

Exergianalys som verktyg inom VA-tekniken

*Jörgen Hanæus
Annelie Hedström
Daniel Hellström
Magnus Bäckström*



VA-Forsk

VA-Forsk är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet. FoU-avgiften är för närvarande 1,05 kronor per kommuninnevånare och år. Avgiften är frivillig. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

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

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvattenrening
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

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

Ola Burström, ordförande
Roger Bergström
Bengt Göran Hellström
Staffan Holmberg
Pär Jönsson
Peeter Maripuu
Stefan Marklund
Peter Stahre
Jan Söderström

Skellefteå
Svenskt Vatten AB
Stockholm Vatten AB
Haninge
Östersund
Vaxholm
Luleå
VA-verket Malmö
Sv kommunförbundet

Asle Aasen, adjungerad
Thomas Hellström, sekreterare

NORVAR, Norge
Svenskt Vatten AB

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

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

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Exergianalys som verktyg inom VA-tekniken
Title of the report:	Exergy analysis – an evaluation method of water and wastewater systems
Rapportens beteckning Nr i VA-Forsk-serien:	2003-20
ISSN-nummer:	1102-5638
ISBN-nummer:	91-89182-84-7
Författare:	Jörgen Hanæus, Annelie Hedström, Daniel Hellström, Magnus Bäckström, Luleå tekniska universitet
VA-Forsk projekt nr:	97-144
Projektets namn:	Exergianalys – bedömning av resursanvändning vid hantering och behandling av avloppsvatten, slam och urin
Projektets finansiering:	VA-Forsk
Rapportens omfattning Sidantal:	51
Format:	A4
Sökord:	Exergi, VA-teknik, naturresurser, kväve, diken, urinsortering
Keywords:	Exergy analysis, sanitary engineering, nitrogen, swale, urine separation
Sammandrag:	Exergianalys är ett värderingssätt som ger ett mått på förbrukning av ordnade strukturer och kan ses som ett komplement till ekonomiska analyser. Exergianalysen kräver en klar avgränsning av det system som ska utvärderas. I denna rapport ges tre exempel på hur exergikalkyler kan nyttjas i VA-sammanhang. Slutligen diskuteras exergikalkylernas begränsningar och möjligheter.
Abstract:	An exergy analysis is a method to evaluate processes and systems from a thermodynamical point of view and represent an important complement to economic analysis. Exergy analysis demands a sharp definition of the system being calculated. This report focuses on three different ways of making use of exergy analysis in order to evaluate strategies within sanitary engineering. Limitations and potentially interesting situations for exergy analysis in sanitary engineering is also discussed.
Målgrupper:	VA-planerare, VA-chefer, tekniska chefer, miljöchefer
Omslagsbild:	Potentialskillnad, foto Ravi Kappel
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2003
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Sammanfattning

Exergianalys är ett värderingssätt som utgående från termodynamikens huvudsatser ger mått på hur vi hanterar molekylär ordning, dvs. i vilket omfattning vi förbrukar de ordnade strukturer som solenergin möjliggör. Exergianalysen kan därför komplettera den ekonomiska analysen, som har begränsad framgång när det gäller att värdera påfrestningar på ekosystemen i långsiktiga och globala perspektiv.

Arbets sättet kräver en klar avgränsning av det system som ska utsättas för beräkningar.

Rapporten visar på möjligheter att använda exergikalkyler för att jämföra olika handlingsalternativ inom VA-områden. Tre olika studier har genomförts på skilda teman men alla med stark VA-anknytning.

I den första studien undersöks effektiviteten hos påtagligt olika avloppssystem med avseende på deras hantering av näring. Exergiåtgången i några viktiga faser av behandlingen beräknas och jämförs.

Den andra studien jämför humanurin med andra gödselmedel för grödor där kvävegödning är intressant. Exergianalysen svarar även på vilka delsteg i gödslingsprocessen som är mest exergikrävande.

I den tredje studien ställs en dikessträcka för dagvattenavledning mot en ledningssträcka och exergiförbrukningen under tänkt livslängd beräknas för båda alternativen. Även de olika momenten anläggning, drift och underhåll beräknas. Som jämförelse görs en traditionell kostnadsanalys av de olika systemen och även här studeras de olika momenten.

Avslutningsvis diskuteras några av kalkylens begränsningar samt några potentiellt intressanta situationer där exergiberäkningar bidrar till ett förbättrat beslutsunderlag.

Summary

An exergy analysis is a method to evaluate processes and systems from a thermodynamical point of view. The exergy analysis informs us about the magnitude of the disorder that we accomplish by different activities. Solar radiation on the other hand contributes to the (molecular) order.

By analysing disorder, the exergy analysis may represent an important complement to the traditional economic analysis, which has shown limited success in evaluating e. g. stress on our ecosystems or global environmental problems.

The use of exergy analysis demands a sharp definition of the system being calculated implying that boarder conditions are of great importance.

This report concentrates on different ways of making use of the exergy analysis in order to evaluate different strategies within sanitary engineering. Three different studies have been carried out on different themes, all with strong connection to sanitary engineering.

In the first study, the efficiency of different wastewater handling systems when it comes to utilisation of nutrients has been evaluated. The exergy consumption of some important steps has been calculated and comparisons have been made.

Comparison of the consumption of resources at the use of different nitrogen fertilisers, one of which was human urine, has been done by the use of exergy analysis. Several subsequent operations were included in the calculation.

In the third study a swale to convey storm water was compared to a pipe for similar use. A life length was assessed and calculations were done for construction, operation and maintenance.

A traditional cost analysis was also carried out for the alternatives.

Finally limitations in the method as well as potentially interesting situations for exergy calculations in sanitary engineering were discussed.

Förord

Föreliggande rapport utgör en sammanställning av arbete kring exergibegreppets användbarhet för frågeställningar inom VA-området. Arbetet har utförts inom forskarutbildningen vid avdelningen för VA-teknik, Luleå tekniska universitet.

Medverkande har varit Jörgen Hanæus, Daniel Hellström, Magnus Bäckström, Annelie Hedström och Maria Viklander. Huvuddelen av den slutliga sammanställningen har utförts av Jörgen Hanæus och Annelie Hedström.

Det samlade arbetet har bedrivits under perioden 1997–2001 och finansierats av VA-Forsk, Byggforskningsrådet och Luleå tekniska universitet.

Följande artiklar utgör kärnan i denna rapport:

Daniel Hellström (1998). Exergy Analysis: A Comparison of Various Treatment Alternatives for Nutrient Removal. Proc. of the 8th Gothenburg Symposium 1998, September 1998, Prague, pp 313–324.

Annelie Hedström, Daniel Hellström & Lars Ericson (2000). A comparison of human urine, commercial fertilizer and green manure crops as nitrogen fertilizers – an exergy analysis. In: "Adsorption and reclamation of wastewater nitrogen and the value of human urine as a nitrogen fertiliser". Licentiatavhandling 2000:17.

Magnus Bäckström, Daniel Hellström & Maria Viklander (1999). Resources utilization analysis: A comparison of different stormwater transport systems. In: Proceedings of the 8th International Conference on Urban Stormwater Drainage. Joliffe, I. B. and Ball J. E (Eds), pp 1327–1334.

Ytterligare publikationer från avdelningen för VA-teknik, LTU, avseende exergianalys av VA-tekniska problem:

Daniel Hellström (1997). An exergy analysis for a wastewater treatment plant – an estimation of the consumption of physical resources. Water Environment Research, Vol. 69, No 1, pp 44–51.

Daniel Hellström & Erik Kärrman (1997). Exergy analysis and nutrient flows of various sewerage systems. Water Science and Technology, Vol. 35, No 9, pp 135–144.

Magnus Sundelin (1998). Exergianalys av ekobyen Understenshöjden. Examensarbete 1998:127 CIV, Avd för VA-teknik, Luleå tekniska universitet.

Luleå Mars 2002

Jörgen Hanæus

Annelie Hedström

Daniel Hellström

Magnus Bäckström

Innehållsförteckning

BIBLIOGRAFISK SIDA
SAMMANFATTNING
SUMMARY
FÖRORD

1	BAKGRUND	1
2	EXERGIBEGREPPET	3
3	JÄMFÖRELSE AV SEX OLIKA AVLOPPSYSTEM.....	9
3.1	MÅL OCH AVGRÄNSNINGAR	9
3.2	BESKRIVNING AV DE OLIKA SYSTEMALTERNATIVEN	9
3.3	METODDISKUSSION FÖR EXERGIANALYS.....	10
3.4	RESULTAT.....	14
3.5	DISKUSSION	16
3.6	SLUTSATSER	16
3.7	REFERENSER	16
4	JÄMFÖRELSE MELLAN HUMANURIN OCH ANDRA GÖDSELMEDEL FÖR KVÄVEGÖDNING.....	20
4.1	SYFTE	20
4.2	SYSTEMBESKRIVNING OCH FÖRUTSÄTTNINGAR	20
4.3	GÖDSELALTERNATIV	21
4.4	EXERGIANALYS.....	22
4.5	RESULTAT OCH DISKUSSION.....	26
4.6	SLUTSATSER	32
4.7	METODDISKUSSION AV EXERGIANALYSEN	33
4.8	REFERENSER	33
5	EXERGI- OCH KOSTNADSANALYS AVSEENDE TVÅ OLIKA TRANSPORTSYSTEM FÖR DAGVATTEN	36
5.1	INTRODUKTION	36
5.2	METODIK	36
5.3	BESKRIVNING AV SYSTEMALTERNATIVEN.....	37
5.4	EXERGIANALYS.....	38
5.5	KOSTNADSANALYS	40
5.6	DISKUSSION	42
5.7	SLUTSATSER	42
5.8	REFERENSER	42
6	SAMMANFATTANDE SYNPUNKTER.....	45

1 Bakgrund

I VA-verksamheter liksom i andra samhällsaktiviteter ställs man ofta inför att värdera handlingsalternativ. Den verktygslåda som står till förfogande för värderingsarbete innehåller som flitigast använda verktyg den ekonomiska kalkylen. Andra värderingsverktyg kan utgöras av riskbedömningar (i VA-branschen ofta hygieniska risker), myndighetsdirektiv eller avvägningar av vad som är genomförbart från en politisk synpunkt.

Många beslut i VA-verksamheterna tas med uttalad avsikt att samverka med naturen så väl som möjligt. Den ekonomiska kalkylen visar här begränsningar då människors transaktioner på en marknad inte nödvändigtvis svarar mot påfrestningarna på ekosystemen; särskilt inte ur ett långsiktigt eller globalt perspektiv. De många konfliktpunkter som härigenom uppstått har inom ekonomiämnet fått återverkningar, t.ex. genom snabb utveckling av grenen miljöekonomi (Brännlund & Kriström, 1998).

Ekonomisystemets ofullkomlighet i dessa avseenden har ökat intresset för alternativa värderingsmetoder, där påverkan på omgivande natur värderas från andra utgångspunkter än de ekonomiska. Metoder som på senare tid väckt uppmärksamhet är exergi- och emergianalyser (Wall, 1977; Delin, 1985; Björklund, 2000). En grov beskrivning: Dessa metoder kan sägas värdera ordningen i uppbyggda strukturer (där växtsamhället via fotosyntesen består med den dominerande delen; alltså upptag och strukturerande av solenergi).

Emergianalysen (från begreppen energy memory) utgår från en successiv uppbyggnad av strukturer med allt högre ordning och den struktur som ska beräknas härleds tillbaka till den solenergi som skapat densamma. Särskilt intresse ägnas övergångarna mellan olika strukturer (t.ex. från sol till vind eller till växter) och därtill hörande omvandlingsfaktorer (transformiteter). Bärande ideolog anses vara H T Odum och svenska avhandlingar med VA-inslag som tillämpar emergibegreppet har framlagts av Geber (2000) och Björklund (2000). Emergin anges ofta i sej (solar emjoules).

Exergianalysen tar, med utgångspunkt i termodynamikens två huvudsatser, främst fasta på förskingringen av molekylär ordning; dvs fokuserar på vår förmåga att hushålla med ordnade resurser.

Den fortsatta rapporten begränsar sig till att handla om exergibegreppet. Flera svenska arbeten kring exergifrågor finns, förutom ovannämnda kan t.ex. Sörlin et al (1992) nämnas.

Referenser

- Björklund, J. (2000). Emergy Analysis to Assess Ecological Sustainability. Dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Agraria 245.
- Brännlund, R. & Kriström, B. (1998). Miljöekonomi. Studentlitteratur, Lund.
- Delin, S. (1985). Naturens teknik och människans. 2 uppl., LT:s förlag, Stockholm.

Geber, U. (2000). Integration of wastewater treatment in agro-ecosystems. Dep of Ecology and Crop production science. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.

Sörlin, S. (ed) (Abrahamsson, Hällgren, Sundström, Sörlin) (1992). Humanekologi. Carlssons förlag, Stockholm. ISBN 91 7798 642 3.

Wall, G. (1977). Exergy – a useful concept within resource accounting. Report no. 77-2, Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology.

2 Exergibegreppet

Exergi är alltså ett mått på fysiska resurser och kan definieras som det maximala arbete som kan utvinnas ur ett materie- eller värme flöde innan det kommer i jämvikt med en omgivande referensnivå. Exergi relateras till energi via flera begrepp såsom energikvalitet, tillgänglig energi, användbar energi eller essergi (the essence of energy). Exergivärden anges med samma enheter som energi, t.ex. kWh.

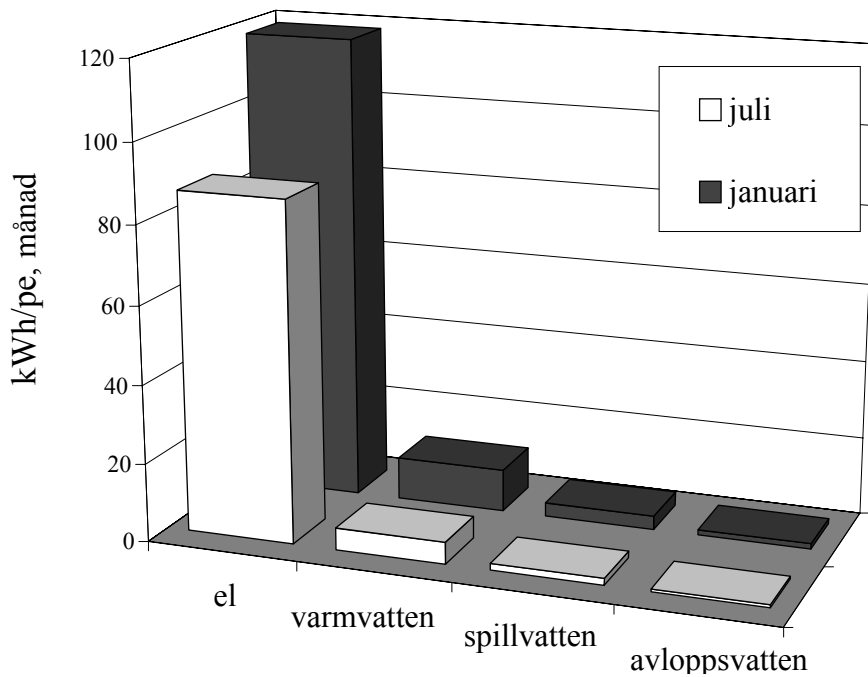
För att ge en enkel bild av relationen mellan energi och exergi kan vi jämföra med pengar. Att använda sedlar utan att beakta deras värden skulle orsaka förvirring och uppståndelse. När detta sker i energisammanhang är det emellertid få som blir förvirrade och uppståndelsen är måttlig. Ofta blandar man kilowattimmar av diverse olika slag utan att beakta att deras värde kan variera. Detta beror på att de fysikaliska begrepp som finns för att beskriva värdet av ett visst energiflöde inte tillämpas i någon nämnvärd utsträckning. Sålunda uppfattas sådana begrepp som diffusa och är relativt okända för de allra flesta. En förklaring kan vara att det är lättare att ta till sig termodynamikens första lag som talar om att energin är oförstörbar, än att greppa den andra lagen som talar om att oordningen ökar vad man än företar sig. Dels kan det kännas oegentligt att mäta oordning (entropi) och dels kan man lätt få för sig att det är lika bra att sitta still – vilket inte är så upplyftande. Å andra sidan beskriver termodynamikens andra lag sådant som vi upplever dagligen. Ett tydligt exempel är den bensin som förbrukas då vi använder den för att driva våra fordon. När bensinen är slut finns energin kvar – men till stor del i form av värme (varma avgaser mm) och dess kvalitet, ordning, är förbrukad. Vår erfarenhet säger oss också att ordnade strukturer inte uppstår slumpartat; tvärtom är vi vana vid att glas krossas och att kläder skrynklas och smutsas ner.

