

Effektivare reningsverk

Några steg mot bättre energi- och resursutnyttjande

Gustaf Olsson



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SV-Utveckling) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet.

SV-Utveckling (fd VA-Forsk) initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

SV-Utveckling styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Anders Lago, ordförande	Södertälje Kommun
Olof Bergstedt	Göteborg Vatten
Roger Bergström	Svenskt Vatten AB
Per Fåhraeus	Varbergs Kommun
Carina Färm	Mälarenergi AB
Daniel Hellström	Svenskt Vatten AB
Mikael Medelberg	Roslagsvatten AB
Marie Nordkvist Persson	Sydvatten AB
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten AB
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Ulf Thysell	VA SYD
Susann Wennmalm	Käppalaförbundet
Fred Ivar Aasand	Norsk Vann, adjungerad

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

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47 607
117 94 Stockholm
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:	Effektivare reningsverk. Några steg mot bättre energi- och resursutnyttjande
Title of the report:	More Effective Water Sewage Plants
Rapportens beteckning Nr i serien:	2008-19
Författare:	Gustaf Olsson. Lunds Tekniska Högskola & Chalmers Tekniska Högskola
Projekt nr:	25-111
Projektets namn:	VA-verkens bidrag till energieffektivisering.
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling
Rapportens omfattning Sidantal: Format:	56 A4
Sökord:	Energieffektivisering, pumpning, luftning, reglering, fällningskemikalier, biogas, värmepumpar
Keywords:	Energy saving, pumping, areators, chemical dosage, biogas, heat pumps
Sammandrag:	Rapporten bör kunna tjäna som inspiration till att energieffektivisera reningsverk. Goda förutsättningar finns att minska elanvändningen, och förbättra utnyttjandet av den energi som finns i form av värme i utgående vatten och i form av kemiskt bunden energi i organiskt material.
Abstract:	This report is aimed to inspire the improvement of more efficient operation of wastewater treatment plants. There are good opportunities to reduce power consumption and to improve the recovery of energy, that is stored as heat in the effluent and as organic material in the sludge.
Målgrupper:	Ansvariga för drift och energieffektivisering vid VA-verk, konsulter.
Omslagsbild:	Skebäcksverket, Örebro kommun
Tryckta rapporter beställs från:	Svenskt Vattens distribution, Box 262, 591 23 Motala, 0141-539 00. Alla rapporter finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se . Där kan du också beställa tryckta rapporter. Klicka vidare till "Vattenbokhandeln".
Utgivningsår:	2008
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Innehåll

	Sammanfattning	4
	Summary	5
1	Bakgrund	6
2	Energianvändning i reningsverk	7
3	Reningsverkets energibalans	12
4	De ekonomiska incitamenten	15
5	Energieffektiviteten – påverkan av utrustningen	17
5.1	Pumpar	17
5.2	Rörledningar	24
5.3	Luftning i aktivslamprocessen	26
5.4	Omrörning	29
5.5	Slambehandling	29
5.6	Uppvärmning, belysning och ventilation i lokaler	30
6	Energibesparingar genom reglering	31
6.1	Störningar	31
6.2	Reglering – grundläggande begrepp	32
6.3	Styrning och reglering på olika nivåer	34
6.4	Syrereglering	34
6.5	Nitratreturpumpning	41
6.6	Dosering av fällningskemikalier	42
7	Produktion av biogas	46
8	Begränsning av effekttoppar	48
9	Utbyte av erfarenheter	50
10	Slutsatser	51
	Mer att läsa	53

Sammanfattning

Syftet med denna rapport är att vara ett slags inspiration till mer energieffektiva reningsverk. På flera håll i Sverige pågår ett intensivt och medvetet arbete att spara elenergi och att utnyttja den energi som finns i form av värme i utgående vatten eller som kemiskt bunden energi i organiskt material. Rapporten har inte som avsikt att ge kvantitativa svar eller detaljanvisningar om hur man skall förverkliga sitt energisparande. Däremot är ambitionen att visa de stora viktiga processer och utrustningar som är de mest energikrävande och hur de kan drivas mer effektivt.

Pumpning är väsentlig elförbrukare i ett verk. Den stora utmaningen är inte bara att installera sådana pumpar att de kan drivas med den bästa verkningsgraden vid det vanligast förekommande flödet. Utmaningen är också att göra pumpningen så anpassad till variabla flöden att pumparna ändå kan drivas effektivt. Här kommer varvtalsregleringen in som en viktig möjlighet. Sambandet mellan varvtal och verkningsgrad är mycket viktig, vilket diskuteras mer i detalj. Man kan minska en hel del på friktionsförlusterna i rör genom att dimensionera dessa rätt. Förlusterna är starkt beroende av förhållandet mellan flöde och rördiameter.

Syrekoncentrationen i luftningsbassängerna är av central betydelse både för biologin och driftsekonomin. En flexibel reglering av syrekoncentrationen är en viktig del i energieffektiviseringen. Det räcker oftast inte att reglera det totala luftflödet till luftningsbassängen, utan också fördelningen av luft längs bassängerna spelar en stor roll. För att detta skall vara möjligt krävs flera reglerbara luftventiler längs bassängen. Det betyder också att man behöver mäta syrehalten i flera punkter längs bassängen.

Rätt dosering av fällningskemikalier är ett svårt problem, om man inte kan mäta det slutliga resultatet, d.v.s. utgående totalfosforhalten. Med kommersiellt tillgängliga fosfatgivare kan man åstadkomma en avsevärd besparing av kemikalier. Detta påverkar driftskostnaderna väsentligt.

Reningsverket är inte bara en energikonsument. Genom att *producera biogas* och att *utnyttja värmeinnehållet* i utgående vatten kan reningsverket bli en nettoproducent av energi. Det är en väsentlig information som vi bör göra mer känd: reningsverk är inte bara en anläggning som tar hand om icke önskvärda föroreningar i slutet av avloppsnätet. Det är också en viktig *energiproducent*, som dessutom är miljövänlig. Ekonomiska värdet är beroende av storleken på verket och dessutom beroende av om det går att garantera en jämn last av organiskt material.

Hur skall vi lyckas åstadkomma de önskvärda besparingarna? Kunskap är förstås en del av lösningen. Personalen på många verk är väldigt kompetent. Lika viktigt som kunskap är att vi skapar de incitament som gör det både lönsamt och nöjsamt att bli effektivare, både för den enskilde miljöarbetaren på verket och för organisationen vid verket. Det handlar alltså om en kombination av tekniska lösningar och ”mjuka” faktorer för att åstadkomma det energieffektiva verket.

Summary

The aim of this report is to serve as a source of inspiration to achieve more efficient operation of wastewater treatment systems. In Sweden a lot of activities have been initiated to save electrical energy in the operation and to make use of the energy that is stored as heat content in the effluent water and as organic material in the sludge.

The purpose of the report is not to present quantitative calculations or detailed operational guidance how to obtain a more efficient operation. Rather the ambition is to show the key operations and main equipment that are most interesting from an energy point of view and then to indicate how to operate more efficiently.

Pumping is a key consumer of electrical energy in a wastewater treatment plant. It is a great challenge to install pumps that can be operated with maximum efficiency at the most common flow rates. Furthermore, pumping has to be adapted to variable flow rates so that the pumps can be operated efficiently. Variable speed drives should be considered. However, it is important to take the relationship between efficiency and speed into consideration. This is discussed in more detail in the report. Another detail is the friction loss in pipes that depends critically on the pipe diameter. The losses also depend significantly on the relationship between the flow rate and the pipe diameter.

The dissolved oxygen concentration in the aerators is of fundamental importance, both for the biology and for the operation economy. A flexible control of the dissolved oxygen concentration is a key component in making the operation more efficient. Mostly it is not sufficient to control only the total air flow rate to the aerators. The aeration distribution along the aerator plays an important role. Therefore it is mostly required to control the air flow rate independently in different zones along the aerator. Naturally, the dissolved oxygen concentration has to be known in the various zones.

The proper dosage of chemicals is a difficult problem, if the effluent total phosphorous concentration can not be measured. Today there are commercially available phosphate sensors that will help to significantly save chemicals and subsequent operating costs.

A wastewater treatment plant is not only an energy consumer. The *production of biogas* and *extraction of heat* from the effluent can make the plant a net producer of energy. We should make it known to the public that a wastewater treatment plant is in fact an *energy producer* and not just an end-of-pipe facility. It is an environmentally friendly energy producer.

How to obtain the desired efficiency? A good knowledge is of course part of the solution. The personnel at most treatment works are very competent. However, we also have to create the right incentives to make it profitable and enjoyable to become more efficient, both for the individual and for the plant organization.

1 Bakgrund

Sedan ett par år tillbaka driver Svenskt Vatten ett projekt för energieffektivisering av svenska reningsverk. Eftersom energipriserna ökar stadigt så ökar också incitamenten att spara på energi utan att därför försämra resultatet av reningen i processerna.

Under 2006 och 2007 har Svenskt Vatten och Föreningen Vatten arrangerat flera seminarier kring temat energi i reningsverk, där författaren medverkat med presentationer. Dessa presentationer bildar utgångspunkten för denna skrift. Uppdraget (31 Jan. 2008) från Svenskt Vatten har varit att producera en rapport som kan utgöra ett slags inspiration till mer energieffektiva reningsverk. På flera håll i Sverige pågår ett intensivt och medvetet arbete att göra reningsverken mer energieffektiva genom att spara elenergi och att utnyttja den energi som finns i form av värme i utgående vatten och i form av kemiskt bunden energi i organiskt material.

Rapporten har inte som avsikt att ge kvantitativa svar eller detaljanvisningar om hur man skall förverkliga sitt energisparande. Däremot är ambitionen att visa de stora viktiga processer och utrustningar som är de mest energikrävande och hur de kan drivas mer effektivt och ekonomiskt utan att reningsresultatet blir lidande.

2 Energianvändning i reningsverk

Effekt och energi

Vi talar om effekt- och energimått. Effekt är ingenting annat än energin per tidsenhet, d.v.s. den hastighet med vilken energi används eller förbrukas. Vanliga mått för effekt är W och kW medan energin mäts i Wh (wattimmar), eller vanligare, kWh (kilowattimmar).

I ett större reningsverk närmar man sig en elanvändning på MW, där $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$ eller 10^3 kW (mega = million). 1 MWh motsvarar alltså 1000 kWh .

Årsförbrukningar mäts ofta i GWh (miljarder Wh) där $1 \text{ GWh} = 1000 \text{ MWh}$. Ett reningsverk med en medelförbrukning av $1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW}$ kommer att under årets 8760 timmar förbruka totalt $8760 \text{ MWh} = 8,76 \text{ GWh}$.

$1 \text{ TWh} = 1000 \text{ GWh} = 10^6 \text{ MWh}$
 $= 10^9 \text{ kWh} = 10^{12} \text{ Wh}$.

Svenska reningsverk med en total årsförbrukning på $0,6 \text{ TWh} = 600 \text{ GWh}$ har alltså en medelförbrukning (8760 timmar på 1 år) av $600/8760 = 0,068 \text{ GW} = 68 \text{ MW}$ under dygnets 24 timmar, hela året.

I en tidigare rapport från Svenskt Vatten har Lingsten-Lundkvist (2008) gjort en detaljerad analys av energianvändningen i svenska VA-verk. Med cirka 40% av branschen som deltagit i undersökningen har man sedan extrapolerat till den totala energianvändningen i Sverige. Hela branschen – vattenproduktion, vattendistribution samt avledning och rening av avloppsvatten – använder cirka $1,3 \text{ TWh}$ ($= 1300 \text{ GWh}$) el och cirka $0,5 \text{ TWh}$ annan energi. Till detta kommer energiinnehållet i de kemikalier som används. På avloppsreningsverken produceras energi i form av cirka $0,6 \text{ TWh}$ biogas och cirka $2,5 \text{ TWh}$ ($= 2500 \text{ GWh}$) spillvärme från utgående vatten. Via värmepumpar levereras detta till fjärrvärmenäten.

För att få en känsla för de väldiga talen så beräknar vi i stället elenergin per svensk innevånare. Då motsvarar $1,3 \text{ TWh}$ el cirka 145 kWh^1 per person. Kostnaden motsvarar cirka 8% av VA-taxan, men de ökade energipriserna gör att denna siffra håller på att öka. Enligt vissa bedömningar kan siffran redan ha passerat 10% .

Är detta en stor kostnad? Sett i ett nationellt perspektiv svarar VA-verken för 1% av elförbrukningen och andra sektorer är mer betydelsefulla. För det enskilda verket är däremot energikostnaden en väsentlig del av de totala kostnaderna.

Det internationella perspektivet

Möjligheten och nödvändigheten att spara energi i vattensektorn är också uppmärksammat internationellt. Både den ökande vattenanvändningen och energikonsumtionen inom EU kräver energibesparingsprogram för reningsverk. IWA (the International Water Association) har bildat en arbetsgrupp (task group) för att jämföra olika typer av reglering av reningsverk. Benchmarking har sedan början av 1990-talet använts flitigt för att värdera reningsverk (Benchmarking 2008).

Vattendistribution och vattenrening är ju oftast en naturlig monopolverksamhet vilket bidrar till en begränsad konkurrens. Dock innebär den ökande vattenanvändningen i många länder på kontinenten att hållbarhet kommer alltmer i fokus. Hög kvalitet är alltid högsta prioritet i vattensammanhangen. Den globala uppvärmningen och nödvändigheten att minska CO_2 -utsläppen sätter en press på aktörerna att förbättra och utveckla mer energieffektiva lösningar och ändå behålla en hög kvalitet på vattnet. Man arbetar också på ett internationellt "benchmarking" system. Genom att jämföra sig med de bästa så kan man göra förbättringar och öka energieffektiviteten. Kontinuerliga benchmarks mellan olika reningsverk har resulterat i minskande energikonsumtion (Wett et al. 2007).

Vare sig man jämför reningsverk mellan olika platser i Sverige eller mellan olika länder är det många olikheter som gör att en direkt jäm-

¹ Har man en 40 W lampa tänd 10 timmar om dagen i 365 dagar blir energiåtgången cirka 145 kWh .

förelse av energiåtgången inte är rättvisande. Avloppsnätens utsträckning är olika, topografin har en stor betydelse och koncentrationen av organiskt material och närsalter kan också vara ganska olika. Dessutom finns väldigt olika förutsättningar för att driva små och stora verk. Infrastrukturen runt verket kan avgöra hur mycket biogasproduktion kan löna sig. En lönsam biogasframställning förutsätter också en viss storlek på verket och en någorlunda jämn belastning av organiskt material. Dessutom är ju personalsituationen väldigt olika på stora och små verk. Ett större verk kan tillåta att någon person mer helhjärtat kan ägna sig åt energieffektivisering, medan driftpersonal vid ett litet verk skall klara en mängd olika uppgifter.

I svenska reningsverk står elkostnaderna för cirka 12 % av de totala driftskostnaderna (Gunnarsson et al. 2008), vilket är t.ex. högre än siffrorna för Tyskland.² Här kan lokala variationerna vara mycket stora och det är inte ovanligt att elen står för 25 % av driftskostnaderna. En viktig faktor är pumpning av inkommande vatten.

I Sverige används totalt 630 GWh el i avloppsreningsverken, vilket ger i medeltal 2,5–3 kWh per kg BOD vilket motsvarar 90–100 kWh per ansluten person och år. Utöver detta används cirka 300 GWh som värme (motsvarande 43–48 kWh per person och år), som genererats från värmepumpar, olja och biogas. I Tyskland är motsvarande siffror cirka 45 kWh som el och 45 kWh som värme per person och år.

Varför dessa skillnader? Det finns flera förklaringar. Sverige har haft mycket lägre elpris än Tyskland, men också äldre utrustning, design för högre kapacitet än den som är aktuell och mindre avancerad styrutrustning. Svenska reningsverk är oftast mindre än de tyska och kräver t.ex. större uppvärmningskostnader. Vattnet i de svenska verken är kallare vilket påverkar energiförbrukningen. Dessutom är den geografiska spridningen större. De svenska verken ingår oftast i mindre organisationer, medan en tysk organisation (såsom t.ex. Ruhrverband) ofta har flera miljoner abonnenter. Detta betyder naturligtvis att man också har råd att hålla sig med kvalificerad personal och den kompetens som krävs för effektiv drift. Medan man i Tyskland vill sträva att minska 45 till 30 kWh per person och år kan en 20 % minskning vara realistisk i Sverige (Lingsten-Lundkvist 2008). Detta betyder att vi borde komma ned till åtminstone 70–80 kWh per person och år i Sverige. Många verk har en betydligt mer ambitiös målsättning.

Några lärdomar från en internationell utvärdering

För några år sedan medverkade författaren i en internationell undersökning för att jämföra styrning och reglering i olika reningsverk. Totalt deltog 36 reningsverk från 10 länder. En mer detaljerad redovisning av detta finns dels i doktorsavhandlingen Ingildsen (2002) och i en konferensartikel Ingildsen-Lant-Olsson (2001). Här redovisar vi de 29 som svarat mest detaljerat.

² Variationerna är stora. Enligt Lingsten-Lundkvist (2008) är medianvärdet för den totala elförbrukningen 144 kWh per ansluten person och år. Minimivärdet är 94 medan maximala värdet är 352 kWh per ansluten person och år.

Storleksfördelningen på verken visas i figur 2-1. Observera särskilt verken nummer 4, 9 och 10 som har väldigt stora biologiska volymer i förhållande till inkommande flöde.

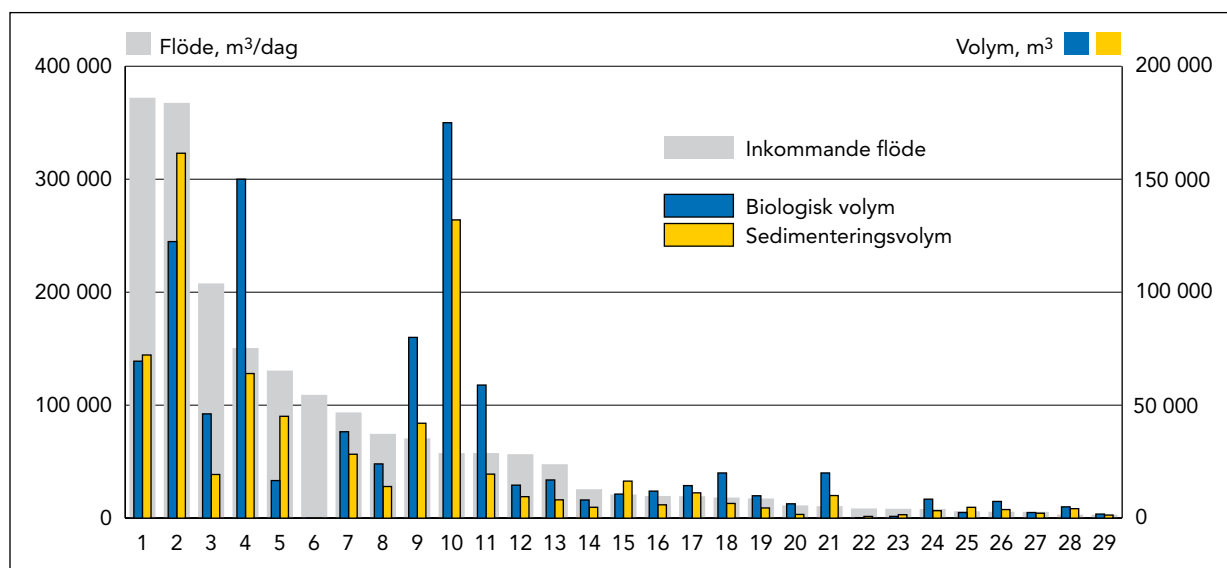
Eftersom verken har stora biologiska volymer är det troligt att relativt mycket energi behövs för luftningen. Man bör komma ihåg att inkommande flödet inte säger hela sanningen om belastningen, eftersom vi ännu ej diskuterat inkommande organiskt material eller ammoniumkväve.

De olika verken representerar många olika typer av design, t.ex. kvävereduktion med fördenitrifikation, batchprocesser (*sequential batch reactors*), kväveborttagning med simultan nitrifikation och denitrifikation samt med efterdenitrifikation. Reningsverken har en belastning allt från 0,33 till 7,9 gånger designbelastningen. I medeltal är de belastade med 1,1 gånger designbelastningen. De flesta är dock belastade nära sin nominella design och endast 2 anläggningar har en belastning större än dubbla designbelastningen.

