UPTEC W 19042
Examensarbete 30 hp
Juni 2019

UPPSALA
UNIVERSITET

Styrning av biologisk kväverening anpassat efter tidsvarierande elpris

Johan Sund

REFERAT

Styrning av biologisk kväverening anpassat efter tidsvarierande elpris

Johan Sund

Elbehovet för reningsverk varierar då inflödet följer samhällets dygnsmönster, vilket gör att de flesta verk använder mest el under dagtid då marknadspriset på el är högt. Att *anpassa driften efter prisets variation* är en idé som funnits länge, men det finns få publicerade studier. Det har föreslagits att inflödet kan omfördelas över dygnet med ett utjämningsmagasin. En studie visade 16 % minskning i elkostnad vid utjämning till konstant flöde. Syresättning genom luftning står för majoriteten av elbehovet. Anpassning av luftning har föreslagits, men det krävs hänsyn till utsläppsvillkor, särskilt för kväve, då större verk ofta är utrustade med kväverening. I denna studie användes en avskalad variant av Benchmark Simulation Model no. 1, med en bassäng, för att utvärdera potentialen för anpassning efter elpris. Luftningen optimerades (genom *optimal styrning*) för minimal elkostnad givet en elprisprofil för ett dygn, med bivillkor för ammoniumutsläpp. Elkostnaden minskade med 1 till 2,5 % i jämförelse med energioptimal styrning. Utjämning till konstant flöde gav en energibesparing på 2,5 till 12 %, och kostnadsbesparing på upp till 5 % utöver energibesparingen. Med styrning av magasin anpassat efter elpris var besparingen ytterligare 1-3 %. Nitrifikations-processens hastighet är känslig för syre- och ammoniumkoncentration. Detta gör det svårt att omfördela nitrifikationen, något som blir särskilt tydligt för en modell med en bassäng. Det är därför motiverat att vidare undersöka en modell med fler bassänger.

Nyckelord: Biologisk kväverening, optimering, luftning, utjämning, magasin, efterfrågerespons, nitrifikation

Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet, Box 337, SE-75105 Uppsala

ISSN 1401-5765

ABSTRACT

Control of biological nutrient removal adapted to time-varying electricity price

Johan Sund

The electricity demand of a waste water treatment plants follows the diurnal pattern of society, and this generally leads to higher demand when the market price is high. The possibility to *adapt the operation after price variation* has been known since long, but few studies have been published. It has been suggested that the influent can be redistributed using an equalization basin, and one study showed 16 % reduction in cost with *equalization to constant flow*. Oxygen supply by aeration uses the major part of electricity, and adaptation of aeration intensity has also been suggested. However, this requires respect for effluent limits, especially for nitrogen, as larger plants are often equipped with nitrogen removal. In this study, *optimal control* of aeration was used to evaluate the potential of adapted aeration. Use of an equalization basin was also studied. A reduced version of Benchmark Simulation Model no. 1 was used, with only one basin. Aeration was optimized for minimal cost given a price profile for 24 hours, under a constraint on ammonia discharge. Cost was reduced with 1-2.5 % compared to energy-optimal control. Constant flow equalization showed an energy reduction of 2.5-12 %, and a cost reduction of additionally up to 5 %. Control adapted after price gave another 1-3 % savings. The nitrification process is sensitive to oxygen and ammonia concentration. This makes it difficult to redistribute nitrification over the day, especially with a one basin model. It is therefore motivated to study a model with more basins.

Keywords: Biological nutrient removal, optimization, demand response, aeration, equalization, retention basin, nitrification

Department of Information Technology, Uppsala University, Box 337, SE-75105 Uppsala

ISSN 1401-5765

FÖRORD

Detta examensarbete utfördes baserat på ett förslag från Bengt Carlsson, som också haft rollen som handledare. Idén att undersöka anpassning efter varierande elpris är inspirerad av tidigare studier vid institutionen för informationsteknik. Metodiken med optimering bygger vidare på studier med energioptimal luftning som genomförts av Linda Åmand, som delade med sig av modeller och material som underlättade uppstarten av detta arbete. Ett särskilt tack riktas till handledare Bengt Carlsson, och till ämnesgranskare Hans Rosth, båda vid institutionen för informationsteknologi.

Copyright © Johan Sund och Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet.
UPTEC W 19042, ISSN 1401-5765.
Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2019.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

För kommunala reningsverk utgör el en stor del av driftkostnaden, och den största delen av elen används för luftning i det biologiska steget i reningsprocessen. Elbehovet varierar över tiden, och särskilt över dygnet, då inflödet till verket följer samhällets dygnsrytm. Det gör att de flesta verk har högst elbehov under dag och kväll, då elen är som dyrast. Att anpassa driften av reningsverket efter elprisets variation är en idé som har funnits länge, men det finns ändå bara ett fåtal publicerade studier på ämnet. Det har föreslagits att inflödet till reningsverket kan utjämnas med ett magasin, så att flödet omfördelas mot tider med lågt elpris. En tidigare modellbaserad studie om detta visade en besparing i elkostnad på 16 %. Det har också föreslagits att luftningen borde kunna anpassas efter elpris, men här finns en utmaning i att reningens resultat är känsligt för variationer i luftning. Villkor för utsläpp måste hållas vid försök att minimera elkostnad. I detta arbete undersöktes båda nämnda möjligheter till anpassning efter elpris, med hjälp av en modell för reningsprocessen och en optimeringsmetodik.

Avloppsvatten innehåller en mängd föroreningar som måste renas bort till hög grad. Organiskt material förbrukar syre vid nedbrytning av mikroorganismer, både i naturen och i reningsverk. Näringsämnen, främst kväve och fosfor, bidrar till övergödning av vattendrag. Ett reningsverk består av flera steg, däribland sedimentering, biologisk rening och kemisk fällning. Det biologiska steget är ofta en så kallad aktivslamprocess, där en hög halt mikroorganismer hålls aktiva i stora bassänger genom att syre tillförs kontinuerligt. I aktivslamprocessen avskiljs både organiskt material och kväve. Det första steget i kväverening är nitrifikation, där en viss typ av mikroorganismer omvandlar ammonium till nitrat. Nitrifikation förbrukar syre, och hastigheten för processen beror på både syre- och ammoniumkoncentration.

Processen kan styras genom att välja luftflöde till olika zoner. Den klassiska strategin för luftning är att reglera syrehalten till ett konstant värde, vanligen 2 mg per liter. Det finns vidareutvecklingar där syrehalten varieras för att få samma rening vid mindre energibehov. Det finns idag god förståelse för vad som händer i aktivslamprocessen, som har använts för att bygga upp matematiska modeller som kan användas bland annat vid utvärdering av strategier för att styra processen. En avskalad version av en mycket använd processmodell användes i denna studie.

Optimering av luftning för att minimera elkostnad undersöktes med en metod som bygger vidare på tidigare studier, där energibehov minimerats. Resultaten visade relativt liten kostnadsbesparing vid optimal luftning, mellan 1 och 2,5 %. Utjämning av flöde undersöktes med en modell för ett utjämningsmagasin och enkla strategier för att välja utflödet från magasinet, d.v.s. inflödet till aktivslamprocessen. Utjämning till konstant flöde gav en energibesparing på 3 till 13 %. Med hänsyn till varierande elpris gav konstant flöde en ytterligare kostnadsbesparing på upp till 5 procentenheter, när högt elpris sammanföll med inflödets topp. När magasinets utflöde styrdes anpassat efter elpris blev kostnadsbesparingen ytterligare 1 till 3 procentenheter.

Förklaringen till den något begränsade besparingen ser ut att finnas i nitrifikationsprocessens beroende på syre- och ammoniumkoncentration. Vid försök att omfördela nitrifikationen över dygnet genom att variera syrehalten påverkas också ammoniumkoncentrationen, vilket motverkar förändringen i nitrifikation. Detta

tillsammans med att nitrifikationens beroende på syrehalt är olinjär gör det svårt att variera luftningen alltför mycket utan att kraftigt öka energibehovet. En viktig förenkling i studien ser också ut att ha stor betydelse. Modellen byggdes upp med bara en enda luftad bassäng. Eftersom utsläppet sker från den enda bassängen måste ammoniumkoncentrationen hela tiden vara relativt låg, för att klara det uppställda utsläppskravet. Sammanfattningsvis tyder resultaten på att potentialen för att spara in på elkostnad genom anpassning efter elpris är låg, men det kan vara intressant att undersöka vad som händer för en modell med fler bassänger.

INNEHÅLL

1. INLEDNING 1
1.1. SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR 2
2. BAKGRUND 3
2.1.1. Variation i inflöde, process och utsläpp 4
2.2. AKTIVSLAMPROCESSEN 5
2.2.1. Biologisk kväverening 6
2.2.2. Luftning och syreöverföring 7
2.2.3. Styrning av luftning 9
2.2.4. Utjämningsmagasin 11
2.3. MODELLERING AV AKTIVSLAMPROCESSER 13
2.3.1. Aktivslammodellen ASM1 13
2.4. OPTIMAL STYRNING 15
2.4.1. Numerisk lösning med parameteroptimering (CVP) 16
2.4.2. Optimering av aktislamprocesser 17
2.5. ELKOSTNAD OCH TIDSVARIERANDE ELPRIS 18
2.5.1. Energiavgift vid tidsvarierande elpris 19
2.5.2. Effektavgift 20
2.5.3. Anpassning av drift efter energipris 21
2.6. TIDIGARE STUDIER 21
2.6.1. Magasinering som anpassning till varierande elpris 21
2.6.2. Elkostnad för olika luftningsstrategier 22
3. METOD 23
3.1. PRISPROFIL, INFLÖDE, SCENARION, PROCESSMODELL 23
3.1.1. Scenarion 24
3.1.2. Processmodell 24
3.2. DELSTUDIE 1: KOSTNADSOPTIMAL LUFTNING 25
3.2.1. Optimeringsproblemet 26
3.2.2. Kombinationer av prisprofil och scenario 26
3.3. DELSTUDIE 2: ANVÄNDNING AV UTJÄMNINGSMAGASIN 26
3.3.1. Modell för magasin 27
3.3.2. Strategier för val av styrsignal till magasinet 27
4. RESULTAT 29
4.1. ENERGIOPTIMAL LUFTNING 29
4.2. DELSTUDIE 1: KOSTNADSOPTIMAL LUFTNING 30

4.2.1. Sinusformad prisprofil 31
4.2.2. Prisprofil med spik 32
4.2.3. Stegformad prisprofil 32
4.2.4. Sammanfattning delstudie 1 35
4.3. DELSTUDIE 2: ANVÄNDNING AV UTJÄMNINGSMAGASIN 36
4.3.1. Energibesparing 36
4.3.2. Kostnadsbesparing 37
5. DISKUSSION 41
5.1. ANPASSAD LUFTNING 41
5.2. MAGASIN 41
5.3. SAMMANFATTNING 42
6. SLUTSATSER 43
7. REFERENSLISTA 44

1. INLEDNING

Kostnaden för el har blivit allt viktigare för reningsverk, i takt med ökande elpriser och striktare utsläppskrav. På elmarknader finns nu en utveckling mot att ta olika mycket betalt för el beroende på vilken tid på dygnet den köps. Det är något som hittills fått lite uppmärksamhet gällande drift av reningsverk, men kan innebära en möjlighet att minska elkostnaden om driften kan anpassas efter gällande priser (Aymerich m.fl. 2015). Ett reningsverks elbehov varierar över dygnet, som en följd av att samhällets dygnsmönster ger en variation i inkommande flöde av föroreningar och vatten. Variationen liknar den för samhällets efterfrågan på el, och belastningen är därför ofta hög vid samma tider som elpriset är högt. Det har föreslagits att magasin kan användas för att förskjuta inkommande flöde mot tider med lägre elpris. Trots att idén är enkel, och troligen lika gammal som tidsvarierande elpris, så finns det få publicerade studier. Leu m.fl. (2009) studerade förskjutning av inkommande flöde med en förenklad modell och visade resultat med 16 % besparing i elkostnad. Det har också föreslagits att luftningen borde kunna anpassas efter elpris. Gällande båda dessa möjligheter finns det dock få publicerade studier (se t.ex. Aymerich m.fl. 2015; Bjerg m.fl., 2015).

Reningsverk kan idag vara både konsumenter och producenter av energi. El används för att driva blåsmaskiner, pumpar och övrig utrustning. Energi kan produceras i form av biogas genom rötning av slam och i form av värme utvunnet från utgående vatten. Att det finns en viktig koppling mellan vatten, avlopp och energi har betonats av bl.a. Olsson (2008). Inkommande avloppsvatten syresätts i stora bassänger genom tillförsel av luft (luftning). Luftning utgör 40 till 70 % av det totala elbehovet, vilket ger en elkostnad i storleken upp emot 50 % av totala driftkostnaden (Olsson m.fl., 2008). Idag är större reningsverk som regel utrustade med biologisk kväverening, vilket gör att omvandlingen av ammonium till nitrat (nitrifikation) får en central roll.

Luftningens intensitet anpassas idag vanligen för att hålla en önskad konstant syrehalt (börvärde) i bassängerna i det biologiska steget, ofta ca 2 mg/l. Anpassningen görs automatiskt av en regulator som väljer ventilläge för de luftledningar som går till olika bassänger. En energibesparande vidareutveckling bygger på att variera syrehalten baserat på uppmätt ammoniumhalt. Denna typ av ammoniumbaserade styrstrategier kan betraktas som nuvarande state-of-the-art inom luftning för kväverening (Åmand m.fl. 2013a). Det finns idag möjlighet och erfarenhet av att styra med varierande syrehalt, och det finns alltså instrument för att anpassa luftning efter elpris.

Att utvärdera effekten av en föreslagen styrstrategi är inte helt enkelt för reningsverk, där inflödet är en störning som aldrig riktigt följer samma mönster och där inte heller två parallella linjer i processen fungerar helt på samma sätt. Det är idag vanligt att modeller används för att jämföra olika styrstrategier. En processmodell utvecklad för detta syfte är Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1) som representerar ett typiskt reningsverk med biologisk kväverening (Copp, 2002).

Det går att argumentera för att jämförelse av styrstrategier för luftning kan baseras på kombinationen av två mått:

1) Mängden utsläppt ammonium
2) Mängden elenergi använd för luftning

I en simuleringsstudie är det möjligt att hålla mängden utsläppt ammonium på samma nivå för de strategier som jämförs, genom att iterativt anpassa börvärden och/eller parametrar. Skillnaden mellan två strategier ligger då endast i energibehov, som då kan sägas vara ett rättvist mått på hur mycket bättre en strategi är jämfört med en annan.

För en simulering över ett tidsintervall, t.ex. ett dygn, finns det en styrsignal som ger det *minsta möjliga energibehovet* samtidigt som den håller utsläpp av ammonium på en given nivå. Med hjälp av matematisk optimering är det möjligt att söka denna optimala styrsignal, vilket har demonstrerats av Åmand & Carlsson (2013b). Om målet ändras till att *minimera elkostnad* så fås ett verktyg för att uppskatta potentialen för kostnads-besparing vid anpassning av luftning efter varierande elpris.

Att optimera styrsignalen till ett dynamiskt system är ett problem i *optimal styrning* (se t. ex. Bryson 1999). För luftning finns ett fåtal studier med denna typ av optimering, men ett antal närliggande problem har behandlats (Hreiz m.fl., 2015). En optimal styrsignal kan användas vid utveckling av praktiskt användbara styrstrategier och ger även ett mått på den teoretiska potentialen för energibesparing (Banga m.fl. 2003).

1.1. SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR

Det övergripande syftet med examensarbetet är att undersöka om det är möjligt att minska elkostnaden på reningsverk med biologisk kväverening genom att anpassa driften efter tidsvarierande elpris.

Två olika möjligheter till anpassning ska studeras:

1. Optimering av lufttillförseln under ett dygn så att elkostnaden minimeras, under bivillkoret att utsläppt mängd ammonium hålls på ett givet värde.
2. Användning av ett magasin för att förskjuta delar av inkommande flöde mot tider på dygnet med lägre elpris.

Undersökningen ska utföras med en avskalad variant av processmodellen BSM1 och Matlab Simulink. En av metoderna som ska användas är matematisk optimering av styrsignalen för luftning (optimal styrning).

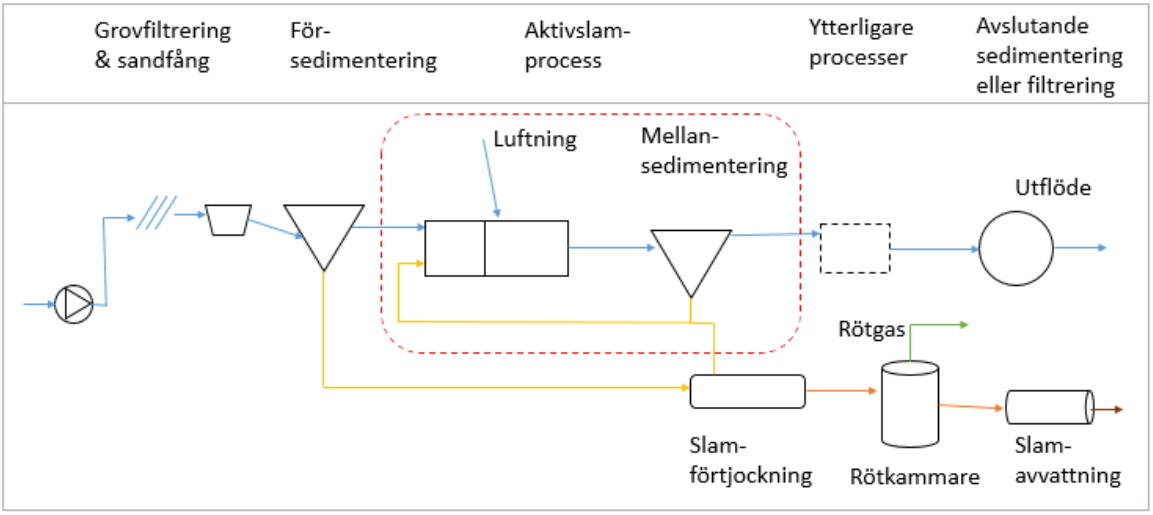
Arbetet har ett antal avgränsningar:

- Endast inflödesvariationer vid torr väderlek undersöks.
- Inkommande flöde och ammoniumkoncentration antas tillsammans med elpriset vara känt 1 dygn framåt.
- Anpassning över ett dygn undersöks.
- Studien utförs med en enda luftad bassäng. Tidsvariationen undersöks men alltså inte variationen längs med en linje av bassänger/zoner.
- Effektavgift behandlas endast kortfattat, fokus ligger på att minimera den större delen av elkostnaden som kommer från energipriset.

2. BAKGRUND

Avloppsvatten innehåller ett stort antal ämnen, varav en del måste renas bort innan utsläpp i mottagande vattendrag. Dessa ämnen kan med analysmetoder delas in i olika klasser efter fysikaliska och biokemiska egenskaper. En enkel uppdelning är mellan lösta och partikulära ämnen. I detta arbete är det ett fåtal ämnen som är av intresse: ammonium, syre, nitrat och organiskt material. Mängden organiskt material mäts och anges i hur mycket syre som åtgår vid nedbrytning. Ett mått är Chemical Oxygen Demand (COD), som anger syreåtgången (mg/l) vid oxidering av det organiska materialet med en kemisk reagent (se t.ex. SVU, 2010).

För att effektivt ta bort föroreningar är reningsverk indelade i flera steg som använder fysiska, kemiska och biologiska processer, däribland sedimentering, kemisk fällning och nedbrytning med mikroorganismer. Det centrala steget för avskiljning av organiskt material och kväve är vanligen *aktivslamprocessen* (ASP), vars placering visas i Figur 1. Eventuella utjämningsvolymer kan vara en bassäng mellan försedimentering och det biologiska steget, eller finnas i form av en tunnel före inloppspumpning.



Figur 1. Vanligt upplägg för ett kommunalt reningsverk. Röd markering ringar in aktivslamprocessen, som innefattar ett antal luftade bassänger och sedimentering. Anpassat efter Åmand (2014).

I inflödet till en ASP är *COD* vanligtvis i intervallet 200 till 400 mg/l, och totala kvävekoncentrationen i storleken 40 mg/l (US EPA, 2010). Kväve mäts och anges uppdelat i ett antal fraktioner. Ett exempel ges i Tabell 1.

