

Analys av system för rening av avloppsvatten i en anaerob membranbioreaktor

Analysis of systems for treatment of wastewater
in an anaerobic membrane bioreactor

Tove Sundberg

Referat

Analys av system för rening av avloppsvatten i en anaerob membranbioreaktor *Tove Sundberg*

Vid behandling av avloppsvatten i Sverige används idag i de flesta fall en aktivslamprocess kompletterad med kemiskfällning. Denna process är inte så energieffektiv och kanske inte heller den mest optimala ur miljösynpunkt. Därför kan det vara intressant att utvärdera nya alternativa metoder för att se om dessa kan vara skonsammare mot miljön och bidra till en minskad resursförbrukning. I Sjöstadverket, som är en försöksanläggning vid Hammarby Sjöstad, undersöks flera nya tekniker i mindre skala. För att kunna utvärdera dessa tekniker utifrån ett helhetsperspektiv görs systemanalyser, där för- och nackdelar och andra effekter kan vägas in.

I föreliggande studie har fem systemstrukturer för vattenrening byggts upp i Matlab/Simulink. Substansflödesmodellen URWARE (URban WATER REsearch) användes för att utföra en systemanalys, som gjorde en jämförelse av de olika systemen möjlig. Fyra av systemen innehöll ny reningsteknik bestående av en anaerob membranbioreaktor (MBR) kopplad till en VSEP- enhet (Vibratory Shear Enhanced Process). Det är en teknik som nu testas i Sjöstadverket. Det femte systemet var ett referenssystem utformat som ett konventionellt reningsverk. De vatten som behandlades i reningsverken var i vissa fall blandat avloppsvatten, i andra källsorterat, med och utan matavfall från köksavfallskvarnar.

Utifrån systemanalysen kan det konstateras att MBR-tekniken ger en del fördelar gentemot den konventionella reningen. Bland annat eftersom en stor andel av näringsinnehållet i avloppsvattnet kan fångas upp och återföras till åkermark. Bäst kretsloppspotential fås när membranbioreaktorn kombineras med en kompost som tar hand om allt matavfall. Totalt sett bidrar också alla de nya reningssystemen till lägre växthusgasutsläpp och lägre utsläpp av eutrofierande ämnen än referenssystemet med konventionell rening. Ur exergisynpunkt är den nya tekniken bättre än den konventionella i det fall då urin källsorteras. I de fall då omvänd osmos används vid behandling är den konventionella processen mer fördelaktig. En nackdel med MBR-tekniken är att utsläpp av försurande ämnen är markant större än för den konventionella tekniken.

Nyckelord: URWARE, avloppsvattenrening, systemanalys, VSEP, MBR, miljöpåverkan, exergi

Abstract

Analysis of systems for treatment of wastewater in an anaerobic membrane bioreactor

Tove Sundberg

The most common way to treat wastewater in Sweden today is by a combination of an activated sludge process and a chemical treatment. These processes are not very energy efficient and may not be the most environmentally friendly. That is why it is interesting to evaluate new alternative methods to see if they can be less harmful to the environment and help to a lower resource consumption. New techniques are tested in a pilot installation at Hammarby Sjöstad, Sjöstadsverket. To be able to evaluate these techniques in a wide perspective system analyses are conducted where different impacts can be considered, advantages and disadvantages in the systems.

Five system structures for water treatment have been constructed in Matlab/Simulink in this study. The URWARE (URbanWATER REsearch) model was used to conduct a system analysis, which made a comparison of the different systems possible. Four of the systems contained a new technique for water treatment, consisting of an anaerobic membrane bioreactor (MBR) combined with a VSEP (Vibratory Shear Enhanced Process) unit. This is one of the techniques that now are tested in Sjöstadsverket. The fifth system was a reference system designed as a conventional treatment plant. The wastewater treated in the different systems was in some cases mixed wastewater, in other source sorted, with or without food waste from kitchen waste disposers.

Results from the system analysis shows that the MBR technique gives some advantages compared to the conventional water treatment. A large part of the nutrients in incoming materials are recycled. The highest recycling percent is reached when the MBR technique is combined with compost that handles the food waste. The total impact on the environment by greenhouse gases and eutrophic substances is lower in all the alternative systems compared to the reference system. The system with the source sorted urine has the most favourable exergy turnover. When reversed osmosis is used in the treatment a lot of energy is needed which leads to a poor exergy turnover and the conventional technique is more advantageous in these cases. All the alternative systems give a larger acidification which is a disadvantage with the MBR technique.

Keyword: URWARE, wastewater treatment, system analysis, VSEP, MBR, environmental load, exergi

Department of Information Technology, Uppsala University
Box 337, SE- 751 05 UPPSALA
SWEDEN
ISSN 1401-5765

Förord

Detta examensarbete ligger inom civilingenjörsprogrammet Miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och omfattar 20p. Arbetet har utförts på uppdrag av Stockholm Vatten AB och är ett delprojekt inom utvärderingen av anaeroba reningsmetoder för avloppsvattnet från Hammarby sjöstad. Arbetet syftar till att utföra en systemanalys av nya reningstekniker innehållande anaerob membranbioreaktor och studera miljöpåverkan från dem.

Handledare på Stockholm Vatten har Daniel Hellström varit. Andras Baky på JTI har varit hjälphandledare och bidragit med kunskap om URWARE-modellen. Ämnesgranskare på universitetet har Bengt Carlsson vid institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet varit. Allan Rodhe vid institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet har varit examinator.

Jag vill tacka följande personer som jag varit i kontakt med under examensarbetet: Daniel Hellström för diskussioner och all hjälp jag har fått under projektets gång. Andras Baky för alla långa telefonsamtal och för att du orkat svara på alla mina frågor. Utan dig hade det inte gått. Cecilia Hessel för att du så snällt har hjälpt till när jag frågat. Josh Miller på New Logic för att jag har fått låna era bilder. Slutligen vill jag också rikta ett varmt tack till Lena Jonsson på Stockholm Vatten som har svarat på massor av frågor och varit en trevlig rumskamrat.

Tove Sundberg

Stockholm, maj 2006

Copyright © Tove Sundberg och Institutionen för Informationsteknologi, Uppsala universitet.

UPTEC W 06 012, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2006.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	1
1.1 SYFTE OCH MÅL.....	1
1.2 HAMMARBY SJÖSTAD OCH SJÖSTADSVÄRKET.....	1
2. BAKGRUND	2
2.1 MEMBRANBIOREAKTOR MED VSEP-ENHET	3
2.2 OMVÄND OSMOS	4
2.3 METALLER I AVLOPPSVATTEN.....	5
2.3.1 Tungmetallreduktion i anaerob membranbioreaktor med VSEP.....	5
2.3.2 Tungmetallreduktion i omvänd osmos.....	6
2.4 EXERGI	8
3. SYSTEMANALYS	9
3.1 SYSTEMSTRUKTURER	9
3.1.1 Uppströms system	9
3.1.2 Kärnsystem.....	9
3.1.3 Nedströms system.....	10
3.1.4 Kompensatoriskt system	10
3.2 SYSTEMAVGRÄNSNINGAR.....	10
3.3 SYSTEMANALYSVERKTYGET URWARE	10
4. FALLSTUDIE	12
4.1 SYSTEMSTRUKTURER	12
4.2 SYSTEMAVGRÄNSNINGAR.....	13
4.2.1 Antaganden för modellerna	14
4.3 SYSTEMUPPBYGGNAD.....	16
4.3.1 Systemstruktur 1: Referenssystem	16
4.3.2 Systemstruktur 2: Svartvattensystem med omvänd osmos	16
4.3.3. Systemstruktur 3: Svartvattensystem med urinsortering	17
4.3.4. Systemstruktur 4a: Sjöstadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos med kompost	18
4.3.5. Systemstruktur 4b: Sjöstadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos utan kompost	19
4.4 SIMULERING	20
4.5 KÄNSLIGHETSANALYS.....	21
4.6 MÖJLIG IMPLEMENTERING AV METALLFLÖDEN I RENINGSVERKSMODELLEN	22
5. RESULTAT	23
5.1 SYSTEMENS MILJÖPÅVERKAN.....	23
5.1.1 Växthuspotential.....	23
5.1.2 Förurningspotential.....	24
5.1.3 Eutrofieringspotential	25

5.1.4 Jämförelse av miljöpåverkan	27
5.1.5 Kretsloppspotential – andel av näringsämnen som kan återföras till jordbruksmark	27
5.2 SYSTEMENS EXERGIFÖRBRUKNING	28
5.3 KVALITÉ PÅ VATTEN SOM SLÄPPS UT TILL RECIPIENT	29
5.4 KÄNSLIGHETSANALYS	31
6. DISKUSSION OCH SLUTSATS	33
6.1 DISKUSSION.....	33
6.2 SLUTSATSER	34
7. REFERENSER	36
BILAGA A	38
BILAGA B.....	40
BILAGA C	41

Liten ordlista

COD	Chemical Oxygen Demand
BOD	Biological Oxygen Demand
TS	Total Solids
TSS	Total Suspended Solids
ORWARE	Organic Waste Research
URWARE	Urban Water Research
MBR	Membranbioreaktor
VSEP	Vibratory Shear Enhanced Processing
Spillvatten	Avloppsvatten
BDT-vatten	Avloppsvatten från bad, disk och tvätt
Gråvatten	= BDT-vatten
Svartvatten	Gråvatten+urin+fekalier
Dagvatten	Uppsamlat regn- och smältvatten från tätort

1. INLEDNING

Vid behandling av avloppsvatten i Sverige används idag i de flesta fall en kombination av mekanisk, biologisk och kemisk rening, som oftast består av en aktivslamprocess kombinerad med en kemisk fällning. Dessa processer är inte så energieffektiva och kanske inte heller de mest optimala ur miljösynpunkt. Därför kan det vara intressant att utvärdera nya alternativa metoder för att se om dessa kan vara skonsammare mot miljön och bidra till en minskad resursförbrukning. Ett relativt enkelt sätt att testa och jämföra nya system är via en systemanalys. Där kan alla möjliga effekter vägas in och utvärderas utifrån ett helhetsperspektiv. I systemanalysverktygen ORWARE (ORganic WAsTe REsearch) och URWARE (URban WAtER REsearch) finns mycket erfarenhet och kunskap samlad i modeller som beskriver system för hantering av avloppsvatten och avfall. ORWARE och URWARE är substansflödesmodeller som har byggts upp under flera år i plattformen Matlab/Simulink. Med hjälp av dessa verktyg kan en pålitlig och trovärdig systemanalys utföras.

Detta examensarbete bygger vidare på ett tidigare examensarbete utfört av Cecilia Hessel (2005). I systemstrukturerna som här byggts upp används modeller som Hessel har tagit fram och i möjligaste mån används också samma avgränsningar som använts i hennes studie.

1.1 SYFTE OCH MÅL

Syftet med detta examensarbete är att utvärdera olika reningsmetoder innehållande anaerob membranbioreaktorteknik och jämföra dem med vanlig konventionell rening. Resultaten ska finnas som underlag när beslut ska tas om ett lokalt reningsverk ska byggas vid Hammarby sjöstad och vilken reningsteknik som i så fall ska användas.

Målet inom examensarbetet är att utföra en systemanalys där olika systemstrukturer för vattenrening byggs upp. Fem strukturer ska jämföras och utvärderas varav fyra är nya alternativa metoder och den femte ett referenssystem som byggs upp som ett konventionellt reningsverk. De olika systemstrukturernas potentiella utsläpp av växthusgaser, försurande ämnen och eutrofierande ämnen samt deras kretsloppspotential och exergianvändning ska studeras.

1.2 HAMMARBY SJÖSTAD OCH SJÖSTADSVERKET

Runt Hammarby Sjö i södra Stockholm håller en ny stadsdel på att byggas. Tidigare var det ett gammalt hamn- och industriområde, men nu har platsen sanerats och bebyggs för att omvandlas till ett modernt och ekologiskt hållbart bostadsområde. När Hammarby Sjöstad är fullt utbyggd kommer det att finnas 9000 lägenheter för drygt 20000 invånare (Stadsdelen, 2005). Ett ambitiöst miljöprogram sattes upp inför projektet där det övergripande målet var att stadsdelen miljöpåverkan skulle vara hälften så stor som vid normal nybyggnation (Miljöprogram för Hammarby Sjöstad, 2000). Målet innefattar såväl markanvändning, transport, byggmaterial, energi, avfall som vatten och avlopp. De mest relevanta miljömålen för vatten och avlopp som sattes upp för Sjöstaden var följande:

- Allt dagvatten ska tas om hand lokalt.
- Kväveinnehållet i det renade avloppsvattnet ska minska.
- Slammet från avloppet ska hålla så god kvalitet att det kan användas på jordbruksmark.
- Vattenförbrukningen ska halveras.
- Avloppsvattnets innehåll av farliga ämnen ska halveras.

De två sistnämnda målen ovan är i jämförelse med vad ett vanligt bostadsområde bidrar med. Till exempel förbrukar en person i ett vanligt bostadsområde cirka 200 l vatten per dygn vilket innebär att målet för Sjöstaden är 100 l/person och dygn.

Goda förutsättningar skapas redan i konstruktionsfasen för att miljömålen ska kunna uppnås, genom till exempel bra materialval, men även engagemang hos de boende i området och deras medverkan till en hållbar resursanvändning är viktigt för att lyckas.

Tanken är att ett beslutsunderlag ska tas fram om och i så fall hur ett lokalt reningsverk ska byggas vid Sjöstadsområdet. Om ett lokalt reningsverk byggs är det meningen att det ska underlätta recirkulation av närsalter och bidra till en snålare resursanvändning, eventuellt genom användande av nya reningsmetoder. Stockholm Vatten AB är en viktig del i utvärderingen av ny alternativ teknik för att förbättra energi-, avfalls- och vattenhantering i det så kallade Sjöstadsprojektet. En pilotanläggning, Sjöstadsverket, har byggts upp intill Henriksdals reningsverk där försök med nya metoder utförs. Projekten som bedrivs är koncentrerade inom fem områden; aeroba processer, anaeroba processer, membranteknik, mätinstrument och informationsteknologi med styr- och reglerstrategier (Stockholm Vatten, 2005). Fyra linjer testas för närvarande:

- Aerob rening med aktivslamprocess och biologisk kväve- och fosforreduktion.
- Aerob membranbioreaktor, där membranet utgörs av ett trumfilter. Denna process kan användas för biologisk kväve- och fosforreduktion eller kombineras med en omvänd osmos för utvinning av näringsämnen.
- Anaerob rening med UASB (Upflowing Anaerobic Sludge Blanket). Denna process kan kombineras med biologisk kvävereduktion och kemisk fosforrening eller kombineras med en omvänd osmos för utvinning av näringsämnen.
- Anaerob membranbioreaktor, där membranet utgörs av en VSEP (Vibratory Shear Enhanced Process). Denna process kan kombineras med en omvänd osmos för rening och utvinning av näringsämnen.

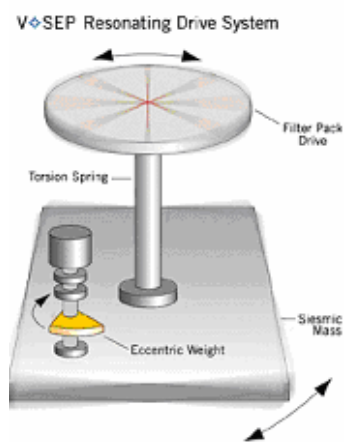
Detta examensarbete är gjort för att utvärdera den sistnämnda linjen ovan i ett systemanalysperspektiv.

2. BAKGRUND

Tekniken som ska utvärderas i systemanalysen är en anaerob membranbioreaktor med VSEP-enhet. I några av systemen kommer en omvänd osmos att användas som efterbehandling. Dessa tekniker beskrivs i följande kapitel. Information om tungmetaller i avloppsvatten och hur stor del av dem som reduceras i membranbioreaktor och omvänd osmos, samt vad exergi är kommer också att tas upp.

2.1 MEMBRANBIOREAKTOR MED VSEP-ENHET

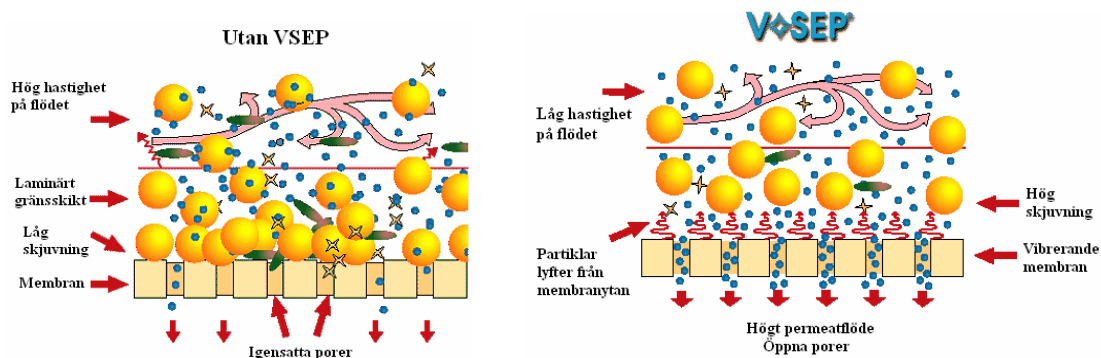
En membranbioreaktor (MBR) består av en bioreaktor ihopkopplad med en membranenhet och kombinerar biologisk rening med membranfiltrering. Vid rening leds avloppsvattnet först in i bioreaktorn där mikroorganismer bryter ned det organiska materialet, sedan förs det vidare till membranet som separerar ut en vätskefas, kallad permeat. En koncentrerad fastare fas, koncentrat, återcirkuleras till bioreaktorn. Även om genomströmningen är relativt hög hålls det biologiskt aktiva materialet kvar i reaktorn och systemet fungerar bra. Bioreaktorn kan vara antingen aerob eller anaerob, och membranet kan vara placerat både externt och internt i reaktorn (Hessel, 2005). I Sjöstadsverket är bioreaktorn anaerob och membranenheten är placerad externt.



Membrantekniken som används är en VSEP (Vibratory Shear Enhanced Process) vilken består av vibrerande membran som håller biomassan inne i systemet, se figur 1. Två cirkulära plattor är fästa på en vibrerande mittaxel och emellan dem finns en membranstack (flera membraner ovanpå varandra) bestående av den sort plattmembran som passar bäst för typen av vätska som önskas renas. Till exempel kan membranens porstorlek och material varieras för att optimera reningen som gjordes i en studie av Grundestam (2006).

Figur 1. Del av VSEP-enhet. (New Logic, 2006)

Vid traditionell membranseparation, då vätska leds förbi membran i hög hastighet, blir vätskan närmast membranet i stort sett stillastående på grund av friktion och membranet sätts lätt igen. Om membranet rör sig, som i VSEP- tekniken, försvinner det stillastående lagret vid membranytan och membranet sätts inte igen lika snabbt som i den traditionella membrantekniken. Vad som händer när membranerna vibrerar fram och tillbaka i hög hastighet är att stora skjuvkrafter utvecklas vid membranens ytor, vilka skapar turbulens så att partiklar inte sätter sig och porerna hålls öppna för permeat utflöde. I figur 2 visas strömningsscenarioer utan och med vibrerande membran.

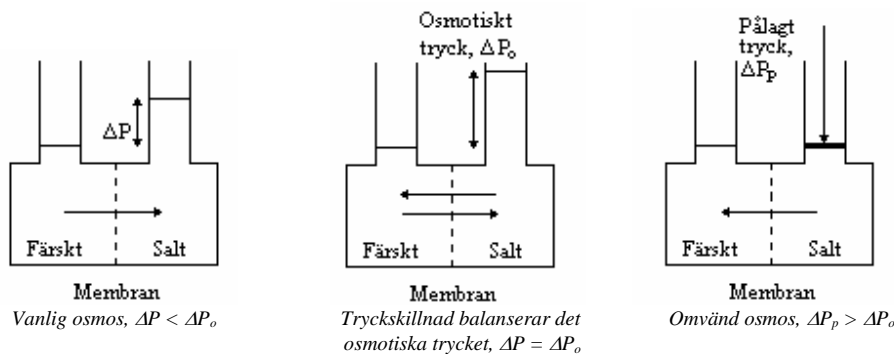


Figur 2. Strömning längs med membranytan, utan och med vibrerande membran (New Logic, 2006).

VSEP-tekniken har lägre energiförbrukning än konventionell membrantechnik eftersom ett lägre pålagt tryck behövs, vattnet kan strömma långsammare men ändå renas effektivt. En annan positiv egenskap med VSEP-enheten är att den är kompakt och således kräver litet utrymme (Hasan m.fl., 2002). Den här tekniken är relativt obeprövad inom kommunal avloppsvattenrening, men det pågår pilotförsök på några ställen runt om i landet.

2.2 OMVÄND OSMOS

Ordet osmos kommer från grekiskan och betyder tryck eller stöt. Det är förmågan eller strävan hos vätskor och lösta ämnen i vätskor att genomtränga ett membran för att åstadkomma samma koncentration på båda sidor av membranet. Om ett semipermeabelt membran skiljer två lösningar av olika koncentration åt, till exempel saltlösningar, kommer en skillnad i kemisk potential uppstå över membranet. Detta leder till att en spontan diffundering av lösningen med den lägre koncentrationen, högre potentialen, genom membranet till lösningen med den högre koncentrationen, lägre potentialen. Se den vänstra skissen i figur 3. Diffunderingen kommer att fortgå till systemet hamnar i jämvikt.



Figur 3. Principen för osmos och omvänd osmos enligt ENWA (2006).

När koncentrationen av salt är lika i de båda lösningarna har jämvikt uppstått. Då kommer en skillnad motsvarande vattennivån i tanken på båda sidor om membranet finnas. Denna höjdskillnad är det osmotiska trycket, P_o . Se mittensskissen i figur 3. Skapas ett högre tryck än det osmotiska trycket på saltlösningen omvänds processen. Då kommer rent vatten diffundera membranet från lösningen med den högre saltkoncentrationen till lösningen med den lägre koncentrationen, vilket visas i den högra skissen i figur 3. På så sätt koncentreras saltlösningen (ENWA, 2006).

I vattenreningssammanhang utnyttjas en omvänd osmos som ett senare, ofta sista, steg i en behandlingsprocess. Detta för att avloppsvattnet inte får innehålla för stora partiklar som kan sätta igen membranet och sänka kapaciteten i processen. Syftet med den omvända osmosen är att koncentrera näringsämnen i spillvattnet för att sedan kunna återföra detta koncentrat till jordbruksmark.

2.3 METALLER I AVLOPPSVATTEN

I avloppsvatten finns det en hel del olika tungmetaller i varierande halter, mer eller mindre toxiska. Kadmium (Cd), bly (Pb) och kvicksilver (Hg) förekommer inte i så stora halter, men de är de mest toxiska tungmetallerna och skapar därför stora problem för miljön och människan. Det är så allvarligt att riksdagen har beslutat att de tre metallerna ska avvecklas ur samhället. Andra vanligt förekommande metaller är koppar (Cu), krom (Cr), nickel (Ni) och zink (Zn), men dessa anses ha mycket liten belastning på miljön i de flesta användningsområden och därför anses avveckling av dessa inte nödvändig (Naturvårdsverket, 2002). Avveckling ur samhället kommer alltså inte ske för dessa tungmetaller, men gränsvärden finns för hur mycket som får släppas ut. Den största andelen tungmetaller som kommer in till reningsverken finns i BDT-vatten, (Bad-, Disk- och Tvättvatten) främst i tvättvattnet (IEH, 2003). Via svartvatten inkommer en mindre mängd tungmetaller, framförallt via fekalier. I urin finns knappt några tungmetaller alls, vilket gör att avskiljd urin med fördel kan nyttjas som växtnäring (IEH, 2003; Jönsson, 2001). Även historiska utsläpp av framförallt Cd, Pb och Hg påverkar än idag metallhalten i inflödet till avloppsreningsverken (Naturvårdsverket, 2002).

Det finns goda kunskaper om hur mycket metaller som kommer in i reningsverken och hur mycket som släpps ut till recipienter, då kontinuerliga mätningar görs. Kunskapen om vad som händer med tungmetallerna i reningsverkets olika processer är begränsad, den behöver utvidgas genom att processerna studeras mer ingående. Tyvärr finns ännu inte många tester utförda inom området. I ett tidigare examensarbete för Stockholm Vatten skriver Magnusson (2003) att de flesta metaller återfinns komplexbundna till suspenderat material, och då i synnerhet till organiskt material. Endast i mindre utsträckning förekommer fria metalljoner. Detta leder till att en stor andel tungmetaller hamnar i slammet. En studie av Grundestam (2006) visar att tungmetaller ackumulerar i MBR:en, men halterna i slammet ligger långt under de godkända gränsvärdena för tungmetaller i avloppsslam. Processer i reningsverket som avskiljer mest tungmetaller torde vara alla slags filtreringar och sedimenteringar så som till exempel försedimentering, sandfilter och den omvända osmosen (Baky, pers. komm.). Hur verket är uppbyggt och vilka kemikalier som tillsätts inverkar också, bland annat eftersom metaller uppför sig olika då till exempel pH förändras.

