



# rapport

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Energi och miljöintegrering  
genom utnyttjande av lågvärdigt  
värme från kraftvärmeverk och  
fjärrvärmeanläggningar för  
effektivisering av  
avloppsvattenrening

Jenny Arnell Rune Bergström Mats Ek Bengt Hansen

B 1587

Dec 2004



<b>Organisation/Organization</b> IVL Svenska Miljöinstitutet AB IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd.	<b>RAPPORTSAMMANFATTNING</b> <b>Report Summary</b>
<b>Adress/address</b> Box 5302 40014 Göteborg	<b>Projekttitel/Project title</b> Energi och miljöintegrering genom utnyttjande av lågvärdigt värme från kraftvärmeverk och fjärrvärmeanläggningar för effektivisering av avloppsvattenrening
<b>Telefonnr/Telephone</b> 031-725 62 00	<b>Anslagsgivare för projektet/ Project sponsor</b> Energimyndigheten, Svensk Fjärrvärme, Svenskt Vatten, Purac, Alfa-Laval samt Stiftelsen IVL
<b>Rapportförfattare/author</b> Jenny Arnell Rune Bergström Mats Ek Bengt Hansen	
<b>Rapportens titel och undertitel/Title and subtitle of the report</b> Energi och miljöintegrering genom utnyttjande av lågvärdigt värme från kraftvärmeverk och fjärrvärmeanläggningar för effektivisering av avloppsvattenrening	
<b>Sammanfattning/Summary</b> Kväve i utgående vatten från avloppsreningsverk ger upphov till övergödning av många havsområden och sjöar med syrebrist och döda bottnar som följd. EU:s direktiv för avloppsvatten ställer högre krav på rening av kväve vid Svenska avloppsvattenrening. Att höja temperaturen på avloppsvattnet under de kalla perioderna kan vara en kostnadseffektiv lösning på kvävereningen. Värmeavtappning från fjärrvärmenätet till reningsverken leder till lägre temperaturer på returvattnet och detta medför att tillvaratagandet av energi kan optimeras. En lägre returtemperatur ger bättre förutsättningar för rök-gaskondensering och därmed en förbättrad rening av de utgående rök-gaserna. De praktiska möjligheterna att generera el i kraftvärmeanläggningar begränsas av fjärrvärmereturens temperatur. Det innebär att fjärrvärmeproducenterna får avsättning för lågvärdig värme och kan optimera sin elproduktion. För reningsverken innebär det miljömässiga och ekonomiska vinster genom att de får en effektivare och stabilare reningsprocess och kan uppfylla de hårdare kraven på kvävereningen. I en pilotstudie under verkliga förutsättningar har man inom projektet utrett den verkliga vinsten och studerat de problematiska stegen i den tekniska lösningen.	
<b>Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren /Keywords</b> Kväverening, energieffektivisering,	
<b>Bibliografiska uppgifter/Bibliographic data</b> IVL Rapport/report B 1587	
<b>Rapporten beställs via /The report can be ordered via</b> Hemsida: <a href="http://www.ivl.se">www.ivl.se</a> , e-mail: <a href="mailto:publicationservice@ivl.se">publicationservice@ivl.se</a> , fax: 08-598 563 90 eller IVL, Box 210 60, 100 31 Stockholm	

## **Sammanfattning**

Kväve i utgående vatten från avloppsreningsverk ger upphov till övergödning av många havsområden och sjöar med syrebrist och döda bottnar som följd. EU:s direktiv för avloppsvatten ställer högre krav på rening av kväve vid Svenska avloppsvattenrening. Att höja temperaturen på avloppsvattnet under de kalla perioderna kan vara en kostnads-effektiv lösning på kvävereningen.

Win-win effekter kan erhållas genom att integrera kommunala avloppsreningsverk och energiproduktionsanläggningar. Värmeavtappning från fjärrvärmenätet till reningsverken leder till lägre temperaturer på returvattnet och detta medför att tillvaratagandet av energi kan optimeras. En lägre returtemperatur ger bättre förutsättningar för rökgaskondensering och därmed en förbättrad rening av de utgående rökgaserna. I kraftvärmeverk kan det medföra ett större elutbyte. De praktiska möjligheterna att generera el i kraftvärmeanläggningar begränsas av fjärrvärmereturtemperatur. Det innebär att fjärrvärmeproducenterna får avsättning för lågvärdig värme och kan optimera sin elproduktion. För reningsverken innebär det miljömässiga och ekonomiska vinster genom att de får en effektivare och stabilare reningsprocess och kan uppfylla de hårdare kraven på kvävereningen.

I en pilotstudie under verkliga förutsättningar har man inom projektet utrett den verkliga vinsten och studerat de problematiska stegen i den tekniska lösningen. Värmeväxlingen har genomförts med plattvärmeväxlare som har fungerat bra under hela försöksperioden.

Kostnader för förbättrad kväverening genom uppvärmning av avloppsvattnet har jämförts med kostnader för utbyggnad av konventionella reningsbassänger. För små och medelstora avloppsvattensflöden är kostnaderna för uppvärmning betydligt lägre än för utbyggnad av bassänger. För mycket stora flöden erhålls inte en lika tydlig ekonomisk fördel.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	1
1 Inledning.....	3
2 Bakgrund.....	4
2.1 Miljön och direktiv.....	4
2.1.1 Vattendirektiv.....	4
2.1.2 Övergödning, miljömål.....	4
2.1.3 Förordning om deponering av avfall.....	5
3 Avloppsvattenrening.....	5
3.1 Temperaturberoende hos kommunalt avloppsvatten.....	5
3.1.1.1 Nitrifikation.....	5
3.1.1.2 Denitrifikation.....	5
3.2 Temperaturberoendet.....	6
4 Simulering och beräkningar av reningsverks kväverenningsförmåga vid olika temperaturer.....	6
4.1 Inledning.....	6
4.2 Rådata.....	6
4.3 Design av reningsverk enligt ATV:s designmanual.....	7
4.4 Simulering enligt JASS.....	8
4.5 Simulerings resultat.....	10
4.6 Slutsatser från simuleringsarbetet.....	10
5 Energitekniska aspekter.....	11
5.1 Inledning.....	11
5.2 Värmekälla.....	11
5.2.1 Fjärrvärmereturen.....	11
5.2.2 Kraftvärmeverk.....	13
5.2.3 Avfallsförbränning.....	13
5.2.4 Rök-gaskondensering.....	13
5.2.5 Spillvärme.....	14
5.3 Energibehov.....	14
5.3.1 Teknisk utformning.....	16
5.3.1.1 Referensfall Karlstads Energi AB.....	17
5.3.2 Värmeväxling- är plattvärmeväxlare en god lösning?.....	18
5.4 Reningsteknik.....	19
5.4.1 Filter.....	19
5.4.2 Rengöring av värmeväxlare.....	19

5.5	Diskussion .....	20
6	Pilotstudie.....	21
6.1	Pilotutrustning .....	21
6.1.1	Försök 1 - Membranbioreaktor.....	21
6.1.2	Försök 2 - Konventionellt sedimenteringssteg .....	24
6.2	Utvärdering av värmeväxling .....	25
6.3	Utvärdering av nitrifikationshastighetens temperaturberoende.....	27
6.3.1	Försök 1 och 2 - Membranreaktor samt Laboratorieförsök.....	27
6.3.2	Försök 3 - Konventionellt sedimenteringssteg .....	32
6.4	Slutsatser från pilotförsök.....	34
7	Stora mängder kväve kan reduceras.....	34
8	Resonemang och slutsatser .....	36
8.1	Kostnadsjämförelse .....	36
8.2	Pristak.....	37
9	Referenser .....	38
10	Tack.....	39
11	Ordförteckning .....	40

## **1 Inledning**

Processintegrering, samverkan mellan processer eller delar av processer för att effektivisera och optimera produktionen. Denna studie avser att studera effekterna av integration mellan kommunala avloppsreningsverk och energiproduktionsprocesser.

Kväve i utgående vatten från avloppsreningsverk ger upphov till övergödning av många havsområden och sjöar med syrebrist och döda bottnar som följd. EU:s direktiv för avloppsvatten ställer högre krav på rening av kväve vid avloppsvattenrening. Idag är det ett hundratal reningsanläggningar i Sverige som inte uppfyller de nya kraven. Fjärrvärmens returvatten kan vara lösningen för reningsverken då kvävereningen fungerar bättre vid temperaturer runt 20-35 grader. Vintertid då temperaturen i reningsbassängen är runt 10 grader är reningen mycket låg och i vissa fall obefintlig. Sommartid kan reduktionen av kväve uppgå till 90 procent.

Genom att höja temperaturen under de kalla perioderna kan man få en kostnadseffektiv lösning på kvävereningen. Det kan göras med hjälp av lågvärdigt värme så som spillvärme från industri eller från returvattnet i fjärrvärmenätet. Kväverening vid hög temperatur innebär en effektivare rening av vattnet. Alternativet för reningsverken är att bygga ut kvävereningsbassängerna, vilket är kostsamt och kräver utrymme.

Det finns flera fördelar med att använda returvattnet från fjärrvärmenätet till att höja temperaturen i kommunala avloppsreningsverk. Värmeavtappning till reningsverken leder till lägre temperaturer på returvattnet och detta medför att tillvaratagandet av energi kan optimeras. En lägre returtemperatur ger också bättre förutsättningar för rök-gaskondensering och därmed bättre rening av de utgående rökgaserna.

I kraftvärmeverken kan det medföra ett större elutbyte. De praktiska möjligheterna att generera el i kraftvärmeanläggningar begränsas av fjärrvärmereturens temperatur. Det innebär att fjärrvärmeproducenterna får avsättning för lågvärdig värme och kan optimera sin elproduktion. För reningsverken innebär det miljömässiga vinster genom att de får en effektivare och stabilare reningsprocess och kan uppfylla de hårdare kraven på kvävereningen.

Det är framförallt under vinterhalvåret då temperaturerna är låga som värmeavtappningen ger störst effekt i avloppsvattenreningen. Det är också då det är kallt utomhus som returtemperaturerna i fjärrvärmenäten är höga. Detta är intressant då det är under kalla perioder som efterfrågan är stor och elpriserna är höga. Även under sommarhalvåret kan värmeavtappningen till reningsverken vara av stort värde, detta hänger samman med direktiv om förbud av deponi. Genom att få avsättning för värme kan mer sopor tas om hand.

För att gå från teoretiska resultat till praktiska har under september 2003–april 2004 genomförts ett pilotprojekt på Sjöstads avloppsreningsverk i Karlstad där man undersökt effekten av höga temperaturer för att sänka kvävehalten i kommunalt avloppsvatten.

Det förekommer en del skepsis kring idén att utnyttja en värmekälla för att få en effektivare och mer kompakt nitrifikation. Frågetecknen gäller framförallt de tekniska möjligheterna till en temperaturhöjning, men också den verkliga vinsten av en förhöjd temperatur.

Genom att genomföra en pilotstudie under verkliga förutsättningar har man inom projektet utrett den verkliga vinsten och studerat de problematiska stegen i den tekniska lösningen. I pilotanläggningen har möjligheten till att utnyttja plattvärmväxlare utvärderats och gett ett fullgott resultat. Försöket visar att kvävereningen blir mer effektivt och att reningsgraden ökar då temperaturen ökas.

## **2 Bakgrund**

### **2.1 Miljön och direktiv**

#### **2.1.1 Vattendirektiv**

EU-direktivet 91/271/EEC, uppdaterat med 98/15/EEC ställer krav på utgående halter från kommunala reningsverk på 15 mg totalkväve (N<sub>tot</sub>) per liter, för reningsverk med 10 000 – 100 000 personekvivalenter (pe) samt 10 mg N<sub>tot</sub>/l för reningsverk med fler än 100 000 pe. Dessa krav har hittills varit en del svenska reningsverk undantaget men EU ställer nu högre krav på att de uppsatta målen skall uppnås. Sverige har hävdats att man bör ta hänsyn till minskningen av kväve i vatten på väg till haven (retention), och att man bör få undantag för områden norr om Gävle. Undantaget skulle grundas på de låga temperaturerna något som många länder fått accepterat för reningsverk 1 000 meter över havet. Det är ännu oklart hur EU ställer sig till de svenska önskemålen.