Ett sätt att mäta denna förbrukning av ordning eller energikvalitet är att använda sig av exergibegreppet. Exergi kan något förenklat definieras som den ”användbara” delen av energin, dvs maximalt uttagbart arbete. Exergi blir således ett mått på energins kvalitet (dess användbarhet), vilket beror på dess ordning och kontrast till omgivningen. Det förhåller sig alltså så, att olika energiformer med lika energiinnehåll kan ha vitt skilda innehåll av exergi. För t.ex. en elradiator som värmer ett rum blir all elenergi till värme (verkningsgrad 100 %), men den högkvalitativa elenergin omvandlas till lågkvalitativ rumsvärme, varför exergiverkningsgraden blir ca 5 %. En jämförelse av exergiinnehåll i olika energiformer visas i tabell 2-1.

Tabell 2-1. Olika energiformer efter avtagande kvalitet vid en omgivningstemperatur av ungefär + 20 °C (Wall,1986).

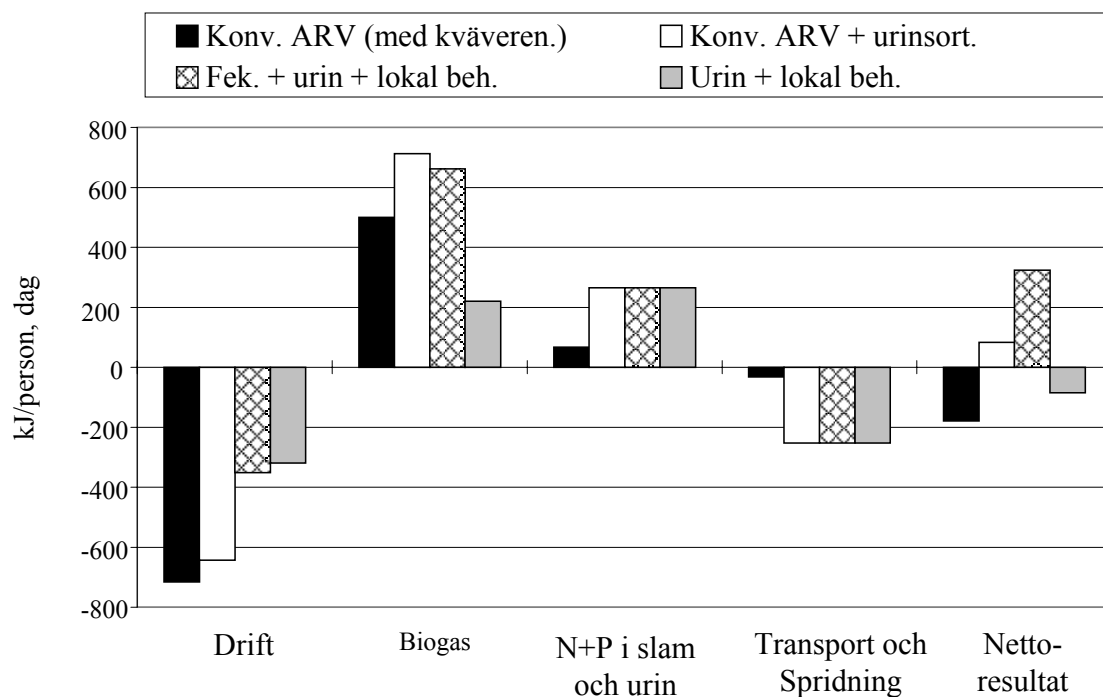
Energiform	Exergi/Energi (%)
Lägesenergi	100
Rörelseenergi	100
Elektrisk energi	100
Kemisk energi	ca 100
Kärnenergi	ca 95
Solljus	93
Het ånga	ca 60
Fjärrvärme	ca 30
Spillvärme	5
Värmestrålning från jorden	0

Ett exempel på vad som kan hämtas ur en exergikalkyl, visas i figur 2-1. Här demonstreras hur exergin, energins kvalitet, förbrukas då el används för att värma upp vatten samt när varmt och kallt vatten blandas. Figuren är hämtad från en exergianalys för området Bergsjön i Göteborg (Hellström, 1998), men använda data är tämligen generella. För att illustrera att det framförallt är kvalitén som förbrukas så har det antagits att energiförlusterna är försumbara. Förbrukningen består således i att ordningen på energin förstörs samt att man jämnar ut kontrasterna gentemot omgivningen, bland annat beroende på att temperaturen sjunker då kallare vatten blandas in. Figuren illustrerar dels att uppvärmning medelst el medför stora exergiförluster genom att den energi som finns i vattnet tappar kvalitet ju närmare avloppsreningsverket man kommer. Även om energimängderna i form av värme kan vara betydande när vattnet når reningsverket så finns endast en knapp procent av den ursprungliga exergin kvar. Ur värmeåtervinnings-synpunkt är det därför önskvärt att ta tillvara värmen så tidigt som möjligt i systemet. Allra viktigast är emellertid att energikällor av sämre kvalitet, exempelvis fjärrvärme, används för att värma upp varmvattnet.



Figur 2-1. Exergi i el, varmvatten, spillvatten när det lämnar fastigheten samt i avloppsvattnet strax innan det når reningsverket. *Avloppsvatten avser det blandade flödet i nätet; alltså inkl påkopplat dagvatten och inläckage.

Exergianalys ger en uppfattning om hur resursanvändningen ser ut för olika system. Sådana analyser är viktiga eftersom låg resursförbrukning anses vara ett av kriterierna för en hållbar utveckling. Resultatet av en studie av olika tänkta system för en stad med ca 100 000 invånare redovisas i figur 2-2. De antagande som har gjorts bygger i korthet på att stadens omland har en för Sverige genomsnittlig andel jordbruksareal samt att mängden urin och slam som tillförs åkermarken styrs av de genomsnittliga kväve- och fosforgivorna som används inom det svenska lantbruket. Vidare antas att de källsorterande systemen fungerar väl samt att de är uppbyggda av kända och helt eller delvis beprövade komponenter. Resultat visar att de källsorterande alternativen klarar sig bra vid en jämförelse med de konventionella alternativen. Det är emellertid viktigt att exergin i det organiska materialet kan nyttiggöras.



Figur 2-2. Exergianvändning för olika system för en tänkt stad med ca 100 000 pe. Nettoresultatet utgörs av differensen mellan förbrukning för drift (inkl. transporter och spridning) och exergin i gas, slam och urin.

Användning av exergibegreppet ger således dels en möjlighet att jämföra resursförbrukningen för olika system och tillför dels ett kraftfullt verktyg för att upptäcka var i systemen den största misshushållningen sker.

Väsentlig skillnad mellan energi och exergi är att energi inte går förlorad, utan endast omvandlas, medan exergi förbrukas tills termodynamisk jämvikt med omgivningen (referensnivån) är nådd.

Det är alltså viktigt att tydligt definiera det system inom vilket man beräknar exergiförändringen och att motivera valda referensnivåer. Detta är inte alltid enkelt. Jordklotet strålar till exempel ut värme till omgivande rymd som en svart kropp med en strålningstemperatur av ca 250 °K. Det är en förhållandevis lättfattlig referensnivå för globala värmerörelser. Ett annat exempel, såsom den lokala referensnivån vid fosforutnyttjande; alltså en omgivande fosforkoncentration, illustrerar något som är betydligt svårare att definiera.

Mer omfattande resonemang kring definitionen av exergibegreppet återfinns t.ex. hos Evans (1969) och Wall (1977).

Vanliga beräkningsformler för exergi, härledda ur de termodynamiska lagarna, framgår av tabell 2-2.

Tabell 2-2. Samband mellan energi, materia, kontrast och information utgörande användbara formler vid exergikalkyler. Från Delin (1985) (kompletterad).

$E = \Delta H - T\Delta S$	(för beräkning av kemiskt arbete)
$E = RT \ln C_2/C_1$	(för beräkning av koncentrationsarbete)
$E = n_m (\mu - \mu^\circ + RT \ln C/C_0)$	(dito relativt ämnens standardpotential)
$E = -nFU$	(för beräkning av elektriskt arbete)
$E = hf_1 - hf_2$	(för beräkning av ljusets arbetsförmåga)
$E = k I T \ln 2$	(samband mellan arbetsförmåga och information)
där:	
E = exergin mätt i Joule per mol	
H = entalpin eller energiinnehållet vid konstant tryck	
T = temperaturen mätt i °Kelvin	
S = entropin mått i Joule per mol och grad	
R = allmänna gaskonstanten, 8,314 Joule per mol och °Kelvin	
C = koncentration (tex mol per liter)	
C_0 =koncentration i omgivningstillstånd (tex mol per liter)	
n_m = antalet mol	
μ° = kemisk potential för ett ämne i omgivningen relativt sitt referenstillstånd, Joule per mol	
μ = kemisk potential för ett ämne relativt sitt referenstillstånd, , Joule per mol	
n = antalet ekvivalenter per mol	
F = Faradays konstant, 96500 coulomb per ekvivalent	
U = elektromotorisk kraft mätt i volt	
h = Plancks konstant, $6,626 \cdot 10^{-34}$ kg per m ² och s	
f = ljusets frekvens	
k = Boltzmanns konstant, $1,381 \cdot 10^{-23}$ Joule per °Kelvin	
I = informationen mätt i bits (binary units)	
Δ = förändring av	

För flera ämnen, aktuella vid avloppsvattenbehandling, har standardexergivärden sammanställts av Hellström (1999), tabell 2-3.

Tabell 2-3. Standardvärden på kemisk exergi för olika kemikalier som används i avloppsvattenbehandling samt värden på relationen energi och exergi för metan, fossila bränslen och elektricitet (Hellström, 1999).

Ämne	Exergivärde	
Aluminiumklorid	445	kJ/mol
Aluminiumoxid	200	kJ/mol
Aluminiumsulfat	530	kJ/mol
Kalciumoxid	110	kJ/mol
Ferroklorid	198	kJ/mol
Ferriklorid	230	kJ/mol
Ferrosulfat	173	kJ/mol
Ferrisulfat	511	kJ/mol
Polymer	15,2	kJ/g
Elektricitet	1	kJ exergi/kJ energi
Fossilt bränsle	1	kJ exergi/kJ energi
Metangas	831,6	kJ/mol
Kväve	322,1	kJ/mol NH ₄ -N
Organiskt material	13,6	kJ/g COD
Fosfat	134,1	kJ/mol

Referenser:

Delin, S. (1985). Naturens teknik och människans. 2:a uppl. Stockholm, LT, ISBN: 91-36-02417-1.

Evans, R.B. (1969). A proof that essergy is the only consistent measure of potential work. Thesis, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire.

Hellström, D. (1998). Nutrient management in sewerage systems – Investigations of components and exergy analysis. Dissertation, Dep. of Environmental Engineering, div of Sanitary Engineering, Luleå University of Technology, 1998:2.

Hellström, D. (1999). Exergy analysis: A comparison of source separation systems and conventional treatment systems. Water Environment Research, Vol 71, No 7, pp 1354–1363.

Wall, G. (1977). Exergy – a useful concept within resource accounting. Report no. 77-42, Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology.

Wall, G. (1986). Exergy –a useful concept. Dissertation, Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology. ISBN 91-7032-269-4.

3 Jämförelse av sex olika avlopssystem

Det finns många sätt att minska utsläppet av näringsämnen från avlopssystem till omgivande vattenrecipienter. Den vanligaste strategin är att bygga avloppsverk och separera näringsämnen (Henze, 1995). En annan möjlighet är att använda källsorterande teknik och att minska mängden tvättmedel som innehåller fosfor.

Utgående från data publicerade av Naturvårdsverket (NV, 1995) är det ett rimligt antagande att åtminstone 90 % separation av kväve och fosfor vore möjlig om urin och fekalier samlades in för sig och inte släpptes till ett konventionellt avlopssystem. För att uppnå 90 % i fosforreduktion behöver dock även tvättmedelsanvändningen minskas (NV, 1995). Existerande teknik för att behandla och förflytta separata latrinkärl medför dock ett mödosamt och föga tilltalande arbete som i släptåg har hygieniska risker och luktproblem (Haglund & Olofsson, 1997, NV m.fl., 1996). Dock sker utveckling av nya system, som baseras på vakuumteknik och våtkompostering (Jenssen & Skjelhaugen, 1994, Norin, 1996).

En annan möjlighet är att kombinera urinsorteringsteknik med avancerad behandling. Urin svarar för ca 80 % av allt kväve och ca 50 % av all fosfor i normalt avloppsvatten (NV, 1995). En kombination av urinsortering vid källan och biologisk fosforreduktion i övrigt avloppsvatten skulle därför kunna ge en hög fosforavskiljning.

De svenska erfarenheterna av urinsortande system kan betecknas som försiktigt positiva; insamlingen av urin i separationstoiletter, transport och lagring av urin har kunnat genomföras i praktisk drift (Hanæus et al, 1997, Jönsson et al, 1997). Flera detaljfrågor återstår dock att lösa.

3.1 Mål och avgränsningar

Syftet med denna studie har varit att jämföra olika metoder för näringsavskiljning och att därvid använda exergianalys som metod vid jämförelsen.

3.2 Beskrivning av de olika systemalternativen

Studien omfattar endast system med fler än 50 000 personer anslutna. Skälet till detta är att energiutnyttjandet för att driva avloppsverk är relativt konstant för avloppsverk av sådan storlek (Balmér & Mattsson, 1993, WEF, 1997). Vidare blir rötning av slam praktiskt och ekonomiskt realiserbart i anläggningar med fler än ca 50 000 personer anslutna (WEF, 1997).

För de behandlingsalternativ som valts ut i denna studie krävdes en hög grad av fosforavskiljning (> 90 %) och en tämligen hög grad av kväveavskiljning (> 70 %). Ett annat kriterium var att ingående processer kunde betecknas som vanliga (Rusten et al, 1995; Ödegaard & Karlsson, 1994). Utöver detta analyserades system med källseparering av urin för att beskriva konsekvenserna av alternativ där all behandling inte skedde vid avloppsverk.

De system som utvaldes för exergianalys visas i tabell 3-1.

Tabell 3-1. Sex utvalda system för exergianalys.

1	<i>Fördenitrifikation i ett enslamsystem kombinerad med kemisk efterfällning för fosforavskiljning. Efterfällning föredras där avloppsvattnets innehåll av organiskt material utgör enda kolkälla (Ödegaard&Karlsson,1994).</i>
2	<i>Efterdenitrifikation i en aktiv-slamprocess (kan också gälla en process med dräkt biobädd (biofilm)). Fosfor avskiljs med kemisk förfällning. Extern kolkälla används till denitrifikationen. Huvudsaklig fördel med detta system är att erforderlig reaktorvolym blir liten (Ödegaard&Karlsson,1994). Dessutom är det möjligt att uppnå en högre kväveavskiljning jämfört med fördenitrifikation (Rusten et al, 1995; Ödegaard&Karlsson, 1994).</i>
3	<i>Förstärkt biologisk fosforreduktion (EBPR) i kombination med nitrifikation-(för-)denitrifikation. Som system 1 men kompletterad med en anaerob zon för att stimulera den biologiska fosforreduktionen.</i>
4	<i>Kväveavskiljning genom urinsortering (vid källan) kombinerad med förstärkt biologisk fosforreduktion (EBPR). Här reduceras även fosforinnehållet, dvs ett högre COD/P-värde kommer att uppnås.</i>
5a	<i>Kväveavskiljning genom urinsortering kombinerad med kemisk fällning av fosfor. Ungefär 80 % avskiljning av organiskt material har rapporterats från norska avloppsverk med kemisk fällning (Ödegaard&Karlsson, 1994). I situationer där avloppsvattnets sammansättning medger en hög avskiljning av organiskt material via kemisk fällning skulle därför den biologiska behandlingen kunna uteslutas utan att recipientkvaliteten hotades.</i>
5b	<i>Kväveavskiljning genom urinsortering kombinerad med kemisk fällning av fosfor samt ett biologiskt reningssteg för att avskilja organiskt material..</i>

3.3 Metoddiskussion för exergianalys

3.3.1 Allmänt

De flöden som beaktades i denna analys var de som berör behandlingen av organiskt material, kväve och fosfor. Studien omfattar endast driften av avloppsverken. Analysen innefattar enbart exergiinnehållet i de olika resurskomponenterna själva (kemikalier, elektricitet etc). Exergiåtgången för att producera dessa komponenter har inte inkluderats.