2.3.1 Tungmetallreduktion i anaerob membranbioreaktor med VSEP

I Sjöstadverket tas prover kontinuerligt på inkommande vatten till MBR:en, proverna skickas på analys av bl.a. tungmetaller. Årsmedelvärden från år 2005 på tungmetallkoncentrationer i avloppsvatten från Hammarby Sjöstad har beräknats och anges som inkoncentrationer i tabell 1. Utkoncentrationer i samma tabell är medelvärden från Grundestams (2006) fyra provtagningar gjorda på utgående vatten från en anaerob membranbioreaktors VSEP-enhet (Bilaga B). Tungmetallreduktionen i membranbioreaktorn har beräknats enligt formel 1:

$$\text{Reduktion [\%]} = \left(1 - \frac{Me_p}{Me_{in}}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

där Me_p = metallkoncentration i permeatet och Me_{in} = metallkoncentration i inflödet.

Tabell 1. Inkommande och utgående värde för MBR:en, samt reduktionen av tungmetaller.

Tungmetall	Inkoncentration ¹ [µg/l]	Utkoncentration ² [µg/l]	Reduktion [%]
Cd	0,175	0,0125	93
Pb	2,417	0,675	72
Hg	-	-	-
Cu	35,667	1,7	95
Cr	2,817	0,9	68
Ni	7,842	3,75	52
Zn	91,583	6,5	93

¹Årsmedelvärde på koncentration i spillvatten från Hammarby Sjöstad

²Medelvärde från Grundestams fyra försök

Alla metaller reduceras med mer än 50 %. Kvicksilver innehåller så många värden under detektionsgränsen att denna typ av beräkning blir vansklig. Kadmium, koppar och zink reduceras med över 90 %. Resultaten ovan kan användas som riktvärden för hur stor metallreduktionen är i membranbioreaktorn. Dock har endast en försöksomgång med fyra provtagningar gjorts för utgående vatten från VSEP-enheten vilket ger en stor osäkerhet i resultaten. Det ges inte heller någon information om hur stor andel av metallerna som förekommer i löst respektive partikulär form, men troligtvis är de metaller som inte reducerats lösta eftersom i stort sett alla partiklar fastnar i VSEP:en (Hellström, pers. komm.). Fler provtagningar rekommenderas för att resultaten ska bli mer trovärdiga.

2.3.2 Tungmetallreduktion i omvänd osmos

I en studie av Andersson och Castor (2005) har prover tagits på spillvatten före och efter en omvänd osmos och analyserats med avseende på tungmetaller. Reduktionen av metaller i detta försök visas i tabell 2, tillsammans med in- och utkoncentrationerna. In i en omvänd osmos leds ett flöde, ut från processen kommer två flöden, ett permeat och ett koncentrat:

$$Q_{in} = Q_p + Q_k \quad (2)$$

där Q_{in} = inflödet, Q_p = permeatflödet och Q_k = koncentratflödet.

Volymreduktionsfaktorn i försöket som gjordes var femton, $VRF=15$, vilket innebär att volymen som innehåller huvuddelen av föroreningarna har reducerats med 93 %.

$$\frac{(Q_p + Q_k)}{Q_k} = VRF = 15 \quad (3)$$

Prover på spillvattnet in i den omvända osmosen och på det utgående permeatet togs och analyserades med avseende på tungmetaller. När resultaten var givna kunde metallkoncentrationer i utgående koncentrat och reduktionsgrad beräknas enligt formel 4 och 1:

$$Me_k = \frac{(Me_{in} \cdot Q_{in} - Me_p \cdot Q_p)}{Q_k} \quad (4)$$

där Me_k är lika med metallkoncentration i koncentrat. I formel 4 görs ett antagande att alla metaller som kommer in i den omvända osmosen också kommer ut ur den. Q_{in} var uppmätt till 1,5 l/min vilket gav $Q_p=$ 1,4 l/min och $Q_k=$ 0,1 l/min. Resultat av analyser och beräkningar visas i tabell 2.

Tabell 2. Tungmetallkoncentrationer i inkommande vatten, utgående permeat och utgående koncentrat samt reduktionen i avloppsvattnet (Andersson & Castor, 2005).

Tungmetall	In [µg/l]	Ut_{permeat} [µg/l]	Ut_{koncentrat} [µg/l] beräknad	Reduktion [%]
Cd	<0,01	<0,01	<0,15	100 ¹
Pb	<0,1	<0,1	<1,5	100 ¹
Hg	<0,02	<0,02	<0,3	100 ¹
Cu	6	2	62	67
Cr	8	0,1	119	99
Ni	14	1	195	93
Zn	4	4	4	0

¹ Andersson och Castor har antagit att hela mängden metall hamnar i koncentratet eftersom metallhalten i permeatet befinner sig under detektionsgränsen för analysutrustningen.

Resultaten kan användas som riktvärden om hur stor del av metallerna som hamnar i koncentratet respektive permeatet, alltså vilken metallreduktion som sker i den omvända osmosen. Dock har endast ett försök gjorts vilket ger en stor osäkerhet, och ingen information ges heller här om hur stor andel av metallerna som förekommer i löst form respektive partikulärt. För att få mer kunskap om tungmetallsreduktion i omvänd osmos behövs ytterligare provtagningar göras.

I en samtida studie av Grundestam (2006) har liknande provtagningar gjorts i Sjöstadverket, men där på koncentratet istället för permeatet. Detta försök var något mer omfattande och bestod av fyra provtagningar. Resultaten från studien visas i tabell 3 och tabell 4.

Tabell 3. Tungmetallkoncentrationer i inkommande vatten till den omvända osmosen (Grundestam, 2006).

Tungmetall [µg/l]	Cd	Pb	Hg	Cu	Cr	Ni	Zn
Försök 1	0,02	1,0	0,1	0,8	0,9	4	8
Försök 2	0,01	0,2	0,1	0,5	1,0	4	5
Försök 3	0,01	1,0	0,1	5,0	0,9	4	-
Försök 4	0,01	0,5	0,1	0,5	0,8	3	-

Tabell 4. Tungmetallkoncentrationer i utgående koncentrat (Grundestam, 2006).

Tungmetall [µg/l]	Cd	Pb	Hg	Cu	Cr	Ni	Zn
Försök 1	0,01	0,5	0,1	3,0	3,0	23	19
Försök 2	0,1	16	0,1	110	36	83	630
Försök 3	0,1	2,0	0,2	220	39	180	-
Försök 4	0,5	4,0	0,1	170	35	220	-

Dessa försök syftar till att ta reda på kvalitén hos koncentratet, och om eventuell återföring till jordbruksmark är lämplig. Resultaten är dock inte direkt användbara för bestämning av metallreduktion eftersom antagandet som gjorts av Andersson och Castor (2005) att de tungmetaller som inte finns i permeatet hamnat i koncentratet inte är fullständigt korrekt (formel 4). En viss andel tungmetaller fastnar i den omvända osmosens membran och sköljs ur vid tvättning och hamnar i tvättvätskan. Antagligen är denna andel inte särskilt stor, men det är en okänd faktor och därmed ett förenklat samband. För att undkomma detta faktum borde en provtagningsomgång med flera försök göras, där metallanalyser på inkommande vatten, utgående permeat och utgående koncentrat utförs.

2.4 EXERGI

Energi kan varken skapas eller förstöras. Det är en av de fundamentala naturlagarna. Kvantiteten energi förändras alltså inte när den omvandlas, men kvalitén på energin påverkas. Det är just vad den fysikaliska termen exergi beskriver, kvalitén på energi. Enligt definition är exergi arbete (ordnad rörelse) eller förmåga till arbete, och den utgör den del av energin som kan omvandlas till alla andra sorters energi. Ett material kan ses på samma sätt som energi, det kan inte heller förstöras utan bara delas upp i mindre beståndsdelar. Dessa beståndsdelar kan vara mer eller mindre välordnade, och således ge materialet högre eller lägre kvalitet. I tabell 5 visas kvalitetsfaktorer för olika energiformer och material (Wall, 1977).

Tabell 5. Kvalitet hos olika energiformer och material (Wall, 1977).

	Energiform	Exempel	Kvalitetsindex [%]
ENERGI	Potentiell energi	Kraftverksdammar	100
	Kinetisk energi	Vattenfall	100
	Elektrisk energi		100
	Kärnkraft	Energin i kärnbränslet	~100
	Solljus		95
	Kemisk energi	Olja, kol, gas och torv	95
	Het ånga		60
	Fjärrvärme		30
	Överskottsvärme		5
	Värmestrålning från jordytan		0
MATERIAL	Strukturerat material	Diamant	100
	Kommersiella material	Järn, bly guld	~100
	Blandningar	Stål, legeringar, plast	~90
	Rika mineralfyndigheter	Limonit	50-80
	Malm		~50
	Mineralfyndigheter	Bauxit	20-50
	Mineraler lösta i havsvatten eller mark		~0

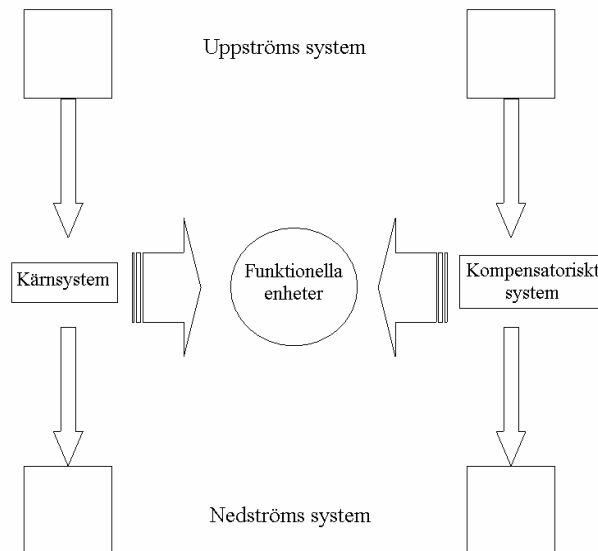
Exergin i ett system i en viss omgivning är den mängd mekaniskt arbete som maximalt kan utvinnas ur det systemet i just den omgivningen (Wall, 1977). Det betyder att exergi inte är ett absolut begrepp utan grundar sig på jämförelser i förhållande till ett referenstillstånd.

Exergibegreppet passar bra för att jämföra olika processers miljöpåverkan där till exempel olika material används och olika energiformer förekommer, men en jämförelse är alltså endast möjlig om processerna äger rum i liknande miljöer.

3. SYSTEMANALYS

3.1 SYSTEMSTRUKTURER

Ett sätt att testa och jämföra nya tekniker är via en systemanalys, där olika effekter kan vägas in och utvärderas utifrån ett helhetsperspektiv. Systemstrukturer för de system som önskas utvärderas och ett referenssystem som gör jämförelse möjlig byggs upp. Men för att systemstrukturerna ska kunna jämföras med varandra måste de vara just jämförbara. Det innebär att om ett system till exempel saknar en funktion som finns i de andra systemen, måste det kompenseras för. Det görs genom att systemgränserna utvidgas till att innehålla olika kompensatoriska system, uppströms system och nedströms system (Eriksson m.fl., 2002). En schematisk modell över det totala systemet visas i figur 4.



Figur 4. Schematisk modell över det totala systemet. (Eriksson m.fl., 2002)

3.1.1. Uppströms system

I uppströmssystem ingår alla processer som är nödvändiga för att kärnsystemet ska fungera, som till exempel tillverkning av fällningskemikalier.

3.1.2. Kärnsystem

Kärnsystemet är det system som man önskar studera i studien. I detta examensarbete utgörs det av flödet av avloppsvatten och organisktavfall från hushållen till utsläpp i recipient, spridning på jordbruksmark och deponering av biprodukter.

3.1.3. Nedströms system

Nedströms aktiviteter är sådant som sker efter processerna i kärnsystemet, till exempel spridning av växtnäring och utnyttjande av biogas. Det är ett tillvaratagande av biprodukter som bildats i kärnsystemet, önskade som oönskade.

3.1.4. Kompensatoriskt system

I det kompensatoriska systemet ingår de funktioner som ett visst system saknar då det ska jämföras med ett annat system som har dessa funktioner.

Vad som räknas till vilket system beror givetvis på var systemgränserna dras någonstans.

3.2 SYSTEMAVGRÄNSNINGAR

För att ett system inte ska bli hur stort som helst måste det avgränsas. Avgränsningar i tid, i funktion, i uppströms system och geografiskt bör göras.

3.3 SYSTEMANALYSVERKTYGET URWARE

URWARE (URban Water REsearch) är en substansflödesmodell utvecklad i Matlab/Simulink. Modellen är en vidareutveckling av föregångaren ORWARE (ORganic WAste REsearch) som utvecklats av fem olika parter; KTH Industriellt Miljöskydd, IVL Svenska Miljöinstitutet, JTI Institutet för jordbruks- och miljöteknik, SLU Lantbruksteknik och SLU Ekonomi (KTH, 2006). ORWARE används för att bygga upp kompletta avfallshanteringsystem, med modeller som till exempel transport, förbränning och deponi. I MISTRA- programmet Urban Water (1999-2005) utvecklades URWARE som består av delmodeller som beskriver olika komponenter i ett VA-system (Vatten och Avlopp). Dessa tar hänsyn till energi och material (precis som modellerna i ORWARE), såsom hushåll, dricksvattenanvändning, avloppsvattenrening, dagvattenrening och slambehandling. Reningsverksmodellerna finns beskrivna i Jeppson m.fl. (2005). URWARE anpassas till det avloppssystem som man önskar studera och med hjälp av metodik hämtad från livscykelanalys kan miljöpåverkan från detta avloppssystem utvärderas. Utsläpp till luft, vatten och jord beräknas och till exempel kan systemets klimatpåverkan, försurnings- och kretsloppspotential tas fram (Urban Water, 2006). Indata för simuleringarna består av en vektor med 84 parametrar (Bilaga A). I modellen ligger defaultvärden som är framtagna utifrån de senaste forskningsresultaten och beskriver värden för svenska förhållanden, men det går lika bra att lägga in och använda platsspecifika indata om de finns tillgängliga. Vad som kan vara intressant att beakta är att alla värden i URWARE- modellerna inte är uppmätta utan vissa är så kallade intelligenta gissningar vilket ger en osäkerhet, inte nödvändigtvis stor men dock en osäkerhet. Viktigt att veta är också att in- och utdata till modellerna är års medelvärden, vilket till exempel innebär att transienter inte modelleras (Jönsson m.fl., 2005).

Den så kallade URWARE-vektorn består alltså av 84 element, men inte alla av dem är väsentliga i avloppsvattenreningssammanhang. I tabell 6 visas de parametrar som är intressanta.

Tabell 6. URWARE-vektorn, med parametrarna som är väsentliga i avloppsvattenrenings-sammanhang.

Elementnummer	Parameter
6	Biologisk syreförbrukning, BOD7
7	Flyktiga substanser, VS
8	Torrsvikt, DM, denna parameter beskriver allt löst material, TS
22	Vatten
23	Totalkväve, Ntot
24	Ammoniumkväve, NH3-N
26	Nitrit- och nitratkväve, NO3-N
28	Totalsvavel, Stot
29	Sulfatsvavel, SO4-S
30	Totalfosfor, Ptot
32	Totalkalium, Ktot
42	Suspenderat (partikulärt) material, TSS
43	Totalt COD
44	Kväve i lösligt material, Nsol
46	Partikulär Svavel
48	Sulfidsvavel, HS
49	Organiskt bunden kalium, Kpart
75	COD för löst, biologiskt nedbrytbart material, CODbiosol
76	COD för löst, inert material, CODinsol
77	COD för partikulärt,, biologiskt nedbrytbart material, CODbiopart
78	COD för partikulärt, inert material, CODinpart
79	Fosfatfosfor, PO4-P
80	Partikulär fosfor, Ppart
81	Partikulär kväve, Npart
82	Temperatur i °C
	<i>För aktivslam- modellerna behövs ytterligare sju variabler. (Dessa fungerar som tillståndsvariabler)</i>
85	Långsamt biologiskt nedbrytbart material
86	Heterotrof biomassa
87	Autotrof biomassa
88	Löst kväve som hör ihop med den lösta biologiskt nedbrytbara COD-fraktionen
89	Partikulär kväve som hör ihop med u(85)
90	Partikulär fosfor som hör ihop med u(85)
91	Partikulärt svavel som hör ihop med inerta fraktioner

4. FALLSTUDIE

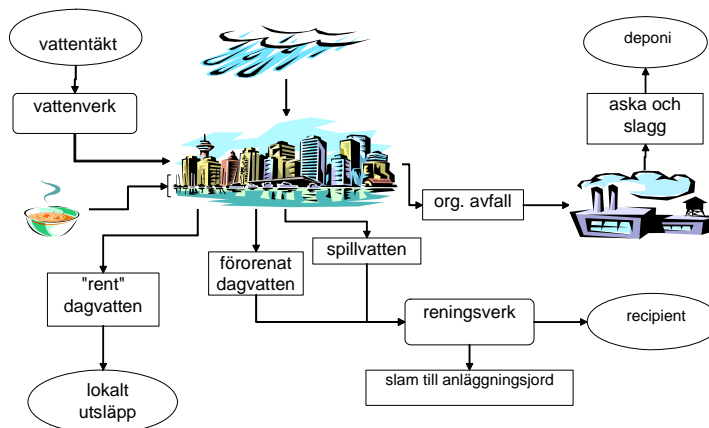
Hessel (2005) utvärderade i sin studie två olika avloppsvatten i två olika reningsystem. I denna studie har fem olika reningsystem studerats med tre olika vatten. De fem systemstrukturerna och vilka vatten som renas i dem finns beskrivna nedan.

4.1 SYSTEMSTRUKTURER

Fem olika systemstrukturer för vattenrening önskade man undersöka i detta examensarbete, ett konventionellt system och fyra innovativa system. Det konventionella systemet, *Referenssystem* (system 1), används som en referens för att se hur miljöpåverkan skiljer sig mellan dagens teknik och den nya tekniken i de fyra innovativa systemen; *Svartvattensystem med omvänd osmos* (system 2), *Svartvattensystem med urinsortering* (system 3), *Sjöstadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos med kompost* (system 4a), och *Sjöstadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos utan kompost* (system 4b). I de fem systemen behandlas avloppsvattnet på olika sätt. Beskrivning följer nedan:

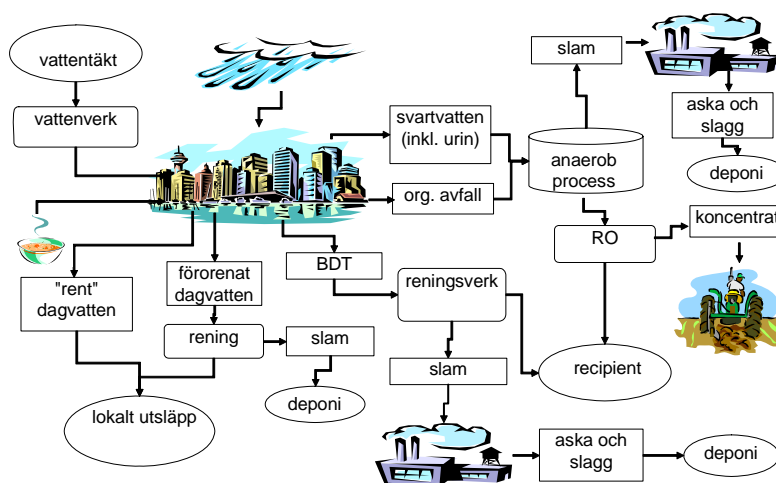
1. Referenssystem.

Svartvatten, gråvatten (tillsammans det totala spillvattnet) och förorenat dagvatten renas på konventionellt sätt med kemisk fällning, aktiv slamprocess och sandfilter. Organiskt avfall förbränns.



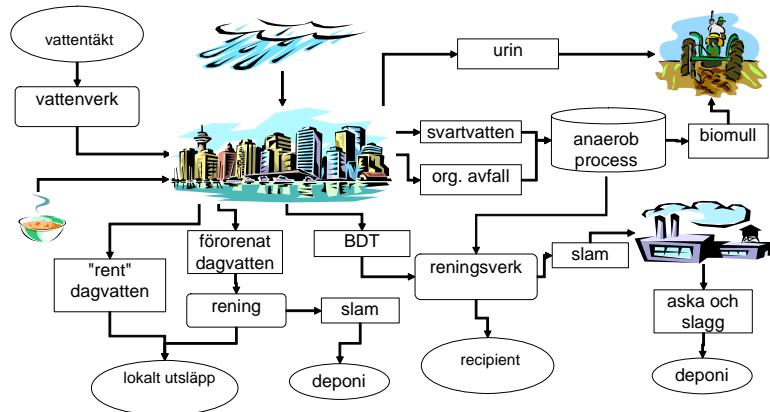
Figur 5. Illustration av system1.

2. *Svartvattensystem med omvänd osmos*. Svartvatten och organiskt avfall renas först i en anaerob membranbioreaktor, där membranet utgörs av en VSEP, och efterbehandlas sedan med en omvänd osmos. Gråvatten renas i ett konventionellt reningsverk och förorenat dagvatten renas med sandbädd.



Figur 6. Illustration av system 2.

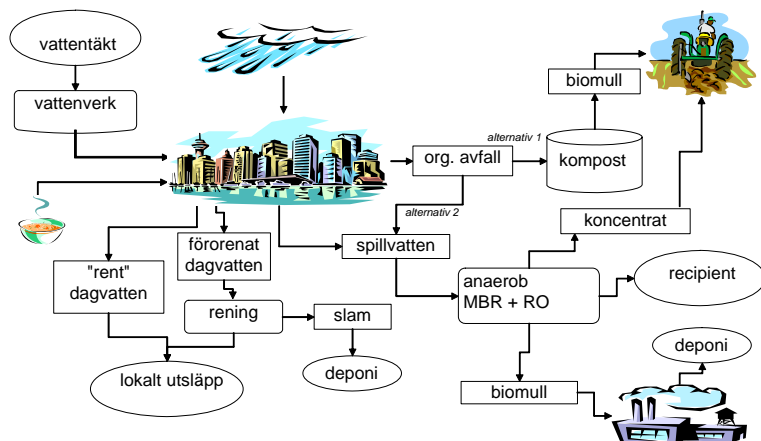
3. *Svartvattensystem med urinsortering.* Svartvatten och organiskt avfall renas först i en anaerob membranbioreaktor, där membranet utgörs av en VSEP, och efterbehandlas sedan i ett konventionellt vattenreningsverk. Urin avskiljs före rening och transporteras till jordbruk. Gråvatten renas i ett konventionellt reningsverk och förorenat dagvatten renas med sandbädd.



Figur 7. Illustration av system 3.

4a. *Sjöstadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos med kompost.* Spillvatten renas först i en anaerob membranbioreaktor, där membranet utgörs av en VSEP, och efterbehandlas sedan med en omvänd osmos. Organiskt avfall komposteras och förorenat dagvatten renas med sandbädd. Se alternativ 1 i figur 8.

4b. *Sjöstadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos utan kompost.* Spillvatten tillsammans med organiskt avfall renas i en anaerob membranbioreaktor där membranet utgörs av en VSEP, och efterbehandlas sedan med en omvänd osmos. Förorenat dagvatten renas med sandbädd. Se alternativ 2 i figur 8.



Figur 8. Illustration av system 4a och 4b.

I det andra och tredje systemet samt i 4b blandas organiskt matavfall i spillvattnet med hjälp av köksavfallskvarnar.

4.2 SYSTEMAVGRÄNSNINGAR

Avgränsningar i tid: Allt avloppsvatten som genereras under ett år ingår i systemet, med början då det genereras tills det att det är godkänt enligt gällande krav och kan släppas ut till recipient. Även behandling av biprodukter som bildas, såsom slam, slagg och aska innefattas. Tidsbegränsningen vid deponering av biprodukter är satt till ST (Surveyable

Time), vilken är den tid då främst anaeroba processer sker och emissioner domineras av inre initial nedbrytning av organiskt material.

Avgränsningar geografiskt: Endast rening av avloppsvatten och organiskt avfall från Hammarby sjöstad ingår i systemen. Påverkan på åkermark som tar emot slam, koncentrat från omvänd osmos och urin ingår likväl som påverkan på recipient som tar emot utgående vatten från reningsverken. Emissioner som uppkommer vid slambehandling tilldelas vattenreningen.

Avgränsningar i funktion: Systemens huvudfunktion är att rena avloppsvatten till den grad att de uppfyller uppsatta utsläppskrav från Miljödomstolen med Henriksdals reningsverks utsläppshalter som riktlinje. Bifunktioner är att producera biogas och ta hand om slam och närsalter.

Avgränsningar av processer i uppströms system: Utifrån ett livscykelperspektiv beräknas de uppströmsprocesser som är möjliga, såsom transporter, tillverkning av uppströmsmaterial, energiförbrukning och dylikt. En process som är svår att beräkna är till exempel själva uppbyggnaden av reningsverket, vilken alltså inte ingår.

4.2.1 Antaganden för modellerna

- Inkommande avloppsvatten genereras i hushåll i Hammarby Sjöstad och har den sammansättningen som URWARE-gruppen föreslagit (Jönsson m.fl., 2005).
- En funktionell enhet omfattar omhändertagandet av avloppsvatten och matavfall för en personekvivalent (pe) under ett år inom Hammarby Sjöstad.
- Systemen antas kunna gå på full kapacitet hela tiden utan några eventuella driftstörningar.
- Endast i Referenssystemet blandas avloppsvatten med dagvatten och de båda vattnen renas tillsammans i ett konventionellt reningsverk. I de övriga systemen leds avloppsvattnet in i ett separat ledningssystem och dagvatten renas för sig.
- I alla scenarier antas inläckaget via ledningssystemet i systemen vara 5 liter per dag och pe varje år. Inget utläckage antas ur systemen.
- Den urinsorterande toaletten använder 4 liter vid en stor spolning och 0,2 liter vid en liten spolning. Totalt blir det 4855 l/pe & år.
- Den övriga toaletterna är så kallade snålspolande toaletter, vilka använder 4 liter vid en stor spolning och 2 liter vid en liten spolning. Totalt blir det 9125 l/pe & år.
- Ett reningsverk med en process motsvarande den som finns i Henriksdals reningsverk står som modell för Referenssystemet med konventionell rening.