#### **2.1.2 Övergödning, miljömål**

Ett av det 15 svenska miljömålen lyder: Ingen övergödning. Ett av de allvarligaste hoten för haven är övergödning med algbloomning, syrebrist och döda bottnar som följd. Också sjöar och vattendrag i Sverige har problem med övergödning, i det fallet gäller det dock främst fosfor.

### 2.1.3 Förordning om deponering av avfall

Från och med januari 2002 råder förbud mot deponi av utsorterat brännbart avfall enligt förordning 2001:512. Första januari 2005 träder även deponiförbud mot organiskt avfall i kraft. Detta förbud medför stor kapacitetbrist och en utbyggnad av sopförbränningen är ett måste.

## 3 Avloppsvattenrening

### 3.1 Temperaturberoende hos kommunalt avloppsvatten

I pilotanläggningen är det i första hand nitrifikationssteget som studerats. Den hastighet med vilken bakterierna omvandlar ammonium till nitrat ökar kraftigt med temperaturen i intervallet 0-30°C. Denitrifikationssteget är inte i lika stor utsträckning temperaturberoende och det är nitrifikationssteget som är det begränsande steget vid låg temperatur.

#### 3.1.1.1 Nitrifikation

I nitrifikationssteget omvandlas ammoniumkväve med hjälp av syre via nitrit till nitrat och kvävgas.



Oxidationen sker i två steg med hjälp av bakterierna Nitrosomonas och Nitrobacter.

#### 3.1.1.2 Denitrifikation

Denitrifikationen innebär en oxidation av nitrat till kvävgas. Denitrifikationsformeln beror på sammansättningen av det organiska materialet. Med metanol som kolkälla kan denitrifikationen skrivas:



Även reduktion av nitrat sker i flera steg det är dock ett stort antal bakterier som kan oxidera organiskt material med hjälp av nitrat. Det gör denitrifikationen mindre känslig än nitrifikationen.



## 3.2 Temperaturberoendet

Normalt räknar man med en ökning av nitrifikationshastigheten på 10-14% ökning/°C (8-15% för olika slam). Ofta används den ungefärliga formeln:

$$\text{hast}(T^{\circ}\text{C}) = \text{hast}(15^{\circ}\text{C}) * \text{Exp}(0,10(T-15))$$

Man förväntar sig alltså minst en fördubbling av nitrifikationshastigheten vid ökning av avloppsvattentemperaturen med 10°C.

# 4 Simulering och beräkningar av reningsverks kväverenningsförmåga vid olika temperaturer

## 4.1 Inledning

Ett delprojekt i projektet har varit simulering av reningsverks förmåga att avskilja kväve. I studien nedan har dels den så kallade ATV:s designmanual (ATV-DVWK-A 131) använts för att designa reningsverk och dels har dessa data verifierat i JASS (<http://www.syscon.uu.se/~psa/>), som är ett simuleringsprogram för kväverening utvecklat av Uppsala Universitet och tillgängligt på Internet.

I denna studie har data från Karlstads reningsverk, Sjöstad, använts som fallstudie, samt från C-EMIR som är en databank över alla kommunala reningsverk i Sverige.

## 4.2 Rådata

Vi har arbetat med årsmedelvärde och dessa kan ge en osäker bild på verkliga inkommande värden. Simuleringen ger dock en indikation på hur temperaturens inverkan är på designen av reningsverket. Vi har två scenarios där inkommande vatten antingen renas med försedimentering eller med förfällning. Reningsresultaten för de olika föravskiljningsprocesserna har antagits, baserat på mångårig erfarenhet. När det gäller förfällningen har det antagits att den är extremt bra.

Följande data har använts vid beräkningarna:

Tabell 1 Data för inkommande vatten, försedimenterat, förfällt och utgående renat vatten.

Parameter	Inkommande	Försed.	Förfällt	Utgående
Inkommande flöde (m <sup>3</sup> /d)	28600	28600	28600	28600
Designflöde (m <sup>3</sup> /d)	4000	4000	4000	4000
BOD (mg/l)	220	160	78	10
N <sub>tot</sub> (mg/l)	37	37	36	12
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	34	34	34	0
COD (mg/l)	590	410	210	
P <sub>tot</sub> (mg/l)	6	5	1,6	0,5
SS (mg/l)	230	160	45	10

Dosen av fällningskemikalie är beräknad till 100 g/m<sup>3</sup> av en järnklorid.

### 4.3 Design av reningsverk enligt ATV:s designmanual

ATV-manualen är den som används vid design av alla reningsverk i Tyskland. Vid designen används både teoretiska beräkningar såväl som beräkningar baserade på praktisk erfarenhet. I manualen ligger en del säkerhetsfaktorer med som är beroende på storlek på verket. På Sjöstads avloppsreningsverk i Karlstad är belastning av BOD ganska hög vilket medför minskade säkerhetsfaktorer.

Följande scenarios har beräknats: Höjning av vattentemperaturen från 8° C till 20° C. Detta har gjorts för två fall, antingen för försedimenterat eller för förfällt vatten. Slamproduktion sker i föravskiljning såväl som i den biologiska processen. Den utgående kvävehalten är mindre än 15 mg Ntot/l och utgående BOD är mindre än 15 mg/l. Processvalet är efterdenitrifikation.

Resultaten finns redovisade i Tabell 2 där också de befintliga volymerna för den biologiska reningen på Sjöstads avloppsreningsverk (ARV) finns upptagna.

Tabell 2 Resultat av beräkningar utförda enligt ATV:s designmanual.

Parameter	Idag	Försedimentering		Förfällning	
Temperatur (°C)		8	20	8	20
Slamålder (d)		13	4,1	23	7,2
Volym aktiv slam (m <sup>3</sup> )	2400	14500	4600	8600	2800
Area slutsed (m <sup>2</sup> )	2000	3600	3600	3600	3600
Syrebehov (kg O <sub>2</sub> /d)		460	470	400	410
Bioslamprod. (kg TS/d)		4900	5200	1700	1800
Primärslamprod. (kg TS/d)		1900	1900	6000	6000
Total slamprod. (kg TS/d)		6900	7100	7600	7800

Som synes i Tabell 2 skulle det enligt ATV inte gå att erhålla full kväverening i det befintliga verket även om vattnet förfälls hårt och temperaturen är 20° C. Däremot är det relativt små utökningar av volymen som måste till för att uppnå detta. Sedimentationsytan måste däremot ökas betydligt.

Om verket istället designas för försedimentering, kommer de existerande volymerna att räckta till än mindre, oberoende om vattnet värms eller ej. Vid 20° C är tillbyggnaden dock mycket mindre än om verket skall klara sina kvävereningskrav även vid extremt låga temperaturer.

Det krävs med största säkerhet nya luftare och blåsmaskiner för att klara av kväverenningsprocessen. Vid förfällning är syrebehovet dock mindre än vid försedimentering. Lägg märke till att syrebehovet ökar med ökad temperatur, dock inte särskilt mycket.

Slamproduktionen ökar totalt sett med bättre föravskiljning och även när temperaturen ökar (lägre slamålder). Ovan redovisas slamproduktionen före rötning. Efter rötning är skillnaderna mindre och biogasproduktionen kommer att vara betydligt högre i förfällningsalternativet. I alternativet med försedimentering används simultanfällning och dess bidrag till slamproduktionen är medräknad.

När förfällning används och den är så effektiv som i fallet ovan kommer det att finnas behov av att dosera extern kolkälla. Dosen är relativt låg, cirka 35 g COD/m<sup>3</sup>.

Anledningen till den höga slamåldern vid förfällning, är att det råder kolkällebrist och den anoxiska zonen blir större relativt sett. Vid ökad kolkälledos skulle den anoxiska zonen kunna minskas i volym och eventuellt skulle det gå att utföra kväverening i befintliga volymer vid 20° C.

#### **4.4 Simulering enligt JASS**

JASS är ett program som är utvecklat på Uppsala Universitet och är tillgängligt på internet. Det går att modulera kväverenningsprocesser ganska väl i programmet utan att det för den sakens skull ger exakta värden. Programmet kan däremot med enkelhet användas som kontroll mot andra beräkningar. Skiljer sig resultatet mycket åt bör man fundera på varför det är så.

I simuleringsprogrammet delas aktivslambassängen upp i 10 zoner som kan vara antingen aeroba eller anoxiska. Returslamflöde och recirkulationsflöde kan regleras.

Resultaten från ATV-designen användes i JASS för att kontrollera rimligheten i kalkylen. Beräknade bassängvolymer användes i simuleringen och slamåldern var aldrig högre än vad som beräknats enligt ATV-modellen.

I JASS måste avloppsvattnets karaktär (t.ex. löst, inert, lättnedbrytbart COD) specificeras mera noga. Eftersom inga sådana siffror fanns tillgängliga har enbart COD- och BOD-värdena fördelats inom dessa kategorier. Resultaten från simuleringen finns redovisade i tabellen nedan.

Tabell 3 Resultat enligt JASS, utgående värden samt MLSS och kolkälledos. Reningsverkens storlek är de som är beräknade enligt ATV:s manual.

Parameter	Försedimentering		Förfällning	
Temperatur (°C)	8	20	8	20
MLSS (g/l)	5100	5700	5000	4300
Kolkälledos (g COD/m <sup>3</sup> )	0	0	48	60
BOD (mg/l)	1,8	2,0	2,0	2,0
N <sub>tot</sub> (mg/l)	14	12	12	14
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	8,4	10	9,4	12
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	4,1	0,3	2,0	1,0
SS (mg/l)	8,7	10	10	11

Som synes av tabellen ovan går det att klara utgående värden med de av ATV-manualen beräknade volymerna. Däremot blir MLSS-halterna högre i de flesta fallen enligt JASS, enligt ATV skall de vara 4,5 g/l i alla fallen. Vid utbyggnad i full skala bör man alltså beakta om inte aktivslamvolymerna skall vara något högre än vad som är beräknat ovan. Enligt JASS kan den anoxiska zonen vara mindre än enligt ATV.

I övrigt bör det påpekas att en lägre temperatur gör reaktionerna mycket långsammare och att det tar tid för aktivslamprocessen att ställa in sig.

För att ytterligare undersöka temperaturens inverkan på kvävereningen jämfördes för- och efterdenitrifikation med varandra enligt de grunddata som finns i JASS. Uppehållstiden i aktivslambassängen är totalt 10 timmar.

Vid modelleringen ändrades temperaturen stegvis från 20 till 8° C. Under simuleringen strävades det hela tiden efter att hålla totala kvävehalten i utgående vatten under 15 mg/l. Helst skulle nitrifikationen vara så nära fullständig som möjligt. För att klara av detta krav ändrades antalet aeroba zoner, slamålder och kolkälledos. I vissa fall blev slamhalten hög och slamåldern kunde inte höjas ytterligare på grund av det.

I processen med efterdenitrifikation (ED) hölls den första zonen anoxisk vid alla temperaturer. På så sätt kunde den interna kolkällan utnyttjas för att denitrifiera den nitrat som återförs med returslammet. Returslamflödet var lika stort som inkommande för denna process och i fördenitrifikationsprocessen (FD) fanns också ett recirkulationsflöde lika stort som inkommande flöde.

## 4.5 Simulerings resultat

BOD-halten ökar något i utgående vatten då temperaturen sjunker. Halten ligger också något högre för efterdenitrifikationsprocessen eftersom susphalterna i utgående vatten ligger något högre. Halten av löst BOD är nära noll i alla fallen. Halterna är dock mycket låga över lag.

Totalkvävehalten ut går att hålla under 15 mg/l utom vid 8° C. Det som orsakar de försämrade värdena där är ammoniumhalten eftersom nitrifikationshastigheten går ned. För ED-processen kan detta delvis förklaras av att slamåldern inte höjdes ytterligare på grund av för höga MLSS-halter. Nitratkvävehalten kontrollerades med kolkälledosen i ED-fallet och denitrifikationen hängde med i hela temperaturintervallet. Dosen av kolkälla hölls så låg som möjligt och överdosering undveks. Att nitrat- och ammoniumkvävehalten minskade igen vid 11° C för ED-processen beror på att nitrifikationsvolymerna ökade.