En beräkning av det totala exergibehovet för att driva ett avloppssystem bör även innehålla extern konsumtion som t.ex. uppstår vid framställningen av elektricitet och kemikalier. Resultatet blir då beroende av exergieffektiviteten i dessa sidosystem. Om dessa system är ineffektiva, kommer resultatet från deras infogande i kalkylen att göra bilden av avloppssystemet otydligare. Av detta skäl har nämnda bakgrundsberäkningar utesluts i denna studie.

För att illustrera skillnaden mellan olika behandlingsmetoder har enbart flöden som avsevärt avviker mellan de olika alternativen tagits i beaktande, såsom elektricitet för luftningen, tillsatt kemikaliemängd, tillsats av extern kolkälla och produktionen av metanogas.

Exergibehovet för att samla in, transportera och sprida urinen är inte försumbart. En genomförd uppskattning av exergiåtgången för dessa moment ger ungefär 0.25 MJ/p/d (MJ/person/dygn) om dagens urinseparationsteknik används i en stad med ca 100 000 invånare (Hellström, 1998). Denna siffra kan jämföras med den exergi som åtgår för att framställa handelsgödselmedel; den är ungefär 35 MJ/kg N (Böckman et al, 1990). Det innebär att exergivärdet av kvävet i urinen är omkring 0.35–0.40 MJ/p/d. Även med beaktande av kväveförluster under insamling och spridning av urin, blir värdet av kvävet av ungefär samma storlek som åtgången för transport och spridning. Alltså kan skillnaden mellan urinkvävets exergivärde och exergiåtgången för att hantera urinen sättas till noll.

Organiskt material, närsalter och behandlingskemikalier hanteras som individuella kemiska ämnen och exergin för dessa ämnen kan hämtas från standardvärden för kemisk exergi för olika kemiska substanser (Hellström, 1998; Szargut et al, 1988).

Data från denna analys kommer att hänföras till den exergimängd som åtgår för att behandla avloppsvatten från en person. Enligt Naturvårdsverket (NV, 1995) kan värdena 66.1 g BOD₇/d, 165 g COD/d, 13.3 g tot-N/d och 2.2 g tot-P/d användas för innehållet i denna avloppsvattenmängd.

3.3.2 Kemikalier för avloppsvattenbehandlingen

Kemikalieanvändningen har bestämts utgående från data för 16 större svenska avloppswerk från perioden 1994–95. De vanligaste fällningskemikalierna vid dessa verk var olika ferro- eller ferrisalter. Fyra verk använde dessutom mindre mängder aluminiumbase-rade fällningskemikalier. Endast ett av de 16 verken använde enbart aluminumsalt till fällningen. Medianen av exergiinnehållet i fällningskemikalierna för dessa verk, inklusive polymerer men exklusive extern kolkälla, var 25 kJ/p/d. Som jämförelse kan exergiåtgången för framställning och transport av kemikalierna uppskattas vara av samma storlek som exergiinnehållet i kemikalierna själva (Ödegaard & Karlsson, 1994). Vidare antas att kemikalieåtgången kan minskas med 20 % om urinsorterande toaletter användes.

3.3.3 Extern kolkälla

Genom att använda fördenitrifikation kan en tämligen hög biologisk kväveavskiljning åstadkommas utan att extern kolkälla behöver tillföras (Rusten et al, 1995; Ödegaard & Karlsson, 1994). Efterdenitrifikationen kräver däremot extern kolkälla. Om 70 % av allt kväve antas denitrifierat via extern kolkälla och vidare att åtgången är 1,08 mol metanol/mol nitrat blir exergiförbrukningen härför 0,50 MJ/p/d. Detta värde är nära överensstämmande med det exergibehov som beräknats utifrån mätdata från Klagshamns avloppswerk (Nyberg et al, 1992). Vid Klagshamnsverket erhöles omkring 90 % kväveavskiljning i ett enslamsystem med förfällning och efterdenitrifikation med metanoltillsats. Metanoltillsatsen uppgick till 1,82 g metanol/g N_{infl} eller 2,31 metanol/g NH₄-N_{inf}

(Nyberg et al, 1992). Metanolens standard exergiinnehåll är 22.4 kJ/g (Szargut et al, 1988). Sålunda åtgick 40 MJ/kg N_{inf} eller 0.56 MJ/p/d vid Klagshamns avloppsverk.

Aspegren (1995) utvärderade en högbelastad aktivslamprocess med avseende på biologisk fosforreduktion. Det föreföll möjligt att uppnå en tillfredsställande fosforavskiljning utan tillsats av extern kolkälla eller fällningskemikalie även då rejektet från slambehandlingen (som inkluderade rötning) recirkulerades åter till vattenbehandlingsdelen (Aspegren, 1995). Emellertid kommer fosforbelastningen på det biologiska behandlingssteget att underhand öka åtskilligt om rejektet återförs utan behandling och sannolikt kommer därvid ett behov av kolkälla att uppstå för den biologiska fosforreduktionen.

En litteraturgenomgång visade att fosforupptag av poly-P-organismer inträffar i anoxiska zoner i näringsseparerande system, alltså denitrifikation och fosforupptag parallellt (Barker & Dold, 1996). Att EBPR-slammen har förmåga till samtidig denitrifikation och fosforupptag har framgått av flera experiment (Carlsson, 1996; Carlsson et al 1997). Nitrat kan alltså nyttjas som elektronacceptor av de fosforseparerande bakterierna varvid mängden nödvändig kolkälla reduceras. Dock finns indikationer på att inte alla poly-P-organismer har denna förmåga (Barker & Dold, 1996).

Sammanfattningsvis är det alltså svårt att väl definiera behovet av extern kolkälla för processer sammansatta av biologisk kvävereduktion och förstärkt biologisk fosforreduktion. I denna analys antas att 20 % av den biologiska fosforreduktionen och 20 % av denitrifikationen åstadkoms genom tillsats av extern kolkälla. Utgående från data presenterade av Jönsson et. al. (1996) har värdet 15 g COD/g P_{rem} använts.

3.3.4 Luftning

Exergibehovet för luftning är starkt beroende av vilken utrustning som används och elektricitetsbehovet varierar kraftigt mellan olika anläggningar (WEF, 1997). Denna variation slår också igenom när det gäller att hitta pålitliga data för exergianalysen. Ødegaard och Karlsson (1994) använde värdet 3.6 MJ/kg BOD_{rem} , van Loosdrecht et. al. (1997) föredrog 2.3 MJ/kg O_2 och WEF (1997) nyttjade 0.51 MJ/m³ för aktivslamanläggningar. Enligt WEF (1997) står luftningen för ungefär 40–45 % av den totala elförbrukningen vid avancerade avloppsverk utan nitrifikation. Om detta värde tillämpas på svenska förhållanden blir exergiåtgången, baserad på data från Hellström (1998), ungefär 0.20 MJ/p/d eller 3.0 MJ/kg $BOD_{7, influent}$. Data från WEF (1997) och Hellström (1998) leder alltså till att ett värde av storleken 5–6 MJ/kg BOD_{rem} kan användas. För den här aktuella analysen har värdet 5 MJ/kg BOD_{rem} valts.

För att beräkna syreförbrukningen för nitrifikationsprocessen har värdet 4,57 g O_2 /g $N_{nitrified}$ använts (van Loosdrecht et al, 1997). För processer som utnyttjar fördenitrifikation kommer syrebesparingen att bli 2,86 mg O_2 /mg NO_3-N_{red} (van Loosdrecht et al, 1997). Om 80 % av nitraten recirkuleras och används för att oxidera organiskt material, kommer ca 50 % av syret att kunna sparas. I efterdenitrifikationsprocessen kan nitraten utnyttjas för att oxidera den tillsatta kolkällan.

WEF (1997) har använt värdet 0,33 MJ/m³ för biologisk nitrifikation. Vid antagande om ett kväveinnehåll i inkommande avloppsvatten av 25 g NH_4-N /m³ och att fullständig

nitrifikation uppnås, svarar detta värde mot en elförbrukning av 13 MJ/kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{nitrified}}$. Enligt Ødegaard och Karlsson (1994) kan värden om 14–15 MJ/kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{nitrified}}$ användas för nitrifikationsprocessen. I här presenterade kalkyler kommer en exergiförbrukning av 12 MJ/kg N_{inf} att användas för efterdenitrifikationsprocesser och 6 MJ/kg N_{inf} för för-denitrifikationsprocesser.

Vidare framgår att det är en diskrepans mellan syrebehoven för nedbrytning av organiskt material samt denitrifikation. Det indikerar att exergibehovet för nedbrytning av organiskt material kan ha överskattats eller att exergibehovet för nitrifikation är underskattat. Ett tredje alternativ är att syreöverföringen vid nitrifikationsprocesser är mer effektiv. De data som används i föreliggande analys kommer inte att revideras med hänsyn till diskrepansen utan de ovan presenterade värdena användes.

3.3.5 Metanproduktion

Producerad mängd metan bestäms av flödet av organiskt material till rötkammaren och utnyttjande graden härav, som i sin tur bestäms av faktorer som typ av substrat, temperatur och uppehållstid (Metcalf & Eddy, 1991).

Beräkningarna i denna analys har förenklats genom antagandet att substratutnyttjandet i rötkammaren är 50 %, oberoende av vattenbehandlingsprocess. Flödet av organiskt material bestäms av avloppsvattnets sammansättning, t.ex. andelen partikulärt organiskt material, och behandlingsprocessens uppbyggnad. Här har antagits att allt organiskt material som separerats vid kemisk fällning är tillgängligt för metanproduktion. Vad beträffar den biologiska behandlingen, måste beaktas att olika processer ger olika utbyte av slammet. Baserat på litteratordata har utbyteskoefficienter för olika fall beräknats, Tabell 3-2 (Metcalf & Eddy, 1991; Randall et al, 1992; Rusten et al, 1995; WEF och ASCE, 1992). Den viktigaste skillnaden mellan processerna representeras av slamåldern. En annan skillnad är substratets sammansättning. Om en extern kolkälla tillsätts, t.ex. metanol, kommer ett observerat utbyte att ges värdet 0,20 g COD/g COD_{added} (Rusten et al, 1995).

Jardin och Pöpel (1996) undersökte effekten av EBPR på överskottsslamproduktionen. De fann inga signifikanta effekter på den organiska slamproduktionen. Dock var produktionen av organiskt överskottsslam något högre i perioder med förhållandevis högt fosforinnehåll i aktivslammet. Mot den bakgrunden har här antagits att det observerade utbytet inte påverkas av EBPR-processen.

I denna analys har också antagits att ungefär 5 % av det organiska materialet, som COD, avskiljs i förbehandlingsstegen och att 90 % av det organiska materialet som tillförs de kemiska och biologiska reningsstegen antingen är direkt tillgängligt för gasproduktion eller indirekt tillgängligt via konvertering till cellsubstans.

85 % av det organiska materialet (som COD) kommer alltså att utnyttjas direkt eller indirekt i slamproduktionen som går till rötkammaren. I en behandlingsprocess utan biologiskt behandlingssteg, kommer endast 65 % av ingående COD att vara tillgängligt för metanproduktion (tabell 3-2).

Tabell 3-2. Utgångsdata för att bestämma flödet av organiskt material till rötkammaren.

Process		Andel COD _{infl} som utnyttjas i slamproduktion		Observerat utbyte	
		sedimente- ring/ kemisk fälln.	biologisk växt	g COD/ g COD _{rem}	g COD/ g NH ₄ -N
1	För-DN, efterfälln.	35	50	0.33	0.13
2	Efter-DN, förfälln.	65	20	0.33	0.13
3	EBPR, för-DN	35	50	0.33	0.13
4	EBPR + urinsort.	35	50	0.46	-
5a	CPR + urinsort.	65	-	-	-
5b	5a+AS	65	20	0.46	-

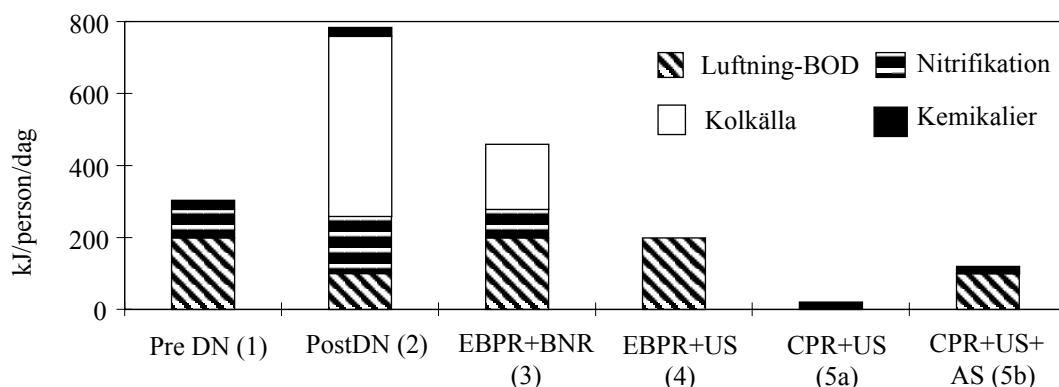
där AS = Aktivt slam, CPR = Kemisk fosforreduktion, DN = Denitrifikation.

3.4 Resultat

Exergiåtgången för luftning, fällningskemikalier och kolkälla visas i figur 3-1. Åtgången för nitrifikation har visats som ett tillskott; dvs återanvändandet av syre har beaktats. Av figur 3-1 framgår att exergiåtgången är högst för efterdenitrifikationsprocessen; huvudsakligen beroende på användandet av extern kolkälla. Den lägsta exergiåtgången noteras för processen som kombinerar urinsortering och kemisk fällning.

Figur 3-2 visar exergiinnehållet i producerad metan. Gasproduktionen är högst för de processer som använder förfällning och lägst för processer som använder fördenitrifikation.

Nettoresultaten för de olika processerna visas i figur 3-3. Nettoresultaten har beräknats som skillnaden mellan gasproduktion och den exergi som åtgår för luftning, extern kolkälla och fällningskemikalier. Systemen med urinsortering visar de högsta värdena medan de system som utnyttjar extern kolkälla ger minst skillnad mellan exergi från gasproduktion och förbrukad exergi. Det ska dock framhållas att nettoresultatet inte avser hela avloppsverket, utan de resursströmmar som angivits här.



Figur 3-1. Exergiåtgången för luftning, fällningskemikalie och kolkälla för de olika processerna. BNR = Biologisk kvävereduktion, CPR = Kemisk fosforreduktion, US = Urinsortering.

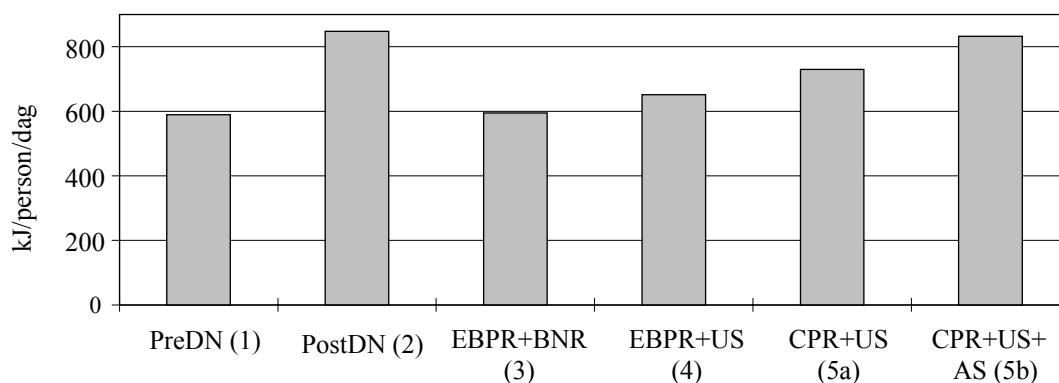


Fig. 3-2. Exergiinnehållet i det metan som produceras i de olika processerna.

