



SINTEF Energiforskning AS

Postadresse: 7465 Trondheim
Resepsjon: Sem Sælands vei 11
Telefon: 73 59 72 00
Telefaks: 73 59 72 50

<http://www.energy.sintef.no>

F. nr.: NO 939 350 675

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

**Energiutnytting i Noreg –
Eksergialyse av det norske samfunnet**

SAKSHANDSAMARAR

Ivar S. Ertesvåg og Michal Mielnik

OPPDRAAGSGJEVAR

Sintef Energiforskning AS

TR NR. A4991	DATO 1999-08-13	OPPDRAAGSGJEVAR REF.	PROSJEKTNR. 18E003
ELEKTRONISK ARKIVKODE J:\DOK\18\ISE\99002982.DOC	PROSJEKTANSVARLEG (NAMN, SIGN.) Ivar S. Ertesvåg	GRADERING Open	
ISBN NR. 82-594-1584-4	RAPPORTTYPE	FORSKNINGSSJEF (NAMN, SIGN.) Bjørn F. Magnussen	OPPLAG SIDER 78
AVDELING Varme- og strømningslære	BESØKSADRESSE Kolbjørn Hejes vei 1B	LOKAL TELEFAKS 73 59 35 80	

RESULTAT (samandrag)

Energibruken i det norske samfunnet er undersøkt ved ein eksergialyse. Analysen tek med alle resursar som går inn i samfunnet: energiberarar, malm og mineral, avling i jord- og skogbruk, fiske og fangst. Alt som går ut til forbruk og eksport vert også tilordna ein eksergi-verdi. Det gjeld varer som mat, metall, kjemiske produkt, og tenester som romvarme og transport. Analysen peikar ut dei områda der potensialet for dei største forbetringane ligg, og kor store dei er.

I analysen har vi halde utaskjers olje- og gassaktivitet og -eksport utanfor. Analysen gjeld resten av samfunnet. For analyse-året 1995 gjekk det til saman 1184 PJ eksergi inn i det norske samfunnet (PJ = petajoule = 10^{15} J = 3,6 TWh). Frå alt dette var det att 282 PJ i dei varer og tenester som vart produserte. Dette gjev ein utnyttingsgrad på 24 %.

Ulike energiformer har ulik kvalitet. Effektiv utnytting krev at energi vert nytta med den kvaliteten føremålet krev. I ein eksergialyse ser vi både på varneverdien som i ein vanleg energialyse, og på *arbeidsverdien* (eksergien). Eksergien er lik det maksimale mekaniske arbeidet ei energimengd kan utføre. For eit materiale er eksergien det teoretisk minste arbeidet som må til for å føre det til ein viss tilstand, til dømes rein aluminium frå malm eller magnesium frå sjøvatn.

Samfunnsområde som særleg peikar seg ut med svak energiutnytting, er romvarme, lys og utstyr m.m., næringsmiddel og transport. Alle desse har utnyttingsgrad under 20 % og utgjør kvar for seg ein stor del av energibruken. Treforedling, metallindustrien, mekanisk og kjemisk industri kjem ut med eksergiutnytting på 30-60%. Dette kjem først og fremst av at produkta (papir, aluminium, kjemiske produkt, osv.) inneheld mykje eksergi.

I rapporten er det er gjort greie for bakgrunn og metode, og detaljanslysar for kvar av sektorane. Vidare er resultatata drøfta og samanlikna med tilsvarande analysar for andre land.

STIKKORD

EIGENVALDE	Eksergi	Exergy
	Energiutnytting	Energy conversion

INNHALD

	Side
1 Hovedresultat: Utnyttning av energi og energikvalitet i Noreg	5
 DEL 1: GENERELT OM BAKGRUNN OG METODE FOR ANALYSEN	
2 Bakgrunn: Energiforvaltning	9
3 Termodynamikk, metode og datagrunnlag	10
3.1 Kort om det termodynamiske grunnlaget	10
3.2 Om analysemetoden	11
3.3 Systemgrense for analysen	11
3.4 Bruk av statistiske data	12
4 Litt om energi, varme, temperatur og eksergi	13
4.1 Nokre termodynamiske uttrykk	13
4.2 Døme: Varmekraftverk og kraft-varmeverk	16
4.3 Døme: Oppvarming og smelting av fast stoff	18
5 Drøfting av feilkjelder og alternative reknemåtar	19
5.1 Energisektoren	19
5.2 Prosess/bruker-sektorer	20
5.3 Energisystemet	21
5.4 Oppsummering av uvisse og eventuelle feil	22
6 Samanlikning med andre land	23
7 Litteraturliste	26
 DEL 2: DELANALYSAR	
8 Generelt om delanalysane	27
9 Tilgang på energi og eksergi	28
9.1 Tilgang på ulike råvarer og energibærere	28
9.2 Energi og eksergi	31
10 Eksergianalyse av trevare- og treforedlingsindustrien i Norge	33
10.1 Forbruk av eksergi fra energivarer:	33
10.2 Forbruk av råvarer:	33
10.3 Netto produsert eksergi:	34
10.4 Resultat:	35
11 Eksergianalyse av produksjon- og forbruk av mat i Norge	36
11.1 Ekserginnhold i korn, fisk, kjøtt, etc:	36
11.2 Netto tilgang:	36
11.3 Forbruk av energibærere:	38
11.4 Netto produsert eksergi:	38
11.5 Resultat:	39
11.6 Kommentar:	39
12 Eksergianalyse av aluminiumsindustrien i Norge	41
12.1 Forbruk av eksergi fra energibærere:	41
12.2 Forbruk av råvarer:	41
12.3 Netto produsert eksergi:	42
12.4 Resultat:	42
13 Eksergianalyse av ferrolegeringsindustrien i Norge	46
13.1 Introduksjon:	46
13.2 Forbruk av eksergi fra energibærere:	46
13.3 Forbruk av råvarer:	47

13.4	Netto produsert eksergi:.....	47
13.5	Resultat:.....	48
14	Eksergianalyse av stålindustrien i Norge	50
14.1	Forbruk av eksergi fra energibærere:.....	50
14.2	Forbruk av råvarer:.....	50
14.3	Netto produsert eksergi:.....	51
14.4	Resultat:.....	51
15	Eksergianalyse av ikke-jernholdige metaller (unntatt aluminium)	52
15.1	Forbruk av eksergi fra energibærere:.....	52
15.2	Forbruk av råvarer:.....	52
15.3	Netto produsert eksergi:.....	53
15.4	Resultat:.....	53
16	Oppsummering for stål- og metallindustrien totalt (unntatt aluminium)	44
16.1	Forbruk av eksergi:.....	44
16.2	Produksjon av eksergi:.....	44
16.3	Resultat:.....	44
17	Eksergianalyse av kjemisk industri i Norge	54
17.1	Forbruk av eksergi fra energibærere:.....	54
17.2	Forbruk av råvarer:.....	54
17.3	Netto produsert eksergi:.....	55
17.4	Resultat:.....	55
18	Eksergianalyse av transportsektoren i Norge	56
18.1	Forbruk av eksergi fra energibærere:.....	56
18.2	Bane- og veitransport:.....	56
18.3	Vanntransport:.....	56
18.4	Lufttransport:.....	57
18.5	Resultat:.....	57
19	Generelt om romvarme, lys og mekanisk arbeid	58
19.1	Mekanisk industri.....	58
19.2	Tjenesteytende næringer og husholdninger.....	59
19.3	Fordeling etter formål.....	59
19.4	Antagelser og estimater.....	60
19.5	Analyser.....	60
20	Eksergianalyse av hushold i Norge	61
20.1	Forbruk av eksergi fra energibærere:.....	61
20.2	Eksergi brukt til romvarme:.....	61
20.3	Eksergi brukt til varmvatn.....	63
20.4	Eksergi brukt til lys.....	63
20.5	Eksergi brukt til kjøling, elektrisk utstyr, m.m.....	63
20.6	Resultat.....	64
20.7	Kommentar:.....	64
21	Eksergianalyse av tjenesteytende næringer	66
21.1	Forbruk av eksergi fra energibærere:.....	66
21.2	Eksergi brukt til romvarme:.....	66
21.3	Eksergi brukt til belysning og elektrisk utstyr:.....	67
21.4	Eksergi brukt til motordrift (mekanisk arbeid):.....	68
21.5	Eksergi brukt til varmtvann:.....	68
21.6	Resultat:.....	68
21.7	Kommentar:.....	69
22	Eksergianalyse av "annen industri" i Norge	70
22.1	Introduksjon.....	70
22.2	Forbruk av eksergi fra energibærere.....	70
22.3	Eksergi brukt til mekanisk arbeid.....	70

22.4	Eksergi brukt til belysning, etc.	71
22.5	Eksergi brukt til varmtvann	71
22.6	Eksergi brukt til romvarme	71
22.7	Eksergi brukt til prosessvarme	72
22.8	Resultat	72
22.9	Kommentarer	73
23	Eksergialyse av romoppvarmingen i Norge	74
23.1	Introduksjon	74
23.2	Forbruk av eksergi fra energibærere	74
23.3	Resultat	74
24	Eksergialyse av belysning, el. artikler, prosessvarme, etc. i Norge	75
24.1	Introduksjon	75
24.2	Forbruk av eksergi fra energibærere	75
24.3	Resultat	75
25	Eksergialyse av mekanisk arbeid i Norge	76
25.1	Introduksjon	76
25.2	Resultat	76
26	Sluttmerknader og konklusjon	77
	Litt om måleiningar	79

1 Hovudresultat: Utnytting av energi og energikvalitet i Noreg

I dette avsnittet vert hovudresultata presenterte. Meir om bakgrunn, metode, drøfting og samanlikning med andre land følgjer i dei neste avsnitta. Deretter kjem delanalysane, sektor for sektor av det norske samfunnet.

Energibruken i det norske samfunnet er undersøkt ved hjelp av eksergianalyse. Eksergi er eit termodynamisk mål for energikvalitet. Eksergi er arbeidsevna, det maksimale mekaniske arbeidet ei energimengd kan utføre, – eller det minste arbeidet som må til for å føre eit materiale eller medium til ein viss tilstand. Alle energiformer og materialar har eit større eller mindre eksergi-innhald. Elektrisk og mekanisk energi har høg kvalitet, energien i høgtrykksdamp har middels kvalitet, varme ved romtemperatur har låg kvalitet, og termisk energi i havet har null kvalitet. Omvendt så treng ein ikkje energi med høg kvalitet for å varme opp eit rom eller for å koke matvarer.

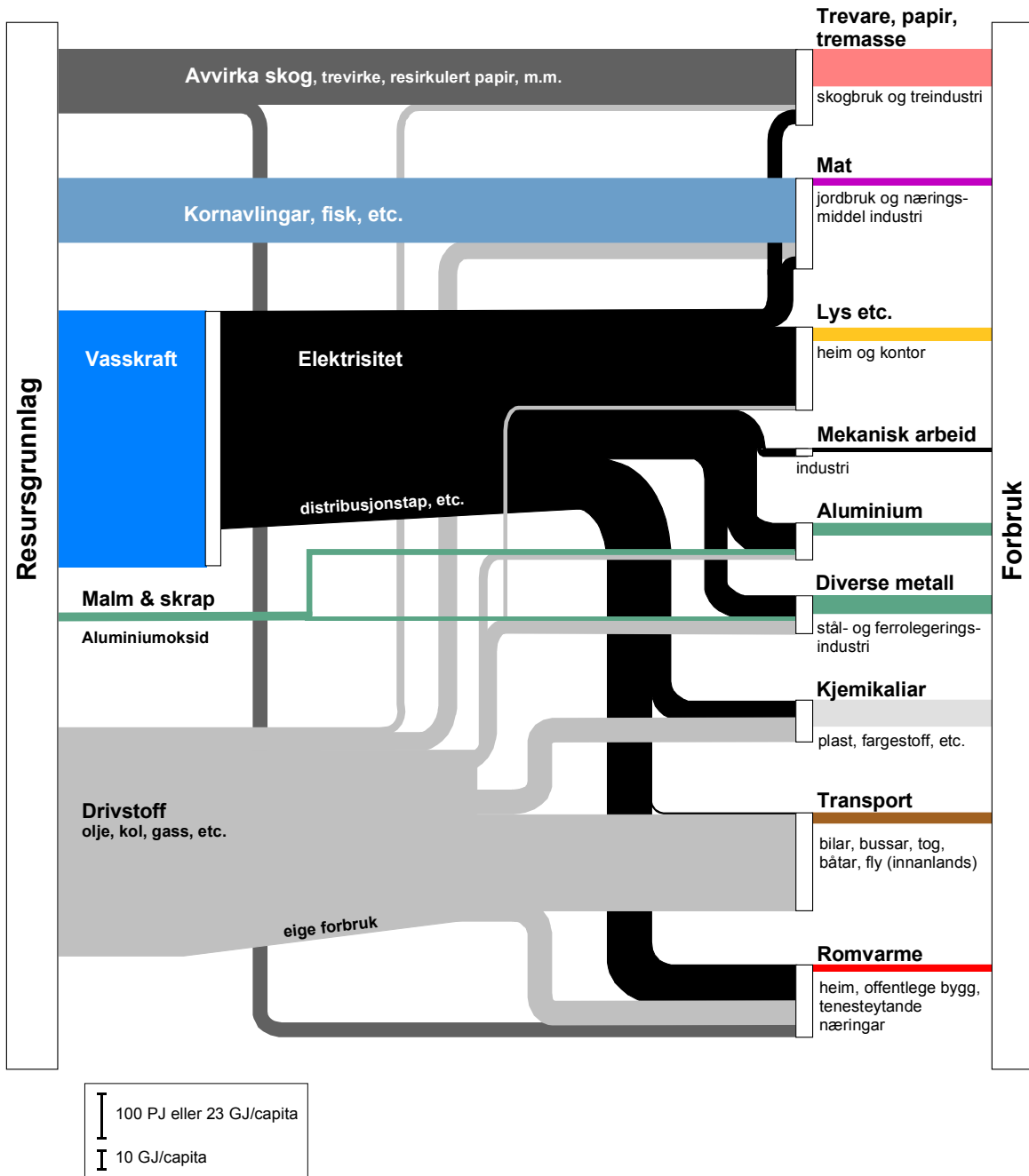
I eksergianalysar fører ein rekneskap med energien (dvs. varmeverdien til energien) på same måte som i vanlege energianalysar, og i tillegg fører ein rekneskap med arbeidsevna (kvaliteten) til energien.

Analysen tek med alle resursar som går inn i samfunnet: energiberarar, malm og mineralar, avling i jord- og skogbruk, fiske og fangst. Alt som går ut til forbruk og eksport vert også tilordna ein eksergi-verdi. Det gjeld varer som mat, metallprodukt, kjemiske produkt, og tenester som romvarme og transport. Analysen peikar ut dei områda der potensialet for dei største forbetringane ligg, og kor store dei er. Når ein ser dette i samanheng med moglege tekniske løysingar og praktisk gjennomføring, vil ein meir effektivt kunne setje inn tiltak som monnar.

For året som er analysert, 1995, gjekk det til saman 1184 PJ eksergi inn i det norske samfunnet. Frå alt dette var det att 282 PJ i dei varer og tenester som vart produserte. Dette gjev ein utnyttingsgrad på 24 %.

Tabell 1 Hovudresultat. Utnytting av energikvalitet (eksergi) i Noreg.

	Eksergi (PJ)	Del av samla inngang (%)
Inngang, samla	1184	100,0
Tap/brukt i energisektoren	140	11,8
Inngang til brukarsektorar	1031	87,1
Tap i brukarsektorar	751	63,4
Utgang frå brukarsektorar	282	23,8



Figur 1: Ekssergistraumen i det norske samfunnet, 1995, utanom utaskjers olje- og gassaktivitet. Den samla ekssergi-inngangen var 1184 PJ (278 GJ/cap), og ekssergien i produserte varer og tenester var 282 PJ (66 GJ/cap).

Tabell 2 Resultat frå dei ulike delanalysane utanom energisektoren; eksergi-inngang, eksergi-utgang og utnyttingsgrad.

Brukar-sektor	Eksergi-inngang (PJ)			Del av inng. (%)	Eksergi-utg. (PJ)	Del av utg. (%)	Utnytting (%)	Del av tap (%)
	Råvare	Energivr.	Sum					
Treforedling	104,6	36,1	140,7	13,6	71,2	25,2	51,2	9,3
Matvare	122,7	46,8	169,5	16,4	28,5	10,1	16,8	18,8
Aluminium	5,4	65,9	71,3	6,9	28,0	9,9	39,3	5,8
Stål/Metall	4,9	61,1	66,0	6,4	22,2	7,9	33,6	5,8
Kjemisk		106,6	106,6	10,3	64,0	22,7	60,0	5,7
Transport		189,5	189,5	18,4	31,1	11,0	16,0	21,2
Lys/utstyr		140,4	140,4	13,6	23,4	8,3	16,7	15,6
Mekan.arb.		11,2	11,2	1,1	5,6	2,0	50,0	0,7
Romvarme		136,0	136,0	13,2	8,2	2,9	6,0	17,0
Samla	237,6	793,6	1031,2	99,9	282,3	100,0	27,4	99,9
Tap (differanse inn-ut):				748,9				

Tabell 3 Alternativ fordeling av sektorane "Lys og utstyr m.m.", "Mekanisk arbeid", og "Romvarme". Dei tre siste linjene før "sum", kan bytast ut med følgjande inndeling.

Brukar-sektor	Eksergi-inngang (PJ)			Del av inng. (%)	Eksergi-utg. (PJ)	Del av utg. (%)	Utnytting (%)	Del av tap (%)
	Råvare	Energivr.	Sum					
Annan ind.		35,0	35,0	3,4	8,7	3,1	24,8	3,5
Hushald		166,2	166,2	16,1	19,9	7,0	12,0	19,5
Teneste		86,4	86,4	8,4	8,6	3,0	10,0	10,4

Analysen byggjer på statistikk frå Statistisk sentralbyrå, bransjeorganisasjonar, m.m. Ein legg til grunn dei prosessane og aktivitetane som faktisk er der. Spørsmålet om korleis vi skal, eller eventuelt ikkje skal, utføre aktivitetane, er viktig nok, men fell utanfor rammene for denne analysen.

Samfunnsområde som særleg peikar seg ut med svak energiutnytting, er romvarme, lys m.m., næringsmiddel og transport. Alle desse har utnyttingsgrad under 20 % og utgjer kvar for seg ein stor del av energibruken.

Mykje direkte elektrisk oppvarming gjer at **romvarme** kjem svært dårleg ut, med under 6% utnytting. Alvorleg satsing på varmpumper, som er ein kjend teknologi, ville hjelpe her. Mykje energi til **lys** går berre til varme, og med endå dårlegare utnytting. Vansken med å få til forbetringar i desse sektorane ligg i at det er svært mange aktørar, og umåteleg mange einingar. På den ande sida er mykje av utstyret standardisert, og difor vil den same løysinga kunne nyttast i mange tilfelle. Ein annan føremon er at teknologi som kan gjere energiutnyttinga til lys og romvarme monaleg betre, finst alt i dag.

Næringsmiddelsektoren kjem svakt ut av fleire grunnar. Energimessig sett gjev husdyr og oppdrettsfisk store tap. Næringsinnhaldet i slaktet er vesentleg lågare enn næringsinnhaldet i alt det foret dyret, fuglen eller fisken har ete. Vidare gjev svinn, eller uutnyttat organisk materiale, eit visst bidrag. Ein del av tapet er knytt til prosessar der høgkvalitetsenergi er nytta til varme ved moderate temperaturar (koking, tørking, oppvarming).

Også **transport**sektoren kjem svakt ut i denne analysen. Dette har fleire grunnar. Som ein viktig bakgrunn, må ein ta med seg at energien her går til mekanisk arbeid utført av termiske arbeidsmaskiner (bensin- og dieselmotorar, gassturbinar). Termodynamikken set ei avgjerande øvre teoretisk grense for energiutnyttinga i slike maskiner. Vidare går ein del av arbeidet ufråvikeleg til å overvinne friksjon og strøymingsmotstand. Sektoren er oppdelt i svært mange einskild-einigar: over to millionar bilar, båtar, fly, m.m. På den andre sida er det stort sett standardiserte innretningar i denne mengda, og dessutan ei viss utskiftingstakt. Det gjer at ein kan rekne med jamn forbetring etter kvart som transportmidla vert fornya.

Aluminiumsindustrien er eit døme på ein sektor med etter måten god utnytting, nær 40%. Det vil seie at produktet, hovudsakleg råaluminium, inneheld så stor del av den tilførte eksbergien. Vi kan også leggje merke til at berre 7% av den tilførte eksbergien ligg i råstoffet, medan elektrisitet utgjer 77% av den tilførte eksbergien.

Denne sektoren er særmerkt som ein einskapleg sektor med få, store einingar. Difor vil det reint praktisk liggje til rette for forbetringar her. Det gjeld i noko mon dei følgjande sektorane også.

Treforedling og trevare kjem ut med relativt høg utnytting, vel 50%, først og fremst fordi produkta framleis inneheld mykje eksbergi. Det same gjeld **kjemisk industri**.