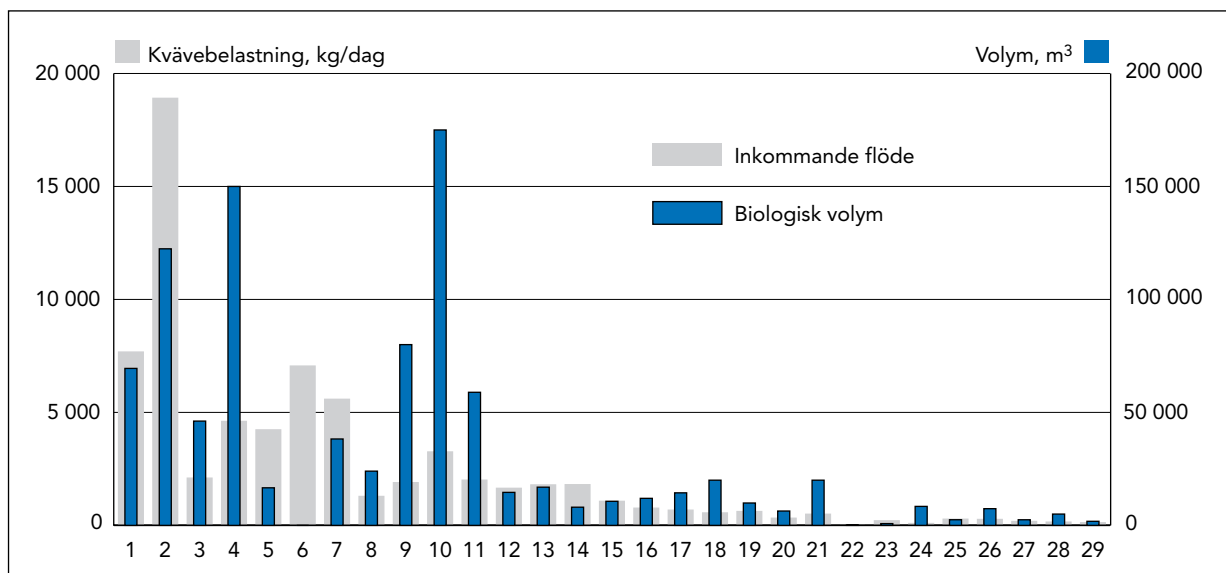
Kvävebelastningen borde vara relaterad till den biologiska volymen. Att så inte är fallet demonstreras av figur 2-2. Notera åter verken 4, 9 och 10 som har en biologisk volym som är betydligt större i förhållande till kvävebelastningen än vad övriga verk visar upp.

Vi kan också jämföra energikonsumtionen. I figur 2-3 visas energikonsumtionen i förhållande till flödet (kWh/m³) och dels i förhållande till kvävebelastningen (kWh/kg borttaget kväve). Notera återigen verken nummer 4, 9 och 10 som har en relativt sämre effektivitet än övriga verk. Verken 24, 25 och 28 är också väldigt energikrävande, men eftersom de är mycket små är jämförelsen med de stora verken inte så rättvisande.

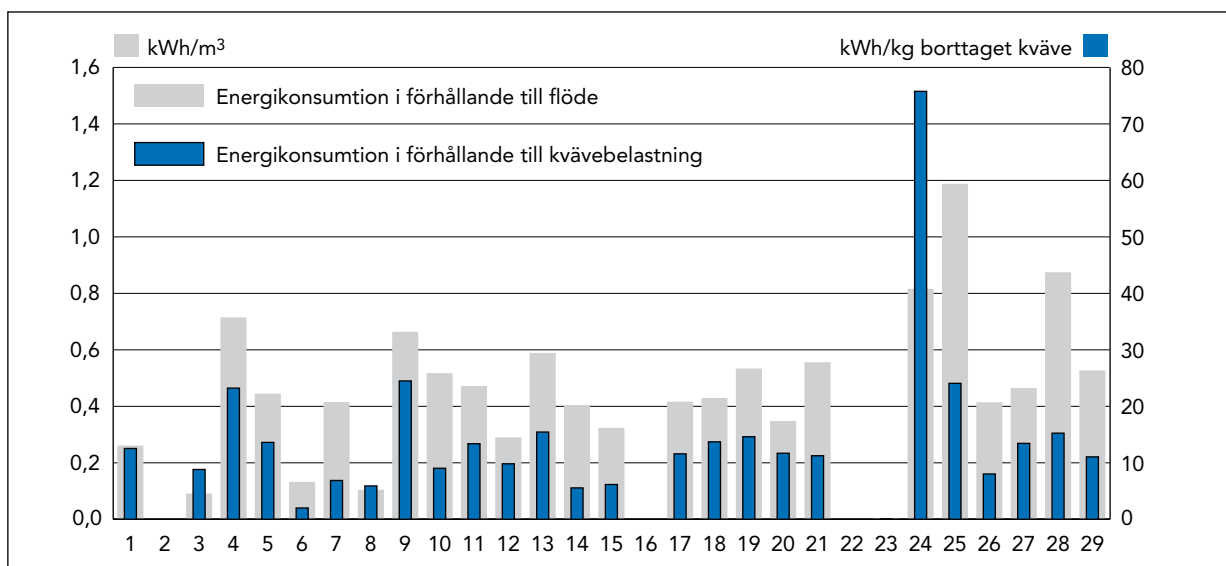
Den internationella jämförelsen motiverar att införa ett antal nyckeltal för verkens effektivitet.



Figur 2-1 Storleken på de 29 verken sorterad efter inkommande flöde (Ingildsen 2002).



Figur 2-2 Kvävebelastningen jämfört med volymen på biologiska reaktorerna (luftningsbassängerna) (Ingildsen 2002).



Figur 2-3 Energikonsumtionen i förhållande till flödet samt energikonsumtionen i förhållande till kvävebelastningen (Ingildsen 2002).

Viktiga nyckeltal för energianvändningen

Det är vanligt att idag försöka sammanfatta effektiviteten i processer och anläggningar med olika nyckeltal (ofta kallade KPI, *key performance indicators*). Det är attraktivt att hitta viktiga indikatorer, även om man alltid måste använda dem med en viss försiktighet. Exempelvis kan det vara mycket missvisande att jämföra pumpeffekten per m³ vatten på två olika verk om ledningsnät och höjdskillnader ser väldigt olika ut. På samma sätt kan det vara riskabelt att jämföra luftningsenergi mellan olika verk om utspädningsgraden är olika eller t.ex. kvävebelastningen skiljer sig mycket åt. Däremot är det viktigt att göra *interna* jämförelser, så att man kan följa nyckeltalens utveckling från år till år eller månad för månad i samma verk.

Nyckeltalen påverkas förstås av reningskraven. Skillnaden mellan kraven i Sverige och Danmark kan vara intressant. I Sverige har vi ju fasta utsläppsgränser för organiskt material, kväve och fosfor, medan man i Danmark betalar en avgift för varje kg som släpps ut från verket. Detta ger anledning till andra typer av optimering.

Man borde ha en *separat* redovisning av elförbrukningen i de stora utrustningarna inom verket. Exempelvis är det viktigt att kunna skilja på energi för pumpning av inkommande vatten och energi för luftning. Ju mer detaljerad energiredovisningen som görs, desto bättre kan man skapa en förståelse för vad som kan göras liksom att ge uppmuntran över vad som redan gjorts. Några relevanta nyckeltal sammanfattar vi i tabellen nedan.

En mer detaljerad energianalys måste naturligtvis göras för att få god kvalitet på nyckeltalen. Exempel på parametrar i en sådan analys återfinns i Kjellén-Andersson (2002).

Tabell 2-1 Nyckeltal

Energi per m³ vatten (kWh): • Totalt • Pumpning inkommande vatten • Luftning • Omrörning • Etc. Kommentar 1: Dessa nyckeltal används ofta men att jämföra energi per vattenmängd är vanligen ett irrelevant mått. Skälen är flera. Luftningen beror av mängden organiskt material och mängden ammoniumkväve. Ett verk som har ett stort inläckage i sitt ledningsnät kan få bättre nyckeltal. Man bör alltså vara skeptisk till detta nyckeltal Kommentar 2: Energikostnaden påverkas av mängden recirkulationer i verket. Alla har inte med reningen att göra.	Värmeproduktion: • Uttag av värmeinhåll i utgående vatten (GWh/år) • Producerad volym biogas (Nm³/år eller MWh/år) • Intern värmeproduktion ur biogas (MWh/år) • Försäljning av biogas (MWh/år) • Produktion av el ur biogas (MWh/år) • Inköp av värmeenergi (olja, fjärrvärme, etc.) (MWh/år)
Reningsresultat per kWh: • Kg borttaget ammoniumkväve per kWh • Kg borttaget COD per kWh • Kg borttaget BOD per kWh • Kg borttaget ammoniumkväve som funktion av koncentrationen utgående ammoniumkväve • Etc.	Förbrukning av kemikalier: • Fällningskemikalier (g dosering per g borttaget P) • Externa kolkällor (g dosering per g borttaget totalkväve eller g borttaget nitrat)

3 Reningsverkets energibalans

I ett reningsverk används el för så gott som varje processavsnitt. Här kan vi av utrymmesskäl inte diskutera varje elförbrukare, utan koncentrerar oss på de stora och viktiga för att sedan få ett perspektiv på möjliga besparingar. Vi belyser också möjligheterna att producera energi inom verket.

De viktiga energiförbrukarna

Pumpningen av inkommande vatten är en betydande energianvändare. En viss volym vatten skall ju lyftas en given nivå, så frågan är på vilket sätt man kan spara. Svaret ligger i att man skall sträva efter att *pumpa med maximal verkningsgrad*, alltså att utnyttja pumparna på bästa möjliga sätt. De geografiska och topografiska förhållandena runt reningsverket har självklart en stor betydelse för energiåtgången. Ett verk beläget i ett område med stora höjdskillnader kan kanske utnyttja gravitationen för avloppsnäten mer än ett verk i ett slättlandsområde. Det är inga enkla samband mellan topografin och pumpenergi utan detta måste man analysera noggrant. Dessutom har ett tätare ledningsnät som reducerar vattenmängden en stor betydelse för energieffektiviteten i hela kedjan. Pumpning diskuteras mer i avsnitt 4.

Förutom pumpningen av inkommande vatten utgör *luftningsbassänger* eller *biobäddar* de största energianvändarna i reningsverket och svarar normalt för 50–80 % av den totala elenergikonsumtionen. Luftning av organiskt material och ammoniumkväve kräver stora mängder energi. Vi diskuterar luftning och syrerreglering i avsnitt 4 och 6.

Försedimenteringen kan påverka energiåtgången eftersom den påverkar den mängd slam som skickas vidare till luftningen och därmed påverkas behovet av energi för luftningen. Det slam som pumpas från försedimenteringen kan också påverka mängden biogas som genereras.

I *slambehandlingen* kan olika behandlingssätt betyda väldigt stor skillnad i energibalans. Man använder mycket elektrisk energi för att pumpa, blanda, avvattna och förtjocka slammet. Transport av slam är en stor utgiftspost. Oxidationsprocessen i en aerob slambehandling kräver betydligt mer energi än anaerob rötning. Den anaeroba rötningen kan ju producera biogas som är en direkt energivinst. En hög TS-halt vid rötning leder till mindre förbrukning av uppvärmningsenergi, och ökar samtidigt rötningsanläggningens kapacitet. Det betyder att man har möjlighet att röta mer organiskt material. Alternativt kan man klara sitt rötningsbehov med mindre antal rötkammare.

Dosering av *kemikalier* för fosforfällning eller av kolkällor för denitrifikation innebär en stor energibelastning, inte som elektrisk energi i verket, men som energi för framställning och transport. Mer om detta i avsnitt 6.6.

Ett reningsverk innehåller ju också andra verksamheter, t.ex. filter-salar, laboratorier, verkstäder, materialförråd, kontor, vilket ju också kräver energi för uppvärmning, ventilation och belysning.

Energigenerering inom verket – biogas och värmeinnehåll

Den potentiella energiproduktionen inom reningsverk är stor. Det är väsentligen två källor som kan utnyttjas, *biogas* och *värmeinnehållet* i utgående vatten.

Biogas

Många reningsverk använder idag sin egen biogas för att värma upp både lokaliteter och rötkammare. Dessutom kan biogasen användas för att generera el. Cirka 80 GWh el producerades i verken 2005 vilket är cirka 13 % av verkens elförbrukning.³ Gasmotordrivna kompressorer kan vara direkta ersättare för elektriskt drivna kompressorer. I Sverige används biogas för att generera fjärrvärme, men biogas för drivmedel i fordon ökar i användning allt eftersom energi- och bensinpriset ökar.

Biogas består till största delen av kolvätet metan. Biogas kan produceras från en mängd olika organiska föreningar förutom slam från reningsverket: matavfall, gödsel, slakteriavfall, avfall från livsmedelsindustrin och växtrester. Energin i *biogasens metan* kan utvinnas och transformeras till både värme och elektricitet och kan täcka stora delar av verkets energibehov. En grundförutsättning för att få en god produktion av biogas är naturligtvis att belastningen av organiskt material till verket är tillräckligt stor och dessutom tillräckligt jämnt fördelat i tiden.

Biogas är en miljövändig energikälla. Vi kan utnyttja råmaterial som annars bara skulle vara avfall, t.ex. organiska ämnen i form av matavfall. Utvinnet man biogas ur gödsel minskar man dessutom utsläppen av metan från gödsel, vilket annars bidrar till växthuseffekten. Det konkurrerar inte med andra energibehov i samhället på det sätt som etanol gör. Som drivmedel ger biogasen väldigt små utsläpp, mindre än både etanol och biodiesel (Mattiasson 2008).

Intresset för biogas ökar mycket snabbt (Ny Teknik 2008). I takt med ökande energipriser planerar man för nya anläggningar som skall producera bränsle till bilar, bussar och lastbilar. Under 2007 producerades biogas i Sverige med ett energiinnehåll av 1,3 TWh. Av detta används 0,3–0,4 TWh som bränsle i fordon.⁴ Enligt Svenska Gas- och Biogasföreningen kommer den siffran att fördubblas de närmaste fem åren.

Idag produceras biogas vid totalt 227 anläggningar i Sverige. Produktionen sker främst vid kommunala reningsverk, deponier och samrötningsanläggningar. Allt fler privata företag dyker upp i branschen.

Det stora hindret idag för en mer utbredd användning av biogas är bl.a. kraven på en infrastruktur för distributionen. Processtekniken för uppgradering av biogasen är under utveckling och fortfarande dyr. Det pågår också en utveckling att framställa flytande biogas. I flytande form blir bränslet renare och enklare att transportera till tankställena.

Vi diskuterar mer om biogas i avsnitt 7.

³ Som ett kuriosum kan nämnas att Skatteverket under 2008 börjat visat stort intresse för elproducerande verk för att få in produktionsskatt på el.

⁴ Totalt använder vägtransporterna i Sverige drygt 80 TWh energi.

Värmepumpar

Värmeinnehållet i utgående vattnet är en stor energikälla. Den värme som kan produceras är större än behovet av värme internt i verket. För att utnyttja denna energikälla förutsätts förstås att någon kan använda den. Med värmeväxlare och värmepumpar kan omgivande bebyggelse och fjärrvärmenät förses med betydande värmebidrag. En värmepump kan också producera kyla till ett fjärrkylnät.

En värmepump kräver ett tillskott av elenergi för driften. Det betyder t.ex. att en värmepump med en *värmefaktor* (även kallad COP, Coefficient Of Performance) på 4 innebär att för varje kWh el som tillförs kommer värmepumpen att leverera 4 kWh värme.

Värmepumpar i större tillämpningar utnyttjar en kompressorprincip. Värmepumpen är uppbyggd av fyra huvudkomponenter: förångare, kompressor, kondensor och strypanordning. Ett köldmedium går från ett högt tryck till ett mycket lägre genom en strypventil eller förträngning. Det lägre trycket medför en markant lägre temperatur. Köldmediet passerar sedan förångaren, där det förångas av värme från omgivningen. Ångan passerar sedan kompressorn där den åter komprimeras och skickas vidare till kondensorn, där den kondenseras till vätska. Därmed frigörs värme som måste bortföras. Det är den värmen som man använder hos värmepumpar. Köldmediet leds från kondensorn till förångaren i ett kontrollerat flöde så tryckdifferensen upprätthålls med hjälp av en strypventil, från vilken den kalla vätskan åter skickas till förångaren.

Värmefaktorn är helt beroende av *temperaturskillnaden* mellan det man tar värmen ifrån (i detta fall utgående vatten) och det man avger värmen med. Med liten temperaturskillnad får man hög värmefaktor och med stor temperaturskillnad får man låg värmefaktor.

Avloppsvattnet med en temperatur på typiskt 9–18° överför sin värme till värmepumparnas system. Med hjälp av köldmedia och kompressor höjs processens temperatur till 60–70° innan värmen överförs till ett fjärrvärmesystem. Temperaturen i avloppsvattnet sänks i samma process med 2–10° och kan ledas till en kylväxlare där kylan kan överföras till ett fjärrkylsystem.

Utnyttjandet av värmeinnehållet i utgående vatten är föremål för en driftsoptimering med hänsyn till behov och temperatur. Denna planering görs ofta av energibolaget och därmed har reningsverket inte har så stort inflytande. I flera städer har man byggt stora avfallsförbränningsanläggningar som tillgodoser ett stort värmebehov. Eftersom elkraften till värmepumpen kostar allt mer så kan värmepumparna få större problem att konkurrera med andra värmekällor.

Olika former av energi – exergi

Det är viktigt att notera att olika energislag har olika nyttovärden. Detta brukar man benämna exergi, den "nyttiga" energin. Elenergi är en mycket högkvalitativ energiform eftersom elen kan omvandlas till andra energiformer, t.ex. mekanisk energi (i en motor) eller till värme. Däremot kan värmeenergi inte utan vidare omvandlas till elenergi.

Värmen i utgående vatten kan inte omvandlas till elenergi men kan utnyttjas till annan värmeenergi. Å andra sidan kan värme i form av högtrycksånga omvandlas till elenergi.

Vi ser alltså att 1 kWh el är betydligt mer värdefullt än 1 kWh värme i form av varmvatten.

4 De ekonomiska incitamenten

Varje energieffektivisering måste ses i ljuset av två viktiga faktorer

- Kommer processen att påverkas?
- Vad kostar investeringen i bättre effektivitet?

För varje driftsansvarig är *kvaliteten på utgående vatten* och myndigheternas krav helt avgörande och energikonsumtionen en sekundär fråga. Detta betyder att man för varje effektivisering också måste bedöma hur processen kommer att påverkas. Vi skall se att i många fall är påverkan positiv genom bättre effektivisering, medan man i andra fall minskar på marginalerna.

Är effektiviseringen lönsam? För att utreda det måste man dels beräkna förväntade kostnadsminskningar för energin, men också den investering som kan krävas.

Det är en ganska säker prognos att kostnaden för energi kommer att öka successivt. Priserna för el, fossila bränslen och värme är kopplade till varandra. Man kan få en uppfattning om prisutvecklingen genom att studera energibolagens egna prognoser eller genom priserna på längre kontrakt. En källa för sådana studier är <http://www.nordpool.com/asa/>.⁵ Ett ökat energipris innebär också att försäljning av biogas blir alltmer intressant.

Det finns flera osäkerhetsfaktorer som man måste hantera. Om biogas används för att producera elkraft så blir ju reningsverket en elenergiproducent och påverkas därmed av speciella skatteregler. Om biogas används till uppvärmning blir kostnads- och intäktsbilden en annan än om biogasen används som fordonsbränsle. Å andra sidan måste då gasen renas ytterligare för att bli drivmedel.

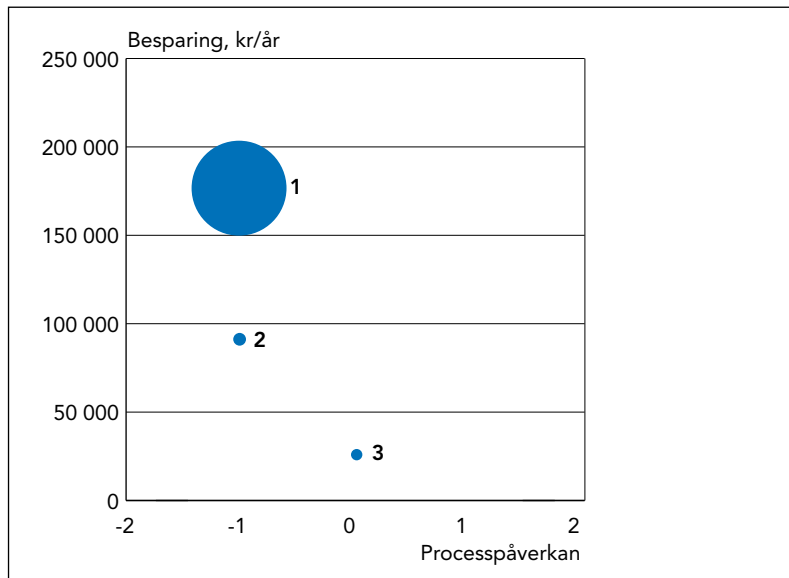
Den infrastruktur som finns runt verket påverkar kraftigt lönsamhetskalkylen. Används värmepumpar för att utnyttja värmeinnehållet i utgående vatten måste naturligtvis finnas avsättning för värmeenergi, t.ex. i ett fjärrvärmenät. Efterfrågan på värme har också kraftigt förändrats i de kommuner som satsat stort på stora sopförbränningsanläggningar. En ytterligare svårighet för värmepumparna är att de använder elenergi, som tenderar att bli allt dyrare.

I följande kapitel kommer vi att diskutera två möjligheter för energieffektivisering. Den ena är *påverkan av utrustningen*. Exempelvis kan mer effektiva pumpar innebära en stor minskning i energikostnaderna. Å andra sidan, om en äldre pump skall bytas ut så måste ju investeringen kunna motiveras genom lägre driftskostnader. Den andra möjligheten är effektivisering genom bättre styrning. Syrereglering är ett viktigt exempel. Regleringen kräver också investeringar i form av instrumentering, ställdon (ventiler, variabel varvtalsstyrning för motorer, styrmöjligheter för kompressorer etc.) liksom styrsystem. Dessa

⁵ Nord Pool är en elbörs där köpare (el distributorer) och säljare (elproducenter) från hela Norden möts och förhandlar för att bestämma elpris för kommande dag eller för en längre period. Via Nordpool kan man också följa prisutvecklingen för el i hela Norden under flera år bakåt.

kostnader måste då vägas mot vinsten i *energiförbrukning*, men också mot vinsten i *processkvalitet*.

