

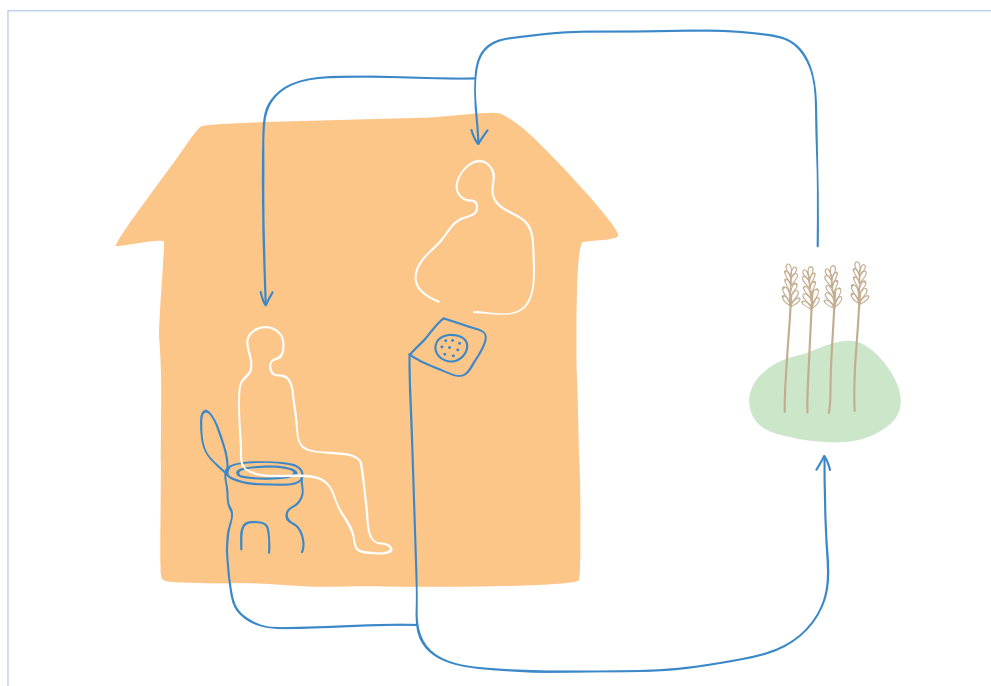
Återvinning av näringsämnen ur svartvatten

– utvärdering projekt Skogaberg

Pascal Karlsson

Peter Aarsrud

Mark de Blois



Svenskt Vatten Utveckling

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

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

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

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

Anders Lago, ordförande	Södertälje
Olof Bergstedt	Göteborg Vatten
Roger Bergström	Svenskt Vatten AB
Per Fåhræus	Varberg
Carina Färm	Mälarenergi
Daniel Hellström	Stockholm Vatten AB
Mikael Medelberg	Roslagsvatten AB
Marie Nordkvist Persson	Sydvatten
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Ulf Thysell	VA-verket i Malmö
Susann Wennmalm	Käppalaförbundet
Einar Melheim, adjungerad	NORVAR, Norge
Peter Balmér, sekreterare	Svenskt Vatten AB

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

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Återvinning av näringsämnen ur svartvatten – utvärdering projekt Skogaberg
Title of the report:	Recovery of nutrients from black water
Rapportens beteckning Nr i serien:	2008-10
Författare:	Pascal Karlsson, Kretsloppskontoret, projektledare; Peter Aarsrud, Kretsloppskontoret, bitr. projektledare; Mark de Blois, H2OLAND
Projektnr:	25-105
Projektets namn:	Svartvatten Skogaberg
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling (f.d. VA-Forsk), Kretsloppskontoret, Egenhemsbolaget
Rapportens omfattning Sidantal: Format:	91 A4
Sökord:	Svartvatten, Återvinning, Näringsämnen, Kretslopp, Bioavfall, Avfallskvarn, Svartvattensystem, Omvänd osmos, Membranfiltrering, Rötning, Biogas, Gödsel, Jordbruk
Keywords:	Black water, Recovery, Nutrients, Ecocycle, Biowaste, Waste Disposer, Black water system, Reverse osmosis, Membrane filtration, Digestion, Biogas, Fertiliser, Agriculture
Sammandrag:	Denna rapport karakteriserar ett svartvatten i ett självfallsystem från bostadsområdet Skogaberg i Göteborg samt beskriver och jämför olika alternativ (vad gäller investeringar, energi, transporter, etc.) för att återvinna näringsämnen från svartvattnet som gödsel i jordbruk.
Abstract:	This report characterizes black water in a self-draining system in the neighbourhood of Skogaberg in Gothenburg. Different alternatives for recovery of nutrients from black water are described and compared concerning investments, energy, transports etc. The goal is to use the recovered product as a fertilizer in the agriculture.
Målgrupper:	Kommuner, föreningar, alla som önskar få avlopp i kretslopp
Omslagsbild:	Schematisk ritning över kretsloppet av näringsämnen
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som pdf-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2008
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Hur ska framtidens avloppssystem utformas, och vilka möjligheter finns att ta tillvara nyttigheter i avloppsvattnet samtidigt som våra vattendrag skyddas? Frågeställningarna är ständigt aktuella, men ibland ser svaren annorlunda ut. Ser man historiskt på hur städernas infrastruktur har utformats utifrån respektive tids förutsättningar, så är svartvattensystem ingen ny företeelse, även om de försök med svartvattensystem som utformats de senaste 15 åren innehåller nya tekniska komponenter. Drivkraften för svartvattentekniken är resurshushållning.

Av det här projektet framgår att vi inte har några stora tekniska problem att hantera. Upparbetning av näringsinnehåll med membranteknik är tekniskt möjlig, den går med stor sannolikhet att skala upp, och resultatet är tekniskt sett helt godtagbart. Energibalansen i ett svartvattensystem med vattenavskiljning är till nackdel, på denna punkt behöver membrantekniken utvecklas ytterligare.

Den sociala acceptansen på tillämpningen har visat sig vara mycket positiv, och de boende i området har upplevt projektet mycket positivt. Bilden har vi fått bekräftad både genom de analyser av avloppskvalitet och de enkäter med de boende som genomförts. Innan svartvattensystem av denna karaktär kan anses mogna, behöver emellertid driftekonomin förbättras.

Tillsammans med övriga svartvattenprojekt i Sverige och internationellt, är det ändå mycket värdefulla erfarenheter som vunnits i Skogabergsprojektet. Och själva har vi tagit ytterligare några steg på vägen mot svaret om framtidens avloppssystem.

Planering, byggande, pilotförsök och utvärdering har skett i samverkan mellan de kommunala aktörerna kretsloppskontoret, Egnahemsbolaget och Göteborg Vatten. Beslut om genomförande togs av respektive nämnd/styrelse under 2002. Projektgruppen har bestått av Pascal Karlsson (projektledare) och Peter Aarsrud, båda kretsloppskontoret, Lars-Gunnar Bokesjö och Annika Malm, båda Göteborg Vatten samt Åke Gustavsson, Egnahemsbolaget.

Anne Tuisku och Hans Diechle har varit projektanställda för försöken som genomförts i samverkan med Britt-Marie Wilén, Chalmers Tekniska Högskola, Robert Eklund, Umeå Universitet och Matthias Grottke, Fackhögskolan i Lübeck. Processkonsulter har varit Mark de Blois, H2OLAND och Carl-Henrik Hansson, Nordcap Membrane Consulting. Många tabeller och figurer i denna rapport har upprättats med hjälp av Torben Meins, H2OLAND. Miljösystemanalysen har genomförts av Urban Water, inom ett parallellt projekt. Värdefulla synpunkter under projektets gång har lämnats av Peter Balmér, VA-Strategi, Gunilla Pettersson, Göteborg Vatten samt Ann Mattsson, Gryaab. Många studenter och andra personer har på olika sätt medverkat och sju examensarbeten har slutförts inom projektet.

Trevlig och intressant läsning till alla er som får rapporten i er hand!

Göteborg i maj 2007

Kaj Andersson - Förvaltningschef, kretsloppskontoret

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	7
Summary	8
1 Bakgrund	9
2 Mål med projektet och utvärderingen	10
3 Bostadsområdet Skogaberg	11
3.1 Orientering	11
3.2 Information till boende	12
3.3 Information till allmänhet och bransch	12
4 Valt svartvattensystem i Skogaberg	13
5 Avfallskvarnar och ledningssystem	15
5.1 Avfallskvarnars funktion och utbredning	15
5.2 Beskrivning av systemet	15
5.2.1 Avfallskvarnarna i Skogaberg	15
5.2.2 Toaletterna	16
5.2.3 Ledningssystemet	16
5.3 Erfarenheter av systemet	18
5.3.1 Brukarnas erfarenheter av avfallskvarnarna	18
5.3.2 Utsortering av biologiskt avfall	20
5.3.3 Driftserfarenheter av ledningssystemet	21
5.4 Kostnader	23
6 Svartvattnets tillrinning och sammansättning	24
6.1 Tillrinning	24
6.2 Sammansättning	24
7 Studerade återvinningsalternativ	31
8 Låg ambition – återvinning av organiskt material	33
8.1 Målsättningar och förutsättningar	33
8.2 Behandlingstekniker	33
8.3 Dimensionering	34
8.4 Genomförda mätningar och försök	35
8.5 Förbrukningar och kostnader	35
8.6 Produktsammansättning	37
8.7 Måluppfyllelse	37
9 Mellan ambition – återvinning av organiskt material och fosfor	38
9.1 Målsättningar och förutsättningar	38
9.2 Behandlingstekniker	38
9.3 Genomförda mätningar och försök	39
9.4 Dimensionering	40
9.5 Förbrukningar och kostnader	42

9.6	Produktsammansättning.....	43
9.7	Måluppfyllelse	43
10	Hög ambition – återvinning av alla näringsämnen.....	44
10.1	Målsättningar och förutsättningar.....	44
10.2	Möjliga behandlingstekniker	44
10.2.1	Indunstning.....	44
10.2.2	Jonbyte.....	44
10.2.3	Membranteknik.....	45
10.3	Genomförda mätningar och försök	47
10.4	Dimensionering	61
10.5	Förbrukningar och kostnader	69
10.6	Produktsammansättning.....	71
10.7	Måluppfyllelse	71
11	Rötning av slam, rens och koncentrat	73
11.1	Central rötning?.....	73
11.2	Målsättningar och förutsättningar.....	73
11.3	Genomförda mätningar och försök	74
11.4	Energibalans.....	75
12	Användning av gödselprodukten	77
12.1	Kvalitet på produkterna.....	77
12.2	Lagring och spridning.....	78
12.3	Kvalitetssäkring	79
13	Utvärdering av Skogabergs svartvattensystem.....	81
13.1	Jämförelse mellan studerade behandlingsalternativ	81
13.2	Skogabergs svartvattensystem i stor skala?.....	82
14.	Slutsatser och rekommendationer	84
	Avfallskvarnar och ledningssystem.....	84
	Tillrinning och sammansättning	84
	Återvinning av näringsämnen	84
	Referenser.....	89

Sammanfattning

Bostadsområdet Skogaberg i Göteborg har byggts med ett extra avloppssystem för källsorterat avlopp, kallat svartvattensystem. Även biologiskt nedbrytbart matavfall leds till svartvattensystemet. Det samlas in med avfallskvarnar som sitter under diskbänkens sköljho. Syftet med svartvattensystemet var att börja återföra näringsämnen från avlopp till produktiv mark på ett sätt som uppfyller alla önskemål som lantbrukarna och livsmedelssektorn har på en ren gödselprodukt. I området har 130 nya bostäder anslutits till svartvattensystemet mellan december 2002 och september 2005. Avfallskvarnarna och ledningssystemet har fungerat väl. De boende är överlag nöjda med systemet, särskilt med avfallskvarnen.

Under åren 2005–2006 har mätningar gjorts på svartvattnet. Svartvattnet innehåller mycket näringsämnen och bara lite tungmetaller. Olika behandlingstekniker för att framställa en attraktiv gödselprodukt från svartvattnet har provats i labbskala eller pilotskala.

Mest fokus har lagts på återvinning av alla näringsämnen med ett mycket tätt vibrerande membran: VSEP omvänd osmos. Pilotanläggningen har varit i drift i sammanlagt drygt 3 månader och det har verifierats att omvänd osmos är en möjlig teknik för att koncentrera upp svartvattnet 10–15 ggr. I koncentratet återfanns då >95 % av inkommande fosfor samt >80 % av kväve och kalium. Energiförbrukningen för den lokala anläggningen vid tillämpning av omvänd osmos uppskattas till ca 9 kWh/m³ svartvatten varav den omvända osmosen står för hälften. Vid en storskalig behandlingsanläggning skulle elbehovet vara lägre. En långsam minskning av membranens kapacitet från månad till månad har observerats. Detta antyder att kemisk utfällning av något svårslutigt salt har förekommit trots förbehandlingen, men det har inte kunnat klarläggas inom projektet. En permanent behandlingsanläggning av detta slag skulle ge en attraktiv, förnyelsebar gödsel men anläggningen skulle bli mycket kostsam att bygga och driva.

Försök har även gjorts med kemisk fällning. Då erhöles ett fosforrikt slam med lite metaller. En slamavskiljare med kemisk fällning skulle kunna byggas till låg kostnad och det vore förmodligen det lämpligaste behandlingsalternativet om detta svartvatten ska behandlas separat vid Skogaberg.

Svartvattenslammet har rötats i labbskala. Rötningförsöken har visat att svartvattenslammet kan ge ca 90 kWh biogas per person och år. Slammet bör transporteras med bil till en stor rötninganläggning, där biogasen kan tas tillvara på ett bra sätt och en certifierad gödselprodukt produceras.

Svartvattensystemet vid Skogaberg skulle gå att bygga i större skala, men om Göteborgs stad vill få kretslopp på mycket näringsämnen från avlopp finns bättre alternativ. Det befintliga avloppssystemet kan utvecklas med källkontroll eller förändrad behandling på Ryaverket, så att en attraktiv gödsel erhålls där. Detta gäller i synnerhet om huvudsyftet är att återvinna fosfor och ej de andra näringsämnena.

Summary

The neighbourhood Skogaberg in Göteborg has been built with an additional sewer system for source separated sewage, a so called black water system. Biological degradable food waste is collected also through waste disposers which are placed under the kitchen sinks. The aim of the black water system was to recover nutrients from sewers to productive land in a way that meets all requirements of the farmers and the food sector. 130 new dwellings in the area have been connected to the black water system. The system has functioned well and generally, the inhabitants are pleased, especially with the waste disposers.

The black water contains a lot of nutrients and relatively little heavy metals. Different treatment techniques for producing an attractive fertilizer from the black water have been tried in laboratory scale or pilot scale.

Main focus was put on recycling all of the nutrients with a very tight vibrating membrane: VSEP reverse osmosis. The pilot plant has been working for more than 3 months and it has been verified that reverse osmosis is a possible technology in order to concentrate the black water up to 10–15 times. In the concentrated sludge, >95 % of incoming phosphorus and >80 % of incoming nitrogen and potassium was found. The energy consumption for the local plant with application of reverse osmosis could be estimated to around 9 kWh/m³ black water, of which the reverse osmosis constitutes approximately 50 %. For a treatment plant of a bigger scale, the electricity need would be lower. A slow reduction of the membrane's capacity from month to month has been observed. This implies that chemical precipitation of some not solvable salt has occurred despite the pre-treatment, but it could not be determined precisely which salt. A permanent treatment plant would give an attractive, renewable fertilizer but it would become very expensive to build and operate.

Experiments have also been done with chemical precipitation, in which a phosphorus rich slurry was produced with little metals. A sedimentation tank with chemical precipitation could be built at low costs and it is probably the most appropriate treatment alternative if this black water would be treated separately at Skogaberg.

Digestion tests on a laboratory scale have shown that the black water sludge can give approximately 90 kWh of biogas per person and year. The sludge should be transported by truck to a large digester, where the gas could be taken care of in an appropriate and safe manner and a certified fertilizer could be produced.

It is possible to build the black water system of Skogaberg in bigger scale, but there are better alternatives for recycling nutrients. The existing sewer system could be developed with source control and/or the central waste water treatment for the city could be changed and an attractive fertilizer could be obtained from there. This applies in particular if the main goal is to regain only the phosphorus but not the other nutrients.

1 Bakgrund

Riksdagen, Naturvårdsverket, Lantbrukarnas Riksförbund, Livsmedelsföretagen m.fl. har mål och visioner om att återföra näringsämnen från livsmedel till jordbruk, vilket blir nödvändigt i ett långsiktigt hållbart samhälle. De flesta kommunerna brottas med frågan om hur avloppsslammet ska kunna avsättas. Göteborgs stad har ett långsiktigt mål om att de näringsämnen som via livsmedel transporteras in till staden också ska kunna återföras till livsmedelsproduktion, på ett säkert, kostnadseffektivt och i övrigt hållbart sätt. Det innebär att vi vill sluta kretsloppet för näringsämnen i både ”bioavlopp” och ”bioavfall”. Det är givetvis stora fördelar om vi kan behålla det mesta av dagens infrastruktur för avlopp, men vi utesluter inte heller systemförändringar, särskilt vid nybyggnation.

I ett konventionellt spillvattensystem blandas näringsämnen från livsmedel med tungmetaller, och svårnedbrytbara organiska ämnen från hushåll, industrier, deponier och andra verksamheter. I Göteborg leds också dagvattnet med sina föroreningar från ca 1/3 av stadens hårdgjorda ytor till Ryaverket. Det har diskuterats mycket kring vilka mängder av tungmetaller och organiska föroreningar som jordbruksmarken tål, och nationella gränsvärden har satts upp för maximala koncentrationer i slam och för maximala tungmetallmängder som via slam får tillföras jordbruket. Sverige har internationellt sett mycket stränga krav och många avloppsreningsverk klarar dessa gränsvärden för alla eller för de flesta ämnen. När svartvattensystem för Skogaberg kom till fanns en utbredd tveksamhet hos livsmedelsindustrin för att köpa in råvaror från lantbruk där marken gödslats med avloppsslam. Tveksamheten gällde främst risken att utsätta de egna varumärkena för något som helst tvivel avseende produktkvalitet. Sedan 1999 avrådde därför Lantbrukarnas Riksförbund, LRF,

lantbrukarna från att ta emot avloppsslam, baserat på försiktighetsprincipen. LRF:s ambition var dock att jordbruket ska kunna ta emot huvuddelen av hushållens näringsämnen från avloppet (LRF Policy, 2004) men under förutsättning att växtnäringen är lika ren som den är i livsmedlen, d.v.s. ytterligare metaller eller oönskade organiska föreningar ska inte tillföras med gödselprodukter från tätorter. I LRF:s mål på kort sikt framgick ”Använda organiskt avfall som är rent, d.v.s. från källsorterade flöden” och ”I första hand avfall från hantering av livsmedel och från toaletter.”

Planeringen av Skogabergs svartvattensystem som gjordes år 2001–2002, utgick från LRF:s Policy och det ”Arbetspapper” som tagits fram tillsammans med Livsmedelsföretagen och Naturskyddsföreningen.

Göteborgs stad genom Kretsloppsnämnden och VA-nämnden samt Egnahemsbolaget har med detta projekt försökt att bidra med en pusselbit till det utvecklingsarbete som behövs om vi ska nå långsiktig hållbarhet avseende näringsämnen från livsmedel. Kretsloppsnämnden har bedömt att det är nödvändigt att prova källsortering i den aktuella skalan för att få underlag inför vidareutveckling av stadens avloppssystem. Bostadsområdet Skogaberg har byggts med ett källsorterande avloppssystem för insamling av ”bioavlopp” och ”bioavfall”. I detta ”svartvattensystem” ingår både toalettavloppet och matavfall som mals ned i köksavfallskvarnar. Systemet har valts med kunderna i fokus; dels gödselanvändarna där vi har utgått från LRF:s policy om källsortering; dels fastighetsägarna som får ett lättanvänt, kretsloppsanpassat system. Det har varit en medveten prioritering av gödselkvaliteten och användarvänligheten framför kostnadseffektivt och teknisk enkelhet.

När denna utvärdering skrivs är området färdigbyggt och inflyttat. Driftserfarenheter från svartvattensystemet finns sedan fyra år från området. Omfattande försök med olika behandlingstekniker har gjorts men däremot har ingen permanent behandlingsanläggning byggts.

2 Mål med projektet och utvärderingen

Huvudmålet med svartvattensystemet i Skogaberg är:

- **att i ett separat ledningssystem ta tillvara de mest näringsrika och minst förorenade fraktionerna från hushållen, och att behandla dem så att en så ren gödselprodukt som möjligt kan erhållas.**

Huvudmålsättningarna med projektet för vilket medel från VA-Forsk söktes är:

- att utvärdera funktionen hos separata svart- och gråvattenledningssystemen med självfall
- att utvärdera avfallskvarnarnas funktion och brukarnas erfarenheter av dessa

- att få en gedigen karakterisering av Skogabergs svartvatten (sammansättning, renhet, pågående processer i svartvatten)
- att verifiera att VSEP-membranteknik med silning som förbehandling är ett möjligt, lämpligt och tillräckligt resurssnålt alternativ för att koncentrera upp näringsämnena i svartvatten.
- att ta fram ett dimensioneringsunderlag för en fosforåtervinningsanläggning för Skogaberg baserad på fällning och sedimentering.
- att karakterisera slutprodukterna från behandlingsanläggningen av svartvatten och bedöma deras lämplighet som gödselmedel
- att jämföra det valda systemet med ett konventionellt system genom systemanalys
- att jämföra kostnaderna för det valda systemet med ett konventionellt system

3 Bostadsområdet Skogaberg

3.1 Orientering

En bild av ett antal typiska hus i Skogaberg finns i figur 3.1.

Egnahemsbolagets område ligger i S:t Jörgens parks södra dalgång på Hisingen. Skogaberg innehåller totalt 133 bostäder, varav 110 villor, 17 BRF-lägenheter samt 6 lägenheter i ett boende med särskild service.

De 110 friköpta husen i området är ritade av Sweco FFNS Arkitekter. På avstånd kan området liknas vid en grekisk bergsby som slingrar sig in i dalgången. Den moderna funkisstilen är väldigt omtyckt och de ljusa putsade fasaderna ger ett gediget intryck.

Områdets parkliknande karaktär har behållits genom att anlägga grönytor mellan husgrupperna och låta den orörda naturen möta områdets yttersta gränser. Husen ligger i mindre grupper utmed små

återvändsgator. Intill varje hus ligger ett förråd och en carport.

De flesta husen i området är tvåplanshus med altaner på förrådets tak. Hustyperna har genom olika souterräng lösningar anpassats till den omgivande naturen där så krävts. Ett fåtal enplanshus finns på två olika platser i det vidsträckta området. Bostadsytan varierar mellan 100 och 140 m² och de egna tomterna är relativt små. Gårdsgator och omgivande grönytor ägs samfällt. Några mindre gemensamma lekplatser för de mindre barnen finns insprängda på strategiska platser. Husen är visserligen miljövänligt byggda och möjliggör ett miljövänligt boende enligt dagens standard, men utöver svartvattensystemet, så har de inga "eko-by"-anspråk. Husen vänder sig till "vanliga" göteborgare. Inflyttning skedde från november 2003 till september 2005.

Bostadsrättslägenheterna ligger i tre huskroppar av rött tegel mitt i området. Dessa inrymde tidigare sjukköterskebostäder för personal på S:t Jörgens sjukhus. Fastigheterna totalrenoverades och planlösningarna förändrades för att få större lägenheter. Inflyttning skedde redan i slutet av 2002.



Figur 3.1 Typiska hus i Skogaberg.

3.2 Information till boende

Kunderna fick sin första information om svartvatten-systemet vid deras besök hos säljaren inför bokning av sitt hus, på Egnahemsbolaget. Där kunde man även få se och känna på en avfallskvarn och i säljmaterialet följde en informationsbroschyr med om hur avfallskvarn och systemet skulle användas och vad som var tanken bakom.

Vid inflyttning fick de ytterligare ett laminerat informationsblad att sätta upp på insidan diskbänkskåpet.

De flesta kunder hade inte speciellt mycket frågor om svartvattensystemet utan i så fall mer om själva kvarnen och dess användning. De flesta var positivt inställda men ibland lite oroliga för att det skulle bli krångligt.

Någon månad efter inflyttning har Egnahemsbolaget ordnat med informationsmöte på kvällstid. Mötets huvudpunkt har varit information om hur fjärrvärmeanläggningen fungerar. Vid det mötet har de även fått en kort information om svartvattenprojektet.

Under projekttidens gång har bara ett riktat utskick gjorts till alla hushållen i Skogaberg. Ett informationsblad om varför den tillfälliga provtagningsstationen byggts upp.

De boende har sedan start fått information om att Kretsloppskontoret planerar att bygga ett komplett system för återföring av näringsämnen, och näringsämnena kommer att gå till jordbruk.

3.3 Information till allmänhet och bransch

Information om projektet har kunnat nå allmänheten via bilagor i GP, Egnahemsbolagets egen tidning och inslag i Västnytt. Den särskilt intresserade har även kunnat ta del av de lägesrapporter som redovisats årligen till Kretsloppsnämnden och som är offentlig handling.

Det har förekommit artiklar om projektet i branschtidskrifterna Svenskt Vatten, Cirkulation och VVS-forum. Resultat från pilotförsöken med omvänd osmos presenterades via en poster på IWA-konferensen i Beijing.

Till projektet har kommit en lång rad studiebesök från branschen, internationellt och från landet bl.a. f.d. samhällsbyggnadsminister Mona Sahlin.

4 Valt svartvattensystem i Skogaberg

Val av systemlösning

Valet av lösning för svartvattensystemet i Skogaberg har gjorts i flera steg. Dessa beskrivs översiktligt nedan.

Val av principlösning

Idén till ett kretsloppsanpassat avloppssystem kom från SWECO FFNS som år 2001 tog fram planhandlingar åt Egnahemsbolaget. På Egnahemsbolagets uppdrag tog då SWECO fram en utredning (Wennberg, Aleby & Stenman, 2001). Denna jämförde konventionellt avloppssystem med svartvattensystem och urinsortering. Efter flera möten mellan Kretsloppskontoret och Egnahemsbolaget enades man om ett svartvattensystem med avfallskvarnar. Motivet var att det möjliggjorde återföring av en stor del av näringsämnena till jordbruk samt att det var mycket användarvänligt för ”vanliga” Göteborgare. Systemlösningen skulle göra det enkelt för de boende att delta i ett kretsloppsanpassat avlopps- och avfallssystem. Avfallskvarnen bedömdes vara ett mer användarvänligt sätt att källsortera avfall än de två andra källsorteringssystem som uppmuntras i övriga Göteborg: hemkompostering eller insamling i papperspåse. Urinsortering bedömdes underlätta återföring av näringsämnen rent tekniskt, men antogs vara lite för främmande för vanliga husköpare. Det fanns vid denna tid också en del negativa driftserfarenheter från urinsortering i andra områden. Slutligen bedömdes avfallskvarnen öka möjligt marknadsvärde för husen medan urinsortering toalett möjligen skulle ha sänkt värdet. Det konstaterades också att svartvattensystemlösningen krävde att kommunen gick in som huvudman för ledningssystemet och för projektet som behövdes för genomförandet. Kretsloppskontoret tog fram en projektplan (Karlsson, 2002) och genomförandet beslutades under 2002 av

Kretsloppsnämnden, VA-nämnden och Egnahemsbolagets styrelse.

Val av självfallssystem

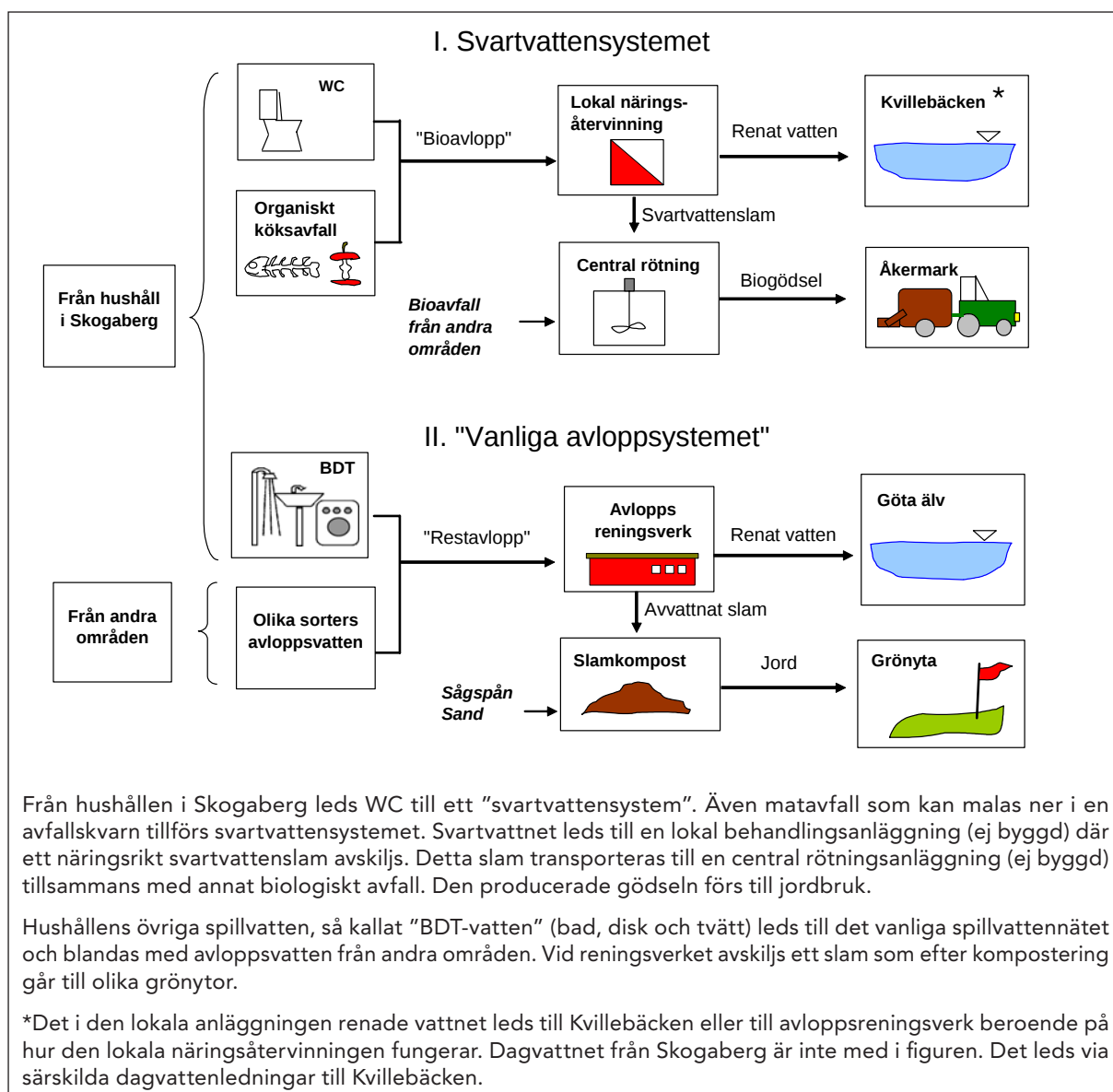
och ledningssystemets utformning

Kretsloppsnämnden beställde år 2002 byggande av svartvattensystemet från VA-nämnden, men lämnade åt dåvarande VA-nämnd att välja princip för ledningssystemet, tex. självfall, vakuum eller trycksatt pumpsystem. Studiebesök gjordes bla. till Vibyåsen, Sollentuna kommun och Volvos fritidsgård vid Bokenäset, för att ta del av deras erfarenheter. Baserat på dessa erfarenheter valde dåvarande VA-verk ett självfallssystem med konventionella WC och med detaljlösningar för att få vattnet att rinna så lätt som möjligt i ledningsnätet.

Val av behandlingsteknik för gödselproduktion

Självfallssystemet med konventionell WC kräver en hel del spolvatten och ger därmed stora svartvattenvolymer vilket gör det olämpligt att transportera svartvattnet till jordbruk. I stället behöver näringsämnena fångas i ett koncentrerat som behandlas och transporteras till jordbruk. Eftersom huvuddelen av näringsämnena i svartvattnet kommer i löst form via urinen, så krävs förhållandevis avancerad teknik om hög grad av alla näringsämnen ska koncentreras. En förstudie visade att omvänd osmos är energi- och resursmässigt bäst, om hög grad av alla näringsämnen ska återföras. Det gick inte ens internationellt att hitta tillräckligt likvärdiga referenser så det bedömdes nödvändigt att genomföra egna pilotförsök. Denna rapport skrivs i ett läge när ingående pilotförsök genomförts. Däremot finns i dagsläget inget beslut om någon permanent behandlingsanläggning.

I figur 4.1 redovisas en förenklad skiss för det tilltänkta systemet för avloppet från Skogaberg medan figur 4.2 ger en översiktsskild över en stor del av området inklusive pilotanläggningen.



Figur 4.1 Förenklad systemskiss för avloppet från Skogaberg.



Figur 4.2 Översiktspild över en stor del av området inklusive pilotanläggningen (längs ner i mitten) Foto: Winnfors, 2005.

5 Avfallskvarnar och ledningssystem

5.1 Avfallskvarnars funktion och utbredning

En avfallskvarn monteras under en av hoarna i diskbänken och ansluts till avloppet. Kvarnen används för att mala ner den malbara delen av matavfallet från hushållen. Matavfallet matas ner i malkammaren varefter vattenkranen sätts på. Avfallet som hamnar på en roterande skiva slungas ut mot malkammarens sidor där det rivs mot en sågtandad rivare med en spaltöppning på ca 2 mm. Det malda avfallet och vattnet leds via ett vattenlås till avlopps nätet. Figur 5.1 visar en avfallskvarn i genomskäring.

Avfallskvarnar som är kopplade till det kommunala avloppsnätet är relativt vanligt i USA där ca 50 % av hushållen har kvarnar (de Koning & van der Graaf, 1996). I Europa och Sverige är avfallskvarnar däremot inte särskilt vanligt. En kommunenkät som genomfördes av Kärrman m.fl. (2001) visade att drygt 20 svenska kommuner hade registrerade avfallskvarnar och att totalt antal registrerade i Sverige var ca 3000 (varav 2000 i Surahammar). Man antog dock att antalet inte registrerade kvarnar var minst lika många om inte fler.



Figur 5.1 Avfallskvarn i genomskäring.

5.2 Beskrivning av systemet

5.2.1 Avfallskvarnarna i Skogaberg

I Skogaberg installerades två olika typer av avfallskvarnar. I de 17 lägenheterna installerades kontinuerligt matade kvarnar av modellen Jegon 400 och i villorna satsvis matade av modellen Disperator 178. I de sex lägenheterna med särskilt boende installerades inga kvarnar. I den kontinuerligt matade kvarnen kan man tillföra avfall medan kvarnen är igång och den har en strömbrytare som är placerad på väggen ovanför diskhon. Den satsvis matade kvarnen sätts på och stängs av genom att ett skyddslock sätts i inkasthålet och vrids om 90 grader. Skyddslocket har en spalt som vatten kan spolas igenom. Avfallskvarnarna är, liksom toaletterna, anslutna till svartvattenssystemet. Figur 5.2 visar de två kvarnmodellerna i Skogaberg.



Figur 5.2 Kvarnmodellerna Disperator 178 (till vänster) och Jegon 400 (till höger) på plats i Skogaberg.

5.2.2 Toaletterna

I Skogaberg installerades två olika toalettmodeller. I lägenheterna installerades en dubbelspolande modell med spolvattenvolymerna två respektive fyra liter. Villorna har också dubbelspolande toaletter, men där ställdes båda spolvolymerna in på sex liter. Anledningen till att ha så pass hög spolvattenvolym i villorna var att minska risken för stopp i svartvattenledningarna. Val av spolvattenvolym för toaletter i ett svartvattensystem med självfall är en avvägning mellan önskan att tillföra så lite spolvatten som möjligt för att möjliggöra en enklare uppkoncentrering av näringsämnena i svartvattnet och att ändå tillföra tillräckligt mycket vatten för att inte riskera att det blir stopp i ledningen.

5.2.3 Ledningssystemet

Ledningar

I Skogaberg finns tre separata avloppsledningssystem; (1) ett svartvattensystem som avleder avloppet från toaletterna och avfallskvarnarna, (2) ett system för bad-, disk- och tvättvatten (bdt-vatten) som avleder avloppet från diskho, diskmaskin, tvättmaskin och bad/dusch samt (3) ett system för dagvatten som avleds i separata dagvattenledningar. Området består av husgrupper som ligger på gårdsgator där ledningarna ägs av samfällighetsföreningar samt en grupp med flerfamiljs-hus där ledningarna ägs av en bostadsrättsförening. Ledningarna från gårdsgatorna och bostadsrätterna ansluter till ledningarna i kommunal mark i sju punkter.

För att minimera innehållet av koppar i svartvattnet valdes plast och rostfritt stål som material i vattenledningar och varmvattenberedare inne i byggnaderna. Eftersom lutningen i området är gynnsam valdes ett självfallssystem. Ett alternativ som hade gett mindre spolvattenmängder, och som diskuterades vid projektets start, var vakuumsystem men eftersom ingen erfarenhet fanns av detta i Göteborg valdes självfallssystem. Området sluttar relativt kraftigt från öster till väster varför lutningarna på de allmänna ledningarna varierar mellan 10 och 80 ‰. Inom tomtmark och i gårdsgatorna har samtliga ledningar en minsta lutning av 10 ‰. Den maximala lutningen på en enskild ledningssträcka inom gårdsgatorna uppgår till 217 ‰.

