

Reningsprocessen i en SBR-bassäng är uppdelad i ”faser”. Dessa faser är fyllnadsfas, reaktionsfas (oluftad och/eller luftad), sedimenteringsfas, dekanteringsfas och ibland en avslutande vilofas. Beroende på processvariant kan en SBR-reaktor fyllas under pluggflöde, omrörning och/eller luftning. En vanlig cykeltid på en kommunal SBR-anläggning är 4–12

timmar, vilket innebär att under ett dygn behandlas 2–6 cykler (Singh & Srivastava, 2011).

Då tillförsel av inkommande avloppsvatten sker satsvis består en anläggning ofta av flera parallella SBR:er vilket möjliggör ett kontinuerligt flöde så att det alltid är någon reaktor som är i fyllnadsfasen.

Det som skiljer en SBR-process från en konventionell aktivslamprocess när det gäller luftningssystemet är följande:

1. Hänsyn behöver tas till att luftningsperioden är sekventiell.
2. Omrörning och luftning krävs vanligtvis i samma volym.
3. Vattendjupet och därmed det statiska mottrycket kan variera under luftningsfasen.
4. Det faktiska syrebehovet är högt under början av luftningsfasen för att sedan sjunka.

8.4.1 Dimensionering för SBR

Dimensioneringen av den biologiska processen och det totala syrebehovet i en SBR-process görs på samma sätt som för en aktivslamprocess. Det som skiljer sig är den efterföljande hydrauliska dimensioneringen, samt dimensionering av bassängvolymen och antal bassänger.

Då den luftade tiden (fasen) inte är kontinuerlig och alltså inte pågår 24 timmar om dygnet måste dimensionering av luftningssystemet ta hänsyn till hur lång den luftade fasen är och hur många SBR-reaktorer som är i den luftade fasen samtidigt. Vid beräkning av dimensionerande timbelastning utifrån ett dygnsvärde måste hänsyn tas till hur många luftade faser som inträffar totalt under ett dygn. Syrebehovet fördelas på de antal reaktorer som är luftade samtidigt vilket illustreras i Exempel 8.8.

Vanligtvis sker dimensioneringen med hänsyn till att SBR:erna ska kunna drivas på olika sätt när det gäller vilka faser som ska ingå i cykeln och hur långa dessa ska vara. Utöver den luftade fasen som sker efter tillsats av avloppsvatten kan det till exempel även ingå returslamluftning i början av cykeln, påfyllning av rejektvatten, en oluftad fas för denitrifikation med mera. Möjligheten till en flexibel drift är en stor fördel med SBR:er, men ramarna för denna flexibilitet måste definieras i samband med dimensioneringen, framförallt när det gäller hur lång den luftade fasen ska vara. Det bör således finnas kapacitet hos blåsmaskinerna att klara av fler luftade bassänger samtidigt än vad som förväntas ske i normalfallet.

Om timvärdet är baserat på ett medeldygnsvärde så bör en säkerhetsfaktor läggas till för att ta höjd för det högre syrebehovet under början av den luftade fasen, detta då en SBR processmässigt fungerar som en pluggflödesprocess med en högre reaktionshastighet under början av fasen tack vare närvaro av hög föroreningskoncentration.

Exempel 8.8

Dimensionering av luftning för SBR

SOR har bestämts till 480 kg O₂/h och behandling ska ske i en process bestående av 4 parallella SBR:er. Cyklerna är 4 timmar varav 2 timmar är luftad tid. Två reaktorer luftas samtidigt.

Systemet behöver kapacitet för att täcka SOR med två av reaktorerna. Vardera reaktorn behöver således dimensioneras för:

$$\text{SOR}_{\text{SBR}} = \frac{\text{SOR}_{\text{Tot}}}{2} = \frac{480}{2} = 240 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

Beräkningen kan också utgå från luftad tid per dygn. Denna blir:

$$\begin{aligned} & \text{Antal reaktorer} \cdot \frac{\text{luftad tid}}{\text{reaktor} \cdot \text{cykel}} \cdot \frac{\text{timmar}}{\text{dygn}} / \frac{\text{timmar}}{\text{cykel}} = \\ & = 4 \cdot 2 \cdot 24/4 = 48 \text{ h/d} \end{aligned}$$

Syrebehovet som varje reaktor behöver klara blir detsamma, nämligen för medelbelastningen 11 520 kg O₂/d SOR:

$$\text{SOR}_{\text{SBR}} = \frac{11\,520}{48} = 240 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

Om kvoten mellan det syrebehovet i början av cykeln och det genomsnittliga syrebehovet antas vara 1,5, behöver varje SBR dimensioneras för:

$$240 \cdot 1,5 = 360 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

8.4.2 Utformning i SBR

Då alla processer sker i samma reaktor (bassäng) måste hänsyn tas till detta vid val och placering av luftningsutrustning. Normalt utrustas SBR-bassänger med en omrörare för att tillgodose omrörningskravet under den oluftade fasen. På grund av de krafter som den kan skapa ska inte membranluftare placeras direkt under en vertikal omrörare.

Sedimenteringsprocessen sker också i samma bassäng som luftningen. Detta innebär att slam lägger sig på luftningssystemet och det är då viktigt att det inte kan läcka in slam i luftarutrustningen om membranluftare används. Av den anledningen bör aldrig keramiska luftare eller luftare som inte kan sluta tätt om membranet användas. Med ett grovblåsig system brukar det däremot inte vara något problem att rören fylls med en viss mängd slam som sedan blåses ut när luftningen startar. Ett alternativ kan vara en mekanisk bottenluftare som kan ombesörja både behovet av omrörning och luftning genom att drivas med eller utan tillsats av luft.

Blåsmaskinerna som väljs till SBR måste kunna hantera ett varierande mottryck. Detta behov uppstår om anläggningen drivs med luftad fyllnadsfas. Under denna period startas luftningen vid en lägre nivå av vattendjup för att sedan pågå under tiden bassängen successivt fylls upp. En

typisk variation i vattendjupet är 1/3, så om normalt vattendjup är 6 meter ska blåsmaskinen även kunna hantera luftflödet vid 4 meters djup. Blåsmaskinerna måste även klara av flera start och stopp per timme. Vissa typer av blåsmaskiner klarar detta medan andra inte gör det. Därför är värt att kontrollera detta krav mot leverantören.

Vid installation av instrument är det viktigt att de är placerade så att de inte blir torrlagda under slutet av tömningsfasen.

8.5 Intermittent luftad process

För en process med kontinuerligt flöde och intermittent luftning sker dimensionering och utformning av luftningssystemet enligt liknande principer som för en SBR. Vid dimensioneringen måste hänsyn tas till den andel av tiden som den aktuella volymen är luftad. Eftersom luftningen endast ska vara i drift en del av tiden måste behovet av syre tillgodoses under denna tid. Det innebär att luftarsystemets kapacitet måste vara större för en intermittent luftad process än för motsvarande kontinuerligt luftade process. Liksom för en SBR är en flexibel drift en av fördelarna med intermittent luftning. Utrymmet för denna flexibilitet måste samtidigt definieras vid dimensioneringen.

En intermittent luftad process kan utformas med eller utan omrörare. Med omrörare blir flexibiliteten stor eftersom de oluftade, anoxiska faserna kan göras långa utan risk för sedimentering av slam. Utan omrörare i processen sker denitrifikation samtidigt som slammet, beroende på flödesmönster, har möjlighet att sedimentera i bassängen. Sedimentering gör att dess effektivitet så småningom avtar. Längden för de oluftade faserna har därför en naturlig begränsning om ingen omrörare finns. Som ett alternativ kan någon kort puls av luft tillämpas i den annars anoxiska fasen i syfte att skapa omrörning.

Förutom att en enklare utformning kan uppnås utan omrörare i bassängen, kan det också innebära fördelar för luftarsystemet. I vissa fall kan luftarna placeras jämnare och tätare när ingen hänsyn behöver tas till placering av omrörare.

Liksom för SBR:er måste de blåsmaskiner som används vid intermittent luftning vara sådana att de klarar av flera start och stopp per timme. Vid utvärdering av energianvändningen för en blåsmaskin kan också hänsyn behöva tas till att centrifugalblåsmaskiner friblåser vid uppstart (se Avsnitt 5.5.2). Detta innebär en liten förlust varje gång maskinen startas upp.

Det typiska fallet för intermittent luftning är när nitrifikation och denitrifikation ska åstadkommas i samma volym, vilket är vad som beskrivits ovan. Det kan även finnas andra syften med att använda intermittent luftning. Ett sådant är att skapa ett bredare reglerområde genom en större möjlighet att reglera ned luftningen vid lågt syrebehov. Detta kan vara aktuellt ifall situationer uppstår, under exempelvis lågt belastade perioder, då behovet av syre är lägre än det minsta flödet som blåsmaskinerna kan leverera. Då kan istället luftningen ske intermittent så att syrehalten hålls i ett intervall mellan ett högsta och ett lägsta värde.

Intermittent luftning kan även användas endast i syfte att skapa omrörning. Detta kan göras med så lite luft att denitrifikationen inte påverkas negativt. I normalfallet är en effektiv omrörare mer energimässigt gynnsam att använda än luftning, men det kan finnas särskilda fall och anledningar till att tillämpa luftning för omrörning (Rosso, 2018).

8.6 Processer med suspenderade bärare (MBBR)

I processer med suspenderade bärare (MBBR; se även Avsnitt 4.4) behöver närvaron av biofilmbärare tas hänsyn till vid utformning av luftningsanläggningen. Det innebär några skillnader jämfört med rena aktivslamprocesser, vilka i huvudsak är:

1. Luftningssystemets utformning ska utformas så att den underlättar omblandning av bärarna och förhindrar att bärare strömmar med vattnet och hamnar vid silarna i alltför stor utsträckning.
2. Omrörning av bärare kräver mer energi än omrörning av aktivt slam vilket gör att omblandningskriteriet oftare blir begränsande.
3. Behovet av underhåll måste anpassas till att det finns bärare i bassängen.
4. Närvaron av bärare påverkar SOTE.

8.6.1 Dimensionering för MBBR

Beräkningen av AOR kan ske på liknande sätt som för aktivslamprocessen enligt ovan. En skillnad är dock att en biofilmsprocess vanligtvis har en mindre väldefinierad halt av mikroorganismer och/eller slamålder. För att kunna inkludera biofilmens endogena syreförbrukning (för BOD-baserad beräkning) eller slamproduktion (för COD-baserad beräkning) krävs en uppskattning baserad på erfarenhet.

Med ett grovblåst system blir syreöverföringseffektiviteten högre i biofilmbärarnas närvaro än vad den annars skulle vara. Ökning i SOTE blir högre ju högre fyllnadsgraden av bärare är, men påverkas även av typ av bärare, vattendjup och omblandningsintensitet (se Avsnitt 7.3.9). I Tabell 8.7 anges några exempel på SOTE med bärare för ett grovblåst system som utan bärare har SOTE på 3 %/m ($9 \text{ g O}_2/(\text{Nm}^3 \cdot \text{m})$). Dessa värden ska ses som indikativa på grund av de många övriga faktorer som kan påverka. Med ett finblåst system är bärarnas effekt på SOTE mindre entydig och kan vara såväl positiv som negativ beroende på typ av bärare med mera. Leverantörer av biofilmsprocesser har omfattande information om SOTE vid olika typer av bärarprocesser för dimensioneringsändamål.

Tabell 8.7 Indikativa värden på SOTE med biofilmbärare (van Haandel & van der Lubbe, 2012).

Typ av bärare	Fyllnadsgrad av bärare (%)	Vattendjup (m)	SOTE ($\text{g O}_2/(\text{Nm}^3 \cdot \text{m})$)
AnoxKaldnes K1, K3	> 25 %	> 4	13
AnoxKaldnes K1, K3	> 25 %	< 4	12
AnoxKaldnes Biochip M	alla	alla	11

Omrörning av bärare kräver mer energi än omrörning av aktivt slam. För att säkerställa fullgod omblandning kräver därför en bärarprocess generellt sett oftare luftning som går utöver processens syrebehov. Det vill säga att omblandningskriteriet oftare blir begränsande. En vanlig tumregel för bärarprocesser är att det krävs ett luftflöde relativt bassängytan motsvarande mellan 6 och 8 m³/(m²·h) för omblandning (McQuarrie & Boltz, 2011). Beroende på typ av bärare, fyllnadsgrad och bassängutformning kan även högre luftflöden krävas i vissa fall. Placeringen av utloppssilarna har stor betydelse för hur mycket omblandning som behövs för att förhindra att bärarna hindrar genomströmning av vatten vid ofullständig omblandning. Dessa luftflöden är minst 6–8 gånger högre än vad som krävs för aktivt slam med försedimentering. Det leder till att det för MBBR finns en starkare incitament att installera omrörare även i luftade zoner, i synnerhet i zoner med relativt lågt syrebehov.

8.6.2 Utformning för MBBR

Ett typiskt grovblåst luftsystem för MBBR har öppningar för luften som är ca 4–5 mm i diameter. Varje luftargrind har en nedledare och en grind kan bestå av två till tre fördelarrör med luftare. Vanligtvis finns det två till fyra nedledare i varje zon. Luftarna kan vara rostfria rör med 25 mm diameter med hålen på undersidan, med ca 50 mm mellanrum (McQuarrie & Boltz, 2011). Luftarna förankras ungefär 25 cm från botten. Tätheten av luftare ökar i flödesriktningen så att det är högst täthet i den sista grinden och lägst i den första. Tätheten kan antingen justeras genom antalet luftare eller antalet hål i varje luftare. Denna utformning är anpassad för ett ökande luftflöde över zonen per kvadratmeter bassängyta. Det leder till ett rörelsemönster där bärarna flödar tillbaka mot vattnets flödesriktning och förhindrar att alltför många bärare samlas intill silarna. Driftsättet skapar samtidigt de valsar som annars ska undvikas eftersom de leder till ökad hastighet på bubblorna och minskad SOTE.

En äldre typ av utformning av luftning för MBBR innebär endast vertikala rör med 7 mm öppningar. Detta leder till mycket låg syreöverföringseffektivitet och bör undvikas men finns fortfarande kvar på vissa anläggningar.

Även om finblåsiga luftare kan användas för MBBR finns det ännu endast på ett mindre antal anläggningar. Vissa av dessa anläggningar har luftarsystem som är lyftbara eller monterade på en svängarm för att underlätta underhåll. Utvecklingen går mot att MBBR-anläggningar allt oftare utrustas med finblåsiga luftare.

Valet av finblåsiga luftare kräver särskild hänsyn med avseende på vilka som passar till MBBR. I synnerhet är det viktigt att undvika slitage av membran från bärarna. Tallriksluftare har generellt visat sig fungera bra enligt MBBR-leverantörer. För rörluftare finns en ökad risk för slitage av membran från bärarna på rörets sidor. Här måste tid mellan underhåll särskilt beaktas.

Membran av textilmaterial har visat sig passa bra till MBBR-tillämpningar tack vare deras högre slitållighet. Bubblorna från dessa är i regel något

större än med gummimembran, vilket resulterar i SOTE-värden någonstans mellan grov- och mer högeffektiva finblåsiga system.

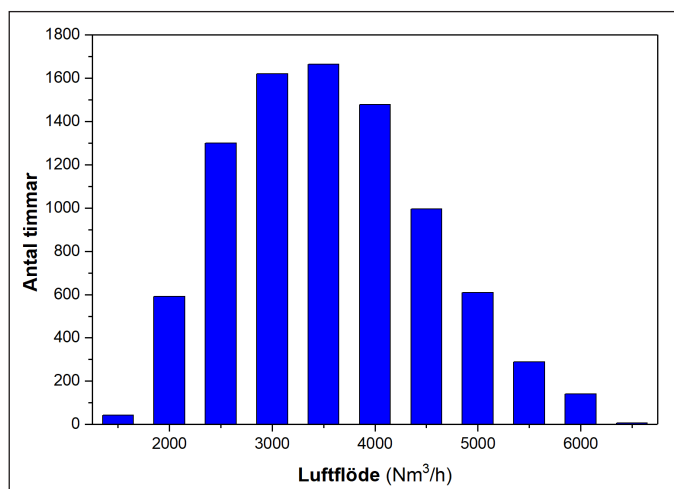
Ett mindre antal MBBR-anläggningar finns också med keramiska luftare. Bubbeltorlek och SOTE är liknande som med textilmembran och en fördel är lång livslängd.

Luftarsystemets hållfasthet behöver vara särskilt anpassat för den tyngd som bärarna med biofilm utgör, för att tanken ska kunna tömmas med bärare kvar.

8.7 Dimensionering och val av blåsmaskiner

För att tillföra komprimerad luft till reningsprocessen används normalt blåsmaskiner av typen vridkols-, skruv- eller turbomaskiner (se Avsnitt 5.5). Dimensionering av blåsmaskin görs av blåsmaskinleverantören baserad på uppgifter om luftflödesbehov och -variation, samt systemtryck. Saknas de givare som behövs för att ta fram ett underlag finns det konsulter och leverantörer som tillhandahåller sådana tjänster med hjälp av mobil mätutrustning. Förhållandena för den insugna luften med avseende på temperatur, lufttryck och luftfuktighet måste också specificeras. Vid kravställning av blåsmaskiner är det minst lika viktigt att ställa krav på det minsta luftflödet som önskas likaväl som att det maximala luftflödet krävs. Hur stort reglerområde som behövs påverkar både lämpliga typer och antal maskiner.

Ett lämpligt underlag för dimensionering av blåsmaskiner är fördelning av drifttid vid olika luftflöden. Denna fördelning bör ha minst fem driftfall men gärna fler (Figur 8.15). Vid bestyckningen bör det också säkerställas att inga reglerhål uppstår vilket innebär områden mellan driftfallen som inte kan uppnås.



Figur 8.15 Fördelning av drifttid för olika luftbehov under ett år.

Om en hel luftningsanläggning ska dimensioneras bestående av både blåsmaskiner och luftare kan SOR fungera som underlag för hela systemet. I så fall används inte luftflöden. Då behöver istället underlaget med SOR ha en

högre upplösning än vad som är typiskt (min, max och medel) för att göra en ordentlig utvärdering av energianvändning möjlig.

Även när det gäller blåsmaskiner är det lämpligt att utgå från att det ska finnas tillräcklig kapacitet för att klara tillfredsställande rening under en tid även om en av maskinerna står avställd. Det kan innebära att någonstans mellan den genomsnittliga och den maximala belastningen ska klaras av med en maskin ur drift. I detta läge är det kanske rimligt att kompromissa med minflödet under en begränsad tid. Om anläggningen bestyckats med blåsmaskiner med olika kapacitet behövs en redundans som tar hänsyn till en situation där den största maskinen, som normalt tar baslasten, tas ur drift.

Ett alternativt sätt att tillgodose redundans är att anläggningen förses med en extern anslutning med avstängningsventil så att det går att hyra och ansluta en maskin när ett tillfälligt behov uppstår. Vissa leverantörer kan tillhandahålla en hyresmaskin med kort varsel. Fördelar med denna lösning uppstår om investering och underhåll för en extra maskin kan undvikas.

8.7.1 Dimensionera för dagens eller framtidens belastning?

En investering i blåsmaskiner är långsiktig och därför kan det kännas naturligt att inte bara beakta dagens belastning utan även den framtida. Prognoser för förändringar i befolkning och avloppsledningsnät kan användas för uppskattning av framtida belastning men innebär också stora osäkerheter.

Vid dimensionering för en framtida belastning finns stor risk att luftningssystemet blir överdimensionerat i förhållande till dagens belastning. Åtminstone under en tid, innan belastningen har ökat i linje med prognoserna. För blåsmaskinerna kan det innebära en ineffektiv drift ur energisynpunkt under många år, eftersom maskinernas förmåga till nedreglering alltid är mer eller mindre begränsad.

I den här typen av situationer är det särskilt viktigt tänka på att blåsmaskinerna ska kunna drivas energieffektivt vid dagens belastningssituation samtidigt som det finns kapacitet som motsvarar aktuellt tillstånd från myndigheterna. En stegvis utökning av kapaciteten är att föredra när detta är möjligt. Istället för att installera redundans för en fullt belastad anläggning kan exempelvis plats lämnas för ytterligare en maskin med rörgalleri och kraftmatningar med högre kapacitet än vid driftstarten. Ett annat alternativ är att förbereda för att kunna byta ut en eller flera av maskinerna till större om och när belastningen ökar. Här är det viktigt att rördimensioner är tillräckligt stora för att klara framtida behov.

8.7.2 Val av blåsmaskinteknik

Allmänt sett ökar energieffektiviteten för blåsmaskiner från vridkolvs- till skruvmaskiner och från skruv- till turbomaskiner. Hand i hand med högre energieffektivitet går också en högre investeringskostnad.

Fördelen med vridkolvsblåsmaskiner är en låg investering, men samtidigt är effektiviteten relativt låg. Skruvblåsmaskiner kan ha signifikant högre

effektivitet än vridkolvsmaskiner, men storleken på denna skillnad beror på det aktuella mottrycket. Dock innebär en skruvblåsmaskin vanligen en större investering. Turboblåsmaskiner kan ha hög maximal effektivitet, men medför en större investering.

Vilken teknik som är mest lämplig för ett specifikt fall utifrån livscykelkostnad avgörs inte minst av storleken på luftbehovet och dess dynamik (reglerområdet). Även behov av och tillgänglighet för underhåll kan spela en stor roll (Avsnitt 10.4.4). Övriga faktorer som är viktiga i sammanhanget och kan påverka valet av blåsmaskin är det maximala mottrycket och variationer i omgivande temperatur och luftfuktighet. Hur några av dessa faktorer kan påverka vilken teknik som blir mest gynnsam utifrån livscykelkostnad illustreras nedan i Avsnitt 14.1.

Temperaturen på den ingående luften påverkar samtliga typer av blåsmaskiner såtillvida att varmare luft håller lägre halt av syre vilket måste kompenseras med ett högre volymetriskt luftflöde. Displacement- och centrifugalblåsmaskiner påverkas dock på något olika sätt av temperaturen vilket gör att, relativt displacementmaskiner, är centrifugalmaskiner gynnade av högre temperaturer. Vice versa gynnas displacementmaskiner något mer än centrifugalmaskiner av lägre temperaturer.

Syrenehållet i luften minskar också med dess fukthalt och därför måste hög luftfuktighet i insugluften också kompenseras med ett högre volymetriskt luftflöde.

I tillämpningar med variabelt mottryck som i vissa fall med SBR, måste detta särskilt beaktas. Beroende på driftsätt luftas en SBR ibland under fyllning vilket innebär en variabel volym och därmed mottryck vid luftningen. Displacementblåsmaskiner är generellt mer toleranta för ett variabelt mottryck än centrifugalblåsmaskiner och kan därför vara lämpliga för en SBR som drivs på detta sätt, särskilt ifall nivåskillnaden är stor. Anledningen står att finna i maskinernas olika grundläggande funktion (se Kapitel 5).

Vid jämförelse av effektiviteten för blåsmaskiner är det viktigt att vara medveten om att detta kan göras på olika sätt vilket kan påverka jämförelsen. Det vanligaste är att jämföra luft levererad ut från blåsmaskinen mot total effekt för maskinens alla delar (se Avsnitt 11.1).

8.7.3 Kombination av blåsmaskiner

Traditionellt sett har det i Sverige varit vanligt att använda flera maskiner i samma storlek och av samma typ. Bakgrunden till detta är okänd, men det är tänkbart att lagerhållning av reservdelar blir lättare med lika stora maskiner samt att styrningen blir enklare med maskiner som har samma reglerområde. Sett ur ett energiperspektiv och reglerperspektiv kan det finnas fördelar med att bestycka luftningssystemet med olika stora blåsmaskiner och kanske olika tekniker.

I nuläget är det också vanligt att samtliga maskiner är utrustade med frekvensomriktare med undantag för växlade turboblåsmaskiner (som regleras med ledskenor och ställbara blad i diffusorn). Med olika storlek på

maskinerna kan det i vissa situationer gå att uppnå ett lika bra regleringsintervall genom att till exempel kombinera en frekvensstyrd maskin med flera som drivs med fast varvtal. Maskinerna med fasta varvtal drivs då alltid vid optimal driftpunkt om ingen mekanisk reglering används. Investering i frekvensomriktare undviks, liksom de förluster i elanvändning som de medför. Förlusterna i frekvensomriktare är vanligtvis omkring 2 % och därmed inte försumbara.

Det kan också finnas situationer där det är fördelaktigt för livscykelkostnaden att kombinera olika typer av blåsmaskiner i ett luftningssystem. Generellt kan vridkolvmaskiner och skruvmaskiner kombineras med varandra liksom skruvmaskiner och turbomaskiner. Möjlighet och rekommendationer för att kombinera vridkolvmaskiner med turbomaskiner skiljer sig beroende på situation och tillverkare. Anledningen är att de pulsationer som vridkolvarna ger upphov till under vissa omständigheter kan vara problematiska för turbomaskiner. En driftstrategi vid en kombination av olika typer av maskiner bygger normalt på att utnyttja högsta effektivitet som kan erhållas under så stor del av tiden som möjligt.

8.7.4 Utformning av blåsmaskinsrum

En viktig aspekt som ofta förbises vid blåsmaskininstallation är hur själva rummet som blåsmaskinen ska placeras i är utformat och mer specifikt hur lufttillförsel till och från blåsmaskinen ska utformas. Dessutom ska blåsmaskinsrummet gärna fungera som extra ljudisolering.

Det finns två alternativa utformningar när det gäller vilken luft som används för att mata blåsmaskinen. Den ena är att låta blåsmaskinen ta luften direkt från rummet den är placerad i. Den andra innebär en separat lufttillförsel (sugledning) till blåsmaskinen som tar luft *utanför* blåsmaskinsrummet.

Valet av tilluft påverkar dimensioneringen av blåsmaskinsrummets ventilationssystem. Ventilationsbehovet i blåsmaskinsrummet styrs delvis av behovet av att upprätthålla en lämplig temperatur för maskinerna, och i synnerhet undvika att det blir alltför varmt. En viss andel av den effekt som tillförs maskinerna omvandlas till spillvärme som avges till rummet. Hur stor denna andel är beror på blåsmaskintyp men den är någonstans mellan 4 och 15 % av tillförd effekt. Placering av till- och frånluft ska vara sådan att god ventilation uppstår genom hela rummet utan risk för kortslutning. Tilluft placeras gärna vid golvnivå och frånluft närmare taket.

Med insug från rummet:

- Ventilationen i rummet sker med hjälp av blåsmaskinen.
- Forceringsventilation krävs om blåsmaskiner genererar ett flöde som understiger ventilationsbehovet.
- Kräver en viss storlek på rummet i förhållande till luftflödet för att inte ventilationen ska bli alltför hög och orsaka dålig arbetsmiljö på grund av för stora luftrörelser.
- Temperaturen på blåsmaskinens tilluft är lika med utetemperaturen plus ökningen som rummet ger upphov till. En ökning på 20 °C innebär

att luften innehåller 7 % mindre syre och kräver en motsvarande högre insats från blåsmaskiner.

- Kan vid varm väderlek innebära en risk för alltför höga temperaturer på blåsmaskinen.
- Filtrering av rummets tilluft kan ske utöver blåsmaskinens eget luftfilter.

Med separat insug utifrån:

- Separat ventilation av blåsmaskinsrummet krävs.
- Temperaturen på blåsmaskinens tilluft är lika med ute-temperaturen vilket kan innebära högre energieffektivitet tack vare lägre temperatur (högre syreinnehåll).
- Risk för högre tryckfall och högre ljudvolym.

Om tilluft tas via en längre tilluftskanal så bör denna isoleras för att undvika problem med ljud, men även kondensbildning när den varmare inomhusluften kondenserar mot det kalla röret.

Blåsmaskinsrummet bör vara lämpligt utformat med ljudisolerande material på väggar och tak. Vid dimensionering av rörsystem från blåsmaskinen bör de hastigheter som angetts ovan eftersträvas (Avsnitt 8.3.4) i stamledning för att undvika höga ljud och vibrationer. Många maskiner har inbyggd ljuddämpare, men ibland kan också en extern ljuddämpare installeras på trycksidan.

8.7.5 Värmeåtervinning

När luften komprimeras i luftningssystemet med hjälp av blåsmaskinen ökar samtidigt dess temperatur med ungefär 10 °C per mVp i tryckökning. Temperaturen ut från blåsmaskinerna är därför vanligen mellan 50 °C och 140 °C beroende på ingående lufttemperatur och mottryck i systemet. En del av denna värme kan återvinnas och på så sätt kommer en del av den elenergi som blåsmaskinerna använder till nytta som värme.

Återvinning av värme från luften kan ske med värmeväxlare för luft/luft eller luft/vatten. Värmeväxlaren tillför ett visst mottryck till systemet (typiskt 20–40 mbar) men den extra energianvändning som det innebär är liten jämfört med värmeenergin som kan utvinnas. Högre verkningsgrad och lägre mottryck kan uppnås med luft/luftvärmeväxlare. Den uppvärmda luften kan exempelvis användas för att värma lokaler. Uppvärmgt vatten kan användas för uppvärmning av lokaler eller andra delar av anläggningen såsom rökammare. Ett annat syfte med kylning av luften kan vara att skydda PVC-rör, luftare och membran från för höga temperaturer.

Värmeväxlare finns som extern utrustning men kan också finnas integrerade i vissa maskiner. Eftersom rördragning krävs är det fördelaktigt att projektera värmeåtervinning sker i samband med installation av blåsmaskiner.

Design och utformning av ett värmeåtervinningssystem sker baserat på tillgång på värme (luftflöde och temperatur) likväl som avsättning och behov av värmekällan såsom till exempel vatten med en viss temperatur. Med luft/vatten värmeväxling kan generellt maximalt en vattentemperatur på 5 °C under den varma luftens temperatur åstadkommas. Högre luftflöden

och temperaturer, såsom uppstår vid tryck >600 mbar (6 mVp), leder till större incitament för installation av värmeåtervinning.

På Ryaverket i Göteborg (Gryaab) återvinns värme på trycksidan av tre växlade turboblåsmaskiner. Luften kyls från 90–120 °C till ungefär 60 °C i luft/vattenvärmeväxlare. Samtidigt värms ett delflöde av cirkulerande varmvatten. Denna värme minskar behovet av fjärrvärmens som används för att värma rötkammarna. Värmeåtervinningen från luftningssystemet genererar 1,2–1,5 GWh värme per år.

8.8 Sammanfattning

Ett luftarsystem bör dimensioneras baserat på varaktighet med en bedömning av vilken maximal kapacitet som behövs för att uppnå anläggningens mål och vilken minsta kapacitet som är rimligt. Energi-effektivitet kan stå i motsats till storleken på reglerområdet varför ett alltför brett reglerområde bör undvikas.

Belastning i form av syrebehov beräknas under processförhållanden och omvandlas till standardförhållanden. Beställaren bör fastställa α -värdet för att anbudet ska bli jämförbara. Leverantörer utformar normalt anbud baserat på syrebehovet vid standardförhållanden. Värden på SOTE och tryckfall från anbudet kan användas för utvärdering och prestandagaranti för luftningssystemen.

Dimensionering och val av blåsmaskiner sker också med hänsyn till reglerområdet. Här är fördelningen av drifttid vid olika luftflöden en viktig förutsättning. Denna fördelning bör ha minst fem driftfall men gärna fler. Redundans bör beaktas så att tillräcklig rening kan klaras med en maskin ur drift. Det behöver inte nödvändigtvis innebära att den dimensionerande maxbelastningen behöver klaras med en maskin ur drift. De allra flesta blåsmaskiner förlorar i effektivitet när de regleras ned i kapacitet. Det är därför mycket viktigt att inte överdimensionera blåsmaskiner utan dimensionera så att maskinerna kan drivas effektivt vid den belastning som är aktuell i dagsläget med utrymme att utvidga kapaciteten om behov uppstår i framtiden.

9 Instrumentering, styrning och reglering

För att syrebehovet för mikroorganismernas respiration ska garanteras måste tillräckligt med luft tillsättas bassängen. Eftersom belastningen till reningsverket och därmed syrebehovet varierar över tiden är det omöjligt att hitta ett konstant luftflöde som passar alla belastningar. En möjlig strategi vore att ha ett så högt luftflöde att syrebehovet är uppfyllt även under tider då reningsverket är högbelastat. Detta görs ofta på de allra minsta reningsverken. Det leder dock till att onödigt mycket luft används under normaldrift vilket inte är energieffektivt. Det är här reglertekniken kommer in. Nedan visas hur reglerteknik kan användas för att automatiskt styra luftflödet så att det anpassar sig efter det behov som finns. Detta kapitel ger alltså en viktig komplettering till tidigare kapitel som beskrivit val, utformning och drift av luftningssystemet. För att reningen av avloppsvatten ska bli energieffektiv måste hela kedjan vara optimerad: både utformningen av systemet och styrningen av detsamma.

Innan vi går in mera på styrningen av luftningen ges en kort översikt av några reglertekniska begrepp. Sedan redogörs för styrning av kontinuerligt luftade aktivslamprocesser. Dessa delar är inspirerade av Carlsson & Hallin (2010), Åmand (2015, 2013) och Olsson et al. (2018a, 2018b). Därefter presenteras styrning av luftning i processer som inte tidigare blivit grundligt belysta på svenska, däribland SBR:er, intermittent luftade processer och MBBR:er samt styrning av blåsmaskiner. Avslutningsvis presenteras de instrument som vanligtvis används i sammanhanget.

Nedan kommer att antal styrstrategier beskrivas. Valet av strategi beror på flera faktorer och den mest lämpliga strategin varierar därför mellan anläggningar. Omständigheter som påverkar valet är:

- Storlek på reningsverket eller dess linjer, vilket avgör incitament för att minska energianvändning med investering i instrument och styrning.
- Utsläppsvillkor och periodicitet för dessa (månads-, kvartals- eller årsmedelvärden), vilket avgör toleransen för kortvariga störningar.
- Övriga mål och prioriteringar med den biologiska behandlingen.
- Organisatoriska faktorer såsom bemanning och kompetens.

Vid styrning baserad på givardata blir anläggningens drift beroende av kvaliteten på signalerna. Det är därför viktigt med kontinuerlig kvalitetskontroll och underhåll av givare.

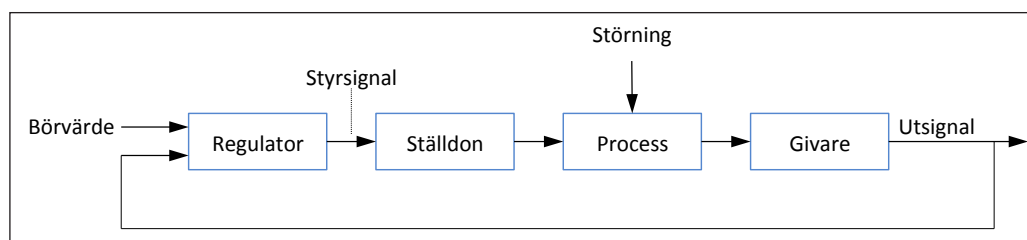
9.1 Reglerteknik

Reglerteknik handlar om att automatiskt styra en process. Tekniken kan användas inom många olika tillämpningsområden varav avloppsvattenrening är ett. För att kunna reglera en process måste processen kunna påverkas. Det som processen kan påverkas med kallas styrsignal. I de allra

flesta fallen måste även svaret (responsen) från den variabel (storhet) som ska regleras kunna mätas. Detta kallas för processens utsignal, mätsignal, processvärde eller ärvärde.

En anledning till att automatiskt reglera en process är att de flesta processer påverkas av störningar som påverkar utsignalen på ett oönskat sätt. Den grundläggande uppgiften för styrningen är att aktivt kompensera för dessa störningar. Ett huvudproblem är att alla processer är dynamiska. Detta betyder att det tar en viss tid innan en förändring av styrsignalen syns fullt ut i utsignalen. Detta märks till exempel tydligt då gaspedalen i en bil trycks ned: det tar då en viss tid innan bilen har uppnått en ny hastighet.

Många regler tekniska problemställningar kan beskrivas med ett block-schema enligt Figur 9.1. I figuren är ställdonet (andra vanliga namn är manöverdon och aktuator) den komponent som via regulatorn påverkar den aktuella processen. Vanliga ställdon i ett avloppsreningsverk är ventiler och pumpar. Utsignalen från processen mäts med en givare och återkopplas till regulatorn. Både givare och ställdon är mycket viktiga komponenter i ett regelsystem. Regulatorn får också reda på det önskade värdet på utsignalen, vilket kallas börvärde. Störningen som kommer in till processen är en oönskad påverkan som gör att utsignalen förändras om ingen styråtgärd sätts in. Förekomsten av störningar i en process är den främsta orsaken till att en regulator behövs. Fanns det inga störningar kunde ett konstant värde på styrsignalen ställas in som gjorde att utsignalen blev lika med börvärdet. Typiska störningar i ett reningsverk är förändringar av inkommande flöde, sammansättning och temperatur. Sammanfattningsvis är regulatorns uppgift att *beräkna en styrsignal till ställdonet så att processens utsignal (den storhet som ska regleras) hålls nära börvärdet (det önskade värdet på utsignalen) trots att processen påverkas av störningar.*



Figur 9.1 Blockschema för ett typiskt regelsystem, utsignalen återkopplas till regulatorn som beräknar en styrsignal till ställdonet så att processens utsignal (den storhet som ska regleras) hålls nära ett önskat värde, börvärdet.

I industriella styrsystem används ofta de begrepp som finns i Tabell 9.1. Begreppen “insignal” och “utsignal” kan skapa viss förvirring eftersom en utsignal från en regulator också är en insignal till processen (ställdonet).

Tabell 9.1 Några vanliga förkortningar i styrsystem på engelska och svenska (Åmand, 2013).

Namn	Exempel på svenska förkortningar i styrsystem	Exempel på engelska förkortningar i styrsystem
Styrsignal (insignal till processen)	OUT Utsignal (från regulatorn)	OP (output)
Utsignal (ärvärde, mätvärde, processvärde)	ÄR (ärvärde) PV (processvärde)	PV (process variable) MV (measured variable)
Börvärde	BV (börvärde)	SP (set-point)

Den vanligaste typen av regulator i processindustrin, inklusive på avloppsreningsverk, är den så kallade PI-regulatorn där P står för proportionell och I för integrerande. Styrsignalen för en PI-regulator beräknas enligt:

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (9.1)$$

där K är regulatorns förstärkning, T_i är integrationstiden och $e(t)$ är ”felet”, det vill säga skillnaden mellan börvärdet och ärvärdet. För att regleringen ska fungera som tänkt måste regulatorns två parametrar (K och T_i) trimmas mot den process som ska regleras. Det finns inga default-värden! Vanligen måste det experimentellt bestämmas hur mycket processens utsignal ändras då insignalen ändras till ett nytt värde och hur lång tid detta tar. Ett exempel på en trimningsmetod är lambda-metoden som finns beskriven i Carlsson & Hallin (2010) och Olsson et al. (2018a).

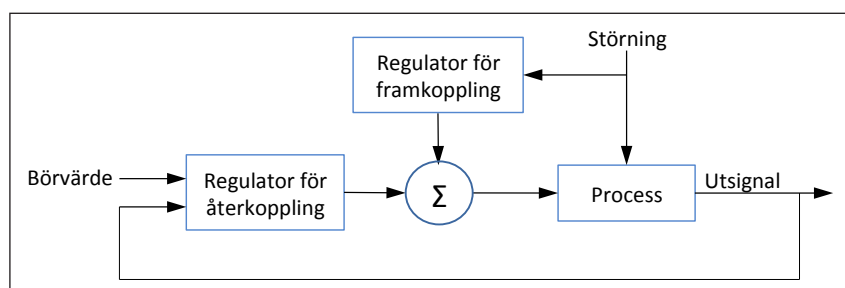
Det är ofta (inte minst vid syrerreglering) viktigt att sätta gränser för det högsta och lägsta tillåtna värdet på styrsignalen, detta kallas ofta för min- och maxgränser. Det är oerhört viktigt att detta görs på ett korrekt sätt, gränserna ska sättas inuti regulatorn och inte efter regulatorn. Flera problem med regleringen vid svenska reningsverk har kunnat härledas till felaktig implementering av min- och maxgränser.

Varken regulatorns parametrar eller min- och maxvärden behöver vara konstanta i alla driftsituationer. För vissa processer kan det vara svårt att hitta regulatorinställningar som varken är för långsamma eller leder till instabilitet. Då kan det löna sig att använda parameterstyrning, vilket innebär olika regulatorparametrar för olika arbetsnivåer. Arbetsområdet, som exempelvis kan vara öppningsgraden för en ventil, delas då in i några intervall där varje intervall har en egen uppsättning parametrar. Den variabel som används för att byta regulatorparametrar kan vara styrsignalen, börvärdet, utsignalen eller någon extern signal. Parameterstyrning kan användas för att optimera regleringen mot en högre energieffektivitet (Åmand & Carlsson, 2014).

Många reglersystem är uppbyggda enligt blockschemat i Figur 9.1. Strategin bygger på återkoppling från utsignalen vilket i de flesta fall är en väldigt sund metodik ”låt regulatorn få vetskap om det den ska styra, det vill säga värdet på utsignalen”. En begränsning med återkoppling är att den inte agerar på en störning förrän den syns i utsignalen. Ibland kan dock störningen mätas och då kan en teknik som heter framkoppling utnyttjas. Idén med framkoppling är att utnyttja mätningar av störningen för att

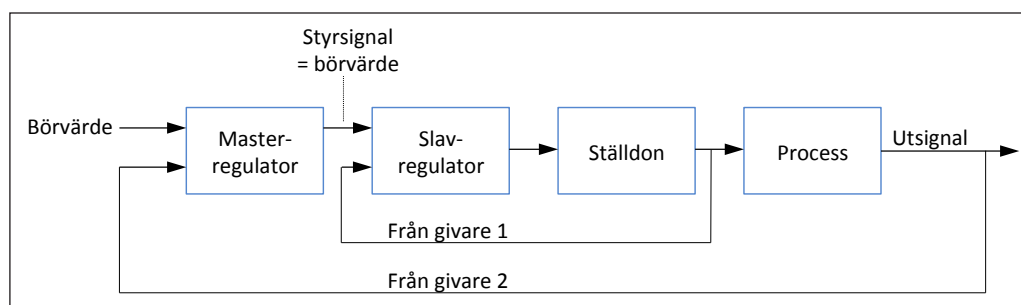
med en modell beräkna styrsignalen och direkt kompensera för denna. Med hjälp av framkoppling kan inverkan av störningar minskas väsentligt. I vissa fall kan störningens inverkan på utsignalen helt elimineras, vilket är omöjligt med bara återkoppling. Ett exempel på när framkoppling ibland används vid luftning är i samband med överordnad ammoniumstyrning (se nedan Avsnitt 9.3.3).

I de allra flesta fall bör framkoppling kompletteras med en återkoppling. Dels finns ingen garanti för att utsignalen hamnar nära börvärdet om inte återkoppling används och dels har de flesta processer ett flertal störningar av vilka inte alla är mätbara. Vanligen är också den modell som ligger till grund för framkopplingen inte perfekt. Inverkan av störningarna kan då bara regleras bort med en återkopplingsregulator. Det allmänna blockschemat för en kombinerad återkoppling-framkopplingsstrategi visas i Figur 9.2.



Figur 9.2 Blockschemat för kombinerad framkoppling och återkoppling.

Ibland används två regulatorer (oftast av PI-typ) i serie så att utsignalen från den ena regulatorn (masterregulatorn, överordnade regulatorn) används som börvärde för den andra regulatorn (slavregulatorn, underordnade regulatorn). Detta kallas kaskadreglering. För att kaskadreglering ska kunna användas krävs att processen kan delas upp i två seriekopplade delprocesser där den mellanliggande signalen mäts med en givare. Principen visas i Figur 9.3. Vid syrereglering finns det flera fördelar med att använda kaskadreglering jämfört med en "vanlig" reglering enligt Figur 9.1, se vidare nedan (Avsnitt 9.2).



Figur 9.3 Blockschemat för kaskadreglering.

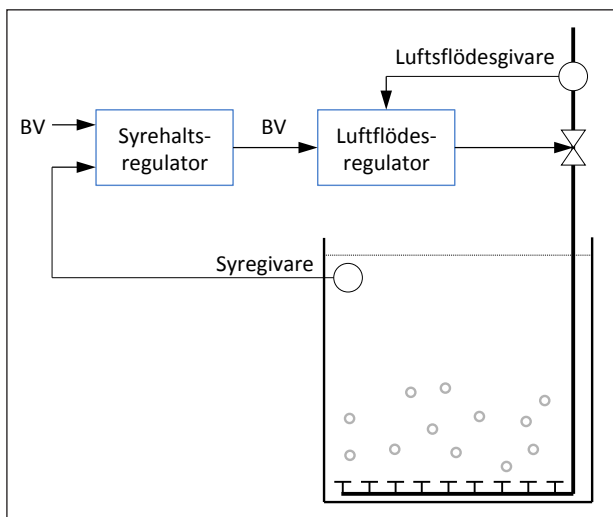
9.2 Syrereglering

Syrereglering innebär att luftflödet till processen regleras för att hålla syrehalten i bassängen kring ett visst börvärde (önskat värde). Det är

vanligt att bassängen är uppdelad i ett antal zoner där syrehalten regleras i varje zon. Separat reglering till varje zon är viktigt ur energisynpunkt eftersom syrebehovet varierar längs bassängen. På Himmerfjärdsverket (SYVAB) uppskattades att luftningsenergin kunde minska med 15 % om varje bassäng delades upp i två zoner med separat reglering istället för en reglermöjlighet per bassäng (Andersson & Holmberg, 2006). Belastningen och därmed luftbehovet kan också skilja sig mellan parallella linjer och därför är det önskvärt med separata givare och reglerventiler till varje linje (ATV, 2000a). Med flera zoner i följd förekommer det ibland att någon zon regleras utan syregivare, till exempel baserat på medelvärdet av värden från intilliggande zoner.

Ett sätt att reglera syrehalten är att använda återkoppling enligt Figur 9.1 så att en syrehaltsregulator påverkar ventilläget på luftledningen för att uppnå önskat värde på syrehalten (börvärdet). I de flesta fall behöver min- och maxgränser för luftflödet hanteras. Med denna reglering kan min- och maxgränser tillämpas för ventillägen.

Ofta används en kaskadreglering enligt Figur 9.4 för syreregleringen. En överordnad ("master") regulator använder mätningar av syrehalten och syrebörvärdet. Utsignalen från den överordnade regulatorn kopplas till en underordnad ("slav") regulator som styr öppningsgraden på luftflödesventilen. Styrsignalen från den överordnade regulatorn blir alltså börvärde för luftflödet. Uppgiften för den underordnade regulatorn är att hålla luftflödet nära luftflödesbörvärdet. De två regulatorerna i Figur 9.4 ska vara sådana att masterregulatorn får information om när slavregulatorn når sina gränser (min- och maxlägen). Kommersiella styrsystem har lösningar för hur detta ska göras (Olsson et al., 2018b).



Figur 9.4 Reglering av syrehalten i en luftningsbassäng med kaskadreglering. I figuren betecknar BV börvärdet till regulatorn.

Reglering av syrehalten med kaskadreglering har flera fördelar: De olinjäriteter som finns i de vanligast använda reglerventilerna (se Avsnitt 5.4 och Figur 5.6) påverkar regleringen mindre. Störningar i luftflödet på grund

av tryckvariationer kan regleras ut snabbare. Det är dessutom lätt att lägga in begränsningar för hur stort och litet luftflödet får vara. Detta ska göras i syrehaltsregulatorn.

Även om kaskadreglering är en vanlig reglerstrategi har den sitt pris eftersom strategin kräver två regulatorer och två givare. Om en kaskadreglering används är det viktigt att det i gränssnittet för styrsystemet tydligt framgår hur kaskadregleringen fungerar. Även om kaskadreglering ofta är den "bästa" lösningen för syreregleringen kan ibland en enklare lösning väljas. En av flera möjliga förenklingar är att skippa den underordnade regulatorn och låta syrehaltsregulatorn direkt påverka ventilläget enligt ovan. Ett annat alternativ är att direkt styra trycket i blåsmaskinen mot en önskad syrehalt (se Avsnitt 9.10.2).

Det finns även mer avancerade styrstrategier för luftning än de som presenterats ovan, som exempelvis modellprediktiv reglering. Denna typ av styrstrategier kan vara motiverade om gränsvärden för utgående halter är så strikta att de inte får överskridas vid någon tidpunkt (Åmand, 2013).

Att tänka på vid syrereglering

- Placering och antal syregivare
- Reglerbara ventiler till zoner
- Mätning av luftflöde och kaskadreglering
- Underhåll av systemet

Fördelar med syrereglering

- Luftningen anpassas till belastningen
- Säkerställer att luftningen är tillräcklig för att hålla ett givet börvärde
- Undviker nackdelar som kommer med för hög syrehalt

Nackdelar med syrereglering

- Inte säkert att vald syrehalt ger önskat reningsresultat, manuell justering av syrebörvärdet behövs
- Flera syregivare och luftflödesmätare ger bättre möjlighet att styra processen men kommer med en kostnad både för inköp och underhåll

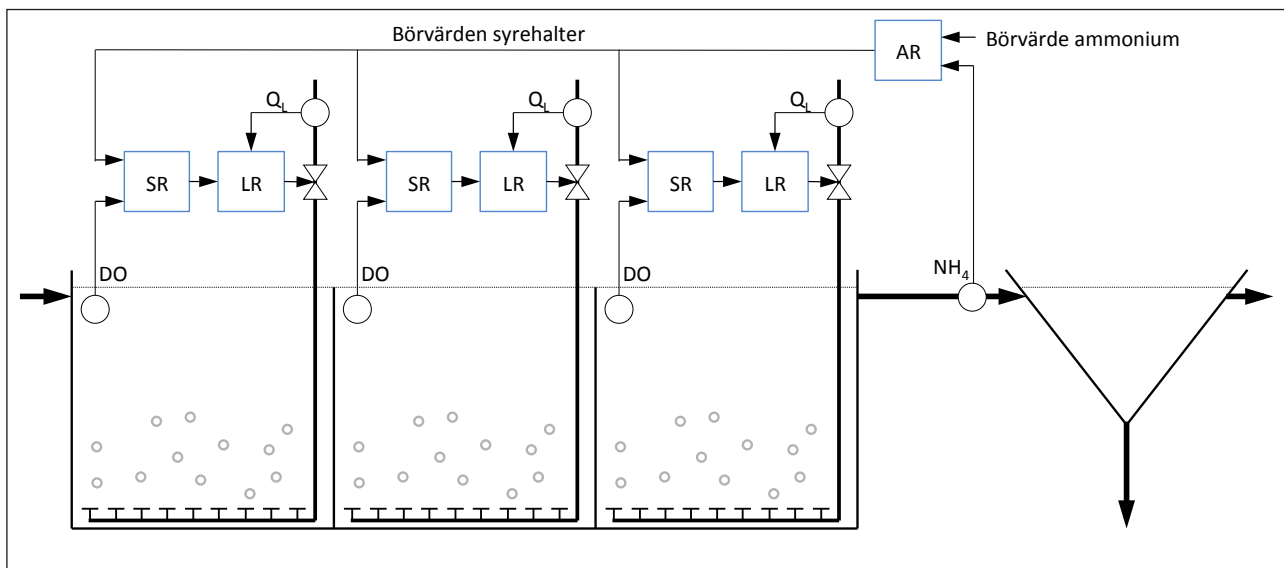
9.3 Ammoniumstyrning

På avloppsreningsverk med kväverening är nitrifikation vanligen en begränsande faktor med avseende på luftningen. Det kan därför vara naturligt att använda styrning som är baserad på halten av ammonium. Detta utnyttjas ofta vid styrning av fasernas längd vid intermittent luftning, vilket behandlas separat nedan (Avsnitt 9.5).

9.3.1 Överordnad ammoniumåterkoppling

Genom en väl fungerande syrereglering kan stabila halter av löst syre som ligger nära de valda börvärdena uppnås. Syreregleringen kan också kombineras med en överordnad styrning som reglerar börvärden för syrehalten baserat på koncentrationen av ammonium. Med en ammoniumhaltsmätare

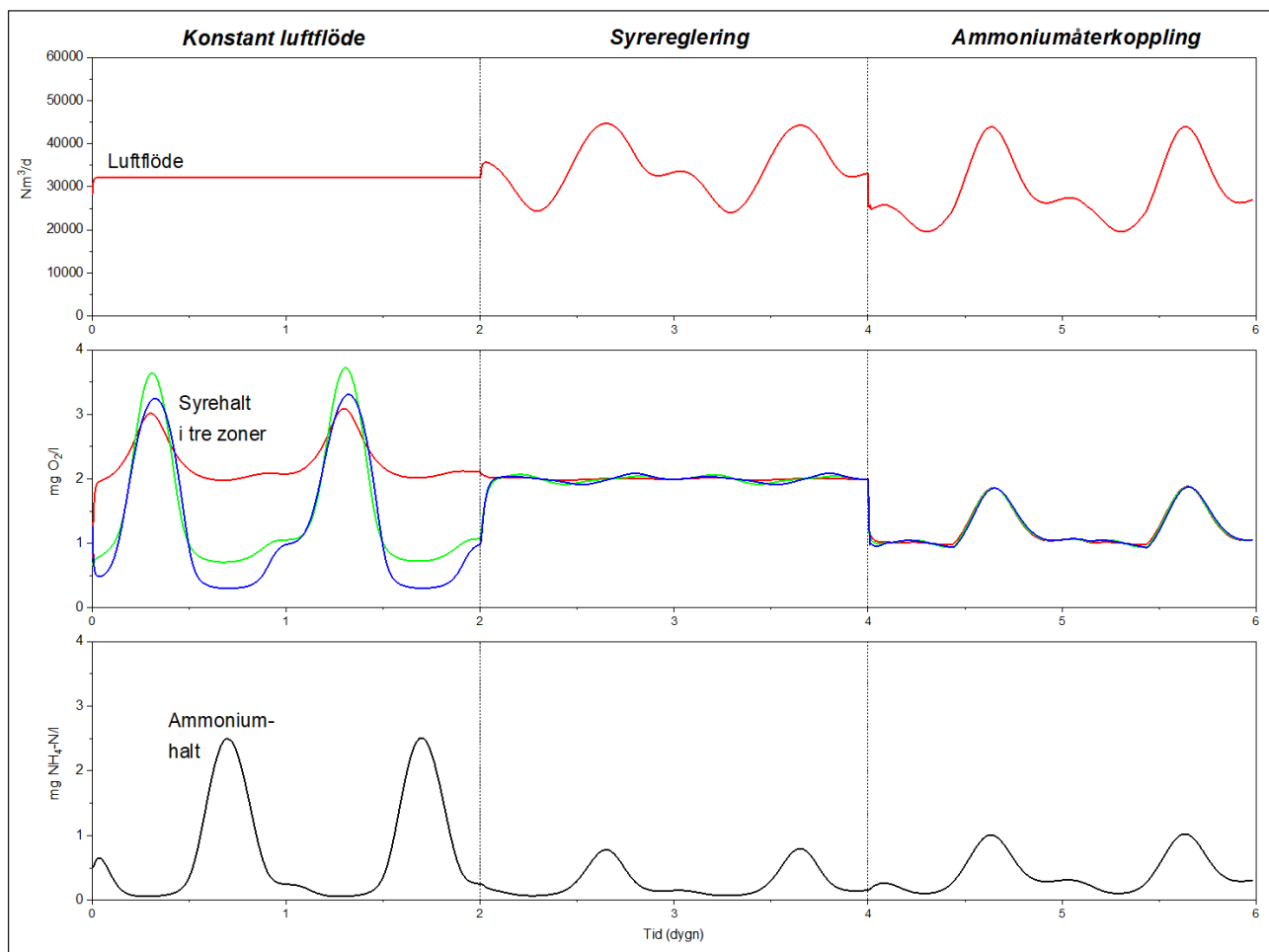
och en överordnad regulator kan börvärdet för syrehalten regleras så att luftningen bättre anpassas till det aktuella behovet i processen. Med kaskadreglering av syrehalten enligt ovan innebär detta en kaskad med tre regulatorer för luftflöde, syrehalt och ammonium (Figur 9.5). Vid ammoniumåterkoppling placeras givaren i den sista luftade zonen eller efter sedimenteringen. Placeringen har betydelse för styrningens snabbhet eftersom uppehållstiden i sedimenteringen innebär en fördröjning för återkopplingen.



Figur 9.5 Vid syrereglering med ammoniumåterkoppling utnyttjas en kaskadreglering med tre regulatorer i serie. AR - Ammoniumregulator, SR - Syrehaltsregulator, LR - Luftflödesregulator, DO - syrehalt ("dissolved oxygen"), QL - Luftflöde.

Ett börvärde för ammoniumhalten anges för den överordnade styrningen (AR i Figur 9.5) liksom högsta och lägsta tillåtna syrehalter i zonerna. När exempelvis belastningen är hög eller temperaturen låg, möter styrningen detta genom att öka syrehalten så att den önskade ammoniumhalten bibehålls. När belastningen är låg regleras syrehalten ned. På så sätt kan denna styrning spara energi. Den högsta tillåtna halten av löst syre bör vara den utöver vilken en ytterligare ökning inte har någon märkbar effekt på kapaciteten för nitrifikation. Här når regleringen sin begränsning uppåt och i detta läge är kapaciteten begränsad av mängden nitrifierande mikroorganismer i anläggningen istället för halten av löst syre. En topp i ingående kvävebelastning kan dämpas men inte alltid elimineras helt med ökad syrehalt.