- I Sjöstadssystem 2, Svartvattensystem med omvänd osmos och Svartvattensystem med urinsortering blandas matavfall ner i avloppsvattnet med hjälp av matavfallskvarnar. I Sjöstadssystem 1 komposteras matavfallet vid Sofielund och i Referenssystemet samlas matavfallet ihop och transporteras till förbränning i Högdalen.
- VSEP:ens totala energiförbrukningen antas vara 1,9 kWh/m³ (Grundestam, 2006).
- Den omvända osmosen antas förbruka 4 kWh/m³ (Bergström, pers. komm.).
- Transport av matavfall till komposten vid Sofielund sker med lastbil med släp, en transportsträcka på 20,5 km från Henriksdals reningsverk (eniro, 2006).
- Transport av slam till förbränningsanläggningen i Högdalen sker med lastbil med släp, en transportsträcka på 11 km från Henriksdals reningsverk (eniro, 2006).
- Transport av aska och slagg från Högdalens förbränningsanläggning till Sofielund för deponi sker med lastbil med släp, en transportsträcka på 4 km (Hessel, 2005).
- Temperaturen på inkommande avloppsvatten är satt till 20,8 °C och baseras på årsmedeltemperaturen år 2005 på avloppsvatten från Hammarby Sjöstad (Stockholm Vatten, 2006; Bilaga B).
- Renat vatten som släpps ut till recipient ska uppfylla krav som är satta av Miljödomstolen med Henriksdals reningsverks krav som riktlinje avseende utsläppskoncentrationer och utsläppt mängd. Hammarby Sjöstad har uppsatta mål för utsläpp som är striktare och en jämförelse kommer göras.

De gränsvärden som finns uppsatta av miljödomstolen visas nedan i tabell 7 tillsammans med Henriksdals reningsverks utsläppta koncentrationer och mängder år 2005. Reduktionen som skett av de olika ämnena i reningsverket visas också.

Tabell 7. Miljödomstolens gränsvärden, värden från Henriksdal för utsläppsmängder, utsläppskoncentrationer och reduktion samt uppsatta mål för Sjöstaden (Stockholm Vatten, 2005).

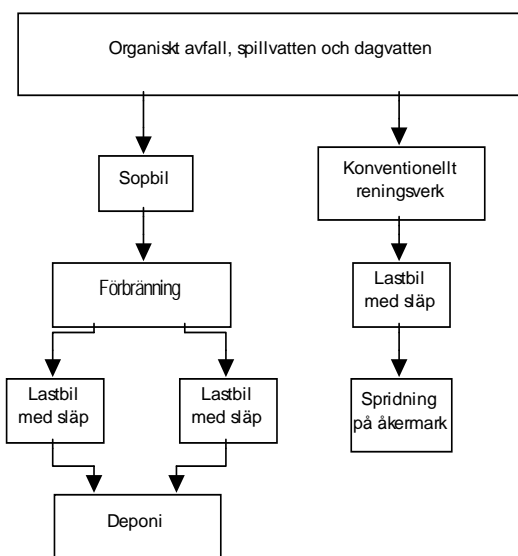
	Gränsvärden		Värden från Henriksdal (2005)		Reduktion i Henriksdal [%]	Uppsatta mål för Hammarby Sjöstad [mg/l]
	[mg/l]	[ton/år]	[mg/l]	[ton/år]		
BOD ₇	8	1500	2	180	99	5
P _{tot}	0,3	50	0,13	11	98	0,15
PO ₄ -P	-	-	0,08	6,6	-	-
N _{tot}	10	1750	7,4	640	82	6
NH ₄ -N	3	-	1,2	100	96	1,5
NO ₃ -N	-	-	5,2	450	-	-
TSS	-	-	<2	130	100	-

4.3 SYSTEMUPPBYGGNAD

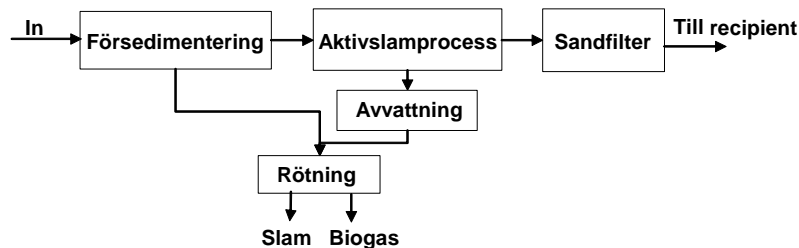
De fem systemstrukturerna av intresse byggdes upp i Simulink med hjälp av modellbiblioteket i URWARE och andra befintliga system.

4.3.1 Systemstruktur 1: Referenssystem

I systemstruktur 1, Referenssystemet, behandlas blandat avloppsvatten och förorenat dagvatten i reningsverk med konventionell vattenrening. Avvattnat slam transporteras ut till jordbruket och sprids på åkermark. Organiskt avfall samlas ihop och transporteras med sopbil till förbränning i Högdalen. Restprodukterna, slagg och aska, transporteras därefter med lastbil till deponi vid Sofielund. I figur 9a visas hur systemet ser ut uppbyggt i Simulink kompletterat med ett förenklat processschema för det konventionella reningsverket i figur 9b.



Figur 9a. Övergripande struktur i Simulink för systemstruktur 1.

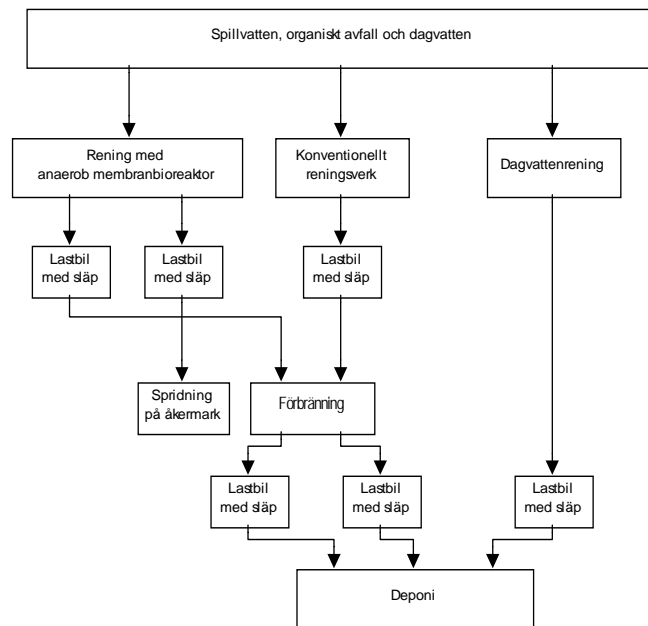


Figur 9b. Processschema för det konventionella reningsverket.

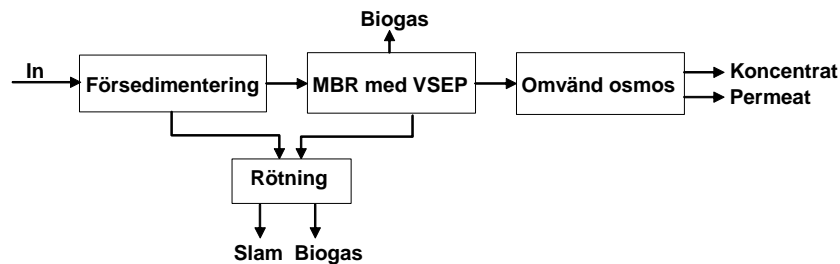
4.3.2 Systemstruktur 2: Svartvattensystem med omvänd osmos

I systemstruktur 2, Svartvattensystemet med omvänd osmos, behandlas gråvatten i ett konventionellt reningsverk med kemisk fällning, aktivslamprocess och sandfilter. Svartvatten och matavfall från avfallskvarnar leds in i en anaerob process bestående av en försedimentering, en anaerob membranbioreaktor och en omvänd osmos som efterbehandling. Fällningskemikalie, FeCl_3 , tillsätts i försedimenteringen. Koncentrat från

den omvända osmosen transporteras till jordbruk och sprids på åker. Avvattnat slam från reningsverket och från den anaeroba processen förs till förbränningsanläggning i Högdalen och restprodukter därifrån transporteras till deponi vid Sofielund. Förorenat dagvatten renas separat med sandbädd och restprodukten slam förs till deponi vid Sofielund. I figur 10a visas den övergripande systemstrukturen i Simulink kompletterat med ett förenklat processchema för MBR-verket i figur 10b. För det konventionella reningsverkets processchema se figur 9b.



Figur 10a. Övergripande struktur i Simulink för systemstruktur 2.

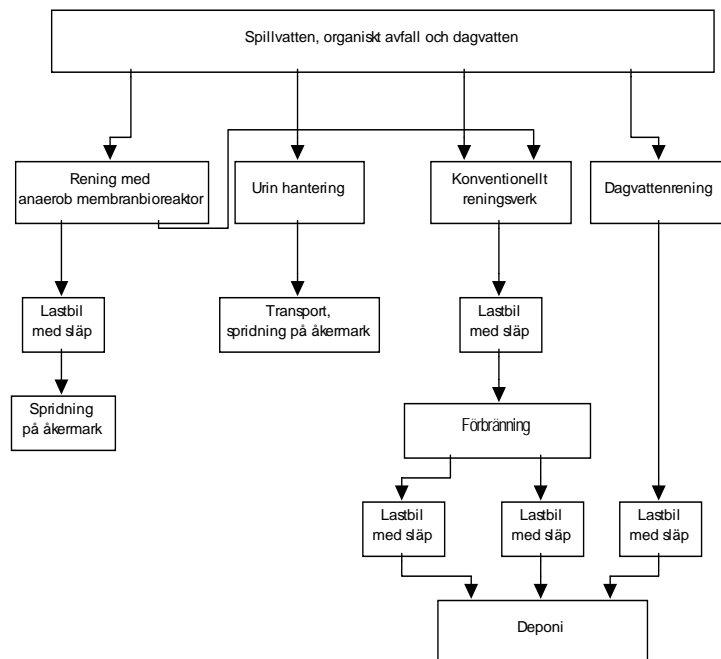


Figur 10b. Processchema för MBR-verket med omvänd osmos.

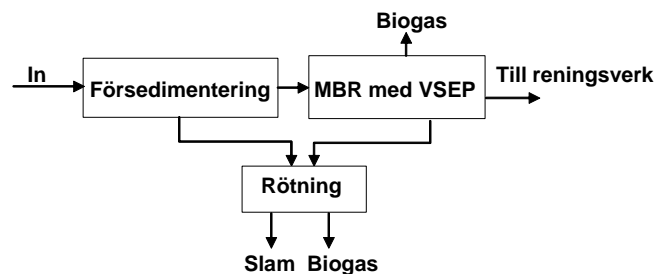
4.3.3. Systemstruktur 3: Svartvattensystem med urinsortering

I systemstruktur 3, Svartvattensystemet med urinsortering, behandlas gråvatten i ett konventionellt reningsverk med kemisk fällning, aktivslamprocess och sandfilter. Svartvatten och matavfall från avfallsskvarnar leds in i en anaerobprocess bestående av en försedimentering och en anaerob membranbioreaktor, sedan efterbehandlas spillvattnet med konventionell rening. Fällningskemikalie, FeCl_3 , tillsätts i försedimenteringen. Urin avskiljs i källan och transporteras till jordbruk. Avvattnat slam från den anaeroba processen transporteras till jordbruk och sprids på åker, medan slam från reningsverket förs till förbränningsanläggning i Högdalen och restprodukter därifrån transporteras till deponi vid

Sofielund. Förorenat dagvatten renas separat med sandbädd och restprodukten slam förs till deponi vid Sofielund. I figur 11a visas den övergripande systemstrukturen i Simulink och i figur 11b visas ett förenklat processschema för MBR-verket. För det konventionella reningsverket processschema se figur 9b.



Figur 11a. Övergripande struktur i Simulink för systemstruktur 3.

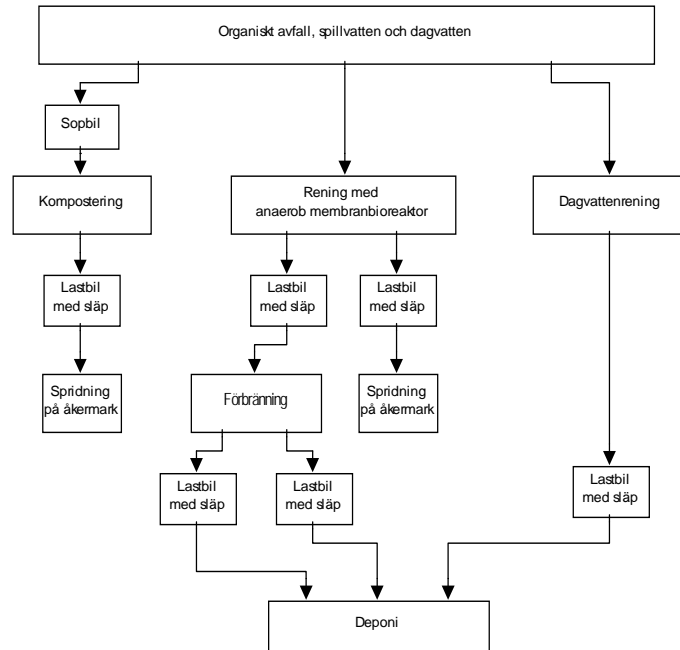


Figur 11b. Processschema för MBR-verket utan omvänd osmos.

4.3.4. Systemstruktur 4a: Sjästadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos med kompost

I systemstruktur 4a, Sjästadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos med kompost, behandlas spillvatten i en anaerobprocess bestående av en försedimentering och en anaerob membranbioreaktor. Sedan efterbehandlas spillvattnet med en omvänd osmos. Fällningskemikalie, FeCl_3 , tillsätts i försedimenteringen. Avvattnat slam från den anaeroba processen transporteras till förbränningsanläggningen i Högdalen, och restprodukterna därifrån, aska och slagg, förs till Sofielund för deponering. Det organiska avfallet samlas ihop och transporteras med lastbil med släp till kompostering. Det komposterade materialet och koncentratet från den omvända osmosen används för

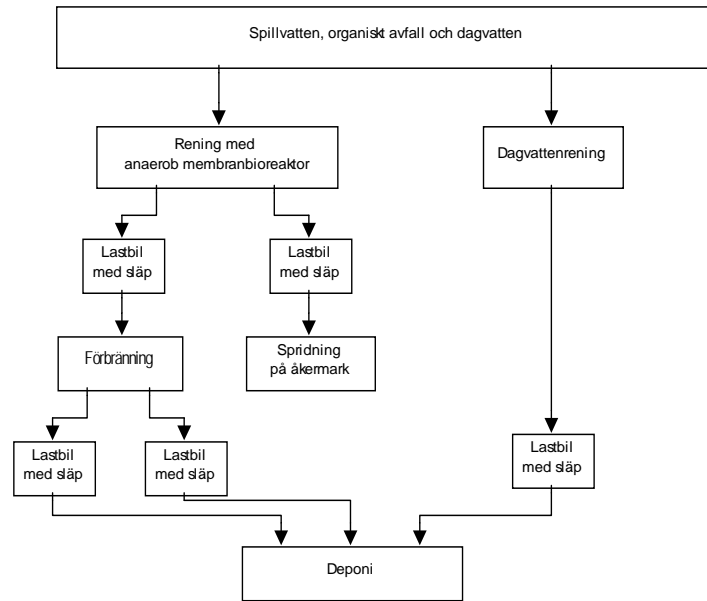
spridning på åkermark. Förorenat dagvatten renas separat med sandbädd och restprodukten slam förs till deponi vid Sofielund. I figur 12 visas hur det uppbyggda systemet ser ut i Simulink. För processschema över MBR-verket se figur 10b.



Figur 12. Övergripande struktur i Simulink för systemstruktur 4a.

4.3.5. Systemstruktur 4b: Sjästadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos utan kompost

I systemstruktur 4b, Sjästadssystemet med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos utan kompost, behandlas spillvatten tillsammans med organiskt avfall från avfallskvarnar i en försedimentering och en anaerob membranbioreaktor. Sedan efterbehandlas spillvattnet i en omvänd osmos. Fällningskemikalie, FeCl_3 , tillsätts i försedimenteringen. Avvattnat slam från den anaeroba processen transporteras till förbränningsanläggningen i Högdalen, och restprodukterna därifrån, aska och slagg, förs till Sofielund för deponering. Koncentratet från den omvända osmosen används för spridning på åkermark. Förorenat dagvatten renas separat med sandbädd och restprodukten slam förs till deponin vid Sofielund. I figur 13 visas hur systemstrukturen ser ut uppbyggd i Simulink. För processschema över MBR-verket se figur 10b.



Figur 13. Övergripande struktur i Simulink för systemstruktur 4b.

4.4 SIMULERING

När de fem systemen var färdigbyggda testsimulerades de, tills de fungerade som de skulle. Därefter anpassades parametrarna i modellerna så att de klarade kraven för utsläppskoncentrationer till recipient som redovisas i tabell 7. De parametrar som justerades anges i tabell 8 tillsammans med valda inställningar.

Tabell 8. Parameterinställningar för försedimentering, aktivslamprocess och sandfilter i de fem systemens reningsverk.

Process	Parameter	1 AS	2 AS	2 MBR	3 AS	3 MBR	4a MBR	4b MBR	Enhet
Försedimentering	TS-halt i slam	3,5	3,5	3,0	3,5	3,0	3,0	3,0	%
	TSS reduktion	50	60	40	60	40	40	40	%
	Tillsats av fällnings-Kemikalie, FeCl ₃	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0	0	kg/l lösning
	Maximal PO ₄ -halt efter försedimentering ¹	2,5	2,5	1000	2,5	2,5	1000	1000	mg/l
Aktivslam process	Slamålder	30	20		20				dagar
	Andel aerob volym av totala volymen	70	65		65				%
	Extern kolkälla	0	0		0				m ³ /dag
Sandfilter	TSS _{ut}	2	2		2				mg/l
	PO ₄	0,15	0,15		0,15				mg/l

¹ Maximal PO₄-halt utifrån försedimentering har satts högt i tre fall för att försäkra att ingen fällning sker.

Därefter var det dags att simulera alla systemen i följd efter varandra för att få ut resultat att jämföra. Först anropades den fördefinierade funktionen `varsave.m` i Matlab, vilken initierade alla variabler som skulle lagras under analysen. Exempel på variabler som lagras är exergiförbrukning, luft- och vattenemissioner, kemikalieförbrukning, transporterade sträckor mm. Sedan kördes huvudinitieringsfilen för det system som skulle simuleras innan simuleringen startades i Simulink. Efter simuleringen kördes två filer, först `calcIntSys.m` sedan `varname.m`. `CalcIntSys.m` är anpassad för den specifika systemanalysen och aggregerar ihop utvalda kategorier som till exempel total exergiförbrukning och total transporterad sträcka. `Varname.m` döper om alla vektorer och variabler genom att lägga till ett z framför varje vektor- och variabelnamn. Det görs för att värden som skapats vid simuleringen ska lagras och inte skrivas över i nästa simulering. En matris byggs upp där data lagras i den ordning simuleringarna utförs.

Detta förfarande upprepades tills samtliga system var simulerade. Efter det kördes `calcExtSys.m` och samtidigt med den initierades `xsInit.m`. Dessa filer gör det möjligt att beräkna det kompensatoriska systemet, samt upp- och nedströms system. Sedan kördes `calcImpCat.m` och samtidigt med den initierades `wfInit.m`. `CalcImpCat.m` räknar fram miljöpåverkan i form av växthus-, eutrofiering och försurningspotential med hjälp av viktningfaktorer som finns i `wfInit.m`. När alla beräkningar var gjorda var det dags att föra över resultaten till en fil i excel kallad `simres.xls`. Denna måste vara öppen för att överföringen ska kunna ske och skapad så att rätt siffror kommer på rätt plats. Överföringen skedde genom att filen `transres2xl.m` anropades i Matlab. I excel- filen skapas diagram över till exempel försurningspotentialen i de olika systemen, vilket gör en jämförelse lättare och presentationen av resultaten mer överskådliga (Bilaga C; Hessel, 2005; Jeppson m.fl., 2005).

4.5 KÄNSLIGHETSANALYS

De tre mest osäkra inparametrarna till URWARE-modellen togs fram med avsikt att utföra en enklare känslighetsanalys. Dessa var vattenanvändningen, VSEP:ens energiförbrukning och COD_{tot} , vilken innefattar COD för löst och partikulärt biologiskt nedbrytbart material (COD_{biosol} och $BOD_{biopart}$) samt COD för löst och partikulärt inert material (COD_{insol} och COD_{inpart}). Inparametrarna ökades först en i taget med 25 % (drygt 60 % för energiförbrukningen) och en simulering av alla systemen i följd gjordes. Utdata studerades för att se hur mycket systemen påverkades av ändringen. Sedan minskades de tre inparametrarna en i taget med 25 % (drygt 60 % för energiförbrukningen) och ytterligare simuleringar gjordes. Också här studerades utdata för att se hur de enskilda parametrarna påverkade systemen. Intressanta utdata för eventuella förändringar var utsläppshalter från reningsverken, systemens miljöpåverkan och deras exergi- och energiförbrukning.

I en ytterligare analys togs försedimenteringen före den anaeroba membranbioreaktorn bort i de system som renar avloppsvatten med en MBR. Detta gjordes för att man skulle kunna se hur resultatet påverkades, i avseende på miljöpåverkan och energiförbrukning.

4.6 MÖJLIG IMPLEMENTERING AV METALLFLÖDEN I RENINGSVERKSMODELLEN

I dagsläget finns ingen modell som beskriver vad som händer med tungmetallerna i delmodellerna inom reningsverket. I URWARE-vektorn finns sju stycken tungmetaller inlagda på elementnummer 34-40, men de används inte i modellerna. Parametrarna står för den totala mängden tungmetaller som finns i systemet, det finns inte angivet hur mycket som är partikulärt och hur mycket som är löst. För att kunna ange fördelningen mellan partikulära och lösta tungmetaller behövs 14 nya parametrar i URWARE-vektorn. Denna fördelning är viktig att ta fram för modellen ska kunna uppföra sig så snarligt verkligheten som möjligt. Det finns åtminstone två olika sätt att gå till väga, antingen läggs 14 nya element till i vektorn som då blir 98 lång, eller så för man in parametrarna på platser i vektorn som inte används i systemen som körs. För dessa vattenreningsmodeller kan det vara lämpligt att föra in de 14 parametrarna på elementnummer 50-63, eftersom de inte nyttjas i modellerna (Tabell 9).

Tabell 9. Tungmetaller I URWARE- vektorn

Elementnummer	Parameter	Kemisk beteckning
34	Bly	Pb
35	Kadmium	Cd
36	Kvicksilver	Hg
37	Koppar	Cu
38	Krom	Cr
39	Nickel	Ni
40	Zink	Zn
50	<i>Bly, löst</i>	
51	<i>Kadmium, löst</i>	
52	<i>Kvicksilver, löst</i>	
53	<i>Koppar, löst</i>	
54	<i>Krom, löst</i>	
55	<i>Nickel, löst</i>	
56	<i>Zink, löst</i>	
57	<i>Bly, partikulärt</i>	
58	<i>Kadmium, partikulärt</i>	
59	<i>Kvicksilver, partikulärt</i>	
60	<i>Koppar, partikulärt</i>	
61	<i>Krom, partikulärt</i>	
62	<i>Nickel, partikulärt</i>	
63	<i>Zink, partikulärt</i>	

Rent praktiskt kommer man inte att ange totalvärdena (elementnummer 34-40), utan man adderar ihop de lösta och partikulära fraktionerna och för sedan in dem på totalens plats i vektorn. Exempel för bly:

$$y(34) = y(50) + y(57) \quad (5)$$

För närvarande finns inte några siffror på var andel lösta och partikulära tungmetaller hamnar i reningsverksprocesserna, utan till en början får siktet ställas in på att ta reda på

var tungmetallerna som helhet tar vägen. Då behövs bara de parametrar som sedan tidigare finns inlagda i URWARE-vektorn (elementnummer 34-40). För att få initialvärden till fördelningen av tungmetaller i membranbioreaktorn med VSEP:en och i den omvända osmosen kan resultat från studierna som togs upp i kapitel 2.3.1 och 2.3.2 användas.