Andre har gjort tilsvarende analysar for Sverige, Italia og Japan. Ser ein på den totale utnyttingsgraden åleine, kjem Noreg etter måten godt ut i samanlikning. Men dette kjem eine og åleine av stor tilgang på vasskraft. Elektrisitetsproduksjon frå vasskraft gjev små tap. Dine er det teknisk/økonomisk sett enklare å utnytte el.energi enn t.d. fossile brensel i mange industriprosessar. Dersom ein ser på energiutnytting utanom energisektoren, kjem Noreg ut om lag som dei andre landa.

Eit moment som ikkje kjem med i desse tala, er at det ikkje finst tekniske innretningar som fullt ut kan utnytte eksbergien i kjemiske og fassile brensel. Den beste teknologien gjev 35-55 % utnytting av brenselenergi; mot 90 % for vassfallenergi. Dersom den norske elektrisiteten var produsert med beste kolkraftteknologi (ca. 40%), ville vi kome ut med ei samla utnyttingsgrad på om lag 14 %. Dette er ei halvering, og svakare enn dei andre landa.

DEL 1: GENERELT OM BAKGRUNN OG METODE FOR ANALYSEN

2 Bakgrunn: Energiforvaltning

Energi er viktig i alle samfunn – anten det er steinalder, stålalder eller dataalder. For oss i Noreg er energi særleg viktig, både fordi vi lever i eit kaldt klima, fordi vi er eit "utvikla" samfunn, og fordi vi har store inntekter av energiekспорт.

Energiproduksjon og energibruk, iallfall slik det vert gjort i dag, har ein del skadeverknader for miljø og helse. Fossile brensel har uheldige og uvisse klimaverknader. Dei energiformene vi nyttar i dag, må også reknast som avgrensa resursar – dels fordi det finst endelege mengder av dei, dels fordi bruken av dei har verknader på helse, miljø og klima. Og endeleg er det økonomiske kostnader ved energibruk: Ein må betale for den energien ein brukar.

Alt dette peikar mot at energien vi har tilgjengeleg bør forvaltast med klokskap. Dette har minst to sider:

- Ein kan spørje om energibruken er naudsynt. – Treng vi så mykje lys og så mykje varme på så mange rom, treng vi reise med fly når det går tog, kan varetransporten utførast med mindre køyring (men kanskje meir lagring), kan aluminium frå elektrolyseomnen gå rett i støypeforma for detaljproduksjon? – Eller treng vi eigentleg lage *så mange* ting? Dette er spørsmål som går på kva ein gjer og ikkje gjer.
- Om vi har sett oss føre å gjere ting som krev energi, vert spørsmålet: – Kan dette gjerast med mindre resursar enn det vi gjer i dag? Kan vi få like god varme, like god transport, og industriprosessar med den same produksjonen, men likevel bruke mindre resursar?

Denne rapporten vil først og fremst sjå på en del av det siste spørsmålet: Alle energiformer har ein større eller mindre energikvalitet. Spørsmålet vert ikkje berre kor mykje energi vi treng til eit føremål, men også kor mykje energikvalitet vi treng.

Eit døme: For å varme opp 10 kg vatn frå 5 °C til 100 °C, treng vi 3,98 MJ varme (1,11 kWh). Men, teoretisk treng vi berre 0,62 MJ (0,17 kWh) elektrisk energi til dette. Det er 15% av varmen. Resten av varmen kan vi hente frå omgjevnadene med ei varmpumpe. For å koke (fordampe) dei 10 kg vatn, treng vi 22,6 MJ varme ved 100 °C. Av dette må 46% eller 10,3 MJ (2,86 kWh) vere elektrisk energi eller mekanisk arbeid.

Eit mål for energikvalitet er **eksergi** – som er det maksimale arbeidet ei energimengd kan utføre.

3 Termodynamikk, metode og datagrunnlag

3.1 Kort om det termodynamiske grunnlaget

Vi skal ikkje her repetere det termodynamiske grunnlaget for denne studien. Dei som studerer dette faget, les ei bok som til dømes Moran & Shapiro: *Fundamentals of engineering thermodynamics* (1998). Det er denne vi brukar i faga *Termodynamikk 1* og *2* ved NTNU. Det finst mange slike bøker, men ingen på norsk på dette nivået. Her finn vi det generelle grunnlaget i termodynamikk og ei innføring i eksergianalyse. Vidare har vi bøker som er meir retta mot eksergianalyse, særleg T.J. Kotas: *The exergy method of power plant analysis* (1995). Denne brukar vi i faget *Energiforvaltning* ved NTNU. Utrekning av eksergiverdiar for energistraumar og energimengder kan ein finne i generelle termodynamikk-bøker. Grunnlaget for å rekne ut eksergi for materialstraumar finn vi i boka til Kotas.

Denne særskilde greina av eksergianalyse, for eit heilt land eller samfunn, er utvikla av Gøran Wall. I avhandlinga si (1977) brukte han det svenske samfunnet 1975 og 1920 som døme på korleis teorien kunne nyttast. Seinare er det gjort analysar for mellom anna Japan 1985 (Wall, 1990), Italia 1990 (Wall, Sciubba & Naso, 1994), Sverige 1980 (Wall, 1986) og Sverige 1994 (Wall, 1997). Vidare er det gjort noko enklare analysar av Kanada 1986 (Rosen, 1992) og Brasil 1987 (Schaeffer & Wirtshafter, 1992).

Læra om samanhengen mellom varme og andre energiformer vert kalla termodynamikk, eller varmelære.

Frå gammalt av har ein visst at krefter i vatn og vind kan gjerast om til arbeid i vasshjul, vindmøller og segl. Endå mykje lengre har menneska kunne gjere brensel om til varme. Først med dampmaskinene til Newcomen i 1712 og Watt i 1769 kunne brensel og varme gjerast om til arbeid. Termodynamikken vart utvikla med bakgrunn i dette. Spørsmålet var kva samheng det var mellom varme og arbeid: –Kor mykje drivkraft er det i varme? Svaret vart at

- alt arbeid kan gjerast om til ei like stor mengd varme. Den varmen som vert omgjort til arbeid, gjev ei like stor mengd arbeid.
- berre ein viss del av varmen kan gjerast om til arbeid.

Dette er 1. og 2. hovudsetning (eller 1. og 2. lov) i termodynamikken. I følge 1. hovudsetning er alle energiformer likeverdige; dei har *same kvantitet*. Etter 2. hovudsetning er nokre energiformer meir verdifulle enn andre; dei har *ulik kvalitet*. Energimengda er kvantiteten. Den delen av energimengda som kan gjerast om til arbeid, arbeidsevna, er eit mål for kvaliteten, vi kallar det *eksergi*.

3.2 Om analysemetoden

I termodynamisk analyse definerer ein eit **system** med **grenser**, og med **straumar** av masse og energi over desse grensene. Eit system kan vere ein varmevekslar, ein fyrkjel, ein gassturbin (sjå Ertesvåg, 1998), eit prosessanlegg, eit brenselcellesystem (sjå Bedringås m.fl., 1997), eit fabrikkområde, eit land, atmosfæren. Ein føresetnad for ein slik analyse er at straumane over denne systemgrensa, og endringar i tilstanden innafor, kan identifiserast og kvantifiserast.

Denne studien er ein **eksergialanalyse** av eit definert system. Då har vi talfesta både massen, energien og eksergien (dvs. energikvaliteten) til dei straumane som kryssar systemgrensa.

3.3 Systemgrense for analysen

Det vi har definert som system for analysen, er **det norske samfunnet** – utan utaskjers olje- og gassaktivitet. Råolje og naturgass til eksport er halde utanfor analysen, og likeins den resursbruken som går med til å utvinne og transportere dei ut.

Inngang til systemet er alle importerte, hausta eller utvunne råvarer og energivarer: hausta biologiske produkt som fisk (ikkje oppdrett), avlingar, vilt, skogsvirke, mineralar og malm, olje, naturgass og kol (til innanlands forbruk), resirkulerte stoff som (retur-)papir og skrapmetall, utnytta vassfallsenergi, vindenergi, bølgeenergi, solenergi, osb.

Utgang av systemet er råvarer og varer (mat, treprodukt, kjemikaliar, metallvarer, og så bortetter) og tenester (oppvarming, lys, transport, mekanisk arbeid, m.m.) som går til forbruk eller eksport.

Biologiske produkt (matvarer, mat- og fôrplanter, fisk, vilt) vert rekna som inngang i det dei vert hausta eller importerte. Slakt av oppdrettsfisk og husdyr er ikkje inngang, men eit ledd i prosesskjeden mellom inngang (t.d. hausta dyrefor) og utgang (t.d. kjøtprodukt til forbruk, eller ferskfisk til eksport).

Elektrisitet er ikkje primærenergi, bortsett frå når han er importert. (I analyseåret, 1995, var nettoimporten svært liten.) Inngangen er den utnytta vassfallenergien, eller brensel til varmekraftverk.

Analysen tek utgangspunkt i dei prosessane som faktisk finst. Om vi har ein gammal fyrkjel, er han dårlegare enn ein ny. Men det er like fullt den gamle fyrkjelen som står der, og som energien går inn til. Transport kan ein alltid tenkje seg meir effektiv; meir kollektivtransport, betre motorar og drivverk, lettare køyrety, mindre og jamnare fart. Desse vurderingane fell utanfor ein slik analyse. Om du køyrer ein gammal, stor, tung bil med stor friksjon i hjul og drivverk, så gjer du det. Ein kunne lagt til grunn at du kunne bruke ein liten, lett og ny bil. Men skal ein gå inn på slike vurderingar, kjem ein lett til at du også "burde" reise kollektivt, sykle, eller kanskje at reisa strengt rekna ikkje var naudsynt. Slike vurderingar vil ikkje inngå i ein termodynamisk analyse som denne. Men vurderingane må gjerast på det kunnskapsgrunnlaget som slike analysar er med på å leggje.

3.4 Bruk av statistiske data

Dei ulike delanalysane som følgjer, tek utgangspunkt i tilgjengelege statistiske data for bruken av ulike materialar og energiberarar, produksjon av ulike produkt, og så bortetter. I somme sektorar er statistikken svært detaljert, i andre tilfelle er det sparsamt med data. Siktemålet med analysen er å skaffe fram eit total-bilete. Det gjer at vi ikkje kan, eller treng, finrekne på dei aller minste detaljane. Vi må vurdere kor viktig ein sektor er. Matvareproduksjon er eit døme på ein større sektor, med rikelege mengder statistiske data. Her har vi gått etter måten noggrant til verks. Mekanisk arbeid er ein sektor med svært få data for utgangen. Men sidan sektoren i seg sjølv er liten (vi kjenner energi-inngangen), gjer eventuelle feil i overslaget lite eller inkje for totalbiletet. Aluminiumsindustrien er ein sektor med eit visst omfang, med ein einskapleg struktur – og difor enkle, men nøyaktige data.

4 Litt om energi, varme, temperatur og eksergi

4.1 Nokre termodynamiske uttrykk

Energi finst i mange former, t.d. potensiell, kinetisk, elektrisk, kjemisk og termisk energi, arbeid og varme. Etter første hovudsetning er alle energiformer jamstilte og likeverdige. Etter andre hovudsetning har ulike energiformer ulik kvalitet. Denne kvaliteten måler vi etter evna til å gjere arbeid. Ei energimengde kan teoretisk gje ei viss mengde arbeid; dette kallar vi **eksergi** (tidlegare lærebøker brukar også nemningar som “maksimalt arbeid”, “tilgjengeleg energi”, “arbeidsevne”). Ein reversibel prosess kan gje dette arbeidet frå den energimengda det er snakk om. Resten av energien kan aldri gjerast om til arbeid.

Dersom vi har ei energimengd som vi overfører reversibelt frå ein tilstand til ein annan, vil eksergien vere den same. Dersom overføringa skjer ved ein irreversibel prosess (t.d. over ein endeleg trykkdifferanse eller temperaturdifferanse, eller det er friksjon i systemet), vil noko av eksergien (eller arbeidsevna) gå tapt. Dette tapte arbeidet eller tapte eksergien kallar vi **irreversibilitet**.

Eksergi i ei energimengd og irreversibilitet i ein prosess kan vi kvantifisere ved hjelp av første og andre hovudsetning.

- Eksergi i varme

Eksergi i ei varmemengd Q [J] avgjeven ved ein temperatur T [K] er

$$E^{\text{ex}} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad [\text{J}]$$

Her er T_0 [K] temperaturen i omgjevnadene. Dette er også det teoretisk minste arbeidet som må til for å levere varmemengda Q ved temperaturen T , dvs i ei varmepumpe.

For ein varmestraum \dot{Q} [J/s] vert uttrykket for \dot{E}^{ex} [J/s] likeins.

Uttrykket i parentesen er identisk med Carnot-verknadsgraden (Carnot-faktoren); dvs det største arbeidet vi kan få ved å veksle varme frå temperaturen T til temperaturen T_0 i omgjevnadene.

Ved ei varmeoverføring (utan arbeid) \dot{Q} frå temperatur T_1 til temperatur $T_2 < T_1$ er eksergitapet eller irreversibiliteten:

$$\dot{E} = \dot{E}_1^o - \dot{E}_2^o = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_o}{T_1} - 1 + \frac{T_o}{T_2} \right) = \dot{Q} T_o \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Dette gjeld t.d. i ein varmevekslar.

- Eksergi i elektrisitet og mekanisk energi

Eksergi i elektrisk energi er lik energimengda: $\dot{E}_{el} = \dot{W}_{el}$. Det same gjeld mekanisk arbeid, kinetisk og potensiell energi.

- Eksergi i strøymande medium

Eksergi i eit strøymande medium (arbeids- eller varmemedium) – dvs for ein massestrøm \dot{m} [kg/s] inn/ut av eit ope system:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (h - h_o) - T_o (s - s_o) && \text{[J/kg]} \\ \dot{E} &= \dot{m} \varepsilon && \text{[J/s]} \end{aligned}$$

Her er h spesifikk entalpi [J/kg], og s er spesifikk entropi [J/kg/K] for mediet; $h_o = h(T_o, P_o)$ og $s_o = s(T_o, P_o)$; der P_o [Pa] er trykket i omgjevnadene. Desse storleikane kan vi ofte hente frå tabellverk (databasar).

- Eksergi i masse (lukka system)

Eksergi i ei masse m [kg] (lukka system) vert uttrykt noko annleis enn for ein massestrøm (dette følgjer av definisjonen og av hovudsetningane):

$$\begin{aligned} \xi &= (u - u_o) + P_o (v - v_o) - T_o (s - s_o) && \text{[J/kg]} \\ \Xi &= m \xi && \text{[J]} \end{aligned}$$

Her er u spesifikk indre energi [J/kg], og v er spesifikt volum [m³/kg]; $u_o = u(T_o, P_o)$ og $v_o = v(T_o, P_o)$.

For faseovergang (reversibel) ved konstant temperatur T_s [K] gjeld

$$s_2 - s_1 = \frac{h_2 - h_1}{T_s} \quad (\text{ved konstant trykk})$$

$$s_2 - s_1 = \frac{u_2 - u_1}{T_s} \quad (\text{ved konstant volum})$$

For eit reint stoff skjer prosessen ved konstant temperatur. For smelting/storkning er $\Delta u \approx \Delta h$. For blandingar av fleire stoff skjer faseovergangen over eit temperaturintervall, slik at uttrykka vert noko meir samansette.

- Kjemisk eksergi: eksergi i materialar

Dei samanhengane som er lista opp ovanfor, gjeld for system utan kjemiske reaksjonar og for blandingar der samansetnaden ikkje vert endra.

For å føre rekneskap med energi og eksergi, må vi ha ein referanse. Det er omgjevnadene. Ovanfor har vi sett på det arbeidet ein kan ta ut av eit medium når det vert ført til mekanisk og termisk jamvekt med omgjevnadene, dvs til same trykk og temperatur. Kjemisk eksergi er det arbeidet ein kan få frå eit stoff ved å føre det frå mekanisk/termisk jamvekt og heilt til kjemisk jamvekt med omgjevnadene.

For kvart grunnstoff vert det definert ein *mest stabil tilstand*. For oksygen er dette atmosfærisk oksygen, dvs. O_2 med partialtrykket 0,2040 bar (0,2067 atm). For jarn, Fe, er referansen hematitt, Fe_2O_3 , med ein viss konsentrasjon i jordskorpa (Kotas, 1995). Alle andre jarnsambindingar får eksergi i høve til dette. Rein eller opprika hematitt (Fe_2O_3) har ein eksergi lik det teoretisk minste arbeidet som må til for å skilje ut hematitten. Magnetitt, Fe_3O_4 , har ein eksergi lik det minste arbeidet som må tilførast for å lage Fe_2O_3 ved referansekonsentrasjonen om til Fe_3O_4 og atmosfærisk oksygen. Reint jarn har eksergi lik det minste arbeidet som må til for å gjere Fe_2O_3 om til reint jarn og atmosfærisk oksygen.

Ein prosess som brukar Fe_3O_4 til råvare, vil få tilført noko eksergi med råvarestraumen. Når prosessen nyttar skrapjarn som jarnkjelde, vil han få tilført ei større eksergimengd med råvarene enn om han brukte Fe_3O_4 .

Blandingar der stoffa har andre konsentrasjonar enn i omgjevnadene, vil også ha eksergi. Referansen for karbon er CO_2 ved partialtrykket i atmosfæren (0,000294 bar). Rein CO_2 ved trykk 1 atm (1,01325 bar) vil såleis ha kjemisk eksergi lik ekspansjonsarbeidet frå 1 atm til 0,000294 bar. Dette er også lik det minste arbeidet som må til for å separere CO_2 frå atmosfæren.

Ferskvatn har kjemisk eksergi fordi det har ein annan samansetnad enn det havet det renn ut i. Eksergien svarar til eit vassfall på om lag 270 m. Dette potensialet ligg til grunn for tanken om *saltkraft*.

4.2 Døme: Varmekraftverk og kraft-varmeverk

Ein skil gjerne mellom *varmekraftverk*, som berre skal produsere elektrisk energi, og *kraft-varmeverk*, som attåt elektrisk energi også skal levere varmt vatn/damp til oppvarming eller prosessar (også kalla “kogenerering”). Eit *varmeverk* leverer berre varme, ikkje elektrisk energi.

Eit moderne fastbrenselfyrt (kolfyrt) kraftverk gjev elektrisk energi lik omlag 40-45% av brenselenergien. For gassfyrte kraftverk er talet omkring 55-60%. Resten av energien går ut med kjølevatn og røykgass. I slike oppgåver er det vanlegvis ikkje gjort greie for kva som er med i reknestykket; dvs om tap ved oppstart/nedkøyring, eigenforbruk, brenselhandsaming (t.d. knusing, transport) m.m. er rekna inn.

Ved å utnytte spillvarmen til oppvarming eller prosessvarme kan opp mot 90 % av brenselenergien utnyttast til varme og elektrisk energi. Men då vert elektrisitetsdelen mindre. Den samla eksergileveransen vert også mindre enn for eit reint kraftverk.

Ein stor del av eksergitapet skjer i forbrenninga; varmeveksling over store temperaturdifferansar er ei anna stor kjelde til irreversibilitet.

Døme: Tre alternativ for kraftverk og kraft-varmeverk

Vi vil ha eit fastbrenselfyrt anlegg, der innfyrt brenselenergi (brennverdi til brensløst) er sett til 100 % (eller 100 energi-einingar, om ein vil). Alternativa er

- 1) leverer 40 % elektrisk energi; ikkje varme.
- 2) leverer 30 % elektrisk energi; 40 % termisk energi som vatn til fjernvarme (tur 120°C; retur 80°C)
- 3) leverer 25 % elektrisk energi; 20 % termisk energi som damp ved 500°C, 20 bar, (retur: vatn 80°C, 1 bar) og 20% termisk energi som vatn til fjernvarme (120°C, retur 80°C).

Etter 1. hovudsetning har vi størst utbytte i tilfelle 2: 70% av brenselenergien.

Vi kan rekne ut eksergiinnhaldet i dei tre tilfella, og let omgjevnadene ha $T_o = 273\text{K}$ (0°C):

1) kraftverket leverer el.energi = eksergi, 40 % av brenselenergien (brennverdien)

2) vatn ved 120°C kan teoretisk avgje ei varmemengd $h-h_o = 504 \text{ kJ/kg}$, som inneheld ei eksergimengd $\varepsilon = 87 \text{ kJ/kg}$, eller 17% eksergi. Verdiane for entalpi og entropi hentar vi frå tabellverk, t.d. i ei termodynamikk-bok. Returvatnet, 80°C , kan framleis avgje ei varmemengd på 335 kJ/kg , og har ein eksergi på 41 kJ/kg , eller 12% av varmemengda. For oppvarming frå 80°C til 120°C må det tilførast ei varmemengd på 169 kJ/kg , og ei eksergimengd på 45 kJ/kg som er 27% av den tilførte varmemengda.