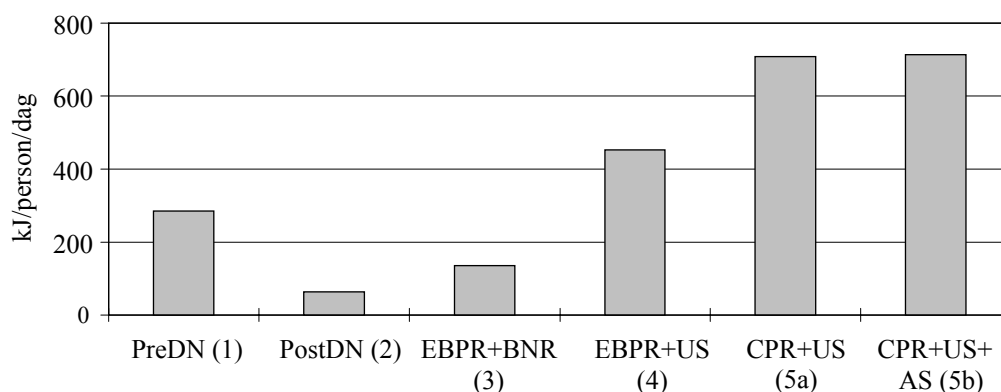


Fig. 3-3. Skillnader mellan extern kolkälla och fällningskemikalie för de olika processerna, dvs nettoresultatet.

3.5 Diskussion

I denna analys har hänsyn endast tagits till exergiförbrukningen för olika behandlingsalternativ. Om analysen ska utvidgas till långsiktig hållbarhet behöver även andra kriterier såsom arealutnyttjande, förnyelsebarheten hos använda resurser, emissioner samt möjligheterna att recirkulera näring via växtsamhället beaktas.

Exergianalysen kan alltså kritiseras för att inte ta hänsyn till huruvida exergiresurserna är förnyelsebara eller inte. Sålunda kommer användande av fällningskemikalier att innebära en förbrukning av icke-förnyelsebar resurs om inte metallsalterna recirkuleras.

Teknik för att återvinna fällningskemikalier finns (Göransson & Karlsson, 1994; Karlsson & Göransson, 1993), men har inte utvärderats med exergianalys. Inkluderandet av en sådan behandlingsteknik i analysen kommer sannolikt att påverka resultatet påtagligt. I ett sådant läge kommer troligen EBPR-processen med kväveseparering via urinsortering att framstå som ännu gynnsammare.

En annan fråga gäller existerande system contra nya. Att bygga helt nya system skulle innebära en stor exergikonsumtion. Dock är förhållandena mycket varierande i ett internationellt perspektiv, och på många ställen kan omfattande förnyelse av avloppsbehandlingen bedömas nödvändig (Niemczynowicz, 1992).

Även med ovannämnda förenklingar och begränsningar indikerar resultaten att urinsortering utgör ett intressant alternativ och att extern kolkälla bör undvikas från en exergikutgångspunkt. Kemisk fällning är ett intressant alternativ till biologisk fosforavskiljning, åtminstone om kravet på återanvändning av fällningskemikalien inte hävdas.

3.6 Slutsatser

Utgående från exergianalysen för drift av avloppsbehandlingen i de olika kalkylerade alternativen utgör urinsortering i kombination med kemisk fällning det gynnsammaste alternativet.

Där kväveavskiljning bedöms vara väsentlig visar resultaten att installation av urinsortande toaletter kan vara ett intressant alternativ till biologisk kväveseparation.

3.7 Referenser

Aspegren, H. (1995). Evaluation of a High Loaded Activated Sludge Process for Biological Phosphorus Removal., Department of Water and Environmental Engineering, Lund Institute of Technology/Lund University, Doctoral Dissertation, Report 1004.

Ayres, R. U. (1996). Statistical Measures of Unsustainability. *Ecol. Econ.*16, 239.

Azar, C., Holmberg, J., Lindgren, K. (1996). Socio-Ecological Indicators for Sustainability. *Ecol. Econ.*18, 89.

Balmér, P., Mattsson, B. (1993). Driftskostnader för Avloppsanläggningar. VA-Forsk rapport 1993-15.

Barker, P. S., Dold, P. L. (1996). Denitrification Behaviour in Biological Excess Phosphorus Removal Activated Sludge Systems. *Wat. Res.* 30, 769.

Bøckman, O. C., Kaarstad, O., Lie, O. H., Richards, I. (1990). Agriculture and fertilizers. Agricultural Group, Norsk Hydro AS, Oslo, Norway.

Carlsson, H. (1996). Biological Phosphorus Removal and Nitrogen Removal in a Single Sludge System, Department of Water and Environmental Engineering, Lund Institute of Technology/Lund University, Doctoral Dissertation, Report 1005.

Carlsson, H., Aspegren, H., Andersson, B., Hilmer, A. (1997). Nitrogen Removal in a Single Sludge EBPR Process. *Vatten* 53, 65.

Daly, H. E. (1990). Toward Some Operational Principles of Sustainable Development. *Ecol. Econ.* 2.

Göransson, J., Karlsson, I. (1994). Beneficial Use of Sludge from Sewage Plants and Water Works. In: *Chemical Water and Wastewater Treatment III*, R. Klute and H.H.

Hahn (Eds.). Springer, Berlin Heidelberg, pp. 341–352.

Haglund, J.-E., Olofsson, B. (1997). Utvärdering av VA-lösningar i ekobyar. VA-Forsk rapport 1997:1.

Hanæus, J., Hellström, D., Johansson, E. (1997). A Study of a Urine Separation System in an Ecological Village in Northern Sweden. *Wat. Sci. Tech.* 35, 153.

Hellström, D. (1998). Nutrient Management in Sewerage Systems – Investigations of Components and Exergy Analysis. Ph. D. Thesis, Dep. of Environmental Engineering, div. of Sanitary Engineering, Luleå University of Technology, Report 1998:2.

Henze M. (1995). Nutrient Removal from Wastewater. In: *New World Water 1995*, pp. 114–117.

Holmberg, J. (1995). Socio-Ecological Principles and Indicators for Sustainability. Dissertation, Institute of Physical Resource Theory, Chalmers University of Technology and Gothenburg University.

Jardin, N., Pöpel, H. J. (1996). Influence of the Enhanced Biological Phosphorus Removal on the Waste Activated Sludge Production, *Wat. Sci. Tech.*, 34, 17.

Jenssen, P. D., Skjelhaugen, O. J. (1994). Local Ecological Solutions for Wastewater and Organic Waste Treatment – a Total Concept for Optimum Reclamation and Recycling, In: *On-Site Wastewater Treatment – Proc. 7th Int. Symp. Individual and Small Community Sewage Systems*, Collins E. (Eds.). pp. 379–387.

Jönsson, H., Stenström, T.-A., Svensson, J., Sundin, A. (1997). Source Separated Urine – Nutrient and Heavy Metal Content, Water Saving and Faecal Contamination. *Wat. Sci. Tech.* 35, 145.

Jönsson, K., Johansson, P., Christensson, M., Lee, N., Lie, E. Welanders, T. (1996). Operational Factors Affecting Enhanced Biological Phosphorus Removal at the Wastewater Treatment Plant in Helsingborg, Sweden. *Wat. Sci. Tech.* 34, 67.

Karlsson, I., Göransson, J. (1993). Thermic Sludge Treatment. *Wat. Sci. Tech.* 27, 449.

van Loosdrecht, M. C. M., Kuba, T., van Veldhuizen, H. M., Brandse, F. A., Heijnen, J. J. (1997). Environmental Impacts of Nutrient Removal Processes: Case Study. *J. Environ. Engin.* 123, 33.

Metcalf & Eddy (1991). *Wastewater Engineering – Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd edition. Revised by Tchobanoglous G. and Burton F. L., McGraw-Hill, Inc.

Narodoslawsky, M., Krotscheck, C. (1995). The Sustainable Process Index (SPI): Evaluating Processes According to Environmental Compatibility. *J. Hazardous Materials* 41, 383.

Naturvårdsverket (1993). Vatten, avlopp och miljö. Naturvårdsverket, Rapport 4207.

Naturvårdsverket (1993). Renare slam – Åtgärder för kommunala avloppsreningsverk. Naturvårdsverket, rapport 4251.

Naturvårdsverket (1995). Stora avloppsreningsverk – Slam & avloppsvatten, aktuella förhållanden 1993. Naturvårdsverket, Rapport 4423.

Naturvårdsverket (1995). Vad innehåller avlopp från hushåll? Naturvårdsverket, Rapport 4425.

Naturvårdsverket (1997a). Fosfor – livsnödvändigt, ändligt och ett miljöproblem. Naturvårdsverket, Rapport 4730.

Naturvårdsverket (1997b). Nitrogen from Land to Sea. Swedish Environmental Protection Agency, report 4801.

Naturvårdsverket, Smittskyddsinstitutet, Socialstyrelsen (1996). Sjukdomsframkallande mikroorganismer i avloppssystem – Riskvärdering av traditionella och alternativa avloppslösningar. Naturvårdsverket rapport 4683.

Niemczynowicz, J. (1992). Water Management and Urban Development – a Call for Realistic Alternatives for the Future. *Impact of Science on Society* 166, 133.

Norin, E. (1996). Våtkompostering i ett lokalt kretsloppsbaserat behandlingssystem för toalett- och köksavfall. JTI-report ”Kretslopp & Avfall” no. 5.

Nyberg, U., Aspegren, H., Andersson, B., la Cour Jansen, J., Villadsen I. S. (1992). Full-Scale Application Nitrogen Removal with Methanol as Carbon Source. *Wat. Sci. Tech.* 26, 1077.

Randall, C. W., Barnard, J.L., Stensel, H.D. (1992). *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal*. Technomic Publishing Company, Inc.

Rosen, M. A., Dincer, I. (1997). On Exergy and Environmental Impact. *Int. J. Energy Res.* 21, 643.

Rusten, B., Hem, L. J., Ødegaard, H. (1995). Nitrogen Removal from Dilute Wastewater in Cold Climate Using Moving-Bed Biofilm Reactors. *Water Environ. Res.* 67, 65.

Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R. (1988). *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*. Springer, New York, N.Y.

Wall, G. (1977). Exergy – A Useful Concept within Resource Accounting. Report no. 77-42 Physical Resource Theory Group, Chalmers University of Technology, Sweden.

WCED (1987). *Our Common Future*. The World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, Oxford.

WEF and ASCE (1992). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, 2nd ed. WEF Manual of Practice No. 8, ASCE manual and report on engineering practice no. 76.

WEF (1997). *Energy Conservation in Wastewater Treatment Facilities*. WEF Manual of Practice No. FD-2.

Ødegaard, H., Karlsson, I. (1994). Chemical Wastewater Treatment – Value for Money. In: *Chemical Water and Wastewater Treatment III*, R. Klute and H.H. Hahn (Eds.). Springer, Berlin Heidelberg, pp. 191–209.

4 Jämförelse mellan humanurin och andra gödselmedel för kvävegödning

4.1 Syfte

Syftet med detta projekt var att utvärdera humanurin som kvävegödselmedel i jämförelse med kvävekonstgödsel och grüngödsel vid odling av höstvete. Utvärderingen av de olika alternativen gjordes med exergianalys. En uppskattning av kväveförlusterna för de olika kvävegödselalternativen genomfördes också.

En fallstudie valdes som metodik för denna studie eftersom studiens resultat är beroende på lokala förhållanden och antaganden. Målsättningen var att välja ett fall som skulle representera en så stor del av Sveriges population som möjligt. Systemgränsen för analysen inkluderade berörda delar av odlingssystemet men även delar av det konventionella avloppsbehandlingssystemet. Detta för att kväve- och fosforbelastningen förändras när humanurin nyttjas som gödselmedel.

4.2 Systembeskrivning och förutsättningar

Jordbruksområdet på Uppsalaslätten valdes som område för denna analys. Detta område valdes på grund av förhållandevis homogena produktionsförhållanden för jordbruket (t.ex. jordförhållanden, topografi och klimat) samt det korta avståndet till det tätbefolkade Stockholmsområdet.

I Uppsala län är styv lera den vanligaste förekommande jordtypen (64 %) vilken valdes för denna analys. Växtsäsongen börjar normalt omkring den 20:e april och varar 180–200 dagar (Välimaa 1998). Årsmedelnederbörden är 563 mm/år.

Det bor ungefär 289 000 invånare i Uppsala län och det finns omkring 1 500 km² åkermarkmark (betesmarken exkluderad) vilket motsvarar cirka 20 procent av Upplands area (SCB, 1998a; SCB, 1998b). Omkring 40 km från den centrala delen av Upplands län ligger Stockholmsområdet med cirka 1 744 000 invånare.

Denna analys fokuserade på odling av vintervete eftersom denna gröda är en av de viktigaste grödorna i denna region. Ett år av grüngödselgröda följs därtill ofta av vintervete vid ekologisk odling (Roemke, 2000, personlig kommentar). Från en hygienisk synvinkel rekommenderas också att odla säd som exempelvis vete när man gödslar med humanurin. I denna region sker sådden av vintervete i mitten av september och skördas i början av september året därpå (Välimaa 1998).

I denna studie antogs att produktionen av vintervete skulle vara i samma storleksordning som den är idag. (5 000–6 000 kg vete/ha/år) (SCB 1992–1999). 1996 vad konstgödselgivan för vintervete i medeltal 137 kg N/ha vilket resulterade i en beräknad normaliserad avkastning på 5 600 kg vete/ha (Välimaa 1998). En konstgödselgiva på 130 kg N/ha valdes därför i denna analys.

Näringsämnen i humanurin har en hög gödslande effekt (Jönsson, Vinnerås et al. 2000). Få erfarenheter har rapporterats där humanurin har nyttjats som ett gödselmedel (Lindén, 1997; Elmquist et al., 1998; Steineck et al., 1998; Kvarnmo, 1998; Jönsson et al., 2000). De refererade kruk- och fältförsöken gav något heterogena resultat gällande humanurinens gödseffekt. (Jönsson, Vinnerås et al. 2000) drog emellertid slutsatsen att kvävegödseffekten vid nyttjande av humanurin var nästan lika stor som vid nyttjande av konstgödselkväve, såvida man tog hänsyn till en högre ammoniakavgång vid spridning av humanurin. Generellt var ammoniakavgången mindre än 10 % av totala kvävegödselgivan, och ibland mindre än 1 %. I denna analys har därför antagits att kvävegödselgivan var 10 % högre när humanurin användes jämfört med konstgödselkväve, för att på så sätt nå en veteskörd i samma storleksordning för dessa båda kvävegödselmedel.

Vidare antogs att kväveförlusterna för de olika undersökta systemen skulle vara så små som möjligt. Detta antagande kan nås med en moderat gödselgiva (Jørgensen & Nielsen 1996) samt med odlingstekniker som minimerar förlusterna, t.ex. lämpliga gödselspridningstekniker, tidpunkt och väderförhållanden vid gödselspridning (Rodhe & Johansson 1996).

4.3 Gödselalternativ

4.3.1 Kvävekonstgödsel

Det finns många olika slags kvävekonstgödsel. I den här analysen valdes att fokuseras på gödselmedlet N28. Detta gödselmedel består av ammoniumnitrat och kalk och omkring 28 viktprocent av konstgödslet är kväve, hälften i form av ammoniumkväve och hälften som nitratkväve (Hovelius, 1999). N28 produceras av Hydro Agri AB i Landskrona.

Exergianalysen för kvävekonstgödsel inkluderade exergiåtgång vid produktion av N28, transport från tillverkare till lantbrukare, transport från gård till fält samt vid spridning. Vid nyttjande av konstgödsel i jämförelse med humanurin måste kväve och fosfor som utsöndrats via urinen behandlas i ett reningsverk för att uppnå en acceptabel utgående vattenkvalitet från reningsverket till recipienten. Denna aspekt har också inkluderats som en exergiförbrukning för konstgödselalternativet.

4.3.2 Humanurin

Analysen för humanurinalternativet inkluderade insamling och transport av urinen från bostadsområdena till lantbrukarna och spridning av urinen på fälten. Vid gödsling med urin tillförs förutom kväve även fosfor och kalium till jorden vilket minskar behovet av fosfor- och kaliumtillskott i form av konstgödsel. Detta har också tagits med i analysen för detta alternativ.

När humanurin nyttjas som gödselmedel är exergiförbrukningen som är knuten till transporterna beroende av hur stora ytor som gödslas med urin. Urinen måste i medeltal transporteras längre om större ytor gödslas. I denna analys togs en funktion fram som beskriver hur transportavståndet ökar med ytan som gödslas med humanurin.

I analysen förutsattes att humanurinen samlades in via en urinsorterande toalett (Johansson, 1999; Jönsson et al., 2000) och lagrades lokalt i tankar i bostadsområdena. 11 gram urinkväve antogs utsöndras per person och dag (NV, 1995) och omkring 70 procent av det utsöndrade urinkvävet ansågs möjligt att samlas in (Jönsson, Vinnerås et al. 2000). Koncentrationen av kväve, fosfor och kalium antogs vara 3 500 mg N/l, 300 mg P/l och 1 000 mg K/l, enligt Jönsson et al. (2000).

