

Lagring av flisade skogsbränslen
- med avseende på att minska energi- och kvalitetsförändringar

Storage of chipped forest fuels
- with regard to reducing energy and quality changes

Agunnaryd, 2011-02-28

30 hp

Examensarbete/BT 9903

Handledare: Helen Frisé, Växjö Energi AB

Handledare: Thomas Thörnqvist, Linnéuniversitet, Institutionen för teknik

Examinator: Thomas Thörnqvist, Linnéuniversitet, Institutionen för teknik

Examensarbete nr: TEK 001/2011

Daniel Nilsson

Organisation/ Organization Linnéuniversitetet Institutionen för teknik Linnaeus University School of Engineering	Författare/Author(s) Daniel Nilsson	
Dokumenttyp/Type of Document Examensarbete/Diploma Work	Handledare/tutor Thomas Thörnqvist & Helen Frisé	Examinator/examiner
Titel och undertitel/Title and subtitle Lagring av flisade trädbränslen - med avseende på att minska energi- och kvalitetsförsämringar Storage of chipped woodfuels - with regard to reducing energy and quality deterioration		
Sammanfattning (påsvenska) Vid lagring av biobränslen sker det substansförluster, tillväxt av mikrosvampar, förändringar av fukthalten etc. Sammantaget leder detta till energiförändring i bränslestacken. Syftet med denna studie har varit att ta fram ett förslag över hur bränslet ska lagras vid VEAB:s nya bränsleplan med avseende att minimera energi- och kvalitetsförsämringar samt att minimera brandrisken i bränslelagret. Med kvalitetsförsämringar menas i detta fall substansförluster och energiförluster samt tillväxt av mikrosvampar. Samtliga prov som använts i denna undersökning har insamlats vid ett och samma tillfälle. Då insamlades både material som lagrats under ca sju månader men även nyinkommet material. Resultaten från det undersökta materialet har sedan jämförts med tidigare undersökningar utförda på sönderdelade hyggesrester, både färsk och lagrade. Medelfukthalten i stacken med det lagrade materialet var vid provtagningstillfället 30,5 % medan medelfukthalten för det nylevererade bränslet var 47,4%. Resultaten av fukthaltsproverna visar även att en omfördelning av fukten sker vid lagring. Medelaskhalten i stacken bestämdes till 1,91 % vilket kan jämföras med medelaskhalten för det nyinkomna bränslet på 1,42 %. Det kalorimetriska värmevärdet för bränslet i stacken bestämdes till 20,1 MJ/kg TS och till 19,4 MJ/kg TS för det nyinkomna bränslet. Det effektiva värmevärdet för bränslet i stacken ($q_{V,net,m}$), beräknades enligt SIS-CEN TS 14918: 2005 till 12,2 MJ/kg vilket motsvarar 17,6 MJ/kg TS. För det nyinkomna bränslet beräknades det effektiva värmevärdet mellan 8,5 MJ/kg respektive 15,9 MJ/kg TS. Torr-rådensiteten för det lagrade bränslet i stacken uppmättes i medeltal till 434,9 kg/m ^{3f} , medan det nyinkomna bränslets torr-rådensitet uppmättes till 425,1 kg/m ^{3f} . Mängden sporer i proverna bestämdes i medeltal till $1,5 \cdot 10^{11}$ st/kg TS för bränslet i stacken och till $5,0 \cdot 10^{10}$ st/kg TS för det nyinkomna bränslet. Fraktionsfördelningen i stacken visade sig vara uppdelad på 88,7 % ved, 10,4 % finfraktion och 0,9 % barr. Detta kan jämföras med fraktionsfördelningen i det nyinkomna bränslet där fördelningen var 79,7 % ved, 19,3 % finfraktion och 1 % barr. Både energiförlusterna och substansförlusterna är som störst i början av lagringen, under de tre första månaderna (Thörnqvist och Jirjis 1990). Substansförlusterna i bränslet har skattats utifrån bränslets torr-rådensitet vilken uppmättes till 435 kg/m ^{3f} för bränslet i stacken efter lagring medan torr-rådensiteten antas varit ca 480 kg/m ^{3f} vid sönderdelningen detta ger en substansförlust på ca 45 kg/m ^{3f} eller ca 9 %. Energiförlusterna i stacken har skattats utifrån det effektiva värmevärdet per m ^{3f} . Det effektiva energiinnehållet i stacken beräknades till ca 7700 MJ/m ^{3f} medan energiinnehållet i samma material vid sönderdelning beräknades till ca 8060 MJ/m ^{3f} . Detta ger en total energiförlust på 360 MJ/m ^{3f} eller ca 4,5 %. För att minska energiförluster, substansförluster, återfuktning och tillväxten av mikroorganismer är det fördelaktigt att sönderdela bränslet så sent som möjligt i kedjan från hygge till panna.		

Nyckelord

lagring, kalorimetriskt värmevärde, effektivt värmevärde, torr-rådensitet, mikrosporer, askhalt, fukthalt

Abstract (in English)

When biofuels are stored substance losses, growth of micro-fungi, changes in moisture content, etc. Overall this leads to energy losses of the fuel. The purpose of this study is to investigate these changes in fuel quality, and investigate earlier research on how fuel can be stored with respect to minimize deterioration of fuel quality. With deterioration in this study is meant by substance losses, energy loss, and growth of micro-fungi. The results of this study have therefore been compared with previous research conducted of stored logging residues.

The average moisture content of the stored fuel was determined at 30.5 % while the average moisture content of the newly delivered fuel was determined at 47.4 %. The result of the moisture content measurements shows that there has been a redistribution of moisture content in the windrow. The average ash-content in the stored fuel was determined to 1.91 % and 1.42 %. The gross calorific value at constant volume of the fuel was determined at 20.1 MJ / kg DM and 19.4 MJ / kg DM for the newly delivered fuel. The net calorific value at constant volume for the fuel was calculated according to SIS-CEN TS 14 918: 2005 to 12.2 MJ / kg which corresponds to 17.6 MJ / kg DM. For the newly calculated fuel net calorific value between 8.5 MJ / kg and 15.9 MJ / kg DM. The average basic density of the stored fuel was determined to 434.9 kg/m³f and 425.1 kg/m³f for the newly delivered fuel. The amount of micro-fungi spores in the stored fuel was determined to $1.5 \cdot 10^{11}$ pcs / kg DM for the fuel in the stack and to $5.0 \cdot 10^{10}$ pcs / kg DM for the newly delivered fuel. The fraction distribution of the fuel was found to be 88.7% wood, 10.4% fines and 0.9% needles. For the newly delivered fuel the fraction distribution was 79.7% wood, 19.3% fines and 1% needles.

Both energy losses and substance losses are greatest at the beginning of storage, in the first three months (Thörnqvist & Jirjis 1990). The substance losses in the fuel has been estimated based on the basic density of the fuel which was measured at 435 kg/m³f for fuel in after storage while the basic density assumed to have been about 480 kg/m³f the disintegration thus causing an substance loss of about 45 kg/m³f or about 9% .

Energy losses in the fuel has been estimated based on the calorific value per m³f. The net energy content of the stack was calculated at approximately 7700 MJ/m³f while the energy content of the material upon decomposition was calculated at approximately 8060 MJ/m³f. This gives a total energy loss of 360 MJ/m³f or about 4.5%.

To reduce energy loss, substance loss, moisture and the growth of microorganisms, it is advantageous to decompose the fuel as late as possible in the supply chain.

Key Words

storing, gross calorific value at constant volume, net calorific value at constant volume, basic density, micro fungi spores, ash content, moisture content

Utgivningsår/Year of issue

2010

Språk/Language

Svenska/Swedish

Antal sidor/Number of pages

64

Internet/WWW

<http://www.lnu.se>

Sammanfattning

För ytterliggare satsningar på förnybar energi i Växjö, "Europas grönaste stad", planerar Växjö Energi AB (VEAB) för ytterliggare ett kraftvärmeblock eldat med biobränslen. I samband med det nya kraftvärmeblocket planeras en ny större lagringsyta där bränslet kan hanteras på ett bättre sätt.

Vid lagring av biobränslen sker det substansförluster, tillväxt av mikrosvampar, förändringar av fukthalten etc. Sammantaget leder detta till energiförluster i bränslestacken. Eftersom VEAB ska bygga en ny lagringsyta i anslutning till kraftvärmeverket är man intresserad av att ta reda på hur bränslestackarna i fortsättningen ska planeras på bästa tänkbara sätt med avseende på brandrisk, fuktutjämning, substansförluster, tillväxt av mikrosvampar och energiförluster. Bränslet i stacken bestod av flera olika material (sågspån, ren lövflis, hyggesrester, bark mm.) där skogsrester stod för merparten av. Resultaten i denna undersökning har därför jämförts med tidigare undersökningar utförda på hyggesrester.

I dagsläget har VEAB en lagringsyta stor nog för produktion av ca 15 - 18 000 MWh värme, vilket motsvarar ungefär en veckas lager under vintermånaderna. Eftersom lagringsytan är begränsad innebär det ett problem då det äldsta bränslet kan bli liggande längst in i bränslestacken under lång tid. Detta innebär i sin tur att det färskaste bränslet förbränns först under stora delar av eldningssäsongen.

Medelfukthalten i stacken med det lagrade materialet var vid provtagningstillfället 30,5 % medan medelfukthalten med det nylevererade materialet var 47,4%. Resultaten av fukthaltsproverna visar även att en omfördelning av fukten har skett. De högsta fukthalterna hittas i stackens översta nivå, längre ner i stacken var fukthalten lägre. Medelfukthalterna i stacken var för N1, N2 samt N3 i tur och ordning 40,7%, 27,5% och 23,4%. Detta kan jämföras med medelfukthalten för färskta sönderdelade hyggesrester som varierade mellan 54,5 och 57,5% (Thörnqvist 1983 a).

Askhalten i stacken varierade mellan 1,16 och 3,85 % med en medelaskhalt på 1,91 %. För det nyinkomna bränslet varierade askhalten mellan 1,08 % och 1,77 %, med en medelaskhalt på 1,42 %. Den uppmätta medelaskhalten kan jämföras med askhalten för nyavverkade hyggesrester, vilken bestämdes av Thörnqvist (1985) till 2,1 %, men den kan också jämföras med askhalten för ren stamved vilken varierar mellan 0,2 och 0,4 % (Thörnqvist 1985).

Det kalorimetriska värmevärdet för bränslet i stacken varierade mellan 19,2 och 20,4 MJ/kg TS, med ett medelvärde på 20,1 MJ/kg TS. Det kalorimetriska värmevärdet för det nyinkomna bränslet varierade mellan 18,9 och 20,0 MJ/kg TS, med ett medelvärde på 19,4 MJ/kg TS. Det effektiva värmevärdet för bränslet i stacken ($q_{v,net,m}$), beräknat enligt SIS-CEN TS 14918: 2005, varierade mellan 8,9 och 15,8 MJ/kg. Medelvärdet för stackens effektiva värmevärde beräknades till 12,2 MJ/kg. För det nyinkomna bränslet varierade det effektiva värmevärdet mellan 7,0 och 10,2 MJ/kg med ett medelvärde på 8,5 MJ/kg. Det effektiva värmevärdet beräknades även enligt formler angivna i Thörnqvist (1983 c) och Lehtikangas (1999). Då varierade det effektiva värmevärdet mellan 16,1 och 18,6 MJ/kg TS. Medelvärdet för stackens effektiva värmevärde beräknades till 17,6 MJ/kg TS. För det nyinkomna bränslet varierade det effektiva värmevärdet mellan 14,8 och 17,0 MJ/kg TS med ett medelvärde på 15,9 MJ/kg TS. Det sistnämnda värdet kan tyckas lågt men beror av höga fukthalter och relativt låga kalorimetriska värmevärden i två av proverna. De låga värdena på det

kalorimetriska värmevärdet kan tyda på en hög lövandel i den nyinkomna flisen vid just detta tillfälle.

Då även torr-rådensiteten uppmättes kunde det effektiva värmevärdet beräknas med avseende på volymen. När det effektiva värmevärdet beräknat utifrån SIS-CEN TS 14918: 2005 varierade mellan 4196 MJ/m³f och 8173 MJ/m³f för bränslet med ett medelvärde på 5442 MJ/m³f. För det nyinkomna bränslet beräknades det effektiva värmevärdet till 3043 respektive 3454 MJ/m³f. När samma beräkningar utfördes utifrån formler angivna i Thörnqvist (1983 c) och Lehtikangas (1999) varierade det effektiva värmevärdet, med avseende på volymen, mellan 6208 och 9434 MJ/m³f med ett medelvärde på 7772 MJ/m³f. För det nyinkomna bränslet beräknades det effektiva värmevärdet till 6576 respektive 6427 MJ/m³f med ett medelvärde på 6501 MJ/m³f.

Substansförlusterna i bränslet har skattats utifrån bränslets torr-rådensitet vilken uppmättes till 435 kg/m³f för bränslet i stacken efter lagring medan torr-rådensiteten antas varit ca 480 kg/m³f vid sönderdelningen detta ger en substansförlust på ca 45 kg/m³f eller ca 9 %.

Mängden sporer per kg/TS i stacken varierade mellan 5,0*10¹⁰ st/kg TS och 3,4*10¹¹ st/kg TS med ett medelvärde på 1,5*10¹¹ st/kg TS. För det nyinkomna materialet varierade mängden sporer mellan 4,2*10¹⁰ st/kg TS och 6,3*10¹⁰ st/kg TS med ett medelvärde på 5,0*10¹⁰ st/kg TS.

Bränslet delades i denna undersökning in i tre olika fraktioner, dessa är ved, inklusive kvist med bark grövre än 3 mm, finfraktion samt barr. Sammantaget visade det sig att stacken i medeltal innehöll 88,7 % ved, 10,4 % finfraktion och 0,9 % barr. Fraktionsfördelningen i det nyinkomna materialet fördelade sig på 79,7 % ved, 19,3 % finfraktion och 1 % barr.

Några temperaturmätningar i stacken utfördes inte i denna undersökning, men det kunde under provtagningstillfället konstateras att temperaturvariationerna i stacken inte var betydande. Vissa delar av stacken var visserligen lite varmare än genomsnittet men det fanns ingen del som var riktigt varm, däremot fanns det några kalla områden med isklumpar.

Substans och energiförlusterna är som störst i början av lagringen, under de tre första månaderna enligt bland annat Thörnqvist och Jirjis (1990) och Rugar-Gadd (2006). Båda dessa är starkt kopplade till bränslets medelfukthalt. Energiförlusterna och substansförlusterna efter ca tre månaders lagring är 5,1 respektive 5,9 %. Därefter avtar hastigheten både för energiförlusterna och substansförlusterna, efter ca sju månaders lagring är den totala energiförlusten 7,9 % och den totala substansförlusten 11,3 % (Thörnqvist och Jirjis 1990).

Energiförlusterna i stacken har skattats utifrån det effektiva värmevärdet per m³f. Det effektiva energiinnehållet i stacken beräknades till ca 7700 MJ/m³f medan energiinnehållet i samma material vid sönderdelning beräknades till ca 8060 MJ/m³f. Detta ger en total energiförlust på 360 MJ/m³f eller ca 4,5 %.

För att minska energiförluster, substansförluster, återfuktning och tillväxten av mikroorganismer är det fördelaktigt att sönderdela bränslet så sent som möjligt i kedjan från hygge till panna.

Summary

For further investment in renewable energy in Vaxjo, Växjö Energi AB (VEAB) is planning for yet another combined heat and power unit (CHP) fired with biofuels. In connection with the new CHP block is planned a new, larger storage area where the fuel can be handled in a better way.

When biofuels are stored substance losses, growth of micro-fungi, changes in moisture content, etc. Overall this leads to energy losses of the fuel. The purpose of this study is to investigate these changes in fuel quality, and investigate earlier research on how fuel can be stored with respect to minimize deterioration of fuel quality. With deterioration in this study is meant by substance losses, energy loss, and growth of micro-fungi. The results of this study have therefore been compared with previous research conducted of stored logging residues.

The average moisture content of the stored fuel was determined at 30.5 % while the average moisture content of the newly delivered fuel was determined at 47.4 %. The result of the moisture content measurements shows that there has been a redistribution of moisture content in the windrow. The average ash-content in the stored fuel was determined to 1.91 % and 1.42 %.