5. RESULTAT

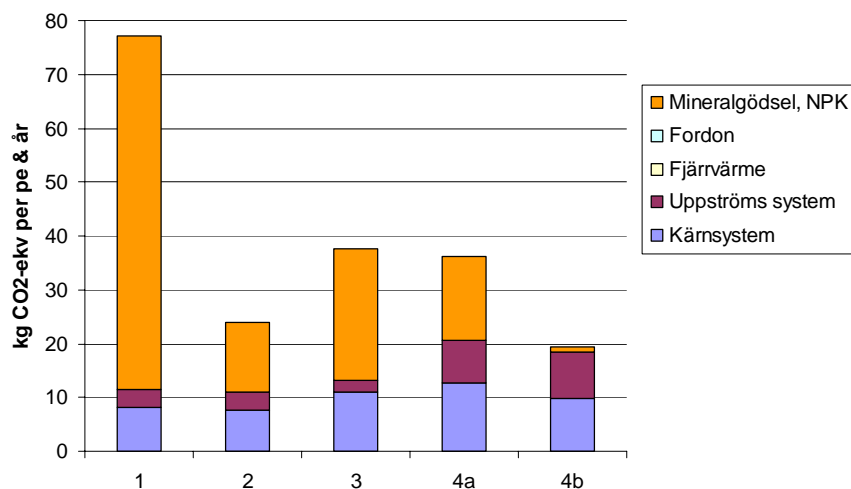
En jämförelse mellan de fem olika system följer här nedan, med avseende på deras miljöpåverkan, exergi- och energiförbrukning samt systemens förmåga att klara utsläppskvoterna till recipient. De osäkra inparametrarnas effekt på systemen presenteras i resultatet från känslighetsanalysen. System 1 är Referenssystemet, system 2 är Svartvattensystemet med omvänd osmos, system 3 är Svartvattensystemet med urinsortering, system 4a är Sjöstadssystemet med anaerob membranbioreaktor och kompost och 4b är Sjöstadssystemet med anaerob membranbioreaktor utan kompost.

5.1 SYSTEMENS MILJÖPÅVERKAN

Potentiella utsläpp av växthusgaser, den så kallade växthuspotentialen, studeras för systemen. Där tittar man på hur många kg CO₂-ekv som släpps ut per person och år. De potentiella utsläppen av försurande ämnen, försurningspotentialen, för systemen visas som utsläpp av kmol H⁺ per person och år. De potentiella utsläppen av eutrofierande ämnen anges i kg O₂-ekv per person och år och kallas för systemens eutrofieringspotential.

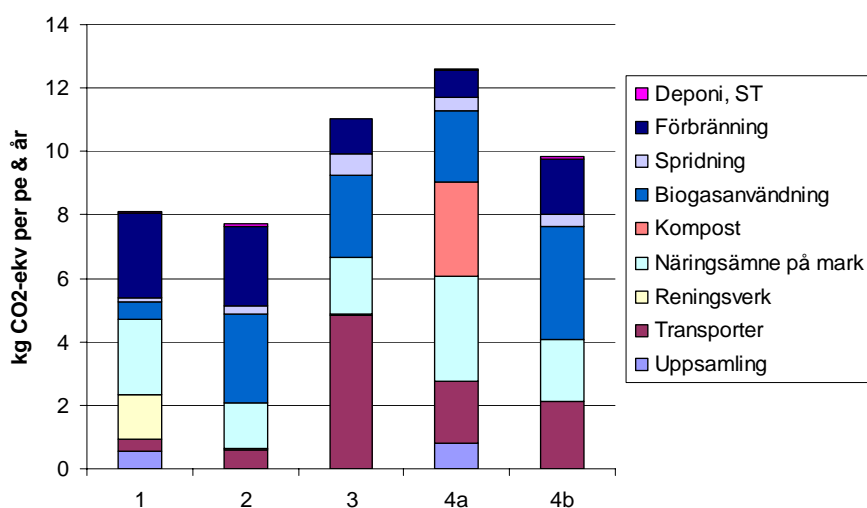
5.1.1 Växthuspotential

Referenssystemet har en omfattande växthuspotential, mer än dubbelt så stor som de flesta andra systemen. Detta syns i diagrammet med de utökade systemen (figur 14a) och beror på utsläpp av gaser vid mineralgödselproduktion. I system 3 bidrar mineralgödselproduktionen till mer än hälften av utsläppen, medan den i system 4b är knappt märkbar. I de båda Sjöstadssystemen finns stora källor i deras uppströms system. Dessa beror främst på utsläpp till luft vid elproduktion och tillverkning av fällningskemikalier. Även i system 1, 2 och 3 har utsläpp till luft vid elproduktion och tillverkning av fällningskemikalier en stor betydelse i de uppströms systemen.



Figur 14a. Systemens potentiella utsläpp av växthusgaser i de totala systemen.

Beaktas endast kärnsystemen är bilden en annan, system 1 har nästan lägst utsläpp här. System 3 och 4a ger de största bidragen i kärnsystemen främst beroende på transporter av urin i 3 och komposten i 4a. Urin är skrymmande och volymerna som ska transporteras är stora, vilket leder till att lastbilarna får köra många gånger. Bidragen från transportererna är rätt omfattande i system 4a, eftersom organiskt avfall först ska samlas in till kompostering för att sedan köras ut och spridas på åkermark. Faktiskt är det så att transportererna tillsammans med emissionerna från själva komposten och näringsämnen till åkermark utgör större delen av stapeln för system 4a (Figur 14b). Biogasanvändningen är en stor källa i alla de alternativa systemen (system 2, 3, 4a och 4b). Näringsämne på åkermark är en stor källa i alla systemen, allra störst är den i referenssystemet (1) och i system 4a. I system 1 sprids allt slam från reningsverket på åkermark och i system 4a sprids den mogna komposten och koncentratet från den omvända osmosen. Emissionerna består främst av lustgas. Material från komposten i system 1 förbränns vilket ger ett stort bidrag, precis som i system 2 där allt slam från både det konventionella reningsverket och MBR-verket förbränns. Deponins bidrag till växthusgaser under överskådlig tid är försumbar eftersom det bara är slagg och aska som deponeras. Systemet Källsorterat svartvatten har den lägsta växthuspotentialen i kärnsystemet, men totalt sett ger Sjästadssystemet utan kompost det minsta bidraget.

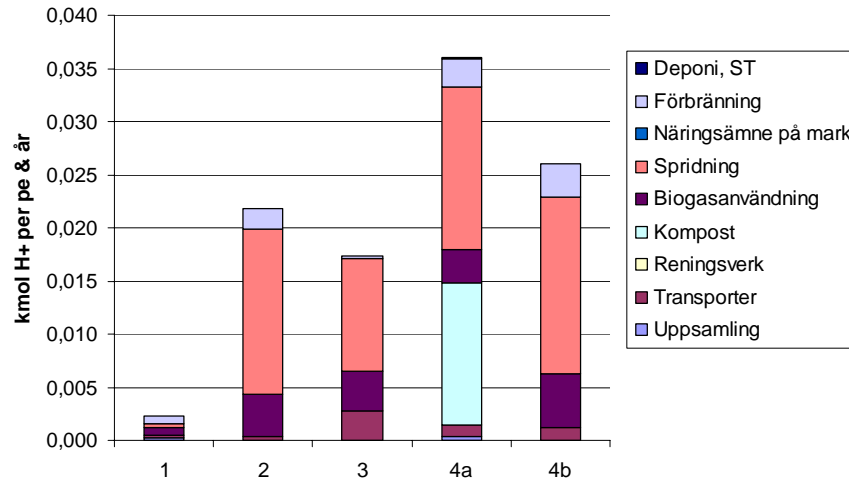


Figur 14b. Kärnsystemens potentiella utsläpp av växthusgaser.

5.1.2 Försurningspotential

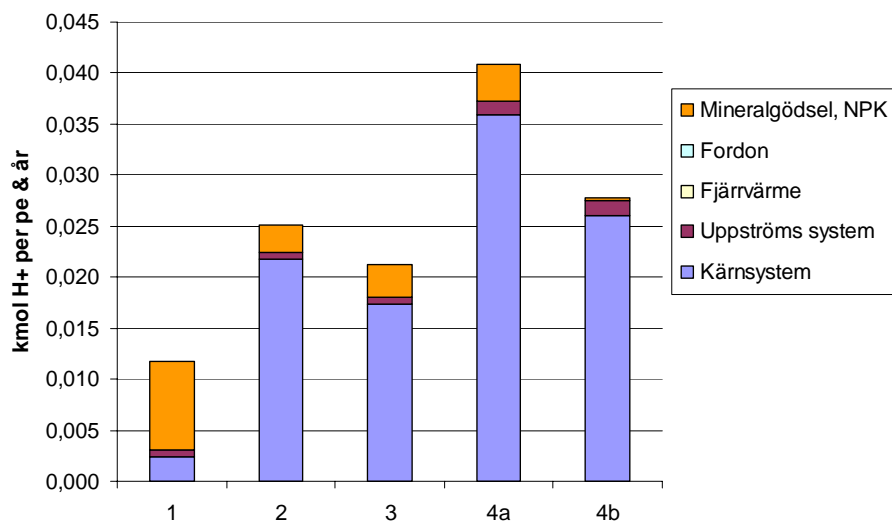
System 4a släpper ut mest försurande ämnen och det beror på att det är det enda system som har en kompost. Komposten släpper ut gaser och främst är det ammoniakemissionerna som verkar försurande på miljön. Den andra stora källan till försurningspotentialen är spridningen på åkermark och den är stor i alla de alternativa systemen. Även här är det ammoniakemissionerna som är den stora källan. Ammoniakemissioner är endast emissioner till luft. Att spridningen på åkermark inte är stor i system 1 beror på att slammet därifrån knappt innehåller någon ammoniak utan mest organiskt kväve. I system 3 bidrar urinspridningen mest till utsläpp av ammoniak, endast ett mindre bidrag kommer från spridningen av slammet från MBR-verket i det systemet. Emissioner från transporter ger ett stort bidrag i system 3 på grund av transportbehovet för urinen. Förbränningens bidrag är störst i system 2, 4a och 4b eftersom det i dessa system förbränns störst mängder slam.

Användning av biogasen, som kommer från membranbioreaktorn och rötkammaren, ger ett bidrag i alla systemen. Resultaten från kärnsystemen för de olika scenarierna visas i figur 15a.



Figur 15a. Kärnsystemens potentiella utsläpp av försurande ämnen.

I alla system utom referenssystemet är det kärnsystemet som bidrar med störst försurningspotential. Det syns tydligt om det utökade systemet studeras (figur 15b). I referenssystemet är det tillverkning av näringsämnen som är den klart största källan. Tillverkningen av näringsämnen ger ett mindre bidrag även till de alternativa systemen, tillsammans med utsläpp vid elproduktion i deras uppströms system. Minst försurande är system 1, både om kärnsystemet och det totala systemet beaktas.

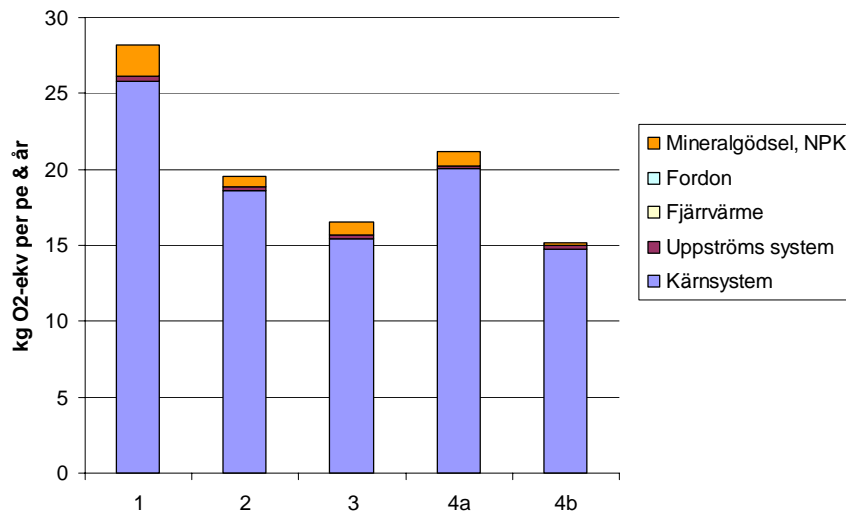


Figur 15b. Systemens potentiella utsläpp av försurande ämnen i de totala systemen.

5.1.3 Eutrofieringspotential

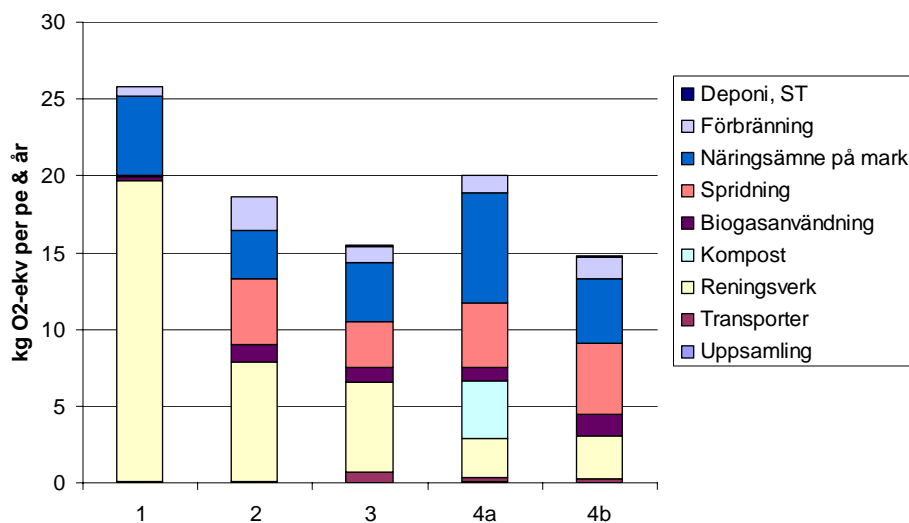
De eutrofierande utsläppen kommer till den största delen från kärnsystemen. Studeras de utökade systemen är det i stort sett bara tillverkningen av mineralgödsel som ger ett bidrag,

och störst är det i referenssystemet där detta är en kompensatorisk funktion eftersom de andra kärnsystemen producerar mer näring (Figur 16a).



Figur 16a. Systemens potentiella utsläpp av eutrofierande ämnen i de totala systemen.

Studerar kärnsystemen syns det att Referenssystemet har störst eutrofieringspotential på grund av sina utsläpp till recipient ifrån reningsverket. Även i de övriga systemen är denna källa stor, större i 2 och 3 där konventionella reningsverk finns än i 4a och 4b som endast har alternativa verk med MBR. Näringsämnen till åkermark är en stor post i alla systemen där det läcks ut eutrofierande ämnen, främst i 1 och 4a. I de alternativa systemen bidrar spridningen på åker till en rätt stor ökning av potentialen, för att det innehåller så mycket ammoniumkväve. I Svartvattensystem med urinsortering är det spridningen av urin som är den största bidragande källan till övergödningen, inget koncentrat från den omvända osmosen sprids i det systemet. Sjöstadssystemet utan kompost har lägst eutrofieringspotential, både sett till kärn- och de utökade systemen, tätt följt av Svartvattensystem med urinsortering. Kärnsystemens eutrofieringspotential visas i figur 16b.



Figur 16b. Kärnsystemens potentiella utsläpp av eutrofierande ämnen.

5.1.4 Jämförelse av miljöpåverkan

De samlade resultaten från växthuspotentialen, försurningspotentialen och eutrofieringspotentialen visas i tabell 9. Där jämförs de med värden för den ”kritiska belastningen”, vilken bygger på vad som anses vara långsiktigt hållbart samt bakgrundsmaterial för de svenska miljömålen. För växthusgaser är den kritiska belastningen 4500 kg CO₂ ekv/pe och år, för försurning är den kritiska belastningen 928 molH⁺ ekv/pe och år och för eutrofiering är den kritiska belastningen 171,6 kg O₂ ekv/pe och år (Erlandsson, 2002).

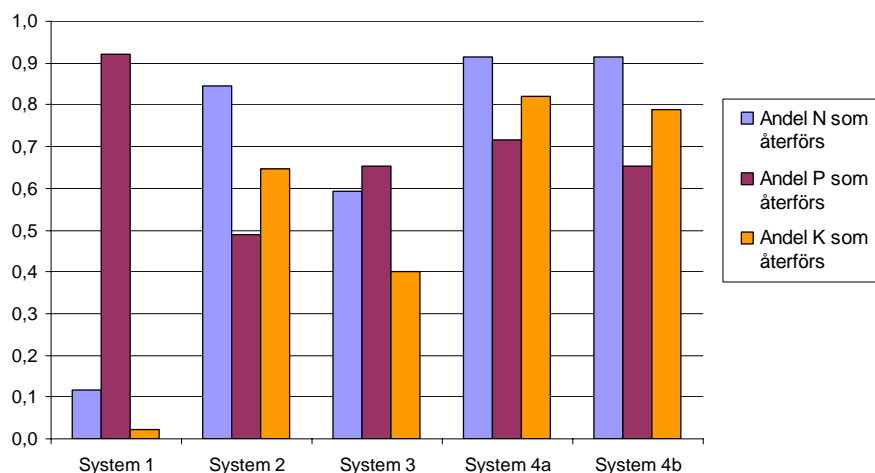
Tabell 9. Systemens potentiella utsläpp av växthusgaser, försurande ämnen och eutrofierande ämnen som andel av den nivå som anses hållbar enligt de svenska miljömålen (Erlandsson, 2002)

Miljöpåverkan		1	2	3	4a	4b
Växthusgaser	kg CO ₂ ekv/pe, år	77,08	23,88	39,49	37,59	19,48
	% av hållbarnivå	1,7	0,5	0,9	0,8	0,4
Försurning	molH ⁺ ekv/pe, år	11,7	25,1	22,1	41,5	27,9
	% av hållbarnivå	1,3	2,7	2,4	4,5	3,0
Eutrofiering	kg O ₂ ekv/pe, år	28,17	19,55	16,72	21,35	15,18
	% av hållbarnivå	16,4	11,4	9,7	12,4	8,8

Övergödningen kan sammantaget anses som den viktigaste miljöpåverkan, eftersom man där ser den högsta andelen av den hållbara nivån. Sett ur den synvinkeln är Sjöstadssystemet utan kompost, 4b, det mest fördelaktiga systemet.

5.1.5 Kretsloppspotential – andel av näringsämnen som kan återföras till jordbruksmark

Om samtliga näringsämnen beaktas har Sjöstadssystem med kompost den bästa kretsloppspotentialen, tätt följt av Sjöstadssystemet utan kompost. De är också de bästa alternativen då kväve och kalium önskas återföras till jordbruksmark, följda av system 2. Referenssystemet är klart bäst på att återföra fosfor, men visar ingen bra recirkulation för kväve och kalium. Potentialen hos Svartvattensystem med urinsortering påminner om Referenssystemets, men fosforandelen är lägre och kväve och kalium betydligt högre. Andelen av kväve, fosfor och kalium som kommer in i systemen och efter behandling sedan kan återföras till jordbruksmark visas i figur 17.

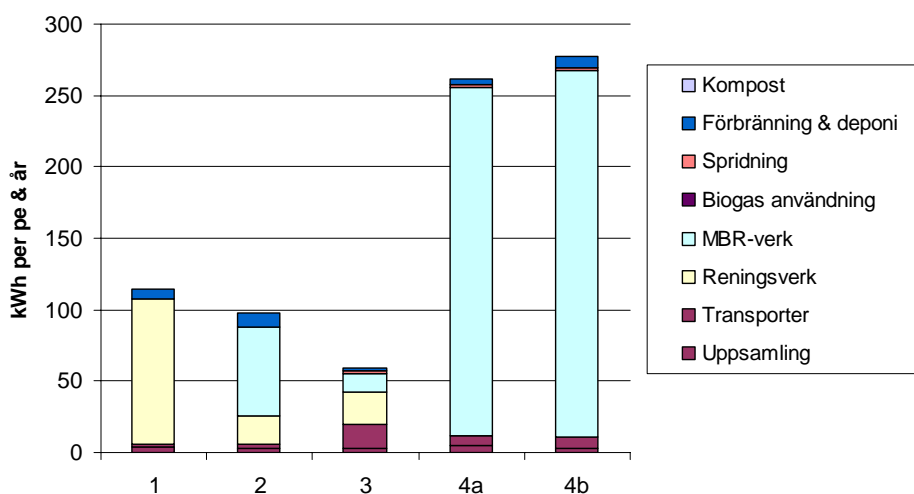


Figur 17. Andel av näringsämnen i inkommande material som återförs till jordbruksmark.

Att andelen återförd fosfor är relativt låg i system 2 beror på att en del fosfor är partikulärt och hamnar i slammet som sedan skickas till förbränning. I system 3 skickas allt slam från det konventionella reningsverket till förbränning vilket är en förklaring till att de återförda andelarna är mindre än de övriga.

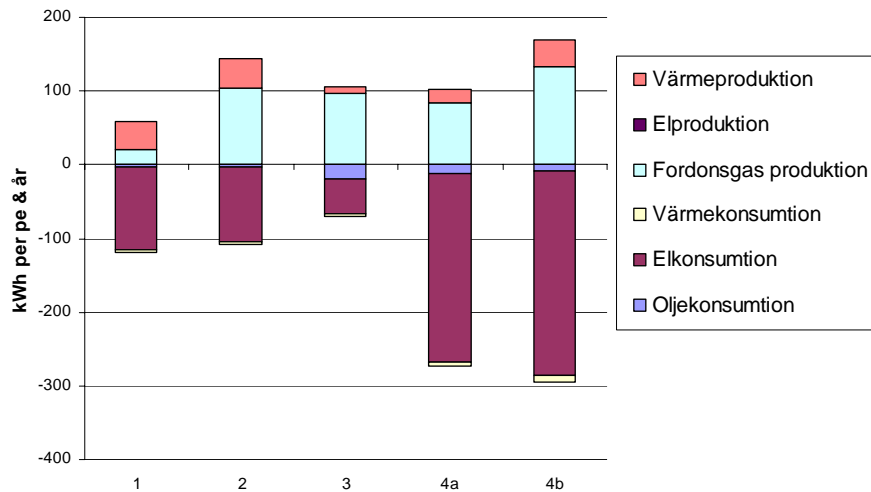
5.2 SYSTEMENS EXERGIFÖRBRUKNING

De två system som förbrukar klart mest exergi är 4a och 4b. Den största delen av energin går till driften av den omvända osmosen i MBR-verket. Även i system 2 går en hel del av energin till den omvända osmosen. Aktivslamprocessens luftning och rötningen står för i stort sett hela förbrukningen i system 1, samt några mindre poster i system 2 och 3. Det mest fördelaktiga systemet ur exergisynpunkt är system 3 med urinsorteringen, där det inte finns någon omvänd osmos. Resultaten finns införda i figur 18a. Exkluderas den omvända osmosens användning kommer förbrukningen att sjunka avsevärt i alla de alternativa systemen utom system 3. Då är det luftningsprocessen i reningsverket som är den största posten och system 1 blir den största exergikonsumenten.



Figur 18a. Exergianvändning för de olika systemen.

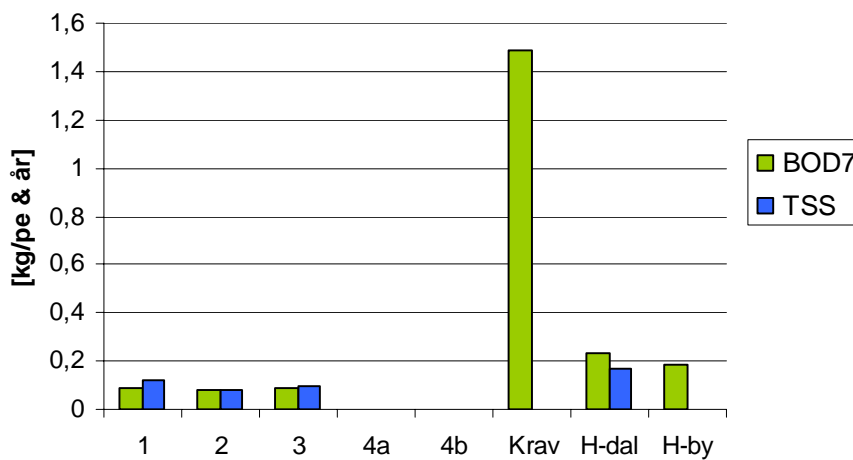
Studeras omsättningen av exergi så syns att system 2 och 4b är de som producerar mest exergi i form av gas till fordon och värme. Men eftersom system 4b förbrukar så mycket exergi är det systemet ändå det mest ofördelaktiga ur exergisynpunkt. System 2 är inte en så stor förbrukare och är därför det näst bästa systemet efter system 3. I system 3 produceras lite värme och en hel del gas, och elkonsumtionen är liten vilket gör att detta system är det mest fördelaktiga även om man ser till omsättningen av exergi. Endast i detta system och i system 2 är produktionen större än konsumtionen (figur 18b).



Figur 18b. Exergiomsättning för de olika kärnsystemen där negativa värden anger en förbrukning och positiva en produktion.

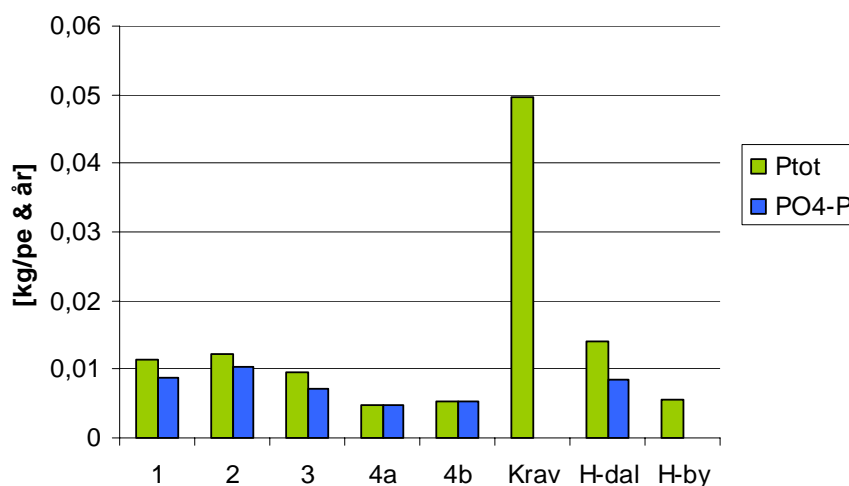
5.3 KVALITÉ PÅ VATTEN SOM SLÄPPS UT TILL RECIPIENT

Kraven för BOD₇- och TSS- utsläpp i utgående vatten som är ställda av Miljödömsstolen uppfylls mer än väl av alla systemen. Att inget utsläpp finns från system 4a och 4b beror på att membranerna i VSEP:en avskiljer allt suspenderat material. Utsläppsmängder av TSS och BOD₇ är båda lägre i de undersökta systemen än i Henriksdal. Jämfört med det uppsatta målet för Hammarby Sjöstad är utsläppsmängder av BOD₇ lägre för systemen (figur 20).