4.3.3 Gröngödselgröda

Gödsling med gröngödselgrödor innebär att kvävefixerande växter (t.ex. rödklöver) tillför odlingssystemet atmosfäriskt kväve som binds i jorden. Detta kväve kan sedan nyttjas av grödor som odlas året efter. En vanligt förekommande rutin för odling av gröngödselgröda är att rödklöverfröna sås in samtidigt som vid sådd av en sommargröda, t.ex. havre, våren år ett. Vid slutet av växtsäsongen skördas havren men rödklöverplantorna, som precis har etablerats, klarar sig undan skörd. Under den andra växtsäsongen växer enbart klöverplantorna på åkern. Två till tre gånger putsas plantorna för att hålla tillbaka ogräs och blomning. I början på september plogas rödklövern ner och fälten harvas för att bearbeta jorden för sådd av vintervete i mitten på september det året (Roemke, 2000, Personlig kommentar).

Odlingsinsatser som har inkluderats i exergianalysen är traktorarbeten knutna till sådd, putsning och nerplöjning av gröngödselgrödan. På samma sätt som för konstgödselalternativet har även behandling av humanurinkväve och -fosfor tagits med.

4.4 Exergianalys

För de tre gödselalternativen har endast de processer och rutiner som skiljer de olika alternativen åt inkluderats i analysen. Rutinerna för odling av vintervete har antagits vara lika för de olika gödselstrategierna och därför har endast aktiviteter knutna till gödsling tagits med i analysen.

Vid beräkning av exergiinnehållet i elektricitet och fossila bränslen antogs att 1 kJ exergi motsvarades av 1 kJ energi (Holmberg, 1995). Exergivärdet 295 kJ/mol användes som ett mått på det kemiska exergiinnehållet i ammoniumnitrat (Szargut, 1988).

4.4.1 Tillverkning av konstgödsel

Davis & Haglund (1999) undersökte energi- och materialflödena vid produktion av N28 i Landskrona. Deras studie inkluderade förbrukning av diesel, olja, elektricitet, kol och naturgas samt produktion av fjärrvärme och ånga. Från deras data beräknade Hovelius (1999) exergiförbrukningen för produktion av N28 till 13,55 MJ/kg N28, förbrukningen av dolomit inkluderad. Detta värde motsvarar en exergiförbrukning på 49,1 MJ/kg kväve.

4.4.2 Transport av gödselmedel

Konstgödsel

Den närmast belägna tillverkningsindustrin till Uppland som producerar N28 ligger i Landskrona. Avståndet mellan fabriken och Uppsala är ungefär 65 mil. I analysen antogs att konstgödslet transporterades med lastbilar med en maximal lastkapacitet på 30 ton och en bränsleförbrukning på 0,9 MJ/ton/km (den tomma returtransporten inklude-

rad) (Sonesson, 1996). Detta resulterade i en exergiförbrukning på 2.1 MJ/kg kväve för fjärrtransporten av N28.

De lokala transportererna från Uppsala till lantbrukaren antogs genomföras med mindre lastbilar med en maximal lastkapacitet på 12 ton och en bränsleförbrukning på 1,2 MJ/ton/km (den tomma returtransporten inkluderad) (Sonesson 1996). Medeltransportavståndet uppskattades vara cirka 35 km. Detta gav en exergiförbrukning på 0,15 MJ/kg kväve för de lokala transportererna.

Humanurin

För att bestämma hur långt humanurinen skulle transporteras i relation till hur mycket urin som antogs nyttjas i jordbruket, förutsattes att lantbrukarna i första hand föredrog humanurin från det lokala området. Avståndet mellan bostadsområdena och åkermarkerna baserades på tillgången av humankväve, beräknad för varje kommun i Upplands och Stockholms län. Om det var ett överskott eller en brist på humanurinkväve i relation till nyttjandet inom en kommun, antogs att humanurin exporterades eller importerades till eller från den närmsta kommun som hade brist eller överskott på humanurin. De kommuner som exporterade humanurin antogs ligga i Uppland eller i de norra eller mittersta områdena i Stockholms län. Orsaken till varför kommunerna i södra Stockholms län inte antogs exportera humanurin till Stockholm var att detta urin hellre skulle föredras in jordbruksregionerna söder om Stockholm.

När de urinexporterande kommuner hade bestämts för olika nyttjandegrader av humanurin, uppskattades transportavståndet mellan bostadsområdena till summan av avståndet mellan tätorterna i de två kommunerna plus halva radien av de två kommunerna. Den radie som nyttjades i beräkningarna var den radie som täckte halva kommunarean. Denna förenkling inkluderade även antagandet att åkermarkerna var jämt fördelade över kommunerna. Slutligen beräknades ett medeltransportavstånd alla kommuner i Upplands län där hänsyn togs till hur mycket urin som hade transporterats.

För att bestämma exergiförbrukningen för urintransporterna, antogs att de genomfördes med tankbilar med en maximal lastkapacitet på 12 ton och en bränsle konsumtion på 1,2 MJ/ton/km (den tomma returtransporten inkluderad) (Sonesson 1996).

4.4.3 Av- och pålastning av konstgödsel och humanurin

Efter transport till lantbrukaren måste konstgödsel och humanurin lastas. Därtill måste gödselprodukterna lastas på traktorn vid gödselspridningen. Hovelius (1999) bestämde exergiförbrukningen för avlastningen av konstgödsel till 2,53 MJ/ton och för pålastningen till 2,76 MJ/ton. Både av- och pålastningen antogs göras med en frontlastare. Eftersom avlastningen av humanurinen antogs göras genom att endast öppna tanken och låta den rinna ut, förbrukades ingen exergi för detta arbete. Exergiförbrukningen för lastning av urin uppskattades till 2,18 MJ/ha (Hovelius 1999).

4.4.4 Spridning av gödselmedel

I analysen antogs att spridningen av konstgödselkväve skulle ske vid ett tillfälle med en centrifugalspridare med spridningsbredden 12 m och en lastkapacitet på 1 ton. Spridningshastigheten antogs vara 7 km/h och bränsleförbrukningen motsvarade 391 MJ/h (Hovelius, 1999). Bränsleförbrukningen multiplicerades med en faktor för att kompen-

sera för att man ibland måste köra på fälten utan att spridning sker. Faktorn, vars storlek exempelvis beror på formen på fältet och topografi, valdes till 1,2 enligt Hovelius (1999).

För att beräkna exergiåtgången vid spridning av humanurin gjordes följande antaganden: spridningen skedde med en släpslangspridare med en maximal lastkapacitet på 10 ton, urinen spreds vid ett tillfälle samt spridningsbredd, hastighet och bränsleförbrukning var 12 m, 8 km/h och 969 MJ/h (Hovelius, 1999). Även i detta fall multiplicerades bränsleförbrukningen med en faktor 1,2.

4.4.5 Odling av gröngödselgröda

Exergiförbrukningen vid odling av gröngödselgrödor är relaterad till olika traktorarbeten på fälten. Värdet som användes för exergiinnehållet i traktorbränslet var 37,8 MJ/l (Hovelius, 1999).

Sådd

Under den första växtsäsongen sås rödklöverfröna i anslutning till sådd av en annan gröda. Det finns olika möjligheter för sådd av rödklöver; metoden som har inkluderats i denna studie var att så de två olika frösorterna på samma gång, men på olika djup, med en särskild utrustning. Bredden på såmaskinen var 4 m och bränsleförbrukningen för denna utrustning var bestämd till 3,3 l/ha (Sundberg, 1997). Eftersom denna typ av sådd ger två fördelar antogs att endast hälften av exergiförbrukningen allokerades till sådd av rödklöver.

Putsning

I analysen antogs att rödklöverplantorna putsades vid tre tillfällen under det andra året (Sundberg et al., 1997). Bredden på putsningsmaskinen var 3,6 m och bränsleförbrukningen för varje putsning 8 l/ha (Sundberg et al., 1997).

Stubbearbetning

Stubbearbetning görs ibland före plogning. I likhet med (Sundberg et al., 1997) antogs att stubbearbetning genomfördes 0,5 gånger per år i medeltal och att bränsleförbrukningen uppgick till 8,3 l/ha.

Plöjning

Plöjning antogs ske vid ett tillfälle, i slutet på växtsäsong två. Vid odling av gröngödselgrödor istället för nyttjande av konstgödsel förbättras jordstrukturen och exergibehovet minskar vid plogning. Bränsleförbrukningen för plöjning av gröngödselgrödan antogs vara 16,6 l/ha (Sundberg, et al., 1997).

4.4.6 Transporter mellan gård och fält

I denna studie förutsattes att åkermarken i medeltal låg 1 000 m från gården, vilket är orsaken till att transporter till och från fälten tagits med i analysen.

Transporten av konstgödsel förutsattes ske med en traktor med maximal lastkapacitet på ett ton. Medelhastigheten antogs vara 30 km/h och bränsleförbrukningen 214 MJ/h (Hovelius, 1999). Eftersom gödselgivan per hektar understeg den maximala lastkapaci-

teten, 471 kg/ha, krävdes endast 0,47 turer per hektar och år för spridning av konstgödseln.

För uringödslingalternativet gjordes tre antaganden: transporter gjordes med en traktor med lastkapaciteten 10 ton, med medelhastigheten 30 km/h och en bränsleförbrukning på 347 MJ/h (Hovelius, 1999). På grund av gödselgivan på 143 kg N/ha/år vid nyttjande av humanurin och dess låga kvävekoncentration, 3 500 mg/l, resulterade detta i en total giva på 41 ton/ha/år. Därför behövdes cirka 4 turer till en hektar per år för att resultera i en tillräcklig gödselgiva.

10 enkelturer med en traktor till och från fälten krävdes för odling av gröndgödselgröda under de två odlingssäsongerna. Bränslekonsumtionen för en enkeltur antogs vara 0,25 l/km (Sundberg et al., 1997).

4.4.7 Alternativ behandling av avloppsvatten

Vid nyttjande av urinsorterande avloppssystem minskar kväve- och fosforbelastningen på avloppsreningsverket, som i sin tur medför en minskning av exergiförbrukningen. För att bestämma denna minskning har data från det största avloppsreningsverket i Stockholm, Henriksdal, använts. Behandlingsprocesserna på Henriksdal inkluderar mekanisk biologisk och kemisk behandling med rensfilter, sandfång, förluftning, försedimentering (med förfällning), aktiv slamprocess (inklusive kväverening med fördenitrifikation) och filtrering (med tillsats av fällningskemikalier).

Den minskade exergiförbrukningen vid reningsverket på grund av urinsortering skulle främst bero på (Hellström, 1998 och 1999):

Minskat behov av luftning. Omkring 140 kJ/person/dag används för den biologiska reningen vid Henriksdals reningsverk. Om cirka 30 % av syrebehovet (hänsyn tagen till 50 % syreåtervinning på grund av recirkulation av nitrat) förutsätts användas för kväverening skulle exergibehovet kunna minskas med cirka 50 kJ/person/dag.

Ökad produktion av biogas/metan på grund av minskade slamuppehållstider i den biologiska behandlingssteget och ökad avskiljning av organiskt material i förfällningssteget. Den uppskattade ökningen av den organiska belastningen i den anaeroba biogasreaktorn skulle vara 5–10 %, vilket skulle motsvara 30–60 kJ/person/dag. I denna studie har ett värde på 45 kJ/person/dag valts.

Minskad kemikalieförbrukning för kemisk fällning på grund av minskad fosforbelastning. Om det externa exergibehovet inkluderas, dvs produktion och transport, är exergibehovet för kemisk fällning cirka 50 kJ/person/dag. Enligt Hellström (1999) skulle förbrukningen av fällningskemikalier åtminstone reduceras med 20 % om sorteringsgraden är 70 %. Därmed skulle exergibehovet reduceras med 10 kJ/person/dag.

Sammanfattningsvis, om urinsorterande toaletter skulle installeras i ett område knutet till Henriksdals reningsverk, skulle reduktionen av exergiförbrukningen motsvara ungefär (50+45+10) 105 kJ/person/dag. För att erhålla en kvävegiva på 143 kg N/ha/år med humanurin skulle urin från 51 personer krävas. 105 kJ/person/dag kan därför räknas om till 1950 MJ/ha/år.

4.4.8 Produktion, transport och hantering av fosfor- och kaliumkonstgödsel

Vid nyttjande av humanurin som gödselmedel minskas behovet av PK-konstgödsel och beräkningarna av denna minskade exergikonsumtion baserades på fosforinnehållet i urinen. En kvävegiva på 143 kg N/ha/år skulle motsvara en fosforgiva på 12,3 kg P/ha/år. Data för produktion av PK-gödselmedel (innehållande 20 % P_2O_5 och 22 % K_2O) hämtades från Davis & Haglund (1999) och användningen av energi och fysiska resurser har räknats om till en exergiförbrukning enligt Hovelius (1999) metod. Exergiförbrukningen för transporter, av- och pålastning och spridning av PK-gödselmedlen beräknades på samma sätt som för kvävekonstgödslet.

4.4.9 Skörd av vintervete

Nyttjande av de olika undersökta gödselmedlen har förutsatts resultera i veteskördar av samma storleksordningar, om än kvävegivan vid användning av humanurin skulle vara 10 % högre än vid användande av konstgödselmedel. Vid nyttjande av kvävekonstgödsel är det enklare att gödsla med högre precision än om humanurin eller grüngödsling används. Därför kommer vete skörden förmodligen att vara mer stabil år från år vid nyttjande av konstgödsel. I denna analys antogs en veteskörd på 5 500 kg/ha. Hovelius (1999) har bestämt exergiinnehållet i vintervete till 17,6 MJ/kg (fukthalt 11,3 %) enligt en metod beskriven av Szargut et al. (1988), vilket är det värde som har använts i denna analys.

4.5 Resultat och diskussion

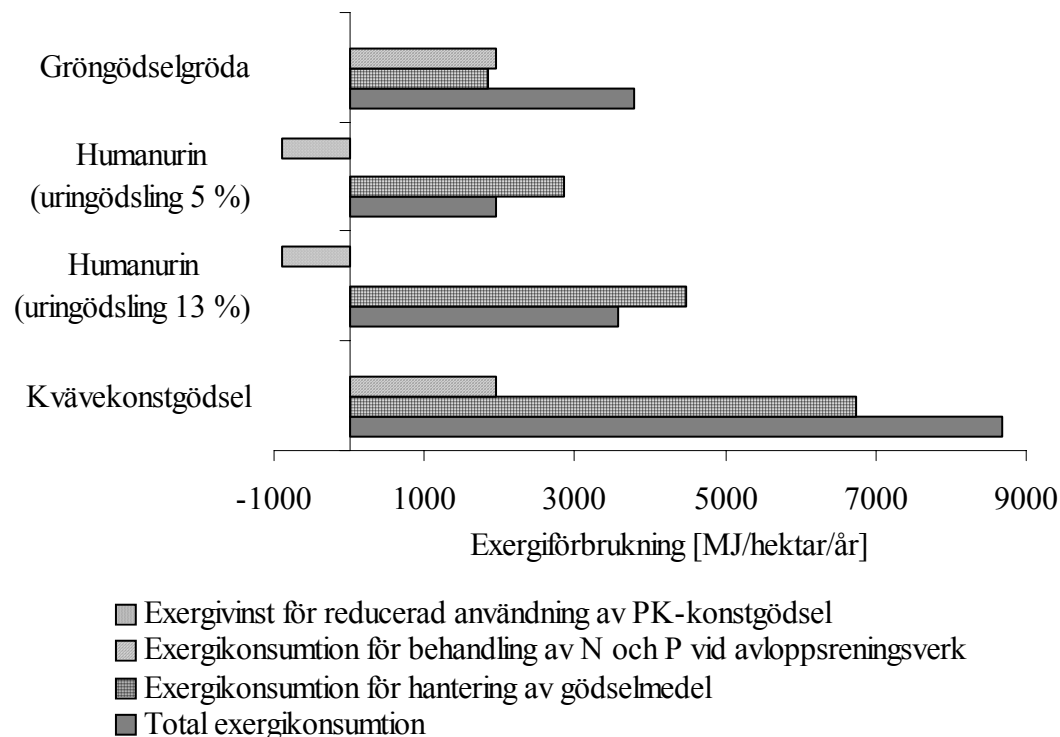
4.5.1 Jämförelse mellan olika kvävegödselalternativ

I figur 4-1 presenteras exergiförbrukningen och exergivinsten för de olika kvävegödselstrategierna. Enligt förutsättningarna för beräkningarna gav nyttjandet av konstgödselkväve den största exergiförbrukningen, 8 690 MJ/ha/år, där produktionen och hanteringen representerade nästan 80 % av den totala förbrukningen.