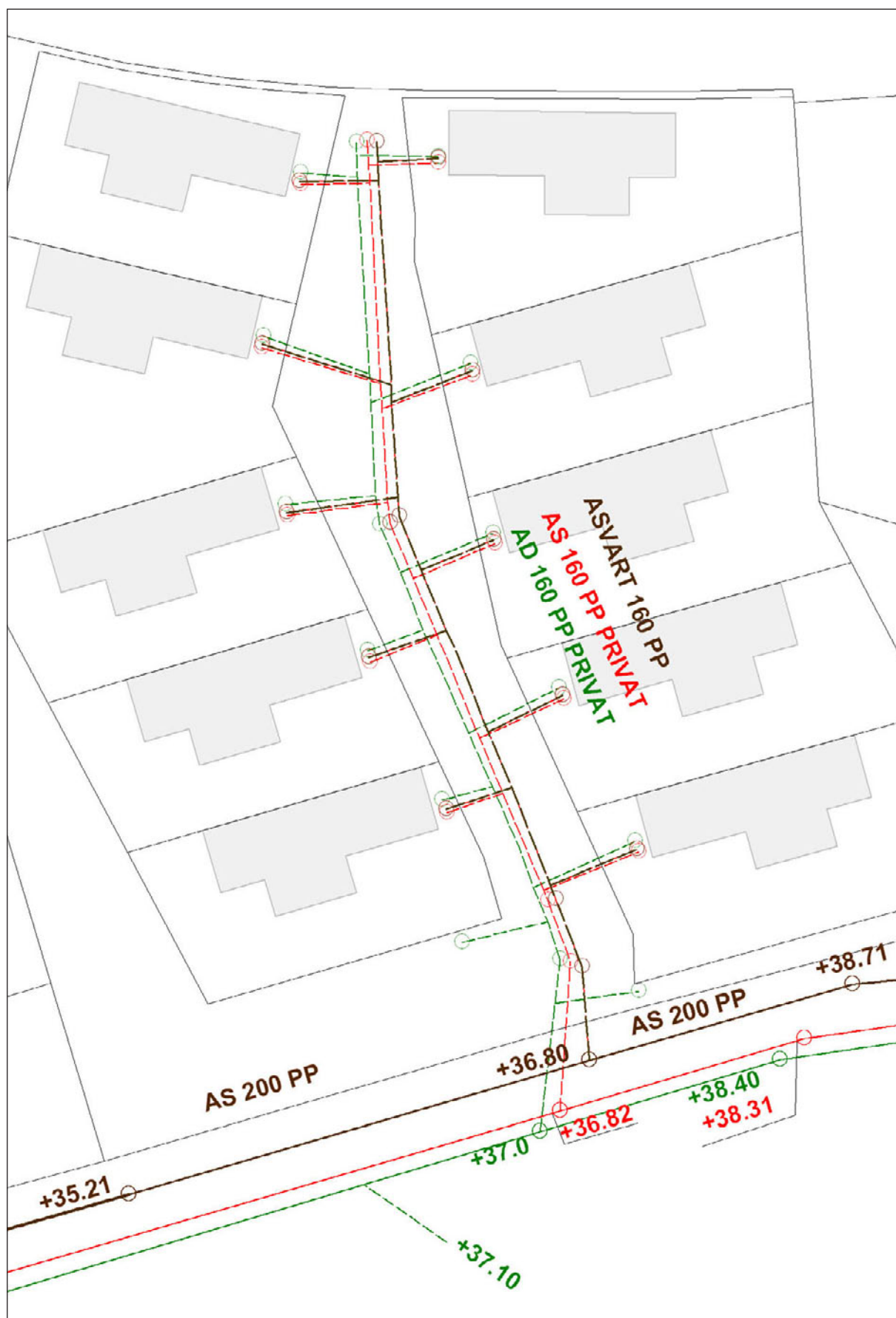
Som ledningsmaterial för svartvattensystemet både inom tomtmark och kommunal mark valdes PP (polypropen) dels för att motstå svavelväte och dels för att friktionen skall bli minsta möjliga. Ledningarna inom tomtmark har dimensionen 110 mm och ledningarna i gårdsgatorna dimensionen 160 mm. Anslutningen av ledningarna från de enskilda fastigheterna till ledningen i gårdsgatan har en mjuk böj för att underlätta flödet. Dimensionen på de kommunala svartvattenledningarna är 200 mm, vilket är den minsta dimensionen som bör användas för en allmän svartvattenledning. Svartvattenledningarna i kommunal mark har en längd av cirka 800 meter

I figur 5.3 visas svartvatten-, bdt-vatten och dagvattenledningarna i en husgrupp och hur dessa ansluter till ledningarna i kommunal mark.

Brunnar

Mot bakgrunden av att risk för stopp i svartvattenledningarna fanns, sattes ovanligt många spol- och nedstigningsbrunnar inom såväl tomtmark och gårdsmark som kommunal mark. Inom tomtmark utanför varje hus sattes en spolbrunn av dimensionen 200 mm. I gårdsgatorna sattes tillsynsbrunnar av dimensionen 400 mm längst upp på ledningen samt i krökar på ledningen. 1000 mm-brunnar sattes i anslutning till samfällighetsföreningarnas och bostadsrättsföreningens förbindelsepunkter (sammanlagt 7 st) för en eventuell framtida sammankoppling av svartvatten- och bdt-vattenledningarna samt för att underlätta vid spolning och tv-filmning. I kommunal gata sattes nedstigningsbrunnar av dimensionen 1000 mm i princip i varje krök på svartvattenledningen (sammanlagt 21 st). Dessutom finns fyra stycken provtagningsbrunnar. 400 och 1000 mm-brunnarna är av betong och är utformade så att en genomgående PP-ledning har ingjutits i brunnen, och sedan skurits upp i övre kvartscirkeln. Vid vinkeländring har en färdig böj av PVC med radie 800 mm gjutits in. Att böj av PVC använts beror på att denna är mer formstabil än PP. På vattenledningen längst upp i varje gårdsgata sattes en spolpost, i händelse av att det skulle bli nödvändigt att spola svartvattenledningarna regelbundet (sammanlagt 15 st).

Svartvattnet leds till systemets lägsta punkt där en skärande avloppspump lyfter det in i en tillfällig provtagningsstation.



Figur 5.3 Svartvatten-, bdt-vatten- och dagvattenledningarna i en husgrupp samt anslutning till ledningarna i kommunal mark i figurens nederkant. Svartvattenledningarna är svarta.

5.3 Erfarenheter av systemet

Inför projektet saknades praktiska erfarenheter av avfallskvarnar i Göteborg. Projektet gav tillfälle att utvärdera kvarnarnas tekniska funktion och hur brukarna använder och upplever dem. Detta har gjorts genom en enkätundersökning bland brukarna, uppföljning av driftproblem genom Egnahemsbolagets personal och genom plockanalyser av restavfallet från området. Även erfarenheterna av driften av lednings-systemet har dokumenterats.

5.3.1 Brukarnas erfarenheter av avfallskvarnarna

En enkätundersökning bland de boende i Skogaberg gjordes i början av december 2005 för att ta reda på brukarnas erfarenheter av svartvattensystemet och framförallt avfallskvarnarna. När undersökningen gjordes hade de boende varit inflyttade i området i mellan tre år och en månad. Nästan 90 % av hushållen hade varit inflyttade längre än sex månader. Samtliga hushåll fick enkäten i brevlådan med uppmaningen att fylla i den och returnera den i ett frankerat svarskuvert. Svarsfrekvensen på enkäten var 67 %, vilket motsvarar 85 av 127 hushåll.

Enkätsvaren visar att det finns en viss tveksamhet kring vad som ska malas ned i avfallskvarnen. På frågan om man någon gång känner tveksamhet om vad som ska malas ned i kvarnen svarade 25 % ja. Andelen som kände tveksamhet var större bland dem som bott i området en kortare tid, vilket är naturligt eftersom kvarnarna i viss mån är "självinstruerande" genom att användaren lär av sina eventuella misstag. Tveksamheterna gäller framförallt rädsla för att mala ned material som kan orsaka stopp eller skador, t.ex. fiskskinn, kycklingben och fruktkärnor. På frågan om det finns något biologiskt avfall som man faktiskt inte mal ner utan i stället slänger med soporna nämns benbitar, kycklingben, fett, senor, fiskskinn och kärnor. Motiveringarna är att dessa typer av avfall inte går att mala eller att det fastnar i kvarnen. Detta stämmer väl med vad som skrivs i driftinstruktionen som de boende fick vid inflyttningen. Många nämner också att det är svårt att mala bananskal och vissa även skal från citrusfrukter och lök. Ett fåtal nämner att för mycket potatisskal kan sätta igen vattenlåset.

61 % av hushållen anger att man har haft någon typ av driftproblem med avfallskvarnen. Framförallt handlar det om att material har fastnat i kvarnen eller att det blivit stopp i vattenlåset. I de flesta fall har de boende kunnat åtgärda problemen själva men vid ett antal tillfällen har Egnahemsbolagets personal hjälpt till. Problemen har kunnat åtgärdas genom att plocka upp det som fastnat med tång, använda sugpropp eller att plocka isär och rensa vattenlåset. Ett fåtal anger också att de har upplevt problem med kvarnens strömbrytarfunktion (gäller hushåll med kvarn från Disperator). Baserat på resultaten från enkätsvaren går det inte säkert att säga att någon av kvarnmodellerna ger fler driftproblem än den andra.

Egnahemsbolaget har sedan första inflyttningen i området startade hjälpt till om hushållen har haft problem med kvarnarna eller om det blivit stopp i avloppsledningarna. Ett vanligt problem är att de boende mal ned en för stor mängd avfall utan att spola tillräckligt med vatten. Det leder antingen till att kvarnen kör fast och stannar eller att det blir stopp i ledningen under diskhon. Ett annat vanligt fel, som inte uppmärksammades i enkätundersökningen men som blev vanligare efter att enkätundersökningen gjordes, är att en dosa med en strömbrytare som sticker ut från kvarnen från Disperator lätt går av vid slag så att man tvingas dra ur sladden för att stoppa kvarnen. Detta hade till och med november 2006 hänt på ca 14 kvarnar. De trasiga strömbrytarna har nu ersatts av en kraftigare modell som Disperator har tagit fram. Till och med november 2006 hade man inte behövt byta ut några avfallskvarnar i lägenheterna eller villorna (Sporrong, personlig kommunikation 2006). Egnahemsbolagets registrering av problemen med kvarnar och stopp i ledningar har sammanställts (Göteborgs Stad, Kretsloppskontoret, H2OLAND, 2007).

På frågan vad man tycker att den största fördelen med kvarnen är svarar de flesta att det är bekvämt. 84 % har angett detta som största fördel. Många anser också att det är miljövänligt och hygieniskt. Ett fåtal påpekar att användande av avfallskvarn leder till en minskad mängd sopor. När det gäller vad man upplever som den största nackdelen med kvarnen anger 50 % av brukarna att det är buller. Ett antal andra nackdelar nämns av en mindre andel, däribland lukt och problem med stopp. Noterbart är att 9 % spontant uppger att det inte finns några nackdelar.

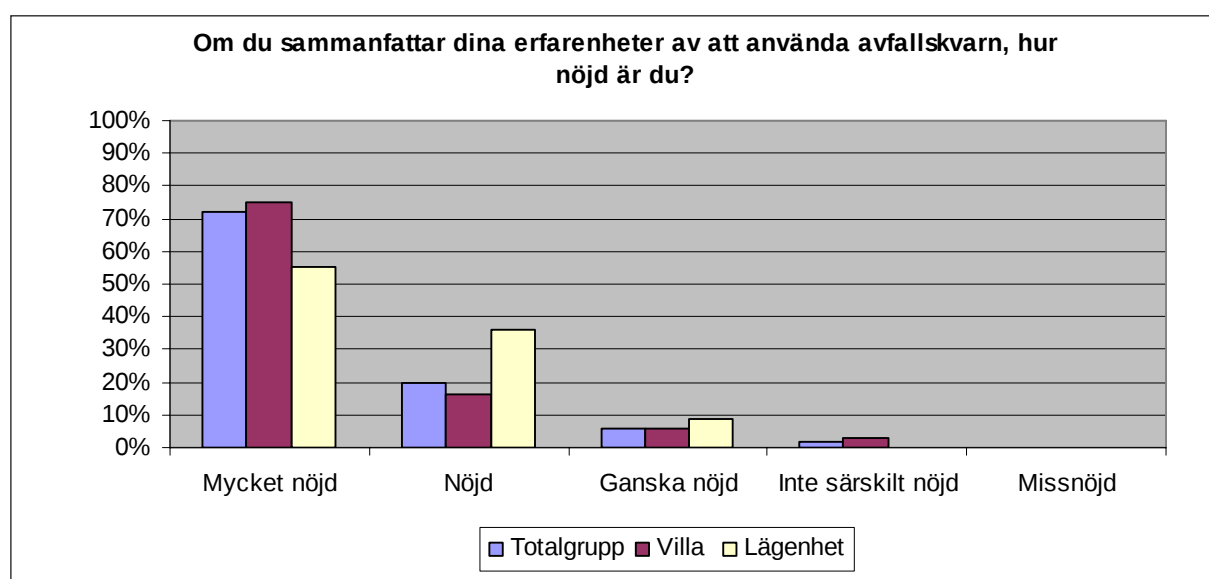
Trots att en relativt stor andel har uppgett att de har upplevt olika typer av driftproblem är brukarna

överlag nöjda med avfallskvarnarna. På frågan "Om du sammanfattar dina erfarenheter av att använda avfallskvarn, hur nöjd är du då?" svarar 92 % att de är nöjda eller mycket nöjda. Endast 2 % anger att man inte är särskilt nöjd och ingen svarar att man är missnöjd. De boende i villorna är något mer nöjda än de boende i lägenheterna. Vad denna skillnad beror på är svårt att säga men eventuellt kan det bero på att man har olika kvarnmodeller. Resultaten visas i figur 5.4.

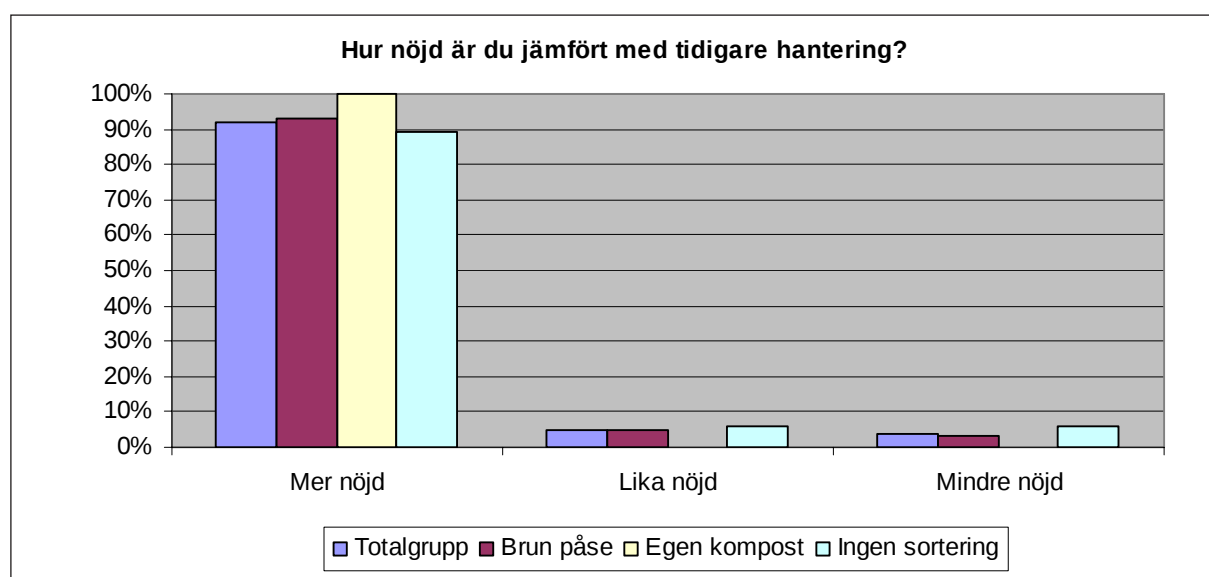
Bland de boende hade 47 % innan de flyttade in i området sorterat matavfall i brun papperspåse, 11 % hade sorterat ut matavfall till egen kompost och 42 % hade tidigare inte sorterat ut matavfall alls. I enkäten

ställdes frågan om man generellt är mer eller mindre nöjd med att sortera matavfall genom avfallskvarn jämfört med hur man gjorde där man bodde tidigare. Resultaten visas i figur 5.5. Totalt svarade 92 % att man var mer nöjd än tidigare. Skillnaderna mellan grupperna var små.

De boende frågades också om de skulle vilja ha en avfallskvarn om de skulle flytta från Skogaberg. Hela 96 % svarade ja. Förutsättningar om investeringskostnad och taxesättning var inte redovisade i samband med frågan, vilket eventuellt hade kunnat dra ner intresset, men det är ändå tydligt att de boende är positivt inställda till att använda avfallskvarn vid en eventuell flytt.



Figur 5.4 Enkät svar på frågan hur nöjda brukarna är med avfallskvarnarna, uppdelat på boendeform.



Figur 5.5 Enkät svar på frågan hur nöjd man är med att sortera matavfall genom avfallskvarn jämfört med hur man sorterade innan flytten till Skogaberg.

På frågan om det faktum att man har ett svartvatten-system gör att man tänker mer på vad som inte får spolas ner i toaletten jämfört med där man bodde tidigare, svarade 66 % ja. 34 % svarade att man tänker lika mycket på det. De som bott i området mindre än fyra månader svarade i högre utsträckning att man tänkte mer på det än övriga. Den här typen av fråga är ledande och ger inte svar på brukarnas faktiska beteende, men kan ändå ge en indikation på hur man tänker. Erfarenheter från provtagningsstationen visar dock att våtstarka servetter, bindor och bomulls-pinnar regelbundet spolas ner i toaletten, vilket ger problem med avloppspumpen. Att personer som nyligen flyttat in uppger sig tänka mer på vad som spolas ner är inte förvånande eftersom dessa mer nyligen har tagit del av informationsmaterialet om kvarnen och svartvattensystemet.

De boende frågades också om man upplever avloppssystemet i Skogaberg inklusive avfallskvarnarna som mer eller mindre miljövänligt. 94 % svarade att man upplever det som mer miljövänligt. De vanligaste motiveringarna var att det är positivt att närings-ämnena ska bli gödning och att det blir mindre sopor att transportera men bland svaren fanns också många frågor kring om och när en gödselprodukt från svartvattnet skulle komma att användas i jordbruket.

5.3.2 Utsortering av biologiskt avfall

För att ge en bild av hur väl avfallskvarnar fungerar för utsortering av matavfall har plockanalyser av restavfallet från bostadsområdet genomförts. Med restavfall avses det avfall som hushållen slänger i soppåsen efter källsortering. Plockanalyserna har genomförts

enligt metoden i Vikecevic m.fl. (2001) med undantaget att kategorin övrigt papper inkluderas i övrigt brännbart. Metoden innebär att ett stickprov på ca 400 kg tas ut från ett större samlingsprov från en boendeform. Materialet sorteras i 20 olika kategorier som sedan vägs separat. En procentuell sammansättning beräknas sedan för det sorterade materialet.

Plockanalyser av restavfallet från Skogaberg har gjorts vid fyra tillfällen; i oktober 2005, december 2005, maj 2006 och oktober 2006. Fördelningen mellan producentansvarsmaterial (förpackningar och tidningar), matavfall, resterande avfall och farligt avfall i plockanalyserna redovisas i tabell 5.1.

De insamlade mängderna från Skogaberg och underlag om antal boende i området visade att det genererades ca 148 kg restavfall per person och år. I genomsnitt var innehållet av matavfall i restavfallet vid de fyra plockanalyserna 18 %, vilket innebär att 27 kg matavfall slängs i restavfallet per person och år. En person i ett genomsnittligt hushåll genererar ca 93,6 kg matavfall per år (Vikecevic m.fl., 2001). Om detta antas gälla även i Skogaberg, innebär resultaten från plockanalyserna att ca 29 % av det genererade matavfallet slängs i restavfallet, medan ca 71 % mals ned i avfallskvarnarna, vilket motsvarar ca 67 kg per person och år. Dessa utsorteringsgrader stämmer ungefärligen överens med vad som antagits av Karlberg och Norin (1999); 33 % slängs med restavfallet och 67 % mals i kvarnen. Karlberg och Norin gör antaganden om att 20 % av matavfallet består av avfallsslag som inte kan malas, t.ex. fiskskinn, större ben och långfibriga fruktskal. Sett mot denna bakgrund uppnås en bra sortering av matavfall i Skogaberg.

Det är av intresse att jämföra utsorteringsresultaten från Skogaberg med källsorteringssystem där man sorterar ut matavfall till egen kompost eller till central



Figur 5.6 Plockanalys av restavfall.

Tabell 5.1 Resultat från plockanalyser. Fördelning mellan producentansvarsmaterial, matavfall, resterande avfall och farligt avfall i restavfallet.

	Producentansvarsmaterial Viktandel	Matavfall Viktandel	Resterande avfall Viktandel	Farligt avfall Viktandel
Oktober 2005	31,7 %	14,8 %	53,5 %	0,1 %
December 2005	24,3 %	23,0 %	52,5 %	0,2 %
Maj 2006	29,7 %	16,2 %	54,1 %	0,0 %
Oktober 2006	26,5 %	18,6 %	54,7 %	0,2 %
Medel	28,1 %	18,2 %	53,7 %	0,1 %

behandling i brun papperspåse, två system som idag uppmuntras i Göteborg. Tyvärr finns få publicerade resultat från plockanalyser av restavfall där samtliga hushåll i ett bostadsområde har antingen hemkompostering eller insamling till central behandling. Från Helsingborg finns opublicerade resultat från plockanalyser gjorda 2005 i ett område med 105 villor som samtliga sorterar matavfall i bruna påsar på liknande sätt som i Göteborg. Plockanalyserna gjordes ca sex månader efter införandet av hushållsnära sortering i nio fraktioner. Resultatet var att ca 17 % av matavfallet slängdes med restavfallet medan ca 83 % sorterades rätt (Vikicevic, personlig kommunikation 2006). Dessa goda sorteringsresultat ska ses mot bakgrunden av att omfattande informationsinsatser föregick införandet av det nya sorteringsystemet och att den hushållsnära sorteringen av nio fraktioner troligen motiverar brukarna till noggrann sortering. I ett villaområde med 53 villor med sortering av matavfall i Stockholm genomfördes plockanalyser av restavfallet ca sex månader efter införandet av systemet med utsortering av matavfall. Resultaten visade att andelen matavfall i restavfallet var 15 %. Även där föregicks införandet av sorteringsystemet av omfattande informationsinsatser (Renhållningsförvaltningen Stockholms Stad, 2005). De plockanalyser som gjorts regelbundet i bostadsområden i Göteborg 2004–2006, där andelen hushåll som sorterar ut matavfall varierar, visar att andelen matavfall i restavfallet i medel ligger på ca 35 %.

5.3.3 Driftserfarenheter av ledningssystemet

Inom området har byggnationen färdigställts etappvis. I samband med färdigställandet av varje ny etapp startade Göteborg Vatten en tvåårig tillsyn av

ledningarna i gårdsgatorna. Tillsynen startade i april 2004 i den först färdigställda etappen och kommer att fortgå till och med september 2007 för den sist färdigställda etappen. Under första månaden skedde tillsyn med två veckors intervall för att sedan glesas ut till en gång i månaden. Göteborg Vatten utför även tillsyn i de kommunala ledningarna med samma intervall. Normalt sker ingen tillsyn av nylagda ledningar utan man gör en garantibesiktning två år efter idrifttagande.

Vid Göteborg Vattens månatliga tillsyn av ledningssystemet har driftpersonalen rapporterat att systemet fungerat bra vid i stort sett samtliga tillsynstillfällen och inga åtgärder har behövt göras. I början var det en del makadam och grusmaterial från byggtiden som fick spolas ur och när pumpen till den tillfälliga provtagningsstationen togs i drift kom en del makadam och grusmaterial in i pumpen, vilket föranledde spolning av ledningssystemet.

Till och med november 2006 hade 14 stycken stopp i svartvattenledningen mellan hus (villa) och gårdsgata registrerats. Dessa stopp upptäcktes inte via tillsynen utan av villaägarna. Stoppen hade förekommit vid sex olika hus och av dessa stod två av husen för fyra respektive sex stopp. Samtliga hus med problem med stopp ansluter längst upp eller näst längst upp på svartvattenledningen i en gårdsgata. Ett stopp hade registrerats i ledningen i en gårdsgata mellan de hus som låg längst upp och näst längst upp på en gårdsgata. Samtliga stopp åtgärdades genom högtrycksspolning. Spolposterna längst upp på varje gårdsgata har inte behövt användas. Vid det hus som haft sex stopp lades ledningen om och därefter har inga problem uppstått, vilket tyder på att det varit bakfall eller dålig lutning på ledningen. Vad övriga stopp berott på har inte gått att fastställa. En tänkbar orsak är att spolvattnet från toalett och avfallskvarn från hushållen inte räckt till för att transportera de fasta partiklarna.

Andra orsaker kan vara att makadam och grusmaterial från byggtiden funnits kvar i ledningen och startat uppbyggnaden av ett stopp eller att fallet på ledningarna varit för litet. Göteborg Vatten har gjort iakttagelser om att gjutrester, makadam och grusmaterial har förekommit i svartvattenledningarna. Eftersom samtliga stopp har förekommit vid de hus som ansluter längst upp eller näst längst upp på en gårdsgata har det diskuterats om spolvattenvolymer på toaletterna

i dessa hus skulle höjas till åtta liter. Ännu har dock inga åtgärder gjorts. Inga problem med stopp har registrerats i ledningarna från de tre fastigheterna med lägenheter. Inga stopp har heller registrerats i svartvattenledningar på kommunmark. Ett kraftigt inläckage i en svartvattenledning har upptäckts och tätats. Figurerna 5.7 och 5.8 visar bilder från ledningssystemet från november 2006.



Figur 5.7 Bild på svartvattenledning med avlagring på rörväggen i höjd med vattengång.



Figur 5.8 Bild på svartvattenledning i gårdsgata (160 mm) med inkommande servis från hus (110 mm). På bilden ser man den ingjutna ledningen i gårdsgatan som är uppskuren i övre kvartscirkeln.

5.4 Kostnader

Byggkostnader

Total byggkostnad för svartvattensystemet för de 133 bostäderna, exklusive behandlingsanläggning, blev ca 5 miljoner kr (**37 000 kr/bostad**). Därav var **23 000 kr/bostad** kostnader inom tomt- & kvartersmark och **14 000 kr/bostad** kostnader för det allmänna svartvattensystemet. Kostnadsposter som kan vara av särskilt intresse tas upp nedan.

Projektering

Merkostnaden för svartvatten vid projekteringen bedöms vara ca 200 kkr (1500 kr/bostad).

Undvikande av koppar i dricksvatteninstallationerna

I stället för kopparledningar har plast ("rör i rör"-system) och rostfritt stål använts. Även varmvattenberedarna har varit av rostfritt stål. Merkostnaden för att undvika koppar, inklusive varmvattenberedare i rostfritt, har varit ca 800 kr/bostad.

Avfallskvarnar

Avfallskvarnarna är av två modeller och har i genomsnitt kostat 4500 kr/st, inklusive elektrisk arbete.

Svartvattenledningar i hus

Svartvattenledningar inom husen, inklusive arbete har kostat ca 2000 kr/bostad.

Svartvattenledningar i tomt/kvartersmark/allmän plats

Svartvattenledningar inklusive schakt inom tomtmark, 110 mm PP, har kostat 600 kr/m.

Svartvattenledningar inklusive schakt i kvartersmark, 160 mm PP, har kostat 500 kr/m.

Allmänna svartvattenledningar inklusive schakt, 200 mm PP, har gett en merkostnad på 450 kr/m vid samförläggning med andra ledningar respektive 900 kr/m vid egen schakt.

Därutöver har tillkommit kostnader för sprängning, isolering m.m. För att minska risken för stopp har rörböjar med större radie än normalt använts vid grenrör och tillsynsbrunnar. De kostade 260 kr/st.

Nedstigningsbrunnar.

Varje kvartersledning har avslutats med en nedstigningsbrunn med överkopplingsmöjlighet. Grundkostnad 12 200 kr/st. I systemet har även byggts fyra provtagningsbrunnar för 26 000 kr/st. I botten på varje nedstigningsbrunn har särskilt framtagna plast-rörböjar med stor radie gjutits in till en kostnad av ytterligare 2900 kr /brunn. Kostnaden för dessa särskilda brunnar/böjar motsvarar 2400 kr/bostad.

Spolposter

En spolpost har satts på vattenledningen längst in på varje gårdsgata, i händelse av att det skulle bli nödvändigt att spola svartvattenledningarna. Kostnad 10 000 kr/st (motsv. 1 500 kr/bostad). De har inte behövts. De få spolningar av ledningarna som gjorts sker med spolbil.

6 Svartvattnets tillrinning och sammansättning

Skogabergs svartvattens sammansättning och tillrinning har studerats vid olika tillfällen samt beskrivits i olika rapporter (de Blois, 2004b, 2006a, 2006b). I detta kapitel sammanställs de viktigaste resultaten.

6.1 Tillrinning

Det specifika flödet i Skogaberg uppgår till 50–60 l svartvatten/p.d. Vid ca 366 personer anslutna blir dygnsflödet därmed ca 20 m³/d, vilket överensstämmer bra med det framräknade förväntade dygnsflödet för Skogabergsområdet.

Flödesvariationen över dygnet är redovisat i figur 6.1.

Som förväntat beter människorna sig på samma sätt från dag till dag, vecka till vecka. På natten, då alla sover, är aktiviteten ringa och flödet är för det mesta ca 200 l/h, vilket motsvarar drygt 30 toalettspolningar à 6 l per spolning. I samband med vaknandet ökar flödet kraftigt vid sextiden och når sin topp strax efter klockan sju: flödet ligger då mellan 1500 och 2000 l/h,

vilket motsvarar omkring 300 toalettspolningar och det innebär att huvuddelen av invånarna (> 80 %) har gått på toaletten vid det läget.

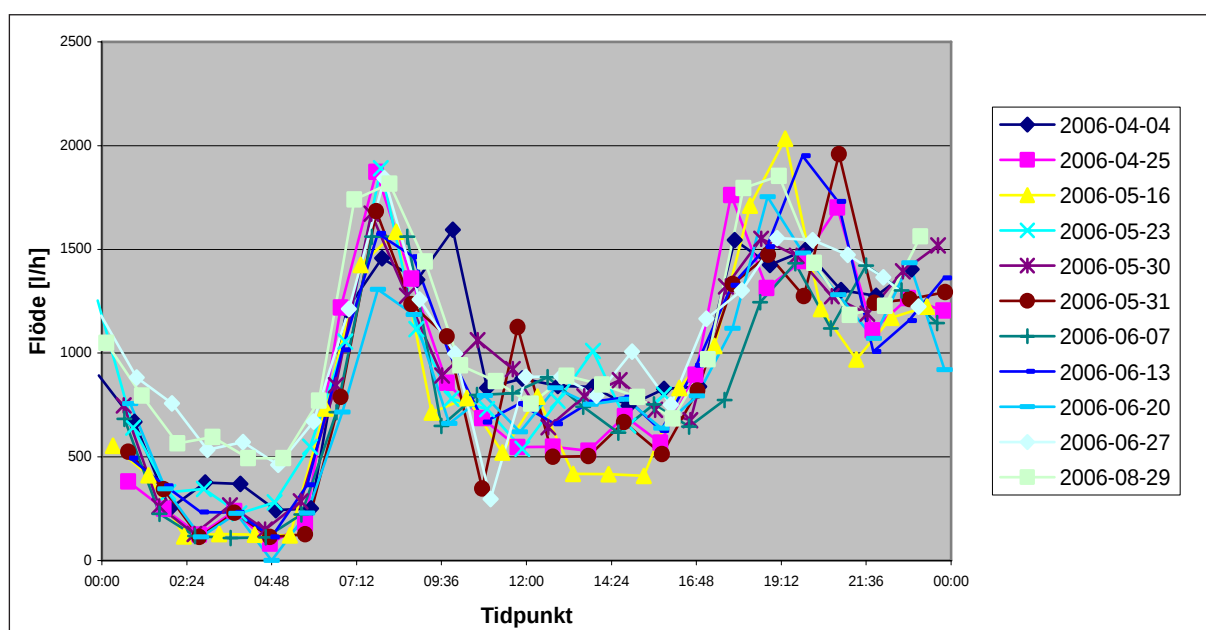
Efter morgontoppen sjunker flödet snabbt igen (många åker till jobbet) och mellan kl 10.00 och 17.00 ligger flödet för det mesta mellan 500 och 1000 l/h för att sedan snabbt öka igen till 1300–2000 l/h i samband med hemkomst och matlagning. Senare på kvällen, från ca kl 20.00 sjunker flödet till 1000–1500 l/h för att sedan ligga där fram till ca 24.00 då det har blivit sängdags för de flesta.

6.2 Sammansättning

Mängderna i silat avloppsvatten och rens redovisas för dygnet 2006-01-24 samt 2006-01-25 då för dessa dygn pålitliga flödesmätningar föreligger (dygnsflödet uppgick till ca 17 m³ för båda provtagningsdagarna) och hela Skogabergsområdet var anslutet vid det läget.

Specifika mängder

Skogabergs svartvattnets sammansättning motsvarar i stort sett den sammansättning som kan förväntas och framräknas med hjälp av litteraturuppgifter. Generellt är de specifika mängderna i Skogaberg 50–80 % av de i litteraturen uppgivna mängderna (se tabell 6.1a–6.1d). Dessa lägre värden beror rimligtvis på att en stor del



Figur 6.1 Variation av svartvattenflödet över dygnet för olika dagar (alla vardagar, mest tisdagar).

av invånarna i Skogaberg är borta från hemmet i samband med arbetet och skola.

Det finns undantag:

- Den specifika kvävemängden i Skogabergs svartvatten har, till och från, varit relativt stor, vilket beror på höga koncentrationer av organiskt bundet kväve (delvis löst, delvis partikulärt). Orsaken till detta är inte helt tydlig. Även den organiska svavelmängden har varit relativt stor (Proteiner innehåller såväl kväve som svavel).
- Järnmängden i Skogabergs svartvatten är mycket lägre än den i litteraturen uppgivna mängden, vilket är svårförklarligt.
- Tungmetallmängderna i Skogabergs svartvatten är relativt ringa med undantag för koppar-, krom och nickelmängden som är något högre i Skogabergs svartvatten än referensvärdena (Kopparmängden

borde vara ringa då inga kopparledningar i fastigheterna har installerats). Samtliga tungmetallmängder i Skogabergs svartvatten är avsevärt mindre än de tungmetallmängder som finns i blandat avloppsvatten (blandat grå- och svartvatten). Det gäller i synnerhet för kvoten mellan tungmetallmängd och fosformängd, se även kapitel 12 och M. de Blois (2006), vilket är i överstämmelse med andra litteraturuppgifter (Palmquist, 2004; Jönsson m.fl., 2005).

De specifika mängderna i svartvattnet i tabellerna nedan är fördelade i en mängd som kan tas bort med en 0,6 mm (trum)sil (slammet/grovmaterial som kan tas bort kallas rens) och en del som passerar en sådan sil (silat svartvatten). Uppdelningen ger en bra indikation på innehållet av den grova fraktionen i svartvattnet.

Tabell 6.1a Specifika mängder TS, VS, SS, VSS, COD, BOD & TOC i Skogabergs svartvatten (medelvärde dygn 1 & 2) samt referensvärden i (g/p,d, flöde i l/p,d, - = ingen uppgift).

	Skogaberg			Referensvärden				
	silat sv	rens	totalt	urin	fekalier + toalettpapper	mat	dricksv	totalt
Flöde ^{1;2}	ca 50	ca 2	ca 50	1,5 ²	0,11 ²	0,22 ¹	varierar	-
TS ²	48	23	72	20	53	68,2	ca 0	141,2
VS ²	29	22	52	7,4	46	58	ca 0	111,4
SS ¹	29	23	52	0	22	55	ca 0	77
VSS ¹	27	22	49	-	-	-	ca 0	-
COD ^{1;2}	72	33	105	8,5 ²	64 ²	71 ¹	ca 0	143,5
BOD ²	31	-	-	5	34	-	ca 0	-
TOC ²	18	13	31	-	-	30	ca 0	-

¹ Edström m.fl., 2001.

² Jönsson m.fl., 2005.

Tabell 6.1b Specifika mängder av N, P, K & S i Skogabergs svartvatten (medelvärde dygn 1 & 2) samt referensvärden i (g/p,d).

	Skogaberg			Referensvärden				
	silat sv	rens	totalt	urin	fekalier + toalettpapper	mat	dricksv	totalt
N ²	14,1	0,8	14,9	11	1,5	1,6	ca 0	14,1
P ²	1,0	0,1	1,1	0,9	0,5	0,27	ca 0	1,67
K ²	2,3	0,1	2,4	2,4	1,0	0,6	0,1	4,1
S ²	1,2	0,1	1,3	0,7	0,17	0,15	0,5	1,07

¹ Edström m.fl., 2001.

² Jönsson m.fl., 2005.

Tabell 6.1c Specifika mängder av Ca, Mg, Cl, Fe & Al i Skogabergs svartvatten (medelvärden dygn 1 & 2) samt referensvärden i (g/p,d).

	Skogaberg			Referensvärden				
	silat sv	rens	totalt	urin	fekalier + toalettpapper	mat	dricksv	totalt
Ca ¹	1,51	0,35	1,86	0,2	0,8	1,3	1,0	3,3
Mg ¹	0,29	0,03	0,32	0,02	0,45	0,07	0,08	0,61
Na ¹	3,5	0,1	3,6	4,1	-	-	0,8	-
Cl ¹	4,7	0,1	4,8	6,7	-	-	0,4	-
Fe ¹	0,02	0,01	0,03	0,00	0,04	0,15	ca 0	0,19
Al ¹	0,04	0,01	0,05	-	-	-	-	-

¹ Edström m.fl., 2001.

² Jönsson m.fl., 2005.

Tabell 6.1d Specifika mängder av Pb, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Ni, Ag & Zn i Skogabergs svartvatten samt referensvärden i (µg/p,d).

	Skogaberg			Referensvärden			
	silat ^{*)}	Rens ^{**)}	totalt	urin	fekalier + toalettpapper	mat	totalt
Pb ²	78,8	<68	<150	12	40	260	312
Cd ²	7,9	<6,8	<14,7	0,5	10	9,5	20
Co ¹	23	<17	<40	6,7	27	53	86,7
Cu ²	2110	690	2800	100	1100	1090	2290
Cr ²	556	109	665	10	130	510	650
Hg ²	<11,6	1,6	<13	0,82	9	1,4	11,22
Ni ²	534	77	610	11	190	260	461
Ag	211	<35	<250	-	-	-	-
Zn ²	8600	3150	11750	300	10700	3070	14070

*) medelvärden dygn 1 & 2.

**) värden från dygnsprovtagning 2006-09-12.

¹ Edström m.fl., 2001.

² Jönsson m.fl., 2005.

Dygnsmängder i silat avloppsvatten och rens

TS, VS, SS, VSS, COD, TOC

Mängderna TS, VS, SS, VSS, COD, och TOC i silat avloppsvatten och rens är redovisade i tabell 6.2a. En betydlig del av de organiska och suspenderade ämnena, ca 40 %, återfinns i rensset/grovmaterialiet som fångas av trumsilen. Detta är en stor del om man betänker att volymen av rensset endast utgör ca 3 % av den totala svartvattenvolymen.

Tabell 6.2a Mängd av TS, VS, SS, VSS, COD, TOC i svartvatten och andel i rens.

	Dygn 1		Dygn 2	
	totalt kg/d	% i rens	totalt kg/d	% i rens
TS	29	35 %	24	30 %
VS	21	45 %	17	41 %
SS*	22	45 %	16	44 %
VSS**	21	45 %	15	46 %
COD***	45	32 %	32	32 %
TOC	13	42 %	9,6	39 %

* SS silat svartvatten + TS rens.

** VSS silat svartvatten + VS rens.

*** COD silat svartvatten + 1,5 x VS rens.

Näringsämnen

Mängden av de olika näringsämnena i svartvatten och andelen i rens är redovisad i tabell 2b. Renset innehåller bara en bråkdel av näringsämnena och är därmed på så vis mindre intressant som gödselämne än silat svartvatten.

Tabell 6.2b Mängd av näringsämnen i svartvatten och andel i rens.