The calorific value at constant volume of the fuel was determined at 20.1 MJ/kg DM and 19.4 MJ/kg DM for the newly delivered fuel. The net calorific value at constant volume for the fuel was calculated according to SIS-CEN TS 14 918: 2005 to 12.2 MJ/kg which corresponds to 17.6 MJ/kg DM. For the newly calculated fuel net calorific value between 8.5 MJ/kg and 15.9 MJ/kg DM. The latter value might seem low, but due to high moisture content and relatively low calorific values in two of the samples. The low values of the calorific value may indicate a high proportion of deciduous wood in the newly-received chips at this very moment.

The average basic density of the stored fuel was determined to 434.9 kg/m³f and 425.1 kg/m³f for the newly delivered fuel.

The number of micro-fungi spores in the stored fuel was determined to $1.5 \cdot 10^{11}$ kg⁻¹ DM for the fuel in the stack and to $5.0 \cdot 10^{10}$ kg⁻¹ DM for the newly delivered fuel.

The fraction distribution of the fuel was found to be 88.7% wood 10.4% fines and 0.9% needles. For the newly delivered fuel the fraction distribution was 79.7% wood, 19.3% fines and 1% needles.

During this study no temperature measurements was executed in the windrow but it was during the time of sampling found that temperature variations in the stack was not significant. Some parts of the stack was admittedly a bit warmer than average but there was no part that was really hot, but there were some cold regions where ice blocks could be found.

Both energy losses and substance losses are greatest at the beginning of storage, in the first three months (Thörnqvist & Jirjis 1990). The substance losses in the fuel has been estimated

based on the basic density of the fuel which was measured at 435 kg/m³f for fuel in after storage while the basic density assumed to have been about 480 kg/m³f the disintegration thus causing an substance loss of about 45 kg/m³f or about 9% .

Energy losses in the fuel has been estimated based on the calorific value per m³f. The net energy content of the stack was calculated at approximately 7700 MJ/m³f while the energy content of the material upon decomposition was calculated at approximately 8060 MJ/m³f. This gives a total energy loss of 360 MJ/m³f or about 4.5%.

To reduce energy loss, substance loss, moisture and the growth of microorganisms, it is advantageous to decompose the fuel as late as possible in the supply chain.

Abstract

I detta examensarbete har ett flertal av kvalitetsparametrar hos sönderdelade och lagrade trädbränslen. De kvalitetsparametrar som undersökts är fukthalt, askhalt, energiinnehåll, torr-rådensitet, mängden mikrosporer och bränslets fraktionsfördelning. Resultaten från experimenten har jämförts med tidigare forskningsresultat där lagring av sönderdelade skogsrester undersökts. Utifrån resultaten och tidigare forskning skulle ett förslag på hur lagringen av bränslet kan förbättras.

Nyckelord:

lagring, kalorimetriskt värmevärde, effektivt värmevärde, torr-rådensitet, mikrosporer, askhalt, fukthalt

Förord

Föreliggande examensarbete är genomfört i samarbete mellan avdelningen för Skog och Trät, Institutionen för teknik vid Linnéuniversitetet och Växjö Energi AB (VEAB). Examensarbetet har varvat teori, i form av litteraturstudier, och praktik, i form av praktiska undersökningar av flertalet kvalitetsparametrar.

Jag vill börja med att tacka mina handledare Thomas Thörnqvist, professor i Virkeslära vid Linnéuniversitetet i Växjö, och Helen Frisé, energihandlare vid VEAB, för deras hjälp och stöd under arbetets gång.

Därefter vill jag tacka Bengt Nilsson, Linnéuniversitetet, som har agerat bollplank under arbetets gång.

Jag vill även tacka all övrig personal på VEAB för ett vänligt bemötande och hjälp under insamling och beredning av prover. Jag vill även rikta ett tack till alla på Avdelningen för Bioenergiteknik samt Avdelningen för skog och trä vid Linnéuniversitetet i Växjö för att jag fått låna labbutrustning och lokaler så mina undersökningar kunnat utföras.

Innehåll

Sammanfattning.....	II
Summary	IV
To reduce energy loss, substance loss, moisture and the growth of microorganisms, it is advantageous to decompose the fuel as late as possible in the supply chain.Abstract.....	V
Abstract	VI
Förord.....	VII
1. Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte.....	2
1.3 Avgränsningar.....	2
2. Definitioner.....	3
2.1 Fukthalt.....	3
2.2 Askhalt	3
2.2.1 Naturlig askhalt	3
2.2.2 Föroreningsaskhalt	4
2.3 Energiinnehåll.....	4
2.3.1 Exempel enligt Asplund	4
2.3.2 Kalorimetriskt värmevärde.....	5
2.3.3 Effektivt värmevärde	7
2.4 Substansförluster och torr-rådensitet.....	9
2.5 Svampsporer och mikrobiell aktivitet	9
2.6 Fraktionsfördelning	10
2.7 Växjö Energi AB:s (VEAB:s) krav på träbränslekvalitet till Sandviksverket.....	10
2.7.1 Olika sortiment.....	11
2.7.2 Kvalitetskrav på bränsle	11
3. Material och metod.....	12
3.1 Fukthalt.....	13
3.2 Askhalt	13
3.3 Energiinnehåll.....	13
3.4 Substansförluster via torr-rådensitet.....	14
3.5 Svampsporer.....	14
3.6 Fraktionsfördelning	15
4. Litteraturstudie.....	16

4.1 Fukthalt.....	17
4.2 Askhalt	18
4.3 Energiinnehåll och energiförluster	18
4.4 Substansförluster	20
4.5 Svampsporer och mikrobiell aktivitet	21
4.6 Fraktionsfördelning	23
4.7 Temperaturhöjning och självantändning	24
4.8 Hur bör bränslet lagras för att minimera riskerna för självantändning och energiförluster?	25
5. Resultat.....	27
5.1 Fukthalt.....	27
5.2 Askhalt	27
5.3 Energiinnehåll.....	28
5.4 Substansförluster och energiförluster.....	30
5.5 Svampsporer.....	32
5.6 Fraktionsfördelning	32
5.7 Temperatur.....	33
6. Diskussion.....	34
6.1 Fukthalt.....	34
6.2 Askhalt	34
6.3 Energiinnehåll.....	34
6.4 Substansförluster och energiförluster.....	35
6.5 Mikroorganismer	36
6.6 Fraktionsfördelning	36
6.7 Hur bör bränslet lagras?	37
7. Slutsats	39
8. Referenser	40
8.1 Tryckta källor	40
8.2 Elektroniska källor	41
8.3 Bildkällor.....	41
9. Bilagor.....	42

1. Inledning

Föreliggande examensarbete är genomfört i samarbete mellan avdelningen för Skog och Trä, Institutionen för teknik vid Linnéuniversitetet med Växjö Energi AB (VEAB) som värd företag.

1.1 Bakgrund

Intresset för biobränslen är för närvarande större än någonsin, enda sedan oljekrisen i mitten av 1970-talet har skogsbränslen använts för energiomvandling. Under senare år har efterfrågan på träbränsle ökat vilket har inneburit en ökad konkurrens inom kraftvärmeindustrin. Detta beror bland annat på att nya anläggningar planeras och byggs runt om i landet (Egnell 2009) samt att konkurrensen om sågverkens biprodukter hårdnat allt eftersom pelletindustrin vuxit. En av de största anledningarna till den kraftigt ökande efterfrågan på skogsbränslen är det rådande politiska läget gällande energipolitik i Europa. Bland annat kan EU:s 20-20-20-mål från 2007 nämnas. Detta innebär att EU ska bli 20 % mer energieffektivt, öka andelen förnybar energi med 20 % och minska utsläppen av växthusgaser med 20 % till 2020 (Energimyndigheten 2009). I Sverige har regeringen satt upp egna mål genom Kommissionen mot oljeberoende (2006). I målen säger man bland annat djärvt att vi i Sverige drastiskt ska minska vårt oljeberoende till 2020. För att lyckas med detta krävs en genomgående energieffektivisering av hela samhället. Kommissionen mot oljeberoende (2006) föreslår även att Sverige under de närmsta decennierna ska storsatsa på råvaror från skogen för bland annat värme och elproduktion. Målet är att år 2020 ska i stort sett oljan vara helt eliminerad inom uppvärmningssektorn.

Enligt Egnell (2009) omsätts i Sverige idag en stor del, ca 45 %, av den totala mängden avverkad skogsbiomassa som energi ganska omgående, antingen inom skogsindustrin, kraftvärmeindustrin eller i enskilda hus. Men i slutändan kommer även en stor del av den resterande avverkade skogsbiomassan att användas för energiändamål så produkterna från skogen återvinns efter användande. Egnell (2009) menar också att om ytterligare kvantiteter från sågverksindustrin i form av restprodukter ska frigöras för energiändamål krävs det kraftiga energieffektiviseringar eller strukturförändringar inom skogsindustrin. Trots detta finns det stora potentialer att öka uttaget av biomassa från skogen i form av sortiment som den traditionella skogsindustrin idag inte använder. Främst utgörs detta av stubbar, klena träd, skadat virke och ett ökat uttag av grot. Egnell (2009) menar även att konkurrensen om massaveden i framtiden kan komma att öka, men redan idag eldas det massaved i vissa värmeverk runt om i Sverige. Detta eftersom otillräckliga mängder av annat skogsbränsle kunnat levereras.

Fjärrvärme var enligt Energimyndigheten (2009) en av de vanligaste uppvärmningsformerna i Sverige 2007. Bland flerbostadshus värmdes 82 % upp av enbart fjärrvärme men endast 9 % av alla småhus. Även för offentliga lokaler samt affärs- och kontorslokaler är fjärrvärme det vanligaste uppvärmningssystemet, 66 % av dessa lokaler värmdes upp av fjärrvärme. För industrilokaler däremot stod fjärrvärme endast för 4 % av den totala energiförbrukningen. Däremot står biobränslen över lag för 37 % av industrins totala energiförbrukning. Den totala elproduktionen från biobränslen var enligt Energimyndigheten (2008) ca 18,7 TWh. Enligt Kommissionen mot oljeberoende (2006) är den potentiella elproduktionen från kraftvärme i Sverige ca 25 TWh, med det fjärrvärmeunderlag som då beräknades finnas 2010.

Biobränslen för värme och elproduktion domineras av avverkningsrester och biprodukter från skogsindustrin. Dessa produceras jämnt fördelat över året medan värmebehovet är koncentrerat till vintermånaderna, detta innebär att det krävs en lagring av bränsle. Enligt Rugar-Gadd (2006) lagras ungefär 10 % av den årliga produktionen av skogsbränslen under 5-10 månader, utöver detta lagras ungefär den dubbla mängden under kortare tider. För att kunna säkerställa ett konstant bränsleflöde till värmeverken lagras ofta sönderdelat skogsbränsle på terminaler ganska nära värmeverket (Jirjis 1995). Terminalerna är placerade nära värmeverken beroende på att transporter av skogsbränsle längre än 50-100 km inte är ekonomiskt eller miljömässigt hållbart (Rugar-Gadd 2006). När organiskt material lagras sker det förändringar orsakade av mikroorganismer men även olika kemiska och fysikaliska förändringar. Dessa förändringar påverkar bränslets kvalitet men kan också innebära olika hälsorisker.

I dagsläget har VEAB en lagringsyta stor nog för produktion av ca 15 000- 18 000 MWh värme, vilket motsvarar ungefär en veckas lager under vintermånaderna. Eftersom lagringsytan är begränsad innebär det ett problem då det äldsta bränslet kan bli liggande längst in i bränslestacken under lång tid. Detta innebär att det färskaste bränslet förbränns först under stora delar av eldnings säsongen. Det äldsta materialet levererades under perioden 1 juli till och med mitten av augusti vilket innebär att detta material har lagrats i ca 9 månader. Bränslet i stacken bestod av flera olika material (sågspån, ren lövflis, hyggesrester, bark mm.) där skogsrester stod för merparten av. Resultaten i denna undersökning har därför jämförts med tidigare undersökningar utförda på hyggesrester.

När bränslet lagras sker det substansförluster, tillväxt av mikrosvampar, förändringar av fukthalten etc. Sammantaget leder detta till energiförluster i bränslestacken. Eftersom VEAB ska bygga en ny lagringsyta i anslutning till kraftvärmeverket är man intresserad av att ta reda på hur bränslestackarna i fortsättningen ska planeras på bästa tänkbara sätt med avseende på brandrisk, fuktutjämning, substansförluster, tillväxt av mikrosvampar och energiförluster.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att ta fram ett förslag över hur bränslet ska lagras vid VEAB:s nya bränsleplan för att minimera kvalitetsförsämringar och brandrisk i bränslestacken. Med kvalitetsförsämringar menas i detta fall substansförluster och energiförluster samt tillväxt av mikrosvampar.

1.3 Avgränsningar

Inom ramen för detta examensarbete har inga kontinuerliga provtagningar skett utan istället är undersökningarna utförda på material hämtat vid ett provtagningstillfälle. Från dessa prover har sedan olika kvalitetsparametrar hos bränslet undersökts.

Med kvalitetsparametrar för bränslet menas i detta examensarbete fukthalt, askhalt, energiinnehåll torr-rådensitet, mängden svampsporer samt fraktionsfördelning.

Det har heller inte gjorts några ekonomiska beräkningar eller några undersökningar över hur bränslet ska hanteras ur ett logistiskt perspektiv.

2. Definitioner

2.1 Fukthalt

Fukthalten definieras som vattnets procentuella andel av materialets råa massa (Thörnqvist 1984) och beräknas enligt följande formel:

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_u} \times 100[\%]$$

där

u = fukthalten i %

m_u = bränslets massa i rått tillstånd [kg]

m_o = bränslets massa i torrt tillstånd [kg]

Fukthalten i skogsbränslet efter avverkningen beror bland annat på nederbörd, lagringsmetod, temperatur och luftfuktighet (Lehtikangas 1999, Thörnqvist 1985).

Slutanvändarens krav på bränslets fukthalt varierar, anläggningar med rökgaskondensering efterfrågar ofta ett bränsle med en fukthalt på ca 50 % för att bäst utnyttja energin i bränslet medan anläggningar utan rökgaskondensering ofta efterfrågar ett betydligt torrare bränsle för bäst effekt (Lehtikangas 1999).

Mängden fukt i ett bränsle är av mycket stor betydelse för lagringsresultatet och därmed den eventuella värdeminskningen hos bränslet (Thörnqvist 1984). Fukthalten påverkar bland annat bildandet av isklumpar i bränslet men också i viss mån den biologiska nedbrytningen (Lehtikangas 1999). Fukthalten hos ett skogsbränsle är beroende av den metod som används för sönderdelning av materialet, krossat material blir ofta blötare än flisat (Thörnqvist 1983 a).

Motsatsen till bränslets fukthalt är bränslets torrhalt, Vilken beräknas som:

$$T = 100 - u[\%]$$

där

T = torrhalten i %

2.2 Askhalt

Det finns två olika typer av askhalt, naturlig askhalt respektive föroreningsaskhalt (Thörnqvist 1985).

2.2.1 Naturlig askhalt

Enligt Thörnqvist (1984) definieras den naturliga askhalten som skogsbränslets askhalt före skörd. Den naturliga askhalten består av icke brännbara oorganiska substanser i veden som t.ex. mineralerna kalcium (Ca), kalium (K), magnesium (Mg) och kisel (Si) (Thörnqvist 1984, Lehtikangas 1999). Den naturliga askhalten i ren stamved hos våra vanliga skogsträd ligger på ca 0,4-0,7 % (Lehtikangas 1999). Askhalten är betydligt högre i t.ex. bark och barr, granbarken kan i vissa fall ha en naturlig askhalt på uppemot 4 % medan granbarren kan ha en

naturlig askhalt på ca 5-6 % (Lehtikangas 1999). Enligt Thörnqvist (1985) ligger den naturliga askhalten hos nyavverkade hyggesrester på 0,6 % för ved, 4,4 % för bark och barr.