Tabell 1. Exempel på fördelning mellan olika kvävefraktioner för inflöde till en ASP, och i renat utflöde. Värden är sammanställda från en publikation av US EPA (2010)

	Beteckning	**Konc. i inflöde (mg N/l)**	**Andel i inflöde**	**Konc. i utflöde (mg N/l)**
Ammonium- och Ammoniakkväve	NH_x-N	32	80 %	2
Nitrit- och nitratkväve	NO_x-N	0	0 %	6
Organiskt bundet kväve	Org-N	8	20 %	1
Totalkväve	Tot-N	40	100 %	9

Organiskt material bryts ner av mikroorganismer i naturen eller i reningsverket, i första hand med hjälp av syre. Utsläpp av *COD* har en syretärande effekt som kan orsaka skador på ekosystemet i det vatten som tar emot utflödet. Utsläpp av alla former av kväve bidrar till övergödning, och ammonium har också en syretärande effekt.

2.1.1. Variation i inflöde, process och utsläpp

Reningsverk utsätts för stora variationer inom dygnet i inkommande flöde och föroreningar i detta *inflöde*. Ett exempel ges i Figur 2. Mellan olika verk kan det vara stor skillnad i hur mycket inflödet varierar, något som ger olika förutsättningar för att driva reningsprocesser. Det har också betydelse hur inflödet fördelar sig över dygnet, särskilt när tidsvarierande elpris kommer in i bilden. Det är vanligt med topp kring kl. 12, men stora verk kan ha toppen på kvällen.

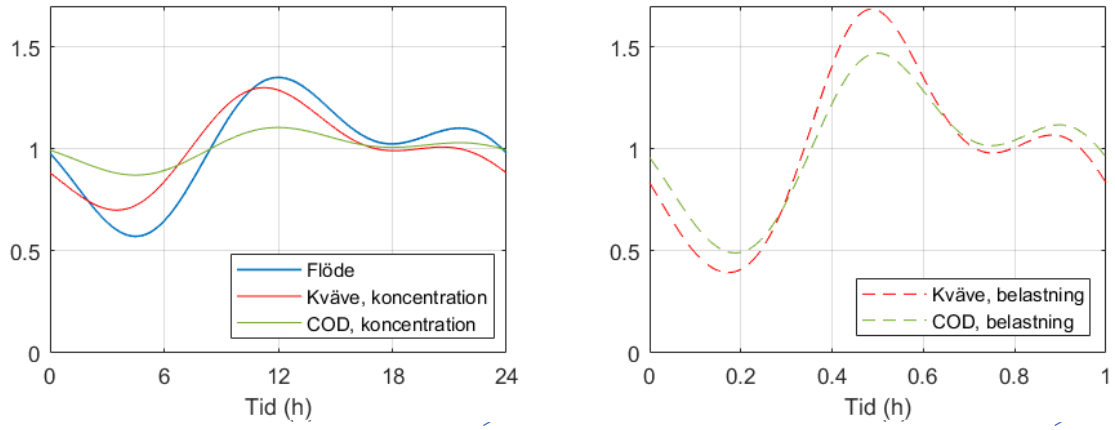
Hur mycket vatten som inkommer över tid anges som flöde, Q (m^3/h). Hur mycket föroreningar som inkommer kan anges som massflöde,

$$M(t) = Q(t) * c(t)\,, \tag{1}$$

eller belastning,

$$L(t) = \frac{M(t)}{V} = \frac{Q(t) * c(t)}{V}\,, \tag{2}$$

där c är koncentration (mg/l) av exempelvis *COD*, och V är bassängsvolymen, som är konstant. *COD*-Massflöde kan anges i kg/h och *COD*-belastning i g/(m^3*h).



Figur 2. Inflödets variation över ett dygn i ett exempel, med skalade profiler. Vänster: Flöde och koncentration. Höger: Belastning beräknat från profiler till vänster.

Kurvan som visar flöde eller koncentration över ett dygn benämns dygnsprofil, eller helt enkelt *profil*, då denna studie är inriktad på variation inom ett dygn. Högre flöde sammanfaller vanligen med högre koncentration, vilket gör att variationen i belastning är särskilt hög. Flöde mäts ofta kontinuerligt med flödesmätare, men det är besvärligt att kontinuerligt mäta *COD* eller kvävekoncentration. Dygnsprofilen för koncentration kan istället bestämmas med en mätkampanj, där en stor mängd prover tas ut manuellt över ett dygn. Koncentration är vad som mäts genom analys på lab, men det är snarare belastning som direkt påverkar processen (Dold, 1982).

I en ASP är det koncentration som påverkar hastigheten för biokemiska processer. Koncentration påverkas i sin tur av massflöde. Massflöde kan beskriva både transport (inflöde eller utflöde) och ett ämnes omvandling mellan olika former. Förändrings-hastigheten för koncentrationen i en vattenvolym är lika med summan av alla massflöden delat med volymen.

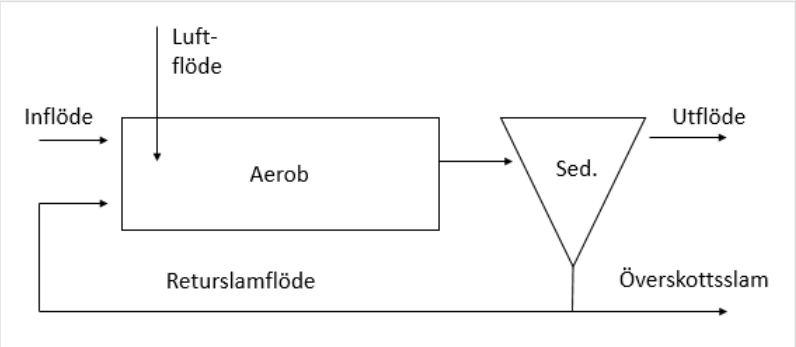
2.1.1.1. Utsläppsvillkor

Gränsen för kväveutsläpp sätts normalt för totalkväve, i vissa fall kompletterat med en gräns för ammonium. En vanlig gräns är 10 mg tot-N/l gällande *flödesviktad koncentration* över en tidsperiod, ofta kalenderår (NVV, 2013). Flödesproportionell provtagning ger ett samlingsprov där koncentrationen av ett ämne är ett flödesviktat medelvärde. Detta mått står i linjär proportion till utsläppt mängd.

Villkoren för utsläpp har på senare år skärpts på flera verk. Det är tekniskt möjligt att nå lägre utsläpp än de 10 mg tot-N/l som är vanligt idag, men det kan kräva mer energi och eventuellt tillbyggnad eller omstrukturering på reningsverk (US EPA, 2010).

2.2. AKTIVSLAMPROCESSEN

I en grundutformad aktivslamprocess sker avskiljning av organiskt material genom upptag av mikroorganismer och absorption kring partiklar, i kombination med sedimentering (Figur 3). Processen kan utvidgas till både biologisk kväverening och fosforrening. I detta arbete behandlas biologisk kväverening. Grundidén bakom processen är att uppehållstiden för mikroorganismer är längre än för inkommande vatten, vilket leder till en hög halt aktiv biomassa. Detta ordnas genom att suspenderat partikulärt material (slam) separeras från processvattnet genom sedimentering och återförs genom pumpning i ett *returslamflöde*. För att hålla en önskad halt och uppehållstid för suspenderat material så ingår även ett uttag av *överskottsslam*.



Figur 3. Grundutformad aktivslamprocess. En luftad bassäng kombinerat med sedimentering. Inflödet kommer från försedimentering.

Syre tillförs för att ge mikroorganismer (främst bakterier) goda möjligheter att ta upp och bryta ner organiskt material. Heterotrofa bakterier står för den största aktiviteten i processen. De tar upp organiskt material som används som kolkälla för celltillväxt och för energiutvinning. Syre används som elektronacceptor när energi utvinns. Ungefär hälften av det COD som tas upp byggs in i ny biomassa medan hälften oxideras, varvid syre åtgår. Förenklat kan detta beskrivas som

$$organiskt\ material + O_2 \xrightarrow{biomassa} ny\ biomassa + CO_2 + energi \quad .$$

En välfungerande sedimenteringsbassäng är ett måste för att få till en effektiv ASP. I bassängen sker sedimentering och förtjockning av inkommande suspenderade ämnen (slam). Sedimenteringen går bra när mikroorganismer och andra partiklar aggregerar i slamflockar med rätt egenskaper. Ett viktigt mått vid drift av en ASP är *slamålder,* som anger en slampartikels genomsnittliga uppehållstid i systemet. Den kan påverkas genom val av överskottsslamflöde: lägre uttag ger högre slamålder. I en grundutformad ASP bör slamåldern vara minst 3–5 dygn för att bra slamflockar ska utvecklas (SVU, 2010). Högre slamålder innebär högre halt mikroorganismer och annat suspenderat material (högre slamhalt), och därmed högre kapacitet för nitrifikation och upptag av *COD*. Hög slamålder kan dock bl.a. öka risken för slamproblem, så valet är en avvägning.

Vid celltillväxt tas även näringsämnen upp ur vattnet. För en grundutformad ASP avskiljs mellan 10 och 30 % av inkommande kväve, främst genom upptag vid heterotrof celltillväxt och följande uttag av överskottsslam (SVU, 2010). Det finns ett överskott av kväve i förhållande till COD i kommunalt avloppsvatten. För att nå högre rening behövs en processlösning anpassad för kväverening.

2.2.1. Biologisk kväverening

Kväveavskiljande aktivslamprocesser utnyttjar olika typer av mikroorganismer för att omvandla ammonium till nitrat (nitrifikation) och sedan nitrat vidare till kvävgas (denitrifikation), som avgår till atmosfären. Kväverening beskrivs av t.ex. Carlsson & Hallin (2003), US EPA (2010) och Henze m.fl. (2008).

2.2.1.1. Nitrifikation

Nitrifikation utförs av *autotrofa* organismer, som använder CO_2 som kolkälla, syre som elektronacceptor och får energi genom att oxidera kväve. Omvandlingen sker i två steg men kan schematiskt skrivas i ett steg (SVU, 2010):

$$NH_4^+ + 2O_2 \leftrightharpoons NO_3^- + H_2O + 2H^+$$

Mängden syre som åtgår kan beräknas utifrån stökiometrin. Vid oxidering av kväve från ammonium- till nitratform reduceras 4,6 gram syre per gram kväve (se t.ex. SVU 2010). För att nitrifikation ska ske krävs en aerob miljö, d.v.s. en miljö med löst syre. Vid ökad syre- eller ammoniumhalt ökar hastigheten för nitrifikation. Hastigheten ökar även vid ökad temperatur. Kinetiken behandlas vidare i kapitel 2.3.

2.2.1.2. Denitrifikation

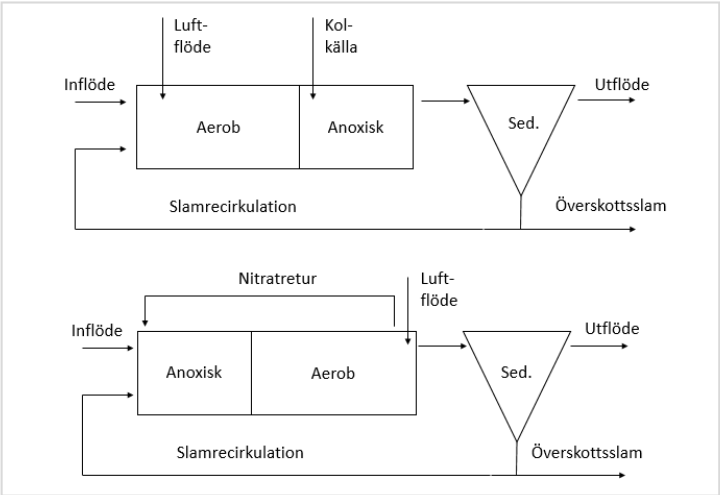
Denitrifikation utförs av *fakultativa* heterotrofa bakterier, som i en syrefri miljö använder nitrat som elektronacceptor istället för syre. Organiskt material används både som energi- och kolkälla. Omvandlingen sker i flera steg men kan förenklas till ett:

$$4NO_3^- + 5C\ (organiskt\ kol) + 4H^+ \leftrightharpoons 2N_2 + 5CO_2 + 2H_2O$$

För att denitrifikation ska ske krävs en anoxisk miljö, d.v.s. en miljö utan löst syre men innehållande nitrat. Det måste även finnas tillgång till lättomsättligt organiskt material. Varje gram nitratkväve som reduceras till kvävgas innebär en minskning av *COD* motsvarande aerob respiration av 2,86 g syre. Därmed kan en del av syrebehovet för nitrifikation räknas bort (US EPA, 2010).

2.2.1.3. Processlösningar för kväverening

En ASP för kväverening måste innehålla både luftade och oluftade delar. Det finns två huvudsakliga processlösningar för att åstadkomma detta i samma process (Figur 4).



Figur 4. Processlösningar för kväverening. Ovan: Efterdenitrifikation; Under: Fördenitrifikation. Anpassat efter SVU:s publikation Avloppsteknik 2 (2010).

Vid *efterdenitrifikation* sker nitrifikation i början av processen. Även en stor del av *COD* avskiljs här, då det är goda förhållanden för aerob heterotrof tillväxt. Vatten som strömmar vidare till oluftade zoner är rikt på nitrat men fattigt på lättomsättligt organiskt material. Därför är det som regel nödvändigt att tillföra externt organiskt material för att få tillräckligt hög denitrifikation.

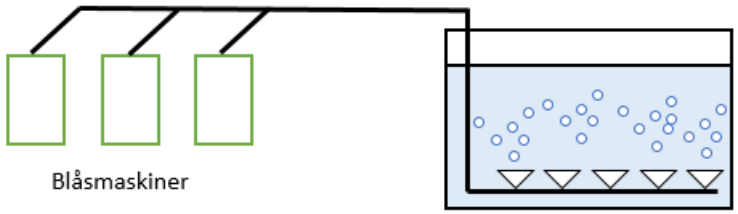
Vid *fördenitrifikation* sker denitrifikation i början av processen där tillgången på organiskt material är god. Eftersom nitrifikation sker i den senare delen måste bildat nitrat återföras. Det sker delvis genom returslamflödet men vanligen införs ett extra returflöde, kallat nitratretur eller intern recirkulation, som pumpas från slutet av den luftade delen. Ett problem är att inte allt bildat nitrat återförs. Returflödets storlek i relation till utflödet sätter en gräns för hur stor andel av bildat nitrat som kan denitrifieras. Om utsläppsgränsen för *tot-N* är låg kan det vara nödvändigt att ha ett efterföljande polerande steg med ytterligare denitrifikation (US EPA, 2010). Om mängden syre är för hög i nitratreturen kan det påverka denitrifikationen negativt.

Denitrifikation kan ske även i en luftad zon om syrehalten tidvis sjunker till låga värden, omkring 0,3–0,8 mg/l. Slamflockarnas struktur gör att det kan finnas nära syrefria mikromiljöer, så att viss denitrifikation kan pågå. Detta fenomen som kallas *simultan denitrifikation och nitrifikation* (SDN) innebär minskat syrebehov genom att mer *COD* oxideras med nitrat istället för att förbruka syre vid aerob respiration. Det finns ett stort antal processlösningar beskrivna, se exempelvis US EPA (2010). En variant av efterdenitrifikation är att låta denitrifikation ske i ett separat steg efter sedimentering, medan nitrifikation sker i en grundutformad ASP med högre slamålder.

2.2.2. Luftning och syreöverföring

Syresättning sker genom luftning, med ett system som illustreras i Figur 5. Syre måste tillföras kontinuerligt för att täcka mikroorganismernas syreupptag. Syremängden som är lagrad i vattnet är liten i förhållande till syreupptagshastigheten, så syret tar snabbt

slut om luftningen stängs av. Syresättning sker i allmänhet genom att ett luftflöde trycks ut genom porösa membran monterade vid bassängens botten så att en stor mängd luftbubblor bildas. Luftflödet skapas med blåsmaskiner som förflyttar luft från sitt intag (atmosfärstryck) in i luftningssystemet (systemtryck). Systemtrycket ges till stor del av vattendjupet, t.ex. 4 meter ger ett hydrostatiskt tryck på 0,4 bar.



Figur 5. Ett luftningssystem med blåsmaskiner.

Ändring av luftflöde och systemtryck är snabba processer i jämförelse med syreöverföring och syreförbrukning. Därför kan dynamiken i luftningssystemet bortses från vid studier av luftning.

2.2.2.1. Syreöverföringshastighet (OTR), syreöverföringseffektivitet (OTE)

Syre överförs från luftbubblor till vatten genom diffusion över bubblans två gränsskikt. Drivkraften är skillnaden mellan syrehalt i vattnet och dess syrehalt vid mättnad (Henze m.fl., 2008). Syreöverföringshastighet (*Oxygen Transfer Rate, OTR)* modelleras i allmänhet som en diffusionsprocess i ett steg,

$$OTR(t) = K_L a\left[q_{luft}(t)\right]\left[S_O^{sat} - S_O(t)\right], \qquad (3)$$

där

- K_L är diffusionskonstant för överföring från vätskefilm till vattenmassa
- $a = A/V$ är sammanlagd bubbelyta per bassängsvolym
- $K_L a$ är syreöverföringskoefficienten
- q_{luft} är luftflöde, angett i massflöde per bassängsvolym
- S_O är syrehalt i bassängen
- S_O^{sat} är syrehalt vid mättnad (ofta 8 mg/l)

Syreöverföringskoefficienten $K_L a$ är en funktion av luftflödet: högre luftflöde innebär fler bubblor och därmed större area för syreöverföring, a. Förhållandet kan uppskattas som linjärt, men för luftare som skapar små bubblor avtar ökningen av $K_L a$ vid högre luftflöden då bubblor aggregerar. I modellstudier används $K_L a$ ofta som styrsignal istället för luftflöde, och ger grund för beräkning av elbehov (Hreiz et al., 2015).

Vid ett visst luftflöde fås högre OTR vid lägre syrehalt, enligt ekv (3). Effektiviteten, *OTE* (eng. Oxygen Transfer Efficiency), definieras som mängden överfört syre relativt mängden syre i tillförd luft (US EPA, 2010). Det finns andra faktorer som inverkar på *OTE*, t.ex. vissa föroreningars koncentration och sammansättning, och som sagt bubbelstorlek. Här behandlas dock bara det grundläggande beroendet på syrehalt. För en modellbaserad studie kan ett par mått definieras utifrån ekv (3), som är intressanta vid utvärdering av luftningsstrategier. Mängden överfört syre för en tidsperiod ges av

$$O_T = \int_{t_0}^{t_1} K_L a(t)\left[S_{O,sat} - S_O\right] dt \ . \quad (4)$$

En OTE-faktor som beror enbart på syrehalt kan definieras enligt

$$f_{OTE} = \int_{t_0}^{t_1} K_L a\,(t) \frac{S_{O,sat} - S_O}{S_{O,sat}} dt \ . \quad (5)$$

Att minska energibehovet för luftning utan att öka utsläpp handlar i princip om att öka *OTE,* något förenklat genom att öka denna *OTE*-faktor.

För att beräkna energibehov utifrån en modellstudie behövs ett samband mellan luftflöde (eller $K_L a$) och elektrisk effekt till blåsmaskiner, *P*. Ofta antas ett linjärt samband (se t.ex. Hreiz 2015). Då ges energibehovet över en tidsperiod av

$$E = k \int_{t_0}^{t_1} K_L a(t) dt \quad (6)$$

där *k* är en konstant, som blir oviktig vid relativ jämförelse av styrstrategier.

2.2.3. Styrning av luftning

Det övergripande målet vid drift av en ASP är att utsläppsgränser ska hållas, med en så låg åtgång av energi, fällningskemikalier och externt organiskt material som möjligt. För att uppnå detta används olika driftmål som t.ex. att syrehalten ska hållas konstant på ett valt värde (börvärde). Styrning mot det övergripande målet sker sedan genom val av bland annat börvärde för syrehalt. Att använda driftmålet konstant syrehalt är dock inte den mest energieffektiva luftningsstrategin när belastningen varierar. Genom att variera syrehalt lagom mycket i relation till uppmätt ammoniumhalt kan samma flödesviktade ammoniumhalt fås till lägre energibehov (Åmand 2014, Rieger m.fl. 2014).