	Dygn 1		Dygn 2	
	totalt kg/d	% i rens	totalt kg/d	% i rens
N	5,8	5,9 %	5,1	4,4 %
P	0,43	8,8 %	0,36	6,9 %
K	0,90	4,3 %	0,83	3,1 %
S	0,47	5,4 %	0,45	3,4 %

Salter

Saltmängden i svartvatten och andelen i rens är redovisad i tabell 6.2c. Påfallande är att kalcium- och magnesiumandelen i rensen är stor (ca 20 resp. 10 %). Antingen är kalcium och magnesium bundna till partiklar eller det sker utfällning av övermättade kalcium- och magnesiumsalter. Även en stor del av järn- och aluminiummängden i rensen är stor, vilket var väntat. Järn och aluminium faller ju till största del ut som fosfater och hydroxider.

Tabell 6.2c Mängd av diverse salter i svartvatten och andel i rens.

	Dygn 1		Dygn 2	
	totalt kg/d	% i rens	totalt kg/d	% i rens
Ca	0,75	22 %	0,62	16 %
Mg	0,13	12 %	0,11	8,4 %
Na	1,4	3,4 %	1,3	2,0 %
Cl	1,9	2,1 %	1,6	1,5 %
Fe	0,012	42 %	0,009	44 %
Al	0,014	37 %	0,024	15 %

Tungmetaller

Tungmetallmängden i svartvatten och andelen i rens är redovisad i tabell 6.2d. Den största tungmetallmängden finns i det silade svartvattnet, men det finns, trots allt, relativt mycket tungmetaller i rensen vilket var väntat då de flesta tungmetaller är starkt bundna till partiklar.

Tabell 6.2d Mängd av diverse tungmetaller i svartvatten och andel i rens.

	silat*) mg/d	rens**) mg/d	totalt mg/d	% i rens
Pb	29	< 25	< 54	< 46
Cd	2,9	< 2,5	< 5,4	< 46
Co	8,4	< 6,2	< 15	< 41
Cu	770	250	1020	25
Cr	200	40	240	17
Hg	< 4,2	0,6	< 4,8	> 13
Ni	200	28	230	12
Ag	77	< 12	< 89	< 13
Zn	3 100	1 200	4 300	28

*) medelvärden dygn 1 & 2.

**) värden från dygnsprovtagning 2006-09-12.

Halter i silat svartvatten av suspenderade och organiska ämnen samt näringsämnena

I tabell 6.4 är de uppmätta halterna av suspenderade, organiska ämnen och näringsämnena i svartvatten redovisade.

TS, VS, SS, VSS

TS i svartvatten bestäms av suspenderade ämnen, men även av de lösta salterna (vissa salter såsom ammoniumvätekarbonat avgår dock vid bestämning av TS). Salthalten (minus ammoniumvätekarbonat) är ca 300 mg/l för de två sista provtagningsdygnen vilket förklarar största delen av skillnaden mellan TS och SS.

VS och VSS borde ge samma resultat och så är det också för provet 2006-01-23. Glödningsförlusten för SS (VSS/SS) är ca 90 % vilket innebär att största delen av de suspenderade ämnena består av organiska ämnen.

Märkligt är att den partikulära TOC-halten bara uppgår till ca 100 mg/l vilket skulle innebära att endast en liten del (ca 20 %) av VSS är organiskt kol. Detta är inte möjligt, se även nedan.

BOD, COD, TOC

Efter silning är de uppmätta halterna ca 3–4 ggr högre än i vanligt avloppsvatten (bortsett från provtagningsdygn 2004-04-19, där förmodligen själva provtagningsförfarandet gjorde att halter av suspenderade och organiska ämnen blev låga). En stor del, 50–70 %, av BOD och COD kan tas bort med hjälp av filtrering och är alltså partikelbunden. Av TOC däremot kan bara ca 30 % filtreras bort. Detta är motsägelsefullt.

Med tabellen ovan kan man beräkna att de partikelbundna organiska ämnena har en mycket hög COD:TOC kvot, mellan 5 och 10 mg/mg (eller 4 mol O₂ per mol C) medan de lösta organiska ämnena har en mycket lägre COD:TOC kvot, ungefär 2 mg/mg (eller 0,8 mol O₂ per mol C).

Den höga kvoten COD:TOC för partiklar är teoretiskt inte möjlig (den högst möjliga kvoten, för metan, är 2 mol/mol). I litteraturen har problem rapporterats i samband med TOC-analyser på avloppsvatten med höga halter av suspenderade ämnen där de suspenderade ämnena inte oxiderats fullständigt. Detta bör avstämmas med anlitat laboratorium (Alcontrol).

Bättre/pålitligare är att utgå från kvoten partikulär COD:VSS. Denna kvot är 1,5–1,6 mg/mg och ett normalt värde.

Den låga COD:TOC kvoten efter filtrering (lösta organiska ämnen) är jämförbar med kvoten för utgående avloppsvatten från ett kommunalt reningsverk (ca 1 mol/mol; 2,5 mg/mg) och tyder på en relativt hög oxideringsgrad av de lösta organiska ämnena (t.ex. för ättiksyra är kvoten 1 mol/mol, fenol ger 1,2 mol/mol). Generellt gäller: Ju fler inbyggda syreatomer och dubbla bindningar desto lägre blir kvoten.

Kväve

För proven 2006-01-23 och 2006-01-24 är kvävehalten i silat avloppsvatten förvånansvärt hög, ca 300 mg/l, och ungefär 10 ggr så hög än i kommunalt avloppsvatten. Fram till hösten 2005 uppgick totalkvävehalten i silat avloppsvatten till ungefär 100–200 mg/l. Därefter ökade kvävehalten plötsligt kraftigt. Det är det organiskt bundna kvävet som har ökat, ammoniumhalten, NH₄⁺ har hela tiden legat runt 100–150 mg N/l.

För 2006-01-23 och 2006-01-24 är andelen ammonium i totalkvävet ca 40 % och efter filtrering ca 60 %. Resten, en stor del av kvävet är tydligen organiskt bundet (nitrat/nitritalternativ är försumbara).

Kvävet som kan tas bort med hjälp av filtrering, organiskt partikulärt bundet kväve, är ca 30 % av totalkvävet. Detta borde vara kväve från matrester och fekalier. Skillnaden mellan filtrerat, löst kväve- och ammoniumkvävehalt är förmodligen urinens urea, CO(NH₂)₂ som inte ammonifierats (också ca 30 % av totalkvävet).

Alltså (se tabell 6.3).

Halten av löst organiskt kväve är rätt hög och mycket högre än de halter som uppmättes fram till sommaren 2005 då den lösta kvävehalten huvudsakligen bestod av ammonium (till ungefär 80 %). En förklaring för detta kan vara svartvattnets låga temperatur vid vinterprovtagningen (8–9 °C) där ammonifikationen av urea sker långsamt.

Fosfor

Fosforhalten är som BOD-halten ca 4 ggr så hög som i kommunalt avloppsvatten. Största delen av fosfor i svartvatten, ca 80 %, är fosfat (främst vätefosfat: HPO₄²⁻, från urinen). Vid filtrering genom 1 µm filter kan 20–30 % av fosfor avlägsnas: detta är dels utfälld övermättad kalciumfosfat och dels organiskt bundet fosfor (från matavfall och fekalier).

Kalium

Kaliumhalten i svartvattnet är 50–60 mg/l. Kalium föreligger löst i svartvattnet (som K⁺) och kommer främst från urinen.

Svavel

Totalsvavelhalten är ca 25 mg/l för 2006-01-23 och 2006-01-24. Lite förvånande är att endast ca 10 mg/l därav är sulfatsvavel (observera att det har visat sig att Alcontrol har problem med sulfatanalyserna och att sulfathalterna var betydligt högre 2004-04-19 och 2005-03-29). Resten, ca 15 mg/l, borde vara lösta svavelinnehållande proteiner från matrester och fekalier.

Tabell 6.3 Kväve i Skogabergs svartvatten under två provtagningsdygn (2006-01-23 och 2006-01-24).

Kväveform	Ursprung	koncentration	andel
organiskt partikulärt bundet kväve	matrester, fekalier (proteiner)	70–100 mg/l	ca 30 %
urea (eller annat löst organiskt kväve)	urin (eller proteiner)	90 mg/l	ca 30 %
ammonium	urin	130 mg/l	ca 40 %
Totalt		ca 300 mg/l	100 %

Tabell 6.4 Suspenderade, organiska ämnen och näringsämnen i svartvatten från Skogaberg, silade och filtrerade prov, samt beräknade reduktioner.

Parameter	enhet	2004-04-19			2005-03-29			2006-01-23--24			2006-01-24--25		
		silat	filtrerat	red. filtr.	silat	filtrerat	red. filtr.	silat	filtrerat	red. filtr.	silat	filtrerat	red. filtr.
		(0,6mm)	(1 µm)	(%)	(0,6mm)	(1µm)	(%)	(0,6mm)	(1µm)	(%)	(0,6mm)	(1µm)	(%)
TS	(mg/l)	-	-	-	990	650	34	1080	690	36	1000	660	34
VS	(mg/l)	-	-	-	-	-	-	680	288	58	585	275	53
SS	(mg/l)	280	-	-	540	-	-	730	9	99	540	18	97
VSS	(mg/l)	-	-	-	-	-	-	670	9	99	480	15	97
COD(Cr)	(mg/l)	810	780	4	1700	920	46	1800	730	59	1300	590	55
BOD7	(mg/l)	380	270	29	750	370	51	710	210	70	620	310	50
TOC	(mg/l)	370	260	30	490	320	35	440	320	27	350	260	26
COD/BOD	-	2,1	2,9	-	2,3	2,5	-	2,5	3,5	-	2,1	1,9	-
COD/TOC	-	2,2	3,0	-	3,5	2,9	-	4,1	2,3	-	3,7	2,3	-
Kväve													
Kväve totalt, N	(mg/l)	160	150	6	140	120	14	320	220	31	290	220	24
Ammoniumkväve	(mg/l)	150	150	0	100	-	-	130	-	-	130	-	-
Nitrat + Nitrit, N	(mg/l)	-	-	-	0,35	-	-	0,2	-	-	0,081	-	-
Fosfor													
Fosfor tot, P	(mg/l)	20	16	20	19	15	21	23	16	30	20	16	20
Fosfatfosfor	(mg/l)	16	19	-19	13	9,9	24	19	16	16	17	14	18
Kalium, K	(mg/l)	62	62	0	60	56	7	50	50	0	48	47	2
Svavel													
Svavel, S	(mg/l)	-	-	-	-	-	-	26	24	8	26	25	4
Sulfatsvavel	(mg/l)	26,3	27,7	-5	16,3	18,3	-12	6,7	14,3	-115	10,7	9,7	9

Jonbalans

En jonbalans för silat svartvatten redovisas i tabell 6.5. I jonbalansen har endast makrojonerna tagits med (alla joner med en halt > 1 mg/l).

Jonbalansen stämmer ganska bra. De positiva jonerna överträffar de negativa. Skillnaden ligger inom gränsen av analysnoggrannheten (resultatet blir lite jämnare om de filterade värderna tas som utgångspunkt vilket man egentligen borde göra). Det är dock sannolikt att det finns negativa organiska syror i svartvattnet som inte har uppmätts här.

Tabell 6.5 Jonbalans för silat svartvatten, resultat för de olika provtagningsdygnen.

Parameter	2004-04-19			2005-03-29			2006-01-23--24			2006-01-24—25		
	silat			silat			silat			silat		
Katjoner	(mg/l)	(mmol/l)	(meq/l)	(mg/l)	(mmol/l)	(meq/l)	(mg/l)	(mmol/l)	(meq/l)	(mg/l)	(mmol/l)	(meq/l)
Ammoniumkväve	150	10,7	10,7	100	7,1	7,1	130	9,3	9,3	130	9,3	9,3
Kalium, K	62	1,6	1,6	60	1,5	1,5	50	1,3	1,3	48	1,2	1,2
Natrium, Na	160	7,0	7,0	83	3,6	3,6	76	3,3	3,3	77	3,3	3,3
Kalcium, Ca	32	0,8	1,6	37	0,9	1,8	34	0,8	1,7	31	0,8	1,5
Magnesium, Mg	7	0,3	0,6	6,9	0,3	0,6	6,7	0,3	0,6	6	0,2	0,5
Totalt			21,4			14,7			16,1			15,9
Anjoner	(mg/l)	(mmol/l)	(meq/l)	(mg/l)	(mmol/l)	(meq/l)	(mg/l)	(mmol/l)	(meq/l)	(mg/l)	(mmol/l)	(meq/l)
Alkalinitet, HCO ₃ ^{*)}	590	9,2	9,2	-	-	-	680	10,5	10,5	700	10,9	10,9
Klorid, Cl	260	7,3	7,3	110	3,1	3,1	110	3,1	3,1	93	2,6	2,6
Sulfat, SO ₄	79	0,8	1,6	49	0,5	1,0	20	0,2	0,4	32	0,3	0,7
Vätefosfat, P	16	0,5	1,0	13	0,4	0,8	19	0,6	1,2	17	0,5	1,1
Totalt	1400 ^{**))}		19,2			5,0	1160 ^{**))}		15,3	1170 ^{**))}		15,3
Totalt (+) – (-)			2,2	-	-	-	-		0,8			0,6

*) korrigerat för vätefosfat, **) med ammonium som NH₄⁺.

7 Studerade återvinningsalternativ

Tre olika ambitionsnivåer har studerats i denna studie, se figur 7.1:

- Låg ambitionsnivå: Återvinning av (partikulärt) organiskt material, se kap. 8.
- Mellan ambitionsnivå: Återvinning av organiskt material och fosfor, se kap. 9.
- Hög ambitionsnivå: Återvinning av alla näringsämnen, se kap. 10

För varje ambitionsnivå har två olika delalternativ urskiljts. I figur 7.1 redovisas endast huvudalternativet för varje ambitionsnivå.

Gemensamt för varje ambitionsnivå är att, lokalt vid Skogaberg, ett slam, rens och/eller ett koncentrat produceras som utgör ca 10 % av det totala svartvattenflödet från Skogaberg. Detta slam, rens, eller koncentrat transporteras per slambil till en strategiskt placerad rötningsanläggning i staden där även annat organiskt avfall rötas. I denna centrala rötningsanläggning produceras metan som kan användas som biobränsle och en stabiliserad, hygieniserad gödselprodukt som är kvalitetssäkrad för användning i jordbruket.

Ju högre ambitionsnivå desto mer organiska ämnen samt näringsämnen återvinns och desto mer komplicerad teknik behöver användas. I den låga

ambitionsnivån räcker det med en enkel slamavskiljare medan i den höga ambitionsnivån omvänd osmos (i uppkoncentreringsanläggningen) behöver tillgripas för att kunna uppnå målsättningarna.

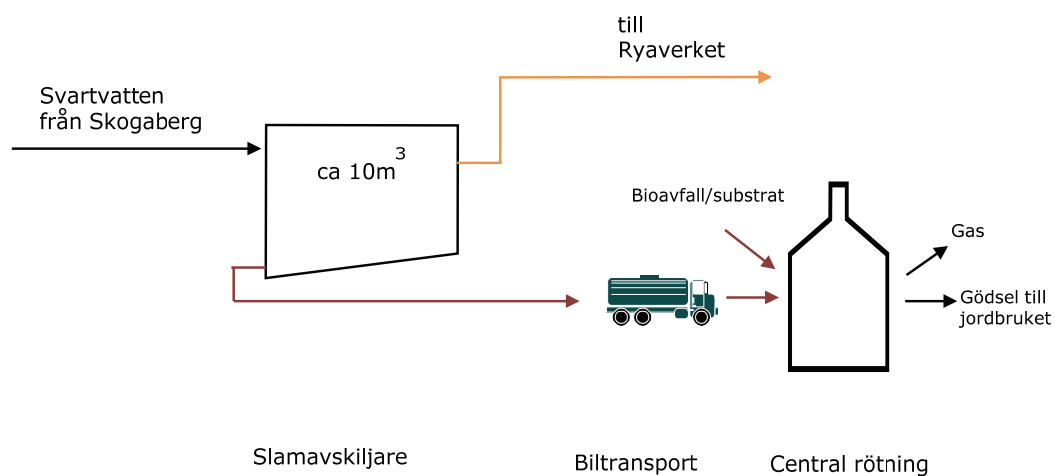
Olika studier (de Blois (red.), 2003, Nordberg m.fl., 2007) har visat att central rötning är idag den mest lämpliga tekniken för att vidarebehandla det lokalt på Skogaberg producerade slammet/renset/koncentratet för att:

- Rötning är en enkel beprövad teknik för att stabilisera slam. Dessutom produceras relativt mycket energi i form av metangas. En annan enkel teknik för att stabilisera slam är våtkompostering. Denna teknik kräver dock energi (för luftningen) och är därför mindre lämplig med tanke på resurshushållning. Våtkompostering och rötning har studerats och jämförts för Skogaberg i en studie av JTI (Nordberg m.fl., 2007).
- Lokal rötning i liten skala är mindre lämplig med tanke på säkerhetsföreskrifterna i samband med metangasproduktionen. Vidare är det inte ekonomiskt försvarbart att lokalt upparbeta gasen till ett fullvärdigt biobränsle och därmed blir det svårare att utnyttja metangasen till fullo.
- Vid central rötning blandas svartvattenslam med mycket annat organiskt avfall från staden. Rötningen, hygieniseringen samt rötgasreningen kan då byggas i en stor skala vilket gör detta alternativ även ekonomiskt attraktivt.

Rötning av svartvattnet beskrivs närmare i kapitel 11.

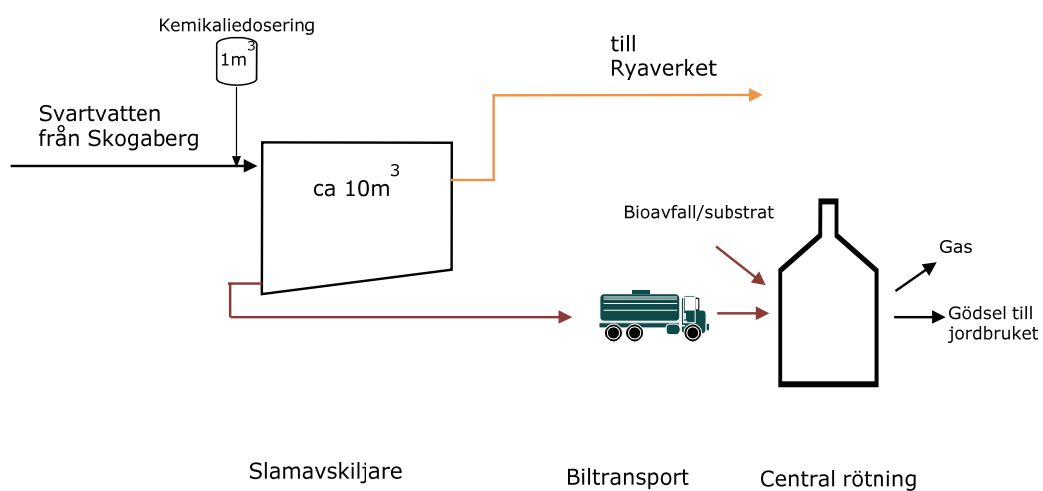
Låg

Återvinning av organiskt material vid Skogaberg



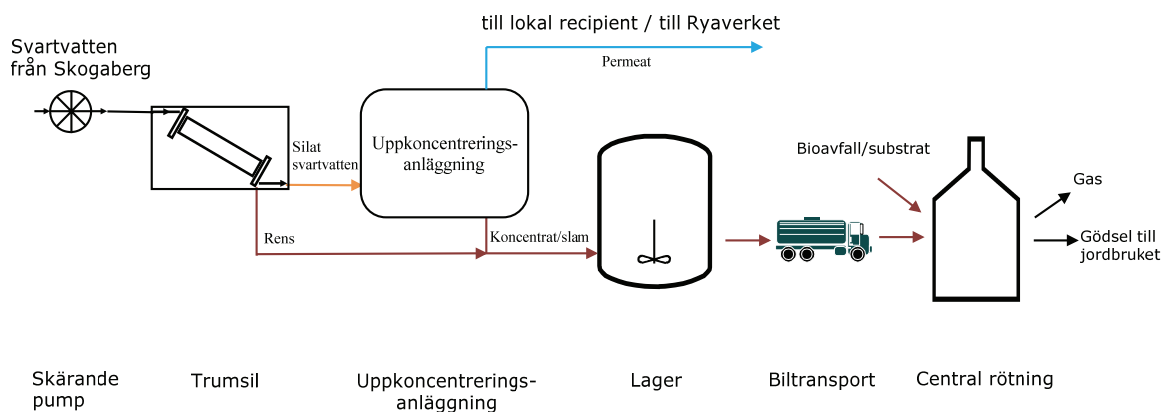
Mellan

Återvinning av organiskt material och fosfor vid Skogaberg



Hög

Återvinning av alla näringsämnen vid Skogaberg



Figur 7.1 Studerade återvinningsalternativ.

8 Låg ambition – återvinning av organiskt material

8.1 Målsättningar och förutsättningar

Målsättningarna med den lokala anläggningen i Skogaberg i denna variant är:

- Återvinning av största delen (> 50 %) av det organiska material som är partikelbundet.
- Återvinning av en stor del av de näringsämnen som är partikelbundna.
- Producerat koncentratet och slam ska utgöra maximalt 10 % av inkommande flöde.

Förutsättningar:

- Anläggningen ska vara lättskött och kunna bedrivas automatiskt utan allt för regelbunden tillsyn.
- Anläggningen ska inte avge någon (besvärande) lukt samt buller till omgivningen.
- Det utgående vattnet från den lokala anläggningen i Skogaberg kan ledas till Ryaverket.
- Det krävs ingen lokal hygienisering och stabilisering: Rens och slam leds per biltransport till en central rötningsanläggning i Göteborg.

Målsättningarna med rötningsanläggningen är:

- Utnyttjande av återvunnet organiskt material för energiproduktion.
- Användning av producerat svartvattenslam som kvalitetssäkrad gödsel i jordbruket (efter stabilisering genom rötning och hygienisering).

Rötningen och kvalitetssäkringen av gödseln behandlas vidare i kapitel 11 resp. 12. I detta kapitel beskrivs den lokala anläggningen i Skogaberg.

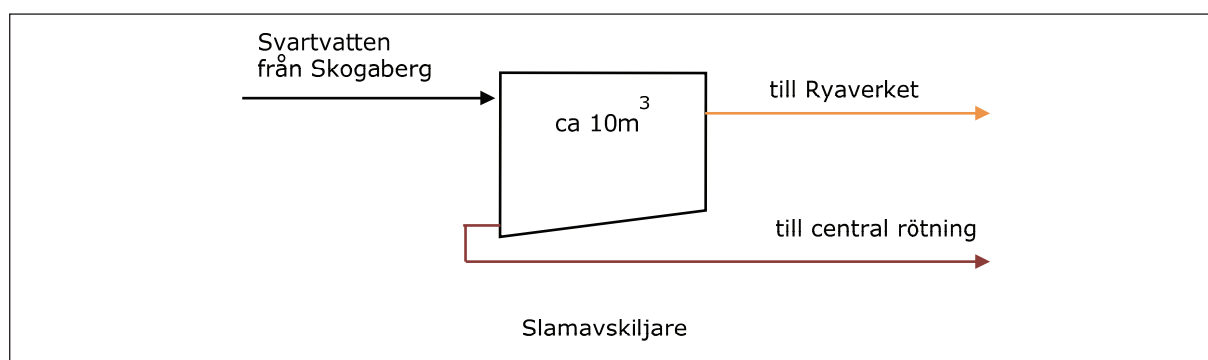
8.2 Behandlingstekniker

Behandlingstekniker

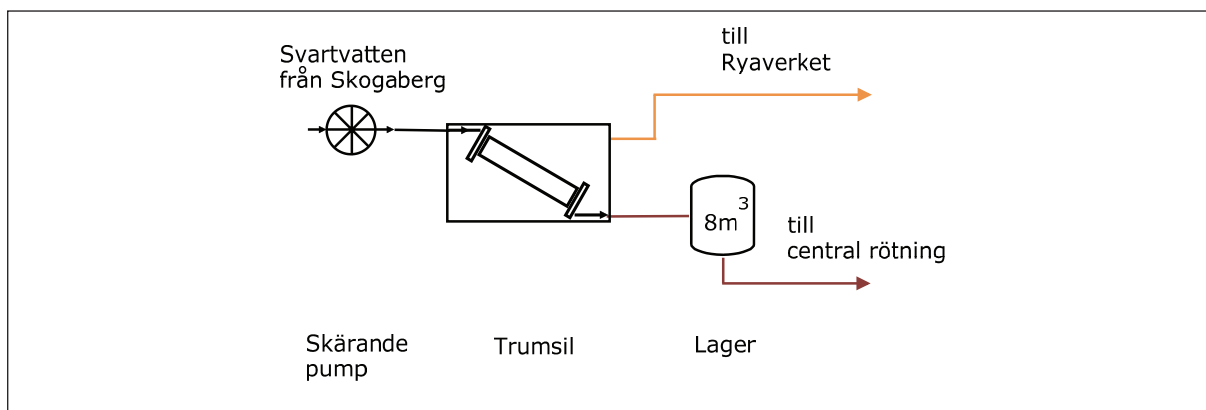
Det finns i princip två relativt enkla sätt för att ta bort partikulärt bundet organiskt material från svartvatten:

1. Sedimentering av partikulärt organiskt material i en slamavskiljare där en stor del av partiklarna hamnar i den sedimenterade slamfasen.
2. Silning av svartvatten i en trumsil. Partiklar större än trumsilens hål fångas av och ett slam, så kallat rens produceras.

Båda alternativen är schematiskt redovisade i figur 8.1 resp. 8.2.



Figur 8.1 Enkelt schema över alternativet - slamavskiljare.



Figur 8.2 Enkelt schema över alternativet – trumsil.

8.3 Dimensionering

Dimensionering alternativ 1

I alternativ 1 kommer svartvattnet ledas med självfall till en sluten, markförlagd slamavskiljare där sedimentering av slam sker. Slamproduktionen uppskattas till maximalt 2 m³/d (maximalt 10 % av svartvattenflödet, uppskattat med hjälp av slamvolymmätningar på Skogabergs svartvatten: 50–100 ml/l).

En vanlig slambil kan transportera en volym om 8–10 m³. Om slamavskiljarens volym därmed sätts till 10 m³ behöver tömning/slamsugning ske 2 ggr per vecka, förslagsvis på måndagar och fredagar. Slamavskiljaren dimensioneras så att såväl sedimentering

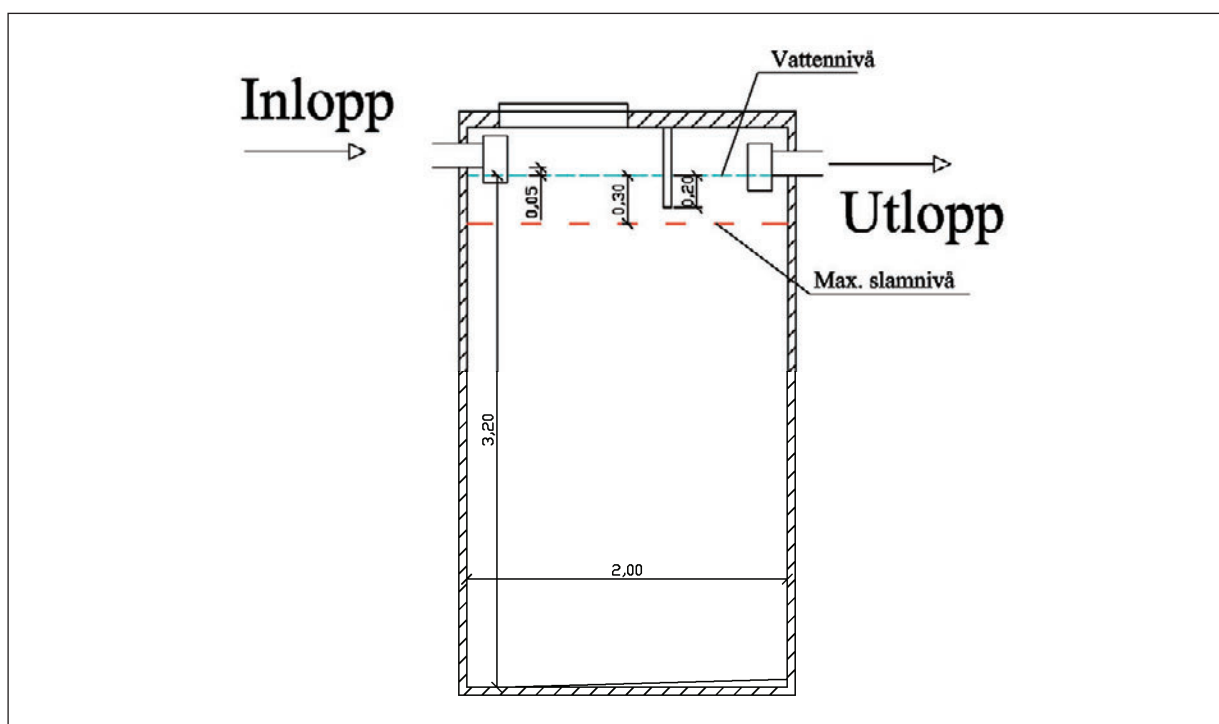
av grovt material (matavfall, papper, fekalier) som fettavskiljning sker. Ett exempel på utformning av en slamavskiljare om 10 m³ redovisas i figur 8.3.

Genom ett brunnslöck kan slamavskiljaren nå och slamsugning ske.

Dimensionering alternativ 2

I alternativ 2 pumpas svartvattnet upp med en skärande pump (kapacitet ca 1 l/s). Allt stort material skärs sönder i mindre delar om ca 2 mm.

Pumpen pumpar in svartvattnet till en roterande trumsil. Trumsilen består av en perforerad trumma (0,6 mm hål) med en invändig fastsatt transportskruv som transporterar de avskilda partiklarna ut ur trumman. Trumman roterar på bärhjul och drivs av



Figur 8.3 Principskiss över en möjlig slamavskiljare.



Figur 8.4 Bild på sil med öppen framlucka.

en kuggväxelmotor. Inkommande vätska förs in i trumman genom ett inloppsrör vilket fördelar vätskan på en stor yta av trummans insida. Under passagen genom trumman silas vätskan genom trummans hål och samlas i ett underliggande tråg. De avskiljda partiklarna (renset) transporteras ut ur trumman genom uppsamlingstratten i utloppet. Under transporten genom trumman sker kontinuerlig avvattning (Läckeby products, 2007).

För att förhindra igensättning av trummans hål är trumsilen försedd med ett roterande borste och ett spolrör med dysor. Spolröret används i ett tvättprogram som startar var 90 minut och varar 1 minut per gång. Under tvättningen sprutas varmt vatten ut från röret ovan på borste. En bild på trumsilen redovisas i figur 8.4.

Det finns även andra trumsiltyper på marknaden som skulle kunna vara lämpliga.

8.4 Genomförda mätningar och försök

Orienterande försök har genomförts med båda alternativen.

Alternativ 1

Enkla sedimenteringsförsök i bägare på laboratorieskala genomfördes och visade att slammet från Skogaberg sedimenterar lätt. Slamvolymen varierade mellan 50–100 ml/l.

Alternativ 2

I pilotförsöket i Skogaberg har en skärande pump samt en trumsil varit i drift under en lång period med följande resultat:

Skärande pump:

- Pumpning av det relativt koncentrerade svartvattnet har visat sig vara besvärlig på grund av igensättningar. Pumpning med en skärande pump (typ Piranha S17 2D/KS, 1700W) har varit mest framgångsrik. Även denna pump har dock regelbundet igensatts med framförallt våtstarkt papper som kan hopa sig i pumpsumpen. Knivarna i den skärande pumpen har regelbundet (2–4 ggr/år) fått bytas ut.

Trumsil (typ Rotosieve Modell 4013-40):

- Det producerade renssets TS-halt uppgår till 1–4 %. Renssets TS-halt avhänger av flödet in till silen samt TS-halten i svartvattnet men ett tydligt samband har inte kunna klarläggas (för få mätningar föreligger).
- Renssets volym utgör ca 3 % av svartvattnets volym. Denna volym kan bli mycket mer om flödesbelastning och/eller TS-belastningen på silen är hög (upp till 7 % har uppmätts).
- Trumsilen har ett tvättprogram som startar var 90 minut och varar 1 minut per gång. Spolvattnet har en temperatur om ca 50 °C och spolvattenvolymen är ca 400 l/d (2 % av den totala svartvattenvolymen).
- Trumsilens funktion är stabil och trumsilen kräver mycket litet underhåll:
 - rengöring av trumsil, etc med spolslang: 1–2 ggr/månad
 - inställning av tvättborsten: 2 ggr/år
 - byte av tvättborste: 1 gång var femte år (uppskattning)
 - smörjning: 2 ggr/år

8.5 Förbrukningar och kostnader

Förbrukningarna och kostnaderna för alternativ 1 & 2 i denna ambitionsnivå är sammanfattade i tabell 8.1.

Tabell 8.1a Uppskattade förbrukningar.

	Alternativ 1	Alternativ 2	Enhet
Energiförbrukning			kWh/år
• pumpning	0	2500	
• trumsil	0	1000	
• flödesmätning	900	900	
Totalt:	900	4400	
Kemikalier	-	-	m ³ /år
Transporter	ca 100	ca 30	antal slambilar/år
Arbete	-	100	h/år, 2 h/vecka

Tabell 8.1b Uppskattade investeringar lokal anläggning.

	Alternativ 1 kkr	Alternativ 2 kkr
Byggnad	-	570
Slamavskiljare	78	-
Inloppspumpstation	-	140
Trumsil	-	200
Lager	-	86
Övrigt (bla: el-, maskininstallationer)	-	190
Summa	78	1200
Pålägg (projektering, oförutsett, entrepenör): 62,5 %	49	750
Totalt	130	1950

Tabell 8.1c Uppskattade investeringar & driftkostnader (ca 366 anslutna personer).

	Alternativ 1	Alternativ 2	Enhet	Enhetspris
Investeringar:			kkr	
• avfallskvarnar	600	600		
• ledningar	4400	4400		
• lokal anläggning	130	1900		
Totalt:	5130	6900		
Driftkostnader:			kkr/år	
• energi	1	4		1 kr/kWh
• transporter	100	30		1000 kr/tömning
• slammottagning	180	53		240 kr/m ³
• arbete	-	40		400 kr/h
Totalt:	280	130		
Kapitalkostnader:			kkr/år	Avskrivning
• avfallskvarnar	40	40		15 år
• ledningar	110	110		40 år
• lokal anläggning	9	120		15 år
Totalt:	160	270		(ingen kalkylränta)
Årliga kostnader, totalt	440	400	kkr/år	

8.6 Produktsammansättning

En typisk möjlig sammansättning för slammet som återvinns redovisas i tabell 8.2.

För alternativ 1 har vi antagit att allt slam som hamnar i rensat vid användning av en 0,6 mm trumsil även hamnar i slamfasen vid användning av en slamavskiljare. Vidare antas att därutöver även 60 % av allt partikulärt bundet material hamnar i slamfasen. Till slut fångas även 10 % av det lösta materialet av då slamproduktionen uppskattas till 10 % av den totala svartvattenvolymen. För alternativ 2 är de redovisade halterna medelvärden av resultaten för provtagningsdagar 2006-01-24/2006-01-25.

Som redovisas är återvinningsgraden för alternativ 1 högre än för alternativ 2. Detta har följande orsaker:

- Slammets volym i alternativ 1 är 10 % av svartvattens totala volym medan rensats volym är endast 3 % av svartvattens totala volym. Härmed blir återvinningsgraden minst 10 % för alternativ 1 och minst 3 % för alternativ 2.
- I alternativ 1 tas också en stor del av det finfördelade partikulära materialet bort (småpartiklar som passerar en 0,6 mm trumsil).

8.7 Måluppfyllelse

Målsättningar kan uppnås med de redovisade alternativen. Uppskattningsvis kan ca 60 resp. 40 % av den totala mängden av organiska ämnen i svartvattnet återvinnas i ett slam med en volym om ca 10 % av svartvattenflödet med hjälp av sedimentering resp. silning. Av de partikulärt bundna organiska ämnena återvinns då mer än 50 % i båda fallen. Även en stor del av de partikulärt bundna näringsämnena återvinns, men detta är bara en liten del av den totala mängden av näringsämnena i svartvatten (4–30 %).

Det producerade slammet eller rensat är lämpligt för rötning men är efter rötning ej särskilt lämpligt som gödselprodukt p.g.a. det ringa innehållet av näringsämnena, se även kapitel 11 och 12.

De presenterade teknikerna är mycket enkla och tillsynen kan ske i samband med tömningstillfällena (1–2 ggr/vecka).

Tabell 8.2 Sammansättning av producerat slam.

Komponent	g/l** alt. 1	g/l* alt. 2	g/kg TS** alt. 1	g/kg TS* alt. 2	återvinning % alternativ 1**	återvinning % alternativ 2*
Flöde	1,7 m ³ /d	ca 0,5 m ³ /d	-	-	10	3
TS	8,3	19	-	-	53	33
VS	7,6	18	920	950	67	43
COD	13,3	25	1600	1300	59	32
TOC	3,9	10	470	540	56	41
N tot	0,85	0,64	100	33	27	5,2
NH ₄ -N	0,15	0,20	18	10	11	4,5
P tot	0,06	0,07	7,8	3,7	28	7,9
S tot	0,04	0,05	4,7	2,4	15	4,4
K	0,06	0,07	6,9	3,8	12	3,7

* Uppmätta analyser på rens (medelvärden av resultaten för provtagningsdagar 2006-01-24/2006-01-25).

** Beräknade värden.

9 Mellan ambition – återvinning av organiskt material och fosfor

9.1 Målsättningar och förutsättningar

Målsättningar med denna variant är:

- Återvinning av största delen (> 50 %) av det organiska material som är partikelbundet.
- Återvinning av största delen av fosfor (> 60 %).
- Producerat koncentratet och slam ska utgöra maximalt 10 % av inkommande flöde.

Förutsättningar:

- Anläggningen ska vara lättskött och kunna bedrivas automatiskt utan allt för regelbunden tillsyn.
- Anläggningen ska inte avge någon (besvärande) lukt samt buller till omgivningen.
- Det utgående vattnet från den lokala anläggningen i Skogaberg kan ledas till Ryaverket.
- Det krävs ingen lokal hygienisering och stabilisering: producerat slam leds per biltransport till en central rötningsanläggning i Göteborg.

Målsättningarna med rötningsanläggningen är:

- Utnyttjande av återvunnet organiskt material för energiproduktion.
- Användning av producerat svartvattenslam som kvalitetssäkrad gödsel i jordbruket (efter stabilisering genom rötning och hygienisering).

Rötningen och kvalitetssäkringen av gödseln behandlas vidare i kapitel 11 resp. 12. I detta kapitel beskrivs den lokala anläggningen i Skogaberg.