Nitrifikationen stannade av lite tidigare för FD-processen men även här förbrukades kolkällan fullständigt och denitrifikationen var ej begränsande.

Kolkälledosen för ED-processen ökar med minskad temperatur, slamåldern blir högre och mer kol förverkas på annat sätt. Vid 8° C minskade kolkälledosen kraftigt jämfört med vid 11° C. Detta beror på att nitrifikationen avstannade. Försök med att dosera mer kolkälla gjordes vid denna temperatur men bidrog enbart till att nitrifikationen stannade av så att utgående totalkvävehalten ökade.

Kolkällan bidrar också till att slamproduktionen ökar vilket medför att slamhalterna är högre jämfört med FD-processen vid samma slamålder. Detta påverkar hur hög slamålder som kan hållas. Höga MLSS-halter ger också mer SS i utgående vatten.

Inte nog med att slamhalten ökade med minskad temperatur, även antalet aeroba zoner fick ökas. Vid minskad temperatur minskar nitrifikationshastigheten men också delningshastigheten för nitrifierarna vilket innebär att högre slamålder krävs. Slamåldern hölls alltid så hög att nitrifierarna inte spolades ut.

Den aeroba volymen fick ökas med 50% vid 8° C jämfört med vid 20° C. Samtidigt ökade slamhalten med cirka 100 %. Detta innebär att den aeroba biomassan ökade med 300% men ändå orkade nitrifikationen inte helt med.

## 4.6 Slutsatser från simuleringsarbetet

Dessa kalkyler (med grova värden från Sjöstad ARV) visar att det är svårt att få igång en kväverenningsprocess i befintliga volymer. Däremot behöver volymerna inte ökas

nämnavert mycket om vattnet hålls varmt och förfällning och extern kolkälla används. För ekonomiska beräkningar se avsnitt 8.

Vidare visar JASS att temperaturen har stor inverkan på processen. Vid låga temperaturer krävs större volymer, högre slamhalter och ändå kan det vara svårt att erhålla en fullständig nitrifikation.

Det är uppenbart att nitrifikationen är det processteg som är känsligast för temperaturen och att det främst är den som bör studeras i pilotförsöken.

## **5 Energitekniska aspekter**

### **5.1 Inledning**

Denna studie syftar till att utreda de energitekniska aspekterna kring möjlig uppvärmningsstruktur och -behov på avloppsreningsverken. Tänkbara värmekällor samt effekterna på dessa kommer att studeras samt den praktiska utformning för att möjliggöra en önskad temperaturhöjning.

I tidigare utförda studier har möjlig processutformning diskuterat.

### **5.2 Värmekälla**

Val av värmekälla varierar från fall till fall och bör om möjligt göras för att optimera nyttan. Redan idag finns stora mängder spillvärme som utnyttjas till bland annat fjärrvärme men trots detta finns en stor mängd outnyttjad energi vid låga temperaturer.

De värmekällor som kan utnyttjas är så kallade lågvärdiga, med värme vid låga temperaturer som inte kan användas som prima värme. Att utnyttja dessa medför ett steg mot ett energieffektivare samhälle.

Genom att utnyttja fjärrvärmereturen som värmekälla kan positiva effekter även erhållas på produktionsenheterna och en effektivare energiproduktion möjliggöras.

#### **5.2.1 Fjärrvärmereturen**

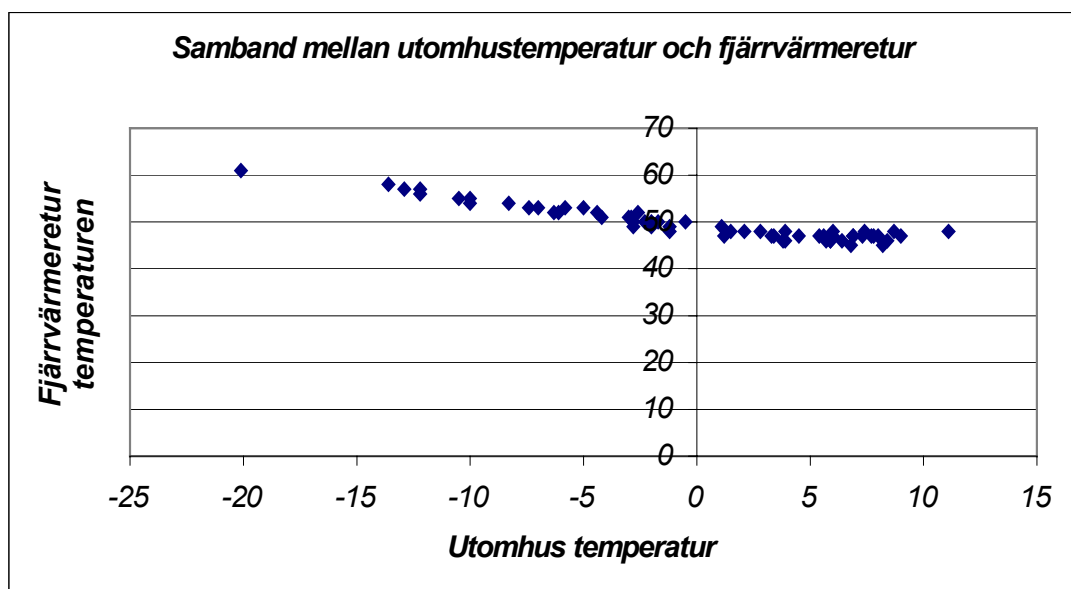
Fjärrvärmereturen är en möjlig energikälla. Den vanliga temperaturen på fjärrvärmereturen är kring 45-65 °C vilket kan utnyttjas för den önskade uppvärmningen.

Fjärrvärmenätet är i många tätorter väl utbyggt och ledningar finns i många fall dragna i nära anslutning till avloppsreningsverken. I de fall där avståndet är långt mellan

fjärrvärmenätet och reningsverket är en dragningen av fjärrvärmerör inte begränsande då de inte kräver stora dimensioner.

Ett flertal fördelar följer av en lägre returtemperatur i fjärrvärmenätet:

- + Minskade distributionsförluster. Varje grads sänkning medför en minskning av distributionsförlusten med ca 1,5 %.
- + Högre elutbyte i kraftvärmeverk, se avsnitt 5.2.2
- + Avsättning för värme av låg temperatur.



Figur 1 Samband mellan temperaturen i luften samt returtemperaturen i fjärrvärmenätet.

Genom att studera sambandet mellan temperaturen utomhus och temperaturen i fjärrvärmenätet ser man att då det är kallt ute ökar temperaturen på returvattnet i fjärrvärmesystemet. Då kalla perioder ofta hänger ihop ett högt elbehov är det gynnsamt att kunna sänka returtemperaturen och på så sätt producera mer el.

I programmet ”Värdering av förändrade temperaturnivåer i ett fjärrvärmenät” kan man erhålla en översiktlig uppskattning av vinsten av en temperatursänkning av fjärrvärmereturen. Här ses att genom en sänkning med endast en grad kan ett par hundra tusen kronor i minskade produktionskostnader sparas per år.

### 5.2.2 Kraftvärmeverk

Genom en samtidig produktion av el och värme erhålls högre verkningsgrader. Då kylvattnet kan hålla en lägre temperatur kan alfa-värde och totalverkningsgrad förbättras.

En sänkning av fjärrvärmereturen med en grad medför ett ökat elutbyte på någon procent vilket medför stora vinster genom ökade elintäkter per år. Kraftvärmeverk i Sverige står idag (2003) för ca 6 TWh<sub>el</sub>/år, om returen skulle sänkas med ett par grader och utbytet ökade med 1-2 % skulle det alltså motsvara 6-12 GWh/år och medföra 5-10 miljoner kronor per år i ökade elinkomster.

Hur stor vinsten blir i enskilda kraftvärmeverk beror av aktuellt verkningsgradsoptimum. En del problem kan förekomma med erosion på exempelvis turbinens skovelblad eller i skorstenen vilket måste beaktas. Vid byggnation av nya kraftvärmeverk kan optimering tas med redan i projekteringsstadiet och därför tillgodogöras maximalt.

### 5.2.3 Avfallsförbränning

I Sverige finns idag 28 anläggningar för förbränning av hushållsavfall. Totalt utvanns 9,3 TWh värme (8,6) och el (0,7) under 2003. Värmen från avfallsförbränning täcker ca 15 % av Sveriges totala fjärrvärmebehov. Hushållsavfall består till största delen av förnyelsebart material. Detta innebär ett marginellt bidrag till växthuseffekten vid ersättande av olja och andra biobränslen.

Som beskrivs i avsnitt 2.1.3 råder förbud mot deponi av utsorterat brännbart avfall från januari 2005 råder även deponiförbud mot organiskt avfall i kraft. Dessa förbud medför kapacitetsbrist och en utbyggnad av sopförbränningen är ett måste.

### 5.2.4 Rökgaskondensering

Genom att värmväxla de varma rökgaserna med en kallare fjärrvärmeretur kan en effektivare kondensering erhållas. Detta medför att ytterligare värme kan tillvaratas. I de fall då returen är så hög att den ligger över kondenseringspunkten för rökgasen går mycket energi till spillo.

En effektivare rökgaskondensering medför positiva effekter på vad som släpps ut i skorstenen. Genom att kondenseringssteget blir effektivare möjliggörs en bättre rening av rökgaserna och utsläppen av bland annat partiklar, tungmetaller och saltsyra kan reduceras.



### **5.2.5 Spillvärme**

Större industrier levererar i många fall redan idag överskottsvärme till fjärrvärmenät. Det finns däremot en stor del outnyttjat värme. Genom att även utnyttja spillvärme vid lägre temperaturer kan ytterligare kylbehov/strömmar i många fall tas tillvara.

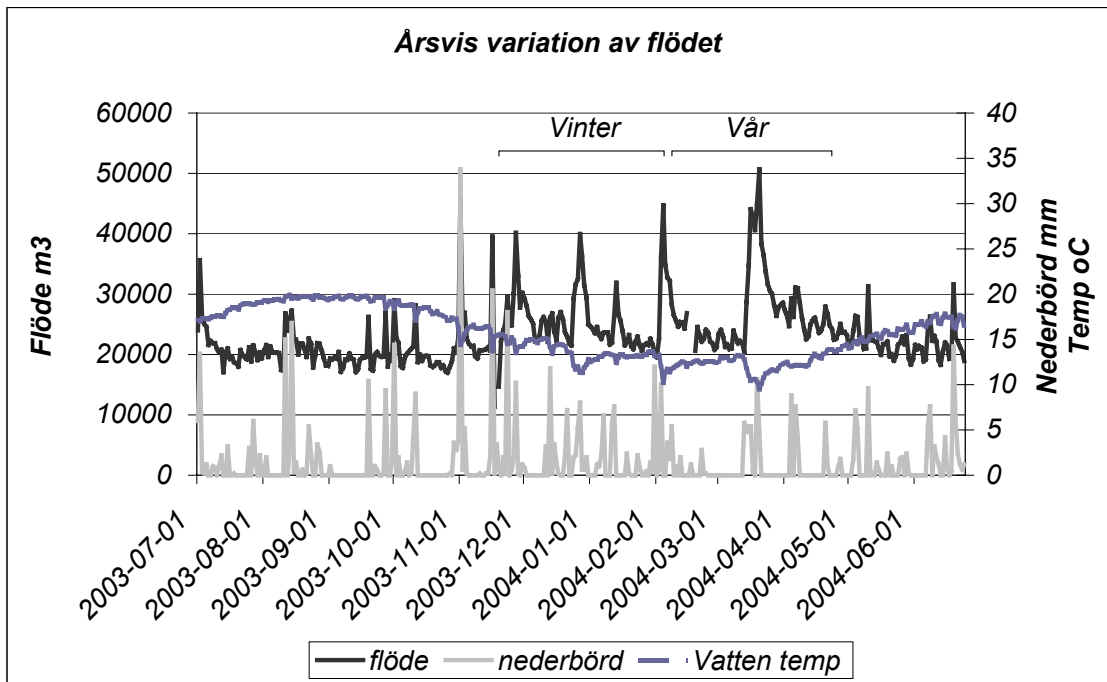
Typer av industrier med stora kylbehov och alltså spillvärme som kan tas till vara i ett fjärrvärme nät eller då temperaturerna är låga direkt i reningsverket är t.ex. massa- och pappersindustri, raffinaderier, kemikalieindustri och stålverk.