Varje enskilt verk kräver sin speciella lönsamhetskalkyl. Ett sätt att illustrera påverkan av effektiviseringen har utarbetats av Ryaverket i Göteborg och visas i figur 4-1. Figuren kan ge en snabb och kondenserad jämförelse mellan olika åtgärder för energibesparing.



Figur 4-1 Illustration av lönsamheten för tre olika tänkta energieffektiviseringar. Investeringens storlek speglas i storleken på cirkeln. (bilden från Ryaverket, Göteborg)

5 Energieffektiviteten – påverkan av utrustningen

För att kunna minimera energianvändningen måste man naturligtvis ha lämplig utrustning. De helt dominerande komponenterna för elanvändning är *pumpar*, *motorer* och *kompressorer*. Intuitivt är det självklart att man skall pumpa vatten eller komprimera luft i förhållande till behovet. Vi vet att behovet, som styrs av belastningen på verket, varierar kraftigt timme för timme. Därmed borde utrustningen kunna anpassas efter den variabla belastningen.

Många reningsverk har dimensionerats för framtida expansion av belastningen, kanske 20–30 år framåt. Samtidigt har inte maskinell utrustning samma långa livslängd, så det är väldigt angeläget att motorer, pumpar och andra maskiner är dimensionerade för den verkliga belastningen och inte av den framtida förväntade belastningen. Att använda utrustning med en så bra verkningsgrad som möjligt är avgörande för god energiekonomi.

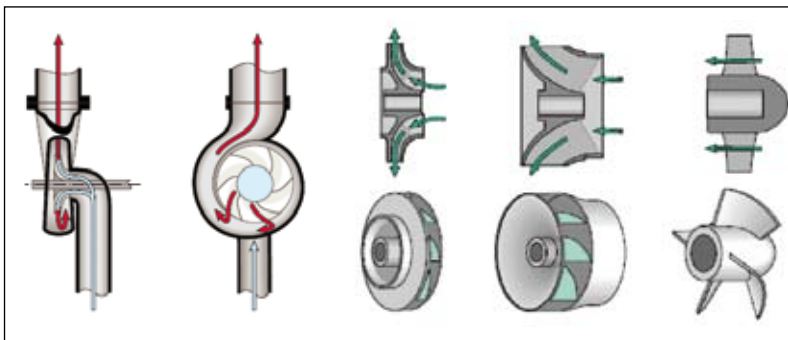
5.1 Pumpar

Pumpar i vattenverk, vattendistribution eller i reningsverk använder stora mängder energi och skillnaderna mellan olika pumpar kan vara mycket stor. Det är därför väldigt viktigt att jämföra effektivitet och verkningsgrad på olika pump typer innan man gör en installation.

Det finns i princip två huvudtyper av pumpar, med *tvingat flöde* och med *icke tvingat flöde*. I en pump med tvingat flöde pumpas alltid lika mycket vatten för varje pumpslag eller varv, oberoende av hur stor mottrycket är. Sådana pumpar kallas *förträngningspumpar*. *Kolvumpar* är exempel på sådana. Det går inte att stänga av flödet då en sådan pump är igång, eftersom pumpen då skulle sprängas av trycket. Det finns många typer av förträngningspumpar, både oscillerande och roterande. I ett reningsverk finns t.ex. excenterskruvpumpar för slamhanteringen (slam från försedimenteringen, överskottsslam, returslam och slamavvattning), dränkbara pumpar (returslam) och virvelhjulpumpar (slamcirkulation vid rötkammaren och provtagning)

I en pump med icke tvingat flöde beror flödet på hur högt vattnet måste lyftas innan det når pumpen (den statiska sughöjden) och hur stort mottrycket är (den dynamiska tryckhöjden). Den dynamiska tryckhöjden utgör summan av den statiska tryckhöjden (nivåskillnaden mellan utloppet och själva pumpen) och förlusterna i ledningen. I en pump med icke tvingat flöde kan man alltså variera flödet, och en sådan pump kallas för *turbopump*. En *centrifugalpump* är ett exempel på turbopumpar.

Centrifugalpumpen består i princip av ett pumphus med ett löphjul (pumphjul) enligt figur 5-1. Löphjulet drivs via en drivaxel av en motor. Löphjulet sätter vattnet i rörelse och pressar det utåt och in i tryckledningen. I och med att vattnet pressas utåt bildas ett undertryck i mitten



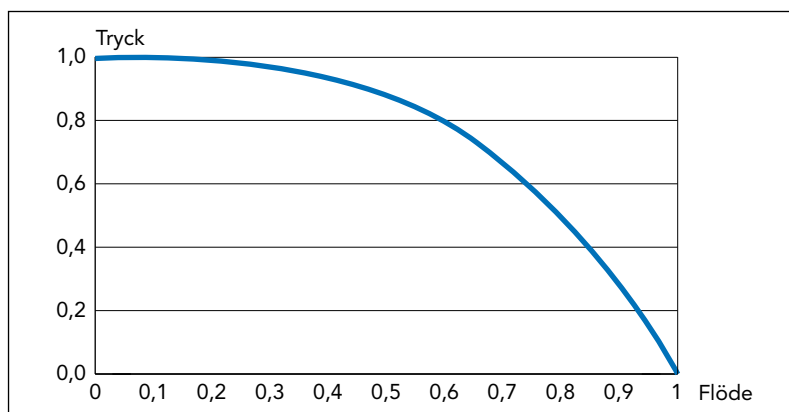
Figur 5-1 Principen för en centrifugalpump med pumphus och löphjul (pumphjul). Till höger visas olika typer av ledskenor på pumphjulet (bild från Statens räddningsverk).

på löphjulet. Undertrycket utjämnas i stort sett omedelbart genom att atmosfärstrycket pressar in nytt vatten i pumpen. Utrymmet mellan löphjulet och pumphusets vägg blir långsamt större och omvandlar den hastighet som vattnet har när det lämnar pumphjulet till ett statiskt tryck. Genom att utformningen är gjord med s k diffusorverkan så kan detta göras i stort sett utan förluster. Löphjulet ger högst tryck om det är utformat som ett s k radialhjul. Detta innebär att vattnet kommer in vinkelrätt mot hjulet och lämnar det vinkelrätt mot axeln.

Varje löphjul arbetar parvis med en *ledskena*. I figur 5-1 visar tre ledskenetyper. Ledskenorna sitter runt om pumphjulet och styr vattnet som lämnar pumphjulet ut i diffusorn. En ledskena fungerar som en extra diffusor som minskar hastigheten och omvandlar den till ett statiskt tryck. Genom ledskenorna kan friktionen i diffusorn minskas och man vinner en större uppfodringshöjd. Verkningsgraden kan förändras beroende på ledskenans utformning. Man kan också höja pumpens verkningsgrad genom att bygga samman två eller flera steg.

Pumpkurvor och arbetspunkt

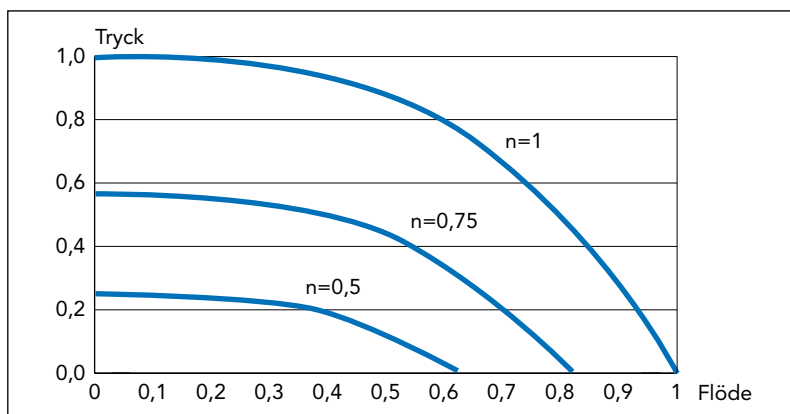
En pump karakteriseras av sin pumpkurva (figur 5-2), som visar förhållandet mellan pumptrycket och flödet. Som figuren visar så sjunker trycket (eller uppfodringshöjden H) med ökande flöde (Q). *Alltså*, ju större flöde man försöker pumpa, desto lägre uppfodringshöjder klarar pumpen av.



Figur 5-2
Exempel på pumpkurva.

Figur 5-3

Pumpkurvor för olika varvtal. Ett högre varvtal (n) producerar ett högre tryck vid samma flöde.



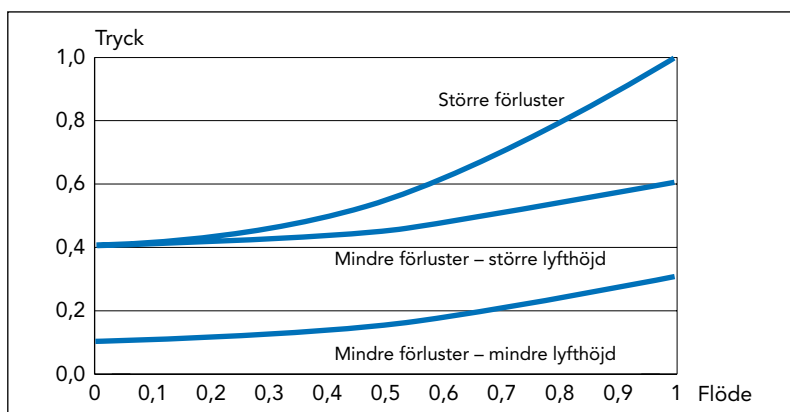
Ändras varvtalet på pumpen så ändras också pumpkurvan, figur 5-3. Sänker man varvtalet på pumpen innebär det alltså att vid ett visst tryck (eller en viss uppföringshöjd) producerar pumpen ett lägre flöde. Om en pump är tänkt att arbeta bara vid ett visst flöde och tryck har det ingen större betydelse vilken lutning kurvan har. Däremot är den vanliga situationen i ett reningsverk att flödet behöver varieras och därför måste man beakta sambandet mellan flöde, tryck och verk-ningsgrad. I en pump med flack karakteristik kommer trycket att vara relativt oberoende av flödet.

Arbetspunkten för en pump bestäms av både pumpens *QH-kurva* och av lastens karakteristik. Pumpen skall i princip skapa ett tryck som driver vätskeflödet genom ett rör. Detta tryck består av två delar. Den första motsvarar helt enkelt lyfthöjden (den geodetiska höjden) och är ett statiskt tryck, d.v.s. det tryck man måste övervinna innan pum-pen kan åstadkomma något flöde alls. Den andra termen motsvarar friktionsförlusterna i pump och rör. Dessa förluster är proportionella mot vätskans hastighet v i kvadrat (vi kommer att diskutera rörförluster i nästa avsnitt). Dessa två termer tillsammans bildar den s.k. *mano-metriska* tryckhöjden. Tryckkurvan (eller systemkurvan) får alltså ett utseende som i figur 5-4. Till vänster startar kurvan i den punkt som motsvarar lyfthöjden. Mindre lyfthöjd innebär att kurvan startar i en lägre punkt (i detta exempel vid trycket 0,1) och högre lyfthöjd i en högre punkt (i exemplet 0,4).

Precis som för andra rör så beror friktionsförlusterna på t.ex. ytråhet, lokala förluster och längd av röret. Vi beskriver mer om detta i avsnit-

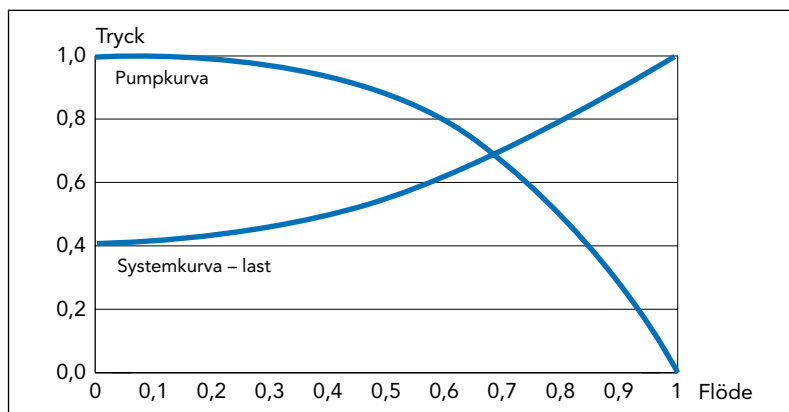
Figur 5-4

Beskrivning av olika systemkurvor som representerar pumplasten. Vid flödet noll skall statiska trycket övervinnas, vilket är beroende av lyfthöjden. När pumpen övervunnit statiska trycket kan flöde öka, och då ökar också friktionsförlusterna ungefär som kvadraten på flödet.



tet om rörledningar. Om friktionsförlusterna är små är systemkurvan ganska flack och man talar om s.k. *lyftsystem*. Om däremot friktionsförlusterna är stora blir ju systemkurvan brantare och man kallar sådana system för *förlustsystem*.

Pumpkurvan visar hur mycket tryck som pumpen *levererar* och systemkurvan (beskrivningen av lasten) hur mycket tryck som *krävs*. Skärningspunkten mellan dessa kurvor definierar arbetspunkten, figur 5-5. Anta nu att flödet minskar tillfälligt. Då kommer pumpens levererade tryck att vara större än det tryck som lasten kräver. Pumpen kan då accelerera vattenströmmen och därmed öka flödet. På samma sätt, om en störning gör att flödet blir för stort, så levererar pumpen mindre tryck än vad som krävs. Därmed minskar flödet och systemet återgår till arbetspunkten.



Figur 5-5

Arbetspunkten för en pump definieras av skärningspunkten mellan pumpkurvan och lastkurvan.

Den punkt där pumpen arbetar mest effektivt kallar man för konstruktionspunkten (*Best Efficiency Point*). Vid denna punkt är förlusterna som lägst och därmed verkningsgraden som högst.

I en centrifugalpump har ledskenans utformning en avgörande betydelse för hur pumpkurvan ser ut. Antalet steg i pumpen och stigningen på skovlarna bestämmer också karakteristiken. Det är bland annat utloppsvinkeln på pumphjulsskovlarna som bestämmer vilken lutning pumpkurvan får. En liten vinkel gör att kurvan blir flack medan en större vinkel ger en brantare kurva. En pump med flack pumpkurva har principiellt en lägre verkningsgrad. Centrifugalpumpar med större lutning har alltså en bättre verkningsgrad.

Om man vill minska flödet med hjälp av *strykning* så ökar man trycket i ledningen. Det leder till en brantare systemkurva, medan pumpkurvan är densamma. På så sätt skjuts arbetspunkten i figur 5-5 till vänster. Naturligtvis leder detta till stora effektförluster, men används fortfarande eftersom metoden är enkel att förverkliga. Med ökande energipriser blir dock priset för strypning allt mindre acceptabelt.

Pumpförluster

Man särskiljer på tre olika effekter för en pump. Den effekt som levereras av den elektriska motorn är den *inkommande* effekten, P_{in} . Den effekt som överförs till pumpens axel kallas *axeffecten* (den mekaniska

effekten) P_{axel} och är lite lägre än den inkommande effekt, vilket betyder att vi har vissa, om än små, motorförluster. En elmotors *märkeffekt* är den mekaniska effekten vid märkdriftpunkten. Märkeffekten är alltså *inte* detsamma som den förbrukade effekten.

Den *mekaniska* effekten P_{axel} överförs sedan till den *nyttiga* effekten P_{hydr} som alltså är den hydrauliska effekt som pumphjulet överför till vattnet. Denna effekt kan uttryckas som

$$P_{\text{hydr}} = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g$$

där

Q = flödet

H = uppföringshöjden

ρ = tätheten

g = tyngdaccelerationen

Nyttiga effekten är alltså proportionell mot flödet, vilket betyder att en dubbling av flödet kräver ungefär en dubbling av den nödvändiga nyttiga pumpeffekten. Den effektförlust som äger rum på vägen från axeln till vattnet, $P_{\text{hydr}} - P_{\text{axel}}$, beskriver alltså pumpförlusterna.

Den totala verkningsgraden för pumpen definierar man som

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{hydr}}}{P_{\text{in}}}$$

Varje pump kan karakteriseras också av sambandet mellan flöde och verkningsgrad. Denna visar alltså vid vilket flöde som pumpen har bästa effektivitet.

Samband mellan flöde och effekt

För att förstå sambanden mellan flöde, varvtal och effektbehov för en pump så skall vi kort beskriva de s.k. affinitetslagarna. Sambandet mellan flöde och varvtal är linjärt, vilket betyder att flödet Q är proportionellt mot varvtalet n , d.v.s.

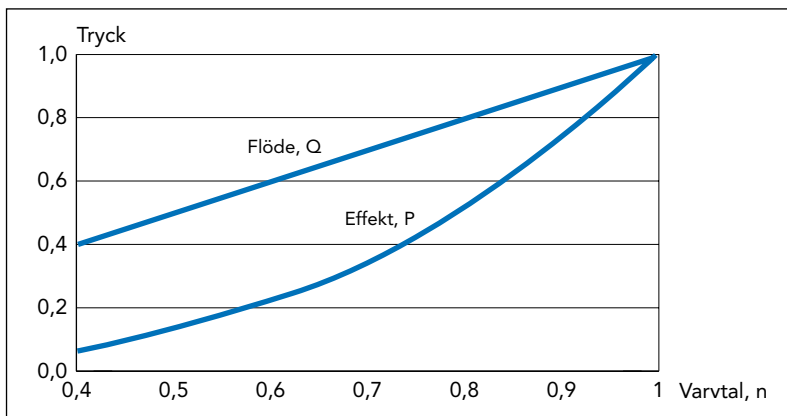
$$Q = \alpha \cdot n$$

där α är en konstant. Det betyder alltså att om man halverar varvtalet så halveras flödet, vilket illustreras av den övre kurvan i figur 5-6. Sambandet mellan effektbehovet P och varvtalet är betydligt mer känsligt:

$$P = \beta \cdot n^3$$

där β är en konstant (undre kurvan i figur 5-6). Varieras varvtalet kommer alltså effekten att ändras kraftigt. Halverar man varvtalet kommer flödet, som tidigare påpekats att halveras, medan effekten går ned till $1/8$. Just detta konstaterande visar att varvtalsreglering är av avgörande betydelse för energiåtgången.

Låt oss nu se vilken energi (kWh) som skulle gå åt för att pumpa en viss volym vatten. Vi väljer då att pumpa med fullt varvtal ($n = 1$) eller med olika reducerade varvtal, vilket illustreras av figur 5-7. Den statiska höjden är noll, vilket betyder att exemplet beskriver cirkulationspumpning.

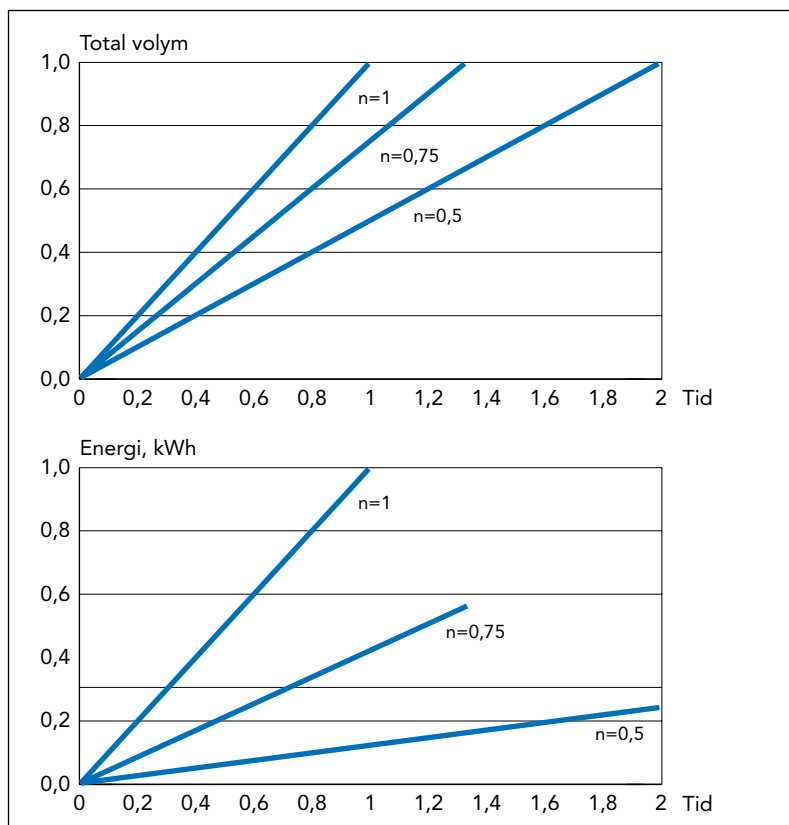


Figur 5-6

Samband mellan flöde och varvtal (övre kurvan) och effekt och varvtal (undre kurvan) enligt affinitetslagarna.

Den övre kurvan i figur 5-7 visar hur mycket volym som har pumpats. Lutningen på kurvan motsvarar flödet (t.ex. liter/s), d.v.s. ju större lutning desto större flöde. Med fullt varvtal ($n = 1$) har man pumpat färdigt en viss volym vid tiden $t = 1$. Med halvt varvtal, t.ex. $n = 0.5$, minskar flödet till hälften (lutningen av kurvan är hälften så stor) och det tar alltså den dubbla tiden för att pumpa samma volym. Den undre kurvan i figur 5-7 visar hur energin förbrukas. Lutningen i den undre kurvan motsvarar effekten. För full effekt är lutningen 8 gånger större än för halv effekt. Vid halva varvtalet används alltså endast $1/8$ av effekten, men å andra sidan måste man hålla på dubbelt så lång tid för att pumpa samma volym. Därför har 4 gånger mindre energi förbrukats vid halv effekt.

I praktiken är siffrorna ungefärliga, men visar ändå vilket stor potential som varvtalsregleringen ger för energibesparingen.