9.2 Behandlingstekniker

Behandlingstekniker

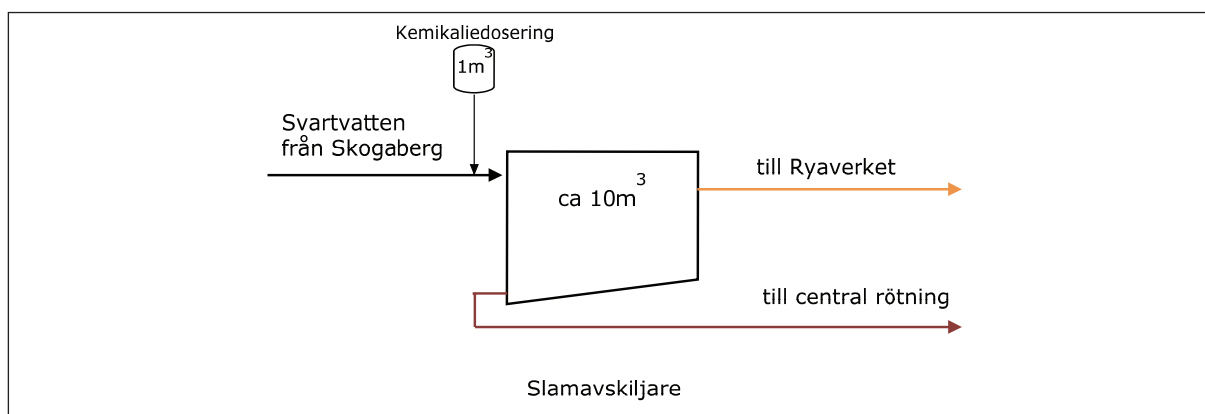
Det finns bara ett självklart, enkelt alternativ för fosforåtervinning och det är återvinning genom kemisk fällning. Även en stor del av de organiska ämnena återvinns vid tillämpning av kemisk fällning. Andra alternativ såsom biologisk fosforåtervinning bedöms vara för komplicerat för denna tillämpning och storlek.

Kemisk fällning kan ske med olika kemikalier däribland:

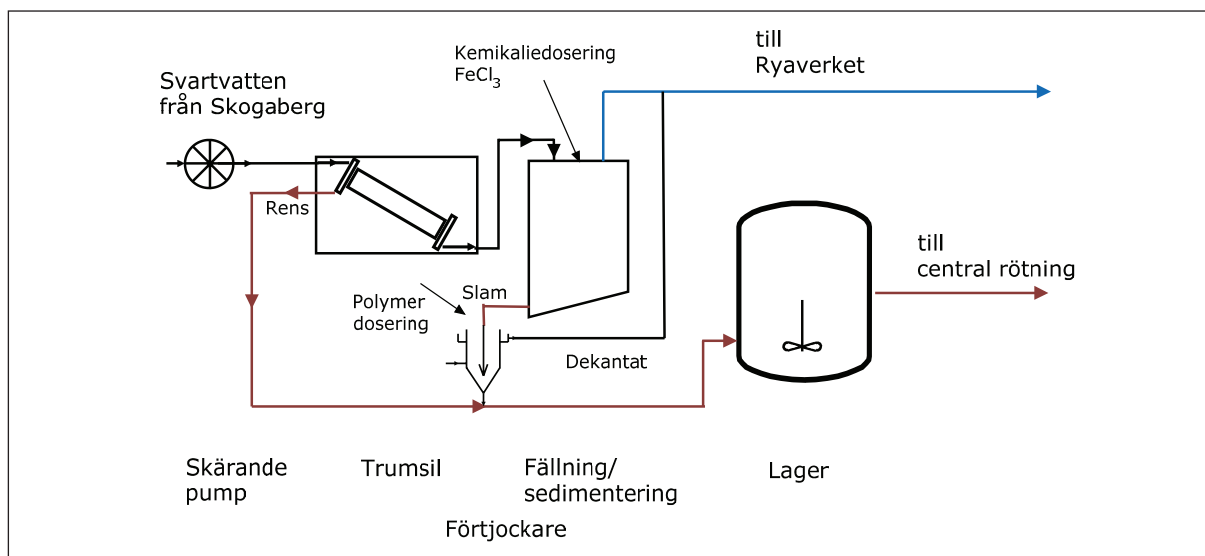
- Olika järnsalter (t.ex. järnklorid eller järnsulfat), fosfor fälls som FePO_4
- Olika aluminiumsalter (t.ex. aluminiumklorid eller aluminiumsulfat), fosfor fälls som AlPO_4
- Kalk (kalciumhydroxid) eller kalciumoxid, fosfor fälls som $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
- Magnesiumhydroxid, fosfor fälls som MgNH_4PO_4

Här urskiljer vi två varianter för kemfällningen:

1. Lågambition, enklast möjligt: Kemfällning sker i en enkel slamavskiljare (figur 9.1).
2. Högambition, fällningsprocessen styrs bättre med en högre återvinning som följd: Kemfällning sker på svartvatten som är förbehandlat med en trumsil (figur 9.2).



Figur 9.1 Kemfällning i en slamavskiljare.



Figur 9.2 Kemfällning av förbehandlat, trumsilat svartvatten.

Närmare beskrivning av alternativen:

- I alternativ 1 leds svartvattnet med självfall till en sluten, markförlagd slamavskiljare (jfr kapitel 8, alt. 1). Kemikalierna doseras till ledningen strax (ca 1m) före slamavskiljaren. Slamavskiljaren töms två ggr per vecka med hjälp av en slambil som transporterar slammet till en central rötningsanläggning.
- I alternativ 2 pumpas svartvattnet med en skärande pump till en roterande trumsil (jfr kap. 8, alt. 2). Det silade avloppsvattnet förs sedan till en sedimenteringstank till vilken fällningskemikalie doseras. Ett fosfatrikt slam avskiljs som pumpas vidare till en sedimentationsförtjockare för att göra slammet tjockare så att transportvolymerna kan minskas. Förmodligen behövs en polymerdosering till förtjockaren för att få slammet tillräckligt tjockt. Förtjockat slam samt rens från trumsilen transporteras per slambil till en central rötningsanläggning.

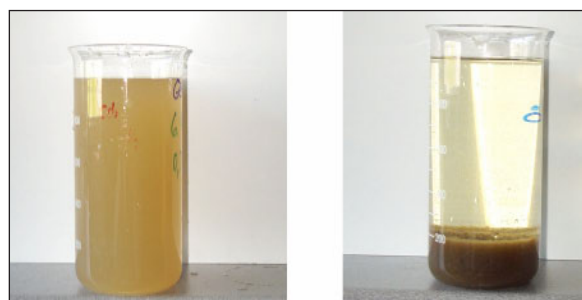
De viktigaste slutsatserna är:

- Fosfor kan till stor del återvinnas i ett slam som produceras vid dosering av fällningskemikalier. Fosforåtervinningen är mer än 90 % och fosforhalterna i det utgående vattnet från fällningsanläggningen blir mindre än 1 mg/l vid rätt doseringsmängd samt fällningskemikalie.
- Relativt höga fällningskemikaliedoseringar behövs för att uppnå höga återvinningsgrader samt låga halter i det utgående vattnet: Ca 100 mg Fe/l (ca 2 mmol/l, se figur 9.3) eller ca 50 mg Al/l (ca 2 mmol/l) behövs doseras. För de olika järnsalterna har det visat sig att fällningen fungerar bäst när pH-värdet på svartvattnet sänks till 5,5–6 medan fällningen med aluminiumsalter fungerade bra vid pH 6–6,5.
Kalk ger bra resultat om pH-värdet höjs till 9,5 eller högre. En dosering om 4 mmol/l, 80 mg Ca/l, eller mer behövs i så fall.
- Den producerade slamvolymen är relativt volyminös framförallt vid tillämpning av järn- eller aluminiumsalter: ca 150–200 l/m³ behandlat svartvatten,

9.3 Genomförda mätningar och försök

Genomfört försök

Orienterande labbskaleförsök har utförts med kemfällning för tre typer av kemikalier: järnsalter, aluminiumsalter samt kalk. Alla resultat från detta försök finnes i (Klimeski, 2007).



Figur 9.3 Svartvatten före och efter fällning med järnklorid. Dosering: ca 100 mg Fe/l (Klimeski, 2007).

alltså 15–20 % av det behandlade vattnet blir slam. För kalk är motsvarande siffra 5–8 %.

Producerat järn- och aluminiumfosfatslam behöver förtjockas ytterligare med hjälp av en sedimentationsförtjockare och en polymerdosering för att erhålla en acceptabel uppkoncentreringsgrad (slamvolymen ska vara 10 % eller mindre av totalvolymen).

- TS-halten i slammet är låg, endast 0,2–0,3 % för järn- och aluminiumfosfatslam. Slam som består av kalciumfosfat/kalciumkarbonat är betydligt kompaktare och har en TS-halt om 0,5–1 %.

9.4 Dimensionering

Alternativ 1

Slamavskiljaren är i princip samma slamavskiljare som dimensionerades i förra kapitlet. En kemikalietank och doseringspump för fällningskemikalier tillkommer.

Alternativ 2

Den skärande pumpen och trumsilen dimensioneras som i förra kapitlet. Fällning, flockning och sedimentering kan ske i en och samma tank. Reningen sker i det fallet med en satsvis behandlingsreaktor (faser: fyllning, dosering av kemikalie, och inblandning, omrörning och flockulering samt koagulering, sedimentering, dekantering samt slamuttag). Två tankar behövs: medan behandling sker i den ena tanken fylls den andra tanken med inkommande avloppsvatten.

Tank 1 fylls med silat svartvatten tills den är full, och en viss nivå har uppnåtts. Därefter doseras fällningskemikalie, förslagsvis FeCl_3 , under snabb omrörning. Doseringen styrs på pH-värdet (som sänks till ca pH 5,5). Järnklorid väljs för att detta är en lätthanterlig kemikalie (levereras i form av en vätska) med en rimlig kostnad samtidigt som utfällningsprodukten, järnfosfat, faller ut lätt och är acceptabel som ett av ämnena i producerad gödsel.

Efter omrörning och dosering följer flockningsfasen där omrörningen sker långsamt. Efter 10 min flockning stoppas omrörningen och sedimenteringen kan börja. Sedimenteringen sker i ca 60 minuter och följs av 30 minuters dekantering där vattnet ovan slamfasen förs till avlopp. Efter dekantering pumpas det producerade slammet till en gravimetrisk förtjockare

för vidare förtjockning. Detta är nödvändigt då slamvolymen efter fällning är relativt stor, 15–20 % av totalvolymen blir slam. Med förtjockning inklusive en eventuell polymerdosering borde man kunna få ner denna volym till ca 5 (–10) % av totalvolymen. Dekantatet från förtjockaren leds tillbaka till inloppet.

Under behandlingstiden av svartvattnet i sedimenteringstank 1 fylls tank 2 som behandlas i sin tur då tank 1 är färdigbehandlad (och fylls med nytt svartvatten).

De olika behandlingsfaserna och deras tider presenteras i tabell 9.1.

Dimensionering

Kemfällningen är grovt dimensionerad i tabeller 9.2 respektive 9.3 nedan.

En enkel planritning över alternativ 2 redovisas i figur 9.4.

Tabell 9.1 Behandlingsfaser vid kemisk fällning (satsvis behandling).

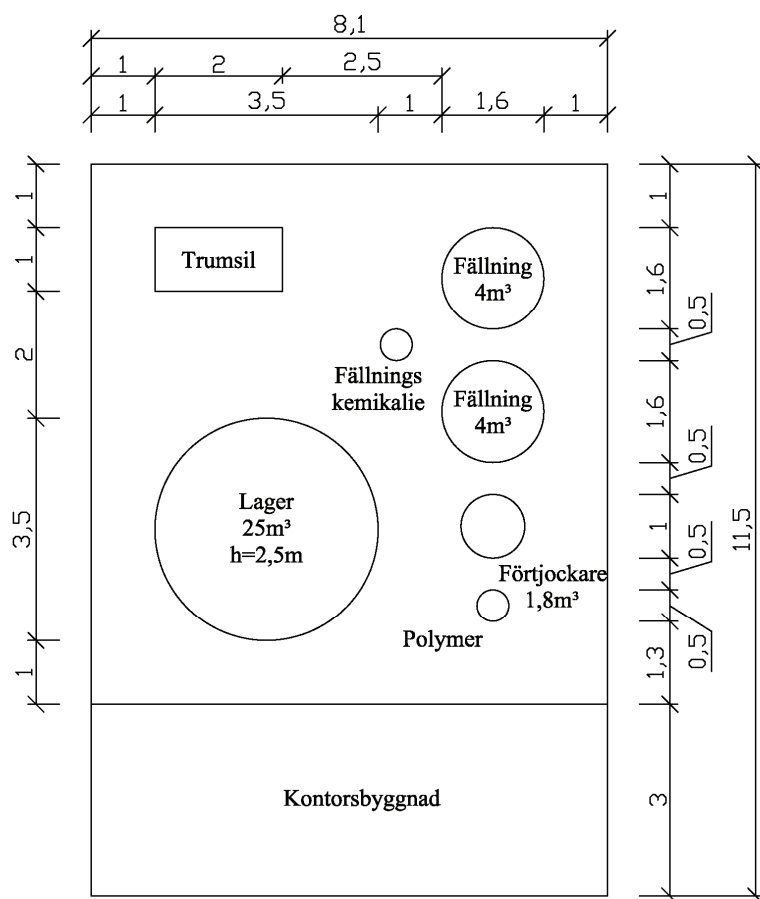
tid	sekvens i tank 1	sekvens i tank 2
10 s	dosering fällningskemikalie & snabb omrörning	fyllning
10 min	flockning	fyllning
60 min	sedimentering	fyllning
30 min	dekantering	fyllning
20 min	slamuttag	fyllning
härefter	fylls	samma sekvenser som tidigare har skett i tank 1

Tabell 9.2 Dimensionering av kemfällningsanläggning (lågambition).

Del i anläggning	Enhet	Uppgift
Volym slamavskiljare	m^3	10
Volym fällningskemikalietank	m^3	1
Erforderliga pumpar		• doseringspump
Kemikaliedosering (13,8 v-% Fe)	l/m^3	ca 0,5 (varierar)

Tabell 9.3 Dimensionering av kemfällningsanläggning (högambition).

Del i anläggning	Enhet	Uppgift
Skärande pump, kapacitet	m ³ /h	8
Trumsil, kapacitet	m ³ /h	5
Volym sedimenteringstankar (med omrörare)	m ³	2 x 4
Volym fällningskemikalietank	m ³	1
Erforderliga pumpar		• doseringspumpar • dekanteringspumpar • slampumpar
Kemikaliedosering (järn- och aluminiumsalt)	l/m ³	ca 0,5 (varierar)
Volym förtjockare	m ³	2
Tank för flyttande polymer (dosering till förtjockaren)	m ³	1
Lagringstank	m ³	20



Figur 9.4 Planritning för kemfällningsanläggning, alt. 2.

9.5 Förbrukningar och kostnader

De uppskattade förbrukningarna, investeringarna och kostnaderna för båda kemfällningsalternativen är sammanfattade i tabell 9.4.

Tabell 9.4a Uppskattade förbrukningar.

	Alternativ 1	Alternativ 2	Enhet
Energiförbrukning			kWh/år
• mätning/styrskåp	900	2600	
• inloppspump	-	2500	
• trumsil	-	1000	
• fällning (dosering, omrörning, dekantering, pumpning)	300	3100	
• förtjockning (dosering, dekantering, pumpning)	-	900	
• omrörning i lager	-	1900	
• Totalt:	1200	12000	
Kemikalier			m ³ /år
• FeCl ₃ , 13,8 %	3,7	3,7	
• polymer	-	0,1	
Transporter	ca 100	ca 100	antal slambilar/år
Arbete	52	210	h/år

Tabell 9.4.b Uppskattade investeringar för lokal anläggning.

	Alternativ 1 kkkr	Alternativ 2 kkkr
Byggnad	170	1200
Slamavskiljare	110	-
Inloppspumpstation	-	96
Trumsil	-	250
Fällning		
• doseringsutrustning	65	25
• tank	-	330
Förtjockning		
• doseringsutrustning	-	50
• tank	-	120
Lager	-	190
Övrigt (bl.a.: el-, maskininstallationer)	-	790
Summa	350	3000
Pålägg (projektering, oförutsett, entreprenör): 63 %	220	1900
Totalt	570	4900

Tabell 9.4c Uppskattade totala investeringar & driftkostnader.

	Alternativ 1	Alternativ 2	Enhet	Enhetspris
Investeringar:			kkkr	
• avfallskvarnar	600	600		
• ledningar	4400	4400		
• lokal anläggning	600	4900		
Totalt:	5600	9900		
Driftkostnader:			kkkr/år	
• energi	1	12		1 kr/kWh
• kemikalier	15	18		
• transporter	100	100		1000 kr/tömning
• slammottagning	180	180		240 kr/m ³
• arbete	21	84		400 kr/h
Totalt:	320	400		
Kapitalkostnader:			kkkr/år	Avskrivning
• avfallskvarnar	40	40		15 år
• ledningar	110	110		40 år
• lokal anläggning	53	330		15 år
Totalt:	200	480		(ingen kalkylränta)
Årliga kostnader, totalt	520	880	kkkr/år	

9.6 Produktsammansättning

En beräknad sammansättning för det producerade slammet vid fällning är redovisad i tabell 9.5. Sammansättningen har beräknats på följande sätt:

- Allt slam som skulle ha tagits bort som rens i en 0,6 mm trumsil tas även bort vid fällning.
- I alternativ 1 tas 80 % av allt partikulärt bundet material och fosfor bort medan i alternativ 2 denna avskiljning uppgår till 90 %.
- I båda alternativen är slamvolymen 10 % av den totala svartvattenvolymen m.a.o. även 10 % av alla lösta ämnen återfinns i slamfasen.

9.7 Måluppfyllelse

De uppsatta målsättningarna kan uppnås: Ca 60 % av de organiska ämnena samt mer än 80 % av fosfor kan fångas i slamfasen. Med hjälp av rötning kan energin i slammet utnyttjas och en stabiliserad produkt erhållas som är lämplig som gödsel i jordbruket, se även kap. 11 och 12.

Tabell 9.5 Sammansättning av producerat slam vid tillämpning av fällning (Uppskattade, beräknade värden).

Komponent	g/l alt. 1	g/l alt. 2	g/kg TS alt. 1	g/kg TS alt. 2	återvinning % alternativ 1	återvinning % alternativ 2
Flöde	1,7 m ³ /d	1,7 m ³ /d	-	-	10	10
TS	9,1	9,5	-	-	57	59
VS	8,3	8,6	910	900	72	75
COD	15	16	1600	1700	66	70
TOC	4,1	4,1	450	440	59	61
N tot	1,0	1,1	110	110	32	35
NH ₄ -N	0,15	0,15	16	16	11	11
P tot	0,19	0,21	21	22	83	92
S tot	0,04	0,04	4,6	4,5	16	16
K	0,06	0,06	6,4	6,1	12	12

10 Hög ambition – återvinning av alla näringsämnen

10.1 Målsättningar och förutsättningar

En lokal anläggning för återvinning av alla näringsämnen ska uppfylla följande målsättningar:

Målsättningar med anläggningen i Skogaberg:

- Återvinning av en stor del (> 80 %) av det organiska materialet.
- Återvinningsgraden för näringsämnena N, P och K ska uppgå till minst 80 %.
- Producerat koncentratet och slam ska utgöra maximalt 10 % av inkommande flöde.
- Energi- och kemikaliekostnader samt förbrukningen av övriga resurser ska vara så ringa som möjligt. Den slutgiltiga lösning som föreslås för Skogaberg ska vara hållbar ur miljösynpunkt (och ur denna synvinkel vara ett ”bättre” alternativ än dagens hantering av avloppsvatten).

Förutsättningar för anläggningen i Skogaberg:

- Anläggningen ska vara enkel och lättskött och inte utgöra något hinder för den lokala omgivningen.
- Det utgående vattnet från den lokala anläggningen i Skogaberg kan ledas till Ryaverket.
- Det krävs ingen lokal hygienisering och stabilisering; koncentrat och slam leds med biltransport till en central rötningsanläggning i Göteborg.

Målsättningarna med rötningsanläggningen är:

- Utnyttjande av återvunnet organiskt material för energiproduktion.
- Användning av producerat svartvattenslam som kvalitetssäkrad gödsel i jordbruket (efter stabilisering genom rötning och hygienisering).

Rötningen och kvalitetssäkringen av gödseln behandlas vidare i kapitel 11 resp. 12. I detta kapitel beskrivs den lokala anläggningen i Skogaberg.

10.2 Möjliga behandlingstekniker

Behandlingstekniker

I dagsläget finns det följande tänkbara tekniker som uppfyller återvinningsgradskravet (de Blois, 2004a):

- Indunstning
- Jonbyte med zeolit, wollastonit
- Membranteknik, omvänd osmos

10.2.1 Indunstning

Svartvattnet från Skogaberg är relativt tunt och därmed blir energikostnaderna för indunstning höga. De uppskattas här till 30–35 kWh/m³ (vakuumindunstning). För att kunna behålla kvävet i vattnet måste dessutom pH-värdet i svartvattnet sänkas till ca 4: en syradosering om cirka 1 mol H⁺/mol NH₄⁺ uppskattas behövas. Ett alternativ till en syradosering är en biologisk behandling med nitrifikation där syra produceras av bakterierna. Detta skulle dock göra anläggningen mycket mer komplex.

Slutsats

På grund av främst den mycket höga energiförbrukningen är indunstning mindre intressant i detta fall och stryks som alternativ för Skogaberg.

10.2.2 Jonbyte

Jonbyte sker med mineralerna, zeolit eller wollastonit (kalium och ammonium byts mot natrium). Jonbytet kan ske i jonbytesfilter, filter fyllda med nämnda mineraler eller mineralerna doseras, som ett granulat, direkt till vattnet. Vattnet förbehandlas t.ex. med fällning och sedimentering för att ta bort suspenderade ämnen och fosfat före jonbytet.

Man kan tillämpa jonbyte med eller utan regenerering. Om man väljer regenerering blir anläggningen komplex. Jonbytesmassan ska spolats med en koncentrerad NaCl-lösning. Spolningsförfarandet och hanteringen av jonbytesmassan är för besvärligt för en sådan liten anläggning utan regelbunden tillsyn. Dessutom är produkten, en koncentrerad kalium- och ammoniumkloridlösning, inte direkt lämplig som gödselämne p.g.a. mycket höga resthalter av natriumklorid.

Utan regenerering blir anläggningen enklare, men tyvärr ska då stora mängder mineral doseras för att kunna adsorbera största delen av ammonium, uppskattningsvis cirka 400 kg zeolit/d (jämför med TS-mängden i svartvattnet, ca 20–30 kg/d), vilket motsvarar 150 ton zeolit/år. Detta är för stora mängder och långt ifrån resurssnålt.

Det har inte hittats några relevanta referenser där jonbyte används för en liknande tillämpning.

Slutsats:

I dagsläget är jonbyte inget aktuellt alternativ för Skogaberg.

10.2.3 Membranteknik

(Detta kapitel beskriver resultaten från en förstudie (de Blois, 2004a). Förstudien ledde sedan till pilotförsök för vilka resultaten beskrivs i kapitel 10.3.)

Alternativet som är kvar, membranteknik, omvänd osmos, är med dagens teknik det mest lämpliga alternativet för att koncentrera upp Skogabergs svartvatten med bibehållande av näringsämnena: Energikostnaderna är betydligt lägre än för indunstning, investeringskostnader och syradosering är i samma storleksordning, det finns ett antal relevanta referenser, och anläggningen blir inte allt för komplicerad.

Förbehandling

Förbehandling före membranfiltrering ska minst bestå av:

- grovgallring och sedimentering eller silning (genom ca 0,5 mm), t.ex. i form av en roterande trumsil för att ta bort största delen av de suspenderade ämnena

och för att skydda membranläggningen mot större saker såsom bomullspinnar, kondomer etc.

- utjämning så att ett jämnt flöde kan pumpas in till membranläggningen
- syradosering för att kunna behålla ammonium i koncentratet och för att undvika utfällning av olösliga metallsalter på membranytan.

Idag finns två principiellt olika membrantekniker som passar denna tillämpning.

1. Konventionell membranteknik, spirallindrade membran som idag mest tillämpas för dricks- och processvattenberedning. Här behövs dock ytterligare förbehandling för att ta bort suspenderade ämnen. Två olika förbehandlingsätt, eller en kombination av dem, kan tänkas för att ta bort suspenderade ämnen:
 - a) Mikrofiltrering (MF) eller ultrafiltrering (UF). All susp tas i princip bort.
 - b) Kemisk fällning (susphalten förväntas kunna sänkas till 10–20 mg/l)
2. VSEP konceptet: Filtrering genom vibrerande membran. Vibrationen gör att membranet är mindre känsligt för igensättning förorsakade av höga halter av suspenderade ämnen och i princip skulle ingen ytterligare förbehandling behövas utöver ovannämnd förbehandling (silning över ca 0,5 mm, utjämning, syradosering). VSEP-konceptet beskrivs närmare i New Logic Research (2007).

I figur 10.1 (konventionell membranfiltrering) och 10.2 (VSEP) är båda alternativen schematiskt presenterade medan en översiktlig jämförelse görs i tabell 10.1.

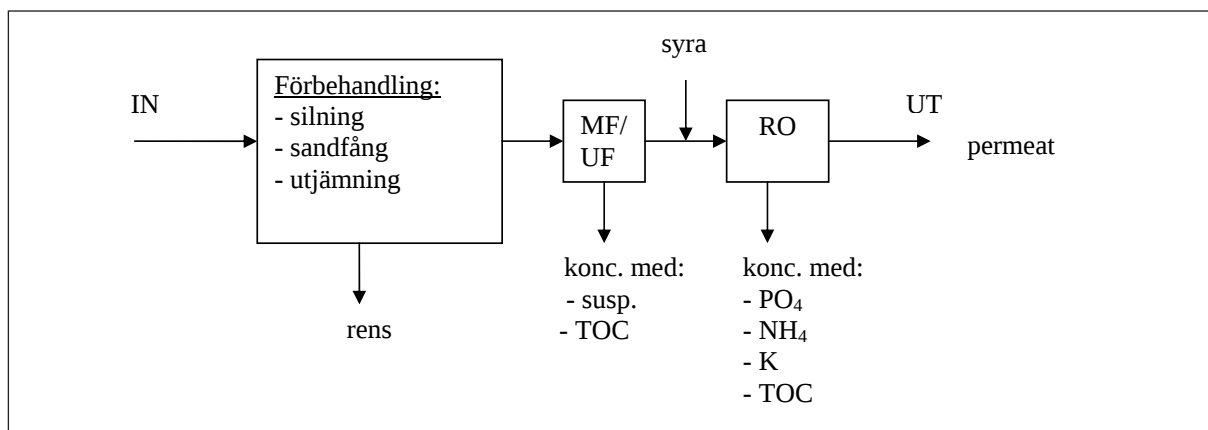
Tabell 10.1 Jämförelse mellan konventionell och VSEP-membranteknik.

System	Investering Mkr ^{***}	Energi (kWh/m ³)	Syradosering mol H ⁺ /mol NH ₄ ⁺	Membran-kostnader kkr/år	Retention N/K/P	Ref.
MF – RO	1,5	4–8	ca 1	ca 10	> 80 %	+/- ^{*)}
VSEP (RO)	2,2	4–8	ca 1	ca 100	> 80 %	+/- ^{**)}

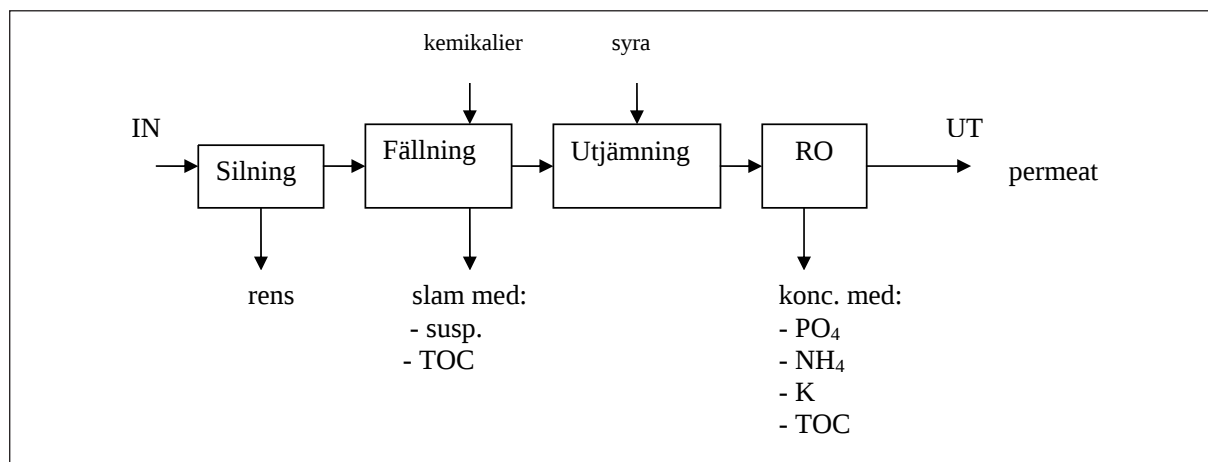
^{*)} svingödsel (Tyskland, Nederländerna), TRAAB (pilotförsök, fullskaleanläggning byggs).

^{**)} svingödsel (Korea), diverse labb- och pilotförsök.

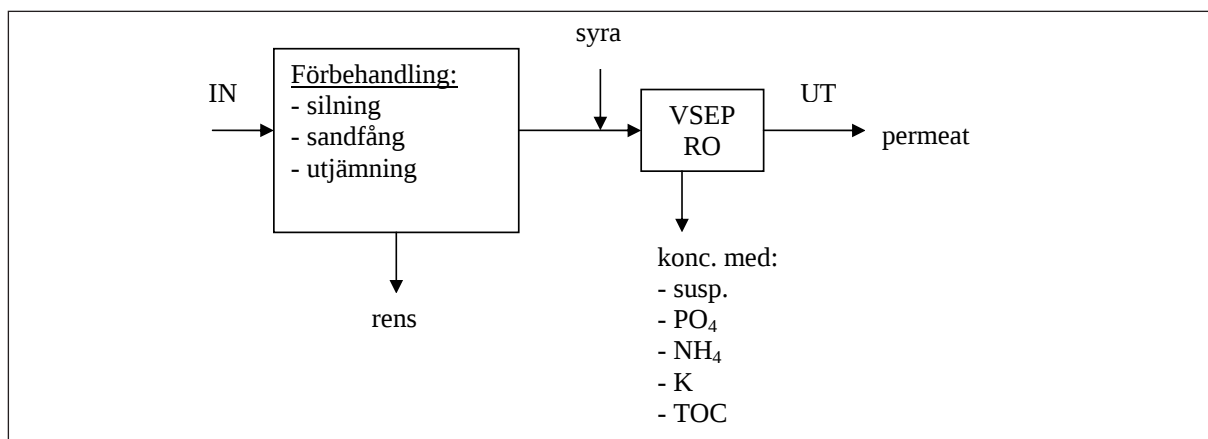
^{***)} Grova uppskattningar, utan kringkostnader såsom byggnad, rördragning till anläggning, etc.



Figur 10.1a Mikrofiltrering och konventionell omvänd osmos.



Figur 10.1b Fällning och konventionell omvänd osmos.



Figur 10.2 Omvänd osmos med VSEP-teknik.

Investeringskostnader

Investeringskostnader för konventionell membran-teknik är lägre än investeringskostnaderna för VSEP-tekniken (se även kapitel 10.4 och 10.5 där båda alternativen dimensioneras).

Energiförbrukning

Vid konventionell membran-teknik recirkuleras vattnet med hög hastighet längs membranytan för att undvika att membranet sätts igen av suspenderade ämnen. Det är denna recirkulation och tryckfallet över membranet som tillsammans ger en relativt hög energiförbrukning. I VSEP-tekniken är recirkulation inte nödvändig. Det är vibrationen (som genereras med hjälp av resonans)

som gör att det bildas ett mikroskopiskt och nära nog partikelfritt vattenskikt mellan membranytan och de suspenderade ämnena. Huvuddelen av partiklarna kommer därför inte i direkt kontakt med membranytan och igensättning av membranet kan på så sätt undvikas. I VSEP-tekniken är det vibrationen och tryckfallet över membranet som tillsammans står för den största energiförbrukningen. Den exakta energiförbrukningen är avhängig av förbehandlingen, membranvalet, uppkoncentreringsfaktorn, foulingen och membranslitaget.

Syradosering

Syradoseringen har två syften:

- att behålla ammonium i koncentratet. Största delen av kvävet i svartvatten består nämligen av ammonium (50 à 70 %). Ammonium står i jämvikt med ammoniakgas enligt:



Ju högre pH-värdet är desto mer ligger jämvikten ovan till höger och desto större andel av ammonium föreligger som ammoniakgas. Ammoniakgas hålls inte emot i membranfiltrering utan trycks genom membranet och därför kan vid högre pH-värden (pH > 7–8) en stor del av kvävet förloras till permeatet och luften.

Genom att dosera syra till svartvattnet sänks pH-värdet och förskjuts jämvikten ovan till vänster och förlusten av ammoniak kan begränsas.

- att begränsa utfällningen av svårslösliga metallsalter i koncentratet såsom kalciumkarbonat och kalciumfosfat (vilket kan sätta igen membranet). Ett alternativ i detta fall är dosering av en komplexbildare (antiscalant).

Den erforderliga syradoseringen uppskattas till 1 mol H^+ /mol NH_4^+ (all alkalinitet tas bort, pH sänks till ca 5,5).

I båda varianterna behöver lika mycket syra doseras.

Membrankostnader

Membrankostnaderna är kostnaderna för regelbundet byte av förbrukade membran. Dessa kostnader är idag betydligt mindre för konventionell membrantechnik än för VSEP-membrantechnik då spirallindrade membranpaket är enklare att producera än VSEP-membranpaket. Dessutom finns spirallindrade membran redan i ett stort antal anläggningar över hela världen vilket möjliggör massproduktion.

Retention

Återvinningsgraden, retentionen för näringsämnen bedöms bli mer än 80 % i de två varianterna, tack vare tillämpning av omvänd osmos, RO.

Slutsats

Såväl konventionell membrantechnik som VSEP-membrantechnik är lämpliga tekniker för att återvinna största delen av näringsämnen i ett koncentrat. VSEP-tekniken har fördelen av att den erforderliga förbehandlingen består endast av silning vilket gör anläggningen relativt enkel. Konventionell membrantechnik med förbehandling (fällning, och/eller mikrofiltrering/ultrafiltrering) är ett intressant alternativ då investeringarna är mycket lägre. Dessutom förväntas membransättningskostnaderna falla kraftigt för konventionella membran de närmaste åren i samband med massproduktion (denna utveckling har redan satts igång och väntas inte på samma sätt för VSEP-membran).

10.3 Genomförda mätningar och försök

Pilotförsök med silning, fällning, omvänd osmos och rötning genomfördes på plats år 2005 och 2006. De flesta resultat har beskrivits i ett antal examensarbeten (Ahmad, 2005; Coquin, 2005; Meins, 2005 & Rud, 2006). Här sammanfattas de viktigaste resultaten. Pilotuppställningen presenteras i ett fotografi, figur 10.3 samt ett enkelt schema i figur 10.4a resp. 10.4b. VSEP-membrantechniken valdes därför att från början förväntades en mindre energiförbrukning än vid konventionell membrantechnik och därför att anläggningsutformningen förväntades bli enklare (bara silning och utjämning som förbehandling).

Beskrivning pilotuppställning

Från Skogabergsområdet leds svartvattnet i separata ledningar och med självfall till en brunn med en skärande pump där matrester och större delar i svartvattnet skärs sönder i mindre bitar. Pumpen lyfter svartvattnet upp till en trumsil där alla partiklar större än 0,6 mm skiljs av.

Därefter leds det silade svartvattnet genom ett sandfång för att avskilja sanden i svartvattnet (sandfången användes endast i en del av försöken). Svartvattnet leds

sedan till en matningstank, "feedtanken" där pH-värdet sänks till ett börvärde med hjälp av saltsyra-dosering, omrörning och pH-mätning. Feedtanken fungerar även som en utjämningsstank.

Från feedtanken matas membranläggningen, typ VSEP med hjälp av en feedpump. VSEP är en förkortning för "Vibratory Shear Enhanced Processing". Kärnan i VSEP-membrantestanläggningen är membranpaketet som består av 38 (19 dubbelsidiga) membranplattor med en sammanlagd yta om ca 1,5 m². Membranpaketet är monterat på en stång som hålls i vibration/resonans med hjälp en motor. Vibrationen gör att partiklar i svartvatten lyfts från membranytan. Membranytan hålls på så sätt nära nog fri från partiklar vilket minskar risken för igensättning av membranen. En närmare beskrivning av VSEP-principen redovisas i New Logic Research (2007).

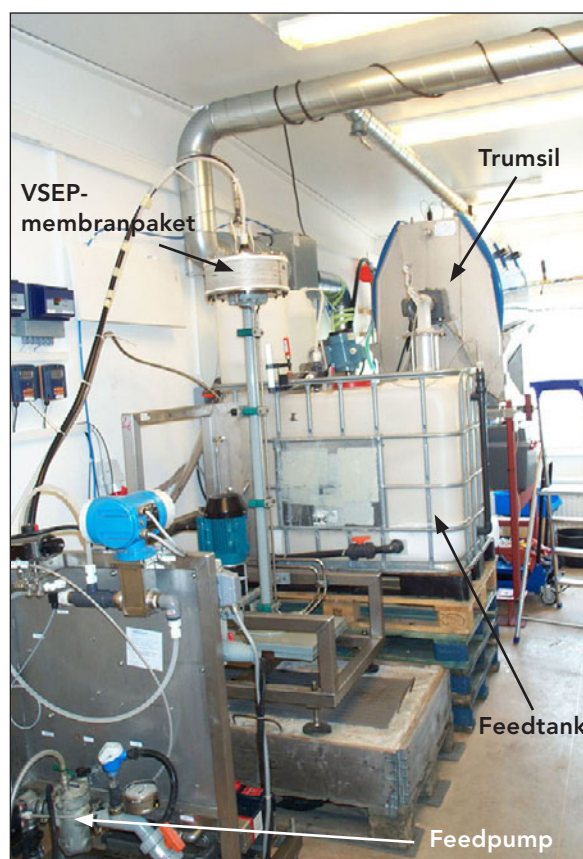
De testade membranplattorna i membranläggningen är av typ LFC1 eller LFC3 (båda tight RO, fabrikant Hydronautics). Specifikationen för LFC1 samt LFC3-membranen ges i tabell 10.2.

Tre membranpaket har testats under försöksperioden:

- LFC1 – körning i recirkulations-/förträngningsmode – totalt 23 körningar
- LFC3 1:a paket, körning i förträngningsmode – 12 körningar
- LFC3 2:a paket, körning i förträngningsmode, kemfällning som förbehandling, 5 körningar

Tabell 10.2 Specifikation av LFC1 samt LFC3/
Information från tillverkaren.