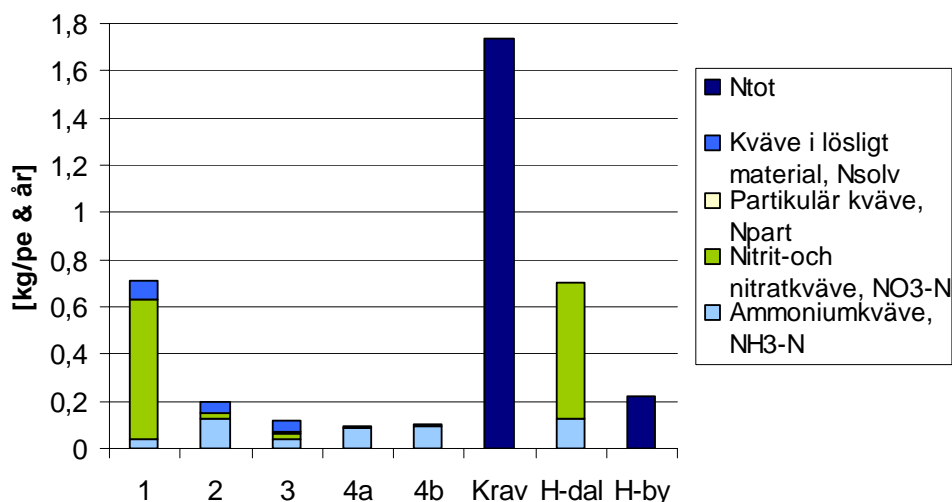
Figur 20. BOD₇- och TSS-mängd i utgående vatten från reningsverken.

För fosforutsläppen uppfylls Miljödomstolens krav väl av alla system. Sjöstadssystemen, 4a och b, har låga utsläppsmängder jämfört med övriga system och Henriksdal. Svartvattensystemet med omvänd osmos och Referenssystemet släpper ut mer fosfatfosfor än vad Henriksdal gör, men det totala fosforutsläppet är ändå lägre i dessa system. Studeras det uppsatta målet för Hammarby Sjöstad är det bara Sjöstadssystemen, 4a och 4b, som ligger lägre och klarar det (figur 21).



Figur 21. Mängd av fosfor i utsläppt vatten.

Alla systemstrukturer uppfyller kraven, ställda av Miljödomstolen, för kvävemängder i utsläppt vatten. Utsläppsmängder i Referenssystemet är ungefär desamma som i Henriksdal. I de alternativa systemen 2, 4a och 4b släpps det mest ut ammoniumkväve, medan det i system 3 släpps ut mest kväve i lösligt material. De uppsatta målen för Hammarby Sjöstad uppfylla av alla de alternativa systemen, men inte av referenssystemet (figur 22).

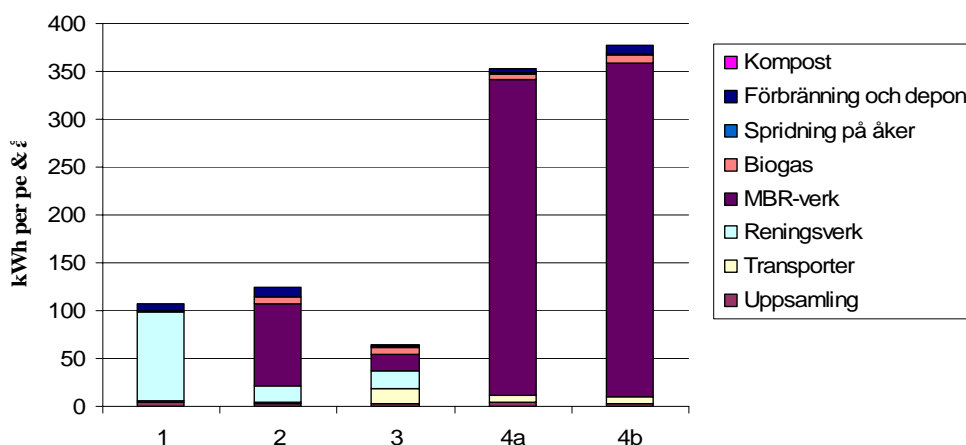


Figur 22. Totalkväve uppdelat i delfraktioner för de olika systemen.

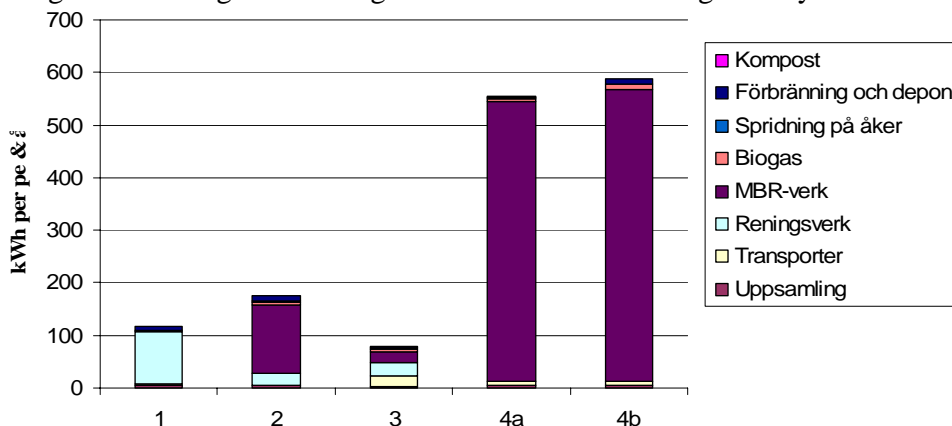
5.4 KÄNSLIGHETSANALYS

När energiförbrukningen för VSEP:en varierades från standardvärdet $1,9 \text{ kWh/m}^3$, till först $3,10 \text{ kWh/m}^3$ och sedan $0,70 \text{ kWh/m}^3$, blev inte utslaget stort i resultaten. Resultaten skiljde endast med ett fåtal procent. Det går alltså att säga att det är en mindre känslig parameter.

Då vattenmängden in i systemen ökades respektive minskades förväntades ett utslag på energiåtgången. Mycket riktigt blev energianvändningen lägre när vattenmängden minskade och högre när vattenmängden ökades. Men detta gällde främst för system 2, 4a och 4b. System 2 fick en minskad/ökad energikonsumtion med ungefär 17 %, system 4a fick en minskad/ökad energikonsumtion med ungefär 25 % och system 4b fick en minskad/ökad energikonsumtion runt 20 %. För system 4a och 4b innebär det en skillnad på drygt 200 kWh/pe & år. I system 1 och 3 skedde ingen större förändring (figur 23a och 23b).



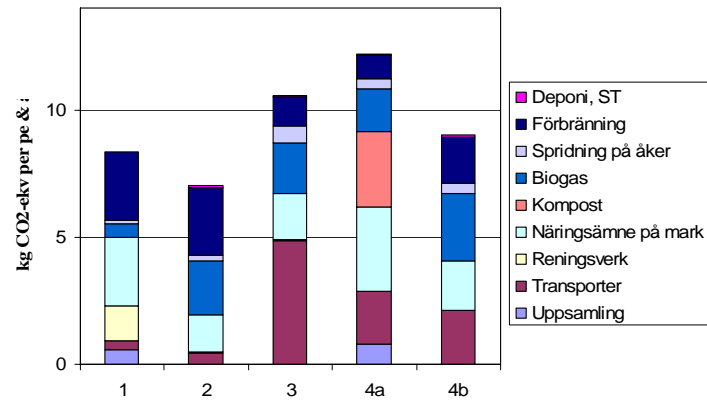
Figur 23a. Energianvändning med minskad vattenmängd in i systemen.



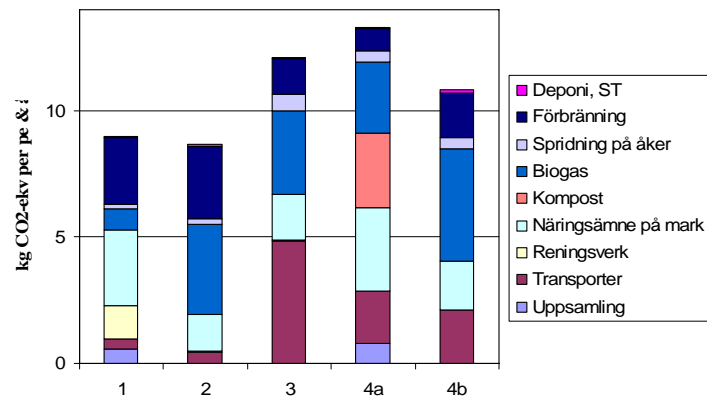
Figur 23b. Energianvändning med ökad vattenmängd in i systemen.

När alla COD- fraktionerna samtidigt ökades respektive minskades med 25 % förväntades en förändring i biogasen. Den kan påvisas i växthuspotentialdiagram där emissionerna av gaser ökar/minskar. I figur 24a och 24b nedan visas att alla systemen fick en minskad biogas (klarblå färg) då COD minskade. Denna minskning var direkt proportionell mot

biogasminskningen, förutom i system 1 där minskningen blev ungefär 21 %. Samma resultat uppvisades för ökningen.



Figur 24a. Biogasproduktion vid minskad COD koncentration in i systemen



Figur 24b. Biogasproduktion vid ökad COD koncentration in i systemen.

När alla COD- fraktionerna samtidigt ökades, minskade systemens nettoförbrukning av exergi med i snitt 60 kWh/pe & år för de alternativa systemen. För referenssystemet märktes ingen större skillnad.

När försedimenteringen före den anaeroba membran bioreaktorn togs bort ur systemen skiljde sig resultaten ytterst lite. Växthuspotentialen minskade något totalt sett, ungefär 0,5 kg CO₂-ekv per person och år. Försurningspotentialen minskade lite totalt sett, med cirka 0,1 mol H⁺ per person och år. De potentiella utsläppen av eutrofierande ämnen minskade också sett till de totala systemen, denna med cirka 0,07 kg O₂-ekv per person och år. Energiförbrukningen minskade också lite i och med borttagandet av försedimenteringen, med cirka 14 kWh/pe & år.

6. DISKUSSION OCH SLUTSATS

6.1 DISKUSSION

Fördelarna med att utföra en systemanalys när nya tekniker ska jämföras med konventionella blir tydliga då resultaten i studien presenteras. Ett system kan verka väldigt bra då kärnsystemet studeras men läggs upp- och nedströmssystemen och det kompensatoriska systemet till kanske bilden förändras helt. Ett bra exempel är växthuspotentialerna för de olika systemen som visas i Figur 14a och 14b. Där verkar referenssystemet inte släppa ut så mycket växthusgaser i förhållande till de andra systemen, men när det utökade systemet studeras har referenssystemet den högsta potentialen på grund av all mineralgödsel produktion som görs i kompensatoriskt syfte.

Resultaten som tagits fram i systemanalysen ska inte tolkas som exakta värden, utan mer ge en uppfattning om vilken storleksordning emissioner och energiförbrukning har. Det beror bland annat på att inte tillräckligt många simuleringar med olika inställningar har gjorts, men också på den stora mängden parametrar som kan ändras och bidra till förändringar i resultaten.

Substansflödesmodellerna URWARE och ORWARE har byggts upp under flera års tid. Många studier ligger till grund för informationen som finns samlad i modellerna. Det är svårt att säga exakt var svagheter i dessa modeller ligger eftersom antaganden i dem grundar sig på allt från väl underbyggda studier till intelligenta gissningar. När man bygger upp systemstrukturer förlitar man sig på kunskap och erfarenheter från alla tidigare studier, eftersom den tid det skulle ta att granska alla källor är omfattande. Det betyder att granskning av delmodeller, som till exempel förbränning och kompost, inte har ingått i examensarbetet. Inte heller har den stora datamängd som använts för att ta fram delmodellerna granskats. En del av osäkerheten i resultaten har alltså sin grund i tidigare studiers antaganden, men riktigheten i indata och modellerna accepteras som de är med motiveringen att de har skapats för liknande syfte som denna systemanalys av personer med hög kompetens inom området.

Införande av tungmetallers uppförande i reningsverkens delmodeller är bara påbörjad. Reduktionsgraderna över membranbioreaktorn med VSEP och den omvända osmosen från kapitel 2.3.1 och 2.3.2 kan användas som initialvärden i URWARE, men fler och mer noggranna provtagningar och analyser bör göras för att resultaten ska bli mindre osäkra. Enligt analyser gjorda på slam från en membranbioreaktor innehåller det låga halter metall/g P vilket tyder på en god slamkvalité (Grundestam, 2006). Införande av tungmetallflöden ska göras i URWARE för att förbättra möjligheterna att bestämma kvalitén på slammet och den omvända osmosens koncentrat utifrån en system analys, för att på så sätt avgöra om det är lämpligt att sprida produkterna på åkermark eller inte.

I figur 17 där kretsloppspotentialen visas är det antaget att restprodukter, så som slam, urin och koncentrat från den omvända osmosen, har god kvalité och kan spridas på åkermark. Om så inte hade vara fallet skulle de alternativa systemen inte vara så bra, utan ha betydligt lägre potentialer.

Komposten i system 4a gör att miljöpåverkan från detta system är större än den i system 4b. Växthus-, försurnings- och eutrofieringspotentialen är alla större i 4a än i 4b. Avfallskvarnar som blandar ner organiskt avfall i avloppsvattnet tycks vara ett bättre alternativ, så länge den färdiga produkten har godkänd kvalitet.

I Sjöstadverket har det visat sig vara nödvändigt att tillsätta syra i de omvända osmosförsöken för att förhindra fosfatutfällningar, vilket leder till lägre ammoniakemissioner vid spridning. Det beror på att ammoniakavgången är pH-beroende och till detta tas det ingen hänsyn i modellerna. Användningen av syra tas det heller ingen hänsyn till i modellerna, vilket gör att den miljöbelastningen inte syns i resultaten. Totalt sett betyder det att ammoniakemissionernas bidrag till försurningspotentialen antagligen är något överskattade.

System 3 är ett av de två system där exergiproduktionen är större än konsumtionen, så trots att produktionen inte är mer än den tredje största är detta system det mest fördelaktiga om man ser till omsättningen av exergi.

Hessel (2005) kom fram till att energikostnaderna var höga för membranbioreaktorn med VSEP:en. Det stämmer fortfarande, trots att energiförbrukningen för VSEP:en reviderats och sänkts.

Elförbrukningen för den omvända osmosen är konstant i modellerna och på grund av detta blir den i system 4a och 4b något överskattad (drygt 10 %), eftersom vattnet som kommer in i de systemen är tunnare än det in i de övriga systemen. Den omvända osmosen använder inte lika mycket energi vid behandling av vatten med lägre koncentration, som vid behandling av vatten med högre koncentration, men antas alltså göra det i modellerna. Elförbrukningen borde göras proportionell mot koncentrationen i vattnet som kommer in, för att inga överskattningar ska göras av energikonsumtionen.

Energiförbrukningen i den omvända osmosen är en stor osäkerhet i systemet eftersom en liten justering i värdet bidrar till en stor ändring i resultatet. Värdet som använts i den här studien är ett medelvärde på vad man tror den omvända osmosen förbrukar (Bergström, pers. komm.).

6.2 SLUTSATSER

Resultaten från systemanalysen indikerar hur systemen förhåller sig till varandra med avseende på miljöpåverkan, kretsloppspotential och exergiförbrukning. När resultaten tolkas måste osäkerheten som finns i modellerna beaktas.

Systemgränsen är väldigt viktig och helt avgörande för resultatet.

För att kunna utvärdera möjligheten att sprida slam och koncentrat på åkermark i ett systemanalytiskt perspektiv måste införande av tungmetaller göras i URWARE.

Reningssystem med MBR-teknik uppbyggda som Sjöstadssystemen ger en bra kretsloppspotential om restprodukterna har godkänd kvalitet och går att använda.

Alla systemens potentiella utsläpp av växthusgaser, försurande ämnen och eutrofierande ämnen ligger långt under nivån av vad som anses hållbar enligt de svenska miljömålen. Övergödningen kan sammantaget anses som den viktigaste miljöpåverkan, eftersom man där ser den högsta andelen av den hållbara nivån. Så ur miljöpåverkanssynpunkt är ett system där avloppsvatten och matavfall blandas och leds in i ett MBR-verk vilket har omvänd osmos som efterbehandling det mest fördelaktiga.

Ett separerande system där BDT-vatten behandlas för sig i ett konventionellt reningsverk, urin avskiljs och resterande vatten blandas med matavfall och renas i MBR-verk är det mest fördelaktiga ur exergisynpunkt.

7. REFERENSER

Andersson, K. & Castor, M., 2005. *Behandling av svartvatten och matavfall med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos*. Examensarbete, Nr 2005-13, Lunds Tekniska Högskola, Lund, Sverige.

ENWA, 2006.

<http://www.enwa.se>, 2006-03-09

Eriksson, O., Frostell, B., Björklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J-O., Granath, J., Carlsson, M., Baky, A. & Thyselius, L., 2002. *ORWARE - a simulation tool for waste management*.

<http://www.ima.kth.se/im/orware>, 2006-02-14

http://www.ima.kth.se/im/orware/Documents/paper2_ola_lic3.pdf

Erlandsson, M., 2002. Miljöbedömningsmetod baserad på de svenska miljökvalitetsmålen – visionen om det framtida hållbara folkhemmet. IVL, rapport B1509.

http://www.ivl.se/rapporter/pdf/b1509_old.pdf, 2006-03-17

Grundestam, J., 2006. *Rening av avloppsvatten med anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos*. Examensarbete, UPTEC W06 008, Uppsala universitet, Uppsala, Sverige.

Hammarby Sjöstad, 2005.

Miljöprogram för Hammarby sjöstad, 2000.

Miljöredovisning för Hammarby sjöstad 2002/ 2003.

<http://www.hammarbysjostad.se>, 2005-11-23

Hasan, K. S., Visvanathan, C., Ariyamethee, P., Chantaraaumporn, S. & Moongkhumklang, P., 2002. *Introduction to Vibratory Shear Enhanced Membrane Process and its Application in Starch Wastewater Recycling*. Liquid Purification Engineering International Co., Ltd, Nonthaburi, Thailand.

<http://www.vsep.com/pdf/articles/PaperStarch.pdf>, 2006-03-08

Hessel, C., 2005. *Avloppsvattenbehandling med membranbioreaktor- En jämförande systemanalysavseende exergi, miljöpåverkan samt återföring av närsalter*. Examensarbete, UPTEC W05 034, Uppsala universitet, Uppsala, Sverige.

IEH, 2003. *Konferensrapport Avlopp & kretslopp 2003. Nyttigheter och skadligheter - vad innehåller avloppsvatten egentligen?*

<http://www.ieh.se/konferensrapport/lasundersida.cfm?185>, 2006-02-27

Jeppsson, U., Baky, A., Hellström, D., Jönsson, H. & Kärrman, E., 2005. *The URWARE wastewater treatment plant models*. Urban Water rapport 2005:5, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige.

Jönsson, H., 2001. *Urine separation – Swedish experiences*. SLU.

<http://www.agsci.kvl.dk/njf327/papers/reviewedJonsson.pdf>

Jönsson, H., Baky, A., Jeppsson, U., Hellström, D. & Kärrman, E., 2005. *Composition of urine, faeces, greywater and biowaste for utilisation in the URWARE model*. Urban Water rapport 2005:6, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige.

KTH, 2006. *ORWARE- modellen*.
<http://www.ima.kth.se/im/orware/Swedish/orware.html>, 2006-02-23

Magnusson, J., 2003. *Sammanfattning på hushållsspillvatten från Hammarby Sjöstad: Hushållens bidrag av miljöfarliga ämnen till avloppsvattnet*. Examensarbete, Nr 2003:292, Luleå Tekniska Universitet, Luleå, Sverige.

Naturvårdsverket, 2002. *Metaller i stad och land- sammanfattning av Rapport 5184*.
<http://www.naturvardsverket.se/dokument/omverket/forsk/avslproj/avsprdok/metsam.pdf>, 2006-03-03

New Logic, 2006.
<http://www.vsep.com/solutions/technology.html>, 2006-03-02

Stockholm Vatten (SVAB), 2005. *Miljörapport 2005*.
<http://www.stockholmvatten.se>, 2006-02-15

Urban Water, 2006.
<http://www.urbanwater.org>, 2006-02-09

Wall, G., 1977. *Exergy - a useful concept within resource accounting*. Rapport nr 77-42, Institutionen för teoretisk fysik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Wall, G., 2006. *Vad är energi och exergi?*
<http://exergy.se>, 2006-03-03

PERSONLIG KOMMUNIKATION

Andras Baky, JTI, Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.

Daniel Hellström, Stockholm Vatten AB, Stockholm.

Rune Bergström, IVL, Svenska miljöinstitutet, Stockholm.

BILAGA A

Tabell 1. URWARE-vektorn.

Elementnummer	Parameter
1	C-total, biologiskt
2	C-kolhydrat, lignin
3	C-kolhydrat, lätt nedbrytbart
4	C-fett
5	C-protein
6	Biologisk syreförbrukning, BOD₇
7	Flyktiga substanser, VS
8	Torrsvikt, DM, denna parameter beskriver allt löst material, TS
9	CO ₂ -fossilt
10	CO ₂ -biologiskt
11	CH ₄
12	VOC
13	CHX
14	AOX
15	PAH
16	CO
17	Fenoler
18	PCB
19	Dioxiner
20	O-total
21	H-total
22	Vatten, H₂O
23	Totalkväve, N_{tot}
24	Ammoniumkväve, NH₃-N
25	NO _x -N
26	Nitrit- och nitratkväve, NO₃-N
27	N ₂ O-N
28	Totalsvavel, S_{tot}
29	Sulfatsvavel, SO₄-S
30	Totalfosfor, P_{tot}
31	Cl-total
32	Totalkalium, K_{tot}
33	Ca
34	Pb
35	Cd
36	Hg
37	Cu
38	Cr
39	Ni
40	Zn
41	C-kolhydrat, cellulosa
42	Suspenderat (partikulärt) material, TSS
43	Totalt COD
44	Kväve I lösligt material, N_{sol}
45	
46	Partikulär Svavel
47	
48	Sulfidsvavel, HS
49	Organiskt bunden kalium, K_{part}
50	Magnetisk metall
51	Lätt metall
52	Gulmet och rostfritt

53	Glas, ofärgat
54	Glas, färgat
55	Annat inert, ej aska
56	Aska
57	Pappersbehållare
58	Tidningspapper
59	Tidskriftspapper
60	Kontorspapper
61	Blandat papper
62	Plast-PE
63	Plast-PP
64	Plast-PVC
65	Plast-PS
66	Plast-PET
67	Plast blandat
68	Gummi
69	Textil
70	Trä
71	Elektronik
72	Brännbart riskmaterial
73	Icke-brännbart riskmaterial
74	MFA
75	COD för löst, biologiskt nedbrytbart material, CODbiosol
76	COD för löst, inert material, CODinsol
77	COD för partikulärt,, biologiskt nedbrytbart material, CODbiopart
78	COD för partikulärt, inert material, CODinpart
79	Fosfatfosfor, PO4-P
80	Partikulär fosfor, Ppart
81	Partikulär kväve, Npart
82	Temperatur i C
83	Exergi, kemiskt bunden
84	Exergi, värme

För aktivslam-modellerna behövs ytterligare sju variabler. (Dessa fungerar som tillståndsvariabler)

85	Långsamt biologiskt nedbrytbart material
86	Heterotrof biomassa
87	Autotrof biomassa
88	Löst kväve som hör ihop med den lösta biologiskt nedbrytbara COD-fraktionen
89	Partikulär kväve som hör ihop med u(85)
90	Partikulär fosfor som hör ihop med u(85)
91	Partikulärt svavel som hör ihop med inerta fraktioner

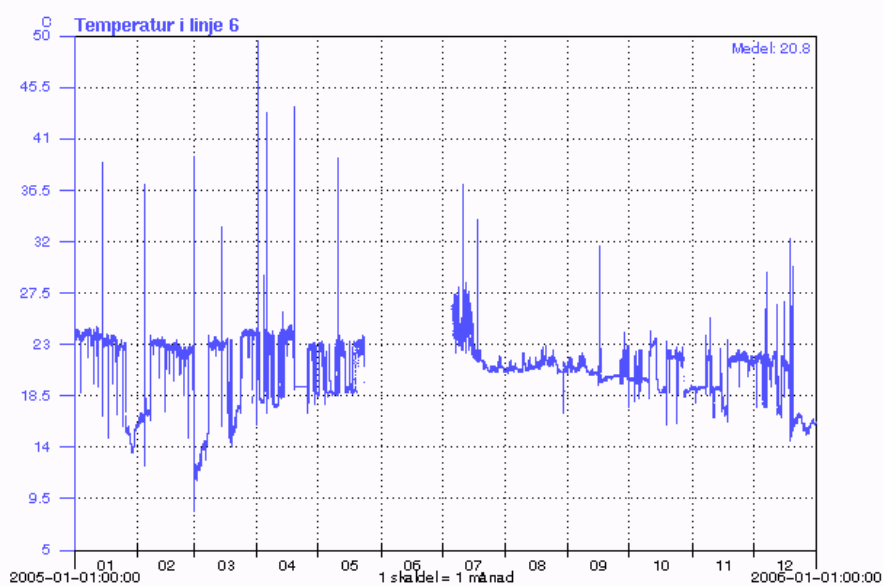
BILAGA B

Tabell 2. Tungmetallkoncentrationer i utgåendevatten från MBR:en (Grundestam, 2006).