## **5.3 Energibehov**

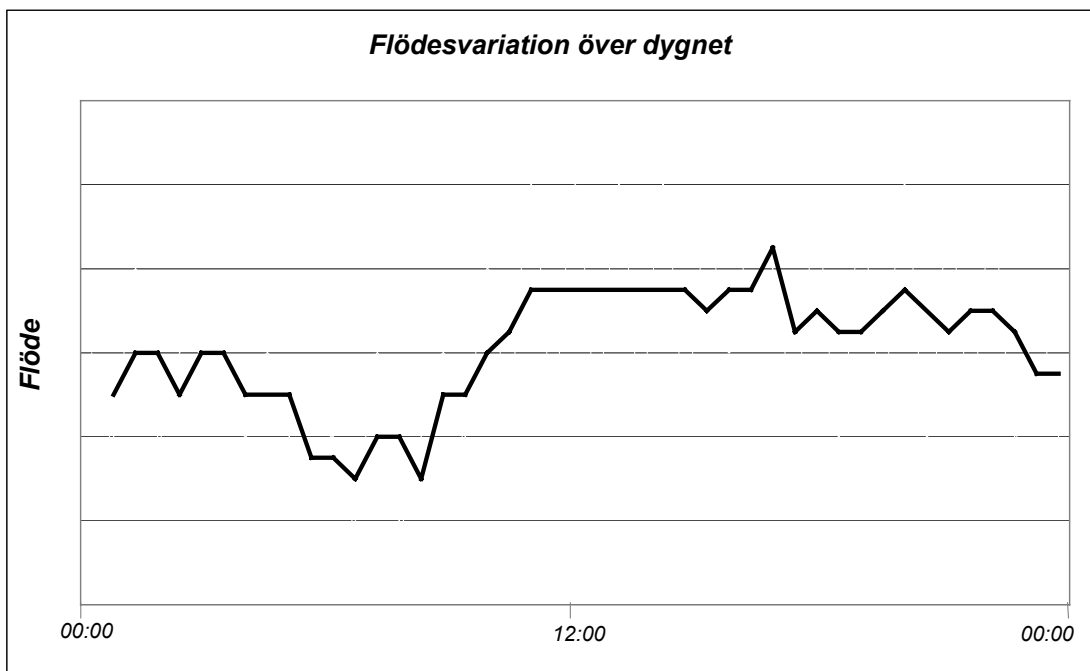
Energibehovet beror av hur stor temperaturhöjning av avloppsvattnet som är önskvärt. Den tid på året som uppvärmning krävs samt hur stort avloppsvattenflödet är också parametrar som bestämmer hur stort energibehovet blir. Genom att studera variationen av flödet samt vilken temperaturprofil som det inkommande avloppsvattnet till Sjöstad ARV har under ett typ år erhålls en bra uppskattning på hur stora energimängder som blir aktuella oberoende av val av värmekälla.

Grundläggande energiberäkningar ger energibehovet och medför möjlighet till kostnadsuppskattningar. Genom att ta fram kostnaden för energiåtgången samt för nödvändig utrustning kan en jämförelse göras med konventionellt alternativ att nå kravnivåerna på kväveutsläpp.

För att driva pumpar för att leda de stora vattenmängderna genom värmeväxlarna erfordras el. Tryckfallet i värmeväxlarna är olika i de olika fallen



Figur 2 Fördelning av avloppsvattenflödet över året.

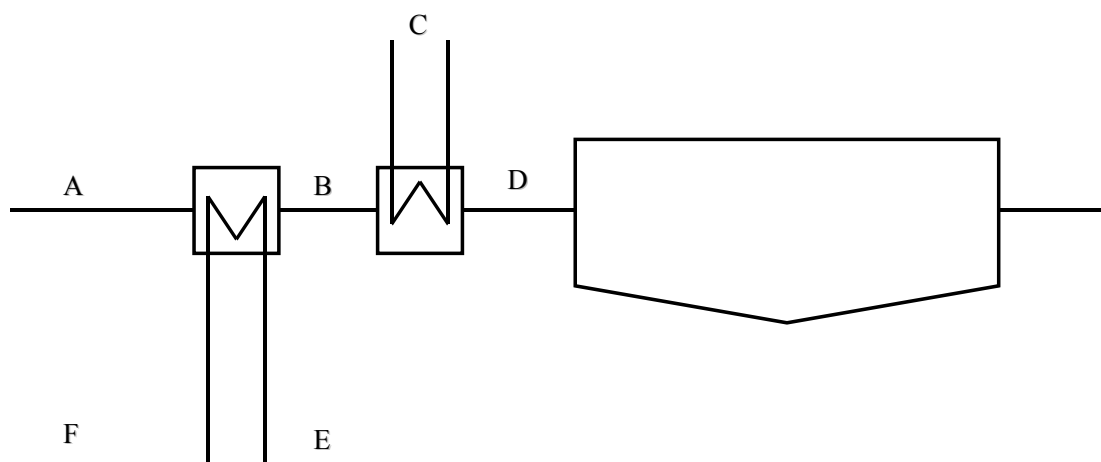


Figur 3 Flödesfördelning till reningsverket över dygnet.

Som ses i diagrammet ovan varierar behovet med årstiderna, det största behovet finns under vinter och vår. Behovet varierar med flödet och under maximalt flöde erhålls energitoppar.

Flödet varierar också under dygnet, under natten är flödet mindre och ökar igen på morgonen då den folk vaknar och startar upp arbetet. Förskjutning av flödet beror av uppehållstiden i ledningsnätet.

### 5.3.1 Teknisk utformning



Figur 4 Schematisk översikt över värmeväxlingssteget.

För att hålla nere energibehovet sker värmeåtervinning mellan ut och ingående avloppsvatten.

Systembeskrivning över värmeväxlingssteget:

- A* Inkommande avloppsvatten. Temperaturen varierar mellan olika verk, för att utgå från två typfall antas temperaturen i norr ligga kring 5 °C som kallast på vintern och verk i söder 10 °C. Vattnet in till kväveringssteget har gått genom mekanisk rening och sandfång, ibland också försedimentering.
- B* Genom att värmeväxla utgående varmt vatten från kväveringssteget med det ingående flödet kan stora värmemängder återanvändas. Värmeväxlingen sker med plattvärmeväxlare med små temperaturförluster.
- C* Genom steg B krävs en mindre värmekälla. Genom att utnyttja returvattnet i fjärrvärmesystemet erhålls en källa på omkring 45-60 °C, denna temperatur skiljer sig mellan olika nät.

- D* En temperaturhöjning av extern värmekälla till måltemperaturen 25 °C. Denna källa optimeras efter behov och önskemål, i ett fjärrvärmenät med höga returtemperaturer kan det var önskvärt att erhålla en stor sänkning, se separat avsnitt.
- E* Utgående vatten från nitrifikationssteget har en förhöjd temperatur och kan avge sin överskottsenergi till inkommande avloppsvatten genom värmeåtervinning med plattvärmeväxlare.
- F* Vattentemperaturen på flödet ut från nitrifikationssteget kommer att vara några grader högre än det ingående, även efterföljande reningssteg, eventuell efterdenitrifikation, kan gynnas av en högre temperatur. Efter alla steg i reningsverket kan temperaturen antas vara normal.

Då värmeväxlingen mellan utgående vatten från nitrifikationssteget värmväxlas med det ingående kan stora värmemängder återanvändas. I Tabell 4 presenteras det aktuella energibehovet vid olika stora reningsverk.

Tabell 4 Gruppering efter storleksindelning av svenska avloppsreningsverk

Antal pe anslutna till reningsverket	Årsmedelflöde [m <sup>3</sup> /år]	Medelflöde [kg/s]	Energibehov [MW/år]
20000 pe	3 000 000	100	2
50 000-100 000 pe	15 000 000	500	10
Över 100 000 pe	100 000 000	3200	64

Val av gruppering av flödet har gjorts utifrån storleksindelning av svenska reningsverk 2000.

### 5.3.1.1 Referensfall Karlstads Energi AB

I pilotstudien, se kapitel 6, har reningsverket i Karlstad fungerat som referensfall. I de fall där effekten på energisystemet utreds har därför Karlstads Energi AB fungerat som referensfall.

Genom att värma avloppsvattnet till 20- 25°C, och utnyttja värmeåtervinning se avsnitt 5.3.1, skulle med det flöde som är aktuellt i till Sjöstads reningsverk omkring 5 MW lågvärdigt värme åtgå. Då temperaturen väntas bli låg under framförallt vinter och vår är det i första hand under denna tid en värmning är av vikt. Detta motsvarar omkring 20 000 MWh och genom att räkna på ett värmepris på 100 kr/MWh, vilket är lågt men är en förhandlingsfråga vid varje enskilt tillfälle, blir den årliga energikostnaden 2 MSEK.

Vid en returtemperatur idag på 55 °C medför värmeuttaget en temperatursänkning på fjärrvärmereturen på omkring 3-4 °C. Genom att sänka fjärrvärmereturen in till rökgaskondenseringen med 3 grader skulle ytterligare omkring 6 MW kunna utvinnas ur rökgaskondenseringssteget.

### **5.3.2 Värmeväxling- är plattvärmeväxlare en god lösning?**

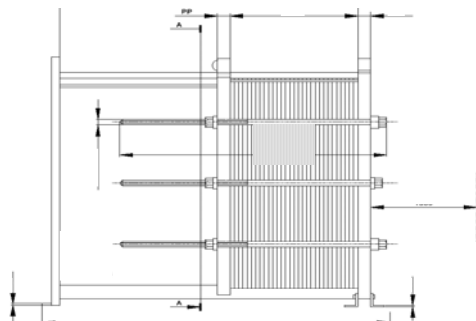
Då stora mängder vatten passerar reningsverket kommer det att finnas krav på en mycket effektiv uppvärmning. Plattvärmeväxlare kan göras effektiva med mycket små temperaturförluster. Denna typ av värmeväxlare är kompakta och platsbesparande såväl som ett relativt ekonomiskt val. I tidigare studier har tubvärmeväxlare utnyttjats

För värmeväxling av avloppsvattenflödet utvärderas möjligheterna att använda plattvärmeväxlare. I samarbete med Alfa Laval tas lämplig utrustning fram både för pilotstudien och för fullskaliga applikationer, se under avsnitt 6.2

Försök har utförts i pilotskala för att visa på praktiska möjligheten till utnyttjande av denna typ av värmeväxlare. Genom att under en längre tid låta avloppsvatten värmas har plattorna kunnat studeras efter denna typ av processvatten. Efter nästan ett halvt år har värmeväxlingen fungerat tillfredsställande och inget driftstopp har inträffat under försökstiden. Se del 6.2

För att studera värmeväxlingen har tre olika flöden studerats. Val av flöde har gjorts utifrån storleksindelning av svenska reningsverk, se Tabell 4. För att klara uppvärmningen av flödet till de mindre och medelstora reningsverken kan relativt små värmeväxlare nyttjas. För de stora flöden som är aktuella vid de största avloppsreningsverken krävs flera stora värmeväxlingsenheter parallellt.

För att designa värmeväxlarna man utgått från lägsta temperatur och högsta flöde som växlaren skall klara av. Under den kalla perioden ligger inkommande temperatur på avloppsvattnet på 5-10° C beroende på var i landet man befinner sig. Två nivåer för inkommande temperatur används i beräkningarna, 5 respektive 10° C. Två olika uppvärmningsnivåer har används i beräkningarna, 20 respektive 25° C.



Figur 5 Plattvärmväxlare

Konstruktionen för värmningen är densamma för de olika flödesnivåerna. De värmeöverförande ytorna samt antalet plattor ökar vid ökat flöde. Antalet plattor och flödet inne i växlaren beräknas för att erhålla önskade krafter och godtagbara tryckfall.