Tillämpning			
Uppgift	Enhet	LFC1 och LFC3	
Max temperatur	°C	45°	
pH område		3,0–10	
Retention under testförhållanden (se nedan)			
Egenskap	Enhet	LFC1	LFC3
Min salt retention	%	99,2	99,5
Normal salt retention	%	99,5	99,6
Testförhållanden			
Parameter	Enhet	LFC1 och LFC3	
NaCl lösning	mg/l	1500	
Tryck	MPa	1,55	
Temperatur	°C	25	
Permeatproduktion	%	15	
pH-värde		6,5–7	

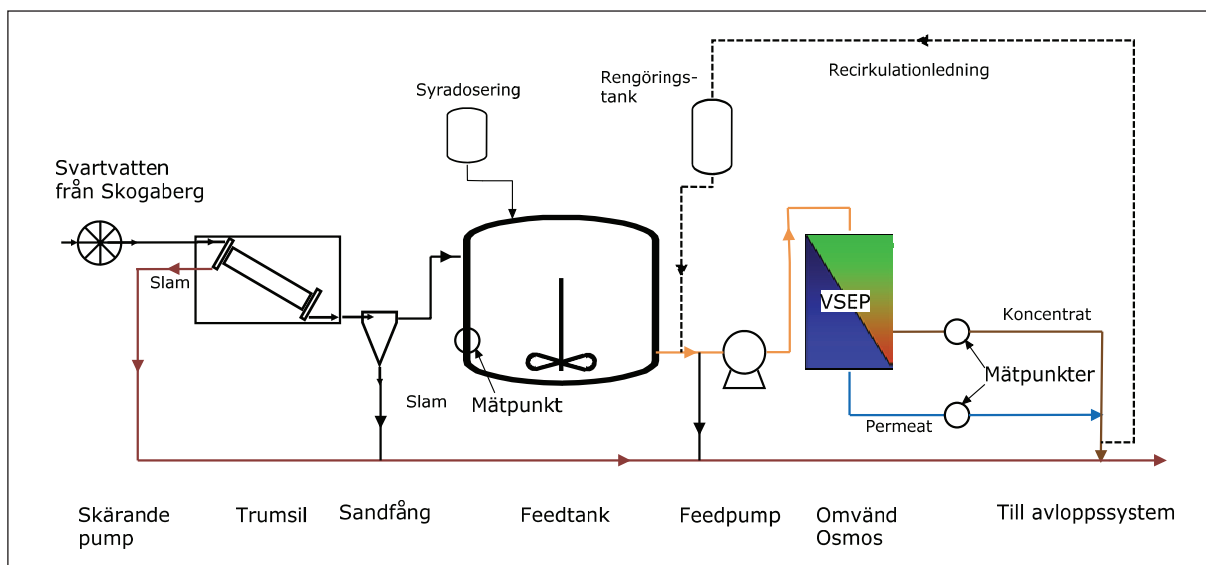


Figur 10.3 Bild över pilotuppställningen för Skogaberg.

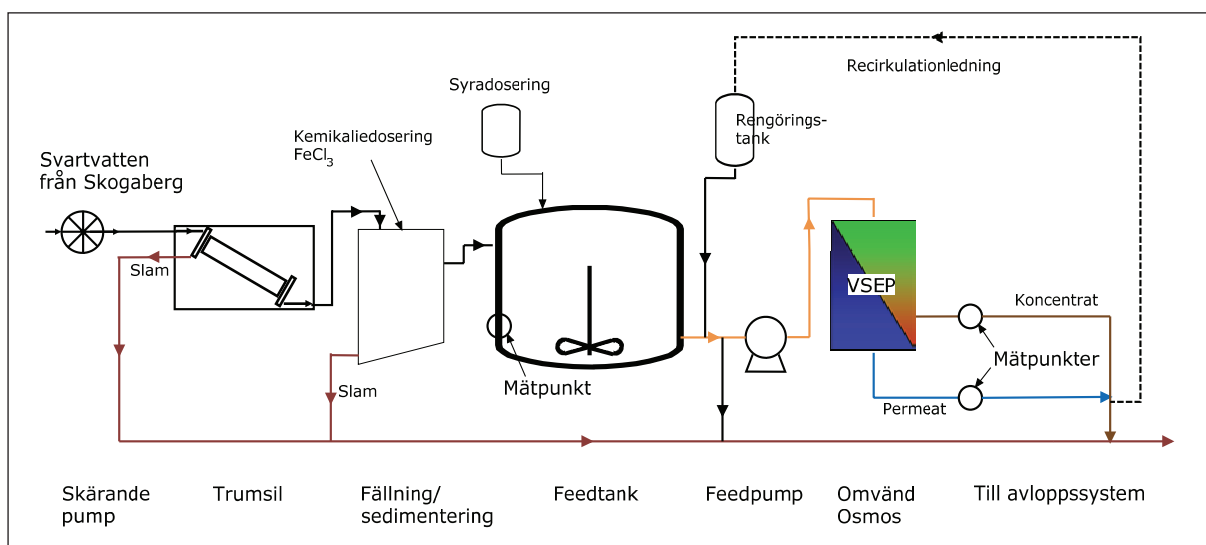
Recirkulations-/Förträngningsmode

Pilotanläggningen har körts i två olika inställningar, "modes":

- Recirkulationsmode: Ett koncentrat och permeat produceras kontinuerligt och koncentratet recirkuleras över feedtanken (utjämningsstanken). I feedtanken blir svartvatten då mer och mer koncentrerat allteftersom körningen fortskrider.
- Förträngnings- eller purgemode. Uppkoncentreringen sker normalt genom att, vid ett visst tryck (t.ex. 20 bar), pumpa in silat svartvatten in i membranpaketet. Vattnet trycks genom membranen och ett rent permeatflöde produceras samtidigt som ventilen i koncentratledningen är stängd så att inget koncentrat produceras. Detta innebär att kvarvarande svartvatten in i membranpaketet blir mer och mer koncentrerat (de flesta salter stannar kvar i membranpaketet medan vatten trycks igenom). Efter en viss inställd tid av uppkoncentrering öppnas koncentratventilen, trycket sänks och koncentratet förträngs i membranpaketet av inkommande silat svartvatten. Förträngningen sker vid relativt högt flöde och under en kort tid (ca 10 s). Efter förträngningen stängs koncentratventilen igen och påbörjas nästa uppkoncentrering.



Figur 10.4a Schema över pilotuppställningen i Skogaberg, förträngningsmode.



Figur 10.4b Schema över pilotuppställningen i Skogaberg inklusive fällningssteg, förträngningsmode.

Förträngningsmoden är den inställning som skulle tillämpas i en fullskalanläggning. Recirkulationsmoden har testats för att få en bättre förståelse för membranfiltreringsprocessen, i synnerhet för att undersöka vid vilken uppkoncentreringsgrad utfällning av olösliga metallsalter startar.

I normalfallet har membranläggningen under en körning drivits vid ett konstant tryck, en fast uppkoncentrerings- och tömningstid samt en konstant vibrationsamplitud.

Kemfällning före RO

Försök har också genomförts med kemfällning före RO (i förträngningsmode) för att undersöka om utökad förbehandling med kemfällning ger förbättrad membranfiltrering (figur 10.4.b)

Inställningar

De viktigaste inställningar som tillämpades i förträngningsmoden (purgemod) för tre olika membranpaket är sammanfattade i tabell 10.3. Vibrationsamplituden som tillämpades under alla körningar var ca 2 cm (3/4 inch).

Innan en körning påbörjades gjordes en fluxtest med dricksvatten under standardförhållanden: 11,5 bar och en temperatur om 20 °C.

Vanligtvis rengjordes membranpaketet med tvättkemikalier varje gång efter det att en körning avslutades.

Tabell 10.3a Inställningar i förträngningsmode, membranpaket: LFC-1.

Inställningar LFC 1									
Batch/ körning	Start datum	Konc. tid (s)	Purge tid (s)	Konc. tryck (Bar)	Vol. konc./ purge (l)	Flux* (ml/min)	Tvätt innan körningen	Prov	Antal dygn
Batch 3	2006-01-03	900	15	20/25/30	1,1/1,3	650			0,5
Batch 4	2006-01-04	999	10	20	0,74	580			0,5
Batch 5	2006-01-12	999	10	20	0,7	640	NC2	ja	1
Batch 6	2006-01-31	999	10	20	0,7	565		ja	1
Batch 7	2006-02-21	999	10	20	0,95	640	NC2		0,5
Batch 8	2006-02-28	999	10	20		335	NC2/NC4/NaOH		0,2
Batch 9	2006-03-01	999	10	24	0,6/0,7	525		ja	0,5
Batch 10	2006-03-14	999	10	25/30	0,94			ja	0,5
Batch 11	2006-03-21	1 250	13	20	0,9	580	NC2/MCT511/MCT882	ja	0,5
Batch 12	2006-04-11	1 200	12	22/24	0,92	625	MCT511	ja	2
Batch 13	2006-04-25	1200	12	20	0,89/1,08	570		ja	3
Batch 14	2006-05-10	800	12	20	1,1/1,2	425	MCT511/MCT822/NC4/MCT511	ja	3
Batch 15	2006-05-16	1 200	12	20	1,15/1,2	440	MCT511	ja	4
Batch 16	2006-05-23	1 200	12	20	1,15	450	MCT511	ja	2
Batch 17	2006-05-30	1 200	12	20	1,15	425	MCT511	ja	2
Batch 18	2006-06-01	1 200	12	20	1,15	435	MCT511	ja	2
Batch 19	2006-06-08	1 200	12	20	1,15		MCT511	ja	2
Batch 20	2006-06-13	1 200	12	20	1,15		MCT511	ja	4
Batch 21	2006-06-20	1 200	12	20	1,15		MCT511	ja	3
Batch 22	2006-06-27	1 800	12	20	1,15	330	MCT511	ja	3
Batch 23	2006-07-04	1 800	9	20	0,83		MCT511	ja	3

* Genomfördes med dricksvatten vid 11,5 bar och 20 grader.

Tabell 10.3b Inställningar i förträngningsmode. Membranpaket LFC-3, nr 1.

Inställningar LFC 3, stack 1									
Batch	Start	Konc. tid (s)	Purge tid (s)	Konc. tryck (Bar)	Vol. konc./ purge (l)	Flux* (ml/min)	Tvätt innan körningen	Prov	Antal dygn
Batch 1	2006-08-23	1 800	12	20	1,21	585		Ja	2
Batch 2	2006-08-29	1 800	12	20	1,2	530	MCT511/NC4	Ja	2
Batch 3	2006-09-13	1 800	12	20	1,2	370	NC2/NC4	Nej	2
Batch 4	2006-09-19	2 700	12	25	1,2	335	NC2	Ja	2
Batch 5	2006-09-26	1 800	12	20	1,23	331	MCT882/MCT511	Ja	6
Batch 6	2006-10-03	1 440	12	25	1,2	335	MCT511/NC2	Nej	2
Batch 7	2006-10-10	1 440	12	25	1,22	324	NC2	Ja	3
Batch 8	2006-10-17	2 700	12	25/30	1,24	314	MCT511	Ja	9
Batch 9	2006-10-26	3 600	12	25/30	1,2	255	NC2	Ja	6
Batch 10	2006-11-08	5 400	12	25/30	1,2	225	NC2/NC4	Ja (ej sänt)	5
Batch 11 s**	2006-11-15	1 800/2 700	12	20/25	1,2	232	NC2/511/882/NC4	Nej	1,5
Batch 12 s**	2006-11-21	1800	12	20	1,2	260	MCT511/HCI	Nej	3 tim.

* Genomfördes med dricksvatten vid 11,5 bar och 20 grader. ** Sedimenterat/fällt svartvatten.

Tabell 10.3c Inställningar i förträngningsmode. Membranpaket LFC-3, nr 2**.

Inställningar LFC 3, stack 2									
Batch	Start	Konc. tid (s)	Purge tid (s)	Konc. tryck (Bar)	Vol. konc./ purge (l)	Flux* (ml/min)	Tvätt innan körningen	Prov	Antal dygn
Batch 1	2006-11-23	1800	12	10,5-13	1,2	687	Nej	Nej	1
Batch 2	2006-11-28	1800	12	13	1,2	700	NC2	Nej	1
Batch 3	2006-12-04	2700/2072	12	16,5/21,5	1,2	568	NC2/NC4	Ja	4
Batch 4	2006-12-11	2700	12	16,5	1,2	611	NC2/HCI	Nej	2
Batch 5	2006-12-18	2700	12	16,5	1,2	597	NC2/HCI	Nej	3

* Genomfördes med dricksvatten vid 11,5 bar och 20 grader. ** Sedimenterat/fällt svartvatten.

Viktigaste slutsatser

De viktigaste slutsatserna från försöken är:

Uppkoncentreringsfaktor/återvinningsgrad

Med omvänd osmos har silat pH-sänkt svartvatten kunnat uppkoncentreras med en faktor upp till ca 20 ggr. Vid en uppkoncentreringsfaktor upp till 15 ggr och ett tight RO-membran, typ LFC3 har alla näringsämnen (N, P, K och S) kunnat återvinnas till 90 % eller mer i ett koncentrat.

Sammansättning

Med hjälp av resultaten från pilotförsöket kan lätt en sammansättning för koncentrat och permeat beräknas utifrån en viss sammansättning för silat svartvatten, en uppkoncentreringsfaktor samt ett konstant förhållande för en viss komponent mellan halten på permeat- och koncentrationsidan. Detta förhållande är avhängigt av tätheten på membranet, och storleken samt laddningen av komponenten/jonen. Resultaten av en sådan beräkning redovisas i tabell 10.4a (LFC1) resp. tabell 10.4b (LFC3).

En bild på hur feed, permeat och koncentrat kan se ut rent visuellt ges i figur 10.5.

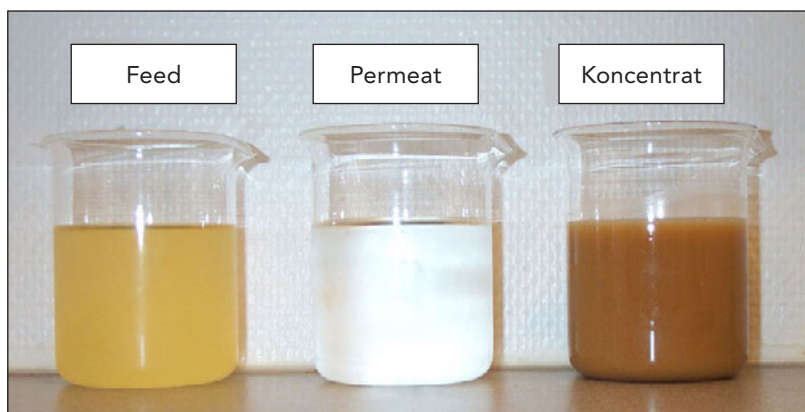
Tabell 10.4a Typisk sammansättning för silat svartvatten, koncentrat och permeat vid 15 ggr uppkoncentreringsgrad med ett LFC1-membran.

Parameter	Cp/Cc* %	Silat svartvatten mg/l	Koncentrat mg/l	Permeat mg/l	Återvinning %
Susp. ämnen	0	640	9600	0	100
COD	0,4	1600	22000	90	95
TOC	0,3	400	5700	16	96
N-tot	1,9	310	3600	70	79
NH ₄ -N	3,1	130	1400	42	70
P-tot	0,6	22	300	1,8	92
PO ₄ -P	0,6	18	250	1,4	93
S-tot	0,6	26	360	2,1	93
K	3,0	49	520	16	70
Cl (doseras som HCl)	4,0	100	4800	190	-

Tabell 10.4b Typisk sammansättning för silat svartvatten, koncentrat och permeat vid 15 ggr uppkoncentreringsgrad med ett LFC3-membran.

Parameter	Cp/Cc* %	Silat svartvatten mg/l	Koncentrat mg/l	Permeat mg/l	Återvinning %
Susp. ämnen	0	640	9600	0	100
COD	0,4	1600	22000	92	94
TOC	0,2	400	5700	12	97
N-tot	1,0	310	4000	39	88
NH ₄ -N	0,8	130	1700	15	89
P-tot	0,02	22	320	0,05	99,8
PO ₄ -P	0,02	18	270	0,05	99,7
S-tot	0,09	26	390	0,3	98
K	0,7	49	670	4,6	91
Cl (doseras som HCl)	0,6	100	7000	44	-

* Permeatkonzentration delat på koncentratkonzentration.



Figur 10.5 Visuell bild för feed, permeat och koncentrat.

Fouling och permeatflöde

Vid membranfiltrering uppstår fouling: igensättning av membranytan vilket ger en minskning av permeatflödet (vid samma tryck). Detta leder till att membranet regelbundet måste rengöras med tvättkemikalier för att upprätthålla flödet genom membranet.

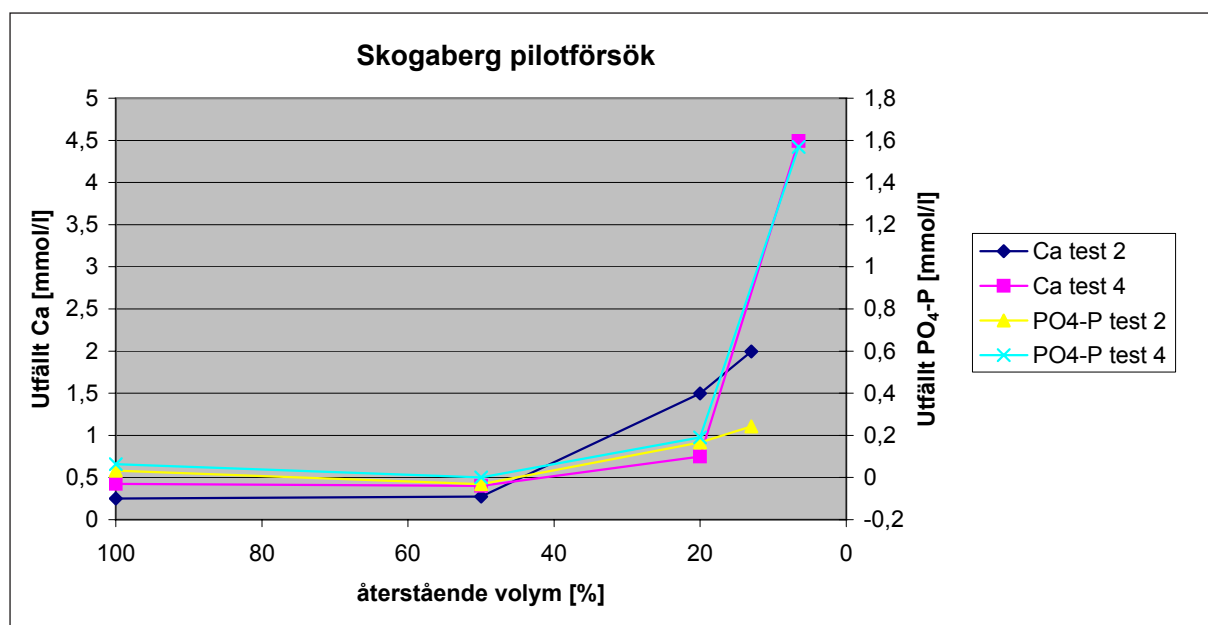
Det finns olika typer av fouling:

- Partikulär fouling: Igensättning av membranet med partiklar.
- Organisk fouling: Igensättning av membranets porer med lösta organiska ämnen.
- Biologisk fouling: Igensättning genom tillväxt av bakterier på membranytan.
- Oorganisk fouling: Utfällning av olösliga metallsalter på membranytan.

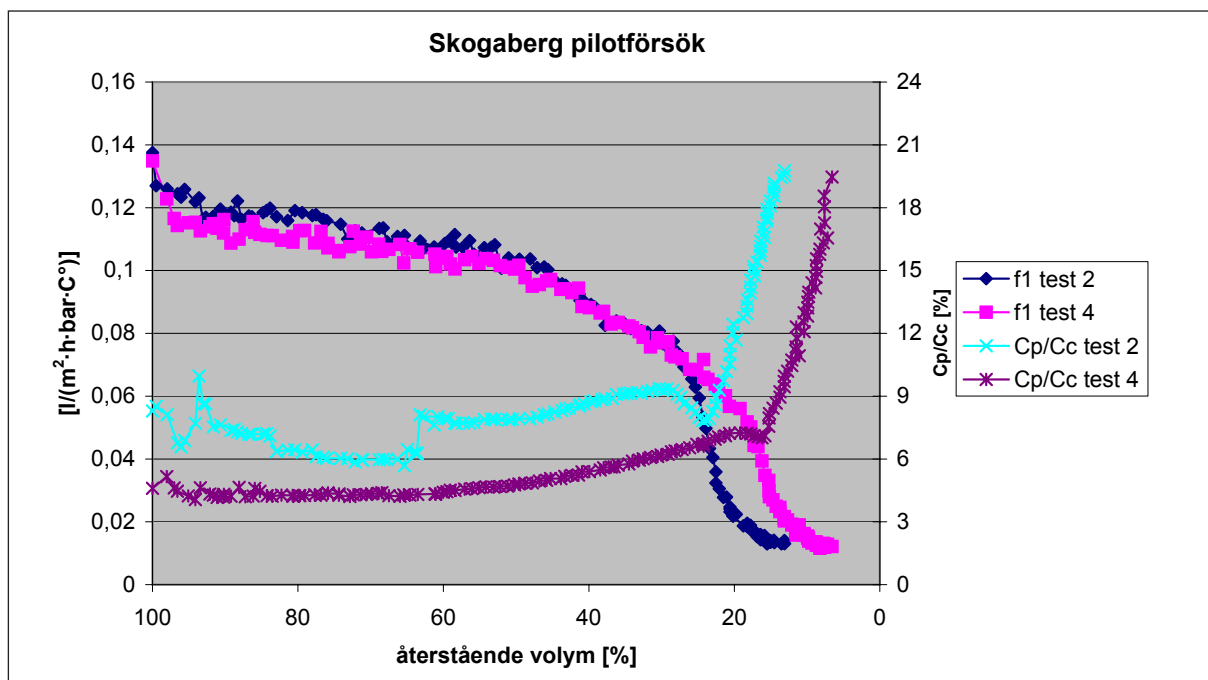
Alla fyra typer av fouling har konstaterats i försöket i Skogaberg (Rud, 2006).

Den fouling som är svårast att ta bort och ger en relativt snabb minskning av permeatflödet är oorganisk fouling.

Uppkoncentrering av icke pH-sänkt svartvatten ger fouling p.g.a. utfällning av främst kalciumkarbonat och kalciumfosfat. Utfällningen kan teoretiskt redan börja vid en uppkoncentreringsfaktor om 2 men tilltar i praktiken kraftigt vid en uppkoncentreringsfaktor om ca 4–5 och mer. Detta framgår tydligt av figur 10.6 där kalcium- och fosfatutfällningen i koncentratet redovisas som funktion av den återstående volymen under uppkoncentreringen (resultat från två körningar i recirkulationsmode). Effekten av utfällningarna på permeatflödet är redovisat i figur 10.7. Det specifika permeatflödet (per °C och bar, korrigerat för det osmotiska trycket) minskar snabbt mellan 10 och 30 % återstående volym, alltså vid uppkoncentreringsfaktorer mellan 3 och 10.



Figur 10.6 Utfällning av kalcium och fosfat för två körningar i recirkulationsmode (ingen syradosering).



Figur 10.7 Förlopp av specifikt permeatflöde (f_1) och läckage (C_p/C_c) för två körningar i recirkulationsmode (ingen syradosering).

I figur 10.7 är också läckaget av konduktiviteten (permeatkonduktivitet, C_p , delat på koncentratkonduktivitet, C_c) redovisat som funktion av den återstående volymen. Tydligt syns att när utfällningen tilltar och permeatflödet kraftigt minskar då försämras även permeatkvaliteten.

Observerade iakttagelser blir tydligare och begripligare om membranteorin studeras. Enligt membranteorin är flödet genom ett membran proportionellt med tryckskillnaden över membranet, temperaturen

(p.g.a. att viskositeten minskar vid högre temperatur) och membranarean (ekvation 1, tabell 10.5). Fouling gör att effektiv membranarea minskar genom igen-sättning och därmed minskar flödet (vid samma tryck och temperatur).

Vidare är, enligt teorin (Baker, 2004), salttransporten genom membranet proportionell med membranarean och salthaltsskillnaden mellan koncentrat och permeat (ekvation 2, tabell 10.5). Då permeatsalthalten brukar vara försumbar relativt koncentratsalthalten

Tabell 10.5 Permeatflöde och saltflux genom ett membran enligt membranteorin.

Permeatflödet genom membranet kan beräknas med:

$$F_p = f_1 \cdot T \cdot A \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) \quad (1)$$

där

F_p = permeatflöde (l/h)

f_1 = specifikt flöde, konstant vid oförändrad viskositet och ingen fouling (l/m².h. °C. bar)

T = temperatur (°C)

A = membranarea (m²)

ΔP = tryckskillnad över membranet (bar)

$\Delta \Pi$ = osmotisk tryckskillnad över membranet (bar)

Saltfluxet genom membranet kan beräknas med:

$$S_p = F_p \cdot C_p = f_s \cdot A \cdot (C_c - C_p) \quad (2)$$

där

S_p = saltmängd i permeat (kg/s)

f_s = saltpermeabilitetskonstant (m/s)

A = membranarea (m²)

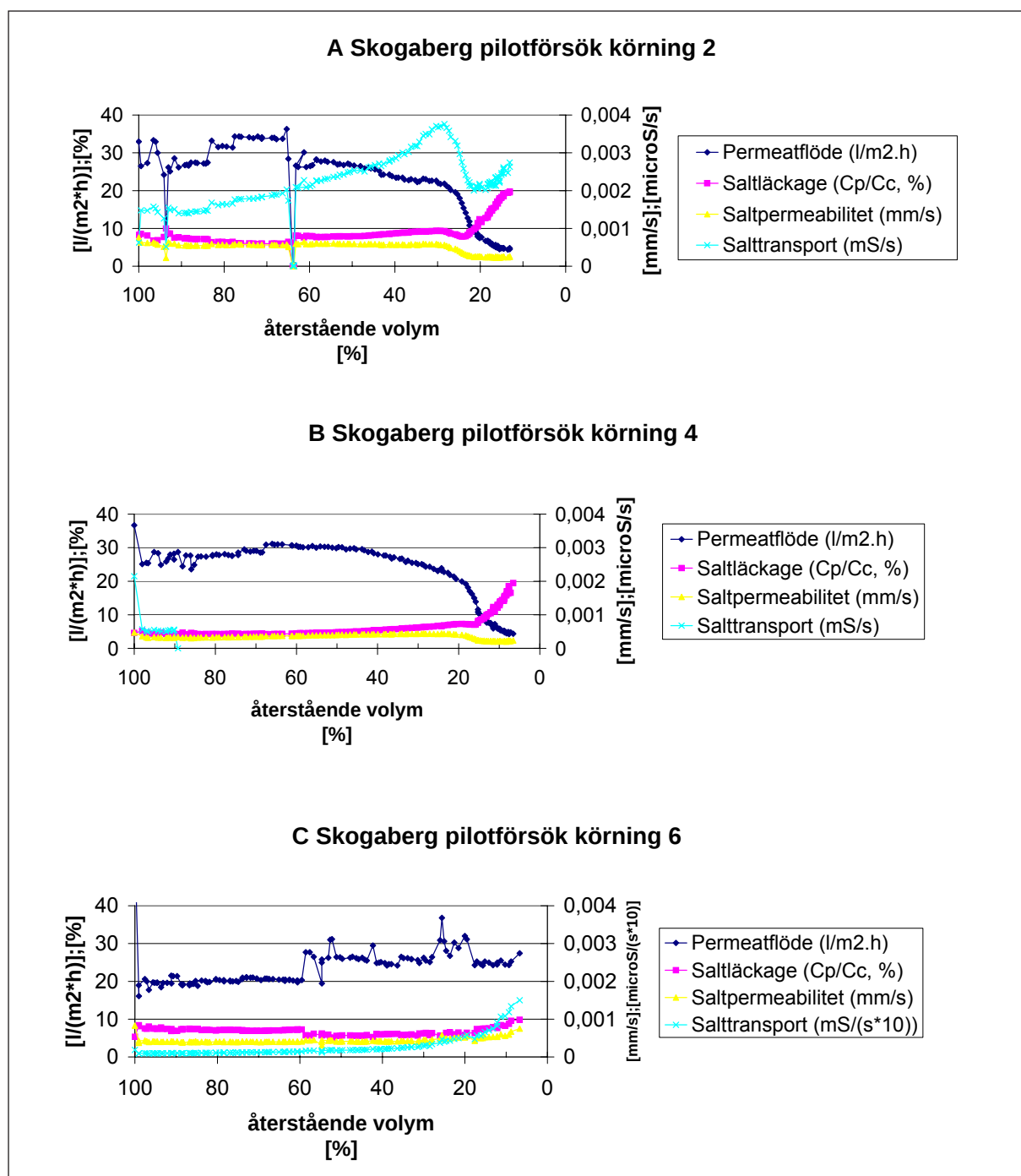
C_c = salthalt i koncentrat (kg/m³)

C_p = salthalt i permeat (kg/m³)

är salttransporten genom membranet i praktiken proportionell med koncentratsalthalten. Vid fouling sätts membranet igen och därmed minskar salttransporten relativt koncentratsalthalten med andra ord saltpermeabiliteten minskar. Detta framgår av figur 10.8 där permeatflödet, förhållandet permeat-/koncentratkonduktivitet samt salttransporten och saltpermeabiliteten under uppkoncentreringen är redovisat för tre olika körningar: två utan syradosering och kraftig

utfällning av olösliga metallsalter (körning 2 och 4) och en med syradosering och ringa utfällning av olösliga metallsalter (körning 6).

Då foulingen, utfällning av olösliga metallsalter börjar (körning 2 och 4), minskar saltpermeabiliteten genom igensättning av effektiv membranyta. Salttransporten genom membranet minskar under denna fas (permeatflödet minskar kraftigare än permeatkonduktiviteten ökar). Efter ett tag, förmodligen då hela



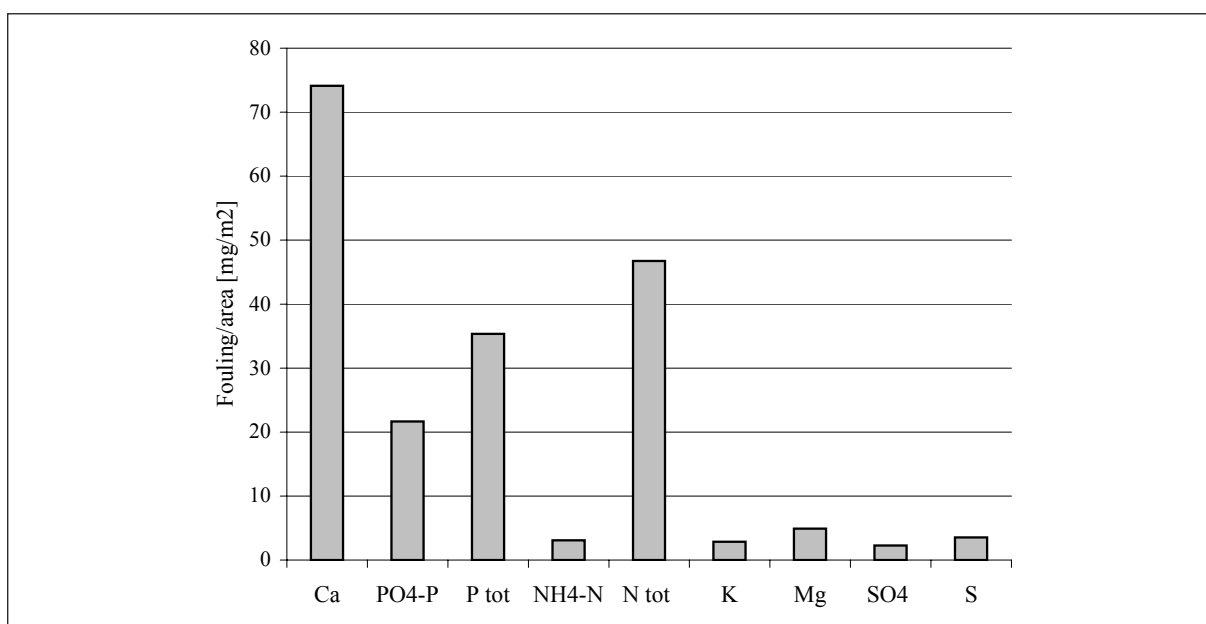
Figur 10.8a,b,c Permeatflöde, förhållande permeat-koncentratkonduktivitet (saltläckage), saltpermeabilitet och salttransport för tre olika körningar. Första två figurena: utan syradosering, tredje figuren: med syradosering (ner till pH 6).

membranytan är täckt med utfällningsprodukter sker en stabilisering. Saltpermeabiliteten är mer eller mindre konstant igen, fast på en lägre nivå och membran-teorin, ekvation 2, gäller igen, i alla fall tillfälligt. Då permeatflödet fortfarande minskar relativt snabbt innebär detta att förhållandet mellan permeat- och koncentrationkonduktiviteten ökar kraftigt. Även salttransporten genom membranet ökar nu igen då koncentrationkonduktiviteten alltså ökar.

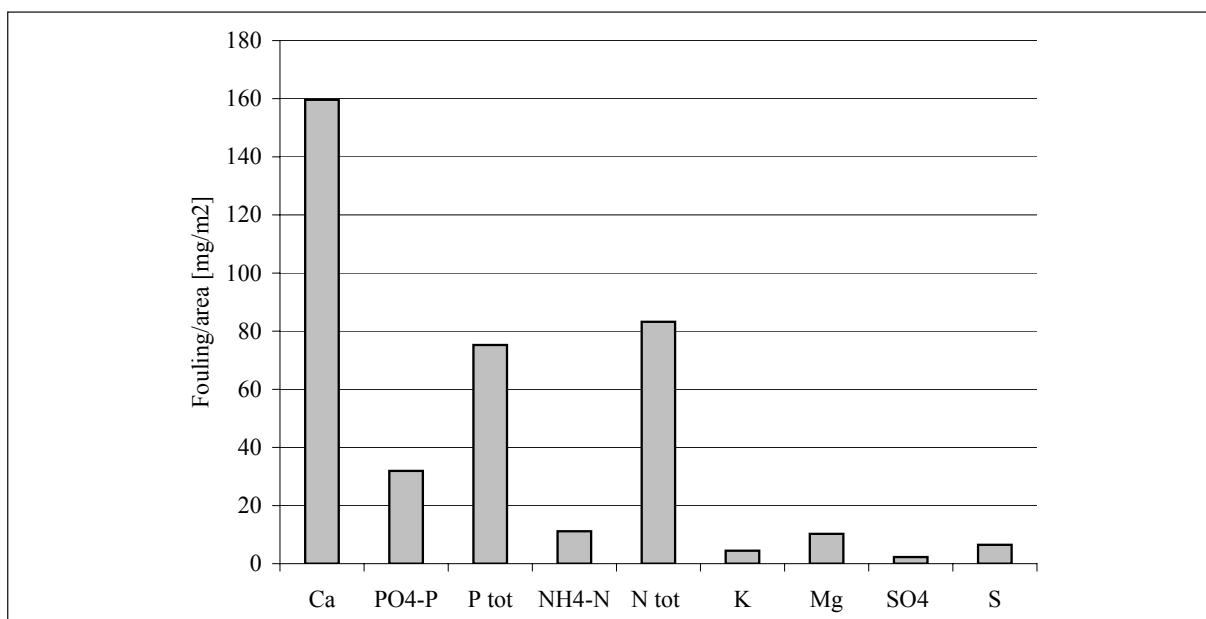
Om pH-värdet på silat svartvatten sänks blir utfällningen betydligt mindre och beskrivna fenomen ovan

sker inte (figur 10.8, C, körning 6): Permeatflödet är mera konstant och i stället för en sänkning av saltpermeabiliteten sker en ringa ökning i slutet av uppkoncentreringen. En förklaring för detta kan vara att allt mer saltsyra doseras under uppkoncentreringen och därmed höjs kloridjonkoncentrationen relativt mycket. Klorid är en envärd jon som relativt lätt läcker genom ett membran.

Analys av foulingen visar att foulingen innehåller relativt mycket fosfor och kalcium, se figur 10.9a och 10.9b (Rud, 2006). För VSEP-membrantekniken gäller



Figur 10.9a Sammansättning av fouling (oorganiska komponenter, samt N-tot & P-tot), första 19 membranplattorna, resultat test 4, recirkulationsmode utan syradosering (Rud, 2006).



Figur 10.9b Sammansättning av fouling (oorganiska komponenter, samt N-tot & P-tot), sista 19 membranplattor, resultat test 4, recirkulationsmode utan syradosering (Rud, 2006).

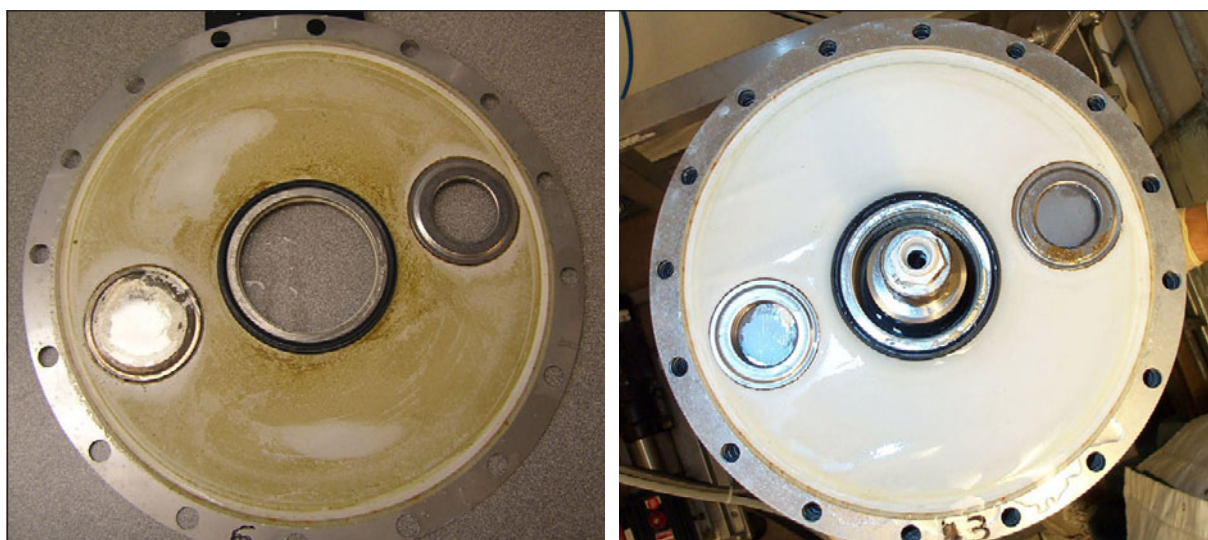
att ju längre ner i membranpaketet svartvattnet når desto mer koncentrerat blir det. Alltså är risken för utfällning av olösliga metallsalter mycket större längre ner i membranpaketet. Som framgår är mängden av utfällningarna i den nedre hälften av membranpaketet betydligt större än i den översta hälften.