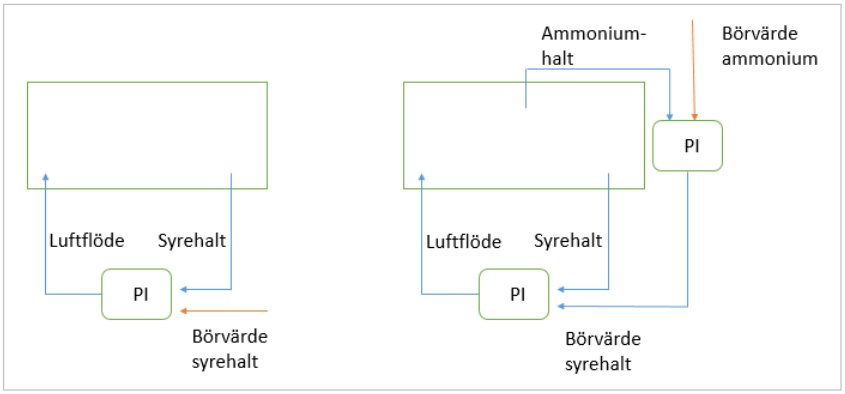
Processen påverkas genom ändring av ett antal olika *styrsignaler*, däribland ventilläge för luftflöde. Detta ventilläge används som ställdon för att reglera syrehalten. Övriga styrsignaler som ska väljas är bl.a.: Returslam-, överskottsslam- och nitratreturflöde. Dessa behandlas av t.ex. Olsson m. fl. (2005). Det är vanligt att retur- och överskottsflöde hålls konstanta över längre tid. Här behandlas endast luftflöde.

Viss mätning bör ske i realtid för att luftning ska kunna styras och övervakas:

- *Syrehalt* kan mätas med optiska metoder eller jonselektiva elektroder. Givare har funnits länge, är pålitliga och kräver inte mycket underhåll (Olsson, 2008).
- *Ammoniumhalt* kan mätas i realtid med jonselektiva elektroder. Givaren kräver underhåll, särskilt om den är placerad tidigt i processen (Åmand m.fl., 2013b).

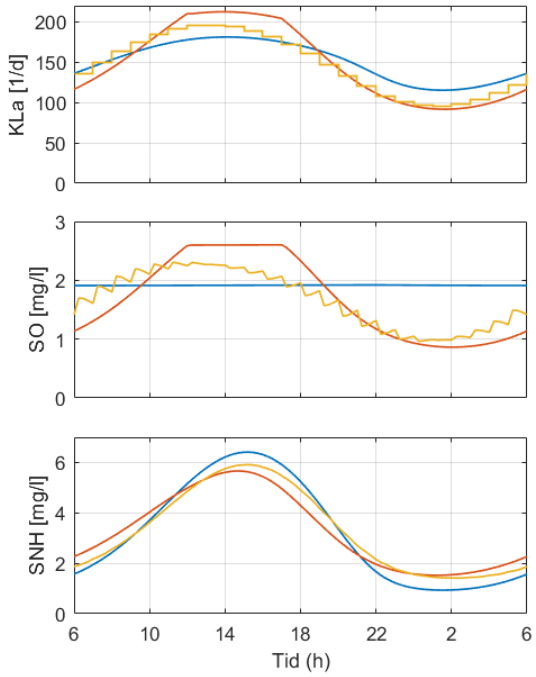
Den vanligaste strategin för reglering av syrehalt är att använda en *PI-regulator* och återkoppling från uppmätt syrehalt. Det finns vidareutvecklingar och avancerade strategier men i många fall är en välinställd PI-regulator tillräcklig (Åmand m.fl. 2013a). En processlinje innehåller ofta ett antal luftade zoner kopplade till varsin luftledning, så en komplett strategi för luftning måste bestämma syrebörvärden för alla zoner. I detta arbete behandlas dock en process med en enda luftad zon.

Syrehalt har en direkt verkan både på hastigheten för aeroba processer och på *OTE*. Strategier med varierande syrehalt använder lämpligen en inre reglerkrets för att reglera syrehalten (Figur 6). Problemet som ska lösas blir då hur syrebörvärdet ska varieras.



Figur 6. Vänster: PI-reglering mot konstant syrehalt. Höger: Överordnad reglering av ammoniumhalt.

Vid ammoniumbaserad styrning varieras syrebörvärde i relation till uppmätt ammoniumhalt enligt högra bilden i Figur 6. Målet är inte konstant ammoniumhalt. Det är i allmänhet inte möjligt och det är inte en energieffektiv strategi att försöka (Rieger m.fl., 2014). Målet är att spara energi genom att utnyttja att nitrifikationshastigheten beror av ammoniumhalt. Det är viktigt att sätta genomtänkta övre och undre gränser för syrebörvärdet. I figur 7 jämförs ammoniumbaserad styrning med konstant syrehalt.



Figur 7. Ammoniumbaserad styrning (röd) (återkoppling med PI-regulator) jämfört med konstant syrehalt (blå), energioptimal luftning (gul) vid samma ammoniumutsläpp. Mitten: Syrehalt. Nedan: Ammoniumhalt. Efter Carlsson & Åmand (2012).

En sänkning av syrehalt vid en tid med låg ammoniumhalt innebär en mindre sänkning av nitrifikationshastighet. Denna minskning kan tas igen genom en mindre ökning av

syrehalt vid en tid med hög ammoniumhalt. Energibesparing fås på detta vis genom förhöjd *OTE* när samma totala nitrifikation uppnås med lägre medelvärde för syrehalt.

Fördelar som kan fås med ammoniumbaserad styrning är:

1. För ett givet medelvärde på utgående ammonium kan ammoniumbaserad styrning ge ett lägre energibehov jämfört med att använda konstant syrebörvärde
2. Enklare att anpassa mängden av utgående ammonium över tid
3. Ökad denitrifikation vid låglasttid genom SDN och i vissa fall som en följd av lägre syrehalt i nitratretur

Lägre energibehov fås genom variation av syrehalt över ett dygn och mellan dygn. Ammoniumbaserad styrning studerades grundligt av Åmand (2014), utifrån både fullskaleförsök och simuleringar. Författaren uppger att potentialen för energibesparing är i storleken 3,5 % över ett dygn och 5 % över veckor och säsonger, vid jämförelse med *konstant syrehalt* vid lika medelvärden av utgående ammonium.

2.2.4. Utjämningsmagasin

Utjämningsmagasin har använts länge men kan få förnyat intresse i takt med ökande elpriser och hårdare utsläppskrav, särskilt gällande kväve. Traditionellt har magasin vid reningsverk byggts för att hantera extrema flöden vid regn (inläckage) och då undvika bräddning och överbelastning av sedimentering. Det är välkänt att magasin har en positiv inverkan på biologisk rening (Mansfeldt, 1994). En del kunskap om effekten av utjämning bygger på försök med reningsverk utan kväverening, och resultaten därifrån kanske inte kan översättas direkt till kväverening (Mikola m. fl., 2012).

Utjämning har en rad positiva effekter för driften av ett reningsverk (Dold, 1982), bl.a:

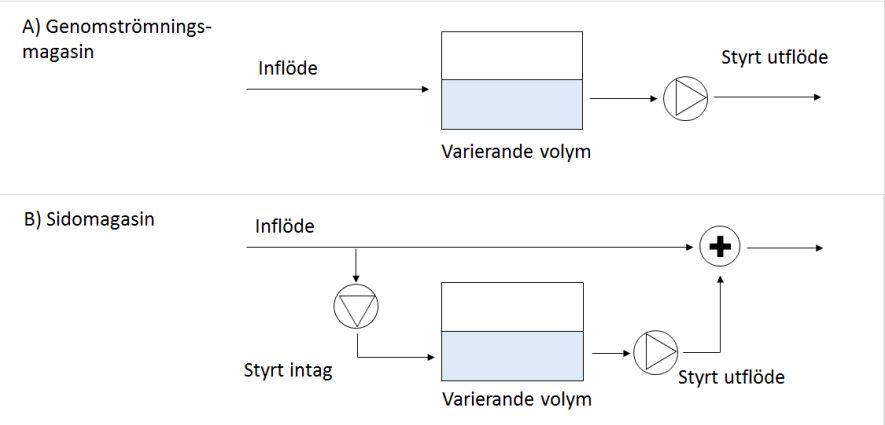
1. Förbättrad funktion för sedimentering, genom utjämning av flöde
2. Förenklad dosering av fällningskemikalier
3. Förenklad styrning av luftning
4. Bättre förutsättningar för biologisk rening, särskilt gällande nitrifikation

Punkt 4 kan tolkas antingen som att processen kan uppnå högre kväveavskiljning eller som att samma nivå kan uppnås till en lägre energiåtgång. Punkt 1 och 3 ger indirekt möjlighet till energibesparing. Punkt 2 ger kanske främst möjlighet till bättre fosfor-avskiljning och lägre åtgång av fällningskemikalier.

Vid drift av ett magasin placerat vid reningsverket tillkommer energibehov för pumpning, vars storlek beror på mängden vatten, lyfthöjd och pumpens effektivitet. Energibehovet kan skattas med enkla beräkningar (se t.ex. Olsson, 2008). Då lyfthöjden är liten kan behovet vara litet i förhållande till övrig pumpning och luftning.

2.2.4.1. Olika typer av utjämningsmagasin

Magasin kan delas in i två typer, vilket visas schematiskt i Figur 8. Ett genomströmningsmagasin tar emot allt inkommande vatten, medan ett sidomagasin bara tar in det vatten som ska magasineras. Med ett genomströmningsmagasin fås utjämning av koncentration över hela dygnet medan ett sidomagasin endast påverkar koncentration när magasinet töms. Magasin med konstant volym är också en konstruktion som förekommer. Med dessa utjämnas snabba variationer i koncentration men inte flöde.



Figur 8. Två typer av magasin: A) Genomströmningsmagasin. B) Sidomagasin.

Det är inte alltid nödvändigt att konstruera nya magasin för att få förbättrad utjämning. Det kan också vara möjligt att bygga om andra volymer till magasin eller att utöka användningen av stora tunnlar (VAForsk, 1994). Istället för att fokusera på utjämning vid inlopp finns även möjlighet att förbättra utjämningen genom att införa så kallad realtidsstyrning av ledningsnätet, något som dock ännu är ovanligt (Olsson, 2005).

2.2.4.2. Styrning och volym

Att hålla *konstant flöde* är kanske den enklaste och vanligaste styrningen men gör inte att belastningen blir konstant, då koncentration bara delvis utjämnas. Det har föreslagits att fokus bör ligga på utjämning av belastning, genom ett omfördelat, varierande flöde (Dold, 1982). Flödet från magasinet styrs genom varierande pumpning eller vid gravitationsdrivet flöde med klaffar eller ventiler.

Volymen som krävs för att hålla konstant flöde under ett dygn beror på variationen i flöde. För en mer långtgående omfördelning av flöde och belastning krävs en större volym. Beräkning av volymen kan göras relativt enkelt från skillnaden mellan inkommande flödesprofil och önskad flödesprofil ut från magasinet. Om tillgänglig volym inte är tillräcklig för att få konstant flöde så är en vanlig strategi att sätta ett maxflöde (toppkapning) och magasinera överskjutande flöde, som sedan återförs vid tid med lägre flöde (vanligen under följande natt).

Hela den konstruerade volymen används inte för utjämning, då det är rimligt att sätta en lägsta fyllnadsvolym, V_{min}, för att inte torrlägga eventuell pump eller omrörare (US EPA, 1979). Totala volymen ges då av

$$V_{max} = V_{min} + V_{effektiv} \ , \tag{7}$$

där $V_{effektiv}$ är den volym som kan användas för utjämning.

2.2.4.3. Energibesparing vid utjämning

Det är välkänt att utjämning kan minska energibehovet för luftning, men det finns få publicerade uppgifter kring hur stor energibesparing som kan väntas. Detta kan delvis förklaras av att utjämning undersöktes mer innan utbyggnaden av biologisk kväverening (Mikola m. fl., 2012), men mest beror det troligen på att utjämning påverkar både utsläpp och energibehov. Det kan vara svårt att urskilja en möjlig energibesparing om även reningsresultatet ändras vid ett försök.

Ett teoretiskt resonemang kan föras kring effekten av utjämning utifrån en tänkt studie där samma *konstanta syrehalt* används både med och utan utjämning. Utjämnad belastning leder till jämnare ammoniumhalt i processen och därmed ökad nitrifikation, vilket ger lägre utsläpp. Syrebehovet ökar i relation till ökningen i nitrifikation (se kapitel 2.2.1). Energibehovet blir då högre, om inte OTE höjs. Effektiviteten i överföringen från K_La till OTR är konstant vid konstant syrehalt, men OTE kan ändå öka genom effektivare överföring från luftflöde till K_La vid utjämnat luftflöde.

En fullskalestudie av utjämning utfördes av Mikola m.fl. (2012) vid ett reningsverk med fördenitrifikation och biologisk fosforavskiljning. Den ena av verkets två linjer användes för försöket med utjämning medan den andra användes som referens. Syrehalten reglerades mot samma konstanta nivå i båda linjer under försöks-perioden. Ammoniumhalten i utgående vatten var 9,4 mg/l för referenslinjen och 5,1 mg/l för den utjämnade linjen. Luftbehovet var inte högre än för referenslinjen. Om syrehalten hade sänkts så att utsläppet ökat till referenslinjens nivå hade det sannolikt gett en betydande minskning av energibehov. Det hade dock inte varit rimligt i detta fall då utsläppet var högt. Målet får ses som att minska utsläpp snarare än energibehovet.

Modeller och simuleringsstudier erbjuder en annan möjlighet för att studera effekten av utjämning (Bolmstedt & Olsson, 2005; Filipe m. fl., 2001). Det krävs då både en modell för magasinet och en modell för aktivslamprocessen.

2.3. MODELLERING AV AKTIVSLAMPROCESSER

En modell för en ASP byggs upp av ett antal delmodeller (se t.ex. Henze m. fl., 2008). Den centrala är *aktivslam-modellen*, som beskriver de biokemiska processer som sker i en ASP. Den mest välkända för kväverening är Activated Sludge Model No. 1, ASM1 (Henze m. fl., 1987). En *hydrodynamisk modell* (bassängsmodell) beskriver hur vattenmassan och de ämnen vattnet innehåller rör sig inom, in i och ut ur en volym. Den vanligaste, och enklaste, modellen är en totalomblandad bassäng. En bassängsmodell i kombination med en aktivslam-modell ger en *bioreaktormodell*.

En *sedimenteringsmodell* beskriver hur partikulära och lösta ämnen som inkommer till sedimentering med tiden fördelas på överflöde (ut från processen) och underflöde, som delas upp i retur- och överskottsslamflöde. Modellen kan vara en dynamisk variant eller en enkel statisk massbalansmodell beroende på vad som studeras (Gernaey, 2003).

Processmodellen bygger samman delmodeller till en ASP med ett visst upplägg, med ett antal bassänger och hur olika flöden är kopplade. Här ingår också en modell för hur syre tillförs, i allmänhet enligt standardmodellen för syreöverföring.

2.3.1. Aktivslammodellen ASM1

ASM1 är en modell för en ASP med nitrifikation och denitrifikation. Ingående beskrivningar ges exempelvis av Jeppson (1996) och Henze m.fl. (2008). Modellen byggs upp med 13 tillståndsvariabler som representerar koncentrationen för olika fraktioner av COD och kväve (Tabell 2). Partikulära (suspenderade) fraktioner betecknas med *X* och lösliga med *S*.

Tabell 2. Tillståndsvariabler i ASM1. Tre variabler som inte påverkar kvävereningen utelämnas: alkalinitet och inerta fraktionerna S_I, X_I (Anpassat efter Alex m. fl., 2008).

Definition	Notation	Enhet
Lättomsättligt organiskt substrat	S_S	*mg COD/l*
Långsamt nedbrytbart organiskt material	X_S	*mg COD/l*
Heterotrof aktiv biomassa	$X_{B,H}$	*mg COD/l*
Autotrof aktiv biomassa	$X_{B,A}$	*mg COD/l*
Partikulära produkter från nedbrytning av biomassa	X_P	*mg COD/l*
Syre	S_O	*mg -COD/l*
Nitrat- och nitritkväve	S_{NO}	*mg N/l*
Ammonium- och ammoniakkväve	S_{NH}	*mg N/l*
Löst nedbrytbart organiskt bundet kväve	S_{ND}	*mg N/l*
Partikulärt nedbrytbart organiskt bundet kväve	X_{ND}	*mg N/l*

I centrum står två typer av aktiv biomassa: Heterotrof biomassa, X_{BH} och autotrof biomassa, X_{BA}. Modellen byggs upp av 8 grundprocesser som kombineras till 13 systemekvationer, det vill säga förändringshastighet för de 13 tillstånden.

Vid *autotrof tillväxt* ökar mängden autotrof biomassa. Hastigheten för processen beror på koncentrationen biomassa, X_{BA}, samt på koncentrationen av substraten syre och ammonium, S_O och S_{NH}. Ammonium övergår i nitrat och syre förbrukas.

Vid *aerob heterotrof tillväxt* ökar mängden heterotrof biomassa. Hastigheten för processen beror på koncentrationen biomassa, X_{BH}, samt på substraten S_S och S_O. Av den mängd S_S som omvandlas byggs en del in i biomassan och en del oxideras för energi och försvinner från systemet. Syre förbrukas för den mängd S_S som oxideras.

Utöver de tre grundprocesser som nämns ovan ingår även: Nedbrytning av autotrof biomassa *(X_{BA} -> X_S, X_{ND}, X_P)*, nedbrytning av heterotrof biomassa *(X_{BH} -> X_S, X_{ND}, X_P)*, hydrolys av långsamt nedbrytbart organiskt material *(X_S->S_S)*, hydrolys av partikulärt organiskt bundet kväve *(X_{ND} -> S_{ND})* samt mineralisering av löst organiskt bundet kväve *(S_{ND} -> S_{NH})*. Det ingår också 19 parametrar indelade i stökiometriska och kinetiska.

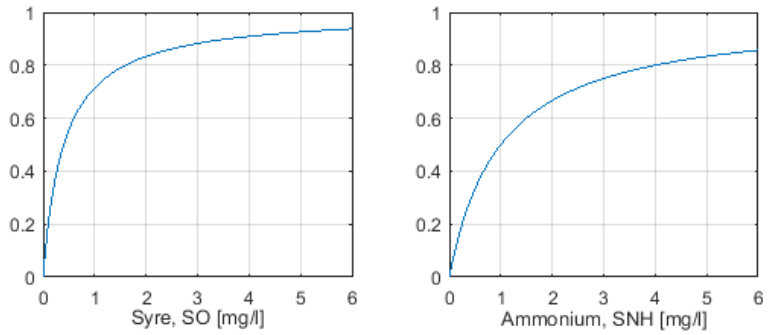
Alla reaktionshastigheter i ASM1 byggs upp som summan av ett antal grundprocesser, vars hastighet beror på koncentrationen av olika fraktioner, i många fall enligt ett olinjärt samband kallat Monod-funktion,

$$\mu(S) = \mu_{max}\left(\frac{S}{K+S}\right), \tag{8}$$

där faktorn till höger antar värden mellan 0 och 1, μ är en hastighet som beror av koncentrationen S, μ_{max} är maximala hastigheten, och K är en så kallad halvmättnadskonstant. Nitrifikationshastigheten är linjärt proportionell mot tillväxthastigheten för X_{BA}, som i modellen ges av,

$$\rho_3 = \mu_{A,max}\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O}\right)X_{B,A}\,. \tag{8}$$

Den kinetiska parametern $\mu_{A,max}$ är den *maximala specifika tillväxthastigheten*. K_{NH} och K_{OA} är konstanter. Uttrycket innehåller två Monod-funktioner, som illustreras i Figur 9.



Figur 9. Monod-funktioner som ger hur nitrifikationshastighet beror av syre- (vänster) och ammoniumkoncentration (höger). Halvmättnadskonstanter är 0,5 och 1,0 mg/l.

Höjning av syrehalt från en hög nivå ger bara en liten ökning av nitrifikationshastighet. Enligt Figur 9 ger en höjning från 1,0 till 1,5 mg/l en ökning på 11,1 %, medan en höjning från 2 till 2,5 mg/l bara ger 3,5 %. En höjning av S_O under en tidsperiod leder till att S_{NH} minskar, vilket i sin tur motverkar ökningen i nitrifikationshastighet. Denna dynamik blir särskilt tydlig under tider med låg belastning.