## 5.4 Reningsteknik

### 5.4.1 Filter

För att undvika och förebygga igensättning av större partiklar bör värmväxlarna föregås av ett filtersystem. I dessa kan eventuellt medföljande större föroreningar avlägsnas effektivt för att igensättning inte skall inträffa som skulle kunna medföra stopp.

I pilotförsöket fungerar en siltrumma, konstruerad av ett nät med möjlighet till rengöring, som detta steg, se 6.1.

### 5.4.2 Rengöring av värmväxlare

Plattvärmväxlarna kommer med jämna mellanrum att behöva genomgå en rengöring för att de värmeöverförande ytorna skall kunna fungera så effektivt som möjligt. Stationär reningsutrustning som möjliggör en rening utan isärmontering av plattorna är att föredra för att undvika långa stopp. I projektet har möjligheten att använda denna reningsteknik utvärderats i samarbete med Alfa-Laval. Till varje växlare bör en CIP – Clean In Place – kopplas, en reningsteknik där rengöring av de värmeöverförande ytorna kan ske utan isärmontering.

## **5.5 Diskussion**

Det är alltså inte frågan om att öka användningen av prima energi. Det är en fråga om att genom integrationstänkandet möjliggöra en energieffektivare produktion och ge utrymme för ökad elproduktion vilket är av intresse med ökande elpriser. Effektiviseringen innebär att:

- + Genom ett större värmeunderlag erhålls ges möjligheten att producera mer el.
- + Genom lägre mottryckstemperaturer kan alfavärdet förbättras.
- + Genom en effektivare avkylning kan förlusterna minskas.
- + Mer värme kan kondenseras ut ur den fuktiga rökgasen.

Föreslagen energiavtappning medför positiva bieffekter:

- + Rökgaserna kan renas effektivare
- + Ökad möjlighet att förbränna t.ex. avfall under tider när värmeunderlaget idag är lågt, detta ligger i linje med direktivet om förbud mot deponi av brännbart avfall, se avsnitt 2.1.3.

## **6 Pilotstudie**

Pilotförsök har utförts vid Sjöstads avloppsreningsverk i Karlstad September 2003 tom mars 2004.

Bakomliggande studier samt litteraturen pekar på hur en ökning av temperaturen gynnar kväverenningsprocessen. En del skepsis kring idén att utnyttja en värmekälla för att er-hålla en effektivare och mer kompakt nitrifikation förekommer, främst kring de tekniska möjligheterna. Skepsis kring den verkliga vinsten av en förhöjd temperatur förekommer också. Genom att utforma en pilotstudie och genomföra processförändringen har projektet ämnat ta reda på den verkliga vinsten och studera de problematiska stegen i den tekniska lösningen. Genom att värma under de kallaste månaderna och månader med så kallat vintervatten har temperaturen i det verkliga fallet kunnat studeras. Frågan om hur uppvärmningen skall lösas har skett i samarbete med Alfa-Laval genom att studera en plattvärmeväxlare under en längre tid för att kartlägga eventuell igensättning och påväxning på de värmeöverförande ytorna.

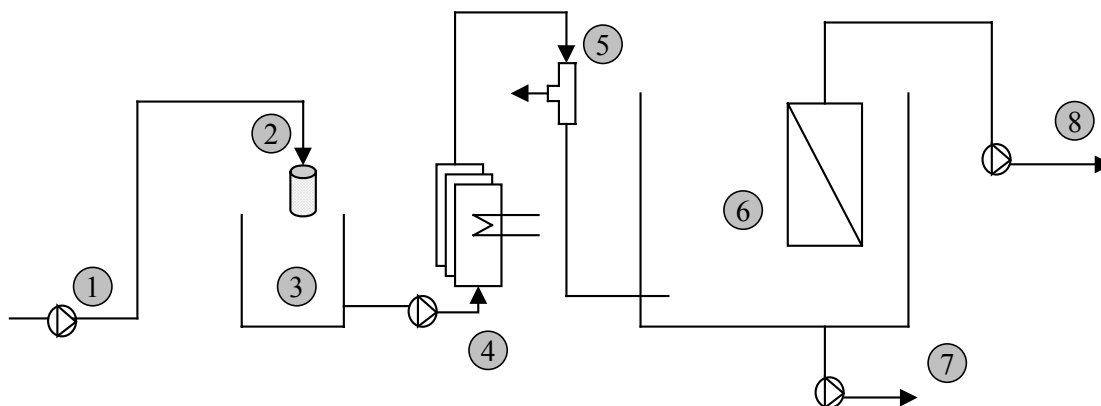
I pilotanläggningen är det i första hand nitrifikationssteget som undersökts. Den hastighet med vilken bakterierna omvandlar ammonium till nitrat ökar enligt litteraturen kraftigt med temperaturen i intervallet 0-30°C. Från litteraturen förväntas minst en fördubbling av nitrifikationshastigheten vid 10° ökning. Se avsnitt 3.2.

### **6.1 Pilotutrustning**

#### **6.1.1 Försök 1 - Membranbioreaktor**

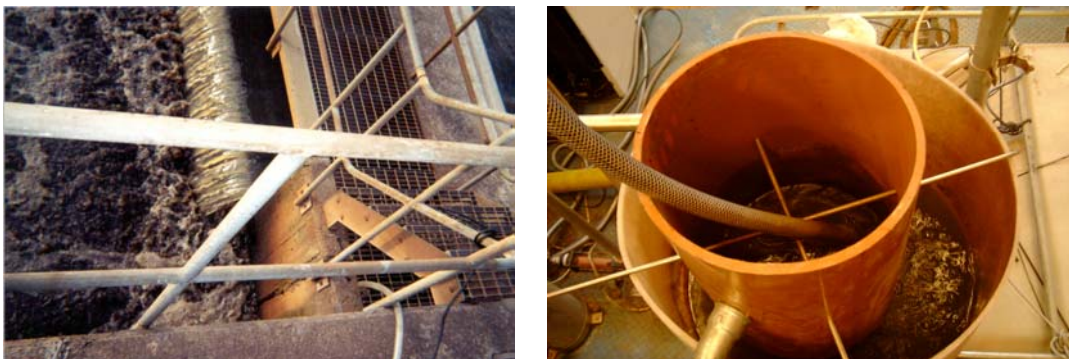
En pilotanläggningen har hyrts in, utrustningen har tidigare använts i doktorsarbete för att studera användningen av membranbioreaktor för behandling av avlopp från blekning av pappersmassa. Försöksanläggningen har kompletterats och utformats för att uppfylla önskemålen i studien.





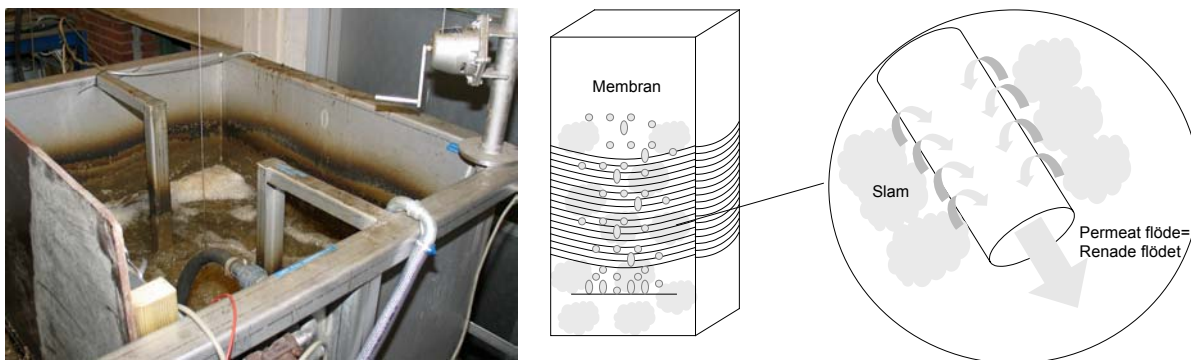
Figur 6 Försöksanläggningens övergripande uppbyggnad.

- 1 Dränkbar inloppspump, försedimenterat avloppsvatten pumpas in till pilotanläggningen.
- 2 För att undvika igensättning av större partiklar i slangar samt värmeväxlare filtreras det inkommande vattnet.
- 3 Genom att låta vattnet först passera en inloppstank kan flödet genom värmeväxlaren och in till reaktorn hållas konstant. Inloppspumpen (1) är nivåreglerad.
- 4 Vattnet pumpas vidare genom en plattvärmeväxlare. Plattvärmeväxlaren är reglerad efter utgående temperatur på avloppsvattnet.
- 5 För att kunna hålla ett konstant flöde genom värmeväxlaren och en konstant nivå i reaktorn är inkommande flöde något större än permeatflödet och överflödigt vatten bräddas genom ett bräddöverslöp. Det bräddade vattnet leds till avloppet.
- 6 I reaktortanken finns membran genom vilka det renade permeatet suges ut med en pump.
- 7 För att kunna styra slamålder och slamhalt i reaktorn pumpas överskottsslam ut. Genom att ändra på avdraget kan slamåldern ändras. Slamavdraget leds till avlopp.
- 8 En provtagare tar dygnsvisa samlingsprov på det utgående renade permeatet, permeatet leds sedan till avlopp.



Figur 7 En dränkbar pump (1) pumpar utgående vatten från försedimenteringssteget till pilotanläggningens inloppstank (3). För att förhindra att större partiklar följer med och sätter igen värmeväxlaren silas avloppsvattnet i en siltrumma (2).

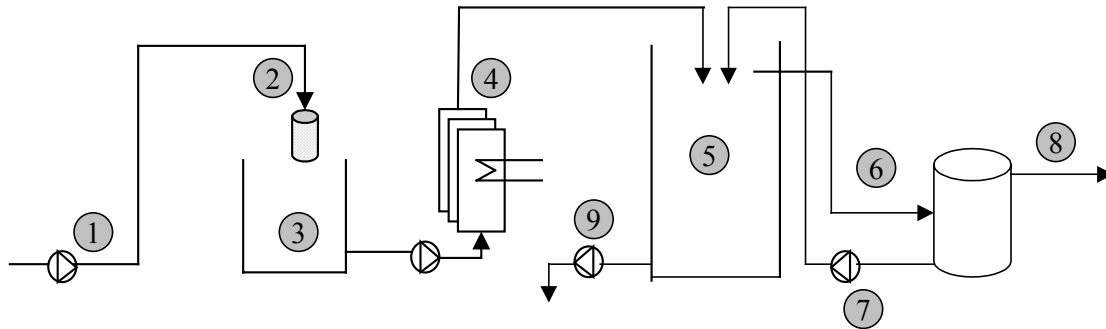
Vid ett flertal tillfällen var tömning och rengöring av siltrumman nödvändig. Det är alltså viktigt att plattvärmväxlarna föregås av någon typ av kompletterande rening så som föreslås under 5.4.1.



Figur 8 Nitrifikationsreaktor med membransepareringsprincip (6), med en pump sugas det reade vattnet in genom membranerna och samlas ihop till utgående permeatflöde.

I en konventionell aktivslamanläggning hålls slammet kvar genom sedimentering och återpumpning till reaktorn. I en membranbioreaktor hålls slammet kvar genom att utgående vatten filtreras genom fina membran. I reaktorn finns ett membranpaket innehållande spagetti-tunna membranrör. Dessa är kopplade till en pump och det behandlade vattnet sugas in i membrankanalerna och pumpas ut.

### 6.1.2 Försök 2 - Konventionellt sedimenteringssteg



Figur 9 Övergripande processuppbyggnad vid försök med sedimenteringssteg.

- 1 Dränkbar inloppspump, försedimenterat avloppsvatten pumpas in till pilotanläggningen.
- 2 För att undvika igensättning av större partiklar i slangar samt värmewäxlare filtreras det inkommande vattnet.
- 3 Genom att låta vattnet först passera en inloppstank kan flödet genom värmewäxlaren och in till reaktorn hållas konstant. Inloppspumpen (1) är nivåreglerad.
- 4 Vattnet pumpas vidare genom en plattvärmewäxlare. Plattvärmewäxlaren är reglerad efter utgående temperatur på avloppsvattnet.
- 5 Det temperaturreglerade avloppsvattnet leds till en luftad bassäng.
- 6 Från den luftade bassängen rinner vattnet till sedimenteringsbehållaren.
- 7 Från botten på sedimenteringsbehållaren återförs slam till luftningsbassängen.
- 8 Det renade vattnet rinner över kanten på sedimenteringsbehållaren och leds till behållare för provtagning.
- 9 Avdrag av överskottsslam för att kontrollera slamåldern.