Figur 5-7

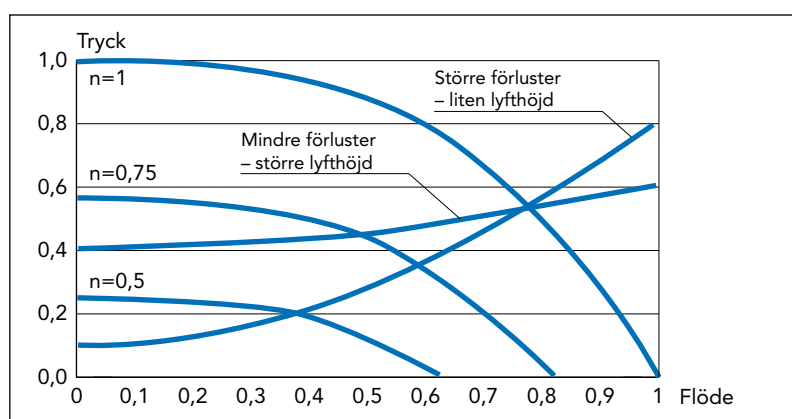
Pumpning av en given mängd vatten vid olika varvtal på pumpen. Övre kurvan visar att hela volymen (=1 volymsenhet) kan pumpas på 1 tidsenhet vid fullt varvtal ($n=1$) medan det krävs 2 tidsenheter vid halvt varvtal ($n=0.5$). Den undre kurvan visar att vi förbrukat 1 energienhet (t.ex. 1 kWh) på tiden 1 vid fullt varvtal. Med halva varvtalet ($n=0.5$) tar det dubbla tiden för att pumpa samma volym medan energin som krävs för att pumpa samma volym är bara en fjärdedel.

Det finns andra möjligheter att spara pumpenergi genom bättre styrning. I ett examensarbete vid KTH och Käppalaverket har Magnusson (2006) visat att man kan spara energi genom att ändra styrningen av inloppspumpningen. Två pumpar arbetar normalt parallellt för att pumpa inkommande flöde. Anta t.ex. att de har kapaciteten $1 \text{ m}^3/\text{s}$ vardera och mer än $1 \text{ m}^3/\text{s}$ skall pumpas. Tidigare strategi gick ut på att den ena pumpen körde på max flöde, medan den andra pumpade resterande flöde. Exempelvis kunde flödet $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ delas upp i $1 + 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ på två pumpar. Den nya strategin innebär att pumparna arbetar ungefär lika mycket, d.v.s. i exemplet $0,65 + 0,65 \text{ m}^3/\text{s}$. På så sätt undviker man längre att pumparna arbetar vid för låg verkningsgrad. Om däremot inkommande flöde går under $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ bör den ena pumpen stängas av. Man kan dessutom åstadkomma energiförbättringar genom att investera i mindre pumpar om små flöden förekommer ofta.

Varvtalsreglering av pumpar

Hur skall man då välja pump? Det finns två grundläggande saker man skall beakta: pumpens *verkningsgrad* vid normalflöde samt möjligheten att *varvtalsreglera* pumpen. Naturligtvis finns också andra viktiga aspekter, t.ex. underhåll och pris, men det är väsentligt att beräkna alternativa energikostnader under pumpens livslängd.

Betrakta nu fallet att vi har en varvtalsreglering, figur 5-8. Figuren visar en pump med tre olika hastigheter och två olika systemkurvor. Betrakta först systemkurvan med stora förluster men liten lyfthöjd. För ett given varvtal (t.ex. $n = 1$) får man då en bestämd arbetspunkt (tryck $\approx 0,5$ och flöde $\approx 0,8$). Minskas varvtalet på pumpen kommer arbetspunkten att förskjutas till skärningspunkten mellan den korrigerade pumpkurvan och systemkurvan. Vid stora förluster så blir flödesskillnaden inte så stor, eftersom systemkurvan har en stor lutning. Det betyder att man inte avviker så mycket från bästa verkningsgrad då man ändrar pumphastigheten.



Figur 5-8
Arbetspunkter vid olika varvtal. Pumpen har vid varje varvtal en arbetspunkt för användning i ett system med höga förluster och en annan arbetspunkt för ett system med lägre förluster.

Betrakta nu systemkurvan med små förluster (och större lyfthöjd). Den är betydligt flackare. Vid en ändring av pumphastigheten kommer därför flödet att ändras kraftigare än vid fallet större förluster. Vid halva varvtalet kan pumpen inte längre producera något flöde. Det är inte längre självklart att pumpen fortfarande arbetar med en bra verknings-

grad vid alla varvtal. Därför att det viktigt att inte okritiskt bara ta hänsyn till pumpenergin såsom vi gjort i figur 5-7. Det är väsentligt att lägga samman energivinsterna som man gör med *varvtalsregleringen* och förlusterna som man får genom att avvika för mycket från bästa *verkningsgrad*.

Det finns flera sätt att påverka verkningsgraden. Ofta nöjer man sig inte med en enda pump, både av säkerhetsskäl och av effektivitetsskäl. Förekommer låga flöden ofta kan det vara värdefullt att ha en speciell pump med bästa verkningsgrad vid låga flöden. En annan pump kan vara dimensionerad så att den har bästa verkningsgrad vid de vanligast förekommande flödena. För varje flöde kan man därmed konfigurera bästa val av pump. Om man kör flera pumpar parallellt så är det viktigt att man väljer rätt antal pumpar i förhållande till det totala flödet så att de hamnar i rätt arbetsområde, vilket vi påpekat i föregående avsnitt. Investeringskostnaderna kan alltså vara väldigt olika om man önskar förbättra verkningsgraden.

Ändring av uppfordringshöjd

Man kan i vissa fall påverka uppfordringshöjden (hur högt vattnet måste lyftas) för inloppspumparna. Genom att höja nivån i inkommande tunnelsystem kan man påverka den energi som behövs för pumpningen. Vid stora verk kan denna energibesparing vara betydande. En sådan åtgärd innebär ingen investeringskostnad men priset är en minskad buffertkapacitet i tunnelsystemet och kräver en pålitlig reglering av inloppspumparna. Vid ett stort verk, Ryaverket i Göteborg, innebär en höjning av medelnivån i tunneln med 2 dm en besparing på cirka 100 000 kWh/år. Det finns dock viktiga negativa konsekvenser. En är att buffertkapaciteten i norra tunnelsystemet minskas med 7 000 m³ (ca 7 % av den kapacitet som används idag). En annan är att mer vatten i tunneln samlas mer sediment i tunneln. Dessa sediment kommer förr eller senare att pumpas till verket och kan ofta då komma vid olämpliga tillfällen. (Lumley 2008, Gryaab AB 2007)

5.2 Rörledningar

Friktionsförluster i ledningar konsumerar en hel del energi. Detta gäller inte bara i reningsverk utan också i många processindustrier. Det finns ett fysikaliskt samband mellan tryckförlusterna i ledningen och ett antal parametrar, den s.k. Darcy-Weisbach's ekvation. Den beskriver att *tryckförlusten är proportionell mot ledningens längd, ytans råhet, diametern på ledningen samt vätskans hastighet*. Friktionslagen formuleras som:

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2g}$$

där h_f är tryckförlusten på grund av friktionen. Friktionsfaktorn f är ett mått på ytans råhet. Den påverkas också av kopplingar, ventiler, in- och utlopp, som alltså kan ge lokala energiförluster. Bara genom att göra mjuka i stället för skarpa rörböjar och koniska diameterförändringar

Varvtalsreglering och verkningsgrad

Ett enkelt exempel kan belysa att totala *verkningsgraden* måste beaktas i samband med varvtalsreglering. En varvtalsreglerad pump fungerade utmärkt men hade för hög kapacitet i förhållande till flödet. Den fick därför köras på endast 60% av sin kapacitet. Därmed blev också verkningsgraden lägre, cirka 65% för motor och pump tillsammans. En ny pump med rätt flödeskapacitet visade sig ha cirka 80% verkningsgrad vid det vanligaste flödet. Det var därför lönsamt att byta pump.

Det är alltså väsentligt att förstå att en dåligt dimensionerad pump inte kan kompenseras med varvtalsreglering.

Pumpar – sammanfattning av begrepp

Pumpkurvan (figur 5-2) visar förhållandet mellan pumptrycket (eller uppfordringshöjden) och flödet. Trycket sjunker med ökande flöde.

Arbetspunkten för pumpen bestäms av skärningspunkten mellan pumpkurvan och lastkurvan. Denna består av två delar, den statiska lyfthöjden och förlusterna på grund av friktion i ledningar och pump.

Varvtalsreglering är viktig med tanke på att effekten varierar som kuben av varvtalet. Vid halva varvtalet förbrukas alltså bara 1/8 av effekten. Det räcker dock inte med varvtalsreglering, utan man måste också se till att pumpens *verkningsgrad* är som störst vid det vanligast förekommande flödet.

i stället för abrupta sådana kan lokala förlusterna minskas kraftigt och mycket energi kan sparas. Tryckförlusten ökar proportionellt mot längden L på röret och minskar proportionellt mot diametern D . Det betyder alltså att tryckförlusterna dubblas antingen om rörlängden dubblas eller om diametern halveras. Vätskans hastighet är v medan g är tyngdaccelerationen. Faktorn $v^2/2g$ är ett mått på vätskans rörelseenergi och härleds ur den s.k. Bernoulli's ekvation, som säger att summan av alla tryck i ett rör är konstant. För varje hinder i vägen i form av kopplingar och krökar så måste alltså vätskan accelereras igen, och detta kräver energi. Att förlusterna beror av kvadraten på hastigheten v såg vi också i systemkurvorna för pumpar.

Beroendet av rördiametern

Friktionsförlusten är mycket känslig för diametern på röret. Det kan man förstå om man betraktar *kontinuitetsvillkoret*, som säger

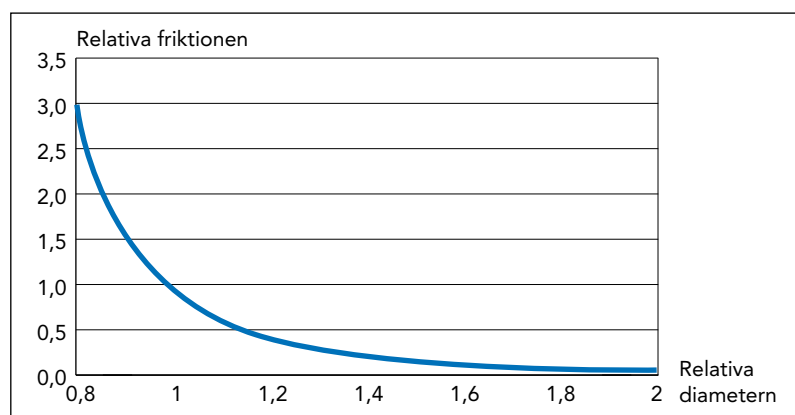
$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

där A är tvärsnittsarean och v hastigheten på flödet.⁶ En dubblad diameter betyder alltså fyra gånger större tvärsnittsarea och därmed fyra gånger lägre hastighet. Tryckförlusterna kommer att bli dramatiskt lägre vid en dubbling av rörets diameter. Eftersom hastigheten v minskar till bara en fjärdedel kommer faktorn v^2/D att bli endast 1/32 av tidigare värde. Det betyder att friktionsförlusterna går ned till endast 3% av tidigare värde, alltså en minskning med 97%, om rördiametern fördubblas.

Vi ser alltså att friktionsförlusterna beror kritiskt på diametern D . I själva verket minskar de med femte potensen av D , d.v.s. $1/D^5$. Detta illustreras i figur 5-9. Samtidigt skall man komma ihåg att överdimensionerade rör åstadkommer andra problem som kan öka kostnaderna.

Figur 5-9

Friktionsförlusterna som funktion av rördiametern. Diagrammet visar att en minskning av diametern från 1 till 0,8 ökar friktionsförlusten med 200 %. En ökning med 20 % från 1 till 1,2 innebär en minskning av förlusterna med 60 %.



Beroendet av rörkrökar

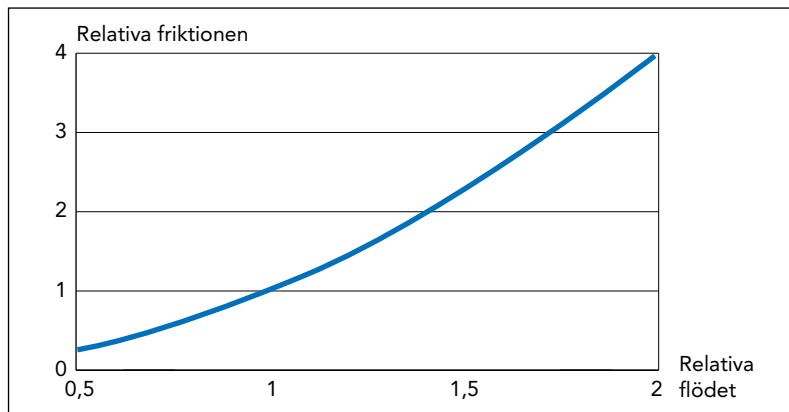
Samtliga komponenter i ett rörsystem medverkar till friktionsförluster, d.v.s. förlusterna adderas till varandra. Friktionsfaktorn f bestämmer

⁶ Sambandet är intuitivt enkelt och vi har vardagliga erfarenheter av detta. Kläm på en trädgårdsslang så ökar hastigheten på vattnet!

man experimentellt och kan därmed få jämförelsetal på hur ytan påverkar motståndet för olika material, den s.k. *sandråheten* ϵ (epsilon). Ett mindre ϵ betyder en jämnare yta. Typiska värden är $\epsilon = 0,25$ för gjutjärn, $\epsilon = 0,046$ för stål och $\epsilon = 0,0015$ för plast. Det betyder alltså att friktionen är cirka 30 gånger mindre i ett plaströr än i ett stålrör – om man bortser från alla lokala förluster. Samtidigt betyder det att de lokala förlusterna – från kopplingar och ventiler – blir en större del av de totala friktionsförlusterna i ett plaströr med liten friktion. Som figur 5-10 illustrerar betyder utformningen av rörböjar mycket för den totala friktionsförlusten i röret.

Beroendet av flödet

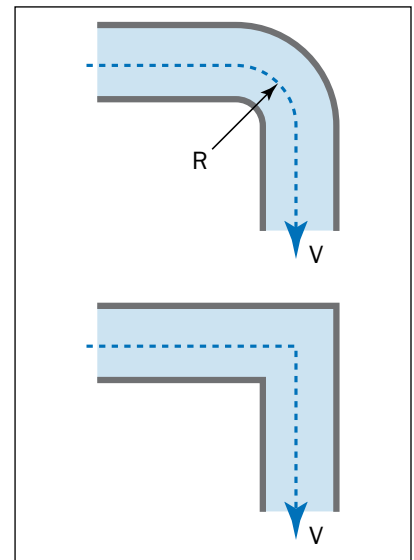
Utifrån Darcy-Weisbach's ekvation kan man också beräkna hur friktionen beror av flödet. Eftersom hastigheten v är direkt proportionell mot flödet betyder det att friktionen ökar som kvadraten på flödet. Som figur 5-11 visar så minskar friktionsförlusterna till en fjärdedel om man halverar flödet. Ökar man flödet med 50 % så kommer förlusterna att öka till 2,25, d.v.s. att mer än dubblas.



Ett exempel kan ges från pumpning av returslam. Vid höga flöden och små dimensioner på rören kan tryckförlusterna vara stora. I detta fall kan man alltså överväga två olika åtgärder. Den ena (dyrare) är att byta ut ledningarna och den andra att minska returslamflödet så att energiförlusterna minskar. Då måste man självklart också ha andra konsekvenser i åtanke, t.ex. hur returslamflödet påverkar luftningsbassängens kapacitet. Ett exempel från Gryaab AB (Ryaverket, Göteborg) visar att en sänkning av returslampumpningens medelflöde från 3,3 till 1,3 m³/s ger en besparing på 2,7 GWh/år, alltså en besparing på cirka 2 Mkr.

5.3 Luftning i aktivslamprocessen

Syrehalten i luftningsbassängen har en avgörande roll för biologin och därmed aktiviteten för de organismer som skall leva i en s.k. aerob miljö, d.v.s. där syre förekommer. I luftningsbassängerna fungerar



Figur 5-10

En skarp 90° rörböj har 3–10 gånger större förluster än ett rör med en mjukare böj. Ju större radien R är, desto mindre blir friktionsförlusterna.

Figur 5-11

Förhållandet mellan flöde och friktion i ett rör. Exempelvis, om friktionsförlusterna är 1 vid flödet 1 ökar de med en faktor 4 om flödet fördubblas.

Rörledningar – sammanfattning av begrepp

Friktionsförlusterna är starkt beroende av rördiametern. Att byta rör för att minska friktionen kan naturligtvis vara alldeles för kostsamt i förhållande till energivinsten. Däremot bör man noggrant beakta inverkan av diametern vid nyinvesteringar.

Rörkrökar skall vara mjuka!

Att flöde och rördiameter skall vara anpassade till varandra är väsentligt. Förlusterna är starkt beroende av flödet.



Figur 5-12

Luftningsbassäng med syremätare i olika positioner längs bassängen.

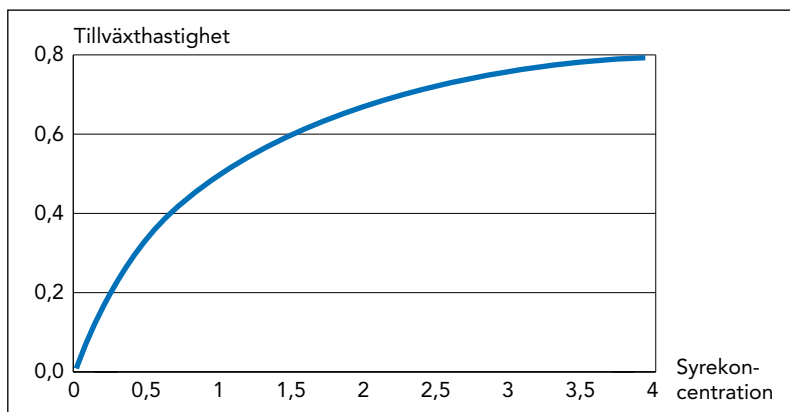
Figur 5-13

Samband mellan organismernas tillväxthastighet och koncentrationen av löst syre (mg/l) i en luftningsbassäng. Detta samband (ofta kallat en Monodkurva) har olika värden för olika organismer, men det principiella sambandet ser ungefär likadant ut.

mikroorganismerna som ett slags katalysator för organiska föreningar skall kunna oxideras till mindre molekyler. Där kväveborttagning förekommer skall andra organismer se till att ammoniumkväve oxideras till nitrit och nitrat.

Figur 5-13 visar hur organismernas tillväxt beror på koncentrationen löst syre i vattnet – ju mer syre desto större tillväxthastighet.

I figuren ser vi att i början är lutningen stor vilket betyder att tillväxthastigheten (och därmed oxidationshastigheten för substraten i vattnet) ökar ganska mycket för en liten förändring av syrehalten. Vid högre syrehalter kommer inte längre oxidationshastigheten att förändras så kraftigt för en ändring i syrehalten.



Hur mycket syre som behövs är alltså en balansgång mellan det rent biologiska behovet och kostnaden för luftning, d.v.s. energikostnaden. För lite syre betyder för dålig tillväxt av organismerna, vilket begränsar kapaciteten på verket. För mycket syre å andra sidan kostar för mycket energi och ger inte nödvändigtvis så mycket större kapacitet. Ett bra luftarsystem skall alltså balansera mellan energikravet och det biologiska kravet.

Ett luftarsystem har som uppgift att blåsa in "lagom" stora luftbubblor i luftningsbassängen. Det gasformiga syret i luftbubblorna skall sedan övergå i löst syre. I kontaktytan mellan luftbubblorna och vattnet sker en diffusion av syre från bubblan till vattnet pga en koncentrationsgradient. Ju större kontaktytan är desto mer syre kan överföras från gasformig till löst form. Små luftbubblor är därför effektivare än stora, eftersom ytan relativt volymen är större för små bubblor. Hastigheten för syreöverföringen begränsar hur fort man kan ändra syrehalten i luftningsbassängen och är en process som kan ta mellan 10 och 30 minuter i ett vanligt luftarsystem.

I de flesta svenska reningsverk har man idag finblåsiga system, men fortfarande förekommer grovblåsiga luftarsystem. Dessa är därmed mindre effektiva och ger följaktligen en större energikostnad. Den kan vara dubbelt så hög i ett grovluftarsystem som i ett finluftarsystem. Ytluftare har också en sämre verkningsgrad än finluftarsystem och medför större energikostnader.

Blåsmaskiner

En turbokompressor är en centrifugalmaskin som arbetar med *kompresibelt* flöde. Förenklat kan man säga att en turbokompressor åstadkommer en tryckökning genom att tillföra kinetisk energi (hastighet) till ett kontinuerligt flöde via en rotor. Turbokompressorer används överallt i processindustrin genom att de har relativt få rörliga delar, är energieffektiva (omkring 80 % verkningsgrad) och kan producera högre luftflöde än en lika stor kolvmaskin. Den främsta nackdelen är att en turbokompressor inte kan producera en lika hög kompression som en kolvmaskin med mindre än att man installerar flera maskiner i serie. För en turbokompressor finns en minsta kapacitet vid vilken den är effektiv, ofta omkring 45 % av det nominella flödet. Därför är det viktigt att ha en förståelse för hur mycket som luftflödet kan ändras med hjälp av ledskenor, diffusor och varvtal.