Tungmetall [µg/l]	Cd	Pb	Hg	Cu	Cr	Ni	Zn
Försök 1	0,02	1,0	0,1	0,8	0,9	4	8
Försök 2	0,01	0,2	0,1	0,5	1,0	4	5
Försök 3	0,01	1,0	0,1	5,0	0,9	4	-
Försök 4	0,01	0,5	0,1	0,5	0,8	3	-

Tabell 3. Inkommande tungmetallhalter till Sjöstadverket år 2005 (SVAB, 2006).

Tungmetall [µg/l]	Cd	Pb	Hg	Cu	Cr	Ni	Zn
v. 2-5	0.1	2	0.07	37	3	7	91
v. 6-8	0.3	2	<0.02	20	2	5	86
v. 9-13	0.2	2	0.3	31	3	6	81
v. 14-17	0.1	3	0.06	26	2	6	90
v. 18-19	0.1	2	<0.02	39	3	7	82
v. 22-26	0.2	2	0.02	41	3	8	100
v. 27-30	0.2	3	<0.02	40	3	16	93
v. 31-34	0.1	2	<0.02	36	3	8	86
v. 35-38	0.2	2	0.06	27	3	6	100
v. 39-43	0.2	5	0.05	63	3	12	120
v. 44-47	0.2	2	0.09	33	3	7	81
v. 48-52	0.2	2	0.1	35	2.8	6.1	89
Årsmedelvärde	0.175	2.417	0.069	35.667	2.817	7.842	91.583



Figur 1. Temperatur i avloppsvattnet i linje sex, Sjöstadverket år 2005 (SVAB, 2006).

CalcIntSys.m

% CalcIntSys calculates energy and economy vectors for the core and up-stream system
% Made by Cecilia Hessel 2004-12, JTI. Last modified Tove Sundberg 2005-12, Stockholm Vatten

```
%n=size(TimeStep,1);          %simulation stage

% CORE SYSTEM
%-----
% Fuel consumption vehicles
%Energy
enOilDieselCo(:,1) = enFueliCo1(end); % Collection of organic household waste to compost
enOilDieselCo(:,2) = enFueliCo2(end); % Collection of organic household waste to incineration
% Exergy
exOilDieselCo(:,1) = exFueliCo1(end);
exOilDieselCo(:,2) = exFueliCo2(end);

% Fuel consumption truck and trailers
% Energy
enOilDieselTT(:,1) = enFueliTT1(end); % Transport from compost to spreading (arable land)
enOilDieselTT(:,2) = enFueliTT2(end); % Transport of sludge from stormwater to landfill
enOilDieselTT(:,3) = enFueliTT3(end); % Transport of flyash slurry from incinerator to landfill
enOilDieselTT(:,4) = enFueliTT4(end); % Transport of slag from incinerator to landfill
enOilDieselTT(:,5) = enFueliTT5(end); % Transport of sludge f. MBR to incinerator
enOilDieselTT(:,6) = enFueliTT6(end); % Transport of sludge f. MBR to spreading (arable land)
enOilDieselTT(:,7) = enFueliTT7(end); % Transport of sludge f. WWTP to spreading (arable land)
enOilDieselTT(:,8) = enFueliTT8(end); % Transport of urine to spreading (arable land)
enOilDieselTT(:,9) = enFueliTT9(end); % Transport of sludge from WWTP to incinerator
% Exergy
exOilDieselTT(:,1) = exFueliTT1(end);
exOilDieselTT(:,2) = exFueliTT2(end);
exOilDieselTT(:,3) = exFueliTT3(end);
exOilDieselTT(:,4) = exFueliTT4(end);
exOilDieselTT(:,5) = exFueliTT5(end);
exOilDieselTT(:,6) = exFueliTT6(end);
exOilDieselTT(:,7) = exFueliTT7(end);
exOilDieselTT(:,8) = exFueliTT8(end);
exOilDieselTT(:,9) = exFueliTT9(end);

% Fuel consumption spreaders
% Energy
enOilDieselspr(:,1) = enFueliSg2(end); % Energy consumption from spreading of WWTP sludge
enOilDieselspr(:,2) = enFueliSg6(end); % Energy consumption from spreading of MBR sludge
enOilDieselspr(:,3) = enFueliSg8(end); % Energy consumption from spreading of urine
enOilDieselspr(:,4) = enFueliSgCp(end); % Energy consumption from spreading of compost
% Exergy
exOilDieselspr(:,1) = exFueliSg2(end);
exOilDieselspr(:,2) = exFueliSg6(end);
exOilDieselspr(:,3) = exFueliSg8(end);
exOilDieselspr(:,4) = exFueliSgCp(end);

% Fuel consumption others
% Energy
enOilDieselOthers(:,1) = enOiliSm(end); % Energy for soil manufacturing
enOilDieselOthers(:,2) = enFueliBaIc(end); % Bailing of waste prior to incineration
enOilDieselOthers(:,3) = enFueliBioCellLf(end); % Management of landfill biocell
enOilDieselOthers(:,4) = enFueliWasteLf(end); % Management of waste landfill
```

```

enOilDieselOthers(:,5) = enFueliSludgeLf(end); % Management of sludge landfill
enOilDieselOthers(:,6) = enFueliAshLf(end); % Management of ash landfill
enOilDieselOthers(:,7) = enFueliSlagLf(end); % Management of slag landfill
enOilDieselOthers(:,8) = enDieselCp(end); % Drying of compost
% Exergy
exOilDieselOthers(:,1) = exOiliSm(end); % Exergy for soil manufacturing
exOilDieselOthers(:,2) = exFueliBaIc(end); % Exergy for incinerator
exOilDieselOthers(:,3) = exFueliBioCellLf(end); % Exergy landfill
exOilDieselOthers(:,4) = exFueliWasteLf(end);
exOilDieselOthers(:,5) = exFueliSludgeLf(end);
exOilDieselOthers(:,6) = exFueliAshLf(end);
exOilDieselOthers(:,7) = exFueliSlagLf(end);
exOilDieselOthers(:,8) = exDieselCp(end); % Drying of compost

% Total consumption of diesel oil
% Fuel production
% *****
% Energy
enOilo(:,1) = enGasBusGuSp(end); % Biogas used in buses
enOilo(:,2) = enGasBusGuSpMBR(end); % Biogas used in buses
enOilo(:,3) = 0; %enGasBusGuSpSoil(end); % Biogas used in buses
enOilo(:,4) = enGasCarGuSp(end); % Biogas used in cars
enOilo(:,5) = enGasCarGuSpMBR(end); % Biogas used in cars
enOilo(:,6) = 0; %enGasCarGuSpSoil(end); % Biogas used in cars
% Exergy
exOilo(:,1) = exGasBusGuSp(end);
exOilo(:,2) = exGasBusGuSpMBR(end);
exOilo(:,3) = 0; %exGasBusGuSpSoil(end);
exOilo(:,4) = exGasCarGuSp(end);
exOilo(:,5) = exGasCarGuSpMBR(end);
exOilo(:,6) = 0; %exGasCarGuSpSoil(end);

% Electricity consumption (multiplying with 1e-6 to obtain energy expressed as MJ instead of J)
% *****
% Energy:
%Presedimentation at sewage plant
enEliTotPreSSp = mboExtrasPreSSp(:,2)*1e-6; % Total energy presedimentation
enEliSludgeMixPreSSp = mboExtrasPreSSp(:,3)*1e-6; % Sludge mix energy in presedimentation
enEliSludgeScrapersPreSSp = mboExtrasPreSSp(:,4)*1e-6; % Sludge scrapers, presedimentation
enEliPumpPreSSp = mboExtrasPreSSp(:,5)*1e-6; % Energy for pumping, presedimentation

%Presedimentation before MBRad
enEliTotPreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,2)*1e-6; % Total energy presedimentation
enEliSludgeMixPreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,3)*1e-6; % Sludge mix energy in presed.
enEliSludgeScrapersPreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,4)*1e-6; % Sludge scrapers, presed.
enEliPumpPreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,5)*1e-6; % Energy for pumping, presed.

% Activated Sludge
enEliTotASAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,6)*1e-6; % Total energy
enEliMixASAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,7)*1e-6; % Mixing energy
enEliPumpASAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,8)*1e-6; % Pumping energy
enEliAerationASAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,9)*1e-6; % Aeration energy

enEliTotASAerobSp = mboAerobExtrasSp(:,6)*1e-6;
enEliMixASAerobSp = mboAerobExtrasSp(:,7)*1e-6;
enEliPumpASAerobSp = mboAerobExtrasSp(:,8)*1e-6;

```

```

enEliAerationASAerobSp = mboAerobExtrasSp(:,9)*1e-6;

enEliTotASIdealSSp = spASIdealSextras(:,2)*1e-6;           % Total energy
enEliSludgeRemASIdealSSp = spASIdealSextras(:,4)*1e-6;     % Sludgerem energy
enEliPumpASIdealSSp = spASIdealSextras(:,5)*1e-6;          % Pumping energy

enEliThickSp = mboExtrasThickSp(:,2)*1e-6;                 % Total energy for centrifuge

enEliTotSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,2)*1e-6;             % Total energy
enEliSludgeMixSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,3)*1e-6;       % Sludgemix energy
enEliSludgeRemSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,4)*1e-6;       % Sludgerem energy
enEliPumpSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,5)*1e-6;            % Pumping energy
enEliFilterSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,6)*1e-6;          % Filter energy

enEliTotAdSp = mboExtrasAdSp(:,7)*1e-6;                   % Total energy
enEliMixAdSp = mboExtrasAdSp(:,1)*1e-6;                   % Mixing energy
enEliPumpAdSp = mboExtrasAdSp(:,2)*1e-6;                  % Pumping energy
enEliHeatExchangerAdSp = mboExtrasAdSp(:,3)*1e-6;         % Energy used by heatexchanger

enEliTotAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,7)*1e-6;            % Total energy
enEliMixAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,1)*1e-6;            % Mixing energy
enEliPumpAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,2)*1e-6;           % Pumping energy
enEliHeatExchangerAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,3)*1e-6;  % Energy used by heatexchanger

enEliDewSp = mboExtrasDewAdSp(:,2)*1e-6;                  % Total energy in AD dewatering
enEliDewSpMBR = mboExtrasDewAdSpMBR(:,2)*1e-6;           % Total energy in AD dewatering

enEliTotMBRad = mboDigestExtraMBR(:,7)*1e-6;              % Total energy for MBR
enEliMixMBRad = mboDigestExtraMBR(:,1)*1e-6;              % Mixing energy
enEliPumpMBRad = mboDigestExtraMBR(:,2)*1e-6;             % Pumping energy
enEliHeatExchangerMBRad = mboDigestExtraMBR(:,3)*1e-6;   % Energy used by heatexchanger

enEliTotVsepSp = mboVSEPextrasMBR(:,1)*1e-6;              % Total energy for VSEP
enEliPumpVsepSp = mboVSEPextrasMBR(:,6)*1e-6;             % Pumping energy
enEliVibrationVsepSp = mboVSEPextrasMBR(:,7)*1e-6;        % Vibration energy

enEliTotRevOsmSp = enEliRevOsmMBR(:,2)*1e-6;              % Total energy for RevOsm

enEliTotSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,2)*1e-6;
enEliSludgeMixSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,3)*1e-6;
enEliSludgeRemSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,4)*1e-6;
enEliPumpSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,5)*1e-6;
enEliFilterSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,6)*1e-6;

enEli(:,1) = enEliIc(end);
enEli(:,2) = enEliBaIc(end);
enEli(:,3) = enEliWd(end);
enEli(:,4) = enEliCp(end);
enEli(:,5) = enEliConvPipeSp(end);
enEli(:,6) = enEliThickSp(end);
enEli(:,7) = enEliConvPipeMBR(end);
enEli(:,8) = enEliHyg70AdSp(end);
enEli(:,9) = enEliTotAdSp(end);
enEli(:,10) = enEliTotAdSpMBR(end);
enEli(:,11) = enEliGuSp(end);
enEli(:,12) = enEliTotPreSSp(end);

```

```

enEli(:,13) = enEliTotPreSSpMBR(end);
enEli(:,14) = enEliTotASAnoxSp(end);
enEli(:,15) = enEliTotASAerobSp(end);
enEli(:,16) = enEliTotRevOsmSp(end);
enEli(:,17) = enEliTotSandFSp(end);
enEli(:,18) = enEliDewSp(end);
enEli(:,19) = enEliDewSpMBR(end);
enEli(:,20) = enEliTotASIdealSSp(end);
enEli(:,21) = enEliTotMBRad(end);
enEli(:,22) = enEliTotVsepSp(end);
enEli(:,23) = enEliGuSpMBR(end);
enEli(:,24) = 0;
enEli(:,25) = enEliHyg70AdSpMBR(end);
enEli(:,26) = enEliSandFSw(end);
enEli(:,27) = enEliConvPipeSw(end);
enEli(:,28) = enEliTotSandFSw(end);
enEli(:,29) = enEliRevOsmSp(end);
enEli(:,30) = enEliUrineWR(end);
enEli(:,31) = enEliARSp(end);
enEli(:,32) = enEliHyg70ROSp(end);
enEli(:,33) = enEliHyg70ROSpMBR(end);

% Exergy
%PreSettler
exEliTotPreSSp = mboExtrasPreSSp(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; % Tot exergy requirement for presed
exEliSludgeMixPreSSp = mboExtrasPreSSp(:,3)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; % Sludgemix exergy in presed
exEliSludgeScrapersPreSSp = mboExtrasPreSSp(:,4)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; % Sludge scrapers, presed
exEliPumpPreSSp = mboExtrasPreSSp(:,5)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; % Exergy for pumping, presed

%PreSettler MBR
exEliTotPreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
% Tot exergy requirement for presedimentation
exEliSludgeMixPreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,3)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
% Sludgemix exergy in presedimentation
exEliSludgeScrapersPreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,4)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
% Sludge scrapers, presedimentation
exEliPumpPreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,5)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
% Exergy for pumping, presedimentation

% AS
exEliTotASAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,6)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliMixASAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,7)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliPumpASAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,8)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliAerationASAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,9)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliTotASAerobSp = mboAerobExtrasSp(:,6)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliMixASAerobSp = mboAerobExtrasSp(:,7)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliPumpASAerobSp = mboAerobExtrasSp(:,8)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliAerationASAerobSp = mboAerobExtrasSp(:,9)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;

exEliTotASIdealSSp = spASIdealSextras(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliSludgeRemASIdealSSp = spASIdealSextras(:,4)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliPumpASIdealSSp = spASIdealSextras(:,5)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;

exEliThickSp = mboExtrasThickSp(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
% Sandfilter
exEliTotSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;

```

```

exEliSludgeMixSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,3)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliSludgeRemSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,4)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliPumpSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,5)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliFilterSandFSp = mboSandFExtrasSp(:,6)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
%Sludge AD
exEliTotAdSp = mboExtrasAdSp(:,7)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliMixAdSp = mboExtrasAdSp(:,1)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliPumpAdSp = mboExtrasAdSp(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliHeatExchangerAdSp = mboExtrasAdSp(:,3)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
%Sludge AD for MBRad
exEliTotAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,7)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliMixAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,1)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliPumpAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliHeatExchangerAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,3)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;

exEliDewSp = mboExtrasDewAdSp(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliDewSpMBR = mboExtrasDewAdSpMBR(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
%Stormwater
exEliTotSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliSludgeMixSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,3)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliSludgeRemSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,4)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliPumpSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,5)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
exEliFilterSandFSw = mboSandFExtrasSw(:,6)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;
%MBRad
exEliTotMBRad =mboDigestExtraMBR(:,7)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; %Total exergy for MBR
exEliMixMBRad = mboDigestExtraMBR(:,1)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; %Mixing exergy
exEliPumpMBRad = mboDigestExtraMBR(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; %Pumping exergy
exEliHeatExchangerMBRad = mboDigestExtraMBR(:,3)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; %Exergy used by
heatexchanger
%VSEP
exEliTotVsepSp = mboVSEPextrasMBR(:,1)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; %Total exergy for Vsep
exEliPumpVsepSp = mboVSEPextrasMBR(:,6)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; %Pumping exergy
exEliVibrationVsepSp = mboVSEPextrasMBR(:,7)*exQualityFactor(3,1)*1e-6; %Vibration exergy
%RevOsm
exEliTotRevOsmSp = exEliRevOsmMBR(:,2)*1e-6; %Total exergy for RevOsm
exEliRevOsmSp = enEliRevOsmSp*exQualityFactor(3,1);

exEliDewAd = mboExtrasDewAd(:,2)*exQualityFactor(3,1)*1e-6;

exEli(:,1) = exEliIc(end);
exEli(:,2) = exEliBaIc(end);
exEli(:,3) = exEliWd(end);
exEli(:,4) = exEliCp(end);
exEli(:,5) = exEliConvPipeSp(end);
exEli(:,6) = exEliThickSp(end);
exEli(:,7) = exEliConvPipeMBR(end);
exEli(:,8) = exEliHyg70AdSp(end);
exEli(:,9) = exEliTotAdSp(end);
exEli(:,10) = exEliTotAdSpMBR(end);
exEli(:,11) = exEliGuSp(end);
exEli(:,12) = exEliTotPreSSp(end);
exEli(:,13) = exEliTotPreSSpMBR(end);
exEli(:,14) = exEliTotASAnoxSp(end);
exEli(:,15) = exEliTotASAerobSp(end);
exEli(:,16) = exEliTotRevOsmSp(end);
exEli(:,17) = exEliTotSandFSp(end);

```

```

exEli(:,18) = exEliDewSp(end);
exEli(:,19) = exEliDewSpMBR(end);
exEli(:,20) = exEliTotASIdealSSp(end);
exEli(:,21) = exEliTotMBRad(end);
exEli(:,22) = exEliTotVsepSp(end);
exEli(:,23) = exEliGuSpMBR(end);
exEli(:,24) = 0;
exEli(:,25) = exEliHyg70AdSpMBR(end);
enEli(:,26) = exEliSandFSw(end);
enEli(:,27) = exEliConvPipeSw(end);
enEli(:,28) = exEliTotSandFSw(end);
enEli(:,29) = exEliRevOsmSp(end);
enEli(:,30) = exEliUrineWR(end);
enEli(:,31) = 0; %exEliARSp(end);
enEli(:,32) = exEliHyg70ROSp(end);
enEli(:,33) = exEliHyg70ROSpMBR(end);
enEli(:,34) = exEliDewAd(end);

```

% Electricity production

% Energy

```

enElo(:,1) = enEloIc(end); % From incineration
enElo(:,2) = enEloGuSp(end); % F. gas utilisation, combustion of biogas in stationary gas engine
enElo(:,3) = enEloWasteLf(end); % Gas utilisation, combustion of recovered landfill gas in stationary gas
engine, gas from waste landfill
enElo(:,4) = enEloSludgeLf(end); % Gas utilisation, combustion of recovered landfill gas in stationary gas
engine, gas from sludge landfill
enElo(:,5) = enEloGuSpMBR(end); %F gas utilisation, combustion of biogas in stationary gas engine
enElo(:,6) = enEloGuSpSoil(end); %F gas utilisation, combustion of biogas in stationary gas engine
enElo(:,7) = enEloBiocellLf(end); %Landfill biocell

```

% Exergy

```

exElo(:,1) = exEloIc(end); % From incineration
exElo(:,2) = exEloGuSp(end); % F gas utilisation, combustion of biogas in stationary gas engine
exElo(:,3) = exEloWasteLf(end); % Gas utilisation, combustion of recovered landfill gas in stationary gas
engine, gas from waste landfill
exElo(:,4) = exEloSludgeLf(end); % Gas utilisation, combustion of recovered landfill gas in stationary gas
engine, gas from sludge landfill
exElo(:,5) = exEloGuSpMBR(end); %F gas utilisation, combustion of biogas in stationary gas engine
exElo(:,6) = exEloGuSpSoil(end); %F gas utilisation, combustion of biogas in stationary gas engine
exElo(:,7) = exEloBiocellLf(end); %Landfill biocell

```

% Heat consumption

```

enHeiTotAdSp = mboExtrasAdSp(:,4)*1e-6; %Tot Heat consump AD for Conventional Plant Sludge
enHeiNetAdSp = mboExtrasAdSp(:,8)*1e-6; %Net Heat consump AD for Conventional Plant Sludge

```

```

enHeiTotAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,4)*1e-6; %Tot Heat consump AD for MBRad Sludge
enHeiNetAdSpMBR = mboExtrasAdSpMBR(:,8)*1e-6; %Net Heat consump AD MBRad Sludge

```

```

enHeiTotMBRadSp = mboDigestExtraMBR(:,4)*1e-6; % Total Heat consumption MBRad
enHeiNetMBRadSp = mboDigestExtraMBR(:,8)*1e-6; % Net Heat consumption MBRad

```

% Energy

```

enHei(:,1) = enHeiHyg70AdSp(end); % Heat for drying of anaerobic sludge
enHei(:,2) = enHeiNetAdSp(end); % Heat for preheating of digestate to digester temperature
enHei(:,3) = enHeiNetMBRadSp(end);
enHei(:,4) = enHeiHyg70ROSp(end); % Heat for preheating of digestate to digester temperature

```



```

enHei(:,5) = enHeiHyg70AdSpMBR(end); % Heat for drying of anaerobic sludge
enHei(:,6) = enHeiNetAdSpMBR(end); % Heat for drying of anaerobic sludge

```

```

% Exergy

```

```

exHeiTotAdSp = enHeiTotAdSp*exQualityFactor(8,1);
exHeiNetAdSp = enHeiNetAdSp*exQualityFactor(8,1);
exHeiTotAdSpMBR = enHeiTotAdSpMBR*exQualityFactor(8,1);
exHeiNetAdSpMBR = enHeiNetAdSpMBR*exQualityFactor(8,1);

```

```

exHeiTotMBRadSp = enHeiTotMBRadSp*exQualityFactor(8,1); % Tot Heat consumption MBR
exHeiNetMBRadSp = enHeiNetMBRadSp*exQualityFactor(8,1); % Net Heat consumption MBR

```

```

exHei(:,1) = exHeiHyg70AdSp(end); % Heat for drying of anaerobic sludge
exHei(:,2) = exHeiNetAdSp(end); % Heat for preheating of digestate to digester temperature
exHei(:,3) = exHeiNetMBRadSp(end);
exHei(:,4) = exHeiHyg70ROSp(end); % Heat for preheating of digestate to digester temperature
exHei(:,5) = exHeiHyg70AdSpMBR(end); % Heat for drying of anaerobic sludge
exHei(:,6) = exHeiHyg70AdSpSoil(end); % Heat for drying of anaerobic sludge
exHei(:,7) = exHeiTotAdSp(end); % Heat for preheating of digestate to digester temperature
exHei(:,8) = exHeiHyg70ROSp(end); % Heat for preheating of digestate to digester temperature

```

```

% Heat production

```

```

% Energy

```

```

enHeo(:,1) = enHeoIc(end); % District heat from incineration
enHeo(:,2) = enHeoWasteLf(end); % Heat from combustion of landfill gas in a stationary gas engine,
landfilling of waste
enHeo(:,3) = enHeoSludgeLf(end); % Heat from combustion of landfill gas in stationary gas engine,
landfilling of sludge
enHeo(:,4) = enHeoGuSp(end); % District heat from combustion of biogas in stationary gas engine
enHeo(:,5) = enHeoGuSpMBR(end); % District heat from combustion of biogas in stationary gas engine
enHeo(:,6) = enHeoGuSpSoil(end); % District heat from combustion of biogas in stationary gas engine
enHeo(:,7) = enHeoBiocellLf(end); % Landfill biocell

```

```

% Exergy

```

```

exHeo(:,1) = exHeoIc(end); % District heat from incineration
exHeo(:,2) = exHeoWasteLf(end); % Heat from combustion of landfill gas in a stationary gas engine,
landfilling of waste
exHeo(:,3) = exHeoSludgeLf(end); % Heat from combustion of landfill gas in stationary gas engine,
landfilling of sludge
exHeo(:,4) = exHeoGuSp(end); % District heat from combustion of biogas in stationary gas engine
exHeo(:,5) = exHeoGuSpMBR(end); % MBR-WWTP
exHeo(:,6) = exHeoGuSpSoil(end); % WWTP
exHeo(:,7) = exHeoBiocellLf(end); % Landfill biocell

```

```

% Distances for different transports

```

```

% Distance travelled during collection of waste

```

```

distCo(:,1) = distkmCo1(end); % Collection of organic household waste to compost
distCo(:,2) = distkmCo2(end); % Collection of organic household waste to incineration

```

```

% Distance travelled, Truck and Trailer (TT)

```

```

distTT(:,1) = distkmTT1(end); % mature compost from compost to arable land
distTT(:,2) = distkmTT2(end); % sludge from stormwater to landfill
distTT(:,3) = distkmTT3(end); % ash from incineration to landfill
distTT(:,4) = distkmTT4(end); % slagg from incineration to landfill
distTT(:,5) = distkmTT5(end); % MBR sludge to incineration
distTT(:,6) = distkmTT6(end); % MBR sludge to arable land