Nedan visas ett exempel på hur resultaten kan se ut med olika styrstrategier enligt modellsimuleringar (Figur 9.6). I den första perioden (dag 0–1) tillämpas konstant luftflöde vilket leder till stora variationer i löst syrehalt och ammonium. Med syrereglering mot 2 mg/l (dag 2–3) är det istället luftflödet som varierar och variationerna i ammonium blir mindre. Med ammoniumåterkoppling (dag 4–5) tillåts även syrenivån variera efter behov. Energibesparingen för ammoniumåterkoppling uppkommer då syrehalten kan sänkas under perioder med fullständig eller nästan fullständig nitrifikation.



Figur 9.6 Exempel på resultat vid olika styrstrategier: konstant luftflöde, konstant syrenivå och ammoniumstyrning.

Det är viktigt att styrningens tidsskala är väl anpassad till processens dynamik och att de olika reglerkretsarna har hastigheter som är rätt ordnade. Reglering av luftflödet är det som ska ske snabbast. Syreregulatorn bör vara inställd på en något långsammare reglering än luftflödesregulatorn. Vid ammoniumstyrning bör syrehaltens börvärde inte ändras alltför snabbt i förhållande till ändringar i ventilläget. Därmed ska en eventuell ammoniumregulator reglera långsammare än syreregulatorn (Olsson et al., 2018b). Mer om trimning av regulatorerna i kaskadreglering och en del andra praktiska aspekter beskrivs av Åmand (2013) och Olsson et al. (2018b).

Utvärderingar i fullskala har visat på besparingar i luftningsenergi mellan 4 och 27,5 % vid implementering av ammoniumåterkoppling (Åmand, 2013). Storleken på besparingen påverkas i hög grad av hur effektiv den ursprungliga regleringen var. Generellt uppnås en besparing på i storleksordningen 10 % om jämförelsen görs mot en effektiv syrerreglering med konstanta syrehalter och samma grad av nitrifikation (Åmand, 2015). Om det är acceptabelt med en något högre utgående halt av ammonium eller om jämförelsen görs mot en mindre effektiv styrning med konstanta syrehalter kan besparingen bli uppåt 15 % (Åmand, 2015).

Förutom den energibesparing som kan erhållas genom ammoniumåterkoppling kan stabiliteten öka och operatörens arbete med processöver-

vakning minska. Dessa fördelar behöver ställas mot kostnaderna som styrningen medför. Kostnader kan vara för en ammoniumgivare och de arbetsinsatser som krävs för implementering och underhåll. Den tillkommande arbetsinsatsen för underhåll av givaren kan i vissa fall kompenseras genom att arbete med processövervakning för operatören minskar.

Storleken på kostnadsbesparingen vid implementering av ammoniumåterkoppling är beroende av hur stor belastning som den aktuella linjen hanterar. Beräkningar har gjorts av återbetalningstiden vid olika storlek på reningsverk, antaget en energibesparing på 10 % (Åmand, 2015). Enligt dessa beräkningar var återbetalningstiden omkring 1,5 år för ett reningsverk på 500 000 pe, omkring 5 år vid 100 000 pe och 8,5 år vid 25 000 pe. I denna analys räknades inte andra nyttor än energibesparing in i analysen.

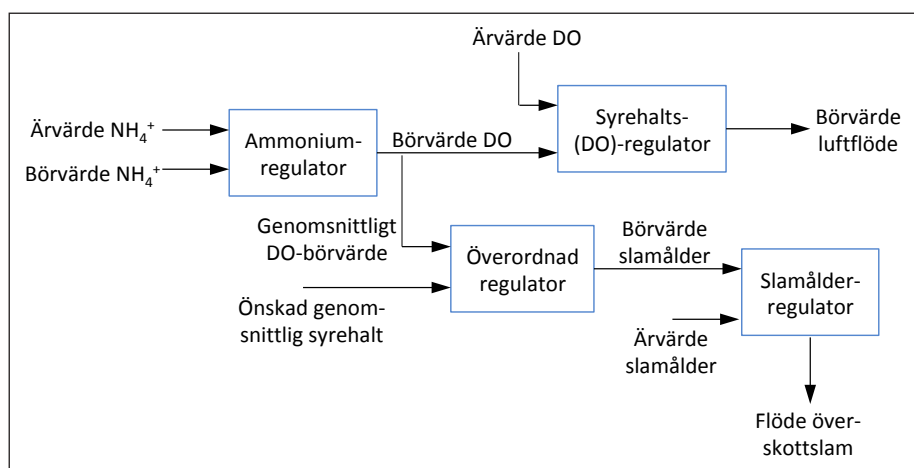
Fördelar med ammoniumåterkoppling	Nackdelar med ammoniumåterkoppling
• Luftningen anpassas efter önskat reningsresultat • Möjlighet till minskad energianvändning	• Kräver en ammoniumgivare som underhålls och kontrolleras • Tillkommande implementering

9.3.2 Överordnad ammoniumåterkoppling med slamålderstyrning

Som nämnts ovan optimerar ammoniumåterkopplingen energianvändningen på så sätt att styrstrategin tillgodoser att den lägsta möjliga koncentrationen av löst syre tillämpas som leder till tillfredställande reningsresultat, i detta fall ammoniumbörvärdet. Det finns dock en rad faktorer som påverkar syrebehov och luftningsenergi och som den överordnade ammoniumåterkopplingen i vissa fall inte tar hänsyn till (Avsnitt 7.2 och 7.3).

Vilken syrehalt som behövs för att erhålla en viss nitrifikationshastighet påverkas av slamåldern. Ju högre aerob slamålder som hålls i systemet desto lägre syrehalt går det att tillämpa, eftersom nitrifierarna då hålls kvar i systemet även med en lägre tillväxthastighet. Detta betyder att en högre slamålder kan påverka systemet mot lägre energianvändning för luftning. Å andra sidan motverkas detta av att syrebehovet blir högre vid en högre slamålder (Avsnitt 7.2.2).

Det finns alltså en avvägning mellan systemets slamålder och syrehalt som behöver göras och detta är grundprincipen i en nyligen presenterad styrstrategi som kombinerar ammoniumåterkoppling med slamålderstyrning (Schraa et al., 2019). En önskad genomsnittlig syrekoncentration anges och överskottslamflödet styrs för att justera slamåldern upp eller ner beroende på värdet av den uppmätta syrehalten (Figur 9.7). När exempelvis temperaturen sjunker och ammoniumregulatorn strävar efter att öka syrehalten, kommer även slamåldern att ökas vilket gör att ammoniumregulatorn inte behöver höja syrehalten.



Figur 9.7 Blockschema för ammoniumåterkoppling med slamålderstyrning. (DO = löst syrehalt)

9.3.3 Överordnad ammoniumframkoppling

Det går även att kombinera ammoniumåterkoppling med framkoppling. Det gör att regeringen blir snabbare och minskar därmed effekten av störningar, till exempel i form av ökad belastning. Vanligen används flöde eller inkommande ammoniumhalt för framkoppling vid ammoniumstyrning. En framkopplingsstrategi är att använda en modell av hur störningen påverkar utsignalen. En sådan modell är aldrig exakt och därför behövs oftast även en återkoppling för att garantera att utsignalen hålls nära ett önskat börvärde. Kombinerad fram- och återkoppling kan leda till högre energianvändning än endast återkoppling. Det kan vara en lämplig strategi när utsläppsvillkoren är sådana att även en kortvarig ökning i utgående ammonium måste undvikas. Liksom vid återkoppling är det inte alltid möjligt för framkopplingsregulatorn att dämpa ammoniumtoppen när den kommer om till exempel mängden nitrifierande slam i biosteget är begränsande. En givare som används för framkoppling får ett större underhållsbehov på grund av det obehandlade vattnet.

Fördelar med framkoppling

- Snabbare reaktion på störning

Nackdelar med framkoppling

- Kräver en modell i framkopplingsregulatorn
- Bör kompletteras med återkoppling för att kompensera för modellfel och störningar som modellen inte tar hänsyn till
- Kräver fler givare

9.4 Volymsreglering

Många anläggningar innehåller någon eller några flexibla zoner som kan vara luftade eller endast omrörda. Genom att starta luftning i en tidigare oluftad zon ökas kapaciteten för nitrifikation omedelbart. Volymsreglering kan tillämpas för att automatiskt ändra den luftade volymen genom att

slå på eller av luftning en zon vid behov. Syftet med volymsreglering kan vara att hantera ammoniumtoppar genom att öka den luftade volymen och spara energi när denna kapacitet inte behövs. Det kan också vara att bättre försöka optimera vilka volymer som ska användas för nitrifikation respektive denitrifikation. För att volymsreglering ska bli effektiv krävs att zonerna är väl avgränsade med väggar (Åmand, 2013). Ofta kan det dock räcka med enkla brädväggar som inte är kostsamma.

Styrning av volymen kräver ett tydligt villkor för om en zon ska vara luftad eller inte. Såväl återkoppling som framkoppling kan användas. Den luftade volymen kan till exempel styras baserat på tid, vattentemperatur eller utgående halt ammonium. Överordnad ammoniumstyrning kan kombineras med volymsreglering så att luftningen slås på när syrehalterna nått sina maximala nivåer i den redan luftade volymen (Suescun et al., 2001). Den luftade volymen kan också styras utan ammoniumgivare, bara baserat på syrehalterna så att luftningen utvidgas om syrehalten avviker alltför mycket från sitt börvärde (Ekman et al., 2006). Genom framkoppling och ökning av luftade volymen i samband med ökad belastning kan en snabb ökning av nitrifikationskapaciteten fås (Krause et al., 2002).

Det finns ytterligare alternativ för bedömning om luftningen ska vara på eller av i en zon (Åmand, 2013). Exempelvis har studier gjorts med skattning av nitrifikationshastigheten och en kombination av fram- och återkoppling (Samuelsson & Carlsson, 2002) och skattning av COD utifrån syreupptagningshastighetsberäkningar vid korta avstängningar av luftningen (Baeza et al., 2002).

Fördelar med volymsreglering	Nackdelar med volymsreglering
• Ökad flexibilitet • Tillför snabbt extra kapacitet • Extra utrymme för denitrifikation • Sparar energi om volymer och variationer är stora	• För att få ökad effektivitet behövs väggar som avskiljer den volym som ska växlas • Den reglerade volymen behöver utrustas med både omrörare och luftare

9.5 Styrning av SBR och intermittent luftning

Intermittent luftning innebär att luftningen omväxlande är av och på. Syftet med detta är vanligen att erhålla både nitrifikation och denitrifikation i samma volym (Balku, 2007; Chachuat et al., 2005; Dotro et al., 2011). Liknande drift sker i en SBR där faserna i en cykel innebär att luftning ibland är avstängd för oluftad fas, sedimentering och tömning. Den luftade fasen i en SBR kan också drivas intermittent vilket då innebär att luftning är omväxlande på och av flera gånger under varje cykel (mellan fyllning och tömning). Intermittent luftning kan tillämpas både för kontinuerliga processer och SBR:er.

Med ändamålsenlig styrning kan en intermittent luftad process vara flexibel då det enkelt går att reglera kapaciteten genom att ändra längden på de

luftade och oluftade faserna (Hanhan et al., 2011). Intermittent luftning kan innebära lägre energianvändning än en kontinuerligt luftad process med fördenitrifikation eftersom ingen pumpning för intern recirkulation av nitratrikt vatten behövs. En annan fördel är att den alkalinitet som förbrukas vid nitrifikation återställs ganska omgående. Det leder till ett stabilt pH-värde vilket är gynnsamt för den biologiska behandlingen. När nitrifikation och denitrifikation sker i samma volym finns ökad möjlighet att gynna simultan nitrifikation och denitrifikation genom att använda en låg syrehalt. En nackdel är vanligen att en del av det organiska materialet i avloppsvattnet oxideras under luftade förhållanden vilket både kan öka luftbehovet och försämra denitrifikationen.

Det enklaste sättet att styra intermittent luftning är att använda fasta tider för luftad och oluftad fas (Habermeyer & Sánchez, 2005; Kimochi et al., 1998). Tiderna ändras manuellt vid behov av större eller mindre andel luftad tid. En del handpåläggning kan krävas för att justera fasernas längd. Nackdelen är att luftningen inte automatiskt anpassas till dynamiken i syrebehovet. Genom att styra fasernas längd baserat på data från givare kan luftningen anpassas till det verkliga behovet i processen. Information från ammonium-, nitrat- och redoxpotential kan användas.

En process med kontinuerligt flöde och intermittent luftning kan styras på följande sätt:

Luftad fas (inkommande ammonium omvandlas till nitrat genom nitrifikation):

- Luftning pågår en viss minsta tid och avbryts efter en viss maximal tid
- Luftning avbryts om ammonium understiger en viss koncentration som antingen är ett konstant värde eller en funktion av nitratkoncentrationen.

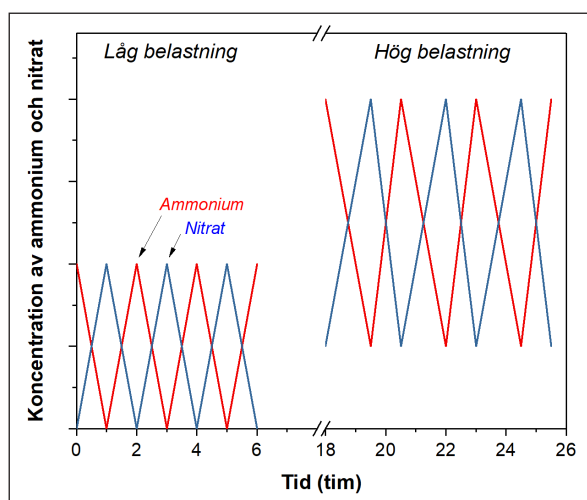
Oluftad fas (nitrat omvandlas till kvävgas genom denitrifikation och ammoniumhalten ökar från inkommande avloppsvatten):

- Oluftad fas pågår en viss minsta tid och avbryts efter en viss maximal tid
- Oluftad fas avbryts om ammonium överstiger en viss koncentration som antingen är ett konstant värde eller en funktion av nitratkoncentrationen.

Följderna av styrningen är att hög kvävebelastning leder till långa faser med större andel luftad än oluftad tid. Låg kvävebelastning leder till korta faser med mer oluftad än luftad tid (Figur 9.8).

Längden på den oluftade fasen kan även styras direkt mot koncentrationen av nitrat. I en SBR är detta ett lämpligt alternativ eftersom halten av ammonium inte ökar under den oluftade fasen. Denitrifikationsfasens slutpunkt kan också styras mot redoxpotentialen.

Den minsta tiden för faserna behövs för att undvika alltför frekventa start/stopp vilket i så fall skulle slita på utrustningen i onödan. Om luftningen står för all omrörning behöver den luftade fasen också vara tillräckligt lång för att röra om slammet väl. Den maximala tiden för luftning behövs för



Figur 9.8 Exempel på variationer i ammonium- och nitratkväve vid intermittent luftning.

att undvika att anläggningen fastnar i detta läge om villkoret för avslutning inte uppnås. På så sätt uppnås till exempel viss denitrifikation även om belastningen är så hög att önskad ammoniumhalt inte kan uppnås. Den maximala tiden för den oluftade fasen beror på om det finns omrörare. Finns ingen omrörare begränsas längden på den oluftade fasen av att slammet sedimenterar och så småningom förlorar sin aktivitet (Avsnitt 8.5).

Reglering av syrehalter kan ske på samma sätt som i en kontinuerligt luftad process, med till exempel kaskadreglering (Avsnitt 9.2). Även överordnad ammoniumstyrning kan användas för att anpassa börvärden för syrehalten (Avsnitt 9.3). Syrehalten kommer då vara högre vid hög belastning och i början av luftade faser.

Fasstyrning baserad på givardata innebär att anläggningens drift blir i särskilt hög grad beroende av kvaliteten på signalerna. Därför är det extra viktigt med kontinuerlig kvalitetskontroll av givaren (Avsnitt 9.11.5). Visar sig kvaliteten inte vara tillräcklig kan då reservstrategier för regleringen träda in. Reservstrategier kan till exempel vara att styrning sker endast baserat på nitrat eller att styrning sker baserat på data från en annan linje. Som ytterligare reserv kan tidsstyrning användas.

Det finns kommersiella produkter på marknaden i form av överordnade styrsystem med färdiga lösningar för fasstyrning.

Som tidigare nämnts (Avsnitt 8.5) kan intermittent luftning även användas som ett sätt att undvika att överlufta processen när belastningen är så låg att blåsmaskinerna inte kan regleras ned mera och alltså inte sänka luftflödet mera. När detta är fallet kan luftning styras på ett enkelt sätt baserat på ett övre syrebörvärde, där luftningen stängs av, och ett lägre syrebörvärde, där luftningen startas igen.

Intermittent luftning tillämpas på några avloppsreningsverk i Sverige, varav här ges några exempel:

- Nykvarnsverket i Linköping (Tekniska Verken). Styrning mot ammoniumbörvärden som beror av nitrathalter eller min/max-tider.

- Skebäckverket (Örebro kommun). Styrning mot fasta ammoniumbörvärden eller min/max-tider. Horisontell omrörning i ringkanaler (Granbom, 2016).
- Kungsängsverket i Uppsala (Uppsala Vatten & Avfall). Tidsstyrning av faser (Svanberg, 2016).
- Lucerna avloppsreningsverk (Västervik Miljö & Energi). Styrning mot ammonium och nitrat med kommersiellt överordnat styrsystem i SBR (Wenström, 2013).
- Källby avloppsreningsverk i Lund (VA SYD). Övergång till intermittent luftning i vissa zoner när luftbehov understiger blåsmaskinernas nedre gräns.

Fördelar med intermittent luftning	Nackdelar med intermittent luftning
• Flexibilitet och effektivare utnyttjande av volymerna • Möjlighet till förbättrad kväverening • Möjlighet att minska energianvändningen	• En del BOD oxideras i onödan • Beroende på styrstrategi krävs olika antal mätinstrument och olika komplexitet i styrningen • Kräver utrustning som tål frekventa start och stopp

9.6 Styrning av högbelastade aktivslamprocesser

Högbelastade aktivslamprocesser (utan kväverening) syftar till att reducera mängden organiskt material. Antingen sker kväveavskiljning i ett efterföljande steg eller saknas krav på kväverening, vilket är vanligt i Sveriges norra delar och på mindre avloppsreningsverk. Även luftningen i en högbelastad aktivslamprocess styrs vanligen med syrerreglering.

Eftersom de heterotrofa mikroorganismerna når sin maximala hastighet vid lägre halter av löst syre än nitrifierande mikroorganismer, kan dessa processer drivas vid lägre syrehalter. Typiska koncentrationer av löst syre är mellan 0,5 och 1,5 mg/l. Hur låg syrehalt som kan tillämpas begränsas vanligen av utgående halt av BOD i förhållande till utsläppsvillkoret. Det kan utnyttjas för en överordnad styrning av börvärdet för syrehalten på liknande sätt som med ammoniumstyrning. Mätning av BOD och COD kan ske online (Iranpour & Zermeno, 2008; Vanrolleghem & Lee, 2003) och användas för reglering av syrehalten med fram- och/eller återkoppling.

I avsaknad av kväverening finns större utrymme att minska slamåldern och på så sätt minska syrebehovet. I samband med rötning har en låg slamålder ytterligare fördelar i form av högre slamproduktion och högre metanutbyte. En alltför låg slamålder minskar dock syreöverföringseffektiviteten (Avsnitt 7.2.2 och 10.1).

9.7 Styrning av MBBR-processer

Eftersom högre halter av löst syre ofta tillämpas i MBBR-processer (Avsnitt 7.3.1), är området för reglering av luftningen ofta bredare än i en aktivslamprocess. Inte sällan designas en MBBR-process för nitrifikation numera för koncentrationer av löst syre mellan 4 och 5 mg/l. Tidigare tillämpades ofta högre halter (McQuarrie & Boltz, 2011; Ødegaard, 2006).

Reglering av syrehalt kan i en MBBR göras på samma sätt som beskrivits ovan. Överordnad ammoniumstyrning med återkoppling kan också tillämpas på samma sätt. I vissa fall tillämpas styrning av ventil direkt mot ammoniumhalten eller indirekt via en luftflödesregulator utan inblandning av syrehalten.

Det relativt höga behovet av luftning för omblandning i en MBBR-process (Avsnitt 8.6.1) gör att det kan vara lämpligt med styrning för att minska luftning vid låg belastning. Nyligen har metoder utvecklats för att minska behovet av luftning för omrörning i MBBR:er (Cannon & Jeal, 2018). Detta kan ske genom övergång till intermittent luftning intill silarna vid låg belastning. Behovet av omrörning kan också minskas genom att flödesriktningen genom två reaktorer alterneras. Genom att två reaktorer i serie drivs växelvis som första och andra steget hjälper flödet genom systemet till att växelvis transportera bort biofilmsbärare från silarna.

9.8 Styrning baserad på utgående luft från bassängen

I vissa luftningssystem kan det vara en utmaning att implementera en väl fungerande syrerreglering. Att ställa in regulatorerna är ofta en avvägning. En långsam reglering gynnar stabilitet, men leder till fördröjning i systemets anpassning till förändringar i luftbehov. En alltför långsam reglering kan leda till att syrenivån avviker från börvärdet onödigt länge. Alltför aggressiva regulatorinställningar ger snabbare respons, men riskerar istället leda till instabilitet och självsvängningar (se Avsnitt 9.10.1). I fall där regleringen fungerar mindre bra, är det i praktiken kanske så att det kompenseras genom att börvärdet ökas för att skapa en marginal.

En alternativ styrstrategi har föreslagits för situationer då traditionell syrerreglering inte fungerar tillfredställande. Genom att kontinuerligt mäta syrehalten i luften som lämnar bassängen vid ytan ges en bild av den verkliga förbrukningen av syre i processen. Luftningen kan då anpassas direkt till behovet utan omvägen via överskottet (koncentrationen) av syre i bassängen. Utrustningen som används innebär en flytande huv som samlar upp utgående luft vid bassängytan ("off-gas") och givare för att mäta syrehalten i gasen. Metoden ger samtidigt information om luftningssystemets prestanda med avloppsvatten och beskrivs närmare nedan (Avsnitt 11.3.2).

När styrning baserat på online "off-gas"-mätningar har testats i fullskala har stabilare syrehalter uppnåtts än med syrerreglering (Sahlmann et al., 2004; Trillo et al., 2004; Trillo & Smith, 2015). Det innebär i sin tur ett mindre behov av marginal för börvärdet så att syrehalten kan sänkas, med

en energibesparing som följd, utan risk för att alltför låga syrehalter uppstår periodvis. Informationen som kontinuerligt erhålls om luftarsystemets prestanda (α SOTE) kan samtidigt användas för att optimera luftningen (Schuchardt et al., 2007).

9.9 Minimering av lustgas

På senare år har avgång av lustgas (N_2O) från processer för biologisk kväverening fått allt mer uppmärksamhet. Lustgas har ungefär 265 gånger starkare klimatpåverkan ("global warming potential") än samma mängd koldioxid i ett 100-årsperspektiv (IPCC, 2014). Det är därför mycket viktigt att minimera avgången av lustgas från reningsprocesser. Ur miljösynpunkt kan sällan energieffektivisering motiveras ifall den görs på bekostnad av ökade lustgasutsläpp. Dessvärre är de faktorer som påverkar bildandet av lustgas inte särskilt väl kartlagda (Desloover et al., 2012; Kampschreur et al., 2009). Forskning pågår på ett antal håll i världen för att öka förståelsen kring hur lustgas bildas vilket så småningom kan leda till tydligare rekommendationer kring driftsförhållanden (Domingo-Félez & Smets, 2019; Massara et al., 2017; Ni & Yuan, 2015).

Både ammoniumoxiderande och denitrifierande bakterier kan producera lustgas under vissa betingelser. Vid denitrifikation är lustgas en mellanprodukt som kan ackumuleras vid närvaro av syre som inhiberar omvandlingen av lustgas till kvävgas. Nitrifierare kan bilda lustgas vid oxidationen av mellanprodukten hydroxylamin eller vid denitrifikation vid ogynnsamt låg syrehalt eller förhöjd koncentration av nitrit. En faktor som har identifierats som positiv för att undvika lustgas är en syrereglering som reagerar snabbt och undviker temporära dippar eller toppar i syreöverskott, vilket minskar risken för syreinhibering för både nitrifierare och denitrifierare (Daelman et al., 2015). Låga halter av utgående totalkväve, låga halter av nitrit i anläggningen och smala spann för koncentrationsvariationer i kvävefraktioner har också bedömts som gynnsamt (Foley et al., 2011).

De observationer kring lustgasavgång som härletts till snabba förändringar i syrehalt har lett till att intermittent luftning ibland betraktas som riskabelt (Dotro et al., 2011; Westling, 2011). Flera mätningar vid anläggningar med intermittent luftning har dock visat mycket låga utsläpp av lustgas (Kimochi et al., 1998), även vid svenska anläggningar som Nykvarnsverket i Linköping och Skebäckverket i Örebro (Granbom, 2016). Intermittent luftning i sig behöver därför inte betyda ökade lustgasutsläpp.

Likaså behöver inte låga syrehalter i sig leda till förhöjd lustgasproduktion. Den typ av anpassning av syrenivån som sker vid exempelvis ammoniumåterkoppling (Avsnitt 9.3.1) behöver inte vara problematisk då den ser till att syrenivån är låg när även ammoniumhalten är låg (Olsson et al., 2018b). Genom en minskad luftning vid låg belastning minskar också risken för att syre återförs till den anoxiska zonen vilket annars ökar risken för lustgasproduktion vid denitrifikation.

9.10 Styrning av blåsmaskiner

Reglering av tillförseln av luft till anläggningens olika delar är centralt för styrning mot energieffektiv luftning. Möjligheten till denna reglering är förstås begränsad av blåsmaskinens eller blåsmaskinernas högsta och lägsta kapacitet. Energieffektiv luftning kräver också att styrning av blåsmaskiner är utformad på ett sådant sätt att försörjningen av luft till luftningssystemet är anpassad till det behov som finns.

Kapaciteten på en blåsmaskin regleras antingen med frekvensomriktare eller med ledskenor och ställbara blad i diffusorn (Avsnitt 5.5). Ibland förekommer blåsmaskiner som drivs med fast varvtal utan reglermöjlighet eller med möjlighet till två hastigheter (hög/låg-reglering). Numera är det vanligt att en blåsmaskin levereras med integrerad styrning av den enskilda maskinen. För direktdrivna turboblåsmaskiner är detta en förutsättning medan andra typer av maskiner ibland kan levereras utan frekvensomriktare, så att kunden själv kan göra denna sammankoppling. Blåsmaskiner med integrerad styrning registrerar aktuellt tryck och flöde, antingen med inbyggda givare eller genom beräkning utifrån aktuell effekt. Dessa signaler kan kommuniceras från den lokala maskinen till det centrala styrsystemet.

Blåsmaskiner kan ha sekvenser som initieras vid uppstart eller avstängning som är specifika för tillverkaren. För en centrifugalmaskin innebär uppstart att maskinen måste ta sig förbi det område med lågt flöde i förhållande till trycket, där maskinen annars riskerar stall (Avsnitt 5.5.2). Uppstart kan därför innebära att ventilen för friblåsning öppnas.

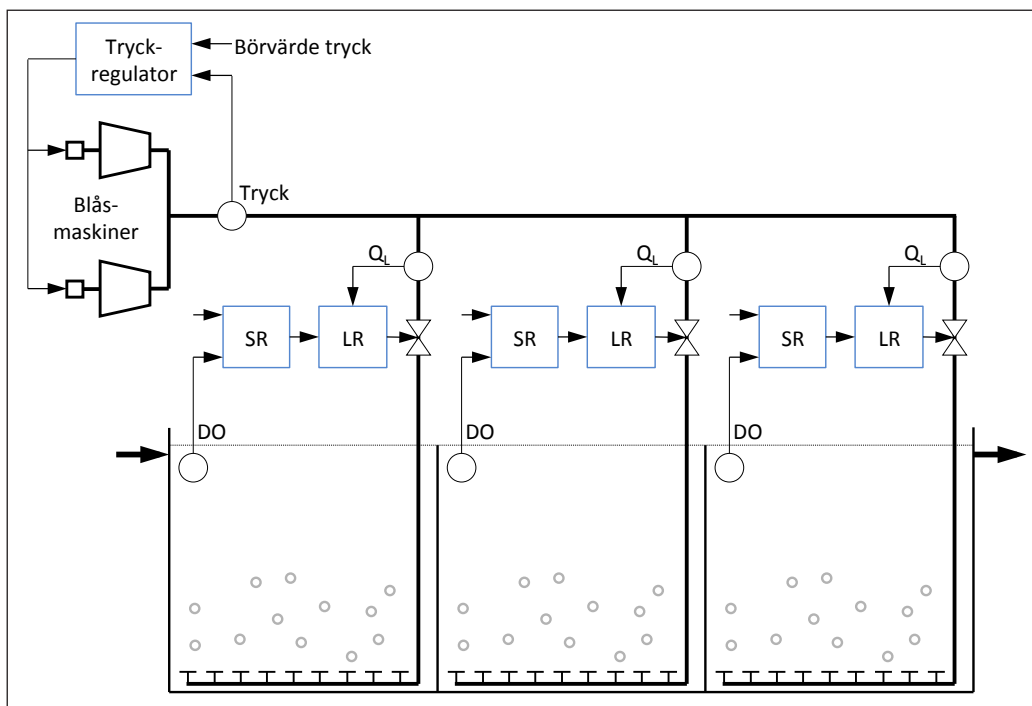
Styrningen av en centrifugalmaskin måste se till att stall alltid undviks under drift. Den driftpunkt där stall sker är specifik för en viss maskin. Vid reglering av maskinen nedåt undviks att flödet blir så lågt att stallpunkten uppnås. En viss marginal ska finnas så att den lägsta driftspunkten är något högre än stallpunkten. Blåsmaskiner kan även ha annan typ av styrning för att skydda utrustningen som temperatur-, tryck- och vibrationsvakter (Jenkins, 2014).

9.10.1 Tryckreglering

I ett luftningssystem med flera blåsmaskiner eller flera luftade zoner styrs vanligtvis blåsmaskiner mot ett önskat tryck i huvudledningen (Figur 9.9). Om en ventil öppnar för att syrerregleringen kallar på mer luft till processen sjunker trycket i ledningen och blåsmaskinens produktion ökar för att återställa trycket. Om en ventil stänger för att processens behov av luft sjunker ökar trycket och blåsmaskinens regleras ned tills trycket har sjunkit till sitt börvärde.

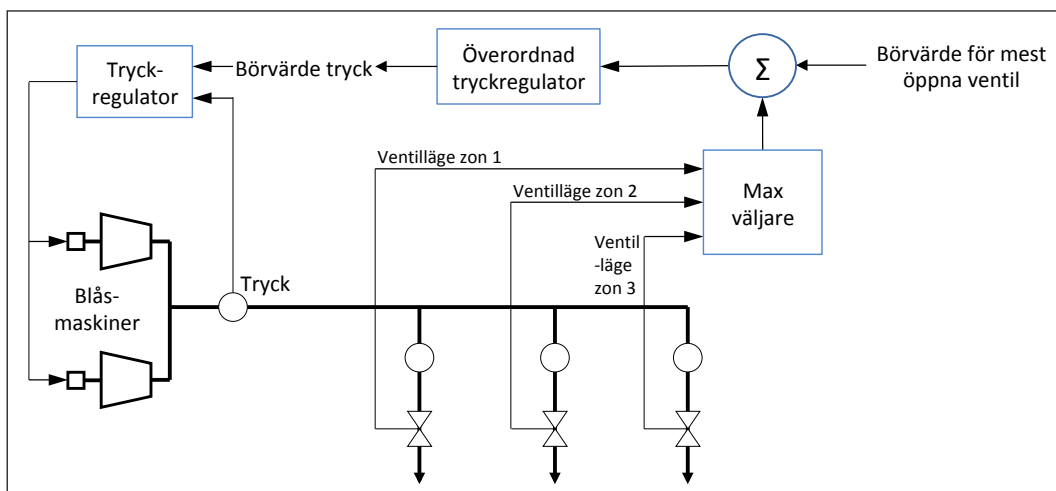
Nackdelen med denna styrning är att den kräver att trycket är tillräckligt högt för att klara den högsta belastningen. Vid lägre belastning kommer ventilernas öppningsgrad att minska vilket betyder större tryckförluster och onödig energianvändning.

Genom att istället anpassa börvärdet för trycket till behovet kan tryckförlusterna minskas. En vanlig metod för detta kallas MOV-reglering

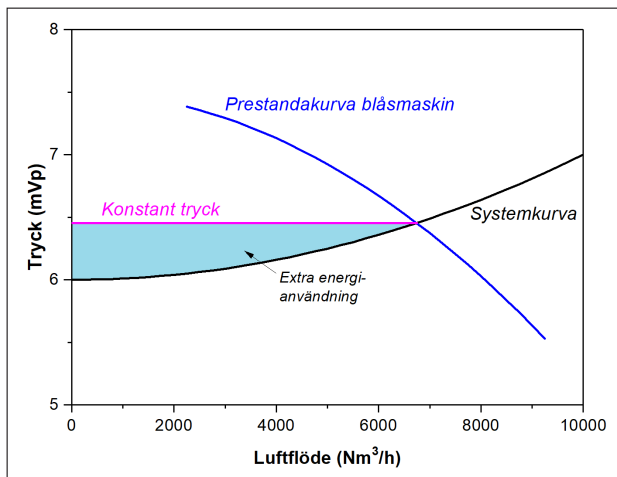


Figur 9.9 System med två tryckstyrda blåsmaskiner som försörjer tre luftade zoner med kaskadreglerade syrehalter. SR - Syrehaltsregulator, LR - Luftflödesregulator, DO - syrehalt, QL - Luftflöde.

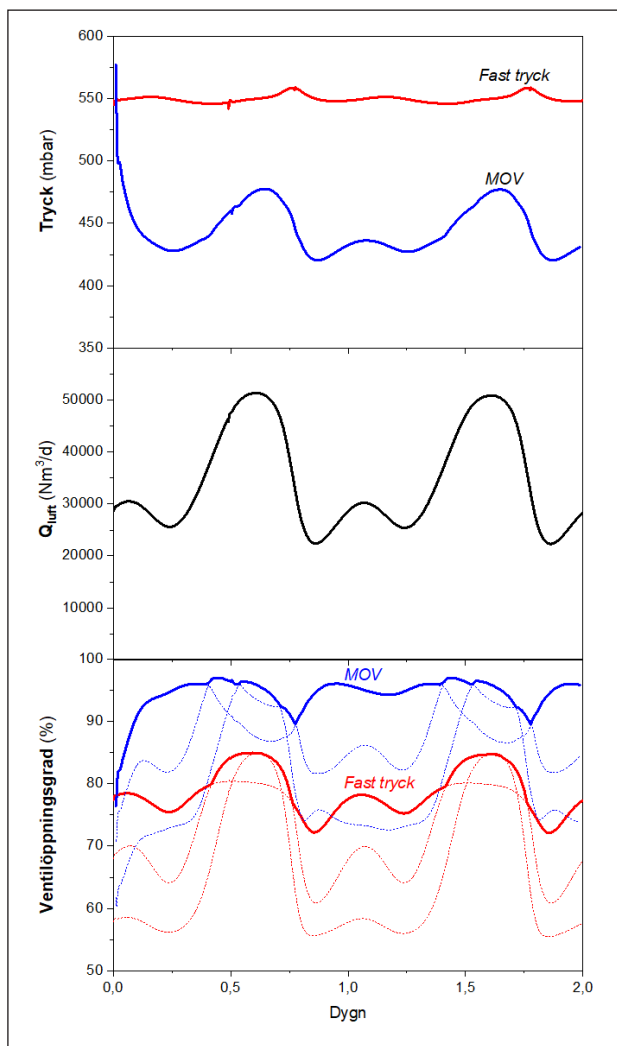
där MOV står för "most open valve". Genom att samtliga ventilers lägen registreras anpassas trycket så att den mest öppna ventilen håller sig nära ett givet börvärde. Börvärdet kan till exempel väljas till 80 % vilket gör att den mest öppna ventilen är nästan helt öppen (Figur 9.10). Om den mest öppna ventilen är helt öppen indikerar detta att systemet behöver mer luft och trycket ökas. Om den mest öppna ventilen har lägre öppningsgrad än börvärdet minskas trycket för att spara energi. Denna metod kräver dock att ventillägesgivare finns. Den energibesparing som variabelt tryck kan ge tack vare minskade tryckförluster över ventiler är i storleksordningen flera procent (Figur 9.11 och 9.12).



Figur 9.10 Reglering för variabelt tryck med principen för mest öppna ventil.



Figur 9.11 Skillnaden i energianvändning med konstant och variabelt tryck representeras av det skuggade området (antaget konstant verkningsgrad för blåsmaskinerna).



Figur 9.12 Exempel från modellsimuleringar med fast tryck och MOV som visar att MOV-styrning bidrar till lägre tryck i systemet, i synnerhet då luftbehovet är lågt. Ventilöppningsgrad anges för tre zoner och mest öppna ventil i fetare linje. Strykning undviks med MOV genom att den mest öppna ventilen har en högre ventilöppningsgrad.

Tryckregleringen och syreregleringen är två kopplade reglersystem som måste vara utformade så att de fungerar väl tillsammans. Som tidigare nämnts behöver syreregleringens olika kaskadkretsar ha hastigheter som är rätt ordnade. Vid MOV-reglering behöver tryckregulatorn dessutom vara inställ så att ändringar av tryckets börvärde sker långsamt i förhållande till övrig reglering för att en stabil styrning ska uppnås (Olsson, 2008).

Ett problem som kan uppstå ifall syre- och tryckreglering inte samverkar på ett bra sätt är att systemet blir instabilt och hamnar i självsvängning. Självsvängning kan uppstå om systemen istället motverkar varandra på följande sätt (Henze et al., 2008): Mer luft behövs i en del av anläggningen och syrereglering gör att ventilen öppnas. Kanske hinner luftflödet till någon annan del av anläggningen minska för att mer luft går igenom den öppnade ventilen. Trycket sjunker i luftledningen och blåsmaskinerna varvar upp som svar. Flera ventiler har hunnit öppna och nu blir flödet genom dessa högt varpå syrehalterna stiger. Detta leder till att ventilerna stänger igen och sedan börjar det om igen. Systemet har hamnat i självsvängning och det innebär både svårigheter att hålla önskad syrehalt och onödigt slitage på utrustningen. I de flesta fall kan omsorgsfull inställning av regulatorerna med hänsyn till delsystemens tidsskalor råda bot på problemet.

Fördelar med MOV-reglering	Nackdelar med MOV-reglering
• Kan spara energi genom minskade tryckförluster	• Mer avancerad implementering • Ventillägesgivare måste finnas

9.10.2 Enskild blåsmaskinstyrning

I ett luftningssystem som består av en enda blåsmaskin och bara en luftad bassäng är det möjligt att styra blåsmaskinen direkt mot behovet i processen. En sådan styrning kan vara att blåsmaskinens kapacitet styrs mot halten av löst syre i bassängen. Om en luftflödesgivare finns är även kaskadreglering möjlig så att regulator för syrehalten ger ett börvärde till en luftflödesregulator, som i sin tur styr blåsmaskinens varvtal eller annan reglerutrustning (ledskenor och ställbara blad i diffusorn).

Fördelen med enskild blåsmaskinstyrning är att inga reglerventiler behövs vilket minimerar tryckförlusterna i systemet. En nackdel är att reglerområdets storlek begränsas av den enskilda maskinens reglerbarhet. Färre maskiner i ett system innebär ett mindre reglerområde. Därför blir det extra viktigt att använda en maskin med god reglerbarhet.

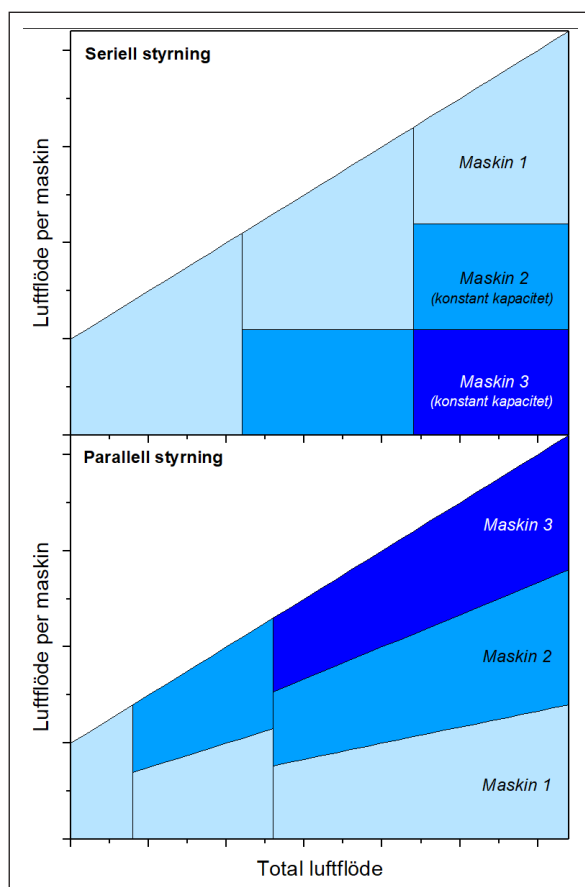
Denna styrning kan till exempel passa på mindre reningsverk som bara har en luftad bassäng. Den kan också vara ett sätt att minimera energiförluster på ett större reningsverk med flera parallella linjer och dedikerade blåsmaskiner till varje luftad bassäng. Den begränsade möjligheten att reglera luftningen till varje bassäng kan kompenseras genom att intermittent luftning tillämpas så att den luftade tiden istället regleras (Avsnitt 9.5). Detta sker till exempel vid Skebäckverket i Örebro kommun (Granbom, 2016).

9.10.3 Överordnad blåsmaskinstyrning

När flera blåsmaskiner används i ett luftningssystem behövs styrning för att samordna driften av dem. Samordningen av maskinerna syftar till att behovet av luft till anläggningen från maskinerna ska tillgodoses på ett stabilt sätt och till att lägsta möjliga energianvändning ska uppnås i hela reglerområdet.

Om en maskin blir stående avstängd under en lång tid kan det öka risken för problem när den ska startas upp. Därför brukar blåsmaskinernas drift samordnas så att maskiner av samma storlek drivs omväxlande. Då får de samma driftstid och slits med samma hastighet.

Alla blåsmaskiner har ett område där driften är som mest effektiv. Över och under detta ökar energianvändningen per enhet levererad luft. Vid samordning av flera maskiner strävas efter att maskinerna ska drivas så nära sina optimala driftpunkter som möjligt. Samordningen av maskiner kan ske enligt två huvudprinciper. Enligt en av dessa drivs två maskiner med seriell styrning, så att den ena ligger vid sin optimala driftpunkt och den andra regleras efter det ytterligare behovet. Då kommer en maskin drivas optimalt medan den andra kommer ligga längre ifrån sitt optimum. Seriell styrning används också om en eller flera maskiner i systemet saknar reglermöjlighet och har en konstant kapacitet (Figur 9.13).



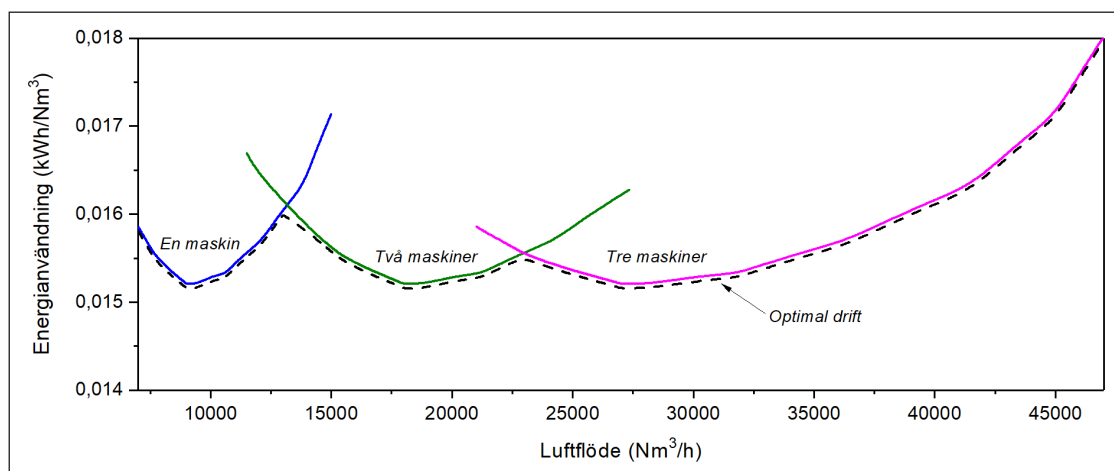
Figur 9.13 Exempel på överordnad styrning för samordning av blåsmaskiner. Ovan: Seriell samordning av tre maskiner varav en med reglermöjlighet och två med konstant kapacitet. Nedan: Parallell samordning av tre maskiner med reglermöjlighet.

Vid samordning av flera maskiner med reglermöjlighet kan istället maskinerna styras parallellt så att de levererar samma flöde (Figur 9.13). Med två maskiner ligger då båda oftare utanför det optimala området men istället ligger ingen maskin lika långt ifrån optimum. Parallell samordning har fördelen att båda maskinerna gemensamt rör sig bort från stallpunkten (för centrifugalmaskiner) mot ett område där maskinerna är stabila och som minst känsliga för störningar (Jenkins, 2014).

Samordningen av flera maskiner kan också vara upplagd så att regleringen är parallell endast i vissa delar av driftområdet. I andra delar drivs en maskin vid minsta, högsta eller optimal kapacitet medan övriga maskiner regleras parallellt med hänsyn till luftbehovet. Vilken princip för samordning som är mest lämplig beror på typ av maskin. Leverantören ger rekommendationer för vad som passar bäst i en viss tillämpning. Samordningen inkluderar också hur de maskiner som redan är i drift ska regleras ned innan en ytterligare maskin startas (ATV, 2000a).

Det är också vanligt att någon form av hysteres implementeras i styrningen för att undvika att blåsmaskiner slås på och av onödigt ofta när luftbehovet varierar nära en av de punkter där antalet maskiner i drift ska ändras (Wikén, 2017). Detta kan ske genom en fördröjning i tid så att ett ökat flöde måste krävas under en viss tid innan ändring sker. Det kan också vara i form av ett dödbandsområde där ingen ändring sker. Det innebär då att det till exempel krävs lite högre flöde för att växla upp från en till två maskiner än vad som krävs för att växla ned från två till en.

Ett exempel på hur den specifika energianvändningen kan variera vid parallell drift av tre maskiner i ett driftområde från 10 000 Nm³/h till 47 000 Nm³/h visas nedan (Figur 9.14). Det finns vissa överlappande områden och den streckade kurvan visar hur driften kan ske optimalt. När flödet överstiger 13 000 Nm³/h ska uppväxling ske från en till två maskiner. När flödet överstiger 23 000 Nm³/h ska övergång från två till tre maskiner ske. Exemplet är hämtat från Bromma avloppsreningsverk (Stockholm Vatten och Avfall) som beskrivs mer nedan i Fallstudie 2 (Avsnitt 14.3).



Figur 9.14 Den specifika energianvändningen i relation till luftflödet vid drift av en, två eller tre maskiner parallellt. Optimal drift med avseende på låg energianvändning motsvaras av den streckade linjen.

Det vanligaste när flera maskiner ska samverka är att leverantören ger rekommendationer för det antal maskiner som ska drivas i olika luftflödesintervall. Baserat på dessa intervall implementeras sedan den överordnade styrningen i det centrala styrsystemet. En del leverantörer har produkter som hanterar samordningen mellan maskiner. Detta styrsystem blir då ett decentraliserat system som styr blåsmaskinerna mot en effektiv kombination av driftpunkter och kommunicerar med det centrala styrsystemet. I den svenska VA-branschen är det relativt ovanligt med decentraliserade styrsystem för blåsmaskiner. Många föredrar att styrningen istället implementeras centralt för att ha kontroll över och insyn i styrningen. Det finns samtidigt en allmän utveckling mot att fler komponenter har egen styrning eller intelligens. Det viktiga här är att gränssnitten är väl definierade med avseende på vilken auktoritet ett decentraliserat system ska ha och vilka in- och utgående signaler som ska kommuniceras med det centrala systemet. Det är också viktigt att beakta behovet av underhåll så att detta inte blir orimligt stort i samband med fler decentraliserade styrsystem.

Nedan illustreras effekten av valet av styrstrategi för samordning av blåsmaskiner (Exempel 9.1).

Exempel 9.1

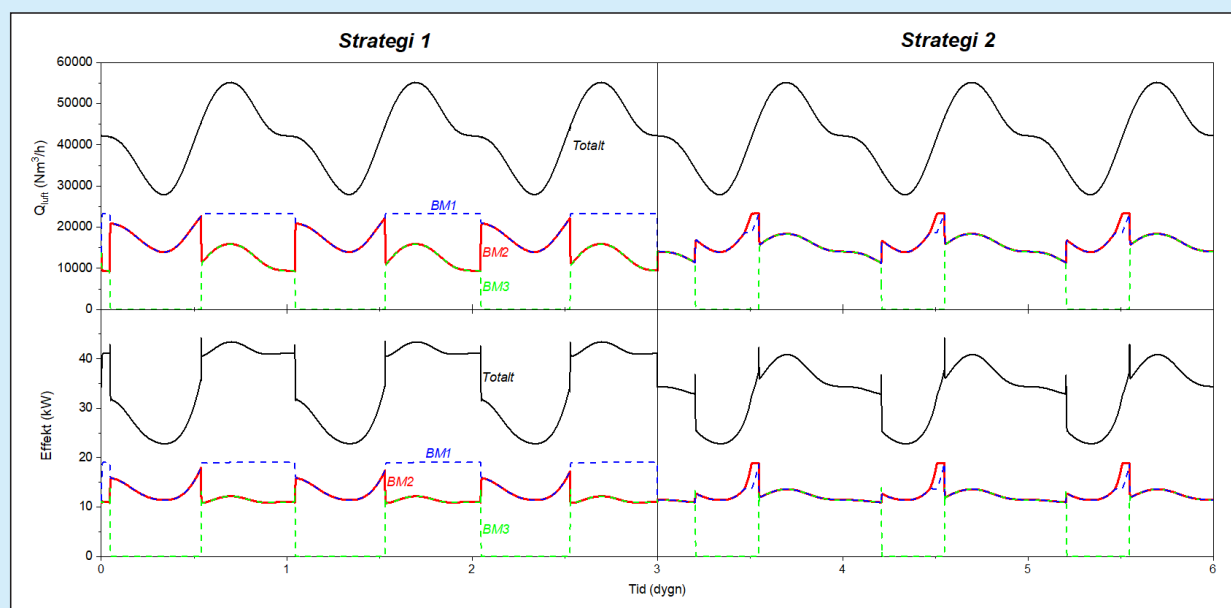
Överordnad styrning för samordning av blåsmaskiner (simulering)

Två strategier för styrning av blåsmaskiner jämfördes med processimuleringar med mjukvaran SIMBA (iFAK). Mjukvarans inbyggda bibliotek för luftarsystem användes och en modell av ett luftarsystem upprättades bestående av tre lika stora displacementblåsmaskiner, ett rörsystem med förgrening till tre luftade zoner, reglerventiler och ett finblåsigt membranluftarsystem. Luftning mot fast syrbörvärde 2 mg/l tillämpades. Simuleringsverktygets egna metod för att beräkna maskinernas effektuttag användes.

Vardera blåsmaskinen kunde regleras mellan 40 och 100 % av sin kapacitet. Total kapacitet var således 300 %. För behov upp till 200 % fördelades behovet lika mellan blåsmaskin 1 och 2. När behovet översteg 200 % jämfördes två alternativ:

1. Blåsmaskin 1 gick på 100 % och resterande behov fördelades lika mellan blåsmaskin 2 och 3.
2. Luftbehovet fördelades lika mellan de tre blåsmaskinerna.

Luftflöde och effekt för blåsmaskinerna under simuleringen visas i Figur 9.15. Den första strategin simulerades under de första tre dyggen, därefter byttes till strategi nr 2. Det totala luftflödet till processen var lika för de olika strategierna. Effekten minskade när ett högt luftbehov fördelades lika på tre maskiner. I detta fall ledde därför strategi 2 till ungefär 5 % lägre energianvändning.



Figur 9.15 Resultat från simuleringar i form av luftflöde (överst) och effekt (nederst) för blåsmaskin 1-3 (BM1-3) och totalt.

9.11 Instrumentering

Reglering av luftning kräver instrument som ger återkoppling från processen i form av mätsignaler. Onlineinstrument innebär att instrumentet har en givare i kontinuerlig kontakt med provmediet och kan ge mätdata med täta intervall. Förutom vid styrning kan mätdata även användas för uppföljning av processen (Avsnitt 10.3) och vid dimensionering av ny utrustning (Kapitel 8). Här nedan presenteras de variabler som är vanligast att mäta i anslutning till luftningen.

9.11.1 Löst syre

Mätning av syrehalten är ytterst central för luftningens funktion och styrning. Syregivare mäter samtidigt temperaturen eftersom korrekt återgivning av syrehalten kräver kompensation för temperaturen. Det finns i huvudsak två typer av syregivare. Den äldre varianten bygger på ett permeabelt membran och en elektrokemisk cell där en ström uppstår när syre tränger igenom membranet. Regelbundet byte av membran, elektrolyt och elektrod behövs. Den modernare och idag vanligaste varianten är den optiska syregivaren som istället utnyttjar ett fluorescerande eller luminiserande ämne som är känslig för syre. En ljuskälla i givaren gör att ämnet absorberar och sedan emitterar ljus. Emissionen av ljus påverkas av syret och mäts. Dessa givare kräver regelbundna byten av mät huvud. En nackdel kan vara att optiska givare inte har lika hög noggrannhet vid låga syrehalter.

För syregivare av olika typ och olika fabrikat kan bristande rengöring påverka mätsignalen åt olika håll (Samuelsson et al., 2018). Vissa givare visar alltså högre värde än det verkliga medan andra, förmodligen de flesta,

visar för låga värden. Vid syrereglering och bristande rengöring kan energianvändningen följaktligen påverkas åt olika håll beroende på syregivare.

Var i bassängen bör syregivaren placeras? Flera faktorer påverkar vad som är den bästa placering av givaren vilket därför kan variera från fall till fall. Allmänt sett bör givaren placeras där syrehalten är representativ. Det innebär framförallt att döda zoner med bristfällig omblandning ska undvikas, som till exempel alltför nära en av bassängens väggar. Punkter där intern recirkulation eller returslam leds in i bassängen bör också undvikas eftersom dessa flöden annars kan påverka mätningen. Det bör också undvikas att placera givaren alltför nära inflödet. Annars kommer styrning ske mot att i alla lägen upprätthålla börvärdet där belastningen är som högst vilket kan vara onödigt energikrävande.

Då en anläggning eller linje består av en enda luftad zon placeras ibland givaren vid 2/3 eller 3/4 av längden från inflödet till utflödet från bassängen. Om ett konservativt börvärde har valts, undviks då ett onödigt syreöverskott i slutet av bassängen, men även en alltför aggressiv styrning vid belastningstoppar. Samtidigt finns en viss uppehållstid kvar så att om syrenivån är låg, kan den hinna ökas innan utflödet.

I en anläggning med flera luftade zoner är det mer vanligt, beroende på zonernas storlek och utformning, att varje zon kan betraktas som totalomblandad. Givaren kan då placeras i mitten av zonen eller där det är enklast att komma åt den för underhåll. Det kan vara bra att testa vad som kan vara optimal placering av syregivaren med en handhållen mätare. En rekommendation är då att utföra ett sådant test när belastningen är som högst under dygnet och att en bra placering är där syrenivån börjar stiga markant (Jenkins, 2014).

Givaren placeras vanligen några decimeter nedsänkt i vattnet monterad på en stav eller hängande i en kedja. Givaren kan gärna vara lutad något för att undvika att bubblor fastnar vid mät huvudet.

9.11.2 Luftflöde

En vanlig typ av luftflödesmätare på reningsverk är den termiska massflödesmätaren. Givaren sticks in till mitten av röret, till exempel genom en kulventil. Mätningen bygger på att det finns två temperaturgivare och kyleffekten av luftflödet mellan dessa registreras. Kyleffekten beror på luftens hastighet och densitet. Det är således massflödet som mäts, vilket till exempel kan anges i Nm^3/h (1 atm, 0 °C). För att omvandla värdet till ett volymflöde (m^3/h , vid aktuellt tryck och temperatur) behövs information om rördimension, tryck och temperatur. Information från tryck- och temperaturgivare kan då användas för omräkningen.