En effektiv drift och styrning av blåsmaskinerna har en stor inverkan på hela verkets kapacitet och på dess energikostnader. Eftersom lasten varierar kraftigt så skall också blåsmaskinerna anpassas till detta, samtidigt som man vill behålla verkningsgraden. Varvtalsreglering är därför en vital ingrediens i ett effektivt system. För en blåsmaskin gäller samma affinitetslagar som för pumpar, nämligen att effekten är en funktion av tredje potensen av varvtalet. Halva varvtalet för en kompressor kräver alltså ungefär bara 1/8 av effekten.

Med en *frekvensomriktare* kan man åstadkomma variabelt varvtal och därmed kan blåsmaskinerna ges en bättre verkningsgrad över hela varvtalsområdet. Varje avvikelse i syrehalt från önskad nivå leder till en korrigering av luftflödet. Besparingarna kan bli avsevärda, vilket vi skall diskutera mer i avsnitt 6.4.

Start av fläktar och kompressorer kräver extra omsorg. Startströmmen kan vara 6–7 gånger högre än den nominella motorströmmen. Det orsakar en stor mekanisk och termisk påfrestning och kräver tålig isolering för att garantera en säker start. Därför kan man med frekvensomriktare åstadkomma mjuka starter, där man helt enkelt begränsar strömstyrkan. Med en mjukstartare kan man minska startströmmen till ungefär två gånger den nominella motorströmmen. Det innebär att mindre säkringar och billigare kablage kan användas, vilket både sparar energi och ökar utrustningens livslängd.

En kompressor kan också utrustas med *inbyggd momentreglering*. Det gör att drivande momentet är begränsat under hela startförloppet och motorn kan varvas upp med t.ex. konstant acceleration. Detta innebär också mindre energiåtgång och lägre underhållskostnader.

Med en frekvensomriktare kan man också *beräkna axeleffekten* ut från kompressorn. Axeleffekten är ju ett mått på belastningen, och om belastningen verkar onormal går det alltså att upptäcka detta. Man kan beräkna avvikelser från den normala lastkurvan över hela varvtalsområdet. Genom att larma vid för hög axeleffekt kan man åstadkomma en skonsammare drift och minimera stillestånd, energiförluster, slitage på utrustningen och haverier. Skulle axeleffekten vara för stor kan en frekvensomriktare reagera direkt och antingen varna eller direkt stoppa maskinen. Tidiga varningar gör det möjligt att arbeta med förebyggande underhåll.

Luftning och blåsmaskiner – sammanfattning

Luftningen i en aktivslamprocess står för en väsentlig del av energikostnaderna i verket. Därför är valet av kompressorer/blåsmaskiner mycket viktigt. Med varvtalsstyrning kan man åstadkomma en kraftig reduktion i effektbehov vid minskade luftflöde. Investering i lämpliga blåsmaskiner är en viktig del för att syre-reglering skall vara effektiv (se avsnitt 6.4).

Kompressorer med momentreglering har också en mjukare start och har därmed oftast lägre underhållskostnader. Det finns dessutom en potential för övervakning av kompressorerna genom t.ex. momentreglering och beräkning av axeleffekten.

För turbokompressorer är reglering genom varvtalsändring inte alltid möjligt, eftersom drift av strömningsmaskiner kräver vissa strömningsförhållanden för att pumpningen av luft inte skall kollapsa. Av det skälet drivs kompressorn med konstant varvtal och reglering sker med hjälp av omställning av ledskenorna. På så sätt kan kapaciteten regleras ned till ett minimum av ca 45 % av nominellt flöde.

Det finns flera exempel på lyckade satsningar på bättre luftarsystem. Vid Käppalaverket har man investerat i nya motorer som har minskat energikonsumtionen med cirka 5 % (Magnusson 2006). Vid Himmelfärdsverket, SYVAB har energikonsumtionen minskat cirka 10 % genom att införa ett bättre filtersystem för blåsmaskinerna (Gunnarsson et al. 2005).

5.4 Omrörning

Omrörning kräver mycket energi. I luftningsbassängerna svarar oftast luftarsystemet för en tillräcklig omrörning. Däremot kan syrebehovet bli så lågt vid låg belastning att den adekvata mängden luft för syresättningen inte räcker till för att ge tillräcklig omrörning och hålla slammet suspenderat. Då kan det förekomma att man kompletterar luftarsystemet med omrörare. Omrörningen kan då göras mer energieffektiv med mekaniska omrörare i stället för omrörning via luftflödet. Därmed sparar man energi vid låga belastningar.

I anoxa bassängerna för denitrifikation krävs omrörning samtidigt som man skall undvika syresättning. Likaså kräver rötammare att slammet hålls i suspenderad form. Då är det betydelsefullt att omrörarna anpassas till volymen i respektive bassäng. Naturligtvis handlar det om såväl utformningen och storleken på själva omrörarbladen som på motorerna som driver omrörarna. Fler detaljer kring dessa frågor har utretts av (Kjellén-Andersson 2002).

Vilken typ av omrörare som passar bäst bestäms av flera faktorer, t.ex. bassänggeometri och bassängvolym. Placeringen av omrörarna, deras vridningsvinkel och lutning är också viktiga faktorer. Den specifika omrörningseffekten är i intervallet 3–8 W/m³ och hastigheten av omrörarnas blad brukar vara 0,2–0,3 m/s vid bassängens botten. Då kan man undvika avlagringar.

I vissa lägen kan man avbryta omrörningen periodiskt utan att processen försämras, s.k. *intermittent* omrörning. På så sätt kan man också minska energibehovet.

5.5 Slambehandling

Om man kan hålla en *hög slamkoncentration* i förtjockningen innan rötning bidrar det till en lägre energiförbrukning och högre kapacitet i röttningsanläggningarna. Avvattnat slam medför en mindre slamvolym och kräver följaktligen också mindre energi för pumpning, transport och uppvärmning. En hög slamkoncentration leder också till energibesparingar i kommande behandlingssteg, såsom förbränning och

torkning. Den utrustning som används för avvattning är avgörande för energikonsumtionen. Gravitationssedimentering och förtjockning kräver försumbar energi. Större utrustning kräver förhållandevis mindre energi per kg avvattnat slam än mindre enheter (Kjellén-Andersson 2002).

Vid Ryaverket (Göteborg) betyder en ökning av TS-halten på 1% en minskning av transportkostnaderna med cirka 0,5 MSEK per år (Lumley 2008). En studie vid Käppalaverket (Lidingö) indikerar en stor potential för energibesparing då koncentrationen av slamhalten ökar. En ökning med TS-koncentrationen med 1 % skulle minska energikostnaderna med storleksordningen 170 kSEK.

5.6 Uppvärmning, belysning och ventilation i lokaler

Det finns många små och enkla sätt att spara energi. Man behöver t.ex. inte ha allt ljus tänd under nätter och helger. Ventilation i tunnelsystem är relativt energikrävande. (Man skall dock komma ihåg att det krävs en viss ventilation för att hålla en viss luftkvalitet i tunneln.) Kostnaderna är små i jämförelse med de stora pump- och blåsmaskinkostnaderna, men genom att införa styrutrustning och automatik för elutrustning kan både små och stora besparingar göras. Ventilation och uppvärmning i kontorslokaler, materialförråd och lab kan reduceras då det inte finns personal närvarande. Armaturer till ytterbelysning kan ofta bytas (t.ex. från kvicksilverarmaturer till högtrycksnatrium) vilken kan betala sig i form av lägre elförbrukning.

Det finns många förslag på energibesparande åtgärder ute på olika reningsverk. Vid Laholms VA-verk har man genomfört många utmärkta besparingsåtgärder (Brink 2008). Exempel på sådana är:

- rörelsevakt och skymningsrelä på ytterbelysning och i lokaler,
- tidur på ventilationen,
- sommarventilation med gallerdörrar i stället för fläktar,
- termostatbyte på radiatorer (radiatorer skall inte vara påslagna på sommaren!),
- varvtalsreglering och mjukstart (som vi diskuterat tidigare i detta avsnitt),
- kemslam som förs till försedimenteringen (minskade kemikalieförbrukningen med 40 % i Laholm),
- minskad transportkostnad genom användning av 14 m³ container i stället för 8 m³,
- utbyte av gamla pumpar,
- avfuktare i stället för bortventilerad värme.

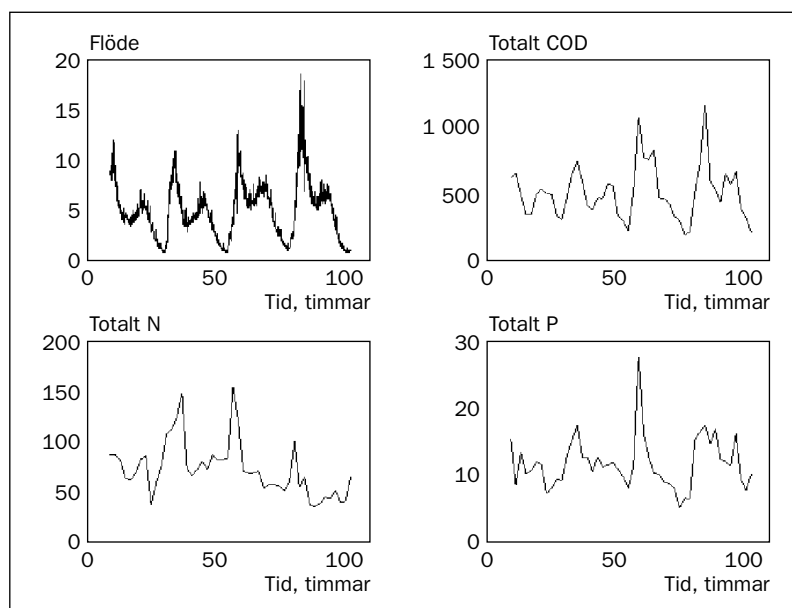
6 Energibesparingar genom reglering

Ett reningsverk är hela tiden utsatt för störningar. Inkommande flöde varierar i både storlek, koncentration och sammansättning, allt ifrån variationer i minut- och tidskala till variationer efter årstiderna. Plötsliga händelser, t.ex. ett kraftigt regn, toxiska föroreningar eller korta belastningstoppar kan inträffa snabbt. Alla dessa störningar medför att anläggningen aldrig är i något slags medelläge (stationärt tillstånd), utan reningsverket är så gott som alltid i ett transient tillstånd. Med reglering kan man kompensera för störningarna för att åstadkomma den kvalitet på produkten som krävs. Jämfört med de flesta processindustrier (t.ex. kemi eller pappers- och massa) är störningarna till ett reningsverk extremt stora. Det betyder också att kravet på reglering är stort.

Det traditionella sättet att bygga reningsverk har varit att kompensera störningar med stora bassängvolym. Detta är dyrt och kapitalkostnaderna blir stora. Dessutom påverkas också driftkostnaderna negativt av överdimensionerade system. On-line reglering är ett mycket mer attraktivt och kostnadseffektivt sätt som visat sig klara de flesta av dessa störningar.

6.1 Störningar

De flesta störningar är relaterade till inkommande flödet, figur 6-1. Inverkan av dessa störningar skall helst elimineras, men åtminstone dämpas.



Figur 6-1

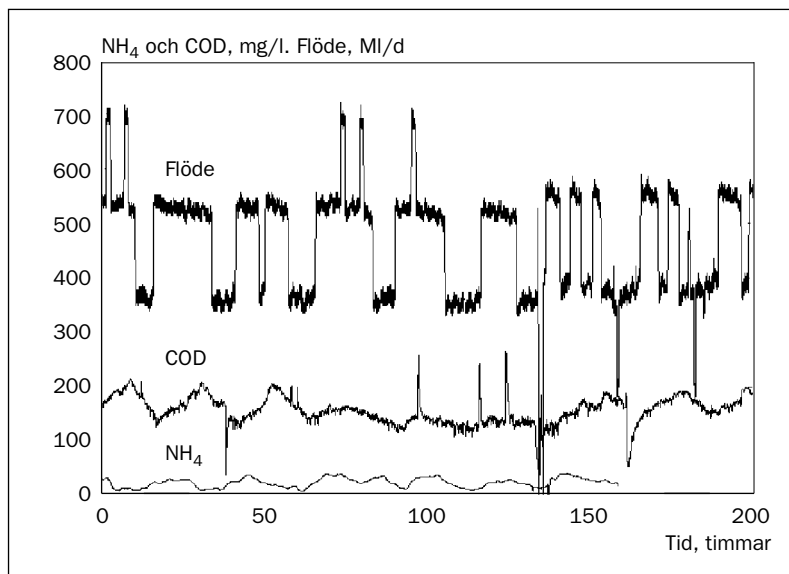
Typiska dygnsvariationer i ett reningsverk med avloppsvatten från endast hushåll. Vädret är torrt. Variationerna har uppmätts från torsdag till söndag.

Om resultatet av störningen mäts *inne* i verket, t.ex. en ändrad syrehalt, ökande slamnivå eller en ändrad susphalt, så kan den uppmätta infor-

mationen återkopplas till en regulator som kan aktivera en pump, en ventil eller en kompressor, så att inverkan av störningen minimeras.

Tyvärr skapas ofta störningar på grund av själva driften i verket. Detta beror ofta på att man ofta inte har en full förståelse hur de olika processdelarna påverkar varandra. Figur 6-2 visar hur inkommande flöde pumpas med tre on/off pumpar. Resultatet blir att verket tar emot snabbt förändrade flöden, vilket kommer ha en mycket negativ inverkan på klarning och sedimentering. Vi kan alltså se att varvtalsreglerade pumpar inte bara har en positiv inverkan på energikonsumtionen utan också en fördelaktig inverkan på t.ex. sedimenteringens kvalitet.

De stora belastningsvariationerna motiverar både en flexibel pumpning och ett luftarsystem som kan anpassas till både låga och höga laster. Möjligheten att styra flöden och doseringar är alltså helt vital för att en bra drift skall kunna förverkligas.



Figur 6-2

Inkommande flöde och koncentrationer under 200 timmar (drygt en vecka) i ett stort reningsverk.

Notera hur on/off pumpningen medför stora flödesvariationer in i verket.

6.2 Reglering – grundläggande begrepp

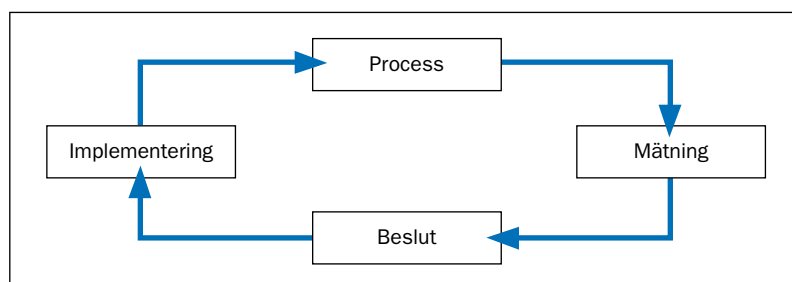
Det är helt tydligt att man vill kunna styra alla *flöden* som är kopplade till det inkommande flödet, såsom pumparna för inkommande vatten, returslampumpar, överskottsslampumpning, recirkulationer för nitrat, för att nämna de viktigaste. Likaså vill man flexibelt kunna styra *doseringen* av både fällningskemikalier och externa kolkällor. Att variera mängden *luft* till luftningsbassängerna är också central för energiekonomi.

Den absolut grundläggande principen för all reglering är återkoppling (feedback), vilket illustreras i figur 6-3. Processen (i detta fall kan det vara luftningsbassängen, doseringssystemet, en rötkammare, en pumpgrop) är hela tiden utsatt för störningar som orsakats av främst belastningsvariationer, men som också kan vara orsakade av interna förändringar, t.ex. recirkulationer eller pumpningar. Processens aktuella tillstånd mäts av någon mätgivare (instrument) och baserat på den mätningen skall regulatorn fatta ett beslut. För att kunna besluta måste regulatorn ha något mål (börvärde, önskat värde), t.ex. att syrehalten

skall vara 3 mg/l eller flödet 100 l/s, etc. Beslutet kommer i form av ett värde i datorn eller en signal från regulatorn. Denna signal måste översättas i "muskler", d.v.s. aktivera ett ställdon som kan vara en motor till en pump eller kompressor, eller en ventil.

Figur 6-3

Illustration av återkopplingsprincipen. Ett mätinstrument (mätgivare) ger information om processen. Baserat på mätningen fattas ett beslut i regulatorn. Beslutet genererar en signal till ett ställdon, som kan vara en motor, en ventil, en kontakt, alltså en apparat som översätter från signal till en mekanisk rörelse eller kraft.



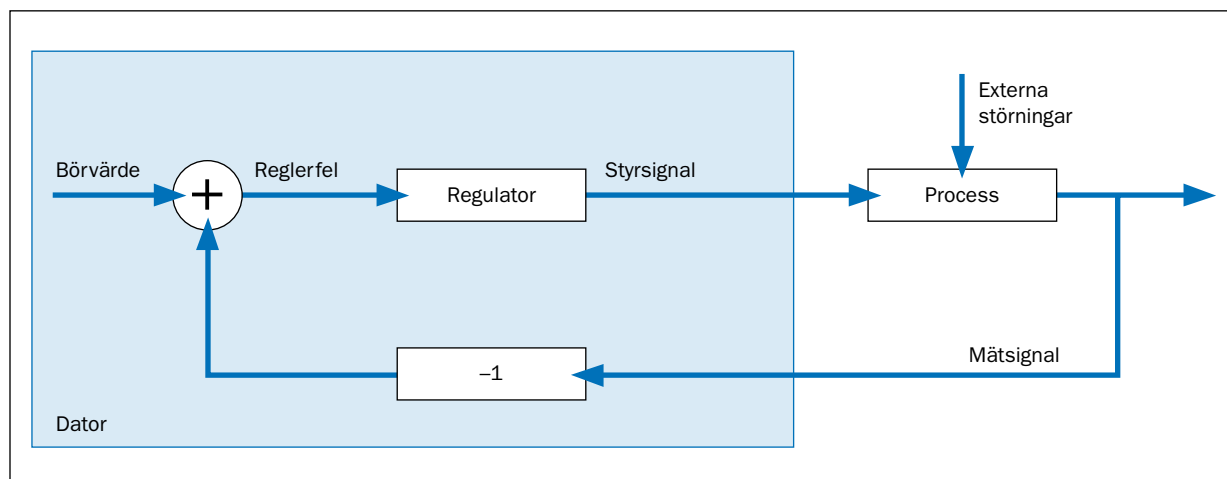
Vi har erfarenhet av återkoppling hela tiden i vårt dagliga liv. I vår egen kropp känner nervcellerna av temperaturen och hjärnan styr musklerna så att kapillärerna i huden påverkas. Att hålla balansen kräver att vi känner en riktning. Hjärnan styr musklerna i fötter och ben för att hålla oss upprätta. När vi kör bil tillämpar vi återkoppling hela tiden. Ögat noterar hastigheten från hastighetsmätaren, vägens utseende, avståndet till nästa bil o.s.v. Hjärnan sammanställer sedan hela denna information för att ta ett beslut om vad som skall göras nästa ögonblick. Detta beslut översätts till muskler som vrider på ratten, bromsar eller gasar. Hela tiden är skälet för denna återkoppling att scenen för föraren ändras kontinuerligt. Med andra ord så är "processen" utsatt för störningar som tvingar oss att använda återkoppling. Bilkörningen är ett exempel på ett mycket komplext regelsystem med många parallella mätare och flera ställdon, ett s.k flervariabelt system.

Reglering (eller återkoppling) är med andra ord *hur man styr processen mot ett bestämt mål, trots störningarna*. När man identifierat vilka mätningar som kan göras och vilka ställdon som kan användas skall man bestämma sig för en regulatorstruktur (vad skall man mäta och vad skall man styra) och av regulatoralgoritmen (hur själva regulatorberäkningen skall göras).

En enkel reglerkrets representeras ofta av ett blockschema som i figur 6-4.

Figur 6-4

En enkel reglerkrets. Notera att processen utsätts för störningar, vilket är skälet att man behöver reglera, d.v.s. korrigera processen med hjälp av en styrsignal. Målet är att mätvärdet skall vara lika med börvärdet.



Sådana enkla reglerkretsar förekommer överallt i ett verk, t.ex. för reglering av nivåer, tryck, temperaturer och flöden. Två insignaler skickas till regulatorn, mätsignalen från processen och börvärdet (önskade värdet). Regulatorn producerar en styrsignal.

De allra flesta viktiga regleringar i ett reningsverk kan göras med en s.k. PI-regulator. En sådan regulator jämför börvärde och mätvärde och bildar ”felet” e . Regulatorn beräknar sedan styrsignalen som summan av ett värde som är *proportionellt* mot felet (P-delen) och ett värde som är proportionellt mot felets *integral* (d.v.s. det ackumulerade felet, I-delen). Om mätvärdet är lika med börvärdet är alltså felet noll och regulatorn gör ingen förändring av styrsignalen.

6.3 Styrning och reglering på olika nivåer

Man kan beskriva styrning och reglering i ett reningsverk på tre nivåer:

- Håll igång processerna och maskineriet;
- Se till att utgående vatten har tillräcklig kvalitet;
- Maximera effektiviteten i driften och minimera kostnaderna.

För att verket skall kunna producera tillräckligt bra utgående vatten måste utrustningen fungera, något som verkar självklart. På många motorer och pumpar sitter det en *lokal regulator*. Den ser till att flödet, trycket eller nivån hålls på ett värde som man ställer in på regulatorn och fungerar enligt schemat i figur 6-4.