```

```

distTT(:,7) = distkmTT2(end); % WWTP sludge to arable land
distTT(:,8) = distkmTT8(end); % urine to arable land
distTT(:,9) = distkmTT9(end); % WWTP sludge to incineration

% spreader data
distSpr(:,1) = sgHoSprFieDistKmPHa2(end); % from WWTP
distSpr(:,2) = sgDryFieDistKmPHa2(end);
distSpr(:,3) = sgHoSprFieDistKmPHa6(end); % from MBR
distSpr(:,4) = sgDryFieDistKmPHa6(end);
distSpr(:,5) = sgHoSprFieDistKmPHa8(end); % from urine handling
distSpr(:,6) = sgDryFieDistKmPHa8(end);
distSpr(:,7) = sgHoSprFieDistKmPHaCp(end); % from compost
distSpr(:,8) = sgDryFieDistKmPHaCp(end);

% Chemicals
EnergiRef(:,1) = mbiUSAddConsIc(end,1); % Ca(OH)2 (Incineration)
EnergiRef(:,2) = mbiUSAddConsIc(end,2); % CaCO3 (Incineration)
EnergiRef(:,3) = mbiUSAddConsIc(end,3); % polyflock (Incineration)
EnergiRef(:,4) = mbiUSAddConsIc(end,4); % TMT (Incineration)
EnergiRef(:,5) = mbiUSAddConsIc(end,5); % urea (Incineration)

% Nutrients to soil
% Nitrogen
mboNSoil1 = mboSg2(:,23); % WWTP
mboNSoil2 = mboSg6(:,23); % MBR
mboNSoil3 = mboSg8(:,23); % urine
mboNSoil4 = mboSgCp(:,23); % compost

nuNSoil(:,1) = mboNSoil1(end);
nuNSoil(:,2) = mboNSoil2(end);
nuNSoil(:,3) = mboNSoil3(end);
nuNSoil(:,4) = mboNSoil4(end);

% Phosphorus
mboPSoil1 = mboSg2(:,30);
mboPSoil2 = mboSg6(:,30);
mboPSoil3 = mboSg8(:,30);
mboPSoil4 = mboSgCp(:,30);

nuPSoil(:,1) = mboPSoil1(end);
nuPSoil(:,2) = mboPSoil2(end);
nuPSoil(:,3) = mboPSoil3(end);
nuPSoil(:,4) = mboPSoil4(end);

% Potassium
mboKSoil1 = mboSg2(:,32);
mboKSoil2 = mboSg6(:,32);
mboKSoil3 = mboSg8(:,32);
mboKSoil4 = mboSgCp(:,32);

nuKSoil(:,1) = mboKSoil1(end);
nuKSoil(:,2) = mboKSoil2(end);
nuKSoil(:,3) = mboKSoil3(end);
nuKSoil(:,4) = mboKSoil4(end);

% Sulphur

```

```

mboSSoil1 = mboSg2(:,28);
mboSSoil2 = mboSg6(:,28);
mboSSoil3 = mboSg8(:,28);
mboSSoil4 = mboSgCp(:,28);

nuSSoil(:,1) = mboSSoil1(end);
nuSSoil(:,2) = mboSSoil2(end);
nuSSoil(:,3) = mboSSoil3(end);
nuSSoil(:,4) = mboSSoil4(end);

% Fuel Sum
% Energy
enOilDieselCoSum=sum(enOilDieselCo); %Total fuelconsumption in MJ for collection
enOilDieselTTSum = sum(enOilDieselTT); %Tot fuel consumption in MJ for truck and trailer transportation
enOilDieselsprSum = sum(enOilDieselspr); % Total fuel consumption in MJ from spreading on arable land
enOilDieselOthersSum = sum(enOilDieselOthers); % Total fuel consumption in MJ for various diesel users
enOilDieselSum = enOilDieselCoSum+enOilDieselTTSum+enOilDieselsprSum+enOilDieselOthersSum;
% Exergy
exOilDieselCoSum = sum(exOilDieselCo); %Total fuelconsumption in MJ for collection
exOilDieselTTSum = sum(exOilDieselTT); %Tot fuel consumption in MJ for truck and trailer transportation
exOilDieselsprSum = sum(exOilDieselspr); %Total fuel consumption in MJ from spreading on arable land
exOilDieselOthersSum = sum(exOilDieselOthers); % Total fuel consumption in MJ for various diesel users
exOilDieselSum = exOilDieselCoSum+exOilDieselTTSum+exOilDieselsprSum+exOilDieselOthersSum;

% Energy sum
enOiliSum = enOilDieselSum; % Total consumption of oil as diesel in core system
enOiloSum = sum(enOilo); % Total production of vehicle fuel ( biogas to buses and cars) in core system
enEliSum = sum(enEli); % Total consumption of electricity
enEloSum = sum(enElo); % Total production of electricity
enHeiSum = sum(enHei); % Total consumption of heat as district heat or steam
enHeoSum = sum(enHeo); % Total production of heat as district heat or steam
% Exergy sum
exOiliSum = exOilDieselSum; % Total consumption of oil as diesel in core system
exOiloSum = sum(exOilo); % Total production of vehicle fuel ( biogas to buses and cars) in core system
exEliSum = sum(exEli); % Total consumption of electricity
exEloSum = sum(exElo); % Total production of electricity
exHeiSum = sum(exHei); % Total consumption of heat as district heat or steam
exHeoSum = sum(exHeo); % Total production of heat as district heat or steam

% Distance trucks sum
distCoSum = sum(distCo); % Total km travelled by collection trucks
distTTSum = sum(distTT); % Total km travelled by ordinary trucks
distSprSum = sum(distSpr); % total distance travelled by tractor and spreader toan from field asnd on field

% Distance bus & car sum
distBusSum = sum(enOilo(:,1:3))/guBiogasBusMJperKm; % Total km by busses using biogas as fuel
distCarSum = sum(enOilo(:,4:6))/guBiogasCarMJperKm; % Total km by cars using biogas as fuel

% Nutrients sum
nuNSprSum = sum(nuNSoil(:,1:4));
nuPSprSum = sum(nuPSoil(:,1:4));
nuKSprSum = sum(nuKSoil(:,1:4));
nuSSprSum = sum(nuSSoil(:,1:4));

% Up- and downstream processes
% -----

```

```

% Energy
enOilUS(:,1) = enOiliUSDwChemProdTo(end); %Chemicals added during drinking water generation (toilet)
enOilUS(:,2) = enEliUSDwChemProdTo(end); %Chemicals added during drinking water generation (toilet)
enOilUS(:,3) = enEliUSDwPumpTo(end); %Chemicals added during drinking water generation (toilet)
enOilUS(:,4) = enOiliUSDwChemProdBDT(end); %Chemicals added during drinking water generation (BDT)
enOilUS(:,5) = enEliUSDwChemProdBDT(end); %Chemicals added during drinking water generation (BDT)
% Exergy
exOilUS(:,1) = exOiliUSDwChemProdTo(end); %Chemicals added during drinking water generation (toilet)
exOilUS(:,2) = exEliUSDwChemProdTo(end); %Chemicals added during drinking water generation (toilet)
exOilUS(:,3) = exEliUSDwPumpTo(end); %Chemicals added during drinking water generation (toilet)
exOilUS(:,4) = exOiliUSDwChemProdBDT(end); %Chemicals added during drinking water generation (BDT)
exOilUS(:,5) = exEliUSDwChemProdBDT(end); %Chemicals added during drinking water generation (BDT)

% Chemicals
mbiFeCl3PreSSp = mboExtrasPreSSp(:,1);
mbiFeCl3PreSSpMBR = mboExtrasPreSSpMBR(:,1);
mbiCleaningChemVsep = mboVSEPextrasMBR(:,4);
mbiCSourceAnoxSp = mboAnoxExtrasSp(:,1);
mbiFeCl3SandFSp = mboSandFExtrasSp(:,1);
mbiPolyThickSp = mboExtrasThickSp(:,1);
mbiDewPolySp = mboExtrasDewAdSp(:,1);
mbiDewPolySpMBR = mboExtrasDewAdSpMBR(:,1);
mbiFeCl3SandFSw = mboSandFExtrasSw(:,1);

MtrlAddUS(:,1) = mbiUSAddConsIc(end,1); % Ca(OH)2 (Incineration)
MtrlAddUS(:,2) = mbiUSAddConsIc(end,2); % CaCO3 (Incineration)
MtrlAddUS(:,3) = mbiUSAddConsIc(end,3); % polyflock (Incineration)
MtrlAddUS(:,4) = mbiUSAddConsIc(end,4); % TMT (Incineration)
MtrlAddUS(:,5) = mbiUSAddConsIc(end,5); % urea (Incineration)
MtrlAddUS(:,6) = mbiUSToDwChemCl2(end); % Cl2 (Drinking water generation, toilet)
MtrlAddUS(:,7) = mbiUSToDwChemLime(end); % Lime (Drinking water generation, toilet)
MtrlAddUS(:,8) = mbiUSToDwChemCO2(end); % CO2 (Drinking water generation, toilet)
MtrlAddUS(:,9) = mbiUSToDwChemAlSO4(end); % AlSO4 (Drinking water generation, toilet)
MtrlAddUS(:,10) = mbiUSToDwChemNaCl(end); % NaCl (Drinking water generation, toilet)
MtrlAddUS(:,11) = mbiUSBDTDwChemCl2(end); % Cl2 (Drinking water generation, BDT)
MtrlAddUS(:,12) = mbiUSBDTDwChemLime(end); % Lime (Drinking water generation, BDT)
MtrlAddUS(:,13) = mbiUSBDTDwChemCO2(end); % CO2 (Drinking water generation, BDT)
MtrlAddUS(:,14) = mbiUSBDTDwChemAlSO4(end); % AlSO4 (Drinking water generation, BDT)
MtrlAddUS(:,15) = mbiUSBDTDwChemNaCl(end); % NaCl (Drinking water generation, BDT)
MtrlAddUS(:,16) = mbiFeCl3PreSSp(end); % FeCl3 added (preSed in wwtp)
MtrlAddUS(:,17) = mbiCleaningChemVsep(end); % Cleaningchemicals for the Vsep
MtrlAddUS(:,18) = mbiCSourceAnoxSp(end); %Extra carbon added in Anox Process
MtrlAddUS(:,19) = mbiFeCl3SandFSp(end); %FeCl3 added (sandFilter in wwtp)
MtrlAddUS(:,20) = mbiPolyThickSp(end); %Polymers added in Thickener after AS/MBRad
MtrlAddUS(:,21) = mbiDewPolySp(end); %Polymers added in final sludge dewatering
MtrlAddUS(:,22) = mbiDewPolySpMBR(end); %Polymers added in final sludge dewatering
MtrlAddUS(:,23) = mbiFeCl3PreSSpMBR(end); % FeCl3 added (preSed in wwtp)
MtrlAddUS(:,24) = mbiAdditiveToSm(end); % Additive in soil manufacturing
MtrlAddUS(:,25) = mbiFeCl3SandFSw(end); % FeCl3 added (PreSed in stormwater process)
MtrlAddUS(:,26) = mbiFeCl3PreSSw(end);

enOilUSSum = sum(enOilUS);
exOilUSSum = sum(exOilUS);

%-----End of File-----

```

Varname.m

% This is a small scriptfile that rename all variables listed in varsave.m
% Written by Andras Baky 98-10-13. Last modified Tove Sundberg 2005-12, Stockholm Vatten.

```
if exist('zmbiFoodWaste')==0;
    r1=0;
else;
    [r1,c1]=size(zmbiFoodWaste);
end;
ScenarioNr=r1+1;

%-----
% Here comes two strings that renames the variables defined in varsave.m and saves
% them by adding a "z" to the beginning of the variable name. VarVec renames vectors
% and VarScal renames scalars.
%-----

for li=1:NoSaveVecVariables;
    command=['VarName=VarVec',int2str(li),'];
    eval(command);
    NameLength=length(VarName);
    if NameLength>49;    % Check if max 50 significant signs
        error('Variabeln ',VarName,' har för långt namn (>50 tecken)');
    end;

    command=['[r,c]=size(',VarName,')'];
    eval(command);
    command=['z',VarName,'(',num2str(ScenarioNr),',:)=',VarName,'(',num2str(r),',:);'];
    eval(command);
end;

for li=1:NoSaveScalVariables;
    command=['VarName=VarScal',int2str(li),'];
    eval(command);
    command=['NameLength=length(',VarName,')'];
    eval(command);
    if NameLength>49;    % Check if max 50 significant signs
        error('Variabeln ',VarName,' har för långt namn (>50 tecken)');
        stop;
    end;

    command=['[r,c]=size(',VarName,')'];
    eval(command);
    command=['z',VarName,'(',num2str(ScenarioNr),',:)=',VarName,'(',num2str(r),',:);'];
    eval(command);
end;

%-----End of File-----
```

CalcExtSys.m

% This file calculates energy consumption, emissions and costs from the compensatory system
% Made by Cecilia Hessel 05-03-05. Last modified 2005-12-16, Tove Sundberg

% Calculation of magnitude/size/amount of functional units
% Calculation of need of compensatory system in each scenario
% Calculation of upstream energy consumption in waste management system
% Calculation of total energy consumption in compensatory system
% Calculation of total emissions in compensatory system

global eInt
global heInt
global eExt
global eIMix
global SoilModActive

XsInit;

% Size of functional units

% -----

% Energy

zenHemaxWaste = max(zenHeoSum); % Functional unit: heat

zenElmaxWaste = max(zenEloSum); % Functional unit: el

% Exergy

zexHemaxWaste = max(zexHeoSum); % Functional unit: heat

zexElmaxWaste = max(zexEloSum); % Functional unit: el

zdistBusmaxWaste = max(zdistBusSum); % Functional unit: Distance travelled by bus

zdistCarmaxWaste = max(zdistCarSum); % Functional unit: Distance travelled by car

%Nutrients

znuNmaxSoil = max(znuNSoilSum); % Functional unit: Nitrogen, after soil model

znuPmaxSoil = max(znuPSoilSum); % Functional unit: Phosphorus, after soil model

znuKmaxSoil = max(znuKSoilSum); % Functional unit: Potassium, after soil model

znuNmaxSpr = max(znuNSprSum); % Functional unit: Nitrogen, after spreading

znuPmaxSpr = max(znuPSprSum); % Functional unit: Phosphorus, after spreading

znuKmaxSpr = max(znuKSprSum); % Functional unit: Potassium, after spreading

%Exergy

zexNmaxSoil = znuNmaxSoil*exQualityFactor(10,1)/14; % Nitrogen exergy (MJ), after soil model

zexPmaxSoil = znuPmaxSoil*exQualityFactor(11,1)/31; % Phosphorus exergy (MJ), after soil model

zexNmaxSpr = znuNmaxSpr*exQualityFactor(10,1)/14; % Functional unit: Nitrogen, after spreading

zexPmaxSpr = znuPmaxSpr*exQualityFactor(11,1)/31; % Functional unit: Phosphorus, after spreading

% External contribution to functional units

% -----

% Energy

zenHeExternal = zenHemaxWaste-zenHeoSum; % External heat production

zenElExternal = zenElmaxWaste-zenEloSum; % External electricity production

% Exergy

zexHeExternal = zexHemaxWaste-zexHeoSum; % External heat production

zexElExternal = zexElmaxWaste-zexEloSum; % External electricity production

zdistBusExternal = zdistBusmaxWaste-zdistBusSum;

```

zenBusExternal = guDieselBusMJperKm*zdistBusExternal; % External bus fuel
zexBusExternal = guDieselBusMJperKm*zdistBusExternal*exQualityFactor(6); % External bus fuel

zdistCarExternal = zdistCarmaxWaste-zdistCarSum;
zenCarExternal = guPetrolCarMJperKm*zdistCarExternal; % External car fuel
zexCarExternal = guPetrolCarMJperKm*zdistCarExternal*exQualityFactor(6); % External car fuel

znuNSprExternal = znuNmaxSpr-znuNSprSum; % Addition of mineral nitrogen, after spreading
znuPSprExternal = znuPmaxSpr-znuPSprSum; % Addition of mineral phosphorus, after spreading
znuKSprExternal = znuKmaxSpr-znuKSprSum; % Addition of mineral potassium, after spreading

znuNSoilExternal = znuNmaxSoil-znuNSoilSum; % Addition of mineral nitrogen, after soil model
znuPSoilExternal = znuPmaxSoil-znuPSoilSum; % Addition of mineral phosphorus, after soil model
znuKSoilExternal = znuKmaxSoil-znuKSoilSum; % Addition of mineral potassium, after soil model

if SoilModActive == 1
    znuNExternal = znuNSoilExternal;
    znuPEExternal = znuPSoilExternal;
    znuKEExternal = znuKSoilExternal;
end

if SoilModActive == 0
    znuNExternal = znuNSprExternal;
    znuPEExternal = znuPSprExternal;
    znuKEExternal = znuKSprExternal;
end

FUopt = [
    zenHemaxWaste
    zexHemaxWaste
    zenElmaxWaste
    zexElmaxWaste
    zdistBusmaxWaste
    zdistCarmaxWaste
    znuNmaxSpr
    znuPmaxSpr
    znuKmaxSpr
    znuNmaxSoil
    znuPmaxSoil
    znuKmaxSoil
    zexNmaxSpr
    zexPmaxSpr
    zexNmaxSoil
    zexPmaxSoil ];

% Primary energy carriers, upstream to the Core system (MJ)
% -----
% All consumption of oil within the WMS assumed to be diesel oil
% Consumption of diesel oil, electricity and heat
% Energy
zenPrInternalTrucks = xsenOilPr(:,1)*zenOliSum'; % Collection and transportation
zenPrInternalElectricity = xsenElPr(:,elInt)*zenEliSum'; % Electricity used for core system processes
zenPrInternalHeat = xsenHePr(:,heInt)*zenHeiSum'; % Heat used in core system processes
zenPrInternal = zenPrInternalTrucks+zenPrInternalElectricity+zenPrInternalHeat;

zenPrHydroInternal = zenPrInternal(1,:); % MJ electricity: Hydropower

```

```

zenPrBiomassInternal = zenPrInternal(2,:); % MJ fuel: Biomass
zenPrNuclearInternal = zenPrInternal(3,:); % MJ electricity: Nuclear power generation
zenPrNgasInternal = zenPrInternal(4,:); % MJ fuel: Natural gas
zenPrOilInternal = zenPrInternal(5,:); % MJ fuel: Oil
zenPrCoalInternal = zenPrInternal(6,:); % MJ fuel: Hard coal
% Exergy
zexPrInternalTrucks = xsenOilPr(:,1)*zexOiliSum'; % Collection and transportation
zexPrInternalElectricity = xsenElPr(:,elInt)*zexEliSum'; % Electricity used for core system processes
zexPrInternalHeat = xsenHePr(:,heInt)*zexHeiSum'; % Heat used in core system processes
zexPrInternal = zexPrInternalTrucks+zexPrInternalElectricity+zexPrInternalHeat;

zexPrHydroInternal = zexPrInternal(1,:); % MJ electricity: Hydropower
zexPrBiomassInternal = zexPrInternal(2,:); % MJ fuel: Biomass
zexPrNuclearInternal = zexPrInternal(3,:); % MJ electricity: Nuclear power generation
zexPrNgasInternal = zexPrInternal(4,:); % MJ fuel: Natural gas
zexPrOilInternal = zexPrInternal(5,:); % MJ fuel: Oil
zexPrCoalInternal = zexPrInternal(6,:); % MJ fuel: Hard coal

% Primary energy carriers distributed to activities in the core system
% -----

% Includes oil,electricity and heat. Waste is not accounted for.
% Energy
zenPrco=xsenOilPr(:,1)*zenOilDieselCoSum'+xsenElPr(:,elInt)*(zenEliWd+zenEliConvPipeSp+zenEliConv
PipeMBR+zenEliConvPipeSw+zenEliConvPipeUr); % Collection

zenPrtf = xsenOilPr(:,1)*zenOilDieselTTSum'; % Transportation
zenPrsg = xsenOilPr(:,1)*zenOilDieselsprSum'; % Spreading of organic fertiliser
zenPrpcp = xsenOilPr(:,1)*zenDieselCp(:,1)+xsenElPr(:,elInt)*zenEliCp'; % Compost
zenPric = xsenOilPr(:,1)*zenFueliBaIc'+xsenElPr(:,elInt)*(zenEliIc+zenEliBaIc); % Incineration
zenPrgu = xsenElPr(:,elInt)*(zenEliGuSp+zenEliGuSpMBR); % Gas utilisation
zenPrLf = xsenOilPr(:,1)*zenFueliLf'; % Landfill
zenPrsw = xsenElPr(:,elInt)*zenEliTotSandFSw'; % Stormwatwer treatment

zenPrMBR=xsenElPr(:,elInt)*(zenEliTotPreSSpMBR+zenEliTotMBRad+zenEliTotVsepSp+zenEliTotRevOs
mSp+zenEliTotAdSpMBR+zenEliHyg70AdSpMBR+zenEliDewSpMBR+zenEliHyg70ROSpMBR)+xsenHe
Pr(:,heInt)*(zenHeiNetAdSpMBR)+xsmvCorePr(:,6)*zMtrlAddUS(:,23)+xsmvCorePr(:,7)*zMtrlAddUS(:,2
2)'; % Anaerobic process

zenPrsp=xsenElPr(:,elInt)*(zenEliTotSandFSp+zenEliTotPreSSp+zenEliTotASAnoxSp+zenEliTotASAerobS
p+zenEliTotASIdealSSp+zenEliTotAdSp+zenEliDewSp+zenEliThickSp)+xsenHePr(:,heInt)*(zenHeiNetAd
Sp)+xsmvCorePr(:,6)*zMtrlAddUS(:,16)+xsmvCorePr(:,6)*zMtrlAddUS(:,19)+xsmvCorePr(:,7)*zMtrlAdd
US(:,20)+xsmvCorePr(:,7)*zMtrlAddUS(:,21)'; % Sewage plant

zenPrcoSum = sum(zenPrco);
zenPrtfSum = sum(zenPrtf);
zenPrsgSum = sum(zenPrsg);
zenPrpcpSum = sum(zenPrpcp);
zenPrsmSum = sum(zenPrsm);
zenPricSum = sum(zenPric);
zenPrguSum = sum(zenPrgu);
zenPrLfSum = sum(zenPrLf);
zenPrMBRSum = sum(zenPrMBR);
zenPrspSum = sum(zenPrsp);
zenPrswSum = sum(zenPrsw);

```



```

% Exergy
zexPrco=xsenOilPr(:,1)*zexOilDieselCoSum'+xsenElPr(:,elInt)*(zexEliWd+zexEliConvPipeSp+zexEliConv
PipeMBR+zexEliConvPipeSw+zexEliConvPipeUr);           % Collection

zexPrtf = xsenOilPr(:,1)*zexOilDieselTTSum';           % Transportation
zexPrsg = xsenOilPr(:,1)*zexOilDieselsprSum';         % Spreading of organic fertiliser
zexPrpcp = xsenOilPr(:,1)*zexDieselCp(:,1)+xsenElPr(:,elInt)*zexEliCp';           % Compost
zexPrpc = xsenOilPr(:,1)*zexFuelBaIc'+xsenElPr(:,elInt)*(zexEliIc+zexEliBaIc); % Incineration
zexPrgru = xsenElPr(:,elInt)*+(zexEliGuSp+zexEliGuSpMBR)'; % Gas utilisation
zexPrflf = xsenOilPr(:,1)*zexFuelLf';                 % Landfill
zexPrsw = xsenElPr(:,elInt)*zexEliTotSandFSw';        % Stormwater treatment

zexPrMBR=xsenElPr(:,elInt)*(zexEliTotPreSSpMBR+zexEliTotMBRad+zexEliTotVsepSp+zexEliTotRevOs
mSp+zexEliTotAdSpMBR+zexEliHyg70AdSpMBR+zexEliDewSpMBR+zexEliHyg70ROSpMBR)+xsenHe
Pr(:,heInt)*(zexHeiNetAdSpMBR)+xsmvCorePr(:,6)*zMtrlAddUS(:,23)+xsmvCorePr(:,7)*zMtrlAddUS(:,2
2)';
% Anaerobic process

zexPrsp=xsenElPr(:,elInt)*(zexEliTotSandFSp+zexEliTotPreSSp+zexEliTotASAnoxSp+zexEliTotASAerobS
p+zexEliTotASIdealSSp+zexEliTotAdSp+zexEliDewSp+zexEliThickSp)+xsenHePr(:,heInt)*(zexHeiNetAd
Sp)+xsmvCorePr(:,6)*zMtrlAddUS(:,16)+xsmvCorePr(:,6)*zMtrlAddUS(:,19)+xsmvCorePr(:,7)*zMtrlAdd
US(:,20)+xsmvCorePr(:,7)*zMtrlAddUS(:,21)';
% Sewage plant

zexPrcoSum = sum(zexPrco);
zexPrtfSum = sum(zexPrtf);
zexPrsgSum = sum(zexPrsg);
zexPrpcpSum = sum(zexPrpcp);
zexPrsmSum = sum(zexPrsm);
zexPrpcSum = sum(zexPrpc);
zexPrgruSum = sum(zexPrgru);
zexPrflfSum = sum(zexPrflf);
zexPrMBRSum = sum(zexPrMBR);
zexPrspSum = sum(zexPrsp);
zexPrswSum = sum(zexPrsw);

% Primary energy carriers, external system
% -----

% The variables e (elInt & elExt) and h (heInt & heExt) are set in the run-file whereas
% e = 1, h = 1 biomass
% e = 2    hydropower
% e = 3    windpower
% e = 4    nuclear power
% e = 5    natural gas
% e = 6, h = 3 oil
% e = 7, h = 2 coal
% e = 8    Swedish Powermix
%         h = 4 peat
% Energy
zenPrExternal =
xsenHePr(:,heExt)*zenHeExternal'+xsenElPr(:,elExt)*zenElExternal'+xsenOilPr(:,1)*zenBusExternal'+
xsenOilPr(:,2)*zenCarExternal'+xsnuPr(:,5)*znuNExternal'+xsnuPr(:,6)*znuPExternal'+
xsnuPr(:,7)*znuKExternal';

zenPrHydroExternal = zenPrExternal(1,:); % MJ electricity
zenPrBiomassExternal = zenPrExternal(2,:); % MJ fuel
zenPrNuclearExternal = zenPrExternal(3,:); % MJ electricity