Den termiska massflödesmätaren mäter vid en punkt i ledningen, vanligen i mitten, och utifrån denna mätning uppskattas det totala flödet i röret. Denna beräkning baseras på antagandet att flödet i röret är laminärt. Luft bromsas av friktion mot rörets väggar och hastighet är högst i mitten. En laminär flödesprofil uppstår i en rak, ostörd sträcka utan inverkan från böjar, reduceringar, påstick eller andra komponenter. En vanlig tumregel

är att en sträcka av 10 gånger rörets innerdiameter krävs innan flödesmätaren och 5 gånger diametern krävs efter flödesmätaren för korrekt mätning (Jenkins, 2014). Tillverkare rekommenderar ofta längre raksträckor än så innan mätaren, nämligen minst 15–25 gånger diametern. En flödesriktare kan installeras innan mätaren för att minska, men inte helt eliminera, behovet av raksträcka. En flödesriktare medför dock en extra tryckförlust. Vridspjällventiler skapar flödesmönster som ger extra besvärliga störningar för mätare. Därför ska en luftflödesmätare alltid placeras innan och aldrig efter en ventil.

Det finns också andra typer av flödesmätare. En del av dessa är baserade på mätning av skillnaden i tryck mellan två punkter där viss strypning sker emellan. Utifrån skillnaden i tryck kan luftens hastighet beräknas med hjälp av Bernoullis ekvation. Flödet av luft kan sedan beräknas med hjälp av tvärsnittsytan. Det är då volymsflödet (m^3/h) som erhålls och omvandling till massflödet (Nm^3/h) kräver information om aktuellt tryck och temperatur. Generellt för dessa mätare är att de har lite svårare att hantera låga flöden. En variant som bygger på denna princip är venturiröret.

Det är inte ovanligt att personal vid avloppsreningsverk observerar att flödesmätningen inte ger tillförlitliga resultat. I många driftsammanhang behöver inte detta vara något större problem när informationen används för att styra fördelningen av luft till olika delar av anläggningen eller följa upp relativa förändringar i luftflöde över tiden. I andra sammanhang, när luftflödesdata ska användas för att dimensionera ny utrustning, är absoluta värden viktiga. Anledningar till att flödesmätningen inte ger korrekt resultat kan till exempel vara:

- Ej tillräckligt lång raksträcka före eller efter givaren.
- Felaktigt tryck och temperatur används för omvandling mellan flöde vid normalförhållanden och flöde vid aktuella förhållanden.
- Luftfuktigheten är inte försumbar (vilket vanligen antas).

9.11.3 Tryck

Trycket i luftledning används ofta vid styrning av blåsmaskiner. Tryckmätning bygger på att trycket skapar en kraft mot någon rörlig del där en motverkande kraft uppstår och vars rörelse kan mätas. Tryck mäts i form av skillnaden mellan två punkter. Därför är det normalt övertryck relativt omgivande luft som mäts. Den rörliga delen kan till exempel bestå av ett membran eller en bälg. Tryckmätare används i många olika sammanhang och det finns därför en uppsjö av varianter och tillverkare att tillgå.

9.11.4 Ventillägesgivare

Ventillägesgivare används för att få information om ventilernas position. De är nödvändiga för MOV-reglering (Avsnitt 9.10.1), men också användbara för att kunna följa upp luftflöde och tryck i förhållande till ventilöppningsgrad (Avsnitt 10.3.5).

9.11.5 Ammonium och nitrat

För mätning av ammonium och nitrat finns jonselektiva givare och analysatorer. En jonselektiv givare har minst två elektroder, en referens- och en mätelektrod. På mätelektroden sitter jonspecifika membran som binder den aktuella jonen. En potentialskillnad mellan elektroderna uppstår som är beroende av koncentrationen av jonen i vattnet vilken jämförs med en kalibrering.

Jonselektiva givare har snabb responstid vilket medger hög mätfrekvens och acceptabelt mätfel (ca $\pm 0,2$ mg/l). Nitrat kan mätas med samma typ av givare och vissa instrument kan mäta båda dessa parametrar. En nackdel är att dessa givare har relativt låg noggrannhet vid låga koncentrationer (< 1 mg/l). Jonselektiv mätning av nitrat störs av klorid och därför har givare för nitrat ofta även en elektrod för klorid för att kompensera för detta. På samma sätt kan jonselektiv mätning av ammonium kompenseras genom en kaliumelektrod. Summan av nitrat och nitrit kan även mätas med givare baserade på UV-absorbans.

Analysatorer för ammonium har generellt högre noggrannhet än jonselektiva givare (ca $\pm 0,02$ mg/l). Responstiden är längre (ca 15 min), men tillräcklig för styrning av luftning. Det finns två typer av analysatorer: gaskänsliga elektroder och kolorimetriska. Proverna filtreras innan mätning sker. Analysatorer med gaskänsliga elektroder kräver kalibreringslösningar och reagenser. Kolorimetriska analysatorer kräver dessutom pumpar och ventiler.

Placeringen av en ammoniumgivare för återkoppling kan vara i en av de luftade zonerna (jonselektiv), vanligtvis den sista, eller i sedimenteringen (jonselektiv eller analysator). Det senare alternativet innebär längre tidsfördröjning i återkopplingen, men mindre underhåll. Framkoppling kräver att givaren placeras vid inflödet med relativt högt underhållsbehov som följd.

9.11.6 Kvalitetssäkring av mätdata

För all styrning som baseras på värden från mätinstrument blir det viktigt att hålla koll på att instrumentet mäter tillräckligt noggrant. För instrument som sitter direkt i reningsprocessen (till exempel syre och ammonium) är underhåll och kontroll extra viktigt eftersom miljön gör att givarna snabbt blir smutsiga, vilket är den vanligaste orsaken till felaktiga mätvärden. Typiskt underhåll för instrument anges i Avsnitt 10.4.6.

Alla instrument som används för styrning bör kontrolleras regelbundet. Syregivare kan till exempel kontrolleras mot ett handhållet instrument. Ammoniumgivare kan kontrolleras mot stickprov som analyseras på labb. Vid kontroll av instrumentet är det viktigt att känna till vilka faktorer som kan störa mätningen och vilken noggrannhet som kontrollmetoden har.

De två vanligaste felen som observeras hos instrument är (Ahlström, 2018):

- Drift – att mätsignalen med tiden avviker allt mer från kontrollvärdet.
- Bias – ett konstant fel.

Andra fel kan vara plötsliga hopp i signalen, avsaknad av värden eller avsaknad av variation i signalen (konstant värde). Vid reglering kan det vara meningsfullt att sätta kvalitetskrav på mätsignalen, till exempel högsta och lägsta accepterade mätvärde som regulatorn ska ta hänsyn till. Detta som en säkerhet ifall det blir något fel på givaren. Kvalitetskontrollen kan också innefatta en högsta accepterad förändring och en högsta tillåtna tid med konstant värde. Visar sig kvaliteten inte vara tillräcklig kan då reservstrategier för regleringen träda in.

Frekvensen för rengöring, kontroll och kalibrering av instrument bör gärna anpassas löpande efter behoven vid det aktuella reningsverket. Hur ofta rengöring och kalibrering behövs är en funktion av både hur snabbt drift och bias uppstår och hur mycket avvikelse som kan accepteras utifrån processens mål.

För att säkerställa en driftsäker styrning är det viktigt att ha en dokumenterad underhållsplan för de instrument som ingår i styrningen. Det finns stora fördelar med att arbeta med prioritering av underhåll på ett systematiskt sätt för att säkerställa att de viktigaste instrumenten underhålls i situationer där det är tids- eller personalbrist.

Mer information om instrumentering med rekommendationer kring hur arbetet med instrument kan läggas upp och prioriteras finns att läsa i SVU-rapporten "Instrumentera rätt på avloppsreningsverk" (Andersson et al., 2019).

Med ökad grad av automation minskar arbetet med manuell övervakning och styrning av processen. Samtidigt ökar behovet av kontroll, underhåll och kalibrering av instrument. Det är därför intressant att automatisera feldetektion vilket skulle kunna minska det manuella arbetet ytterligare. Metoder håller på att utvecklas för att exempelvis övervaka igensättningar av syregivare baserat på andra uppmätta data för att avgöra när givaren behöver rengöring (Carlsson & Zambrano, 2016; Samuelsson et al., 2018, 2017).

9.12 Sammanfattning

När det gäller styrning av luftningsanläggningen är det mest centralt att utformning och instrumentering gör det möjligt att reglera mängden luft till anläggningen. I större anläggningar som inte är totalomblandade behöver varje zon kunna regleras separat. Styrning mot halten av löst syre i bassängen kan bli mer robust och energieffektiv med en kaskadreglering där syrehalten styr ett börvärde för luftflödet som i sin tur regleras med en reglerventil. Styrning av flexibla zoner med både luftare och omrörare liksom intermittent luftning kan öka flexibilitet och energieffektivitet.

På mindre anläggningar, med en enda luftad volym, kan det vara lämpligt med en styrning av blåsmaskinens frekvens direkt mot halten av löst syre. Genom att ingen reglerventil behövs undviks energiförlust

på grund av tryckfall över denna. Denna strategi har även fördelar på större anläggningar om utformningen gör det möjligt med en blåmskin per luftad bassäng.

På anläggningar med kväverening blir onlinegivare för ammonium allt vanligare. De kan användas för att med överordnad ammoniumåterkoppling reglera börvärden för syrehalten och därmed spara energi när belastningen av kväve är låg. En annan energibesparande styrstrategi är MOV som innebär att trycket i systemet anpassas till luftbehovet så att onödig strypning undviks.

Ändamålsenlig och väl fungerande styrning är mycket viktig för energieffektiv luftning. Det är också viktigt att vara medveten om att en ökad grad av styrning baserad på givardata leder till att behovet av kvalitetkontroll och underhåll av givare blir större.

10 Drift och underhåll

En luftningsanläggning designas för att ge låga kostnader för drift och underhåll med hänsyn till en rimlig nivå på den initiala investeringen. Möjligheterna till en energieffektiv drift är således till viss del inbyggd i utformningen, men det finns samtidigt alltid möjligheter att påverka olika aspekter av driften. Det finns också ett antal möjligheter att följa upp anläggningens drift och på så sätt utvärdera driftsätt eller få indikation om när det kan vara dags för visst underhåll. Dessa aspekter, liksom vilka typer av underhåll som kan behövas i luftningsanläggningens olika delar, kommer att beskrivas i detta kapitel.

10.1 Drift

Den driftstrategi som tillämpas är i första hand anpassad för att uppnå de reningskrav som anläggningen har med den aktuella utrustningen för luftning. Först därefter, i konkurrens med andra prioriteringar, kommer strävan att minimera energianvändningen för luftning utan att orsaka andra oönskade bieffekter. Flera faktorer som tidigare diskuterats påverkar energianvändningen vid luftning:

- Nitritifikation och denitrifikation
- Slamåldern
- Halten av löst syre
- Luftflödet per luftare eller luftaryta
- Graden av igensättning och åldrande
- Blåsmaskinens effektivitet i den aktuella driftpunkten

Nitritifikation ökar behovet av syre medan fördenitrifikation sänker det samma (Avsnitt 7.2). En högre slamålder ökar behovet av syre, men medger ökade möjligheter för mikroorganismerna att bryta ned ytaktiva ämnen och ökar därför samtidigt syreöverföringseffektiviteten. Dessa faktorer styrs normalt i första hand av reningsverkets övergripande driftstrategi. Samtidigt är det värdefullt att vara medveten om hur de även påverkar energianvändningen för att ha möjligheten att väga in detta som en del i driftstrategin. En alltför låg slamålder bör undvikas eftersom det kan leda till låg syreöverföring (lågt α). Tillämpas kväverening, som i sig kräver relativt hög slamålder, bör det undvikas att slamåldern är i onödan hög utöver vad som krävs med tanke på utgående halter. Vid gynnsamma temperaturer sommartid kan det finnas mer utrymme att minska behovet av syre genom en lägre slamålder. Detta illustreras i Exempel 10.1.

Den tillämpade halten av löst syre styrs också normalt i första hand baserat på reningsprestandan. Reningssyften som påverkas av löst syrehalt är ofta att uppnå tillräcklig grad av nitritifikation och/eller undvika dåliga slamegenskaper eller finsuspenderat material som kan försvåra separation i sedimenteringen och ge förhöjda halter organiskt material i utgående behandlat vatten.

Att upprätthålla den halt av löst syre som krävs för tillfredställande rening är att betrakta som en normal och oundviklig driftkostnad. Samtidigt ska det undvikas att driva anläggningen vid en högre halt av löst syre än nödvändigt eftersom det innebär en onödig energianvändning (Avsnitt 7.3.1). Det kan därför vara en bra idé att testa och utvärdera drift vid lägre syrehalt under en period för att fastslå om börvärdet kan sänkas permanent. Inte sällan kan lägre koncentration än vad som konventionellt betraktas som en säker nivå, nämligen 2 mg/l, tillämpas utan problem. Med de flesta typer av luftare innebär samtidigt det lägre luftflöde som används för att driva processen vid en lägre syrehalt att SOTE ökar. På så vis minskar luftflödet och energianvändningen ytterligare.

Liksom design och utformning ska även driften av luftningssystemet sträva efter låga luftflöden per luftare eller per luftaryta, för att maximera SOTE. Den utformade trappningen är i bästa fall väl anpassad för den typiska belastningen så att detta uppnås. Men börvärdena för halterna av löst syre i på varandra följande zoner kan också styras för att påverka driften mot lägre luftflöden per luftare. Det är vanligt att lägre syrehalter tillämpas nedströms, framförallt i den sista zonen. En anledning till detta är att vid fördenitrifikation undviks på så sätt att syre tillförs den anoxiska zonen med den interna recirkulationen av nitrat. En lägre syrehalt i tidigare zon kan vara ett sätt att öka SOTE i denna zon och samtidigt förflytta behovet av syre nedströms för att fördela ut det jämnare över anläggningen. Samtidigt måste då förstås säkerställas att ingen oönskad bieffekt uppstår som exempelvis syretillförsel i en zon för fördenitrifikation i samband med nitatrecirkulering. Effekter av ändrade syrehalter illustreras i Exempel 10.2. För Himmerfjärdsverket visade simuleringar att en stigande syreprofil över anläggningen var energimässigt fördelaktigt jämfört med en mer typisk avtagande profil (Andersson, 2012).

Priset för el är rörligt över dygnet och ofta högre under de perioder då reningsverken tar emot högst belastning (Aymerich et al., 2015; Sund, 2019). Det gör att minskningen i kostnad vid en elenergibesparing kan vara större än bara besparingen i energi (kWh) om den huvudsakligen sker när belastningen är hög. Vidare har avloppsreningsverk ofta effektabonnemang. Det innebär att kostnaden påverkas av det maximala effektuttaget, utöver själva energin (kWh). Med ett sådant abonnemang finns ytterligare incitament att minska topparna i elanvändning för att minska kostnaden för el.

Vid kväverening kan alltför låga halter av löst syre leda till ofullständig nitrifikation så att endast till nitrit och inte nitrat uppnås. Dessutom kan alltför låga halter av löst syre under vissa omständigheter leda till förhöjd avgång av lustgas (se Avsnitt 9.9). Då lustgas har en mycket kraftfull påverkan på klimatet är detta viktigt att undvika, men dessvärre också svårt att förutsäga.

10.1.1 Förvaltning av driftinstruktioner

Det är viktigt att ha ett väl fungerande system för upprättande, revision och lagring av anläggningens driftinstruktioner. På så sätt kan erfarenheter

från drift som gäller energieffektivitet förvaltas och bevaras oberoende av omsättning inom personalen. Det är också viktigt att lyfta upp och prioritera de arbetsuppgifter som rör dokumentation och förvaltning av driftinstruktioner för till exempel reningsverkets processingenjörer och tekniker.

Exempel 10.1

Driftstrategier för minskad energianvändning

Vid Koholmen avloppsreningsverk i Karlskrona kommun (45 000 pe) har möjligheterna att anpassa driftstrategierna för lägre energianvändning utretts. Anläggningen drivs för biologisk kväverening, är relativt lågt belastad och har goda marginaler till gällande utsläppsvillkor 12 mg N/l och 0,3 mg P/l.

Enligt initiala beräkningar uppskattades att slamåldern kunde sänkas genom att sänka slamhalten till ungefär hälften. Samtidigt föreslogs en minskad intern recirkulering av nitratrikt vatten. För att tillgodose tillräcklig denitrifikation skulle den anoxiska volymen ökas genom att två flexibla zoner drevs oluftade istället för en som i nuläget. Den potentiella energibesparingen med dessa åtgärder uppskattades till hela 210 000 kWh/år.

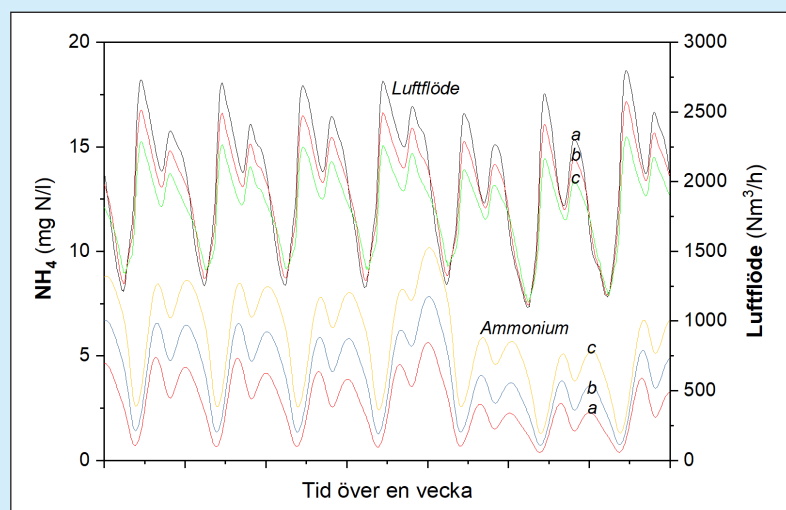
Även om en så stor besparing ansågs svår att uppnå i praktiken med hänsyn till driftsäkerhet och dynamiken i belastning, ledde utredningen till planer på ett program för systematisk test och stegvis utvärdering av ändringar i driftsätt. Ändringar kommer då att ske med försiktighet, som att en sänkt slamålder i första hand utvärderas under sommartid.

Exempel 10.2

Effekter av ändrade syrehalter (simulering)

Här följer en jämförelse av reningsresultat och energianvändning vid olika börvärden för löst syrehalt. Jämförelsen är baserad på samma processmodell som i Exempel 8.5–7 och luftarsystemet System B (542 luftare/linje). De halter av löst syre som tillämpades där, nämligen 2,0 mg/l i den första och andra luftade zonen och 1,5 mg/l i den tredje utgör ett basfall.

En minskning av syrehalterna med 0,5 mg/l i alla zoner till 1,5/1,5/1,0 mg/l ledde till en något försämrad nitrifikation (0,6 mg N/l högre utgående ammonium) men samtidigt något förbättrad denitrifikation. Den genomsnittliga halten av utgående totalkväve blev därmed endast 0,2 mg/l högre än i basfallet (2,0/2,0/1,5 mg/l) och den uppskattade energibesparingen 4 % (12 000 kWh/år). En ytterligare sänkning, till 1,0 mg/l i alla zonerna, ledde till en mer tydlig försämring av nitrifikationen med 1,2 mg N/l högre utgående ammonium i genomsnitt och perioder med ammoniumhalter över 8 mg/l vintertid. Den uppskattade energibesparingen blev i detta fall 9 % (29 000 kWh/år).



Figur 10.1 Koncentrationer av ammonium och luftflöde för basfallet 2,0/2,0/1,5 mg/l syre (a), lägre syrehalter - 1,5/1,5/1,0 mg/l (b) och lägst syrehalter - 1,0 mg/l (c).

Figur 10.1 visar också att den stora minskningen i luftflöde skedde under de högbelastade perioderna vilka inträffar när elpriset vanligtvis är som högst. Det innebär att kostnaden för elen mycket väl kan minska mer än den genomsnittliga energibesparingen.

Tabell 10.1 Effekter av minskade halter av löst syre (DO) enligt simuleringar.

	DO OX1	DO OX2	DO OX3	NH ₄ ⁺ -N	N-tot	Q _L per luftare	Minskad elanv.	Minskad elanv.
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	Nm ³ /h/st	MWh/år	%
Basfall	2,0	2,0	1,5	1,3	8,2	1,9	-	-
Lägre	1,5	1,5	1,0	1,9	8,4	1,8	12	4
Lägst	1,0	1,0	1,0	2,5	8,8	1,7	29	9

Den minskade energianvändningen var i båda fall dels en direkt effekt av det lägre syreöverskottet i bassängen, dels en effekt av högre SOTE, tack vare lägre luftflöde per luftare (Tabell 10.2). De lägre syrehalterna ledde till att anläggningen oftare blev begränsad av minimiluftflödet, från 1 % av tiden i basfallet till 6 % av tiden i OX1 och 2 % av tiden i OX2 med syrehalten 1,0 mg/l. De lägre syrehalterna ledde även till att belastningen försköts nedströms i anläggningen från AOR-fördelningen 49/31/20 till 44/31/25.

10.2 Uppstart

Vid uppstart av en luftningsanläggning har följande steg rekommenderats innan en tom luftningsbassäng med bottenluftning börjar användas (Mueller et al., 2001):

- Kontrollera luftledningar och luftarsystem och laga eventuella trasiga rör, anslutningar och dylikt.
- Kontrollera att luftarna är installerade enligt tillverkarens instruktioner. Exempelvis att luftarna är åtdragna och korrekt orienterade, packningar och O-ringtätningar är elastiska och sitter ordentligt, luftarsystemet är i jämn nivå och att eventuella bultar justerats korrekt.
- Följ tillverkarens anvisningar för att mata luft till luftarsystemet innan de är dränkta. Tillämpa minst det rekommenderade minsta luftflödet per luftare.
- Fyll luftningsbassängen till en nivå av ca 30 cm ovanför luftarna. Observera luftfördelningen och kontrollera om det finns några läckor eller ojämn fördelning av luften. Rätta till eventuella problem.
- Fortsätt fylla luftningsbassängen under övervakning och justering av luftflödet. En gradvis ökning av luftflödet kommer att krävas eftersom ökningen i vattennivån ökar mottrycket.
- Öppna ventiler för tömning av kondens, en åt gången, tills luftnings-systemet är fritt från fukt.
- Justera flöden för ingående avloppsvatten, returslam och luftflödet för att möta de önskade driftsförhållandena.

För mekaniska bottenluftare kan proceduren för uppstart ha liknande syften och tillvägagångssätt. Leverantörens anvisningar ska följas och kan skilja sig mellan olika typer av produkter.

I samband med driftsättning av en ny anläggning bör relevanta kontroller av prestandan göras för att bekräfta överensstämmelse med vad som angetts i upphandlingsdokumenten. Vilka kontroller som är aktuella beror på om installationen gäller luftarsystem, blåsmaskiner eller båda delar. Detta beskrivs närmare i Kapitel 11 och Avsnitt 12.11.

Ifall en luftningsanläggning ska vara avstängd mer än två veckor är en allmän rekommendation att bassängen ska tömmas och rengöras (Mueller et al., 2001). Efter rengöring bör bassängen sedan fyllas till ungefär 1 m över luftarna för att skydda mot UV-ljus och stora variationer i temperatur. Vid risk för frysning krävs extra försiktighetsåtgärder för att förhindra skador på utrustningen.

När en bassäng är tömd är det lämpligt att passa på att inspektera luftarsystemet och bedöma status och skick för luftare och dess membran. Några erfarenheter från luftarbyte presenteras i Exempel 10.3.

Exempel 10.3

Genomförande av luftarbyte - en jämförelse av eget och leverantörens utförande

Kalmar avloppsreningsverk (ca 70 000 pe) byggdes om för kväverening 1997 och då byggdes befintlig aktivslamanläggning om till två linjer med slam-anox, fördenitrifikation och luftningszoner. Samtidigt byggdes två SBR:er om vardera 2 400 m³. Dessa behandlar ett flöde

som motsvarar ungefär en tredjedel av medelbelastningen. Cyklerna i SBR:erna är 6 timmar med faserna luftad fyllning, luftning, sedimentering och dekantering. Vardera SBR har 977 st luftare placerade på tre fjärdedelar av botten. En fjärdedel av bottenytan, där omröraren är placerad, är utan luftare.

Under 2016–2017 var det dags att byta luftarna i SBR:erna och det genomfördes på två olika sätt i de två reaktorerna. Under 2016 byttes luftarnas membran i den ena SBR:en genom att verkets egen personal i samarbete med en extern VVS-firma utförde arbetet med tömning och byte av membran. I samband med arbetet gick en del tallrikar/koppar och ringar sönder och nya behövde beställas för montage. Leveranstiden för dessa innebar en fördröjning av slutförandet.

Följande år, när turen var kommen till den andra SBR:en, byttes istället luftarsystemet vid botten helt och leverantören för det nya luftarsystemet anlätades för montaget. De gamla rören med luftare togs bort genom att de kapades vid stamledningen som var monterad på bottenplattan. De nya rören prefabricerades av leverantören som monterade dem, anslöt dem till stamledningen och monterade nya tallrikar, ringar och membran för alla luftare på rören.

Genomförandet med den första SBR:en i egen regi tog 7,5 veckor och kostnaden uppskattades till 700 000 SEK inklusive egen tid. Leverantörens genomförande med den andra SBR:en tog 3,5 veckor och kostade ca 900 000 SEK. Sammantaget ansågs på reningsverket att alternativet att anlita leverantören var en mycket smidigare lösning som väl motiverade en något högre kostnad. Ett väsentligt kortare driftstopp var också en viktig fördel eftersom anläggningen är högt belastad.

10.3 Uppföljning

För att ha en god överblick över luftningssystemets prestanda är det viktigt med regelbunden uppföljning. Daglig tillsyn och uppföljning är till för att säkerställa att driften sker på avsett vis och för att bedöma om någon förändring i driftsätt behövs. Sådan daglig tillsyn kan till exempel inkludera kontroll av:

- Halterna av löst syre i relation till börvärden
- Blåsmaskiners frekvens och dygnseffekt
- Utgående halt av ammonium om onlinegivare finns.
- Utgående halt av BOD om daglig analys görs.
- Luftflöde
- Tryck
- Ventillägen

Det är också värdefullt att följa upp vissa parametrar systematiskt över längre tid. På så sätt kan det upptäckas ifall några förändringar har skett i systemet som påverkar energianvändningen. Uppföljning behövs också

för att utvärdera om en förändring i driftsätt har haft den avsedda effekten eller inte.

Uppföljning kan vara ett medel för att driva på arbetet och öka engagemanget för en energieffektiv luftning. Genom att lyfta upp och visualisera ett nyckeltal som till exempel elanvändning i förhållande till syrebehov (Avsnitt 10.3.4), kan det göras tydligt hur anläggningen ligger till idag med avseende på energieffektivitet. Då kan utvecklingen i detta nyckeltal följas, om den förbättras efter någon åtgärd eller försämras över tiden vilket kan föranleda utredning och åtgärd. Nyckeltalet kan också kopplas till verksamhetens miljömål.

10.3.1 Visuell bedömning

En visuell bedömning av bubblornas utseende och rörelsemönster vid ytan kan indikera att något inte är som det ska med luftningssystemet. Ovanligt stora bubblor eller kraftig turbulens på ett enskilt ställe i anläggningen kan tyda på att det finns någon trasig luftare eller brott på ett rör. Detta syns i så fall tydligare med relativt grunda bassänger. Med djupare bassänger blir det en ökande svårighet att urskilja mindre fel vid ytan.

Större bubblor generellt i anläggningen över tid kan tyda på åldrande eller igensättning av membranen.

10.3.2 Tömning av kondensat

När den varma komprimerade luften från blåsmaskinerna passerar genom luftningssystemet kyls den av i bassängerna. Då bildas kondens som behöver tömmas ut ur luftningssystemet regelbundet. Detta är samtidigt en möjlighet att kontrollera luftningssystemets status. Fel i form av trasiga luftare eller rörbrott leder till att slam läcker in i luftningssystemet. Det syns då vid tömning av kondensatet som då innehåller slam istället för rent vatten som vid ett intakt system.

10.3.3 Luftflöde

Genom att bevaka luftflödet relativt behovet av syre i processen kan luftarsystemets prestanda följas nedströms blåsmaskinerna, det vill säga över själva luftarna. Data för luftflödet kan komma från separat luftflödesmätare eller från de som finns inbyggda i vissa blåsmaskiner.

Det mest rigorösa sättet att följa luftflödet över tiden är att gå tillväga på samma sätt som vid dimensionering av ett nytt luftningssystem. Behovet av syre i processen kan beräknas utifrån belastningen av syreförbrukande ämnen i avloppsvattnet och uttryckas i form av AOR. Genom att anta eller uppskatta α -värdet kan sedan SOR bestämmas. Om SOTE är känt eller kan uppskattas kan sedan det luftflöde som teoretiskt borde krävas räknas ut (se Avsnitt 8.2). Detta beräknade luftflöde kan då jämföras med det verkliga. En avvikelse mellan dessa två kan exempelvis tyda på att SOTE försämrats av någon anledning.

Det beskrivna tillvägagångssättet är dock lite omständligt och kräver flera antaganden. Ifall syftet är att kunna följa relativa förändringar i luftningssystemets prestanda över tiden kan enklare tillvägagångssätt användas.

Ett sådant förenklat sätt är att beräkna syreöverföringseffektiviteten i processförhållanden (OTE) genom att AOR divideras med massflödet av syre till processen. Massflödet av syre fås genom multiplikation av det volymetriska luftflödet (Q_L) med $0,298 \text{ kg O}_2/\text{Nm}^3$. I detta sammanhang kan förändringar i luftens densitet beroende på temperaturen försummas. Då erhålls kvoten:

$$\text{OTE} = \frac{\text{AOR}}{Q_L \cdot 0,298} \left[\frac{\text{kg O}_2}{\text{kg O}_2} \right] \quad (10.1)$$

En förändring i OTE över tiden kan tyda på en förändring i luftarnas prestanda (SOTE) av någon anledning. Men eftersom OTE också påverkas av α -värdet finns det också en möjlighet att förändringen beror på en ändrad sammansättning i det ingående avloppsvattnet. OTE påverkas också av halten löst syre. Ifall halten av löst syre har varierat över tiden, på grund av att olika börvärden har tillämpats eller att börvärden inte har hållits, kan detta kompenseras för. I så fall kan OTE korrigeras för den verkliga halten av löst syre, vilket brukar kallas effektivitetsfaktorn (EF) (US EPA, 1989):

$$\text{EF} = \frac{\text{AOR}}{Q_L \cdot 0,298} \cdot \frac{C_\infty^*}{C_\infty^* - C} \left[\frac{\text{kg O}_2}{\text{kg O}_2} \right] \quad (10.2)$$

där C är den aktuella koncentrationen av löst syre och C_∞^* är mättnadskoncentrationen av löst syre i bassängen vid aktuell temperatur (mg/l). Ytterligare förenklningar görs ibland genom att bara relatera luftflödet till belastning eller mängd avskild kväve eller BOD. Detta ger dock en begränsad bild och det är mer fördelaktigt att räkna ihop syrebehovet för kväve och BOD till AOR.

En alternativ metod för uppföljning av luftningssystemets prestanda är att mäta syrehalten i den utgående luften som lämnar bassängens yta. För detta krävs särskild utrustning i form av bland annat en flytande huv som samlar upp den utgående luften. Metoden kallas "off-gas"-mätning och beskrivs i Avsnitt 11.3.2.

10.3.4 Elanvändning

Genom att följa upp elanvändningen för luftningen fås en bild av prestandan för hela systemet och inte bara luftarna eftersom blåsmaskiner då också inkluderas. Detta kräver att elanvändningen för blåsmaskinerna mäts och loggas separat.

Liksom luftflödet, relateras elanvändningen bäst till processens totala behov av syre i form av AOR. Genom att beräkna kvoten mellan AOR och effektanvändningen (P) erhålls luftningseffektiviteten vid processförhållanden (AE):

$$\text{AE} = \frac{\text{AOR}}{P} \left[\frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}} \right] \quad (10.3)$$

Även denna kvot kan korrigeras för eventuella variationer i löst syrehalt:

$$AE_{DO} = \frac{AOR}{P} \cdot \frac{C_{\infty}^*}{C_{\infty}^* - C} \left[\frac{\text{kg O}_2}{\text{kWh}} \right] \quad (10.4)$$

Om variationerna i temperatur är betydande kan korrigering även göras för detta enligt sambandet i Avsnitt 8.2. Då erhålls luftningseffektiviteten i processvatten, men i övrigt under standardförhållanden (α SAE). AE är tillsammans med EF användbara verktyg för att följa en process över tiden. De kan antingen ge information om någon oönskad förändring i systemet har skett eller om en avsiktlig förändring i processen har fått den effekt som eftersträövades.

Kvoten mellan elanvändning och luftflöde kan också vara en relevant parameter att följa upp (se Avsnitt 11.1). Denna parameter speglar blås-maskinens prestanda i det aktuella systemet. Ett onormalt värde kan också indikera ett brott på luftningssystemet som orsakat ett minskat mottryck. Om både luftflöde och elanvändning mäts och loggas är denna parameter enkel att ta fram och kräver inga analyser och beräkningar som AOR.

10.3.5 Tryck

Syftet med att följa upp luftningssystemets tryck är att säkerställa att luften inte hindras i onödan på sin väg från blåsmaskin till bassängen. Det vill säga att den förväntade mängden luft når reningssteget utan att blåsmaskinerna måste arbeta onödigt hårt.

Eftersom blåsmaskiner normalt styrs mot ett tryck, är trycket en parameter som vanligtvis mäts och loggas i reningsverkets styrsystem. Det gör det relativt enkelt att bevaka och följa upp eventuella förändringar i systemets mottryck ifall en styrstrategi med variabelt mottryck används (MOV). Eftersom tryckgivaren oftast sitter i luftningssystemets huvudledning är det summan av tryckfallet över rör, givare, ventiler, luftare och vattenpelaren som mäts.

Mottryckets dynamiska del påverkas av flödet så om förändringar i trycket ska följas över tid, måste detta göras vid ett och samma flöde och ventilöppningsgrad. Ifall mottrycket vid ett visst flöde och ventilöppningsgrad ökar över tiden, tyder detta på någon förändring i luftningssystemet som påverkar energianvändningen. Det kan till exempel röra sig om åldrande eller igensättning av membran eller fel på någon ventil.

Ifall motionering av membran utförs regelbundet (se Avsnitt 10.4.1.1) kan detta vara ett tillfälle för uppföljning av mottrycket. Motioneringen sker vanligtvis vid ett förutbestämt högt flöde. Detta flöde kan fungera som en referenspunkt så att uppföljningen av trycket sker för den period som motioneringen sker.

Det kan samtidigt vara lämpligt att registrera blåsmaskinernas effekt vid dessa förhållanden. Då skapas en bild av tryck, ventilöppningsgrad, flöde och effekt som tillsammans ger en bild av hela luftningssystemets prestanda och i synnerhet eventuella förändringar.

I ett system som styrs mot ett konstant tryck blir det istället relevant att följa ifall det förväntade flödet av luft kan uppnås kontinuerligt över tiden.

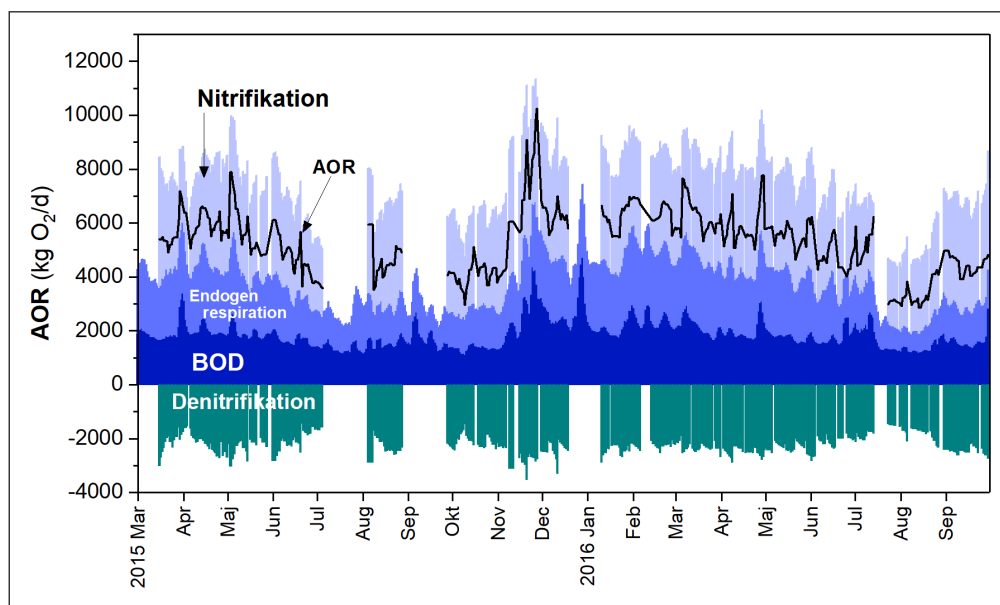
Ifall trycket successivt måste ökas för att upprätthålla det önskade luftflödet är detta ett tecken på att något hindrar tillförseln av luft.

10.3.6 Exempel på uppföljning

I detta avsnitt ges exempel på hur uppföljning av luftningssystem kan genomföras och vilken typ av information som kan fås. Data som har använts kommer från Källby avloppsreningsverk i Lund (VA SYD) och Ryaverket i Göteborg (Gryaab).

För att beräkna AOR behövs i första hand data på BOD-reduktion och slamhalt, samt nitrifikation och denitrifikation om kväverening tillämpas. Slamhalten används för att uppskatta slammets endogena syrebehov. Beräkning av syrebehovet för nitrifikation kräver att hänsyn tas till mängden kväve som assimileras i slammet (normalt 8–12 % av VSS). Vissa bidrag till AOR kan vara så små att de för att förenkla beräkningarna bör försummas. Det kan vara värt att göra en inledande bedömning av vilka bidrag som är försumbara. Det kan till exempel gälla kemisk oxidering av järn, bidrag från interna strömmar eller syre i utgående vatten. Om det inte finns analysdata för avloppsvattnet efter försedimentering kan avskiljningsgraden över försedimenteringen uppskattas baserat på belastningen (Tchobanoglous et al., 2014).

När de huvudsakliga bidragen till AOR summeras över tiden för en process med fördenitrifikation kan det se ut som i Figur 10.2 (Källby avloppsreningsverk). Beroende på syftet med uppföljningen kan data jämnas ut genom att glidande medelvärden beräknas. Med längre intervall för medelvärden minskar genomslaget av kortvariga variationer, medan långsiktiga trender kan bli tydligare att se. I Figur 10.2 har fyra dygns glidande medelvärden tillämpats. Figuren visar hur belastningen varierade



Figur 10.2 Uppföljning av det verkliga syrebehovet (AOR) i en process med fördenitrifikation på Källby avloppsreningsverk. Denitrifikation ger ett negativt bidrag till AOR medan belastning av BOD, nitrifikation och slammets endogena respiration bidrar positivt till AOR.

över tiden. I detta fall var belastningen lägre under sommartid än under resten av året. Det kan också utläsas att slammets endogena syrebehov, som är direkt relaterat till slamhalten, under vissa perioder var relativt högt. Detta berodde på att slamhalten hölls ovanligt hög under dessa perioder på grund av tillfälliga begränsningar i slamhanteringen.

Utifrån AOR går det att räkna ut vad luftflödet teoretiskt borde vara, om antaganden görs för α och SOTE. I detta fall antogs α vara 0,5 (högbelastad aktivslamprocess på Ryaverket) och SOTE 48 % vid 9,6 m vattendjup. Information om temperatur, syrehalt och syrets mättnadskoncentration behövs också. Det beräknade luftflödet kan sedan jämföras med det verkliga, uppmätta luftflödet över tiden, vilket visas i Figur 10.3a. Båda kurvorna är utjämnade med glidande medelvärden. Trenderna för det beräknade luftflödet följer i stora drag det verkliga. Under vissa perioder finns dock väsentliga avvikelser vilka är skuggade i figuren. I synnerhet är det några längre perioder där det verkliga luftflödet överstiger det beräknade. Det kan bero på något av följande:

- Syrebehovet i processen understiger ibland luftningssystemets minsta kapacitet (6 000 Nm³/h).
- Det verkliga α -värdet är periodvis lägre än vad som antagits.
- Rengöring av syregivare är otillräcklig.

På motsvarande sätt kan perioder där det beräknade luftflödet är högre än det verkliga förklaras med att α -värdet då varit högre än normalt. Detta skulle till exempel kunna bero på förändring i industribelastning eller ändrad slamålder.

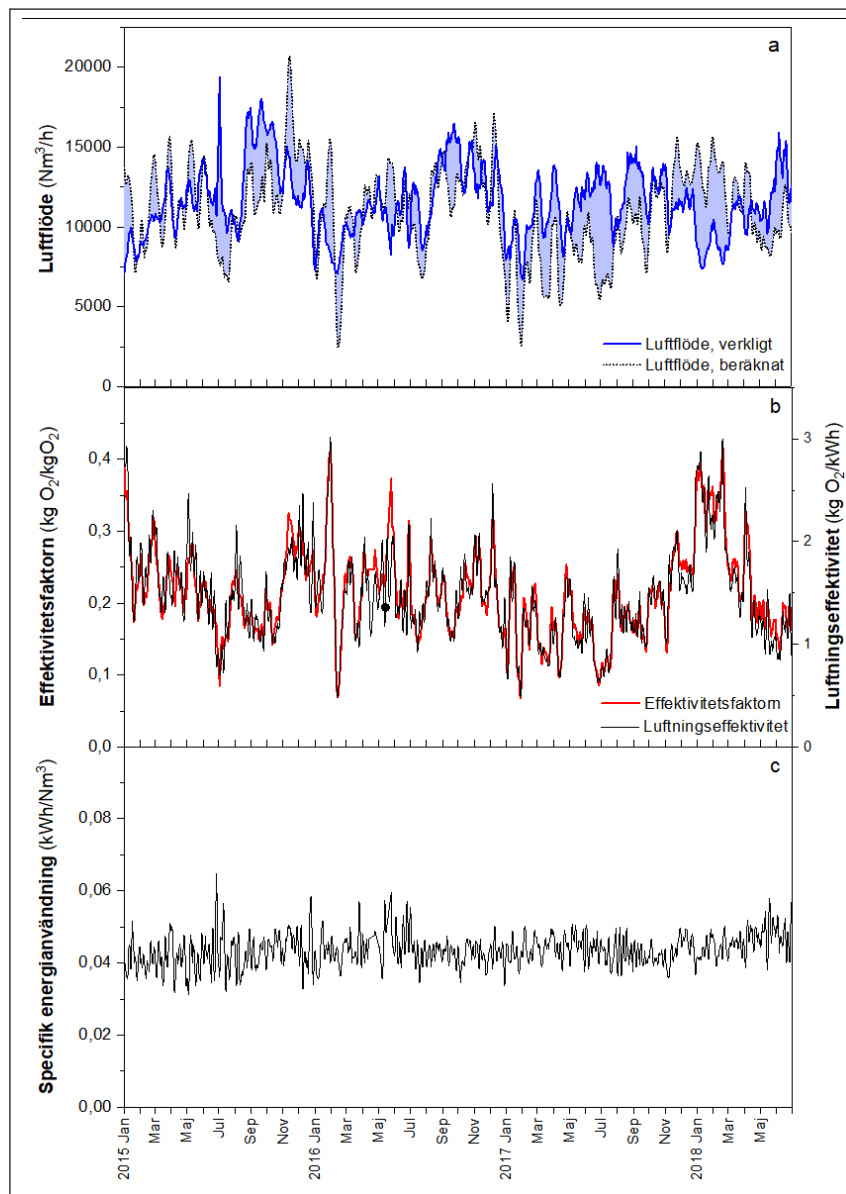
Samvariationen mellan beräknat och verkligt luftflöde över den aktuella tidsperioden tyder inte på någon gradvis försämring av prestandan på grund av till exempel åldrande eller igensättning av luftare.

Som alternativ till att utifrån AOR beräkna SOR och luftflödet kan istället effektivitetsfaktorn beräknas (Avsnitt 10.3.3). Som illustreras i Figur 10.3b ger denna parameter liknande information som en jämförelse av verkligt och beräknat luftflöde. De perioder då det verkliga luftflödet är högre än det beräknade är systemets effektivitet låg. Detta speglas i låga värden på effektivitetsfaktorn vilket inträffar sommartid samtliga år. När det verkliga luftflödet istället är lägre än det beräknade är effektivitetsfaktorn hög (november 2015 – januari 2016 och november 2017 – februari 2018). Genom att beräkna effektivitetsfaktorn kan liknande information erhållas med färre antaganden och beräkningar.

Blåsmaskinernas effektanvändning i relation till AOR, det vill säga AE är också illustrerad i Figur 10.3b. Trenden i AE sammanfaller nästan helt med effektivitetsfaktorn. Det innebär att variationerna i systemets effektivitet över tiden är relaterade till luftarsystemets prestanda med avseende på syresättning och inte till blåsmaskinernas prestanda.

Blåsmaskinerna har en relativt jämn prestanda över tiden uttryckt som specifik energianvändning, vilket innebär energi i relation till volym luft levererad (Figur 10.3c). Möjligen kan en tendens till ökning i specifik

energianvändning skönjas under det sista undersökta halvåret. Det skulle kunna bero på ett ökat mottryck i systemet. I så fall skulle detta kunna bekräftas genom att studera trycket (om variabelt tryck tillämpas) eller förhållandet mellan tryck, flöde och ventilöppningsgrad (vid konstant tryck).



Figur 10.3 Uppföljning av prestanda för ett luftningssystem på Ryaverket. (a) Luftflöde som uppmäts respektive beräknas utifrån belastning av AOR. (b) Effektivitetsfaktorn (EF) som illustrerar luftarsystemets prestanda nedströms bläsmaskiner och luftningseffektivitet (AE) som illustrerar hela luftarsystemets prestanda från kabel till vatten. (c) Bläsmaskinernas prestanda i systemet i form av specifik energianvändning.

10.4 Underhåll

Samtliga delar av ett luftningssystem kan behöva underhåll. I detta avsnitt presenteras behov och metoder för underhåll i luftningssystemets olika delar.

10.4.1 Finblåsiga luftare

Finblåsiga luftare påverkas över tid på ett sätt som har inverkan på prestandan. Med membranluftare kan egenskaperna för materialet i membranen successivt förändras, till exempel genom att vissa ämnen i materialet, som mjukgörare, lakas ur vid användningen. Detta betecknas som åldrande och låter sig inte avhjälpas genom rengöring eller förändring i driftsätt.

På många membranluftare kan endast membran bytas och vissa leverantörer rekommenderar att membran till alla luftare byts enligt fasta tidsintervall. Sådana intervall brukar anges till var 5:e till 10:e år. Det finns också möjlighet att testa prestandan för några luftare och jämföra med nya i laboratoriemiljö (Avsnitt 11.2.2).

Men membran och andra typer av finblåsiga luftare kan också drabbas av igensättning som påverkar prestandan (se Exempel 10.4). Igensättningen kan vara av olika slag, kemisk såväl som biologisk, och ha olika påverkan som ökning av mottryck och/eller försämring av SOTE. Huruvida igensättning sker, och i så fall med vilken hastighet, tycks vara specifikt för varje anläggning (se mer angående igensättning i Avsnitt 7.3.11).

Till skillnad mot åldrande av membran, kan igensättning motverkas genom olika typer av rengöring. Prestandan med avseende på syreöverföring och energianvändning kan mycket väl återgå till sin ursprungliga nivå efter underhåll.

Det finns ett antal metoder för att rengöra finblåsiga luftare genom att avlägsna igensättning som har uppstått vid drift. Även om luftare kan tas ur bassängen för rengöring är detta relativt omständligt och kostsamt varför det istället föredras att rengöringen sker med luftarna på plats. Rengöring kan delas in i metoder som kräver eller inte kräver avbrott i driften av processen. Följande metoder har beskrivits (US EPA, 1989):

Metoder som inte kräver avbrott i driften:

- Motionering av membran
- Tillsats av syra i luftningssystemet

Metoder som kräver avbrott i driften:

- Avspolning med vatten
- Tvätt med syra efter tömning
- Tvätt med ånga

På svenska avloppsreningsverk verkar det vara relativt ovanligt med rengöring av luftare. Av fjorton tillfrågade verk med membranluftare, angav ett att de rengör regelbundet genom nedtömning av bassänger och avspolning vartannat år. Ett verk angav att de inom kort skulle utföra rengöring genom tillsats av syra i luftningssystemet.

Det är mycket viktigt att vara medveten om att en metod som fungerar väl för en typ av luftare kan skada en annan luftare. Därför måste leverantörens rekommendationer följas med avseende på vilken mekanisk och kemisk rengöring som är lämplig för de aktuella luftarna.

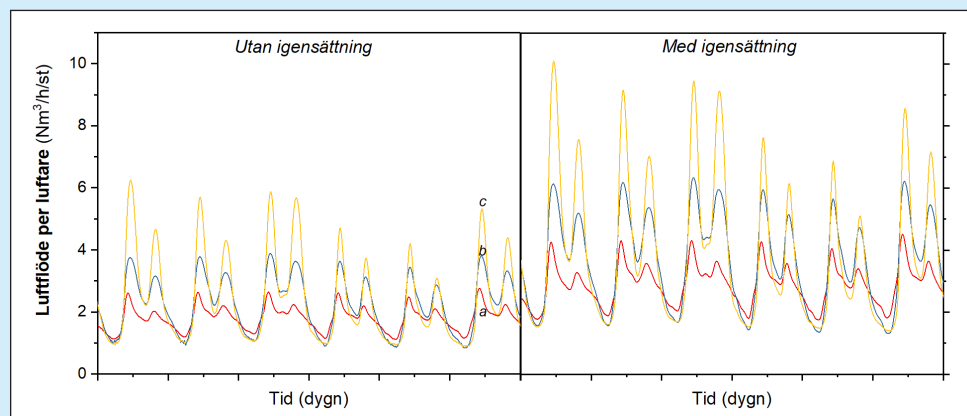
Exempel 10.4

Förlust av prestanda vid igensättning (simulering)

I följande simulering antogs att igensättning skett med 30 %. I en anläggning där igensättning tenderar att ske, är en sådan omfattning i linje med vad som tidigare observerats (se Avsnitt 7.3.11). Ibland uttrycks detta med en foulingfaktor (F) så att prestandan påverkas av produkten $\alpha \cdot F$ istället för bara α . Igensättning med 30 % innebär att F är 0,7. Denna igensättning leder till att syrebehovet i renvatten blir 43 % högre ($1/0,7$). En sådan situation jämfördes med basfallet i en simulering. Det ökade luftflödesbehovet kan förstås leda till kapacitetsbrist hos blåsmaskiner eller begränsning i högsta luftflödet för luftarna. I detta exempel antogs att tillräcklig blåsmaskinskapacitet fanns. De maximala luftflödena överskreds inte. Det innebär att börvärden för syrehalter kunde uppnås och reningsresultaten blev inte negativt påverkade.

Simuleringen visade att igensättningen ledde till 61 % högre energianvändning än i basfallet (Tabell 10.2). Detta var alltså 18 % mer än den direkta effekten från det ökade syrebehovet. Det berodde på att det ökade luftflödet som igensättningen krävde, resulterade i ca 60 % högre genomsnittligt luftflöde per luftare (Figur 10.4) och därmed lägre SOTE.

I detta fall ledde igensättningen till 200 MWh/år högre energianvändning vilket ska ställas mot kostnaden för rengöring av luftarna med till exempel syra för att återställa prestandan. Viss typ av igensättning kan också leda till ökat tryckfall över luftaren, vilket inte har inkluderats i denna beräkning.



Figur 10.4 Luftflöde per luftare i den första (a) andra (b) och tredje (c) luftade zonen enligt simuleringar.

Tabell 10.2 Effekter av igensättning.

	Luftflöde per luftare			Ökad elanv. MWh/år	Ökad elanv. %
	OX1 Nm³/h/st	OX2 Nm³/h/st	OX3 Nm³/h/st		
Basfall	1,6	2,1	2,8	-	-
Igensatt system ($F = 0,7$)	2,5	3,4	4,5	200	61

Metoder som inte kräver driftavbrott

Ett sätt att avlägsna åtminstone mer löst sittande biofilm från luftar-membran med minimalt ingrepp och utan avbrott för anläggningen är att utföra regelbunden så kallad motionering. Det innebär att luftflödet ökas till det för membranen maximala flödet under en kortare tid (5–10 minuter) så att de expanderar, därefter stängs flödet av eventuellt följt av trycksänkning för att låta dem sjunka ihop igen. Typiskt intervall för motionering är en gång per dag till en gång per vecka. Vanligen motioneras då membranen i en zon i taget i tur och ordning.

Av de avloppsreningsverk som undersöktes i denna studie tillämpade 8 av 15 automatisk motionering av membranen. Trots detta observerades vid 3 av 15 reningsverk en tydlig och 8 en möjlig försämring av luftarnas effektivitet över tiden. En amerikansk studie har visat att regelbunden motionering kunde hindra att tryckökning skedde över tid på grund av igensättning, även om minskning i syreöverföringseffektivitet inte kunde förhindras på detta sätt (Odize et al., 2017).

En av de vanligaste rengöringsmetoderna av dem som inte kräver driftavbrott innebär tillsats av syra i luftningssystemet. Saltsyra eller myrsyra kan användas och eftersom dessa är flyktiga transporteras de i gasform med luftflödet till luftarna. Luftflödet bör vara högt, nära det maximalt tillåtna, för att skapa en jämn fördelning och tillse att så många öppningar som möjligt i luftarna är öppna. Syra tillsätts tills ingen ytterligare sänkning i mottryck kan observeras. Metoden har haft god effekt, särskilt för att avlägsna de kemiska fällningar som är lösliga i sur miljö. Metoden kräver naturligtvis varsamhet och kunskap kring de risker som finns vid hantering av starka syror, och adekvata metoder för att hantera dessa. Mängden syra som krävs är inte så stor att vattnets pH i anläggningen påverkas nämnvärt. Tillämpning av metoden illustreras i Exempel 10.5. Enligt en alternativ variant fylls det avstängda luftarsystemet med en svagare lösning av flytande saltsyra i lämplig koncentration. 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). Tömnings-systemet för kondensvatten kan också användas för att avlägsna tvättlösning och sköljvatten. Metoden anses effektiv mot organiskt material och kiselsyra. Kiselsyra är en fällning som annars inte löser sig vid behandling med syra.

Metoder som kräver driftavbrott

Efter tömning av bassängen kan avspolning ske under låg- eller högtrycksstråle. Ibland kan detta ske från bassängkanten. Med dessa metoder avlägsnas slam och biofilm på luftarnas ytor. Däremot påverkas inte mer djupt sittande igensättning som i porerna särskilt mycket. Enligt en variant av denna metod lämnas ca 0,1 m vatten ovanför luftarna vid tömning av bassängen. Ett lågt luftflöde tillämpas genom luftarna medan rengöringen

sker, gärna med en högtryckstvätt med roterande munstycke (Frey & Thonhauser, 2004).

Avspolning kan kombineras med borstning av luftarytorna för att förbättra effekten. En mjuk borste brukar då rekommenderas. Det är viktigt att ingen skada uppstår i något membran, eftersom även en mindre skada sedan kan växa under drift och leda till problem. Tvätt av luftarytor med ånga kan tillämpas och har liknande effekt som avspolning med vatten.

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. Denna metod har visat sig effektiv för att avlägsna både organisk och oorganisk igensättning (Mueller et al., 2001).

Underhåll med suspenderade bärare

I processer med suspenderade bärare (MBBR) måste hänsyn tas till dessa vid underhåll som innebär tömning av bassängen eller driftavbrott. Beroende på typ av bärare och typ av luftare kan bärarna i vissa fall orsaka slitage på luftarnas membran (se Avsnitt 8.6.2). I dessa fall kan livslängden förkortas och membranen behöva bytas oftare.

När det finns flera parallella linjer på anläggningen kan bärare pumpas mellan linjer så att en linje i taget töms på bärare. Därefter kan bassängen tömmas på vatten så att underhållet kan utföras. När underhållet är färdigt kan bärarna pumpas tillbaka till den aktuella linjen. Detta tillvägagångssätt förutsätter då att fyllnadsgraderna i linjerna inte är högre än att bärare från en annan linje kan rymmas under underhållsarbetet. När bärarna pumpas är det mycket viktigt att använda en pump som inte skadar dem.

Ett annat sätt att lösa detta är att använda ett lyftbart luftningssystem som kan tas ur tanken för underhåll. Detta kan kräva särskild erfarenhet för att efter underhållet placera luftningssystemet i tanken igen med bärarna närvarande.

Exempel 10.5

Rengöring av luftare med myrsyra på Nykvarnsverket

På Nykvarnsverket i Linköping (235 000 pe) finns tre block med vardera 2–3 aktivslamlinjer med panelluftare med membran av polyuretan. Luftningen sker intermittent med omväxlande luftade faser för nitrifikation och oluftade faser för denitrifikation. Fasernas längd styrs av med hjälp av onlinegivare för ammonium och nitrat (se Avsnitt 9.5).