Samla eksergi (elektrisitet og vatn) *ut frå* kraft-varmeverket er $(30\%) + 0,27 \cdot (40\%) = 41\%$, rekna av brennverdien.

Tek vi omsyn til at fjernvarmen berre vert nytta til romvarme (20°C), vert eksergimengda 7% (ikkje 27%) av energimengda. Den leverte eksergien vert redusert til 33%.

3) damp ved 500°C , 20 bar kan teoretisk avgje ei varmemengd $h-h_o = 3468 \text{ kJ/kg}$, som inneheld ei eksergimengd $\varepsilon = (h-h_o) - T_o(s-s_o) = 1439 \text{ kJ/kg}$, eller 41,5 % eksergi. Returvatnet på 80°C må tilførast ei varmemengd på 3133 kJ/kg , og ei eksergimengd på 1397 kJ/kg som er 45% av varmemengda.

Samla eksergi (el., damp og vatn) *ut frå* kraft-varmeverket er $(25\%) + 0,45 \cdot (20\%) + 0,27 \cdot (20\%) = 40\%$, rekna av brennverdien.

Når fjernvarmen er rekna som romvarme (sjå ovanfor), vert dette redusert til 35%.

Her har vi valt alle tala “runde”, for å gjere reknedømet enkelt. Tala er såleis noko tilfeldige, men dei er ikkje urealistiske. Sjølv om dei kan vere litt annleis i praksis, vil poenget vere det same: Eit kraft-varmeverk med fjernvarme gjev ikkje noko særleg meir eksergi enn eit reint kraftverk, og det kan like gjerne gje mindre. Den mogelege utnyttinga hjå sluttbrukaren vert mindre.

Dersom elektrisiteten skal brukast til direkte oppvarming i panelomnar, vil naturlegvis tilfelle 2 kome best ut, det som gjev mest energi. Men – som vi veit – lyspærer, datamaskiner, kaffitraktarar, elektrolyseomnar og elektromotorar verkar dårleg på fjernvarme. Det vert dessutan eit spørsmål om kva ein skal gjere med fjernvarmen utanfor varmesesongen. I ei samfunnsmessig vurdering av dei ulike tilfella, må ein også ta med bruk av varmepumper til oppvarming i tilknytning til dei tre tilfella. Då ville el.energien kunne omformast til omlag 3-5 gonger så mykje varme for romoppvarming.

4.3 Døme: Oppvarming og smelting av fast stoff

Vi brukar aluminium (Al-99) som døme, og reknar spesifikk varmekapasitet $C = 0,9$ kJ/kg/K (konstant), smeltepunkt $T_s = 660^\circ\text{C}$ (933 K), og smeltevarme $h_s = u_s = 400$ kJ/kg. Det fordampar ved 2450°C .

Vidare reknar vi at det ikkje utvidar seg vesentleg (eller rettare: at utvidinga ikkje har noko å seie for analysen), at spesifikk varme er konstant og lik for fast og flytande aluminium, og at det har ein definert smeltetemperatur. Vi tenkjer oss at massen har ein start-temperatur på $T_1 = 300^\circ\text{C}$ (573 K), at ho vert varma opp til $T_2 = 1000^\circ\text{C}$ (1073 K), og at omgjevnadene har $T_0 = 273\text{K}$ (0°C).

Tilført energi vert: $\Delta u = u_2 - u_1 = C(T_2 - T_1) + u_s = 1030$ kJ/kg.

Tilført eksergi er: $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = C(T_2 - T_1) + u_s - T_0 C \ln \frac{T_2}{T_1} - T_0 \frac{u_s}{T_s} = 717$ kJ/kg,

eller 70% av tilført energi.

Dette inneber at berre 30 % av oppvarminga kan dekkjast med lågverdig varme, resten (70 %) må dekkjast med høgverdig energi (elektrisk energi – anten direkte eller for å drive ei varmpumpe).

Sidan samansetnaden ikkje vert endra, er kjemisk eksergi heller ikkje endra.

Dette reknedømet føreset ideelle prosessar; dvs. tapsfrie og reversible prosessar. I eit praktisk tilfelle vil ein del av eksergien gå tapt i overføringa mellom varmekjelde og massen som skal varmast opp. Reknedømet vert såleis eit grensetilfelle for den praktiske prosessen; ein kan ikkje på nokon måte få til noko betre.

4.4 Døme: Aluminium frå aluminiumoksid

For å omdanne aluminiumoksid (Al_2O_3) til råaluminium, må det tilførast 31,0 MJ energi pr. kg aluminium. Dette er entalpidifferansen når vi tenkjer oss ein ideell, teoretisk prosess, utan varmetap eller andre energilekkasjar i prosessen. Vi tenkjer oss også at stoffa før og etter prosessen har same temperatur (25°C). Etter *første hovudsetning* kan ein bruke energi frå spillvarme til dette. Men ser vi på den kjemiske eksergien og brukar *andre hovudsetning*, må det tilførast 29,1 MJ eksergi. Altså må 94% av energien vere elektrisk energi og annan høgverdig energi. Denne mengda (29,1 MJ/kg) er altså den *teoretisk minste* eksergimengda som må til for å lage aluminium av oksid. Dersom reduksjonsmiddelet er reint karbon, vil det tilføre 10,9 MJ eksergi. Resten, 18,2 MJ, må vere elektrisitet. Ein praktisk prosess krev også oppvarming og smelting, som vi såg på ovanfor. Vidare vil ein reell prosess alltid måtte medføre ein del tap.

5 Drøfting av feilkjelder og alternative reknemåtar

Dei fleste og viktigaste talverdiane er henta frå offentlege statistikkar og bransjestatistikkar. Dette gjeld slike mengder som tilførsle/produksjon og bruk av elektrisitet, olje, kol, naturgass, skogsvirke til industri, omsette fangstar og avlingar, malm, råmetall og trevareprodukt. Dette er i hovudsak den venstre delen av hovudfiguren, og den industrielle/kommersielle delen av den høgre delen.

I dette avsnittet vil vi drøfte dei mest uvisse energi/eksergi-mengdene, og sjå kor store eventuelle feil i overslaga må vere for å gje eit visst utslag i det totale resultatet. Når det er sagt, må det presiserast at ein ikkje kan legge saman desse eventuelle avvika, og finne ein "mogeleg total feil". Litt enkelt sagt vil gjerne ulike feil slå kvar sin veg, og såleis motverke kvarandre.

5.1 Energisektoren

Energirekneskapan frå Statistisk Sentralbyrå er ein sentral del av datagrunnlaget. Der finn vi ein post ”**Statistiske feil**”. For energivarer er desse feila er i alt 37 PJ (rekna som energi). Det er 3,8% av primærtilgangen innanlands eller 4,0% av registrert bruk utanom energisektoren. På same måte er det ein viss skilnad i eksergimengda ut frå energisektorane (tabellen i avsnittet om energitilgang) og summen av inngang til delanalysane (tabellen under ”Hovudresultat”). Denne differansen er 13 PJ, eller 1,1 % av eksergitilgangen.

Dersom den samla eksergi-inngangen vert endra 4% (råstoff og energivarer), vert den samla utnyttingsgraden endra med 1 %-poeng.

For **vassenergi** er det teke utgangspunkt i produksjonen av elektrisitet, og så rekna med eit tap på 15%. Dette tapsoverslaget er nytta i offisielle statistikkar for alle OECD-land. Det røynelege talet vil variere noko, både frå kraftverk til kraftverk, og over sesongen. Vi ser 15% over året som eit rimeleg overslag for Noreg. Dersom vi set tapet 5%-poeng opp eller ned, vert den samla eksergitilgangen endra med 3%-poeng, og den samla utnyttingsgraden vert endra med 1%-poeng.

Eksergi i ferskvatn (pga. salt-innhaldet i havet) er ikkje rekna med. Det er denne eksergien ein tenkjer seg å utnytte som ”saltkraft”. Vi kunne teke dette med, dersom vi visste kor stor mengd vatn som gjekk rett i havet frå utbygde vassfall. Ei enkelt overslag kan tyde på 5-10% tillegg i vassfallenergien, som ville minke den samla utnyttingsgraden med 1-2 %-poeng.

I statistikken er **ved til romvarme** rekna til 24,6 PJ energi, eller 2,7 % av energibruken. Det meste av dette er ikkje-kommersielt, og såleis uregistrert. Mengda har Statistisk Sentralbyrå rekna ut på grunnlag av spørjeundersøkingar.

Eksergi i brensel har vi rekna som kjemisk eksergi, slik det er definert i termodynamikkbøker, t.d. Kotas (1995) eller Moran & Shapiro (1998). Det gjev ein verdi litt over nedre brennverdi, men (oftast) under øvre brennverdi. Statistikkane oppgjev energi for brensel som nedre brennverdi (for brenselved: effektiv brennverdi), og såleis vert omrekningsfaktoren frå energi til eksergi litt over 1. Scheffer og Wirtshafter (1992) og Rosen (1992) har rekna på same måten i analysane for Brasil og Kanada. Wall (1997, 1994, 1990, o.fl.) har rekna kjemisk eksergi lik nedre brennverdi. Om vi hadde gjort det i denne analysen, ville eksergi-inngangen vore 2,1% mindre, og den totale utnyttingsgraden 0,5 %-poeng større.

5.2 Prosess/brukar-sektorar

I ein analyse av eit så mangfelt og komplisert system som eit heilt land, er det alltid ein viss fare for at det er **noko vi har oversett**. Det kan tenkjast her også. På same måte som for statistiske feil (sjå ovanfor), må den samla inngangen endrast med 4% (eller nær 50 PJ) for å endre utnyttingsgraden med 1 %-poeng. Ei slik endring ville svare til 1/8 av alle petroleumsprodukt, eller nær halvdelen av alt trevirke. Også dersom eksergi-utgangen vart endra 4% (11 PJ), ville den samla utnyttingsgraden verte endra med 1 %-poeng.

Det er noko uvisst korleis **lagerendringar** kjem inn i dei tala vi har nytta. Det gjeld både lager av energivarer hjå brukarane, og lager av industriprodukt. Dette kan vere rekna ulikt i dei statistikkane vi har nytta. Nokre taloppgåver kan vere for varer levert frå produsenten, medan andre kan vere for produksjonen. Slike avvik kan slå begge vegar, og vi har ikkje nokon grunn til å rekne med at det gjev nemneverdig utslag i totalbiletet (jf. drøfting ovanfor). I energisektoren er lagerendringar teke omsyn til i energistatistikken.

Tre brukar-sektorar er – med kvar sine grunnar – vanskelege å setje tal på. Det er kjemisk industri, transport, og romvarme. Inngangen til desse tre sektorane finn vi frå statistikkane. Men utgangen kan vere vanskeleg å talfeste nøyaktig.

Kjemisk industri er så vidfemnande og mangfeldt at det vert svært tidkrevjande å analysere alt det statistiske materialet som faktisk finst. Vidare må ein, for å gjere ein eksergianalyse, vite samansetjinga av dei ulike produkta. Dette er opplysningar som kan vere vanskeleg å finne fram til, eller få tilgang til. Vi har rekna utnyttingsgraden til 60%. Faktoren er høg fordi mange kjemiske produkt inneheld mykje energi og eksergi – dei fleste kan teknisk sett nyttast som brensel. Dersom vi sette faktoren 10%-poeng opp eller ned, ville dette endre samla energi/eksergi-utgang med 4%-poeng og den samla utnyttingsgraden med 1%-poeng.

For **transportsektoren** vert det mest eit spørsmål om kva som er "nyttig" transportarbeid. I litteraturen kan ein finne verknadsgrader (utnyttingsgrader) helt ned i 5-10%. Då har ein lagt ideelle tilhøve til grunn, t.d. friksjonsfri kraftoverføring, minimalisert strøymingsmotstand (luft/vatn) og rullestand. Kanskje har ein også lagt til grunn ein referanse med optimal kapasitetsutnytting (last/passasjer). For overslaga i denne analysen har vi lagt til grunn den transporten som faktisk skjer, og med det materiellet som faktisk vert nytta. Om ting burde/skulle/kunne vore annleis, så held vi det utanfor denne analysen. Med denne reknemåten vert arbeid for å overvinne friksjon og rørslemotstand eit naudsynt (og dermed "nyttig") arbeid for å drive transporten. For transportsektoren er utnyttingsgraden rekna til 16,4%. Dersom ein set dette talet 6%-poeng opp eller ned, vert den samla energi/eksergi-utgangen endra med 4%-poeng og den samla utnyttingsgraden med 1%-poeng.

Romvarme er den tredje sektoren det er vanskeleg å gje nøyaktig utnyttingsgrad for. Dette er drøfta under delanalysen for "Hushald". Ein modell av Wall (1986, 1997, o.fl), som er nytta i analysar m.a. for Sverige, fann vi var svært misvisande for vårt klima. Som eit overslag har vi sett utnyttingsgraden til 6% på landsbasis. Til samanlikning har Wall (1986) funne 5% som ein representativ verdi for Sverige. Det er lite truleg at feilmarginen her er meir enn 2-3 %-poeng; men verdien på 6% er heller for liten enn for stor. Dersom ein set utnyttingsgraden 4%-poeng opp eller ned, vert den samla energi/eksergi-utgangen endra med 2%-poeng og den samla utnyttingsgraden med 0,5%-poeng.

5.3 Energisystemet

I analyse-året 1995 var det ein svært liten netto krafteksport. I analysen er det lagt til grunn at all elektrisitet brukt i Noreg er vasskraft produsert i Noreg. I andre analysar (t.d. av Italia og Brasil) er importert el.energi rekna som tilførsle utan tap. Tapet vert lagt til det landet der krafta vert produsert. Med ein slik reknemåte ville ikkje vårt bilete verte endra, sjølv om vi tok omsyn til kraftutveksling.

Eit nytt kolkraftverk har verknadsgrad eller utnyttingsgrad omkring 40%. Den samla vest-europeiske kraftproduksjonen har lågare utnyttingsgrad enn dette, truleg om lag 30%. For vasskraft reknar ein 85% utnytting. Ein kunne rekna den norske kraftmarknaden som ein del av den europeiske, og dessutan lagt produksjonstapet på brukaren i staden for på produsenten. Om vi på denne måten hadde rekna utnyttingsgraden for el.produksjon til 40%, ville den samla utnyttingsgraden vorte halvert, til om lag 12 %.

Eit moment som ikkje kjem med i denne analysen, er at det ikkje finst tekniske innretningar som fullt ut kan utnytte eksergien i kjemiske og fissile brensel. Den beste teknologien gjev 35-55 % utnytting; mot 90% for vassfallenergi. Vi kunne ha innført ein

"praktisk eksergi" for brensel, basert på beste teknologi. Då ville eksergien i naturgass verte omlag 0,60 gongar nedre brennverdi (ikkje 1,04 gongar), for olje 0,50, for kol og ved 0,40, og for fissil varme 0,35. Desse tala er omtrentlege, og dei vil auke med tida etter som utstyr vert forbetra. Ein slik reknemåte ville gje ein utnyttingsgrad for Noreg som var noko større. Men for dei andre landa som er analyserte ville auken vere monaleg større, og Noreg ville kome svakt ut i samanlikning.

5.4 Oppsummering av uvisse og eventuelle feil

Ein kan seie at det er noko uvisse knytt til dei talverdiane vi har rekna med og kome fram til her. Men like fullt skal det store endringar til i datagrunnlag og føresetnader for delanalysane, før det vert monalege endringar i totalresultat og konklusjon. Det einaste som vil gjere større endring i resultatet er korleis ein ser på energisystemet; om det er eit isolert norsk system, eller om det er ein del av det europeiske energisystemet.

6 Samanlikning med andre land

Det er gjort tilsvarende analysar for fleire andre land. I avhandlinga si brukte Gøran Wall (1977) det svenske samfunnet 1975 og 1920 som døme på korleis teorien kunne nyttast. Seinare er det gjort analysar for mellom anna Japan 1985 (Wall, 1990), Italia 1990 (Wall, Sciubba & Naso, 1994), Sverige 1980 (Wall, 1986) og Sverige 1994 (Wall, 1994). Vidare er det gjort noko enklare analysar av Kanada 1986 (Rosen, 1992) og Brasil 1987 (Schaeffer & Wirtshafter, 1992).

Tabellane som følgjer viser ei samanstilling av nokre tal frå desse analysane, saman med vår analyse. Den første tabellen viser samla eksergi-inngang og –utgang rekna pr. innbyggjar.

Tabell 4 Samla eksergi-inngang og utgang rekna pr. innbyggjar (GJ/cap)

Brukar- sektor	Noreg 1995	Sverige 1994	Italia 1990	Japan 1985	Sverige 1980	Brasil 1987 ^{*)}	Kanada 1986 ^{*)}
Inngang	278	310	140	150	305	41,7	323
Utgang	68	43	25	31	60		

^{*)} Berre energivarer.

Den neste tabellen viser utnyttingsgrada for

energisektoren: Dette er eksergi levert frå energisektoren, dividert på eksergi-inngang til energisektoren. Vi tek med postane kol, koks, petroleum, naturgass, vassfall og elektrisitet i tabell 7.

elektrisitetsproduksjon: El.energi (eksergi) levert, dividert på eksergi til el.produksjon.

brukarsektorar: Samla eksergi-utgang dividert på eksergi levert til prosessar (dvs. alle sektorane til høgre i hovudfiguren).

Total: Samla eksergi-utgang, dividert på samla eksergi-inngang

Tabell 5 Utnyttingsgrader (eksergi) for ulike samfunn

	Energisektor	el.produksjon	brukarsekt.	Total
Noreg 1995	0,85	0,85	0,27 (0,28) ^{*)}	0,24
Sverige 1994	0,60	0,42	0,20	0,14
Italia 1990	0,76	0,43	0,21	0,17
Japan 1985	0,69	0,32	0,30	0,21
Sverige 1980	0,87	0,48	0,25	0,20
Brasil 1987		0,73		
Kanada 1986		0,53		

^{*)} Talet i parentes kjem fram om ein brukar Walls reknemåte for kjemisk eksergi og for eksergi i fjernvarme. Dei andre tala her vert ikkje endra.

For å kaste lys over dei skilnadene tabellen viser, kan vi sjå på strukturen i energisystemet i dei ulike landa. Den som har mykje vassfallenergi, får høg utnyttingsgrad i energisektoren. Termiske kraftproduksjon er underlagt grenser gjevne av 2. hovudsetning i termodynamikken, og må såleis gje lågare utnyttingsgrad enn vasskraft. Vi tek med typiske verknadsgrader i tabellen også, mest som ei teneste for lesaren. Dette er rundelege tal med monaleg spreining, og er ikkje nytta i utrekningane.

Noreg har ein stor del av inngangen som vassenergi, og all el.energi er frå vasskraft, slik at el.energi og vasskraft utgjer ein stor del av energi til prosessane. Dette gjev ein "dobbel føremon" i analysen. For det første er omformingstapet for vasskraft vesentleg mindre enn for annan kraftproduksjon. For det andre er elektrisitet som energiform teknisk sett enklare å utnytte effektivt enn til dømes brenselenergi.

Tabell 6: Levert el.energi til brukar, fordelt etter kjelde. Del elektrisitet og vasskraft-el. til brukarsektorar.

	Fordeling av tilgang på elektrisitet etter kjelde					el.del av energi til brukarsekt.	vasskr.del av energi til brukarsekt.
	vasskr	geo/bio	fossil	fissil	import		
Noreg 1995	1	0	0	0	≈0	0,49	0,49
Sverige 1994	0,42	≈0	0,07	0,51	≈0	0,41	0,18
Italia 1990	0,14	0,01 (g)	0,71	0	0,14	0,16	0,03
Japan 1985	0,14	≈0	0,62	0,24	≈0	0,18	0,03
Sverige 1980	0,61	0	0,11	0,26	≈0	0,25	0,17
Brasil 1987	0,85	0,005 (b)	0,06	0,005	0,08	0,13 ^{*)}	0,12 ^{*)}
Kanada 1986	0,66	0	0,19	0,15	≈0	0,20 ^{*)}	0,13 ^{*)}
Typisk verknadsgrad	0,85	0,2/0,3	0,3-0,5	0,3	1		

^{*)} Berre energivarer

Ulikskapar i den industrielle strukturen vil også forklare ein del av skilnadene. Til dømes gjev kjemisk industri høgare utnyttingsgrad enn stålindustri. Dette kjem mellom anna av at kjemiske produkt i seg sjølv inneheld mykje av den tilførte eksergien. Mange kjemiske produkt kan framleis teknisk sett reknast som brensel. Vidare vil eksergiutnyttinga i romvarme og transport vere mindre enn i industrien, slik at fordelinga mellom industri og andre verkar inn på den totale utnyttingsgraden. For Sverige spesielt ser vi at industridelen har gått ned frå 0,85 til 0,67 frå 1980 til 1994. Dette er ein del av forklaringa på fallet i den totale utnyttingsgraden frå 0,20 til 0,14. Ein annan grunn er at kjernekraft-delen har auka mykje.