Påfallande är också att så fort utfällning av olösliga salter sker, så blir även organiska ämnen inbyggda i foulingen. Detta innebär att minskad oorganisk fouling även ger minskad organisk fouling. Att undvika utfällning av olösliga metallsalter är därmed en förutsättning för effektiv membranfiltrering. I figur 10.10 ges ett exempel på foulingens visuella utseende efter en uppkoncentreringskörning utan syradosering, alltså

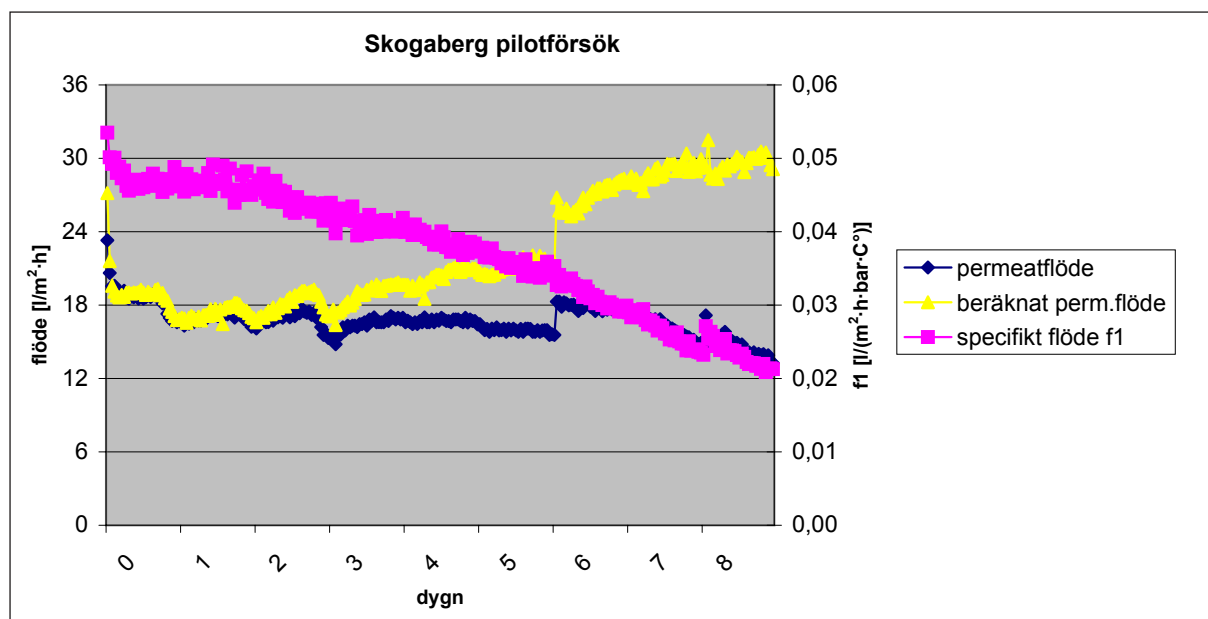
under starkt övermättade förhållanden och efter en körning med syradosering. Skillnaden är stor.

Om pH-värdet på svartvattnet sänks till 5,5–6,0 kan uppkoncentreringsgraden ske till högre uppkoncentreringsgrader utan att en snabb minskning av permeatflödet sker. Vid dessa låga pH-värden har permeatflödet kunnat upprätthållas i flera dygn utan att membranet behövs tvättas/rengöras. Som mest har en körning kunnat pågå i nio dygn utan tvätt/rengöring av membranet. Resultatet av denna körning redovisas i figur 10.11.

Från denna figur framgår dock tydligt att det specifika permeatflödet, f_1 , minskar stadigt efter några dygns körning. Skillnaden mellan det uppmätta och



Figur 10.10 Typisk syn av en membranplatta efter körning utan syradosering (tv) och med syradosering (th).



Figur 10.11 Typiskt förlopp för permeatflöde vid långtidskörning utan tvätt i förträngningsmode. Resultat av körning 8, LFC3-membran.

beräknade permeatflödet blir då större och större (permeatflödet beräknas med hjälp av det initiala specifika flödet, aktuell tryckskillnad korrigerat för det osmotiska trycket samt aktuell temperatur, se ekvation 1 i tabell 10.5). Denna stadiga minskning av det specifika flödet verkar främst vara en följd av organisk, samt eventuell bakteriell fouling. Största delen av permeatflödesminskningen kan nämligen relativt enkelt återfås genom spolning med alkaliska tvättmedel som är lämpliga för att ta bort organisk fouling. I försöket har främst NC2 som alkaliskt tvättmedel används. Specifikationen av detta tvättmedel ges i tabell 10.6.

Figur 10.12 och figur 10.13 anger membranegenskaperna (specifikt flöde, läckage) i början av varje ny körning. Efter i stort sett varje körning (undantagen anges i figuren) rengjordes membranpaketet med tvättkemikalier, alltså främst NC2.

Den kraftiga tillbakagången i det specifika flödet för LFC3, stack 1 från körning 2 till 3, beror (i alla fall delvis) på att membranplattorna skadades i samband med en demontering. Membranplattorna tätades sedan igen genom limning varvid relativt mycket effektiv membranyta försvann.

Från figur 10.12 framgår att det är svårt att få tillbaka det ursprungliga permeatflödet helt efter långkörningar (kontinuerlig körning under några dygn eller mer utan avbrott och utan tvätt under körningen, koncentrationen ca 11 ggr för LFC1 och varierande mellan 10 och 30 ggr för LFC3) och permeatflödet har minskat allteftersom trots alkaliska tvättsekvenser/rengöringar efter varje körning. I ett antal fall kunde bara en rengöring med en stark syralösning (i de flesta fall HCl) vid ett pH-värde om ca 1,5 få upp permeatflödet igen. Detta tyder på en oorganisk utfällning som sätter sig hårt på membranytan och som är mycket svårt att ta bort.

Rent allmänt har det visat sig att det kan vara besvärligt att ta bort scaling (utfällning) från membranytan även om utfällningen främst består av ämnen såsom kalciumfosfat och kalciumkarbonat som i princip borde kunna lösas upp relativt lätt med hjälp av syra. I vissa fall har pH-värdet på tvättvätskan behövt sänkas till ca 1,5 för att lösa upp scalingen och trots det har permeatflödet inte kunnat återställas helt.

Alltså återigen: Undvikande av utfällning av olösliga metallsalter är en förutsättning för effektiv membranfiltrering.

Teoretiska beräkningar och mätningar visar att kalciumfosfat (som apatit – kalciumhydroxifosfat) fortfarande kan falla ut i ett koncentrat (med ca 10

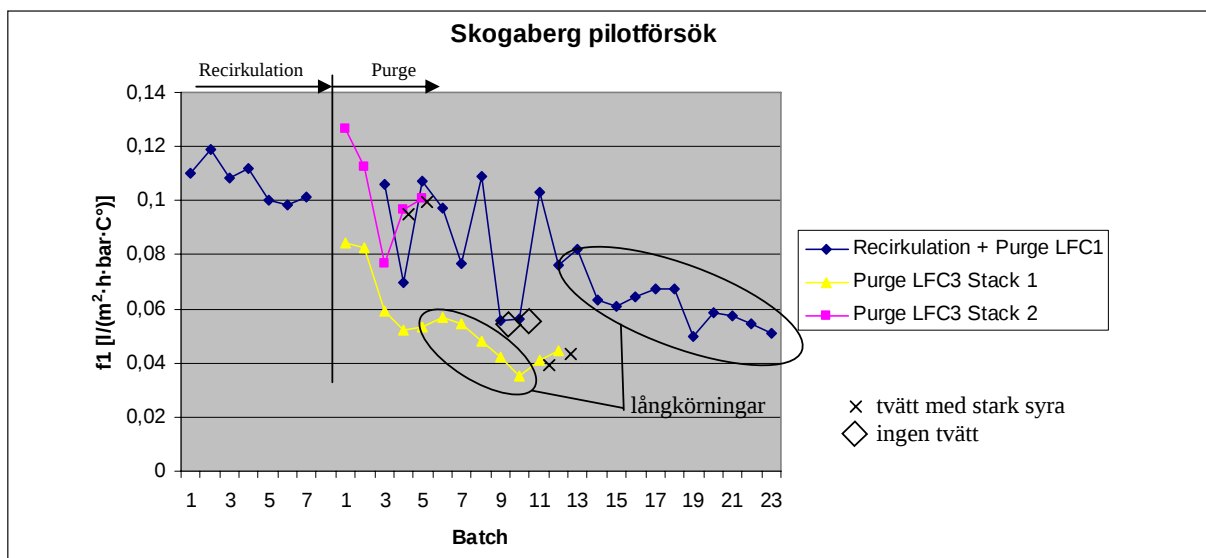
eller mer ggr uppkoncentrering) vid ett pH-värde om 5,5, även om det är i en mycket mindre utsträckning än vid pH 7. För att undvika detta ska pH-värdet i svartvattnet sänkas till pH 4,5–5. Nackdelen med detta är att syraförbrukningen och det osmotiska trycket ökar med ca 20–30 %.

Närmare undersökningar av fouling (producerat från pH-sänkta körningar, pH 5,5) har emellertid visat att foulingen inte innehåller nämnvärda halter av fosfor. Däremot har förhöjda halter av framförallt kalcium och aluminium konstaterats (Wilén, 2007). Detta är svårförklarigt. En kalciumkarbonatutfällning borde vara utesluten vid pH 5,5. Eventuellt skulle kalciumsulfat eller kalciumsulfid ha kunnat fällas ut, men detta har inte kunnat bevisas p.g.a. opålitliga svavelanalyser. Orsaken till att aluminium påträffats i foulingen är, än så länge, en öppen fråga då aluminiumhalterna i svartvattnet ej är särskilt höga (ungefär 1 mg/l). Dock kan t.ex. aluminiumhydroxid falla ut vid uppkoncentrering (pH=5,5 är det "optimala" pH-värdet för utfällning av aluminiumhydroxid).

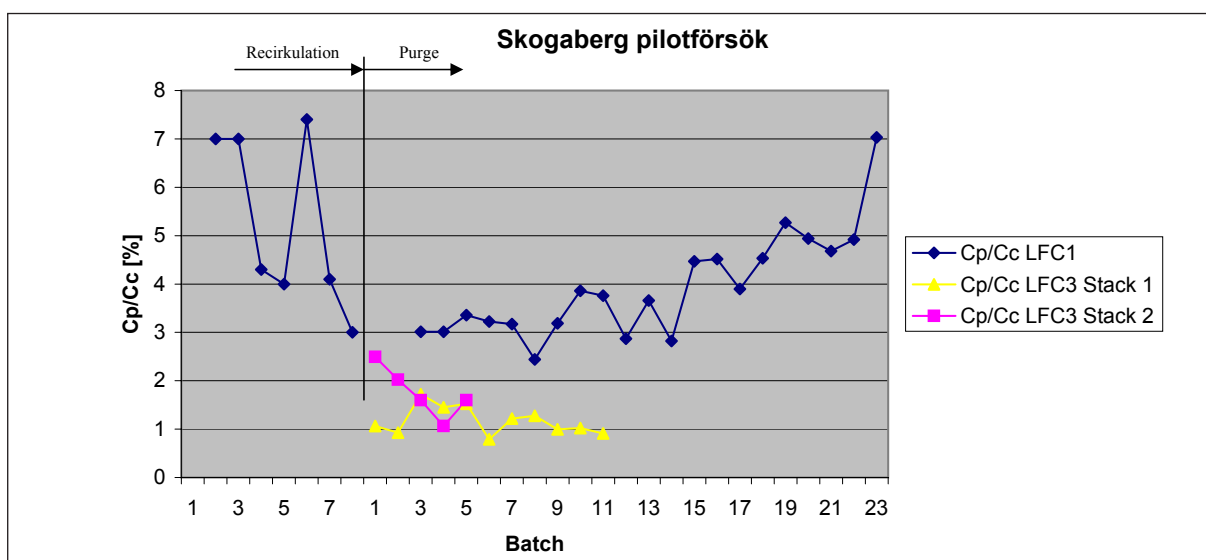
Förloppet av läckaget (konduktiviteten i permeatet delat på konduktiviteten i koncentratet) med tiden är redovisat i figur 10.13. För LFC1-membranet känner man igen förloppet från figur 10.7. Läckaget tilltar då permeatflödet minskar (förmodligen p.g.a. utfällning av olösliga metallsalter). Från figur 10.14 framgår dock att även saltpermeabiliteten ökar vilket inte är i överensstämmelse med tidigare kurvor. Alltså samtidigt som det specifika flödet minskar ökar saltpermeabiliteten. Den effektiva ytan minskar samtidigt som membranet öppnar sig, vilket innebär att membranegenskaperna har ändrat sig. Vid visuell kontroll, vid öppnande av membranpaketet, kunde många sprickbildningar på membranytan iakttas. På vissa ställen hade sand legat och gnuggat och polerat och därmed förmodligen förstörd effektiv membranyta. Detta kan ha lett till ökat saltläckage.

Efter dessa iakttagelser installerades ett sandfång för att undvika att fin sand skulle komma in i membrananläggningen.

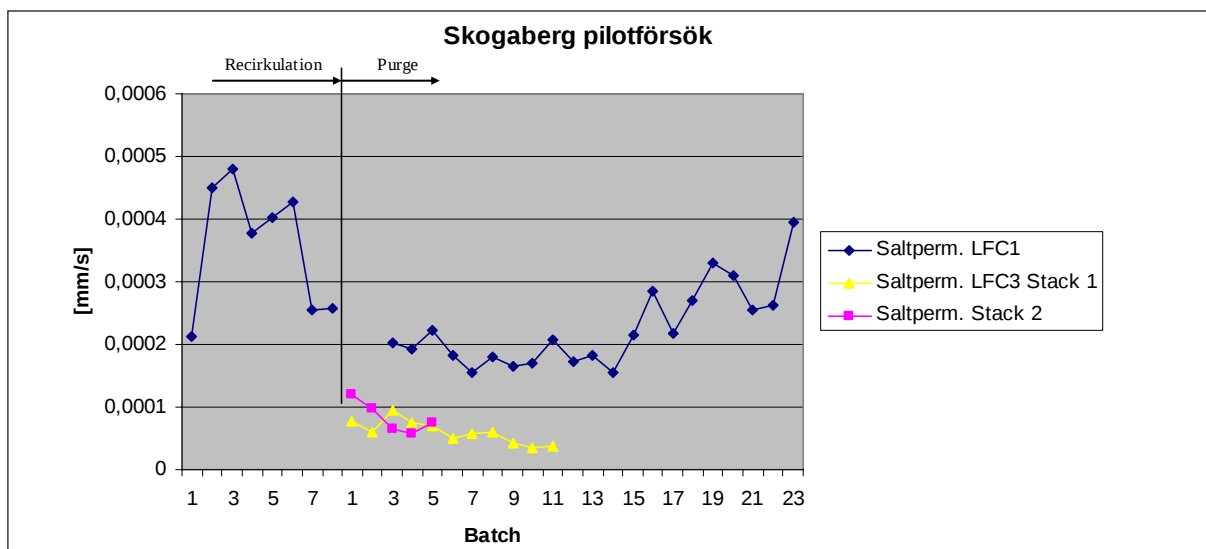
Det tätare LFC3-membranet visade ett annat förlopp: det första LFC3-membranpaketet, stack 1, visar ett ganska konstant läckage med tiden trots att permeatflödet går ned kraftigt, se figur 10.12 och 10.13. Detta innebär i praktiken att salttransporten genom membranet (relativt salthalten i koncentratet) minskar med tiden, alltså att membranporerna sätter igen. Detta syns ganska tydligt i figur 10.14 där förloppet av saltpermeabiliteten med tiden är redovisat.



Figur 10.12 Förlopp av specifikt flöde (f_1) med tiden för 3 olika membranpaket.



Figur 10.13 Förlopp av läckage (C_p/C_c) med tiden för 3 olika membranpaket.



Figur 10.14 Förlopp av saltpermeabilitet med tiden för tre olika membranpaket.

Kemisk fällning som förbehandling

Försök med kemisk fällning som förbehandling före membranfiltrering genomfördes för att undersöka om partikel- och fosfatavskiljning, som kemfällning åstadkommer, minskar problemen med fouling och minskat permeatflöde.

En FeCl_3 -dosering om ca 100 mg/l tillämpades för att sänka pH-värdet på svartvattnet till 5,5–6,0. Doseringen skedde till en fällnings-/sedimenteringstank (satsvis behandling). Efter sedimenteringen av slammet dekanterades klarfasen till feedtanken före VSEP-anläggningen. I feedtanken sänktes pH-värdet ytterligare till pH 5,5 med HCl.

I dekantatet uppmättes låga fosfat- (< 0,5 mg/l), och susphalter (< 20 mg/l).

I figur 10.12 (stack 2, LFC3) ser vi dock att det specifika flödet (efter varje körning med rengöring med NC2) minskade kraftigt trots den goda partikel- och fosfatavskiljningen. När till slut rengöring med en stark syra tillämpades steg det specifika flödet igen. Detta tyder på utfällning av olösliga metallsalter och frågan är om möjliga foulingsproblem med kalciumfosfat-utfällningar inte har ersatts med foulingsproblem med järnhydroxidutfällningar (resthalter av löst järn efter fällning är relativt mycket höga: 5–15 mg/l).

Ytterligare försök skulle behövas för att svara på denna fråga.

Rengöring av membranpaketet

Rengöring skedde oftast med en NC2- eller en MCT511-lösning (vid ett pH-värde om ca 11), två liknande alkaliska rengöringsmedel som är lämpliga för att ta bort organisk fouling. I ett flertal fall användes även en NC4-lösning vid ett pH-värde om ca 2,5 för att ta bort eventuell oorganisk fouling.

Även andra rengöringskemikalier tillämpades:

- Natronlut, NaOH-lösning, tillämpat pH-värde: 11–12, för att kontrollera om endast tvättning vid högt pH-värde kunde ta bort organisk fouling
- Ariel, tillämpat pH-värde: ca 7 för att undersöka om ett helt vanligt tvättmedel kunde ta bort fouling.
- Vanligt dricksvatten. Många gånger stod membranpaketet i endast vatten över natten eller till och med i ett antal dygn.
- MCT882 – speciellt lämpligt för att ta bort biologisk samt organisk fouling. MCT882 användes vid ett pH-värde om ca 2,5.
- Saltsyra, HCl-lösning, tillämpat pH-värde: 1–1,5,

för att undersöka om oorganisk fouling som fastnat hårt kunde lösas upp.

Tvättarna skedde vid hög temperatur, ca 50 °C.

Specifikationen av de mest använda tvättkemikalierna, NC2 och NC4, redovisas i tabell 10.6.

Slutsatser:

- Både NC2 och MCT511 har fungerat många gånger för att få bort organisk fouling och för att återfå (största delen av) permeatflödet efter en körning. Alkalisk tvättning med endast natronlut har inte gett ett tillräckligt bra resultat.
- Tvättning med ett vanligt tvättmedel såsom Ariel gav ett magert resultat. Permeatflödet ökade bara något efter tvättning med Ariel.
- Syratvättar: MCT882 var framgångsrik en gång för att ta bort fouling då varken NC2 och MCT511 gav tillräckligt bra resultat. En annan gång lyckades MCT882 dock inte få upp permeatflödet. NC4 har gett varierande resultat. Oftast var effekten begränsad framförallt för de körningar där svartvattnets pH hade sänkts till 5,5–6.
Saltsyratvättarna vid pH 1–1,5 tillämpades ett antal gånger då permeatflödet hade sänkts kraftigt. I dessa fall kunde permeatflödet höjas något vilket tyder på upplösning av en svårslöslig metallsalt.
- Det har visat sig vara effektivt att låta ett foulat membranpaket stå i vatten över något dygn: I många fall höjdes permeatflödet p.g.a. detta.

Frekvens av tvättning:

Tvättning av membranpaketet skedde i stort sett efter varje körning och i fall av en långkörning (> 2 dgr) ibland även under en körning. Många långkörningar genomfördes dock utan tvättning under körningen. I många fall gick permeatflödet då sakta men stadigt ner efter något dygn. Sedan var det svårt att återställa permeatflödet till utgångsläget. Förmodligen är det bättre att inte låta det specifika permeatflödet sjunka mer än 10–20 % innan en tvätt genomförs så att det är lättare att återfå det ursprungliga permeatflödet. Detta innebär att tvättning borde ske med en frekvens om 1 gång per dygn, alternativt vartannat dygn.

Rekommenderad tvättning blir därmed:

- Alkaliska tvättar, typ NC2, pH 11,5
 - 1 gång per dygn
- Sura tvättar: typ NC4, pH 2
 - 2–3 ggr per vecka

Tabell 10.6 Specifikation av använda tvättkemikalier.

NC2	
Parameter	Halt
Natriumdodecylbensensulfonat	2–4 %
Natriumkapryliminopropionat	2–4 %
Trinatriumetylendiamintriacetat	1–2 %
Vatten	Resterande del
Beredning NC2 i pilotförsök: • ca 4 % lösning, 1,2 l NC2 späds med dricksvatten till 30 l • pH justeras med NaOH till ca 11,5	
NC4	
Parameter	Halt
Fosforsyra	20–30 %
Dodecylbensensulfonsyra	2–4 %
Kumensulfonsyra	1–3 %
Hydroxietyletylendiamintriacetat	1 %
Vatten	Resterande del
Beredning NC4 i pilotförsök • ca 0,33 % lösning, ca 100 ml NC4 späds med dricksvatten till 30 l • pH efter spädning: 2,5	

10.4 Dimensionering

I detta kapitel dimensioneras uppkoncentreringsanläggningen i figur 10.15 (dimensioneringen har genomförts i samarbete med Nordcap Membrane Consulting (Hansson, Carl-Henrik, 2007)). Två alternativ har urskiljts: VSEP, figur 10.16 och konventionell membranfiltrering, figur 10.17.

Kort beskrivning av alternativen

Svartvatten från Skogaberg leds med självfall till en pumpstation. Pumpstationen består av en skärande pump som skär sönder större bitar i svartvattnet i mindre bitar. Svartvattnet pumpas sedan upp till en roterande trumsil med 0,6 mm hål. Partiklar större än 0,6 mm avskiljs som rens som leds till ett slamlager.

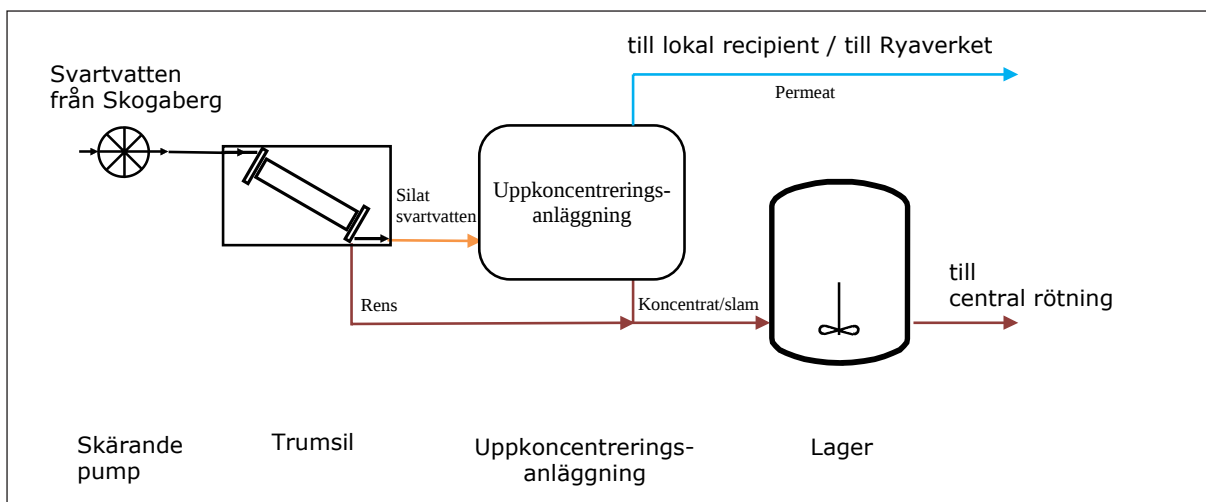
Alternativ 1

Det silade svartvattnet leds via ett sandfång vidare till en omrörd utjämningstank. pH-värdet i tanken sänks till ett fast pH-värde (ca 5) med hjälp av en saltsyra-dosering. Det silade och pH-sänkta svartvattnet leds genom ett pumpsteg till en membranläggning av typ VSEP, omvänd osmos. Med hjälp av högt tryck (15–25 bar) pressas en stor del av vattnet genom membranfiltren och bildar ett permeat medan salterna, jonerna och partiklarna i svartvattnet hålls emot av membranfiltret och bildar ett koncentrat. Beroende på membranets täthet och uppkoncentreringsgraden läcker en liten del av de lösta jonerna genom membranfiltret till permeatet. Största delen av föreningarna i svartvattnet hålls dock kvar i koncentratet. Permeatet kan vara tillräckligt rent för att leda det direkt till den lokala recipienten, Kvillebäcken, alternativt leds permeatet till Ryaverket. Koncentratet leds till samma lagringstank som rensat.

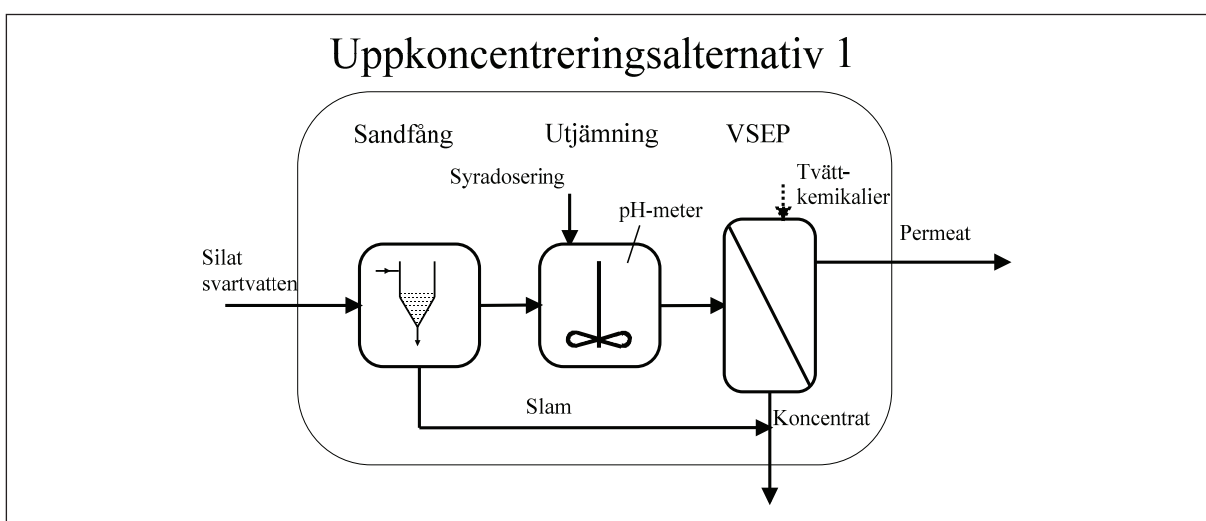
Alternativ 2

Det silade svartvattnet leds till sedimenteringsbassänger. Till sedimenteringsbassängerna doseras fällningskemikalier (järn- eller aluminiumklorid) för att ta bort huvuddelen av partiklar samt fosfat från svartvattnet. Det producerade slammet som är rikt av fosfat och organiska ämnen leds, via en slamförtjockare, till slamlagret medan det silade och fällda svartvattnet förs till en utjämningsbassäng. Det silade och fällda svartvattnet mikrofiltreras sedan i ett mikrofilter och pumpas sedan in i en konventionell spirallindrad membranläggning där vattnet, under högt tryck, skiljs i ett permeat och koncentrat. Koncentratet leds till samma lagringstank som rensat och det fällda slammet.

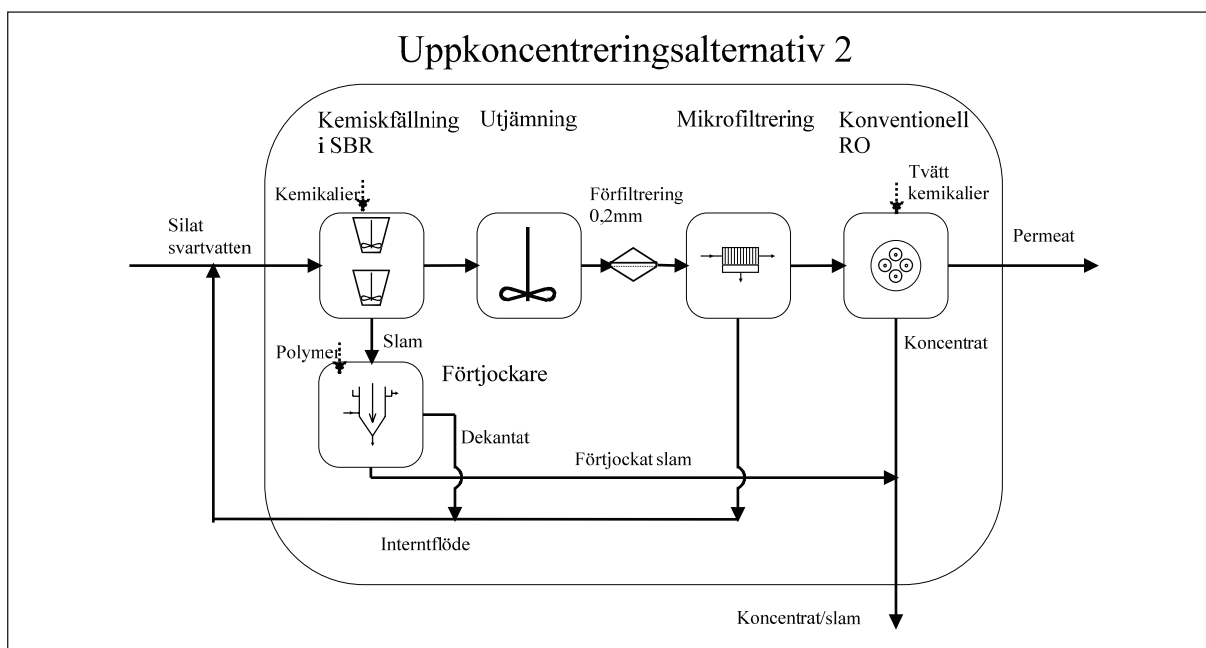
Lagringstanken med blandat rens, slam och koncentrat töms 2 gånger per vecka med tankbil som transporterar blandningen till en strategiskt placerad röt-kammare, se kapitel 11.



Figur 10.15 Principschema för återvinning av alla näringsämnen.



Figur 10.16 Uppkoncentreringsalternativ 1, VSEP.



Figur 10.17 Uppkoncentreringsalternativ 2, konventionell membranfiltrering.

Närmare dimensionering

Lokal uppkoncentrerings, alternativ 1 – VSEP

Anläggningens storlek och pumpens effekt bestäms av permeatflödet och membranvalet.

I pilotförsöket har två membran testats: ett LFC-1 och ett LFC-3 membran. LFC-3 membranet är tätare än LFC-1 membranet vilket innebär att selektiviteten är bättre (mindre läckage av joner till permeatet).

För båda membranen antas en uppkoncentreringsfaktor om 15 ggr vid en temperatur av 20 grader och ett tryck av 25 bar. Konduktiviteten på silat och pH-sänkt svartvatten har satts på 2,0 mS/m.

Dimensioneringen har utförts för båda membranen med hjälp av resultaten från pilotförsöket som bland annat gav ett specifikt flöde samt ett läckage för nya och använda, degraderade membran, se tabell 10.7 nedan. Flödet har beräknats för en standard fullskalemodul (84 tum – 111,5 m² membranyta). Som framgår ger en standardmodul ett flöde om minst 1,6 m³/h (LFC3-slitet) vilket räcker gott för att behandla Skogabergs svartvattenflöde om 20 m³/d.

Bakgrunden av beräkningarna redovisas i tabell 10.8. I figur 10.18 redovisas ett enkelt processchema och en planritning för en fullskaleanläggning (använda tvättkemikalier skulle eventuellt kunna utnyttjas flera gånger via recirkulation över ett mikrofilter). Anläggningsdata redovisas i tabell 10.9.

Tabell 10.7 Ingångsdata och beräkningsresultat för dimensionering, VSEP.

Parameter	Enhet	LFC1 – ny	LFC1 – slitet	LFC3 – ny	LFC3 – slitet
Ingångsdata (resultat pilotförsök)					
Specifikt flöde	ml/h.m ² .bar.°C	90	60	70	50
Läckage	C _p /C _c	0,04	0,03	0,018	0,012
Beräkningsresultat					
Koncentrat konduktivitet	mS/m	19	21	24	26
Flöde fullskala 111,5 m ²	m ³ /h	3,4	2,3	2,4	1,6
Energiförbrukning	kWh/m ³	3,6	5,3	5,3	7,8

Tabell 10.8 Bakgrund av beräkningarna.

Koncentratkonduktivitet

Koncentratkonduktiviteten har beräknats med följande ekvationer:

$$C_f = (1 - f_c) \cdot C_p + f_c \cdot C_c \text{ (massbalans)}$$

och

$$\frac{C_p}{C_c} = x \Rightarrow C_p = x \cdot C_c$$

Alltså:

$$C_c = \frac{C_f}{(1 - f_c) \cdot x + f_c}$$

där

C_f = feedkonduktivitet = 2,0 mS/m

f_c = 1/uppkoncentreringsfaktor = 1/15 = 0,067

C_p = permeatkonduktivitet

C_c = koncentratkonduktivitet

x = konstant beroende på membran och membranskick – resultat från pilotförsök

Permeatflöde

Permeatflödet har sedan beräknats med:

$$F_p = f_1 \cdot T \cdot A \cdot (\Delta P - 0,42 \cdot C_c)$$

där

f_1 = specifikt flöde – resultat från pilotförsök

T = temperatur, här 20 grader

A = membranarea, 111,5 m² för en fullskaleanläggning

ΔP = tryckskillnaden över membranet, här 25 bar

0,42 C_c = uppskattning av den osmotiska tryckskillnaden över membranet

VSEP-membrananläggningar levereras i standardmoduler med en membranarea om 111,5 m² per modul.

Energiförbrukning

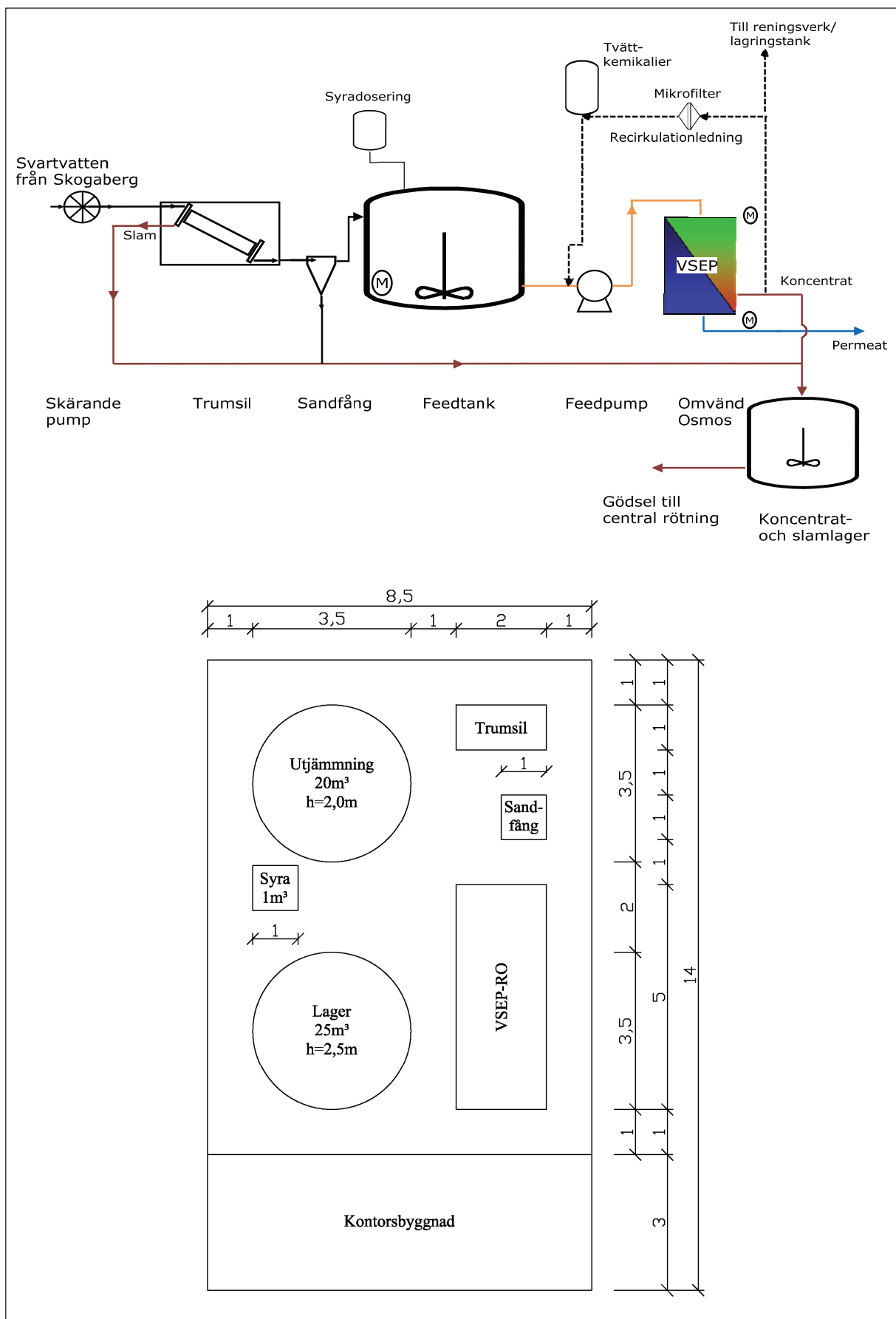
Energiförbrukningen består av:

- Energiförbrukning för vibrationen av stängen. En 84 (tum) stack ger under drift en förbrukning på 6–8 kW. Motorn har en effekt på 15 kW men denna höga effekt används bara vid uppsvängningen för att sätta membranstacken i resonans.
- Energiförbrukningen för feedpumpen (en frekvensstyrd pump, typ hydracell rekommenderas). Energiförbrukningen för en pump vid 25 bar uppskattas till ca 4 kW.

Härmed kan den specifika energiförbrukningen i kWh/m³ beräknas (8 + 4 = 12 kWh delat på flödet).

Tabell 10.9 Anläggningsdata fullskaleanläggning VSEP.

Del i anläggning	Enhet	Uppgift
Skärande pump, kapacitet	m ³ /h	8
Trumsil, kapacitet	m ³ /h	5
Sandfång	m ³	0,5
Feedtank	m ³	20
Feedpump	m ³ /h	ca 2,5
VSEP	m ³ /h	ca 2,5
Tankar för tvättkemikalier	m ³	2 x 0,6
Mikrofiltrering för tvättkem.	m ³ /h	-
Rens- och koncentratlager	m ³	25



Figur 10.18 Schema och planritning över alternativ 1 – VSEP.

Lokal uppkoncentrering: alternativ 2 – kemisk fällning och konventionell membranfiltrering

För detta fall har inget pilotförsök genomförts (förutom för kemfällningsdelen) och dimensioneringen baseras därför på ett antal realistiska antaganden:

Kemfällning – beskrivning

Kemfällningen är beskriven närmare i kapitel 9.

Mikrofiltrering och omvänd osmos

Dimensioneringen av mikrofiltrering (MF) och omvänd osmos (RO) framgår av tabell 10.10 nedan. Figur 10.19 innehåller ett processchema och planritning över en konventionell membranfiltreringsanläggning. Anläggningsdata för hela anläggningen redovisas i tabell 10.11.