Det krävs alltid samma mängd syre för en viss mängd nitrifikation eller för aerob heterotrof tillväxt. Följande kan utläsas ur ASM1 (med parametrar enligt BSM1):

- Vid nitrifikation av 1 mg kväve åtgår 4,3 mg syre;
- Vid aerob heterotrof tillväxt av 1 mg biomassa tas 1 mg organiskt substrat upp, samtidigt som 0,5 mg oxideras med hjälp av syre och lämnar systemet;
- Vid oxidering med syre av 1 mg organiskt substrat åtgår 1 mg syre.
- Avskiljning av S_S genom denitrifikation istället för aerob tillväxt kan ses som en besparing av 2,86 mg syre för varje mg nitratkväve som reduceras till kvävgas.

Vid studie av luftning över en kort tid, som ett dygn, är det först och främst variabler som förändras snabbt som är av intresse. Långsamma variabler som X_{BA} och X_{BH} ändras över flera dygn eller veckor, medan snabba variabler som S_S, S_{NH} och S_O ändras över minuter eller timmar. Luftning handlar om att påverka syrehalten, och därför är det också främst variabler som påverkas av variationer i syrehalt som studeras.

2.4. OPTIMAL STYRNING

Att genom matematisk optimering söka en optimal styrsignal för en dynamisk modell är en metod som kallas *optimal styrning* (eng. Optimal Control/Dynamic Optimization). En optimal styrsignal är den som bäst lyckas med att uppnå ett uppsatt mål, under begränsningar i form av bivillkor (se t.ex. Bryson, 1999) (Lenhart & Workman, 2007). Målet är ofta att minimera en kostnad, t.ex. elkostnad eller energibehov över en tid. En optimal styrsignal för en modell kan studeras vid utveckling av praktiskt användbara styrstrategier. Kostnaden med optimal styrning jämfört med tidigare utvecklade styrstrategier är ett mått på potentialen till förbättring (Banga m. fl., 2003). För enkla problem i optimal styrning kan det vara möjligt att hitta en analytisk lösning, men i allmänhet sker lösning med numeriska metoder (Bryson, 1999).

2.4.1. Numerisk lösning med parameteroptimering (CVP)

Metoden för att optimera en styrsignal till en ASP beskrivs här med ett exempel som är en variant på det problem som formulerades av Åmand & Carlsson (2012). En modell för en ASP med kväverening ges av

$$\dot{\boldsymbol{Z}}(t) = f[\boldsymbol{Z}(t), u(t), t] \ , \tag{9}$$

där tillståndsvektorn $\boldsymbol{Z}$ innehåller koncentrationen för alla ämnen. Vi ser i ekv (9) att förändringshastigheten beror på tillstånd, på tidsberoende insignaler och på styrsignalen

$$u(t) \equiv q_{luft}(t) \ , \tag{10}$$

där q_{luft} är luftflödet till aktivslamprocessen. Energibehov antas vara proportionellt mot luftbehov, d.v.s. integralen av luftflödet.

Problemet är att med en begränsad mängd energi minimera ammoniumutsläppet genom att välja styrsignalen över ett dygn:

$$\min_{u} J(\boldsymbol{Z}(t), u(t), t) \equiv \int_{t_0}^{t_f} Q_{ut}(t) S_{NH}(t) dt \tag{11}$$

under bivillkoren

$$\int_{t_0}^{t_f} u(t) dt = \beta \ , \tag{12}$$

$$t_0, t_f \ givna, \qquad \boldsymbol{Z}(t_0) = \boldsymbol{Z}_0, \qquad systemekvationer \ i \ Ekv. (9).$$

Det problem som formulerades av Åmand & Carlsson (2012) var, något omvänt: Minimera luftbehov under bivillkoret att ammoniumutsläppet håller ett givet värde. Den formuleringen passar bättre med vad som är målet vid styrning av ett reningsverk, men varianten här är mer lättläst som exempel på ett problem i optimal styrning.

2.4.1.1. Numerisk lösning med parameteroptimering: CVP

Mer eller mindre avancerade metoder används för att lösa problem i optimal styrning. Gällande bioreaktorer har så kallade *direkta metoder* varit mest populärt (Banga m. fl., 2003). En metod baseras på att både styrsignal och tillstånd diskretiseras. En annan bygger på parametrisering av styrsignalen (eng. Control Vector Parametrization, CVP).

Problemet att välja en styrsignal över ett tidsintervall innebär att värdet för signalen ska väljas i oändligt många punkter. Genom att begränsa valet till signaler som beskrivs av ett ändligt antal parametrar fås ett problem som är enklare att behandla. Den enklaste parametriseringen är att dela upp tiden i ett antal, *N*, lika långa intervall och låta styrsignalen vara konstant inom varje intervall. Då fås en styckvis konstant styrsignal som beskrivs av *N* parametrar, som kan ordnas i en vektor $\boldsymbol{u} = [u_1, u_2, ..., u_N]$. För att utvärdera resultatet av ett visst val av $\boldsymbol{u}$ simuleras processen över tidsintervallet, vilket ger tillstånden $\boldsymbol{Z(t)}$, och sedan utvärderas kostnadsfunktion och eventuella bivillkor.

Exempelproblemet omvandlas genom CVP till

$$\min_{\boldsymbol{u}} J(\boldsymbol{u}) \ , \tag{13}$$

under bivillkoret

$$g(\boldsymbol{u}) = \sum_{i=1}^{i=N} (h * u_i) - \beta = 0 \ , \tag{14}$$

där steglängden kommer in som $h = (t_f\text{-}t_0)/N$. Kostnadsfunktionen J blir en olinjär funktion av parametervektorn $\boldsymbol{u}$, enligt ekv (13), och bivillkoret blir en summa, enligt ekv (14). Många algoritmer för lösning av olinjära problem utnyttjar gradienten till kostnadsfunktion och bivillkor:

$$\nabla J_u = \left(\frac{\partial J}{\partial u_1}, \frac{\partial J}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial J}{\partial u_N}\right) \ , \tag{15}$$

$$\nabla g_u = \left(\frac{\partial g}{\partial u_1}, \frac{\partial g}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial g}{\partial u_N}\right) \ . \tag{16}$$

Gradienter kan skattas med en finit differens-metod (FDM). En parameter i taget ändras då med ett litet steg och simulering körs med den varierade styrsignalen. Skattning av gradienten tar därför mycket beräkningstid. Bivillkoret i ekv (14) har en enkel form som ger en konstant gradient, ekv (17). Däremot krävs skattning med FDM för ∇J i ekv (15).

$$\nabla g_u = h * (1,1, \dots ,1) \tag{17}$$

2.4.1.2. Lösning av parameteroptimeringsproblem med bivillkor

Numerisk lösning av optimeringsproblem är en iterativ process, som startar i en gissning $\boldsymbol{u}_0$ och försöker att succesivt minska J och uppfylla bivillkor (minska g). Processen kan ses som sökandet efter en punkt $\boldsymbol{u}^*$ som uppfyller alla villkor för optimalitet. För att ett val av $\boldsymbol{u}$ ska vara optimalt måste det uppfylla villkoret

$$0 = L(\boldsymbol{u}) = \nabla J_u - \lambda \nabla g_u \ , \tag{18}$$

där $L(\boldsymbol{u})$ är den så kallade Lagrange-funktionen och λ är en på förväg okänd lagrange-multiplikator. Villkoret kan tolkas som att det i en optimal punkt inte finns någon riktning att gå i där bivillkoret uppfylls samtidigt som J minskar (Bryson, 1999).

I exemplet är gradienten för g oberoende av $\boldsymbol{u}$ och likformig, vilket innebär att för en optimal lösning måste gradienten till J vara likformig. För en optimal lösning måste det gälla att en bestämd liten förändring i luftflödet för ett tidsintervall ger lika stor ändring i utsläpp oavsett vilket tidsintervall som väljs.

2.4.2. Optimering av aktislamprocesser

Vid lösning av problem i optimal styrning måste hänsyn tas till (Banga m. fl., 2003):

- *Konvexitet:* Om problemet inte är konvext kan optimeringen stanna i ett lokalt minimum, som inte nödvändigtvis ligger nära globala minimum.
- *Numeriska problem:* Då utvärdering av kostnadsfunktion, bivillkor och gradienter sker genom simulering kan det hända att noggrannheten i den numeriska lösningen inte är tillräcklig, vilket kan göra att optimeringen stannar.

Det kan vara svårt att bevisa att ett problem är konvext så i praktiken görs detta inte för vissa svårare problem. Det är alltid möjligt att testa att använda en optimeringsalgoritm.

Om algoritmen konvergerar till en lösning så kan den sedan jämföras med andra styrsignaler för att avgöra hur bra lösningen är.

Optimering kan få användning vid design, vid utveckling av styrstrategier och direkt vid styrning av reningsverk. Utvecklingen av heltäckande processmodeller, effektiva numeriska metoder för simulering och snabbare datorer har lett till att optimering nu är ett lättillgängligt verktyg. En sammanfattning av studier med optimal styrning av ASP:er ges av Hreiz m.fl. (2015).

Det finns få studier med optimal styrning där luftflödet är den manipulerade variabeln, alltså där luftflödets profil över tid eller rum ska optimeras. Optimering har oftare använts för att hitta optimala stationära värden (vid konstanta insignaler) (Rivas m. fl., 2008), där konstanta börvärden ska väljas till olika reglerkretsar. Optimal styrning med luftflöde har undersökts för intermittent luftning i batch-processer, och vid konstant inflöde där rumsvariationen optimerades (se Olsson, 2005), men endast ett fåtal försök har gjorts att *optimera tidsvariationen* för kontinuerliga processer (Luo & Biegler, 2011; Åmand & Carlsson, 2012 & 2013b; Åmand, 2014).

Om optimal styrning ska tillämpas direkt i en styrstrategi finns det flera metoder att välja på. Den mest välkända är *modellprediktiv styrning* (eng. Model Predictive Control, MPC). MPC kan användas för reglering mot konstant börvärde, men även för att försöka minimera en kostnadsfunktion över en tid, t.ex. energibehov, något som ibland kallas ekonomisk MPC.

Möjligheten att använda optimal styrning som ett verktyg för utveckling och utvärdering av styrstrategier verkar inte ha utnyttjats särskilt ofta. En svårighet är att bestämma en lagom förenklad problemformulering. Att försöka optimera efter totalkväveutsläpp ger ett något besvärligt problem. Om problemet förenklas till ammoniumutsläpp blir det enklare att behandla.

2.5. ELKOSTNAD OCH TIDSVARIERANDE ELPRIS

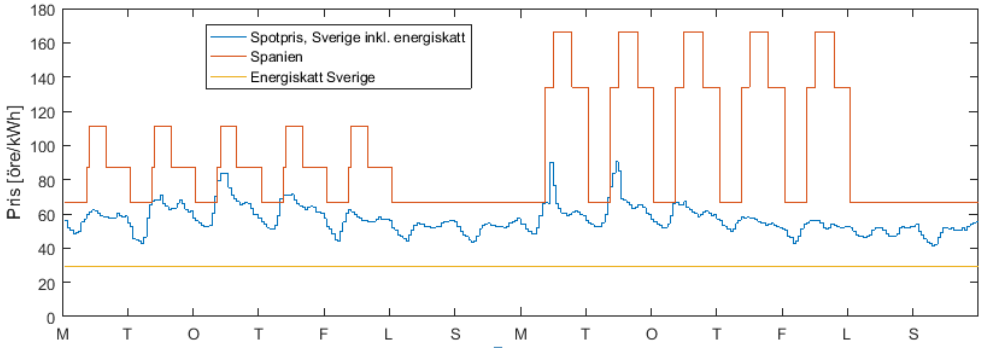
En elkund betalar ett antal olika avgifter som ska täcka produktion av el och drift av elnät. Beroende på hur elmarknaden är strukturerad kommer dessa antingen att betalas till ett företag eller delas upp mellan elnätsoperatör och elhandelsföretag. Oavsett vilket så kan avgifterna ur kundens synpunkt samlas i två delar (se t.ex. Olsson, 2008):

- *Energiavgift* (K_E) betalas för den energimängd som används och beräknas utifrån ett energipris (kr/kWh), som kan variera med tiden, tillsammans med energianvändningen timme för timme.
- *Effektavgift* (K_P) betalas för det högsta effektuttaget under en viss tidsperiod (vanligen månad eller år), och beräknas utifrån ett effektpris (kr/kW) tillsammans med det högsta uppmätta effektuttaget.

Energiavgiften består på den nordiska elmarknaden av flera delar, där de största är avgift till elhandel och produktion, nätavgift och skatt. Dessutom betalas elcertifikats-avgift, som går till att främja förnybar elproduktion. Kunden har även fasta avgifter för teckning av abonnemang och mätning, men de är för en stor elkund små i jämförelse (Olsson, 2008). I denna studie låg fokus på *energiavgiften*. Effektavgift är en mindre del av totala elkostnaden, och en anpassning av drift för att minska denna kan ses som ett separat problem (se kapitel 2.5.2).

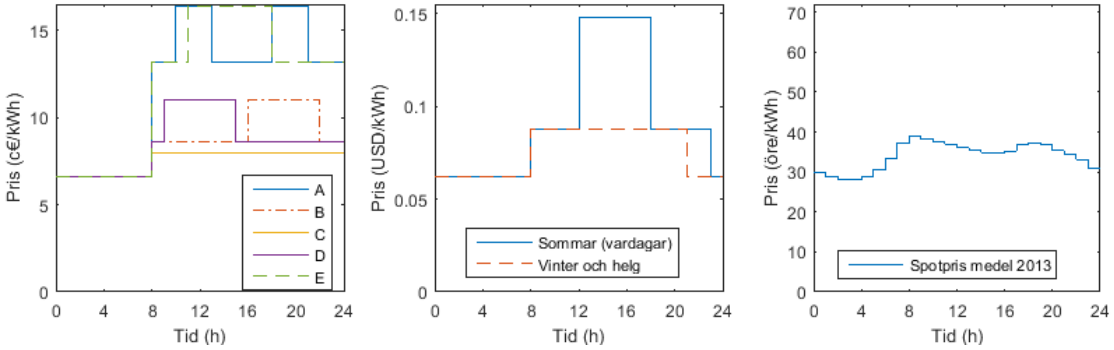
2.5.1. Energiavgift vid tidsvarierande elpris

Ett tidsvarierande energipris kan ges av en *tidsbaserad tariff* (Time-Of-Use, TOU) eller av ett *realtidspris*, vilket illustreras med exempel i Figur 10. Vid TOU-tariff beror priset på tid under dygnet enligt en prisprofil som ändras mellan månader eller säsonger. I Sverige erbjuds avtal med real-tidspris kopplat till spotpriset på nordiska *day-ahead*-marknaden för el, *Nord Pool Spot*. Spotpris bestäms för ett dygn framåt i tiden, är olika varje dygn, men följer ett allmänt dygnsmönster med lägre pris på natten. Statistik över timpriser tillhandahålls av Nord Pool Spot och av vissa elhandelsföretag.



Figur 10. Exempel på tidsvarierande energipris. En TOU-tariff från Spanien och spot-pris (SE3) för perioden måndag 9/6 till söndag 23/6 år 2014. Källor: Aymerich m.fl. (2015), Nord Pool Spot (2016).

För TOU-tariffen är priset på helgen konstant lågt medan priset på vardagar är högre dagtid. Efter första helgen sker en växling till högsäsong med högre pris. Fler exempel visas i Figur 11 tillsammans med medelvärde för spotpris år 2013.



Figur 11. Vänster: Elpris enligt TOU-tariff från Spanien. A) Vinter, B) vår/höst, E) Högsommar. Mitten: TOU-tariff från Kalifornien. Höger: Medelvärde för spot-pris (SE3) för 2013. Källor: Aymerich m.fl. (2015), Rieger m.fl. (2015), (NordPool, 2016).

Elpriset under dagtid kan vara dubbelt så högt som under natten för månader med hög efterfrågan på el. Även om spotpriset under dygnet i medel är jämnare så kan priset tidvis bli mycket högt vid hög efterfrågan.

Energiavgift (kr) för en tidsperiod beräknas enligt

$$K_E = \sum_{i=1}^{n} p_{E,i} * E_i \ , \qquad (19)$$

där $p_{E,i}$ är totala energipriset inom timme i (kr/kWh), och E_i är använd energi (kWh). I totala energipriset ingår pris från elhandlare och nätoperatör samt energiskatt.

2.5.1.1. Energiskatt och mervärdesskatt

Skatt på el ligger i de flesta EU-länder som ett fast energipris på 0 till 35 öre/kWh. Därtill betalas mervärdesskatt i storleken 19 till 25 % på totala elkostnaden. I Sverige år 2016 var energiskatten 29,2 öre/kWh och mervärdesskatten 25 %. När energiskatt är satt som ett fast pris minskas den relativa variationen i elpriset, och då motverkas incitamenten för efterfrågerespons (SVK, 2015). Vissa grupper av industriella elkunder betalar sänkt energiskatt, men reningsverk hör inte till dessa.

2.5.2. Effektavgift

Ett kommunalt reningsverk är en elkonsument av industristorlek och måste därför teckna ett *effektavtal*. En elkund med effektavtal betalar effektavgift men får lägre energipris i nätavgiften (kr/kWh). Hur effektavgift beräknas kan skilja sig något mellan olika avtal (Aymerich m. fl., 2015). Den enklaste formen är att avgiften ges av det högsta effektuttaget under en tidsperiod, P_{topp}, multiplicerat med avtalat effektpris, p_P:

$$K_P = P_{topp} * p_P \qquad (20)$$

En annan form är att kunden årsvis väljer ett abonnerat effektuttag som de betalar en viss avgift för, och sedan betalas en ytterligare avgift om avtalad effekt överskrids.

I Sverige tas effektavgift ut av nätoperatören, och storleken är därför kopplad till drift av elnätet. För reningsverk utgör den uppskattningsvis 5 till 20 % av totala kostnaden. På elmarknader med vertikal integrering av elhandel och nät kan avgiften vara kopplad till dyr produktion för att täcka toppar och kan då vara högre (Rieger m. fl., 2015).

2.5.2.1. Anpassning för att sänka effektavgift

Effektavgiftens storlek beror bara av det högsta effektuttaget under en period. För att minska avgiften gäller det att fokusera på de extrema dagar och timmar som leder till högst effekt. För ett reningsverk är det troligt att extrema dagar är de med högt inflöde vid stora regn eller snösmältning (inläckage). Vid regn ökar effektuttaget för pumpning som en följd av ökat flöde, och eventuellt för luftning som en följd av ökad belastning. Ett exempel på hur effektavgift påverkas av inloppspumpning återges av Olsson (2008).

Att välja en styrstrategi som ger högre toppeffekt, t.ex. *ammoniumstyrning* i jämförelse med *konstant syrehalt*, kan öka effektavgiften (Aymerich m. fl., 2015). Detta kan dock motverkas med åtgärder under extrema dagar, till exempel att tillfälligt övergå till konstant, lägre syrehalt eller att koppla bort en mindre viktig process (lastavkoppling). Att minska effektavgift kan därför ses som ett eget problem, separat från att minska energiavgift. Att införa åtgärder inriktade på effektavgift kan vara enklare, men effektavgiften är en mindre del av totala elkostnaden.

2.5.3. Anpassning av drift efter energipris

Från elmarknadens synpunkt används begreppet efterfrågerespons för att beskriva när en elkund förändrar sin elanvändning från normalt användningsmönster som svar på variationer i elpris. Ett annat begrepp som används är förbrukningsflexibilitet.

Anpassning efter elpris kan ske antingen passivt eller aktivt.

- En *passiv anpassning* är att välja en strategi som är bättre anpassad till hur priset i allmänhet varierar, med högre pris på dagen och lägre på natten.
- En *aktiv anpassning* är att välja en strategi som varje dygn eller timme tar hänsyn till en gällande elpris.

En enkel passiv anpassning är att köra intermittenta processer under natten. Det har föreslagits att renspolning av filter och eventuell centrifugering av slam bör ske vid lågt elpris (se t.ex. Kjellén & Andersson, 2002). Processer som körs intermittent bidrar mindre till energiförbrukningen, så detta kanske främst kan sänka effektavgiften.

De största elförbrukarna luftning och pumpning körs däremot kontinuerligt och det är därför svårare att omfördela denna last. Det är också svårare att uppskatta hur en omfördelning påverkar utsläpp och energibehovets fördelning över tid.