Tabell 7: Relativ fordeling av eksergi-utgang på dei ulike industrielle sektorane

Brukar-sektor	Noreg 1995	Sverige 1994	Italia 1990	Japan 1985	Sverige 1980
Treforedling	0,26	0,44	0,11	0,16	0,66
Matvare	0,05	0,10	0,16	0,12	0,08
Aluminium	0,10	0	0,01	0	0
Stål/Metall	0,08	0,08	0,18	0,18	0,05
Kjemisk	0,23	0,04	0,25	0,26	0,06
Mekan.ind.	0,02	0,05	0,05	0,00	0,05
Sum industri	0,72	0,67	0,70	0,72	0,85

Tabell 8 Relativ fordeling av eksergi-inngangen til brukarsektorar innafor ulike samfunn.

Brukar-sektor	Noreg 1995	Sverige 1994	Italia 1990	Japan 1985	Sverige 1980
Treforedling	0,14	0,31	0,06	0,06	0,22
Matvare	0,16	0,18	0,21	0,10	0,22
Aluminium	0,07	0	0	0	0
Stål/Metall	0,06	0,06	0,07	0,20	0,06
Kjemisk	0,10	0,03	0,12	0,12	0,02
Transport	0,18	0,18	0,23	0,20	0,13
Lys/utstyr	0,14	0,08			0,05
Mekan.arb.	0,01	0,02	0,04	0,04	0,01
Romvarme	0,13	0,15			0,29
Annan ind.	(0,03)		0,06	0,07	
Hushald	(0,16)				
Teneste	(0,08)		0,21	0,20	
Sum	0,99	1,01	1,00	0,99	1,00

7 Litteraturliste

- Bedringås, K.W., Ertesvåg, I.S., Byggstøyl, S. & Magnussen, B.F. (1997) Exergy analysis of solid-oxide fuel-cell (SOFC) systems, *Energy* 22: 403-412.
- Ertesvåg, I.S. (1998) Eksergi – eit mål for energikvalitet. *Xergi 1-98*: 4-5 (Sintef Energiforskning AS).
- Kotas, T.J. (1995) *The exergy method of power plant analysis*, 2nd ed, Krieger, Malabar, Florida.
- Moran, M.J. & Shapiro, H.N (1998) *Fundamentals of engineering thermodynamics* 3rd ed., Wiley, New York.
- Rosen, M.A. (1992) Evaluation of energy utilization efficiency in Canada using energy and exergy analyses. *Energy* 17: 339-350.
- Schaeffer, R. & Wirtshafter, R.M. (1992) An exergy analysis fo the brazilian economy: From energy production to final energy use. *Energy* 17: 841-855.
- Wall, G. (1986) *Exergy - a useful concept*. Dr.avh. Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Wall, G. (1986) *Exergy flows in industrial processes*. Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Wall, G. (1990) Exergy conversion in the Japanese society. *Energy* 15: 435-444.
- Wall, G. (1997) Exergy use in the swedish society 1994. *Int. Conf. on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems (TAIES7'97)*, June 10-13 1997, Beijing, Kina.
- Wall, G. (1997) *Exergetics*. Bokmanuskript i arbeid. Tilgjengeleg på Internettet.
- Wall, G., Sciubba, E. & Naso, V. (1994) Exergy use in the Italian society. *Energy* 19:1267-1274 .

Kjelder for statistiske data og andre data er gjevne for kvar delanalyse.

DEL 2: DELANALYSAR

8 Generelt om delanalysane

Her følgjer ein meir detaljert gjennomgang av kvar sektor. Analysane er gjorde av Michal Mielnik sommaren og hausten 1998, med rettleiing frå fyrsteamanuensis Ivar S. Ertesvåg. Vi har vore i kontakt med svært mange hjelpsame personar ved ulike NTNU og Sintef-miljø, i Statistisk Sentralbyrå, Matforsk, i bransje-organisasjonar og industrien, og ved andre forskingsmiljø. Ein del av dei er nemnde i teksten.

I nokre delanalysar måtte vi gjere overslag for til dømes fordeling mellom ulike føremål og verknadsgrader/eksergiutnytting. Det kan naturlegvis vere ulike syn på kva verdiar ein skal velje ved slike overslag. Det kan også vere ymse syn på korleis ein skal trekkje grenser mellom sektorar, og kvar ein skal leggje den totale systemgrensa. Endeleg kan det vere ting vi har oversett, som burde vere med i analysen. Dei som har synspunkt på dette kan gjerne ta kontakt med Ivar S. Ertesvåg (ivar.s.ertesvag@mtf.ntnu.no).

Når ein skal vurdere resultatane må ein sjå det som det er, ein analyse av det samla samfunnet. Om ein endrar reknestykket for ein sektor, vil det berre gjere mindre utslag for den samla analysen (sjå ”Drøfting”, avsnitt 5). Det gjer også at ein ikkje kan (eller treng) gjere kvar delanalyse like nøyaktig som om det var den eine sektoren som var det totale systemet.

9 Tilgang på energi og eksergi

9.1 Tilgang på ulike råvarer og energiberarer

Kjelder: SSB: Energistatistikk 1996 (tal for 1995)
 (sjå elles delanalysane)

Inngangen i analysen er eksergi-innhaldet i alle råvarer og energivarer/energiberarer som er brukte i det norske samfunnet i 1995. Dette gjeld både råvarer som kan brukast til energiføremål (t.d. olje), og andre råvarer, t.d. malm, som også har ein eksergiverdi.

Tabell 9 viser den samla innanlands produksjonen av primære energiberarer og råvarer i 1995. Eksergiinnhaldet er 8422 PJ, eller 1977 GJ/cap. (Folketalet auka frå 4,16 til 4,37 mill i 1995, med middel 4,26 mill.) Ein stor del av dette går til eksport. Tabell 10 viser at 1184 PJ, eller 278 GJ/cap, er brukt innanlands. Bunkers og lagerendring utgjer 28 PJ.

Nettoeksporten (eksport minus import) er 7210 PJ eksergi, eller 86% av produksjonen. Dette er hovudsakleg råolje og naturgass. Sidan dette utgjer så stor del av den samla energiflyten har vi valt å halde olje/gass-sektoren utanfor og leggje systemgrensa slik at vi berre ser på det som vert brukt innanlands. Det inneber at vi også trekkjer frå energivarer brukt til å utvinne og ilandføre eller eksportere olje og gass.

Reknar vi berre energivarer (ikkje trevirke til industri, mat, malm, o.l.) vert produksjonen 7822 PJ energi, innanlands forbruk 920 PJ (energi) og nettoeksporten 6711 PJ (energi).

Tabell 9: Total innanlands produksjon av primære energiberarer og råvarer, 1995 .

Energiberar	Energi (PJ)	Eksergi (PJ)
Kol	8,2	8,7
Råolje/Petroleumsprodukt	5968,3	6327,4
Naturgass	1302,6	1354,7
Vassfall	518,8	518,8
Brenselved	24,6	27,3
Trevirke, industri		75,1
Mat, fôr		103,9
Malm, skrap		6,8
Sum		8421,7

Tabell 10: Tilgang på energiberarar, innanlands bruk i 1995.

Energiberar	Energi (PJ)	Eksergi (PJ)	Del av inngang (%)	Tap/bruk i e-sektor (PJ)	Eksergi til brukarsektor (PJ)
Kol	28,6	30,3	2,6		30,3
Koks	24,7	25,9	2,2		25,9
Petroleumsprodukt	351,7	372,8	31,5	31,2	341,6
Naturgass	0,6	0,6	0,1		0,6
Vassfall	489,4	489,4	41,3	73,4	
Elektrisitet				35,2	380,8
Brenselved	24,6	27,3	2,3		27,3
Trevirke, industri		104,6	8,8		104,6
Mat,fôr		122,7	10,4		122,7
Malm, skrap		10,3	0,9		10,3
Sum		1183,8	100,1	139,8	1044,1

- Olje, kol, koks og naturgass

Olje, kol og naturgass vert mest nytta direkte som brensel, men dels også som kjemisk råstoff. Ein forsvinnande liten del vert omforma til elektrisitet i varmekraftverk, eller til termisk energi i fjernvarmeverk.

Eige forbruk og transporttap, 31,2 PJ (energi: 29,4 PJ), er utrekna frå Energistatistikken. Med i dette er t.d. tap/kostnad ved raffinering av råolje til bensin og andre brenselkvalitetar. Drivstoff til transport av brensel er ikkje med her, men teke med under anna transport i statistikkane. Ut frå statistikk for *transportarbeid (NOS Lastebiltransport 1994-1996, SSB)* og driftskostnader for tanktransport langs kysten (*Statistisk Årbok, 1998, tabell 437*) kan eit overslag på 1-2 PJ verke rimeleg. Det er om lag 1% av inngangen til transportsektoren. Dette skulle vore trekt frå inngangen til ”Transport” og lagt til ”Tap/bruk i energisektoren” i denne analysen.

- Vasskraft og elektrisitet

Elektrisitet i 1995 kom nær 100% frå innanlands vasskraft.

Energien i vassfall er rekna som *primær* energiberar, medan elektrisitet er handsama som *sekundær* energiberar i Energistatistikken. Den kjende mengda er produksjonen i vasskraftverka. Vassfallenergien finn ein ved å rekne eit tap på 15 % ved omforminga til elektrisk energi, p.g.a. rørfriksjon, mekaniske tap, generatortap, lekkasjar, m.m. Denne prosentsatsen vert nytta i energistatistikkane for alle OECD-land.

Eksergi i ferskvatn som går ut i havet (saltkraft-potensialet) frå utbygde vassfall er ikkje rekna med som eksergi-inngang.

Eige forbruk i kraftsektoren og distribusjonstap (26,2 PJ) står som eigen post i Energistatistikken ("svinn"). Dette kjem i tillegg til tapet ved omforminga.

- Trevirke og returpapir, brenselved

Trevirke går inn i analysen på to ulike vis: I statistikkar for hogst og trevirke til industrien er mengda gjeven som volum fast virke. I energibalansen går brenselved inn som ei energimengd. Vi finn det mest tenleg å skilje mellom desse to inngangane. Føringa av statistikken er éin grunn. Ein annan at det er ein viss skilnad i kvalitet i dei to straumane. Brenselved er gjerne lufttørka og inneheld mindre fukt.

Verdien for trevirke er kjend som total hogst i millionar kubikkmeter fast mål (Mm^3). Wall (1986) har rekna eksergiinnhaldet til 18 MJ/kg for tørrstoff og 8 GJ/ m^3 for tømmer med 25% fukt. Eksergifaktoren varierer med fuktinnhaldet. Tilgangen er estimert under delanalysen for trevareindustri til 100,4 PJ. I tillegg kjem returpapir med 4,2 PJ eksergi.

Brenselved er i hovudsak ikkje-kommersiell, og dermed uregistrert, og går til oppvarming i hushald. Mengda har Statistisk Sentralbyrå funne fram til ved spørjeundersøkingar. Energiinnhaldet har dei sett til 24,6 PJ. I delanalysen "Hushald" er dette utrekna til 27,3 PJ eksergi.

- Matvarer og fôr

Råstoff til matvaresektoren er avlingar til menneskeføde og dyrefor, fisk, jakt og dessutan import av råvarer, halvfabrikata og ferdige matvarer. (Husdyrprodukt inngår i prosessdelen av analysen.) Eksergiinnhaldet er her sett lik energiverdien, sjå delanalysen.

- Malm og metall

Malm, skrap (resirkulert), metalloksid m.m. inngår i delanalysane Aluminiumsindustri (5,4 PJ eksergi), Ferrolegeringsindustri (0,3 PJ), Stålinndustri (4,6 PJ) og Andre metall (tilnærma null); i alt 10,3 PJ eksergi. I dette tilfellet har det lite føre seg å snakke om energiverdi.

- Solenergi, vind- og bølgekraft

Utnyttinga av vind og bølger til kraftproduksjon er så liten at det ikkje vert registrert i statistikkane. Det same gjeld solenergi frå varmepanel og solceller (aktiv solenergi). Difor er desse energikjeldene ikkje med i analysen. Passiv solenergi som lys gjennom vindaug og varme gjennom bygningsdelar, er heller ikkje med. Denne energien er svært vanskeleg å kvantifisere, fordi grensa mot naturleg klima er uklar.

9.2 Energi og eksergi

For brensel er energien ført som *nedre brennverdi* i alle statistikkar, og dette gjeld også energiverdiane som er gjevne i her.

Brennverdi vert definert som den varmen ein tek ut av forbrenninga når reaksjonsprodukt kjem ut av eit brennkammer (ope system) ved den same temperaturen som luft og brensel går inn med, vanlegvis 15 °C eller 25 °C. (Brennverdien er svært lite avhengig av temperaturen han er definert ved.)

Skilnaden mellom *øvre* og *nedre brennverdi* er at i den første er vatn (H_2O) i avgassen rekna som væske, og i den andre er vatn rekna som vassdamp. Øvre brennverdi vert altså lik nedre brennverdi pluss kondensvarmen for vassdampen. Vassdamp vert danna som reaksjonsprodukt frå hydrogen i brensløt, eller også frå fukt i brensløt (trevirke, kol). Sjå t.d. Moran & Shapiro (1998), eller ei anna bok om termodynamikk. For fuktige brensel reknar vi også med ein *effektiv brennverdi*. Det er nedre brennverdi for tørrstoffet, minus fordampingsvarmen for vatnet i brensløt.

For vanlege hydrokarbon (oljeprodukt) og tørt trevirke er øvre brennverdi 5-8% over nedre brennverdi, for naturgass ca. 10% over. Dette er m.a. grunnen til det tilsynelatande paradoksale i at ein kan få fyrkjelar (gass) med verknadsgrad på 106% (tysk: "Brennwertkessel"). Då er verdien rekna av nedre brennverdi, men vassdampen er kondensert ut.

Kjemisk eksergi i eit brensel, eller eit anna stoff, er definert som det arbeidet ein får ut om ein fører kvart stoff i blandinga reversibelt frå termomekanisk jamvekt til kjemisk jamvekt med omgjevnadene. Såleis vil røykgass innehalde noko kjemisk eksergi ved at t.d. CO_2 kan ekspanderast frå partialtrykket i røykgassen til partialtrykket i atmosfæren. For dei fleste brensel ligg kjemisk eksergi mellom nedre og øvre brennverdi. For andre stoff, som metall og mineral, er det den mest stabile sambindinga i jorda som er referanse. Til dømes for jarn eller jarnoksid (magnetitt, Fe_3O_4) er hematitt (Fe_2O_3) den mest stabile sambindinga, og hematitt ved ei viss konsentrasjon vert rekna som referansetilstand. Eksergien i jarn eller jarnsambindingar finn ein ved å late stoffet

reagere reversibelt med atmosfærisk oksygen til hematitt. Dette har Kotas (1995) gjort greie for.

Tabellen viser dei eksergifaktorane som er nytta i denne analysen. For brensel er det altså kjemisk eksergi dividert på *nedre* brennverdi (effektiv brennverdi for ved).

Fysikalsk eksergi til eit stoff er det reversible arbeidet ein kan få ved å føre det til termisk og mekanisk (ikkje kjemisk) jamvekt med omgjevnadene. For dei råstoffa og brensla som er inngang i denne analysen, har fysikalsk eksergi lite å seie. Men for utgangsdelen av analysen er romvarme eit døme der eksergien er fysikalsk eksergi.

Elektrisk energi, kinetisk og potensiell energi (t.d. vassfall) kan teoretisk omformast heilt og fullt til mekanisk arbeid, slik at eksergifaktoren her er 1.

Tabell 11: Eksergifaktor for energiberarar

Energiberar	Eksergifaktor
vassfallenergi, mekanisk energi	1
elektrisk energi	1
olje, petroleumsprodukt	1,06
naturgass	1,04
kol	1,06
koks	1,05
brenselved (20% fukt)	1,11

10 Eksergianalyse av trevare- og treforedlingsindustrien i Norge

10.1 Forbruk av eksergi fra energivarer:

kilder: Treforedlingsindustriens bransjeforening (TFB): Nøkkeltall 1996
SSB: Energistatistikk 1995 og 1996, tab. 7
SSB: Energiregnskap og Energibalanse, 1995, tab. 7

Forbruket av petroleumsprodukter i industrien fordeler seg på *treforedlingsindustri*, der forbruket i 1995 var på 6,8 PJ (energi: 6,4 PJ), og *trevare/trelast*-industrien der forbruket av petroleumsprodukter var på 1,0 PJ (energi: 0,94 PJ). **Totalt gir dette et forbruk av petroleumsprodukter på 7,8 PJ eksergi (energi: 7,3 PJ) i treindustrien.**

I tillegg ble det i 1995 brukt tilsammen 28,3 PJ i form av elektrisk eksergi (=energi). Mesteparten av dette ble (25,3 PJ) ble brukt i treforedlingsindustrien. Dette skyldes at treforedlingsindustrien er en mere kraftintensiv industri, og det kreves mye arbeid og dermed eksergi for å produsere både mekanisk og kjemisk tremasse. Trevareindustrien brukte 3,0 PJ eksergi fra elektrisitet.

Energiforbruket kalt "annet" i tabellen over energiforbruket i "Nøkkeltall 1996" er ikke tatt med her. Dette er sannsynligvis energi fra forbrenning av produksjonsavfall o. likn., slik at det likevel er regnet med som inngang i andre poster (råvare). Likens er ikke energi fra bark og avlut tatt med, fordi det også er resultat av papirmasse- og papirproduksjon.

10.2 Forbruk av råvarer:

kilder: Treforedlingsindustriens bransjeforening (TFB): Nøkkeltall 1996 (som over)
SSB: Skogstatistikk 1995, tab. 19 og 27
G. Wall, "Exergy use in the Swedish society 1994"

I 1995 ble det i treforedlingsindustrien brukt 246 tusen tonn resirkulert papir. Med et eksergiinnhold på 17 PJ/Mtonn gir 0,246 Mtonn papir en eksergimengde på 4,2 PJ. I tillegg til dette ble det totalt felt 9,34 Mm³ fast mål trevirke i 1995. Wall (1986) har regnet ut eksergi innholdet til 8 PJ/Mm³ for slikt virke. Dette gir en eksergi-inngang på 74,7 PJ. Videre ble det importert en netto mengde tømmer for trevareindustrien i Norge på 0,45 Mm³, noe som tilsvarer en eksergimengde på 3,6 PJ. I tillegg importerte treforedlingsindustrien 3,24 Mm³ flis, spon og treavfall, tilsvarende 25,9 PJ. **Dette gir en total tilgang på eksergi i form av returpapir, tre og treavfall i Norge på 108,4 PJ.**

Av dette ble ca. 3,8 PJ brukt som brensel i andre sektorer, mens resten gikk til henholdsvis treforedling og trelast. I følge "Nøkkeltall 1996" fra Treforedlingsindustriens Bransjeforening var forbruket av tre, etc. på 8,17 Mm³. Dette tilsier at 4,4 Mm³ trevirke ble brukt i trevare industrien. I følge SSBs Skogstatistikk 1995 ble det imidlertid felt 4,93 Mm³ for trevareindustrien. Dette er et avvik på mer enn 10 prosent. Denne feilen er vanskelig å rette opp, ettersom den skyldes statistiske feil i de tilgjengelige dataene. Jeg velger imidlertid å tro at opplysningene om treforbruket fra "nøkkeltall 1996" i treforedlingsindustrien er korrekte, og samtidig at den endelige mengden tre tilgjengelig for treindustrien i Norge også er korrekt. Velger da å justere ned mengden tre brukt i trevareindustrien, og setter den lik 4,4 Mm³. Det er også mulig at noe av avviket i tallene skyldes at avfallet fra trevareindustrien blir sendt/solgt til treforedlingsindustrien, og dermed er telt dobbelt i disse beregningene. Derfor er det fornuftig å velge mengden trevare forbrukt i trevareindustrien slik at den stemmer med det totale forbruket. **Dette gir et totalt forbruk av eksergi fra returpapir og trevirke på 104,6 PJ i treindustrien.**

10.3 Netto produsert eksergi:

kilder: TFB: Nøkkeltall 1996

SSB: Ukens statistikk nr.51-52, 1996

Produktene fra disse industriene er papir og papp, tremasse og cellulose, samt trelast og trevare. "Nøkkeltall 1996" fra TFB oppgir en totalproduksjon av papir og papp på 2,26 Mtonn. Ved å bruke Walls verdier for eksergien i papir og papp, dvs 17 PJ/Mtonn, gir dette **38,5 PJ**. Den samme kilden oppgir totalproduksjonen av cellulose og mekanisk tremasse til å være på 0,684 Mtonn, dvs. **11,6 PJ**. Produksjon av trelast og trevarer er meget vanskelig å estimere. Det skal godt gjøres å finne mengden av alle produkter som produseres for så å finne deres eksergi. Det som ble gjort her, var å estimere eksergimengden i de produserte varene ved å telle sammen de viktigste produktene i følge "Ny varestatistikk over industriproduksjonen", Ukens statistikk nr. 51-52, 1996, SSB. Dette ble gjort ved å regne om masse til volum, samt anslå mulige masser for noen karakteristiske treprodukter. Den estimerte verdien lyder **22,0 PJ**, og den virker fornuftig i forhold til de tap man bør kunne forvente å ha under produksjon av diverse trevareprodukter.