2.2.2 Föroreningsaskhalt

Föroreningsaskhalten utgörs uteslutande, som namnet antyder, av olika föroreningar som t.ex. sand och grus. Föroreningarna tillkommer bränslet under hanteringskedjan mellan skogen och förbränningsanläggningen. Olika hanteringsmetoder ger upphov till olika föroreningsgrader av bränslet (Thörnqvist 1984). Vid konventionell avverkning släpas trädet utefter marken och grenarna kommer då i kontakt med marken. Hyggesresterna kan också förorenas under transporten från avverkningsplatsen till avlägg, främst då genom att skotaren som flyttar materialet är oaktsam och får med delar av mineraljorden i hyggesresterna. Under transportererna mellan avlägg och terminal/förbränningsanläggningen kan också materialet förorenas av sand i form av damm som virvlar upp från vägarna. Den största orsaken till föroreningsaskhalt är dock ändå enligt Thörnqvist (1984) hantering av materialet på terminaler där planen inte är belagd. Detta problem har dock minskat då det ofta ställs krav på att materialet ska lagras på upplag med permanentad yta, vanligen asfalt. Föroreningsaskhalten har en negativ inverkan på energiinnehållet hos bränslet, därför kan det effektiva värmevärdet kompenseras med en faktor som tar hänsyn till föroreningsgraden (Thörnqvist 1984, Lehtikangas 1999), se 2.3.2 Effektivt värmevärde.

2.3 Energiinnehåll

Ett bränsles energiinnehåll beskrivs oftast av värmevärdet, uttryckt i MJ/kg TS. Värmevärdet är ett mått på bränslets totala energi som kan tillgodogöras vid förbränning (Asplund 1985). Det finns två huvudtyper av värmevärde, nämligen det kalorimetriska och det effektiva värmevärdet.

Ibland nämns även det högre och det lägre värmevärdet, det högre värmevärdet är enligt Asplund (1985) det kalorimetriska värmevärdet korrigerat för trycket i kalorimeterbomben och kväveoxiderna som bildats vid förbränningen. Det lägre värmevärdet är det som i de flesta fall (åtminstone i Sverige) kallas för det effektiva värmevärdet. I USA används det högre värmevärdet som effektivt värmevärde (Asplund 1985).

Idag används vanligen det effektiva värmevärdet vid upphandling av bränsle, detta beror enligt Asplund (1985) på att tillgången på bränsle en gång i tiden ansågs vara oändlig och priset därmed var extremt lågt. Därför fanns det förr ingen anledning att ta tillvara på den energi som gått åt för att förånga vattnet. Idag är läget ett annat, konkurrensen på trädbränsle är mycket större och priset är därmed högre och det finns en anledning att ta tillvara på denna förlorade energi genom rökgaskondensatorer.

2.3.1 Exempel enligt Asplund

Enligt vårt sätt att räkna på bränslets energiinnehåll idag då vi använder det effektiva värmevärdet är det fullt möjligt att erhålla en verkningsgrad på anläggningen på över 100 %. Asplund (1985) illustrerar det med följande exempel:

Om 1 kg bränsle med ett högre värmevärde på 10 MJ/kg förbränns i en hetvattenpanna med en verkningsgrad på 70 %, ger det en värmemängd på 7 MJ till vattnet.

$$0,7 \times 10 = 7$$

Skillnaden mellan den tillförda energin och den nyttiga energin är då 3 MJ vilka tillskrivs förluster i pannan.

Om vi istället använder oss av det effektiva värmevärdet för bränslet, låt oss säga 8 MJ/kg. Eftersom det är samma bränsle och samma bränslemängd (1 kg) ger det oss fortfarande en värmemängd till vattnet på 7 MJ. Men istället för en tillförd energi på 10 MJ räknar vi endast med 8 MJ tillförd energi och det innebär en helt annan verkningsgrad, nämligen 87,5 %

$$\frac{7}{8} = 0,875 \rightarrow 87,5\%$$

Omvandlingsförlusterna i pannan är nu enligt detta sett att räkna endast 1 MJ. Om vi nu kopplar på en rökgaskondensator som tillför ytterligare 2 MJ/kg bränsle till vattnet får vi ytterligare en annan verkningsgrad på pannan, nämligen 90 % om vi räknar med det högre värmevärdet.

$$\frac{7+2}{10} = 0,9 \rightarrow 90\%$$

Omvandlingsförlusterna blir nu endast 1 MJ/kg bränsle. Räknar vi nu istället verkningsgraden utifrån det effektiva värmevärdet som bas erhåller vi en verkningsgrad som överstiger 100 %, verkningsgraden blir nu nämligen 112,5 %

$$\frac{9}{8} = 1,125 \rightarrow 112,5\%$$

Om vi räknar på detta sätt antyder vi att pannan producerar energimängden 1 MJ/kg bränsle, vilket är en omöjlighet då detta strider mot termodynamikens första huvudsats vilken bland annat säger att energi inte kan skapas eller förintas (Alvarez 2006).

2.3.2 Kalorimetriskt värmevärde

Enligt SIS-CEN TS 14918: 2005 definieras det kalorimetriska värmevärdet för konstant volym (gross calorific value at a constant volume, $q_{v,gr}$) som: "absolute value of the specific energy of combustion, in joules, for unit of a solid biofuel burned in oxygen in a calorimetric bomb under the conditions specified. The products of combustion are assumed to consist of gaseous oxygen, nitrogen, carbon dioxide and sulfur dioxide, of liquid water (in equilibrium with its vapour) saturated with carbon dioxide under the conditions of the bomb reaction, and of solid ash, all at the reference temperature."

Det kalorimetriska värmevärdet bestäms i en så kallad bombkalorimeter under väl definierade förutsättningar (SIS-CEN TS 14918: 2005). En bombkalorimeter består enligt Österholm & Andersson (1987) i stora drag av ett slutet kärl, bomben, där provet placeras och förbränns. Bomben placeras sedan i en isolerad behållare som fylls med en känd mängd vatten. Det finns även någon form av temperaturmätare som registrerar temperaturändringen hos vattnet. I det slutna kärlet sker en fullständig förbränning av ett prov med känd massa i en atmosfär av ren

syrgas under högt tryck. Förbränningen ger upphov till en temperaturhöjning hos vattnet, utifrån denna temperaturhöjning kan sedan det kalorimetriska värmevärdet beräknas. Vid beräkningen, som utförs av en datorenhet som är integrerad med bombkalorimetern, tas hänsyn till all tillförd energi och bombkalorimeterns samt vattnets specifika värmekapacitet. Vid värmevärdesbestämning av biobränslen bör provet malas och pelleteras så att en ofullständig förbränning undviks genom att provet sprids i bomben under förbränningen.

Det kalorimetriska värmevärdet bestäms vanligen direkt på torrt bränsle men det kan även bestämmas för fuktigt bränsle. Då måste dock värdet räknas om till torrt bränsle för vidare beräkning av det effektiva värmevärdet genom följande formel hämtad ur SIS-CEN TS 14918: 2005

$$q_{V,gr,d} = q_{V,gr} \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

där

$q_{V,gr,d}$ är det kalorimetriska värmevärdet vid konstant volym för absolut torrt bränslet uttryckt i J/g

$q_{V,gr}$ är det kalorimetriska värmevärdet vid konstant volym för det fuktiga bränslet uttryckt i J/g

M_{ad} är bränslets fukthalt uttryckt i % (m/m där m = massa)

Denna formel kan även skrivas om för att gälla vid en godtycklig fukthalt enligt SIS-CEN TS 14918: 2005

$$q_{V,gr,m} = q_{V,gr,d} \times (1 - 0,01M)$$

där

M är en godtycklig fukthalt hos bränslet uttryckt i % (m/m)

Det kalorimetriska värmevärdet brukar även kallas W_k och definieras även som den värmemängd som under konstant volym frigörs vid fullständig förbränning av ett bränsle, under förutsättning att vattnet som bildas vid förbränning av det torra bränslet samt dess förbränningsprodukter antagit flytande form och dess begynnelsestemperatur (Thörnqvist 1984).

Sammantaget kan man säga att det kalorimetriska värmevärdet är all kemisk energi som är bunden i bränslet (Lehtikangas 1999). En annan vanlig definition av det kalorimetriska värmevärdet är enligt Alvarez (2006): ”den värmemängd som, per mängdenhet av bränsle, utvecklas då allt det från bränslet härrörande vattnet befinner sig i vätskeform”.

Enligt Thörnqvist (1984) är det rimligt att anta det kalorimetriska värmevärdet för hyggesrester, både färska och lagrade är 20,8 MJ/kg.

2.3.3 Effektivt värmevärde

Det effektiva värmevärdet vid konstant volym, net calorific value at constant volume, ($q_{V,net}$, W_{eff}) definieras som "Den värmemängd som frigörs vid fullständig förbränning av ett bränsle, under förutsättning att bränslets vattenmängd och det vatten som bildats vid förbränning av absolut torrt bränsle samt förbränningsprodukterna befinner sig i ångform" (Thörnqvist 1984). Detta innebär att det effektiva värmevärdet är det kalorimetriska värmevärdet korrigerat med avseende på den energimängd som krävs för att förånga bränsléfukten och det vatten som bildas vid förbränningen.

Det effektiva värmevärdet kan beräknas för absolut torrt bränsle enligt följande formel ur SIS-CEN TS 14918: 2005

$$q_{V,net,d} = q_{V,gr,d} - 206,0 \times w(H)_d$$

där

$q_{V,net,d}$ är det effektiva värmevärdet för absolut torrt bränsle uttryckt i J/g

206,0 är en omräkning av vattnets ångbildningsvärme (41,53 kJ/mol vid 25 °C) till att gälla för bränslets väteinnehåll (per 1 %)

$w(H)_d$ är det absolut torra bränslets vätehalt uttryckt i % (m/m)

Enligt SIS-CEN TS 14918: 2005 kan vätehalten för hyggesrester sättas till 6,1 % (m/m) daf (dry ash free)

Det effektiva värmevärdet kan beräknas för fuktigt bränsle enligt följande formel ur SIS-CEN TS 14918: 2005

$$q_{V,net,m} = q_{V,net,d} \times (1 - 0,01 \times M) - 23,05 \times M$$

där

$q_{V,net,m}$ är det effektiva värmevärdet för bränslet med godtycklig fukthalt uttryckt i J/g

23,05 är en omräkning av vattnets ångbildningsvärme (41,53 kJ/mol vid 25 °C) till att gälla för bränslets fukthalt (per 1 %)

M är bränslets fukthalt uttryckt i % (m/m)

Det finns även andra formler för att beräkna det effektiva värmevärdet, antingen för torrt bränsle (W_a) eller för fuktigt bränsle (W_{eff}). Skillnaden mellan dessa formler och de standardiserade formlerna är att dessa beräknar det effektiva värmevärdet i enheten MJ/kg TS. Ovanstående beräkning av $q_{V,net,m}$ är det effektiva värmevärdet som i Letikangas (1999) anges per råvikt.

Det effektiva värmevärdet för absolut torrt bränsle (W_a) är den energimängd som finns i bränslet förutom den energiförlust det går åt för att förånga det bildade vattnet i förbränningsprocessen (Lehtikangas 1999). En förenklad formel för beräkning av det effektiva värmevärdet för torrt material kan beräknas med följande formel hämtad ur Thörnqvist (1983 c) och Lethikangas (1999):

$$W_a = W_k - 0,2205 \times H_2$$

där

W_k är det kalorimetriska värmevärdet för bränslet (MJ/kgTS)

0,2205 är en sammanslagning av termen $\frac{2,45 \times 9}{100}$ som anges i Lehtikangas (1999) där 2,45 är

vattnets ångbildningsvärme vid 20°C uttryckt i MJ/kg och 9 är antalet delar vatten som bildas av en del väte vid förbränningen

H_2 är bränslets vätehalt i % (6 % används vanligtvis approximativt för skogsbränslen)

Det effektiva värmevärdet för fuktigt material (W_{eff}) är den värmemängd som teoretiskt kan utvinnas ur ett fuktigt bränsle förutom den energi det går åt för att förångas bränslefukten och det vatten som bildas i förbränningsprocessen (Lehtikangas 1999). Det effektiva värmevärdet för fuktigt material anges vanligen i enheten MJ/kg TS. Det effektiva värmevärdet för fuktigt bränsle beräknas utifrån det kalorimetriska värmevärdet med följande formel hämtad ur Thörnqvist (1983 c) och Lehtikangas (1999):

$$W_{eff} = W_a - \left(2,45 \times \frac{F}{100 - F} \right)$$

där

F är bränslets fukthalt uttryckt i %.

Det effektiva värmevärdet kan också anges i andra enheter som t.ex. MJ/kg rå eller MWh/ton, vilken är en vanlig enhet ofta använd inom kraftvärmeindustrin. Det effektiva värmevärdet för bränslets råmassa (MJ/kg rå) får man genom att utföra ovanstående beräkning och sedan multiplicera svaret med bränslets torrhalt. Vill man däremot ange det effektiva värmevärdet i enheten MWh/ton utförs ovanstående beräkningar, svaret divideras därefter med faktorn 3,6. Denna faktor kommer ifrån omvandlingen mellan MJ och kWh.

Ovanstående formler för det effektiva värmevärdet förutsätter att bränslet inte är förorenat. Skulle bränslet vara förorenat får en faktor införas som kompenserar för föroreningsgraden (Thörnqvist 1984, Lehtikangas 1999). Denna korrigering utförs på det effektiva värmevärdet för torrt material, W_a , och kan betecknas med följande formel (Thörnqvist 1984):

$$W_b = W_a \times \left(1 - \frac{a - b}{100} \right)$$

där

W_b är det korrigerade värmevärdet för torrt material (MJ/kgTS)

a är den totala askhalten i %

b är den naturliga askhalten i %

2.4 Substansförluster och torr-rådensitet

Substansförlust är ett mått som beskriver den mängd torrsbstans som brutits ned under den tid lagringen skett (Thörnqvist 1983 a). Bränslets substansförlust är beroende av bland annat materialets fukthalt vid uppläggning i stack, stackens storlek, materialets sammansättning, stackens temperatur och givetvis även den tid som materialet lagras (Thörnqvist 1983 a, Thörnqvist & Jirjis 1990). Substansförlusterna orsakas av mikroorganismer och av kemiska oxidationsprocesser (Thörnqvist 1983 a). I vanliga fall brukar substansförlusten bestämmas genom att en viss mängd material placeras i en nylonsäck och placeras inne i stacken. Denna säck vägs sedan före och efter lagringen. Men eftersom det inte funnits möjlighet att undersöka substansförlusterna på detta sätt i föreliggande studie har den uppskattats genom jämförelse av torr-rådensiteten hos det lagrade bränslet och med torr-rådensiteten för färska hyggesrester angivet i litteratur.

Torr-rådensitet definieras som kvoten mellan den torra massan och den fullsvällda vedens volym (Thörnqvist 1985, Lehtikangas 1999) och varierar beroende på vilken del av landet trädet har vuxit och markens bonitet men den varierar också i trädets olika delar och komponenter samt hur skogen skötts.

Enligt Thörnqvist (1984 och 1985) utsätts alla biobränslen som lagras och som inte torkats ned till under sin fibermättnadspunkt för biologisk nedbrytning, detta benämns substansförlust. Vid fibermättnadspunkten är cellväggarna mättade med fukt medan hålrummen i cellerna är helt torra (Lehtikangas 1999) därav minskar den biologiska nedbrytningen. Fibermättnadspunkten inträder för trä vid ca 20-25 % fukthalt (Thörnqvist 1987). Eftersom substansförlusterna orsakas av rötsvampar vilka bryter ned delar av vedens cellväggar sker en minskning av vedens torrmasa men inte dess volym. Detta leder till en minskning av torr-rådensiteten vilken är proportionell mot substansförlusten.

Torr-rådensitetens betydelse som kvalitetsparameter spelar mindre roll om upphandlingen av bränslet baseras på vikt eller energienhet eftersom den då endast påverkar transportkostnaden. Däremot är det en betydelsefull kvalitetsparameter om upphandlingen baseras på volym. Även vid hanteringen av skogsbränsle spelar densiteten en stor roll för kostnaden (Nilsson 2007). Värmeverken handlar ofta skogsbränsle per viktenhet från de stora skogsföretagen medan de i sin tur ofta köper in skogsbränsle från mindre skogsägare per volymenhet. Även entreprenörerna arbetar med skogsbränsle per volymenhet eftersom det i stort sett tar lika lång tid att hantera ett bränsle med låg torr-rådensitet som det tar att hantera ett bränsle med hög torr-rådensitet.