I ett av blocken (Bio3) observerades tilltagande svårigheter att uppnå syrebörvärden i den luftade fasen vid belastningstoppar. På grund av långsammare nitrifikation blev då de luftade faserna längre och faserna för denitrifikation otillräckliga med förhöjd nitrathalt, vilket resulterade i högre etanoldosering i efterdenitrifikationen. Ovanligt stora bubblor observerades vid ytan. Även luftflödet var högre än normalt

och högre än vad som teoretiskt borde krävas i förhållande till aktuell belastning.

Att problem med syresättning uppkom i block 3 men inte i de andra två blocken antogs ha samband med att detta block matas från botten av inloppskanalen vilket gör att sediment i större utsträckning hamnar där. Periodvis observeras svart fällning i försedimenteringen som förmodas vara järnsulfid som bildats från järnsulfat från förfällningen. Det misstänktes därför att beläggningar av bland annat järnsulfid kunde ha bildats på luftarna i block 3.

Det beslutades att rengöring med myrsyra skulle utvärderas innan några mer omfattande ingrepp gjordes. Utförandet planerades i samråd med leverantören av panelluftarna. En doseringsventil svetsades på varje nedledare i block 3. Block 3 består av tre linjer med vardera två bassänger. Det finns en reglerventil och två nedledare per bassäng. En bassäng behandlades i taget och luftflödet ställdes in på 2 000 m³/h, det vill säga 1 000 m³/h per nedledare. Myrsyra pumpades in med en membranpump från en dunk med flödet 3–4 liter per timme. Proceduren upprepades för varje zon i blocket.

Resultaten av behandlingen var att svårigheterna att upprätthålla börvärdet för löst syre blev märkbart mindre. Vissa börvärden kunde även ökas utan problem med kapaciteten. Det tillämpade luftflödet blev lägre än tidigare. Bubblornas storlek blev mindre och rörelsemönstret vid ytan såg bättre ut. Sammantaget tyder det på att igensättning hade skett och i detta fall kunde avhjälpas med myrsyratvätt. Det har däremot varit svårt att följa upp om rengöringen hade någon effekt på systemets mottryck. Svårigheten ligger delvis i att trycket styrs mot mest öppna ventil (MOV, Avsnitt 9.10.1) och varierar kontinuerligt med luftflödesbehovet.

10.4.2 Grovblåsiga luftare

Även om brott eller andra fel kan uppstå i ett grovblåst luftningssystem är det relativt ovanligt eftersom själva luftarna är robusta och enkelt utformade. Avsaknaden av såväl membran som små öppningar gör att åldrande eller igensättning knappast sker. Det gör att grovblåsiga luftare allmänt betraktas som underhållsfria. Det är också en anledning till att de oftast används för MBBR eftersom det undanröjer de utmaningar som bärarna innebär för underhåll.

10.4.3 Mekaniska bottenluftare

För mekaniska bottenluftare är det de rörliga delarna som behöver visst underhåll med några års mellanrum. Exempelvis kan oljebyte (med 1-2 års intervall) och byte av eventuella bottenlager (5-10 års intervall) behövas.

10.4.4 Blåsmaskiner

Vilket underhåll som normalt krävs för blåsmaskiner är högst individuellt beroende på typ och modell av maskin. Därför är det i första hand leverantören som ska rekommendera förebyggande underhåll.

Samtidigt kan behovet av underhåll påverkas mycket av i vilken miljö maskinen står och hur den används. Maskinens och den ingående luftens temperaturer är två sådana faktorer.

Många maskiner har filter för den ingående luften som behöver bytas regelbundet. Generellt har vissa typer av blåsmaskiner, som displacement-maskiner, slitdelar som behöver kontrolleras och eventuellt bytas ut med relativt förutbestämda intervall. Detta kan till exempel röra sig om drivremmar. Olja eller fett för smörjning kan behöva bytas med visst intervall. Enklare underhållsinsatser kan ofta med fördel utföras av reningsverkets tekniker, medan en del underhåll kräver fackkunskaper och därför helst utförs av leverantören eller dess servicepartner. De flesta leverantörer erbjuder serviceavtal. Av de reningsverk som tillfrågades i samband med denna studie hade ungefär hälften ett avtal för regelbundet förebyggande underhåll av sina blåsmaskiner.

Andra typer av maskiner, som direktdrivna turbomaskiner, kan ha mindre behov av kontinuerligt eller regelbundet underhåll. Däremot kan det å andra sidan finnas en ökande risk för ett större haveri när maskinen börjar närma sig sin tekniska livslängd. Vissa typer av maskiner kan då lagas på plats, medan vissa kan kräva att en del av maskinen skickas iväg till fabrik.

Luftlagrade turbomaskiner har stödlager som har mekanisk kontakt med axeln vid start och stopp av maskinen. Dessa kan behöva bytas efter ett visst antal start/stopp, men beroende på tillämpning (intermittent luftning med frekventa start/stopp) och lagrets utformning och material, kan intervallet för byte vara allt från ett par år till obegränsat.

I tabellen nedan ges exempel på vilka typer av planerat underhåll som är vanligt för olika typer av blåsmaskiner (Tabell 10.3). Uppgifterna ska betraktas med hänsyn till att behovet av underhåll kan skilja sig mellan modeller och påverkas av användningssätt och miljö. De frekvensomriktare som antingen finns integrerade i, eller ansluts till, de flesta blåsmaskiner kräver också ett visst underhåll. Efter ungefär 7 års drift kan det vara aktuellt att byta ut delar av frekvensomriktaren och/eller dess kylfläkt. Vridkolvs- och skruvblåsmaskiner kan drivas med eller utan frekvensomriktare, men drivs oftast med. Växlade turbomaskiner används nästan alltid utan frekvensstyrning och luftlagrade och magnetlagrade maskiner har alltid integrerade frekvensomriktare.

Vid en upphandling av blåsmaskiner kan anbudslämnare anmodas att ange förväntat underhåll år för år under maskinernas livslängd. Detta kan sedan vägas in i en uppskattning av livscykelkostnaden. Det blir då det planerade, det vill säga framförallt förebyggande, underhållet som inkluderas.

Som komplement kan det vara vettigt att göra en bedömning av eventuella kostnader och risker som ett oplanerat haveri i någon av de vitala

Tabell 10.3 Vanligt förekommande planerat underhåll för olika typer av blåsmaskiner. Behov och rekommendationer kan skilja sig mellan tillverkare.

Maskintyp	Underhåll	Intervall (år)
Deplacementblåsmaskiner (vridkolv och skruv)	Byte av luftfilter	0,5-1
	Byte av olja/fett	1-2
	Byte av remmar	1-2
	Kontroll/byte backventil	2
	Kontroll/byte av diverse reserv- och slitdelar	3
Växlade turboblåsmaskiner	Byte luftfilter och oljefilter	0,5-1
	Byte av olja	2-3
Luftlagrade turboblåsmaskiner	Byte av luftfilter	0,5-1
	Byte av stödlager	2-∞
	Byte av friblåsningsventil	5
Magnetlagrade turboblåsmaskiner	Byte av luftfilter	0,5-1
	Byte av backupbatterier och kylfläktar	6

maskindelarna skulle medföra. De relevanta frågorna är: Hur snabbt och till vilken kostnad kan maskinerna lagas? Hur känslig är/blir anläggningen med aktuell redundans för ett haveri?

Inom branschen finns diskussioner om ett scenario för framtiden där leverantörerna tillhandahåller luftning som en tjänst istället för blåsmaskiner. I en sådan modell skulle kunden betala per kubikmeter luft som blivit levererad i likhet med hur i dagsläget sker med el och dricksvatten. Kunden skulle då inte behöva hantera bekymmer i form av drift och underhåll av blåsmaskiner. Det är en modell som kan kännas lite främmande i dagsläget, men samtidigt inte är orimlig att tänka sig i framtiden.

10.4.5 Ledningssystem

Filter för den ingående luften in till blåsmaskinsrummet kräver regelbunden kontroll och byten. I övrigt kräver själva ledningssystemet normalt inget särskilt underhåll, men det är viktigt att då och då inspektera och kontrollera så inga läckor har uppstått vid exempelvis fogtätningar. Läckage av luft är förstås en onödig källa till energianvändning.

10.4.6 Instrument och givare

Fungerande rutiner för löpande underhåll och kontroll av instrument är kritiskt för att luftningsanläggningen ska fungera som avsett.

Vid de reningsverk som undersöktes i denna studie angav 20 % att automatisk rengöring av syregivare tillämpas. Manuell rengöring av syregivare gjordes en gång per vecka av 40 %, varannan vecka av 20 % och en gång i månaden av 27 %. För ammoniumgivare angavs att regelbunden rengöring, kontroll och kalibrering utfördes. I allmänhet ansågs luftflödesmätare inte behöva något löpande underhåll.

Alla typer av givare som doppas ned i en reningsbassäng kräver regelbunden och frekvent rengöring för att avlägsna den biomassa som vidhäftar givaren

och stör mätningar. Bristande rengöring av en syregivare med felaktig signal som följd kan öka energianvändningen väsentligt vilket visas i Exempel 10.6. Frekvensen för manuell avtorkning av syre- och ammoniumgivare kan minskas om den kompletteras med automatisk rengöring med till exempel tryckluft. Men det krävs ändå regelbunden manuell rengöring.

Exempel 10.6

Bristande rengöring av syregivare (simulering)

Hur viktigt är det att rengöra syregivare regelbundet? De flesta givare visar lägre värden på syrehalt än den verkliga i takt med att biofilm växer till på givaren, men det finns även givare som visar för hög signal. Om signalen som registreras är lägre än den verkliga kommer luftflödet att ökas och ge ett onödigt stort syreöverskott.

En situation där bristfällig rengöring lett till ett ökat syreöverskott till 4,0 mg/l i samtliga zoner simulerades. Sådana förhållanden visade sig leda till 47 % högre energianvändning än basfallet (2,0 mg/l i de första två luftade zonerna och 1,5 mg/l i den tredje). I detta fall motsvarade det 3 000 kWh per vecka i extra energianvändning. I en anläggning som inte har lika hög energieffektivitet att utgå ifrån, kan den extra energianvändningen mycket väl bli dubbelt så hög vid samma ökning i syreöverskott.

Generellt kräver givare för nitrat eller ammonium en större arbetsinsats än syregivare, främst eftersom de kräver kalibrering och kontroll med hjälp av labbanalyser. Syregivare kan kontrolleras mot ett handhållet instrument. Ammoniumgivare kan kontrolleras mot stickprov som analyseras på labb.

Vid underhåll av exempelvis syre- eller ammoniumgivare som används för styrning av luftningen är det viktigt att säkerställa att styrningen inte påverkas för mycket när givarna lyfts ur processen. För syrerreglering, till exempel, kommer luftningen drastiskt minskas om en syregivare lyfts upp i bassängen eftersom syrehalten är betydligt högre i luft än i processen. För många instrument finns ett underhållsläge som kan aktiveras innan underhåll påbörjas vilket innebär att mätsignalen fryser på senast uppmätta värde. Ett annat alternativ är att tillfälligt ställa om styrningen till ett manuellt läge innan underhåll av givare påbörjas.

Typiskt underhåll för instrument anges i Tabell 10.4.

Tabell 10.4 Typiskt underhåll för instrument som används till luftningsanläggningen.

Instrument	Underhåll
Syregivare, optisk	Rengöring, byte av mät huvud
Syregivare, elektrokemisk	Rengöring, kalibrering, byte av membran och elektrolyt
Ammonium- och nitratgivare, jonselektiv	Rengöring, kalibrering, byte av elektrod
Ammoniumanalysator, gaskänslig elektrod	Rengöring, påfyllning reagens och kalibreringslösning
Ammoniumanalysator, kolorimetrisk	Rengöring, påfyllning reagens och kalibreringslösning
Nitrat- och nitritgivare, UV-absorbans	Rengöring, kalibrering, byte av elektrod

Vilken frekvens som krävs för underhåll av instrument varierar kraftigt beroende på miljö och hur mätdata används. Syregivare behöver till exempel ofta tätare rengöring sommartid än vintertid (Samuelsson et al., 2018). En adaptiv underhållsplan som anpassas till behoven är fördelaktig (se vidare i Avsnitt 9.11.5). Ämnet behandlas också grundligt i rapporten ”Instrumentera rätt på avloppsreningsverk” (Andersson et al., 2019).

10.5 Sammanfattning

Det finns många faktorer som kan påverka energianvändningen vid drift av en befintlig luftningsanläggning. Uppföljning av systemets prestanda ger värdefull vägledning vid effektivisering. De parametrar som är viktigast att följa upp är:

- Trycket i systemet i förhållande till flöde och ventilöppningsgrad.
- Luftflödet i förhållande till belastning i form av syrebehov (AOR).
- Effektanvändningen för blåsmaskinerna i förhållande till AOR.

För att minska energianvändningen vid drift av ett befintligt system rekommenderas att följande åtgärder utvärderas:

- Minskad slamålder ifall det finns utrymme med avseende på reningsresultaten.
- Minskade halter av löst syre.
- En anpassning av profilen i löst syrehalt över anläggningens olika zoner så att lägsta möjliga luftflöden per luftare uppnås.
- Regelbunden motionering av membran.
- Rengöring av membran genom tillsats av syra i luftningssystemet vid tecken på igensättning.

Behov och typ av underhåll för blåsmaskiner skiljer sig stort beroende på typ av maskin. Förväntat underhåll och risker kring eventuellt driftstopp bör tas i beaktande vid val av maskin.

11 Test av luftningssystemets prestanda

För att kunna jämföra prestanda för utrustning krävs tester. Dessa tester behöver vara anpassade för den aktuella typen av utrustning och ge resultat som är relevanta för den aktuella tillämpningen. För att säkerställa att olika leverantörer utför, utvärderar och rapporterar testresultat på samma sätt behöver testerna vara standardiserade. Det hjälper till att säkerställa att den utrustning som jämförs, jämförs på ett likvärdigt och rättvist sätt – det vill säga med en jämn spelplan.

Det finns flera standarder som föreskriver hur blåsmaskiner ska utvärderas med avseende på energianvändningen vid olika driftförhållanden. Det finns också standarder för hur luftares prestanda ska utvärderas i renvatten och processvatten. Dessa olika metoder och deras användning beskrivs i detta kapitel. Nedan ges några exempel på vilken typ av information som kan fås från prestandatester.

Tabell 11.1 Exempel på vilken typ av information som kan fås från prestandatester.

Typ av test	Parametrar
Blåsmaskin	Specifik energianvändning (kWh/Nm^3)
Renvattentest	SOTR, SOTE och SAE
Processvattentest	α SOTR, α SOTE, α SAE, OTR, OTE och AE
Renvattentest och processvattentest	α

11.1 Prestandatest av blåsmaskiner

Vid jämförelse av effektiviteten för blåsmaskiner är det viktigt att vara medveten om att detta kan göras på olika sätt vilket kan påverka jämförelsen. Ibland diskuteras blåsmaskiners energieffektivitet med termen verkningsgrad. Men det finns olika typer av verkningsgrader och det kan lätt bli otydligt vad som egentligen avses med en blåsmaskins verkningsgrad. Därför är det mer relevant att uttrycka blåsmaskiners effektivitet som specifik energianvändning, vilket innebär kvoten mellan effekt (kW) och luftflödet (Nm^3/h) i enheten kWh/Nm^3 . Den specifika energianvändningen gäller för ett visst mottryck vid en viss uppsättning omgivningsförhållanden (temperatur, lufttryck och luftfuktighet). Definitionen för normalkubikmeter bör också beaktas.

När den specifika energianvändningen ska anges är det sedan viktigt att systemgränserna är väl definierade, så det är tydligt vilken effekt och vilket luftflöde som avses. Luftflödet kan anges som insugen volym eller luft levererad ut från blåsmaskinen. På grund av eventuellt läckage och luftåtgång för kylning behöver dessa inte vara exakt samma. Effekten kan anges som axeleffekt för motorn eller effekten inklusive olika typer av förluster i maskinen. Förluster uppstår över växlar och rem, styrning, frekvensomformare, kylfläkt, filter och ljuddämpare med mera. För uppskattning av

livscykelkostnaden är det totaleffekten inklusive alla förluster ("package power") som är relevant och ska beaktas. Likaså är luft levererad ut från blåsmaskinen, inklusive eventuella förluster, mer relevant än insugen volym. Därför bör blåsmaskinens prestanda jämföras från "kabel-till-luft" ("wire-to-air") vilket då avser den totala effekten för maskinens alla delar i förhållande till luft levererad ut från blåsmaskinen.

De standarder som finns för prestandatest av blåsmaskiner är anpassade för att användas under välkontrollerade förhållanden där mätning kan ske med hög noggrannhet. Testerna görs därför ofta i laboratorie- eller fabriksmiljö. Prestandan kan även testas när maskinen är installerad på en anläggning. I praktiken kan det dock vara svårt att på ett reningsverk åstadkomma de välkontrollerade förhållanden och mätningar som krävs för att ge resultat med hög noggrannhet. Men även om noggrannheten inte blir den allra högsta är det viktigt att följa upp förhållandet mellan effekt och luftflöde för att säkerställa att blåsmaskinens prestanda är inom det förväntade.

De standarder som publicerats av ISO ("International Organization for Standardization") är generellt de som har ett bredast erkännande i Europa. Samtidigt täcker de standarderna ett brett spektrum av tillämpningar och kan därför ha begränsningar för användning till blåsmaskiner.

För displacementblåsmaskiner används standarden ISO 1217 (ISO, 2016). Denna anger i detalj hur ett prestandatest ska gå tillväga, hur resultaten kan omvandlas och presenteras och vilka toleranser som gäller för uppmätta värden. En variant av standarden finns för maskiner med integrerad frekvensomriktare (Annex E) och standarden lämpar sig för "kabel-till-luft"-principen. Standarden hänvisar i sin tur till andra standarder för exempelvis mätning av luftflöde enligt ISO 5167-1 (ISO, 2003).

För centrifugalblåsmaskiner används en annan ISO-standard, ISO 5389 (ISO, 2006). Standarden för centrifugalblåsmaskiner är inte lika tydligt baserad på "kabel-till-luft"-principen som standarden för displacementblåsmaskiner. Standarderna för displacement- respektive centrifugalblåsmaskiner medger också olika intervall för tolerans av såväl effekt som luftflöde. Det innebär att det i praktiken kan vara svårt att göra noggranna jämförelser mellan maskiner av olika typ. I nuläget finns inte något enhetligt och allmänt sanktionerat sätt att jämföra displacement- och turboblåsmaskiner på ett likvärdigt sätt.

I USA används standarder framtagna av ASME ("The American Society of Mechanical Engineers"). Befintliga versioner av dessa, PTC 9 (ASME, 1970) och PTC 10 (ASME, 1997), är baserade på axeleffekt och inkluderar inte all elanvändning. Den nya PTC 13 som är under utveckling är baserad på "kabel-till-luft" och ska täcka alla typer av blåsmaskiner.

Leverantörer av blåsmaskiner verkar genom de internationella branschorganisationerna som de är medlemmar i, som CAGI ("Compressed Air and Gas Institute") och PNEUROP ("European Committee of Manufacturers of Compressors, Vacuum Technology, Pneumatic Tools, Air Treatment Equipment and Condensate Treatment Equipment"), för att vidareut-

veckla standarderna för testning. Detta sker bland annat genom att de ger ut egna standarder. CAGI har publicerat en standard för centrifugal-blåsmaskiner som är ämnad att vara ett alternativ till ISO 5389 som är förenklad och tydligare baserad på ”kabel-till-luft”. Denna heter BL 5389 (CAGI, 2013). Tillsammans har de två organisationerna också tagit fram en standard som inkluderar alla typer av blåsmaskiner, CAGI/PNEUROP BL 300 (CAGI & PNEUROP, 2016). Även om dessa standarder är allmänt tillgängliga är de än så länge inte lika välkända och allmänt accepterade som ISO-standarderna.

När PTC 13 finns tillgänglig blir det förhoppningsvis mer rättframt att jämföra blåsmaskiner av olika slag. Fram till dess är det lämpligt att basera utvärdering av blåsmaskiners prestanda på ISO 1217 och ISO 5389.

11.2 Test av syreöverföring i renvatten

Prestandan för ett luftarsystem definieras i rent vatten. Att renvatten används som referenspunkt gör att luftarsystem kan specificeras oberoende av avloppsvattnets sammansättning och den biologiska processen. Testet utförs därför med vatten av dricksvattenkvalitet och anges vid standardförhållanden (20 °C, 1 atm, 0 mg/l löst syre). Det primära resultatet från ett test med renvatten är syreöverföringshastigheten vid standardförhållanden i renvatten (SOTR). Eftersom SOTR beräknas som produkten av mass-transportkoefficienten och syrets mättnadskoncentration (se Kapitel 6) är det just dessa två parametrar som ska bestämmas.

$$SOTR = K_{La_{20}} \cdot C_{\infty 20}^* \cdot V \quad (6.7)$$

Genom att i samband med testet mäta luftflödet med god noggrannhet kan även syreöverföringseffektiviteten vid standardförhållanden (SOTE, %) bestämmas. Ifall effektuttaget för luftningen också mäts, kan luftningseffektiviteten vid standardförhållanden (SAE, kg O₂/kWh) bestämmas. SAE gäller alltså för hela luftningssystemet från blåsmaskin till bassäng, vilket även kallas ”kabel-till-vatten” (”wire-to-water”).

Ett renvattentest kan utföras i en fullskalig anläggning eller i en mindre och därför avsedd testtank.

Syften med tester i renvatten kan exempelvis vara följande:

- Kontrollera att ett levererat luftarsystem uppnår garanterade värden på SOTR och/eller SOTE.
- Kontrollera att ett levererat luftningssystem med luftare och blåsmaskin uppnår garanterat värde på SAE.
- Kontroll av luftarsystemets prestanda i testtank innan beställning.
- Fastställande av α -värdet (tillsammans med processvattentest).
- Skapa underlag hos leverantören för design av luftarsystem vid olika förhållanden (luftflöde, vattendjup, bottentäckningsgrad med mera).
- Diagnos av luftare efter ett antal år i drift, med avseende på åldrande och igensättning.

11.2.1 Principer för renvattentest

En vanlig metod att mäta syresättning av rent vatten innebär att koncentrationen av syre i vattnet först sänks till nära noll. I mindre skala tillsätts ibland kvävgas för att driva av syret, men i större bassänger är det betydligt vanligare att kemikalier tillsätts för att syret ska förbrukas. Genom att tillsätta natriumsulfit förbrukas syret i bassängen när sulfit oxideras till sulfat (ASCE, 2007). Koboltklorid eller koboltsulfat tillsätts också som katalysator för att reaktionen ska gå snabbare. När all sulfit har förbrukats stiger syrehalten mot mättnadsvärdet. Som tidigare beskrivits (Kapitel 6), kan syresättningen av rent vatten beskrivas enligt följande samband:

$$C_t = C_\infty - (C_\infty - C_0) e^{-K_{\text{Lat}} t} \quad (6.5)$$

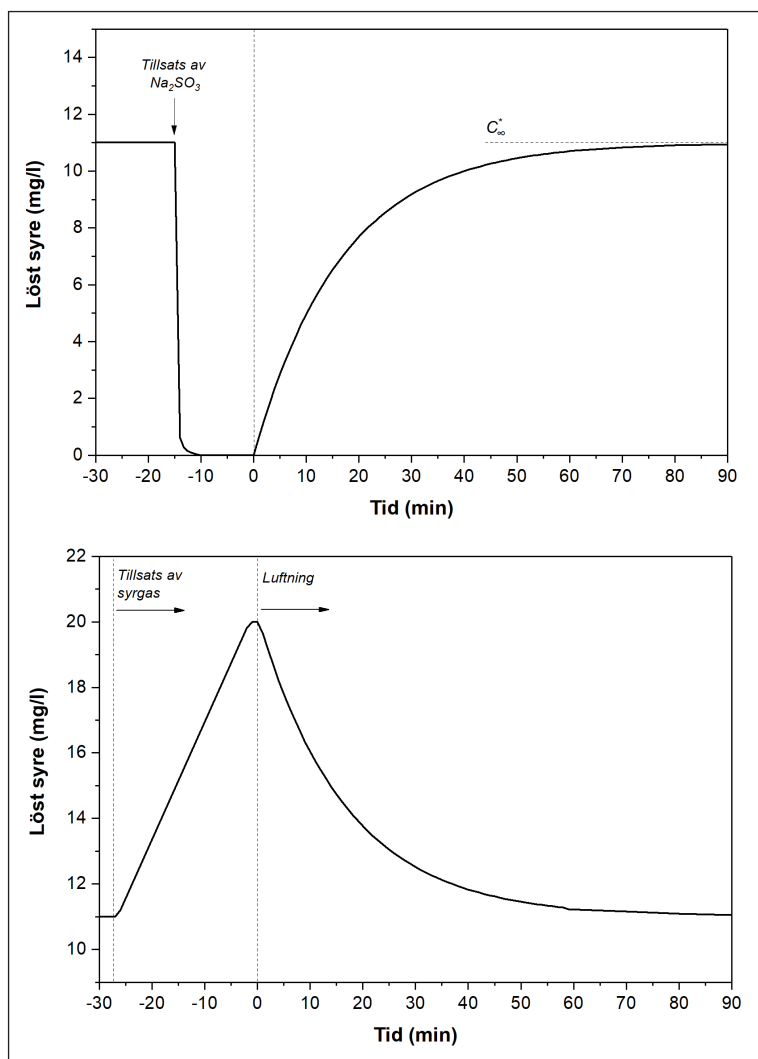
Genom anpassning av uttrycket till de uppmätta värdena på koncentrationen av löst syre med hjälp av icke-linjär regression, kan värdet på bestämmas. Själva testet behöver inte utföras vid 20 °C utan och beräknas genom korrigering för temperaturen enligt sambanden i Kapitel 6. De standarder som finns för renvattentester (Avsnitt 11.2.3) anger rekommendationer för hur långt ifrån 20 °C temperaturen bör vara för att korrigering ska kunna göras på ett tillförlitligt sätt.

Ett exempel på mätresultat från ett syresättningsförsök illustreras i Figur 11.1 på nästa sida. Som alternativ till att sänka koncentrationen av löst syre med kemikalier kan istället syrenivån ökas genom att ren syrgas tillsätts (ATV, 1996). När syrgas tillsätts blir vattnet övermättat med syre vilket innebär att koncentrationen av syre blir betydligt högre än mättnadsnivån med luft. När luftning sedan startas med atmosfärisk luft, sjunker syrenivån mot den normala mättnadskoncentrationen. Sänkningen i syrehalt beskrivs av samma samband som syresättning från koncentrationen noll, även om det nu är desorption istället för absorption som sker. Som kan ses i Figur 11.1 blir kurvan motsvarande, om än uppochnedvänd.

Kobolt är en metall som kan vara giftig och påverka miljön. Tillåtelse och lämplighet att släppa ut det förbrukade vattnet efter renvattentest måste först kontrolleras mot berörda myndigheter. De koncentrationer av kobolt som ska användas enligt standarderna är upp till 0,5 mg/l (ASCE, 2007). Användningen av kvävgas för att sänka syrehalten eller varianten med ren syrgas (desorption) är ett sätt att undvika användning och utsläpp av kemikalier.

11.2.2 Utförande av renvattentest

Ett renvattentest i fullskalig anläggning kan tjäna som garantitest. Då testas det installerade luftarsystemet så som det kommer att fungera vid drift. I en större anläggning kan det dock behövas en hel del dricksvatten, arbete och eventuellt kemikalier för att genomföra testet. Ett alternativ är därför att genomföra testet i en särskild testtank som är särskilt anpassad för ändamålet. En sådan tank är typiskt några hundra kubikmeter. Utformningen blir då inte exakt densamma som i anläggningen, utan en överenskommelse behövs för att överföra förhållandena i anläggningen till testtanken med avseende på bottentäckningsgrad och luftarnas placering.



Figur 11.1 Exempel på resultat från renvattentest med kemikalier för att avlägsna syre (ovan) och med ren syrgas (nedan).

Fördelen med en testtank är att det kan vara enklare att uppnå hög noggrannhet och upprätthålla givare med god precision.

Ibland görs även renvattentester i mindre volymer som några kubikmeter. Förhållandena är då kanske inte särskilt representativa för en anläggning i fullskala. Men om syftet till exempel är att parallellt jämföra olika membran, som nya membran mot använda, kan denna skala vara tillräcklig (se Exempel 7.1).

Utförandet av ett renvattentest enligt metoden med natriumsulfit går i stora drag till enligt följande:

1. Bassängen töms, rengörs och fylls med vatten av dricksvattenkvalitet.
2. Koboltklorid löses upp och tillsätts bassängen.
3. Det önskade luftflödet upprättas.
4. Natriumsulfit tillsätts antingen upplöst i vatten eller som pulver som fördelas väl över anläggningen.
5. Syrehalter loggas med givare utspridda i bassängen.

6. Resultat utvärderas med icke-linjär regression och skillnaden mellan anpassade och uppmätta koncentrationer över tiden studeras för att kvalitetssäkra datan.

Några saker att beakta i samband med genomförandet (ATV, 1996; CEN, 2004):

- Renvattnet ska analyseras med avseende på TDS för att säkerställa kvaliteten. Om inte dricksvatten används kan fler analyser behövas för att säkerställa att det inte innehåller något som kan störa testet.
- Antalet syregivare ska vara minst tre på olika djup och positioner. I större bassänger (> 3 000 m³) rekommenderas sex givare.
- Syregivarna ska ha en respons som är minst 20 gånger snabbare än luftarsystemets respons.
- Ofta kan betydligt lägre koncentrationer av kobolt än 0,5 mg/l tillämpas och det är därför bra att först testa i laboratorieskala vilken koncentration som behövs.
- Det första testet som utförs ger sällan representativa resultat och ska i så fall bortses ifrån.
- Ifall natriumsulfit tillsätts i pulverform måste det ske på ett sätt så att det löser sig snabbt och fördelar sig jämnt i bassängen.

Även om en standard används finns det ett antal aspekter som beställaren i förväg behöver komma överens om med entreprenören eller leverantören. Detta kan till exempel gälla:

- Vilken bassäng eller zon som ska testas.
- Testförhållanden (luftflöde, bottentäckningsgrad, djup med mera).
- Antal test per förhållande.
- Kvaliteteten på renvattnet som ska användas.
- Testmetod: variant med tillsats av natriumsulfit, kvävgas eller syrgas.
- Hur eventuell tillsats av natriumsulfit ska gå till.
- Hur effekten ska mätas för bestämning av SAE.

Det förekommer att renvattentest genomförs i samband med luftningsprojekt vid svenska avloppsreningsverk, både i fullskala (se Exempel 11.1) och i testtank (se Fallstudie 3, Avsnitt 14.4).

11.2.3 Standarder för renvattentest

För att skapa korrekta och jämförbara resultat från renvattentester, är det viktigt att testerna är utförda och analyserade på ett enhetligt och systematiskt sätt. Därför har standarder utvecklats för att skapa enhetlighet kring hur renvattenprestanda erhålls och rapporteras.

I USA ledde ett omfattande arbete inom "American Society of Civil Engineers" kring energieffektiv luftning runt 1980-talet till bland annat en standard för renvattentester (ASCE, 1984). Denna standard har sedan reviderats i omgångar (ASCE, 1992) till den nu gällande (ASCE, 2007). Inom kort väntas åter en ny version publiceras. Utifrån den amerikanska standarden utvecklades i Tyskland en nationell standard (ATV, 1996).

Därefter upprättades en europeisk standard (CEN, 2004), som även är en svensk standard (SIS, 2004). Sedan dess har den tyska standarden uppdaterats så att den numera överensstämmer med den europeiska (DWA, 2007).

I och med harmoniseringen av den tyska med den europeiska standarden finns numera två aktuella standarder: den amerikanska och den europeiska. De allra flesta aspekter av dessa är likvärdiga. Men det finns också några skillnader som är värda att notera (Tabell 11.2). Antalet tester vid ett visst förhållande ska enligt den amerikanska standarden vara tre, medan den europeiska anger minst två. Vissa aspekter av testerna lämnas i standarderna åt de inblandade parterna att komma överens om i förväg. Vilka aspekter detta gäller kan skilja sig mellan standarder.

Tabell 11.2 Exempel på skillnader i de två olika standarderna för renvattentest.

	Amerikansk (ASCE, 2007)	Europeisk (CEN, 2004)
Korrigerig för salthalt	Nämns men inte obligatoriskt	Inkluderas ej
Syrets mättnadskoncentration	Bestäms experimentellt	Bestäms experimentellt eller antas baserat på djup
Antal experiment	Minst tre	Minst två
Effekt för SAE	Ska specificeras	Endast total kabeleffekt
Rekommenderad temperatur	10–30 °C	> 4 °C
Referenstillstånd för 1 m ³ luft	1 atm, 20 °C, 36 % luftfuktighet	1 atm, 0 °C, 0 % luftfuktighet
Mätosäkerhet	En mätning kan vara ± 15 % från genomsnittlig SOTR	SOTR ± 5 % i små och ± 10 % i stora bassänger.

Vattnets salthalt påverkar SOTE genom att salt minskar bubblornas benägenhet att slå sig samman så att bubblorna blir större (se Avsnitt 7.3.3.). 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. Den amerikanska och den europeiska standarden tillåter båda att samma vatten återanvänds så länge den totala koncentrationen av lösta ämnen är lägre än 2 000 mg/l TDS. Möjligheten att korrigera $K_L a$ till 1 000 mg/l TDS, som ligger mitt i det tillåtna intervallet, enligt följande empiriska samband nämns i den amerikanska standarden:

$$K_L a_{1000} = K_L a \cdot e^{(0,0000965 (1000 - \text{TDS}))} \quad (11.1)$$

Enligt detta samband har lösta ämnen i koncentrationen 2 000 mg/l TDS en påverkan på $K_L a$ som är över 20 % med en lika stor påverkan på SOTE. Av denna anledning normaliserar de flesta leverantörer sin prestanda till 1 000 mg/l TDS. Som beställare är det en viktig faktor att vara medveten om när prestandatest av ett luftarsystem planeras och utvärderas.

En annan sak som skiljer mellan olika standarder är hur syrets mättnadskoncentration (C_∞^*) bestäms. Enligt den amerikanska standarden ska C_∞^* bestämmas experimentellt genom att försöket pågår så länge att den uppmätta syrekoncentrationen motsvarar åtminstone 98 % av C_∞^* . Enligt den europeiska standarden kan mättnadskoncentrationen istället uppskat-

tas utifrån trycket vid halva djupet. En sådan uppskattning besparar tid vid utförandet, eftersom syrenivån inte behöver stiga lika långt. Den gör också att resultaten blir mindre känsliga för syregivarnas kalibrering, eftersom det absoluta värdet inte blir lika viktigt. Men en uppskattning C_{∞}^* av baserad på halva djupet ($d_e = 0,5$ i ekvation 8.14 ovan) leder ofta till överskattade C_{∞}^* . Då syreöverföringshastigheten är direkt proportionell mot mättnadskoncentrationen kan det leda till över 10 % överskattning av prestandan (Xylem, 2011).

Standarderna skiljer sig också när det gäller vilken effekt som kan användas för beräkning av luftningseffektiviteten (SAE, kg O₂/kWh). Enligt den europeiska standarden ska endast total kabeffekt användas, medan den amerikanska tillåter andra alternativ som axeleffekt. Vilken slags effekt som avses ska då framgå. Skillnaden är viktig att vara medveten om eftersom det annars kan leda till felaktiga jämförelser.

Den europeiska standarden för renvattentest är för närvarande under revision (Uby, 2019) och en uppdaterad standard där en del av tvetydigheterna beskrivna ovan blivit lösta är att förvänta framöver.

Exempel 11.1

Garantitest i renvatten av nytt luftarsystem på Nykvarnsverket

På Nykvarnsverket i Linköping (235 000 pe) upphandlades 2013 nya luftare för att möta ökad belastning och skärpta utsläppsvillkor. En hög botten täckningsgrad på 25 % efterfrågades med en möjlighet att utöka ytterligare till 40 %. I de åtta aktivslamlinjerna behövde specifika SOTE-värden på 7,2–7,5 %/m uppnås vid maximal belastning. Dessa värden skulle garanteras och testas efter installation.

En konsultfirma anlätades för att utföra ett renvattentest i anläggningen tillsammans med reningsverkets personal. Testet utfördes enligt svensk/europeisk standard med tillsats av natriumsulfit och koboltklorid. En av de åtta linjerna, rengjordes och fylldes med dricksvatten. Fyra syregivare kalibrerades och placerades i bassängen. Natriumsulfit tillsattes i pulverform på 12 olika ställen fördelade över bassängens längd. Maximalt luftflöde tillämpades. Tre tester genomfördes och data från de fyra syregivarna samt luftflödet utvärderades. De visade sig att den utlovade SOTE-nivån uppnåddes och därmed uppfyllde leveransen ställda krav.

11.3 Test av syreöverföring i processvatten

Luftningssystemets prestanda kan också testas i processvatten och då avses blandningen av aktivt slam och (delvis) behandlat avloppsvatten. Resultaten från sådana tester är då syreöverföringshastighet (OTR, kg O₂/h), syreöverföringseffektivitet (OTE, % eller g O₂/Nm³) och luftningseffektivitet (AE, kg O₂/kWh) vid processförhållanden. Om dessa korrigeras för standardförhållanden (20 °C och 1 atm) förutom när det gäller α -faktorn betecknas de α SOTR, α SOTE och α SAE.

Luftningssystemets prestanda uppmätt i processvatten är av stort intresse eftersom det, till skillnad mot i renvatten, speglar verkligheten. Men det är viktigt att ha i åtanke att resultaten är starkt beroende av avloppsvattnets sammansättning (se Avsnitt 7.1) och processens utformning och drift (se Avsnitt 7.2). Detta är faktorer som leverantörer av luftningsutrustning har litet eller inget inflytande över. Därför är leverantörer sällan benägna att utfästa garantier vid processförhållanden. Prestandatester med processvatten används sällan för garantitesting, utan tjänar snarare för att en beställare kan få bra kännedom om sin anläggning. Om prestandan i renvatten är känd kan α -värdet beräknas utifrån prestandan i processvatten som kvoten mellan dessa ($\alpha = \alpha_{\text{SOTR}}/\text{SOTR}$). Värden på α -faktorn i olika zoner och vid olika tidpunkter kan exempelvis ge vägledning för dimensionering av ett nytt luftarsystem, eller indikera att underhåll behövs.

En uppskattning av α -faktorn och β -faktorn kan också göras i mindre skala, såsom laboratorieskala (Röttorp et al., 1999), genom mätning av syreöverföring i både ren- och processvatten. Detta kräver då en uppställning som är tillräckligt representativ för det aktuella luftarsystemet.

För tester i processvatten finns i huvudsak två standarder. Dels en amerikansk standard som nyligen uppdaterats (ASCE, 2018, 1997) och dels en tysk (DWA, 2007) vars tidigare version finns på engelska (ATV, 1996). Den tyska standarden täcker både ren- och processvattentester.

11.3.1 Test vid icke-stationärt tillstånd

Ett sätt att bestämma syreöverföringsprestandan med processvatten är att gå tillväga på ett liknande sätt som vid renvattentester. Det innebär att halten av löst syre antingen sänks eller ökas varefter mätning sker av återgången till jämviktskoncentrationen av syre. Då kan värdet på α i processvatten bestämmas genom anpassning av de uppmätta värdena på löst syrehalten till mätnadsuttrycket ovan.

Förhållandena i processen, med avseende på luftflöde och syreupptagshastighet behöver vara konstanta under testet. Flöden av avloppsvatten genom processen liksom returslam och eventuell intern recirkulation kan vara igång på konstanta nivåer (ASCE, 2018). Men det krävs att testet utförs under en period när belastningen är konstant. Annars kan bättre noggrannhet uppnås genom att inga flöden tillåts genom den del av processen där mätningar sker, och slammets respiration tillåts sjunka till endogen nivå innan mätning. Detta är rekommendationen i den tyska standarden (ATV, 1996). Den endogena nivån motsvarar bakgrundsbehovet av syre i frånvaro av ämnen (framförallt BOD och ammonium) som kan användas för tillväxt (se Avsnitt 4.1).

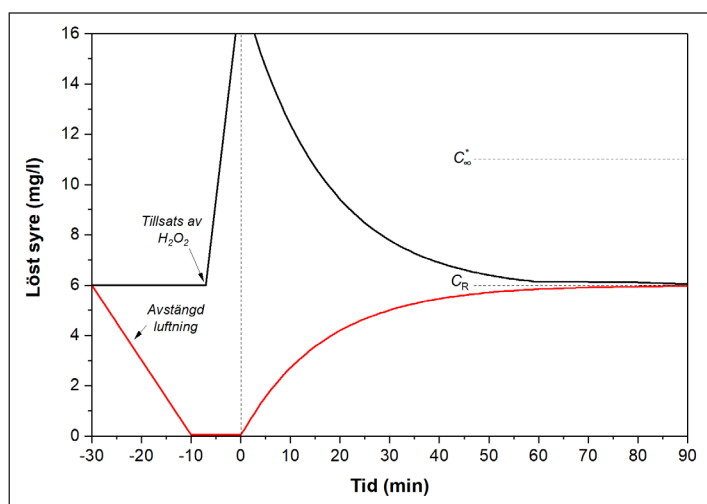
Förändringen i löst syrehalt som krävs kan åstadkommas på något av följande sätt:

- En plötslig ökning av luftflödet.
- Tillsats av ren syrgas.
- Tillsats av väteperoxid.

Efter att halten har ändrats med någon av dessa metoder sker luftning med önskat luftflöde. Förloppet då syrehalten stabiliserar sig genom absorption, efter en ökning av luftflödet, eller desorption, efter tillsats av syrgas eller väteperoxid, studeras.

Metoden med en plötslig ökning av luftflödet kan utföras från avstängd luftning med omrörare eller luftning med lågt luftflöde för att hålla slammet omrört. Noggrannheten i mätningarna ökar med ett ökat spann i löst syrehalt under mätningen. Denna metod innebär vissa begränsningar med avseende på vilka luftflöden som kan tillämpas och samtidigt få noggranna resultat. En plötslig förändring av luftflödet kan också påverka flödesmönstret i bassängen och därmed påverka mätningen.

En metod som har ansetts bättre är att tillsätta väteperoxid till bassängen (ASCE, 2018). Väteperoxid sönderfaller till syre och vatten. Vattnet kan därmed bli övermättat med syre på liknande sätt som om ren syrgas tillsätts. Om inte anslutning för syrgas finns installerad är det betydligt enklare att tillsätta väteperoxid till en bassäng. I rent vatten sker omvandlingen till syre långsamt. Men i närvaro av slam och föroreningar i processvatten sönderfaller väteperoxid tillräckligt snabbt till syre för att vara ett praktiskt tillvägagångssätt. De höga koncentrationer av löst syre som kan åstadkommas underlättar att få tillräckligt med data för noggranna mätningar.



Figur 11.2 Exempel på resultat från tester vid icke-stationärt tillstånd med processvatten. Metoderna med plötslig ökning av luftflödet (röd linje) och tillsats av väteperoxid (svart linje).

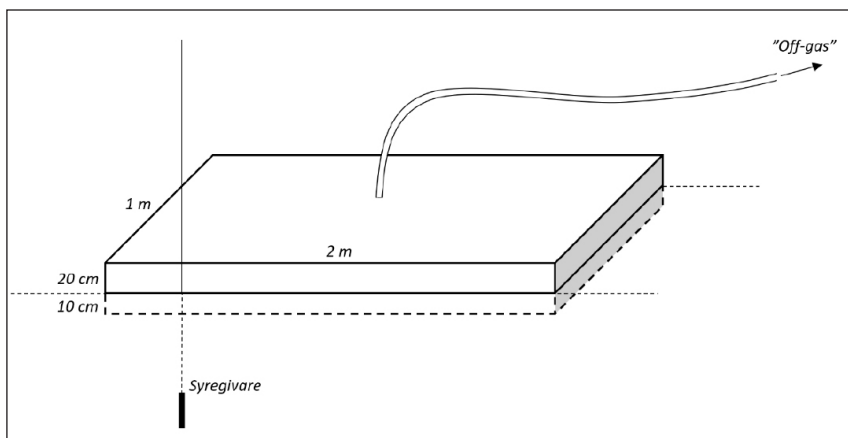
11.3.2 Test vid stationärt tillstånd ("off-gas")

Den mest flitigt använda metoden för att mäta syreöverföring i processvatten är förmodligen den metod som sker vid stationärt tillstånd (konstant halt av löst syre) och analys av in- och utgående halt syre i luften. Genom att utgående luft samlas upp med en huv och syrehalten i in- och utgående luft bestäms, kan en massbalans för syre göras och därmed syreöverföringen fastställas. Denna metod kallas "off-gas"-metoden och är väl beprövad och anses tillförlitlig (Amerlinck et al., 2016; Libra et al., 2005, 2002; Redmon et al., 1983; Rosso et al., 2005; Schuchardt et al., 2007).

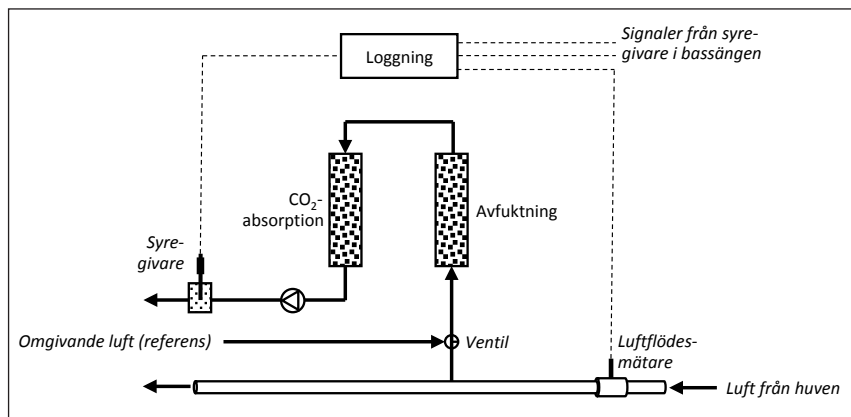
Några förutsättningar är viktiga vid analys med "off-gas"-metoden:

- Förhållandena i processen behöver vara konstanta under den tid som mätningen pågår. Detta underlättas genom att en mätning går relativt snabbt att göra.
- Halten av inerta gaser inklusive kväve behöver vara densamma i in- och utgående luft. Endast försumbar denitrifikation får därför ske.
- Koncentrationen av löst syre i bassängen behöver vara konstant.

Vid analys samlas utgående luft upp med en flytande huv i bassängen (Figur 11.3). Denna huv täcker typiskt en yta av en till några kvadratmeter. Huvn ska vara något nedsänkt i vattnet (typiskt ungefär 10 cm) och ha en viss volym för att förhindra att vatten eller skum förs med provet (typiskt höjd ungefär 20 cm). Luften som samlas under huvn leds till en analysator. Analysatorn kan schematiskt se ut som i Figur 11.4. Den innehåller en givare för syrehalt och en luftflödesmätare. En ventil reglerar så att mätning antingen sker på ingående (omgivande) eller utgående luft. Inte bara halten av syre utan även halterna av koldioxid och vattenånga förändras över processen. För att syreöverföringen ska kunna bestämmas måste koldioxid och vattenånga antingen mätas eller avlägsnas från luften innan mätning. Det vanligaste är att koldioxid och vattenånga absorberas innan mätning av syre.



Figur 11.3 Exempel på hur huv för insamling av utgående luft kan se ut.



Figur 11.4 Schematisk bild över analysator för "off-gas"-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 sker under 5–10 min med utgående luft. Före och efter varje sådan mätning sker mätning med ingående luft. Syrehalten i in- och utgående luft används för att beräkna OTE på varje plats. Luftflödet genom analysatorn samt löst syrehalt i bassängen mäts också. Huven flyttas och en ny mätning görs tills hela analysplanen är genomförd. Då och då kan en mätning göras på en och samma plats för att försäkra om att förhållandena är stabila. Sedan beräknas en genomsnittlig OTE som kan korrigeras till α SOTE. Genom att använda luftflödet kan också OTR (och α SOTR) beräknas. De tyska (ATV, 1996) och amerikanska standarderna (ASCE, 2018) innehåller mer detaljer om lämplig utrustning, tillvägagångssätt och beräkningar vid ”off-gas”-mätningar. Exempel på hur ”off-gas”-mätningar används för utredningar på Käppalaverket presenteras i Exempel 11.2.

Analys med ”off-gas”-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 en renvattentest med luftarna. Sedan pumpas processvatten med slam från anläggningen till tanken kontinuerligt och mätningar utförs med ”off-gas”-metoden för att fastställa α -värdet.

Exempel 11.2

Jämförelse av luftarsystem med ”off-gas”-mätningar på Käppalaverket

På Käppalaverket (ca 510 000 pe) används en av elva aktivslamlinjer för pilottester för att utreda alternativ inför framtida ombyggnader av hela reningsverket. Som en del av dessa undersökningar görs en jämförelse av två luftarsystem. Det ena är en mekanisk bottenluftare i form av en hyperbol kombinerad omrörare och luftare. Det andra är ett bottenluftarsystem med membran i form av slangluftare. Båda dessa har installerats i den sista zonen av totalt åtta zoner i pilotlinjen. Den mekaniska luftaren har placerats i mitten och de fyra enheterna med slangluftare i varsitt hörn av bassängen. Vattendjupet är 6 m, längd och bredd är 12,7 respektive 6,7 m. Båda systemen försörjs av en dedikerad blåsmaskin. Syftet är att jämföra kapacitet (OTR) och energieffektivitet (AE) som underlag för ett beslut om hur luftningen till det framtida Käppalaverket ska utformas.

Jämförelsen genomförs med hjälp av mätningar med ”off-gas”-metoden. Eftersom den sista zonen normalt är lågt belastad har en förbiledning också installerats för att kunna belasta zonen med ett delflöde av det obehandlade avloppsvattnet. Undersökningen är indelad i tre faser:

- 
1. En veckas "off-gas"-mätning med normal (låg) belastning med vardera luftarsystemet (mekanisk luftare respektive membranluftare).
 - 2- En veckas "off-gas"-mätning med hög belastning (obehandlat vatten) med vardera luftarsystemet.
 3. En veckas "off-gas"-mätning i den första luftade zonen med befintliga tallriksluftare.

Med hög belastning till den sista zonen är förväntningen att effekten av ett högre α -värde med mekanisk luftning än med membranluftning ska kunna observeras. Samtidigt kan den totala energianvändningen jämföras med omröraren inkluderad. Vid sidan av energianvändningen är även luftförbrukningen intressant, eftersom ett lägre luftbehov kan minska behovet av att uppgradera blåsmaskiner och luftledningar.

En jämförelse av detta slag hade inte utan vidare kunnat göras med en annan metodik. Eftersom belastningen av AOR inte enkelt kan mätas till en enskild zon, vore en jämförelse baserad på kvoten mellan luftflöde och AOR svår att genomföra. Därför var "off-gas"-mätningar i princip en förutsättning för att kunna utföra jämförelsen med önskat resultat.

11.4 Sammanfattning

Blåsmaskiners prestanda i form av specifik energianvändning kan utvärderas vid drift men för full tillförlitlighet enligt gällande ISO-standarder krävs fabrikstest. Nuvarande standarder är olika för deplacement- och centrifugalblåsmaskiner vilket försvårar en likvärdig jämförelse.

Ett luftarsystems prestanda kan testas i renvatten för att verifiera garanterade värden för SOTR, SOTE och/eller SAE. Testet kan göras i fullskala eller i större eller mindre testtank. Skalbarheten varierar mellan olika system och för garantiändamål är det därför viktigt att de involverade parterna är överens om hur testet ska gå till. Det är också viktigt att vara medveten om att vissa skillnader föreligger i de olika standarderna för renvattentest (amerikansk, tysk och europeisk/svensk) som kan påverka resultaten. Vid renvattentest behöver antingen kemikalier (natriumsulfit och koboltklorid), syrgas eller kvävgas tillsättas.

Prestandan för ett luftarsystem kan också mätas vid processförhållanden med avloppsvatten (OTR, OTE och AE). Den metod som nått högst acceptans för denna typ av test bygger på att syrehalten i inkommande och utgående luft mäts vid stabila förhållanden i anläggningen. Prestandan i processvatten har mindre relevans för garantiändamål men ger värdefull information om anläggningen som kan användas för att effektivisera driften.

12 Upphandling

Syftet med detta kapitel är att ge en vägledning för upphandling och genomförande av ett luftningsprojekt. Kapitlet syftar inte till att vara heltäckande när det gäller entreprenadjuridik utan kommer att fokusera på de delar som berör möjligheten att upphandla ett energieffektivt luftningssystem med livscykelkostnad (LCC) i fokus.

Ett stort bekymmer för hela VA-branschen (och även andra branscher) är det ökande antalet avbrutna upphandlingar. Enligt Upphandlingsmyndigheten har denna siffra ökat sedan 2012 och är nu uppe i ca 13 % i medeltal bland olika branscher (Upphandlingsmyndigheten, 2018). Även om ingen exakt siffra finns, kan det antas att situationen är liknande för VA-branschen. Denna utveckling utgör ett viktigt problem för hela VA-branschen, i synnerhet för entreprenörer leverantörer som får bära en stor del av kostnaden. För att minska risken för att en upphandling avbryts är det därför viktigt att ett bra upphandlingsdokument tas fram med väl definierad kravställning och utvärderingskriterier specificerade.

12.1 *Entreprenadform och upphandlingsform*

Inledningsvis är det viktigt att klargöra skillnaden mellan å ena sidan *entreprenadform* (*avtalsform*) och å andra sidan *upphandlingsform*.

Med *entreprenadform* menas om upphandling och kontraktsskrivning sker enligt något standardavtal liknande AB 04, ABT 06, ABA 99, medan med *upphandlingsform* menas till exempel delad, general- eller samordnad generalentreprenad.

På senare år har begreppet samverkansentreprenad dykt upp och blivit en populär ”entreprenadform”. Samverkansentreprenad är dock ingen entreprenadform eller upphandlingsform utan endast ett arbetssätt. Själva avtalet kan vara baserat på vilket standardavtal som helst som till exempel ABT 06. Samverkan är även känt under namnet partnering som är ett begrepp skapat av företaget NCC. I denna rapport har vi därför valt att använda det mer företagsneutrala begreppet *samverkan*. Syftet med att ingå i ett samverkansprojekt är att parterna har gemensamt ansvar för hela projektet samt dess resultat. Olika former av incitamentavtal är vanliga i ett samverkanprojekt, till exempel för att hålla en gemensam upprättad budget.

Vid planering av en upphandling är det lämpligt att göra det i följande steg:

- Välja upphandlingsförfarande
- Välja upphandlingsform
- Välja entreprenadform
- Ta fram upphandlingsdokumentation (förfrågningsunderlag)
- Ta fram teknisk specifikation
- Fastslå prov för verifiering (FAT, ”factory acceptance test”)

Entreprenadformen bestämmer vem som ansvarar för vad, medan *upphandlingsformen* bestämmer vilket ansvar entreprenörerna har gentemot varandra och mot beställaren.

- Fastslå prov för validering (SAT, "site acceptance test")
- Fastslå innehåll för provdrift, prestandaprov, övertagande med mera

12.2 Resurser, roller och organisation

Inledningsvis bör det bedömas vilka kompetenser som finns inom den egna organisationen gällande upphandling, projektering och genomförande. Tillgång till egen kompetens inom dessa områden kommer att påverka vilken entreprenadform som är mer lämplig.

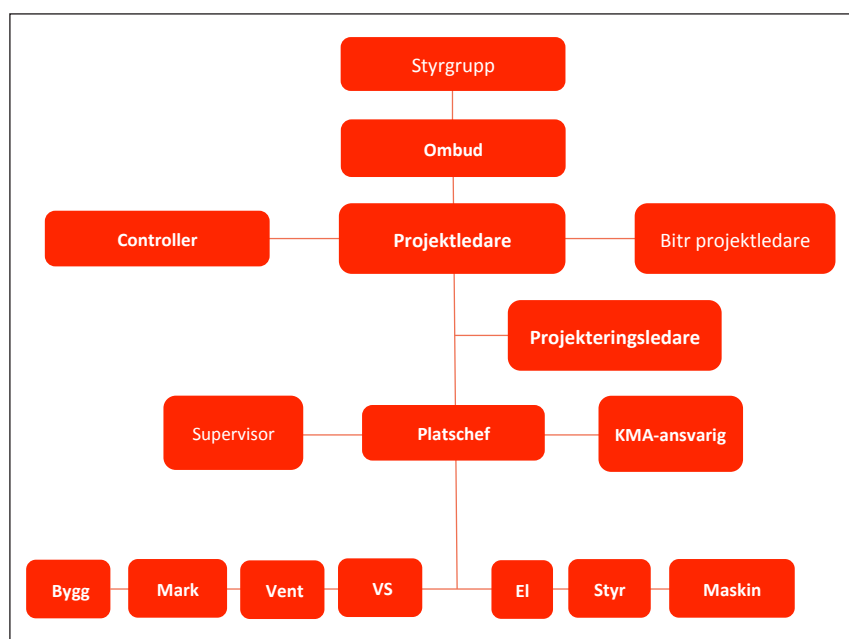
Vid alla investeringsprojekt är det viktigt att beställaren har fastställt vilka personer som kan medverka i projektet och vilket mandat och ansvar respektive person har.