Mikrofiltrering

En membranarea om högst 50 m² uppskattas behövas för mikrofiltreringen. I och med att låga susphalter och

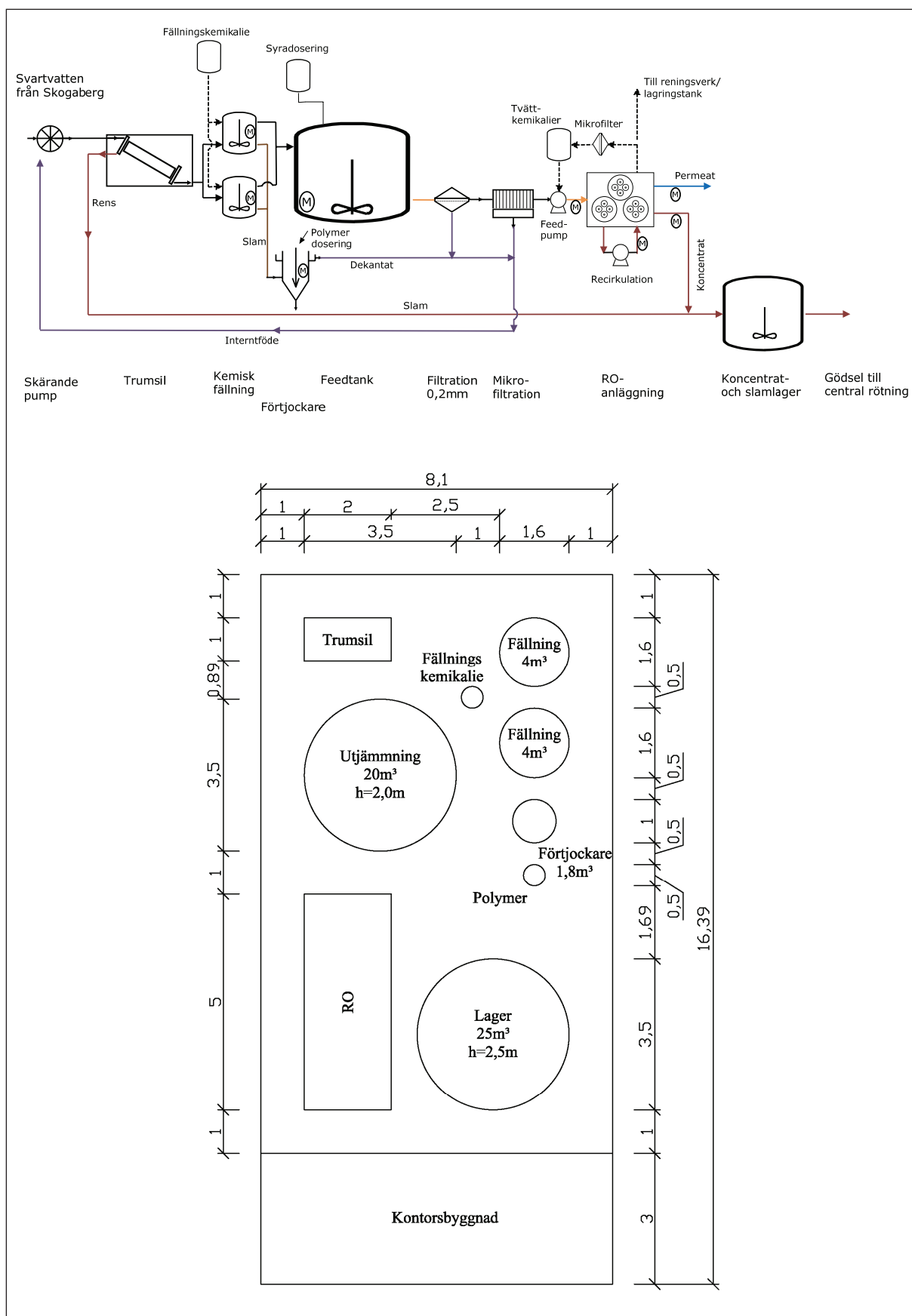
turbiditeter med kemisk fällning kan uppnås, kan efterföljande mikrofiltrering ske med en relativt ringa tryckskillnad om ca 0,7 bar. Den uppskattade energiförbrukningen är då bara 1–1,5 kWh/m³. Mikrofiltrering om 0,1 µm föreslås så att även de minsta partiklarna och bakterier tas bort. Rengöring av dessa filter sker enkelt med hjälp av backspolning, uppskattningsvis 1 g/h. Tvättning med kemikalier (citronsyra och natronlut) behöver uppskattningsvis ske 1 g per vecka.

RO

Ett membran med 99,5 % NaCl-retention föreslås. Den erforderliga tryckskillnaden vid tillämpning av konventionell RO uppskattas till ca 30 bar. Vid mikrofiltrering som förbehandling bedöms fluxet genom membranet bli 20 l/m².h vilket innebär att ca 100 m² membranyta behövs för att behandla ett flöde om 1 m³/h. Den uppskattade energiförbrukningen för RO-steget är ca 3 kWh/m³. Tvättning med kemikalier sker uppskattningsvis 1 gång per vecka. Tvättkemikalierna är av samma typ som i alternativ 1.

Tabell 10.10 Dimensionering av mikrofiltrering och omvänd osmos.

Parameter/anläggningsdel	Enhet	Dimension	kommentar
MF/UF			
Flöde	m ³ /h	1	
Förfiltrering	mm	0,1	anpassad till 0,8 mm hollow fibre
MF/UF	µm	0,05	håller emot emulsioner, kolloider, bakterier
typ		0,8 mm hollow fibre	ger låg energiförbrukning
area	m ²	50	tagit till, kan ev. bli mindre
feedpump	kW	0,6	
specifikt flöde	l/m ² .h	20	
recirkulationspump	kW m ³ /h	0,9 3–5	
tryckskillnad: • över membranet • över cirkulationen	bar bar	0,5–0,7 0,3–0,4	
rengöring: • bakspolning • citronsyra/NaoH	g/h g/v	1 1	+ eventuell sterilisering med bakteriedödande medel, 1 g/v
livstid	år	3	
RO			
RO	% NaCl retention	99,5	
area	m ²	100	3 st. 8 tum spiralmembran i serie
specifikt flöde	l/m ² .h	10	
feedpump	kW	1,8	
recirkulationspump	kW	1,2	
tryckskillnad • över membranet • över cirkulationen	bar	30 1,8	
rengöring • NC2/NC4 • Tankar för tvättkemikalier	ggr/v m ³	1 2 x 0,6	
livstid	år	2	
investering	kkr	1500	helautomatiskt MF/UF och RO-system



Figur 10.19 Schema och planritning över alternativ 2 – konventionell membranfiltrering.

Tabell 10.11 Anläggningsdata konventionell membranfiltrering.

Del i anläggning	Enhet	Uppgift
Skärande pump, kapacitet	m ³ /h	8
Trumsil, kapacitet	m ³ /h	5
Volym sedimenteringstankar (med omrörare)	m ³	2 x 4
Volym fällningskemikalietank	m ³	1
Erforderliga pumpar för fällning, kapacitet		
• doseringspump	l/h	2
• dekanteringspump	m ³ /h	8
• slampump	m ³ /h	4
Kemikaliedosering (järn- och aluminiumsalt)	l/m ³	ca 0,5 (varierar)
Volym förtjockare	m ³	2
Erforderliga pumpar för förtjockning, kapacitet		
• doseringspump	l/h	0,5
• dekanteringspump	m ³ /h	2
• slampump	m ³ /h	2
Tank för flyttande polymer (dosering till förtjockaren)	m ³	1
Feedtank före membranfiltrering	m ³	20
Rens- och konzentratlager	m ³	25

10.5 Förbrukningar och kostnader

De uppskattade förbrukningarna och kostnaderna för båda membranalternativen är sammanfattade i tabell 10.12.

Tabell 10.12a Uppskattade förbrukningar.

	Alternativ 1 VSEP, LFC1	Alternativ 2 konventionell RO	Enhet
Energiförbrukning			kWh/år
• mätning/styrskåp	4400	4400	
• inloppspump	2500	2500	
• trumsil	1000	1000	
• sandfång	400	-	
• fällning (dosering, omrörning, dekantering, pumpning)	-	3100	
• förtjockning (dosering, dekantering, pumpning)	-	900	
• omrörning och dosering i utj.	12000	12000	
• mikrofiltrering	-	9000	
• omvänd osmos	28000	19000	
• omrörning i lager	1900	2500	
Totalt:	50000	54000	
Kemikalier			m ³ /år
• FeCl ₃ , 13,8 %	-	3,7	
• polymer	-	0,1	
• saltsyra	4,5	< 1	
• tvättkemikalie NC4	4,4	4,4	
• tvättkemikalie NC2	0,1	0,1	
• citronsyra/NaOH	iu*	iu*	
Transporter	100	160	antal slambilar/år
Arbete	420	620	h/år
Membranersättning	2	2	ggr/år

* ingen uppgift – ringa mängder.

Tabell 10.12b Uppskattade investeringar.

	Alternativ 1 VSEP kkr	Alternativ 2 konventionell RO kkr
Byggnad	1600	1900
Inloppspumpstation	95	95
Trumsil	250	250
Sandfång	40	-
Fällning • doseringsutrustning • tank	- -	25 330
Förtjockning • doseringsutrustning • tank	- -	50 120
Utjämning • syradosering • tank	50 160	50 160
Membrananläggning	2200	1500
Lager	240	240
Övrigt (bla: el-, maskininstallationer)	660	1000
Summa	5300	5700
Pålägg (projektering, oförutsett, byggherre): 62,5 %	3300	3600
Totalt	8600	9300

Tabell 10.12c Uppskattade kostnader.

	Alternativ 1 VSEP	Alternativ 2 konventionell RO	Enhet	Enhetspris
Investering: • avfallskvarnar • ledningar • lokal anläggning Totalt:	600 4400 8700 13700	600 4400 9300 14300	kkr	
Driftkostnader: • energi • kemikalier • transporter • slammottagning • arbete • membranersättning Totalt:	50 13 100 180 170 900 1410	54 13 160 320 250 64 860	kkr/år	1 kr/kWh 2,9 kr/l 1000 kr/ tömning 240 kr/m ³ 400 kr/h
Kapitalkostnader: • avfallskvarnar • ledningar • lokal anläggning Totalt:	40 110 580 730	40 110 620 770	kkr/år	Avskrivning 15 år 40 år 15 år
Årliga kostnader, totalt	2100	1600	kkr/år	

Påfallande är de (oacceptabelt) höga membranersättningskostnaderna för alternativ 1 (VSEP) p.g.a. det snabba membranslitaget. Om man inte kan minska på membranslitaget är därför konventionell membranfiltrering att förespråka framför VSEP då konventionella spirallindrade membran är betydligt billigare än VSEP-membranpaket.

- Det är inte möjligt att få en lika koncentrerad produkt då slammet från fällnings- och förtjockningssteget utgör uppskattningsvis ca 5 % av svartvattnets totalvolym. Vid en uppkoncentreringsfaktorn om 15 ggr i RO-steget och en rensvolym om ca 3 % av svartvattnets totalvolym blir den totala uppkoncentreringsfaktorn därmed endast 7 ggr (i stället för ca 10 ggr med VSEP-RO).

10.6 Produktsammansättning

VSEP-RO

Produktsammansättningen som erhålls vid tillämpning av VSEP-RO redovisas i tabell 10.13.

Konventionell RO

Sammansättningen som erhålls med hjälp av konventionell membranfiltrering är likadan med följande skillnader:

- Blandningen av rens, slam från sedimenteringen och koncentrat innehåller relativt mycket järn då järn har tillsatts i fällningssteget.

10.7 Måluppfyllelse

Såväl med VSEP-RO och konventionell RO kan alla näringsämnen återvinnas till minst 80 %. Den exakta återvinningsgraden är avhängig av membranvalet och uppkoncentreringsgraden.

För VSEP-RO utgör blandningen av rens och koncentrat ungefär 10 % av svartvattnets totalvolym. För konventionell RO utgör blandningen av rens, slam och koncentrat ungefär 15–20 % av svartvattnets totalvolym och därmed uppnås ej den andra uppsatta målsättningen med konventionell membranfiltrering.

Tabell 10.13 Produktsammansättning vid tillämpning av VSEP-RO (LFC3).

Parameter	Enhet	Svartvatten	Rens	Koncentrat Uppkonc.fakt 15 ggr	Blandat rens/ koncentrat	Återvinning %
Flöde	m ³ /d	17	0,5	1,1	1,6	
pH	-	7,5	5,4	5,5	5,5	-
Alkalinitet	mg/l	690	-	0	0	-
Konduktivitet	mS/m	160	-	2100	2100	-
Susp. ämnen	mg/l	1100	19000	9500	12000	100
TS	mg/l	1500	19000	20000	20000	-
VS	mg/l	1100	18000	9000	12000	100
COD	mg/l	2200	27000	22000	24000	99
TOC	mg/l	650	10400	5800	7100	99
N-tot	mg/l	310	630	4000	3100	91
NH ₄ -N	mg/l	130	200	1700	1300	91
P-tot	mg/l	23	70	320	250	99
S-tot	mg/l	27	45	390	290	98
K	mg/l	50	72	670	500	91
Ca	mg/l	39	290	490	430	99
Mg	mg/l	6,9	27	94	75	99
Na	mg/l	77	79	1100	770	91
Cl (doseras som HCl)	mg/l	100	71	6900	5000	-

Genom mekanisk avvattning av rens och slam borde man dock kunna få ner blandningsvolymen till ca 10 %. Avvattningen skulle dock komplicera anläggningen ytterligare.

Den lokalt i Skogaberg producerade produkten är lämplig för att rötas och kan därefter utnyttjas som gödsel i jordbruket, se kapitel 11.

Det finns fortfarande några flaskhalsar som bör undersökas vidare innan en fullskaleanläggning kan byggas:

- Bestående fouling och permeatflödesminskning har konstaterats (membranersättningskostnaderna

för särskilt VSEP blir därmed mycket höga). Det finns indikationer på att detta beror på utfällningar av olösliga metallsalter som är mycket svåra att tvätta bort. Vidare försök bör rikta sig på att finna orsakerna för denna fouling och säkra metoder (ytterligare pH-minskning, antiscalant) för att undvika den.

- Inget försök med konventionell membranfiltrering har genomförts och de antaganden som gjorts i samband med dimensioneringen bör verifieras med hjälp av pilotförsök.

11 Rötning av slam, rens och koncentrat

11.1 Central rötning?

De tänkbara anläggningar som dimensionerats i kapitel 8–10 inkluderar inte rötningen av materialet. Mängderna slam, rens och/eller ett koncentrat som genereras från Skogaberg är för små för att en separat rötningsanläggning lokalt vid Skogaberg ska bli en rimlig investering och ge en positiv energibalans. En bättre hantering är istället att röta slammet/renset/koncentratet tillsammans med andra substrat centralt i en större anläggning. För detta finns det fyra tänkbara alternativ:

- En rötningsanläggning för huvudsakligen biologiskt avfall från hushåll, restauranger, storkök och livsmedelsindustri. I Göteborg har ett antal aktörer sedan några år arbetat för att få till stånd byggandet av en rötningsanläggning för denna typ av avfall.
- En rötningsanläggning för gödsel och/eller gröda vid ett jordbruk.
- En röt-kammare på ett avloppsreningsverk som är certifierad enligt något system som accepteras av livsmedelsindustrin, t.ex. ReVAQ.
- En fjärde möjlighet, som ligger längre fram i tiden, är att om ett antal bostadsområden byggs med svartvattensystem skulle en rötningsanläggning kunna byggas för att behandla svartvattenslammet från samtliga dessa områden. De större volymerna skulle förbättra den ekonomiska kalkylen och ge bättre energibalans för en rötningsanläggning.

Principen för den centrala rötningsanläggningen beskrivs i figur 11.1 och består av:

- en hygieniseringsreaktor där slammets temperatur höjs till 70 °C vid en uppehållstid om ca 1 timme. I hygieniseringen dödas i stort sett alla bakterierna inkl. patogenerna.
- en eller flera röt-kammare. Här rötas slammet vid en temperatur om ca 55 °C (termofil rötning) alternativt vid ca 35 °C (mesofil rötning) och en uppehållstid om ca 20 dagar. Metangas produceras vars energi, efter rening, utnyttjas t.ex. för el- och värmeproduktion eller fordonsgas.
- ett slamlager där det rötade slammet/producerade gödseln lagras i väntan på transport till jordbruket.

För att undersöka biogaspotentialen i produkterna från svartvattnet i Skogaberg genomfördes försök med rötning. Dessa försök beskrivs i kap. 11.3.

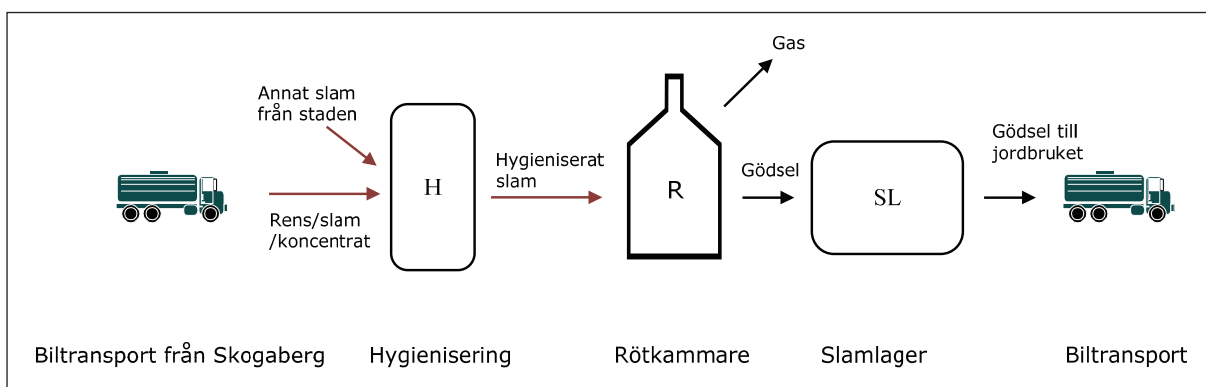
11.2 Målsättningar och förutsättningar

Målsättningar med rötningen:

- Utnyttjande av det lokalt i Skogaberg återvunna organiska materialet som energikälla.
- Produktion av en hygieniserat och stabiliserat gödsel av det slam, rens och koncentrat som lokalt har producerats i behandlingsanläggningen i Skogaberg.

Förutsättningar:

- Svartvattnet från Skogaberg rötas tillsammans med annat organiskt material i en rötningsanläggning någonstans i Göteborgsregionen.



Figur 11.1 Schema över central rötningsanläggning.

- Svartvattnets volym utgör bara en bråkdel av den totala volymen som rötas och svartvattenslammet och koncentratet späds därmed ut så pass att eventuell hämning av rötning p.g.a. t.ex. låg alkalinitet, lågt pH-värde, eller höga ammoniumhalter inte inträffar. Därmed kan rötning ske till full utröttningsgrad.
- Svartvattenslammet har relativt hög vattenhalt. En högre uppkoncentrering före rötning skulle innebära större förlust av näringsämnen (> 98 %).

11.3 Genomförda mätningar och försök

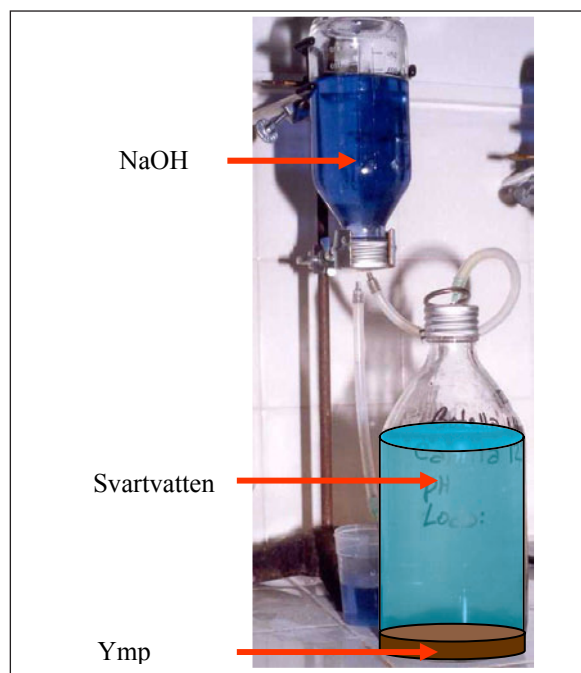
Metod

Mesofil rötning (vid 30 °C) av svartvattenkoncentrat och rens har undersökts på laboratorieskala.

En principbild över rötningsförsöket redovisas i figur 11.2. En flaska om 1 l fylldes med en blandning av koncentrat, ymp och avjoniserat vatten. Ympen hämtades från en rötkammare på Ryaverket (det stora kommunala reningsverket i Göteborg) och var nödvändig för att sätta igång rötningsprocessen. I de flesta försök skedde blandningen så att COD-halten från svartvattenkoncentratet i flaskan blev ca 1 g/l medan VSS-halten från ympen blev ca 2 g/l. Flaskan ställdes i ett vattenbad som höll en temperatur om 30 °C. Den under rötningen producerade metangasen fångades upp i en uppochnedvänd flaska med koncentrerad natronlut.

Metangasen samlar sig högst upp i denna uppochnedvända flaska medan producerad koldioxid löser sig i natronlutlösningen. Den producerade metangasen gör att natronlutlösningen trycks ut från den omvända flaskan. Genom att ständigt fånga upp och mäta volymen på denna lösning kan den producerade metangasens volym bestämmas. Härmed kan även nedbrytningsgraden på det organiska materialet i svartvattnet avgöras (1 mg CH₄/l motsvarar 4 mg COD/l).

Förutom nedbrytningsgraden av det organiska materialet vid rötning bestämdes även den specifika metanogena hastigheten av ympen, konstanten för hydrolyseringen av partiklarna i koncentrat och rens samt koldioxidproduktionen. Alla försök och resultat beskrivs i Linge (2006).



Figur 11.2 Principbild över rötningsförsök (Seghezzo, 2005).

Resultat

Nedan beskrivs endast de för denna rapport relevanta resultaten av rötningsförsöket.

I tabell 11.1 redovisas utröttningsgraden för de olika undersökta substraten.

Tabell 11.1 Utröttningsgrad för olika substrat (prov utspädda till 1 g COD/l)

Substrat	Utröttningsgrad
Koncentrat från membran-anläggning	60–70 %
Rens från trumsil	ca 90 %*
Koncentrat + Rens	80–90 %*

* En viss osäkerhet föreligger beroende på COD-analysens pålitlighet.

Som framgår är utröttningsgraden förhållandevis mycket hög för rens. Rens består till stor del av lätt-nedbrytbara matrester och en hög nedbrytningsgrad förväntas i och för sig, men kanske inte sådana höga värden. Här ska vi dock betänka att det anlitate laboratoriet hade problem med COD-analyserna på rensen och att därför en viss osäkerhet föreligger.

Ett rimligt antagande här är att utröttningsgraden för alla substrat från de olika ambitionsnivåerna är åtminstone ca 70 %.

Rötning av mera koncentrerade och utspädda prov gav betydligt sämre utröttningsgrader. I dessa prov

uppmättes låga pH-värden och alkaliniteter vilket indikerar att rötningen hämmades.

11.4 Energibalans

Med hjälp av utröttningsgraden och metangasproduktionen kan en energibalans för varje ambitionsnivå göras. Rötningen av slam/koncentrat ger metangas och därmed en energiproduktion. Samtidigt behövs det energi för att värma upp hygieniseringsreaktorn och rötkammaren (man kan växla tillbaka en del av värmen). Här har vi räknat med en uppvärmningsenergi för hygienisering och rötning om 53 kWh/m³ substrat.

Resultaten av energibalansen presenteras i tabell 11.2.

Bara i fallet med membranfiltreringsalternativet blir energibalansen för hygieniseringen/rötningen positiv, med andra ord produceras det mer energi än uppvärmningen kräver.

Här ska vi dock betänka att energin som metan ger är högvärdig (stor förmåga till arbete, exergi) medan värme är lågvärdig energi (ringa förmåga till arbete, exergi). Därutöver är förutsättningarna för att köpa in överskottsvärme via fjärrvärmenätet goda i Göteborg. Det finns mycket god tillgång på fjärrvärme medan det är stor efterfrågan på biogas. I en storskalig röttningsanläggning är det därför fördelaktigt att värma hygieniserings- och rötkammare med fjärrvärme medan den högvärdiga metangasen utnyttjas som t.ex. biobränsle.

Den i tabell 11.2 presenterade energibalansen ger därför en mindre bra bild än om hänsyn skulle tas till "kvaliteten" på energikällan. För att ta hänsyn till detta kan en exergibalans istället för en energibalans ställas upp i vilken man multiplicerar värmebehovet med en faktor 0,3 medan producerad energi i form av metan multipliceras med 1, alltså 1 kWh metangas har samma exergivärde som ca 3 kWh värme. Exergibalansen är presenterad i tabell 11.2 längst nedan och den utfaller positivt för alla tre studerade alternativ.

Uppvärmningen tar relativt mycket energi då Skogabergs slamprodukt fortfarande är ganska utspädd med en låg TS-halt. Vi ska dock betänka att detta inte enbart är en nackdel då annars förmodligen spädvatten skulle behövts på röttningsanläggningen, åtminstone om det främst är matavfall från hushåll, restauranger etc. som ska rötas.

Från tabell 11.3 framgår vilken andel av den inkommande COD-mängden som omvandlas till metan i de olika alternativen. Beroende på alternativ omvandlas 40–70 % av den inkommande COD-mängden i svartvattnet till metan. Detta är en stor andel i jämförelse med ett konventionellt avloppsreningsverk där uppskattningsvis endast 30–40 % av den inkommande COD-mängden (svart- och grävatten) omvandlas till metan.

I ett konventionellt system kan en stor del av COD-mängden som tillhandahålls inte tas tillvara som metan då en stor del av COD i avloppet förbrukas vid luftningssteget på reningsverket och bioavfallet behandlas aerobt med hjälp av kompostering.

Tabell 11.2 Energi- och exergibalans för de olika substraten.

	Slamavskiljare	Fällning i slamavskiljare	Membranfiltrering (sil & VSEP)	
Substratflöde	1,7	1,7	1,6	m ³ /d
COD-halt	13,3	15	23,5	g/l
Rötat COD	9,3	10,5	16,5	g/l
Metangasprod.	2,3	2,6	4,1	g/l
Energi				
Energiprod.	3,3	3,7	5,4	kWh/m ³ sv
Uppvärmning	5,3	5,3	5,0	kWh/m ³ sv
Nettoeffekt	-2,0	-1,6	0,4	kWh/m ³ sv
Exergi				
Exergiprod.	3,3	3,7	5,4	kWh/m ³ sv
Uppvärmning	1,6	1,6	1,5	kWh/m ³ sv
Nettoeffekt	1,7	2,1	3,9	kWh/m ³ sv

T.ex. energibalans för membranfiltrering:

COD i blandning slam och koncentrat (substrat):	ca 23,5 kg/m ³
Rötat COD (70 %):	ca 16,5 kg/m ³
Metangasproduktion (0,25 kg/kg COD):	ca 4,1 kg/m ³
Energiinnehåll metan:	50 MJ/kg = 14 kWh/kg
Energiproduktion:	ca 57 kWh/m ³ (eller 5,4 kWh/m ³ svartvatten)
Uppvärmning rens och koncentrat:	4,18 kJ/kg, K = 1,2 kWh/m ³ , K
44 graders uppvärmning: (inkl. energiförluster)	ca 53 kWh/m ³ (eller ca 5,0 kWh/m ³ svartvatten)
Nettoeffekt:	4 kWh/m ³ (eller 0,4 kWh/m ³ svartvatten)

Tabell 11.3 Inkommande COD och andel av inkommande COD som förvandlas till biogas, samt energiproduktion per kg inkommande COD och per person och dag.

	slamavskiljare	fällning	membran-filtrering (sil & VSEP)
ink. COD/pers.d	105	105	105
% COD omvandlat till metan	42	46	68
kWh metan/kg ink. COD	1,2	1,3	2,4
Wh metan/person.d	130	140	250

12 Användning av gödselprodukten

12.1 Kvalitet på produkterna

Såsom beskrivits i kapitel 8–10 ger de tre olika återvinningsteknikerna tre produkter med olika innehåll av näringsämnen och metaller. Innehållet av metaller

i produkterna efter rötning har inte analyserats men med hjälp av analyserna av svartvattnet som redovisades i kapitel 6 har innehållet efter rötning beräknats. De uppmätta och framräknade produktsammansättningar för de tre alternativen efter rötning sammanfattas i tabell 12.1. Produkten från membranfiltreringen är en blandning av rens och koncentrat.

I tabell 12.2 jämförs innehållet av metaller i produkterna med gällande haltgränsvärden för avloppsslam för jordbruksändamål, räknat per kg TS (Förordning (1998:944) om förbud m.m. i vissa fall i samband med hantering, införsel och utförsel av kemiska produkter).

Tabell 12.1 Produktsammansättning för de olika alternativen (efter rötning).

Parameter	Enhet	Slamavskiljare	Fällning	Membranfiltrering (sil & VSEP)*
Flöde	m ³ /d	1,7	1,7	1,6
pH	-	ca 7	ca 7	ca 7
Alkalinitet	mg/l	2100	2800	5300
Konduktivitet	mS/m	160	300	2 500
TS	mg/l	2700	2900	13000
VS	mg/l	2100	2000	5000
COD	mg/l	4000	4500	7100
TOC	mg/l	1200	1100	2500
N tot	mg/l	850	1000	3100
NH ₄ -N	mg/l	640	750	2500
P tot	mg/l	65	190	250
S tot	mg/l	39	42	290
K	mg/l	57	58	500
Cl	mg/l	100	300	5000
Pb	µg/l	6–21	8–23	18–33
Cd	µg/l	0,8–2,2	1,0–2,5	1,8–3,3
Co	µg/l	1,7–5,4	2,1–5,9	5,1–9,1
Cu	µg/l	290	330	630
Cr	µg/l	40	42	148
Hg	µg/l	0,3–1,2	0,3–1,4	0,4–2,9
Ni	µg/l	36	40	140
Ag	µg/l	22–30	29–36	47–55
Zn	µg/l	1000	1100	2600

* Konventionell membranfiltrering ger halter som är ca 30 % lägre p.g.a. ett högre flöde (uppkoncentreringsfaktorn är ca 7 i stället för ca 10 vid VSEP).

Tabel 12.2 Innehåll av metaller i gödselprodukterna efter rötning i jämförelse med haltgränsvärden för användning på åkermark, räknat per kg TS.

	Slamavskiljare mg/kg TS	Fällning mg/kg TS	Membranfiltrering (sil & VSEP)** mg/kg TS	Haltgränsvärde* mg/kg TS
Pb	2,2–7,8	2,9–8,2	1,3–2,5	100
Cd	0,3–0,8	0,4–0,9	0,1–0,3	2 (1,7)
Cu	110	120	48	600
Cr	15	15	11	100
Hg	0,1–0,4	0,1–0,5	0,03–0,2	2,5 (1,8)
Ni	14	14	11	50
Ag	8,3–11	10–13	3,6–4,2	- (15)
Sn	-	-	-	- (35)
Zn	380	390	200	800

* Värden inom parentes anger haltgränsvärden i Naturvårdsverkets förslag till ny förordning (Naturvårdsverket, 2002).

** Värdena för konventionell membranfiltrering är i stort sett desamma.

I tabell 12.3 jämförs innehållet av metaller med Naturvårdsverkets förslag på nya haltgränsvärden där metallinnehållet relateras till fosforinnehållet (Naturvårdsverket, 2002).

Samtliga produkter har ett lågt innehåll av tungmetaller och klarar de haltgränsvärden som gäller för avsättning i jordbruksmark med god marginal. Även de haltgränsvärden som angivits i förslaget till ny slamförordning uppfylls. När de olika produkterna jämförs inbördes framkommer att produkten från membranfiltreringen har de lägsta metallhalterna i förhållande till TS-innehållet. Här ska vi betänka att TS-innehållet i koncentratet från membranfiltreringen höjs betydligt p.g.a. av tillsatsen av saltsyra.

I förhållande till fosforinnehåll har istället produkten från fällning över lag de lägsta halterna. Detta beror att vid fällning mer än 80 % av fosfor fångas av medan endast de partikulärt bundna metallerna tas med i produkten. För membranfiltrering tas dock nästan 100 % av alla tungmetaller med i produkten.

12.2 Lagring och spridning

Hur och var lagringen av gödselprodukten från rötningen ska ske beror på med vilka andra substrat

Tabel 12.3 Innehåll av metaller i gödselprodukterna efter rötning i jämförelse med haltgränsvärden för användning på åkermark, räknat per kg fosfor.

	Slamavskiljare mg/kg P	Fällning mg/kg P	Membranfiltrering (sil & VSEP)* mg/kg P	Haltgränsvärde mg/kg P
Pb	92–320	42–120	72–130	3 600
Cd	12–34	5,3–13	7,2–13	61
Cu	4 500	1 700	2 500	21 000
Cr	620	220	590	3 600
Hg	4,6–19	1,6–7,4	1,6–12	64
Ni	550	210	560	1 800
Ag	340–460	150–190	190–220	540
Sn	-	-	-	1 200
Zn	15 000	5 800	10 000	29 000

* Värdena för konventionell membranfiltrering är i stort sett desamma.

svartvattenprodukten ska rötas. Om rötningsanläggningen ligger vid en lantbruksgård, kan ett flytgödsellager vid gården användas. Ligger anläggningen på annan plats behövs troligen ett mindre lager i direkt anslutning till anläggningen, varifrån gödselprodukten transporteras till större flytgödsellager i anslutning till jordbruksmarken där den ska spridas. För att förhindra förluster av kväve bör gödselbehållaren vara täckt.

Även spridningssätt och giva beror på med vilka andra substrat svartvattenprodukten ska rötas. För att förenkla resonemangen ser vi därför nedan på hur användningen skulle se ut om den rötade svartvattenprodukten skulle användas utan inblandning av andra substrat.

Spridning av produkt från slamavskiljning

Produkten från processen med slamavskiljning innehåller lite växtnäring och kan därför inte betraktas som ett gödselmedel i egentlig mening. Ur lantbrukarperspektiv bör kväveinnehållet vara minst ca 2 kg per m³ flytande biogödsel varav huvuddelen bör bestå av ammoniumkväve. Normalt beräknas kvävetillförsel utifrån mängden ammoniumkväve. Halten ammoniumkväve i produkten är ca 0,5 kg/m³ och detta utgör ca 75 % av produktens totala kväveinnehåll. För att tillföra 100 kg ammonium-N/ha behöver 185 m³ användas. Fosfortillförseln blir då 10 kg/ha. När så pass stora mängder som 185 m³/ha ska spridas bör utrustning som pumpar ut produkten till spridningsutrustningen användas för att inte få för stor markpackning. Alternativt kan bevattningsutrustning användas förutsatt att inte aerosoler bildas (smittspridningsrisk). Kvoten Cd/P är 13–35 mg Cd/kg P, vilket är något högre än för stallgödsel i genomsnitt. Intresset från jordbruket för denna produkt är troligen svagt eftersom mycket stora mängder per hektar måste användas för att få tillräcklig tillförsel av växtnäring.

Spridning av produkt från fällning

TS-halten i produkten från fällning är låg och den ska hanteras som en vätska. Även växtnäringsinnehållet är lågt (ca 0,6 kg ammonium-N/m³), vilket gör en mindre intressant som gödselmedel. För att tillföra 22 kg P/ha (vilket är den maximalt tillåtna årliga tillförseln av fosfor) behöver ca 140 m³ användas. Samtidigt tillförs ca 90 kg växttillgängligt kväve (ammoniumkväve), vilket innebär att fällningsprodukten har en väl balanserad sammansättning av växtnäring. För att undvika risken för markpackning

bör utrustning som pumpar ut produkten till spridningsutrustningen användas. Troligen bidrar den kemiska fällningen till att fosfors växttillgänglighet på kort sikt blir något lägre. Kvoten Cd/P är 5–13 mg Cd/kg P, vilket är något lägre än för stallgödsel i genomsnitt.

Spridning av produkt från membranfiltrering

Gödselprodukten från processen med membranfiltrering är att betrakta som ett flytande kvävegödselmedel ur spridningssynpunkt och när man ser till hur växtnäringen i produkten kan tas upp av en gröda. Den har också högt innehåll av fosfor, kalium och svavel och kan till vissa grödor och på vissa jordar ses som ett fullgödselmedel. Produkten lämpar sig väl för spridning till spannmålsgrödor. Mängden totalkväve, inklusive ammoniumkväve, är 3,1 kg/m³ biogödsel. Andelen direkt växtåtkomligt kväve i form av ammoniumkväve är ca 80 %.

Vid en tillförsel av 100 kg ammonium-N/ha, behöver 40 m³/ha spridas. Gödselprodukten från Skogaberg räcker då till en spannmålsareal av ca 16 ha. Detta innebär en fosforgiva på 10 kg/ha. Kvoten Cd/P är 7,2–13 mg Cd/kg P, vilket kan jämföras med genomsnitt för stallgödsel (nöt och gris) som är ca 15 mg Cd/kg P. Beroende på markens fosforinnehåll kan det behövas tilläggsgödsling med fosfor för att nå optimala betingelser.

Den flytande gödselprodukten är lämplig att sprida med släpslangsspridare, eftersom TS-halten är låg. Efter spridning sker normalt ytterligare markberedning, bl.a. för att skapa en såbädd. Gödselprodukten kan även spridas i växande gröda, men p.g.a. risk för körsador på grödan är det vanligt att spridningen sker före sådd. Om avvattning av rötresten till en flytande och en fast fas skulle ske, sprids den fasta produkten lämpligen med traditionell fastgödselspridare och den flytande fasen med släpslangsspridare.

12.3 Kvalitetssäkring

Svartvattenssystemet i Skogaberg byggdes som ett försök att gå Lantbrukarnas Riksförbund, Livsmedelsföretagen och Svenska Naturskyddsföreningen till mötes i deras önskemål på avloppsgödselprodukter med klosttavloppskvalitet. I sitt gemensamma arbetspapper

från 2002, "Riktlinjer för hållbar användning av växt-näring från samhällets flöden av organiskt material", skriver man att produkter från exempelvis urin och klosettatten ska kunna användas till alla grödor och alla marker efter kontroll av bl.a. närings- och metallhalter. Det anges också att tillförseln av organiska kemikalier ska kunna överblickas och att produkterna ska hygiensäkras (Livsmedelsföretagen, SNF & LRF, 2002). Svartvattensystemet i Skogaberg och de redovisade möjliga behandlingsteknikerna lever upp de kvalitetskrav som ställs, och de olika gödselprodukterna torde accepteras av både lantbrukare och livsmedelsbranschen.

För att åstadkomma ett långsiktigt förtroende hos aktörerna i livsmedelskedjan krävs troligen också någon form av kvalitetssäkringssystem för gödselprodukten från svartvattnet. Idag finns fyra kvalitetssäkringssystem för produkter från avlopp och biologiskt avfall; Certifieringssystemet för biomull, SPCR 089, som innebär produktcertifiering av avloppsslam från reningsverk, projektet ReVAQ, som innebär kvalitetssäkring av hela processen för avloppshanteringen inklusive reningsverk, uppströmsarbete och spridning, certifieringssystemen för biogödsel, SPCR 120, samt kompostering, SPCR 152, som innebär produktcertifiering av biogödsel/kompost från rötning/kompostering av organiskt avfall. Inget av dessa befintliga kvalitetssäkringssystem är tillämpligt för svartvatten eftersom kvaliteten på svartvattnet är högre än för slammet som innefattas av de två systemen för avloppsslam och de två certifieringssystemen för organiskt avfall inte tillåter någon inblandning av avloppsfraktioner, även om de skulle hålla hög kvalitet. Vad som krävs är således att ett nytt kvalitetssäkringssystem tas fram.