Befintlig pilotutrustning med membransedimentering byggdes om och ett konventionellt sedimenteringssteg placerades efter nitrifikationsbassängen.



Figur 10 Sedimentering (6) i separat efterföljande steg.

## **6.2 Utvärdering av värmeväxling**

I pilotstudien har en överdimensionerad plattvärmeväxlare med få plattor använts. Efter 4100 drifttimmar monterades värmeväxlaren isär och plattorna/ytorna inspekterades. Det har varit önskvärt att studera hur länge en god värmeöverföring kan bibehållas utan alltför stor fouling till följd av biologisk påväxt på de värmeöverförande ytorna. Överdimensioneringen innebär att plattvärmeväxlaren inte utnyttjas så bra som möjligt, de önskvärda skjuvkrafterna mellan plattorna blir inte så stora som normalt. Genom att studera påväxningsförfarandet och igensättningsproblematiken kan utifrån pilotstudien slutsatsen dras att det vore tekniskt möjligt att nyttja denna typ av värmeväxlare. I pilotanläggningen har ett galler föregått värmeväxlaren, detta för att avlägsna större partiklar så som snören mm som lätt kan ta sig genom föreliggande reningssteg. Denna typ av föreliggande rensning bör även finnas i stor skala, se beskrivning av filterapparat under avsnitt 5.4.1.



a) Rena plattor innan montering i växlaren.



b) Plattor direkt efter isärtagandet.



c) Plattor avspolade med vanligt vatten.

Figur 11 Plattor i plattvärmväxlaren efter 4100 drifttimmar jämfört med hur plattorna såg ut då de togs i drift.

Värmeväxlingen har under hela försökstiden flutit på utan driftstörning eller stopp. Genom att vattnet har genomgått en första mekanisk rening samt försedimenterats och sedan kompletterats med vår inloppssil har grova partiklar avlägsnats innan värmeväxlaren och inga problem med igensättning har inträffat. Det flöde som uppstår mellan plattorna ger upphov till sådana krafter att eventuella påväxningar på de värmeöverförande ytorna avlägsnas.

Vid isärtagandet av plattorna efter hela försökstiden var ytorna smutsiga, se jämförelse mellan rena och smutsiga plattor i Figur 11. Plattorna var dock enkla att rengöra genom att spola med vanligt vatten. Ingen direkt påväxt på de värmeöverförande ytorna kunde observeras.

### **6.3 Utvärdering av nitrifikationshastighetens temperaturberoende**

#### *Teori:*

Den tekniskt viktiga nitrifikationshastigheten är hur mycket ammoniumkväve som kan oxideras till nitratkväve per m<sup>3</sup> bassängvolym och dygn (g N/m<sup>3</sup>, dygn). Det är den man dimensionerar sin anläggning efter. Den är emellertid beroende av vilken slamhalt man har i systemet. För jämförelse mellan olika anläggningar och betingelser är det därför ofta mer intressant att se vilken hastighet man har per kg biomassa och dygn (g N/kg SS, dygn). Därför har den enheten använts här.

#### **6.3.1 Försök 1 och 2 - Membranreaktor samt Laborieförsök**

##### *Utrustning:*

Pilotanläggning hyrd från Purac, se 6.1.1, kompletterad med plattvärmeväxlare från Alfa-Laval.

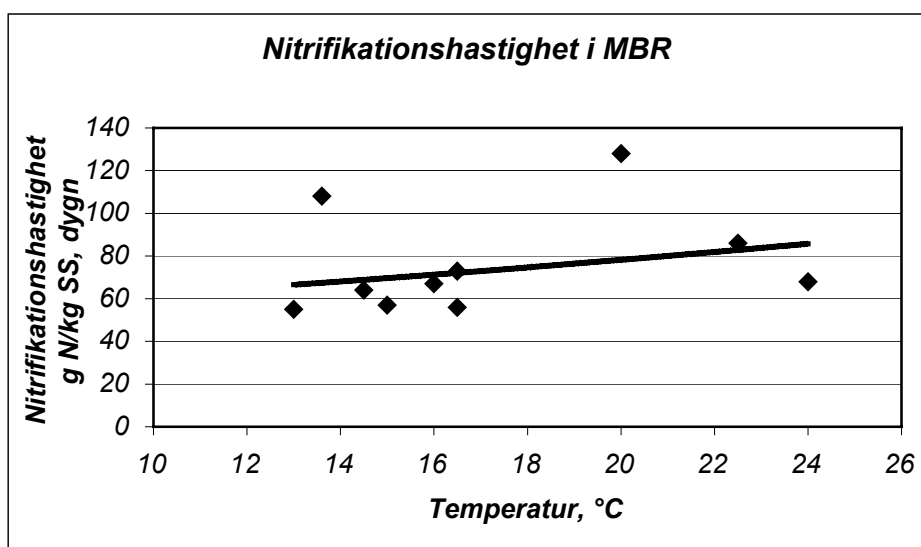
##### *Försök:*

För att studera temperaturens inverkan har ett flertal försöksomgångar genomförts med olika slamåldrar. En försöksserie inleds med en uppbyggnadsfas. Processen tillåts ställas in vid en låg temperatur under en tid 2 till 3 gånger den aktuella slamåldern. Därefter höjs temperaturen i ett första steg till 20 grader. Analyser tas kontinuerligt dygnsvis hela tiden. Genom att höja temperaturen och analysera effekten på nitrifikationen kan ett mått på temperaturens inverkan erhållas. Efter tre dygn höjs temperaturen ytterligare, till 23-24 grader. Denna temperatur hålls i tre dygn och prover tas ut. Efter denna temperaturhöjning sänks temperaturen till omkring 15 grader. Genom att studera hur nitrifikationen påverkas av denna sänkning, innan sammansättningen av slammet hunnit ändras särskilt mycket, erhålls intressanta data för hur temperaturberoendet ser ut.

*Resultat:*

Genom att studera processen och nitrifikationen vid samma förutsättningar med endast en variation av temperaturen kan man bortse från parametrar som skiljer sig åt mellan pilotprocessen och verkliga reningsprocesser samt skillnader mellan olika typer av processutformningar.

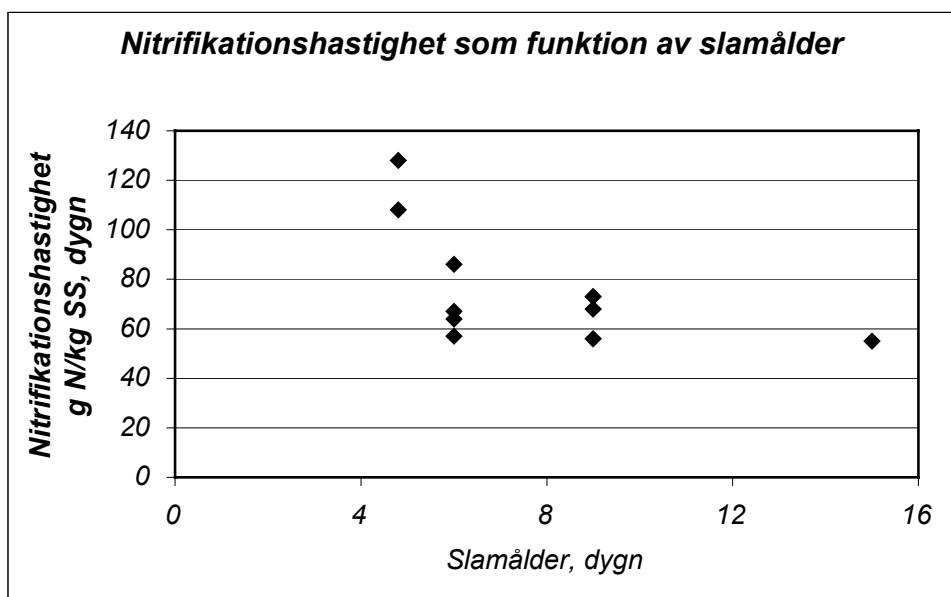
Data från tillfällena då man borde varit nära jämvikt i systemet har samlats i Figur 12 och avsatts mot temperaturen i reaktorn.



Figur 12 Nitrifikationshastigheten som funktion av temperatur i MBR

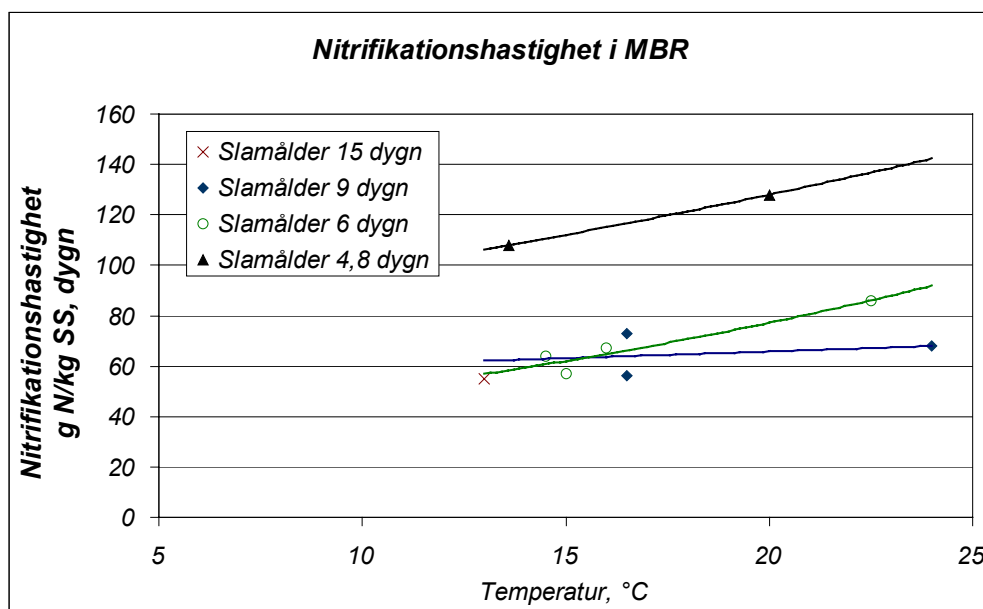
Man ser inte tydligt den väntade hastighetsökningen med förhöjd temperatur. Den allmänna erfarenheten och litteraturdata pekar mot minst en fördubblad hastighet vid 10 graders temperaturökning i det här intervallet.

Data i Figur 12 är från hela perioden, och slamåldern varierar mellan punkterna. Då nitrifierande bakterier anses växa betydligt långsammare än heterotrofa bakterier väntar man sig att slam med en låg slamålder skall innehålla mindre andel nitrifierare. Det skulle innebära lägre specifik aktivitet. Figur 13 visar nitrifikationshastigheten som funktion av slamåldern. Data är från olika temperaturer.



Figur 13 Nitrifikationshastighet i MBR vid olika slamåldrar.