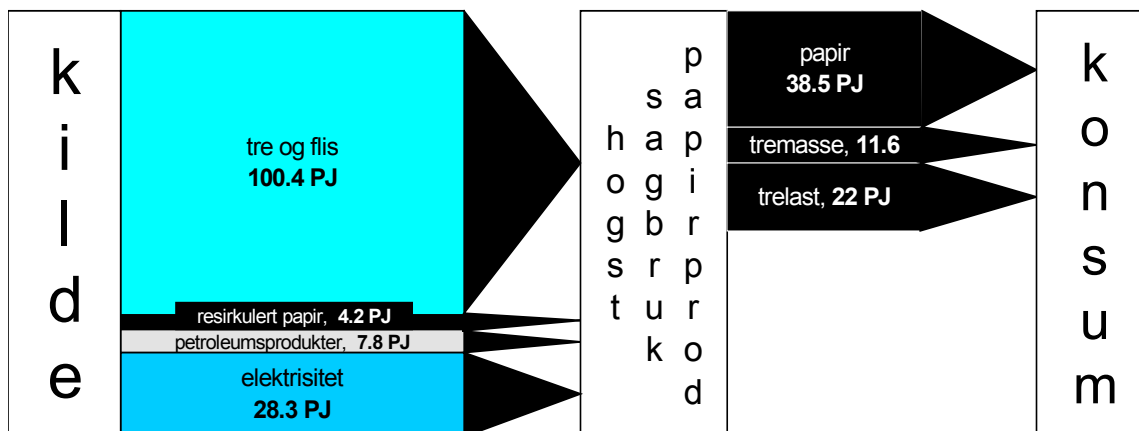
Totalt gir dette en eksergiproduksjon på 72,1 PJ.

10.4 Resultat:

Den totale innsatsen av eksergi fåes ved å summere inngangene fra de enkelte kildene.
Totalt blir dette 140,7 PJ.

Eksergien i produktene er tilsammen 72,1 PJ. Dette gir en utnyttelse av eksergien på 51,2 %.

Figur 2: Eksergiomsetning i trevare- og papirindustri



11 Eksergialyse av produksjon- og forbruk av mat i Norge

11.1 Eksergiinnhold i korn, fisk, kjøtt, etc:

*kilde: USDA Nutrient Database, Beltsville Human Nutrition Research Center, USA.
http://www.nal.usda.gov/fnic/cgi-bin/nut_search.pl*

Eksergiinnholdet i korn, kjøtt, fisk samt en del andre varer ble satt lik energiinnholdet i disse varene (det var dette Wall hadde gjort i sine eksergialyser). Energiinnholdet ble funnet i en database utarbeidet av Nutrient Data Laboratory, Agricultural Research Service, Beltsville Human Nutrition Research Center. Denne databasen finnes på Internett under adressen: http://www.nal.usda.gov/fnic/cgi-bin/nut_search.pl Databasen inneholder detaljerte opplysninger om innholdet av diverse mineraler, fettsyrer, vitaminer, lipider samt bl.a. energi og vanninnhold i de fleste tenkelige råvarer, halvfabrikata og ferdigvarer som eksisterer på markedet. MATFORSK og Statens Ernæringsråd ble kontaktet for å undersøke troverdigheten til databasen, og begge konstaterte at dataene (eller et utvalg av de) ser ut til å være korrekte.

11.2 Netto tilgang:

*kilder: SSB: Statistisk årbok 1996, tab. 288 og 289 (varenr. f.o.m. 01 t.o.m. 09)
SSB: Statistisk årbok 1997, Avling i jordbruket, tab.317
Landbrukets nettsenter, tab.12,
SSB: Fiskeristatistikk 1993-1994, tab. 13, 32 og 33,
SSB: Jaktstatistikk 1995, tab. 8 og 12*

Balansen for import og eksport er vist i tabellen. Den samlede importen av mat, fôr og råvarer hadde et eksergiinnhold på 18,8 PJ. Mengde høstet korn, frukt, grønnsaker, høy, etc. utgjorde i 1995 totalt 89,1 PJ (se tabell). De høstede mengdene ble funnet i kilder listet over. Eksergien ble beregnet ut ifra verdiene funnet i USDA Nutrient Database.

Mengden av fanget fisk, utenom fiskeoppdrett, ble funnet i Fiskeristatistikk 1993-1994, da dette var den nyeste tilgjengelige kilden. Tallene for antall tonn fanget fisk var estimert for 1995. Totalt (inkludert tang og tare, samt skalldyr) utgjorde fisken en eksergitilgang på 14,7 PJ. I denne beregningen kommer ikke hval- og selfangst med, da mengdene er så små at de ikke gir noe utslag på eksergitilgangen. (Hval og sel utgjør vektmessig mindre enn 0,1 promille av den totale vekten av mat - råvaretilgangen.)

Mengden av vilt som ble felt i 1995 er funnet i Jaktstatistikk 1995. Den gjennomsnittlige eksergien i vilt ble satt til 4,5 PJ/Mtonn som er et veid gjennomsnitt av eksergiinnholdet i de forskjellige dyrene.

Vilt består av storvilt og småvilt, hvor storvilt utgjør ca. 90 % av den totale vekten. Vekten er basert på antall felte dyr og gjennomsnittsvekt for de aktuelle artene. Totalt utgjorde vilt en eksergitilgang på 0,029 PJ.

Dette resulterer i en eksergi-inngang på 103,9 PJ høstet i landbruk og fiske. Sammen med den importen av matvarer på 18,8 PJ resulterer dette i en total eksergitilgang i form av råvare til matproduksjon på 122,7 PJ.

Tabell 12: Eksergi i innførsel og utførsel av matvarer

Vareslag	nr)	Mengde (1000 tonn)		Eksergiinnhold GJ/tonn	Eksergi (TJ)	
		Inn	Ut		Inn	Ut
Kjøtt, kjøttvarer	1	11	3	4,5	49,5	13,5
Meierivarer	2	7	33	4,9	34,3	161,7
Fisk, bløtdyr	3	237	1349	5,75	1362,8	7756,8
Korn, kornvarer	4	536	14	14,9	7986,4	208,6
Grønsaker, frukt	5	410	9	1,9	779,0	17,1
Sukker, honning	6	247	4	15,2	3754,4	60,8
Kaffe, te, kakao, krydder,...	7	64	9	10,7	684,8	5,4
Dyrefor (u. korn)	8	242	262	16,1	3896,2	4218,2
Forskjellige matvarer	9	28	17	9,0	252,0	153,0
TOTALT					18,8 PJ	12,6 PJ
Netto import:					6,2 PJ	

*) Refererer til Statistisk årbok, tabell 288 og 289.

Tabell 13: Mengde og eksergi i høstet avling, fisk og vilt

Eksergi i planter og dyr		Mengde produsert i Norge [Mtonn]	Eksergi produksjon [PJ]	
Vekst/dyr	Eksergi [PJ/Mtonn]			
Hvete	13,9	0,312	4,337	
Havre	16,3	0,354	5,770	
Bygg	14,8	0,547	8,096	
Oljefrø	37	0,017	0,629	
Poteter	3,3	0,4	1,320	
Frukt + grøn.	1,9	0,314	0,597	Sum vegetab.: 89,1 PJ
Høy	16,1	3,274	52,711	
Grøntfôr + Silovekster	16,1	0,973	15,665	
Torsk	3,5	0,707	2,475	
Sild og brisling	7,4	0,73	5,402	
Makrell, lodde,...	6,3	0,97	6,111	Sum fisk: 14,7 PJ
Annet (skalldyr+)	3,9	0,1139	0,444	
Tang og tare	1,6	0,185	0,296	
Hval		0	0,000	
Sel (spekkprod.)		0	0,000	
Vilt	4,5	0,0065	0,029	
TOTALT		103,9	

11.3 Forbruk av energibærere:

kilder: SSB: Energistatistikk 1996, tabell 2.8

Energivarebalanse tilsendt av SSB, spesifiserer "annen industri" i tab. 2.8

Nærings- og nytelsesmiddelindustrien sammen med jordbruket og fiskerieringen brukte i 1995 totalt 15,2 PJ eksergi (=energi) fra elektrisitet og 31,6 PJ eksergi (energi: 29,8 PJ) fra petroleumsprodukter. **Dette resulterer i en eksergiinput på 46,8 PJ fra energibærere.**

11.4 Netto produsert eksergi:

kilder: NORKOST 1993-1994, Rapport Statens Ernæringsråd, 1997.

SSB: Statistisk årbok 1996, tabell "folkemengde etter kjønn og alder. 1. Januar"

I følge NORKOST 1993-94 utgitt av Statens Ernæringsråd, er gjennomsnittlig energiinntak for menn på 11,7 MJ pr. dag pr mann, og for kvinner ligger gjennomsnittet på 8,4 MJ pr dag pr kvinne. I 1995 var det ca. 2,15 millioner menn og 2,2 millioner

kvinner. Med 365 dager i året gir dette et samlet, veid gjennomsnitt på 10,0 MJ pr. dag pr. person, eller et **innenlands totalt forbruk på 15,9 PJ** i 1995. Ettersom det er dette som er resultatet og hensikten av matvareproduksjonen, er det nettopp inntaket av energi i form av næringsmidler som regnes som netto output i denne sektoren.

Eksport av mat, fôr og råvarer hadde et eksergiinnhold på **12,6 PJ**. Av dette er 7,8 PJ fisk.

Samlet eksergi-utgang blir 28,5 PJ.

11.5 Resultat:

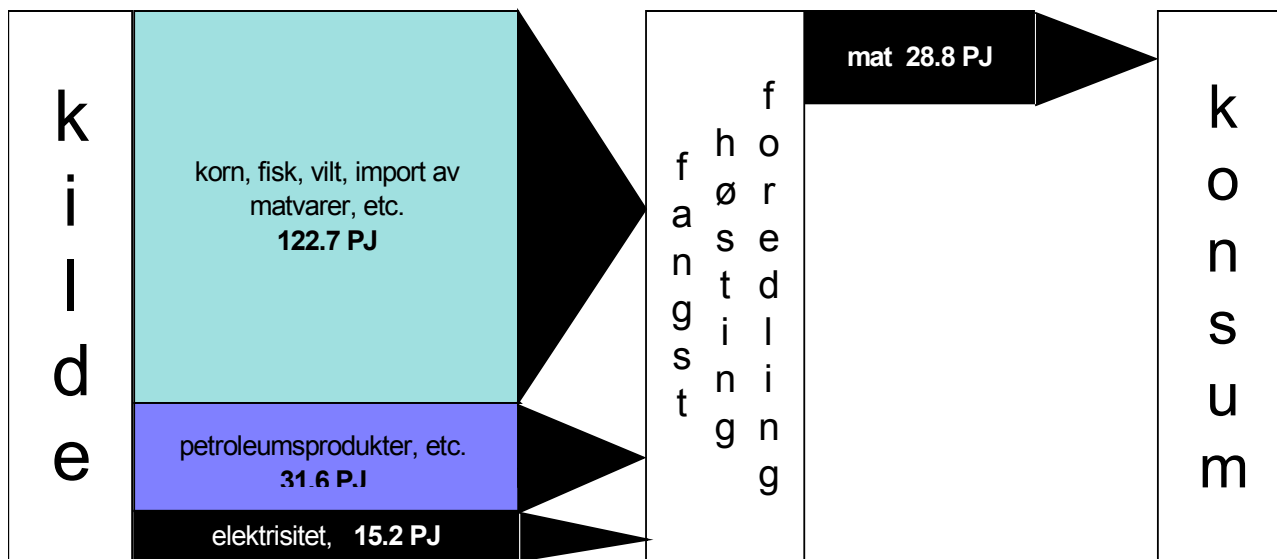
Med en eksergistrøm inn på totalt 169,5 PJ (122,7 PJ fra næringsmidler og 46,8 PJ fra energibærere) **og en strøm ut til forbruker og eksport på 28,5 PJ, får man en utnyttelsesgrad på 16,8%**. Den lave utnyttelsesgraden skyldes flere faktorer, deriblant lav utnyttelse av eksergi ved dyre- og fiskeoppdrett, store mengder avfall ved matproduksjon og sluttforbruk, samt mange termiske bearbeidingsprosesser ved temperaturer rundt 100 °C.

11.6 Kommentar:

Bruken av kunstgjødsel taes ikke med i denne analysen, da denne eksergistrømmen sammen med sollys, mineralinnhold i jorda, etc., resulterer i de vekstene som kan høstes. Vekstenes eksergi er selvfølgelig mindre enn eksergistrømmen fra sola, jorda, kunstgjødsel, etc, men det er funnet praktisk og hensiktsmessig å operere med plantenes eksergi som input.

Oppdrettsfisk og husdyr er ikke regnet som ”inngang”, men som en del av prosessen.

Fiske- og kjøttprodukter er ”utgang”.



Figur 3: Eksergiomsetning i næringsmiddelsektoren.

12 Eksergianalyse av aluminiumsindustrien i Norge

12.1 Forbruk av eksergi fra energibærere:

kilde: SSB: Forbruk av energibærere, Ukens statistikk nr. 38, 1997, "Energiregnskap og energibalanse, 1995 og 1996", tabell 5-7.

Aluminiumsindustrien er, etter husholdningene, den største forbrukeren av elektrisk eksergi. I 1995 ble det brukt 55,3 PJ elektrisk eksergi (=energi) til aluminiumsproduksjon. I tillegg ble det brukt 10,6 PJ eksergi (energi: 10,3 PJ) i form av kull, koks og petroleumsprodukter. **Totalt utgjør dette et forbruk av energibærere på 65,9 PJ eksergi** (energi: 65,6 PJ).

12.2 Forbruk av råvarer:

kilder: Skanaluminium (pr. telefon, bekreftelse av data)

Hydro Aluminium (pr. telefon)

SSB (pr. faks og telefon), samt Statistisk årbok 1997, tabell 363.

Gjenbrukt metall: faks fra SSB, dobbeltsjekk av data hos Skanaluminium (<http://www.skanal.no/>) pr. telefon.

Aluminiumoksidets kjemiske sammensetning og renhet: Skanaluminium og Hydro Aluminium (pr telefon).

Hele den norske aluminiumsproduksjonen baserer seg nesten utelukkende på bruk av importert Al_2O_3 i form av tørket pulver. (Det brukes også noe bauxitt, men med den lille mengden på 0,03 Mtonn og en eksergi på ca. 1,1 PJ/Mtonn, gir ikke dette noe kritisk bidrag til eksergitilgangen). Aluminiumoksidet, utenom noen forurensninger (mindre enn 0,1%) er i prinsippet helt ren. Ved bruk av både Walls og Kotas' tabeller får man et eksergiinnhold i oksidet på 2,0 PJ/Mtonn. Med en vareinnsats i 1995 på 1,58 Mtonn, gir dette 3,2PJ. I tillegg ble det i 1995 brukt 0,066 Mtonn skrap (hentet eksternt) som med sitt høye eksergiinnhold (samme som for rent aluminium; 32,2 PJ/Mtonn) utgjør 2,2 PJ. **Totalt gir dette en eksergiinnsats i form av råvarer på 5,4 PJ.** Jeg vil her også presisere at Aluminiumhydroksid, som er oppført blant dataene over import av Al-forbindelser, ikke brukes i aluminiumsproduksjonen, og er derfor trukket fra verdien for import av varenummer 2818 i faks fra SSB.

12.3 Netto produsert eksergi:

kilde: som over, dessuten:

G. Wall: "Exergetics"

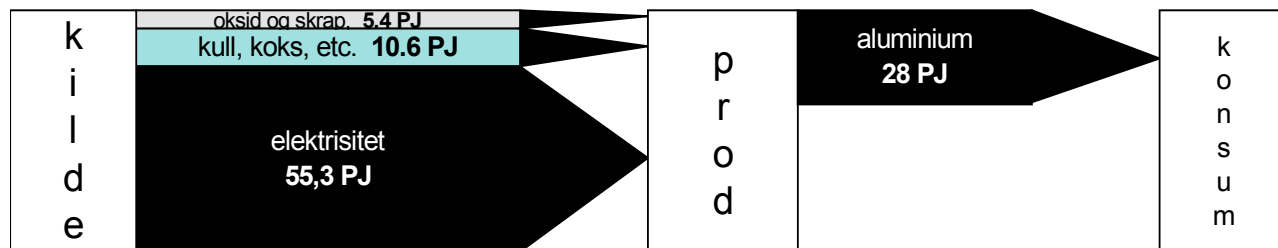
T.J. Kotas: "The exergy method of thermal plant analysis"

Primærproduksjonen av aluminium var i 1995 på 0,85 Mtonn. Med verdiene for kjemisk eksergi i aluminium (rent Al) gitt av Wall eller Kotas får man et eksergiinnhold i aluminium på henholdsvis 32,93 og 32,91 PJ/Mtonn, eller, etter avrunding, 32,9 PJ/Mtonn. Da tilsvarer 0,85 Mtonn aluminium til en **produsert eksergimengde på 28,0 PJ**.

Her har jeg ikke tatt hensyn til det at i de 0,85 Mtonn aluminium som produseres, er det regnet med både produksjon av rent aluminium og aluminiumslegeringer. Mengden av innlegeringselementer er liten i forhold til mengden av aluminium. Det finnes noen høylegerte materialer, men ifølge Skanaluminium (bransjeforening for aluminiumsindustrien) utgjør disse kun noen få tusen tonn. Derfor er ikke disse innlegeringselementene tatt hensyn til, verken som input eller som en del av aluminiumen som produseres. Alt det produserte aluminiumet regnes som rent metall når det gjelder omregning til eksergi.

12.4 Resultat:

Med en total eksergiinnsats på **71,3 PJ** (65,6 PJ i energibærere, 5,4 PJ i råvare) og en **produksjon av aluminium på 28,0 PJ**, gir dette en **utnyttelsesgrad på 39,3%**. Det er imidlertid viktig å merke seg at fremstillingen av Al_2O_3 ikke er tatt med her, siden den foregår utenfor Norges grenser. Ettersom dette er hovedingrediensen i den norske aluminiumsproduksjonen, ville utnyttelsesgraden blitt vesentlig lavere dersom man hadde tatt med eksergitapet som finner sted i fremstillingen av oksidet.



Figur 4: Eksergiomsetning i aluminiumsindustrien.

13 Oppsummering for stål- og metallindustrien totalt (unntatt aluminium)

I dette kapitlet blir delresultatene i de tre følgende analysene samlet opp; dvs. ”ferrolegering”, ”stål” og ”andre metaller unntatt aluminium”.

13.1 Forbruk av eksergi:

Det totale eksergiforbruket i metallindustrien var på 66,0 PJ i 1995. Dette fordeler seg på følgende eksergikilder:

Kull:	13,0 PJ
Koks:	13,3 PJ
Petr.prod. og gass:	2,1 PJ
Elektrisitet:	32,7 PJ
Skrap og malm:	4,9 PJ
Totalt:	66,0 PJ

13.2 Produksjon av eksergi:

Den totale produksjonen av stål, ferrolegeringer og ikke-jernholdige metaller var på 22,2 PJ i 1995. Denne produksjonen fordeler seg på følgende:

Ferrolegeringer/silisium:	17,1 PJ
Stål:	3,4 PJ
Andre metaller:	1,7 PJ
Totalt:	22,2 PJ

13.3 Resultat:

Med et forbruk av eksergi og eksergiproduksjon som ovenfor, blir utnyttelsesgraden i metallindustrien (unntatt aluminium) på **33,9 %**. Dette er noe lavere enn i aluminiumsindustrien. En figur over eksergistrømmen følger på neste side.

Tabell 14: Eksergi i metall, produsert mengde

Metall	produsert mengde (Mtonn)	eksergi innhold (PJ/Mtonn)	produsert eksergi (PJ)
Sink	0,12	5,4	0,65
Nikkel	0,05	4,3	0,22
Kobber	0,03	2,1	0,06
Magnesium	0,03	25,8	0,77
Silisium	0,09	28,6	2,57
Ferrosilisium	0,385	22,8	8,78
FeSiMn	0,2	12,5	2,50
Ferromangan	0,16	10,30	1,65
Ferrokrom	0,14	11,50	1,61
Stål	0,5	6,80	3,40
Totalt (u.alum.)	1,71		22,2
Aluminium	0,85	32,9	28,0

14 Eksergianalyse av ferrolegeringsindustrien i Norge

14.1 Introduksjon:

kilder: SSB, v. Terje Tandle (tlf. 22 00 44 25)

SINTEF Materialteknologi, Halvard Tveit (tlf. 73 59 51 63)

SSB: Statistisk Årbok 1997, tab. 363

Ferrolegeringsindustrien i Norge omfatter i hovedsak produksjon av ferrosilisium (385 000 tonn i 1995), ferrosilikomangan, ferromangan, silisiummetall og ferrokrom. Produksjonsdata for de sistnevnte legeringene kan ikke offentliggjøres av SSB for 1995 og er samlet under fellesbetegnelsen "andre ferrolegeringer" i statistikkene. I en Sintef-rapport (STF 34; referert av Tveit i telefonen) er imidlertid produksjonskapasiteten for disse metallene gitt for 1993. Jeg antar at fordelingen mellom produksjonsmengdene av de forskjellige metallene var omtrent den samme i 1995 som den var mellom produksjonskapasitetene i 1993, og ettersom SSB oppgir tall for produksjon av "andre ferrolegeringer" i 1995 til å være 590 000 tonn, kan den produserte mengden av de forskjellige legeringene estimeres. Dette fører til at det i 1995 ble produsert omtrent 200 000 tonn ferrosilikomangan, 160 000 tonn ferromangan, 90 000 tonn silisiummetall og 140 000 tonn ferrokrom.