2.5 Svampsporer och mikrobiell aktivitet

Det är allmänt känt inom branschen att stora koncentrationer av mögel i omgivningsluften kan medföra allergiska reaktioner hos människor. En av dessa sjukdomar är allergisk allevoit, vilken förr ofta kallades t.ex. tröskdamslunga, justerverkssjuka eller fliseldarsjuka. Sjukdomen antas orsakas av inandning av mikrosvamparnas luftburna sporer, som frigjorts vid hanteringen av bränslet (Thörnqvist 1984).

Vid lagring av trädbränsle sker en tillväxt av olika mikroorganismer, främst olika svampar men även bakterier, som vid gynnsamma förhållanden kan vara så stor att det finns risk för allergiska reaktioner hos den personal som hanterar bränslet (Jirjis 1995, Lehtikangas 1999, Thörnqvist 1984, 1985, Jirjis och Norden 2005). Detta beror på att olika mikroorganismer lätt

kan kolonisera biomassa som lagras. Kolonisationen sker lättare om materialet är färskt (Jirjis och Norden 2005), därav är tillväxten som störst de första månaderna av en lagring (Rupar-Gadd 2006).

En lämplig metod för att bestämma mängden svampsporer i en flisstack är den så kallade räknekammarmetoden (Carlström *et.al.* 1981), som beskrivs under avsnitt 3.5. Denna metod är både enkel och tillräckligt noggrann, om syftet med undersökningen inte är att undersöka förekomsten av levande svampsporer eller olika arter av svampar.

2.6 Fraktionsfördelning

Fraktionsstorlekarna hos ett bränsle är av stor betydelse för en förbränningsanläggning, allt för stora fraktioner ger upphov till störningar i bränsleinmatningen medan allt för små fraktioner ger upphov till en ökad mängd oförbränt material i rökgaserna. Därför är fraktionsfördelningen eller komponentfördelningen en viktig parameter att ta hänsyn till vid lagring av sönderdelade trädbränslen.

Fraktionsstorleken och dess spridning runt medelfraktionsstorleken hos ett bränsle beror främst på sönderdelningsmetoden men också på råvaran. Krossat material ger ofta upphov till en större spridning runt medelfraktionsstorleken jämfört med material som sönderdelats i en hugg (Lehtikangas 1999, Thörnqvist 1985). Hyggesrester som flisas ger upphov till ett större spann i fraktionsstorlek än t.ex. massaved. Detta beror på att massaveden kan matas in i flishuggen med samma vinkel medan hyggesresterna väldigt sällan matas in med samma vinkel. Förutom detta ger barren upphov till en högre andel av de mindre fraktionerna, de mindre grenarna däremot går oftare rätt igenom utan att sönderdelas (Thörnqvist 1985).

Ett annat sätt att beskriva ett bränsles fraktionsfördelning är genom bränslets komponentsammansättning. De olika komponenternas kemiska och fysikaliska egenskaper skiljer sig åt och detta ger skillnader i energiinnehåll och förbränningskemi. Komponentensammansättningen skiljer sig kraftigt åt mellan olika bränslen, hyggesrester har t.ex. fler olika komponenter än ren stamvedsflis. Komponentensammansättningen kan i viss mån påverkas genom sättet att finfördela, lagra och sålla bränslet (Thörnqvist 1985).

Ett sätt att dela in trädbränsle i olika komponenter är ved utan bark, avskalad bark från ved, kvistar med bark mindre än 3 mm, barr samt finfraktion (Thörnqvist 1983 b, 1984, 1985). I denna undersökning har komponentsammansättningen och fraktionsfördelningen begränsats till att endast innefatta tre olika fraktioner, dessa är ved, inklusive kvist med bark över 3 mm, finfraktion samt barr.

2.7 Växjö Energi AB:s (VEAB:s) krav på trädbränslekvalitet till Sandviksverket

VEAB betalar för energiinnehållet i bränslet och ställer därför krav på bränslekvaliteten hos sina leverantörer. Betalningen sker efter bränslets effektiva värmevärde mätt i MWh/ton bränsle inklusive vatten. I samråd med leverantören upprättas en leveransplan vid upphandlingen. I leveransplanen specificeras bränslekvalitet, bränslevolymer och leveranstidpunkter. Kvalitetskraven är utformade för att ge VEAB ett bränsle som passar i deras anläggning.

2.7.1 Olika sortiment

Sandviksverkets huvudsakliga produktionsenhet är en 100 MW kraftverksångpanna som i huvudsak ska eldas med träbränslen. Därav köper VEAB i huvudsak olika träbränslen såsom flis, spån och bark. Varje bränsleleverans kontrolleras av virkesmätningföreningen (VMF).

Flis till Sandviksverket får vara framställd av energived, avverkningsrester, röjningsvirke, barr- och lövved, obarkad yt- och ribbved men också produkter från träbearbetande industri. Hyggesresterna ska vara avbarrade och avlödade innan flisning, detta innebär att hyggesresterna ska lagras på hygget under minst en säsong innan de flisas. Om hyggesresterna blivit buntade skall buntningen ske efter avbarrningen och snören som används får inte vara av plast. VEAB köper inte flis som härrör från rivning eller annan återvinning.

Tillåten spån är sågspån men inte kutterspån, vilket endast är tillåtet om det är blandat med annat träbränsle. VEAB eldar även bark, då främst gran-, tall- och björkbark.

I Sandviksverket eldas även en viss mängd torv.

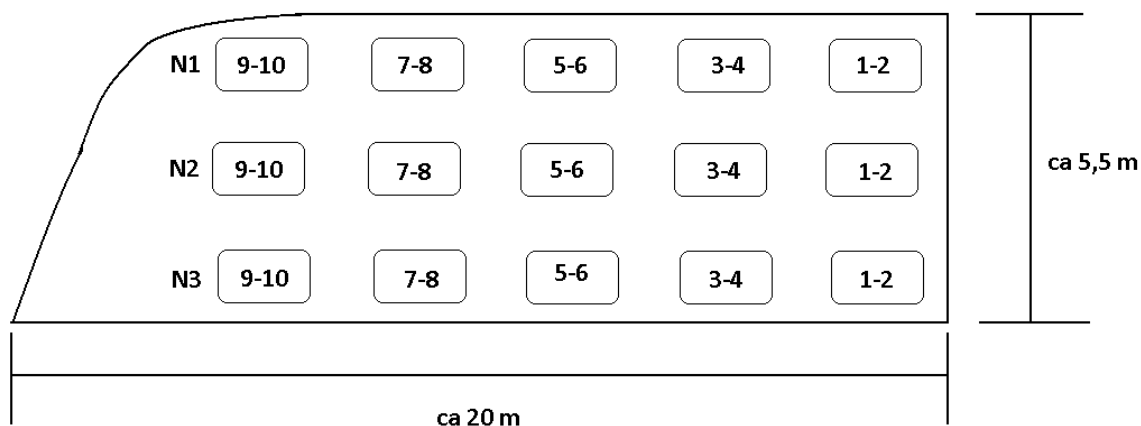
2.7.2 Kvalitetskrav på bränsle

Om bränslet inte håller den kvalitet som VEAB önskar kan bränsleleveransen avvisas efter kontroll av VMF, det är då upp till leverantören att forsla undan det ogiltiga bränslet och ersätta det med godkänt material. De kvalitetskrav som ställs på bränslet innefattar föroreningar, önskade fraktionsstorlek, fukthalt m.m.

- Bränslets fukthalt får inte överstiga 55 % räknat i medeltal per månad. Enstaka leveranser får ha högre fukthalt men aldrig över 64 %.
- Bränslet ska i möjligaste mån vara rent från föroreningar eftersom dessa kan störa förbränningen och bränsleinmatningen. Oorganiska föroreningar får maximalt utgöra 5 % av torrmassan, vid mindre mängd föroreningar är det dock endast tillåtet med tre stenar större än 70 mm eller en enskild sten större än 120 mm. Metallföremål får under inga omständigheter förekomma i bränslet. Bränslet får inte heller innehålla rester av snören längre än 200 mm från buntning av hyggesresterna.
- Bränslet får inte innehålla salt. Lastbilsflak och containrar som använts under transporten får inte heller saltas för att undvika fastfrysning.
- Bränslet får inte vara hopfruset, innehålla tjälklumpar/tjälblock eller vara snötäckt med ett snötäcke djupare än ca 20 mm. Flak eller containrar som används vid leveranser måste även vara renskottade från snö innan leverans.
- Bränslet ska hanteras så att innehållet av mögelsporer minimerats.
- Flisfraktionen ska vara 30-50 mm, enstaka bitar med maximal dimension av 20x40x100 mm får förekomma. I en bränsleleverans får det också förekomma enstaka stickor eller klena kvistar med en maximal diameter av 10 mm och en längd av 200 mm. Även bark ska vara riven i samma fraktioner som flisen.

3. Material och metod

Samtliga prover som analyserats i denna rapport hämtades från den lagrade flisstacken samt från nyinkommet bränsle den 23 april 2010. Det nyinkomna bränslet såg relativt färskt ut men det kan inte uteslutas att det lagrats någon tid på terminal, detta material kan inte heller ses som något representativt prov för allt nyinkommet material då det endast togs från en leverans. För att få representativa prover från hela flisstacken grävdes ett tvärsnitt genom halva stacken, anledningen till att inte prov från hela stacken använts är att den byggts upp från centrum och ut mot kanterna. Därför valdes ett tvärsnitt från en kant in till centrum av stacken där det äldsta materialet fanns. Stacken var vid provtagningsstillfället ca 5,5 m hög och tvärsnittets längd ca 20 m (Se Figur 1.) Proverna togs på tre olika nivåer i stacken, varav den första nivån kallad N1 är ca 0,5-1 m från stackens topp. Den andra nivån, N2, fanns ungefär i mitten av stacken på ca 3 m höjd från marken och den sista nivån, N3, på en höjd av ca 0,5-1 m ovan marken. På varje nivå togs det 5 dubbelprover, med 2-3 meters mellanrum. Proverna användes för bestämning av fukthalt, fraktionsfördelning, densitet, energiinnehåll och mängden mikroorganismer. Totalt togs det 30 prover från flisstacken samt att det togs 6 prover från nyinkommet material samma dag. Totalt samlades det in 36 prover för analys. För att säkerställa att proverna är representativa för stacken togs de minst en meter in i stacken från tvärsnittets yta. Detta gjordes eftersom det inte var möjligt att närvara och samla in proverna allt eftersom tvärsnittet gjordes. För att nå tillräckligt långt in utnyttjades en lastmaskin som tog en skopa från varje provplats. Därefter kunde två prover, på vardera ca 2-3 liter, enkelt tas från skopan i bekväm arbetshöjd. Under dagen för provtagningen föll det en del nederbörd men eftersom proverna togs ca 1 meter in i stacken borde detta endast ha marginell påverkan av resultaten för fukthalterna.



Figur 1. Stackens tvärsnitt för den aktuella halvan och de olika nivåerna och punkterna för provtagningen.

Eftersom stacken hela tiden fyllts på med nytt material har extra vikt lagts vid proverna 1 till och med 4, på samtliga nivåer, beroende på att detta material är äldst. Materialet i denna del av stacken är därmed också relativt orört. Resterande del av stacken (5-10) har under tiden blivit mer eller mindre ersatt med nytt material. Därav är lagringstiden för denna flis osäker.

3.1 Fukthalt

Fukthalten bestämdes genom att ett av varje dubbelprov vägdes direkt efter provtagning, därefter torkades de i 103°C under två dygn innan de vägdes igen och fukthalten beräknades. Därefter beräknades en medelfukthalt för hela stacken vilken jämfördes med medelfukthalten för materialet i stacken vid uppläggningsen samt även med medelfukthalter från tidigare utförda undersökningar. Medelfukthalten för stacken vid uppläggningsen beräknades utifrån de mätningar utförda av VMF på varje bränsleleverans mellan den 1 juli och 14 augusti. Detta uppskattas utgöras av prov 1-4 på samtliga nivåer.

3.2 Askhalt

Askhalten bestämdes på absolut torrt och malt försöksmaterial med hjälp av en muffelugn av märket Nabertherm (Se Figur 2). Provet placerades i en degel av keramik med tillhörande lock, vägdes och askades in vid en temperatur av 550°C under två timmar, för att säkerställa fullständig inaskning. Därefter placerades provet i en excikator där provet fick svalna till rumstemperatur innan det vägdes på nytt och askhalten, på massbasis, kunde beräknas.



Figur 2. Muffelugn av märket Nabertherm som användes för inaskningen av bränslet.

Foto: Daniel Nilsson

3.3 Energiinnehåll

Energiinnehållet i försöksmaterialet bestämdes i en bombkalorimeter, IKAC200, på absolut torra provpellets (se Figur 3). Provpelletarna pressades för hand i en handpress av märket Perkin Elmer med ett tryck av 10 000 kg. Pelletarna pressades av malet försöksmaterial, malningen skedde i en kvarn av märket Retsch.



Figur 3. Bombkalorimeter IKAC200
Foto: Daniel Nilsson

Från varje prov analyserades tre pellets i bombkalorimetern, varefter ett medelvärde av det kalorimetriska värmevärdet beräknades på massbasis. Utifrån det kalorimetriska värmevärdet beräknades sedan det effektiva värmevärdet.

3.4 Substansförluster via torr-rådensitet

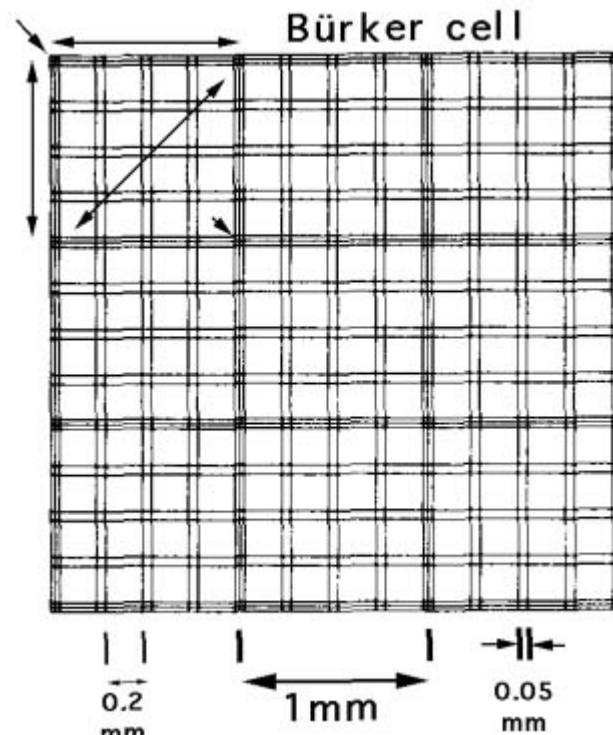
Substansförlusterna i stacken bestämdes via mätning av torr-rådensitet. Försöksmaterialets torr-rådensitet bestämdes med Archimedes princip, vilken utnyttjar det faktum att vattnets densitet vid 4°C är 1 000 kg/m³. Metoden går principiellt till så att försöksmaterialet placerades i en tvättpåse som sedan vägs. Påsen med försöksmaterialet blötlades sedan och all luft kramas ur materialet. Därefter placeras påsen under stativet och volymen beräknades via försöksmaterialets totala massa och dess lyftkraft under vatten. Därefter torkas påsen med försöksmaterialet och den torra massan kunde bestämmas, även fukthalten kunde nu bestämmas. Torr-rådensiteten beräknades sedan med hänsyn tagen till påsens torra massa och dess volym.

Nackdelen med Archimedes princip för bestämning av torr-rådensiteten är att torrt material får ett något högt värde och att fuktigt material får något lågt värde (Thörnqvist 1983c). Detta antas bero på bland annat att en viss mängd ytvatten finns kvar på det fuktiga materialet, en del luft blir säkerligen kvar i påsen och att en del av finfraktionen kramas ur påsen och missas därmed i analysen.