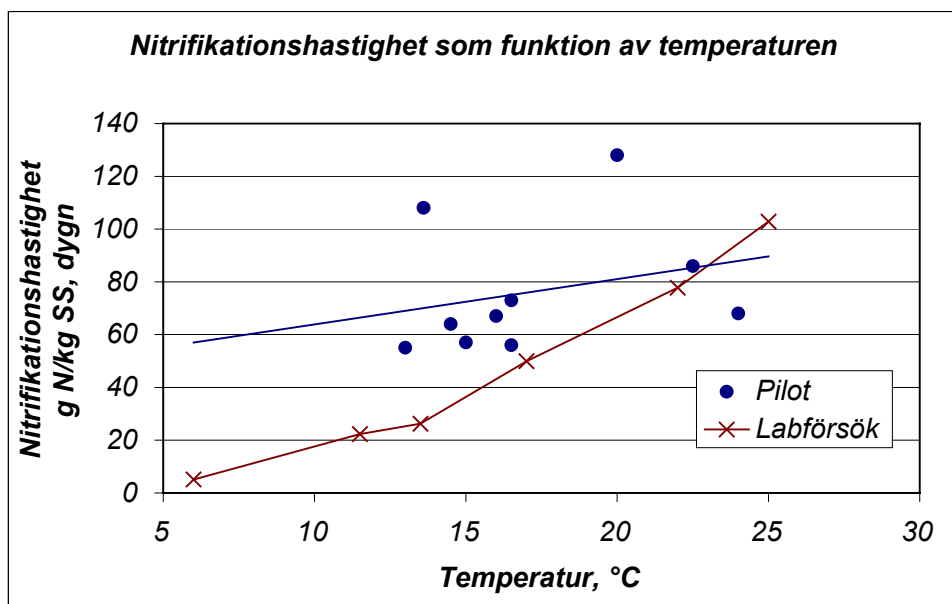
Figuren visar en annan bild än den förväntade. Är det att data kommer från försök vid olika temperaturer som maskerar effekten av slamåldern? Nej, dels tycktes ju inte temperaturen ha den väntade betydelsen enligt Figur 12, dels innefattar varje slamålder utom 15 dygn data mellan ca 15 och drygt 20°C. Det syns också i Figur 14.



Figur 14 Nitrifikationshastighet som funktion av temperatur och slamålder.



I Figur 14 kan en ökning av nitrifikationshastigheten urskiljas dock inte i den storleksordning som man förutspått. För att kontrollera slammet i en annan miljö gjordes en bestämning av temperaturberoendet i laborieförsök. I Figur 15 är det temperaturberoende som bestämdes i laborieförsök inlagt. Slammet togs från MBR 20 januari 2004. Det motsvarar närmast punkten 55 vid 13°C.



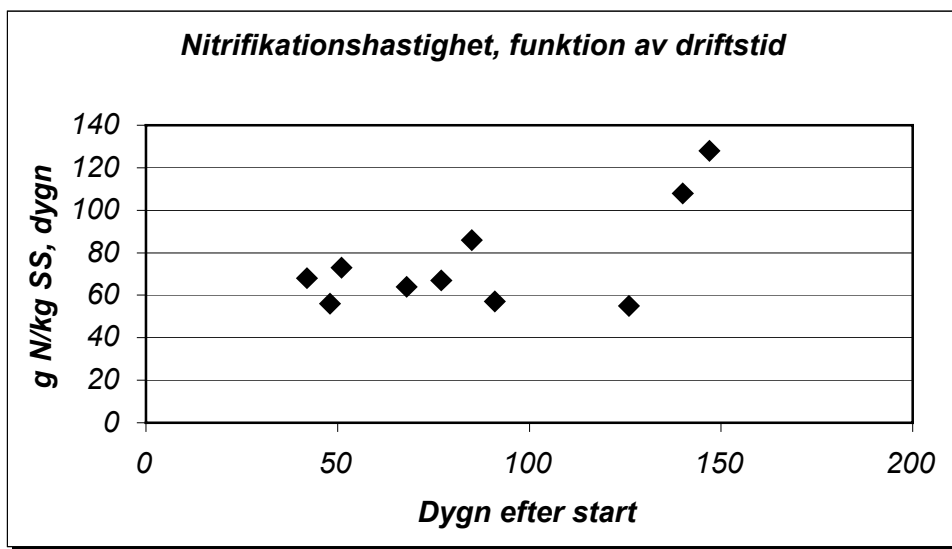
Figur 15 Jämförelse mellan MBR-resultat och laborieförsök.

Figuren visar det förväntade temperaturberoendet hos slammet som användes i labförsöket. Aktiviteten är kanske något låg, men det kan bero på att slammet transporterades och förvarades några dagar före försöksstart. Jämfört med motsvarande MBR-data vid 13°C är hastigheten ungefär hälften.

Det finns en viktig skillnad mellan MBR-data och de från laborieförsöket. Vid det senare satte man till en bestämd mängd ammonium, och man kunde mäta hastigheten genom uttag av prover efter olika tidpunkter. I pilotförsöket varierade halten av ammonium i vattnet, och det enda provet var efter drygt 10 timmars uppehållstid i reaktorn. Hastigheten kan då begränsas av tillgången på ammonium. När resthalten av ammoniumkväve är under 2 mg/l kan man anta att värdet borde varit högre. Det gäller främst punkten 128 vid 20°C, den skulle troligen legat högre om det funnits tillräckligt med ammonium i vattnet.

Normalt skulle man i det läget ha minskat den hydrauliska uppehållstiden för att få fram den verkliga hastigheten, men det gick inte på grund av membranets kapacitet och att det inte gick att minska volymen ytterligare.

En annan faktor att ta hänsyn till är att försöket startade med slam från Sjöstadsverket, med låg slamålder och utan nitrifikation. Det betyder att man skulle vänta sig en gradvis tillväxt av nitrifierare upp till den andel av slammet som motsvarar förhållandet ammonium till BOD i avloppsvattnet. Det skulle betyda att hastigheten i MBR skulle öka med tiden upp till en viss gräns. Figur 16 visar hur hastigheten utvecklades under försökets gång.



Figur 16 Nitrifikationshastigheten som funktion av försökstiden.

Någon tydlig ökning av hastigheten med tiden kan inte utläsas av figuren. Visserligen är data en blandning av olika temperaturer och slamåldrar (9, 6, 15 resp 4,8 dygn i den ordningen), men en mer tydlig trend borde ha syns ändå.

Den grundläggande skillnaden mellan MBR och normala aktivslamanläggningar (AS) är hur man selekterar det slam som finns i reaktorn. I AS selekterar man på bakterier/-organismer som dels växer till i systemet, dels sedimenterar relativt bra. I MBR selekterar man på storlek, och genom att välja membran håller man normalt kvar alla bakterier och mikroorganismer. I båda systemen tar man ut en delmängd för att få en definierad slamålder. Skillnaden är att förutom det avsiktliga slamavdraget så har man i AS också slamförluster (= bakterieförluster) med utgående vatten från sedimenteringen.

När vi valde att använda en MBR i försöket utredde vi metodvalet och fann att avdraget från MBR och avdrag och förluster från AS skulle vara likartade, dvs att man inte ändrade förhållandet mellan olika typer av bakterier. Samtidigt noterar man ofta att man får en sämre klarfas ut från verk med nitrifikation. Om det beror på att de nitrifierande bakterierna har mindre benägenhet att bilda flockar skulle man få en högre andel nitrifierare i en MBR än i en AS med samma slamålder. Det kan vara en anledning till

att vi med bara 5 dygns slamålder och 15-16°C hade nästan fullständig nitrifikation. Vid samma tidpunkt hade man i Sjöstadsverkets AS nästan ingen nitrifikation alls. För att säkerställa metodvalet utfördes försöken även med konventionell sedimentering.

Att man skulle få den klart högsta hastigheten vid den lägsta slamåldern kräver dock fortfarande en förklaring. En möjlighet är att man i MBR-piloten har en mycket större yta för bakterieväxt än i en normal AS. Dels gör skalan att yt/volymförhållandet blir högre, dels tillkommer membranens yta. Om en signifikant del av nitrifikationen sker på ytorna kommer en slamålder som ger låg halt suspenderat material att få en för hög hastighet om man räknar den bara på det suspenderade materialet.

Någon bra förklaring till att man inte ser någon tydlig temperatureffekt i MBR-försöken har vi dock inte. Det enda skulle vara att nitrifierarna i verkligheten växer till betydligt snabbare än man tror, men att AS ger stora förluster av just dem. Med MBR hann nitrifierarna anpassa sig till tillgången på ammonium när temperaturen sänktes under några dagar. Enligt försöken har temperaturen en mindre inverkan på nitrifikationen i en MBR reaktor än förutspått.

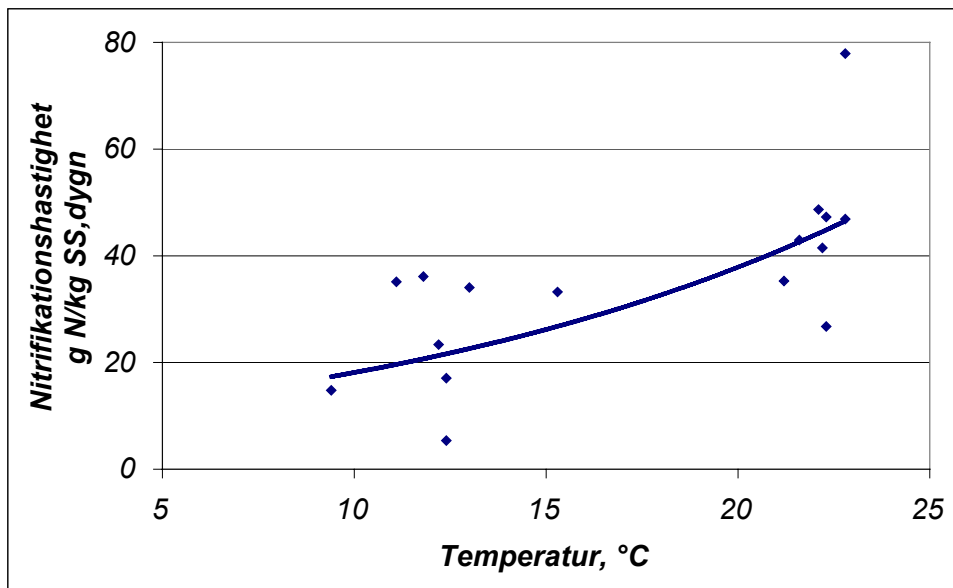
### **6.3.2 Försök 3 - Konventionellt sedimenteringssteg**

#### *Utrustning:*

Pilot hyrd från Purac, se tidigare beskrivning, membran-steget utbytt mot konventionell sedimenteringsbassäng.

#### *Försök:*

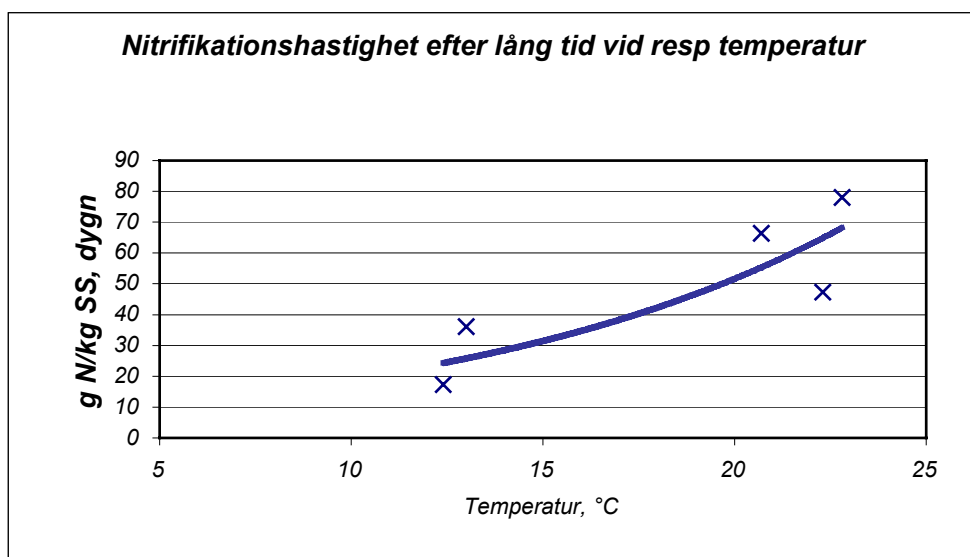
Efter slamuppbyggnad har ett flertal försök vid olika temperaturer utförts. Efter att temperaturen har justerats har processen pågått 5-6 uppehållstider innan ny justering gjorts. Slamåldern har varit konstant under försöken. Ett flertal skiftningar mellan kallt och varmt har genomförts under försöksperioden.



Figur 17 Nitrifikationshastigheten som funktion av temperaturen i försök med konventionellt sedimenteringssteg.

Figur 17 visar att vid en högre temperatur sker en effektivare nitrifikation. Vid en ökning av temperaturen med en grad sker nitrifikationen omkring 7% snabbare. Detta resultat motsvarar bättre de förväntade resultaten enligt litteraturen.