14.2 Forbruk av eksergi fra energibærere:

kilder: SSB, Energivarebalanse 1995, tilsendt pr. faks.

I 1995 var forbruket av energibærere (medregnet bruk til reduksjonsmiddel, m.m.) i den norske ferrolegeringsindustrien som følger:

Kull: 10,5 PJ eksergi (energi: 9,9 PJ)

Koks: 11,0 PJ eksergi (energi: 10,5 PJ)

Petroleumsprodukter: 0,1 PJ eksergi (energi: 0,1 PJ)

Elektrisitet: 22,3 PJ eksergi (=energi)

Totalt utgjør dette et forbruk av eksergi fra energibærere på 43,9 PJ (energi: 42,8 PJ).

14.3 Forbruk av råvarer:

kilder: SINTEF Materialteknologi, Halvard Tveit og Eli Ringdalen (tlf. 73 59 0715)

SSB: Statistisk Årbok 1997, tab. 275

SSB: Utenrikshandel, import og eksport av varer, tilsendt pr. faks

ELKEM Rana, v. Einar Andersen (tlf. 75 13 67 92)

T. J. Kotas; "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis"

Under fremstilling av de ovennevnte metallene brukes innsatsvarer som jernmalm og skrapjern (se analyse av stålindustrien), kvarts (SiO_2 , 99% innhold), manganmalm (MnO_2 og MnO , 76 % innhold), og krommalm (70% FeCr_2O_4).

Netto tilgang på disse malmene i Norge i 1995 var på ca. 620 000 tonn kvarts og 735 000 tonn manganmalm. Tallene for krommalm kan ikke offentliggjøres av SSB. Der har imidlertid Elkem Rana vært meget behjelpelige og fortalte at importmengden av denne malmen i 1995 var på 346 000 tonn. (Elkem er de eneste produsentene av denne legeringen i Norge, og dermed den eneste importøren av denne malmen).

Eksergi-innholdet i malmene ble beregnet i følge Kotas(1995):

Kvarts (99% SiO_2): 0,03 PJ/Mtonn

Manganmalm (76% MnO_2): 0,2 PJ/Mtonn

Krommalm (70% FeCr_2O_4): 0,4 PJ/Mtonn

Med tallene for netto tilgang av disse malmene i 1995 gitt ovenfor, får vi en **netto tilgang av eksergi i form av råvarer på 0,30 PJ**.

14.4 Netto produsert eksergi:

kilder: SSB v. Terje Tandle (tlf. 22 00 44 25)

SINTEF Materialteknologi, v. Halvard Tveit og Eli Ringdalen.

SSB: Statistisk Årbok 1997, tab. 363

T.J Kotas; "The Exergy method of thermal plant analysis"

SINTEF Materialteknologi, v. Håvard Karoliussen.

Ihsan Barin: "Thermochemical Data of Pure Substances" (ref. av Karoliussen)

Det ble i 1995 produsert ca. 90 000 tonn silisiummetall (tilnærmet rent Si). Silisium har et eksergiinnhold på 28,6 PJ/Mtonn. Dette tilsvarer en eksergiproduksjon på **2,6 PJ**.

Videre har vi ferrosilisium, der det vanligste fordelingen er 75% Si og 25% Fe på massebasis. Dette metallet består av ca. 50% FeSi_2 -fase og ca. 50% ren Si-fase jevnt fordelt i strukturen. Eksergien i FeSi_2 er ikke tabulert verken i Kotas eller Wall. Derfor måtte den beregnes fra Gibbs fri energi ($= -78\,435 \text{ kJ/kmol}$) for dannelsen av FeSi_2 , og

verdien ble 1 905 325 kJ/kmol (se vedlagte beregninger). Fra dette ble eksergien i blandingen regnet ut til 22,8 PJ/Mtonn. Med en produksjonsmengde i 1995 på 385 000 tonn gir dette en eksergiproduksjon på **8,8 PJ**.

FerroSilikoMangan består hovedsakelig av 20 % Si, 10 % Fe og 70 % Mn (masse%). Siden jern og mangan har lignende egenskaper, finnes det forskjellige faser og utfellinger i denne legeringen, og det er vanskelig å si hvilken fase som er den dominerende. Etter råd fra Materialteknologi vil jeg betrakte denne legeringen som en mekanisk blanding av de forskjellige komponentene. Beregninger gir da et eksergiinnhold i legeringen på 12,5 PJ/Mtonn. Med en produksjonsmengde i 1995 på 200 000 tonn, gir dette totalt en eksergiproduksjon på **2,5 PJ**.

Ferromangan består av 80% mangan, 13% jern og 7% karbon (masse%). Her, på grunn av liknende egenskaper, skilles mangan og jern ut hver for seg. Karbonet binder seg til disse eller skilles ut i egne faser. Igjen, etter råd fra SINTEF Materialteknologi, regner jeg denne legeringen som en mekanisk blanding av de forskjellige komponentene. Beregninger gir da et eksergiinnhold i legeringen på 10,3 PJ/Mtonn. Med en produksjonsmengde i 1995 på ca. 160 000 tonn, resulterer dette i eksergiproduksjon på **1,6 PJ**.

Ferrokrom er den siste viktige ferrolegeringen i norsk metallindustri. Denne består av 60% krom, 29,5 % jern, 7,5 % karbon og 3% silisium (masse%). De dominerende fasene som felles ut i denne legeringen er ukjente selv for eksperter (ifl. Eli Ringdalen). Jeg fikk dermed råd om å regne dette som en mekanisk blanding av de tilstedeværende komponentene. I skrivende øyeblikk (sommeren 1998) foregår det arbeid med å bestemme fase-sammensetningen i ferrokrom (diplomoppgave høsten 1998), slik at de beregnede verdiene kan korrigeres i ettertid dersom ønskelig. Beregninger under forutsetningen at legeringen er en mekanisk blanding av komponentene i ren form, fører til et eksergiinnhold på 11,5 PJ/Mtonn. I 1995 ble det produsert ca. 140 000 tonn ferrokrom. Dette gir en eksergiproduksjon på **1,6 PJ**.

14.5 Resultat:

Innsatsen av eksergi fra energibærere i ferrolegeringsindustrien i Norge i 1995 var totalt på 43,9 PJ (energi: 42,8 PJ). I tillegg ble det brukt 0,34 PJ eksergi fra råvarer. Tilsammen utgjør dette et **forbruk på 44,2 PJ eksergi**.

Produksjonen av ferrolegeringer i 1995 var totalt på 17,1 PJ eksergi. Dette gir en **virkningsgrad på 38,7 %**. Det er imidlertid viktig å merke seg her at jernmalm som inngår i råvarene ikke er regnet med her, fordi den i sin helhet er tatt med i stålproduksjon. Resultatene for stålproduksjonen, ferrolegeringsproduksjonen og produksjonen av ikke-jernholdige metaller vil bli lagt sammen og presentert som en

sektor på totalfiguren. Her er de imidlertid analysert hver for seg, både av hensyn til gjennomføringen av analysen, samt for å lette fremstillingen av disse sektorene hver for seg dersom dette skulle være ønskelig.

15 Eksergianalyse av stålindustrien i Norge

15.1 Forbruk av eksergi fra energibærere:

kilder: SSB: Energistatistikk 1996, tab. 2.8

SSB: Energivarebalanse 1995, tilsendt pr. faks.

I 1995 ble det brukt 2,5 PJ eksergi fra kull (energi: 2,4 PJ), 1,9 PJ eksergi fra koks (energi: 1,8 PJ), 0,8 PJ eksergi fra petroleumsprodukter og gass (energi: 0,8 PJ), og 3,8 PJ eksergi fra elektrisitet (=energi). **Til sammen utgjør dette et forbruk av eksergi på 9,0 PJ (energi: 8,8 PJ) til stålproduksjonen i Norge i 1995.**

15.2 Forbruk av råvarer:

kilder: SSB: tabell over innkjøp av skrapjern, tilsendt pr. faks

Stålverkenes skrapjernkontor

SSB: Utenrikshandel, tabeller over import og eksport, tilsendt pr. faks

SSB: detaljerte oppgaver over malmutvinningen, tilsendt pr. faks

T. J. Kotas: "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis"

I 1995 ble det utvunnet 2,2 Mtonn jernmalm i Norge. Av dette ble 900 000 tonn eksportert. Dette gir en netto tilgang på jernmalm i Norge på 1,3 Mtonn. I malmen som utvinnes i Norge ligger det gjennomsnittlige innholdet av jern på ca. 66%, noe som gir et eksergiinnhold i den Norske malmen på 0,50 PJ/Mtonn. Med dette eksergiinnholdet er eksergitilgangen i Norge i form av jernmalm på 0,7 PJ.

I tillegg til dette brukes skrapjern, i 1995 var forbruket på ca. 580000 tonn. Skrapjernet regnes som rent Fe, der Fe har et eksergiinnhold på 6,8 PJ/Mtonn. Dette gir en tilgang på eksergi i form av skrapjern på 3,9 PJ.

Den totale eksergitilgangen i form av råvare (malm og skrap) ligger da på 4,6 PJ.

Kommentar: Det er her viktig å merke seg at en del av disse råvarene går til produksjon av ferrolegeringene ferrosilisium, ferrokrom, etc. Derfor gjelder denne råvareinnsatsen hele stål- og ferrolegeringsindustrien, ikke kun stålindustrien.

15.3 Netto produsert eksergi:

kilder: T. J. Kotas: "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis"

SSB: Statistisk Månedshefte 11/97, tab. 28

SSB: Statistisk Årbok 1997, tab. 363

I 1995 ble det produsert ca. 500 000 tonn råstål. Stål regnes her som rent Fe, selv om stål er en fellesbetegnelse på jern med innlegeringselementer. Generelt utgjør innlegeringselementene en liten andel av den totale massen, og jeg velger derfor å ikke ta hensyn til disse her. Eksergiinnholdet i rent jern er 6,8 PJ/Mtonn i følge Kotas. Med en stålproduksjon på 0,5 Mtonn i 1995, gir dette en **netto produsert eksergi på 3,4 PJ**.

15.4 Resultat:

Med et forbruk av råvarer på 4,6 PJ, og et forbruk av eksergi fra energibærere på 9,0 PJ, gi dette en **total eksergiinnsats på 13,6 PJ**. Den **netto eksergiproduksjonen ligger på 3,4 PJ**. Det er imidlertid vanskelig å snakke om noen utnyttelsesgrad for denne industrien alene, da en del av råvarene tatt med her egentlig går til produksjon av andre ferrolegeringer.

16 Eksergianalyse av ikke-jernholdige metaller (unntatt aluminium)

16.1 Forbruk av eksergi fra energibærere:

kilde: SSB: Energivarebalanse 1995, tilsendt pr. faks.

I 1995 ble det brukt 0,4 PJ eksergi (= 0,4 PJ energi) fra koks, 0,7 PJ eksergi fra petroleumsprodukter, 0,5 PJ eksergi fra gass og 6,6 PJ eksergi fra elektrisitet. Totalt utgjør dette en **innsats av eksergi fra energibærere på 8,2 PJ**. (Pga. avrunding blir dette tilnærmet lik energiverdiene.)

16.2 Forbruk av råvarer:

kilder: SSB: Statistisk Årbok 1997, tab 363

Tabeller 13 og 14, mottatt pr. faks fra Terje Tandle, SSB

SSB: Utenrikshandel, tabeller over import og eksport (pr. faks)

Forbruket av råvarer til produksjon av nikkel og kobber viste seg å være vanskelig å finne. Ved å sette opp en balanse mellom utvunnet malm, eksport og import, ble den netto tilgangen av kobbermalm funnet å være *minus* 3846 tonn. Men verdiene, særlig for konsentrasjon, er usikre. Nettotilgangen av nikkel som nikkelkonsentrat ble funnet å være et sted mellom 1220 tonn (om en regner at all eksportert malm er nikkelkonsentrat) og ca. 30000 tonn (om en regner at den eksporterte malmen ikke inneholder nikkel). Disse tallene er åpenbart i strid med hverandre, siden de innebærer at det produseres mer primærmetall enn det finnes råstoff til å produsere dette metallet av. Konklusjonen må være at det enten at tallene er usikre, at det er andre råstoffer enn konsentrater og oksider som disse metallene fremstilles av, eller at det meste, for ikke å si alt, produseres med basis i gjenvinning.

Ettersom de produserte mengdene av disse metallene er så små i eksergimessig sammenheng at de i realiteten ikke gjør noe utslag på totalresultatet, må nødvendigvis råvareinnsatsen utgjøre en enda mindre del av totalbildet, og det antas herved at den kan neglisjeres. For å sannsynliggjøre riktigheten av denne antagelsen, vil jeg referere til aluminium, der råvareinnsatsen, (selv om vektmessig selvfølgelig større enn produksjonen), utgjør eksergimessig kun 1/5 av eksergien i produktet. Den maksimale eksergien i råvarene ville funnet sted dersom produksjonen var utelukkende basert på gjenvinning. Hvis dette hadde vært tilfelle her, ville det uansett ikke påvirket sluttresultatet i særlig grad. Da det imidlertid er meget sannsynlig at produksjonen baserer seg dels på gjenvinning og dels på foredling av råvare, neglisjerer jeg den inngående materialstrømmen.

For sink ble det funnet noe mer realistiske tall for råvaretilgangen, selv om disse også tilsier at kilden enten er gjenvinning eller andre råvarer enn de som inngår i disse statistikkene. Likevel velger jeg å bruke samme argumentasjonen som over og neglisjere den inngående materialstrømmen og samtidig påstå at feilen jeg da gjør er av bagatellmessig karakter i forhold til de usikkerhetene som ligger innbakt i de statistiske dataene, samt antagelsene og overslagene gjort i analysene av de andre sektorene.

Magnesium blir utvunnet fra sjøvann, slik at råvaren får null eksergi.

16.3 Netto produsert eksergi:

kilder: SSB: Statistisk Årbok 1997, tab. 363

SSB: Statistisk Månedshefte 11/97, tab. 28

T. J. Kotas: "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", 1995.

Hydro Magnesium, Herøya (telefon til Per Bakke, apr.99)

I 1995 ble det produsert 0,12 Mtonn primær sink, 0,05 Mtonn primær nikkel, 0,03 Mtonn primærkobber og 0,03 Mtonn magnesium. Med verdiene for kjemisk eksergi i ren sink, nikkel og kobber gitt av Kotas får man et eksergiinnhold i sink på 5,4 PJ/Mtonn, nikkel 4,3 PJ/Mtonn, kobber 2,1 PJ/Mtonn, og 25,8 PJ/Mtonn for magnesium. Da gir sink en eksergimengde på 0,65 PJ, nikkel 0,22 PJ, kobber 0,06 PJ, og magnesium gir 0,77 PJ eksergi (se vedlagt tabell). Totalt utgjør dette en **produsert eksergimengde på 1,7 PJ**.

16.4 Resultat:

Med en **total eksergiinnsats på 8,2 PJ og en produksjon av metaller på 1,7 PJ** gir dette en **utnyttelsesgrad på 21%**.

Her er det to viktige momenter man bør merke seg. Det første er neglisjeringen av råvareinnsatsen i produksjonen, se argumentasjon over, pkt. 2. Det andre er at det helt sikkert produseres flere metaller enn de som er tatt med her, men i små kvanta. Summen av disse små kvantaene kan imidlertid bli så stor at utnyttelsesgraden i denne sektoren blir betydelig endret. Likevel er denne sektoren så liten i det totale bildet at eventuelle tillegg vil ha neglisjerbar innvirkning på totalanalysen.

17 Eksergianalyse av kjemisk industri i Norge

17.1 Forbruk av eksergi fra energibærere:

kilder: SSB: Energistatistikk 1996, tab. 2.8

SSB: Energivarebalanse 1995 (tilsendt fra SSB)

Energiforbruket i kjemisk industri fordeler seg på forbruk av energibærere benyttet som råstoff i den kjemiske produksjonen og forbruk av energibærere som energikilder til prosesser, etc. I 1995 ble det brukt 14,7 PJ eksergi fra kull (energi: 13,9 PJ), 7,2 PJ eksergi fra koks (energi: 6,9 PJ), 46,9 PJ eksergi fra petroleumsprodukter (energi: 44,3 PJ), 9,6 PJ eksergi (energi: 9,2 PJ) fra gass ("andre gassar" i energistatistikken, hovedsakelig fra petroleum) og 28,2 PJ eksergi fra elektrisitet (=energi). Dette kan fordeles som 40,5 PJ eksergi (energi: 38,2 PJ) i petroleumsprodukter brukt som råvareinnsats i den kjemiske produksjonen, og 66,1 PJ eksergi (energi: 64,3 PJ) brukt som energivarer.

Totalt gir dette et forbruk av eksergi som råvare og drivstoff på 106,6 PJ (energi: 102,5 PJ).

Tabell 15: Forbruk av energibærere i kjemisk industri

	Brukt som råstoff (PJ)	Prod. av råvarer (PJ)	Fra "annen industri" (PJ)	Energi totalt (PJ)	Eksergi-faktor	Eksergi (PJ)
Kull	0	5,2	8,68	13,9	1,06	14,7
Koks	0	6,2	0,68	6,9	1,05	7,2
Petr.prod.	0	2,2	2,67	43,1	1,06	45,7
Gass	38,2	9,2	1,27	10,5	1,04	10,9
Elektrisitet	0	21,9	6,3	28,2	1	28,2
Sum	38,2	44,7	19,6	102,5		106,7

De to første kolonnene er fra Energistatistikken, tabell 2.8, post 10 og 14.3. Den tredje kolonnen er fra Energivarebalansen, der all kjemisk industri som ikke inngår i post 14.3, er tatt med.

17.2 Forbruk av råvarer:

Forbruket av råvarer i den kjemiske industrien er tatt med i forbruket av energibærere. Eventuelle andre råvarer enn kull, olje og naturgass som brukes her, ser jeg bort i fra. De er så varierte og kommer sannsynligvis i så små kvanta at noen reell verdi for forbruket vil bli meget vanskelig, for ikke å si umulig å finne.

17.3 Netto produsert eksergi:

Den netto produserte eksergien settes til 60% av eksergistrømmen inn. Her betyr dette at en input av eksergi på 106,6 PJ gir en output i form av produkter som plast, gummi, maling, lakk, etc. på 64 PJ. Dette er ingen beregnet verdi, men en faktor som er blitt satt etter å ha sett på Walls tidligere publikasjoner for Sverige, Italia og Japan.

17.4 Resultat:

Med en total innsats av eksergi på 106,6 PJ, og en antatt utnyttelsesfaktor på 60 %, blir den kjemiske produksjonen i Norge i 1995 på 64,0 PJ.

18 Eksergianalyse av transportsektoren i Norge

18.1 Forbruk av eksergi fra energibærere:

kilde: SSB: Energistatistikk 1996, tab. 2.8

Transportsektoren er den største forbruker av petroleumsprodukter. I 1995 var forbruket av eksergi fra petroleumsprodukter på 187,1 PJ (energi: 176,5 PJ). I tillegg til dette ble 2,4 PJ eksergi (= energi) fra elektrisitet brukt av sektoren, hovedsakelig til trikker og tog. **Totalt utgjør dette et eksergiforbruk på 189,5 PJ** (energi: 178,9 PJ). Eksergiforbruket fordelte seg på tre undertyper transport: bane- og veitransport (135,4 PJ), kysttransport (28,9 PJ) og lufttransport (25,1 PJ).

18.2 Bane- og veitransport:

kilde: G. Wall: "Exergy use in the Swedish society 1994"

Bane- og vegtransport konsumerte 135,4 PJ eksergi (energi: 127,9 PJ). I denne transporttypen regner man med en output av eksergi på ca. 13% av innsatsen (G. Wall, "Exergy use in the Swedish society 1994"). Det store tapet skyldes kjølesystem, utslipp av eksos fra motoren, friksjons- og transmisjonstap i motor og akslinger, etc. Dette medfører en netto output på 17,6 PJ, som omfatter eksergi brukt på akselerasjon, overvinning av luftmotstand og transport av gods og mennesker.