2.6. TIDIGARE STUDIER

Gällande både luftning och magasin finns det två förbisedda möjligheter i tidigare studier. Det finns få studier där aktiv anpassning har undersökts och möjligheten att jämföra strategier vid samma ammoniumutsläpp har inte använts.

2.6.1. Magasinering som anpassning till varierande elpris

Utjämning har länge pekats ut som ett sätt att minska både effekt- och energiavgift för reningsverk med TOU-tariff. I litteraturen finns förslag på hur storleken på besparingen kan uppskattas med enkla *statiska* modeller (Jenkins, 2013). En bättre skattning kan fås med en dynamisk ASP-modell. Det blir då möjligt att utvärdera godtyckliga profiler för flöde och belastning. Dessutom kan luftningsstrategier studeras simultant med utjämning, och det blir möjligt att hålla samma utsläpp. Magasin kan användas för utjämning till konstant flöde, men även för att omfördela flöde och belastning.

Leu m.fl. (2009) undersökte hur anpassad magasinering påverkar elkostnad i en modellstudie med tre olika strategier: 1) Toppkapning, 2) Konstant flöde, 3) Flöde förskjutet till tid med lägre pris (natt). Syrehalt hölls på samma konstanta nivå. Kostnad beräknades utifrån realtidspriser med stark variation från södra Kalifornien. Årlig kostnadsbesparing beräknades för strategi 1, 2 och 3 till 6 %, 10 % respektive 16 %, med magasinsvolymer på 5 000, 7 500 respektive 10 000 m^3. Energibehov redovisas inte, och ej heller reningsresultat, men utifrån upplägget är det troligt att utsläpp minskade och att energibehov ökade något (Jämför kapitel 2.2.4.3).

Vid aktiv anpassning av flöde och belastning är det naturligt att potentialen är högre, särskilt gällande realtidspriser där varje dygn har en egen prisprofil. Detta föreslås i litteraturen av bland andra Thompson m.fl. (2010), men det finns få publicerade förslag på hur en sådan styrstrategi kan se ut. Ett förslag är att låta flödets variation vara linjärt proportionellt mot elpriset (Bjerg, 2015), något som inte verkar ha undersökts med en

dynamisk ASP-modell. Den kostnadsminskning som visades av Leu m.fl. (2009) ger anledning att vidare studera aktiv anpassning i stil med Bjerg (2015).

2.6.2. Elkostnad för olika luftningsstrategier

Vid utvärdering av olika styrstrategier för luftning jämförs vanligen energibehov. Det är mindre vanligt att jämförelse görs för elkostnad (Aymerich m.fl., 2015; Rieger m.fl. 2015). Med tidsvarierande elpris påverkas skillnaden mellan olika styrstrategier. Med *ammoniumstyrning* blir variationen i luftflöde högre än vid konstant syrehalt. Hög belastning sammanfaller för de flesta verk med högre elpris under dagtid, vilket då innebär att ammoniumstyrning är sämre anpassat till elprisprofilen. Aymerich m.fl. (2015) utförde en modellbaserad undersökning av detta, där tre olika styrstrategier simulerades över ett år varefter energibehov och elkostnad beräknades. En elprisstruktur från Spanien användes, där energipriset ges av en TOU-tariff och effektavgiften beräknas utifrån en abonnerad effekt. Ammoniumstyrning gav lägre kostnad än styrning med konstant syrehalt, men inte lika stor besparing som utan varierande elpris.

Möjligheten att aktivt anpassa luftning efter elpris har inte heller fått mycket uppmärksamhet. Det har föreslagits att syrehalt kan sänkas vid högt elpris men det har inte utretts om det är lönsamt. När utsläppsvillkor är formulerade för utsläppt mängd över en längre tidsperiod så krävs hänsyn till detta. För att en minskad syrehalt vid högt elpris ska vara lönsam krävs att nitrifikationen kan tas igen under en annan period till en lägre kostnad. Optimering ger en möjlighet att söka efter den styrsignal som ger minimal elkostnad givet en viss timprisprofil, under bivillkoret att ett visst utsläpp av ammonium ska hållas. Denna kostnadsoptimala styrning skulle kunna jämföras med styrstrategin *konstant syrehalt*, men en kostnadsbesparing skulle då kunna utgöras av både en energibesparing och en bättre anpassning till timprisprofilen. Ett bättre mått på potentialen till kostnadsbesparing fås om kostnadsoptimal styrning jämförs med energioptimal styrning, där båda håller samma ammoniumutsläpp.

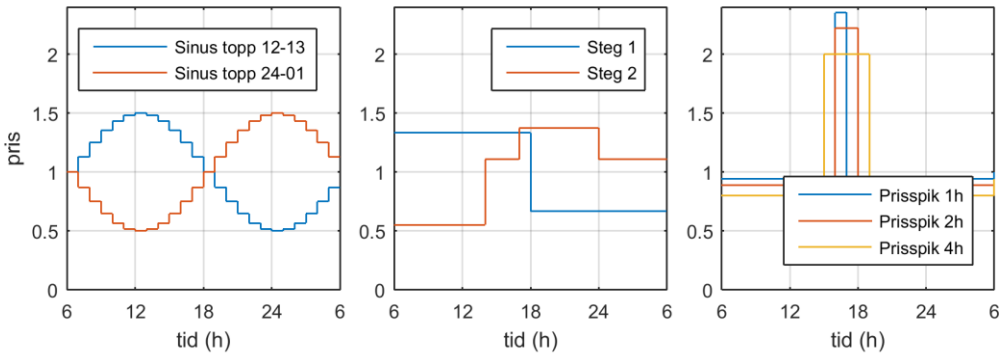
3. METOD

Potentialen för minskning av elkostnad genom anpassning efter varierande elpris undersöktes med hjälp av en modell för en aktivslamprocess (ASP) med nitrifikation. Utgångspunkten var att strategier som jämförs ska hålla samma *flödesviktade dygnsmedelvärde av utgående ammonium*, $S_{NH,24e}$. Arbetet delades in i två delstudier, där två olika möjligheter studerades:

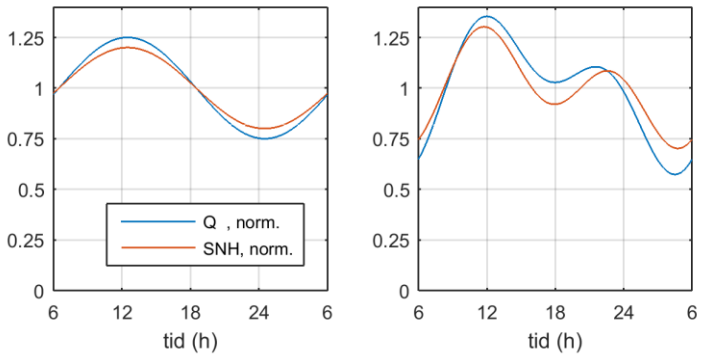
1. *Anpassad luftning* studerades genom jämförelse mellan energioptimal och kostnadsoptimal luftning vid en viss elprisprofil (kapitel 3.2).
2. *Anpassad magasinering* studerades genom att ASP-modellen kompletterades med en modell för ett magasin. Flödet ut från magasinet tillkommer då som en styrsignal som måste väljas, utöver luftningen. Flödet valdes till enkla former anpassade efter elpris (kapitel 3.3).

3.1. PRISPROFIL, INFLÖDE, SCENARION, PROCESSMODELL

Båda delstudier genomfördes med 6 *scenarion* uppbyggda med olika val av inflöde, modellparametrar och $S_{NH,24e}$. Ett antal *prisprofiler* studerades (Figur 12). Potentialen utvärderades för ett antal *kombinationer av scenario och prisprofil*. Fyra olika inflödesprofiler användes, varav tre byggdes upp av enkla sinusfunktioner och en av fourier-serier med två toppar (Figur 13).



Figur 12. Prisprofiler av tre typer. Från vänster till höger: sinusform, stegform, spikform.



Figur 13. Tidsvarierande inflöde. Vänster: Enkel sinus-profil. Höger: Två toppar.

Flöde, totalkväve och total-COD beskrivs av varsin funktion. För varje tidpunkt delades dessa upp i ASM1-fraktioner enligt Gernaey m.fl. (2011). Ett exempel visas i Tabell 3.

Tabell 3. Uppdelning av inflödets totalkväve och total-COD i de fraktioner som används i ASM1, för fallet då tot-N = 40 mg/l och tot-COD = 300 mg/l

	SI	SS	XI	XS	XBH	SNH	SND	XND
Konc.	30	90	32,76	129,24	18	24	3,95	12,05
Enhet			Mg COD/l				Mg N/l	

Koncentrationen sattes till 0 för S_O, S_{NO}, X_{BA} och X_P.

3.1.1. Scenarion

Tanken var att urvalet av scenarion som sammanställs i Tabell 4 skulle representera ASP:er som drivs under olika förutsättningar. För ett scenario hölls genomgående ett visst $S_{NH,24e}$, som bestämdes genom simulering med konstant syrebörvärde. För att få scenarion med höga eller låga syrehalter och $S_{NH,24e}$ varierades inflöde och värde på nitrifikationsparametrar. Slamålder valdes för att justera till högt eller lågt $S_{NH,24e}$.

Tabell 4. Sammanställning av scenarion. X: Ändrade parametrar, μ_A = 0,3. K_{OA} = 0,6.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Inflöde	A	A	A	B	C	D
Syrebörvärde	1,5	2,0	2,25	1,5	2,25	2,25
Par. ändrade			X	X	X	X
$S_{NH,24e}$	1,3	1,3	3,5	4,0	3,5	3,0

Färgkodningen anger om värdet är högt (röd), mellan (grå) eller lågt (blå). Om ett syrebörvärde är högt eller inte ska ses i relation till parametern K_{OA}. För inflöde gäller färgkodningen istället variationen (Tabell 5). Inflöde A och D visas i Figur 13.

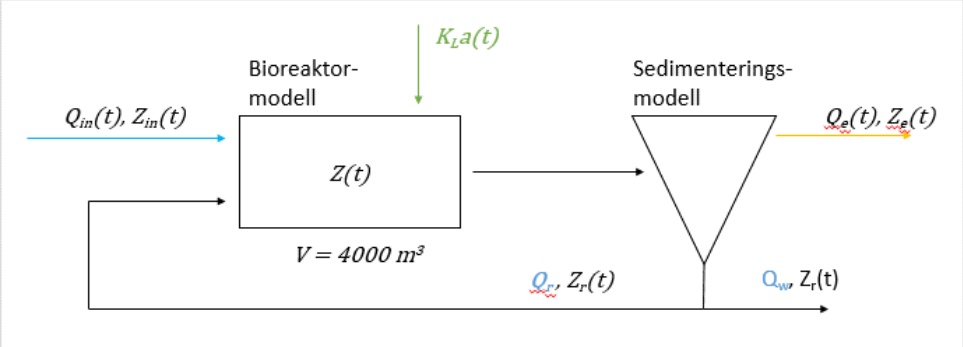
Tabell 5. Sammanställning av inflöden. För *Tot-N* anges aritmetiskt medel.

	Enhet	Inflöde A	Inflöde B	Inflöde C	Inflöde D
Form	-	Sinus	Sinus	Sinus	Fourier
Flöde medel	m3/d	14 000	14 000	14 000	14 000
Flöde max	m3/d	17 500 (+25%)	16 800 (+20%)	16 800 (+20%)	18 900 (+35%)
Tot-N medel	mg N/l	40	30	40	40
Tot-N max	mg N/l	48 (+20%)	34 (+13%)	50 (+25%)	52 (+30%)

Inflöde A kan ses som representativt för en dellinje i ett större verk med relativt låg variation. Inflöde D har högre variation och kan tänkas representera ett mellanstort eller mindre reningsverk. Inflöde C har ungefär lika stor variation i belastning (ekv (2)) som A, men större variation i koncentration.

3.1.2. Processmodell

En avskalad variant av BSM1 med en enda luftad bassäng, i stil med Åmand & Carlsson (2012), designades för studien (Figur 14). Sedimentering modellerades som en statisk separationspunkt uppbyggd kring massbalans. Returslamflödet var konstant, lika med 0,7 gånger medelvärdet av Q_{in}. Överskottsslamflödet var konstant, men med olika värde för varje scenario.



Figur 14. Processmodellen – En avskalad variant av BSM1 med en luftad bassäng och ideal sedimentering. **Z** innehåller alla tillståndsvariabler för aktivslammodellen.

I simuleringsstudien är det luftning som ger energibehov. Tidsvariationen i energibehov beräknas utifrån använd styrsignal för luftning, K_La. Ett linjärt samband antogs mellan K_La och elektrisk effekt till luftning:

$$P(t) = k * K_La(t) \ . \tag{21}$$

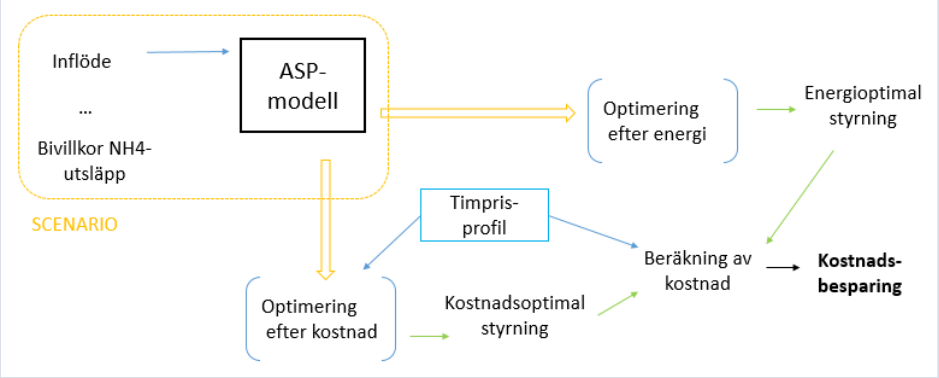
Energibehovet för en styrsignal under ett tidsintervall ges då av

$$E = k \int_{t_1}^{t_2} K_La(t)dt \ . \tag{22}$$

Om K_La är konstant över en timme blir energibehovet helt enkelt en summering av K_La över de timmar som studeras. Vid en relativ jämförelse av styrsignaler är det inte nödvändigt att bestämma konstanten k.

3.2. DELSTUDIE 1: KOSTNADSOPTIMAL LUFTNING

Elkostnad jämfördes mellan energioptimal och kostnadsoptimal luftning vid en given prisprofil, där båda höll samma $S_{NH,24e}$ (Figur 15). Kostnad för de två styrsignalerna beräknades utifrån aktuell prisprofil, och därefter beräknades den relativa besparingen.



Figur 15. Schema för beräkning av kostnadsbesparing.

Studien gällde ett dygn, men det är problematiskt att utvärdera effekten av styrning om simulering sker över ett enda dygn. Därför utvärderades den *periodiska lösningen*, som nås när simulering körs över ett stort antal dygn med samma inflöde och styrsignal. Då gäller att tillståndet vid tiden t är samma som vid $t + T$, där periodtiden T är ett dygn.

Initialtillstånd sattes till slutvärden från simulering med konstant syrehalt. För simulering användes en metod med adaptivt val av steglängd (*ode45* i Matlab).

3.2.1. Optimeringsproblemet

Att hitta den styrsignal som ger minimal elkostnad samtidigt som den håller ett bestämt $S_{NH,24e}$ är ett problem i optimal styrning. Problemet omvandlades till ett problem i parameteroptimering (se kapitel 2.4), och till det problemet användes sedan en optimeringsalgoritm av typen SQP (*fmincon* i *Optimization Toolbox*).

Styrsignalen (K_La) delades in i 24 entimmes intervall, där den för timme nr i hålls konstant lika med u_i. Styrsignalen kan då representeras med en vektor: $\boldsymbol{u} = [u_1, ..., u_{24}]^T$. Även priset på el sattes konstant inom en timme, med $\boldsymbol{p} = [p_1,..., p_{24}]$. Problemet blir att finna den vektor $\boldsymbol{u}$ som minimerar elkostnaden,

$$\min_{\boldsymbol{u}} f(\boldsymbol{u}) = k \sum_{i=1}^{24} p_i u_i \ , \tag{23}$$

under ett bivillkor för flödesviktat dygnsmedelvärde av utgående ammonium,

$$\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} \frac{Q_{ut}(t) S_{NH}(t)}{Q_{ut,medel}} dt = S_{NH,24e} \ , \tag{24}$$

där $Q_{ut,medel}$ är medelvärdet för utflödet. Utvärdering sker över periodtiden T = 1 dygn. Starttiden för utvärdering, t_1, valdes till 8 veckor.

Optimering med en mängd olika startgissningar gav samma lösning, vilket tyder på att problemet kan vara konvext (inom ett avgränsat område) och att metoden fungerar bra.

3.2.2. Kombinationer av prisprofil och scenario

Ett scenario simulerades först med *PI-reglering mot konstant syrebörvärde*, och $S_{NH,24e}$ beräknades. Därefter utfördes energioptimering med bivillkoret för satt till detta värde och energibesparingen beräknades. För varje scenario utfördes kostnadsoptimering med 7 olika prisprofiler (Figur 12) och besparingen beräknades i jämförelse med energioptimal styrning. Även en variant av S4 med konstant inflöde studerades i kombination med stegprofiler med olika amplitud.

3.3. DELSTUDIE 2: ANVÄNDNING AV UTJÄMNINGSMAGASIN

Målet var att uppskatta potentialen för kostnadsminskning vid omfördelning av flöde och belastning anpassat efter varierande elpris. En magasinsmodell lades till före ASP-modellen och flödet ut från magasinet var den styrsignal som skulle väljas.

Tre typer av flödesprofiler undersöktes, där de två senare är anpassade efter elpris:

A. Konstant flöde
B. Variation i flöde proportionellt mot variation i elpris
C. Variation i belastning proportionellt mot variation i elpris

Energibehovets fördelning över dygnet ges liksom tidigare av luftflödet (K_La). När flöde från magasinet tillkommer som styrsignal kvarstår problemet att bestämma luftflöde.

Luftningen sattes för varje strategi till den energioptimala lösningen. På så vis hölls även $S_{NH,24e}$ på den nivå som definierats för varje scenario.

De anpassade strategiernas elkostnad beräknas liksom tidigare i relativt mått. Här i jämförelse med elkostnaden utan utjämning. Energibesparing beräknades för utjämning med konstant flöde jämfört med ej utjämnat inflöde. Dessutom undersöktes effekten av att bara kapa flödestoppen (se kapitel 2.2.4.2)

En snabb uppskattning på potentiell energibesparing vid flödesutjämning fås genom att konstruera ett helt konstant inflöde utifrån ett tidsvarierande inflöde. För varje scenario bildades ett konstant inflöde, där koncentrationer sattes till flödesviktade medelvärden. Att i praktiken nå ett helt konstant inflöde är dock inte realistiskt, och kanske inte heller önskvärt om elpriset varierar. Med en modell för ett magasin ges bättre möjlighet att studera omfördelning av flöde och belastning.

3.3.1. Modell för magasin

Ett genomströmningsmagasin modellerades som en icke-reaktiv, totalomblandad bassäng placerat före aktivslamprocessen. Den matematiska modellen ges av

$$\dot{c}(t) = \frac{1}{V(t)}[Q_{in}(t)c_{in}(t) - Q_m(t)c(t)]\,, \tag{25}$$

$$\dot{V}(t) = Q_{in}(t) - Q_m(t)\,, \tag{26}$$

där V är den varierande volymen, c är koncentrationen för ett ämne i magasinet, Q_m är flödet ut från magasinet, Q_{in} är flödet in till magasinet och c_{in} är koncentrationen i inflödet. Koncentrationen i utflödet är lika med koncentrationen i magasinet.

Samma modell används i BSM2 för utjämning av rejektvatten (Nopens m.fl. 2010), och därför utnyttjades den färdiga implementeringen för Matlab Simulink. En initial volym måste väljas, minst så stor att V aldrig går under noll. Istället för att direkt välja ett initialvärde på V kan V_{max} väljas och sedan beräknas det initiala värdet på V.

Styrsignalen Q_m över ett dygn bestämdes med 24 parametrar, $\boldsymbol{Q_m} = [Q_{m,1}, \ldots, Q_{m,24}]$, och var linjär mellan värden definierade i varje heltimme. Valet av $\boldsymbol{Q_m}$ måste göras så att medelvärdet är samma som för Q_{in}, annars fås ingen periodisk lösning. Den periodiska lösningen studerades och på så vis garanteras att utflödet från magasinet över ett dygn är lika stort som inflödet, både gällande vattenvolym och också mängden föroreningar. Magasinsmodellen samkördes med ASP-modellen, något som är möjligt eftersom utflödet från magasinet svänger in till en periodisk lösning på kort tid.