I Figur 17 är alla punkter med data på nitrifikation och slamhalt med. I Figur 18 är bara data från provtagningar relativt långt efter temperaturändringar medtagna. Punkterna är få, och spridningen kring den linje som bäst anpassas till dem stor, men linjen motsvarar i alla fall ekvationen  $\text{hast.} = 7,1 \cdot \text{Exp}(0,099 \cdot T)$ , alltså mer än en fördubbling vid en höjning av temperaturen från 10 till 20°C.



Figur 18 Nitrifikationshastigheten efter minst tre dagar efter temperatur- skifte som funktion av temperaturen.

## 6.4 Slutsatser från pilotförsök

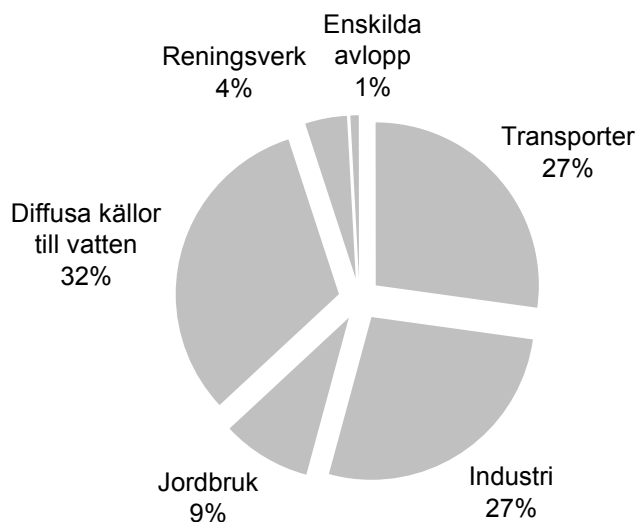
De erhållna resultaten tyder på två vägar att öka nitrifikationshastigheten vid låg temperatur på avloppsvattnet. Det ena sättet är det förväntade, dvs att höja temperaturen på vattnet med t ex restvärme från fjärrvärmesystem. Det andra tycks vara att använda en membranbioreaktor i stället för konventionell aktivslam.

Av kostnadsskäl är det enda rimliga i en befintlig aktivslamanläggning att höja temperaturen. Att sätta in membranmoduler skulle med dagens priser bli alltför dyrt. Bara om man har mycket ont om utrymme vid nybyggnation kan en MBR vara av intresse, eftersom man kan nå högre slamhalter utan att få problem med slamegenskaperna, och man slipper den utrymmeskrävande sedimenteringen. Andra skäl att välja MBR kan finnas, om man t ex har mycket hårda krav på ett partikelfritt behandlat vatten.

## 7 Stora mängder kväve kan reduceras

Genom att summera de totala utsläppen av kväve, både till vatten och luft, kan man få en uppfattning om hur stor andel av de totala kväveutsläppen som kommer från de kommunala reningsverken. Utsläppen från reningsverk står för cirka 4 % av de totala utsläppen, detta motsvarar omkring 12 % av de totala utsläppen till bara vatten. Genom

att vidta åtgärder inom denna sektor kan en hel del göras för att nå lösningar på våra miljöproblem.



Figur 19 Fördelning av det totala svenska kväveutsläppen både till vatten och luft mellan olika sektorer.

Om ett reningsverk reducerar sina utsläpp av kväve till kravnivån, exempelvis Sjöstadsreningsverk i Karlstad, kan stora kvävemängder reduceras. Idag (räknat på data från år 2003) släpper verket ut omkring 38 mg/l, kravnivån för ett verk av Sjöstads storlek är 15 mg/l, räknat på ett medelflöde minskas utsläppen bara från detta enda verk med nästan 300 ton kväve per år om kravnivån kan hållas.

Omkring 70 verk i Sverige befinner sig i en situation där de måste vidtaga någon åtgärd för att sänka sina kväveutsläpp, dessa åtgärder skulle innebära en minskning på mellan 1700 och 2800 ton kväve per år.

## 8 Resonemang och slutsatser

### 8.1 Kostnadsjämförelse

Tabell 5 Total årlig kostnad för att klara utgående kväveringskrav genom en förhöjd temperatur.

Antal pe anslutna till renings- verket	Årlig kostnad för investe- ringar: Värmeväxlare, filter- teknik, reningsteknik, pumpar [SEK/år]	Energikostnad [MSEK/år]	Total årlig kostnad [MSEK/år]
20000 pe	50 000	1	1,1
50 000-100 000 pe	150 000	4	4,2
Över 100 000 pe	600 000	26	26,5

Som ses i tabellen ovan är det energikostnaden som påverkar den totala kostnaden mest. Investeringskostnaden med avskrivning är relativt låg, det är därför av större vikt att investera i en så effektiv värmeöverföring som möjligt för att hålla denna kostnad nere. I beräkningarna ovan har antagits att man endast värmer under vinter och vår då avloppsvattentemperaturen är som lägst, se Figur 2. Den årliga kostnaden tas fram genom annuitetberäkningar med en ränta på 4,5 % och 20 års avskrivning. Då den nödvändiga energin är av låg kvalitet bör priset inte vara i samman storleksordning som för prima fjärrvärme, här har ett pris på 100 kr per MWh använts. Detta är en förhandlingsfråga vid varje enskilt tillfälle.

Tabell 6 Total årlig kostnad för byggnation av bassänger.

Volym från Flödesförhållande	Erforderlig nitrifikations- volym [m <sup>3</sup> ]	Årlig kostnad för investering i bassänger samt kringutrustning och driftskostnader [MSEK/år]
20 000 pe	5 000	2,5
50 000- 100 000	24 000	6
100 000 pe	155 000	20

Bassängkostnaden för att klara behovet av kvävering vid befintlig temperatur uppskattas till 5 miljoner kronor per år i det fall som simulerats i avsnitt 4. Denna kostnad inkluderar investering i grundläggning, nybyggda bassänger, luftare mm. Jämförande kostnaderna i Tabell 6 för bassängbyggnationer grundas på volymsberäkningar i avsnitt 4. Kostnaden för bassängerna uppskattas med kostnaden 3000 kr/m<sup>3</sup> och samma

annuitetsantaganden som ovan. Den ovan beräknade årliga kostnaden ligger något under uppskattningsvärdet 30 000-60 000 per ton renat kväve.

Investering i värmeväxlingsutrustning samt energikostnad innebär, räknat på ett energipris på 100 kr per MWh(värme), en årlig kostnad på cirka 3 miljoner kronor.

Detta innebär alltså att genom att temperaturen höjs kan investeringarna samt driftskostnader hållas på en mycket lägre nivå än att investera i byggnation av bassänger. Detta gäller för de små och medelstora reningsverken, då flödet blir allt för stort kommer energikostnaden att bli stor och troligtvis överstiga investering i bassänger.

Att jämföra med kostnaden för att bygga ut nitrifikationsbassängen för att klara kravnivån 105mg/l, för verk med upp till 100 000 personekvivalenter (pe), respektive 10 mg/l, för verk med fler än 100 000 pe, totalkväve ut från reningsverket.

Resultaten från studien kan redovisas på två sätt antingen med ett antaget energipris som ger en totalkostnad som kan jämföras med alternativa lösningar, vilket gjorts ovan. Eller genom att räkna ut hur mycket man kan betala för värmen innan den totala årliga kostnaden överstiger kostnaden för bassängbyggnation.

## **8.2 Pristak**

Då ägande situationen ser olika ut för reningsverk i olika kommuner kan prissättningen variera. Genom att jämföra de olika investeringsbehoven och driftskostnaderna kan ett högsta ekonomiskt försvarbart pris på värmen beräknas. Beräkningar ger ett pristak på omkring på 240 kronor/MWh för verk med låga flöden och omkring 120 kronor/MWh för medelstora verk, under denna kostnad kan en vinst räknas hem.



## **9 Referenser**

Andersson H., Arnell. J. Värmning av avloppsvatten med spillvärme för att förbättra kvävereningen. Elforsk 2002

ATV:s designmanual (ATV-DVWK-A 131)

C-EMIR

Data från Sjöstads reningsverk samt personliga kontakter med personal på verket.

Data från Karlstads Energi.

Energiläget i siffror 2003. Statens Energimyndighet.

EU-direktiv 91/271/EEC

Förordning 2001:512 om deponering av avfall.

JASS, <http://www.syscon.uu.se/~psa/>

Särner, E. Kvävereduktion för kommunala och industriella avloppsvatten. PURAC.

Värdering av förändrade temperaturnivåer i ett fjärrvärmenät. Beräkningsprogram.

<http://www.svenskfjarrvarme.se>

Värmeväxlingsberäkningar gjorda av Alfa-Laval.

## **10Tack**

Ett stort tack till all mycket vänlig och hjälpsam personal på Sjöstads reningsverk som ställt upp i vått och torrt.

Tack till styrgruppen för ett gott samarbete och god vägledning.

## 11 Ordförteckning

Aktivt slam	Biologisk avloppsreningsmetod. Mikroorganismer i slam som är aktiva i nitrifieringssteget, avskiljs från vattnet i sedimenteringsbassäng och återförs som aktivt slam till luftningsbassängen för nitrifikation.
Biologisk rening	Bakterier bryter ner organiskt material, oxiderar ammonium till nitrat och reducerar nitraten till kvävgas.
BOD	Biologiskt mått på mängden syrekrävande material.
COD	Mått på kemiskt syreförbrukande material (BOD inkluderat)
Denitrifikation	Nitrat reduceras med hjälp av tillgång på organiskt material till kvävegaser
Eutrofiering	Övergödning av hav och vattendrag med närsalter (kväve eller fosfor) som medför förhöjd tillväxt av alger och växter. Vid nedbrytning av dessa åtgår vattnets syre med syrebrist som följd.
Fällning	Olösliga föreningar som bildas mellan föroreningar i vattnet tillsammans med fällningskemikalier.
Kraftvärmeverk	Produktion av både el och värme.
Nitrifikation	Omvandling av ammonium till nitrat med hjälp av bakterier.
Returslam	Slam från den biologiska reningen återpumpas till inloppet av aktivt slambassängen för att åter delta i reningssprocessen.
Rökgaskondensering	Genom att låta de heta rökgaserna värmväxla med t.ex. det kalla fjärrvärmevattnet kondenserar dessa och värme frigörs. Ett kondensat erhålls som kan renas separat.
Slamålder	Genomsnittliga tiden slammet befinner sig i processen.
Sedimentering	Partiklar tillåts sjunka till botten och bilda sediment (slam).
Spillvärme	Värme som bildas som tex måste kylas bort vid produktion som kan tas omhand som värmekälla.
Totalkväve (Ntot)	Den totala halten av kväve, bundet i olika föreningar, kvävgas ej inräknat.

## IVL Svenska Miljöinstitutet AB

IVL är ett oberoende och fristående forskningsinstitut som ägs av staten och näringslivet. Vi erbjuder en helhetssyn, objektivitet och tvärvetenskap för sammansatta miljöfrågor och är en trovärdig partner i miljöarbetet.

IVLs mål är att ta fram vetenskapligt baserade beslutsunderlag åt näringsliv och myndigheter i deras arbetet för ett bärkraftigt samhälle.

IVLs affärsidé är att genom forskning och uppdrag snabbt förse samhället med ny kunskap i arbetet för en bättre miljö.

### Forskning- och utvecklingsprojekt publiceras i

IVL Rapport: IVLs publikationsserie (B-serie)

IVL Nyheter: Nyheter om pågående projekt på den nationella och internationella marknaden

IVL Fakta: Referat av forskningsrapporter och projekt

IVLs hemsida: [www.ivl.se](http://www.ivl.se)

Forskning och utveckling som publiceras utanför IVLs publikationsservice registreras i IVLs A-serie.

Resultat redovisas även vid seminarier, föreläsningar och konferenser.



---

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd

P.O. Box 210 60, SE-100 31 Stockholm  
Hälsingegatan 43, Stockholm  
Tel: +46 (0)8 598 563 00  
Fax: +46 (0) 8 598 563 90

P.O. Box 5302, SE-400 14 Göteborg  
Aschebergsgatan 44  
Tel: +46 (0)31 725 62 00  
Fax: +46 (0)31 725 62 90