18.3 Vanntransport:

Vanntransport eller kysttransport (kun innenlands) hadde en eksergi input på 28,9 PJ (energi: 27,3 PJ). Siden mesteparten av denne transporten foregår under lave hastigheter (5 - 15 knop) og hastigheten holdes konstant over lengre perioder, vil transmisjonstapene være lavere her. Dessuten er de fleste båter dieseldrevet, noe som gir en høyere virkningsgrad i motoren. Det må imidlertid tas hensyn til at båtparken generelt er forholdsvis gammel, og mange transportbåter med dårlige samlede virkningsgrader finnes ute i fjordene. Outputen av eksergi fra kysttransport settes derfor som et overslag til 25% av inputen. Dette resulterer i en netto output av eksergi på 7,2 PJ.

18.4 Lufttransport:

Lufttransport hadde et ekssergiforbruk på 25,1 PJ (energi: 23,7 PJ). På samme måte som med vanntransport, må de gjøres et overslag. Propellvirkningsgraden (en jetmotor er også en ”propell” eller vifte) til et fly kan teoretisk ligge rundt 60%, og virkningsgraden i selve motoren, som i prinsippet fungerer som en turbin, kan ligge mellom 0,5 og 0,6 avhengig av trykkforholdet (ved ideell prosess). Den totale virkningsgraden vil da ligge mellom 30 og 36%. Det er imidlertid slik at den praktiske virkningsgraden vil være noe lavere enn den teoretiske (ideelle), og outputen av ekssergi fra lufttransport settes derfor lik 25% av inputen. Dette resulterer i en output av ekssergi på 6,3 PJ.

18.5 Resultat:

Summen av **ekssergi-utgangen i transportsektoren er på 31,1 PJ**. En total ekssergi-inngang på 189,5 PJ gir en **gjennomsnittlig utnyttingsgrad på 16%**, eller, sett fra den andre siden, et ekssergitap på 84%.

19 Generelt om romvarme, lys og mekanisk arbeid

De tre sektorene *Husholdninger*, *Tjenesteytende næringer* og *Mekanisk industri* skiller seg i vesentlig grad fra de andre sektorene behandlet i denne analysen.

Disse sektorene består av mange små enheter, og variasjon i energibruk og formålsfordeling fra enhet til enhet vil være til dels meget stor. Dette kan skyldes forskjellige løsninger for oppvarming, klimasonen som enheten befinner seg i, interaksjon med andre bedrifter som befinner seg i nærheten, etc. Videre følger en diskusjon av sektorene og gjennomføringen av analysene.

19.1 Mekanisk industri

Mekanisk industri bruker ikke råvarer til produksjon i samme forstand som f.eks. aluminiumsindustrien eller treforedlingsindustrien. I stedet har den halvfabrikata som inngående materialstrøm, mens den utgående materialstrømmen består av ferdige produkter eller mer sammensatte halvfabrikata. Det skjer liten eller ingen foredling av materialstrømmen når det gjelder dens kjemiske sammensetning og egenskaper. Som oftest ligger den eneste endringen i den geometriske utformingen til materialet eller i sammenføyingen av flere deler til en enhet. Denne endringen i geometrisk form eller sammenføyingen bør imidlertid kunne betraktes som produksjon av eksergi. Dersom man tenker på eksergi som graden av ubalanse med omgivelsene, er det helt klart at en bil som veier et tonn og er laget av stål, er i mye større ubalanse med de naturlige omgivelsene enn en ståklump som veier det samme, og har dermed større eksergi. Den kjemiske eksergien i et tonn stål og et tonn stål formet som en bil er imidlertid den samme; ergo må det være den geometriske utformingen som gir den ekstra eksergien.

Selv om en slik betraktning kanskje ville ha resultert i at mekanisk industri egentlig produserer netto eksergioverskudd, eller går i null, når det gjelder eksergi forbruk i form av energibærere og eksergiproduksjon i form av fremstilling av objekter med en geometri i sterk ubalanse med omgivelsene, finnes det pr. i dag hverken noe teoretisk fundament eller empirisk verktøy til å behandle denne type eksergi. Derfor har det i denne analysen blitt regnet med 50 % virkningsgrad for mekanisk arbeid (G. Wall: e-post; avhandling) uavhengig av hva dette mekaniske arbeidet måtte resultere i. I prinsippet vil dette si at en dreiebenk som går på "tomgang" vil i følge denne analysen produsere like mye eksergi som en dreiebenk ved operasjon i optimal skjærehastighet. Da det imidlertid er rimelig å anta at de fleste mekaniske bedrifter etterstreber mest mulig effektiv produksjon for å beholde konkurransedyktigheten på markedet, bør ikke dette være den største feilantagelsen i denne analysen.

19.2 Tjenesteytende næringer og husholdninger

Tjenesteytende næringer og husholdninger produserer så å si ingenting i eksergimessig forstand. Man kan selvfølgelig også her argumentere på en lignende måte som over ved å si at det å drive f.eks. et legekantor eller et universitet er så viktig for vår eksistens at den eksergien som produseres der i form av kunnskap og helse er langt større enn, eller i det minste veier opp for, den eksergien som disse institusjonene forbruker i form av elektrisitet og brensel. Slike betraktninger faller likevel utenfor denne analysen.

19.3 Fordeling etter formål

Resultatet er at husholdninger, tjenesteytende næringer og mekanisk industri ansees kun som forbrukere av eksergi. Dette forbruket deles opp i tre hoveddeler:

1) Romvarme:

Oppvarming av bygningsvolum ved direkte bruk av elektrisk eksergi (panelovner, etc.), oppvarming ved punktvarme fra ved og avfall (ovner, peiser, etc.) og oppvarming ved bruk av sentralfyr og sentralvarme/fjernvarme med vann eller luft som transporterende medium.

2) Belysning, elektriske artikler, varmtvann, etc.:

Elektrisk eksergi brukt til belysning og elektriske artikler (datamaskiner, TV, mikrobølgeovner, etc.) betraktes som formål med samme virkningsgrad, satt til 10% (jf. Wall). Bruk av eksergi til mekanisk arbeid/motordrift i husholdninger og tjenesteytende næringer inkluderes også her (med 50% virkningsgrad, jf. Wall). Videre omfatter denne delen prosessvarme i mekanisk industri.

3) Mekanisk arbeid:

Omfatter kun mekanisk arbeid utført i mekanisk industri. Virkningsgrad er satt til 50% (jf. Wall).

Det er denne oppdelingen de inkluderte resultatene presenterer. Analysen av hver enkelt sektor er imidlertid beskrevet i detalj og resultatene for hvert enkelt formål presentert, slik at det ikke skulle by på større problemer eller tidsinnsats å ordne resultatene i en annen oppdeling enn den beskrevet over.

19.4 Antagelser og estimater

Det må presiseres at fordelingen av energi- og eksergiforbruket etter formål er basert utelukkende på estimater og overslag. Det fins ingen sikre tall for bruken av energi etter formål i tjenesteytende næringer og mekanisk industri. Det finnes estimater for bruken av elektrisk energi etter formål i husholdninger (SSB), men igjen, dette er kun estimater, og de sier ingenting om fordelingen av den totale energibruken. Det er en viss usikkerhet i selve forbruket av ved og avfall, da dette tallet er estimert (SSB) på grunnlag av spørreundersøkelser i et utvalg husholdninger.

De fleste estimatene eller antagelsene er gjort innenfor dette prosjektet (og ikke av andre). Mange av dem er foretatt på grunnlag av tabeller gjort tilgjengelig av Bjørn Grinden, SINTEF Energiforskning, men disse tabellene inneholdt også skjønnsmessige overslag.

Som en oppsummering kan en si at det er ingen sikker grunn man står på her, men vi mener likevel (etter diverse telefonsamtaler med Energidata AS, SINTEF Energiforskning, samt andre som har kompetanse på området, og etter å ha gått igjennom en del statistiske data) at antagelsene ikke er så altfor langt fra sannheten.

19.5 Analyser

I det følgende kommer analyser av de tre ovennevnte sektorene, en oppdeling av deres energiforbruk etter formål (estimater og overslag), beregninger av totale virkningsgrader og hovedresultat. Forhåpentligvis er disse analysene såpass detaljerte og klare at det ikke blir noe problem å følge dem steg for steg, og eventuelt gå inn og korrigere de feilantagelsene som måtte bli oppdaget.

Etter sektoranalysene følger resultat for hovedformålene 1, 2, og 3 (punkt 3 ovenfor), der resultatene for disse formålene fra de enkelte sektoranalysene er summert. Denne delen baserer seg kun på analysen av hovedsektorene, og dersom det blir oppdaget noen feil der, skyldes disse ene og alene feil i summeringen av resultatene fra de tre aktuelle sektoranalysene.

20 Eksergianalyse av hushald i Noreg

20.1 Forbruk av eksergi frå energibærarar:

kjelder: SSB: *Elektrisitetsstatistikk 1995, tab. 17*
SSB: *Energistatistikk 1995, tab. 2.8 og 7.2*

Hushald står for den største elektrisitetsbruken i Noreg. I 1995 vart det brukt 125,2 PJ eksergi (=energi) frå elektrisitet. (Elektrisitetstatistikk 1995, tab. 17, sum av "Hushald" og "Hytter og fritidshus"). I tillegg til dette vart det brukt 27,3 PJ eksergi frå ved og avfall (energi: 24,6 PJ, estimert av SSB) og 13,7 PJ eksergi (energi: 12,9 PJ) frå petroleumsprodukt. **Tilsaman er eksergi-inngangen 166,2 PJ.**

Eksergiinnhaldet i fuktig ved er rekna ut etter Kotas (1995) (s.267f). Vi har rekna nedre brennverdi for tørrstoff til 19,1 MJ/kg. Med eit fuktinnhald på 20% (masse) vert effektiv brennverdi 14,8 MJ pr. kg fuktig brensel. Eksergiinnhaldet ved 20% fukt reknar vi ut til 16,5 MJ/kg, slik at eksergifaktoren vert lik 1,11 i høve til effektiv brennverdi. For tørrstoff er eksergifaktoren 1,08. Både effektiv brennverdi og eksergi minkar når fuktinnhaldet aukar. Men effektiv brennverdi minkar meir enn eksergiinnhaldet, slik at eksergifaktoren aukar.

20.2 Eksergi brukt til romvarme:

kjelder: SSB: *Energistatistikk 1995, tabell 7.2*
G. Wall: *"Exergy use in the Swedish society 1994", formel 7 og 8 samt figur 10*

41 % av elektrisitetsforbruket i hushald går til oppvarming. Med eit samla forbruk på 125,2 PJ gjev dette 51,3 PJ til oppvarming. Vi reknar at all ved og avfall (27,3 PJ eksergi) og kol, parafin, mellomdestillat og gass (13,7 PJ eksergi) går til varme ved forbrenning. I alt gjev dette 92,3 PJ eksergi til oppvarming.

Dette gjev **eksergi-inngang 92,3 PJ til romvarme.**

Med ein eksergiutnytingsgrad på 6% (sjå nedanfor), **er eksergi-utgangen 5,5 PJ.**

Det eksakte talet for eksergiutnyttinga kunne ein i prinsippet finne ved å integrere ein funksjon av kontinuerlege data for ute- og innetemperatur for alle oppvarma rom i heile landet over heile året.

Wall har utvikla ein modell eller formel for eksergi i romvarme, der ein føreset at utetemperatur varierer harmonisk (dvs. som ein sinusfunksjon) over sesongen og gjennom døgeret. Parametrane i formelen er innetemperaturen, årsmiddeltemperatur, minste 5-dagars middeltemperatur, lengda på oppvarmingssesongen, og typisk dagsvariasjon (amplitude) for utetemperatur. Med utetemperatur frå denne modellen kan han integrere Carnot-formelen, og finne eksergi som del av tilført varme; altså utnyttingsgraden. Det viste seg at denne modellen ikkje kunne nyttast. Modellen er truleg høveleg for område med stabilt vintervêr. Men særleg for stadar med brå skifte og korte periodar med svært avvikande (låg) temperatur, vert den modellen misvisande. Den harmoniske funksjonen vert ei dårleg tilnærming til temperaturfordelinga over året. Eit døme er Kristiansand, der formelen gjev ein eksergi på 4-500% av varmen! For stader med brå skifte og med korte periodar med svært avvikande (låg) temperatur, vert modellen svært misvisande.

Ei anna ulempe ved denne modellen er at temperaturdata er normaliserte over mange år (i Noreg 30 år), medan data for energibruken gjeld eitt særskild år. Ei tredje innvending mot modellen er at *uteluft*-temperaturen ikkje utan vidare skal nyttast som *omgjevnads*-temperatur. I svært mange tilfelle vil det vere tilgjengelege varmekjelder i sjø, vassdrag, jord og grunnvatn. Desse vil ha ein temperatur på 0-5 °C heile året. Vidare vil ein særleg langs kysten ha lufttemperatur mellom 0 og 10 °C i ein stor del av oppvarmingssesongen.

Eksergien i romvarme må reknast i høve til dette.

Ein kunne kome eit stykke på veg ved å dele landet inn i område, slik Wall har gjort. For utvalde stader kunne ein nytte registrerte temperaturdata for det aktuelle året, gjere føresetnader om døger-variasjon og innetemperatur, og integrere Carnot-formelen over året. Dette kan late seg gjennomføre, men vi har ikkje funne rom for det i dette prosjektet.

I mangel på betre data, sette vi den gjennomsnittleg eksergifaktoren til 6%. Dette inneber ein representativ *omgjevnad*stemperatur på 2°C i Carnot-formelen. Om ein skal diskutere dette talet, må diskusjonen helst gå på om det skal vere mindre enn 6%. Til samanlikning har Wall (1986) ved hjelp av modellen sin rekna ut utnyttingsgradene for 7 representative svenske byar. Dei varierer frå 4,0% (Göteborg) til 6,7% (Umeå), og med eit vege gjennomsnitt for Sverige på 5,0%.

Wall har også sett opp eit eige uttrykk for eksergifaktoren i varme levert som vassboren sentral- eller fjernvarme. Der ser ein levert varme som varme ved temperatur i vatnet (dvs. ikkje som varme levert ved romtemperatur). Med vassstemperatur levert til forbrukar og returtemperatur som i Sverige (jf. Wall), og representativ utetemperatur på 0°C, vert eksergifaktoren for denne varmen 23%. Vidare reknar vi at kol, petroleumsprodukt og gass (13,7 PJ eksergi) går til sentral- og fjernvarme (23% utnytting), medan resten går til direkte oppvarming i punktkjelder (6% utnytting). Dette

reknestykket ville gje ein samla eksergiutgang på 7,6 PJ, og ei utnyttingsgrad på 8,3%, eller 2,3%-poeng meir enn ovanfor.

Det kan vere grunnar til å nytte denne reknemåten. Vi har gjort dette reknestykket her som det av drøfting og samanlikning med andre analysar. Men vi har valt å ikkje bruke det i sjølve analysen (samleresultatet). Walls reknemåte favoriserer sentral- og fjernvarme framfor punktkjelder. Slike system er meir fleksible med omsyn til energiberar enn punktkjelder. Eit alvorleg innvending mot reknemåten er at uansett energiberar og varmesystem, er det romvarmen som er produktet. Walls reknemåte gjev til dømes det paradoksale resultatet at elektrokjellar gjev betre utnytting enn panelomnar, sjølv med same mengd elektrisk energi, same varmemengd, og same romtemperatur.

20.3 Eksergi brukt til varmvatn

kjelder: som ovanfor
G. Wall: verknadssgrader sendt pr. e-post.

24% av elektrisitetsforbruket går til varmvatn, det er 30 PJ. Dersom ein føreset at varmvatnet held ein temperatur på ca. 60°C og temperaturen i omgjevnadene er romtemperaturen på ca. 20°C, får ein utnyttingsgrad 17% frå Carnot-formelen. Dette gjev ein **eksergi-utgang på 5,1 PJ.**

20.4 Eksergi brukt til lys

kjelder: som ovanfor

11% av elektrisiteten i hushald går til lys, det er 13,8 PJ. For lys og anna utstyr set vi verknadsgrada til 10%. Wall har nytta denne verdien, men ikkje gjort detaljert greie for han i publikasjonane. Det verkar som eit fornuftig overslag. **Frå dette er eksergi-utgangen 1,4 PJ.**

20.5 Eksergi brukt til kjøling, elektrisk utstyr, m.m.

kjelder: som ovanfor

8% av eksergien frå elektrisitet går til kjøling. Som eit overslag reknar vi med ei gjennomsnittleg verknadssgrad på 30% for frysarar og kjøleskap. (Merk: Her er

verknadsgrad lik faktisk arbeid utført arbeid dividert på det minste teoretisk moglege arbeidet for å overføre den varmen som *faktisk* vert overført; dvs ikkje den varmen ein ville overføre i eit betre isolert kjøleskap.)

7% av elektrisitetsforbruket går til det som vert kalla "anna utstyr". Om vi reknar dette som halvt mekanisk hushaldsutstyr (50% verknadsgrad) og halvt elektriske artiklar som radio, tv, m.m. (10% verknadsgrad), får vi ei gjennomsnittleg verknadsgrad på 30 %.

Steiking og koking, vasking og tørking utgjer høvesvis 4, 3 og 2% av el-forbruket. Alle desse inneber forholdsvis høg temperatur (40-250°C), og også ein del mekanisk arbeid (rotasjon, etc). Vi slår over ein verknadsgrad til 20 %.

Oppsummert utgjer dette 24% av el.forbruket, 30,0 PJ, til kjøling, elektrisk utstyr, m.m. Eit vege gjennomsnitt for verknadsgrad vert 26% og eksergiutgangen 7,9 PJ.

20.6 Resultat

I 1995 vart det i alt **brukt 166,2 PJ** eksergi i norske hushald. Av dette gjekk 92,3 PJ til husvarme og 73,9 PJ gjekk til varmvatn, lys, elektrisk utstyr, med meir. Den samla **eksergiutgangen var 19,9 PJ**, dvs 12,0 % utnytting

For **romvarme** i hushald var **eksergiutgangen 5,5 PJ, med utnyttingsgrad 6%**.
For **lys, elektrisk utstyr**, varmvatn, m.m. var den gjennomsnittlege **utnyttingsgrada 19,5%** (vege gjennomsnitt, sjå tabell). Det gjev **eksergi-utgang på 14,4 PJ**.

20.7 Kommentar:

Vi har valt å setje oppvarming ved romtemperatur som ein post for seg, og lys, varmvatn, elektrisk utstyr, m.m. som ein annan post. Vi fann at dette ville være den mest tenlege inndelinga, særleg med tanke på lesinga av figuren som skal illustrere resultatata. Det skulle like fullt vere nok opplysningar her til å setje opp resultatet med ei anna fordeling, dersom ein skulle ønskje det.

Tabell 16: Ekssergibruk etter føremål og estimert utnyttingsgrad i hushald

Føremål	av el. (%)	forbruk tot. (PJ)	av total (%)	utnyttning	Ekssergi ut (PJ)
Romvarme	41	92,3	55,5	0,06	5,5
Vassvarming	24	30,0	18,1	0,17	
Lys	11	13,8	8,3	0,1	
Kjøling	8	10,0	6,0	0,3	
Anna utstyr	7	8,8	5,3	0,3	
Steiking/koking	4	5,0	3,0	0,2	
Vasking	3	3,8	2,3	0,2	
Tørking	2	2,5	1,5	0,2	14,4
Totalt:	100	166,2	100		19,9

21 Eksergianalyse av tjenesteytende næringer

21.1 Forbruk av eksergi fra energibærere:

*kilder: SSB: Energistatistikk 1996, tab. 2.8
SSB: Elektrisitetsstatistikk 1995, tab. 17*

Tjenesteytende næringer omfatter bygge- og anleggsvirksomhet, varehandel, hotell og restaurant, bank og forsikring, offentlig forvaltning, undervisning, helse- og sosialtjenester samt tjenesteyting ellers. Transport tilknyttet disse næringene holdes utenfor, og tas med under sektoren "Transport".

I 1995 ble det i denne sektoren brukt 71,3 PJ eksergi (=energi) fra elektrisitet og 15,1 PJ eksergi (energi: 14,3 PJ) fra petroleumsprodukter. **Totalt utgjør dette en eksergi-inngang på 86,4 PJ (energi: 85,6 PJ).**

21.2 Eksergi brukt til romvarme:

*kilder: SSB: Elektrisitetsstatistikk 1995, tab. 17
EFI (nå: SINTEF Energiforskning) og Norges Energiverkforbund:
"Belastningsforhold hos sluttbrukere og i fordelingsnett", faktahefte 1993
Tabeller tilgjengeliggjort av Bjørn Grinden, SINTEF Energiforskning, Avd.
produksjon og Marked*

På grunnlag av elektrisitetsforbruket hos de forskjellige tjenesteytende næringene, ble det beregnet et veid gjennomsnitt for andel energi brukt til husvarme i den tjenesteytende sektoren (se tabell). Posten "Kontorbygg" i beregningstabellen omfatter bank og forsikring, offentlig forvaltning samt "tjenesteyting ellers" fra tabell 17 i elektrisitetsstatistikken.

Det ble funnet at det i gjennomsnitt brukes 36,2 % (31,3 PJ) av eksergien til romoppvarming. Det vil i de videre beregninger antas at all eksergi fra petroleumsprodukter brukes til oppvarming (via sentralfyring, o.l.). Petroleumsprodukter utgjør 17,5 % (15,1 PJ) av den totale eksergiinnsatsen, noe som medfører at de resterende 18,7 % (16,2 PJ) som brukes til oppvarming kommer fra elektrisitet.