För att utgående vatten skall få en tillräcklig kvalitet kan vi tillämpa olika typer av styrning, t.ex. syrerreglering. Om man ser till att tillräckligt mycket luftning äger rum, så bör också processens biologi fungera bra. Det betyder inte att vi luftar på mest effektiva sättet. Här kommer sedan ekonomin in, hur vi får systemet att fungera så effektivt som möjligt.

6.4 Syrerreglering

Vi har redan tidigare diskuterat den centrala roll som syrekonzentrationen spelar för att åstadkomma en effektiv biologisk rening. Syrekonzentrationen påverkar tillväxten (och därmed aktiviteten) av olika typer av organismer. Den har dessutom en stor inverkan på den totala driftkostnaden för verket.

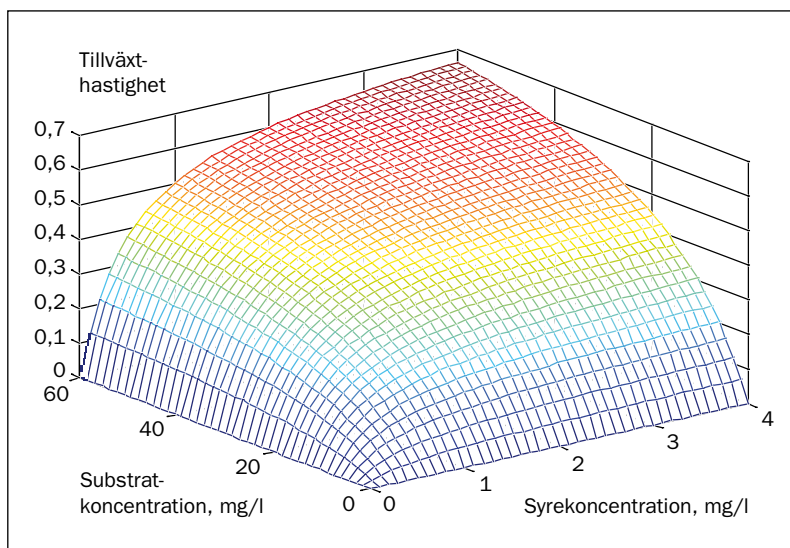
Det bör påpekas att tillväxten och aktiviteten för en organism påverkas inte bara av syrehalten utan också av koncentrationen av föda (alltså organiskt material, BOD, och halten ammoniumkväve). Det kan grafiskt åskådliggöras i figur 6-5. Det betyder alltså att organismen måste ha tillgång till både föda och syre. Är mängden föda mycket stor så hjälper det inte tillväxthastigheten för mikroorganismerna om syrehalten samtidigt är låg.

Konstant luftning och tidsstyrning

Eftersom det normalt förekommer stora variationer i belastningen till ett reningsverk är konsekvensen av konstant luftning att man vid

Figur 6-5

Tillväxthastigheten eller aktiviteten för mikroorganismer beror av koncentrationer av både föda (substrat) och syre.



höglast får en relativt låg syrekonzentration och vid låglast en hög (och oftast onödigt hög) syrekonzentration. Den vänstra kurvan i figur 6-7 visar ett exempel på resultat av konstant luftning.

Ibland förekommer att man använder två blåsmaskiner, där båda är inkopplade vid hög last och endast en vid lägre last. Med ett tidur styr man till- och fränkopplingen av blåsmaskinerna. Ett sådant förfarande kallar man *öppen styrning* (open loop) eller *tidsstyrning*. Fortfarande har man inte någon mätning av den verkliga syrehalten, och resultatet blir därmed att man slösar onödigt mycket energi på luftningen. Eftersom man inte mäter syrehalten finns naturligtvis också en risk att man luftar för lite under vissa tider på dygnet. Det är som att köra en bil med förbundna ögon.

Återkoppling från en syremätare

I enklaste fallet kan vi anta att syrekonzentrationen är densamma i hela luftningsbassängen, vilket ofta är ett rimligt antagande i mindre verk. Genom att mäta syrehalten får man en direkt indikation på om mängden luft skall öka eller minska.

Mätning av syrehalten är en teknik som är utprovad sedan många år. En modern givare bygger på optisk teknik. En s.k. LDO-givare (*luminescent dissolved oxygen*) har ett mät huvud som innehåller ett syrekänsligt skikt, som bestrålas med blått ljus (figur 6-6). Efter en fördröjning emitteras rött ljus. Varaktigheten på det röda ljuset är proportionell mot syrekonzentrationen i provet. En LDO-givare innehåller inget membran och riskerar därför inte att smutsas ner och blockeras. Typiskt måste mät huvudet bytas ut en gång per år och ingen frekvent kalibrering eller byte av elektrolyt är nödvändig. Inga mätare är förstås perfekta och därför måste fler kostnader än själva grundinvesteringen tas med i beräkningen. Kostnaderna för installation och underhåll får inte glömmas bort.

Den allra enklaste styrningen är s.k. *on/off styrning*, något som dock är ganska ovanligt idag. Anta att syrehalten skall hållas på 3 mg/l. En on/off styrning innebär att en extra blåsmaskin slår till då syrehalten



Figur 6-6

Syrehaltsmätare, Lange LDO

går ner under t.ex. 2,6 mg/l och den slås av då syrehalten överstiger 3,4 mg/l. Resultatet av en sådan styrning är att syrekonscentrationen kommer att pendla mellan gränsvärdena. Det går inte att åstadkomma någon mjuk variation av luftmängden och styrningen medför stort slitage på utrustningen.

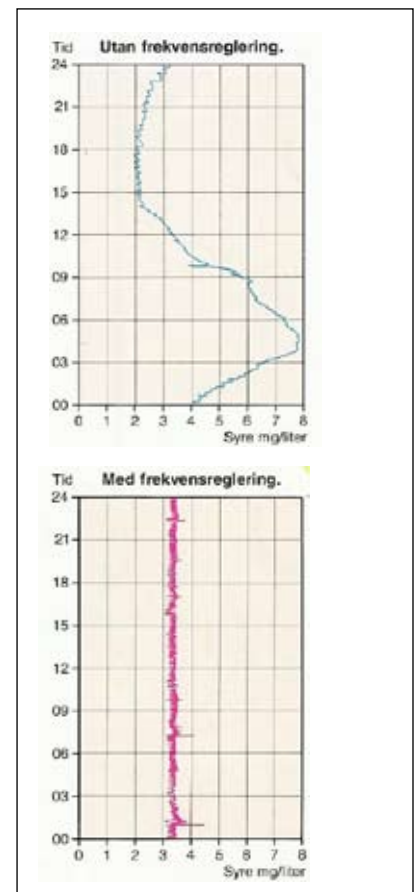
En enkel varvtalsreglering av blåsmaskinerna ger ett annat och bättre resultat. I standardfallet kan ändringen i luftflödet göras proportionell mot avvikelsen (reglerfelet e i figur 6-4) från önskade syrehaltsvärdet och dess integral (alltså den ackumulerade avvikelsen). Detta är en PI-regulator. Resultatet av en sådan reglering ser vi i den högra kurvan i figur 6-7.

Reglerkretsen för syrekonscentrationen

Standardfallet för syreregleringen är att syrehalten (DO = dissolved oxygen) mäts i en punkt i luftningsbassängen. Konscentrationen jämförs med det önskade värdet och syreregulatorn beräknar den ökning eller minskning av luftflödet som behövs för att korrigera syrehalten. Block-schemat i figur 6-8 visar hur informationsflödet ser ut från syremätaren till luftventilerna. Notera, att syreregulatorn inte skickar sin signal direkt till luftventilen, utan styrsignalen utgör i stället börvärdet (önskade värdet) till en annan regulator som styr själva luftflödet. Den senare är då en *slavregulator* medan syreregulatorn är *master*. Luftflödesregulatorn jämför det önskade luftflödet med det verkligt uppmätta och skickar sedan en signal till ventilen eller kompressorn så att luftflödet blir det önskade. En reglering med två regulatorer i serie (master + slave) kallas för *kaskadreglering* och är den normala strukturen för en syrereglering.

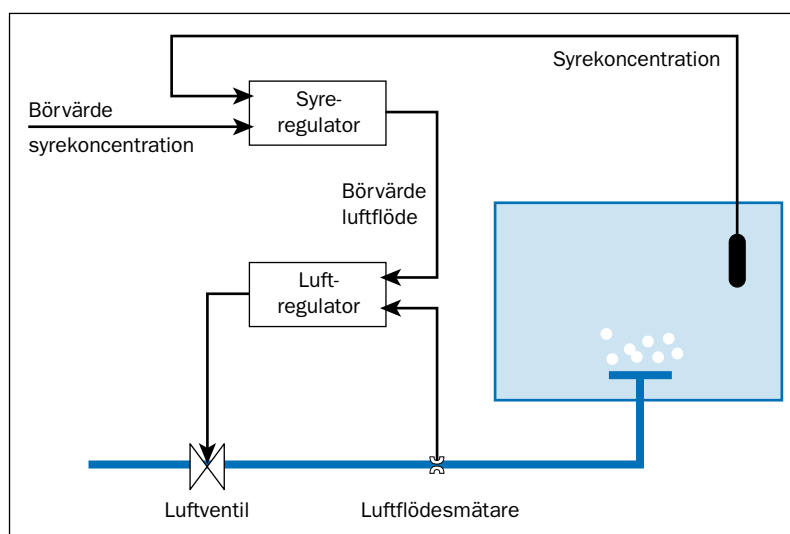
Att mäta luftflöde på ett pålitligt och noggrant sätt är inte heller trivialt. Man skall inte bortse från de svårigheter som det kan innebära.

Det finns två skäl till varför syreregulatorn inte är direkt kopplad till ventilen. Det första skälet beror på själva ventilkarakteristiken. En luftventil är vanligen olinjär. En konsekvens av detta är att en 10% ökning av ventilsignalen ger helt olika svar om ventilen är nästan stängd eller om den är nästan helt öppen. Detta betyder att en önskad ändring i luftflödet måste resultera i väldigt olika ventiltrörelser vid låg belastning



Figur 6-7

Övre kurvan visar hur syrehalten kan variera under ett dygn vid konstant luftning. Den undre kurvan visar att syrehalten kan hållas nära sitt önskade värde genom att varvtalsreglera kompressorn med frekvensomriktare (bild från Bo Brink, Laholm).



Figur 6-8

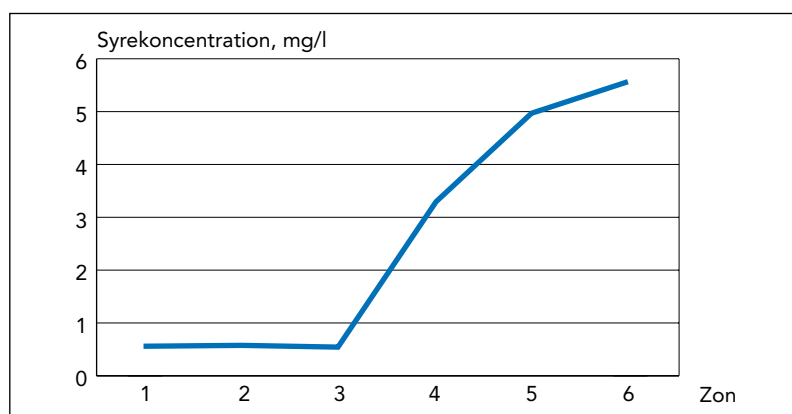
Strukturen på en kaskadreglering. Syreregulatorn är "master" och producerar ett börvärde till luftflödesregulatorn ("slaven") som reglerar luftflödet. Observera att man måste mäta både syrehalt och luftflöde.

och vid hög belastning av verket. Om man däremot *mäter* luftflödet så behöver man inte bekymra sig om själva ventilkarakteristiken, utan ventilen utför den önskade rörelsen för att generera det önskade luftflödet.

Det andra skälet till varför man helst använder kaskadreglering är vid igångkörningen av reglerkretsen. Slavregulatorn ställs in först, medan master (syreregulatorn) är satt i manuell. Då kan man först se till att luftflödet ändras som man önskar. När detta är gjort kopplas masterregulatorn in, som då kan ställas in betydligt enklare.

Syreprofil i långa luftningsbassänger

I de allra flesta reningsverk är luftningsbassängen antingen en långsträckt bassäng eller byggd som flera bassänger i serie. Om inkommande vatten skickas in i början av luftningsbassängen betyder det att koncentrationen av föda är störst i början av bassängen. Följaktligen är syrebehovet störst där. I slutet av bassängen har födan i bästa fall tagit slut och därmed är aktiviteten för mikroorganismerna mindre. Om då luftflödet är lika fördelat längs bassängen blir syreprofilen liknande den i figur 6-9. En sådan luftfördelning är lyckligtvis relativt ovanligt idag, men förekommer fortfarande.



Figur 6-9
Syreprofilen då luftflödet är ungefär likformigt längs bassängen. Luftningsbassängen är indelad i 6 zoner (från Andersson-Holmberg 2006).

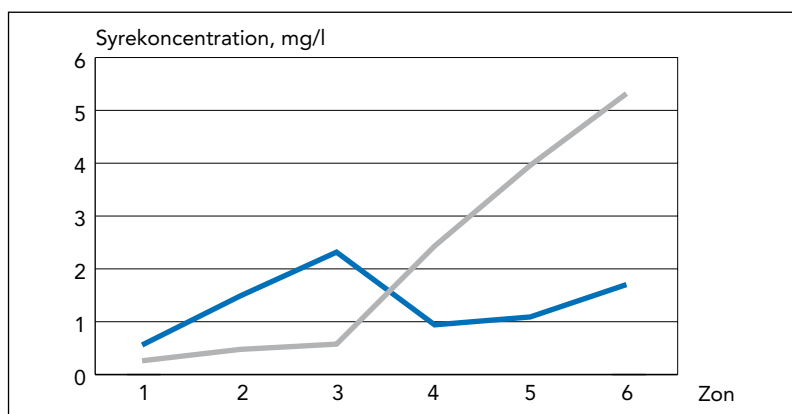
Om man vänder upp och ner på kurvan i figur 6-9 får man ett mått på mikroorganismernas syrebehov. Intuitivt är det då klart att man önskar sig ett större luftflöde i början och ett mindre i slutet av bassängen.

Att på ett bra sätt reglera syret i en luftningsbassäng med en syreprofil som i figur 6-9 är inte helt lätt. Om man bara kan reglera totala luftflödet har man inga möjligheter att reglera så att man får en bra syreprofil. Om man dessutom har endast en syrehaltsmätare så är det inte alls självklart var man skall placera syremätaren. Likaså, vad är ett lämpligt börvärde för syret? Hur vi än placerar mätaren så kan en reglering inte åstadkomma en bästa syresättning, eftersom vi måste skicka in så mycket luft så att det blir ett stort överskott i slutet av bassängen. Detta kräver onödigt mycket energi.

Syrereglering i flera luftningszoner med separat luftning

I en idealisk luftningsbassäng skulle man vilja ha en konstant syrekonzentration från början till slutet. Det betyder att betydligt mer luft måste kunna skickas in i början än i slutet. För att åstadkomma detta måste man alltså dels mäta i flera delar av luftningsbassängen, dels kunna styra luftflödet separat i varje del.

Själva regleringen är enkel om man kan styra luftflödet separat. Andersson-Holmberg (2006) har visat vad detta kan betyda i Himmerfjärdens reningsverk (SYVAB). Med endast en syremätare (placerad i zon 5) och en luftventil kan man inte åstadkomma bättre syreprofil än figur 6-9. Samma profil är återgiven i figur 6-10 (grå kurvan). Ytterligare en syremätare placerades sedan i zon 2 och första och andra hälften av luftningsbassängen styrdes separat. Resultatet blir som den blå kurvan i figur 6-10.



Figur 6-10

Jämförelse av syreprofiler i luftningsbassäng. Den grå profilen är resultatet av styrning med bara en syremätare placerad i zon 5. Den svarta kurvan är syreprofilen om zon 1–3 styrs separat via en mätare i zon 2 och zon 4–6 styrs med en mätare i zon 5 (från Andersson-Holmberg 2006).

Energibesparingen med 2 syremätare i stället för 1 är 15%. Naturligtvis måste man då kontrollera att kvaliteten på utgående vatten inte försämras. I luftningsbassängen sker nitrifikation och man kan konstatera att i båda fallen minskar ammoniumkoncentrationen längs bassängen till ett tillräckligt lågt värde. Eftersom organismerna får en bättre syreförsörjning i början av luftningsbassängen får man dessutom en bättre slamkvalitet.

Tryckreglering

Så snart man ändrar ventilöppningen för luft kommer trycket i ledningen att påverkas. Trycket i luftarsystemet måste ju hålla ett minsta värde för att någon luft skall komma ut ur luftarna. Det nödvändiga trycket motsvarar ungefärligen vattendjupet i bassängerna.

Då trycket minskar i ledningen skickas en signal från en tryckmätare till en tryckregulator som kommer att påverka kompressorerna att producera mer luft. Detta kan ske genom att ändra ledskenorna eller genom att öka varvtalet på kompressorn. Motsvarande förändring sker vid ett minskat flöde och ökat tryck.

Måste trycket vara konstant?

Nej! I många anläggningar har man parallella luftningsbassänger och syrehalten skall styras i var och en av dessa. Belastningen är sällan den-

samma i de olika parallella bassängerna, vilket betyder att luftventilerna därmed kan vara olika öppna.

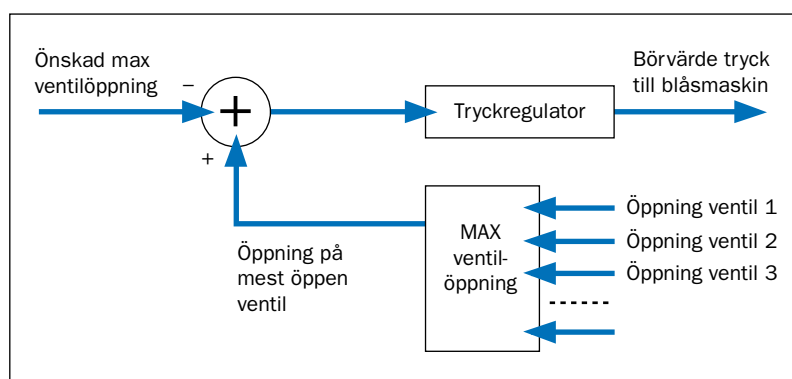
En ventil som är delvis stängd medför en energiförlust. För att undvika denna energiförlust kan man minska trycket. Detta medför att ventilen måste öppnas för att få fram samma luftflöde. Helst skall ventilen vara nästan helt öppen.

Under förutsättning att ventillägena kan mätas kan styrsystemet kontinuerligt registrera alla ventilöppningar. Den mest öppna ventilen kan väljas att vara nästan helt öppen, något mindre än 100% för att fortfarande ha någon reglermöjlighet kvar. Om den mest öppna reglerventilen är för liten öppen ges en signal att minska börvärdet för trycket, figur 6-11. Detta leder till att ventilerna måste öppna sig mer. På motsvarande sätt, om ventilen är för mycket öppen kan man öka trycket så att ventilerna måste stängas något men fortfarande släppa igenom samma mängd luft.

Om man i stället väljer att ha ett konstant tryck i systemet måste ju trycket vara tillräckligt stort för höga belastningar. Det betyder att trycket vid låga belastningar är lite för högt och ventilerna är mer stängda, vilket orsakar energiförluster.

Figur 6-11

Överordnad reglering av trycket. Om den mest öppna ventilen är mindre öppen än den önskade max-öppningen skickar tryckregulatorn en signal till blåsmaskinerna som minskar trycket. Därmed måste ventilerna öppnas ytterligare.



Besparingen med variabelt tryck kan vara i storleksordningen flera procent. De första försöken med variabelt tryck gjordes redan i början av 1980-talet på Käppalaverket (Olsson-Newell 1999) och har senare följts upp av Thunberg (2007).

Beräkningar från Ryaverket (Gryaab AB 2007) visar att en sänkning av medeltrycket med 1 kPa innebär en besparing av 30 000 kWh/år. Mätresultat visar att vid normala/låga flöden kan flödet hållas stabilt vid tryck ner mot 110 kPa genom enskilda ventiler. Dock kan behovet från andra ventiler begränsa hur mycket trycket får sänkas. Den möjliga sänkningen av trycket uppskattas till ca 0,5 kPa vilket motsvarar 15 000 kWh/år.

Kan man beräkna syrebehovet?