3.3.2. Strategier för val av styrsignal till magasinet

Att utnyttja ett magasin på ett optimalt sätt är att styra utflödet så att reningsverkets drift optimeras, under den begränsning som ges av tillgänglig magasinsvolym (se kapitel 2.2.3). En optimeringsmetod liknande den som användes för luftning är tänkbar, men att hitta en optimal styrning med begränsad volym och givet $S_{NH,24e}$ är ett svårare problem. Istället valdes en enklare metod för att undersöka anpassning efter elpris. Flödesprofilen valdes enligt två strategier, B och C, som formar variationen i flöde respektive belastning efter elprisets variation.

3.3.2.1. Strategi A: Konstant flöde

Konstant flöde undersöktes för samtliga scenarion och energibesparing beräknades. För ett urval av prisprofiler beräknades kostnadsbesparing.

3.3.2.2. Strategi B: Variation i flöde proportionellt mot elprisvariation

Flödets variation sattes i varje tidpunkt proportionellt mot elprisets variation,

$$\frac{Q_m(t) - Q_{m,medel}}{Q_{m,medel}} = \gamma \frac{p(t) - p_{medel}}{p_{medel}}, \tag{27}$$

vilket leder till

$$Q_m(t) = Q_{m,medel}\left(1 + \gamma \frac{p(t) - p_{medel}}{p_{medel}}\right), \tag{28}$$

där Q_m är flödet ut från magasinet, p är elpris och γ är en vald proportionalitetsfaktor. Exempel: Om lägsta pris är 25 % lägre än medelpriset och γ väljs till -1 så fås ett högsta flöde som är 25 % högre än medelflödet, vid tiden för lägsta timpriset.

3.3.2.3. Strategi C: Variation i NH_4-belastning prop. mot elprisvariation

Variationen i massflöde för ammonium, M_{NH}, sätts proportionellt mot elpris,

$$\frac{M_{NH}(t) - M_{NH,medel}}{M_{NH,medel}} = \lambda \frac{p(t) - p_{medel}}{p_{medel}}, \tag{29}$$

vilket med ekv (1) ger

$$Q_m(t) = \frac{M_{NH,medel}}{S_{NH,medel}}\left(1 + \lambda \frac{p(t) - p_{medel}}{p_{medel}}\right), \tag{30}$$

där $M_{NH,medel}$ och $S_{NH,medel}$ är aritmetiska medelvärden över dygnet. Belastning, L_{NH}, är proportionellt mot massflöde. För att beräkna $Q_m(t)$ krävs då att $S_{NH,m}(t)$ är känd, men den varierar något beroende på val av Q_m-profil. För enkelhets skull användes i ekv (30) den $S_{NH,m}$-profil som gavs av simulering med konstant flöde. Det gav en L_{NH}-*profil* nära proportionell mot elpris.

3.3.2.4. Kombinationer av scenario och prisprofil

Ett begränsat antal olika scenarion (3.1.1) i kombination med prisprofiler studerades, med målet att ge en översiktlig bild av resultatet av prisanpassad styrning av magasin. För att rättvist kunna jämföra två olika strategier är det rimligt att de ska använda samma magasinsvolym. Gällande B och C sattes V_{min} till 25 % av V_{max}. För att göra en mer rättvis jämförelse med A bildades A*, där V_{max} är samma som för B eller C. För strategi B och C testades flera val av proportionalitetskonstanten γ.

Undersökta kombinationer:

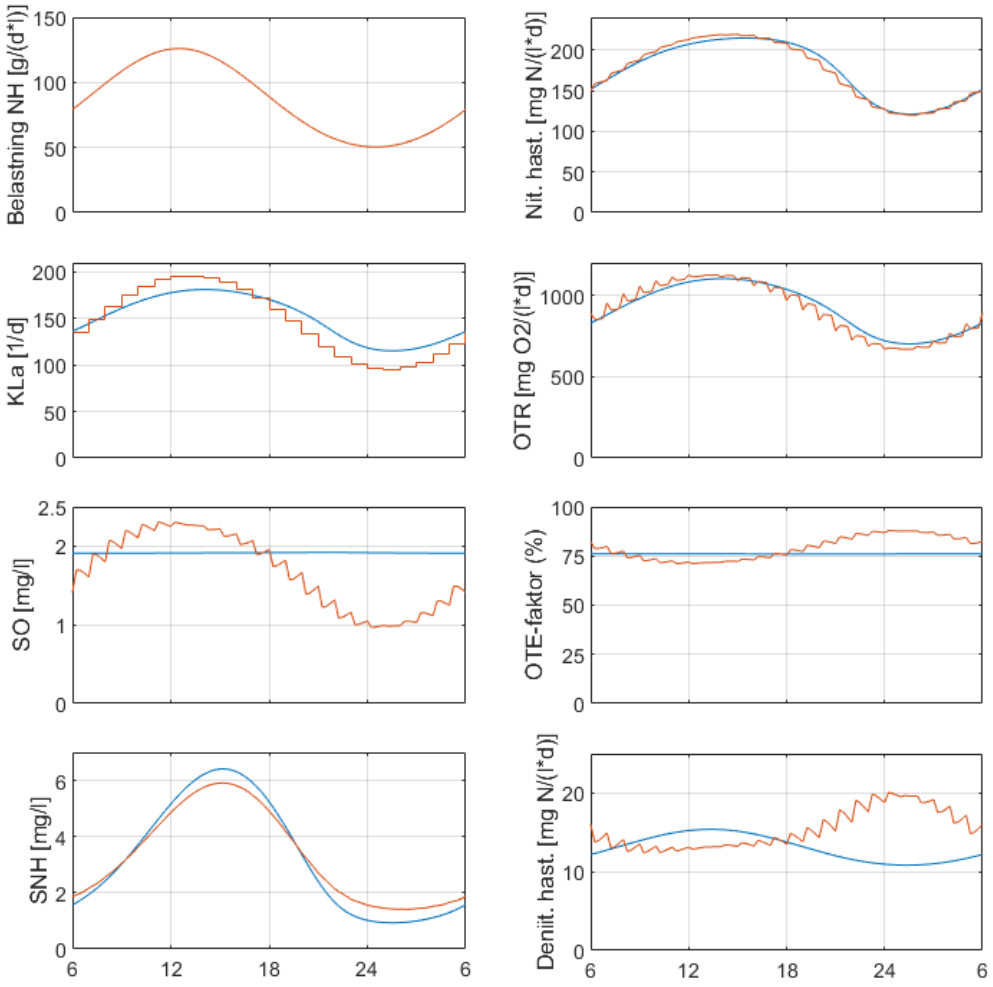
- Scenario 3, sinusform, strategi A, A* och B
- Scenario 5, stegform, strategi A, A* och C
- Scenario 4 med idealt konstant inflöde, strategi A och B

4. RESULTAT

I delstudie 1 undersöktes anpassad luftning och i delstudie 2 undersöktes fallet att processen utökats med ett utjämningsmagasin.

4.1. ENERGIOPTIMAL LUFTNING

Energioptimal luftning togs fram för varje scenario (S1 till S6) med bivillkoret att flödesviktat dygnsmedelvärde av utgående ammoniumkoncentration ($S_{NH,24e}$) skulle hålla ett bestämt värde, som bestämdes genom simulering med PI-reglering mot konstant syrehalt. Energibehovet för optimal luftning jämfört mot konstant syrehalt redovisas i Tabell 6, tillsammans med $S_{NH,24e}$ för samtliga scenarion. Jämförelsen visar vad som händer när syrehalten varieras, något som har stor betydelse när luftning anpassas efter elpris. Ett exempel av optimeringen visas i Figur 16 där konstant syrehalt och optimerad luftning jämförs för scenario 3.



Figur 16. Energioptimal luftning (röd) jämfört med konstant syrehalt (blå). Scenario 3.

Skillnaden i K_La -profil är liten men ger stor relativ variation i syreprofil. Den tandade formen på syreprofilen är en följd av att K_La -profilen är styckvis konstant. Effekten på ammoniumprofilen är liten. Trots att syrehalten varierar mellan 1 och 2,3 mg/l och att flera processers hastighet är direkt beroende av syrehalt så är det få processer som

markant påverkas. Exempelvis nitrifikationshastigheten påverkas inte särskilt mycket, eftersom varje försök att påverka denna dämpas av att hastigheten beror även på S_{NH}.

Tabell 6. Energioptimal lösning i jämförelse med konstant syrehalt vid samma $S_{NH,24e}$. Visar energibesparing, och även förändring i total syretillförsel, *OT*, och i syreöverföringseffektivitet, *OTE*.

	Enhet	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$S_{NH,24e}$	mg N/l	1,279	1,281	3,518	3,961	3,490	3,012
OT	%	– 1,11	– 0,86	– 0,74	– 0,27	– 1,06	– 0,97
OTE	%	+1,59	+2,33	+2,57	+0,45	+3,20	+3,00
Energibesparing	%	2,7	3,1	3,2	0,71	4,1	3,9

Undantaget S4 med låg variation i inflödet var besparingen mellan 2,7 och 3,9 %. Besparingen för S1 som utgår från syrebörvärde 1,5 mg/l var nästan lika hög som för S2 som utgår från 2,0 mg/l. Källan till besparingen var något annorlunda, där den för S1 till större del kom från minskad total syreöverföring, *OT*, vilket beror på att syrehalten under låglasttid går så lågt att denitrifikationen ökar.

Resultaten tyder på att förhållanden som ger högre energibesparing vid energioptimal luftning i jämförelse med konstant syrehalt är:

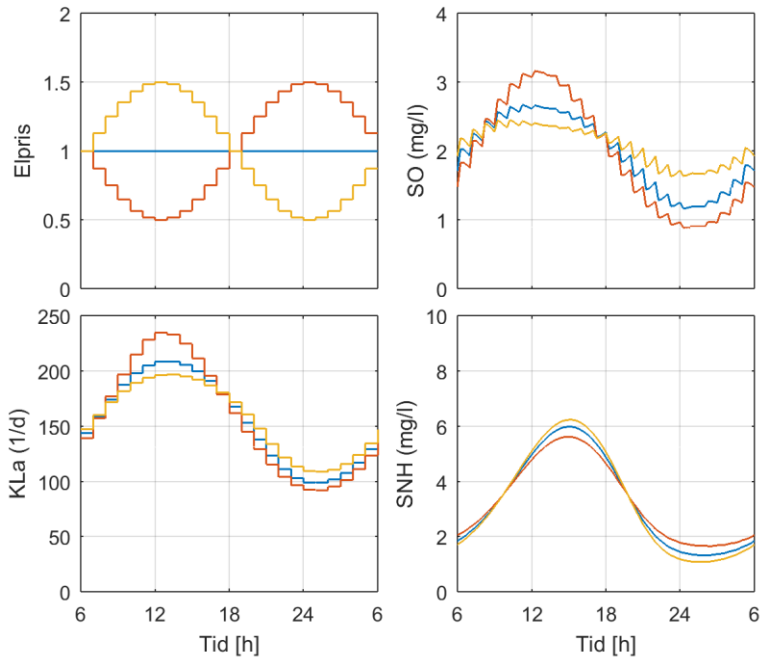
- Hög variation i kvävebelastning (S5, S6).
- Att syrehalten är hög innan optimering, d.v.s. hög konstant syrehalt (S2, S3, S5, S6). Detta kompenseras delvis för scenarion som utgår från låg syrehalt (S1) genom att energioptimala styrningen leder till låg syrehalt under lågbelastningstid, och då ger denitrifikation.
- Låg ammoniumhalt under lågbelastningstid (S1, S2), som är en följd av variationen i inflödet och övriga förutsättningar.

4.2. DELSTUDIE 1: KOSTNADSOPTIMAL LUFTNING

Kostnadsoptimal luftning togs fram för kombinationer av 6 scenarion och 7 prisprofiler. För varje kombination beräknades besparingen i jämförelse med *energioptimal luftning*. Optimeringsalgoritmen konvergerade i samtliga presenterade resultat.

4.2.1. Sinusformad prisprofil

Två sinusformade prisprofiler studerades och resultatet visas i Figur 17.



Figur 17. Övre vänstra figur: Två olika sinusformade prisprofiler: Pristopp 24–01 (röd), Pristopp 12–13 (gul). Övriga figurer: Kostnadsoptimal lösning (röd och gul) och energioptimal (blå). Scenario 3.

Trots att priset varierar är skillnaden i K_La -profil liten mellan energioptimal och kostnadsoptimal luftning, enligt Tabell 7. Ändå ses relativt stor skillnad i S_O-profiler, men liten skillnad i S_{NH}-profiler. Det går att ana en liten fasförskjutning i K_La, där röd kurva är förskjuten åt vänster och gul åt höger.

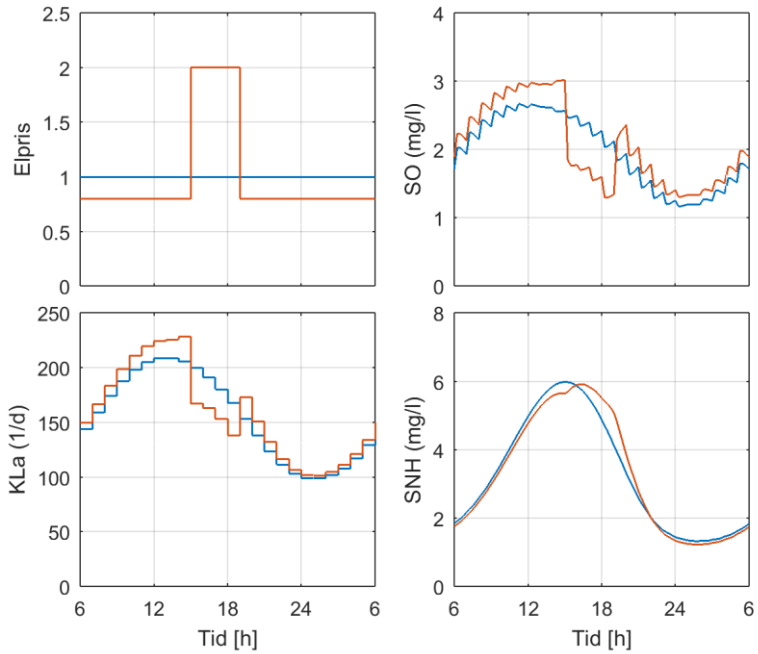
Tabell 7. Besparing (%) vid sinusformade prisprofiler. Besparingen avser kostnadsoptimal luftning jämfört med energioptimal luftning.

Tid för pristopp	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
24–01	0,89	0,97	1,16	1,54	1,16	1,33
12–13	0,64	0,69	0,82	1,18	0,79	1,04

Prisbesparingen var relativt liten för samtliga kombinationer. En något högre besparing uppkom då lågt elpris sammanfaller med hög belastning. Scenarion med högre ammoniumnivå (S3, S4, S5, S6) gav något högre kostnadsbesparing. Högst besparing gav S4 som har en låg variation i inflöde, hög ammoniumhalt och behöver en relativt låg syrekoncentration.

4.2.2. Prisprofil med spik

Tre profiler med prisspik studerades och resultatet visas i Figur 18 samt Tabell 8.



Figur 18. Prisprofil med spik och kostnadsoptimal luftning (röd) jämfört med energioptimal (blå) för scenario 3.

Kostnadsoptimal $K_L a$ -profil är avsevärt lägre vid pristoppen, och är extra hög ett par timmar före och efter toppen. Syrehalten är tydligt lägre under de 4 timmar toppen varar. I ammoniumprofilen ses ändå ingen större skillnad.

Tabell 8. Kostnadsbesparing (%) vid prisspik och kostnadsoptimal luftning. * Luftning avstängd viss tid.

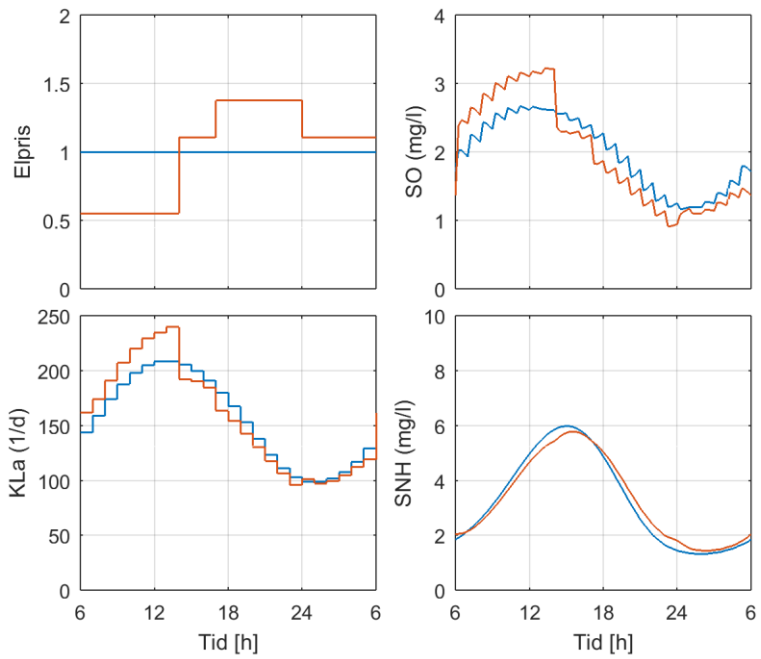
Prisprofil	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
1 h topp	0,83	0,77	1,0	2,2 *	1,04	-
2 h topp	1,08	1,05	1,6	2,3	1,63	-
4 h topp	1,36	1,42	2,2	2,9	2,23	-

Besparingen är i flera kombinationer större än vid sinusform. Förklaringen till det ligger troligen delvis i den högre prisskillnaden och delvis i att det snabbare prishoppet gör att fördröjningen i bassängen kan utnyttjas mer. Det är till viss del möjligt att avvakta en timme med att nitrifiera inkommande ammonium.

Det var möjligt att sänka $K_L a$ relativt mycket under en prisspik och på så vis spara in på elkostnad, men besparingen var som högst drygt 2 % vid en 4 h lång spik. S4 var lite speciellt eftersom $K_L a$ sänktes kraftigt, vilket aktiverade denitrifikation och därmed sänkte syrebehovet. Vid 1 h topp stängdes luftning av helt, vilket kan ses som en övergång till intermittent luftning, där denitrifikation prioriteras en stund.

4.2.3. Stegformad prisprofil

Två stegformade prisprofiler studerades och resultat visas i Figur 19 samt tabell 9.



Figur 19. Stegformad prisprofil och kostnadsoptimal luftning (röd) jämfört med energioptimal (blå). Scenario 4.

Anpassningen efter prisprofilen syns extra tydligt vid lågt pris där luftningsintensiteten är högre. Medelvärdet för $K_L a$ är högre för den kostnadsoptimala styrningen, vilket alltid gäller i jämförelse med den energioptimala. Skillnaden i ammoniumprofil är liten. Det är alltså ingen större skillnad i nitrifikation mellan de två jämförda simuleringarna.

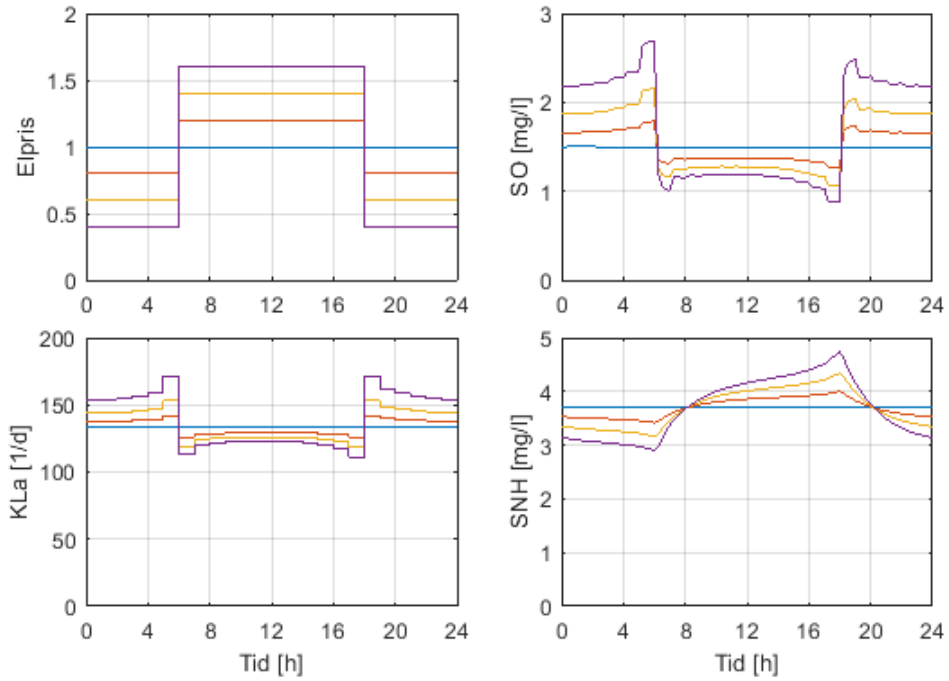
Tabell 9. Besparing vid stegformade prisprofiler (%).