Exergiförbrukningen vid nyttjande av humanurin som kvävegödselmedel berodde på i vilken omfattning jordbruksmarken i länet gödslades med humanurin. Nettoexergikonsumtionen när 13 % av åkermarken gödslades med humanurin var omkring 3 580 MJ/ha/år. Motsvarande värde för 5 % var 1 950 MJ/ha/år. Exergiförbrukningen för dessa uringödslingalternativ var 40 och 20 % av förbrukningen för konstgödselalternativet.

Beräkningarna för grüngödselalternativet resulterade i en total exergiförbrukning på 3 800 MJ/ha/år och fältarbetet för odling motsvarade nästan 50 % av den totala förbrukningen.

Den minskade exergiförbrukningen för behandling av kväve och fosfor vid ett reningsverk vid nyttjande av humanurin uppgick till 1 950 MJ/ha/år vilket adderades som en extra exergiförbrukning för konstgödsel- och grüngödselalternativen. Om kvävereningskravet för avloppsreningsverket skulle öka så att en extern kolkälla skulle behövas, skulle exergiförbrukningen för denna post öka till att bli omkring 9 310 MJ/ha/år (nästan fem gånger högre).



Figur 4-1. Exergiförbrukning och exergivinster för olika kvävegödselalternativ

4.5.2 Exergiförbrukning för konstgödselalternativet

I tabell 4-1 visas mer detaljerat exergiförbrukningen för nyttjande av kvävekonstgödsel. Den mest betydande delen av den totala exergikonsumtionen var tillverkningen, 6,380 MJ/ha/år, vilket motsvarade omkring 75 % av den totala konsumtionen. Denna produktionskostnad kan jämföras med det kemiska exergiinnehållet i ammoniumnitrat, vilket motsvaras av 1 370 MJ/ha/år. Det innebär att endast en dryg femtedel av den tillförda exergin binds upp i den kemiska föreningen. Exergikonsumtionen för transporter och spridning av konstgödslet var däremot förhållandevis lågt. Detta på grund av den höga kvävekoncentrationen i gödselmedlet.

Tabell 4-1. Exergiförbrukning för nyttjande av kvävekonstgödselmedel

Konstgödsel	Exergiförbrukning [MJ/ha/år]
Produktion av kvävegödselmedel	6 380
Transport från tillverkar till grossist	276
Transport från grossist till lantbrukare	20
Av- och pålastning av gödselmedel	2,5
Transport från gård till åkermark	6,7
Spridning av gödselmedel	56
Behandling av N och P vid avloppsreningsverk	1 950
<i>Totalt:</i>	<i>8 691</i>

För att minska exergiförbrukning för konstgödselalternativet, skulle en möjlighet kunna vara att transportera gödselmedlet långa sträckor med pråm. Eftersom långväga transporter endast stod för ca 3 % av den totala exergiförbrukningen, skulle denna lösning inte ha någon större inverkan på den totala exergiförbrukningen för detta alternativ.

4.5.3 Exergiförbrukning för gröngödselalternativet

Exergiförbrukningen för nyttjande av gröngödselgrödor visas i tabell 4-2. Vid en jämförelse mellan de olika odlingsinsatserna representerade putsningen den största exergiförbrukningen.

Tabell 4-2. Exergiförbrukning för nyttjande av gröngödselgrödor som kvävegödselmedel

Gröngödselgrödor	Exergiförbrukning [MJ/ha/år]
Sådd	62
Putsning	907
Stubbearbetning	157
Plogning	627
Transport från gård till åkermark	95
Behandling av N och P vid avloppsreningsverk	1 950
<i>Totalt:</i>	<i>3 798</i>

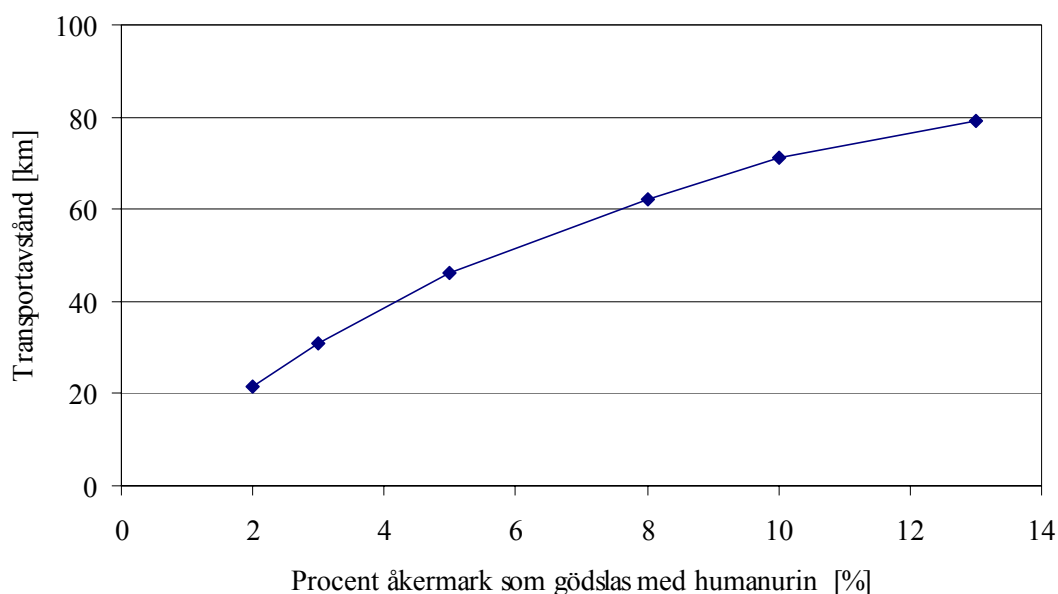
4.5.4 Exergiförbrukning för humanurinalalternativet

I tabell 4-3 presenteras exergiförbrukningen när av humanurin nyttjas som kvävegödselmedel. För detta alternativ stod urintransporterna för den största exergiförbrukningen. Denna transportkostnad var mycket högre jämfört med transportkostnaden för konstgödselalternativet, även om avståndet var mycket längre. Orsaken till detta var den låga kvävekoncentrationen i humanurinen. Reduktionen av exergiförbrukningen på grund av minskat behov av PK-konstgödsel uppgick till 900 MJ/ha/år.

Tabell 4-3. Exergiförbrukning och exergivinster vid nyttjande av humanurin som kvävegödselmedel

Humanurin	Exergiförbrukning [MJ/ha/år]
Transport från bostadsområden till lantbrukare	2 258–3 887
Transport från gård till åkermark	95
Spridning av humanurin	495
Minskat behov av PK-konstgödsel	-900
<i>Totalt:</i>	<i>1 947–3 576</i>

I figur 4-2 presenteras en uppskattning av transportavståndet för humanurin i relation till hur stor andel av jordbruksmarken i Upplands län som gödslas med humanurin.



Figur 4-2. Transportavstånd av humanurin i relation till andel åkermark som gödslas med humanurin

Om 13 % av åkermarken i Upplands och Stockholms län skulle gödslas med en kvävegiva på 143 kg N/ha/år, skulle all urin som produceras i Uppland och de norra och centrala delarna av Stockholms län nyttjas som gödselmedel. Om 3 % eller mindre av åkermarken i Upplands län skulle gödslas med humanurin, skulle däremot inte någon import av urin krävas från Stockholms län. Dessa omständigheter innebär längre transporter av urin när större arealer gödslas med humanurin. Beräkningarna i denna analys visade att om endast 2 % av åkermarken gödslas med humanurin, skulle medeltransportavståndet endast bli 20 km. Om all humanurin i Upplands och Stockholms län skulle sorteras och nyttjas som gödselmedel, skulle transportavståndet bli omkring 80 km i medeltal.

Om urinlösningen skulle vara mer koncentrerad, skulle exergiförbrukningen för transporter och spridning minska. Reducering av vätskevolymerna genom en kombination av syratillsats till urinen och torkning (Hellström and Thurdin, 1998) eller en kombination

av nitrifikation av urinen och torkning (Johansson, 1999) är metoder som undersökts för att reducera vätskevolymerna och skulle kanske vara framkomliga vägar i framtiden.

4.5.5 Skördeavkastning för olika gödselalternativ

Den antagna skördeavkastningen på 5 500 kg/ha/år (85 % TS) motsvarade ett exergiinnehåll på 92 760 MJ/ha/år. Vid nyttjande gröngödselgrödor upptas ofta en tredjedel av växtföljden av dessa grödor. Detta kan jämföras med nyttjande av konstgödsel och humanurin som gödselmedel där bara 10 % av växtföljden måste vara i träda. Om ett förenklat antagande görs att skördeavkastningen är 5 500 kg/ha de år då åkermarken inte är beväxta med gröngödselgrödor (33 %) eller ligger i träda (10 %), kan skördeavkastningen för hela växtföljden uppskattas. Ett exergieffektivitetsförhållande har här tagits fram genom att dividera den beräknade medelskördeavkastningen med exergiförbrukningen för de olika kvävegödselalternativen, se tabell 4-4.

Tabell 4-4. Skördeavkastning, exergiförbrukning och exergieffektivitetsförhållande för olika gödselalternativ

Gödselalternativ	Skördeavkastning – exergi [MJ/ha ¹ /år]	Exergi-förbrukning [MJ/ha/år]	Exergi-effektivitets-förhållande
Kvävekonstgödsel	83 486	8 691	10
Humanurin (uringödsling 13 %)	83 486	3 576	23
Gröngödselgrödor	62 151	3 798	16

1) *Nettoproduktionsareal*

Dessa beräkningar är förenklade eftersom vintervete inte är den enda gröda som odlas i en växtföljd. De beräknade värdena ger i alla fall en indikation på hur exergieffektiviteten influeras av att gröngödselgrödorna upptar en tredjedel av åkermarken. I tabell 4-4 kan ses att den högsta skördeavkastningen i förhållande till exergiförbrukningen för nyttjande av olika kvävegödselmedel erhöles när humanurin användes som kvävegödselmedel. Detta exergieffektivitetsförhållande var lägre för gröngödselalternativet och lägst för konstgödsel.

I denna studie antogs att gröngödselgrödorna inte skördades utan endast putsades tre gånger under andra växtsäsongen för att kontrollera ogrästillväxten. En annan möjlighet skulle kunna vara att skörda gröngrödan en eller två gånger för att nyttja det som foder. Då skulle exergiförbrukningen för att odla gröngödselgrödor både kunna allokeras till kvävegödsling och foderproduktion. En möjlig grönfoderskörd på 4 000 kg TS/ha/år (Wivstad, 1999, personlig kommentar) skulle motsvaras av cirka 76 000 MJ/ha/år (Tai, et al. 1986).

4.5.6 Kväveförluster

I tabell 4-5 kan kväveförlusterna för olika gödslingsalternativ ses. Kväveförlusterna som erhålls från olika odlingssystem beror på faktorer som exempelvis odlingsmetoder, jord- och väderförhållanden. Värdena nedan ska därför endast betraktas som indikationer. När de olika kvävegödselalternativen jämfördes med avseende på kväveförluster, gav konstgödselalternativet lägre förluster jämfört med de andra alternativen. Ammoniakavgången för humanurin var högre beroende på högre avgång vid spridning. Grön-

gödselgrödor skulle mest troligt leda till största kväveförlusterna eftersom kväveflödena är svårast att kontrollera vid en sådan gödselstrategi.

Tabell 4-5. Kväveförluster för olika kvävegödselalternativ

	Konstgödsel- kväve [kg N/ha]	Human- urin [kg N/ha]	Gröngödsel- grödor [kg N/ha]
Nitratläckage	4 ¹	4 ⁶	10 ¹⁰
Ammoniakemission	1,3 ²	10 ⁷	3 ¹⁰
Kvävgas	18 ³	18 ⁸	20–30 ¹⁰
Lustgas	0,2 ⁴	0,2 ⁹	0,2 ⁹
Ammoniakemission (vid tillverkning)	0,7 ⁵		
Kväveoxider (vid tillverkning)	0,3 ⁵		
Lustgas (vid tillverkning)	0,7 ⁵		
Ammonium- och nitratläckage (vid till- verkning)	0,3 ⁵		
Lagring		0 ⁷	
Totalt	25	32	33–43

1) 4kg/ha/år vid odling av vintervete i Upplands län på styv lera (Johansson och Hoffman 1997)

2) 1 % av kvävegödselgivan (Välimaa, 1998)

3) Denitrifikation från jordbruksmark i mellersta Sverige, lerig jord (Claesson och Steineck, 1991)

4) 1 % av denitrifikationen (Välimaa, 1998)

5) (Hydro, 1990)

6) Läckaget är i samma storleksordning som för konstgödsel (Steineck et al., 1998)

7) (Jonsson et al., 2000)

8) Denitrifikationen är i samma storleksordning som för konstgödsel (Steineck et al., 1998)

9) Antas vara i samma storleksordning som för konstgödsel

10) Uppskattningar gjorda av Wivstad (1999) (personlig kommentar)

4.5.7 Gödselstrategier

I denna analys antogs att endast ett av de undersökta gödselalternativen användes för odling av vintervete. I praktiken skulle det däremot vara möjligt att kombinera alternativen. Exempelvis skulle det vara möjligt att kombinera grüngödselalternativet med humanurin. I ett sådant fall skulle urinen kunna sprids våren efter det att höstvetet såtts. Detta skulle antagligen öka nyttjandegraden av kväve i odlingssystemet (Wivstad 1997), och skördarna skulle kunna öka. Om endast grüngödselgrödor används som gödselmedel i ett odlingssystem, kommer det inte att ske något tillskott av fosfor och kalium vilket skulle ge en utarmning av dessa ämnen i jorden på lång sikt.

Stallgödsel har inte inkluderats som gödslingsalternativ i denna analys. I praktiken är det däremot möjligt att kombinera denna näringskälla med de studerade gödslingsalternativen.

4.6 Slutsatser

Utifrån de förutsättningar som antogs för denna fallstudie visade resultaten av exergianalysen att nyttjande av kvävekonstgödsel gav den högsta exergikonsumtionen, 8 700 MJ/ha/år. Exergiförbrukningen för tillverkningen av gödselmedlet stod för omkring 75 % av den totala förbrukningen.

Vid nyttjande av humanurin som kvävegödselmedel ökar exergiförbrukningen ju större arealer som gödslas, detta på grund av längre transportavstånd. Denna analys visade att om 13 % av åkermarken i Uppland gödslades med humanurin (all tillgänglig urin är då utnyttjad) skulle exergiförbrukningen uppgå till 3 580 MJ/ha/år, cirka 40 % av konstgödselalternativet. Om 5 % av åkermarken skulle gödslas med humanurin, skulle däremot exergiförbrukningen vara omkring 1 950 MJ/ha/år, ca 20 % av konstgödselalternativet.

Fastän det tätbefolkade Stockholmsområdet ligger i ganska nära anslutning till odlingsområdena, stod urintransporterna från bostadsområden till lantbrukare för 80–85 % av förbrukad exergi, detta på grund av den långa kvävekoncentrationen i urin. Transportavståndsberäkningarna visade att om all urin i Upplands län och de norra och mittersta delarna av Stockholms län skulle samlas in och spridas med en kvävegiva på 143 kg N/ha/år skulle urinen räcka till 13 % av åkerarealen i dessa områden. Detta extrema gödslingsalternativ resulterade i en något lägre exergiförbrukning än för grüngödselalternativet som gav en exergiförbrukning på 3 800 MJ/ha/år. Omkring hälften av denna exergiförbrukning kunde relateras till insatser gjorda vid odling.

Humanurinalternativet gav det högsta exergieffektivitetsförhållandet. Även om grüngödselgrödor upptog en tredjedel av växtföljden i jämförelse med en tiondel för de andra alternativen, hade grüngödselalternativet ett högre exergieffektivitetsförhållande i jämförelse med konstgödselalternativet.

Nyttjande av kvävekonstgödselmedel resulterar mest troligt i lägre kväveförluster jämfört med de andra kvävegödslingsalternativen. Detta på grund av en större kontroll på kväveflödena. Vid nyttjande av konstgödselkväve uppskattades kväveförlusterna till

omkring 25 kg N/ha/år medan förlusterna för humanurin- och grüngödselalternativen uppskattades till cirka 32 och 33–43 kg N/ha/år.