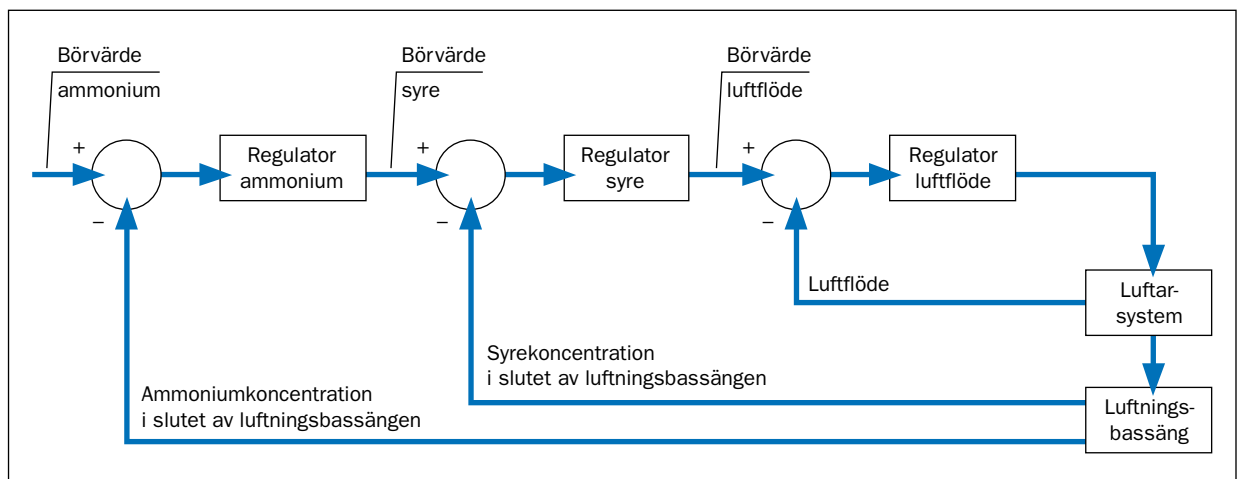
Ja! Utvecklingen av givare för bl.a. ammoniumkväve har gjort det möjligt att ytterligare utveckla syreregleringen, så att man tillåter ett variabelt börvärde för syrehalten. I en nitrifierande luftningsbassäng oxideras ammoniumkväve till nitrit och sedan till nitrat. Det betyder att koncentrationen av ammonium minskar successivt längs bassängen

och skall vara tillräckligt liten i slutet av bassängen. Om en on-line ammoniummätare placeras vid utloppet av luftningsbassängen kan man alltså avgöra om nitrifikationen varit tillräcklig. Är ammoniumkoncentrationen för hög försöker man i första hand att öka börvärdet för syret (av praktiska skäl skall man alltid begränsa detta till t.ex. 4 mg/l). Kanhända räcker inte ökningen av luftningen och då har bassängen helt enkelt inte tillräcklig kapacitet att nitrifiera vid den höga lasten. Om å andra sidan ammoniumkoncentrationen är för låg betyder det att man varit för ambitiös. Man kan då uppnå en tillräcklig nitrifikation med lite mindre luftning, och därmed kan syrebörvärdet sänkas (av praktiska skäl skall man alltid definiera en minsta gräns, t.ex. 0,5 mg/l).

Figur 6-12 visar ett blockschema för reglersystemet. Jämför man med figur 6-8 har man lagt till en regulator, ammoniumregulatorn. Denna beräknar skillnaden mellan uppmätta och önskade ammoniumkoncentrationen. Den ger sedan ett värde på hur mycket syrebörvärdet i slutet av luftningsbassängen skall minska eller öka.

I figur 6-13 visar vi hur en syrereglering med variabelt börvärde kan se ut. Experimenten har gjorts i Källby reningsverk, Lund. I en av luftningsbassängerna mäts ammoniumkoncentrationen i utloppet, medan den andra parallella bassängen tjänar som referens.

Vid hög belastning kommer ammoniumkoncentrationen att överstiga det önskade värdet på 3 mg/l. Ammoniumregulatorn ser då till att höja börvärdet för syrehalten (till maximalt 3 mg/l). På motsvarande sätt visar ett lågt värde på ammoniumkoncentrationen att belastningen är liten. Då sänker regulatorn börvärdet på syrehalten, men lägst till 0,5 mg/l. Med det variabla börvärdet för syre så minskar man energikostnaden. Jämfört med fast börvärde så sparade man i detta fall 28 % av energikostnaden, utan att försämra reningsresultatet. Det skall då jämföras med kostnaden för ammoniumgivaren. Till denna kostnad måste naturligtvis läggas kostnader för underhåll under mätarens livslängd.



Figur 6-12 Blockschemata visar hur informationsflödet ser ut för syrereglering med variabelt börvärde för syrekonscentrationen. Syreregulatorn och luftregulatorn är desamma som visas i figur 6-8. Luftflöde, syrekonscentration och ammoniumkoncentration mäts och jämförs med de önskade värdena (börvärden). Ammoniumregulatorn beräknar önskade börvärdet för syret. Syreregulatorn i sin tur beräknar önskade värdet för luftflödet. Alla regulatorerna finns i styrdatorn medan "luftarsystem" och "luftningsbassäng" är de verkliga fysiska processerna.

Syrereglering – sammanfattning

Syrekoncentrationen skall hållas tillräckligt hög för att biologiska reaktionerna skall gynnas men tillräckligt låg för att minimera energiåtgången. Syrehalten måste alltså kunna mätas. Lika viktigt är att luftflödet skall kunna ändras kontinuerligt. Att bara ändra luftflödet genom att strypa med en ventil är inte energieffektivt, utan kompressorerna måste kunna leverera en variabel luftmängd.

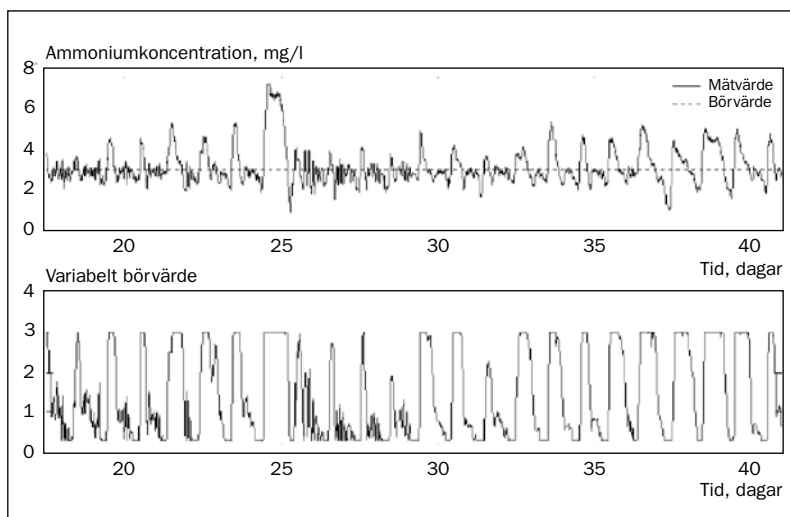
I en lång luftningsbassäng måste man undvika att syret varierar kraftigt längs bassängen. Därför måste man mäta syrehalten på flera ställen längs bassängen. Det kräver i sin tur att luftflödet skall kunna styras oberoende i olika delar av bassängen. Det behövs mer luft i början än i slutet.

I en bassäng med nitrifikation kan man beräkna hur stort börvärde som krävs för syrekoncentration genom att mäta ammoniumkoncentrationen i slutet av bassängen. Detta gör att ytterligare energi kan sparas, samtidigt som man håller kontroll på utgående vattnets kvalitet.

Ett variabelt tryck kan ytterligare bidra till att spara energi, då trycket aldrig behöver vara mer än precis nödvändigt.

Syrereglering kräver investering i instrument. Syrehaltsmätning är beprövad teknik men normalt sett behövs flera syrehaltsmätare. Ammoniummätare är en storleksordning dyrare, men kan motiveras åtminstone i större verk. De kan ju dels bidra till effektivisering, men också till att utgående vattnets kvalitet kan bevakas on-line kontinuerligt. En god syrerreglering kräver också en styrbar luftning med lämpliga kompressorer. Finns inte sådana kan naturligtvis investeringarna bli stora.

Processpåverkan genom syrerreglering är oftast mycket positiv. Syrerregleringen åstadkommer en gynnsammare miljö för mikroorganismerna, vilket ökar möjligheten till bra kvalitet på utgående vatten.



Figur 6-13 Syrerreglering av variabelt börvärde för syrekoncentrationen. I den övre kurvan visas ammoniumkoncentrationen i utloppet. Börvärdet för ammonium har satts till 3 mg/l. Om den uppmätta koncentrationen är högre än 3 så ökas syrebörvärdet i den sista zonen i luftningsbassängen till maximalt 3 mg/l. Om däremot ammoniumkoncentrationen är mindre än 3 mg/l kommer syrebörvärdet att sänkas som mest ned till 0,5 mg/l (från Ingildsen 2002).

Om variationerna är mycket långsamma kanske det inte lönar sig med kontinuerlig mätning utan man kan nöja sig med stickprover.

Tidsskalan för reglering

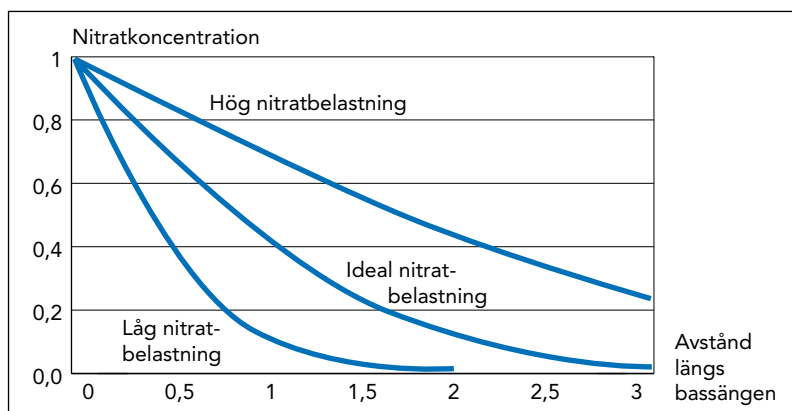
Tidsskalan är alltid betydelsefull i all reglering. Speciellt för en kaskadreglering är det väsentligt att slavregleringen är snabbare än masterregleringen. Det betyder att luftflödet måste kunna regleras mycket snabbare än syrekoncentrationen. Normalt sett är luftregleringen kanske tio gånger snabbare än syrerregleringen. En ändring av *börvärdet* för syrehalten (figur 6-4) måste därför vara betydligt långsammare än själva syrerregleringen. Det betyder att börvärdet inte skall ändras fortare än högst någon gång per timme. På samma sätt får man inte ändra tryckbörvärdet alltför fort. Den mest öppna ventilen skall krypa mot sitt börvärde (t.ex. 95 % öppen) långsamt, inte snabbare än i tidskala. Försöker man ändra börvärdet för trycket alltför ofta så kan systemet komma i svängning, eftersom man då kan få en felaktig koppling mellan olika reglerkretsar, som försöker att bekämpa varandra.

6.5 Nitratreturpumpning

I en aktivslamanläggning med fördenitrifikation pumpas nitrat från slutet av luftningsbassängen tillbaka till den anoxa bassängen, där denitrifikation äger rum. Detta innebär alltså att nitrat reduceras till kvävgas. Oregelbunden mängd av cirkulerat nitratrikt vatten gör att effektiv användning kräver reglering anpassad till flöde.

Figur 6-14 visar tre principiellt olika situationer. I mittenkurvan är nitratflödet precis anpassat så att denitrifikationen hinner äga rum i

bassängen. Den undre kurvan visar en situation där nitraten hunnit reduceras långt innan slutet av bassängen. Det betyder att den sista delen av bassängen är outnyttjad. Man borde alltså kunna reducera mer nitrat genom att pumpa mer nitrat från luftningsbassängen.



Figur 6-14

Principiellt utseende av nitratkoncentrationen i den anoxa zonen. Nitraten reduceras till kvävgas längs bassängen. Idealt sett skall nitratkoncentrationen vara nära noll i slutet av bassängen.

I våra svenska reningsverk anges oftast kravet på kväve att totalkväve skall begränsas, alltså grovt sett ammoniumkväve + nitratkväve. Att minska mängden ammoniumkväve kräver luftningsenergi, vilket är förhållandevis dyrt. Att däremot minska nitratkvävet är relativt billigt. Ur energisynpunkt borde man därför se till att man utnyttjar kapaciteten i anoxa zonen maximalt och sedan anpassar kravet på ammoniumkvävet efter detta. Vid den låga nitratbelastningen kan vi alltså öka recirkulationen av nitrat till en liten energikostnad (vattnet måste lyftas bara en liten höjdskillnad), samtidigt som vi därmed kan spara luftningsenergi.

I fallet med "hög nitratbelastning" i figur 6-14 ser vi att anoxa zonen inte har tillräcklig kapacitet för att reducera allt nitrat. Vi pumpar alltså för mycket nitrat till ingen nytta. Flödet kan alltså minskas och därmed kan man spara energi. Samtidigt skall man i detta läget undersöka om reaktionshastigheten kan öka. För denitrifikationen krävs det att tillräckligt med organiskt material finns tillgängligt. Om så inte är fallet måste man tillsätta en extern kolkälla. På så sätt kan man alltså genom att styra både recirkulationsflödet och externa kolkällan se till att man kommer så nära "idealkurvan" som möjligt.

Naturligtvis måste man kunna mäta att nitratkoncentrationen är tillräckligt liten i slutet av anoxa zonen. Detta kan göras med nitratmätare, vilket är en relativt dyr lösning, men som ändå kan betala sig. Det finns också möjlighet att utnyttja redox-mätningar för att indikera att denitrifikationen har gått mot en fullbordan. Styrning av denitrifikationen med hjälp av redox-mätning har gjorts på flera håll. En omfattande studie har gjorts av Cecil (2006) vid Odense reningsverk i Danmark. Intressanta erfarenheter finns också t.ex. vid Käppalaverket.

6.6 Dosering av fällningskemikalier

Kostnaden för fällningskemikalier för fosforborttagning är betydande. Därför finns tydliga incitament för att reducera dessa kostnader så

långt det går. En kemisk fällningsprocess är betydligt snabbare än biologiska processer. Jämfört med tidsskalan för variationer i inkommande vattens flöde, koncentration och sammansättning så kan kemfällning betraktas som momentan. Ur ett reglertekniskt perspektiv är detta en fördel, eftersom det betyder att en störning eller förändring i fosforkoncentrationen kan korrigeras snabbt med hjälp av återkoppling från fosfatmätning. En viktig detalj är då var mätaren skall placeras.

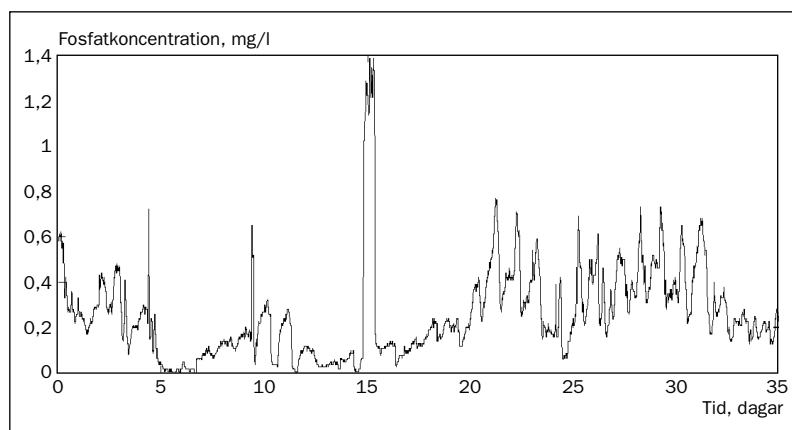
Det är idag möjligt att mäta fosfatkoncentrationen on-line med kommersiellt tillgängliga instrument. Idag finns fosfatmätare som kan mäta både totalfosfor och ortofosfat. Mätområdena är tillräckliga för denna tillämpning. Typiskt kan de vara från 0,01–0,05 mg/l som lägsta gräns till 5–15 mg/l som övre gräns.

Man kan få en god reglering av doseringen om en fosfatmätare placeras direkt efter flockningsbassängen. En demonstration på efterfällningen på Källby reningsverk i Lund kan visa vilka besparingar som kan göras (Ingildsen 2002). Linjen består av ett doseringssystem, följt av en flockningsbassäng, där flockarna byggs upp, följt av sedimenteringsbassängen. Medeluppehållstiden i flockningsbassängen är 1 timme och i sedimenteringsbassängen 4,3 timmar. Tidigare har en del fosfor tagits bort med biologisk fosforreduktion och kemfällningen används för att ta bort resterande fosfor, som kan varieras mellan 1 och 3 mg P per liter.

Två strategier jämförs:

- *Flödesproportionell dosering*: en sådan grundar sig på ett antagande (eller förhoppning) att massflödet av fosfor är ungefär lika stort varje dag. Detta är dock sällan sant.
- *Återkoppling från fosfatmätning*: signalen från en on-line fosfatmätare som placerats efter flockningsbassängen. Regulatorn jämför aktuellt mätvärde med önskat värde och påverkar doseringen.

Figur 6-15 visar resultatet av en flödesproportionell reglering under 35 dagar. Man ser några toppar i koncentrationen som beror på olika typer av felfunktioner. Figuren visar att utgående fosfatkoncentrationen ofta är betydligt lägre än de 0,5 mg/l som krävs. Vid andra tillfällen är koncentration betydligt högre, så variationen är påtaglig. Uppenbarligen är doseringen för hög vid många tillfällen, vilket direkt återspeglas i driftkostnaderna.



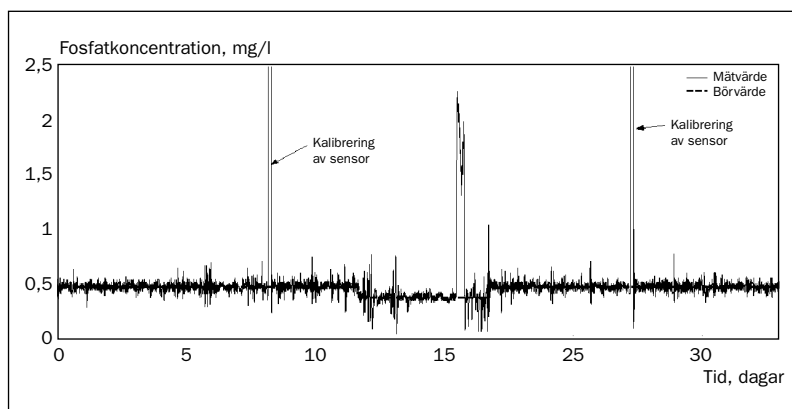
Figur 6-15

Utgående fosfatkoncentration då doseringen av fällningskemikalier baseras på hydrauliska flödet (från Ingildsen 2002).

I den andra testperioden jämförs resultaten då en on-line fosfatmätare placerats efter doseringen. Resultatet visas i figur 6-16. Utgående fosfathalten följer önskade värdet noggrant. Vid dag 23 ändras önskade värdet från 0,5 till 0,4 mg/l och därefter tillbaka till 0,5 på dag 33. Man kan se att regulatorn ändrar doseringen så att det går att åstadkomma också de 0,4 mg/l. Den höga toppen på dag 31 orsakades av ett fel i doseringspumpen.

I andra verk kan variationerna vara betydligt mindre, t.ex. då man har stora tunnelsystem. Man kan ha så mycket järn i vattnet att förändringarna från dag till dag är små, vilket gör att man klarar sig med stickprov och en mycket långsam reglering. Under helgerna kan dock förändringarna vara större. I mindre verk kan dock förändringarna vara snabbare och därmed lönar sig on-line instrumentering mer.

Man bör påpeka att regulatorn baseras på utgående fosfatkoncentrationen, medan kravet på utgående vatten oftast definieras som totalfosfor. I de flesta fall råder ett nära linjärt samband mellan ortofosfat och totalfosfor, vilket betyder att gränsvärdet i totalfosfor lätt kan översättas i ett gränsvärde för ortofosfat.



Figur 6-16

Utgående fosfatkoncentrationen då doseringen av fällningskemikalier baserats på en on-line mätning av fosfat (från Ingildsen 2002).

Besparingen i kemikalier kan vara betydande. Om doseringen baserad på fosfatmätning var 100 % var den 156 % vid flödesproportionell dosering. Besparingen var alltså 35 %. Detta kan mycket snabbt – på några månader – finansierades extra kostnaden för en fosfatmätare. Andra erfarenheter (Sundgren 2008) av reglering av doseringen har också visat stora besparingar. Återigen, om doseringen baserad på fosfatmätningar var 100 % var den 264 % vid fast dosering, 209 % vid flödesproportionell dosering och 201 % vid styrning baserad på inkommande fosfatkoncentration.

Vid Ryaverket har man i flera år använt en alternativ mätmetod för utgående fosfat (Lumley 2001).⁷ Man mäter det lösta fosfatet med stickprov. De största variationerna finns i det partikulära materialet. Genom att mäta TS-halten kan man få en god uppfattning av den totala fosfatkoncentrationen. Den totala fosforkoncentration c_{Ptot} beräknas som

$$c_{\text{Ptot}}(t) = \alpha \cdot \text{TS}(t)$$

⁷ Artikeln innehåller också flera andra goda tips om hur man kan verifiera att instrumenten visar pålitliga värden.

Dosering av fällningskemikalier – sammanfattning

Det är väsentligt att påpeka att den styrning som redovisats ovan endast syftat till att minimera doseringen av kemikalier då platsen för doseringen är given. Här görs alltså inget försök att jämföra en design som baseras på kemisk rening med en design som baseras på biologisk-kemisk rening.

Genom att mäta utgående fosfatkoncentrationen kan man åstadkomma en stor sänkning av kemikaliekostnaden. Det finns dessutom möjlighet att beräkna fosfatkoncentrationen baserad på on-line TS-mätningar. Däremot är det oftast är mycket svårt att noggrant beräkna variationerna av fosfat med ledning endast av inkommande flöde.

Besparingen i kemikalier skall naturligtvis vägas mot kostnaden för investering i on-line fosfatmätare och utökning av styrsystemet, men i de ovan redovisade fallen har återbetalningstiden varit mycket kort, endast några månader.

där TS är en on-line mätning av turbiditeten och α är en faktor som man uppdaterar varje vecka. Man mäter totalfosforhalten varje dag och viktat mätningen med flödet. Då kan α -faktorn beräknas baserad på de senaste 5–10 mätvärdena och uppdateras. Typiskt uppdaterar man α en gång varje vecka. Variationer i α är också en indikation på olika typer av processändringar.