3.5 Svampsporer

Mängden svampsporer bestämdes per kg TS genom räknekammarmetoden. Från varje prov togs ett godtyckligt stickprov på ca 0,5 dl flis, provet placerades i en glasburk med volymen 1 liter. Till provet tillsattes 0,5 liter destillerat vatten och en droppe våtgörare (Tween). Våtgöraren tillsattes för att minska vattnets adhesionskraft. Glasburken innehållande provet, vatten och våtgörare skakades sedan i 10 minuter på en IKA MS1 Minishaker med reglerbar hastighet. Efter skakning tas ett prov på några droppar ut från suspensionen, en droppe placeras i en räknekammare (Bürkerzell) med 0,1 mm djup (se Figur 4). Resterande del av suspensionen silades bort från försöksmaterialet vilket sen placerades i torkugn vid 103°C över natten, därefter vägdes proverna och torrmassan kunde bestämmas. Bürkerzellen placerades sedan i ett mikroskop med 400 gångers förstoring för och sporererna i 10 enskilda

rutor räknades. Därefter togs ett medelvärde av antalet sporer i dessa rutor varifrån en koncentration kan beräknas som senare med hjälp av den totala volymen substrat och torrmassanen för provet kan beräknas till antalet sporer per kg TS.



Figur 4. Schematisk bild över en Bürker cell. (Bild från: iCampus 2010)

Det går inte att med säkerhet särskilja svampsporer från andra partiklar i mikroskop enbart med hjälp av dess utseende vid denna metod. Därför följande antagande gjorts:

”Som svampsporer betraktas i denna studie alla runt eller ovalt formade partiklar i storleksordningen 2-20 μm som i ljusmikroskop har en mörk kontur.” (Carlström *et.al.* 1981)

Detta antagande innebär troligtvis att även andra partiklar än svampsporer räknas in men det innebär även att en del svamparter utesluts.

3.6 Fraktionsfördelning

Bränslets fraktionsfördelning har tagits fram genom mekanisk sällning av materialet genom fyra olika lager för att sedan samlas upp i ett bottenlager under 10 minuter. Därefter sorterades materialet från de olika lagren manuellt i tre olika fraktioner, dessa är ved, kvist och bark över 3 mm, finfraktion och barr. Anledningen till denna uppdelning av fraktionerna är den ofta återkommande diskussionen att barr medför stora problem i förbränningsprocessen. Ett av dessa problem som ofta nämns är den ökade mängden oförbränt material i flygaskan som ofta följer med rökgaserna. Detta är även ett problem gällande finfraktionen därav valdes denna metod för att jämföra barr med finfraktion ur denna synpunkt. En annan anledning är att många tidigare utförda studier inriktat sig på att jämföra bränslet med avseende på t.ex. ved, bark, kvistar och finfraktion, de barr som då funnits i dessa prover har troligtvis i dessa undersökningar ofta räknats till finfraktionen.

Skakmaskinens olika lager är utformade på följande sätt:

Lager 1: Runda hål med en diameter på ~7 mm
Lager 2: Längsgående skåror med en bredd på ~ 2 mm
Lager 3: Runda hål med en diameter på ~ 3 mm
Lager 4: Runda hål med en diameter på ~ 2 mm
Lager 5: Botten

Tanken med denna uppställning med de olika sållen är att de flesta barren ska hamna i lager 2, 3 och 4. Ett problem med denna metod är att en del barr ställer sig upp och fastnar i hålen på Lager 4, där upptäcktes det att barren lätt bryts av och därmed hamnar i bottenlagret. För att inte denna analys då skulle bli alltför tidskrävande gjordes följande antagande: "Som barr räknas halva barr, mindre bitar av barr räknas som finfraktion". Detta antagande bygger därmed på personlig uppskattning på hur stort ett halvt barr är, vilket i sin tur innebär att en del av barren räknas in i finfraktionen. Denna mängd barr som då räknas till finfraktionen är ytterst liten och betraktas därmed som försumbar.

Efter sållningen och uppdelningen i de olika fraktionerna torkades materialet över natten för att efterföljande beräkning säkert skulle utföras på absolut torrt prov. Därefter vägdes materialet och fraktionsfördelningen beräknades till % (m/m) av torrsubstansen.

4. Litteraturstudie

Vid lagring av sönderdelat träbränsle såsom t.ex. hyggesrester, stamvedflis, sågspån, bark etc. förändras en del egenskaper med tiden. Vanligtvis sker det en omfördelning av fukten i stacken. Tillsammans med substansförluster leder detta till att bränslets energiinnehåll förändras. Dessutom sker en tillväxt av mögelsvampar. Vanligtvis sker det även en spontan självuppvärmning av stacken, detta kan i vissa extrema fall leda till spontana bränder.

Idag lagras vanligtvis skogsbränslet en säsong, och ibland flera säsonger, innan de sönderdelas. Det sönderdelade bränslet lagras ytterliggare en tid vid på värmeverket eller vid terminal. Denna lagring av det sönderdelade materialet har störst påverkan på bränslets kvalitet. Väl vid värmeverket/terminalen lagras ofta det sönderdelade bränslet i stackar, ofta helt utan skydd för väder och vind. I vissa fall kan lagringen av det sönderdelade bränslet ske i täckta stackar, ventilerade stackar eller under tak. Men det finns även andra metoder som i vissa fall kan vara bättre ur lagringssynpunkt, som t.ex. stränglagring och lagring av buntat skogsbränsle. Dessa båda är metoder som innebär att lagringen sker innan bränslet sönderdelas. Det finns flera studier som visar att en högre bränslekvalitet erhålls om sönderdelningen sker så sent som möjligt (Jirjis 1995).

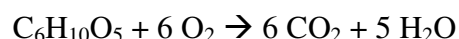
Generellt sett innebär det att skogsbränslet bör sönderdelas så sent som möjligt i hanteringskedjan, allra helst skulle lagring aldrig ske av sönderdelat skogsbränsle. Men det är inte möjligt eftersom värmeverken behöver ett beredskapslager av sönderdelat bränsle som direkt kan användas. En stor del av bränslet som eldas i värmeverken har sitt ursprung i sågverksindustrin och är redan sönderdelade när de blir tillgängliga för värmeverken.

4.1 Fukthalt

Ett bränsles fukthalt är mycket viktigt, det har bland annat en mycket stor inverkan på det effektiva värmevärdet. Fukthalten påverkar även temperaturen och substansförlusterna hos ett bränsle under lagring (Thörnqvist 1983 a).

Enligt Thörnqvist (1983 a) varierar medelfukthalten för färskt sönderdelade hyggesrester mellan 54,5 och 57,5 %. Generellt brukar man säga att fukthalten i nyavverkade hyggesrester ligger någonstans emellan 50 och 55 %. Om materialet legat ute på hygget en vegetationsperiod innan sönderdelning sjunker medelfukthalten till ca 40 % medan den ligger på ca 50 % för material som legat på hygget i två vegetationsperioder. Den högre fukthalten i materialet som legat två vegetationsperioder på hygget berodde enligt Thörnqvist (1983 a) på att just detta hygge var beläget på en sluttning i norrläge med fuktig mark. Det regnade även när dessa hyggesrester skotades ut från hygget. Det material som endast legat en vegetationsperiod på hygget, vilken hade en betydligt lägre fukthalt, kom däremot från ett hygge i söderläge med betydligt torrare mark. Det var även uppehållsväder under skotningen, sönderdelningen och uppläggningsperioden av detta material i stack. I samtliga stackar kunde Thörnqvist (1983 a) se att det skett en omfördelning av fukten, särskilt tydligt är detta i stackarnas nedre delar där fukthalten sjunkit markant. Att det sker en omfördelning av fukten i en stack beror på att en flisstack är hydrokopisk. Det innebär att den både kan ta upp vatten via adsorption och avge vatten via desorption (Thörnqvist 1984). En flisstack strävar hela tiden efter att få en fukthalt i jämvikt omgivningens relativa luftfuktighet, denna jämvikt kallas fukthaltjämvikt. Fuktens omfördelning är beroende av bland annat mängden finfraktion i flisen. Thörnqvist (1983 a) kunde tydligt se dessa skillnader i två olika stackar. I den stack där hyggesresterna var sönderdelade med en så kallad hammarkvarn, vilket gav upphov till en finare fraktion, var fuktens omfördelning knappt märkbar. I den andra stacken där materialet sönderdelats med en skivkross, vilket ger upphov till grövre fraktioner, har en tydlig omfördelning av fukten skett.

Vatten förekommer i ved på två olika sätt, antingen fritt eller bundet (hygrokopiskt). Det fria vattnet finns i cellerna håligheter, lumen, både i vätskefas och i ångfas. Det bundna vattnet finns i cellväggarna. Det finns även kemiskt bundet vatten i cellulosaamolekylerna som endast frigörs vid nedbrytning enligt den kemiska formeln:



När flisade hyggesrester lagras i stack sker det med tiden en omfördelning av fukten i stacken (Thörnqvist 1983c, 1984, Rutar-Gadd 2006). Enligt Thörnqvist (1983c, 1984, 1986) bildas det två tydliga områden i stacken med olika fukthalter. I nedre delen och i mitten av stacken bildas det ett torrare område med fukthalter på ca 20-25%. Utmed stackens sidor och i dess övre del bildas däremot ett betydligt blötare skikt, ofta med fukthalter på 65-70 %. Den övre delen av stacken blir övermättad av vatten och fördelningen mellan dessa två områden beror på temperaturhöjningen i stacken (Thörnqvist 1984). I regel börjar dessa i de centrala delarna. När temperaturen stiger ökar lufttemperaturen vilket leder till att luften stiger och för med sig vatten från stackens centrum till dess ytterkanter. När luften når ytan svalnar den och fukten kondenserar då ut till dagg på stackens ytterkanter, detta leder efterhand till en uppfuktning av stacken (Thörnqvist 1984). Medelfukthalterna i en stack med opackade hyggesrester uppmättes av Thörnqvist (1986) till 42,2 %, efter 7-8 månaders lagring hade stacken torkat till en medelfukthalt av 17,9 %. Samma material lades även i ytterligare en stack och där uppmättes medelfukthalten innan lagring till 40,5 % och 17,5 % efter lagring. Att detta material hade lägre fukthalt än angivna fukthalter för nyavverkat material beror på att

avverkningen skedde under vintern 1984-1985, därefter låg hyggesresterna och torkade på hygget fram till i maj-juni då försöket började och materialet flisades och stackades upp. Det går dock tydligt att se att materialet torkar ner till en relativt låg fukthalt under såpass lång lagring. Det är dock inte alltid så att sönderdelade hyggesrester torkar under lagring, detta visade Thörnqvist (1983 b) gälla då flislagringen sker i stackar med relativt små volymer ca 30-110 m³s då medelfukthalten istället ökade med mellan 4,5 och 7,7 procentenheter.

Det finns olika metoder för att få ett bränsle med väldigt låg fukthalt, varav den enklaste kanske är att täcka stacken med ett tak. Bränslestackar som skyddas av ett tak kan få så pass låg medelfukthalt som 20 % efter sju månaders lagring (Thörnqvist 1982). Det finns även andra metoder som t.ex. genomblåsning av flisen med varm eller kall luft, men med tanke på dagens energidebatt är detta en tveksam metod och kommer därmed inte att beskrivas närmare.

4.2 Askhalt

Den totala askhalten hos nyavverkade hyggesrester är 2,1 %, detta kan jämföras med den naturliga askhalten hos ren stamved vilken varierar mellan 0,2 och 0,4 % (Thörnqvist 1985). Askhaltens variation över tiden i en stack beror bland annat på föroreningsgraden hos bränslet men den varierar också beroende på hur stor nedbrytningen i stackens olika delar. I en undersökning utförd av Thörnqvist (1983c) bestämdes askhalten till 3,7 % hos olagrat material för att sedan efter ett års lagring vara 5,1 %, se Tabell 1.

Tabell 1. Askhalten hos flisade hyggesrester, olagrade respektive lagrade i upp till 12 månader (Thörnqvist 1983c).

Olagrat material	Lagringstid i månader					
	2	4	6	8	10	12
3,7	8,2	4,5	3,7	8,4	13,1	5,1

VEAB utgår från 1,85 % askhalt hos hyggesrester och 1 % askhalt för ren stamved i de beräkningar som används för att uppskatta energiinnehållet i bränslet.

4.3 Energiinnehåll och energiförluster

Förändringen av energiinnehållet i träbränsle beror på substansförluster och förändring av fukthalt samt i vissa fall förändring av det kalorimetriska värmevärdet, vilket dock inte är speciellt vanligt då det kalorimetriska värmevärdet brukar vara ganska konstant (Thörnqvist & Jirjis 1990). De små skillnader som kan finnas i det kalorimetriska värmevärdet har inte undersökts i detta arbete. Men även självuppvärmningen av stacken har betydelse för bränslets energiförluster (Rupar-Gadd 2006).

Det kalorimetriska värmevärdet för färskas hyggesrester ligger vanligtvis någonstans runt 21 MJ/kg TS (Thörnqvist 1985) medan det effektiva värmevärdet för nyavverkade hyggesrester uppmättes till 17,6 MJ/kg TS (Thörnqvist & Jirjis 1990). Det kalorimetriska värmevärdet förändras vanligtvis inte vid lagringen medan det effektiva värmevärdet, beräknat på massbasis, i regel brukar öka något. Ökningen av det effektiva värmevärdet beror till största delen på att bränslet torkat (Thörnqvist & Jirjis 1990). Det kalorimetriska värmevärdet varierar för de olika beståndsdelarna i GROT men det varierar även mellan olika avverkningsplatser i landet, se Tabell 2. Som synes i Tabell. XX. har kvistar och små grenar

det högsta kalorimetriska värmevärdet på 21,76 respektive 21,82 MJ/kg TS, därefter har barren det högsta kalorimetriska värmevärdet, lägst har stamved och bark.

Tabell 2. Kalorimetriskt värmevärde för de olika beståndsdelarna i GROT (Thörnqvist 1985).

	Kalorimetriskt värmevärde för färska hyggesrester från Kinna (MJ/kg TS)	Kalorimetriskt värmevärde för färska hyggesrester från Hälsingland (MJ/kg TS)
Ved	20,24	20,63
Barr	21,11	21,20
Bark	20,55	20,46
Kvistar och små grenar	21,76	21,82

Det kalorimetriska värmevärdet för bränslet i en stack varierar under ett års lagring mellan 18,6 och 20,3 MJ/kg TS, medan det effektiva värmevärdet varierar mellan 18,1 och 19,0 MJ/kg TS (Thörnqvist 1983c). Detta kan ses i Tabell 3.

Tabell 3. Förändringen av det kalorimetriska och det effektiva värmevärdet under ett års lagring. (Thörnqvist 1983c)

	Lagringstid i månader					
	2	4	6	8	10	12
Kalorimetriskt värmevärde MJ/kg TS	19,1	20,1	20,3	19,3	18,6	20,1
Effektivt värmevärde MJ/kg TS	18,1	18,8	19	17,9	17,2	18,7

Det effektiva värmevärdet, per m³f, varierar för hyggesrester från 7450 till 9160 MJ/m³f beroende på vilken fukthalt (0- 60 %) bränslet har, se Tabell 5.

Tabell 4. Effektivt värmevärde för olika trädslag och sortiment vid olika fukthalter. (Lehtikangas 1999)

Sortiment	Trädslag	Torr-rådensitet kg TS/m ³ f	Effektivt värmevärde MJ/m ³ f			
			0	20	40	60
Stamved med bark	Tall	390	7510	7270	6880	6080
	Gran	385	7360	7120	6740	5950
	Björk	490	9560	9260	8760	7760
	Al	360	6840	6630	6270	5550
Helträdsflis	Tall	385	7540	7310	6920	6130
	Gran	400	7430	7200	7020	6210
	Björk	475	9040	8750	8270	7300
	Al	370	6810	6600	6430	5680
Hyggesrester utan barr	Tall	405	8250	8000	7590	6720
	Gran	465	9160	8880	8400	7450
	Björk	500	9850	9550	9040	8020

Enligt Thörnqvist (1986) är energiförlusterna i mindre stackar som lagrats under tak i 7-8 månader under 10 % medan de kan vara över 20 % om lagringen skett under bar himmel. Vid

lagring av bränsleflis från kvistade lövträd har betydligt lägre energiförluster noterats. Enligt Rugar-Gadd (2006) var energiförlusterna i en bränslestack efter 6-12 månaders lagring 10-24%. Energiförlusterna varierar kraftigt beroende på var i stacken mätningen utfördes beroende på bland annat hur stor nedbrytningen var i just den delen av stacken. Substansförlusterna är vanligtvis högre under lagringens början, därefter minskar substansförlusterna. Längre fram i lagringen minskar energiförlusterna i takt med att stacken torkar ut (Thörnqvist & Jirjis 1990).