Att fastställa och kommunicera projektorganisationen är viktigt för att tydliggöra vem som får bestämma/beställa vad. Om detta inte görs finns det risk för att projektet kompliceras och fördyras genom att konsulter och entreprenörer agerar på instruktion från personer utan beslutsrätt.

Nedan visas ett generellt exempel på hur en projektorganisation skulle kunna se ut (Figur 12.1).

Projektintressenter

- Beställare
- Drift- och underhållspersonal
- Konsult
- Leverantör
- Entreprenör



Figur 12.1 Generellt organisationsschema för ett byggprojekt.
(KMA = kvalitet-, miljö och arbetsmiljö)

I investeringsprojekt som berör reningsprocessen, som luftningsprojekt, ska det alltid ingå processkompetens i teknikområde maskin. Samordning mellan process och teknikområdet styr är extra viktigt när det handlar om luftningsprojekt för att tillse att styrningen fungerar med den tänkta processen och blåsmaskinerna. Normalt hamnar även instrument under teknikområdet maskin, men även här gäller det att det finns instrumentkompetens i teknikområdet maskin så att rätt instrumentval görs.

För luftningsprojekt bör personer med kompetenser inom process/drift, underhåll, el och styr ingå i beställargruppen. Som stöd till beställaren

finns en brukargrupp med personer som kommer att driva och underhålla den levererade tekniska lösningen. För luftningsprojekt kanske brukarna inte har så mycket åsikter om själva valet av blåsmaskin eller luftare, men däremot bör de vara delaktiga i till exempel placering av blåsmaskiner, instrument och ventiler samt dragning av luftarstammar och nedledare, då detta ofta påverkar arbetsmiljön gällande tillgänglighet och buller.

Då det kan vara svårt för en styrgrupp att sätta sig in i alla tekniska detaljer och ha detaljkompetens gällande luftningssystem kan det vara en fördel att ha en referensgrupp som har mandat att ta beslut i tekniska frågor som kommer från projektgruppen. Referensgruppen består då av personer med teknisk kompetens gällande det som ska beslutas. Styrgruppen kan sedan formellt ta det beslut som referensgruppen föreslår.

Olika beställarrollers funktion, mandat och ansvar kan beskrivas enligt Tabell 12.1.

Tabell 12.1 Beställarens organisation.

Roll	Funktion	Mandat	Ansvar
Styrgrupp	Behandla frågor som påverkar beslutad tidplan, omfattning, kostnad.	Ta beslut om frågor som påverkar fastställd tidplan, omfattning, kostnad.	Att projektet uppfyller övergripande mål.
Projektledare	Beställarrepresentant	Föra VA-organisationens talan. Godkänna tidplaner, fakturor, mindre ändringar.	Framdrift av projektet. Budget, tidplan, omfattning följer handlingar och beslut.
Process/ driftingenjör	Bistå med process- och driftkompetens	Godkänna luftningsdesign, genomförandeplan.	Kravställning gällande luftningsdesign. Delta vid provning och driftsättning.
Underhålls- ansvarig	Granska maskinhandlingar, delta i teknikmöte maskin. Bistå med maskinkompetens.	Godkänna maskinhandlingar. Kontrollera maskininstallation.	Tar fram underhållsplan för blåsmaskin och luftare. Kravställare maskin. Delta vid besiktning och driftsättning.
Elansvarig	Granska elhandlingar, delta i teknikmöte El. Bistå med elkompetens. Fungera som delprojektledare El.	Projektleda elprojektering och -installation. Godkänna elhandlingar. Kontrollera elinstallation. Godkänna att anläggningen spänningssätts.	Kravställer elspecifikation för installation. Deltar vid besiktningar, spänningssättning.
Styr- & regler- ansvarig	Granska styrhandlingar, delta i teknikmöte styr. Bistå med styr och reglerkompetens	Godkänna styrhandlingar. Kontrollera styrinstallation	Säkerställer att blåsmaskin, instrument kommunicerar med överordnat styrsystem. Kravställning kring styrning av luftningssystemet. Deltar i besiktning och utcheckning.
Referensgrupp	Stödja styrgruppen gällande beslut om rör tekniska lösningar	Ta beslut gällande tekniska frågor	Att granska och besluta om tekniska vägval.
Brukargrupp	Granska förslag, dela med sig av sin erfarenhet kring drift av anläggning.	-	Granska förslag utifrån ett arbetsmiljö- och underhållsperspektiv.

Om inte VA-huvudmannen har egen resurs ska en teknisk konsult anlitas för att göra nödvändig utredning kring luftningsbehovet, ta fram olika förslag för utformning, ta fram kostnadsförslag och genomförandeförslag. Om projektet genomförs som en utförandeentreprenad (AB 04) ska ett konsultföretag göra en detaljprojektering och ta fram bygghandlingar. Konsulten kan också ta fram förfrågningsunderlag och delar med administrativa föreskrifter (AF-delar) om det inte finns en egen upphandlingsenhet som sköter det.

Det kan vara en fördel att anlita samma konsult som har tagit fram detaljprojektering eller förfrågningsunderlag att delta under genomförande som kontrollant av installation och leverans av utrustning, så att levererad utrustning håller den standard eller kapacitet som har krävts i förfrågningsunderlaget.

Under själva utredningsfasen av ett projekt rekommenderas att flera olika leverantörer av luftningsutrustning, instrument och blåsmaskiner kontaktas för att skapa en uppfattning om vad marknaden har att erbjuda och låta dessa komma med olika förslag på lösningar. Det är under utredningsskedet det är till stor nytta att kunna diskutera olika lösningar med leverantörer så att det inte under detaljprojekteringen ställs krav på något som ingen kan leverera, eller kraven blir så lågt ställda att systemet inte blir effektivt.

Om en konsult har anlåtts för utredningen är det viktigt att konsulten även är delaktig vid all kontakt med leverantörer så att konsulten kan ta med sig denna information in till utredningen och detaljprojekteringen.

Eftersom alla kommunala VA-bolag lyder under Lagen om offentlig upphandling (LOU) eller Lagen om upphandling inom försörjningssektorerna (LUF) får ingen kontakt tas med leverantörer under anbudstiden. Det innebär att den enda möjligheten att få in information från leverantörer är under utredning och projekteringsskedet.

Även om det är en fördel att så många leverantörer som möjligt får möjlighet att delta under utredningsskedet är det inget som hindrar en beställare att endast kontakta ett fåtal leverantörer för att inte belasta utredningsarbetet för mycket. Det står beställaren fritt att kontakta de leverantörer hen finner lämpligt i detta skede.

I ett luftningsprojekt är normalt leverantörer uppdelade i produktkategorierna luftare, blåsmaskiner, ventiler och instrument, även om vissa leverantörer har flera produkter i sitt sortiment.

De entreprenörer som är aktuella i ett luftningsprojekt är normalt bygg-, maskin-, el-, styrentreprenörer. Ibland kan även en ventilationsentreprenör vara inblandad som underentreprenör till maskin om det ska dras större luftningsledningar till blåsmaskiner eller liknande. Vid större ombyggnadsprojekt är ofta byggentreprenören generalentreprenören (GE) eller totalentreprenören (TE), medan maskinentreprenören som installerar luftare och blåsmaskin blir underentreprenör (UE). Entreprenörer kommer in sent i projektet om inte projektet genomförs i någon samverkansform.

Enligt LOU/LUF går det att ha en dialog med potentiella anbudsgivare, leverantörer, med mera om vad beställaren bör tänka på vid utformning av upphandlingsdokumenten. Denna dialog kan även ske fortlöpande under projektets gång fram tills en officiell förfrågan har publicerats. Det är viktigt att tänka på grundprincipen om likabehandling, vilken innebär att alla leverantörer ska ges samma förutsättningar, till exempel måste alla leverantörer få tillgång till samma information samtidigt.

12.3 Upphandlingsförfarande

Första steget vid en upphandlingssituation är att fundera på vilket upphandlingsförfarande som ska användas. Det tänkta beloppet för upphandlingen, det så kallade tröskelvärdet, påverkar vilka upphandlingsförfarande som kan väljas. År 2019 var tröskelvärde för upphandling enligt LOU/LUF ca 52,6 MSEK medan direktupphandlingsgränsen var ca 590 000 SEK för LOU och ca 1,1 MSEK för LUF.

Upphandling av ett luftningssystem understiger normalt beloppet för tröskelvärdet. Detta innebär att valet står mellan tre upphandlingsförfaranden: förenklat förfarande, urvalsförfarande och direktupphandling. Förenklat förfarande är nog det som är vanligast. Detta innebär att alla leverantörer får lämna anbud och att beställaren får förhandla med en eller flera anbudsgivare.

Vid urvalsförfarande genomförs först ett förkvalificeringssteg för att sedan kunna välja ut de leverantörer som ska få lämna anbud. Upphandlande enhet får därefter förhandla med en eller flera anbudsgivare och att tilldelning sker till en anbudsgivare efter ett uppsatt angivet utvärderingsförfarande.

Som en tredje metod finns direktupphandling, men i praktiken är det vid ytterst få tillfällen som detta förfarande går att utnyttja med hänsyn till de låga beloppsgränser under vilka direktupphandling är tillåten. Direktupphandling är även omgärdad av en hel rad regler som måste vara uppfyllda för att kunna användas även om kontraktssumman understiger den aktuella beloppsgränsen. Exempelvis gäller beloppsgränsen för hela kalenderåret och för inköp inom hela organisationen. Beloppet gäller även för inköp av varor med identisk eller likartad användning och varor som typiskt erbjuds av en och samma leverantör, som till exempel blåsmaskiner och luftare. Även när det skulle gå att utnyttja direktupphandling finns det fördelar med att istället tillämpa förenklat förfarande eftersom det ger fler leverantörer möjlighet att lämna anbud och därmed ökar chansen att den bästa tekniska lösningen erhålls.

12.4 Upphandlingsformer

12.4.1 Delad entreprenad (DE)

Delad entreprenad (DE) är en vanlig form när ett kontrakt enligt AB 04 (utförandeentreprenad) upphandlas. Beställaren har då allt ansvar att besluta hur entreprenaderna ska delas upp i olika upphandlingar av entreprenader och maskininstallationer. Det innebär sedan att beställaren ansvarar för att lösa uppkomna teknikproblem, ta fram och följa upp tidplaner och kostnader. Detta görs antingen av en projektledare inom den egna organisationen eller kan köpas som en konsulttjänst. Detta kräver att resurser och kunskaper finns inom organisationen att hantera ett omfattande teknikprojekt. Den egna drift- och underhållsorganisationen kan då ges möjlighet att ställa krav på utrustningsdelar och kan få den anläggning som önskas.

Mer information finns på:
Upphandlingsmyndighetens
hemsida:

<https://www.upphandlingsmyndigheten.se/upphandla/om-upphandlingsreglerna/Upphandlingsforfaranden/>

12.4.2 Generalentreprenad (GE)

Om beställaren saknar resurser och kunskap att upphandla, genomföra och samordna uppdelade enskilda entreprenader kan en generalentreprenad (GE) istället upphandlas, där en generalentreprenör handlas upp, via ett kontrakt enligt AB 04, vilket normalt är den entreprenör som har störst andel arbete (största kontraktssumman). Denne får i sin tur handla upp underentreprenörer för respektive teknikområde.

En variant av GE är samordnad GE, där beställaren handlar upp entreprenörerna som en DE, men sedan överför samordningsansvaret till en entreprenör, allt via kontrakt enligt AB 04.

12.4.3 Totalentreprenad (TE) och funktionsentreprenad (FE)

När ABT 06 eller ABA 99 används utförs entreprenaden som en totalentreprenad (TE) eller funktionsentreprenad (FE). Beställaren handlar då upp en totalentreprenör som i sin tur handlar upp konsulter för projektering och erforderliga entreprenader och maskininstallationer för genomförande av respektive teknikområde.

12.5 Entreprenadformer (avtalsformer)

Det finns en mängd olika entreprenadformer att ta hänsyn till. Tabell 12.2 nedan har sammanställts av Varim (branschorganisationen för konsulter, entreprenörer och leverantörer inom vattenrening), som ett stöd för att hitta rätt entreprenadform beroende på typ av projekt.

Tabell 12.2 Sammanställning av entreprenadformer.

Standard-avtal	Ursprungligen upprättat för	Konstruktions-ansvar	Process-/funktionsansvar	Garantitid
ABT 06	Byggnadsprojekt	Totalentreprenör	Totalentreprenör	5 år från godkänd slutbesiktning på utförande och material/varor. 2 år vid beställarönskemål för material/varor.
AB 04	Byggnadsprojekt	Beställare	Beställare Konsult, enligt ABK09	2 år från godkänd slutbesiktning på utförande och 5 år för valda material/varor. 2 år vid beställarönskemål för material/varor. 10 år från efter uppdragets slutförande för upptäckta skador vid vårdslöshet.
ABA 99	Processanläggning	Totalentreprenör	Totalentreprenör	2 år från övertagande efter tillfredställande resultat på gods/montage.
ABK 09	Konsulttjänster	Konsult	Konsult enligt ABK09	10 år från efter uppdragets slutförande för upptäckta skador vid vårdslöshet.
ABM 07	Leverans av varor	Leverantör	Leverantör	5 år från godkänd slutbesiktning på varans funktion.
ALOS 05	Leverans av varor till offentlig sektor	Leverantör	Leverantör	1 år på produkten från leverans.
NL 09/17	Leverans av produkter	Leverantör	Leverantör	1 år på produkten från leverans.
NLM 10	Leverans och montage av produkter	Leverantör	Leverantör	1 år från övertagande på gods och montage.

För lite större projekt är det framför allt ABT 06, AB 04 och ABA 99 som blir aktuella entreprenadformer.

12.5.1 ABT 06

ABT 06 som refererar till standardkontraktet *Allmänna bestämmelser för totalentreprenader avseende byggnads-, anläggnings- och installationsarbete* är framtaget av Föreningen Byggandets Kontraktskommitté (BKK) där samtliga större aktörer i bygg- och anläggnings-Sverige är medlemmar. Avtalet är skrivet för att gälla då en entreprenör har ansvar för *både* projektering och genomförande av ett projekt. Denna kontraktsform kallas för *totalentreprenad*.

Svårigheten med både ABT 06 och ABA 99 (Avsnitt 12.5.3) ur ett beställarperspektiv är att det måste kunna specificeras vilken funktion önskas och hur den ska kunna verifieras efter genomförandet. Denna funktion måste vara objektiv och mätbar.

Användningsområde: Lämplig vid nybyggnation eller då ombyggnationen inte kommer att påverka befintlig (pågående) verksamhet/drift. Anpassad för entreprenader med i huvudsak mark och bygg som inte kräver prestandaprov. Respektive part ansvarar för lämnade uppgifter och lösningar. Det slutgiltiga ansvaret har entreprenören.

Entreprenadformen används ofta när beställaren inte har resurs eller kunskap att driva projektering och genomförande. Entreprenadformen innebär ofta att komponenter som är minst kostsamma för entreprenören erhålls samtidigt som prestandaprov normalt inte ingår.

12.5.2 AB 04

AB 04 som refererar till standardkontraktet *Allmänna bestämmelser för byggnads-, anläggnings- och installationsentreprenad* är liksom ABT 06 framtagen av BKK. Avtalet är skrivet för att gälla då beställaren ansvarar för projekteringen och entreprenören endast för genomförande (utförandet). Denna kontraktsform kallas för *utförandeentreprenad*.

Användningsområde: Lämplig vid ombyggnation i en befintlig anläggning som är i ständig drift. Beställaren har möjlighet att utforma en projektorganisation med resurser och kunskaper att kravställa utformning och tidplan. De av beställarna anlitade konsulterna som används i projekteringen ansvarar enligt ABK 09 som främst reglerar vårdslöshet under 10 år. Garantitid är 2 år för material och varor och 5 år för utfört arbete. Det slutgiltiga ansvaret gentemot entreprenören har beställaren. Beställaren ska ha kunskap och resurser till upphandling, genomförande och prestandaprovning.

12.5.3 ABA 99

ABA 99 som refererar till standardkontraktet *Allmänna bestämmelser för leverans av industriella anläggningar* är till skillnad från AB 04, ABT 06, ABK 09 med flera *inte* framtagen av BKK utan av Teknikföretagen som är bransch- och arbetsgivarorganisationen för de företag som levererar teknisk utrustning. Till skillnad från de övriga avtalsformerna är innehållet i ABA 99 inte överenskommet mellan representanter för leverantörerna på ena sidan och beställarna på den andra sidan, utan det är ensidigt framtaget av Teknikföretagen. Detta innebär *inte* att avtalsformen bör undvikas, men

det är något som bör finnas i åtanke. Upphandlingsdokumenten för ABA 99 baseras på generella mallar omfattande kontrakt, krysslista och försäkringsbilaga, att jämföras med AF-delarna till ABT 06 och AB 04. En viktig sak att ha i åtanke vid användning av ABA 99-kontrakt är att det inte finns någon skrivning gällande garantibesiktning i standardavtalet. En sådan besiktning måste då skrivas till separat.

Användningsområde: Lämpad för processanläggningar, där prestanda bestäms i samråd mellan beställaren och entreprenören. Det slutgiltiga ansvaret ligger hos entreprenören. Graden av funktionsåtagande från leverantörens sida är dock inte en nödvändig följd av valet av ABA 99, utan av hur den tekniska specifikationen för anläggningen utformas. Entreprenadformen kallas normalt *funktionsentreprenad*.

12.5.4 ABM 07

ABM 07 reglerar *köp av byggvaror för yrkesmässig byggverksamhet* och är anpassad till standardavtal för entreprenader. Liksom AB 04 och ABT 06 är den framtagen av BKK. Garantitiden är 5 år från och med godkänd slutbesiktning, dock max 6 år från avlämnade av varan. ABM 07 används tillsammans med AF-delen AMA AF KÖP08.

Användningsområde: För ”enklare” projekt som installation av enstaka komponenter i ett befintligt system. Det slutgiltiga ansvaret har leverantören. Entreprenadformen kallas normalt *produktleverans*.

12.5.5 NL 09/17, NLM 10

NL och NLM är också framtagna av Teknikföretagen för leverans (NL) och leverans inklusive montage (NLM) av enstaka processutrustning/anläggning. Även om provning både i fabrik (FAT) och provning efter installation (övertagandeprov) ingår, vilket dock särskilt måste avtalas om, så ingår inget funktionsansvar i en NL/NLM-leverans. Inte heller begrepp som besiktning eller slutbesiktning finns med i avtalet. En NL/NLM-leverans passar därför bäst när det handlar om ”enklare” projekt såsom installation av enstaka komponenter i ett befintligt system.

Användningsområde: För ”enklare” projekt så som installation av enstaka komponenter i ett befintligt system. Det slutgiltiga ansvaret har leverantören. Normalt kallad produktleverans eller produktleverans med montage.

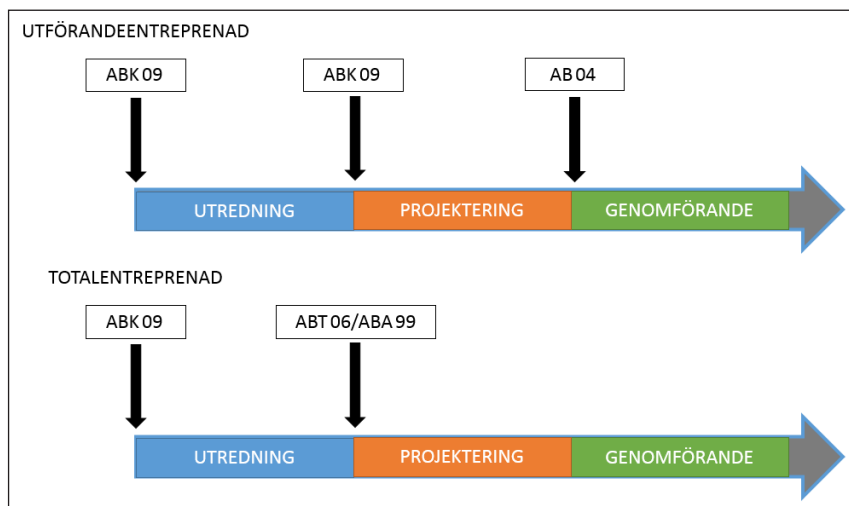
12.6 Entreprenadformer under ett projekt

Under ett luftningsprojekt behöver ofta flera avtalsformer användas (Figur 12.2). Antalet avtal är beroende på vem som gör förstudien och projekteringen. För många reningsverk finns ett behov av att få stöd av någon konsult för att ta fram dimensionerande belastning och utreda vilka alternativ som finns. Om det inte finns en egen upphandlingsenhet kan det också behövas hjälp med att skriva ihop upphandlingsdokument med mängd- och kravspecifikation samt AF-delarna.

Vid en utförandentreprenad (AB 04) behöver beställaren se till att detaljprojektering tas fram så att entreprenören har bygghandlingar att bygga

efter. Normalt görs detaljprojektering i en utförandeentreprenad av ett konsultföretag som då är upphandlad enligt ABK 09.

I en total/funktionsentreprenad har kanske en konsult hjälpt till att göra utredningar och ta fram underlag för upphandling. Konsulter handlas alltid upp med ABK 09. Upphandling av entreprenören görs med ABT eller ABA och i detta fall sköter entreprenören även projekteringen, antingen med egen personal eller med konsult.



Figur 12.2 Användning av olika entreprenadformer under ett projekt.

12.7 Val av entreprenadform

Val av entreprenadform handlar till syvende och sist om riskfördelning mellan beställare och de olika parterna i ett projekt.

En beställare som har önskan av att påverka innehållet i en luftningslösning måste samtidigt vara beredd att ta motsvarande ansvar och risk för den slutliga lösningen. Beställarens engagemang i projektet går hand i hand med den risk som denne är villig att ta. Samtidigt minskar risk och ansvar för de övriga parterna i motsvarande grad. Omvänt gäller att om det finns liten benägenhet att ta risk och ansvar kommer möjligheten att vara med och påverka lösningen minska.

Huvudprojektet avgör ofta avtalsform. Om luftningsprojektet endast är en del i en större ombyggnation som inbegriper anläggningsarbete (betong) kommer avtalsformen med all sannolikhet bli ABT 06 eller en AB 04, eftersom detta är standardavtal för byggentreprenörer.

Vid ett större projekt som inbegriper ombyggnad/utbyggnad av flera anläggningsdelar (reningssteg) så kan det vara lämpligt att lyfta ur den biologiska reningen till en egen entreprenad. Huruvida luftningssystemet bör lyftas ut från den biologiska reningen beror på vem som ska ansvara för funktionen på den biologiska reningen. Om det finns en avsikt att ställa entreprenören för den biologiska reningen till ansvar för reningsgrad/funktion måste även luftningssystemet ingå i den entreprenaden. Val av

Val av entreprenadform handlar om riskfördelning

entreprenadform beror då på den tänkta ansvars- och riskfördelning och vem som har kompetens/resurs.

Oavsett entreprenadform behöver någon ansvara för projektering, genomförande, funktion och reningsresultat. Beroende på val av entreprenadform kommer att ansvaret för dessa uppgifter att variera.

Oberoende av val, är det av yttersta vikt att säkerställa nödvändig kompetens och tillräckligt med resurser för hela projektet, från början i utrednings- via projekterings- till den slutliga genomförandefasen.

Val av entreprenadform styrs också av vad den som är beställare tycker är viktigt. Önskas maximal möjlighet att påverka utformning och innehåll är en utförandeentreprenad enligt AB 04 mest lämplig, alternativt en samverkansform i någon entreprenadform. Är kostnadskontrollen överordnad allt annat så är en ABT 06 mest lämplig, förutsatt att projektet är väl definierat och avgränsat så att entreprenören har beräknat på korrekta uppgifter som lämnats av beställaren. Om däremot processfunktionen och prestanda är det mest kritiska, är en ABA 99 mest lämplig där det finns bäst möjlighet att krävställa en detaljerad provningsplan med funktions- och prestandakrav.

Förenklat kan beställarens val av entreprenadform styras av följande faktorer:

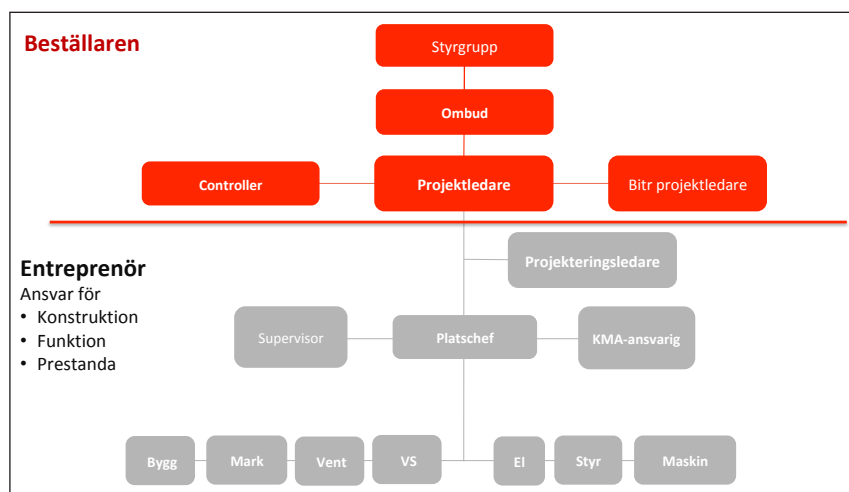
1. beställarens projekttyp (bygg, process, produkt/montage)
2. beställarens ansvars-/risktagande (konstruktion/funktion/process)
3. beställarens kompetens och resurser (projektorganisation)

Lämplig entreprenadform utifrån projekttyp och beställarens vilja till ansvar och risktagande sammanfattas i Tabell 12.3 på nästa sida. Exempelvis anger tabellen att för ett projekt som till största delen handlar om en processanläggning där fokus är på en reningsfunktion så är ABA99 lämpligt, men det innebär också att beställarens möjlighet till att ta ansvar och därmed risk för processutformningen är låg.

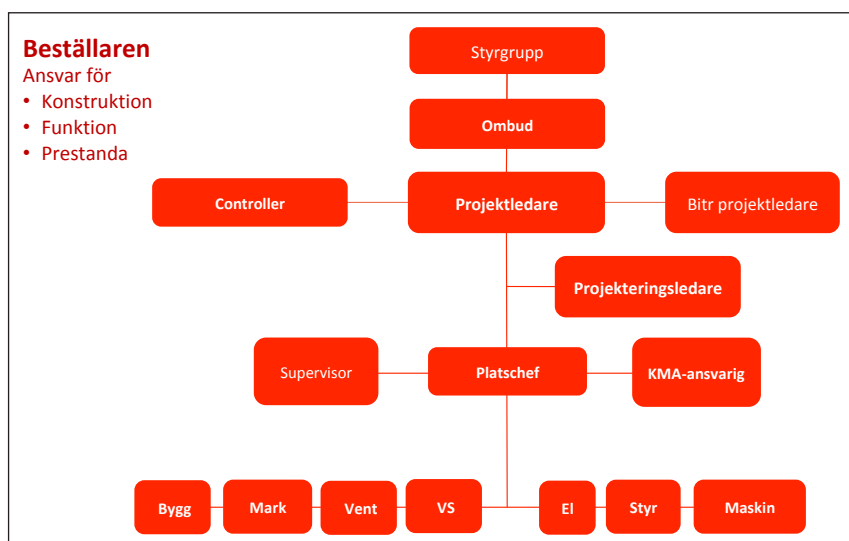
För att förstå vilka resurser och kompetenser som beställaren behöver tillhandahålla beroende på entreprenadform hänvisas till Figur 12.3-12.6 nedan, för respektive entreprenadform. Röda rutor indikerar de resurser som beställaren behöver tillhandahålla, antingen i form av egen anställd personal eller som egen inhyrd personal (konsult).

Tabell 12.3 Sammanställning entreprenadformerna ABT 06, AB 04 och ABA 99.

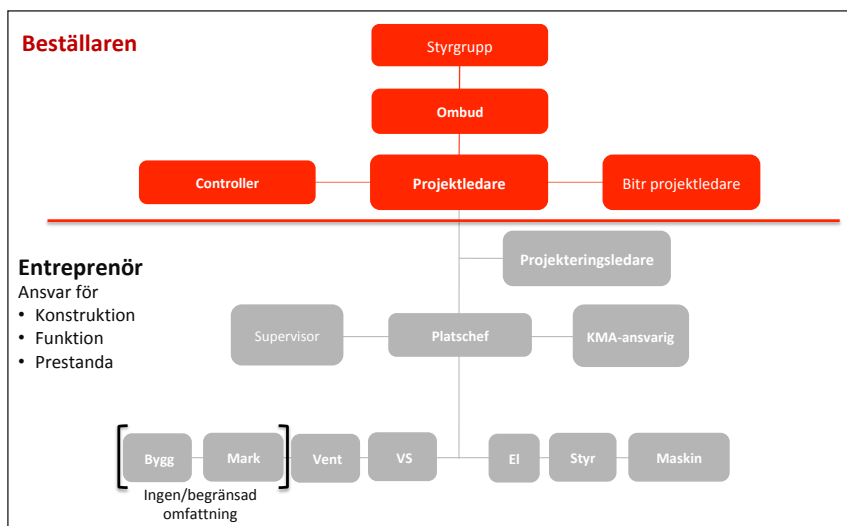
Stand-ardavtal	Ursprungligen upprättat för	Ansvar för konstruktion	Ansvar för process/funktion	Resursbehov hos beställaren	Fördelar	Nackdelar
ABT 06	Byggnadsprojekt	Total-entreprenör	Total-entreprenör	Generellt lågt	- Fastpris - Tydlig ansvarsfördelning	- Anpassad för mark-/byggleverans - Begränsad/ingen påverkan på utformning - Risk för tilläggs-kostnader
AB 04	Byggnadsprojekt	Beställare	Konsult/beställare	Medel till högt	- Investeringskalkyl framtagen - Kontroll över kostnader och utformning - Lägre extern kostnad vid nyttjande av egna resurser	- Teknisk lösning redan vald - Beställaren har "allt" ansvar, inklusive samordning - Risk för tilläggs-kostnader vid brist i konsultens/beställarens dokumentation
ABA 99	Processanläggning	Total-entreprenör	Total-entreprenör	Lågt till medel	- Fastpris - Tydlig ansvarsfördelning (t.ex. mark/bygg enligt ABT 06) - Fokus på process	- Erfarenhet om processprestanda krävs - Begränsad/ingen påverkan på utformning - Risk för tilläggs-kostnader



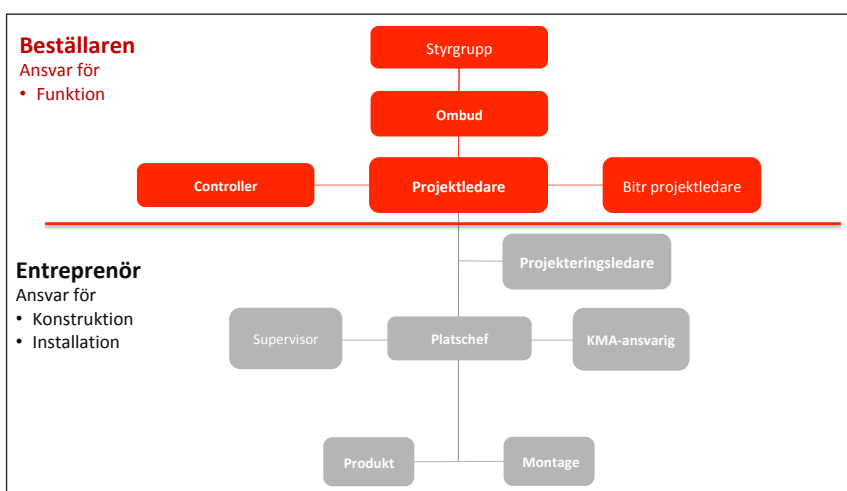
Figur 12.3.
Resursuppdelning i en totalentreprenad.



Figur 12.4
Resursuppdelning i en utförandeentreprenad.



Figur 12.5
Resursuppdelning i en
funktionsentreprenad.



Figur 12.6
Resursuppdelning i en
produktleverans med montage.

Beställaren bör alltid överväga möjligheten till en tidig leverantörs-/entreprenörsdialog då olika leverantörer/entreprenörer har olika kompetenser beroende på vilka processlösningar de själva marknadsför och utvecklar. De leverantörer/entreprenörer som arbetar mycket med bärarmaterial (MBBR) vet sannolikt bäst hur ett luftningssystem ska utformas för en sådan process, medan de leverantörer/entreprenörer som arbetar med ringkanaler ("racetrack") eller SBR vet bäst hur luftningssystem ska utformas för dessa processer.

En intressant aspekt är att AB-kontrakt kan gynna kompetensutveckling av konsultföretag som har resurser att både genomföra förstudier/utredningar som detaljprojektering, medan ABT-kontrakt kan gynna byggföretag och ABA-kontrakt kan gynna processentreprenörer.

12.8 Samverkan

Samverkan är ett "intensivt" samarbete mellan beställare, entreprenör och konsult med samma konstellation fram till färdig anläggning, där vanligtvis entreprenören i slutändan tar funktions- och processansvaret. Sam-

Samverkan är inte en entreprenadform eller ersättningsform utan en arbetsform.

verkan kan användas för alla entreprenadformer, ersättningsformer eller upphandlingsformer.

Det finns olika varianter av samverkan, till exempel projekt, ramavtal och allianser, som alla kan användas för total- eller general- eller den allt vanligare funktionsentreprenaden.

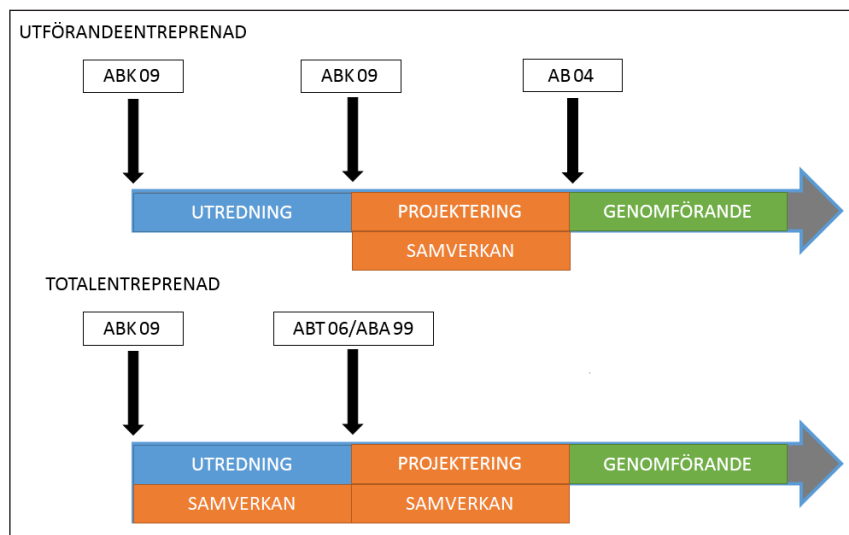
Flera ersättningsformer är möjliga. Det kan vara enbart löpande, enbart fast, eller fast med en löpande del. Det är också vanligt att ett incitamentsavtal finns så att vinsten "delas" om projektet går under en fastställd budget, men att även förlusten "delas" om budgeten överskrids.

Det pågår för närvarande ett internationellt certifieringsarbete för en ISO standard 44001 – Collaborative business relationships. Mer information om entreprenadupphandling i samverkan kan läsas i Konkurrensverkets uppdragsforskningsrapport 2014:4 (Eriksson & Hane, 2014).

När passar samverkan vid luftningsprojekt?

- För anläggningar när förutsättningarna inte är helt givna om anläggningens status.
- För komplexa problemställningar, till exempel markförhållanden eller obeprövade tekniker, som inte har självklara lösningar

Samverkan kan även ske mot enbart en konsult för att sedan gå in i en vanlig utförandeentreprenad för genomförande. Samverkan kan ske under hela projektcykeln med alla inblandade parter eller endast under en enskild projektfas mot en enskild part.



Figur 12.7 Samverkan under projektcykeln.

Fördelar med samverkan:

- Effektivare riskhantering
 - Eventuella risker adresseras direkt vid uppkomst under projektets alla faser och hanteras likformigt.

- Strävar mot bättre kvalitet
 - Möjlighet att vid behov kunna gå in på alla typer av detaljer.
- Färdigt i överenskommen tid
 - En tidplan med gemensamt ansvar ger en förankring med verklighetsanknytning.
- Positivt och konstruktivt samarbete
 - Alla söker lösningar och arbetar mot ett gemensamt och överenskommet mål.
- Ömsesidigt lärande – Teknikutveckling
 - Det skapas ett forum med högt i tak och där det går att dela med sig av sina idéer och erfarenheter.
- Skapar trygghet
 - Det finns inga rätt eller fel – Alla idéer/bekymmer kan tas upp och adresseras med möjlighet att vid behov ta in ytterligare/nödvändiga resurser.
- Ger förutsättningar för engagemang och delaktighet
 - Arbetsmodellen ser till en helhet där alla funktioner är representerade med lika värde.
- En roligare resa
 - Allt görs som ett team enligt gemensamt definierade och förankrade förutsättningar, mot ett och samma mål.

Nackdelar med samverkan:

- Resurskrävande
 - Beställaren inte är medveten, när upphandling görs, om vad som krävs för resurser av samtliga deltagare.
- Tidkrävande
 - Kräver mer resurser från beställar- och leverantörsleden och tar längre tid i anspråk.
- Missar målet
 - Omfånget riskerar att öka under processens gång med risk att fel resultat erhålles i förhållande till vad som från början var tänkt.
 - Risk att organisationen invaggas i en falsk trygghet att problem som kan dyka upp längs vägen löser sig av sig själv.
- Flera agendor
 - Den gemensamma organisationen harmoniserar fullt ut, det vill säga att olika deltagare eller delar av organisationen har andra mål och agendor än de som bestämts för projektet.
- Kärt barn har många namn
 - Eftersom det inte finns någon erkänd definition av samverkan kan vem som helst ta fram ett eget koncept och kalla det för samverkan.
- Svårare att konkurrensutsätta

12.9 Upphandling av ett energieffektivt luftarsystem

För att säkerställa att inkomna anbud är utformade med energieffektivitet i fokus finns det ett antal saker som bör beaktas vid framtagande av upphandlingsdokumentet. Det lämpliga tillvägagångssättet presenteras i Kapitel 8 och nedan följer några sammanfattande punkter kring framtagande av underlag för energieffektivt luftningssystem med vidare hänvisningar:

- Belastningsdata bör vara utformad som ett varaktighetsdiagram så att det framgår hur stor tid som en viss belastning förekommer. Valen av dimensionerande max- och minbelastning är viktiga (Avsnitt 8.2.2).
- Om ett varaktighetdiagram inte kan tas fram bör underlaget baseras på ett antal dimensionerande driftpunkter. Dessa driftpunkter kan vara min, max och medel för ett luftarsystem (Avsnitt 8.2.3) och minst fem driftfall för blåsmaskiner (Avsnitt 8.7).
- Överdimensionering av blåsmaskiner ska undvikas och ifall dimensionering görs för en framtida belastning ska bestyckning ske så att maskinerna kan drivas effektivt även vid dagens belastning (Avsnitt 8.7.1).
- För att anbuden ska vara jämförbara måste samtliga dimensionerande förutsättningar vara specificerade. För luftarsystem är dessa till exempel SOR eller AOR med α -värde, referenstemperatur för luftvolymberäkning, vattendjup och tryckförluster (Avsnitt 8.2.3). Exempel på förutsättningar för blåsmaskiner är luftflöde på trycksidan av blåsmaskinen, insugningsförhållande (temperatur, omgivningstryck och luftfuktighet) och mottryck (Avsnitt 8.7).

Om upphandling av luftningssystemet utgör en del i ett större projekt kan det vara lämpligt att bryta ut luftningen alternativt hela biosteget till en egen entreprenad och handla upp den baserad på energieffektivitet. Om det har ställts krav på en processgaranti för den biologiska reningen måste luftningssystemet ingå i den entreprenaden där processgarantin finns. Ingen entreprenör kommer att ta en processgaranti för biologisk rening om inte luftningssystemet ingår i denna entreprenad. Detsamma gäller för samtliga kritiska stödsystem till den biologiska reningen.

Att arbeta fram ett anbud med fokus på energieffektivitet tar ofta mer tid för leverantörerna än att ta fram det billigaste alternativet. Mer arbete behöver läggas ned för att optimera och fintrimma lösningen för att verkligen hitta den mest energieffektiva lösningen. Om det dessutom ska göras för ett flertal driftpunkter eller ett helt varaktighetsdiagram krävs det flera iterationer innan den bästa lösningen nås. Därför är det extra viktigt när ett energieffektivt luftningssystem ska upphandlas att anbudsgivarna ges den tid det krävs och inte för korta anbudstider anges.

En rimlig tid som en anbudsgivare av luftarsystem ska få bör ligga kring minst två till tre arbetsveckor. Det är då viktigt att det är tid som leverantören ska ha till förfogande och inte den tid som entreprenören som eventuellt ska paketera hela lösningen har.

12.10 Utvärderingskriterier

Generellt rekommenderas att en utvärderingsmodell baserad på livscykelkostnad används med fokus på energieffektivitet. För mindre avloppsreningsverk och reningsverk utan kvävekrav kan de små luftbehoven leda till att investeringsdelen blir en betydande del av hela livscykelkostnaden. I sådana fall kan utvärdering baserad på livscykelkostnad vara mindre lämplig och som alternativ kan utvärderingen baseras på energieffektivitet, det vill säga $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ eller kWh/Nm^3 luft.

Nedan listas parametrar som är relevanta att begära i anbudet från leverantörer. Ett vanligt upplägg är att livscykelkostnaden beräknas för en kalkyltid på 10 eller 15 år med hänsyn till investering, energianvändning och underhåll. Det är också vanligt att beakta fler parametrar än dessa och värdera dem i ett poängsystem. Där kan till exempel även referenser ingå. Hur energianvändning kan användas för beräkning av livscykelkostnader för luftarsystem och blåsmaskiner illustreras i Exempel 8.4 och i Fallstudie 1 och 2 (Avsnitt 14.2 och 14.3)

Blåsmaskiner

- Min och max luftflödeskapacitet
- Specifik effekt vid fem driftpunkter. Information om eventuella hål i reglerområdet.
- Effekt och strömbehov vid respektive driftpunkt
- Medel och max mottryck inklusive förluster (både statiska och dynamiska förluster)
- Max och min insugningstemperatur
- Max och min lufttemperatur på trycksidan
- Intern eller extern frekvensomformare
- Ljudnivå fritt fält enligt ISO 2151 (ISO, 2008)
- Servicebehov och kostnad för detta i ett föreslaget serviceavtal som option
- Supporttillgång

Luftarsystem

- Specifik luftningseffektivitet ($\text{kg O}_2/\text{kWh} - \text{SAE}$), vid minst tre men helst fem driftpunkter (samma driftpunkter som för blåsmaskin)
- SOTE vid min, medel och max luftflöde per luftare
- SOTR ($\text{kg O}_2/\text{h}$) vid min, medel och max belastning
- Luftbehov (Nm^3/h) vid min, medel och max belastning
- Luftflödeshastighet i nedledare vid min, medel och max luftflöde
- Mottryck över luftare vid min, medel och max luftflöde per luftare
- Mottryck vid fläns mot luftarstam vid min, medel och maxluftflöde per nedledare
- Max tillåtna lufttemperaturer för systemet med avseende på rör, luftare och membran

- Bottentäckningsgrad (%)
- Installationshöjd för luftarmembran över bassänggolv

12.11 Prestandakrav, garantier och funktionsprovning

I kontaktshandlingar måste eventuella provningar och prestandatest vara inskrivna. AB 04 och ABT 06 kapitel 7 Besiktning reglerar möjligheten till kontroll av kravställningen genom förbesiktning och slutbesiktning sedan avslutande garantibesiktning. ABA 99 kapitel 10-15 reglerar möjligheten att mer ingående specificera krav på egenkontroll, intrimning, slutkontroll, provdrift och prestandaprov.

Tabell 12.4 Jämförelse av ABT - ABA gällande kontroller och provningar.

AB/ABT	ABA
Egenkontroll	Egenkontroll (Provning och Kontroll)
Förbesiktning	-
-	Intrimning
Slutbesiktning	Slutkontroll
-	Provdrift
-	Övertagande
-	Prestandaprov
Garantibesiktning	-

AB 04/ABT 06 omfattar en förbesiktning men framförallt en garantibesiktning som inte finns i ABA 99. Värt att notera är att garantibesiktning skall påkallas av beställaren före utgång av garantitiden.

Det finns även en skillnad vid val av besiktningsman, där ABT 06 kapitel §7 i första hand omnämner en "extern" opartisk av beställaren utsedd besiktningsman (oberoende tredjepartsbesiktning) medan ABA 99 kapitel 12.3 i första hand förordar en "intern" gemensam slutkontroll som initieras av beställaren. En gemensam genomgång kan främja fokus på funktion och prestanda utöver de rent kontraktsevenliga fordringarna.

För att få ut det bästa av både AB 04/ABT 06 och ABA 99 kan de kapitel som berör besiktning och prestandaprov kombineras från respektive kontrakt. Om det vid användandet av AB 04/ABT 06 även önskas krav på prestandaprov, kan kapitel 10-15 från ABA 99 skrivas in. Omvänt är det utifrån ABA 99 lämpligt att komplettera med text ur kapitel 7 i AB 04/ABT 06 gällande garantibesiktning. Om denna metod ska användas rekommenderas starkt att en avtalsjurist anlitas för att säkerställa att det blir rätt.

För att säkerställa att det levererade luftningssystemet överensstämmer med vad som beställts bör krav ställas på att prestandaprovning kan komma att genomföras (Tabell 12.5). Vid specificering av prestandakraven eller funktionskraven är det viktigt att dessa är objektivt mätbara. Särskilt viktigt blir detta i samband med en totalentreprenad när det inte finns samma kontroll över projekteringen som vid en utförandeentreprenad.

För leverans av ett luftningssystem är det vanligt att kräva att ett renvattentest ska genomföras för att verifiera att begärda värden för SOTE och SOTR är uppfyllda. Sådana tester kan utföras i fullskala eller i en testanläggning och beskrivs närmare i Kapitel 11.

Fullskaletest har fördelen att alla anläggningsspecifika förhållanden tas hänsyn till. Tyvärr kan det ibland vara svårt att genomföra ett renvattentest i fullskala beroende på att testvolymen är mycket stor, eller att anläggningens utformning gör det svårt att isolera den från övriga icke-luftade volymer. I dessa fall bör det övervägas att istället kräva att test görs i en testanläggning. Testanläggningar finns hos leverantörer och hos oberoende företag. Vid prestandaprov i en testanläggning installeras luftarna på samma vattendjup och med samma botten täckningsgrad som den faktiska installationen. Luftarsystemet provas sedan mot överenskomna luftflöden. Det som är svårare att ta hänsyn till vid prestandaprov i en testanläggning är om det i beställarens luftningsbassäng finns hinder som negativt påverkar syreeffektiviteten såsom voter eller områden som inte är täckta med luftare på grund av till exempel en pumpsump eller annan installation (se även Avsnitt 11.2).

Om installation av en ny blåsmaskin ingår i samma entreprenad (kontrakt) kan det även begäras att syreöverföring per effekt ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$) provas (se även Avsnitt 11.1–11.2).

Tabell 12.5. Kontroller och tester av ett luftningssystem vid olika skeden.

Leverans	FAT	Installation (SAT)	Driftsättning/Garantikrav
Luftarsystem	- Renvattentest i labb	- Visuellt "Bubbel"-test med rent vatten som täcker en bit över luftarna	- Luftflöde (min-max) per enhet - Mottryck över membran vid specifikt luftflöde - Mottryck vid leveransgräns vid ett specifikt luftflöde - Lufthastighet i specifik ledningssträcka vid ett specifikt luftflöde - SOTE, SOR vid dimensionerat luftflöden
Blåsmaskin	- Maskintest enligt standard	- Kontroll varvtal, Hz och flöde - Kontroll av mottryck	- Luftflöde (min-max) vid ett specifikt mottryck - Lufttemperatur ut från maskin vid specificerad driftpunkt - Buller vid maskin - Strömförbrukning och effektuttag vid ett specifikt luftflöde - kWh/Nm^3 luft
Blåsmaskin+ luftarsystem	- Allt ovan	- Allt ovan	- Allt ovan + - Lufttemperatur i insida ledning vid en specifik punkt - SAE ($\text{kg O}_2/\text{kWh}$)

12.12 Sammanfattning

- Att driva ett projekt i alla skeden från förstudie, förprojektering, detaljprojektering upphandling till genomförandet kan vara krävande och tar tid från "ordinarie" arbete för de som ingår i projektorganisationen eller ska leverera uppgifter till den.
- För en dialog med flera konsulter, leverantörer, entreprenör under utrednings/förstudiefasen av ett projekt för få så mycket information och få del av deras expertkunskaper inom sitt specifika område innan upphandlingsförfarandet utförs i genomförandefasen.

- Välj entreprenadform utifrån flera parametrar:
 - Omfattning/komplexitet och typ av projekt
 - Den egna beställarorganisationens ansvars-/risktagande och påverkansmöjlighet
 - Tillgång till den kompetens och resurser som organisationen har eller kan tillhandahålla.

13 Modellering av luftningssystem

Processmodellering är ett kraftfullt verktyg för beräkning, simulering och analys av avloppsreningsprocesser och -verk. Erfarenheterna med processmodellering är många och de välbeprövade modellerna används bland annat för design och dimensionering av reningsverk och anläggningsdelar, optimering och styrning av reningsprocesser samt utbildning på olika nivåer. Genom att använda processmodeller är det möjligt att få en ökad insikt i hur reningsverkets olika delar fungerar utan att genomföra tids- och resurskrävande försök på det egna verket.

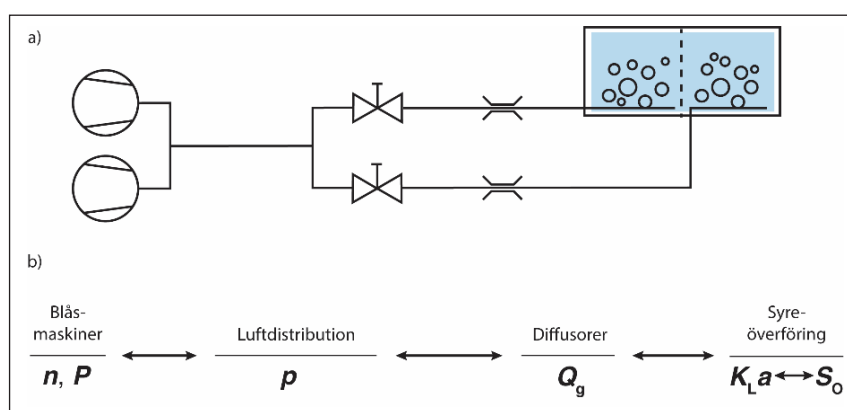
Utvecklingen av mekanistiska processmodeller för avloppsreningsprocesser tog fart under 1950-talet efter att det under seklets början i huvudsak hade använts enkla empiriska modeller. Biokinetiska modeller av de biologiska processerna möjliggjordes av den grundläggande beskrivningen av mikrobiell tillväxt av Monod (1949) som kombinerad med endogen metabolism är basen för våra modeller än idag (Makinia, 2010). Under 1980- och 1990-talen syntetiserades utvecklingen i tre ”state of the art”-modeller för aktivslamsystem, Activated Sludge Model No. 1, No. 2d och No. 3 (ASM1, ASM2d och ASM3; Henze et al., 2000). Under senare delen av 1990-talet påbörjades också utvecklingen av modeller för anaerob rötning och 2002 publicerades Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1; Batstone et al., 2002). Med de huvudsakliga bioprocessmodellerna på plats tog utvecklingen av reningsverksövergripande modeller fart. Alla delprocesser av betydelse har idag beskrivits avseende hydrauliska, fysikaliska, kemiska och biologiska processer, exempelvis försedimentering, mellansedimentering, kemisk fällning, slamförtjockning, avvattnings och olika rejektivattenreningstekniker. Stödsystem såsom pumpning, luftning och kemikaliedosering kan inkluderas beroende på frågeställning. Alla kommersiella simuleringsplattformar för avloppsreningsverk kan idag simulera ett helt reningsverk med samtliga delprocesser av betydelse sammankopplade. Det finns flera kommersiella programvaror på marknaden för att specifikt modellera och simulera avloppsreningsverk: GPS-X från Hydromantis (Kanada), WEST från DHI (Danmark), BioWin från Envirosim (Kanada), SIMBA från iFAK (Tyskland) och SUMO från Dynamita. De matematiska modellerna går också att bygga in i mer generella beräkningsprogramvaror som till exempel Matlab/Simulink från Mathworks Inc. (USA).

När luftning ska inkluderas i en processmodell är det tre delar som behöver beaktas (Amaral et al., 2017):

1. Försörjningssystemet av luft från blåsmaskiner till luftare
2. Syreöverföring från bubblor till vätskefasen
3. Syrebehovet

I de biologiska processmodellerna (till exempel ASM1) är syre en tillståndsvariabel vars koncentration beräknas med en differentialekvation

som tar hänsyn till in- och utflöde från reaktorn, syreförbrukning av mikroorganismerna för oxidation av COD och ammonium samt syretillförsel via luftning. Förhållandena i processen (flöden, koncentration av föroreningar, mängd biomassa, etc.) kommer vid varje givet tillfälle ge det aktuella syrebehovet (AOR). I processmodellen tillförs syre – utöver eventuellt syre i inkommande vatten – generellt som masstransportkoefficienten, $K_L a$ (d^{-1}). En modell för luftningssystemet måste därför först och främst inkludera en relation mellan $K_L a$ och luftflöde samt vidare beskrivning av alla de komponenter och storheter för luftningssystemet som är relevanta för ändamålet med modelleringsstudien. För ett bottenluftarsystem kan detta till exempel inkludera modellekvationer för luftare ($K_L a$ till luftflöde), tryckförluster i luftledningar och ventiler samt blåsmaskinens varierande prestanda vid olika driftlägen (Figur 13.1).



Figur 13.1 Schematisk figur av ett bottenluftarsystem (a) samt modellstruktur (b). Övergripande modellelement visar på relationen mellan blåsmaskinens varvtal (n) och effekt (P), distributionssystemets tryck (p), luftflöde (Q_g), massöverföringen av syre ($K_L a$) och syrekonsentrationen i vattenfasen (S_o) (Arnell, 2016).

Vilka delar av luftningssystemet som behöver inkluderas i modellen beror på syftet med studien. Utifrån syrebehovet som bioprocessmodellen ger beräknas tillförseln av syre från luft som $K_L a$ i enlighet med två-filmsteorin för massöverföring från gas till vätska som utförligt beskrivits i Kapitel 6. Vidare är det i allmänhet viktigt att luftflöden beräknas från simulerat syrebehov. Luftflöden kan till skillnad från masstransportkoefficienten valideras vilket underlättar förståelse och kommunikation av simuleringsresultaten. Om dynamisk energiprestanda för blåsmaskinerna är av intresse behöver tryckfallet i systemet också beräknas och en modell för blåsmaskinen tas med. För modellbaserad design av luftningssystem inklusive dimensionering av blåsmaskiner och inställning av regulatorer måste hela luftningssystemet modelleras i detalj med luftledningar, strypningar, ventiler med mera (Schraa et al., 2015).

Några exempel på hur modellering kan användas har getts i tidigare kapitel gällande design (Exempel 8.5-8.7), styrning (Exempel 9.1) och drift (Exempel 10.2 och 10.4) av luftningssystem. Nedan beskrivs också hur

modellering kommit till god användning inför ändringar i driftstrategier och processutformning vid Nykvarnsverket (Exempel 13.1).

13.1 Modell för bottenluftare

Massöverföringen av syre från tillförd luft till vätskefasen kommer att bero på luftningssystemet (bubblornas storlek, vätskedjup, luftartäthet, etc.), vattnets beskaffenhet (temperatur, föroreningsgrad, etc.) och omgivningsförutsättningar (temperatur, lufttryck, höjd över havet, med mera). För ett finblåst bottenluftarsystem kan relationen mellan $K_L a$ och Q_L beskrivas med Ekvation 13.1 (Arnell, 2016).

$$K_L a = \alpha F (1,024^{T-20}) \frac{SOTE \cdot x_{O_2} \cdot M_{O_2} \cdot \rho_{g, STP}}{V_L \cdot M_g \cdot \delta \cdot S_{O, sat STP}} Q_L \quad (13.1)$$

där

$K_L a$ = den volymetriska syreöverföringshastigheten i vätskefasen (d^{-1})

α = en korrektionsfaktor för förorenat vatten (-)

F = en korrektionsfaktor för igensättning av luftarna (-)

$SOTE$ = syreöverföringseffektiviteten för luftarna som funktion av Q_L (%)

x_{O_2} = andelen syre i torr luft (-)

M_{O_2} = molmassan för syre ($g \cdot mol^{-1}$)

$\rho_{g, STP}$ = densiteten för luft vid standardtryck och standardtemperatur (STP) ($kg \cdot m^{-3}$)

V_L = volymen på den luftade reaktorn (m^3)

M_g = molmassan för luft ($g \cdot mol^{-1}$)

δ = en korrektionsfaktor för vätsketrycket (-)

$S_{O, sat STP}$ = mättnadskoncentrationen för syre vid STP (1 atm, 20 °C) ($g \cdot m^{-3}$)

Q_L = luftflödet ($m^3 \cdot d^{-1}$)

Beroende på om modellen är uppsatt för att beräkna luftflödet baklänges från modellens givna behov av $K_L a$ eller framlänges beräkna $K_L a$ utifrån ett tillhandahållt luftflöde kan Ekvation 1 skrivas om för respektive variabel.