I ett examensarbete utfört på uppdrag av LRF och Svenskt Sigill har ett underlag som kan ligga till grund

för utformningen av ett kvalitetssäkringssystem för hushållsnära avloppsfraktioner (avloppsfraktioner utan inblandning av dagvatten, industriavlopp och sjukvårdsinrättningar, exempelvis svartvatten, urin och fosforfällt trekammarbrunnsslam) tagits fram i dialog med berörda aktörer inom livsmedelsbranschen, miljöorganisationer, kommuner och konsulter (Giers, 2007). Examensarbetet innehåller bl.a. förslag på rutiner för information/utbildning, hämtning och transport, hygienisering, analyser, gödsling och ansvarsfördelning. Ett sådant kvalitetssäkringssystem skulle kunna vara tillämpligt för produkterna från Skogaberg. För att ett kvalitetssäkringssystem ska kunna komma till stånd krävs att de inblandade aktörerna, framför allt livsmedelsbranschen som till slut är de som godkänner systemet, tar ställning till de detaljer kring rutiner och analysfrekvenser som återstår. Det krävs också att en ägare till kvalitetssäkringssystemet utses. När ett kvalitetssäkringssystem är framtaget har de olika uppköparna av lantbrukets produkter att ta ställning till vilken odling de kvalitetssäkrade produkterna ska godkännas för och vilka eventuella restriktioner som ska gälla. Eftersom det är troligt att svartvattenprodukterna skulle rötas tillsammans med andra substrat, skulle ett nytt kvalitetssäkringssystem behöva innefatta möjlighet till samrötning med t.ex. biologiskt avfall från hushåll, restauranger, butiker, livsmedelsindustri, grödor eller gödsel.

Svenskt Vatten har också tillsammans med aktörer inom jordbruks- och livsmedelsbranschen, dagligvaruhandeln, konsumentorganisationer, miljörörelsen och myndigheter inlett ett arbete med att ta fram ett nytt certifieringssystem för återföring av växtnäring med avloppsfraktioner. Preliminärt är avsikten att såväl konventionellt avloppsslam som källsorterat svartvatten och urin ska kunna ingå i detta certifieringssystem.

13 Utvärdering av Skogabergs svartvattensystem

Svartvattensystemet i Skogaberg har byggts med målet att kunna börja återföra näringsämnen från avlopp till jordbruk, på ett sätt som lantbrukarna, livsmedelsföretag och konsumenter accepterar. Hur väl kan då svartvattensystemet uppfylla målet om näringsåterföring? Och till vilket pris avseende elförbrukning, kemikalier, kostnader etc? Och hur står sig svartvattensystemet i jämförelse med dagens konventionella system för avlopp och bioavfall i Göteborg? I detta kapitel görs några olika jämförelser för att svara på dessa frågor.

13.1 Jämförelse mellan studerade behandlingsalternativ

I tabell 13.1 är återvinningsgraden, kostnaderna och förbrukningen för de olika alternativen redovisade. I tabell 13.2 är återvinningen, kostnaderna och förbrukningarna angivna per ansluten person.

Alternativet ”slamavskiljare” ger en låg återvinningsgrad för alla näringsämnen. Samtidigt är energibalansen negativ. Därmed är detta alternativ mindre intressant då varken näringsämnen eller energi utvinns i tillfredställande utsträckning. Energimässigt vore det mera effektivt att leda svartvattnet (med matresterna) via ledningsnätet till det konventionella reningsverket (i detta fall Ryaverket) där bättre möjligheter finns för att förtjocka slammet/renset så att energibalansen kan bli positiv.

Tabell 13.1 Återvinningsgrad, kostnader och förbrukning för de olika alternativen (ca 130 hushåll, ca 366 anslutna personer, ca 17 m³ svartvatten/d).

Alternativ		Slamavskiljare	Fällning	Konventionell membranfiltrering**)
återvinning P	%	ca 30	ca 80	>99
återvinning N, K, S	%	10–30	10–30	>90
återvinning COD	%	ca 60	ca 70	> 95
återvinning P	kg/år	40	120	150
återvinning N	kg/år	530	620	1800
återvinning K	kg/år	35	36	290
återvinning S	kg/år	24	26	170
uppkoncentreringsgrad	ggr	ca 10	ca 10	ca 7
investeringar	Mkr			
• avfallskvarnar*)		0,6	0,6	0,6
• ledningar*)		4,4	4,4	4,4
• lokal anläggning		0,13	0,6	9,3
totalt		5,1	5,6	ca 14
driftkostnader	Mkr/år	0,3	0,3	0,9
kapitalkostnader	Mkr/år	0,16	0,2	0,8
förbrukad elektricitet	kWh/m ³	0,14	0,16	9
förbrukad värme (uppvärmning rötning)	kWh/m ³	5,3	5,3	7,6
producerad biogas	kWh/m ³	3,3	3,7	5,4
transporter à 8 m ³	st/år	ca 100	ca 100	ca 150
kemikalieförbrukning				
FeCl ₃ – 13,8 v-%	m ³ /år	-	ca 4	ca 4
Tvättkemikalier	m ³ /år	-	-	ca 4,5

*) Redan gjorda investeringar. **) VSEP RO är ej aktuell här p.g.a. oacceptabla höga membranersättningskostnader.

Tabell 13.2 Återvinning, kostnad och förbrukning för de olika alternativen per ansluten person (ca 130 hushåll, ca 366 anslutna personer, ca 17 m³ svartvatten/d).

Alternativ		Slamavskiljare	Fällning	Konventionell membranfiltrering**)
återvinning P	%	ca 30	ca 80	>99
återvinning N, K, S	%	10–30	10–30	>90
återvinning COD	%	ca 60	ca 70	> 95
återvinning P	kg/p.år	0,11	0,33	0,41
återvinning N	kg/p.år	1,4	1,7	4,9
återvinning K	kg/p.år	0,10	0,10	0,79
återvinning S	kg/p.år	0,07	0,07	0,46
uppkoncentreringsgrad	ggr	ca 10	ca 10	ca 7
investeringar	kr/p			
• avfallskvarnar*)		1 600	1 600	1 600
• ledningar*)		12 000	12 000	12 000
• lokal anläggning		360	1 600	25 000
totalt		14 000	15 000	39 000
driftkostnader	kr/p.år	820	820	2 500
kapitalkostnader	kr/p.år	440	550	2 200
förbrukad elektricitet	kWh/p.år	2,4	2,7	150
förbrukad värme (uppvärmning rötning)	kWh/p.år	90	90	130
producerad biogas	kWh/p.år	56	63	92
transporter à 8 m ³	st/p.år	0,3	0,3	0,4
kemikalieförbrukning				
FeCl ₃ – 13,8 v-%	l/p.år	-	11	11
Tvättkemikalier	l/p.år	-	-	12

*) Redan gjorda investeringar. **) VSEP RO är ej aktuell här p.g.a. oacceptabla höga membranersättningskostnader.

Alternativet ”fällning” ger en hög återvinningsgrad för fosfor. Detta alternativ ger en förhållandevis ren fosforprodukt för relativt små kostnader. Energi-balansen är något negativ här också. Alternativet bör ställas mot möjligheterna till att återvinna fosfor på ett konventionellt verk t.ex. med hjälp av biologisk fosforering.

Alternativet ”membranfiltrering” ger en hög återvinningsgrad för alla näringsämnen. Samtidigt är kostnaderna och energiförbrukningen relativt höga och energibalansen är negativ. Priset för att uppnå den höga återvinningsgraden är högt och i dagsläget ej försvarbart för att tillämpa detta alternativ i stor skala.

13.2 Skogabergs svartvatten-system i stor skala?

Svartvattensystemet i Skogaberg byggdes för att börja återföra näringsämnen på gödselanvändarnas villkor. Beslutsprocessen kring val och utformning av systemet har förmodligen inte gett ett optimalt svartvattensystem. Mängden spolvätska är relativt hög vilket kräver mycket energi vid uppkoncentrering av näringsämnena. Självfallssystem är förmodligen bara möjligt i områden med goda lutningsförhållanden. I mer flacka områden skulle förmodligen vakuumsystem väljas. Vakuumsystem kräver visserligen energi för insamlingsarbetet men det minskar energibehovet vid uppkoncentreringen. Det finns erfarenheter från vakuumtransport av svartvatten från många fartyg och från vissa samhällen i Tyskland och Holland. Om

svartvattensystem skulle införas i stor skala i Göteborg skulle förmodligen olika ledningstekniker användas för olika delområden. Vidare skulle uppkoncentrering förmodligen göras vid några få större behandlingsanläggningar. Behandlingsteknik för uppkoncentrering skulle utifrån författarnas kännedom förmodligen bli liknande de som undersökts i Skogaberg. På grund av skaleffekter etc. så är det ändå en hel del siffror som skulle skilja sig från de vid Skogaberg.

En omfattande systemstudie om framtidens avlopssystem i Göteborg har gjorts under åren 2005–2007 (Göteborgs Stad, Kretsloppskontoret, 2007) inom ett annat projekt. Då har olika alternativ till dagens avlopps- och bioavfallssystem jämförts utifrån kriterierna hygien, miljö, ekonomi, sociokultur och teknisk funktion. I första hand har system som kan återföra mer näringsämnen studerats, men även slamförbränning med deponering av askan har ingått. Bland de undersökta systemen ingick ett svartvattensystem för ca 2/3 av Göteborgsområdet. Svartvattensystemet liknade det vid Skogaberg men med de skillnader i spolvattenmängder, ledningssystem och behandlingstekniker som skulle följa av en så storskalig utbyggnad. De viktigaste resultaten gällande svartvattnet från den studien beskrivs här:

- Av de åtta system som studerades bedömdes svartvattensystemet sammantaget vara sämst. I systemstudiens sammanvägda bedömning användes ett viktningssystem som gjorde att återföring av näringsämnen inte var ett strikt krav. Om återföring av näringsämnen hade varit ett strikt krav hade det befintliga systemet och ett annat system som inte återför näringsämnen fallit bort. Fortfarande hade flera andra systemalternativ som återför näringsämnen fallit bättre ut än svartvattensystemet:
 - Källkontroll som ger slammet bättre kvalitet, så att det kan återföras till åker. Bio-avfallet leds

till central rötning eller kompost, med rötrest till åker.

- Källkontroll med bioavfallet via avfallskvarn till slammet.
- Utvinning av en ren fosforprodukt ur avloppsvattnet vid reningsverket.
- Förbränning av slammet i separat ugn, med askan till åker.
- Svartvattensystemet skulle återföra mest kväve och kalium av de studerade systemen men inte mest fosfor, eftersom fosfor även kommer via bdt-vattnet. System som bygger på att slammet eller en på reningsverket utvunnen fosforprodukt återförs, skulle återföra mer fosfor.
- Svartvattensystemet skulle vara det dyraste av de studerade systemen, vilket beror på att ett nytt ledningssystem skulle behöva byggas ut i både befintliga och nya delar av staden.
- Svartvattensystemet skulle organisatoriskt vara det svåraste systemet att genomföra eftersom stora byggarbeten skulle behöva göras både inom fastigheterna och på allmän mark.
- Svartvattensystemet skulle generera mycket biogas men även i stor skala så förbrukar den omvända osmosen mycket elektricitet. Ur energisynpunkt skulle svartvattensystemet vara bättre än dagens system, men det finns andra näringsåterförande system som är något bättre.
- Svartvattensystemet skulle ge minst växthuseffekt av de studerade systemen som återför näringsämnen, vilket hänger samman med att konstgödselkväve inte behöver tillverkas.
- I systemstudie avlopp har det tagits fram flera andra systemalternativ som kan ge hög återföring av näringsämnen och som sammantaget skulle vara bättre än utbyggnad av svartvattensystem i stor skala.

14. Slutsatser och rekommendationer

Avfallskvarnar och ledningssystem

Följande slutsatser har kunnat dras när det gäller drift av avfallskvarnarna och ledningssystemet:

- Många av de boende har haft svårigheter med handhavandet av avfallskvarnarna till en början. Kvarnarna är dock till stor del självinstruerande och efter en tid verkar de boende ha lärt sig vad som kan och inte kan malas och hur mycket vatten som ska användas.
- Inga kvarnar hade fram till november 2006 behövt bytas ut. Ett återkommande problem på en av kvarnmodellerna har varit att en dosa med en strömbrytare som sticker ut från kvarnen har gått av så att man tvingas dra ur sladden för att stoppa kvarnen. De trasiga strömbrytarna har ersatts av en kraftigare modell.
- I enkäten svarade 92 % av de boende att de var nöjda eller mycket nöjda med att använda avfallskvarn när de sammanfattade sina erfarenheter. 92 % svarade också att de var nöjdare med att sortera matavfall genom avfallskvarn än på det sätt de hade hanterat matavfall där de bodde tidigare.
- Egnahemsbolagets service med att avhjälpa de boende med problem med avfallskvarnarna har varit viktig.
- Beräkningar utifrån plockanalyser av restavfallet från Skogaberg har visat att ca 29 % av det genererade matavfallet slängs i restavfallet, medan ca 71 % mals ned i avfallskvarnarna, vilket får anses vara ett bra sorteringsresultat.
- Självfallsystemet har fungerat mycket bra trots den lilla spolvattenmängden. Inga stopp har förekommit i de kommunala svartvattenledningarna och det har varit relativt få problem med stopp i svartvattenledningarna inom samfällda och enskilda fastigheter. Till och med november 2006 hade 14 stopp i svartvattenledningen mellan hus (villa) och gårdsgata registrerats. Samtliga hus med problem med stopp ansluter längst upp eller näst längst upp på svartvattenledningen i en gårdsgata, vilket tyder på att större vattenflöde kanske hade behövts för

att undvika sedimentation i ledningarna där inget flöde från andra fastigheter hjälper till. Ett stopp hade också registrerats i ledningen i en gårdsgata mellan de hus som låg längst upp och näst längst upp på en gårdsgata. Vid ett av husen som hade haft upprepade stopp konstaterades att orsaken sannolikt var bakfall i ledningen. Det har inte kunnat fastställas om övriga stopp har berott på det tjocka svartvattnet, makadam och grusmaterial från byggtiden som funnits kvar i ledningarna eller att fallet på ledningarna varit för litet.

- Inspektionerna av svartvattenledningarna i gårdsgator och kommunal mark har inte visat på problem med avlagringar som kan orsaka stopp.
- Inga tecken på svavelvätebildning har observerats.

Tillrinning och sammansättning

Det specifika flödet av svartvatten i Skogaberg uppgår till 50–60 l/p.d. Vid 366 personer anslutna blir dygnsflödet därmed ca 20 m³/d. Flödet varierar stort beroende av tidpunkten på dygnet. Det maximala flödet uppgår till ca 200 l/h.

Skogabergs svartvattens sammansättning motsvarar i stort sett den sammansättning för svartvatten som kan förväntas och framräknas med hjälp av litteraturuppgifter. Generellt är de specifika mängderna i Skogaberg 50–80 % av de i litteraturen uppgivna mängderna. Dessa låga värden beror rimligtvis på att en stor del av invånarna i Skogaberg är frånvarande från hemmet i samband med arbete och skolgång. Kvävemängden i Skogabergs svartvatten har, till och från, varit relativt stor, vilket beror på höga koncentrationer av organiskt bundet kväve (delvis löst, delvis partikulärt).

Svartvatten innehåller relativt mycket näringsämnen och mycket lite tungmetaller och är därmed intressant för återvinning av näringsämnen.

Återvinning av näringsämnen

Tre ambitionsnivåer för återvinningen har studerats. För varje ambitionsnivå har två delvarianter studerats;

i dessa slutsatser belyses endast de mest relevanta varianterna:

1. Låg ambition: återvinning av organiska ämnen med en slamavskiljare.
2. Mellan ambition: återvinning av organiska ämnen och fosfor med hjälp av fällning.
3. Hög ambition: återvinning av organiska ämnen och alla näringsämnen med hjälp av konventionell membranfiltrering.

Behandlingen har antagits ske lokalt i Skogaberg. Därefter transporteras behandlingsprodukten per slambil till en central rötningsanläggning.

Ambitionsnivåerna beskrivs mycket kortfattat nedan (alternativen har jämförts i tabell 13.1 vad gäller återvinningsgrader, kostnader och förbrukningar).

Låg ambition – slamavskiljare

Avskiljning av de partikulärt bundna organiska ämnena kan ske i en slamavskiljare om 10 m³. Tillrinning av svartvatten till slamavskiljaren sker med självfall. Slamavskiljaren dimensioneras så att såväl sedimentering av grovt material (matavfall, papper, fekalier) som fettavskiljning sker. Slamproduktionen uppskattas till ca 2 m³/d, ungefär 10 % av svartvattens tillrinning.

Detta alternativ är mindre intressant då varken näringsämnen eller energi/organiska ämnen utvinns i tillfredställande utsträckning. Energimässigt vore det mera effektivt att leda svartvattnet (med matresterna) via ledningsnätet till det konventionella reningsverket (i detta fall Ryaverket) där bättre möjligheter finns för att förtjocka slammet/renset så att energibalansen (i samband med uppvärmningen av röt-kammaren) kan bli mer gynnsam.

Mellan ambition – fällning

För att även avskilja fosfor doseras en fällningskemikalie, förslagsvis järnklorid till svartvattnet strax före slamavskiljaren. Härmed kan en stor del av fosfor, uppskattningsvis 80 %, fångas av i den sedimenterade produkten (ca 2 m³/d).

Detta alternativ uppfyller återföringsmålet och ger en fosforprodukt av god kvalitet (ringa tungmetallmängder per kg fosfor) för relativt ringa lokala behandlingskostnader. Alternativet bör dock ställas mot möjligheterna till att få en ren fosforprodukt på ett konventionellt verk t.ex. med hjälp av biologisk fosforering.

Ett minus med detta alternativ är att fosfor initialt

är hårt bunden i fällningsprodukten och därmed blir växttillgängligheten låg. Vidare är innehållet av de andra näringsämnena ringa och dessa näringsämnen ska alltså tillföras på annat sätt.

Hög ambition – membranfiltrering

Två återvinningsalternativ har studerats:

- Omvänd osmos enligt VSEP-tekniken med enbart silning och syradosering som förbehandling.
- Konventionell omvänd osmos med silning, kemisk fällning (med förslagsvis FeCl₃), mikrofiltrering och syradosering som förbehandling.

Slamproduktionen uppskattas till ca 2 m³/d (VSEP, rens och koncentrat, 10 % av svartvattenflödet) resp. 3 m³/d (konventionell membran-teknik, blandning av rens, fällt slam och koncentrat, ca 15 % av svartvattenflödet)

Ingående, långvariga försök har genomförts med VSEP-tekniken där silat svartvatten har kunnat koncentreras med en faktor 10–15 med bibehållande av mer än 80 % av alla näringsämnen. Som längst har uppkoncentreringen kunnat köras i nio dygn utan stopp och rengöring av membran-tytan med tvättmedel. En rengöringsfrekvens om en gång per dygn alternativt vartannat dygn rekommenderas dock för att undvika risken på långvarig fouling.

Det finns fortfarande några kritiska frågor som bör undersökas vidare innan en fullskalemembrananläggning kan byggas:

- Bestående fouling och permeatflödesminskning har konstaterats. Det finns starka indikationer på att detta beror på utfällningar av olösliga metallsalter som är mycket svåra att tvätta bort. Vidare försök bör inrikta sig på att finna orsakerna till denna fouling och säkra metoder (ytterligare pH-minskning, antiscalant) för att undvika den.
- De antaganden som gjorts i samband med dimensioneringen av konventionell membranfiltrering bör verifieras med hjälp av pilotförsök.

Alternativet ”membranfiltrering” ger en hög återvinningsgrad för alla näringsämnen. Samtidigt är kostnaderna och energiförbrukningen höga och energibalansen är negativ. Priset för att uppnå den höga återvinningsgraden är högt och i dagsläget ej försvarbart för att tillämpa detta alternativ i stor skala.

VSEP-tekniken har en enklare förbehandling och är på så sätt att föredra framför konventionell membranfiltrering. Membranersättningskostnaderna är dock, så

länge foulingsproblemet ovan inte är löst, oacceptabelt höga för VSEP-tekniken.

Rötning

Laboratorieförsök har visat att åtminstone 70 % av svartvattenprodukternas innehåll av organiska ämnen (COD) kan rötas till metangas.

Gödselprodukter

Produkten som erhålls efter rötning och hygienisering är mer eller mindre intressant för gödsling beroende på alternativ:

- slamavskiljare: ej särskilt intressant då produkten innehåller ringa halter av näringsämnen.
- fällning: ganska intressant, låg tungmetallhalt, ett högt innehåll av fosfor, dock relativt låga halter av de andra näringsämnena.
- membranfiltrering: intressant, produkten innehåller alla näringsämnena (P, N, K, S) i ett ganska gynnsamt förhållande.

Rekommendation av alternativ

Fosforåtervinning med kemisk fällning i en stor slamavskiljare är, i dagsläget, förmodligen det lämpligaste behandlingsalternativet för detta svartvattensystem (med hänsyn till ekonomi, näringsåtervinning och dagens teknik). Total anläggningskostnad för det lokala svartsystemet inklusive slamavskiljare skulle då bli ca 41 000 kr/hushåll varav nästan hela investeringen redan är gjord. Driftskostnaden, beräknad till ca 2 500 kr/hushåll/år skulle främst bestå av transport och mottagningsavgift vid rötningsanläggningen. En mer storskalig utbyggnad skulle ge lägre kostnader per fastighet, beroende på skalfördelar och mindre utvecklingsbehov. Nackdelen med alternativet är att gödselprodukten inte är så attraktiv då kväveinnehållet är lågt och fosfor är relativt hårt bunden till fällningsprodukten. Membrananläggningen skulle ge ett mer fullvärdigt gödselmedel men är, i dagsläget, alltså för kostsam för att byggas ut i fullskala.

Svartvattensystem i nya områden?

Ett svartvattensystem kan förmodligen vara lämpligt i andra områden av begränsad storlek, tex. en mindre ort eller en by med mycket jordbruksmark i direkt närhet. Den mest kritiska faktorn är utspädning av näringsämnena. När kväve och fosfor en gång späts ut är det mycket energi- och kostnadskrävande att koncentrera upp dem igen. Hygienisering av gödselprodukten kräver också mycket energi, vilket gör att

det bör vara koncentrerade gödselprodukter som hygieniseras. Nya svartvattensystem som tar tillvara alla näringsämnen bör därför också designas så att spolvättskan är så liten som möjligt. Vakuumsystem är troligen lämpligare än självfallssystem för de flesta områden. I Lübeck i norra Tyskland finns ett svartvattensystem med vakuumsystem, Behnke (2003). Om ett nytt svartvattensystem ska byggas i Sverige rekommenderas att det bästa av erfarenheterna från svartvattensystemen i Skogaberg, Bokenäsets fritidsgård och Lübeck kombineras. Skogabergs bidrag gäller främst tekniken för uppkoncentrering och ett väl fungerande självfallssystem.

Svartvatten är en komplex blandning av urin, fekalier och dricksvatten vilket kan försvåra möjligheterna till uppkoncentrering. Urin innehåller höga halter av organiskt bundet kväve, urea samt fosfat. Urea omvandlas mycket fort till vätekarbonat och ammonium med enzymerna som finns i fekalierna (de Blois, 2004c). Dricksvatten som används som spolvatten innehåller kalcium. Blandningen, svartvatten, innehåller därmed höga halter av bl.a. fosfat, vätekarbonat, ammonium och kalcium. Det är just denna kombination som gör det så svårt att koncentrera upp svartvatten med hjälp av membrantechnik då risken för utfällning av övermättade metallsalter såsom kalciumkarbonat och kalciumfosfat blir mycket stor.

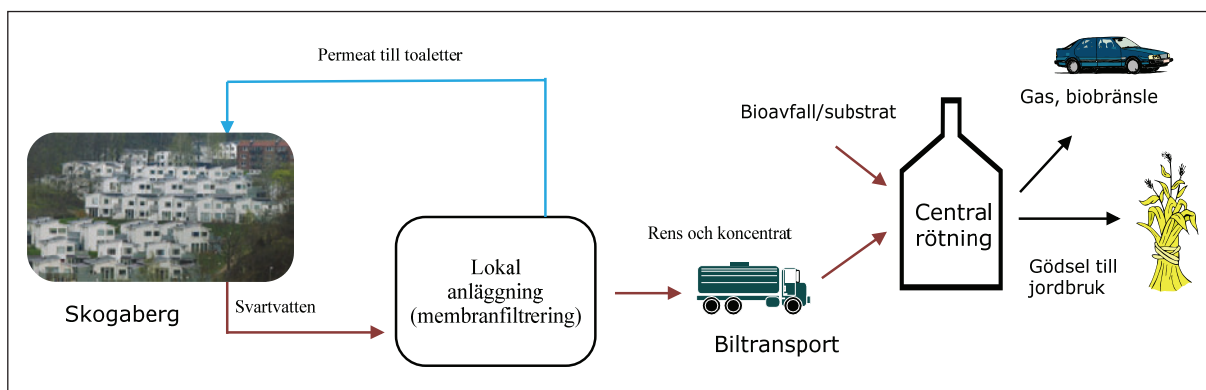
Betydligt bättre skulle det bli om man kan minska halten av en av komponenterna i utfällningsprodukterna.

Ammonium- och vätekarbonathalten skulle kunna minskas om man kan hämma ammonifikation, vilket är mycket svårt så fort man blandar in fekalier i urin.

Detta talar för enbart uppkoncentrering av urin och urinsortering framförallt om man betänker att fekalierna bidrar med relativt ringa mängder av näringsämnen. Uppkoncentrering av urin skulle i så fall ske fort efter uppsamlingen innan ammonifikation har kommit igång på allvar.

I fall av svartvatten är det lättast att angripa kalcium då kalcium är en huvudkomponent i utfällningsprodukterna och huvudsakligen kommer från spolvattnet (dricksvatten).

I stället för dricksvatten kan t.ex. regnvatten som innehåller mycket låga halter av kalcium användas som spolvatten i toaletterna. En annan idé är att återanvända permeat, som producerats med omvänd osmos, som spolvatten. Permeat är ju, i stort sett, helt fritt från kalcium. Härmed skulle en nära nog helt



Figur 14.1 Återvinning av såväl vatten som näringsämnen och energi i ett svartvattensystem.

slutet system åstadkommas där såväl näringsämnena som vattnet återanvänds (se figur 14.1). Ett sådant svartvattensystem skulle vara särskilt lämpligt för isolerade bostadsområden i synnerhet om det dessutom finns brist på vatten av god kvalitet.

Svartvattensystem i stor skala?

Skulle det vara lämpligt att bygga ett svartvattensystem för stora delar av Göteborg?

-Nej, huvudmotivet för att byta till ett svartvattensystem är näringsåterföring och i en stad av Göteborgs storlek kan näringsåterföringen uppnås bättre på annat sätt. Det är en tydlig slutsats av den "Systemstudie avlopp för Göteborg" (Göteborgs Stad, Kretsloppskontoret, 2007), som genomförts i Göteborg år 2005–2007. I systemstudien jämförs bland annat ett storskaligt svartvattensystem med andra systemlösningar som återför en stor del av fosfor till åkermark. Svartvattensystemets fördel är att det återför *alla* näringsämnena i en gödselprodukt av god kvalitet. De andra systemen kan återföra mycket fosfor, men nästan inget kväve. Det går åt mycket energi när kvävegödsel tillverkas i fabriker men behandlingen av svartvatten kräver också mycket energi. Om återföring av kväve betraktas som en energifråga, medan fosfor betraktas som en ändlig resurs, finns det andra näringsåterförande system som sammantaget är bättre än svartvattensystemet, för en stad av Göteborgs storlek. Dessa alternativa system bygger vidare på det befintliga avloppssystemet och genomför sig inte själva utan kräver aktiva åtgärder från VA-förvaltningarna. Om inte stora resurser satsas aktivt på källkontrollåtgärder och/eller på förändrad process på reningsverket (i detta fall Ryaverket), finns risk att det går ytterligare många år utan att lantbrukarna uppfattar gödselprodukter från avloppssystem som attraktiva.

Måluppfyllelse

Huvudmålet med svartvattensystemet i Skogaberg är:

- att i ett separat ledningssystem ta tillvara de mest näringsrika och minst förorenade fraktionerna från hushållen, och att behandla dem så att en så ren gödselprodukt som möjligt kan erhållas.

Försöksresultaten har visat att huvudmålet i princip kan uppfyllas. För närvarande planeras dock ingen permanent lokal anläggning för gödselproduktion vid Skogaberg (Karlsson, 2006, 2007). I stället undersöks möjligheter till näringsåtervinning vid Ryaverket, det centrala avloppsreningsverket i Göteborg (se stycket här ovan).

De övriga målsättningarnas uppfyllelse beskrivs i tabell 14.1.

Förväntad nytta för VA-branschen

Projektet har verifierat att svartvattensystem med avfallskvarnar, självfallsledningar och uppkoncentrer- ing av näringsämnena *kan* vara ett fungerande system för att få i gång återföring av näringsämnena från avlopp och bioavfall vid nybyggnation. Jämförelsen med andra alternativ, som delvis har gjorts i ett parallellt projekt, har visat att näringsåterföring i stor skala i Göteborg bättre kan uppnås på annat sätt än genom att bygga ut svartvattensystem.

Svartvattensystemet har byggts i tillräckligt stor skala för att ge pålitliga data och driftserfarenheter. Andra kommuner som funderar på att bygga svartvattensystem kan få mycket erfarenheter från detta projekt.

Projektet har framför allt gett ny kunskap om behandlingstekniker för ytterligare uppkoncentrer- ing av näringsämnena ur en redan koncentrerad vätska, svartvatten med malt bioavfall. Erfarenheterna bör vara tillämpbara för andra näringsrika vätskor inom

Tabell 14.1 Huvudmålsättningarnas resultat.

Huvudmålsättningarna med projektet	Resultat
• att utvärdera funktionen hos separata svart- och gråvattenlednings-systemen med självfall.	Uppfyllt, fokus på svartvattnet.
• att utvärdera avfallskvarnarnas funktion och brukarnas erfarenheter av dessa.	Uppfyllt
• att få en gedigen karakterisering av Skogabergs svartvatten (sammansättning, renhet, pågående processer i svartvatten)	Uppfyllt
• att verifiera att VSEP-membranteknik med silning som förbehandling är ett möjligt, lämpligt och tillräckligt resurssnålt alternativ för att koncentrera upp näringsämnena i svartvatten.	Delvis uppfyllt: verifierat att tekniken är möjlig men inte helt klarlagt att den är lämplig
• att ta fram ett dimensioneringsunderlag för en fosforåtervinningsanläggning för Skogaberg baserad på fällning och sedimentering.	Uppfyllt
• att karakterisera slutprodukterna från behandlingsanläggningen av svartvatten och bedöma deras lämplighet som gödselmedel	Uppfyllt
• att jämföra det valda systemet med ett konventionellt system genom systemanalys	Uppfyllt, delvis genomfört inom ett annat projekt "Systemstudie avlopp"
• att jämföra kostnaderna för det valda systemet med ett konventionellt system	Uppfyllt, delvis genomfört inom ett annat projekt "Systemstudie avlopp"

VA- och avfallsverksamheten, främst utgående vätska från rötningsanläggningar. Projektet har gett erfarenheter av brukarnas syn på denna sorts avloppssystem. Det är särskilt avfallskvarnarna som de märkt av.

Erfarenheterna från avfallskvarnarna i Skogaberg kan i huvudsak överföras till andra avloppssystem med avfallskvarnar.

Referenser

Ahmad, Shadab (2005). *Analysis of fouling on RO VSEP (LFC 1) membrane system used in recovering nutrients from household sewage water of Skogaberg*. Examensarbete, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Water Environment Technology.

Coquin, Marie-Catherine (2005). *Black Water Recycling at Skogaberg: VSEP Reverse Osmosis Membrane Pilot Tests*. Examensarbete, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Water Environment Technology.

Baker, Richard W. (red.) (2004). *Membrane technology and applications*. Chichester, England: John Wiley & Sons.

Behnke, Stefan (2003). *Vacuum Sewers – an element in ecosan systems*. Ecosan – Closing the loop, proceedings. 2nd International Symposium on ecological sanitation. 7.–11. April 2003, Lübeck, Germany.

de Blois, Mark (red.) (2003). *Pilotprojekt: Svartvatten Skogaberg; Behandlingsmöjligheter för att återvinna näringsämnen ur svartvatten från Skogaberg; Orienterande förstudie*. H2OLAND, i uppdrag av Kretsloppskontoret.

de Blois, Mark (2004a). *Lokal anläggning för återvinning av näringsämnen från Skogabergs svartvatten: Alternativstudie & Design*. H2OLAND, i uppdrag av Kretsloppskontoret.

de Blois, Mark (2004b). *Provtagning på svartvatten från Skogaberg: Ett dygn från 30 villor, april 2004*. H2OLAND, i uppdrag av Kretsloppskontoret.

de Blois, Mark (2004c). *Undersökning av pågående processer i svartvatten från Skogaberg*. H2OLAND, i uppdrag av Kretsloppskontoret.

de Blois, Mark (2004d). *Program för pilotförsök: Återvinning av näringsämnen från svartvatten i Skogaberg*. H2OLAND, i uppdrag av Kretsloppskontoret.

de Blois, Mark (2006). *Provtagning på svartvatten från Skogaberg Januari 2006*. H2OLAND, i uppdrag av Kretsloppskontoret.

de Blois, Mark (2006). *Karakterisering av svartvatten från Skogaberg*. H2OLAND, i uppdrag av Kretsloppskontoret.

de Blois, Mark (2006), Britt-Marie Wilén, Pascal Karlsson & Carl-Henrik Hansson. *Recovery of nutrients from black water by using VSEP RO membrane technology*. Poster IWA-congress Beijing.

Edström, Mats, Hellström, Daniel, Nordberg, Åke, & Olsson, Lars-Erik (2001). *Karaktärisering av olika avloppsvatten*. JTI, Stockholm Vatten & Anox.

Forsman, Björn (2007). *Insamling av svartvatten sluter kretsloppet mellan bord och jord*. Svenskt Vatten, nr 3, 2007. s 29–30.

Giers, H. (2007). *Kvalitetssäkring av hushållsnära avloppsfraktioner: Vad kräver livsmedelsbranschen*. Lic.avh. 2007:01. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för biometri och teknik, Uppsala.

Göteborgs Stad, Kretsloppskontoret, H2OLAND (2007). *Resultatpärm projekt Skogaberg*.

Göteborgs Stad, Kretsloppskontoret (2007). *Systemstudie Avlopp – En studie av framtida hållbara system för hantering av avlopp och bioavfall i Göteborgsregionen*.

Hansson, Carl-Henrik (2007). Nordcap Membrane Consulting. Personliga meddelanden (inom projektet Skogaberg).

Jönsson, Håkan, Baky, Andras, Jeppsson, Ulf, Hellström, Daniel & Kärrman Erik (2005). *Composition of urine, faeces, greywater and biowaste for utilisation in the URWARE model*. Urban Water, Chalmers University of Technology. Urban Water Report 2005:6.

Koning, de J., Graaf, van der, J.H.J.M. (1996). *Kitchen food waste disposers: effects on sewer systems and waste water treatment*. Department of Watermanagement, Environmental & Sanitary Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

Karlberg, T. & Norin, E. (1999). *Köksavfallskvarnar: effekter på avloppsreningsverk. En studie från Surahammar*. VA-Forsk rapport 1999:9.

Karlsson, Pascal (2002). *Projektplan för Skogaberg*, Göteborgs stad, Kretsloppskontoret.

Karlsson, Pascal (2006). *Svartvatten Skogaberg, Lägesrapport november 2006*, Kretsloppskontoret.

Karlsson, Pascal (2007). *Svartvattensystemet i Skogaberg. Kretslopp med avfalls-kvarnar och omvänd osmos. Ett nybyggt bostadsområde med källsorterande system*. Powerpoint presentation konferens avlopp & kretslopp, Linköping, 2007.

Kärrman, E., Olofsson, M., Persson, B., Sander, A. & Åberg, H. (2001). *Köksavfalls-kvarnar – en teknik för uthållig resursanvändning?: En förstudie i Göteborg*. VA-Forsk rapport 2001:02 / RVF Utveckling 01:10.

Klimeski, Aleksandar (2007). *Chemical precipitation of Black Water from Skogaberg*. Examensarbete, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Water Environment Technology.

Livsmedelsföretagen, Svenska Naturskyddsföreningen och Lantbrukarnas Riksförbund (2002). *Riktlinjer för hållbar användning av växtnäring från samhällets flöden av organiskt material*, Arbetspapper.

Lingehed, Isabella (2006). *Anaerobic digestion of sludge and concentrate produced by reversed osmosis*. Examensarbete, Tekniska högskolan vid Umeå universitet, Institute of Technology Umeå University.

Läckeby products (2007). Broschyr Roto-Sieve.

Meins, Torben (2005). *Black Water recycling at Skogaberg: Optimization of VSEP RO settings in P-Recirculation-Mod*. Examensarbete, Fachhochschule Lübeck University of Applied Science Department of Civil Engineering.

Naturvårdsverket (2002). *Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp*. Rapport 5214, Naturvårdsverket, Stockholm.

New Logic Research (2007). VSEP: a separate revolution. Broschyr: www.vsep.com.

Nordberg, Ulf (2006). Ola Palm, Mats Edström & Åke Nordberg. *Behandlingslösningar för svartvatten och malt köksavfall från Skogaberg, Göteborg*. JTI, i uppdrag av Kretsloppskontoret.

Palmquist, Helena (2004). *Hazardous Substances in Wastewater Management*. Division of Sanitary Engineering. Departement of Civil and Environmental Engineering, Luleå University of Technology. Doctoral thesis.

Renhållningsförvaltningen Stockholms Stad (2005). *Plockanalys av avfall –Etapp 3*. Nuvarande Trafikkontoret, Avdelningen för avfall.

Rud, Eva (2006). *Fouling of VSEP RO Membranes: A Pilot Plant Study of Black Water Recycling at Skogaberg*. Examensarbete, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Water Environment Technology.

Seghezzo, Lucas (2005). Adriaan Mels. *Hydrolysis and biodegradability tests – laboratory guidelines to perform hydrolysis and anareobic biodegradability test*. Lettinga Associates Foundation.

Sporrong, J., Egnahemsbolaget, november 2006. Personligt meddelande.

Vikicevic, S., Retzner, L., Törner, T. & Ohlsson, T, (2001). *Karakterisering av avfallsflödet från svenska hushåll*. Stiftelsen REFORSK. FoU 155.

Vikicevic, S., Nordvästra Skånes Renhållnings AB, november 2006. Personligt meddelande.

Wilén, Britt-Marie (2007). *Uppslutna membran_prover_ICP_MS_070718.xls*. Resultatfil (excel). Department of Civil and Environmental Engineering, Water Environment Technology, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.

Winnfors, Eric (2005) *Göteborg återvinner näring med membran*. Cirkulation nr 4, 2005, s 12–13.



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