4.7 Metoddiskussion av exergianalysen

Resultaten från denna exergianalys gäller endast fullständigt för denna fallstudie. Resultaten från analysen kan dock indikera vilka faktorer som står för den högsta exergikonsumtionen. För konstgödselalternativet dominerade själva tillverkningen av gödselmedlet exergiförbrukningen medan de långväga transporterna hade mindre inverkan på den totala exergiförbrukningen. För humanurinalternativet stod däremot transporterna för den största delen av exergiförbrukningen vilket visar att avståndet till tätbefolkade områden är begränsande för nyttjande av humanurin som gödselmedel.

I en exergianalys kan endast nyttjande av energi och materiella resurser värderas. Andra viktiga aspekter måste man ta hänsyn till vid sidan av exergianalysen. Exempelvis kunde positiva sidoeffekter som förbättrad jordstruktur och infiltrationskapacitet samt ökad vattenhållande förmåga vid odling av grüngödselgrödor (Wivstad 1997) inte inkluderas i analysen. Vidare inkluderades inte heller att grüngödselgrödor kan fungera som en avbrottsgröda i ett odlingssystem vilket kan kontrollera spridning av växtsjukdomar.

4.8 Referenser

Claesson, S., S. Steineck (1991). Växtnäring, hushållning – miljö. Speciella skrifter 41, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala.

Davis, J., C. Haglund (1999). Life cycle inventory (LCI) of fertiliser production. Master's Thesis SIK-Report No 654, Department of Chemical Environmental Science, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Elmquist, H., L. Rodhe, S. Steineck, B. Lindén, M. Blomberg (1998). Humanurin och rötresten till Vårkorn Skörd, kväveutnyttjande, ammoniakavgång och risk för nitratutlakning – 1997 års fältförsök, Södermanland. Delrapport , Swedish Institute of Agricultural Engineering, Uppsala.

Hellström, D. (1998). Exergy Analysis: A Comparison of various treatment alternatives for nutrient removal. 8th International Gothenburg Symposium on Chemical Treatment in Prague, 7–9 September 1998. pp. 313–324.

Hellström, D. (1999). Exergy analysis: A comparison of source separation systems and conventional treatment systems. Water Environment Research. 71(7), 1354–1363.

Hellström, D., J. Thurdin (1998). Drying as a urine dewatering method. Vatten. 54(2), 109–114.

Holmberg, J. (1995). Socio-economic principles and indicators for sustainability. Doctoral thesis, Institute of Physical Resource Theory, Gothenburg.

Hovellius, K. (1999). Energy and exergy analyses of bio energy crops and rapeseed oil methyl ester production. Licentiate Thesis 237, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.

Hydro (1990). Agriculture and fertilizers. Norsk Hydro, Oslo.

Johansson, E. (1999). Urine separating systems: design experiences and nitrogen conservation. Licentiate thesis 1999:43, Luleå University of Technology, Luleå.

Johnsson, H., M. Hoffmann (1997). Kväveläckage från svensk åkermark – beräkningar av normalutlakning och möjliga åtgärder. 4741, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm.

Jönsson, H., B. Vinnerås, C. Höglund, T.-A. Stenström, G. Dalhammar, H. Kirchmann (2000). Källsorterad humanurin i kretslopp. VA-Forsk report 2000:1, Swedish Water and Wastewater Association, Stockholm.

Jørgensen, S.E., S.N. Nielsen (1996). Application of ecological engineering principles in agriculture. Ecological Engineering. 7, 373–381.

Kvarnmo, P. (1998). Humanurin som kvävegödselmedel till stråsäd. Examensarbete 107, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala.

Lindén, B. (1997). Humanurin som kvävegödselmedel tillfört i växande gröda vid ekologisk odling av höstvet. Crop and Soils 1, Department of Agricultural Research Skara, Skara.

NV (1995). Vad innehåller avlopp från hushåll. Report 4425, Naturvårdsverket, Stockholm.

Rodhe, L., S. Johansson (1996). Urin – spridningsteknik, ammoniakavgång och växtnäringssutnyttjande. Lantbruk och industri 217, Swedish Institute of Agricultural Engineering, Uppsala.

SCB (1992–1999). Yearbook of Agricultural statistics. SCB, Stockholm.

SCB (1998). Statistical Yearbook of Sweden '98. SCB, Stockholm.

Sonesson, U. (1996). Modelling of the compost and transport process in the ORWARE simulation model. Report 214, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala.

Steineck, S., A. Richert Stinzing, L. Rodhe, H. Elmquist, Jacobsson, C. (1998). Plant nutrients in human urine and food refuse. NJF-seminar No 292, 23–25 November, Jokioinen, Finland.

Sundberg, M., W. Johansson, H. Hjortsberg, K. Hansson, H. Oostra, K. Berglund, H. Elquist (1997). Biogas i framtida lantbruk och kretsloppssamhällen – Effekter på mark, miljö och ekonomi. Kretslopp och avfall 12, Swedish Institute of Agricultural Engineering, Uppsala.

Szargut, J., D.R. Morris, F.R. Steward (1988). Exergy analysis of thermal, chemical

and metallurgical processes. Springer-Verlag, New York.

Tai, S., K. Matsushige, T. Goda (1986). Chemical Exergy and Organic Matter in Wastewater. *International Journal of Environmental Studies*. 27(3/4), 301–315.

Välimaa, C. (1998). Växtnäring i livscykelanalys–Mineralgödselanvändning i spannmålsgröda. Masters Thesis 106, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala.

Wivstad, M. (1997). Green-manure crops as a source of nitrogen systems. Doctoral Thesis Agraria 34, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala.

5 Exergi- och kostnadsanalys avseende två olika transportsystem för dagvatten

5.1 Introduktion

Transportsystem för dagvatten kan vara kombinerade eller separata. Andelen kombinerade ledningar utgör 40 % i Danmark, 18 % i Sverige, 28 % i Norge (Nordisk Ministerråd, 1994), 70 % i Frankrike och England och 90 % i Nederländerna (Marsalek et al., 1993). Båda systemen har svagheter, såsom höga underhållskostnader och utsläpp av föroreningar. Ungefär 50 % av avloppsledningsnäten i Sverige och Danmark byggdes före 1970. Renovering av dessa system kräver en god strategi och flera forskare anser att de konventionella avrinningssystemen har visat så stora begränsningar att det finns klara behov av alternativa lösningar (Marsalek et al., 1993; Kaiser, 1997).

Det separata systemet kan utgöras av rörsystem eller system för ytlig avrinning. Ytavrinningssystem kan bestå av gräsbevuxna diken, rännstenar eller andra kanaler. Funktionen hos gräsbevuxna diken har studerats av Kercher et al. (1983), Yousef et al. (1985, 1987), Wigington et al. (1986), Maestri & Lord (1987), Schueler (1987), Lorent (1992a,b), Finley & Young (1993) samt Bäckström (1998).

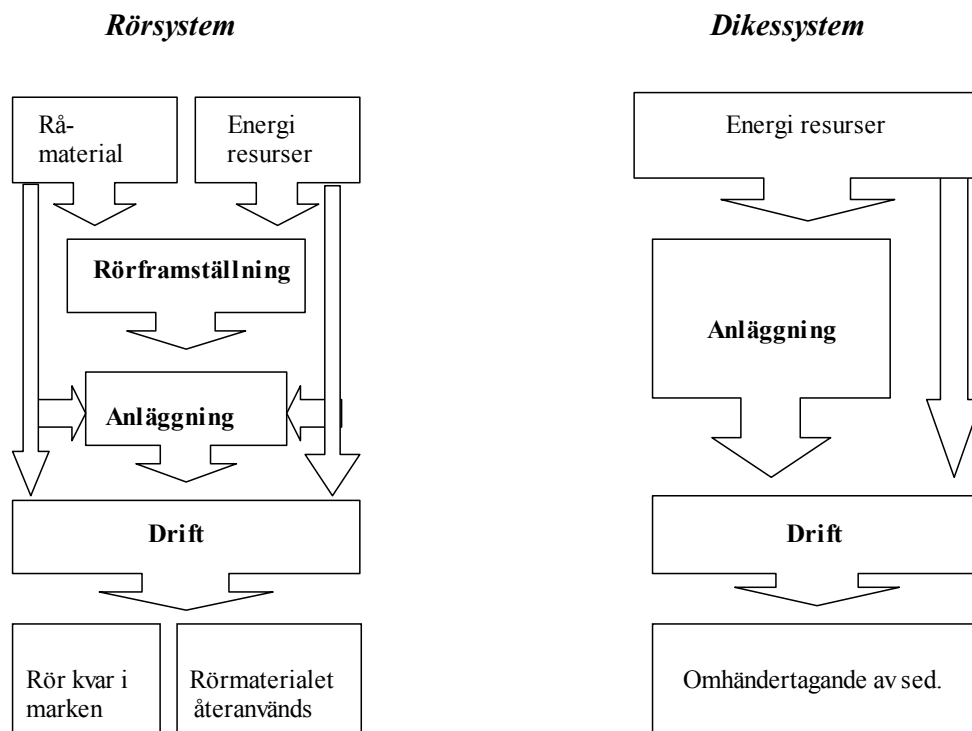
Målet för denna studie var att jämföra resursåtgång för två olika transportsystem för dagvatten och att därvid utröna vilka processer som är mest resurskrävande. Detta genomfördes via undersökning av fysisk resursförbrukning samt genom kostnadsanalys.

5.2 Metodik

Två alternativa system definierades: ett rörsystem och ett dikessystem. De två dräneringssystemen utformades så att de hade jämför kapacitet vad gällde att avleda dagvatten (hydraulisk kapacitet). Systemdetaljer presenteras senare i texten. En enkel livscykelmodell upprättades för vart och ett av systemen, se figur 5-1.

Termen *materialframställning* användes för den fas där all råmaterialtillverkning och all industriell framställning av komponenter utfördes. Termen *anläggning* omfattade alla aktiviteter som genomfördes på platsen där transportsystemen byggdes. Här inkluderades också transporten av rör och byggnadsmaterial.

Allt arbete med att vidmakthålla systemen benämndes *drift*. I denna term innefattades också erforderliga inspektioner, mätningar och slam- eller sedimenttransporter i samband med rengöringar. Uttjänta rör kan antingen lämnas i marken, alternativt kan rörmaterial återtunnas. Värde av återvunnet rörmaterial har inte beaktats i denna studie.



Figur 5-1. Använda modeller för livscykeln hos de två systemalternativen.

Standardinnehållet av exergi för varje komponent utgjorde beräkningsverktyg (Szargut et al., 1988). I allmänhet kunde materialerna definieras som kemiska ämnen innehållande små mängder. Därför användes standardexergivärdet för respektive ämne.

Data för de kvantitativa analyserna hämtades från olika källor. Huvuddelen av data för exergianalys av ledningssystemet hämtades från en studie publicerad av NPG, Nordiska Plaströrgruppen (Kjaerulff and Andersen, 1997). Kostnadsdata hämtades ur en sammanställning av statistiska data för olika byggnadsarbeten i svenska tätorter (KP-fakta, 1996).

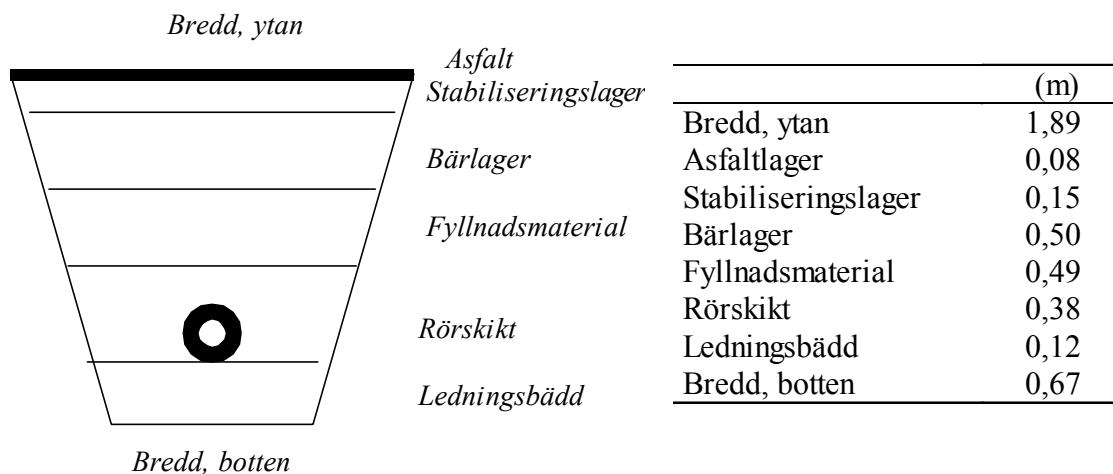
Några generella avgränsningar gjordes för att förenkla analysen. Emissioner under framställning och anläggning beaktades ej i denna studie. Arbetskraft ingick i kostnadsanalysen, men inte i exergianalysen. Inhämtade data ansågs vara lämpliga att ingå i en jämförelse trots att de hämtats från flera olika nordiska källor.

5.3 Beskrivning av systemalternativen

Huvuddelen av rörsystemen i bostadsområden är lokaliserade i anslutning till gator och andra hårdgjorda ytor. Det ansågs därför rimligt att jämföra en dagvattenledning, belägen under en hårdgjord yta med ett dike, beläget intill en hårdgjord yta.

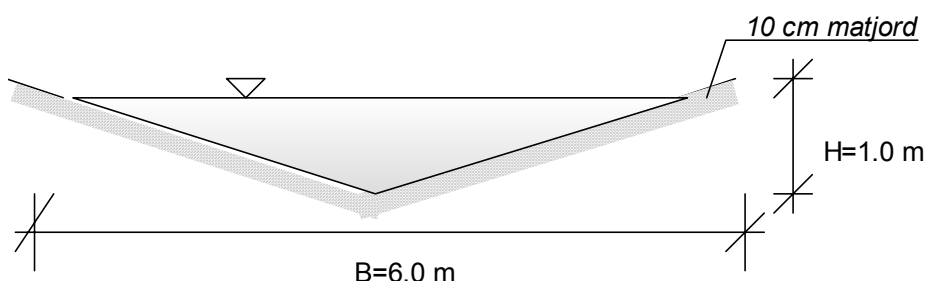
Rörsystemet bestod av betongrör, Ø250 mm. Betongrör valdes för att det i stor utsträckning väljs som material i dagvattenledningar. Användningen av PVC-rör ökar, men främst för avloppsändamål (spillvatten). Utseendet av rörgrav med ledning framgår av figur 5-2. Betongrörets inre diameter var 250 mm, dess vikt var 116,7 kg/m och

längden på varje rör var 1,5 meter. Ledningslutningen sattes till 1 % och råheten till 0,013 (Mannings tal). Rörens livslängd skattades till 50 år.



Figur 5-2. Rörgravssektion (ej skalenlig) med valda data på utformningen.

Dikessystemet bestod av ett gräsbevuxet dike med triangulär tvärsnittsarea, figur 5-3. Dikesdjupet valdes till 1,0 m vilket placerade dikesbotten på samma nivå som röret i rörssystemet. Sidolutningarna var 1:3 (v:h). Råheten 0,04 (Mannings tal) valdes utgående från Chow (1959). Bottenlutningen sattes till 0,1 % för att minimera erosionsrisken och att upprätthålla dagvattenflödet. Ett matjordstäckje om 0,10 m spreds över dikesytan för att försäkra sig om dess kvalitet och ett vegetationstäckje av gräs såddes in i dikesytan.



Figur 5-3. Sektion av gräsbevuxet dike (ej skalenlig).

5.4 Exergianalys

De resurser som tillfördes i rörssystemet sammansattes av råmaterial och olika energikällor (kol, naturgas and olja). Betongen bestod av sand, grus, cement, vatten och luft. Cementet beståndsdelar var kalk, gips och silikat. Kol, naturgas and oljeprodukter var de energiformer som erfordrades för framställning, anläggning och drift. Merparten av oljeprodukterna nyttjades för transport och grävarbete. Kol och naturgas användes för att framställa värme och elektricitet. Tabell 5-2 anger exergiinnehållet i nyttjade bränslen och kemiska ämnen. Att framställa 1 meter betongledning krävde 121,2 MJ exergi i

form av energiresurser (kol, olja och naturgas) och 5,7 MJ exergi i form av råmaterial (NaCl, Bauxit, grus, sand, kalk, Fe och vatten).

Tabell 5-2. Exergiinnehåll för vissa bränslen och kemiska substanser (Szargut et al., 1988).