I Ekvation 13.1 ingår $SOTE$ (se Avsnitt 8.2.4). Om dynamiska simuleringar utförs bör $SOTE$ vara en funktion av luftflödet. Då inkluderas hur syreöverföringen varierar med luftflödet. Punkterna på $SOTE$ -kurvan kan i allmänhet tillhandahållas av leverantören av luftningssystemet och en funktion (till exempel ett tredjegradspolynom) anpassas för att få en kontinuerlig funktion att använda i modellen. Relevanta parametrar och variabler i Ekvation 1 måste korrigeras för omgivningsförutsättningar såsom temperatur, lufttryck och höjd över havet.

En känslig parameter i Ekvation 1 är alfavärdet, α (se Kapitel 6 och 7). Alfavärdet är en lumpad parameter som inkluderar alla faktorer som påverkar att $K_L a$ skiljer sig mellan avloppsvatten och renvatten. Avloppsvattnets och slammets sammansättning är avgörande för α som därför varierar

längs med en pluggflödesreaktor men även luftningsutrustningen påverkar, se Avsnitt 7.3 och Rosso (2018). Dessa faktorer bör inkluderas i modellen utifrån bästa möjliga dataunderlag. Om målsättningen med modellen kräver hög noggrannhet kan omfattande mätningar att krävas av till exempel alfavärden vid anläggningen.

13.2 Modell för luftdistribution

Dynamiken i hela luftningssystemet är sammanlänkad via luftflöde och tryck. I ett väl designat luftningssystem dominerar tryckfallet över luftarna för att ge en jämn fördelning av luft över hela luftarnätet. Ändå är tryckfallet i ledningssystemet betydande för simuleringsresultaten och framförallt i sämre designade eller sämre reglerade system.

Tryckfallet i ledningssystemet modelleras efter strömningsmekanikens klassiska principer. Den förenklade versionen av Bernoullis ekvation där alla tryckförluster ansätts i ekvivalent ledningslängd med Darcy-Weisbachs ekvation kan användas (Amaral et al., 2017). Tryckfallet i reglerventiler modelleras med en anpassad funktion till data från tillverkaren av tryckfallets relation till öppningsgrad för ventilen. Samma princip tillämpas för luftare. Detta kräver att hela ledningsnätet för luft modelleras med ledningar, böjar, förträngningar, delningar med mera. Det omfattande arbetet underlättas av att parametrarna i modellen ofta är tabulerade värden som kräver minimal kalibrering. Vissa av de kommersiella modelleringsprogrammen på marknaden har kompletta bibliotek med enhetsmoduler för olika komponenter i ett luftningssystem.

13.3 Modell för blåsmaskiner

Energianvändningen för luftning beräknas ofta förenklat med en faktor kWh/Nm³. Prestanda för blåsmaskiner är dock inte linjär och varierar mycket mellan olika typer och fabrikat. Om en detaljerad simulering av energianvändningen för luftning efterfrågas så behöver blåsmaskiner modelleras dynamiskt.

Funktioner för blåsmaskinens flöde, tryck på utsidan samt energianvändning eller effektivitet implementeras. Principiellt modelleras blåsmaskiner av centrifugal- och displacementstyp olika. För centrifugalmaskiner kan ett mekanistiskt samband för kompression av luft användas som inkluderar variabler som varvtal, luftflöde och blåsmaskinens dimensioner och inställningar (fläktjulets storlek, ledskenors läge med mera). För displacementsmaskiner är det vanligare att anpassa en funktion till en prestandakurva för den aktuella blåsmaskinen. Detta är möjligt även för centrifugalmaskiner men det ger färre möjligheter att simulera styrning av blåsmaskiner utöver frekvensstyrning av varvtalet. Funktioner baserade på kurvor från leverantören har dock den fördelen att behovet av kalibrering är minimalt.

13.4 Modell för energikostnad

För större reningsverk med hög total elanvändning tillämpas effektabonnemang. Med effektabonnemang är kostnaden för elleveransen beroende av det maximala effektuttaget. Det betyder att om effekttopparna på reningsverket kan minimeras kommer kostnaden för el att minska mer än bara besparingen i energi (kWh) och omvänt. Om modellen ska användas för att simulera energikostnaderna på ett reningsverk är det därför inte alltid tillräckligt att modellera energianvändningen. Det är möjligt att också inkludera effektabonnemangets prisstruktur för kostnader och på så vis modellera hur energikostnaden över längre perioder påverkas av till exempel en viss styrstrategi (Aymerich et al., 2015).

Exempel 13.1

Processmodellering vid Nykvarnsverket

Vid Nykvarnsverket i Linköping används processmodellering som inkluderar luftningen i den biologiska behandlingen. Den biologiska reningen består av en stegbeskickad aktivslamprocess i åtta parallella linjer. Grundmodellen utvecklades 2013 baserad på metodiken i detta kapitel. I ett första skede användes modellen för att jämföra styrstrategier av luftningen:

- Intermittent luftning (strategin som tillämpades i praktiken)
- Luftning mot fasta börvärden för syrehalten
- Ammoniumåterkoppling

Modellen kalibrerades och validerades med två olika uppsättningar data från reningsverket. Simuleringarna visade att både utsläppsresultat och energianvändning påverkades av vilken strategi som valdes. Strategin baserad på ammoniumåterkoppling visade sig ge lägst uppskattad energianvändning. Samtidigt kunde effekterna av styrstrategin nedströms aktivslamprocessen utvärderas, såsom behovet av kolkälla för efterdenitrifikation.

I ett senare skede har modellen även använts för att utvärdera olika alternativ inför en framtida ut-/ombyggnad av processen. Då har indata baserad på en belastningsprognos för år 2035 använts. Här har exempelvis förfiltrering och MBR i olika delar av anläggningen utvärderats med simuleringar. Processmodellen har också använts för att optimera profilen i syrehalter vid ändrad beskickning.

Processmodelleringen har underlättat möjligheten att utvärdera olika alternativ för både drift av nuvarande system och framtida processutformning innan dessa har implementerats.

13.5 Sammanfattning

Processmodellering är ett kraftfullt verktyg för beräkning, simulering och analys av avloppsreningsprocesser och -verk i datormiljö. Modellering och simulering är användbart vid design, optimering och analys av luftningssystem. Beroende på frågeställningen kan tre olika delar inkluderas i modellen: i) försörjningssystemet av luft från blåsmaskin till luftare, ii) syreöverföringen från bubblorna till vätskefasen och iii) syrebehovet i processerna. Syrebehovet ges av de detaljerade bioprocessmodellerna och syreöverföringen kan modelleras med en dynamisk modell för luftarna som inkluderar en variabel SOTE-profil. För detaljerade studier av energianvändning, optimering/trimning av styrstrategier eller design av blåsmaskinskapacitet krävs en detaljerad modell för hela rörsystemet med böjar, förträngningar, ventiler, med mera. Detta är möjligt att inkludera i några av de kommersiella modelleringsprogrammen på marknaden.

14 Beräkningsexempel och fallstudier med erfarenheter från luftningsprojekt

I detta kapitel presenteras inledningsvis ett beräkningsexempel med en jämförelse av blåsmaskinstekniker baserat på teoretiska fall. Därefter presenteras fyra genomförda luftningsprojekt och erfarenheter som kan dras från dessa.

I *Beräkningsexempel – val av blåsmaskinsteknik* jämförs energianvändning och livscykelkostnad för olika blåsmaskinstekniker vid olika förhållanden som storlek på belastningen till reningsverket och bassängdjup. Förutsättningarna är valda för att vara typiskt förekommande. Prestandan för de aktuella blåsmaskinerna är hämtad från det verkliga utbudet på marknaden i dagsläget. På så sätt illustreras vilka faktorer som kan påverka vilken blåsmaskinsteknik som får lägst livscykelkostnad.

I *Fallstudie 1* beskrivs hur ett nytt system med luftare designades och handlades upp. Design baserades på belastning av AOR och data från luftflödesmätare. De inkomna anbuden utvärderades baserat på livscykelkostnad. På så sätt kunde en lösning som innebar hög syreöverföringseffektivitet och lågt mottryck, jämfört med andra alternativ, erhållas.

Livscykelkostnad tillämpas även i *Fallstudie 2*, men här vid upphandling av nya blåsmaskiner. I detta fall illustreras dimensionering baserat på historiska luftflödesdata. Livscykelkostnad användes också för att utreda olika alternativ för renovering eller byte av maskiner.

I *Fallstudie 3* visas, utöver design av ett nytt luftarsystem, hur detta testades med avseende på syreöverföringshastighet och syreöverföringseffektivitet i en testtank. Genom ett sådant test kunde prestandan för det tilltänkta systemet verifieras innan installation.

När ett luftningsprojekt väl är genomfört är det inte alltid som prestandan för det levererade systemet följs upp. Men i *Fallstudie 4* visas hur flera åtgärder för ökad energieffektivitet – byte av blåsmaskiner, luftare och styrning – följdes upp noggrant, en åtgärd i taget, med hjälp av en parallell referenslinje.

14.1 Beräkningsexempel - val av blåsmaskinsteknik

I detta exempel illustreras några principer som är viktiga att beakta vid val av lämplig blåsmaskin. Det finns många faktorer som påverkar vilken typ av blåsmaskin som är mest lämplig för en viss tillämpning. Som tidigare nämnts kan valet av mest optimal blåsmaskinsteknik bland annat påverkas av:

- Luftbehovet, som till stor del beror på belastningen till reningsverket, men även syreöverföringseffektiviteten
- Mottrycket, som till stor del beror på bassängdjupet
- Variationer i belastning (reglerområdet)

Det kommer att illustreras hur några av dessa faktorer kan påverka vilken blåsmaskinsteknik som blir mest optimal ur ett ekonomiskt perspektiv där kostnader för såväl investering som elanvändning inkluderas.

14.1.1 Förutsättningar och tillvägagångssätt

Användning av livscykelkostnad

Eftersom en mer energieffektiv maskin kan vara mer kostsam vid införskaffande blir det inte sällan en avvägning mellan en högre investeringskostnad och en lägre driftkostnad eller vice versa. Ett bra sätt att jämföra ekonomin för investeringar är därför att beräkna livscykelkostnaden för de aktuella alternativen. Livscykelkostnaden är summan av investeringskostnaden och driftkostnaden över ett antal år, kalkyltiden. Livscykelkostnaden kan också beräknas som det så kallade nuvärdet med en kalkylränta. Genom att inkludera ränta blir nuvärdet av den framtida driftkostnaden lägre. Nuvärdet besvarar frågan: "Hur mycket pengar behövs idag för att kunna betala en utgift om x antal år?"

Vid jämförelse av investeringar med livscykelkostnad krävs att kalkyltiden är densamma för de olika alternativ som jämförs. Kalkyltiden ska motsvara den tid som maskinerna kommer att användas och kan maximalt vara dess förväntade livstid. Valet av kalkyltid påverkar jämförelsen, liksom valet av kalkylränta och det är därför viktigt att dessa väljs med omsorg. För blåsmaskiner är det vanligt att räkna med 10 till 15 års kalkyltid. Kalkylräntan ska generellt spegla organisationens kapitalkostnad. Typiska värden för kalkylräntan ligger mellan 0 och 5 %. En högre ränta leder till en lägre vikt för driftkostnader i förhållande till investering i jämförelsen.

I denna jämförelse antogs kalkyltiden vara 15 år och kalkylräntan 3 %. En sådan räntenivå har tidigare använts för investeringsanalys i VA-sektorn baserat på bedömningar från SKL och Konjunkturinstitutet (Svenskt Vatten, 2017). Kostnaden för el antogs vara 1 SEK/kWh.

När driftkostnader beräknas för blåsmaskiner utgör normalt energianvändningen den dominerande delen. Kostnader för underhåll tillkommer. Behov och typ av underhåll skiljer sig mellan olika typer av maskiner vilket diskuteras närmare i Avsnitt 10.4.4. I denna jämförelse beräknades driftkostnaderna endast utifrån energianvändningen. Samtliga livscykelkostnader är därför angivna exklusive underhåll.

Dimensionering och val av blåsmaskiner

Som utgångspunkt i jämförelsen användes ett referensfall med följande förutsättningar:

- Luften ska användas till biosteget på ett kommunalt avloppsreningsverk belastat med 40 000 pe.
- Försedimentering tillämpas före biosteget under vilken 25 % BOD₇ och 10 % totalkväve avskiljs.
- Utsläppskrav: 10 mg N/l (årsmedel), 0,5 mg P/l (kvartal) och 15 mg BOD₇/l (årsmedel).
- Syrebehovet (AOR) beräknades enligt Avsnitt 8.2.3 och för beräkning av syrebehovet i renvatten vid standardförhållanden (SOR) antogs $\tau = \Omega = 1$, $\alpha = 0,6$ och $\beta = 0,95$. Koncentrationen av löst syre i processen antogs vara 2 mg/l.
- Syreöverföringseffektiviteten (SOTE) antogs vara 30 %.
- Vattendjupet antogs vara 5 m och det totala mottrycket i anläggningen konstant 550 mbar.
- Fördelningen av luftbehov till följd av variationer i belastning följde en normalfördelning (se Figur 14.1) med 1 % av varaktigheten vid min och max. Medelluftbehovet motsvarade 55 % av maxbehovet och minbehovet motsvarade 11 % av maxbehovet.

För att illustrera inverkan av olika parametrar varierades vissa värden utifrån referensfallet. Inverkan av verkets totala belastning undersöktes för ett mindre (10 000 pe) och ett större (200 000 pe) alternativ. Ett högre (8 m) och lägre (3 m) vattendjup undersöktes och vid dessa antogs SOTE vara 44 % respektive 21 % och mottrycken 850 mbar respektive 350 mbar.

För varje driftfall valdes en vridkolvsblåsmaskin, en skruvblåsmaskin och en turboblåsmaskin från det utbud som fanns att tillgå från tre leverantörer på marknaden i skrivande stund. Investeringskostnaden för respektive maskin uppskattades utifrån prisläget 2019, exklusive moms, frakt och installationsarbete. Kostnader för underhåll av maskiner exkluderades också på grund av de stora svårigheterna att förutse dessa med en någorlunda noggrannhet. I samtliga fall antogs flera maskiner av samma typ och storlek arbeta parallellt. Antalet maskiner var 3 st (40 000 pe), 2 st (10 000 pe) respektive 5 st (200 000 pe) vilket innebar en redundans så att 70 % (40 000 pe), 55 % (10 000 pe) respektive 80 % (200 000 pe) av det maximala luftbehovet kunde tillgodoses med en maskin ur drift. Maskinvalet anpassades för att uppnå denna prestanda under besvärliga sommarförhållanden (30 °C lufttemperatur). Det ska noteras att displacement- och turboblåsmaskiner regleras av olika ISO-standarder (se Avsnitt 11.1) vilket är en källa till viss osäkerhet i jämförelsen.

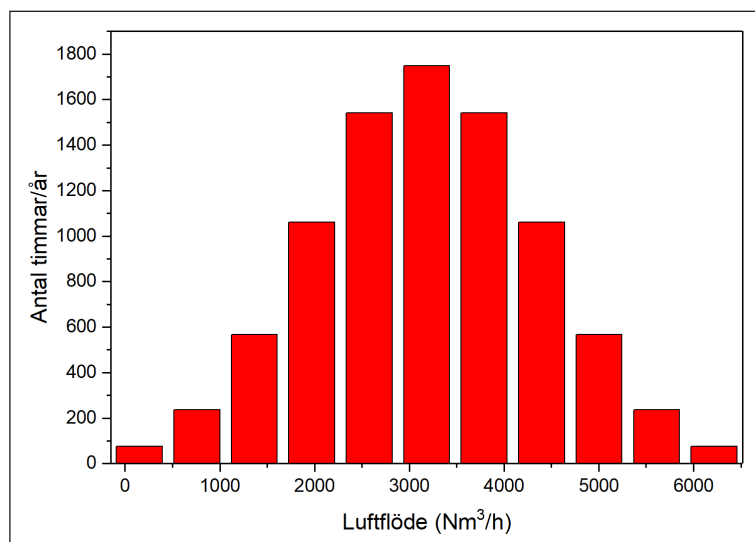
För varje vald blåsmaskinsmodell beräknades energianvändningen baserat på varaktigheten för olika luftbehov enligt den antagna normalfördelningen. Den ingående luften antogs vara i genomsnitt 7 °C med 0 % luftfuktighet. Den totala energianvändningen per enhet levererad luft beräknades inklusive förluster i frekvensomriktare och andra maskindelar. Det antogs att parallella driften av flera maskiner skedde med överordnad

styrning på sådant sätt att energianvändningen minimerades vid det aktuella luftflödet.

14.1.2 Resultat

Referensfall

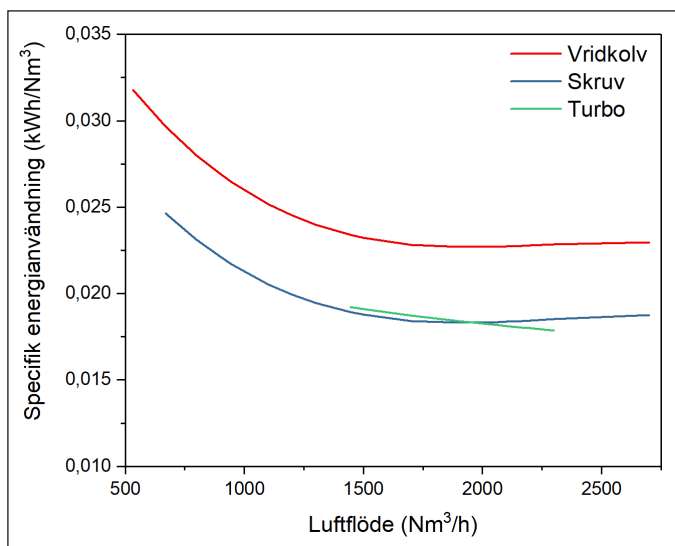
För referensfallet (40 000 pe, 5 m vattendjup, 3 blåsmaskiner) erhöles fördelningen av det erforderliga luftflödet enligt Figur 14.1. Vid beräkning av energianvändning för luftning är det viktigt att ta hänsyn till hela reglerområdet genom att använda flera olika driftpunkter med respektive varaktighet. Om sådan information saknas kan antaganden om spridningen göras utifrån typiska belastningsvariationer.



Figur 14.1 Fördelning av luftbehov som antogs för beräkningar i referensfallet (40 000 pe, 5 m vattendjup).

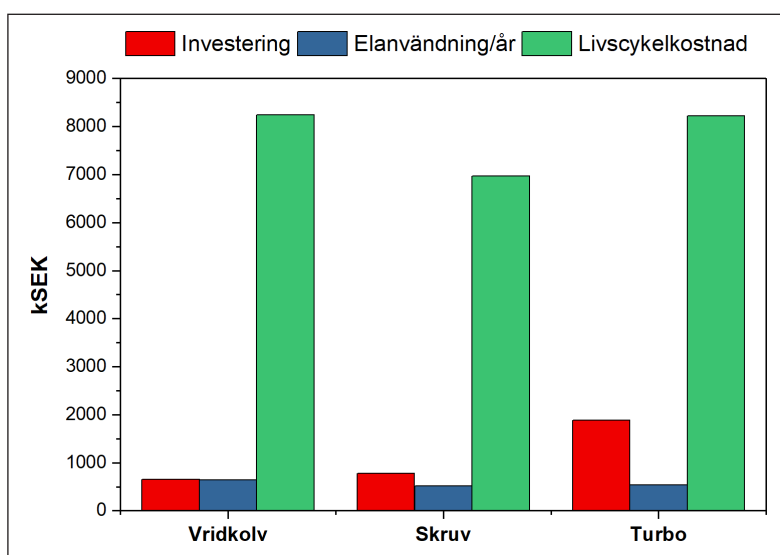
Vikten av att beakta hela reglerområdet illustreras nedan i Figur 14.2. Under förutsättningarna i referensfallet har den aktuella vridkolvsblåsmaskinen högst specifik energianvändning per enhet luft (kWh/Nm³) i hela reglerområdet. Skruvblåsmaskinen och turboblåsmaskinen har lägre och sinsemellan snarlik specifik energianvändning i området 1 500 till 2 200 Nm³/h. Turbomaskinen ligger lägre än skruvmaskinen i sin bästa driftpunkt. Men möjligheten att reglera ned kapaciteten är mer begränsad för den aktuella turbomaskinen vilket gör att när de lägsta luftbehoven föreligger (< 1 500 Nm³/h), kommer anläggningen luftas mer än nödvändigt. Totalt sett kommer därför energianvändningen bli lägre med tre exemplar av den aktuella skruvmaskinen än med tre turbomaskiner. Detta resultat är rakt motsatt det intryck som skulle fås om jämförelsen istället endast gjordes baserat på den bästa driftpunkten för respektive maskin.

Den ekonomiska jämförelsen visade att för denna situation innebar skruvblåsmaskinen den lägsta livscykelkostnaden. Investeringskostnaden var lägst för vridkolvsmaskinen, högre för skruvmaskinen och högst för turbomaskinen, vilket inte är en ovanlig prisbild. I detta fall kompensades den högre investeringskostnaden för skruvmaskinen jämfört med vrid-



Figur 14.2 Energianvändning per enhet levererad luft i förhållande till luftflödet för de olika blåsmaskinerna i referensfallet.

kolvmaskinen mer än väl av den högre energieffektiviteten. Alternativet med skruvmaskiner gav den lägsta livscykelkostnaden (som i hela exemplet anges exklusive underhåll) (Figur 14.3). Alternativet med turbomaskiner hamnade vid dessa förhållanden högre än alternativet med skruvmaskiner på grund av högre investeringskostnad och den mer begränsade förmågan till nedreglering. Driftkostnaden stod för 80–90 % av livscykelkostnaden.



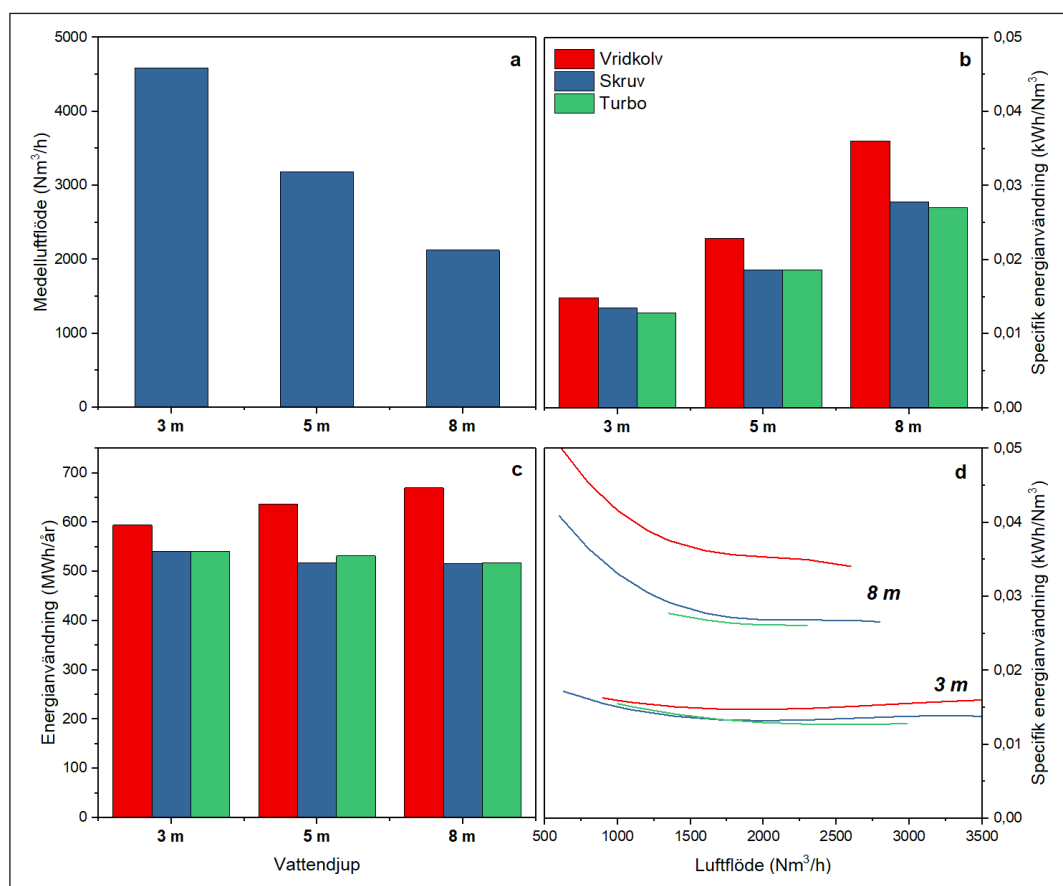
Figur 14.3 Jämförelse av investering, elanvändning och livscykelkostnad (exklusive underhåll) för olika blåsmaskiner i referensfallet (40 000 pe, 5 m vattendjup). (1 kSEK = 1 000 SEK)

Påverkan av vattendjupet

För att illustrera inverkan av vattendjupet gjordes liknande beräkningar för 3 m och 8 m vattendjup. Eftersom mottrycket i systemet normalt till största del utgörs av vattenpelaren antogs dessa vattendjup leda till mottrycken 350 mbar respektive 850 mbar. Storleken på reningsverket och

antal blåsmaskiner antogs vara desamma som i referensfallet, alltså 40 000 pe respektive tre st.

Ett högre vattendjup leder till att luftflödet blir lägre tack vare ett högre värde på SOTE. Luftflödena visas i Figur 14.4a. Ett lägre luftflöde tenderar att minska energianvändningen. Samtidigt krävs det en högre energianvändning *per enhet luft* för att övervinna det högre mottrycket. Det innebär att den specifika energianvändningen blir högre vid ett högre vattendjup vilket visas i Figur 14.4b. Den totala energianvändningen, som är ett resultat av både luftflödet och energianvändningen per enhet luft, visas i Figur 4c. Energianvändningen har beräknats utifrån olika maskinmodeller i de olika fallen, var och en vald för att vara anpassad för det aktuella mottrycket och flödet. Hänsyn har också tagits till reglerområdet vid respektive förhållande (Figur 14.4d) vid drift av tre maskiner.



Figur 14.4 Medelluftflöde (a), genomsnittlig specifik energianvändning (b), total energianvändning (c) och specifik energianvändning som funktion av luftflödet till luftflödet för de olika blåsmaskinerna vid olika vattendjup.

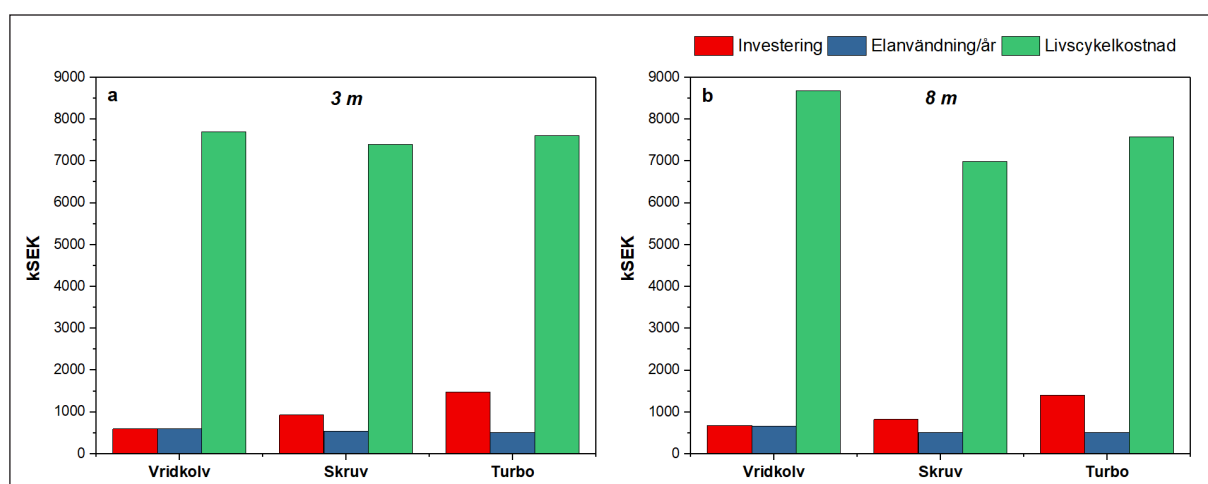
Även om den specifika energianvändningen ökar med ökat vattendjup för samtliga maskintyper, är det tydligt att ökningen är olika stor. Den specifika energianvändningen för vridkolvsmaskinen ökar kraftigare med ökat vattendjup än vad som är fallet för skruv- och turboalternativen. Vid 3 m vattendjup är skillnaden mellan den specifika energianvändningen för vridkolvsmaskinen och de andra relativt litet medan det vid 8 m vattendjup är stort (Figur 14.4b & 14.4d). I hela spannet av vattendjup 3–8

m har alternativen med turbomaskiner högst energieffektivitet, beaktat maskinernas bästa driftpunkt. Samtidigt har de aktuella turbomaskinerna mindre reglerområde än vridkolvs- och skruvmaskinerna (Figur 14.4d).

Den uppskattade årliga energianvändningen var högst med vridkolvs-maskiner vid samtliga vattendjup och 10–20 % lägre med skruv- eller turbomaskiner. Den årliga energianvändningen tenderade att minska med ökat vattendjup för alternativen med skruv- och turbomaskiner tack vare lägre luftflöde (Figur 14.4c). Med vridkolvsmaskiner däremot, blev den uppskattade årliga energianvändningen högre vid högre vattendjup. Ener-gianvändningen för vridkolvsmaskinerna ökade med vattendjupet eftersom förlusten i energieffektivitet överskuggade minskningen i luftbehov. Detta speglar hur det generellt ser ut, nämligen att vridkolvsblåsmaskiner tappar mer i energieffektivitet vid högre mottryck än skruv- och turboblåsmaskiner. Anledningen till detta står att finna i maskinernas grundläggande principer: Vridkolvsmaskiner förflyttar luften genom maskinen utan att komprimera den. Skruvblåsmaskiner utför en intern kompression av luften vilket bidrar till högre energieffektivitet i förhållande till vridkolvsmaskiner vid högre mottryck (se Avsnitt 5.5.1).

Vid 3 m vattendjup var den uppskattade energianvändningen med skruvmaskiner och turbomaskiner ca 10 % respektive 15 % lägre än med vridkolvsmaskiner. De uppskattade livscykelkostnaderna vid detta låga mottryck var dock snarlika (Figur 14.5a).

Vid vattendjupet 8 m blev elanvändningen 23 % lägre med skruv- och turbomaskiner än med vridkolvsmaskiner. Dessutom blev investeringskostnaderna med skruv- och turboteknik lägre än vid 3 m, tack vare det mindre luftbehovet (på grund av högre SOTE) (Figur 14.5b). Med vridkolvs-maskiner blev däremot både driftkostnaden och investeringskostnaden högre med högre vattendjup. Livscykelkostnaden blev därför betydligt lägre (15–20 %) med skruv- eller turbomaskiner än med vridkolvsmaskiner.

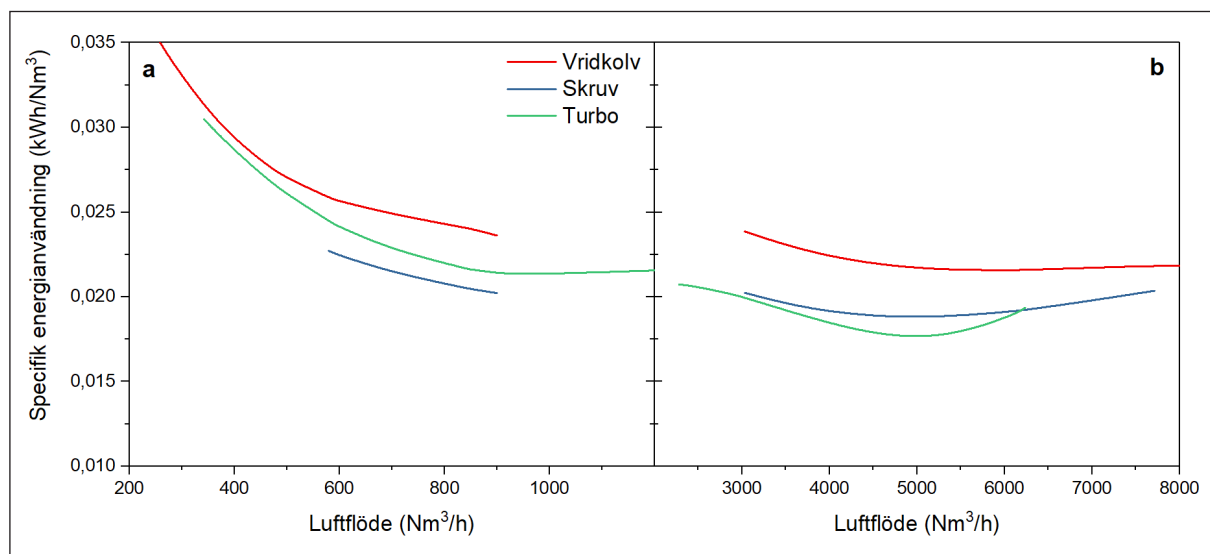


Figur 14.5 Jämförelse av investerings-, drift- och livscykelkostnader (exklusive underhåll) för olika blåsmaskiner vid vattendjupen 3 m (a) och 8 m (b). (1 kSEK = 1 000 SEK)

Påverkan av belastning

Som indikerats ovan är luftbehovets storlek en faktor som starkt påverkar vilken typ av blåsmaskiner som är mest lämplig. Vid samma vattendjup beror luftbehovet till stor del på vilken belastning som behandlas. Därför jämfördes alternativ med de olika typerna av blåsmaskiner för belastningar motsvarande 10 000 pe (2 maskiner) och 200 000 pe (5 maskiner) vid samma vattendjup (5 m).

Vid en belastning motsvarande 10 000 pe hade den aktuella skruvblåsmaskinen lägst energianvändning i hela driftområdet (Figur 14.6a). Livscykelkostnaden i detta fall blev lägst för skruvalternativet (Figur 14.7a). Livscykelkostnaden för vridkolvs- och turboalternativen var högre och sinsemellan snarlik.

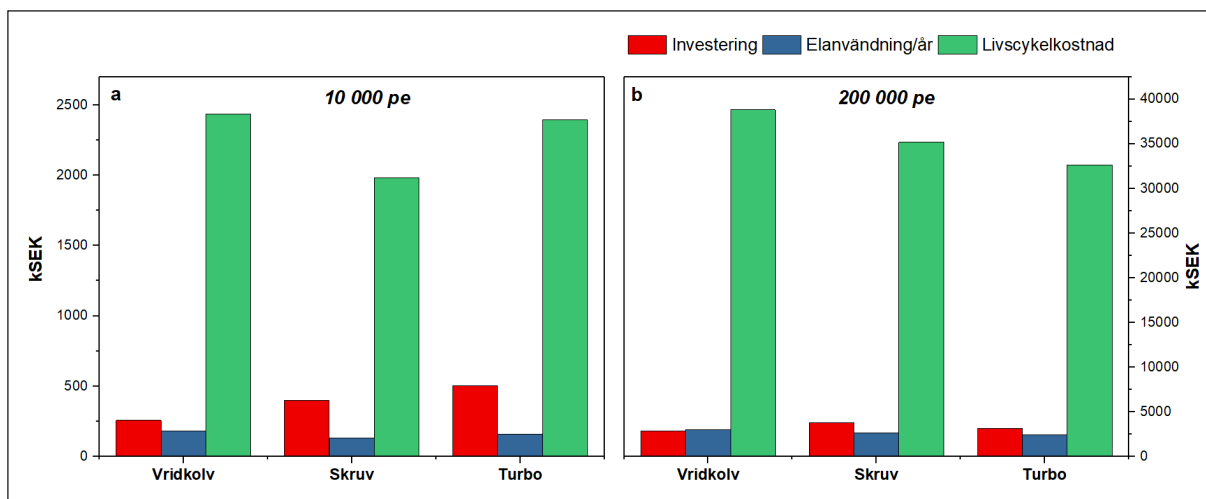


Figur 14.6 Energianvändning per enhet levererad luft i förhållande till luftflödet för de olika blåsmaskinerna vid olika belastningar: 10 000 pe (a) och 200 000 pe (b).

Beräkningarna för en belastning motsvarande 200 000 pe visade att det för ett stort verk finns starkare incitament att investera i en dyrare, men mer energieffektiv teknik. Med större och fler maskiner ges större möjlighet att utnyttja det mest gynnsamma driftområdet hos en turbomaskin (Figur 14.6b). I detta exempel innebar vridkolvsmaskiner (fem st) högst drift- och livscykelkostnad, medan turbomaskiner innebar lägst (Figur 14.7b). Alternativet baserat på fem turbomaskiner innebar ca 20 % lägre elanvändning (-0,5 MSEK/år) och ca 15 % lägre (-6 MSEK) livscykelkostnad än alternativet baserat på vridkolvsmaskiner.

Sammanfattning av slutsatser

Detta exempel har illustrerat hur ekonomiska beräkningar för blåsmaskiner kan göras med hänsyn till kostnader för både investering och elanvändning under maskinens livscykel. Elanvändningen stod för från 80 % till över 90 % av den uppskattade livscykelkostnaden i de olika fallen vilket bekräftar vikten av att fokusera på energieffektivitet.



Figur 14.7 Jämförelse av investerings-, drift- och livscykelkostnader (exklusive underhåll) för olika blåsmaskiner vid belastningarna 10 000 pe (a) och 200 000 pe (b). (1 kSEK = 1 000 SEK)

Det visade sig att den maskin som var mest energieffektiv när respektive maskin beaktades vid sin bästa driftpunkt inte nödvändigtvis var den maskin som hade lägst energianvändning när hänsyn togs till hela driftområdet. Reglerbarhet kan således ibland vara viktigare än hög maximal effektivitet. Vid val av blåsmaskin är det därför viktigt att, så långt möjligt, ta hänsyn till hela dynamiken i luftbehovet.

I praktiken beror vilken blåsmaskin som är mest lämplig på förutsättningarna i det specifika fallet. Beräkningar måste därför göras för varje fall som unikt. Vid beräkning av livscykelkostnaden bör även förväntade underhållskostnader inkluderas efter bästa förmåga, till exempel i form av serviceavtal (se Avsnitt 10.4.4).

Jämförelse av anläggningar med olika vattendjup, och därmed mottryck, visade att vid ökande vattendjup ökar sannolikheten att en skruv- eller turboblåsmaskin har lägst livscykelkostnad. Med en ökande storlek på belastningen, blir det alltmer troligt att en turbomaskin blir det mest lämpliga alternativet. Generellt kan därmed sägas att:

- *Vridkolsblåsmaskiner* används främst men inte uteslutande vid mindre reningsverk, relativt grunda bassänger och när relativt stor vikt läggs vid kostnad för investering.
- *Skruvblåsmaskiner* används generellt men inte uteslutande vid medelstora reningsverk, såväl grunda som djupa bassänger och när låg livscykelkostnad är prioriterad.
- *Turboblåsmaskiner* används främst men inte uteslutande vid medelstora och stora reningsverk, såväl grunda som djupa bassänger och när låg livscykelkostnad och låg driftkostnad är prioriterade.

14.2 Fallstudie 1 - Byte av luftare på Sjölunda avloppsreningsverk i Malmö

Anläggning	Sjölunda avloppsreningsverk
Belägen	Malmö (VA SYD)
Belastning (pe)	350 000
Utsläppsvillkor	BOD ₇ : 12 mg/l (riktvärde månadsmedel) P-tot: 0,3 mg/l (riktvärde månadsmedel) N-tot 70 % reduktion (riktvärde årsmedel)
Projekt	Byte av luftarsystem i ett av fyra block

14.2.1 Sjölunda avloppsreningsverk

Sjölunda avloppsreningsverk i Malmö (VA SYD) tar emot och behandlar avloppsvatten från delar av Malmö och intilliggande kommuner. Reningsverket är dimensionerat för 550 000 pe (med avseende på BOD-belastning) och behandlar i dagsläget avloppsvatten motsvarande ungefär 350 000 pe. Utsläppsvillkoren är 12 mg/l BOD₇, 0,3 mg/l fosfor och 70 % kvävereduktion.

Reningsprocessen omfattar inledningsvis rensgaller (3 mm), sandfång och försedimentering med fällning av fosfor med järnsulfat. Den biologiska behandlingen består av en högbelastad aktivslamprocess för i huvudsak BOD-reduktion, biobäddar för nitrifikation som följs av denitrifikation i en process med bärrmaterial (MBBR) med tillsats av metanol som extern kolkälla (Hanner et al., 2003). En flotationsanläggning finns för efterföljande avskiljning av partiklar. Där kan även polyaluminiumklorid doseras för efterfällning av fosfor som komplement till förfällningen.

Fördenitrifikation tillämpas som komplement till efterdenitrifikationen. Nitrifierat avloppsvatten från biobäddarna recirkuleras genom att ledas tillbaka till inloppet av ett av fyra aktivslamblock, där en fjärdedel av volymen drivs anoxiskt. Detta aktivslamblock behandlar hälften av det inkommande avloppsvattnet. Det nitrifierade rejektivattnet från slamavvattningsanläggningen leds in till anoxiska delar av de andra aktivslamblocken.

14.2.2 Luftningsanläggning

Aktivslamanläggningen består av fyra parallella block, varav tre har vardera två parallella linjer och det fjärde blocket har tre parallella linjer. I block ett och två är vardera linje uppdelad i fem zoner avgränsade med träväggar varav de två första zonerna normalt drivs anoxiskt. Block har nyligen (april 2019) byggts om till IFAS. Varje linje är uppdelad i fem zoner varav de 4 sista är luftade. IFAS-processen är i den tredje zonen. Block fyra består av fyra zoner med möjlighet till att driva de två första anoxiskt. Tällriksluftare med EPDM-membran används.

Nedledarna till zon tre till fem i block ett och två innehåller en reglerventil och en luftflödesmätare vardera och i dessa bassänger finns syrehaltsmätare. I block tre finns en reglerventil och en luftflödesmätare till varje luftargrupp och syrehaltsmätare i varannan zon.

Försörjning av luft till block ett och två sker med ett gemensamt system. Till detta system är tre blåsmaskiner anslutna: en direktdriven magnetlagrad turboblåsmaskin som är i drift konstant, och två skruvblåsmaskiner varav en är frekvensstyrd och en är hög/lågreglerad. Blåsmaskinerna regleras baserat på trycket i systemet och ventillägena. Trycket balanseras så att minst en reglerventil är nästan helt öppen (MOV-principen). Regleringen av syrehalten i respektive zon sker med reglerventilerna och information från syrehalts- och luftflödesmätare. Den uppmätta syrehalten används till en regulator som genererar ett börvärde för luftflödet som styr öppningsvinkeln på reglerventilen (kaskadreglering). Ett syrebörvärde anges för den sista zonen. Sedan beräknas syrebörvärden för zon 3 och 4 baserat på hur nära börvärdet i zon 5 som den uppmätta syrehalten ligger. Styrningen begränsas också av min- och maxbörvärden.

14.2.3 Bakgrund till projektet

Under 2014 konstaterades att membranluftarna i block två behövde bytas. De befintliga luftarna hade installerats 2006 och hade därmed varit i drift i 8 år. Problem att upprätthålla den önskade syrehalten fanns periodvis och vid ytan kunde stora bubblor ses.

I detta läge var frågan ifall bara membranerna skulle bytas ut eller hela luftarsystemet. Luftarsystemet i bassängerna var från år 1985. Under 2009 hade nya blåsmaskiner, en ny luftreglering och gemensam luftstam med block ett installerats. Det befintliga luftningssystemet i block två var i viss mening anpassat för en gammal styrstrategi. Dessutom hade belastningen ökat i och med att block tre var avstängt under en period.

Bytet skulle gälla zon 3–5. Dessa zoner består av rektangulära volymer med längd 26–29 m, bredd 4 m och djup 3,8 m. Bassängerna har voter på båda sidorna nertill med 0,6 m från väggen vid botten upp till 1,3 m från botten vilket gör att den plana bottenytan är 2,8 m bred.

Behovet av att byta åtminstone membranerna konstaterades av drifttekniker och processingenjören gemensamt och diskuterades under en tid i driftgruppen. En projektingenjör engagerades som hade huvudansvar för projektet. Mycket av arbetet i projektet drevs och genomfördes av processingenjören som hade god insikt i anläggningens belastning och drift.

Målen med projektet var både att öka luftningskapaciteten och att öka energieffektiviteten. Det fanns ett önskemål om en dialog med intresserade leverantörer för att skapa ett underlag inför beslutet om vilket av de två alternativen som skulle väljas. Inledningsvis kontaktades tre leverantörer med en förfrågan om vilken information de skulle behöva från verket för att designa ett nytt luftarssystem alternativt ett byte av luftare. Leverantörerna uppmanades att hellre begära mer information än vad som behövs än för lite, för att öka möjligheten till den bästa lösningen för de aktuella behoven. Leverantörerna bjöds också in till en diskussion om hela underlaget.

Två leverantörer återkom med önskemål om vilken typ av information de behövde. Detta var i första hand syrebehov under standardförhållanden

(SOR) för respektive zon men även tryck och luftflöde i befintligt system efterfrågades. Utöver det efterfrågade leverantörerna viss specifik information om det nuvarande systemets utformning.

Efter diskussioner med leverantörerna beslutades att det mest gynnsamma alternativet var att byta ut hela luftarsystemet nedströms nedledningsrören, det vill säga såväl luftare som grenrör och fördelarrör vid botten av bassängen. Huvudledning och nedledare behölls. Anledningen till att detta alternativ valdes var att ett mer energieffektivt system kunde förväntas genom att öka botten täckningsgraden. Ett större antal luftare skulle ge ett lägre luftflöde per luftare och en högre syreöverföringseffektivitet tack vara mindre bubblor. På detta sätt kunde också fördelningen av luftare mellan zonerna justeras. Ett byte av hela luftarsystemet vid botten innebar också att mycket arbete vid bassängbotten undveks med risker för att delar av det befintliga systemet gick sönder.

14.2.4 Design och utformning

Baserat på återkopplingen från leverantörerna togs ett designunderlag fram av VA SYD. Detta bestod av plan- och sektionsritningar med mått och samtliga föremål (länsgröpar, omrörare, rör och voter) utmärkta. Min-, medel och max-belastningar per linje angavs i form av verkligt syrebehov (AOR). Designunderlaget preciserade också fördelningen av belastningen i zon 3, 4 och 5 av AOR (trappningen) samt vilka värden på α , β och θ som skulle tillämpas för omvandling av AOR till standardförhållanden (SOR). För α -värdet antogs en ökande trend över anläggningen från 0,4 i zon 3 till 0,5 i zon 4 och 0,6 i zon 5. Syrekoncentrationerna angavs till 1,0 mg/l i zon 3 och 2,0 mg/l i zon 4 och 5. Även avloppsvattnets egenskaper angavs ($SS \leq 3\,000\text{ kg/m}^3$, $SVI \geq 50\text{ l/kg}$, Temperatur = $20\text{ }^\circ\text{C}$ och $pH \approx 7$).

Den kritiska delen av designunderlaget var beräkningarna av min- och maxvärden för syrebehovet. Dygnsmedelvärden för AOR beräknades för det aktuella blocket baserat på flödesproportionella dygnsmedelvärden och stickprover för suspenderad substans (SS) under åren 2004–2014. Det bestämdes att 5, 50 och 98 percentilerna av dessa AOR-värdens fördelning motsvarade min-, medel- och maxbelastningen. Men hänsyn måste också tas till variationer under dygnet. För att ta hänsyn till variationer inom dygn användes information från luftflödesmätare.

Kvoten mellan maxluftflöde under ett dygn och medelluftflödet under samma dygn beräknades, liksom kvoten mellan minluftflöde under ett dygn och medelluftflödet under samma dygn. Ur dessa kvoters fördelning användes 98 percentilen för maxflödet (kvoten 3,6) och 5 percentilen för minflödet (kvoten 0,35). De erhållna kvoterna multiplicerades med min respektive max av dygnsvärdena för AOR. Då erhöles som designvärden för AOR 175, 850 respektive 5 220 kg O_2 /d som min-, medel- och maxbehov.

VA SYD insåg att detta är ett brett reglerområde vilket medgavs i designunderlaget med en uppmaning att i första hand prioritera maxbehovet. Det använda tillvägagångssättet vid dimensionering, som baseras på maxdygnets maxtimme och mindygnets mintimme, leder generellt till ett stort reglerområde som kan vara svårt att implementera.

En leverantör föreslog ett gafflat system (två nedledare med separata luftarsystem i samma zon) i sista zonen för att öka reglerområdet. Detta alternativ avstods ifrån då det hade krävt en ny nedledare med givare och ventil. Däremot ändrades fördelningen mellan zon 3, 4 och 5 från det ursprungliga 50 %, 30 %, och 20 % till istället 40 %, 35 % och 25 % för att göra det enklare att möta reglerområdet.

Upphandlingen skedde enligt LUF med ett förenklat förfarande. Två leverantörer inkom med förslag på utformning av luftarsystem. De två förslagen skiljde sig med avseende på SOTE med 12–30 % i de olika zonerna vid medelbelastning vilket innebar en motsvarande skillnad i erforderligt luftflöde. Mottrycket i hela systemet skiljde sig med 7–10 %.

Anbuden utvärderades med avseende på totalkostnad för investering och drift under 10 år. För att beräkna driftkostnaden beräknades elanvändningen vid medelbelastningen. Elpriset antogs vara 0,8 kr/kWh. Luftflöde och mottryck antogs enligt leverantörernas uppgifter och baserat på denna information uppskattades elanvändningen för den blåsmaskin som normalt är aktiv vid medelbelastningen.

Det visade sig att den uppskattade driftkostnaden under 10 år motsvarade hela 76 % respektive 80 % av den totala kostnaden (investering + drift) för de två anbuden. Det visade vikten av att välja ett alternativ som var energieffektivt. Den totala kostnaden var omkring 30 % högre för det ena alternativet och större delen av denna skillnad bestod av driftkostnad.

Den valda lösningen innebar att bottentäckningsgraden ökades i alla de luftade zonerna (Tabell 14.1). I det befintliga systemet var 7–12 % av bottenytan i zon 3–5 täckt av luftare vilket ökades till 9–14 % i det nya systemet. Fördelningen av luftare mellan zoner (trappningen) justerades i och med det nya systemet från 44/33/23 % till 41/36/24 % vilket innebar att det nya systemet var mer anpassat för en något jämnare fördelning av belastningen till zon 3–5.

Tabell 14.1 Jämförelse av egenskaper för befintligt och nytt luftarsystem.
Antal luftare per linje av två. Luftflöden per m² aktiv membranyta.

		Botten- täckningsgrad	Antal luftare (st)	Andel luftare	Luftflöde (Nm³/m²/h)		
					Min	Medel	Max
Befintligt	Zon 3	12 %	612	44 %	22	-	173
	Zon 4	9 %	460	33 %	22	-	173
	Zon 5	7 %	320	23 %	22	-	173
Nytt	Zon 3	14 %	428	41 %	21	28	281
	Zon 4	13 %	378	36 %	21	24	243
	Zon 5	9 %	248	24 %	21	22	222

14.2.5 Genomförande

Luftarsystemet med rör och luftare köptes in från leverantören och installationen genomfördes genom avrop på gällande ramavtal. Arbetet utfördes i en av linjerna under hösten 2014 (54 avställda dygn) och i den andra tidigt under 2015 (67 avställda dygn). Verkets aktivslamanläggning har

totalt nio parallella linjer. Det medger att den nödvändiga avstängningen av en linje i taget vid sådant här arbete kan göras utan problem med kapacitet för att uppnå tillräckliga reningsresultat. VA SYDs automationsingenjör genomförde några mindre anpassningar i styrprogrammet som behövdes för det nya systemet.

Vid uppstarten som skedde enligt leverantörens instruktioner upptäcktes ett mindre läckage på luftarsystemet i samband med att bassängen var delvis fylld. Detta kunde enkelt åtgärdas och i övrigt gick genomförandet utan svårigheter.

Det nya systemet har nu varit i drift under några år och har visat sig fungera väl med avseende på kapacitet. Någon detaljerad uppföljning av energieffektivitet har dock inte genomförts.

Det faktum att luftarsystemet på botten har bytts ut medan resterande del av systemet uppströms har behållits innebär vissa begränsningar. Det maximala önskade luftflödet kan uppnås i den nya delen av systemet. Men huvudledning och nedledare är inte dimensionerade för detta luftflöde. Därför kan luftarnas maximala flöde orsaka svängningar och ljudproblem i rörsystemet. Ett utbyte till större rördimensioner skulle även medföra kostnader för byte till större ventiler. Detta är ett exempel på hur det kan vara svårt att nå en optimal lösning när olika delar av luftningssystemet byggs om vid olika tillfällen.

Utvärderingen av anbudet var baserad på totalkostnad för investering och drift. Driftkostnaden var beroende av de SOTE-tal som leverantörerna angav för sina föreslagna system men upphandlingen innehöll inte några möjligheter att bekräfta, med exempelvis oberoende tester, att dessa värden uppnåddes i den slutliga installationen.

14.2.6 Erfarenheter

- Driftkostnaden uppskattades utgöra ungefär 80 % av den totala kostnaden beräknad över 10 år för bytet av luftarsystemet.
- Byte av hela luftarsystemet nedströms nedledarna och inte bara membranen möjliggjorde en ökning av bottentäckningsgraden och därmed ett mer energieffektivt system.
- Valet av dimensioneringsprincip ledde till ett brett reglerområde som begränsade antalet lämpliga luftare som fanns tillgängliga på marknaden.
- En iterativ dialog med leverantörer kan öka möjligheten till ett väl utformat och fungerande system.
- Då denna typ av projekt genomförs sällan kan det vara svårt för VA-organisationen att upprätthålla tillräcklig kompetens hos processingenjör och driftpersonal med breda ansvarsområden. Det är önskvärt med en projektingenjör med specifik kunskap om luftarsystem som håller i upphandlingen.

14.3 Fallstudie 2 - Byte av blåsmaskiner på Bromma avloppsreningsverk

Anläggning	Nockebyanläggningen vid Bromma avloppsreningsverk
Belägen	Bromma (Stockholm Vatten och Avfall)
Belastning (pe)	370 000
Utsläppsvillkor	BOD ₇ : 8 mg/l (gränsvärde kvartalsmedel) P-tot: 0,3 mg/l (gränsvärde kvartalsmedel) NH ₄ -N: 3 mg/l (medelvärde juli-oktober) N-tot: 10 mg/l (årsmedelvärde)
Projekt	Byte av tre av sex blåsmaskiner

14.3.1 Bromma avloppsreningsverk

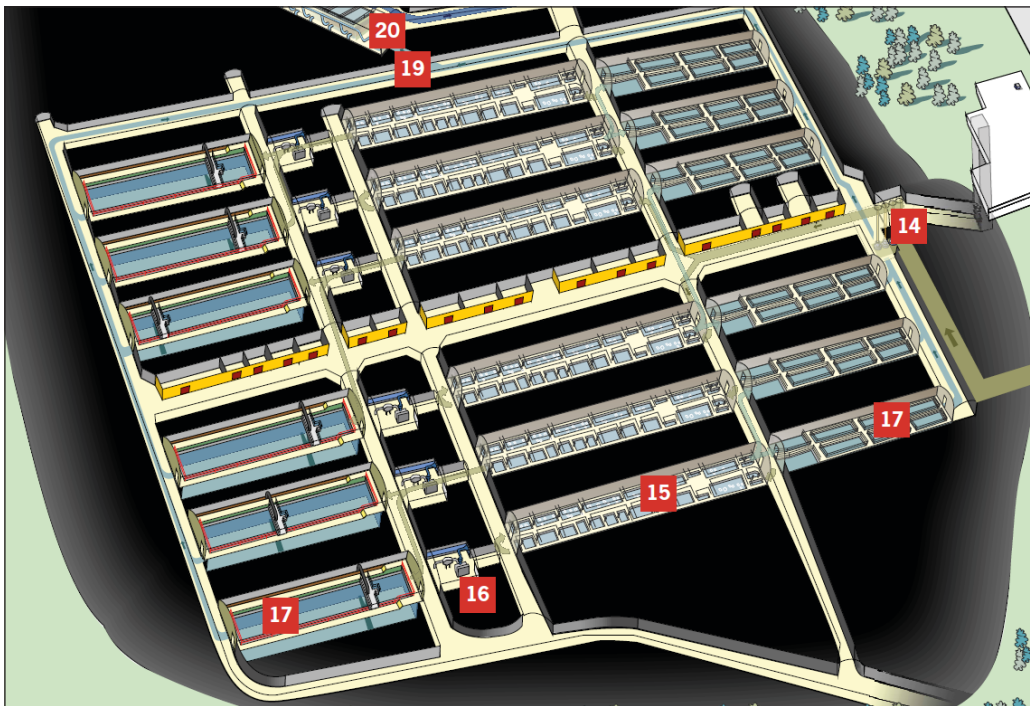
Bromma avloppsreningsverk (Stockholm Vatten och Avfall) består av de två anläggningarna Åkeshov och Nockeby som är sammankopplade via en 600 meter lång tunnel. Här renas avloppsvatten motsvarande ca 370 000 pe från framförallt de norra och västra delarna av Stockholm. I Åkeshovs-anläggningen sker förbehandling med rensgaller (3 mm), sandfång och dosering och förfällning med järnsulfat, samt slambehandling. I Nockeby-anläggningen, som är belägen i ett 120 000 m³ stort bergrum, sker den biologiska behandlingen med en aktivslamprocess med fördenitrifikation samt fosforrening genom simultanfällning. Sedan efterbehandlas vattnet med sandfilter efter eventuell ytterligare fällning genom tillsats av järnsulfat. Rejektvatten från avvattning av rötat slam behandlas i en separat MBBR-process baserad på nitritation-anammox.