	Scenario 1	**Scenario 2**	**Scenario 3**	**Scenario 4**	**Scenario 5**	**Scenario 6**
Steg 1	0,82	0,86	0,90	1,52	1,11	0,99
Steg 2	0,97	1,07	1,39	1,64	1,39	-

Besparingen var låg även vid stegformade prisprofiler.

4.2.3.1. Konstant inflöde

Som en komplettering av de tidigare resultaten studerades även konstant inflöde och stegformade prisprofiler med olika relativ skillnad i pris mellan dag och natt (Figur 20 och Tabell 10).



Figur 20. Konstant inflöde och konstadsoptimal luftning. Scenario 4.

Här är det tydligt att den optimala luftningen ”planerar” för framtiden genom att öka luftningen timmen innan högt pris och sänka timmen innan lågt pris. Den största möjligheten till besparing verkar finnas vid ett snabbt hopp i pris, som vid prisspikar eller övergången mellan två nivåer.

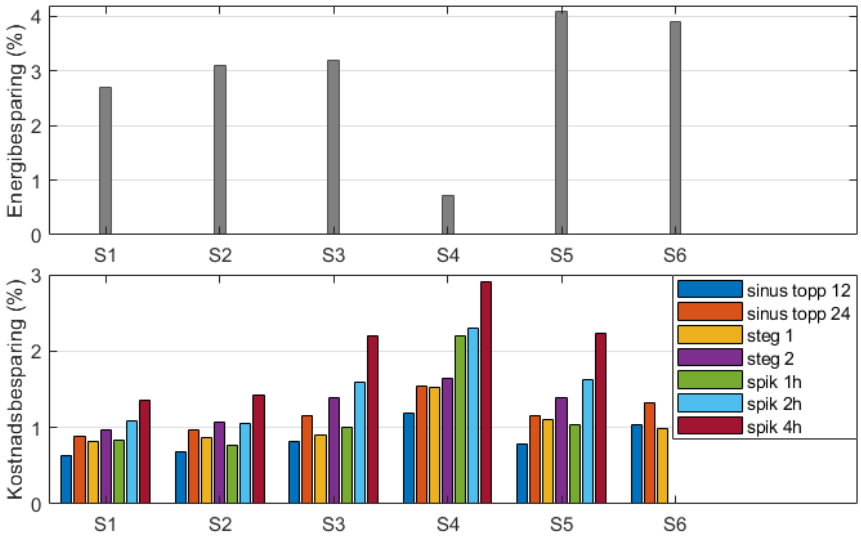
Tabell 10. Besparing (%) vid konstant inflöde och stegformade prisprofiler.

Prisfaktor	Scenario 5	Scenario 6
2 ggr	1,26	1,13
3 ggr	2,93	2,64
4 ggr	4,34	3,92

Med en mycket hög prisfaktor på 4 var besparingen högre, men med en prisfaktor på 2 var resultaten för konstant inflöde ungefär samma som tidigare.

4.2.4. Sammanfattning delstudie 1

Sammanfattningsvis visar resultaten i del 1 en något begränsad kostnadsbesparing vid anpassning av luftning efter elpris, vilket åskådliggörs i Figur 21 tillsammans med energibesparingen i jämförelse med konstant syrehalt.



Figur 21. Över: Energibesparing i jämförelse med konstant syrehalt för olika scenarion. Under: Kostnadsbesparing för olika kombinationer av scenario och prisprofil.

För S4 fanns det mest att tjäna på elprisanpassad luftning, och det var också det scenario som visade lägst potential för energioptimering. Prisprofiler med spikar visade ungefär lika stor kostnadsbesparing som sinusform, trots att en profil med spik är konstant över nästan hela dygnet. Det tyder på att en betydande del av besparingen är kopplad till dynamiken i bassängen. S_{NH} kan tillåtas öka en timme om den snabbt sänks innan utsläppet påverkats för mycket.

Det krävs ganska speciella förhållanden för att kostnadsbesparingen ska bli högre än ca 1,5 %. Ökande amplitud i prisvariation ökar visserligen besparingen, se Tabell 10, men högre variationer än de prisprofiler som studerats är egentligen inte rimligt. Det är svårt att utläsa hur olika parametrar inverkar, men resultaten tyder på att de förhållanden som ger något högre besparing är:

- Låg variation i inflöde
- Högt $S_{NH,24e}$

Det är alltså något omvänt mot förutsättningarna för hög energibesparing. För att det ska vara lönsamt att omfördela syretillförseln är det önskvärt att skillnaden i energibehov är liten vid varierad $K_L a$. Varje variation från den energioptimala luftningen innebär ökat energibehov.

Förklaringen bakom att prisanpassad styrning gav låg besparing verkar ligga i:

- Nitrifikationen påverkas starkt av ammoniumkoncentration.
- Utsläppet måste vara lågt för att matcha normala utsläppskrav, och därför måste ammoniumkoncentrationen i bassängen måste vara låg.

4.3. DELSTUDIE 2: ANVÄNDNING AV UTJÄMNINGSMAGASIN

För att studera hur ett utjämningsmagasin kan användas till att minska elkostnaden vid tidsvarierande elpris användes en modell för ett magasin tillsammans med den tidigare beskrivna ASP-modellen. Tre strategier för val av utflödet från magasinet undersöktes:

A. Konstant flöde
B. Variation i flöde proportionellt mot variation i pris
C. Variation i massflöde proportionellt mot variation i pris

Kostnadsbesparingen för en *kombination av scenario, prisprofil och strategi* beräknades i jämförelse med *ej utjämnat inflöde*, vid samma $S_{NH,24e}$, med energioptimal luftning.

Till att börja med redovisas energibesparingen vid utjämning, som sedan sätts i relation till kostnadsbesparingen för ett antal kombinationer av scenario, prisprofil och strategi för styrning av magasinets utflöde. Alla kombinationer av scenarion och prisprofiler har inte studerats, och i en del tabeller lämnas därför luckor. Resultatet av användning av magasin fångas ändå upp relativt väl av de kombinationer som valts ut.

4.3.1. Energibesparing

Ett utjämningsmagasin ger inte konstant belastning, eftersom koncentrationen inte jämnas ut helt. För att visa på den maximala energibesparingen vid utjämning konstruerades helt konstanta inflöden. Energibesparing beräknades i jämförelse med ursprungligt inflöde, vid samma $S_{NH,24e}$, och sammanställs i Tabell 11.

Tabell 11. Energibesparing (%) vid idealt konstant inflöde i jämförelse med ingen utjämning.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Inflöde	*A*	*A*	*A*	*B*	*C*	*D*
Energibesparing	7,7	11,9	10,8	2,9	12,5	12,8

Höga besparingar ses för S2, S5 och S6 som behöver högre syrehalt. Mindre besparing ses för S1 och S4 som klarar utsläppskraven med lägre syrehalt, särskilt för S4 som även har låg variation i inflödet.

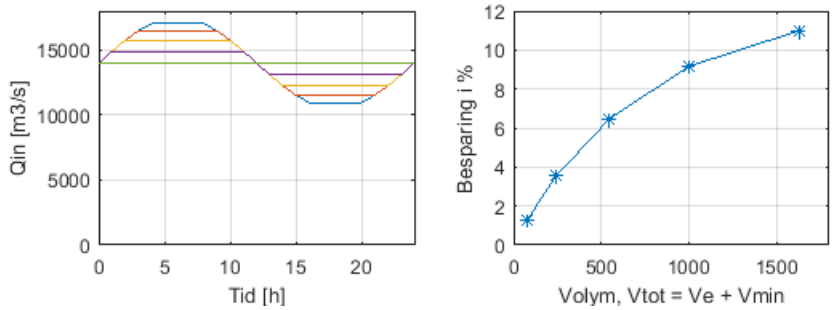
Effekten av modellerad utjämning med konstant flöde ut från magasinet var, som ses i Tabell 12, en något lägre energibesparing än vid idealt konstant inflöde.

Tabell 12. Energibesparing vid utjämning till konstant flöde med magasinsmodell, volymen som krävdes, relativ skillnad i syrebehov och syreöverföringseffektivitet.

	Enhet	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Magasinsvolym, V_{max}	m^3	1590	1590	1590	1270	1270	1880
OTE	%	-	-	+9,3	+2,1	+9,2	-
OT	%	-	-	-1,1	-0,5	-1,2	-
Besparing	%	7,0	11,0	9,6	2,5	9,5	-

Störst skillnad ses för S5, där besparingen är 3 procentenheter mindre än vid ideal utjämning. Besparingen förklaras till stor del av ökad *OTE*, men inte helt. En lägre syreprofil ger en viss ökning i denitrifikation och därmed något lägre syrebehov. Nitrifikationen över dygnet var i princip oförändrad.

Kapning av flödestopp undersöktes för S2. Resulterande energibesparing kan utläsas i Figur 22.



Figur 22. Toppkapning vid olika nivåer (vänster), och resulterande energibesparing (höger) som funktion av magasinsvolymen vid de olika nivåerna.

Besparingen ökar olinjärt och avtagande med ökande volym. Besparingen längst till höger är den vid konstant flöde (11,0 %). En volym på 500 m^3 räckte för att få 6 % energibesparing, drygt hälften av maximala besparingen med en tredjedel av volymen.

4.3.2. Kostnadsbesparing

Kostnadsbesparing vid konstant flöde beräknades för S3 och S5 för ett antal sinusformade prisprofiler och redovisas i Tabell 13.

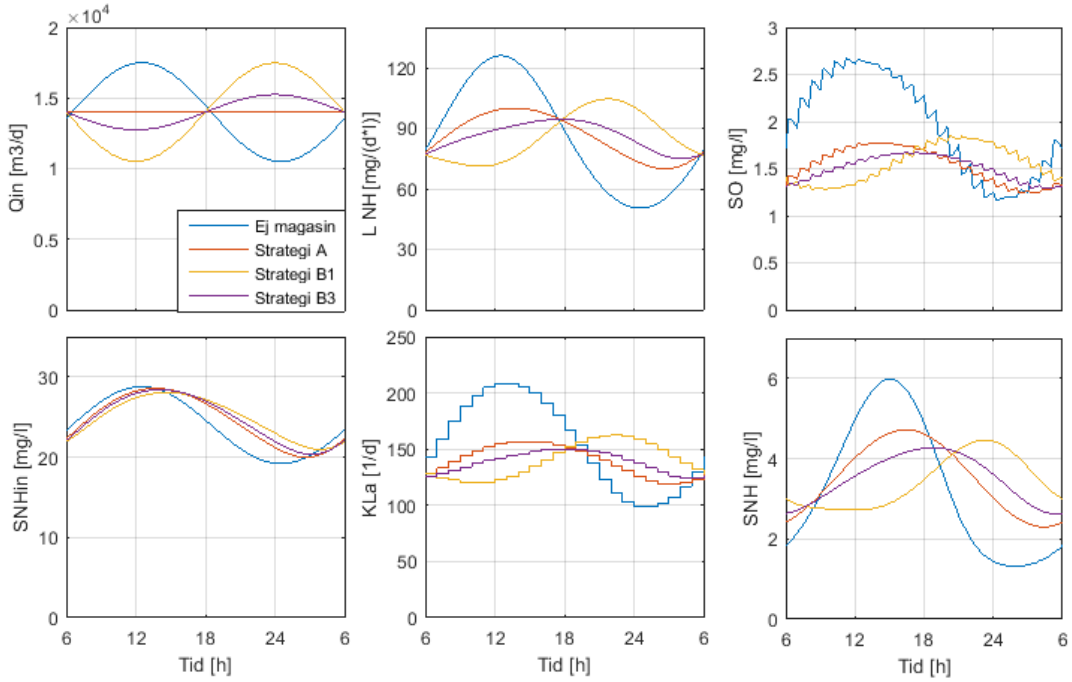
Tabell 13. Kostnadsbesparing (%) vid konstant flöde och olika prisprofiler

Tid för pristopp	Scenario 3	Scenario 5
12–13	14,8	14,1
15–16		12,2
18–19	9,9	8,7
06–07		10,4
24–01	3,3	4,0

Kostnadsbesparingen för S5 var som högst 14,1 procent, vilket ska sättas i relation till energibesparingen för samma scenario som var 9,5 %. I det mindre troliga fallet att lågt pris sammanfaller med högt flöde är besparingen i kostnad lägre än besparingen i energi. Det troligaste i praktiken är att högt pris delvis överlappar högt inflöde, men det finns undantag där stora verk med långa tunnlar har flödestoppen förskjuten till natten.

4.3.2.1. Sinusformat pris och scenario 3

Scenario 3 kombinerades med en sinusformad prisprofil och två strategier. Resultatet visas i Figur 23. Tre olika amplituder undersöktes: B1, B2, B3. Dessa gav olika magasinsvolym, energibesparing och kostnadsbesparing som sammanställs i Tabell 14.



Figur 23. Magasin och sinusformad prisprofil med topp kl. 12-13 (ej visat). Jämför ej utjämnat inflöde (blå) med konstant flöde (röd) och strategi B med olika amplituder (lila, gul). Mitten överst visar belastning gällande ammonium.

Utjämningen av koncentration är liten och skiljer sig inte mycket åt mellan olika strategier. Däremot påverkas belastning starkt av valet av flöde, eftersom belastning är proportionellt mot både flöde och koncentration.

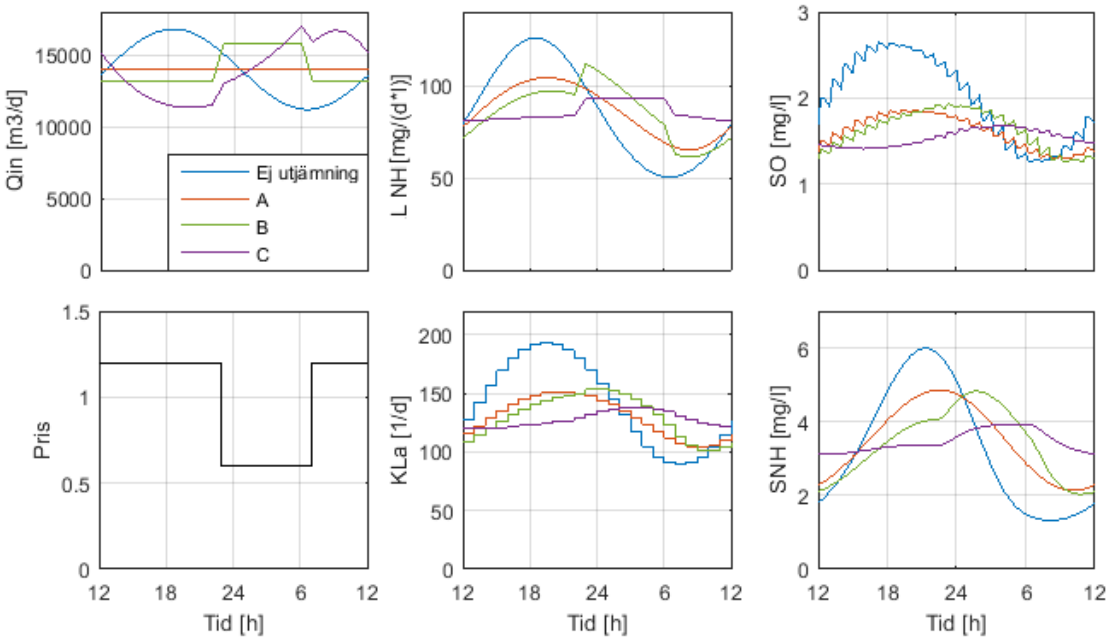
Strategi B1 har lika hög amplitud i flödet som ej utjämnade inflödet, men innebär ändå en kostnadsbesparing som följd av att belastningen utjämnas. Strategi B3 ger bäst utjämning av belastning, vilket ger högst kostnadsbesparing. Flödets variation visar sig vara mindre viktigt för energieffektiviteten. Det finns en viss frihet att låta flödet variera för att anpassa belastning efter prisprofil.

Tabell 14. Styrning av magasin med strategi B jämförs med strategi A (konstant flöde). A* är konstant flöde med magasinsvolymen ökad till samma nivå som för B1.

		Strategi A	**Strategi A***	**Strategi B1**	**Strategi B2**	**Strategi B3**
Högsta flöde	m^3/d	14 000	14 000	17 500	16 500	15 250
Magasinsvolym	m^3	1 590	3 160	3 160	2 710	2 140
Energibesparing	%	9,6	10,2	9,2	10,1	10,3
Kostnadsbesparing	%	14,8	16,7	19,3	18,7	17,2

4.3.2.2. Stegformat timpris och scenario 5

Styrning med strategi A, B och C undersöktes för S5 med en stegformad prisprofil med 8 timmar lågt pris och 16 timmar dubbelt så högt pris. Resultat visas i Figur 24 och sammanställs i Tabell 15.



Figur 24. Magasin styrt med tre olika strategier samt ingen utjämning (blå). B och C är anpassade efter prisprofil. Ovan mitten: Belastning ammonium.

Strategi C lyckas med att anpassa belastningen efter timpriset, vilket ger en $K_L a$-profil som är något högre under lågt pris. Strategi B ger även den en någorlunda bra, men inte lika tydlig, anpassning. Då flödesprofilens form för strategi B är dåligt anpassad till $S_{NH}(t)$ i magasinet går det inte att få till en riktigt bra utjämning.

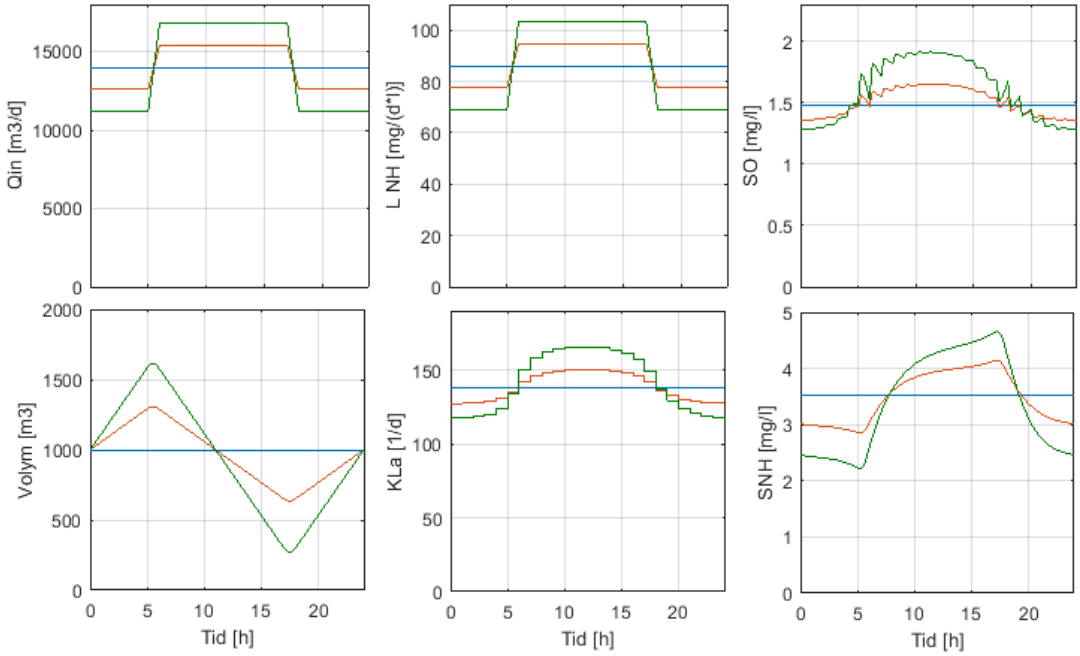
Tabell 15. Besparing vid tre strategier: A) Konstant flöde, B) Flödesvariation proportionell mot prisvariation, C) Variation i belastning proportionell mot prisvariation. Även total magasinsvolym anges.