```

```

zenPrNgasExternal = zenPrExternal(4,:); % MJ fuel
zenPrOilExternal = zenPrExternal(5,:); % MJ fuel
zenPrCoalExternal = zenPrExternal(6,:); % MJ fuel
% Exergy
zexPrExternal =
xsenHePr(:,heExt)*zexHeExternal'+xsenElPr(:,elExt)*zexElExternal'+xsenOilPr(:,1)*zexBusExternal'+
xsenOilPr(:,2)*zexCarExternal'+xsnuPr(:,5)*znuNExternal'+xsnuPr(:,6)*znuPExternal'+
xsnuPr(:,7)*znuKExternal';

zexPrHydroExternal = zexPrExternal(1,:); % MJ electricity
zexPrBiomassExternal = zexPrExternal(2,:); % MJ fuel
zexPrNuclearExternal = zexPrExternal(3,:); % MJ electricity
zexPrNgasExternal = zexPrExternal(4,:); % MJ fuel
zexPrOilExternal = zexPrExternal(5,:); % MJ fuel
zexPrCoalExternal = zexPrExternal(6,:); % MJ fuel

% Primary energy carriers, total system
% -----
% Energy
zenPrHydro = zenPrHydroInternal+zenPrHydroExternal; % MJ electricity
zenPrBiomass = zenPrBiomassInternal+zenPrBiomassExternal; % MJ fuel
zenPrNuclear = zenPrNuclearInternal+zenPrNuclearExternal; % MJ thermal energy
zenPrNgas = zenPrNgasInternal+zenPrNgasExternal; % MJ fuel
zenPrOil = zenPrOilInternal+zenPrOilExternal; % MJ fuel
zenPrCoal = zenPrCoalInternal+zenPrCoalExternal; % MJ fuel
zenPr = zenPrHydro+zenPrBiomass+zenPrNuclear+zenPrNgas+zenPrOil+zenPrCoal;
zenPrNonRen = zenPrNuclear+zenPrNgas+zenPrOil+zenPrCoal;
% Exergy
zexPrHydro = zexPrHydroInternal+zexPrHydroExternal; % MJ electricity
zexPrBiomass = zexPrBiomassInternal+zexPrBiomassExternal; % MJ fuel
zexPrNuclear = zexPrNuclearInternal+zexPrNuclearExternal; % MJ thermal exergy
zexPrNgas = zexPrNgasInternal+zexPrNgasExternal; % MJ fuel
zexPrOil = zexPrOilInternal+zexPrOilExternal; % MJ fuel
zexPrCoal = zexPrCoalInternal+zexPrCoalExternal; % MJ fuel

zenPr = zenPrHydro+zexPrBiomass+zexPrNuclear+zexPrNgas+zexPrOil+zexPrCoal;
zenPrNonRen = zenPrNuclear+zexPrNgas+zexPrOil+zexPrCoal;

% Primary energy carriers distributed to functional units
% -----
% Energy
zenPrHydroEl = zenElExternal*xsenElPr(1,elExt);
zenPrHydroHe = zenHeExternal*xsenHePr(1,heExt);
zenPrHydroDiesel = zenBusExternal*xsenOilPr(1,1); % diesel busses
zenPrHydroPetrol = zenCarExternal*xsenOilPr(1,2); % petrol cars
zenPrHydroN = znuNExternal*xsnuPr(1,5);
zenPrHydroP = znuPExternal*xsnuPr(1,6);
zenPrHydroK = znuKExternal*xsnuPr(1,7);

zenPrBiomassEl = zenElExternal*xsenElPr(2,elExt);
zenPrBiomassHe = zenHeExternal*xsenHePr(2,heExt);
zenPrBiomassDiesel = zenBusExternal*xsenOilPr(2,1); % diesel busses
zenPrBiomassPetrol = zenCarExternal*xsenOilPr(2,2); % petrol cars
zenPrBiomassN = znuNExternal*xsnuPr(2,5);
zenPrBiomassP = znuPExternal*xsnuPr(2,6);
zenPrBiomassK = znuKExternal*xsnuPr(2,7);

```

```

zenPrNuclearEl = zenElExternal*xsenElPr(3,elExt);
zenPrNuclearHe = zenHeExternal*xsenHePr(3,heExt);
zenPrNuclearDiesel = zenBusExternal*xsenOilPr(3,1); % diesel busses
zenPrNuclearPetrol = zenCarExternal*xsenOilPr(3,2); % petrol cars
zenPrNuclearN = znuNExternal*xsnuPr(3,5);
zenPrNuclearP = znuPEExternal*xsnuPr(3,6);
zenPrNuclearK = znuKExternal*xsnuPr(3,7);

```

```

zenPrNgasEl = zenElExternal*xsenElPr(4,elExt);
zenPrNgasHe = zenHeExternal*xsenHePr(4,heExt);
zenPrNgasDiesel = zenBusExternal*xsenOilPr(4,1); % diesel busses
zenPrNgasPetrol = zenCarExternal*xsenOilPr(4,2); % petrol cars
zenPrNgasN = znuNExternal*xsnuPr(4,5);
zenPrNgasP = znuPEExternal*xsnuPr(4,6);
zenPrNgasK = znuKExternal*xsnuPr(4,7);

```

```

zenPrOilEl = zenElExternal*xsenElPr(5,elExt);
zenPrOilHe = zenHeExternal*xsenHePr(5,heExt);
zenPrOilDiesel = zenBusExternal*xsenOilPr(5,1); % diesel busses
zenPrOilPetrol = zenCarExternal*xsenOilPr(5,2); % petrol cars
zenPrOilN = znuNExternal*xsnuPr(5,5);
zenPrOilP = znuPEExternal*xsnuPr(5,6);
zenPrOilK = znuKExternal*xsnuPr(5,7);

```

```

zenPrCoalEl = zenElExternal*xsenElPr(6,elExt);
zenPrCoalHe = zenHeExternal*xsenHePr(6,heExt);
zenPrCoalDiesel = zenBusExternal*xsenOilPr(6,1); % diesel busses
zenPrCoalPetrol = zenCarExternal*xsenOilPr(6,2); % petrol cars
zenPrCoalN = znuNExternal*xsnuPr(6,5);
zenPrCoalP = znuPEExternal*xsnuPr(6,6);
zenPrCoalK = znuKExternal*xsnuPr(6,7);

```

```

% Exergy
zexPrHydroEl = zexElExternal*xsenElPr(1,elExt);
zexPrHydroHe = zexHeExternal*xsenHePr(1,heExt);
zexPrHydroDiesel = zexBusExternal*xsenOilPr(1,1); % diesel busses
zexPrHydroPetrol = zexCarExternal*xsenOilPr(1,2); % petrol cars
zexPrHydroN = znuNExternal*xsnuPr(1,5);
zexPrHydroP = znuPEExternal*xsnuPr(1,6);
zexPrHydroK = znuKExternal*xsnuPr(1,7);

```

```

zexPrBiomassEl = zexElExternal*xsenElPr(2,elExt);
zexPrBiomassHe = zexHeExternal*xsenHePr(2,heExt);
zexPrBiomassDiesel = zexBusExternal*xsenOilPr(2,1); % diesel busses
zexPrBiomassPetrol = zexCarExternal*xsenOilPr(2,2); % petrol cars
zexPrBiomassN = znuNExternal*xsnuPr(2,5);
zexPrBiomassP = znuPEExternal*xsnuPr(2,6);
zexPrBiomassK = znuKExternal*xsnuPr(2,7);

```

```

zexPrNuclearEl = zexElExternal*xsenElPr(3,elExt);
zexPrNuclearHe = zexHeExternal*xsenHePr(3,heExt);
zexPrNuclearDiesel = zexBusExternal*xsenOilPr(3,1); % diesel busses
zexPrNuclearPetrol = zexCarExternal*xsenOilPr(3,2); % petrol cars
zexPrNuclearN = znuNExternal*xsnuPr(3,5);
zexPrNuclearP = znuPEExternal*xsnuPr(3,6);
zexPrNuclearK = znuKExternal*xsnuPr(3,7);

```

```

zexPrNgasEl = zexElExternal*xsenElPr(4,elExt);
zexPrNgasHe = zexHeExternal*xsenHePr(4,heExt);
zexPrNgasDiesel = zexBusExternal*xsenOilPr(4,1); % diesel busses
zexPrNgasPetrol = zexCarExternal*xsenOilPr(4,2); % petrol cars
zexPrNgasN = znuNExternal*xsnuPr(4,5);
zexPrNgasP = znuPEExternal*xsnuPr(4,6);
zexPrNgasK = znuKExternal*xsnuPr(4,7);

zexPrOilEl = zexElExternal*xsenElPr(5,elExt);
zexPrOilHe = zexHeExternal*xsenHePr(5,heExt);
zexPrOilDiesel = zexBusExternal*xsenOilPr(5,1); % diesel busses
zexPrOilPetrol = zexCarExternal*xsenOilPr(5,2); % petrol cars
zexPrOilN = znuNExternal*xsnuPr(5,5);
zexPrOilP = znuPEExternal*xsnuPr(5,6);
zexPrOilK = znuKExternal*xsnuPr(5,7);

zexPrCoalEl = zexElExternal*xsenElPr(6,elExt);
zexPrCoalHe = zexHeExternal*xsenHePr(6,heExt);
zexPrCoalDiesel = zexBusExternal*xsenOilPr(6,1); % diesel busses
zexPrCoalPetrol = zexCarExternal*xsenOilPr(6,2); % petrol cars
zexPrCoalN = znuNExternal*xsnuPr(6,5);
zexPrCoalP = znuPEExternal*xsnuPr(6,6);
zexPrCoalK = znuKExternal*xsnuPr(6,7);

% Emissions to air and water
% -----
% Calculation of upstream emissions to Core system
% Includes oil,electricity and heat. Waste is not accounted for.
%-----
% Emissions from use of upstream materials
zmvFeCl3SpUpStream = (xsmvCoreEmAir(:,6)*(zMtrlAddUS(:,16)+zMtrlAddUS(:,19)))';
zmvFeCl3SpMBRUpStream = (xsmvCoreEmAir(:,6)*(zMtrlAddUS(:,23)))';
zmvFeCl3SwUpStream = (xsmvCoreEmAir(:,6)*(zMtrlAddUS(:,25)+zMtrlAddUS(:,26)))';

zmvPolymerSpUpStream = xsmvCoreEmAir(:,7)*(zMtrlAddUS(:,20)+zMtrlAddUS(:,21))';
zmvPolymerSpMBRUpStream = xsmvCoreEmAir(:,7)*zMtrlAddUS(:,22)';
zmvExternalCSpUpStream = xsmvCoreEmAir(:,5)*zMtrlAddUS(:,18)';

% Air Emissions
zemAirUpco =
xsenOilUpStreamEmAir(:,1)*zenOilDieselCoSum'+xsenElEmAir(:,elInt)*(zenEliWd+zenEliConvPipeSp+
zenEliConvPipeMBR+zenEliConvPipeSw+zenEliConvPipeUr)'; % Collection
zemAirUptf = xsenOilUpStreamEmAir(:,1)*zenOilDieselTTSum'; % Transportation
zemAirUpsg = xsenOilUpStreamEmAir(:,1)*zenOilDieselsprSum'; % Spreading of organic fertiliser
zemAirUpcp = xsenOilUpStreamEmAir(:,1)*zenDieselCp(:,1)';
zemAirUpic = xsenOilUpStreamEmAir(:,1)*zenFueliBaIc'+xsenElEmAir(:,elInt)*(zenEliIc+zenEliBaIc)';
% Incineration
zemAirUpgu = xsenElEmAir(:,elInt)*(zenEliGuSp+zenEliGuSpMBR)'; % Gas utilisation
zemAirUplf = xsenOilUpStreamEmAir(:,1)*zenFueliLf'; % Landfill

zemAirUpMBR = xsenElEmAir(:,elInt)*(zenEliTotPreSSpMBR+zenEliTotMBRad+zenEliTotRevOsmSp+
zenEliTotVsepSp+zenEliTotAdSpMBR+zenEliDewSpMBR+zenEliHyg70AdSpMBR+zenEliDewSpMBR+
zenEliHyg70ROSpMBR)+xsenHeEmAir(:,heInt)*(zenHeiTotAdSpMBR)'+
xsmvCoreEmAir(:,6)*zMtrlAddUS(:,23)'+xsmvCoreEmAir(:,7)*zMtrlAddUS(:,22)'; % MBR process

```

```

zemAirUpsp =
xsenEIEmAir(:,elInt)*(zenEliTotSandFSp+zenEliTotPreSSp+zenEliTotASAnoxSp+zenEliTotASAerobSp+
zenEliTotAdSp+zenEliDewSp)+xsenHeEmAir(:,heInt)*zenHeiTotAdSp'+
xsmvCoreEmAir(:,6)*(zMtrlAddUS(:,16)+zMtrlAddUS(:,19))+xsmvCoreEmAir(:,7)*zMtrlAddUS(:,20)+
xsmvCoreEmAir(:,5)*zMtrlAddUS(:,18); % Sewage plant

zemAirUpsw=xsenEIEmAir(:,elInt)*zenEliTotSandFSw'+xsmvCoreEmAir(:,6)*(zMtrlAddUS(:,25)+zMtrlAd
dUS(:,26)); % Stormwatwer treatment

zemAirUpcoSum = sum(zemAirUpco);
zemAirUptfSum = sum(zemAirUptf);
zemAirUpsgSum = sum(zemAirUpsg);
zemAirUpcpSum = sum(zemAirUpcp);
zemAirUpsmSum = sum(zemAirUpsm);
zemAirUpicSum = sum(zemAirUpic);
zemAirUpguSum = sum(zemAirUpgu);
zemAirUplfSum = sum(zemAirUplf);
zemAirUpspMBRSum = sum(zemAirUpMBR);
zemAirUpspSum = sum(zemAirUpsp);
zemAirUpswSum = sum(zemAirUpsw);

% Emissions to water
zemWaterUpco =
xsenOilUpStreamEmWater(:,1)*zenOilDieselCoSum'+xsenEIEmWater(:,elInt)*(zenEliWd+zenEliConvPipeS
p+zenEliConvPipeMBR+zenEliConvPipeSw+zenEliConvPipeUr); % Collection

zemWaterUptf = xsenOilUpStreamEmWater(:,1)*zenOilDieselTTSum'; % Transportation
zemWaterUpsg = xsenOilUpStreamEmWater(:,1)*zenOilDieselsprSum'; % Spreading of organic fertiliser
zemWaterUpcp = xsenOilUpStreamEmWater(:,1)*zenDieselCp(:,1) % Compost
zemWaterUpic=xsenOilUpStreamEmWater(:,1)*zenFueliBaIc'+
xsenEIEmWater(:,elInt)*(zenEliIc+zenEliBaIc); % Incineration
zemWaterUpgu = xsenEIEmWater(:,elInt)*(zenEliGuSp+zenEliGuSpMBR); % Gas utilisation
zemWaterUplf = xsenOilUpStreamEmWater(:,1)*zenFueliLf; % Landfill
zemWaterUpsw = xsenEIEmWater(:,elInt)*zenEliTotSandFSw'; % Stormwatwer treatment

zemWaterUpMBR =
xsenEIEmWater(:,elInt)*(zenEliTotPreSSpMBR+zenEliTotMBRad+zexEliTotVsepSp+zenEliTotRevOsmSp
+zenEliTotAdSpMBR+zenEliHyg70AdSpMBR+zenEliDewSpMBR+zenEliHyg70ROSpMBR)+xsenHeEm
Water(:,heInt)*zenHeiTotAdSpMBR'; % Anaerobic process

zemWaterUpsp =
xsenEIEmWater(:,elInt)*(zenEliTotSandFSp+zenEliTotPreSSp+zenEliTotASAnoxSp+zenEliTotASAerobSp
+zenEliTotASIdealSSp+zenEliTotAdSp+zenEliDewSp+zenEliThickSp)+xsenHeEmWater(:,heInt)*zenHeiT
otAdSp'; % Sewage plant

zemWaterUpcoSum = sum(zemWaterUpco);
zemWaterUptfSum = sum(zemWaterUptf);
zemWaterUpsgSum = sum(zemWaterUpsg);
zemWaterUpcpSum = sum(zemWaterUpcp);
zemWaterUpsmSum = sum(zemWaterUpsm);
zemWaterUpicSum = sum(zemWaterUpic);
zemWaterUpguSum = sum(zemWaterUpgu);
zemWaterUplfSum = sum(zemWaterUplf);
zemWaterUpMBRSum = sum(zemWaterUpMBR);
zemWaterUpspSum = sum(zemWaterUpsp);
zemWaterUpswSum = sum(zemWaterUpsw);

```

```

% Adding upstream emissions
zemAirUSCore=zenHeiSum*xsenHeEmAir(:,heInt)+zenEliSum*xsenEiEmAir(:,elInt)+zenOiliSum*xsenOil
UpStreamEmAir(:,1);

zemWaterUSCore=zenHeiSum*xsenHeEmWater(:,heInt)+zenEliSum*xsenEiEmWater(:,elInt)+zenOiliSum
*xsenOilUpStreamEmWater(:,1);

% 2. District heating
zEmAirXsHe = zenHeExternal*xsenHeEmAir(:,heExt);
zEmWaterXsHe = zenHeExternal*xsenHeEmWater(:,heExt);
zEmWaterRTXsHe = zenHeExternal*xsenHeDownstreamEmWaterRT(:,heExt); % Left in landfill

% 3. Electricity
zEmAirXsEl = zenElExternal*xsenEiEmAir(:,elExt);
zEmWaterXsEl = zenElExternal*xsenEiEmWater(:,elExt);
zEmWaterRTXsEl = zenElExternal*xsenEiDownstreamEmWaterRT(:,elExt); % Left in landfill

% 4. Vehicle fuel (car and bus)
zEmAirXsVeh = zenBusExternal*xsenOilEmAir(:,1)+zenCarExternal*xsenOilEmAir(:,2);
zEmWaterXsVeh = zenBusExternal*xsenOilEmWater(:,1)+zenCarExternal*xsenOilEmWater(:,2);

% 5. Fertiliser nitrogen
zEmAirXsN = znuNExternal*xsnuEmAir(:,5);
zEmWaterXsN = znuNExternal*xsnuEmWater(:,5);

% 6. Fertiliser phosphorus
zEmAirXsP = znuPEExternal*xsnuEmAir(:,6);
zEmWaterXsP = znuPEExternal*xsnuEmWater(:,6);

% 7. Fertiliser potassium
zEmAirXsK = znuKExternal*xsnuEmAir(:,7);
zEmWaterXsK = znuKExternal*xsnuEmWater(:,7);

% Precipitation Chemicals

%-----END OF FILE-----

```

CalcImpCat.m

% This file calculates the potential environmental impacts
% Written by Andras Baký, JTI. Last modified Tove Sundberg 2005-12, Stockholm Vatten.

WfInit;

% Core system

% *****

% Air emissions

zAirEmCore = [%32

zAirEmSp; zAirEmGuSp; zAirEmGuSpMBR; zAirEmIc; zAirEmRTLf; zAirEmSTLf; zAirEmFuelSg2;
zAirEmFuelSg6; zAirEmFuelSg8; zAirEmFuelSgCp; zAirEmSg2; zAirEmSg6; zAirEmSg8; zAirEmSgCp;
zAirEmSo2; zAirEmSo6; zAirEmSo8; zAirEmSoCp; zAirEmCo1; zAirEmCo2; zAirEmGasCp;
zAirEmDieselCp; zAirEmTT1; zAirEmTT2; zAirEmTT3; zAirEmTT4; zAirEmTT5; zAirEmTT6;
zAirEmTT7; zAirEmTT8; zAirEmTT9; zAirEmUrineStore];

% Water emissions

zWaterEmCore = [%11

zWaterEmSp; zWaterEmSpMBR; zWaterEmIc; zWaterEmRTLf; zWaterEmSTLf; zWaterEmSo2;
zWaterEmSo6; zWaterEmSo8; zWaterEmSoCp; zWaterEmCleanSw; zWaterEmSw];

% Upstream system

% *****

% Air emissions

zAirEmUS = [%11

zemAirUpco'; zemAirUptf'; zemAirUpsg'; zemAirUpcp'; zemAirUpshm';
zemAirUpic'; zemAirUpgu'; zemAirUplf'; zemAirUpMBR'; zemAirUpshp';];

% Water emissions

zWaterEmUS = [%11

zemWaterUpco'; zemWaterUptf'; zemWaterUpsg'; zemWaterUpcp'; zemWaterUpshm';
zemWaterUpic'; zemWaterUpgu'; zemWaterUplf'; zemWaterUpMBR'; zemWaterUpshp'; zemWaterUpshw';];

% Compensatory system

% *****

% Air emissions

zAirEmCS = [%6

zEmAirXsHe; zEmAirXsEl; zEmAirXsVeh; zEmAirXsN; zEmAirXsP; zEmAirXsK];

% water emissions

zWaterEmCS = [%6

zEmWaterXsHe; zEmWaterXsEl; zEmWaterXsVeh; zEmWaterXsN; zEmWaterXsP; zEmWaterXsK];

% GOLBAL WARMING POTENTIAL, 100 years

% *****

% Core system

zGWP100Core = zAirEmCore*wfGWP100;

% Upstream system

zGWP100US = zAirEmUS*wfGWP100;

% Compensatory system, excluding Core and US system

zGWP100CS = zAirEmCS*wfGWP100;

% ACIDIFICATION

% *****

% Acidification MAX

% Core system

```

zAcidMaxCore = zAirEmCore*wfAcidMax;
% Upstream system
zAcidMaxUS = zAirEmUS*wfAcidMax;
% Compensatory system
zAcidMaxCS = zAirEmCS*wfAcidMax;

% Acidification MIN
% Core system
zAcidMinCore = zAirEmCore*wfAcidMin;
% Upstream system
zAcidMinUS = zAirEmUS*wfAcidMin;
% Compensatory system
zAcidMinCS = zAirEmCS*wfAcidMin;

%EUTROPHICATION
% *****
% Eutrophication MAX
% Core system
% Air emissions
zEutrMaxAirCore = zAirEmCore*wfEutrMaxAir;
% Water emissions
zEutrMaxWaterCore = zWaterEmCore*wfEutrMaxWater;

% Upstream system
% Air emissions
zEutrMaxAirUS = zAirEmUS*wfEutrMaxAir;
% Water emissions
zEutrMaxWaterUS = zWaterEmUS*wfEutrMaxWater;

% Compensatory system
% Air emissions
zEutrMaxAirCS = zAirEmCS*wfEutrMaxAir;
% Water emissions
zEutrMaxWaterCS = zWaterEmCS*wfEutrMaxWater;

% Turning of matrices
% -----
% Core system
% Air emissions
for i = 1:32
    k = ScenarioNr*(i-1);
    for j = 1:ScenarioNr
        GWP100Core(i,j) = zGWP100Core(j+k,1);
        AcidMaxCore(i,j) = zAcidMaxCore(j+k,1);
        EutrMaxAirCore(i,j) = zEutrMaxAirCore(j+k,1);
    end
end

% Water emissions
for i = 1:11
    k = ScenarioNr*(i-1);
    for j = 1:ScenarioNr
        EutrMaxWaterCore(i,j) = zEutrMaxWaterCore(j+k,1);
    end
end

```



```

% Upstream system
% Air emissions
for i = 1:11
    k = ScenarioNr*(i-1);
    for j = 1:ScenarioNr
        GWP100US(i,j) = zGWP100US(j+k,1);
        AcidMaxUS(i,j) = zAcidMaxUS(j+k,1);
        EutrMaxAirUS(i,j) = zEutrMaxAirUS(j+k,1);
        EutrMaxWaterUS(i,j) = zEutrMaxWaterUS(j+k,1);
    end
end

% Water emissions
for i = 1:11
    k = ScenarioNr*(i-1);
    for j = 1:ScenarioNr
        EutrMaxWaterUS(i,j) = zEutrMaxWaterUS(j+k,1);
    end
end

% Compensatory system
for i = 1:6
    k = ScenarioNr*(i-1);
    for j = 1:ScenarioNr
        GWP100CS(i,j) = zGWP100CS(j+k,1);
        AcidMaxCS(i,j) = zAcidMaxCS(j+k,1);
        EutrMaxAirCS(i,j) = zEutrMaxAirCS(j+k,1);
        EutrMaxWaterCS(i,j) = zEutrMaxWaterCS(j+k,1);
    end
end
% ----- END OF FILE -----

```