Den biologiska behandlingen är högt belastad och anläggningen drivs därför vanligen med en slamålder som är så låg att den ligger nära vad som är kritiskt för att nitrifikation ska kunna upprätthållas. Det innebär också att största möjliga andel av anläggningen behöver vara luftad. När kväve-reduktionen är begränsad med avseende på denitrifikation, kan därför metanol doseras till fördenitrifikationen. Hastigheten på denitrifikationen ökar då och således går det att undvika att driva en större andel av volymen under anoxiska förhållanden.

14.3.2 Luftningsanläggning

Aktivslamprocessen är totalt 24 000 m³ och består av sex parallella linjer med rektangulära bassänger. Vattendjupet i bassängerna är 4,5 m. Vardera linjen är indelad i 8 zoner varav de första två är anoxiska (8 st omrörare per linje), zon 3–4 är flexibla (både omrörare och luftare), zon 5–6 luftade och 7–8 flexibla. I de luftade zonerna finns ca 2 090 tallriksluftare per linje i en trappad utformning med sjunkande täthet längs bassängernas längd. Luftarna byts ut löpande i en linje i taget. Ursprungligen var samtliga luftare från Nopon men numera finns en blandning av olika fabrikat i olika linjer.

Sex blåsmaskiner förser anläggningen med luft via en gemensam manifold. Ett fast börvärde för trycket tillämpas. Vintertid sker luftningen i zon 3 vid behov medan resterande zoner luftas kontinuerligt. Under vintertid styrs luftningen i zon 3 baserad på ammoniumhalten i zon 7. Vid höga halter startas luftningen i zon 3 och vid låga halter stoppas den helt. Under



Figur 14.8 Aktivslamprocessen vid Bromma avloppsreningsverk med sex linjer av luftningsbassänger (nr 15), sex blåsmaskiner (nr 16) och tolv sedimenteringsbassänger (nr 17).

sommartid är zon 3 oluftad medan zon 4 luftas vid behov beroende på ammoniumhalten i zon 7.

14.3.3 Bakgrund till projektet

Sedan 2000 har de sex blåsmaskinerna som använts varit magnetlagrade turbomaskiner av modellen HST 9000. De enda större underhållsinsatser som hade utförts fram till 2015 var att frekvensomformarna hade renoverats på två av maskinerna. I övrigt hade de fungerat tillfredsställande med originaldelar fram till denna tidpunkt. När sedan en tredje frekvensomformare havererade upplevdes tilltagande svårigheter att hitta nya omformare att ersätta med, som både fungerade med maskinens befintliga magnetkontroll och passade in i maskinskåpet.

I januari 2016 havererade även magnetlagret till en av maskinerna. Detta visade att inte bara frekvensomformare utan även andra vitala maskindelar började nå sin tekniska livslängd. Inom Stockholm Vatten och Avfall började då olika alternativ övervägas för att säkerställa en tillförlitlig luftförsörjning framöver. En utredningsingenjör ledde arbetet med att utvärdera ett antal olika alternativ. I projektet medverkade även driftchefen, en underhållsingenjör, en driftingenjör, en processingenjör och en el- och automationsingenjör. Leverantör för de befintliga maskinerna (Sulzer) anlitas också för att utföra en analys av livscykelkostnaderna för olika alternativ utifrån beställarens önskemål.

Inledningsvis i utredningen utvärderades alternativ med utbyte av frekvensomformare, men på grund av haveriet med magnetlagret ansågs att en mer omfattande renovering av hela de befintliga maskinerna skulle vara

nödvändiga för att uppnå en säker drift framöver. Därför fokuserades på följande alternativa åtgärder:

1. Total renovering av alla sex blåsmaskiner hos leverantören.
2. Renovering av tre befintliga maskiner vilka kompletteras med två nya, större maskiner.
3. Tre nya maskiner som kan klara hela luftbehovet införskaffas och de befintliga maskinerna behålls som reserv.

Alternativen utvärderades med avseende på LCC över en tidsperiod på 10 år och en riskanalys utifrån driftsäkerhet och tillgång på reservdelar. För livscykelkostnaden beräknades de framtida driftkostnaderna som nuvärde med 5 % kalkylränta (Se Avsnitt 14.1.1.1 för mer bakgrund till livscykelkostnad och nuvärde). Uppskattningen av driftkostnaden baserades på historiska data för luftbehov (Figur 14.9). Varaktigheten för olika luftflöden beräknades baserat på uppmätt luftförbrukning under tre år (2013–2015).

Utvärderingen visade att alternativ tre, som innebar tre nya maskiner, hade den lägsta uppskattade livscykelkostnaden (Tabell 14.2). Tack vare en mer energieffektiv teknik i de nya maskinerna skulle driftkostnaden för detta alternativ minska med drygt 20 % jämfört med att behålla de befintliga maskinerna i alternativ 1. Med två nya maskiner skulle de gamla maskinerna användas oftare med en något högre driftkostnad som följd. Investeringskostnaden för två nya maskiner och renovering av tre maskiner skulle samtidigt bli snarlik den för tre nya maskiner (Tabell 14.2)

Tabell 14.2 Uppskattade kostnader för byte och/eller renovering av blåsmaskiner enligt olika alternativ. Livscykelkostnaden beräknades över 10 år och framtida driftkostnader inkluderades i form av nuvärde med 5 % kalkylränta.

	Driftkostnad MSEK/år	Investering MSEK	Livscykelkostnad MSEK
1: Renovering av sex maskiner	1,4	2,9	13,5
2: Två nya + renovering av tre	1,2	4,6	13,0
3: Tre nya maskiner	1,1	4,5	12,4

En riskanalys genomfördes för att även jämföra de olika alternativen med avseende på risken att processen inte skulle kunna tillföras tillräckligt med syre under såväl normal drift som i samband med genomförande av byten och renoveringar. Risken att det i framtiden inte skulle gå att få tag på reservdelar till gamla maskiner togs också hänsyn till liksom risk för ökad arbetsbelastning på grund av ålderstigen utrustning.

Riskanalysen bekräftade att alternativ som innebar att endast frekvensomformare renoverades medförde hög risk för problem med att tillgodose luftbehovet och risk för att inga reservdelar skulle finnas att tillgå i framtiden. Införskaffande av två nya maskiner skulle medföra ett fortsatt beroende av gamla maskiner. Vid normal drift användes fyra till fem av de befintliga maskinerna. Det innebar också att i samband med genomförandet skulle en ökad sårbarhet med avseende på kapaciteten finnas med de alternativ som innebar att maskiner togs ur drift en tid för renovering.

Installation av nya maskiner ansågs däremot kunna ske utan något längre avbrott. Totalt sett bedömdes därför alternativet med tre nya maskiner som det alternativ som skulle innebära lägst total risk. Därmed pekade såväl livscykelkostnad som riskanalys på att det mest fördelaktiga alternativet för Stockholm Vatten och Avfall vore att införskaffa tre nya maskiner som skulle kunna stå för hela luftbehovet i den biologiska behandlingen.

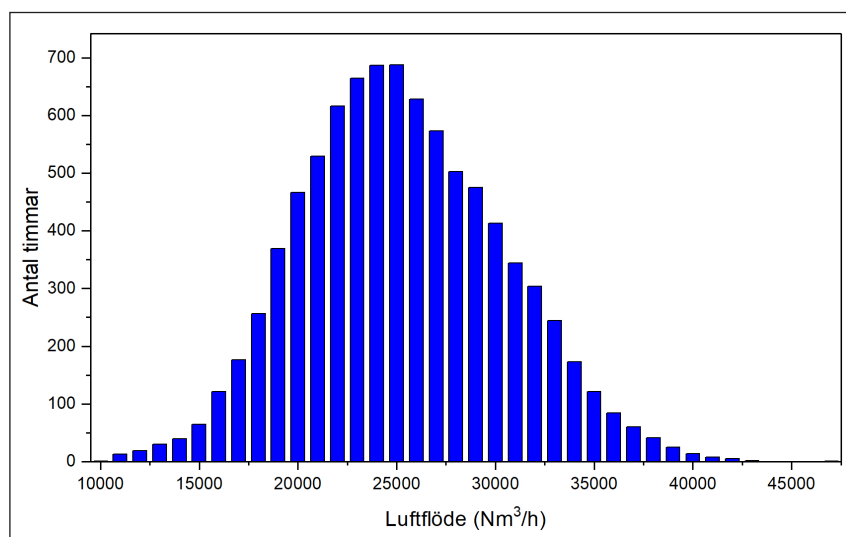
14.3.4 Design, utformning och upphandling

Leverantörer som lämnade anbud förväntades erbjuda blåsmaskiner som var anpassade till de uppmätta historiska luftflödena. Därutöver innehöll förfrågningsunderlagets krav på att antalet blåsmaskiner skulle vara tre och att de skulle uppnå följande:

- Typ: Oljefri, magnet- eller luftlagrade turbokompressorer med luftkyllning
- Minsta totala luftflödesbehov: 10 000 Nm³/h (1 maskin i drift)
- Maximalt totalt luftflödesbehov: 47 000 Nm³/h (3 maskiner i drift)
- Dimensionerande mottryck: 5 mVp
- Driftområde mottryck: 4,7 till 5,2 mVp
- Maximal effekt: 300 kW per maskin och maximal ström vid 400 V: 600 A per maskin

Därutöver ställdes krav på maximal ljudnivå (85 dB(A)) och maximal golvyta (2,5 × 2,1 m per blåsmaskin).

Minsta och maximala luftflöden var enligt den varaktighetsfördelning som bestämts under utredningsfasen (Figur 14.9). Enligt denna var det genomsnittliga luftflödet ca 25 000 Nm³/h. På liknande sätt bestämdes det dimensionerande värdet och driftområdet för mottrycket utifrån tidigare uppmätta värden.



Figur 14.9 Varaktighet för olika luftbehov under ett år. Baserat på uppmätta värden under 2013–2015.

De inkomna anbuden bedömdes baserat på livscykelkostnad. Förutsättningarna för att bestämma livscykelkostnaden var att investeringskostnaden adderades till nuvärdet av driftkostnaden under 10 år med en kalkylränta på 5 % och ett elpris på 1 kr/kWh. Som underlag för beräkning av livscykelkostnaden innehöll förfrågningsunderlaget en varaktighetstabell med antal drifttimmar för olika luftflöden i jämna tusental mellan 10 000 och 47 000 Nm³/h (vid 0 °C, 1 atm och 0 % luftfuktighet). Baserat på varaktighet vid respektive luftflöde och tillhörande effektuttag beräknades årlig elanvändning och därefter livscykelkostnad. Det anbud med lägst livscykelkostnad valdes förutsatt att övriga villkor i anbudet var uppfyllda. Ett sådant villkor var exempelvis att tre referenser med de aktuella maskinerna vid likvärdig kapacitet i Europa skulle tillhandahållas.

Upphandlingen skedde enligt lagen om upphandling inom försörjningssektorn (LUF) och eftersom den förväntade kostnaden låg under tröskelvärdet kunde ett så kallat förenklat förfarande användas.

Tre godkända anbud kom in. Dessa hade uppskattade livscykelkostnader på 30,6 MSEK, 33,2 MSEK och 33,3 MSEK. I anbuden stod driftkostnaderna för 86–90 % av den totala livscykelkostnaden, vilket innebär att det viktigaste i upphandlingen var att erbjuda en energieffektiv teknik. Utöver de godkända anbudin omkom även ett anbud gällande växlade turboblåsmaskiner, vilket är en annan typ än de oljefria, luft- eller magnetlagrade som efterfrågades. Jämförelsen visade att denna lösning hade både en drift- och livscykelkostnad som låg inom spannet för de anbudin om som gällde luft- och magnetlagrade maskiner.

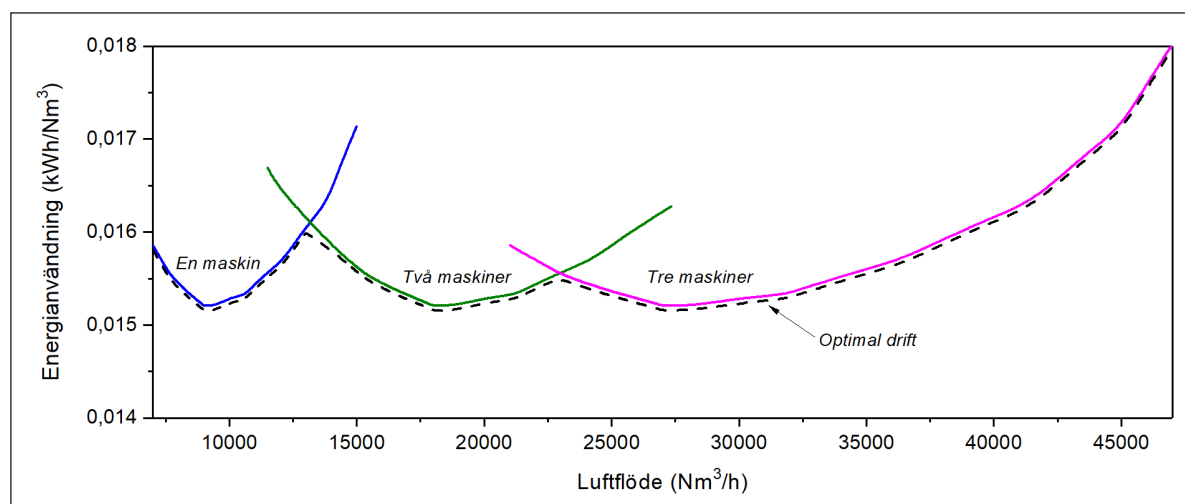
14.3.5 Genomförande

Installationen av de nya maskinerna utfördes av maskinentreprenör, elentreprenör och automationsentreprenör. Dessa anlätades genom avrop på gällande ramavtal med Stockholm Vatten och Avfall. De tre nya maskinerna ersatte tre av de gamla maskinerna och därför krävdes inget ytterligare fysiskt utrymme i blåsmaskinsrummen. Själva installationen av maskiner gick som förväntat smidigt med obetydliga avbrott i driften. Några saker krävde dock särskild hänsyn.

Eftersom de nya maskinerna hade större kapacitet än de gamla behövde tilluftsinloppet byggas om för ett ökat flöde. Blåsmaskinerna påverkar reningsverkets ventilation eftersom anläggningen är belägen i ett bergrum. Därför anlätades en ventilationskonsult som dimensionerade behovet av ytterligare fläktar. Vid installationen avlägsnades de befintliga värmeåtervinningssystemen som fanns på trycksidan. Anledningarna till detta var dels en oklar effekt ur energisynpunkt och dels en störande ljudvolym.

Den överordnade styrningen av blåsmaskinerna krävde också viss anpassning. En svårighet i sammanhanget var att det gamla programmet var svårt att tyda. Den överordnade styrningen används för att styra maskinernas kösystem, det vill säga hur många och vilka maskiner som ska vara i drift vid olika luftbehov. Ett kösystem ska vara upplagt på så sätt att energianvändning blir den minsta möjliga (Figur 14.10). Strategin som implementerades gick ut på att i första hand skulle de nya maskinerna användas så

mycket som möjligt på grund av deras högre verkningsgrad. Vid mycket höga belastningar skulle de tre gamla maskinerna som behölls i drift användas som en extra resurs. De flöden som skulle gälla för kösystemet baserades på leverantörens rekommendation och simuleringar i samband med ett examensarbete (Wikén, 2017). För att de gamla maskinerna inte skulle bli stående oanvända alltför länge inkluderades också motionering av dem så att de startas upp och användes några timmar minst en gång per vecka. Detta görs dock manuellt då någon förändring av styrsystemet inte ingick i projektet.



Figur 14.10 Den specifika energianvändningen i relation till luftflödet vid drift av en, två eller tre maskiner parallellt. Optimal drift med avseende på låg energianvändning motsvaras av den streckade linjen.

14.3.6 Garanti och krav

Som en del av upphandlingen fanns en möjlighet för beställaren att verifiera blåsmaskinernas utlovade prestanda. I samband med driftsättning av den första blåsmaskinen kunde den effekt som leverantören angett vid beräkning av livscykelkostnaden kontrolleras. De utlovade effektvärdena fick justeras med hänsyn till faktisk temperatur och luftfuktighet på insugningsluften, samt tryckökning över maskinen vid kontrolltillfället. Effekt och luftflöde kunde komma att kontrolleras vid tre olika luftflöden, nämligen 10 000, 12 000 och 15 000 Nm³/h. Vidare angavs i förfrågningsunderlaget att luftflödet skulle mätas på trycksidan (omvandlat till normalförhållanden, 0 °C, 1 atm och 0 % luftfuktighet) med blåsmaskinens inbyggda flödesmätare. Effektvärdet skulle tas från den inbyggda frekvensomformaren och tryckökningen över blåsmaskinen från den inbyggda tryckgivaren.

Beställaren nöjde sig med att verifiera prestandan genom att kontrollera effektanvändningen vid det högsta luftflödet. De nya blåsmaskinerna har fungerat tillfredställande sedan installationen 2017. En mer omfattande uppföljning av luftflöden och elanvändning är planerad, men har ännu inte genomförts.

14.3.7 Erfarenheter

- Den uppskattade livscykelkostnaden visade att utbyte av gamla blåsmaskiner till nya, mer effektiva, var mer gynnsamt än renovering.
- Driftkostnaden för nya maskiner stod för minst 86 % av livscykelkostnaden beräknad på 10 år vilket visar på vikten av att välja en energieffektiv lösning.
- Det är relativt enkelt att som beställare verifiera att prestandan på levererad blåsmaskin uppfyller vad som utlovats med avseende på effektanvändning vid olika luftflöden.

14.4 Fallstudie 3 - Luftare till Bålsta nya avloppsreningsverk och prestandatest i renvatten

Anläggning	Bålsta avloppsreningsverk
Belägen	Håbo kommun
Belastning (pe)	16 000
Utsläppvillkor	BOD ₇ : 10 mg/l (årsmedel) P-tot: 0,2 mg/l (riktvärde kvartalsmedel) N-tot: 15 mg/ (årsmedel)
Projekt	Luftarsystem till ny aktivslamanläggning

14.4.1 Bålsta avloppsreningsverk

Bålsta avloppsreningsverk i Håbo kommun byggdes 1975 och har sedan moderniserats och byggts om 1992, 2011 och 2013. Belastningen motsvarar numera ungefär 16 000 pe (2015–2017). Utsläppvillkoren är 10 mg/l BOD₇, 0,2 mg/l fosfor och 15 mg/l kväve.

Reningsverket är utformat med förbehandling i form av rensgaller, sandfång och försedimentering med primärslamhydrolys. Därefter följer en aktivslamprocess med biologisk kväverening genom fördenitrifikation och nitrifikation och biologisk fosforavskiljning med sidostromshydrolys. Efterfällning sker med polyaluminiumklorid på sandfilter.

14.4.2 Bakgrund till projektet

Efter att endast haft utsläppsvillkor för BOD₇ (10 mg/l) och fosfor (0,3 mg/l) infördes 2014 krav på kväverening samtidigt som tillståndsgiven belastning ökade från 24 000 pe till 30 000 pe. På grund av kraven på kväverening byggdes reningsverket ut med nya bassänger för aktivslamprocessen. Den nya anläggningen dimensionerades för 30 000 pe baserat på en förväntad framtida befolkningsökning. Volymerna i den gamla aktivslamanläggningen används numera för sidostromshydrolys. De nya bassängerna för biologisk behandling är totalt ca 6 500 m³ fördelat på tre linjer. Bassängerna är rektangulära, 6,5 m breda och har vattendjupet 5 m. Vardera linjen är indelad i en anoxisk zon med endast omrörare (550 m³), två flexibla zoner med både luftare och omrörare (550 m³ tillsammans), en luftad zon med endast luftare (970 m³) och deox-zon med omrörare (92 m³).

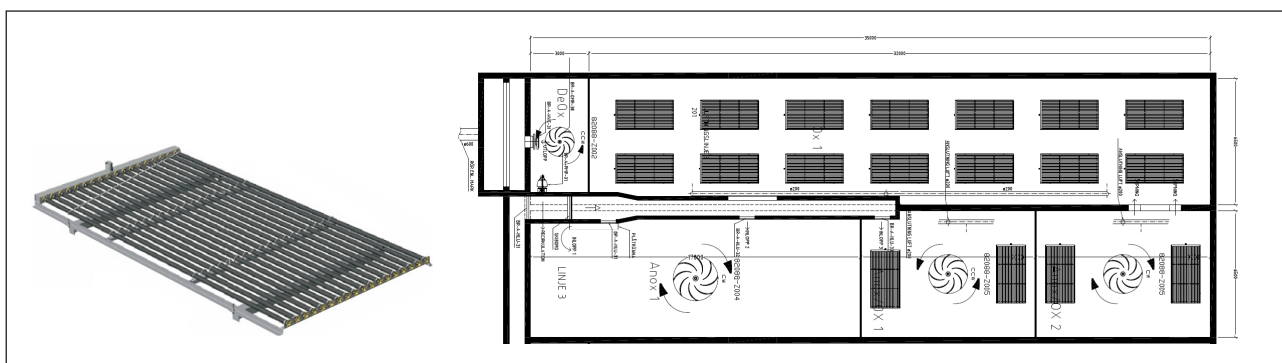
Den övergripande dimensioneringen för den nya biologiska reningen utfördes av en konsultfirma som upprättade ett kalkylerbart förfrågningsunderlag. Sedan upphandlades en utförandeentreprenad enligt standardavtalet AB04.

14.4.3 Design och utformning

I samband med dimensioneringen av den nya biologin för 30 000 pe beräknades också behovet av syre i processen vid min-, medel- och maxbelastning. Dessa behov omvandlades till syrebehov i renvatten genom antaganden för α (0,6) och β (0,95). De erhållna värdena på syrebehov i renvatten (SOR) användes i förfrågningsunderlaget för att få in anbud från leverantörer på förslag på luftningsutrustning som kunde möta behovet.

Enligt förfrågningsunderlaget skulle föreslagna luftningssystem kunna möta syrebehovet med befintliga blåsmaskiner. Syresättningseffektiviteten (SOTE) skulle anges i anbudet och det angavs att garantivärdet kunde komma att kontrolleras genom ett renvattentest. Ifall garantivärdet inte uppnåddes skulle även efterföljande syresättningseffektivitetstester ingå i entreprenaden.

Tre anbud för luftningsutrustning inkom vilka utvärderades efter pris. Den lösning som valdes består av enheter med membranluftare i form av slangar med 30 mm innerdiameter (Figur 14.11). Slangarna av EPDM är monterade på luftfördelningsrör i rostfritt stål. Enheterna är ca $3 \times 1,5$ m och förankrade i botten. På varje enhet är 18 slangar monterade vilka har en aktiv membranyta på ca $4,8 \text{ m}^2$. Varje enhet försörjs av en egen nedledare och rör.



Figur 14.11 Den aktuella slangluftaren (vänster) och luftarnas placering i bassängerna (höger).

Enligt leverantörens dimensionering krävdes 2 st enheter per zon i de flexibla zonerna (12 enheter totalt) och 14 enheter per zon i de luftade zonerna (42 enheter totalt) (Figur 14.11). Därmed blev botten täckningsgraden 15,4 % i de flexibla zonerna och 30,3 % i de luftade zonerna. Med denna utformning uppskattades SOTE i de flexibla zonerna till 26 % respektive 20 % vid min- respektive maxbelastning och 26 respektive 28 % i de luftade zonerna.

Enheterna fördelades jämnt över bottenytan i de luftade zonerna, det vill säga utan någon trappad utformning. Slangarna hamnade ca 20 cm ovanför botten vilket innebär att luftarnas djup var 4,8 m.

Då det nya verket driftsattes var belastningen fortfarande lägre än 20 000 pe och därför drevs endast två av de tre linjerna. Den linje som var ut drift fylldes med dricksvatten och luftarna startades emellanåt för att undvika alltför långa tider av stillestånd.

14.4.4 Garanti och prestandatest

Leverantören lämnade en garanti för den i anbudet angivna prestandan i renvatten för de luftade zonerna. Garantin gällde SOTE, mottryck (från leveransgränsen luftare), nödvändig axeleffekt för befintlig blåsmaskin och SAE enligt nedan (Tabell 14.2).

Tabell 14.2 Garanterade värden för luftare (luft vid 20 °C och 1,013 mbar).

		Min	Medel	Max
Luftflöde per luftare	Nm ³ /h	48,4	58,3	71,4
Mottryck	mbar	550	560	560
SOTR	kgO ₂ /h	56,1	64,8	77,1
Axeleffekt	kW	15	17	20
SAE	kgO ₂ /kWh	3,74	3,81	3,86
SOTE	%	27,7	26,6	25,8

I leverantörens anbud fanns en option för ett prestandatest av luftarna som beställaren valde att utnyttja för att verifiera de garanterade värdena för SOTE i renvatten innan installationen skedde. Ett sådant test innebär att de aktuella luftarna monteras i en för ändamålet avsedd testtank. Samma vattendjup som i anläggningen tillämpas. I övrigt upprättas förhållanden som ska vara så snarlika de som råder i den aktuella anläggningen som möjligt med avseende på bottentäkningsgrad med mera.

De luftare som var föreslagna till Bålsta utvärderades i en testtank som finns hos luftarnas tillverkare i Erlangen, Tyskland. Testet utfördes och dokumenterades av tillverkaren. Närvarande vid testet fanns representanter från reningsverket och representanter från projektets entreprenör, konsult och leverantör. Testtanken var cirkulär med diametern 10,24 m och hade två blåsmaskiner anslutna (1 320 och 500 Nm³/h). På botten monterades sex enheter av luftaren vilket resulterade i en snarlik bottentäkningsgrad (ca 30 %) som i anläggningen (Figur 14.12). Tanken fylldes till 5 m djup med kommunalt dricksvatten. Testproceduren genomfördes enligt den tyska standarden ATV Standard M209 (ATV, 1996) efter revision (DWA, 2007).

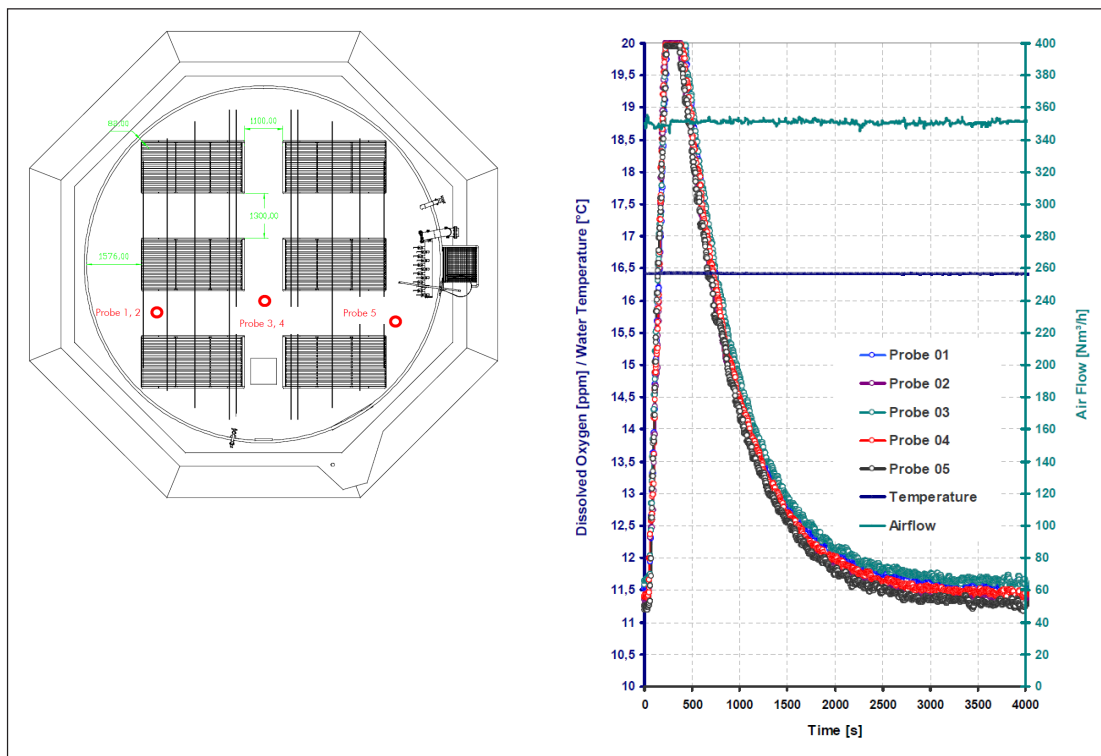
Testet genomfördes vid dimensionerande medel- och maxbelastning, det vill säga vid luftflödena 58 och 71 Nm³/h. Två testomgångar utfördes vid respektive luftflöde. Halten av löst syre mättes och loggades med fem givare utspridda på olika djup i tanken. Luftflöde mättes med ”swirl”-mätare med tryck- och temperaturgivare intill. Den omgivande luftens tryck, temperatur och fuktighet mättes också.

En variant av den standardiserade proceduren användes enligt vilken ren syrgas tillsattes för att öka halten av löst syre över den normala mättnadskoncentrationen som uppnås med luft. Därefter startades luftning med omgivande luft vilket ledde till att halten av löst syre sjönk ner till mättnadskoncentrationen. På detta sätt behöver inga kemikalier tillsättas för att sänka syrehalten. Inverkan av salter från dessa kemikalier på syreöverföringen behöver då inte heller tas hänsyn till. Vattnets konduktivitet mättes för att säkerställa låg salthalt.

Exempel på data från en av testomgångarna visas i Figur 14.12. Principen för hur dessa data utvärderas är att masstransportkoefficienten ($K_L a$) bestäms genom icke-linjär regression av följande ekvation, som kan härledas från modellen för masstransport i Kapitel 6:

$$C_t = C_{\infty}^* - (C_{\infty}^* - C_0) e^{-K_L a t} \quad (6.5)$$

Masstransportkoefficienten och syrets jämviktskoncentration efter lång tids luftning) räknas om från aktuell temperatur till 20 °C och 1 atm lufttryck varefter SOTR, det vill säga hastigheten med vilken syre överförs till vattnet, kan beräknas. Genom att använda det uppmätta luftflödet kan tillsatt mängd syre uppskattas varefter andelen som överförs till vattnet (SOTE) kan beräknas.



Figur 14.12 Luftarnas placering i testtanken (vänster). Registrerade mätvärden för koncentration av löst syre, temperatur och luftflöde under en av testomgångarna.

SOTE-värden beräknades som medelvärden från de två testomgångarna vid varje luftflöde och uppskattades till 28,3 % vid medelluftflöde och 27,4 % vid maxluftflöde. Därmed överskred de garanterade värdena med 0,8 respektive 2,6 %-enheter och således kunde den utlovade prestandan anses bekräftad.

14.4.5 Erfarenheter

- De installerade luftarna ansågs möta den utlovade prestandan eftersom renvattentestet visade att garanterade värden på SOTE uppnåddes.
- Att genomföra prestandatestet i en testtank istället för i anläggningen ledde till enklare genomförande och lägre kostnad.
- Luftarna fungerade väl i anläggningen såtillvida att de önskade halterna av löst syre kunde upprätthållas.
- Valet av utrustning gjordes baserat på pris, så länge erforderlig nivå på SOTE för att möta syrebehovet kunde garanteras. Enligt konsultfirman hade det varit mer fördelaktigt att upphandlingen även innehållit en utvärdering av livscykelkostnaden. Det hade skapat starkare incitament för en energieffektiv luftning.

14.5 Fallstudie 4 - Energieffektivisering vid Sternö avloppsreningsverk med ny blåsmaskin, luftare och styrning

Anläggning	Sternö avloppsreningsverk
Belägen	Karlshamns kommun
Belastning (pe)	
Utsläppsvillkor	BOD ₇ : 10 mg/l (riktvärde månadsmedel) P-tot: 0,3 mg/l (riktvärde årsmedel) N-tot: 12 mg/ (riktvärde årsmedel)
Projekt	Byte av blåsmaskin, luftare och implementering av ny styrning

14.5.1 Sternö avloppsreningsverk

Sternö avloppsreningsverk i Karlshamns kommun togs i drift 1997 och dimensionerades då för 26 000 pe. Belastningen har under senare år (2014–2017) motsvarat ca 25 000 pe med en ökande trend. Utsläppsvillkoren är 10 mg/l BOD₇, 0,3 mg/l fosfor och 12 mg/l kväve.

Reningsverket är utformat med förbehandling i form av rensgaller, sandfång och försedimentering. Därefter följer en aktivslamprocess med biologisk fosfor- och kväverening. Efterbehandling sker med tvåmediafilter.

Anläggningens aktivslamprocess bestod 2010 av två parallella linjer. För att uppnå både fosfor- och kväverening i aktivslamprocessen bestod vardera linjen av anaeroba, anoxiska och aeroba zoner i serie. Den anaeroba zonen (600 m³) följdes av en anoxisk zon (1 350 m³) vilka båda hade omrörare. Därefter följde en flexibel zon (300 m³) med både luftare och omrörare som följdes av två luftade zoner i serie (vardera 600 m³). Den luftade volymen kunde därför vara antingen 1 200 m³ eller 1 500 m³ per linje vilket motsvarade 35 % eller 44 % av volymen. Sedimenterat returslam blandades med inkommande avloppsvatten i den anaeroba zonen. Nitratrikt vatten och slam recirkulerades till en av de anoxiska zonerna och från en av de anoxiska zonerna skedde recirkulering till den anaeroba zonen.

14.5.2 Luftningsanläggning

Det gemensamma luftningssystemet var indelat i två luftarnät per linje som reglerades med varsin vridspjällventil. Den flexibla zonen och den första luftade zonen försörjdes av ett gemensamt nät medan den andra luftade zonen försörjdes av ett nät. Biobassängerna har vattendjupet 5,5 m.

Fram till 2010 fanns rörluftare installerade som varit i drift sedan verket byggdes (1997). I de flexibla zonerna fanns 30 st rörluftare vilket innebar att botten täckningsgraden var 6,3 %. En givare för koncentration av löst syre fanns per ventil. Reglering av luftningen skedde genom att ventilerna styrdes mot halten av löst syre. De blåsmaskiner som användes var fyra vridkolvslåsmaskiner (tre från 1997 och en från 2008). En av maskinerna var utrustad med frekvensomriktare för reglering av hastigheten och var kontinuerligt i drift för att ta hand om basbelastningen. Därutöver användes en maskin med konstant varvtal och en med möjlighet till två hastigheter (låg/hög-reglerad) för att åstadkomma det önskade reglerområdet. Ytterligare en maskin med fast varvtal fungerade som reserv. Blåsma-

skinerna styrdes mot ett fast börvärde för trycket som reglerades manuellt vid behov. Normalt var börvärdet 700 mbar.

14.5.3 Bakgrund till projektet

2010 var de befintliga rörluftarna 13 år och började nå sin förväntade livslängd. Vid denna tidpunkt havererade en av blåsmaskinerna. Haveriet innebar att någon form av åtgärd av luftningssystemet skulle bli nödvändig. Eftersom även luftarna var gamla ansågs på reningsverket att det kunde vara värt att överväga en större uppgradering av luftningssystemet. En leverantör kontaktades, med vilken goda relationer redan fanns. Leverantören såg en bra möjlighet till ett referensprojekt på ett medelstort reningsverk och föreslog flera åtgärder.

Från reningsverkets sida var såväl processingenjör och drifttekniker engagerade för att skapa en mer energieffektiv process. Däremot fanns ibland inte kapacitet att vara drivande i valen av vilka åtgärder som skulle implementeras och hur de skulle utformas. Det var därför i stor utsträckning leverantören av luftare som tog initiativ till innehållet i lösningarna och involverade leverantören av blåsmaskiner och leverantören av ammoniumgivare vid behov. Numera finns det inom kommunen större kapacitet för att driva den här typen av projekt genom centralt placerade projektledare. Samtidigt behövs arbete från personal på reningsverket eftersom de har god kännedom om verket baserat på erfarenheter från driften.

För att kunna göra en ordentlig utvärdering av de åtgärder som vidtogs, separerades försörjningen av luft till de två linjerna. Det innebar att den ena linjen kunde behållas i befintligt skick och fungera som en referens för jämförelsen.

14.5.4 Design och utformning

Tre olika förändringar genomfördes i linje 1 för ökad energieffektivitet samtidigt som utformning och drift av referenslinjen förblev oförändrad. Förändringarna i linje 1 genomfördes en i taget och de åtgärder som utfördes var:

- Byte till ny blåsmaskin
- Byte av luftare
- Implementering av ny styrning

En ny skruvblåsmaskin installerades till testlinjen med kapacitet för 260–1 150 Nm³/h, 45 kW motoreffekt och en frekvensomriktare för reglering av kapaciteten. En månad senare ersattes de befintliga rörluftarna av ett nytt system med tallriksluftare. Antalet luftare var 90 i de flexibla zonerna och 175 i de luftade zonerna. Detta resulterade i botten täckningsgraderna 6,1 % respektive 5,9 %. Design och utformning gjordes av leverantören baserat på underlag från reningsverket.

När de nya luftarna varit i drift tre månader implementerades den nya styrningen som innebar att syrehalten reglerades genom kaskadreglering av ventilerna med hjälp av luftflödet (Avsnitt 9.2) istället för att ventilerna reglerades direkt mot syrehalten som tidigare. Blåsmaskinerna styrdes från och med nu enligt MOV-principen (Avsnitt 9.10.1) mot ett variabelt bör-

värde för trycket istället för ett konstant tryck. Regleringen av börvärdet för trycket skedde så att den mest öppna ventilen skulle vara mellan 75 % och 95 % öppen. Slutligen installerades även ammoniumgivare och styrning för ammoniumåterkoppling inkluderades (Avsnitt 9.3.1). Med hjälp av ammoniumåterkopplingen reglerades börvärdet för syrehalt i den första luftade zonen baserat på ammoniumhalten i den andra luftade zonen.

Leverantören av de nya luftarna genomförde installationen av dessa och samordnade hela genomförandet. Leverantören av blåsmaskinen och leverantören av ammoniumgivare ombesörjde installation och idrifttagning av sin respektive utrustning.

14.5.5 Uppföljning och utvärdering

Tack vare att åtgärderna infördes en i taget blev det möjligt att utvärdera effekten av var och en av dem. En ovanligt noggrann uppföljning gjordes i samband med ett examensarbete hos leverantören (Larsson, 2011) vilken sedan har kompletterats och spridits i flera publikationer (Larsson et al., 2013; Lazic et al., 2012; Nordenborg et al., 2013). Redogörelsen nedan är baserat på dessa studier som även innehåller fler detaljer kring jämförelsen och utvärderingen.

Testlinjen jämfördes med referenslinjen baserat på luftningseffektiviteten (SAE i kg O₂/kWh). Beräkning av denna innebär att syrebehovet i avloppsvatten (AOR) fastställs och sedan omvandlas till sin motsvarighet i avloppsvatten (SOTR) som därefter divideras med energianvändningen. Samtidigt som energianvändningen följdes upp bekräftades det att reningsprestandan var ungefär likvärdig mellan de två linjerna. Därmed säkerställdes att eventuell besparing i energi inte var på bekostnad av kvaliteten på det behandlade vattnet.

Utvärderingen visade att energianvändningen i testlinjen var hela 66 % lägre än i referenslinjen, som förutom luftningen drevs under snarlika förutsättningar. Effekter av de olika åtgärderna är sammanställda i Tabell 14.3. Då endast blåsmaskinerna skiljde linjerna åt, var energianvändningen 34 % lägre i testlinjen. Den nya skruvblåsmaskinen kunde tillgodosätta behovet i linje 1 mer energieffektivt än de vridkolvmaskiner som samtidigt användes i referenslinjen. Den uppmätta skillnaden var större än vad som är typiskt mellan vridkolvs- och skruvblåsmaskiner vid 700 mbar tryck (se Avsnitt 14.1). Den stora skillnaden kan bero på att vridkolvmaskinerna var relativt ineffektiva i sig, påverkade av slitage och åldrade eller att de var överdimensionerade för det aktuella behovet och därmed drevs vid en lägre driftpunkt än vad som var optimalt.

Byte av luftarna ökade energibesparing med 23 %-enheter till 57 %. Tack vare mer effektiva luftare (högre SOTE-värde) kunde ett lägre luftflöde användas vilket gav en direkt energibesparing. Ett lägre mottryck för de nya tallriksluftarna innebar att börvärdet för trycket samtidigt kunde sänkas från 700 mbar till ca 600 mbar. Det lägre trycket bidrog också till energibesparingen.

När den nya styrningen (kaskadreglering av syrehalt, MOV-princip för tryck och ammoniumåterkoppling) implementerades steg energibespa-

Tabell 14.3 Resultat av utvärderingen av effekten för de olika åtgärderna som utfördes för att öka energieffektiviteten (Larsson et al., 2013; Nordenborg et al., 2013). Värden avser uppmätt prestanda och besparing jämfört med referenslinjen efter en, två respektive samtliga tre åtgärder som infördes.

Period	SAE		Luftflödes- besparing	Energibesparing	Energibesparing
	Test	Referens			
	(kg O ₂ /kWh)		(%)	(%)	(kWh/vecka)
Ny blåsmaskin (BM)	2	1,3	u.s. ¹	34	1 565
Ny BM och nya luftare	1,8	0,8	21	57	4 840
Ny BM, luftare och styrning	2,6	0,9	35	66	3 376

¹ Uppgift saknas.

ringen med ytterligare ca 9 %-enheter. Detta berodde på flera faktorer vars enskilda effekter var svåra att fastställa var för sig. Kaskadregleringen ledde till ett jämnare luftflöde vilket bör ha varit gynnsamt. MOV-regleringen gjorde att trycket sjönk ytterligare något från 600 till 570 mbar. Och ammoniumåterkopplingen ledde till att profilen av löst syrehalt blev annorlunda i testlinjen. I referenslinjen tillämpades 1,7 och 0,6 mg/l i de två luftade zonerna. Testlinjen drevs med 0,7 mg/l i den andra zonen och en variabel syrehalt (baserat på ammonium) i den första zonen. Då temperaturen inte var alltför låg drevs därmed den första zonen vid en lägre halt löst syre än referenslinjen. Det ledde till att en högre andel av belastningen nådde den andra zonen och därmed blev fördelningen av belastningen jämnare över anläggningen. En jämnare belastning innebar lägre luftflöden per luftare och högre syreöverföringseffektivitet. Under vintertid tappades inte lika mycket av kapaciteten för nitrifikation i testlinjen som i referenslinjen eftersom syrehalten reglerades upp automatiskt.

Återbetalningstiden för den investering som gjorts i ny utrustning till testlinjen beräknades till ungefär 4 år baserat på elpriset 1,13 SEK/kWh (Larsson et al., 2013).

På reningsverket var man nöjd med de besparingar i energianvändning som uppnåddes och identiska åtgärder med ny blåsmaskin, luftare och styrning har sedan genomförts i den tidigare referenslinjen. Den biologiska behandlingen har byggts om och inkluderar numera (2018) sidostromshydrolys och en aktiv returslamprocess. Ammoniumåterkopplingen har också vidareutvecklats och upplevs ge större fördelar i den ombyggda processen.

14.5.6 Erfarenheter

- Potentialen att effektivisera luftningen vid Sternö avloppsreningsverk visade sig stor och de genomförda förändringarna ledde till hela 66 % mindre energianvändning jämfört med den parallella referenslinjen.
- Besparingarna var en kombination av mer effektiv blåsmaskin, effektiva luftare som ledde till minskat luftflöde och mottryck, samt ett förbättrat driftsätt och styrstrategi.
- Engagerad driftpersonal var en viktig faktor för projektets framgång. Trots stort engagemang var det dock en utmaning för det relativt lilla reningsverket att ha kapacitet att vara den drivande i framtagandet av lösningarnas utformning.

15 Referenser

- Ahlström, M., 2018. Online-instrumentering på avloppsreningsverk- Status idag och effekter av givarfel på reningsprocessen. Examensarbete (UPTEC W18013), Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet.
- Al-Ahmady, K.K., 2006. Analysis of Oxygen Transfer Performance on Sub-surface Aeration Systems. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 3, 301–308. doi:10.3390/ijerph2006030037
- Åmand, L., 2015. Implementering och utvärdering av ammoniumåterkoppling i fullskala. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2200.
- Åmand, L., 2013. Styrning av luftningsprocesser i avloppsreningsverk. Svenskt Vatten Utveckling. Rapport nr 2013-18.
- Åmand, L., Carlsson, B., 2014. Aeration Control with Gain Scheduling in a Full-scale Wastewater Treatment Plant. *IFAC Proc.* Vol. 47, 7146–7151.
- Amaral, A., Schraa, O., Rieger, L., Gillot, S., Fayolle, Y., Bellandi, G., Amerlinck, Y., Mortier, S.T.F.C., Gori, R., Neves, R., Nopens, I., 2017. Towards advanced aeration modelling: from blower to bubbles to bulk. *Water Sci. Technol.* 75, 507–517. doi:10.2166/wst.2016.365
- Amerlinck, Y., Bellandi, G., Amaral, A., Weijers, S., 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
- Andersson, R., Holmberg, M., 2006. Energy Conservation in Wastewater Treatment Operation - A Case Study at Himmerfjärden WWTP. Examensarbete, Avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation, Lunds Tekniska Högskola.
- Andersson, S., 2012. Ammoniumåterkoppling på Himmerfjärdsverket – utvärdering genom försök och simuleringar. Examensarbete, Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet.
- Andersson, S.L., Åmand, L., Samuelsson, O., Nilsson, S., 2019. Instrumentera rätt på avloppsreningsverk. Svenskt Vatten Utveckling. Rapport nr 2019-14.
- Arnaldos, M., Pagilla, K.R., 2014. Implementation of a demand-side approach to reduce aeration requirements of activated sludge systems: Directed acclimation of biomass and its effect at the process level. *Water Res.* 62, 147–155. doi:10.1016/j.watres.2014.05.040
- Arnell, M., 2016. Performance assessment of wastewater treatment plants – Multi-objective analysis using plant-wide models. Doktorsavhandling. Lunds Universitet.

- Arnell, M., 2013. Utsläpp av lustgas och metan från avloppssystem – En granskning av kunskapsläget. Svenskt Vatten Utveckling. Rapport Nr 2013–11.
- ASCE, 2018. ASCE/EWRI 18-18. Standard guidelines for in-process oxygen transfer testing.
- ASCE, 2007. ASCE/EWRI 2-06. Measurement of oxygen transfer in clean water.
- ASCE, 1997. ASCE 18-96. Standard guidelines for in-process oxygen transfer testing.
- ASCE, 1992. ANSI/ASCE 2-91. Measurement of oxygen transfer in clean water.
- ASCE, 1984. ASCE 2-84. A standard for the measurement of oxygen transfer in clean water.
- Ashley, K.I., Hall, K.J., 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
- ASME, 1997. PTC 10. Performance test code on compressors and exhausters.
- ASME, 1970. PTC 9. Displacement compressors, vacuum pumps and blowers.
- ATV, 2000a. ATV-DVWK-M 265E Regulation of oxygen transfer with the activated sludge process.
- ATV, 2000b. ATV-DVWK-A 131E Dimensioning of single stage activated sludge plants.
- ATV, 1996. ATV M 209E. Measurement of the oxygen transfer in activated sludge aeration tanks with clean water and in mixed liquor.
- Aymerich, I., Rieger, L., Sobhani, R., Rosso, D., Corominas, L., 2015. The difference between energy consumption and energy cost: Modelling energy tariff structures for water resource recovery facilities. *Water Res.* 81, 113–123. doi:10.1016/j.watres.2015.04.033
- Baeza, J.A., Gabriel, D., Lafuente, J., 2002. In-line fast OUR (oxygen uptake rate) measurements for monitoring and control of WWTP. *Water Sci. Technol.* 45, 19–28. doi:10.2166/wst.2002.0541
- Balku, S., 2007. Comparison between alternating aerobic-anoxic and conventional activated sludge systems. *Water Res.* 41, 2220–2228. doi:10.1016/j.watres.2007.01.046
- Balmér, P., Hellström, D., 2011. Nyckeltal för reningsverk – verktyg för effektivare resursanvändning. Svenskt Vatten Utveckling. Rapport nr 2011-15.
- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, R.I., Kalyuzhnyi, S. V, Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist, H., Vavilin, V.A., 2002. *Anaerobic Digestion Model No. 1*. IWA Publishing, London.

- Behnisch, J., Ganzauge, A., Sander, S., Herrling, M.P., Wagner, M., 2018. Improving aeration systems in saline water: measurement of local bubble size and volumetric mass transfer coefficient of conventional membrane diffusers. *Water Sci. Technol.* 78, 860–867. doi:10.2166/wst.2018.358
- Bengtsson, S., de Blois, M., Flodin, J., Olsson, J., Jonstrup, M., Myring, K., Johansson, J., Wilén, B.-M., Gustavsson, D., 2017. Aeroba granuler, en ny reningsteknik för kommunala avloppsreningsverk – En kunskaps-sammanställning. Svenskt Vatten Utveckling. Rapport nr 2017-19.
- Boyle, W.C., 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)
- CAGI, 2013. BL 5389. Simplified acceptance test of electric driven, low pressure turbocompressor air blower package.
- CAGI, PNEUROP, 2016. Performance test code for electric driven low pressure air compressor packages.
- Cannon, A., Jeal, W., 2018. Water treatment. Patent. WO2018/146488A1.
- Carlsson, B., Hallin, S., 2010. Tillämpad reglerteknik och mikrobiologi i kommunala reningsverk. Svenskt Vatten.
- Carlsson, B., Zambrano, J., 2016. Fault detection and isolation of sensors in aeration control systems. *Water Sci. Technol.* 73, 648–53.
- 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.
- Chachuat, B., Roche, N., Latifi, M.A., 2005. Optimal aeration control of industrial alternating activated sludge plants. *Biochem. Eng. J.* 23, 277–289. doi:10.1016/j.bej.2005.01.012
- Daelman, M.R.J., van Voorthuizen, E.M., van Dongen, U.G.J.M., Volcke, E.I.P., van Loosdrecht, M.C.M., 2015. Seasonal and diurnal variability of N₂O emissions from a full-scale municipal wastewater treatment plant. *Sci. Total Environ.* 536, 1–11. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.06.122
- Desloover, J., Vlaeminck, S.E., Clauwaert, P., Verstraete, W., Boon, N., 2012. Strategies to mitigate N₂O emissions from biological nitrogen removal systems. *Curr. Opin. Biotechnol.* 23, 474–482. doi:10.1016/j.copbio.2011.12.030
- Domingo-Félez, C., Smets, B.F., 2019. Regulation of key N₂O production mechanisms during biological water treatment. *Curr. Opin. Biotechnol.* 57, 119–126. doi:10.1016/j.copbio.2019.03.006
- Dotro, G., Jefferson, B., Jones, M., Vale, P., Cartmell, E., Stephenson, T., 2011. A review of the impact and potential of intermittent aeration on continuous flow nitrifying activated sludge. *Environ. Technol.* 32, 1685–1697. doi:10.1080/09593330.2011.597783

- DWA, 2007. DWA-M 209:2007-04. Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm.
- Ekman, M., Björlenius, B., Andersson, M., 2006. Control of the aeration volume in an activated sludge process using supervisory control strategies. *Water Res.* 40, 1668–1676. doi:10.1016/j.watres.2006.02.019
- Eriksson, P.E., Hane, J., 2014. Entreprenadupphandlingar – Hur kan byggherrar främja effektivitet och innovation genom lämpliga upphandlingsstrategier? Konkurrensverket Uppdragsforskningsrapport 2014:4.
- Fan, H., Qi, L., Liu, G., Zhang, Y., Chen, X., Wang, H., 2014. Promotion and inhibition of oxygen transfer under fine bubble aeration by activated sludge. *Water Environ. J.* 28, 434–441. doi:10.1111/wej.12061
- Fernandez-Alvarez, G., Perez, J., Gomez, M.A., 2014. Optimization of Reactor Depth in Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment. *J. Environ. Eng.* 140. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000829
- Foley, J., Yuan, Z., Keller, J., Senante, E., Chandran, K., Willis, J., van Loosdrecht, M., van Voorthuizen, E., 2011. N₂O and CH₄ emission from wastewater collection and treatment systems – State of the Science Report and Technical Report. GWRC Report series. IWA Publishing, London.
- Frey, W., 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., 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., 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., 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
- Gernaey, K.V., Jeppsson, U., Vanrolleghem, P.A., Copp, J.B., 2014. Benchmarking of control strategies for wastewater treatment plants. IWA Publishing, London.
- Gernaey, K. V., Flores-Alsina, X., Rosen, C., Benedetti, L., Jeppsson, U., 2011. Dynamic influent pollutant disturbance scenario generation using a phenomenological modelling approach, *Environmental Modelling & Software*. doi:10.1016/j.envsoft.2011.06.001
- Gillot, S., Capela-Marsal, S., Roustan, M., Heduit, A., 2005. Predicting oxygen transfer of fine bubble diffused aeration systems-model issued

- from dimensional analysis. *Water Res.* 39, 1379–1387. doi:10.1016/j.watres.2005.01.008
- Gillot, S., Capela, S., Heduit, A., 2000. Effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and in clean water with surfactants. *Water Res.* 34, 678–683. doi:10.1016/S0043-1354(99)00167-0
- Gillot, S., Heduit, A., 2008. Prediction of alpha factor values for fine pore aeration systems. *Water Sci. Technol.* 57, 1265–1269. doi:10.2166/wst.2008.222
- Granbom, A., 2016. Nitritomvandling vid Skebäck avloppsreningsverk. Examensarbete, Institutionen för ingenjers- och kemivetenskap, Karlstads universitet.
- Groves, K.P., Daigger, G.T., Simpkin, T.J., Redmon, D.T., 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.-H., Peng, Y.-Z., Peng, C.-Y., Wang, S.-Y., Chen, Y., Huang, H.-J., Sun, Z.-R., 2010. Energy saving achieved by limited filamentous bulking sludge under low dissolved oxygen. *Bioresour. Technol.* 101, 1120–1126. doi:10.1016/j.biortech.2009.09.051
- Guo, J., Fu, X., Andres Baquero, G., Sobhani, R., Nolasco, D.A., 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
- Habermeyer, P., Sánchez, A., 2005. Optimization of the Intermittent Aeration in a Full-Scale Wastewater Treatment Plant Biological Reactor for Nitrogen Removal. *Water Environ. Res.* 33, 229–233. doi:10.2175/106143005X41807
- Hanhan, O., Insel, G., Yagci, N.O., Artan, N., Orhon, D., 2011. Mechanism and design of intermittent aeration activated sludge process for nitrogen removal. *J. Environ. Sci. Heal. Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.* 46, 9–16. doi:10.1080/10934529.2011.526073
- Hanner, N., Aspegren, H., Nyberg, U., Andersson, B., 2003. Upgrading the Sjölanda WWTP according to a novel process concept. *Water Sci. Technol.* 47, 1–7. doi:10.2166/wst.2003.0621
- Hem, L., Rusten, B., Ødegaard, H., 1994. Nitrification in a moving bed biofilm reactor. *Water Res.* 28, 1425–1433. doi:10.1016/0043-1354(94)90310-7
- Henkel, J., Cornel, P., Wagner, M., 2009. Free Water Content and Sludge Retention Time: Impact on Oxygen Transfer in Activated Sludge. *Environ. Sci. Technol.* 43, 8561–8565. doi:10.1021/es901559f
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C., Marais, G.V.R., Van Loosdrecht, M.C.M., 1999. Activated Sludge Model

- No.2d, ASM2d. *Water Sci. Technol.* 39, 165–182. doi:10.1016/S0273-1223(98)00829-4
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., van Loosdrecht, M.C.M., 2000. *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA Publishing, London.
- Henze, M., Harremoës, P., la Cour Jansen, J., Arvin, E., 2010. *Wastewater Treatment – Biological and Chemical Processes*. Springer, Berlin.
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, D., 2008. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing, London.
- Hwang, H.J., Stenstrom, M.K., 1985. Evaluation of Fine-Bubble Alpha Factors in near Full-Scale Equipment. *J. Water Pollut. Control Fed.* 57, 1142–1151. doi:10.2307/25042816
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland.
- Iranpour, R., Magallanes, A., Zermeno, M., Varsh, V., Abrishamchi, A., 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
- Iranpour, R., Zermeno, M., 2008. Online Biochemical Oxygen Demand Monitoring for Wastewater Process Control — Full-Scale Studies at Los Angeles Glendale Wastewater Plant, California. *Water Environ. Res.* 80, 298–307.
- ISO, 2016. SS-ISO 1217:2016. Tryckluftsteknik – Displacements-kompressorer – Leveransprovning (ISO 1217:2009, IDT).
- ISO, 2008. SS-EN ISO 2151:2008. Akustik – Kompressorer och vacuum-pumpar – Mätning av buller – Teknisk metod (Grad 2) (ISO 2151:2004).
- ISO, 2006. SS-ISO 5389:2006. Tryckluftsteknik – Centrifugal-kompressorer – Leveransprovning (ISO 5389:2005, IDT).
- ISO, 2003. SS-EN ISO 5167-1. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular crosssection conduits running full – Part 1: General principles and requirements (ISO 5167-1:2003).
- Jansen, W., Costerton, J.W., 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., Garrido-Baserba, M., Nolasco, D., Al-Omari, A., DeClippeleir, H., Murthy, S., Rosso, D., 2017. Modelling oxygen transfer using dynamic alpha factors. *Water Res.* 124, 139–148. doi:10.1016/j.watres.2017.07.032

- Jing, J.Y., Feng, J., Li, W.Y., 2009. Carrier effects on oxygen mass transfer behavior in a moving-bed biofilm reactor. *Asia-Pacific J. Chem. Eng.* 4, 618–623. doi:10.1002/apj.302
- Kaliman, A., Rosso, D., Leu, S.-Y., 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
- Kampschreur, M.J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M.S.M., van Loosdrecht, M.C.M., 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Res.* 43, 4093–4103. doi:10.1016/j.watres.2009.03.001
- Keskar, P., 2006. Control and optimization of unit operations – aeration and DO control, in: *Instrument Engineers' Handbook – Process Control and Optimization*. CRC Press, Boca Raton.
- Kim, Y.K., 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)
- Kimochi, Y., Inamori, Y., Mizuochi, M., Xu, K.-Q., Matsumura, M., 1998. Nitrogen removal and N₂O emission in a full-scale domestic wastewater treatment plant with intermittent aeration. *J. Ferment. Bioeng.* 86, 202–206. doi:10.1016/S0922-338X(98)80114-1
- 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
- Krampe, J., Krauth, K., 2003. Oxygen transfer into activated sludge with high MLSS concentrations. *Water Sci. Technol.* 47, 297–303. doi:10.2166/wst.2003.0618
- Krause, K., Böcker, K., Londong, J., 2002. Simulation of a nitrification control concept considering influent ammonium load. *Water Sci. Technol.* 45, 413–20. doi:10.2166/wst.2002.0638
- Larsson, V., 2011. Energy savings with a new aeration and control system in a mid-size Swedish wastewater treatment plant. *Examensarbete, Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet*.
- Larsson, V., Lazic, A., Carlsson, B., 2013. Energieffektiviserad luftning på Sternö avloppsreningsverk. *Vatten* 69, 37–47.
- Lazic, A., Larsson, V., Nordenborg, Å., 2012. Energy savings potential of new aeration system: Full scale trials. *Water Pract. Technol.* 7. doi:10.2166/wpt.2012.098
- Leu, S.-Y., Chan, L., 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., 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., 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., Sahimann, C., Handschag, J., Wiesmann, U., 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
- Lindberg, C.F., 1997. Control and estimation strategies applied to the activated sludge process. Doktorsavhandling, Avdelningen för materialvetenskap, Uppsala Universitet.
- Lingsten, A., Lundkvist, K., Hellström, D., 2013. VA-verkens energianvändning 2011. Svenskt Vatten Utveckling. Rapport nr 2013-17.
- Lingsten, A., Lundkvist, M., Hellström, D., Balmér, P., 2011. VA-verkens energianvändning 2008. Svenskt Vatten Utveckling. Rapport nr 2011-04.
- Makinia, J., 2010. Mathematical modelling and computer simulation of activated sludge systems. IWA Publishing, London.
- Martins, A.M.P., Heijnen, J.J., van Loosdrecht, M.C.M., 2003. Effect of dissolved oxygen concentration on sludge settleability. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 62, 586–593. doi:10.1007/s00253-003-1384-6
- Martins, A.M.P., Pagilla, K., Heijnen, J.J., Van Loosdrecht, M.C.M., 2004. Filamentous bulking sludge - A critical review. *Water Res.* 38, 793–817. doi:10.1016/j.watres.2003.11.005
- Massara, T.M., Malamis, S., Guisasola, A., Antonio Baeza, J., Noutsopoulos, C., Katsou, E., 2017. A review on nitrous oxide (N₂O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water. *Sci. Total Environ.* 596, 106–123. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.191
- McQuarrie, J.P., Boltz, J.P., 2011. Moving bed biofilm reactor technology: Process applications, design, and performance. *Water Environ. Res.* 83, 560–575. doi:10.2175/106143010X12851009156286
- Monod, J., 1949. The growth of bacterial cultures. *Annu. Rev. Microbiol.* 3, 371–394. doi:10.1146/annurev.mi.03.100149.002103
- Mota, L.S., dos Santos, S.L., van Haandel, A.C., 2018. Minimizing treatment costs of flocculent and granular activated sludge systems by optimizing the sludge concentration, in: *Proceedings of IWA Biofilm Granular Sludge Conference i Delft, Nederländerna*, 18-21 Mars 2018.
- Mueller, J.A., Boyle, W.C., Pöpel, H.J., 2001. Aeration: Principles and Practice. CRC Press, Boca Raton.