Energiförlusterna i en stack med sönderdelat skogsbränsle, med fukthalt mellan 30-50 %, undersöktes av Thörnqvist och Jirjis (1990), resultaten åskådliggörs i Tabell 5. Denna stack var 7 m hög, 14 m bred samt 90 m lång och undersöktes under en tidsperiod av 28 veckor. När energiförlusterna anges per vecka syns det tydligt att energiförlusterna är störst i början av lagringen, redan vecka 1 var energiförlusterna 2,9 % medan energiförlusten vecka 28 endast var 0,3 %. Totalt sett var energiförlusten efter 28 veckor 7,9 %. Totalt sett sker i stort sett hela energiförlusten under lagringens tre första månader för att därefter ligga relativt konstant på någon eller några tiondels procent per månad (Thörnqvist och Jirjis 1990).

Tabell 5. Medelvärde av energiförlusten i en stack med sönderdelat skogsbränsle i jämförelse med substansförlusten och uttorkningen. (Thörnqvist & Jirjis 1990)

Lagringstid i veckor	Energiförlust (%)		Substansförlust (%)	Torkning (procentenheter)
	per vecka	totalt		
1	2,9	2,9	3,6	0,4
2	1,3	2,6	4,5	3,5
3	0,8	2,3	5,2	7,8
4	0,7	2,9	3,6	2,9
6	0,7	4,0	6,0	8,2
8	0,6	4,7	5,6	3,7
10	0,5	5,1	5,9	5,9
12	0,2	2,0	4,6	10,5
16	0,4	6,4	11,8	12,4
20	0,3	6,7	12,2	12,1
24	0,4	8,9	11,9	11,4
28	0,3	7,9	11,3	8,7

4.4 Substansförluster

Thörnqvist och Jirjis (1990) undersökte även substansförlusterna och uttorkningen, resultaten åskådliggörs i Tabell 5. I likhet med energiförlusterna är substansförlusterna som störst i början av lagringsperioden men även starkt beroende av bränslets medelfukthalt, vilket också visas i Tabell 5. Substansförlusten var redan efter en veckas lagring 3,6 %, därefter minskade substansförlusterna kontinuerligt för att efter 12 veckors lagring i genomsnitt vara 0,4 % per vecka. En månad senare efter totalt 16 veckors lagring ökade dock substansförlusterna igen till ca 0,7 % per vecka, efter denna ökning minskade sedan substansförlusterna igen för att vid vecka 28 återigen ligga på en nivå av ca 0,4 % per vecka. Anledningen till den ökande substansförlusten efter 16 veckors lagring beror enligt Thörnqvist & Jirjis (1990) på bränslets medelfukthalt. Medelfukthalten i de provsnitt som analyserades under vecka 1-12 varierade

bränslets medelfukthalt mellan 33-43 %, i de provsnitt som analyserades därefter till och med vecka 28 varierade bränslets medelfukthalt mellan 46-51 %.

Torr-rådensitetens förändring under lagringstiden kan som tidigare nämnts användas som ett mått på hur stora trädbränslets substansförluster är vid lagring. Torr-rådensiteten för nyflisade hyggesrester som legat två månader på hygget uppmättes till 480 kg/m³f, i Tabell 6. redovisas hur torr-rådensiteten förändras under ett års lagring (Thörnqvist 1983c).

Tabell 6. Förändringen av torr-rådensiteten i en bränslestack under ett års lagring (Thörnqvist 1983c).

Torr-rådensitet (kg/m ³ f)	Olagrat	Lagringstid i månader					
		2	4	6	8	10	12
	480	409	384	423	415	429	381

Torr-rådensiteten för helt färska hyggesrester däremot är enligt Thörnqvist (1985) 470 kg/m³f. Det är även stor skillnad på de torr-rådensiteten för de olika beståndsdelarna i GROT, där ved har den högsta torr-rådensiteten med 590 kg/m³f, medan bark har den lägsta med 360 kg/m³f, se Tabell 6. Anledningen till att torr-rådensiteten ökar om hyggesresterna får barra av på hygget är att den tyngre veden då får en större procentuell andel av torrmassan, detta förklarar den högre torr-rådensiteten på 480 kg/m³f som anges i Tabell 7. Detta innebär att en lagringsmetod där torr-rådensiteten ökar hos bränslet påverkar energiinnehållet positivt.

Tabell 7. Torr-rådensiteten för de olika beståndsdelarna i GROT (Thörnqvist 1985).

	Torr-rådensitet (kg/m ³ f)
Gren och stamved	590
Bark	360
Barr	400
Kvistar och smågrenar	420
Vägt medelvärde	470

Enligt Rugar-Gadd (2006) är substansförlusterna i en bränslestack under bar himmel 2-17% efter 6-12 månaders lagring beroende på var i stacken mätningen utfördes. Substansförlusterna är beroende på stackens initiala fukthalt (Rugar-Gadd 2006) och är som störst de första månaderna under lagringen. Redan efter en veckas lagring av sönderdelade skogsrester visade Thörnqvist och Jirjis (1990) att substansförlusterna uppgår till 3,6 % av TS och efter sju månader uppgår de till ca 12 % av TS. Thörnqvist (1986) har också visat att sönderdelade hyggesrester som lagras i mindre stackar. 55-400 m³, har substansförluster på 2,5- 3,5 % per månad under 6-9 månaders lagring. Substansförlusterna är genomgående som högst i en bränslestacks fuktigare delar i jämförelse med stackens torrare delar (Thörnqvist 1983c).

4.5 Svampsporer och mikrobiell aktivitet

Vid lagring av skogsbränsle sker det mikrobiell tillväxt i stackarna vars hastighet är beroende av bland annat näringstillgången, värme, fukthalten och fraktionstorlekarna på materialet. Tillväxthastigheten är kraftigt beroende av bränslets fraktionsfördelning eftersom kvävet är en begränsande faktor. Mycket barr och bark i bränslet leder till högre tillväxt (av mikroorganismer) än vad som skulle ske i ren vedflis, eftersom det innehåller mer bundet kväve än ren ved (Thörnqvist 1983c). Kolonisationen av mikroorganismer är minimal på helt

färskt skogsbränsle men den börjar förekomma direkt efter att materialet lagts upp i stack (Rupar-Gadd 2006). Mikroorganismernas metabolism producerar i sin tur värme vilket gynnar fortsatt mikrobiell tillväxt (Rupar-Gadd 2006). Den mikrobiella aktiviteten i en bränslestack bidrar till temperaturhöjningar i temperaturintervallet 0-70°C, därefter tar olika kemiska processer vid. Men det finns även bakterier och svampar som klarar av temperaturer upp till 80°C (Rupar-Gadd 2006). Den mikrobiella tillväxten i en bränslestack leder till substansförluster, utsläpp av hälsovådliga sporer samt en ökad risk för självantändning av stacken. Allt detta leder till en försämring av bränslets kvalitet (Rupar-Gadd 2006).

Partikelstorleken hos bränslet är av stor betydelse för den mikrobiella aktiviteten i en bränslestack. Ju mer finfördelat materialet desto större yta har mikroorganismerna att kolonisera. Mindre bränslepartiklar ger en högre packningsgrad av stacken vilket ger en mindre permeabilitet, detta gör att den producerade värmen inte lika enkelt kan lämna stacken (Rupar-Gadd 2006). Därför innebär mindre bränslepartiklar en högre temperatur i stacken samt en högre mikrobiell aktivitet. Större bränslepartiklar motverkar mikrobiell aktivitet främst genom en snabbare torkning (Rupar-Gadd 2006).

Hyggesrester som sönderdelats och sedan lagrats i 6-7 månader innehåller mellan 10^{11} och 10^{12} st sporer per kg TS. I helt färska hyggesrester är däremot mängden betydligt mindre och varierar mellan 10^6 och 10^7 st/kg TS. Hyggesrester som avverkats under vintern och sedan fått ligga i vältor tills våren innehåller 10^9 - 10^{10} st/kg TS, under ytterliggare lagring under sommaren ökar mängden mikrosporer till 10^{10} - 10^{11} st/kg TS (Thörnqvist 1984).

Antalet mikrosporer i en bränslestack som lagrats under ett år bestämdes av Thörnqvist (1983c). Vid uppläggnen var antalet till $2 \cdot 10^9$ st/kg TS, skogsbränslet hade då lagrats i ca 2 månader i vältor på hygget innan materialet flisades och stackades upp. Efter sönderdelningen ökar sedan antalet mikrosporer i bränslet, se Tabell 8. Genomgående för undersökningen som utförts av Thörnqvist (1983c) är att de mätpunkter där mängden mikrosporer var som högst var även hade högst fukthalt.

Tabell 8. Det totala antalet mikrosporer i stackens olika mätpunkter under ett års lagring (Thörnqvist 1983c).

Totala antalet svampdiasporer per kg TS $\times 10^9$							
		Lagringstid i månader					
Mätpunkt	Nyflisat material	2	4	6	8	10	12
	2						
1		20	60	200	60	70	60
2		70	100	200	100	100	70
3		50	200	60	200	100	200
4		70	200	80	50	100	70
5		40	100	100	40	200	100
6		40	50	30	20	40	80
Medelvärde		50	120	110	80	100	100

Eftersom mängden mikroorganismer är som störst i stackens fuktiga delar skulle man kunna tänka sig att en väl ventilerad stack är en optimal lösning för att få låg mikrobiell tillväxt i stacken, men enligt Jirjis (1995) är det inte så. Fukthalten minskar visserligen och likaså även

värmeutvecklingen. Men den snabba avkylningen från 75°C till 50°C ger upphov till en mycket gynnsam miljö för mikroorganismer, främst mikrosvampar. Har bränslet en hög fukthalt vid uppstackningen kan det innebära en stor kolonisation av mikrosvampar och de många problem som följer med en hög mikrobiell aktivitet.

Mängden mikrosporer som hittas i bränslet efter lagring är betydligt färre i buntade hyggesrester jämfört med sönderdelade hyggesrester. Flinkman & Thörnqvist utförde (1986) lagringsförsök på buntade hyggesrester och bestämde vid uppläggningsen det totala antalet mikrosporer till $2 \cdot 10^{10}$ st/kg TS. Efter ca 9 månaders lagring bestämdes det totala antalet mikrosporer i buntarna till $9 \cdot 10^9$ st/kg TS.

4.6 Fraktionsfördelning

När sönderdelade hyggesrester lagras förändras fördelningen av bränslets komponenter, trots detta kan ingen trend urskiljas i förändringen av förhållandet mellan de olika fraktionerna i bränslet (Thörnqvist 1983c). I en stack undersökt av Thörnqvist (1983c) under ett års lagring var fraktionsfördelningen av torrsubstansen i medeltal uppdelat på ca 55 % ved, 12 % barr, 16 % bark, 12,5 % kvist och 4 % finfraktion. I Tabell 9 kan förändringen av fraktionsfördelningen under ett år ses.

Tabell 9. Förändringen av bränslestackens fraktionsfördelning under ett års lagring uttryckt som % av TS. (Thörnqvist 1983c)

	Ved (%)	Barr (%)	Bark (%)	Kvist (%)	Finfraktion (%)
Olagrat	54,3	13,4	18,1	10,7	3,4
2 månader	58,0	11,9	13,9	12,5	3,8
4 månader	53,0	13,7	17,0	9,0	7,5
6 månader	56,7	11,3	19,0	9,5	3,5
8 månader	57,9	10,4	17,6	8,6	5,6
10 månader	50,6	13,6	13,3	15,4	7,2
12 månader	55,9	11,9	14,9	15,1	2,3

Om bränslet däremot lagras i processorhögar eller vältor på hygget innan sönderdelningen kan en tydlig trend ses hur fraktionsfördelningen förändras, detta gäller främst för barren. Eftersom hyggesresterna torkar på hygget lossnar även barren som då trillar av grenarna och hamnar på marken, detsamma händer även under hanteringen av hyggesresterna innan flisningen. Thörnqvist undersökte (1983a) bland annat förändringen av fraktionsfördelningen mellan färska hyggesrester samt hyggesrester som lagrat ett respektive två år i vältor vid bilväg innan sönderdelning. Tabell 10 och 11 illustrerar fraktionsfördelningen direkt efter sönderdelningen samt vid försökets avslutande efter sju månaders lagring.

Tabell 10. Fraktionsfördelningen direkt efter sönderdelningen uttryckt som % av TS hos de färska, ett år respektive två år gamla hyggesresterna. (Thörnqvist 1983a)

	Ved (%)	Barr (%)	Bark (%)	Kvist (%)	Finfraktion (%)
Färskt	32,9	26,2	17,9	13,9	9,2
1 år	54,8	6,3	17,5	17,5	4,0
2 år	56,6	5,9	18,7	12,2	6,7

Tabell 11. Fraktionsfördelningen efter sju månaders lagring uttryckt som % av TS hos de färska, ett år respektive två år gamla hyggesresterna. (Thörnqvist 1983a)

	Ved (%)	Barr (%)	Bark (%)	Kvist (%)	Finfraktion (%)
Färskt	37,7	20,7	13,4	7,4	17,4
1 år	53,5	9,9	14,2	14,3	8,1
2 år	55,3	4,7	17,2	4,8	18,0

Om lagringen av skogsbränslet sker innan sönderdelningen, t.ex. i buntar, minskar mängden finfraktion mycket i jämförelse med lagring av sönderdelat skogsbränsle (Jirjis 1995). Detta visades av Flinkman & Thörnqvist (1986) som utförde ett lagringsförsök på buntade träddelar och hyggesrester. Fraktionsfördelningen i buntarna av hyggesrester utgjordes av 59,5 % ved, 20,7 % bark, 12,7 % barr, 6,6 % kvist och 0,4 % finfraktion.

4.7 Temperaturhöjning och självantändning

Lagring av sönderdelade trädbränslen leder ofta till en ökning av temperaturen i stacken vilket till en början beror av kondensationsvärme och respirationsvärme, därefter tar den mikrobiella aktiviteten över, aerob nedbrytning, (Thörnqvist 1987, Jirjis 1995), så är fallet tills temperaturen når ca 75°C därefter tar kemiska processer över (Thörnqvist 1987, Rupar-Gadd 2006). Men redan vid ca 40°C börjar kemiska oxidationsprocesser i bränslet att ha en viss betydelse för temperaturhöjningen, vid 50°C har de en tämligen stor betydelse (Thörnqvist 1987).

Uppvärmningen av en bränslestack sker relativt snabbt, redan efter några veckors lagring har temperaturen i stackens centrala delar ökat till 60-70°C (Thörnqvist 1984, Rupar-Gadd 2006). Temperaturökningen har alltid sitt ursprung i stackens centrum (Thörnqvist 1984). Därefter avstannar temperaturökningen och stackens temperatur stannar på en relativt konstant nivå under hela lagringsperioden. Om stacken består av mycket blandat material, t.ex. hög kvist, bark och barrandel erhålls en högre temperatur i stacken (Thörnqvist 1984, Rupar-Gadd 2006). Bland annat kan nämnas att Thörnqvist (1986) erhöll temperaturer på över 300°C i en stack med flisade och packade hyggesrester som lagrades under tak. Överlag erhöles högre temperaturer i denna stack i jämförelse med de andra stackarna i försöket, redan under de första 3-4 månaderna steg temperaturen till 80°C för att under den femte månaden stiga till temperaturer över mätområdet, vilket slutade vid 300°C. Efter ytterligare ett par veckor började temperaturen sjunka för att sedan stabilisera sig runt 100 °C ända fram till försökets avslutande. Om bränslet däremot är renare, t.ex. ren stamvedsflis av ek, sker det ofta en långsam avsvälning i stacken ner till ca 10°C över omgivningens temperatur (Thörnqvist 1987). Om bränslet är absolut torrt, fukthalten är lägre än fibermättnadspunkten, sker det ingen temperaturökning överhuvudtaget (Thörnqvist 1984).