	Kol	Natur- gas	Olja	Kvarts (SiO ₂)	Gips	CaCO ₃
Exergi (MJ/kg)	32	50	42	0,032	0,050	0,010

De material som användes vid rörgravsanläggandet var svåra att värdera i exergitermer. Ca 99,8 (vikts-) % av byggnadsmaterialet utgjordes av antingen sand eller grus som är material med varierande sammansättning. Som en grov uppskattning användes exergiinnehållet 0,032 MJ/kg för sand (exergiinnehållet i SiO₂), medan exergiinnehållet i grus antogs vara försumbart. Ca 88 % av exergiåtgången i anläggningsskedet härrörde från olje/bensinanvändning vid grävning, transporter och asfaltläggning. De värden som använts för bränsleförbrukningen hos olika maskiner och fordon visas i tabell 5-3.

Tabell 5-3. Använda värden för bränsleförbrukning hos olika maskiner och fordon.

	Grävmaskin ^a (l/h)	Traktor ^a (l/h)	Lastbil ^a (l/km)	Gräsklippare ^b (l/h)
Bränsleförbrukning	12	5	0,33	1

^a Från Kjaerulff och Andersen (1997)

^b Enligt Husqvarna AB (gräsklipparfabrikant)

Driften av rörsystemet innefattade kontroll, underhåll och röjning av de sediment som samlats i brunnsöppningarna. Ingen renovering av systemet utfördes under den 50-åriga beräkningsperioden. Exergiåtgången för rörsystemet under de olika skedena av dess livslängd framgår av tabell 5-4.

Tabell 5-4. Exergiåtgång för rörsystemet.

	Materialframställning	Anläggning	Drift ^a	Totalt
Exergiåtgång per meter ledning (MJ/m)	127	864	25	1016

^aTotal exergiåtgång för 50 års drift

Exergiåtgången för dikessystemet härrörde helt från bränslekonsumtionen för grävmaskiner, transportfordon och gräsklippare. Grävmaskinen hade en kapacitet av 50 m³/h. Lastbilen var av boogiemodell, rymde 8,3 m³ och kunde förflytta 26 m³/h. Den totala schakten var 3 m³ per meter dike. Driften av diket bestod av att ta bort gräs och skräp två gånger per år. Den samlade exergiåtgången för dikessystemet visas i tabell 5-5.

Tabell 5-5. Exergiåtgång för dikessystemet.

	Materialfram- ställning	Anläggning ^a	Drift ^b	Totalt
Exergiåtgång per meter dike (MJ/m)	-	85	56	141

^a Inkluderar 0,10 m matjordstäck

^b Total exergiåtgång för 50 års drift

Dikessystemet krävde ungefär 7 gånger mindre exergi än rörsystemet. Energiresurserna olja och kol dominerade exergiförbrukningen för båda systemen. Råmaterialen till rör och rörgrav utgjorde endast 4 % av den totala exergiförbrukningen i rörsystemet. Manuellt arbete och ianspråktagande av markyta inkluderades inte i exergianalysen; däremot i kostnadskalkylen.

PVC-rör kunde ha varit ett beräkningsalternativ till betongrör, men arbete utfört av Kjaerulff and Andersen (1997) indikerade att resursåtgången var högre för PVC-rör än för betongrör.

5.5 Kostnadsanalys

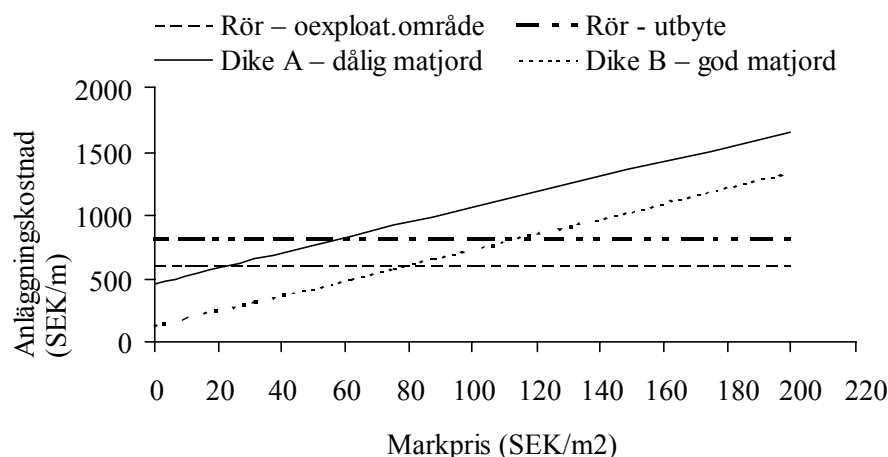
Kostnaderna för att anlägga rörsystemet var i stor utsträckning beroende på det aktuella områdets karaktär (tabell 5-6). I hårt exploaterade områden var anläggningsarbetet komplicerat eftersom hänsyn måste tas till den befintliga infrastrukturen. Anläggningskostnaderna för dikesalternativet berodde mycket på kvaliteten hos det existerande matjordslagret. I områden med dålig matjordskvalitet var kostnaderna för dikessystemet tre gånger större än där densamma var god. Resultaten från kostnadsanalysen framgår av tabell 5-6 (kostnader för markköp har ej inkluderats). Rörsystemet utföll 34–80 % dyrare än dikessystemet i områden med dålig matjordskvalitet. Där området hade god matjordskvalitet blev kostnaderna för rörsystemet 5–6 gånger högre än för dikessystemet.

Tabell 5-6. Anläggningskostnader för rörsystem och dikessystem, kostnader för markköp ej beaktade. (KP-fakta, 1996). 1 USD=7.71 SEK (1/20/99)

	(SEK/m)
Rörsystem ^a – Tidigare oexploaterad mark	610
Rörsystem ^a – Ersättning av befintligt rör	820
Dikessystem – Område med dålig matjordskvalitet	456
Dikessystem – Område med god matjordskvalitet	129

^a Rörsystem: betongrör Ø 225 mm har använts i kalkylerna pga. av brist på data för Ø 250 mm rör. Röret ligger på 2.0 m djup. Antagen jordart var normal morän. Ett dagvattenintag (betong, Ø 400 mm) installerades var 80 meter. Kostnaderna för rörsystemet omfattar grävning, rör, dagvattenintag och rörgrav.

Markprisets inverkan på anläggningskostnaderna för dikessystemet framgår av figur 5-4. Dikessystemet ger en lägre anläggningskostnad än rörsystemet där markpriset är lägre än 75 SEK/m² förutsatt att befintligt matjordstäck är av god kvalitet.



Figur 5-4. Anläggningskostnader för rörsystemet och dikessystemet vid olika markpriser. [Svenska markpriser (Januari 1999): Bostadsområde = 60–100 SEK/m², industriområde = 20–30 SEK/m².]

Underhållskostnader för dagvattenledningar hämtades från 17 kommuner och jämfördes med underhållskostnader för dikessystem hämtade från 9 kommuner. Kommunerna var väl fördelade över landet. Genomsnittlig underhållskostnad för rörsystem var 3.3 SEK per meter och år (tabell 5-7), vilket var 10 gånger mer än underhållskostnaden för dikessystem (0.33 SEK/m, år).

Tabell 5-7. Underhållskostnader för rör- och dikessystem för dagvatten (VAV, 1997).

	Underhållskostnader (SEK/m, år)		
	N	Intervall	Genomsnitt
Rörsystem	17	0.37–9.29	3.3
Dikessystem	9	0.01–1.41	0.33

n = antal observationer

För att kunna bestämma vilket av alternativen som är gynnsammast ur kostnadssynpunkt måste markpris och matjordslagrets kvalitet vara känd. Ofta anläggs diken i anslutning till gator och vägar. Sådana ytor är i regel mindre intressanta ur husbyggnadssynpunkt och markpriset är därför ofta lågt. Det skilde mycket i underhållskostnader mellan rörsystem och dikessystem. Skälet kan vara att metoder för dikesunderhåll är ofullkomliga eller att rörsystemet är mycket underhållskrävande. En annan möjlig förklaring är att flera avdelningar i den kommunala organisationen är involverade i underhållsarbetet och att kostnadsdokumentationen då blivit otydligare.

5.6 Diskussion

En produkts kostnader representerar en samlad, subjektivt mänsklig värdering av produkten. Exergianalysen värderar däremot insatta resursers värde utifrån fysiska egenskaper hos dessa. Den är därför okänslig för subjektiva åsikter. Trots det faktum att kostnader och exergiförbrukning står för olika värderingsmetoder, utföll dikessystemet i båda värderingarna gynnsammare än rörsystemet.

Värderingsarbetet kan givetvis byggas på med systemens respons på miljöeffekter av dagvattenföroreningar, på olika klimatförhållanden, på andra rörmaterial och på andra konfigurationer av diken.

5.7 Slutsatser

Studien visar att det är möjligt att via en exergianalys uppskatta åtgången av fysiska resurser för olika transportsystem för dagvatten. Genom att jämföra åtgången av fysiska resurser med åtgången av finansiella resurser kan flera aspekter på resursutnyttjande tillgodoses.

Ett rörsystem kräver klart mer fysiska resurser än ett dikessystem. För rörsystemet förbrukas huvuddelen av de fysiska resurserna under anläggningsskedet. Transporter och grävning svarar för den största förbrukningen av fysiska resurser i båda de jämförda systemen.

Ett gräsbevuxet dike kostar mindre än ett rörsystem i bostadsområden och i industriområden där markpriserna är förhållandevis låga. Underhållskostnaderna för ett rörsystem är mycket högre än för ett dikessystem, men ett rörsystem kräver en mindre åtgång av fysiska resurser för sitt underhåll än vad ett dikessystem gör.

5.8 Referenser

Bengtsson, M., Lundin M. and Molander S. (1997). Life Cycle Assessments of Wastewater Systems. Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning, Report 1997:9, Göteborg.

Bäckström, M. (1998). Ditches: Sustainable drainage components. Proceedings of the 3rd International conference on Innovative technologies in urban storm drainage, NOVATECH 98, Lyon, France.

Chow, V. T. (1959). Open channel hydraulics, McGraw-Hill.

Finley, S. M. and Young, G. K. (1993). Grassy swales to control highway water quality runoff. Transportation research record No. 1420, U.S. Transportation Research Board.

Hellström, D. (1998). Nutrient Management in Sewerage Systems: Investigations of Components and Exergy Analysis. Dissertation, Department of Environmental Engineering, Luleå University of Technology, 1998:02.

Kaiser, M. (1997). Requirements and possibilities of best management practises for storm water run-off from the view of ecological townplanning. *Water Science and Technology*. Vol 36, No 8–9, pp. 319–323.

Kercher, W. C., Landon, J. C., and Massarelli, R., (1983). Grassy swales prove cost-effective for water pollution control. *Public Works*, 1983, Vol 114, No. 4, pp 53–54.

Kjaerulff, A. and Andersen, A. (1997). Life cycle assessment of sewage water pipes made from PVC, PE, PP and concrete (In Danish). Nordiska Plaströrsgruppen, Stockholm, Sweden, Slutrapport, Augusti 1997.

KP-fakta (1996). KP-fakta 1996. Beräkning av kapaciteter och kostnader för olika anläggningsarbeten. KP-fakta AB, 360 40 Rottne, Sweden.

Lindwall, P., Hogland, W. (1981). Driftsaspekter på dagvatteninfiltration. BFR rapport R14:1981.

Lorent, F. I. (1992a) Highway runoff water quality literature review. Research and Development Branch, Ministry of Transportation, Ontario, report no. MAT-92-13.

Lorent, F. I. (1992b). Effects of piped median vs. Open ditch drainage on stormwater quality. Research and Development Branch, Ministry of Transportation, Ontario, report no. MAT-92-04.

Maestri, B. & Lord, B. N., (1987). Guide for mitigation of highway stormwater runoff pollution. *Science of the total environment*, 59, pp. 467–476.

Marsalek, J., Barnwell, T. O., Geiger, W., Grottker, M., Huber, W. C., Saul, A. J., Schilling, W. and Torno, H. C. (1993). Urban drainage systems: design and operation. *Water Science and Technology* Vol 27, No. 12, pp. 31–70.

Nordisk Ministerråd (1994). Wastewater transport systems in the Nordic countries (In Danish). Rapport TemaNord 1994:535, nordisk ministerråd, ISBN 92 9120 452 8

Schueler, T. R. (1987). Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs. Prepared for the Washington Metropolitan Water Resources Planning Board. Publ. no. 87703. Washington, DC pp. 1.1-9.19.

Sonesson U., Dalemo M., Mingarini K. and Jönsson H. (1997). ORWARE – A simulation model for organic waste handling systems. Part 2: Case Study and simulation results. *Resources, Conservation and Recycling*, 21:39–54

Szargut, J. Morris, D.R. and Stewart, F.R. (1988). *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*, Springer.

Tillman, A-M., Lundström, H. and Svingby M. (1996). Livscykelanalys av alternativa avloppssystem i Bergsjön och Hamburgsund. Chalmers Tekniska Högskola, Teknisk Miljöplanering, Rapport 1996:1.

VAV (1997). Underhållskostnader för VA-system. Årsrapport – 1995, DRIVA-projektet. VAV-rapport MAR 97.

Viklander, M. (1997). Snow Quality in Urban Areas. Dissertation, Department of Environmental Engineering, Luleå University of Technology, 1997:21.

Wigington, P. J., Randall, C. W., and Grizzard, T. J. (1986). Accumulation of selected trace metals in soils of urban runoff swale drains. Water resources bulletin Vol. 22, No. 1, pages 73–79.

Yousef, Y. A., Hvitved-Jacobsen, T., Wannielista, M. P. and Harper, H. H. (1987). Removal of contaminants in highway runoff flowing through swales. The Science of the Total Environment, 59 (1987), pp 391–399.

Yousef, Y. A., Wannielista, M. P. and Harper, H. H. (1985). Removal of highway contaminants by roadside swales. Transportation Research record 1017, U.S. Transportation Research Board.

6 Sammanfattande synpunkter

Föreliggande exergikalkyler genomförda med utgångspunkt i olika situationer inom VA-tekniken har förhoppningsvis demonstrerat en del av exergikalkylens möjligheter, men också något av dess begränsningar.

Exergikalkyler har ett stort värde inför strategiska beslut som i påtaglig utsträckning berör mänskligt nyttjande av naturresurser. Finns alternativa möjligheter att lösa en uppgift, bör det alternativ som medför lägst exergiförbrukning premieras. Om endast ett alternativ finns och detta medför hög exergiförbrukning är det en stark indikation på att området ifråga bör utsättas för forskning och utveckling.

Beräkningsområdets avgränsning är ett väsentligt moment i exergikalkylen. Det måste framgå klart vad som innefattats och vad som lämnats utanför. Svårighetsgraden ökar när många energislag, transformationer och biologiska eller kemiska miljöer av olika slag involveras.

Hur man bedömer exergiåtgången för mänskligt arbete är långtifrån självklart. För kroppsarbete kan detaljerade relationer mellan födo- (kalori-) intag och utfört arbete etableras. Emellertid blir allt färre arbetsuppgifter av denna karaktär. Det är uppenbart att arbetet för en maskinförare, en analytiker eller en designer och dess exergimässiga konsekvenser inte enkelt beskrivs via kaloriintaget. Ett helt annat synsätt – nämligen att vi människor alla är delansvariga för mänskligt utnyttjande av naturens resurser (här i exergimått) och att detta nyttjande kan fördelas lika mellan oss, t.ex. globalt eller nationsvis och ses som en form av ”tomgångsförbrukning” – leder till avsevärt högre exergiförbrukningsvärden per person. Delin & Grundelius (1998) har uppskattat detta värde till 7,9 kWh/h för en svensk medborgare. Utslaget per arbetad mantimme erhålles i stället 94 kWh per arbetstimme som genomsnitt för svenska förhållanden 1997.

Frågor som i stor utsträckning berör mänskliga känslor är knappast intressanta att angripa med exergikalkyler. Vill vi veta huruvida en konsert är bra, om slamodlade växter är lämpliga att äta eller om diken utgör ett vackert inslag i stadsbilden ger en exergikalkyl inget enkelt svar. Den kan däremot ge kunskaper om resursåtgången för att tillverka en altfiol gentemot en klarinett eller om resurser som behövs för att sortera molekyler i slutet av ett avloppssystem jämfört med i början av detsamma. Eller om hur resursåtgången för anläggande och drift av diken förhåller sig till den för ledningar såsom beskrivits i ett av denna rapports exempel.

Referens

Delin, S. & Grundelius, E. (1998). Utveckling av rikttningsanalys – exergiberäkningar i Luleå och Strängnäs kommuner. Forskningsrapport, Luleå Tekniska Universitet, Avd för Restproduktteknik 1998:07. ISSN:1402-1528.



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08-506 002 00

Fax 08-506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se