- Muller, E.B., Stouthamer, A.H., van Verseveld, H.W., Eikelboom, D.H., 1995. Aerobic domestic waste water treatment in a pilot plant with complete sludge retention by cross-flow filtration. *Water Res.* 29, 1179–1189. doi:10.1016/0043-1354(94)00267-B
- Newbry, B.W., 1998. Oxygen-transfer efficiency of fine-pore diffused aeration systems: energy intensity as a unifying evaluation parameter. *Water Environ. Res.* 70, 323–333. doi:10.2175/106143098X124957
- Ni, B.-J., Yuan, Z., 2015. Recent advances in mathematical modeling of nitrous oxides emissions from wastewater treatment processes. *Water Res.* 87, 336–346. doi:10.1016/j.watres.2015.09.049
- Noble, P.A., Park, H.-D., Olson, B.H., Asvapathanagul, P., Hunter, M.C., Garrido-Baserba, M., Lee, S.-H., Rosso, D., 2016. A survey of biofilms on wastewater aeration diffusers suggests bacterial community composition and function vary by substrate type and time. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100, 6361–6373. doi:10.1007/s00253-016-7604-7
- Nordenborg, Å., Larsson, V., Lazic, A., Carlsson, B., 2013. Energy improved aeration at Sternö wastewater treatment plant, in: *NORDIWA 8–10 Oktober, Malmö*.
- Ødegaard, H., 2006. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process. *Water Sci. Technol.* 53, 17–33. doi:10.2166/wst.2006.284
- Odize, V.O., Novak, J., De Clippeleir, H., Al-Omari, A., Smeraldi, J.D., Murthy, S., 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. *Svenskt Vatten Utveckling, Rapport nr 2008-19*.
- Olsson, G., Åmand, L., Rieger, L., Carlsson, B., 2018a. Aeration control – fundamentals, in: Rosso, D. (Ed.), *Aeration, Mixing and Energy. Bubbles and Sparks*. IWA Publishing, London.
- Olsson, G., Åmand, L., Rieger, L., Carlsson, B., 2018b. Aeration control – implementation, in: Rosso, D. (Ed.), *Aeration, Mixing and Energy. Bubbles and Sparks*. IWA Publishing, London.
- Pöpel, H.J., Wagner, M., 1994. Modelling of oxygen transfer in deep diffused-aeration tanks and comparison with full-scale plant-data. *Water Sci. Technol.* 30, 71–80. doi:10.2166/wst.1994.0161
- Qi, L., Li, M., Fan, H., Wang, H., 2015. Prediction of Oxygen Mass Transfer in the Presence of Plastic Carriers. *Environ. Eng. Sci.* 32, 407–415. doi:10.1089/ees.2014.0166
- Redmon, D., Boyle, W.C., 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, 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
- Rieger, L., Gillot, S., Langergraber, G., Ohtsuki, T., Shaw, A., Takacs, I., Winkler, S., 2012. Guidelines for using activated sludge models. IWA Publishing, London.
- Rieth, M.G., Chisea, S.C., Polta, R.C., 1995. Effects of operational variables on the oxygen transfer performance of ceramic diffusers. *Water Environ. Res.* 67, 781–787. doi:10.2175/106143095X131673
- Rosso, D., 2018. Aeration, Mixing, and Energy: Bubbles & Sparks. IWA Publishing, London.
- Rosso, D., Huo, D.L., Stenstrom, M.K., 2006. Effects of interfacial surfactant contamination on bubble gas transfer. *Chem. Eng. Sci.* 61, 5500–5514. doi:10.1016/j.ces.2006.04.018
- Rosso, D., Iranpour, R., Stenstrom, M.K., 2005. Fifteen years of off-gas 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., 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., 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., Larson, L.E., Stenstrom, M.K., 2008a. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. *Water Sci. Technol.* 57, 973–978. doi:10.2166/wst.2008.218
- Rosso, D., Libra, J.A., Wiehe, W., Stenstrom, M.K., 2008b. 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., Lothman, S.E., Jeung, M.K., Pitt, P., Gellner, W.J., Stone, A.L., Howard, D., 2011. Oxygen transfer and uptake, nutrient removal, and energy footprint of parallel full-scale IFAS and activated sludge processes. *Water Res.* 45, 5987–5996. doi:10.1016/j.watres.2011.08.060
- Rosso, D., Shaw, A.R., 2014. Framework for Energy Neutral Treatment for the 21st Century through Energy Efficient Aeration. IWA Publishing & Water Environment Research Foundation, London/New York.

- Rosso, D., Stenstrom, M.K., 2006a. Surfactant effects on alpha-factors in aeration systems. *Water Res.* 40, 1397–1404. doi:10.1016/j.watres.2006.01.044
- Rosso, D., Stenstrom, M.K., 2006b. Economic implications of fine-pore diffuser aging. *Water Environ. Res.* 78, 810–815. doi:10.2175/106143006X101683
- Rosso, D., Stenstrom, M.K., 2005. Comparative economic analysis of the impacts of mean cell retention time and denitrification on aeration systems. *Water Res.* 39, 3773–3780. doi:10.1016/j.watres.2005.07.002
- Röttorp, J., Allard, A.-S., Ek, M., Kaj, L., Remberger, M., Solyom, P., Eriksson, L., 1999. DIKA - Driftstörningar i kommunala avloppsreningsverk – en studie av syreöverföring, ytaktiva ämnen, slamegenskaper och styrmöjligheter 1996-1998. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B1328A.
- Sahlmann, C., Libra, J.A., Schuchardt, A., Wiesmann, U., 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., Zambrano, J., Carlsson, B., 2018. Fault signatures and bias progression in dissolved oxygen sensors. *Water Sci. Technol.* 78, 1034–1044. doi:10.2166/wst.2018.350
- Samuelsson, O., Björk, A., Zambrano, J., Carlsson, B., 2017. Gaussian process regression for monitoring and fault detection of wastewater treatment processes. *Water Sci. Technol.* 75, 2952–2963. doi:10.2166/wst.2017.162
- Samuelsson, P., Carlsson, B., 2002. Control of the aeration volume in an activated sludge process with nitrogen removal. *Water Sci. Technol.* 45, 45–52. doi:10.2166/wst.2002.0548
- Sander, S., Behnisch, J., Wagner, M., 2017a. Design of fine-bubble aeration systems for municipal WWTPs with high sea salt concentrations. *Water Sci. Technol.* 75, 1555–1563. doi:10.2166/wst.2017.027
- Sander, S., Behnisch, J., Wagner, M., 2017b. Energy, cost and design aspects of coarse- and fine-bubble aeration systems in the MBBR IFAS process. *Water Sci. Technol.* 75, 890–897. doi:10.2166/wst.2016.571
- Schraa, O., Rieger, L., Alex, J., 2015. A comprehensive aeration system model for WRRF design and control. 88th Water Environ. Fed. Tech. Exhib. Conf. doi:10.2175/193864715819539786
- Schraa, O., Rieger, L., Alex, J., Miletic, I., 2019. Ammonia-based aeration control with optimal SRT control: improved performance and lower energy consumption. *Water Sci. Technol.* 79, 63–72. doi:10.2166/wst.2019.032
- Schuchardt, A., Libra, J.A., Sahlmann, C., Wiesmann, U., 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, A.O., Rittmann, B.E., Crawford, G. V, Klein, A.M., Daigger, G.T., 2006. Critical review on the effects of mixed liquor suspended solids on membrane bioreactor operation. *Sep. Sci. Technol.* 41, 1489–1511. doi:10.1080/01496390600634699
- Singh, M., Srivastava, R.K., 2011. Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: a review. *Asia-Pacific J. Chem. Eng.* 6, 3–13. doi:10.1002/apj.490
- SIS, 2004. SS-EN 12255-15:2004. Avlopp – Reningsanläggning – Del 15: Luftningsbassänger för slam – Mätning av syretransport i rent vatten.
- Smolders, G.J.F., van der Meij, J., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., 1994. Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process. *Biotechnol. Bioeng.* 44, 837–848. doi:10.1002/bit.260440709
- 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
- Stenstrom, M.K., Gilbert, R.G., 1981. Effects of alpha, beta and theta factor upon the design, specification and operation of aeration systems. *Water Res.* 15, 643–654. doi:10.1016/0043-1354(81)90156-1
- Suescun, J., Ostolaza, X., Garcia-Sanz, M., Ayesa, E., 2001. Real-time control strategies for predenitrification – nitrification activated sludge plants biodegradation control. *Water Sci. Technol.* 43, 209–16. doi:10.2166/wst.2001.0050
- Sund, J., 2019. Styrning av biologisk kväverening anpassat efter tidsvarierande elpris. Examensarbete, Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet.
- Svanberg, N., 2016. Effektivisering av kvävereningen vid bioblock A, Kungsängsverket. Examensarbete, Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet.
- Svenskt Vatten, 2017. Investeringsbehov och framtida kostnader för kommunalt vatten och avlopp. Rapport.
- Svenskt Vatten, 2007. Avloppsteknik 2 – Reningsprocessen. Publikation U2.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., Burton, F., 2014. *Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.* McGraw-Hill Education, New York.
- Trillo, I., Jenkins, T.E., Redmon, D., Hilgart, T., 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., 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
- Upphandlingsmyndigheten, 2018. Statistik om offentlig upphandling 2018. Upphandlingsmyndigheten rapport 2018:2 och Konkurrensverket rapport 2018:9. Tillgänglig via: www.upphandlingsmyndigheten.se/globalassets/publikationer/rapporter/statistikrapport_2018_webb.pdf.
- US EPA, 1989. Design Manual - Fine Pore Aeration Systems. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- van Haandel, A.C., van der Lubbe, J.G.M., 2012. Handbook of biological wastewater treatment - Design and optimisation of activated sludge systems. IWA Publishing, London.
- Vanrolleghem, P.A., Lee, D.S., 2003. On-Line Monitoring Equipment for Wastewater Treatment Processes: State of the Art. *Water Sci. Technol.* 47, 1–34. doi:10.2166/wst.2003.0074
- Wagner, M., Pöpel, H.J., 1996. Surface active agents and their influence on oxygen transfer. *Water Sci. Technol.* 34, 249–256. doi:10.2166/wst.1996.0438
- Wagner, M., 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., 1998. Oxygen transfer and aeration efficiency - Influence of diffuser submergence, diffuser density, and blower type. *Water Sci. Technol.* 38, 1–6. doi:10.1016/S0273-1223(98)00445-4
- Warriner, R., 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, 2018. Design of Water Resource Recovery Facilities, WEF Manual of Practice No. 8, 6th edition. Water Environment Federation, American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill, New York.
- WEF, 2012. Membrane Bioreactors: WEF Manual of Practice No. 36. McGraw-Hill Education, New York.
- WEF, 2010. Energy Conservation in Water and Wastewater Treatment Facilities. Manual of Practice No. 32. Water Environment Federation, New York.
- Wenström, J., 2013. Förbättring av kvävereduktionsprocessen på avloppsreningsverket Lucerna under WTOS-styrning. Examensarbete, Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet.
- Westling, K., 2011. Lustgasemissioner från avloppsreningsverken litteraturstudie. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2200.
- Wikén, M., 2017. Optimering av blåsmaskinstyrning på Bromma reningsverk. Examensarbete, Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet.

Xylem, 2012. Handbook of mixing for wastewater and similar applications. Xylem Water Solutions, Sundbyberg.

Xylem, 2011. White Paper: Comparison of the ASCE and the European EN standards for measurements of oxygen transfer in clean water.

Bildrättigheter

Följande figurer har använts med tillstånd av andra rättighetshavare:

Figur	Med tillstånd av
Figur 4.4	Veolia Water Technologies
Figur 5.2a	Xylem Water Solutions
Figur 5.2b	Invent Umwelt- und Verfahrenstechnik
Figur 5.2c	Invent Umwelt- und Verfahrenstechnik
Figur 5.2d	Xylem Water Solutions
Figur 5.2e	Rudolf Messner Umwelttechnik
Figur 5.3 (vänster)	Xylem Water Solutions
Figur 5.3 (höger)	Invent Umwelt- und Verfahrenstechnik
Figur 5.4a	Invent Umwelt- und Verfahrenstechnik
Figur 5.4b & c	Sulzer Pumps Sweden
Figur 5.6a	EBRO Armaturen
Figur 5.8	Kaeser Kompressorer
Figur 5.9	Atlas Copco Compressor
Figur 5.10a	NextTurbo Technologies
Figur 5.10b	Aerzen Scandinavia
Figur 8.6	Xylem Water Solutions
Figur 8.8	Xylem Water Solutions

Förkortningar

AB 04	Standardkontraktet <i>Allmänna bestämmelser för byggnads-, anläggnings- och installationsentreprenad</i>
ABA 99	Standardkontraktet <i>Allmänna bestämmelser för leverans av industriella anläggningar</i>
ABM 07	Standardkontrakt för <i>köp av byggvaror för yrkesmässig byggverksamhet</i>
ABT 06	Standardkontraktet <i>Allmänna bestämmelser för totalentreprenader avseende byggnads-, anläggnings- och installationsarbete</i>
ADM	"anaerobic digestion model"
AE	Luftningseffektivitet under processförhållanden ("aeration efficiency") (kgO_2/kWh).
AF	Administrativa föreskrifter
AOR	Mikroorganismernas verkliga behov av syre ("actual oxygen requirement") för att utföra omvandlingarna i processen ($\text{kg O}_2/\text{h}$).
ASCE	"American society of civil engineers"
ASM	"activated sludge model"
ASME	"American society of mechanical engineers"
BKK	Föreningen Byggandets Kontraktskommitté
BOD	Biokemisk syreförbrukning ("biochemical oxygen demand").
BSM	"benchmark simulation model"
CAGI	"Compressed Air and Gas Institute"
COD	Kemisk syreförbrukning ("chemical oxygen demand").
DE	Delad entreprenad
DO	Löst syre ("dissolved oxygen")
DWP	Tryckfall för luften över luftaren vid drift ("dynamic wet pressure").
EF	Effektivitetsfaktor (kvoten mellan verkligt syrebehov och massluftflödet korrigerad för syrehalten).
EPDM	Syntetiskt gummi, etenpropengummi ("ethylene propylene diene M-class").
FAT	Prov för verifiering ("factory acceptance test")
FE	Funktionsentreprenad
GE	Generalentreprenad
IFAS	Hybrid mellan aktivslam- och bärarprocess ("integrated fixed-film activated sludge").
ISO	"International organization for standardization"
KMA	Kvalitet-, miljö och arbetsmiljö
LCC	Livscykelkostnad ("life cycle cost")
LOU	Lagen om offentlig upphandling
LUF	Lagen om upphandling inom försörjningssektorerna
MBBR	Reaktor med suspenderade bärare ("moving-bed biofilm reactor").
MBR	Membranbioreaktor.
MOV	Styrstrategi där blåsmaskinens tryck styrs efter systemets mest öppna ventil ("most open valve").
mVp	Meter vattenpelare, tryckenhet.
N	Kväve
NL	Standardkontrakt för leverans

NLM	Standardkontrakt för leverans inklusive montage
Nm ³	En kubikmeter luft med avseende på normalförhållanden. Olika definitioner för normalförhållanden förekommer. I denna rapport gäller 0 °C, 1 atm och 0 % luftfuktighet.
OTR	Syreöverföringshastighet ("oxygen transfer rate") i processen (kg O ₂ /h).
P	Fosfor eller tryck (t.ex. mVp eller mbar)
pe	Personekvivalenter.
PNEUROP	"European committee of manufacturers of compressors, vacuum technology, pneumatic tools, air treatment equipment and condensate treatment equipment"
PTFE	Polytetrafluoreten, ytbeläggning även känd som varumärket Teflon.
PVC	Polyvinylklorid, plast som är vanligt använd till rör.
SAE	Luftningseffektivitet under standardförhållanden i renvatten ("standard aeration efficiency") (kgO ₂ /kWh).
SAT	Prov för validering ("site acceptance test")
SBR	Sekventiell satsvis reaktor ("sequencing batch reactor").
Sm ³	En kubikmeter luft med avseende på standardförhållanden. Olika definitioner för standardförhållanden förekommer. I denna rapport gäller 20 °C, 1 atm och 0 % luftfuktighet.
SOR	Syrebehov i renvatten ("standard oxygen requirement").
SOTE	Syreöverföringseffektiviteten vid standardförhållanden i renvatten ("standard oxygen transfer efficiency") som anger hur mycket av det ingående syret som absorberas vid luftningen (t.ex. % eller i g O ₂ /Nm ³).
SOTR	Syreöverföringshastigheten vid standardförhållanden i renvatten ("standard oxygen transfer rate") (kg O ₂ /h).
SRT	Slamålder ("solids retention time")
SS	Suspenderad substans.
TDS	Lösta ämnen mätt som "total dissolved solids" (mg/l).
TE	Totalentreprenad
TOC	Totalt organiskt kol ("total organic carbon").
UE	Underentreprenör
VA	Vatten och avlopp
VSS	Brännbar suspenderad substrans ("volatile suspended solids").
αSAE	SAE korrigerad för standardförhållanden med avseende på allt utom α.
αSOTE	SOTE korrigerad för standardförhållanden med avseende på allt utom α.
αSOTR	SOTR korrigerad för standardförhållanden med avseende på allt utom α.

Variabler

A	Gränssnittsyta vid vilken masstransport sker från gas och vätska (m^2)
a	Specifik yta per volymenhet (m^{-1})
AOR_{BioP}	Syrebehov för biologisk fosforavskiljning ($\text{kg O}_2/\text{d}$)
AOR_{Den}	Syrebehov för denitrifikation ($\text{kg O}_2/\text{d}$)
AOR_{Kem}	Syrebehov för kemisk oxidation ($\text{kg O}_2/\text{d}$)
AOR_{Nit}	Syrebehov för nitrifikation ($\text{kg O}_2/\text{d}$)
AOR_{Org}	Syrebehov för avskiljning av organiskt material ($\text{kg O}_2/\text{d}$)
AOR_{Sy}	Nettotillförsel av syre med in- och utgående vatten ($\text{kg O}_2/\text{d}$)
AOR_{Tim}	Maxtimvärde för AOR ($\text{kg O}_2/\text{h}$)
$\text{AOR}_{x, d}$	Dygnsmedelvärde för AOR med avseende på x
$B_{\text{BOD, red}}$	Mängd BOD reducerad ($\text{kg BOD}_7/\text{d}$)
B_{BOD5}	Belastning av BOD_5 ($\text{kg BOD}_5/\text{d}$)
C	Koncentrationen av löst syre (mg/l). Även för motståndsfaktor vid beräkning av ekvivalent rörlängd.
C_{∞}^*	Syrets jämviktskoncentration efter lång tids luftning (mg/l).
$C_{\infty 20}^*$	Syrets jämviktskoncentration efter lång tids luftning vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mg/l).
C_{s20}^*	Tabellvärde för mättnadskoncentrationen för syre vid ytan vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, atmosfärstryck och 100 % luftfuktighet (mg/l).
C_{sT}^*	Tabellvärde för mättnadskoncentrationen för syre vid ytan vid temperaturen T, atmosfärstryck och 100 % luftfuktighet (mg/l).
d_e	Korrektionsfaktor för medelvattendjupet (-)
D	Rördiameter (m)
D_f	Vattendjupet med avseende på luftarna (m).
F_{Nit}	Toppfaktor för nitrifikation (-)
f_{Org}	Toppfaktor för organiskt material (-)
F_T	Temperaturkorregeringsfaktor (-)
k_G	Masstransportkoefficient för gasfilmen
k_L	Masstransportkoefficient för vätskefilmen
K_L	Masstransportkoefficient för vätska
$K_L a$	Volymetrisk masstransportkoefficient (d^{-1})
L	Rörlängd eller ekvivalent rörlängd (m).
$N_{\text{ÖS}}$	Kväve i överskottsslamm uttag (kg N/d)
N_{Den}	Denitrifierat kväve (kg N/d)
N_{In}	Inkommande totalkväve eller kjeldalkväve (kg N/d)
N_{Inert}	Inert kväve i utgående vatten (kg N/d)
$N_{\text{NH}_4, \text{Ut}}$	Utgående ammonium (kg N/d)
$N_{\text{NO}_3, \text{Ut}}$	Nitrat i utgående vatten (kg N/d)
N_{Nit}	Mängd nitrifierat kväve (kg N/d)

P	Fosfor eller tryck (t.ex. mVp eller mbar)
P_b	Det rådande trycket (atm eller mVp)
P_s	Standardtrycket 1 atm eller 10,33 mVp
P_{OS}	Fosfor i överskottsslammuttag utan polyfosfat medräknad (kg P/d)
P_{BioP}	Fosfor som tas upp som polyfosfat (kg P/d)
P_{In}	Inkommande fosfor (kg P/d)
P_{Ut}	Fosfor som lämnar systemet med utgående vatten (kg P/d)
Q_L	Luftflöde (t.ex. m ³ /h).
r	Masstransporthastighet per ytenhet per tidsenhet (kg O ₂ m ⁻² d ⁻¹)
r_v	Masstransporthastighet per volymenhet per tidsenhet (kg O ₂ m ⁻² d ⁻¹)
SS_m	Medelslammängd i luftningsbassängen (kg)
T	Temperatur (°C eller K)
V	Volym i vilken masstransporten sker (m ³)
α	Alfa, korrektionsfaktor för avloppsvattnets påverkan på syrebehovet.
β	Beta, korrektionsfaktor för avloppsvattnets påverkan på syrets mättnadskoncentration.
θ	Korrektionsfaktor för temperaturens inverkan på syreöverföring.
τ	Korrektionsfaktor för temperaturens inverkan på syrets mättnadskoncentration.
Ω	Korrektionsfaktor för lufttryckets inverkan på syrets mättnadskoncentration.

Ordlista

Alfa (α)	Korrektionsfaktor för avloppsvattnets påverkan på syrebehovet.
Aktuator	se Ställdon
Ammoniumframkoppling	Reglering av börvärde för löst syrehalt baserad på mätning av ammonium innan den luftade volymen.
Ammoniumåterkoppling	Reglering av börvärde för löst syrehalt baserad på mätning av ammonium efter eller i slutet av den luftade volymen.
Analysator	Instrument för automatiserade analyser av t.ex. ammonium eller syrehalt i utgående luft ("off-gas").
Beta (β)	Korrektionsfaktor för avloppsvattnets påverkan på syrets mättnadskoncentration.
Bias	Ett konstant fel i mätvärdet från en givare jämfört med ett kontrollvärde.
Blåsmaskin	Maskin som levererar luft med ett visst tryck och flöde till ett luftningssystem i reningsprocessen.
Borstluftare	Ytluftare med horisontell roterande axel och blad som skapar droppar och därmed syresätter vattnet. Används ofta i cirkulära bassänger för att samtidigt skapa rotation av vattnet i anläggningen.
Bottenluftare	Luftare som är nedsänkta nära botten.
Bottenluftning	Luft tillsätts avloppsvattnet via nedsänkta luftare nära botten.
Bottentäckningsgrad	Andel (%) av bottenytan i en bassäng som är täckt av aktiv luftaryta i form av till exempel perforerade membran.
Centrifugalblåsmaskin	Blåsmaskin där en motor sätter en axel med ett fläkthjul i rotation vilken sätter luften i rörelse i tvärgående riktning gentemot axeln.
Displacementblåsmaskin	Blåsmaskiner i vilka två roterande kolvar förflyttar luften genom maskinhuset, som till exempel vridkolvs- och skrivblåsmaskiner.
Diffusion	Spontan förflyttning av ämnen mot jämvikt för att utjämna en gradient i koncentration.
Diffusor	Utløpsdelen på en centrifugalblåsmaskin där rörelseenergi omvandlas till ökat tryck. Ordet används ibland för Luftare efter eng. "diffuser".
Direkt driven turboblåsmaskin	Turboblåsmaskin där axeln drivs direkt av motorn utan rem eller kugghjul, vanligen med en höghastighets-permanentmagnetsmotor, som hos till exempel luftlagrade och magnetlagrade turboblåsmaskiner.
Drift	(om mätvärden) Ett fel i mätvärdet som ökar med tiden.
Driftpunkt	Aktuellt flöde och tryck för ett luftningssystem vilket kan illustreras som skärningen mellan systemkurvan och blåsmaskinens driftkurva.
Dubbelexcentrisk vridspjällventil	Vridspjällventil där spjällbladets axel är förskjuten från mitten i djup- och sidled vilket ger en mer linjär ventilkarakteristik än för en (vanlig) centrisk vridspjällventil.
Dynamisk blåsmaskin	se Centrifugalblåsmaskin
Dynamiskt tryck	Den del av systemets mottryck som består av friktionsförlusten och är beroende av flödes hastigheten (av luft) i systemet.
Dynamiskt våttryck (DWP)	Tryckfall över en luftare vid drift i en bassäng.

Dysa	se Luftare
Effektivitetsfaktor (EF)	Kvoten mellan det verkliga syrebehovet (AOR, kg O ₂ /h) och tillförd luft (kg O ₂ /h) korrigerad för halten av löst syre (se ekvation 10.2).
Ejektorluftare	se Jetluftare.
Ekvivalent längd	Den hypotetiska längden av ett rakt rör som motsvarar den tryckförluster som uppstår i böjar, förgreningar, ventiler och dylikt.
Endogen respiration	Mikroorganismernas förbrukning av syre för överlevnad i frånvaro av ämnen som kan omsättas för tillväxt.
Energieffektivitet	Nytta i form av till exempel reningsprestanda i förhållande till använd (el) energi.
Etenpropengummi (EPDM)	Blandning av syntetiskt gummi som ofta används till luftarmembran tillsammans med andra ingredienser som mjukgörare.
Finblåsig	Utrustning som skapar bubblor som är ungefär 1–5 mm stora.
Fjärilsventil	se Vridspjällventil
Flexibel zon	Zon i anläggningen med utrustning som medger att den antingen luftas eller bara omrörs. Även Flexzon eller Swingzon.
Frekvensomformare	se Frekvensomriktare
Frekvensomriktare	Elektronisk utrustning som används för att reglera frekvensen på växelström och därmed hastigheten på en elmotor.
Friblåsning	Avledning av ett delflöde för att undvika stall av en centrifugalblåsmaskin då luftflödesbehovet är lågt som t.ex. vid uppstart.
Fyllnadsgrad	Andel av en bassängvolym som upptas av bärmaterial för biofilm, då bärmaterialet är utan omblandning.
Fördelarrör	Rör vid bassängbotten som leder fram luft till de luftare som är monterade på det. Flera fördelarrör fördelar således tillsammans luften över bassängens botten.
Gafflat luftarsystem	Luftarsystem med två eller flera nedledare med tillhörande luftare som täcker samma bottenytan och därmed överlappar varandra för att öka reglerområdet.
Givare	Instrument som används för att mäta en parameter i anläggningen.
Grenrör	Rör vid bassängbotten, ofta intill bassängväggen, som är anslutet till en nedledare och leder och fördelar luften till ett antal Fördelarrör.
Grid	även Luftargrid, se Luftarnät
Grind	Vanligen för del av luftarnätet som är anslutet till en nedledare.
Grovblåsig	Utrustning som skapar bubblor som är större än 5 mm.
Huvudledning	Luftledningsrör till vilket blåsmaskinerna är anslutna och varifrån luften sedan fördelas till olika delar av luftningsanläggningen.
Hybridblåsmaskin	Mellanting mellan vridkolvs- och skruvblåsmaskiner med vridna lober eller skruvar.
Igensättning	Fenomen då organiskt och oorganiskt material vidhäftar och (delvis) täpper igen öppningarna i framförallt finblåsiga luftare.
Impeller	Fläkt hjul. Roterande element som t.ex. förflyttar luften genom en blåsmaskin.
Intermittent luftning	Luftning som sker omväxlande på och av för att t.ex. erhålla nitrifikation och denitrifikation i samma volym.

Jetluftare	Luftare som består av en dränkt pump som kan förses med luft så att en blandning av luft och vatten sprids genom att sprutas genom ett munstycke.
Jonselektiv givare	Givare som utnyttjar jonspecifika membran som binder jonen som ska mätas och potentialskillnaden som då uppstår mot en referenselektrod.
Kabel-till-luft	Princip för att ange prestanda för blåsmaskiner baserat på total effekt och luftflöde levererat ("wire-to-air").
Kabel-till-vatten	Princip för att ange prestandas för hela luftningssystemet från blåsmaskiner till luftare baserat på total effekt och överfört syre ("wire-to-water"). Se även Luftningseffektivitet som bygger på denna princip.
Kaskadreglering	Reglering med två eller flera regulatorer kopplade i serie, som t.ex. reglering av syrehalt med en regulator för luftflödet som i sin tur styr en reglerventil för att uppnå önskas syrehalt.
Keramiska luftare	Finblåsiga luftare av poröst keramiskt material.
Kinetiskt tryck	se Dynamiskt tryck
Kompressor	Används ibland för blåsmaskiner som kan åstadkomma högre tryck än 1 bar och ibland för maskiner som utför intern kompression av luften som skruv- och centrifugalmaskiner.
Kulsektorventil	Ventil med en kula som kan roteras. Kulan har en öppning och genom att rotera kulan kan påverkas storleken på öppningen genom ventilen.
Laminärt flöde	Strömning som i motsats till turbulent strömning följer parallella linjer utan att blandas.
Ledskena	Mekanisk anordning som används för att reglera vinkel på ingående luft till vissa centrifugalblåsmaskiner (vanligtvis växlade turbo-) och därigenom reglera flöde och energianvändning.
Livscykelkostnad	Summan av kostnaderna för investering och drift under ett visst antal år.
Lob	Blad på rotorn i en vridkolvsblåsmaskin (2 el. 3 st.). Pressar luften genom maskinen.
Lobrotor	se Vridkolvsblåsmaskin
Luftare	Anordning vid ytan eller botten för att skapa syresättning genom kontakt mellan luft och vatten.
Luftarnät	System med luftare och luftledningar, vanligtvis på botten av bassäng.
Luftarmembran	Membran av t.ex. gummi med perforering för att skapa små bubblor när luften passerar.
Luftarsystem	System med luftare och luftledningar, vanligtvis på botten av bassäng.
Luftflödesmätare	Mätare för flöde av luft som monteras i luftledning.
Luftlagrad turboblåsmaskin	Direkt driven turboblåsmaskin där axeln vid drift hålls svävande utan mekanisk kontakt med hjälp av ett luftlager.
Luftningsanläggning	Anläggning bestående av blåsmaskin, luftledning, luftare, instrument, ventiler och styrsystem med mera.
Luftningseffektivitet (SAE)	Mängd syre som tillgodogörs reningsprocessen per tillförd mängd energi (kg O ₂ /kWh) vid rent vatten och standardförhållanden.
Luftningssystem	se Luftningsanläggning
Lustgas	Dikvävemoxid (N ₂ O). Stark växthusgas som kan bildas vid kväverening under vissa förhållanden.

Lägesställare	Anordning för vägleda ett (pneumatiskt) ställdon till det läge en ventil ska regleras till.
Löst syrehalt	Koncentration av löst syrgas, vanligen 0–10 mg/l i vatten.
Magnetlagrad turboblåsmaskin	Direkt driven turboblåsmaskin där axeln hålls svävande utan mekanisk kontakt med hjälp av magneter.
Manifold	även Manifolder eller Manifolderrör. Se Huvudledning.
Manöverdon	se Ställdon
Masstransportkoefficient	Faktor som används för att beskriva hastigheten med vilken syre överförs från gas till vätska med avseende på massa per yta per tid.
Mekaniska luftare	Luftare som utnyttjar mekanisk energi i samband med luftningen genom droppbildning vid ytan (ytluftare) eller genom att sprida bubblor vid botten (mekaniska bottenluftare).
Membranluftare	Luftare med perforerat membran av ett flexibelt material.
Motionering av membran	Tillfällig, kortvarig och ofta regelbunden ökning av flödet genom membranluftare för att avlägsna vidhäftande material.
Motståndsfaktor	Faktor som används för att beräkna tryckförluster i böjar, förgreningar, ventiler med mera i form av Ekvivalent längd
Mottryck	Det lufttryck som behöver övervinnas i hela eller en del av Luftningssystemet.
Mättnadskoncentration	Den högsta möjliga koncentrationen av t.ex. syre i vatten vid en viss uppsättning av förhållanden.
Nedledningsrör	även Nedledare. Leder luften från bassängkanten ned till botten av bassängen där det är anslutet till ett grenrör.
Normalkubikmeter	En kubikmeter luft vid normalförhållanden. Olika definitioner för normalförhållanden förekommer. I denna rapport gäller temperaturen 0 °C, trycket 1 atm och 0 % relativ luftfuktighet.
Omrörningskriteriet	Det luftflöde som krävs, vanligtvis relativt ytan ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$), för att skapa tillräcklig omblandning av reaktorns innehåll.
”Off-gas”-mätning	Metod för att mäta syreöverföring genom att jämföra halten av syre i in- och utgående luft till processen.
Panelluftare	Membranluftare med relativt stor yta per luftare. Ofta rektangulär.
Perforerad luftare	se Membranluftare.
Permanentmagnetmotor	Elmotor där rotorn har permanentmagneter. Används i direkt drivna luftlagrade och magnetlagrade turboblåsmaskiner.
Polytetrafluoreten (PTFE)	En fluorplast med en vaxliknande yta. Mest känt från varumärkena som Teflon och Gore-Tex.
Polyuretan	Mjukplast av är också ett vanligt material till luftarmembran.
Porös luftare	Finblåsiga luftare av poröst material vilket luften passerar och därigenom bildar små bubblor. Kan vara av t.ex. plast eller keramiskt material.
Prestandakurva	Kurva som illustrerar möjliga kombinationer av tryck och luftflöde som en blåsmaskin kan leverera.
Reglerområde	Område i vilket utrustning kan drivas på avsett sätt. T.ex. spannet mellan minsta och maximala luftflödet för ett luftarsystem eller blåsmaskin.
Reglerventil	Ventil som kan ställas i olika lägen för att påverka flödet av en gas eller vätska.

Renvattentest	Test av prestandan (t.ex. SOTR eller SOTE) för ett luftarsystem i rent vatten, dvs. utan påverkan av avloppsvattnets föroreningar. Kan utföras i testanläggning eller i verklig anläggning.
Rotor	Roterande element som t.ex. förflyttar luften genom en blåsmaskin.
Rörluftare	Rörformad luftare. Ofta med kropp av plast och ett flexibelt, perforerat membran.
Shoreprovning	Metod för att bestämma hårdheten hos elastiska material genom att mäta storleken på den deformation som uppkommer när en provspets trycks med en specificerad kraft mot provföremålet.
Silikon	Oorganisk polymer baserad på kedjor av kisel. Används till luftarmembran.
Skjutspjällsventil	Ventil där en platta skjuts in i ventilhuset för att reglera öppningens storlek.
Skjuvfena	Blad undertill på vissa mekaniska bottenluftare som slår sönder bubblor till mindre.
Skruvblåsmaskin	Displacementblåsmaskin i vilken luften förflyttas och komprimeras med hjälp av en han- och en honformad roterande skruv.
Slangluftare	Luftare där bubblor skapas med hjälp av perforerade slangar.
Specifik energianvändning	Energianvändning per enhet luft levererad till systemet (kWh/Nm ³)
Stall, överstegring	Fenomen då en centrifugalblåsmaskin hamnar i obalans och börjar självsvänga vilket kan vara skadligt för maskinen. Uppstår vid relativt lågt flöde och/eller högt tryck. Efter eng ”stalling”.
Standardförhållanden	Förhållanden som innebär temperaturen 20 °C, trycket 1 atm och 0 mg/l löst syre.
Standardkubikmeter	En kubikmeter luft vid standardförhållanden, dvs. temperaturen 20 °C och trycket 1 atm. (andra definitioner kan förekomma)
Ställbara diffusorblad	Blad i diffusorn på en centrifugalblåsmaskin vars vinkel kan ändras för att reglera luftflödet.
Ställdon	Anordning som utför en ändring i t.ex. ventilläge baserat på en signal från ett styrsystem. Kan vara elektriskt eller pneumatiskt. Även Manöverdon eller Aktuator
Stödlager	Lager som används vid start och stopp av luftlagrad turboblåsmaskin när axelns hastighet är för låg för att ett luftlager ska uppstå.
”Surge”	se Stall
Swingzon	se Flexibel zon
Syrebehov i renvatten (SOR)	Processens verkliga behov av syre (AOR) omräknat till standardförhållanden och rent vatten.
Syregivare	Givare som används för att registrera koncentrationen av löst syre i vatten eller gas. Finns med elektrokemisk och optisk mätprincip.
Syrehalt	Koncentration av löst syrgas, vanligen 0–10 mg/l i vatten.
Syreöverföring	Transport av syre från gasform (i luften) till vätska (vatten).
Syreöverföringseffektivitet	Ett mått på hur mycket eller hur stor andel av syret som överförs till vattnet vid luftning, totalt eller per m installationsdjup (SOTE i %, %/m, g O ₂ /Nm ³ eller g O ₂ /Nm ³ /m).
Syreöverföringshastighet	Hastigheten med vilken syre överförs till vattnet (OTR eller SOTR i kg O ₂ /h).
Systemkurva	Kurva som illustrerar trycket som funktion av luftflödet i ett system.

Tallriksluftare	Luftare med formen av en rund skiva med typisk diameter 180–300 mm, ofta med perforerat membran.
Trappat luftarsystem	Luftarsystem där botten täckningsgraden varierar mellan zoner, vanligtvis med högre täthet i första luftade zonen för att möta en hög belastning och sedan fallande täthet.
Turbinluftare	Typ av mekanisk luftare med roterande del för spridning av bubblorna.
Turboblåsmaskin	Centrifugalblåsmaskin med fläkthjul som är aerodynamiskt utformat utifrån turbinmotorteknik.
Tvåfilmsteorin	Fysikalisk modell som beskriver transport av syre från gas till vätska genom tunna filmer intill gränsskiktet på gas- respektive vätskesidan.
Valsluftare	se Borstluftare
Varaktighetsdiagram	Diagram som t.ex. visar hur stor del av tiden faktorn Y är mindre än X.
Ventilkaraktäristik	Samband mellan öppningsgraden för en ventil och flödet genom den. Kan vara såväl linjärt som icke-linjärt.
Ventillägesgivare	Givare som ger information om ventilens öppningsgrad.
Verkligt syrebehov (AOR)	Mikroorganismernas behov av syre för att utföra omvandlingarna i processen. Beräknas utifrån belastningen med hänsyn till nedbrytning av organiskt material, nitrifikation, denitrifikation och endogen respiration.
Volymetrisk masstransportkoefficient	$K_L a$, faktor som används för att beskriva hastigheten med vilken syre överförs från gas till vätska med avseende på massa per volym per tid.
Volymsreglering	Reglering av den luftade volymen genom luftning eller endast omrörning aktiveras i en flexibel zon.
Vot	Förstärkning av betongbassäng i form av t.ex. snedställd vägg vid botten. Leder till att den plana bottenarean blir mindre än arean vid bassängens övre del.
Vridkolvslåsmaskin	Displacementblåsmaskin med två rotorerna med lober som förflyttar luften genom maskinen.
Vridspjällventil	Ventil med en skiva som kan roteras till olika lägen och därmed påverka den öppna tvärsnittsyta och flödet genom.
Växlad turboblåsmaskin	En turboblåsmaskin där motorn drivs vid ett (ofta fast) varvtal som ökar med en växellåda till ett betydligt högre varvtal för fläkthjulet.
Ytaktivt ämne	Även Tensid eller Surfactant. Ämne som består av en polär (hydrofil) och en opolär (hydrofob) del. Dessa egenskaper leder till ansamling vid fasgränssytor som den mellan luft och vatten där de hindrar masstransport.
Ytluftare	Mekanisk roterande luftare med vertikal eller horisontell axel som blandar avloppsvattnet så att droppar bildas och syre från atmosfären löser sig i vattnet.
Ytluftning	Avloppsvattnet blandas mekaniskt på så sätt att droppar bildas och syre från atmosfären löser sig i vattnet.

Bilaga A - Processmodellering

Benchmark Simulation Model (BSM) är ett modellramverk för avloppsreningsverk ursprungligen utvecklat för jämförelser av styrstrategier på avloppsreningsverk genom simuleringar i en fastlagd modellmiljö. BSM-modellerna består av en reningsverksdesign med tillhörande inflöde och belastning, ett antal regler- och styrhandtag, en rutin för simuleringar samt definierade kriterier för utvärdering av resultaten. BSM No. 2 (BSM2) beskriver ett komplett reningsverk med försedimentering och ett biosteg med fem bioreaktorer i serie och biosedimentering; vidare har BSM2 förtjockning av bioslam, rötning av blandat primär- och bioslam, slutavvattning samt ett rejektivattenlager (Gernaey et al., 2014).

Modellen byggdes med utgångspunkt från vattenlinjen i BSM2 i Matlab/Simulink (Matlab 9.3, The Mathworks Inc., Natwick, MA, USA, 2017). Konfigurationen av reningsverket anpassades till det aktuella exemplet och bassängvolymerna med mera justerades. Inflödet till modellen skapades med en fenomenologisk modell för generering av dynamiska inflöden (Gernaey et al., 2011). Inflödesgeneratoren skapar en dynamisk inflödesprofil för 609 dagar med dygnsvariationer, veckovariationer, säsongsvariationer samt reducerad belastning under semesterperioden. Ett antagande om en COD-belastning på 2,2 gånger BOD-belastningen gjordes. För generering av inflödesprofilen antogs en specifik belastning på 150 l/p/d, en industribelastning på 1 000 m³/d samt tillkommande ovidkommande vatten från nederbörd och inläckage. Temperaturprofilen anpassades till en årsmedeltemperatur på 14,7 °C med min- och maxvärden på 9,4 °C respektive 19,7 °C. I Tabell A.1 redovisas belastningar, inflöde i modellen samt inflöde till biosteget i modellen.

Tabell A.1 *Inkommande belastning för design jämfört med modellen, inkommande och efter försedimentering. Redovisade modellvärden är medelvärden för 14 d med torrvädersflöde.*

	Modell ingående	Modell efter försedimentering
COD (kg/d)	6 810	3 330
NH ₄ -N (kg/d)	485	485
N-tot (kg/d)	695	556
Q medel (m ³ /d)	14 350	14 246

Försedimentering med förfällning inkluderades i modellen med en reduktionsgrad av partikulära fraktioner på 80 %. Ingen internbelastning av kväverikt rejektivatten inkluderades.

Biosteget är delades in i sex reaktorer i serie varav: två oluftade (ANOX1 & 2), tre luftade (OX1, 2 och 3) samt en avslutande avluftningszon (DEOX) med volymer Tabell A.2. Reaktorindelningen har jämförts mot gängse sektionering enligt (Rieger et al., 2012) och är tillämplig för modellering av hydrauliken i aktivslamsteget. De två parallella linjerna i designen

Bilaga B - Enkät svar

Drift									
1. Hur har börvärden för koncentrationerna av löst syre vid den biologiska behandlingen valts?									
Enligt konvention eller tumregel	Automatisk ammoniumämte-koppling	Egen erfarenhet för att uppnå tillräcklig N-avskiljning	Egen erfarenhet för att uppnå annat mål	Vet ej					
3	4	7	1	0					
2. Har drift vid lägre koncentrationer av löst syre än vad som nu tillämpas utvärderats?									
Ja	Nej	Vet ej							
9	5	1							
3. Justeras den luftade volymen (antal luftade zoner) vid behov orsakade av till exempel ändrad belastning?									
Ja, oftare än 2 gånger per år	Ja, oftast sommar/vintertid	Sällan	Aldrig (behov att ändra saknas)	Aldrig (ej möjligt, till exempel på grund av att omrörare saknas)					
5	1	3	5	1					
4. Vilken roll har den som oftast utför daglig bevakning av driften av luftningssystemet/bassängen?									
Driftekniker	Driftingenjör	Processingenjör	Vet ej	Annan, ange nedan					
11	3	9	0	0					
Uppföljning och utvärdering									
5. Hur ofta sker uppföljning av luftflödet i förhållande till belastning av syreförbrukande ämnen (till exempel kvoten luftflöde/AOR)?									
En gång per halvår eller oftare	Ungefär en gång per år	Ungefär vart 3:e år	Ungefär vart 5:e år	Mer sällan	Aldrig	Vet ej			
0	0	0	0	5	10	0			
6. Hur ofta sker uppföljning av elanvändningen i förhållande till belastning av syreförbrukande ämnen (till exempel kvoten elanv./AOR)?									
En gång per halvår eller oftare	Ungefär en gång per år	Ungefär vart 3:e år	Ungefär vart 5:e år	Mer sällan	Aldrig	Vet ej			
2	1	0	0	1	11	0			
7. Hur ofta sker uppföljning av totalt mottryck eller tryckfall över luftare?									
En gång per halvår eller oftare	Ungefär en gång per år	Ungefär vart 3:e år	Ungefär vart 5:e år	Mer sällan	Aldrig	Vet ej			
5	1	0	0	1	7	1			
8. Hur ofta inspekteras utseende på uttömt kondensat från luftningsanläggningen?									
En gång per vecka eller oftare	Ungefär en gång per månad	Ungefär en gång per år	Mer sällan	Aldrig	Vet ej				
2	4	1	3	5	0				

9. Har någon av dessa typer av uppföljning lett till någon åtgärd eller underhåll av luftningssystemet?						
Ja	Nej	Vet ej				
6	7	2				
10. I så fall vilken åtgärd?						
Rengöring av luftare	Byte av luftare	Underhåll av blåsmaskin	Underhåll av rørsystem	Vet ej	Annan åtgärd	
0	3	0	0	3	4	
11. Vilken roll har den som oftast utför uppföljning?						
Driftekniker	Driftingenjör	Processingenjör	Utredningsingenjör	Vet ej	Annan	
6	3	6	1	0	0	
Underhåll av luftare						
12. Sker någon regelbunden "motionering" av membranen (ökat luftflöde) och i så fall på vilket sätt sker denna?						
Ja (beskriv sekvensen nedan)	Nej	Vet ej				
8	7	0				
13. Har någon försämring över tid observerats i syreöverföringseffektiviteten för luftare jämfört med när de var nya eller nyligen rengjorda?						
Ja, en tydlig försämring	Möjligen, men osäkert	Nej				
3	8	3				
14. I fall försämring observerats/misstänkts, har det kunnat fastställas i fall den varit relaterad till åldrande eller igensättning?						
Ja, mestadels åldrande	Ja, mestadels igensättning	Nej				
5	0	5				
15. Hur ofta sker någon form av rengöring av luftare?						
En gång per halvår eller oftare	Ungefär en gång per år	Ungefär var 5:e år	Mer sällan	Aldrig	Vet ej	
0	1	0	1	13	0	
16. Vilken form av rengöring?						
Mekanisk rengöring	Spolning med vatten eller högtrycksvätt	Syratvätt via luftningssystemet	Annan kemisk rengöring	Ingen	Annan, ange nedan	
0	1	1	0	13	0	
17. I fall någon form av rengöring gjorts, har positiv effekt kunnat observeras efteråt?						
Ja, en tydlig förbättring	Möjlig förbättring men osäkert	Nej, ingen förbättring				
0	3	0				

18. Vilken roll har den som oftast utför eventuellt underhåll av luftare?						
Driftekniker	Driftingenjör	Processingenjör	Underhållstekniker	Vet ej	Annan, ange nedan	
10	0	0	1	0	2	
Underhåll av instrument						
19. Hur ofta sker automatisk rengöring av syregivare?						
En gång per dag eller oftare	Ungefär en gång per vecka	Mer sällan	Aldrig	Vet ej		
2	0	1	11	1		
20. Hur ofta torkas syregivare av manuellt?						
En gång per dag eller oftare	Ungefär en gång per vecka	Ungefär en gång per månad	Mer sällan	Aldrig	Vet ej	
0	7	6	2	0	0	
21. Vilken roll har den som oftast utför underhåll av instrument?						
9	0	0	0	0	1	0
4						
Underhåll av blåsmaskiner						
22. Vilken typ eller vilka typer av blåsmaskiner finns på anläggningen?						
Vridkolsblåsmaskin	Skruvblåsmaskin	Växlad turboblåsmaskin	Luftlagrad turboblåsmaskin	Magnetlagrad turboblåsmaskin		
5	2	7	3	3		
23. Vilken roll har den som oftast utför underhåll av blåsmaskiner?						
Driftekniker	Driftingenjör	Processingenjör	Underhållstekniker	Leverantör	Vet ej	Annan, ange nedan
4	0	0	3	7	0	1
24. Har ni serviceavtal med någon leverantör för löpande underhåll?						
Ja	Nej	Vet ej				
8	6	0				

modellerades som en då likvärdig flödesfördelning antogs. Biosteget hade fyra reglerloopar implementerade, separat syrerreglering för de tre luftade zonerna samt styrning av nitratreturflödet. Syrerregleringarna var PI-regulatorer som styrde luftflödet till respektive reaktor baserat på syrekonzentrationen (SO) ut från reaktorn. Nitratreturflödet styrdes av en PI-regulator baserat på nitrat-kvävehalten (SNO) ut från ANOX2 mot ett börvärde på 1 mg/l.

Tabell A.2 Volym för de olika zonerna i processmodellen, sammanlagt för två linjer.

	Volym (m ³)
ANOX1	650
ANOX2	650
OX1	650
OX2	650
OX3	650
DEOX	380

Biosedimenteringsmodellen anpassades endast med avseende på djup och volym. Sedimenteringen modellerades som en linje. Modellparametrarna i BSM2 bibehölls och alla simuleringar gjordes i enlighet med protokollet för BSM2 (Gernaey et al., 2014). För varje uppsättning förhållanden kördes en simulering över 609 dagar och utvärderingen baserades på de sista 365 dygnet av de dynamiska simuleringarna.

Luftningssystemen modellerades efter principen beskriven av Arnell (2016). Alfavärdet antogs variera längs reaktarlängden och för OX1 till OX3 användes 0,6, 0,8 och 0,9.

Modellen gav $k_L a$ i varje steg som input av syre i den biologiska modellen. Det faktiska syrebehovet (AOR) beräknades från simuleringresultaten som funktion av $k_L a$, syrehalten och syrets mättnadskoncentration (Ekvation 6.6).

Beräknade AOR-värden vid min-, medel- och maxbelastning användes för design av olika bottenluftarsystemen. Design av varje luftarsystem resulterade i antalet luftare per zon, min- och maxflöden per luftare samt SOTE-profiler för luftarna i de olika zonerna. Ett tredjegradspolynom anpassades till punkterna för SOTE-profilen och data för systemet matades in i modellen för de olika fallen. Luftflödesbegränsningarna som inkluderades var minluftflöde per luftare på 0,85 Nm³/h/st och max på 17 Nm³/h/st. Mottrycket i systemet antogs vara 550 mbar och med hänsyntill detta beräknades energianvändningen som 0,0186 kWh/Nm³.

Bilaga C – Syres mättnadskoncentration

Tabell C.1 Mättnadskoncentrationen för syre vid ytan vid olika temperaturer vid atmosfärstryck och 100 % luftfuktighet.

Temperatur (T) °C	mg/l
0	14,60
1	14,20
2	13,81
3	13,45
4	13,09
5	12,76
6	12,44
7	12,13
8	11,83
9	11,55
10	11,28
11	11,02
12	10,77
13	10,53
14	10,29
15	10,07
16	9,86
17	9,65
18	9,45
19	9,26
20	9,08



Box 14057 • 167 14 Bromma
Tfn 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se