Jirjis undersökte (1995) skillnaden i temperaturökning i både en ventilerad och en oventilerad stack. Undersökningen visade att det i bägge fallen skedde en snabb temperaturhöjning, upp till ca 75°C, i bränslestacken under de första dagarna av lagringen. Därefter följde en gradvis avkylning av den ventilerade stacken till ca 50°C, under de sista sex veckorna av lagringen pendlade temperaturen mellan 25 och 50°C. Den oventilerade stacken behöll däremot en högre temperatur under hela lagringstiden. En metod som helt verkar eliminera temperaturökningen vid lagring av sönderdelat trädbränsle är att istället för stackar lagra bränslet i mindre strängar (Jirjis 1995). Detta innebär även att mängden termofila svampar i bränslet, men även den totala mängden mikrosvampar och sporer hamnar på nivåer under risknivåer för allergiska reaktioner.

Spontan självantändning kan inträffa när de kemiska processerna driver upp temperaturen i bränslestacken. Vid vilken temperatur självantändningen sker är inte känd utan den tros bero på materialsammansättningen, syretillgången och eventuellt närvarande katalysatorer som t.ex. metaller (Thörnqvist 1987). Att kvarglömda metallföremål kan fungera som katalysatorer och starta värmegenererande reaktioner som i vissa fall kan leda till självantändning i organiska material är allmänt känt, särskilt inom kraftvärmeindustrin. I undersökningen utförd av Thörnqvist (1987) kunde brandhårdarna i två fall lokaliseras till områden i stacken där metallföremål hittats. Rupar-Gadd (2006) undersökte i sin doktorsavhandling bland annat just hur metaller påverkar risken för spontan självantändning. Hennes resultat visade att tillsatta metaller till trädbränslet gav betydligt högre värmeutveckling efter 10-30 dagar. En självantändning är precis som en vanlig förbränningsprocess en exoterm, värmeavgivande, oxidationsprocess. Därmed finns det i princip tre krav som måste uppfyllas för att en självantändning ska kunna uppstå. Dessa är tillgång till brännbart material och syre samt en förhöjd temperatur. Om någon av dessa elimineras kan ingen spontan självantändning ske (Thörnqvist 1987). Eftersom det inte är realistiskt att eliminera tillgången på syre eller brännbart material bör lagringen av trädbränsle ske på sådant sätt att temperaturökningen minimeras.

4.8 Hur bör bränslet lagras för att minimera riskerna för självantändning och nergiförluster?

För att minska riskerna för självantändning i en stack med trädbränsle rekommenderar Thörnqvist (1987) följande riktlinjer, vilka även gällande för att erhålla god bränslekvalitet:

- Lagra olika bränslesortiment i olika stackar
- Försök att minimera fukthaltsspridningen i stacken
- Packa absolut inte stackar bestående av sönderdelade hyggesrester
- Undvik metallföremål i stacken
- Stacken bör vara avlång där tvärsnittets bas är lika med dubbla stackhöjden
- Undvik gropar och upphöjningar i marken utmed stackens sidor
- Bygg upp stacken längs med huvudriktningen
- Stackens höjd bör ej överstiga höjderna i Tabell 12.

Tabell 12. Rekommenderade höjder på bränslestackar enligt Thörnqvist (1987).

Bränsle	Höjd ej packad stack (m)	Höjd packad stack (m)
Obarkad stamvedsflis	15	12
Helträdsflis från lövträd	12	9
Helträdsflis från barrträd	10	7
Sönderdelade hyggesrester	7	bör ej packas
Bark	7	4
Sågspån	6	4

Thörnqvist (1987) menar även att höjden på en bränslestack inte bör överstiga 6-7 m, överstigande höjder minskar torkningen i stacken och leder därmed till högre energiförluster.

Det finns flera fördelar med att lagra trädbränslet innan sönderdelningen, vilket innebär att sönderdelningen skall ske så sent som möjligt i hanteringskedjan. Bland annat kan nämnas att ett torrare bränsle erhålls, mindre mängd mikrosporer bildas, energi-, och substansförlusterna blir lägre samt att man inte erhåller någon signifikant temperaturhöjning. Mängden mikrosporer som bildas vid lagring av ej sönderdelade hyggesrester menar Jirjis (1995) är så pass låga att det inte är risk för några allergiska reaktioner hos de som hanterar bränslet (Jirjis 1995).

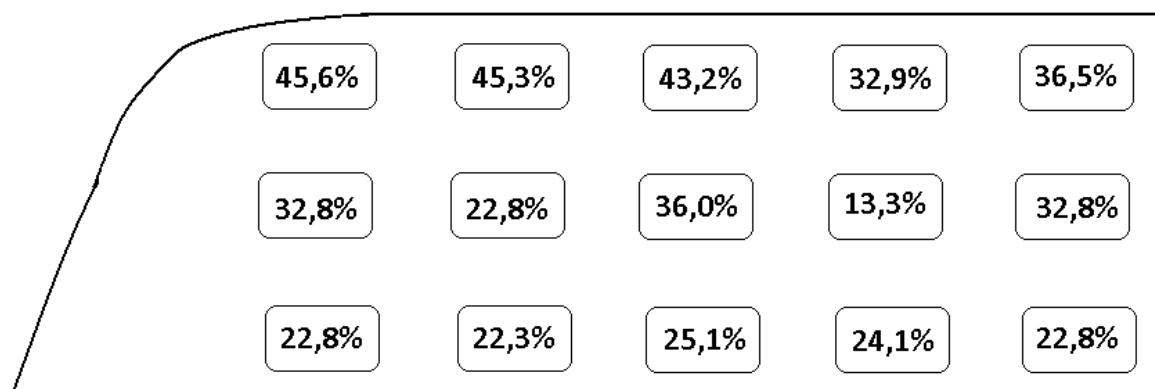
Enligt Jirjis (1995) är det bättre ur lagringssynpunkt att lagra avverkningsrester antingen i täckta buntar eller täckta stackar istället för att lagra materialet flisat direkt under bar himmel. Bland annat minskar riskerna drastiskt för självantändning samtidigt som tillväxten av mikroorganismer och substansförluster minskar. Genom att finfördela materialet så sent som möjligt innebär det även att energiförlusterna minskar. En annan metod som även visar goda lagringsegenskaper är lagring i mindre strängar än i stora stackar. Vid stränglagring erhålls ett torrare bränsle, substansförlusterna och mängden mikrosporer minskar (Jirjis 1995). Då bränslet lagras i buntar istället för sönderdelade hyggesrester menar Jirjis (1995) att de substansförluster som då uppstår till största delen utgörs av de barr som trillar av. För otäckta buntar uppmättes de totala substansförlusterna till ca 21 % av TS medan de var 12 % av TS för de täckta buntarna. Efter nio månaders lagring av buntat skogsbränsle hade fukthalten sjunkit från 43 % till mellan 26 och 30 % beroende på om buntarna varit täckta eller inte (Jirjis 1995). Försöksbuntarna hade en bulkdensitet på ca 160 kg/m³ och var tillverkade av skogsbränsle som legat en sommar och torkat i processorhögar.

5. Resultat

Resultat för samtliga utförda analyser kan ses i tabellform i Bilaga 1-8.

5.1 Fukthalt

Medelfukthalten i stacken av det lagrade materialet var vid provtagningstillfället 30,5 % medan medelfukthalten för det nylevererade materialet denna dag var 47,4% (Se Bilaga 1). Resultaten av fukthaltsproverna visar även att en omfördelning av fukten har skett. De högsta fukthalterna hittas i N1, vilket är den översta nivån på stacken, längre ner i stacken är fukthalten lägre. Medelfukthalterna i stacken är för N1, N2 samt N3 är i tur och ordning 40,7%, 27,5% och 23,4%. En fukttransport har därmed skett från stackens centrum ut mot dess ytterkanter. Fukthalterna vid stackens olika mätpunkter kan ses i Figur 5. Det regnade även en del under provtagningen vilket kan innebära att fukthalterna för proverna kan vara något överskattade.

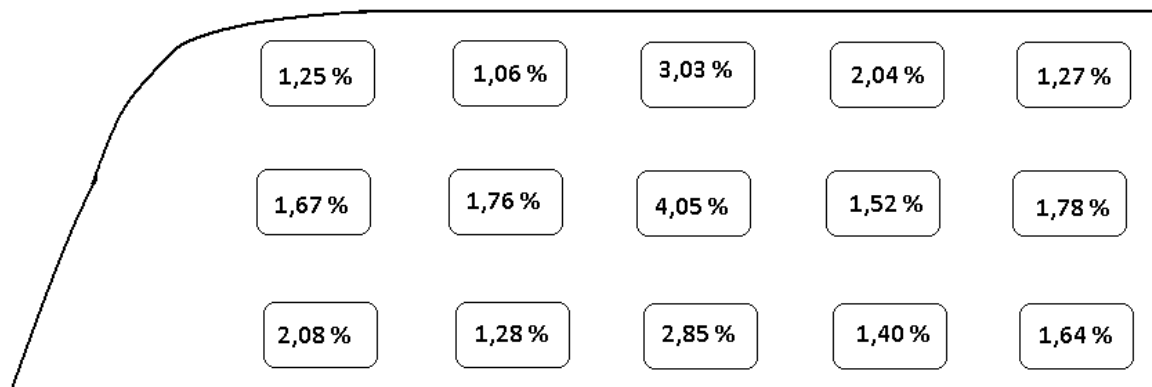


Figur 5. Fukthalterna i stacken vid de olika provtagningspunkterna

Medelfukthalten för det äldsta materialet var vid leverans ca 30 %, och beräknades utifrån mätprotokoll för varje leverans under perioden 2009-07-01 till och med 2009-08-14 (Se Bilaga 8). Under lagringen har materialet torkat till en medelfukthalt av 27,1 % (prov 1 och 3 på samtliga nivåer i stacken). Medelfukthalten har därmed minskat med 11 procentenheter.

5.2 Askhalt

Askhalten i stacken med det lagrade bränslet varierade mellan 1,16 och 3,85 % (Se Figur 6.), med en medelaskhalt på 1,91 %. Det går tydligt att se ett område i mitten av stacken där askhalten är högre än i övriga stacken, detta kan förklaras av att bränslet som inkom just under denna period var mer förorenat än bränslet i resterande delar av stacken. För det nyinkomna bränslet varierade askhalten mellan 1,08 % och 1,77 %, med en medelaskhalt på 1,42 %.

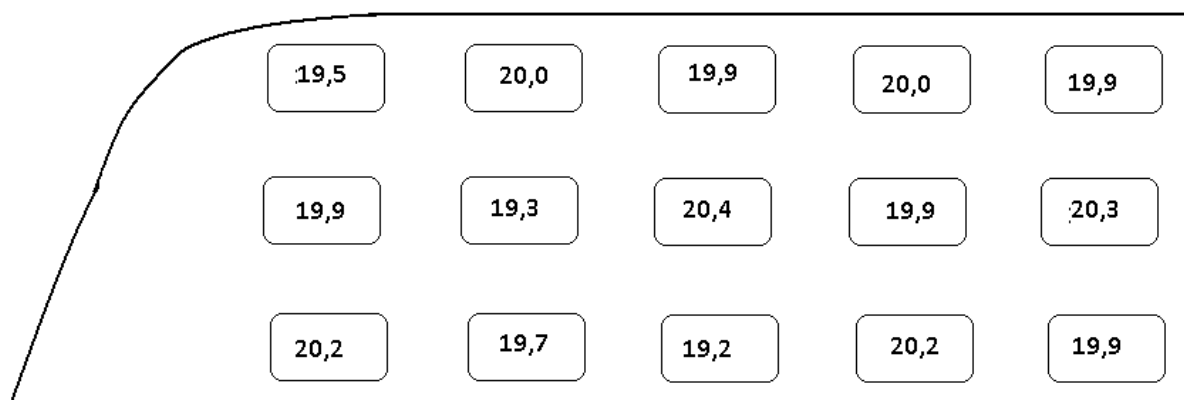


Figur 6. Askhalterna för bränslet i stacken vid de olika provtagningspunkterna.

De angivna askhalterna för bränslet inkommet under perioden 2009-07-01 till och med 2009-08-14 kan ses i Bilaga 8. Medelaskhalten för bränslet under denna period var 1,72 %.

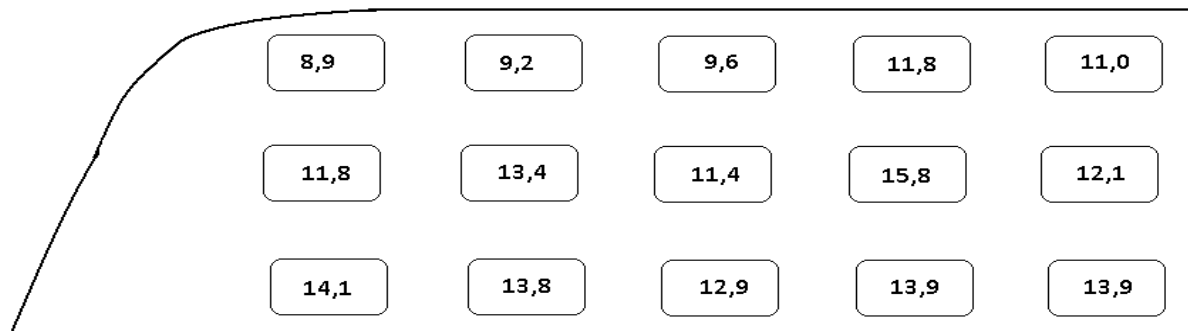
5.3 Energiinnehåll

Det kalorimetriska värmevärdet ($q_{v,gr}$, W_{kal}) för det lagrade bränslet i stacken varierade mellan 19,2 och 20,4 MJ/kg TS (Se Figur 7). För det nyinkomna bränslet varierade det kalorimetriska värmevärdet mellan 18,9 och 20,0 MJ/kg TS. Totalt sett var medelvärdet för det kalorimetriska värmevärdet hos det lagrade bränslet 20,1 MJ/kg TS och 19,4 MJ/kg TS hos det nyinkomna materialet.



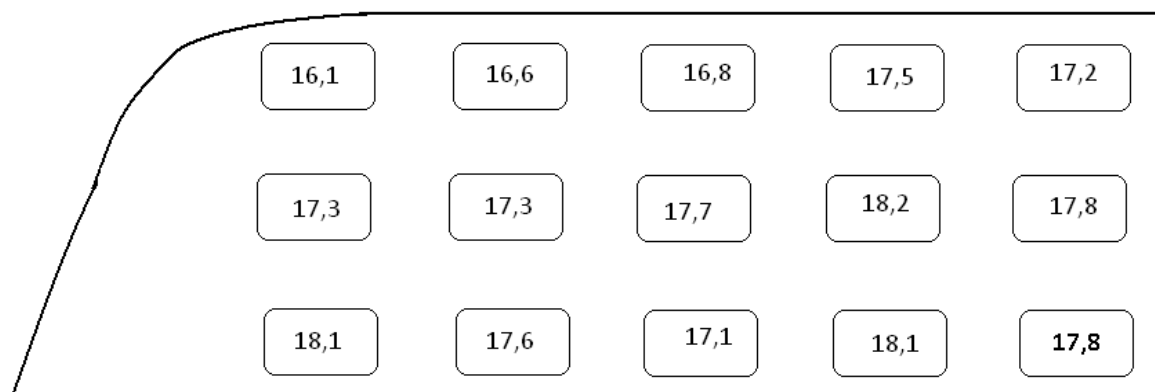
Figur 7. Det kalorimetriska värmevärdet ($q_{v,gr}$, W_{kal}) uttryckt i MJ/kg TS för bränslet i stacken vid de olika provtagningspunkterna.

Det effektiva värmevärdet för bränslet i stacken ($q_{v,net,m}$), beräknat enligt SIS-CEN TS 14918: 2005, varierade mellan 8,9 och 15,8 MJ/kg (Se Figur 8) och är inte korrigerade för askhalten. Medelvärdet för stackens effektiva värmevärde beräknades till 12,2 MJ/kg. För det nyinkomna bränslet varierade det effektiva värmevärdet mellan 7,0 och 10,2 MJ/kg med ett medelvärde på 8,5 MJ/kg.