En reglering av doseringen av fällningskemikalier medför flera sekundära goda konsekvenser, t.ex.:

- minskad mängd kemsam,
- högre TS-halt till förtjockaren,
- högre TS-halt till röt-kammaren, vilket ger lägre uppvärmningskostnader för slammet,
- högre gasutbyte i röt-kammaren,
- högre TS-halt i det avvattnade slammet,
- mindre beläggning på avvattningsutrustningen, t.ex. skrapor och centrifuger. När man har ett högt järnbehov så ökar beläggningen.
- minskad mängd avvattnat slam, vilket minskar transport- och deponikostnaderna.

Alla dessa konsekvenser har en direkt eller indirekt inverkan på energibalansen för reningsverket.

7 Produktion av biogas

Energibalansen för ett reningsverk påverkas kraftigt av hur biogas produceras och används inom verket. Vad som är bäst beror bl.a. på belastningen på verket och på årstiden. Gasen kan användas till

- förbränning i gaspanna för att producera hetvatten som kan användas för uppvärmning av lokaler, rötkammare, eller som fjärrvärme,
- biogasdriven panna för el- och värmeproduktion,
- drift av gasmotor för produktion av el och värme,
- direktverkande gasmotor som omvandlar el till mekanisk energi,
- uppgradering till fordonsgaskvalitet genom att skilja bort koldioxid och svavelväte.

Ett problem är att på många anläggningar kan man inte använda all biogas och det är inte ovanligt att man bränner bort 30–50 % av all gas. Självklart innebär detta ett slöseri och det finns anledning att noggrant analysera alternativa användningar för biogas.

Komplicerade skatteregler gör det inte helt problemfritt att framställa el direkt från biogas. Användning av biogas till *gasmotorer* för att driva kompressorer till luftningen är ett intressant alternativ. Skall man använda gasmotorer måste man naturligtvis försäkra sig om att det finns tillräckligt stor buffertkapacitet för att åstadkomma en pålitlig leverans av gas till motorn. Man skall sedan komma ihåg att gasmotorn kanske enbart skall leverera en konstant basproduktion. Ovanpå denna är det sedan angeläget att varvtsreglera pumpar och kompressorer, och då är elektriska drivsystem den rimligaste lösningen. Av all energi från biogasen omvandlas bara cirka 1/3 till mekanisk energi. Resten blir spillvärme, som också kan återvinnas och användas för uppvärmning.

För att omvandla biogas till *drivmedel* för fordon krävs ytterligare rening av biogasen genom att skilja bort koldioxid och svavelväte. Uppgraderad biogas är ett rent och förnybart fordonsbränsle. Den biogas som erhålls från reningsverk är ofta av hög kvalitet jämfört med biogas som produceras på andra sätt. En förutsättning för att öka användningen av biogas som fordonsbränsle är ett rimligt pris och god tillgänglighet. Skall biogasbilar kunna användas i större utsträckning måste det alltså finnas en större tillgång till tankstationer. Vid exempelvis Bromma reningsverk har man byggt gaslager för uppgraderad biogas och tankningsplatser, vilket gett lyckade resultat.

De ökande energipriserna motiverade SYVAB (Himmerfjärdsverket) till ett samarbete med Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation (IEA) vid Lunds Tekniska Högskola redan 2006 (Gunnarsson et al. 2008). Vid SYVAB har man tillsammans med LTH utvecklat en energibalansmodell för att beräkna bästa möjliga användning av energin. Här ingår viktiga komponenter som biogasproduktionen, värmebehovet för slamtorkningen, värmebehovet för uppvärmning av byggnader, skatteregler, elpriset, oljepriset och marknaden för biogasen. På det sättet kan man beräkna inte bara en förnuftig energibalans utan också olika ekonomiska utfall av olika strategier.

Värmeenergi och elenergi för en gasmotor

En gasmotor levererar cirka 2 kW värme för varje levererad kW el (med en gasmotorverkningsgrad på cirka 30%). Man kan räkna med att cirka 90% av energiinnehållet i gasen som tillförs motorn kan utnyttjas som mekanisk och termisk energi.

Värmen från gasmotorn återfinns dels i motorns avgaser (med en temperatur på 500–600°C) dels i kylvattnet (med en temperatur på cirka 100°C). Gasmotorn utnyttjar cirka 0,5 Nm³ för att producera 1 kWh elenergi. Då har vi räknat med att rötgasen har ett energiinnehåll på cirka 6,7 kWh/Nm³

Slamproduktion

Som vi redan diskuterat kan man ta många viktiga steg för att optimera energibalansen i slambehandlingen:

- *Försedimenteringen*: man kan avskilja mer slam i försedimenteringen. Detta medför att mindre organiskt material kommer till biosteget, vilket kan minska elförbrukningen. Då har man alltså valt att använda kolkällan för att producera biogas, vilket kan medföra att det inte finns tillräckligt med organiskt material i fördenitrifikationsprocessen.
- *Förtjocka inkommande slam till röt-kammaren*: med en effektivare avvattning av slammet minskar man den mängd slam som behöver värmas upp i röt-kammaren. Därmed minskar volymen inkommande slam till röt-kammaren och som ett resultat kan uppehållstiden ökas. Detta gör att biogasproduktionen kan ökas och det går därmed att tillföra mer organiskt material.
- *Uppvärmning av slam*: genom att ta tillvara värmeinnehållet i utgående slam kan man åstadkomma en förbättrad energibalans över röt-kammaren.

En effektivare rötning innebär dels minskade slammängder att avvattna och avyttra, dels en ökad produktion av biogas. Sett ur ett isolerat energiperspektiv verkar det rättframt att man skall öka biogasproduktionen så långt det går, t.ex. med fast organiskt avfall. Då är det dock väldigt viktigt att komma ihåg att en ökad belastning också medför en ökning av volymen *rejektvatten*, vilket normalt sett innehåller höga koncentrationer av ammoniumkväve. När rejektvattnet recirkuleras till början av reningsverket bidrar därför kvävebelastningen från rejektvattnet till en betydande del av den totala belastningen. Vad som man därmed vinner i energi från biogasen kan förloras i den energi som krävs för att lufta mer i biosteget. Exemplet visar att det är vitalt att ha en *integrerad* syn på energibalansen i verket. Annars är risken uppenbar för suboptimeringar.

8 Begränsning av effekttoppar

Den totala elenergikostnaden som debiteras av kraftföretagen består av tre delar:

- En fast kostnad (kronor per år)
- En effektkostnad (kronor per använd kW)
- En energikostnad (kronor per kWh)

För en stor konsument är den fasta kostnaden bara en liten del av den totala elkostnaden. Ju större del som den fasta kostnaden är av den totala kostnaden, desto mindre incitament har man naturligtvis att spara på energin.

Effektkostnaden är en kostnad per kW. Oftast har man som industriell kund en taxa för sommaren och en annan för vinterperioden (november–mars). Anledningen till denna kostnad är att effektuttaget för en industri bestämmer hur stor kapacitet som eldistributionen till industrin måste ha. Eftersom den totala efterfrågan på el är större under vintern så är det naturligt att effektpiserna blir högre på vintern än på sommaren.

En typisk effektkostnad kan vara 85 kr/kW på sommaren och en *ytterligare* kostnad på 160 kr/kW på vintern.

I många sammanhang kan man begränsa effektuttaget, med andra ord minska huvudsäkringen. Det är mycket sällan som ett verk måste utnyttja all installerad elkapacitet samtidigt. Om t.ex. alla pumpar måste användas vid ett kraftigt regn kan kanske andra maskiner tillfälligt begränsas. Måste luftningen vara maximal just då? Kan några andra konsumenter begränsas?

En minskning av maximala uttaget med 100 kW under vinterhalvåret motsvarar alltså $(85+160) \cdot 100 = 24\,500$ SEK. Denna summa är naturligtvis intressant, men oftast är den betydligt lägre än den energikostnad som verket har. Detta gör att man kanske är mindre intresserad av större effektbegränsningar, eftersom det också kan minska handlingsfriheten vid stora störningar.

Det kan dock löna sig att göra en noggrannare analys av hur stor effekt som man använt i verket under ett år. Följer man effektuttaget timme för timme (man beräknar i dessa sammanhang timmedelvärdet) så visar det sig ofta att det totala effektuttaget varit lägre än den installerade effekten. Mellanskillnaden betyder att man betalat en effektkostnad som varit onödigt hög.

Man måste dock komma ihåg att kostnaderna kan vara stora, om man skulle överskrida det överenskomna effektuttaget, även om det sker under en kort tid. Ett exempel från Himmerfjärdsverket kan illustrera detta. Under vintern blir straffkostnaden för varje kW utöver den överenskomna gränsen 1,5 gånger effektkostnaden. Under en period med kraftiga regn under sommaren 2005 tvingades verket under 4 timmar överskrida effektgränsen 4,0 MW till maximalt 4,7 MW. Kostnaden för detta blev 120 000 kr (Andersson-Holmberg 2006).

Effektbegränsningar - sammanfattning

Man bör analysera om verket utnyttjar all effekt upp till det överenskomna effekttaket. Ett minskat effekttag kan ge vissa besparingar, men de är betydligt mindre än möjliga energibesparingar som diskuterats i tidigare kapitel. Om en begränsning av effekttaget skulle innebära en ökad risk för försämrat reningsresultat är det tveksamt om man skall genomföra effektstyrningen.

Det finns idag flera kommersiella styrsystem för att utföra effektbegränsningar. Ett sådant system ser till att det totala effekttaget aldrig överstiger den överenskomna gränsen. Alla effektförbrukare (alltså laster inom verket) delas upp i kategorier med olika prioriteter. Systemet kan då automatiskt besluta att inte koppla in lägre prioriterade laster under en hög belastningsperiod. Ett sådant system kan antingen vara en del av själva styrsystemet eller installeras som ett separat system. I alla lägen förutsätter detta att man kan mäta effekten i systemet.

Ett välplanerat lastbortkopplingssystem kan spara energi utan att det medför några allvarliga processtekniska bekymmer. En kortare minskning av luftningen eller av omrörningen kan ha stor betydelse för effekten men mindre negativ påverkan på reningsresultatet. Vidare är det ofta möjligt att tillfälligt minska ventilationen i tunnlar eller lokaler.

9 Utbyte av erfarenheter

Hur skapar vi incitament att bli bättre?

Det finns en väldigt hög kompetens bland personalen ute på våra reningsverk. Mycket av innehållet i denna skrift är antagligen välkänt för många. Därför måste man reflektera över varför många förslag inte genomförs. Här kommer incitamenten in. På vilket sätt belönar vi goda förslag? Hur ofta möts vi av NIH-faktorn (not invented here)?

När energipriserna går upp kommer drivkrafterna att effektivisera driften att bli större. Dock skall vi aldrig glömma bort att frågorna inte bara är tekniska. Människans roll i sammanhanget är minst lika viktig. Alltför många goda förslag har begravts på grund av ointresse från ledningen.

Risker

Målet med energioptimering är ju att minska kostnaderna och ibland medför detta att man minskar säkerhetsmarginalerna. Syrereglering ser till att organismerna får bara den mängd syre som de behöver för tillfället, men inte mer. Ett fungerande system förutsätter då förstås att instrumentering och reglering fungerar, att kompressorerna inte går sönder etc. Ur risksynpunkt vore det enklare att alltid lufta med överkapacitet, men kostnaden skulle inte vara acceptabel.

Kemikaliedosering kan naturligtvis göras med stora säkerhetsmarginaler, men kostnaderna är stora i form av både kemikalier och mer slamproduktion.

En gasmotor kan gå sönder och därför måste finnas en tillräcklig reservkapacitet i form av elektriskt drivna kompressorer. Den överskottsvärme som kommer via gasmotorn måste då ersättas med andra värmesystem.

Det finns också andra typer av energieffektivisering som inte reducerar säkerhetsmarginalerna. Att leverera gas till en extern användare i stället för att fackla den är ett exempel.

10 Slutsatser

För att driva ett verk mer effektivt måste man först definiera några olika mått på effektiviteten. Det måste alltså finnas något kriterium eller nyckeltal för verket som kan ge ett värde på hur energin används och hur driften av verket utvecklas. Nyckeltal kan ju användas både för att visa hur det egna verket utvecklas och för att jämföra det egna verket med andra verk.

- **Lönsamhet:** förbättringar i form av effektivare drift måste löna sig. Vi har visat att i vissa fall måste man investera i *ny utrustning* för att öka effektiviteten. I andra fall kan man göra driften effektivare med *styrning och reglering*. Också det innebär investeringar i form av instrument och ställdon.
- **Produktion av energi** måste förstås också bli lönsam. Kan man sälja biogasen med vinst? I vilken form skall biogas säljas: som värme, som biogas för uppvärmning, som el eller som fordonsbränsle?
- **Pumpning** innebär en betydande användning av elenergi. Därför måste man extra noga se till att den är effektiv. Det är förstås vitalt att välja pumpar som har en god *verkningsgrad* vid de vanligast förekommande flödena. Dessutom öppnar *varvtalsreglering* många möjligheter, inte bara till ökad effektivitet, utan också drift med mindre slitage, inte minst vid start och stopp. En ytterligare fördel är att en mjukare pumpning bidrar till bättre processbeteende. Samtidigt är det viktigt att komma ihåg att varvtalsregleringen måste ses i samma sammanhang som verkningsgraden. Man får inte frestas att tro att varvtalsreglering kan ersätta fel dimensionering av pumparna.
- **Luftning:** en möjlighet att kontinuerligt variera mängden luft är en grundförutsättning för syrereglering. Det betyder att kompressorna måste vara styrbara inom intressanta driftområden för att kunna åstadkomma en bättre styrning.
- **Syreregleringen** är av fundamental betydelse för energibalansen i verket, för organismernas aktivitet och därmed biologiska delens reningsresultat och för organismernas sammansättning, vilket också påverkar sedimenteringen. En adekvat kapacitetsreglering av kompressorer är avgörande för en god syrereglering. Vid syreregleringen kan man dessutom både *beräkna* önskat värde för syrekoncentrationen och tillåta *variabelt* tryck för att minska energikonsumtionen.
- **Energien för omrörning** får inte försummas utan kan vara en stor del av energikostnaderna.
- **Slambehandlingen** kan kraftigt påverka energianvändningen och energiproduktionen. En första fråga är hur försedimenteringen utnyttjas för att avskilja organiskt material. Skall man maximera mängden organiskt material som skickas till rötkammaren? Energianvändningen påverkas också kraftigt av hur slambehandlingen innan rötkammaren görs. Ett mer koncentrerat slam tar en mindre volym och kräver t.ex. mindre energi för uppvärmning.
- **Kemikaliedosering** kan göras mer effektiv om man kan mäta koncentration av fosfat. Ibland kan det ge goda resultat att beräkna fos-

fathalten via TS-mätningar. En reglering av doseringen baserad på fosfatkoncentration kan medföra betydande sänkning av kostnaderna för fällningskemikalier.

- **Biogas:** på många verk finns en stor potential för större produktion av biogas. Eftersom intresset för biogasproduktion är kraftigt ökande bör detta ägnas en allt större uppmärksamhet. Möjligheten att utnyttja biogas som fordonsbränsle kan ge en helt annan lönsamhet för produktionen.
- **Värmeinnehållet i utgående vatten** är en annan viktig energikälla. Det förutsätter dock att det går att sälja energin på plats.

Vi har också påpekat att ett optimerat system är mer känsligt för störningar, både i form av interna störningar i verket och i form av utrustning som kan tillfälligt gå sönder eller haverera. Avvägningen mellan att göra systemet optimalt och lite mer okänsligt för störningar (alltså mer robust) är ingen enkel ekvation utan bjuder hela tiden på nya utmaningar.

Det finns både många enkla lösningar och flera mer sofistikerade tekniska lösningar för att åstadkomma en mer effektiv drift. Många av dessa lösningar är redan välkända av en mycket kompetent personal. Den stora utmaningen är att också motivera varje anställd vid verket att göra sitt bidrag till en lönsammare drift. Hur vi skapar dessa incitament får bli föremål för nästa diskussion.

Mer att läsa

Under senare år har flera intressanta examensarbeten genomförts vid svenska reningsverk kring temat energi och effektivisering:

- Andersson-Holmberg (2006), Himmerfjärden (SYVAB) i samarbete med Lunds tekniska högskola
- Jonasson (2007), svenska och österrikiska reningsverk i samarbete med Lunds tekniska högskola
- Magnusson (2006), Käppalaverket i samarbete med KTH
- Thunberg (2007), Käppalaverket i samarbete med Uppsala universitet
- Ugrenovic (2007), Kungsängsverket (Mälarenergi) i Västerås i samarbete med Mälardalens högskola

Examensarbetet av Andersson-Holmberg (2006) har lett vidare till en energianalys vid Himmerfjärdsverket, som rapporterats bl.a. av Gunnarsson m.fl. (2008).

Svenskt Vatten har stött flera arbeten kring energikonsumtion i reningsverk, såsom

- Kjellén-Andersson (2002)
- Lingsten-Lundkvist (2008)

Litteratur

Alegre H., Baptista J.M., Cabrera Jr E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W. & Parena R. (2006). *Performance Indicators for Water Supply Services*, 2nd ed., ISBN 1843390515, IWA Publishing, London, UK.

Andersson, Robert & Mats Holmberg (2006). *Energy conservation in wastewater treatment operation – a case study at Himmerfjärden WWTP*, Examensarbete, Inst. för industriell elektroteknik och automation, Lunds tekniska högskola, Lund (tillgänglig via www.iea.lth.se).

Cecil, David (2006). *The Redox Potential in Activated Sludge*. Doktorsavhandling, Syddansk Universitet, Odense (i samarbete med Odense Water Ltd. och Krüger Company), Danmark

Gryaab AB (2007). Driftskostnader. Intern rapport 2007.

Gunnarsson, Lars, Malin Tuveusson, Mats Holmberg & Christian Rosen (2008). Swedish utility achieves energy balance. *World Water and Environmental Engineering*, vol. 31, issue 2, April 2008.

Ingildsen, Pernille, Paul Lant & Gustaf Olsson (2001) Benchmarking Plant Operation and Instrumentation, Control and Automation in the Wastewater Industry. Proc. from *Second IWA World Congress*, Berlin, Germany, October 15-19, 2001.

Ingildsen, Pernille (2002). *Realising Full-Scale Control in Wastewater Treatment Systems Using in Situ Nutrient Sensors*. Doktorsavhandling, Inst. för industriell elektroteknik och automation, Lunds tekniska högskola, Lund (tillgänglig via www.iea.lth.se)

Jonasson, Malin (2007) *Energy benchmark for wastewater treatment processes – a comparison between Sweden and Austria*. Examensarbete, Rapport TEIE-5247, Industriell elektroteknik o automation, Lunds Tekniska Högskola, Lund (tillgänglig via www.iea.lth.se).

Kjellén Börje J. & Ann-Carin Andersson (2002). *Energihandbok för avloppsreningsverk*, VA-Forsk report nr 2002-2, Svenskt Vatten.

Lindtner S., F. Lehner, T. Ertl & F. Murnig (2007). *Öffentlicherbericht; Benchmarking für Kläranlagen, Geschäftsjahr 2005*, Austria (in German).

Lingsten, Anders & Mats Lundkvist (2008). *Nulägesbeskrivning av VA-verkens energianvändning*. Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2008-01

Lumley, Doug (2001) On-line instrument confirmation. How can we check that our instruments are working? 1st *IWA conference on Instrumentation, Control and Automation*, Malmö, juni 2001

Magnusson A.S. (2006). *Streamlining of electricity energy at Käppala-verket*, Examensarbete, KTH, Stockholm.

Ny Teknik (2008). Nr 21, 21 maj 2008, Nr 23, 4 juni 2008.

Olsson, Gustaf. & Bob Newell (1999). *Wastewater Treatment Systems. Modelling, Diagnosis and Control*. IWA Publishing, London.

Olsson, Gustaf, Marinus K. Nielsen, Zhiguo Yuan, Anders Lynggaard-Jensen & Jean-Philippe Steyer (2005) *Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Treatment Systems*. Scientific and Technical Report No.15, IWA Publishing, London, UK.

Svenska vatten- och avloppsverksföreningen (1988). VAV-P58, *Tryckslag i VA-anläggningar, Orsaker - beräkningsmetoder - skyddsåtgärder - mätningar*. Stockholm: Svensk Byggtjänst.

Thunberg, Andreas (2007). *Energieffektivisering av luftningssteget på Käppalaverket, Lidingö*. Examensarbete, Uppsala Universitet.

Ugrenovic Goran (2007). Energy efficiency improvements at the waste water treatment plant at Mälarenergi, Examensarbete, Mälardalens högskola, Västerås

ABS Group, technical support for wastewater
<http://www.absgroup.com/>

**Kontaktpersoner som på olika sätt
bidragit med information och konstruktiv kritik:**

- Andersson (2008). Bengt Andersson, VA SYD
- Aspegren (2008). Henrik Aspegren, VA SYD
- Brink (2008). Bo Brink, Laholms VA-verk (www.brink.just.nu)
- Lumley (2008). Doug Lumley, Gryaab AB, Göteborg
- Lundkvist (2008). Mats Lundkvist, SWECO Environment AB, Halmstad, Sweden.

- Mattiasson(2008). Bo Mattiasson (2008), professor i bioteknik, Lunds tekniska högskola.
- Persson (2008). Rolf Persson, Töreboda
- Sundgren (2008). Harry Sundgren, Hach-Lange, Sverige
- Sundin (2008). Anna Maria Sundin, Käppalaverket, Lidingö, Sweden.
- Tu vesson (2008). Malin Tu vesson, SYVAB, Grödinge, Sweden.
- Wett (2008). Bernhard Wett, Dept of Environmental Engineering, University Innsbruck, Austria.



Box 47607, 117 94 Stockholm
Tel 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
E-post svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se