For oppvarming antas en gjennomsnittlig eksergifaktor på 6% (Se "Eksergianalyse av hushald"). **Totalt gir dette en eksergi-inngang på 31,3 PJ til romvarme, og en utgang på 1,9 PJ.**

Walls regnemåte for sentral- og fjernvarme ble diskutert under “Husholdninger”. Som nevnt der, har vi ikke brukt denne regnemåten i totalanalysen. En kunne anta at petroleumsprodukter (15,1 PJ eksergi) brukes i sentral- og fjernvarme (23% utnyttning), og elektrisitet i punktkilder (6% utnyttning). Dette ville resultere i en eksergi-utgang på 1,0 PJ fra oppvarming med elektrisitet og 3,5 PJ fra oppvarming med petroleumsprodukter (sentralvarme), tilsammen 4,5 PJ eksergi-utgang.

Tabell 17: Fordeling av energibruk til romvarme i tjenesteytende sektor

Sektor	Totalt el.forbruk		andel el. til varme (%)	andel til varme av tot. el. (%)
	energi (PJ)	andel (%)		
Undervisning	9,4	13,1	62	8,2
Kontorbygg	29,7	41,5	38	15,8
Helse/sosial	7,8	10,9	38	4,1
Hotell	5,0	7,0	32	2,2
Bygg/anlegg	1,6	2,2	17	0,4
Varehandel	18,0	25,2	22	5,5
Totalt:	71,5	100,0		36,2

21.3 Eksergi brukt til belysning og elektrisk utstyr:

*kilder: Tabeller tilgjengeliggjort av Bjørn Grinden, SINTEF Energiforskning, Avd. produksjon og Marked
G. Wall: virkningsgrader tilsendt pr. e-post*

Etter et estimat basert på kilden over, ble det funnet at av den resterende elektriske eksergien går ca. 80% til elektrisk utstyr og belysning, hvorav knappe 2 % går til motordrift, dvs. mekanisk arbeid. Virkningsgraden for elektrisk utstyr settes lik den for belysning, dvs. 10%.

Med et forbruk på 16,2 PJ elektrisk eksergi (=energi) brukt til oppvarming, står man igjen med 55,1 PJ. Dette gir **en input av eksergi i elektrisk utstyr og belysning på 43 PJ** (78 % av 55,1 PJ). Med en utnyttingsgrad på 10% får man en **netto eksergi-utgang på 4,3 PJ**.

21.4 Eksergi brukt til motordrift (mekanisk arbeid):

kilder: som over

1,1 PJ elektrisk eksergi går til motordrift, dvs. mekanisk arbeid. For mekanisk arbeid settes virkningsgraden til 50% (ifl. Wall). Dette resulterer i en **eksergi-utgang på 0,6 PJ**.

21.5 Eksergi brukt til varmtvann:

kilder: som over

De resterende **11 PJ elektrisk eksergi går til varmtvann** (estimat basert på data fra B. Grinden). Varmtvann har en eksergifaktor E/Q på 17% (se "Eksergianalyse av husholdninger", pkt. 3). Dette gir en **eksergi-utgang på 1,9 PJ**.

Tabell 18: Eksergibruk etter formål og estimert utnyttingsgrad i tjenesteytende sektor

Formål	av el. (%)	forbruk tot. (PJ)	av total (%)	utnyttning	Eksergi ut (PJ)
Romvarme	23	31,3	36,2	0,06	1,9
Lys, utstyr	60,3	43,0	49,8	0,10	
Vannvarming	15,4	11,0	12,7	0,17	
Motordrift	1,5	1,1	1,3	0,50	6,7
Totalt:	100,2	86,4	100,0	0,10	8,6

21.6 Resultat:

I 1995 ble det **tilsammen brukt 86,4 PJ eksergi** i norske tjenesteytende næringer og offentlige bygg. Av dette gikk 31,3 PJ til romvarme og 55,1 PJ gikk til elektrisk utstyr, belysning, varmtvann og mekanisk arbeid. Utgangen fra romvarme var totalt på 1,9 PJ, med en utnyttingsgrad på 6%. For lys, elektrisk utstyr og varmtvann, var eksergi-utgangen på 6,7 PJ, noe som gir en gjennomsnittlig utnyttingsgrad på 12,2 %.

Samlet eksergi-utgang er 8,6 PJ og utnyttingsgrad 10 %.

21.7 Kommentar:

På grunn av den store mengden elektronisk utstyr som i dag brukes i tjenesteytende næringer, har oppvarmingsbehovet blitt redusert. Varmen som dette utstyret avgir i løpet av fyringssesongen har en viss (dog lav) eksergi. Dette antas å inngå som del av den estimerte eksergi-utgangen for lys og elektrisk utstyr.

Virkningsgraden for elektronisk utstyr er satt lik den for lys. Dette kan virke mystisk, men ettersom det her ikke regnes med abstrakte eksergikilder som f. eks. informasjonshastighet, etc., er det eneste produktet til f. eks. en dataskjerm det lyset og varmen skjermen sender ut.

22 Eksergianalyse av "annen industri" i Norge

22.1 Introduksjon

kilder: SSB: Energistatistikk 1996, tab. 2.8

SSB: Energivarebalanse 1995, tilsendt pr. faks

Post 14.6 i Energistatistikken, tab. 2.8, "annen industri", omfatter bl.a. næringsmiddelindustri, tekstil, bearbeidings- og mekanisk industri, kjemisk industri, etc. På grunnlag av detaljert oversikt over de næringene som inngår (jf. kilde 2) har næringsmiddel- og den kjemiske industrien blitt skilt ut. Disse inngår nå i "Eksergianalyse av produksjon- og forbruk av mat i Norge" og "Eksergianalyse av kjemisk industri i Norge". Man står da igjen med industri av primært produserende og bearbeidende art, der den største delen av energibruken går til mekanisk arbeid og prosess.

22.2 Forbruk av eksergi fra energibærere

kilder: SSB: Energistatistikk 1996, tab. 2.8

SSB: Energivarebalanse 1995, tilsendt pr. faks

I 1995 ble det i mekanisk industri og prosessindustri brukt 17,8 PJ eksergi (energi: 16,8 PJ) fra petroleumsprodukter og koks, og 17,2 PJ eksergi (=energi) fra elektrisitet. **Totalt utgjør dette en eksergi-inngang på 35,0 PJ.**

22.3 Eksergi brukt til mekanisk arbeid

kilder: Tabeller tilgjengeliggjort av Bjørn Grinden, SINTEF Energiforskning, Avd. produksjon og Marked

G. Wall: virkningsgrader sendt pr. e-post

På grunnlag av kilde 1 for tekstilindustrien og egne skjønsmessige overslag antas det at 65 % av den elektriske eksergien (=energi) går til mekanisk arbeid. Med et totalforbruk av elektrisk eksergi på 17,2 PJ, betyr dette **11,2 PJ til diverse maskiner**. Virkningsgraden for mekanisk arbeid er satt til 50 % (Wall). Dette resulterer i en **eksergi-utgang på 5,6 PJ**.

Tabell 19: Annen industri: eksergi bruk etter formål og estimert virkningsgrad

Formål	A (%)	B (PJ)	C (%)	D (PJ)	E (PJ)	F (%)	G (%)	Eksergi ut (PJ)
Mekanisk arb.	65	11,2	0,0	0,0	11,2	32,0	50,0	5,6
Romvarme	10	1,7	60,0	10,7	12,4	35,4	6,0	0,7
Lys, utstyr,...	20	3,4	0,0	0,0	3,4	9,7	10,0	0,3
Varmtvann	5	0,9	0,0	0,0	0,9	2,6	17,0	0,2
Prosessvarme	0	0,0	40,0	7,1	7,1	20,3	26,0	1,8
TOTALT:	100	17,2	100	17,8	35,0	100,0	24,8	8,7

Forklaring til kolonnene:

A: Elektrisitetsforbruk, andel (%)

B: Elektrisitetsforbruk, mengde (PJ)

C: Forbruk av petroleumsprod., andel (%)

D: Forbruk av petroleumsprod., mengde (PJ)

E: Samlet forbruk av eksergi, mengde (PJ)

F: Samlet forbruk av eksergi, andel (%)

G: Estimert utnyttingsgrad (%)

22.4 Eksergi brukt til belysning, etc.

På samme grunnlag som over, antas det at 20% av den elektriske eksergien går til belysning og elektriske artikler som datamaskiner, etc. Dette innebærer en **eksergi-inngang på 3,4 PJ**. Med en virkningsgrad på 10%, resulterer dette i en **eksergi-utgang på 0,3 PJ**.

22.5 Eksergi brukt til varmtvann

Det antas at 5 % av elektrisitetsforbruket går til varmt vann, med en virkningsgrad på 17% (se "Eksergianalyse av husholdninger, pkt. 3). Dette gir en **eksergi-inngang på 0,9 PJ og en utgang på 0,2 PJ**.

22.6 Eksergi brukt til romvarme

Det antas at 10 % av den elektriske eksergien går til romoppvarming. Dette resulterer i en input av eksergi på 1,7 PJ, og en output i form av varme på 0,1 PJ (utnyttingsgrad: se "Eksergianalyse av husholdninger i Norge"). Eksergien fra petroleumsprodukter regnes å

gå dels til romvarme i sentralvarmeanlegg, dels til prosessvarme. Hvis man antar at 60 % av denne eksergien går til romvarme, får man en input av eksergi på 10,7 PJ. Med en utnyttingsgrad på 6% (se under delanalysen "Hushald") gir dette en utgang på 0,6 PJ.

Total input av eksergi til romvarme er da 12,4 PJ, med en utnyttingsgrad på 6% er netto output er på 0,7 PJ.

Walls regnemåte for sentral- og fjernvarme ble diskutert under "Hushald". Denne regnemåten gir 23% utnytting. Ved å anta at petroleumsproduktene (10,7 PJ eksergi) er brukt i sentralvarme, ville en få en utgang på 2,5 PJ. Den samlede eksergi-utgangen ville blitt 2,6 PJ, og utnyttingsgraden 21 %. Som før nevnt, har vi valgt å ikke bruke denne regnemåten, men tar det med som del av diskusjon og sammenligning.

22.7 Eksergi brukt til prosessvarme

De resterende 40 % av det totale forbruket av petroleumsprodukter antas å gå til prosessvarme. Grunnlaget for denne antagelsen er meget usikkert, det er mer en ren gjetning. Det er tenkt at nesten enhver produksjonsprosess krever oppvarming eller tørking på et visst tidspunkt. Ettersom denne industrien ikke er kraftintensiv, og dessuten består den av mange vidt forskjellige industrityper, tenkes det at oppvarmingsprosessene ikke går særlig over 600 °C (f.eks. spenningsgløding av stålkonstruksjoner), og at de aller laveste ligger rundt 60 °C (vask og rensing av tekstiler, etc.). Det antas så videre at det er flere prosesser som krever varme mellom 100 og 150 °C enn det er prosesser som krever høyere varme. Hvis man tar 125 °C som en representativ temperatur, gir dette en Carnot-virkningsgrad på 26%. 40 % av det totale forbruket av petroleumsprodukter tilsvarer **7,1 PJ eksergi (energi: 6,7 PJ), som er input i varmeprosessene**. En gjennomsnittlig virkningsgrad på 26% resulterer i en **output av eksergi på 1,8 PJ**.

22.8 Resultat

Fordelingen av forbruk på formål basert på skjønnsmessige overslag.

I 1995 ble det totalt **brukt 35,0 PJ eksergi** i norsk mekanisk- og prosessindustri, og **eksergiutgangen var 8,7 PJ**. Dette gir en samlet **utnyttingsgrad på 24,8%**. Fordelingen til ulike formål må gjøres som skjønnsmessige overslag. Vi regner at det gikk 11,2 PJ eksergi til mekanisk arbeid. Den netto outputen av mekanisk arbeid, når man regner med en virkningsgrad på 50 %, var på 5,6 PJ.

Forbruket av eksergi til romvarme var totalt på 12,4 PJ. Med utnyttingsgrad på 6% gir dette en netto output på 0,7 PJ.

Eksergi brukt til elektrisk utstyr og belysning, varmtvann, prosessvarme, etc. utgjorde totalt 11,4 PJ (4,3 PJ elektrisk, 7,1 PJ petroleumsprodukt). Den totale outputen av eksergi var på 2,3 PJ. Dette tilsvarer en gjennomsnittlig utnyttelsesgrad på 20,5 %.

22.9 Kommentarer

Det er viktig å være oppmerksom på at mesteparten av denne analysen er basert på egne overslag. Det ligger betydelig usikkerhet/feil i fordelingen av eksergibruk på formål, og virkningsgradene er også kun av omtrentlig karakter.

Det er imidlertid slik at denne sektoren bruker så lite energi i forhold til de andre sektorene som er analysert, at feilene her, uansett hva deres størrelse måtte være, vil gi et lite utslag for den totale analysen. Den feilen som kommer til å synes, er den som ligger i det mekaniske arbeidet. Jeg vil imidlertid tro at antagelsen om at 65% av den elektriske eksergien (=energi) går til mekanisk arbeid, ikke er noe mindre korrekt enn mye av dataene og statistikkene som ligger til grunn for de andre sektorene.

23 Eksergianalyse av romoppvarmingen i Norge

23.1 Introduksjon

Denne analysen baserer seg utelukkende på en summering av resultatene for romvarme fra analysene for husholdninger, tjenesteytende sektorer og mekanisk industri. Eventuelle feil eller resultat her som ikke samsvarer med de tre ovennevnte sektoranalysene, skyldes utelukkende feil under summering av resultatene fra disse analysene.

23.2 Forbruk av eksergi fra energibærere

Det ble i 1995 brukt totalt 69,2 PJ (51,3 + 16,2 + 1,7 PJ) elektrisk eksergi (=energi) til romoppvarming. I tillegg til dette ble det brukt 39,5 PJ (13,7 + 15,1 + 10,7 PJ) eksergi fra petroleumsprodukter (energi: 37,3 PJ). Videre ble det brukt 27,3 PJ eksergi fra ved og avfall (energi: 24,6 PJ) i husholdninger. Tilsammen 136,0 PJ eksergi (energi: 131,1 PJ).

23.3 Resultat

Tilført eksergi er 136,0 PJ. Med en eksergifaktor på 6% for varme ved romtemperatur blir **eksergi-utgangen 8,2 PJ.**

24 Eksergianalyse av belysning, el. artikler, prosessvarme, etc. i Norge

24.1 Introduksjon

Denne analysen baserer seg utelukkende på en summering av resultatene for belysning, elektriske artikler, varmtvann og prosessvarme fra analysene for husholdninger, tjenesteytende sektorer og “annen” (mekanisk) industri.

24.2 Forbruk av eksergi fra energibærere

Det ble i 1995 brukt totalt 133,2 PJ (73,9 + 55,1 + 4,3 PJ) elektrisk eksergi (=energi) til belysning, elektriske artikler, varmtvann, etc. Eksergi-utgangen var på 21,6 PJ, noe som gir en gjennomsnittlig utnyttingsgrad på 16,2 %.

Videre ble det brukt 7,1 PJ eksergi (energi: 6,7 PJ) fra petroleumsprodukter til prosessvarme i mekanisk- og prosessindustrien. Med en antatt eksergifaktor på 26%, resulterer dette i en eksergi-utgang på 1,8 PJ

24.3 Resultat

Det ble i 1995 totalt **brukt 140,3 PJ eksergi** til belysning, elektriske artikler, varmtvann, prosessvarme, etc. Den totale **eksergi-utgangen var 23,4 PJ**. Dette gir en total gjennomsnittlig eksergifaktor på 16,7 %.

25 Eksergianalyse av mekanisk arbeid i Norge

25.1 Introduksjon

Antagelser som i "Eksergianalyse av "annen industri" i Norge", pkt. 3.

25.2 Resultat

Det ble i 1995 **brukt totalt 11,2 PJ elektrisk eksergi** (=energi) til mekanisk arbeid. Med en gjennomsnittlig virkningsgrad på 50 % gir dette en **utgang av eksergi på 5,6 PJ**.

26 Sluttmerknader og konklusjon

Hovudresultata er oppsummerte i avsnitt 1.

Energibruken i det norske samfunnet er undersøkt ved hjelp av eksergianalyse. Analysen tek med alle resursar som går inn i samfunnet: energiberarar, avling i jord- og skogbruk, fiske og fangst, malm og mineralar. Ein eksergianalyse kartlegg *energifyten* som i ein vanleg energianalyse, og *i tillegg eksergien* i material- og energistraumane. Eksergi er eit termodynamisk mål for kvaliteten til energien.

Nytten av ein slik analyse ligg

- for det første i at ein kan *identifisere* område der energiutnyttinga er svak, der mykje energikvalitet går tapt. På denne måten veit ein meir om kvar tiltak kan setjast inn for å betre energiutnyttinga i samfunnet, og spare energi med høg kvalitet (t.d. elektrisk energi).
- for det andre i at ein kan *synleggjere* at ulike aktivitetar krev – eller tek vare på – energien og energikvaliteten (eksergien) på ulikt vis.

For året som er analysert, 1995, gjekk det til saman 1184 PJ eksergi inn i det norske samfunnet. Frå alt dette var det att 280 PJ i dei varer og tenester som vart produserte. Dette gjev ein utnyttingsgrad på 24 %.

Samfunnsområde som særleg peikar seg ut med svak energiutnytting, er romvarme, lys m.m., næringsmiddel og transport. Alle desse har utnyttingsgrad under 20 % og utgjer kvar for seg ein stor del av energibruken. Sektorane "Romvarme" og "Lys m.m." kan alternativt grupperast som "Hushald" og "Tenesteytande sektor". Begge desse sektorane har eksergiutnyttingsgrad på ca. 10%.

Industrien kjem relativt betre ut, med 30-60 % utnyttingsgrad.

Kva fortel så dette?

I analysen har vi sett på kva ein *teoretisk sett* kunne fått ut av dei resursane vi brukar, og kor mykje av dette vi får ut. *I praksis* kan vi ikkje nå dette. I røyndomen må vi leve med friksjon, temperatursprang, trykkskilnader, lekkasjar, og så bortetter. Men analysen viser at det finst eit potensiale for forbedring, og vi i praksis kunne greie oss med ei mindre energimengd. Det vil seie ein stad mellom det teoretiske 24% og det faktiske 100%.

Det same gjeld for dei einskilde sektorane. Aluminiumsindustrien, til dømes, har om lag 40% utnytting. Dersom alle aluminiumsfabrikkar var lik dei nyaste og beste, ville talet gjerne vore litt høgare. Teoretisk sett kunne ein fått 2,5 gongar så mykje aluminium med den same eksergien. Dette er ei absolutt øvre fysisk grense. Vi kunne (hypotetisk) tenkje

oss at ein i ei framtid med ny teknologi kunne utnytte, lat oss seie 60% eller 80%; dvs auke produksjonen til 1,5 –2 gongar. Men då nærmar ein seg den absolutte grensa.

På den andre sida, i sektoren romvarme er utnyttinga om lag 6%. Her kan ein med *eksisterande teknologi* (varmepumper) auke utnyttinga 3-4 gongar. Den praktiske grensa ligg truleg på 6-7 gongar.

Sagt på annan måte: For romvarme kan ein i dag redusere energibruken til ¼ eller mindre. Sjølv med framtidig, ny teknologi kan ikkje aluminiumsindustrien halvere energibruken.

Visste vi dette frå før?

Fagfolk har visst at varmepumper gjev mykje meir nyttig varme enn direkte oppvarming. Dei har også visst at metall- og papirproduksjon krev, eller tek vare på, ein del av energien. Slik sett er ikkje resultata overraskande når dei no ligg føre. Det nye her er at vi har fått biletet talfesta og dokumentert, og at dei ulike samfunnssektorane kan samanliknast.

Kva studien ikkje seier noko om:

Dette er først og fremst ein termodynamisk analyse av energibruken i samfunnet. Vi kjem ikkje inn på politiske, administrative, økonomiske, etiske, eller andre slike spørsmål som også vedkjem energibruken i samfunnet. Men slike spørsmål må drøftast på grunnlag av ein samla, faktisk kunnskap. Det er dette kunnskapsgrunnlaget som er utvida med denne studien.

Litt om måleiningar

I denne rapporten har vi rekna energi og eksergi i SI-eininga *petajoule*, PJ,

$$1 \text{ PJ} = 10^{15} \text{ J.}$$

For dei som er meir vane med *watt-timar*, er omrekninga

$$3,6 \text{ PJ} = 1,0 \text{ TWh,}$$

$$1 \text{ PJ} = 0,278 \text{ TWh.}$$

For masse kan den mest praktiske måleininga vere *mega-tonn*,

$$1 \text{ Mtonn} = 10^6 \text{ tonn} = 10^9 \text{ kg.}$$

For energi pr. masse får vi samanhengen $1 \text{ PJ/Mtonn} = 1 \text{ MJ/kg.}$