		Strategi A	**Strategi B**	**Strategi C**
Högsta flöde	m^3/d	14 000	15 750	16 960
Magasinsvolym	m^3	1270	1730	2500
Energibesparing	%	8,6	8,1	10,1
Kostnadsbesparing	%	10,7	11,8	13,1

Energibesparingen för strategi C är nära den för ideal utjämning (10,2%). För strategi B är högsta flödet inte särskilt högt men att öka variationen mer ger inte minskad kostnad. Varken strategi B eller C ser ut att vara riktigt nära en kostnadsoptimal utjämning. Strategi B utjämnar inte tillräckligt mycket, och strategi C lägger onödigt mycket magasinsvolym på att utjämna massflödet under högpristid till en jämn nivå. Strategi B är på sätt och vis bättre anpassad till prisprofilen, då kostnadsbesparingen är 3,7 procentenheter högre än energibesparingen (3,0 procentenheter för C). Volymen som krävs för strategi C är nästan dubbelt så stor som för strategi A, något som kanske inte är motiverat med tanke på att kostnadsbesparingen bara är 2,4 procentenheter högre.

4.3.2.3. Konstant inflöde

Med ett konstant inflöde tydliggörs den viktiga roll kinetiken för nitrifikation spelar. Två olika nivåer av anpassning efter en stegformad prisprofil visas i Figur 25, och energi- samt kostnadsbesparing visas i Tabell 16. Med ett från början konstant inflöde ger strategi B och C samma form på flödesprofilen från magasinet.



Figur 25. Omfördelning från idealt konstant inflöde som anpassning till stegformad prisprofil, för scenario S4.

Med ett redan konstant inflöde och konstant koncentration är det intuitivt att det energioptimala är att låta flödet vara konstant. Detta är alltså jämförelse med den energioptimala styrningen. Strategi B är däremot inte en kostnadsoptimal lösning, utan endast ett försök till anpassning. Den teoretiska potentialen är därför något större. Troligen begränsas möjligheten till besparing av att S_{NH}-profilen påverkas, och därmed nitrifikationshastigheten.

Tabell 16. Utjämning med strategi B för olika värden på proportionalitetskonstanten och prisprofilen *Steg 1* gav olika volym, flödestopp samt energi- och kostnadsbesparing.

		Strategi B1	**Strategi B2**	**Strategi B3**
Högsta flöde	m^3/d	16 800	16 100	15 400
Volym	m^3	1 920	1 440	960
Energibesparing	%	– 2,9	– 1,6	– 0,67
Kostnadsbesparing	%	1,6	1,7	1,46

Det krävs mer energi när inflödet styrs bort från konstant belastning, och kostnadsbesparingen blir som störst för B2 när flödet varierar 15 % från medelvärdet. Vid högre skillnad i flöde ökar kostnaden, vilket ses för B1. Vid högre Besparingen var mindre än vad som sågs i tabell 15, men det är också skillnad i förutsättningar mellan de två fallen.

5. DISKUSSION

Optimal luftning och styrning av magasin undersöktes för tidsperioden ett dygn. Utifrån resultaten är det möjligt att ge en försiktig uppskattning av potentialen för minskning av elkostnad vid anpassning efter elpris. I båda delstudier är det luftflöde som står för elektrisk effekt, och därmed energibehov samt elkostnad. En viktig förenkling som användes var att modellen bestod av en enda luftad bassäng.

5.1. ANPASSAD LUFTNING

Besparing i elkostnad beräknades för kostnadsoptimal luftning i jämförelse med energioptimal luftning, vid prisprofiler liknande normalt förekommande variationer. För profiler med sinusform var besparingen mellan 0,6 och 1,5 %. Vid prisprofiler med högt pris under kort tid (prisspikar) var besparingen något högre, upp till 2,2 %. Besparingen var något högre vid kraftiga skillnader i elpris.

Förklaringen till den något begränsade potentialen verkar till stor del ligga i kinetiken för nitrifikationshastigheten. Hastigheten beror simultant på S_O och S_{NH}. När styrsignalen avviker från den energioptimala för att anpassas efter timpris ökar energiåtgången snabbt, och det blir inte möjligt att avvika särskilt långt. Energibehovet ökar genom sänkt OTE när syreprofilen lämnar den energioptimala. Andra viktiga faktorer är att bassängsvolymen för en ASP inte är så stor relativt inflödet och att utsläppet av ammonium måste vara lågt (ca 1-4 mg/l) i förhållande till kväveinflödet (ca 30-60 mg/l). Nitrifikationen kan inte omfördelas alltför mycket över dygnet.

Om ett reningsverk redan har utrustning installerad för reglering av syrehalt kan kapitalkostnaden vara låg för att införa en strategi med varierande syrehalt. Även om potentialen bara är i storleksordningen 1-2 % så kan det kanske vara lönsamt, om besparingen går att realisera med en praktisk styrstrategi. För framtida studier borde en liknande metodik användas för att studera en modell med fler bassänger, för att se om potentialen är större då en stor del av nitrifikationen sker vid högre ammoniumhalt.

Profiler för flöde, belastning och elpris antogs vara kända, i princip ett dygn framåt i tiden, för att optimering skulle vara möjligt. I verkligheten är inflödet framåt i tiden inte känt. Om metoden här ska översättas till en styrstrategi med optimering, till exempel modell-prediktiv styrning, så krävs en uppskattning av framtida inflöde. Det är en svårighet som kanske kan hanteras, men det kan också vara möjligt att utveckla enklare strategier. Resultaten här pekar på att det optimala valet av syrehalt i en tidpunkt till stor del beror på ammoniumhalt, belastning och elpris för just den tidpunkten.

5.2. MAGASIN

När ASP-modellen kompletterades med ett magasin kunde effekten av tre olika strategier för val av magasinets utflöde undersökas: A) konstant flöde, B) variation i flöde proportionellt elpris och C) variation i belastning proportionellt mot elpris.

Konstant flöde visade sig ge betydande *energibesparing* (2,5 – 12 %) beräknad i jämförelse med ej utjämnade fallet vid samma $S_{NH,24e}$. Syreprofilen jämnades ut och sänktes markant. Högre besparing erhölls för scenarion som utan utjämning håller hög syrehalt och hög variation i inflöde. Den lägsta besparingen kommer från ett scenario med låg variation i inflödet (S4). Om flödets och belastningens profil får väljas fritt över dygnet är det intuitivt att den energioptimala lösningen är att båda är konstanta. Ett

magasin kan inte åstadkomma det utan att vara orimligt stort. Valet av flödesprofil ut från magasinet blir en avvägning, som ser ut att ge bäst resultat nära konstant belastning, något som har belysts förut (Dold, 1982). Utjämning av belastning kräver dock något större magasinsvolym.

Resultaten kan förklaras av det starka olinjära beroendet av nitrifikationshastighet på ammoniumhalt. Mindre variationer i inkommande kvävehalt ger möjlighet att sänka syrehalten markant, eftersom nitrifikationshastigheten hjälps uppåt av i genomsnitt högre ammoniumhalt. Att den studerade modellen bara har en bassäng kanske överdriver besparingspotentialen.

Vid tidsvarierande elpris ger utjämning en kostnadsbesparing som skiljer sig från energibesparingen (Tabell 13). Med konstant flöde sågs för scenario 3 kostnadsbesparing på upp till 15 %, som består dels i energibesparingen (9,6 %) och dels i effektprofilens ändrade form. Storleken beror på hur inflödesprofilen förhåller sig tidsmässigt till prisprofilen. Om högt pris sammanfaller med högt inflöde är besparingen högst. I det mindre troliga fallet att lågt pris och högt flöde sammanfaller kan kostnadsbesparingen bli lägre än energibesparingen. Skillnaden mellan kostnads- och energibesparing var mellan -6,3 och +5,2 procentenheter, vilket kan jämföras med resultat från Leu m.fl (2009) där 16 % besparing redovisas, vid kraftiga prisvariationer.

När flödet från magasinet anpassades efter elpris (strategi B och C) var det möjligt att sänka elkostnaden med ytterligare 1 till 4,5 procentenheter. Resultaten tyder på att strategi C är marginellt bättre. Ett förslag på framtida studie är att söka den optimala styrningen för magasinet. Problemet blir enklare med en förenklad modell där syrehalten helt enkelt sätts konstant och luftflödet beräknas, i stil med Leu m.fl. (2009).

Med ett idealt konstant inflöde kunde effekten av prisanpassad styrning studeras på ett kompletterande vis (Figur 25). Här är det intuitivt att det är energioptimalt att låta flödet vara konstant. Besparingen för S3 var som mest 1,7 %, när flöde och belastning varierades med +-15 % från medel (vid högre variation ökade kostnaden). Det är något förvånande med tanke på att större besparing sågs när inflödet inte var konstant från början. Det är dock ett resultat från ett exempel med ett utvalt scenario, och det troliga är att potentialen för besparing i allmänhet är högre när inflödet har låg variation.

Den största delen av minskningen i elkostnad var kopplad till energibesparing, men i de fall högt elpris sammanfaller med högt inflöde var kostnadsbesparingen betydligt högre. En stor del av den extra besparingen ser då ut att kunna nås med den enkla strategin konstant flöde. Förhållanden som ger stor energibesparing verkar vara något motsatta de som ger stor kostnadsbesparing, av liknande anledningar som vid anpassad luftning. Det betyder också att en modell med fler bassänger behöver studeras, för att se effekten av att nitrifikation sker till stor del vid högre ammoniumhalt.

5.3. SAMMANFATTNING

Trots att ASP-modellen innehåller ett stort antal variabler och processer var det nästan bara syre och ammonium som påverkades vid variation av luftflödets profil. För att hålla ett givet flödesviktat medelvärde för koncentrationen ammonium i utsläppet, $S_{NH,24e}$, visade det sig att i princip måste totala nitrifikationen över dygnet hålla ett givet värde. Resultaten bör till stor del kunna förklaras av nitrifikationskinetiken, och det

verkar som att modellen skulle kunna reduceras till ett fåtal variabler och ekvationer. Den dynamiska modellen är ett verktyg som ser ut att behövas för att förstå innebörden av de olinjära samband som används för att beskriva nitrifikationsprocessen. Kanske kan vidare studier på prisanpassning utnyttja en reducerad modell, och fokusera på de delprocesser som påverkas vid varierad luftning över ett dygn.

Utöver att anpassa elförbrukningen finns det även möjlighetför vissa reningsverk att anpassa elproduktion från biogas. Det försvåras dock av en brist på effektiva maskiner för elproduktion i små dimensioner. Biogas kan också användas för att driva blåsmaskiner direkt med gasmotor, något som utnyttjats vid exempelvis Himmerfjärdsverket (Nilsson, 2008). Energi kan lagras i batterier, men till en hög kapitalkostnad. En annan tänkbar möjlighet är att producera och lagra tryckluft vid lågt elpris, för användning när priset stiger. Det skulle ge en ökad energiförlust, men det är lite speciellt med reningsverk att tryckluft (vid lågt tryck) ändå måste produceras.

Effektavgift bör kunna minskas genom relativt sett enklare strategier. Exempelvis kan en planering införas där luftningen sänks något under de få dagar och timmar som sätter toppeffekten. Effektavgiften minskas vid utjämning, genom minskad toppeffekt för luftning (se t.ex. Figur 23) och för flödesberoende pumpning. Om utjämning sker i ett tunnelmagasin placerat före inloppspumpning finns särskilt stor potential för att minska effektavgiften (jämför Olsson, 2008).

Användning av magasin för energi- och kostnadsbesparing är ett ämne som verkar ha fått relativt lite uppmärksamhet på senare tid, och kanske inte undersökts tillräckligt för verk med kväverening (se Mikola m.fl., 2012). Det finns goda möjligheter att uppskatta effekten av utjämning med hjälp av en dynamisk processmodell. Att utvärdera effekten av utjämning blir enklare om luftning sker enligt en enkel strategi, så som *konstant syrehalt*. Det rekommenderas att jämförelser görs vid lika stort ammoniumutsläpp.

6. SLUTSATSER

Resultaten ska betraktas utifrån att studien genomförts med en modell med en bassäng, men tyder på att:

- Anpassning av luftning efter varierande elpris har en potential för kostnadsbesparing i storleken 1 %, vid normalt förekommande prisvariationer.
- Utjämning med konstant flöde kan ge en energibesparing i storleken 10 %. Utjämning mot konstant belastning kan ge en ytterligare något högre besparing.
- Vid varierande elpris kan utjämning med konstant flöde ge en kostnadsbesparing som är några procentenheter högre än energibesparingen.
- Aktiv anpassning av magasinets utflöde efter varierande elpris kan ge ytterligare kostnadsbesparing, uppskattningsvis i storleken 2 %.
- Magasin ger en rad positiva effekter utöver minskad energiavgift. Däribland minskad effektavgift och förenklad styrning av andra processer än luftning.

Utifrån resonemang kring de förenklingar som gjorts, bland annat med en enda bassäng, så kan det väntas att potentialen för minskning av kostnad är underskattad, och att energibesparingen vid utjämning kan vara överskattad.

7. REFERENSLISTA

Aymerich, I., Rieger, L., Sobhani, R., Rosso, D., Corominas, L., 2015. The difference between energy consumption and energy cost: Modelling energy tariff structures for water resource recovery facilities. Water Res. 81, 113–123.

Banga, J.R., Balsa-canto, E., Moles, C.G., Alonso, A.A., 2003. Dynamic Optimization Of Bioreactors: A Review.

Bolmstedt, J., Olsson, G., 2005. A benchmark study of controlled emptying of equalization basins. Water Sci. Technol. 52, 113–121.

Bryson, A.E., 1999. Dynamic optimization. Addison Wesley Longman, Menlo Park, CA.

Carlsson, B., Hallin, S., 2003. Reglerteknik och mikrobiologi i avloppsreningsverk. Svenskt Vatten, Stockholm.

Copp, J.B., 2002. The COST simulation benchmark – description and simulator manual. Luxembourg: office for official publications of the European communities. ISBN 92-894-1658-0.

Crawford, G.V., Sandino, J., 2010. Energy efficiency in wastewater treatment in North America: a compendium of best practices and case studies of novel approaches: [final report]. Water Environment Research Foundation ; IWA Publishing, Alexandria, VA : London, United Kingdom.

Dold, P.L., 1982. Design and control of equalization tanks. (Thesis). University of Cape Town.

Evald Bjerg, J., Grum, M., Courdent, V., Augustin T., Halvgaard, R. F., Vezzaro, L., Mikkelsen, P.S. 2015. Coupling of weather forecasts and smart grid-control of wastewater inlet to Kolding WWTP (Denmark). Proc. 10th Int. Urban Drain. Model. Conf. 47–59.

Filipe, C.D.M., Meinhold, J., Jørgensen, S.-B., Daigger, G.T., Grady, C.P.L., 2001. Evaluation of the Potential Effects of Equalization on the Performance of Biological Phosphorus Removal Systems. Water Environ. Res. 73, 276–285. doi:10.2175/106143001X139281

Gernaey, K.V., Rosén, C., Jeppsson, U., 2008. BSM2: A model for dynamic influent data generation. ResearchGate 2008.

Gernaey,K.V., Flores-Alsina, X., Rosen, C., Benedetti, L., Jeppsson, U. 2011. Dynamic influent pollutant disturbance scenario generation using a phenomenological modelling approach. Environ. Model. Softw. 26, 1255–1267.

Henze, M., Loosdrecht, M.C.M. van, Ekama, G.A., Brdjanovic, D., 2008. Biological Wastewater Treatment. IWA Publishing.

Hreiz, R., Latifi, M.A., Roche, N., 2015. Optimal design and operation of activated sludge processes: State-of-the-art. Chem. Eng. J. 281, 900–920.

Jeppson, U. 1996. Modelling aspects of wastewater treatment processes. PhD Thesis, Lund Insititute of Technology.

Jenkins, T.E., 2013. Aeration Control System Design: A Practical Guide to Energy and Process Optimization. John Wiley & Sons.

Kjellén, B.J., Andersson, A.-C., Svenskt vatten, 2002. Energihandbok för avloppsreningsverk. Svenskt vatten , Svensk byggtjänst.

Lenhart, S., Workman, J.T., 2007. Optimal control applied to biological models, Chapman & Hall/CRC mathematical and computational biology series. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton.

Leu, S.-Y., Rosso, D., Larson, L.E., Stenstrom, M.K., 2009. Real-Time Aeration Efficiency Monitoring in the Activated Sludge Process and Methods to Reduce Energy Consumption and Operating Costs. Water Environ. Res. 81, 2471–2481.

Luo, J, Biegler, L.T. 2011. Dynamic optimization of aeration operations for a benchmark wastewater treatment plant. IFAC proceedings volume 4.

Nopens, I., Benedetti, L., Jeppsson, U., Pons, M.-N., Alex, J., Copp, J.B., Gernaey, K.V., Rosen, C., Steyer, J.P., Vanrolleghem, P.A. 2010. Benchmark Simulation Model No 2 – Finalisation of plant layout and default control strategy. Water Science & Technology, 62(9), 1967-1974.

Mansfeldt, R., Andréasson, M., Svensson, B., 1994. Utjämningsmagasin: erfarenheter i svenska avloppsnät. Svenska vatten- och avloppsverksföreningen (VAV) ; Svensk byggtjänst.

Mikola, A., Rantanen, P., Vahala, R., Rautiainen, J., 2012. Full-Scale Investigation of the Influence of Flow Equalization and Prefermenation on Nitrification. Water Environ. Res. 84, 452–459(8).

Nilsson, L.-L., n.d. Himmerfjärdsverket sänker sin elräkning. Cirkulation 2008, 12–13.

NVV, Naturvårdsverket. 2013. Vägledning om villkor och krav för avloppsreningsverk [WWW Document], n.d. URL http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledningar/Avlopp/Vagledning-om-villkor-och-krav-for-avloppsreningsverk/ (accessed 12.1.16).

Olsson, G., 2008. Effektivare reningsverk. Några steg mot bättre energi- och resursutnyttjande. Svenskt Vatten Utveckling. 2008:19.

Olsson, G. (Ed.), 2005. Instrumentation, control and automation in wastewater systems, Scientific and technical report / IWA. IWA, London.

Rieger, L., Aymerich, I., Sobhani, R., Rosso, D., Schraa, O., Corominas, L., 2015. LOWER ENERGY CONSUMPTION BUT HIGHER ENERGY BILLS? THE IMPACT OF ENERGY TARIFFS ON WRRF OPERATING COSTS, in: ResearchGate. Presented at the Water Environment Association of Ontario Annual Conference 2015.

Rieger, L., Jones, R.M., Dold, P.L., Bott, C.B., 2014. Ammonia-Based Feedforward and Feedback Aeration Control in Activated Sludge Processes. Water Environ. Res. 86, 63–73. doi:10.2175/106143013X13596524516987

Rivas, A., Irizar, I., Ayesa, E., 2008. Model-based optimisation of Wastewater Treatment Plants design. Environ. Model. Softw. 23, 435–450.

SVK, Svenska kraftnät. 2015. Anpassning av elsystemet med en stor mängd förnyelsebar elproduktion, Stockholm.

SVU, Svenskt vattenutveckling. Avloppsteknik. 2, Reningsprocessen, 2010. , Publikation U, 1654-5117 ; 2, Stockholm.

Thompson, L., Lekov, A., McKane, A., Piette, M.A. 2010.
Open Automated Demand Response in Wastewater Treatment Facilities in California – Phase II Report: San Luis Rey Wastewater Treatment Plant Case Study. PIER Industrial/Agricultural/Water Energy Efficiency Program.

US EPA, U.E., 2010. Nutrient Control Design Manual.

Åmand, L., 2014. Amonium Feedback Control in Wastewater Treatment Plants. PhD thesis, Uppsala Universitet.

Åmand, L., Carlsson, B., 2012. Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process. Water Res. 46, 2101–2110.

Åmand, L., Carlsson, B., 2013b. The optimal dissolved oxygen profile in a nitrifying activated sludge process – comparisons with ammonium feedback control. Water Sci. Technol. 68, 641.

Åmand, L., Olsson, G., Carlsson, B., 2013a. Aeration control – a review. Water Sci. Technol. 67, 2374–2398.