Figur 8. Det effektiva värmevärdet uttryckt i MJ/kg, utan korrektion för askhalten, för bränslet i stacken vid de olika provtagningspunkterna beräknat enligt CEN-SIS TS 14918: 2005

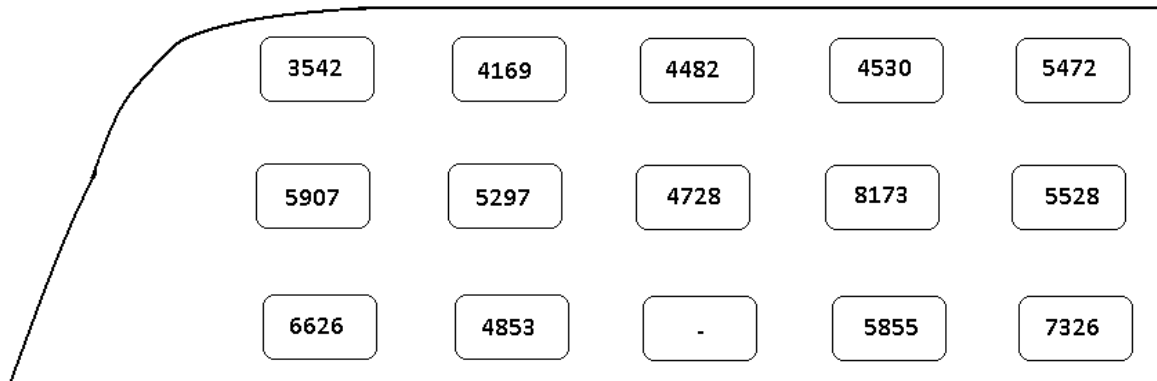
Det effektiva värmevärdet för bränslet i stacken (W_{eff}), beräknat enligt formler i Thörnqvist (1983 c) och Lehtikangas (1999), varierade mellan 16,1 och 18,6 MJ/kg TS (Se Figur 9) och är inte korrigerade för askhalten. Medelvärdet för stackens effektiva värmevärde beräknades till 17,6 MJ/kg TS. För det nyinkomna bränslet varierade det effektiva värmevärdet mellan 14,8 och 17,0 MJ/kg TS med ett medelvärde på 15,9 MJ/kg TS.



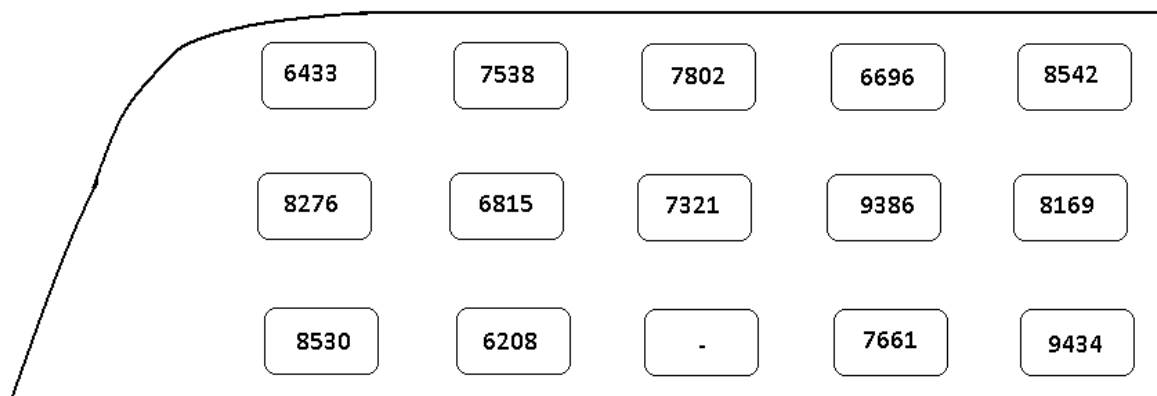
Figur 9. Det effektiva värmevärdet uttryckt i MJ/kg TS, utan korrektion för askhalten, för bränslet i stacken vid de olika provtagningspunkterna beräknat enligt formler i Thörnqvist (1983) och Lehtikangas (1999).

Eftersom även torr-rådensiteten bestämdes kunde det effektiva värmevärdet beräknas med avseende på volymen. Här beräknades inget värde för provtagningspunkten N3.6 då den uppmätta torr-rådensiteten i denna punkt blev orimligt låg och exkluderades därför. Det effektiva värmevärdet, med avseende på volymen beräknat utifrån SIS-CEN TS 14918: 2005 varierade mellan 4196 MJ/m³f och 8173 MJ/m³f för bränslet med ett medelvärde på 5442 MJ/m³f (Se Figur 10). För det nyinkomna bränslet uppmättes endast torr-rådensiteten för två av proverna, därmed beräknades det effektiva värmevärdet med avseende på volym till 3043 respektive 3454 MJ/m³f.

När beräkningarna utfördes för det effektiva värmevärdet beräknat utifrån formler i Thörnqvist (1983 c) och Lehtikangas (1999) kunde det effektiva värmevärdet beräknas med avseende på volym. Det effektiva värmevärdet varierar då mellan 6208 och 9434 MJ/m³f (Se Figur 11) med ett medelvärde på 7772 MJ/m³f. För det nyinkomna bränslet beräknades det effektiva värmevärdet till 6576 respektive 6427 MJ/m³f med ett medelvärde på 6501 MJ/m³f.



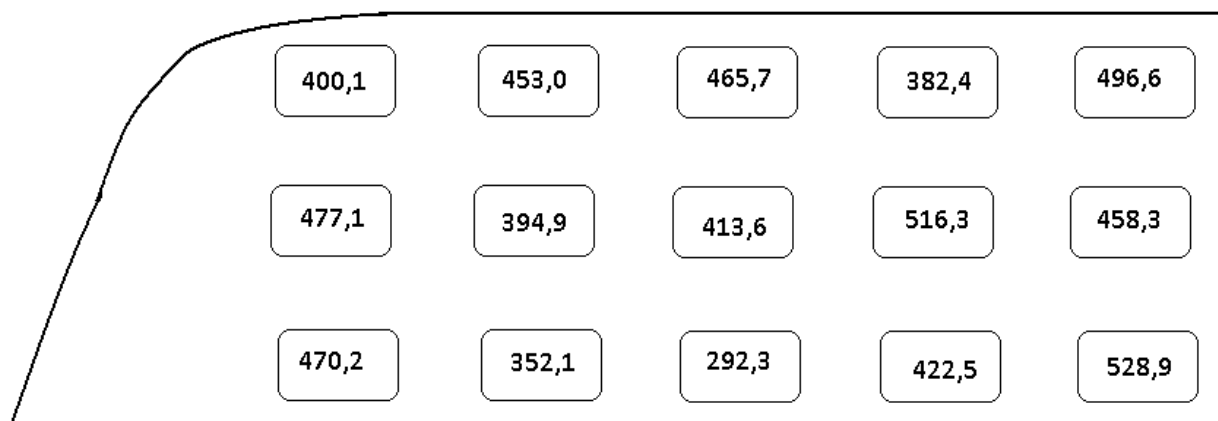
Figur 10. Det effektiva värmevärdet uttryckt i MJ/m³f, utan korrektion för askhalten, för bränslet i stacken vid de olika provtagningspunkterna beräknat via formler enligt CEN-SIS TS 14918: 2005 och den uppmätta torr-rådensiteten.



Figur 11. Det effektiva värmevärdet uttryckt i MJ/m³f, utan korrektion för askhalten, för bränslet i stacken vid de olika provtagningspunkterna beräknat enligt formler i Thörnqvist (1983) respektive Lehtikangas (1999) och den uppmätta torr-rådensiteten.

5.4 Substansförluster och energiförluster

Torr-rådensiteten för det lagrade bränslet i stacken varierade mellan 352,1 och 528,9 kg/m³f med en medeldensitet på 434,9 kg/m³f (Se Figur 12). Den uppmätta torr-rådensiteten i punkten N3.6 vilken hade ett mycket lågt värde på 292,3 kg/m³f och har därför exkluderats ur samtliga beräkningar. För det nyinkomna bränslet uppmättes endast torr-rådensiteten för två prover, 415,4 och 434,7 kg/m³f, anledningen till detta var att en provpåse gick sönder under mätningen.



Figur 12. Torr-rådensiteten uttryckt i kg/m^3 för bränslet vid de olika provtagningspunkterna i stacken

Nedan följer en grov uppskattning av substans-, och energiförlusterna beräknade utifrån antagna värden på torr-rådensitet, fukthalt och kalorimetriskt värmevärde hos bränsleflisen vid sönderdelningen. Bränsleflisens egenskaper och sammansättning vid denna tidpunkt är okänd men antas bestå av en blandning av olika skogsbränslen (främst GROT och stamvedsflis från både barr och lövträd) med olika färskhetsgrad, fukthalt och torr-rådensitet.

Det kalorimetriska värmevärdet antas inte ha förändras speciellt mycket under lagring därför antas det uppmätta värdet för det lagrade bränslet, $20,1 \text{ MJ/kg TS}$, även gälla för bränslet vid sönderdelningen.

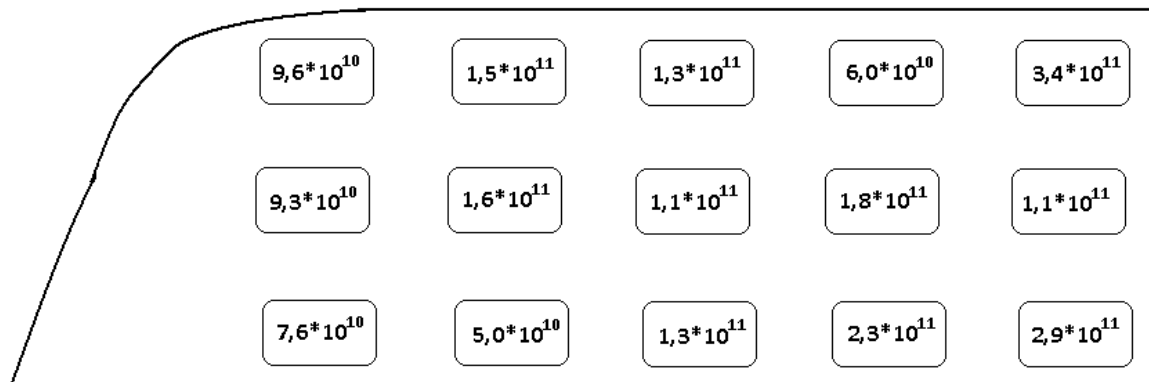
Medelfukthalten bestämdes hos det lagrade materialet till $30,5 \%$. För helt färska trädbänslen brukar fukthalten antas ha ett värde på $50-55 \%$, men eftersom bränslet antas bestå av en blandning av olika skogsbränslen varav vissa har lägre fukthalt antas bränslets medelfukthalt vid sönderdelningen vara ca 45% .

Torr-rådensiteten för det lagrade materialet uppmättes till ca 435 kg/m^3 . Torr-rådensiteten för helt färska hyggesrester brukar sättas till ca 470 kg/m^3 , helt färsk stamved av gran 400 kg/m^3 och stamved av björk 490 kg/m^3 (Thörnqvist 1985). Därför antas torr-rådensiteten för bränslet vid sönderdelningen vara ca 480 kg/m^3 .

Energiförlusterna i bränslet skattas utifrån det effektiva värmevärdet per m^3 . För det lagrade materialet beräknas till ca 7700 MJ/m^3 medan energiinnehållet vid sönderdelningen beräknas till ca 8060 MJ/m^3 med de ovan antagna värdena på torr-rådensitet, fukthalt och kalorimetriskt värmevärde. Detta ger en total energiförlust på 360 MJ/m^3 eller ca $4,5 \%$ och en substansförlust på ca 45 kg/m^3 eller ca 9% .

5.5 Svampsporer

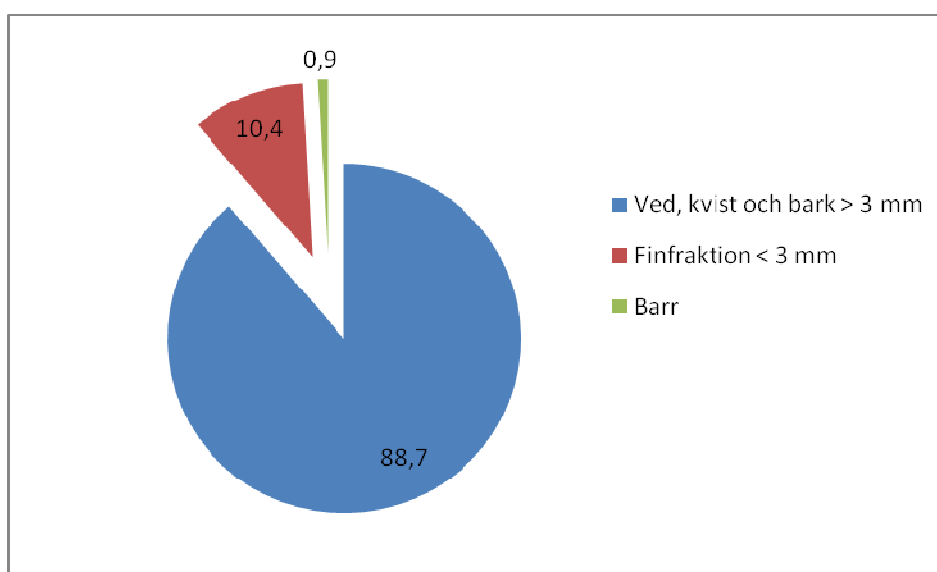
Mängden sporer per kg/TS i stacken varierade mellan $5,0 \cdot 10^{10}$ st/kgTS och $3,4 \cdot 10^{11}$ st/kg TS (Se Figur 13) med ett medelvärde på $1,5 \cdot 10^{11}$ st/kg TS. För det nyinkomna materialet varierade mängden sporer mellan $4,2 \cdot 10^{10}$ st/kg TS och $6,3 \cdot 10^{10}$ st/kg TS med ett medelvärde på $5,0 \cdot 10^{10}$ st/kg TS.



Figur 13. Antalet sporer i bränslet uttryckt i st/kgTS för bränslet vid de olika provtagningspunkterna.

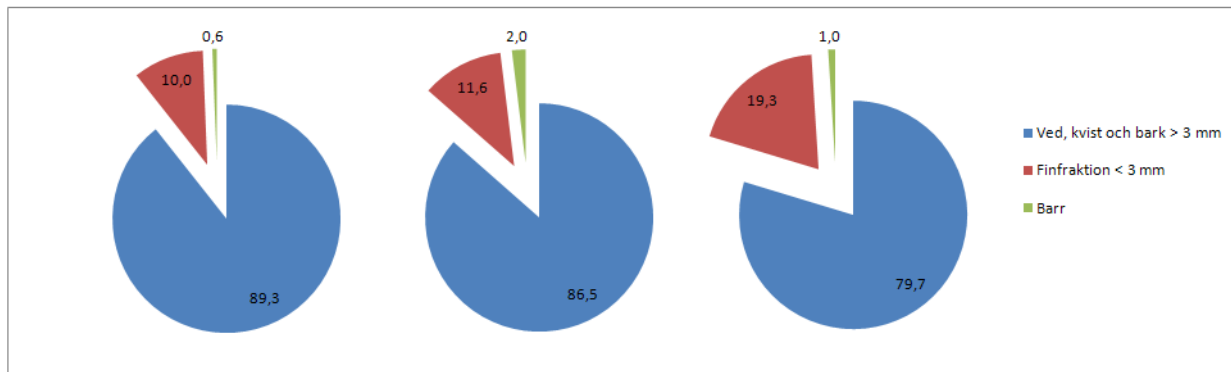
5.6 Fraktionsfördelning

Den totala fraktionsfördelningen i stacken kan ses i Figur 14. Totalt sett innehöll stacken väldigt lite barr vid provtagningsstillfället, endast 0,9 %, andelen finfraktion var 10,4 % och andelen ved, kvist och bark större än 3 mm var 88,7 % (prov 1,3,5,7 och 9 på samtliga nivåer). Detta kan jämföras med fraktionsfördelningen i det nyinkomna materialet (prov 1,3 och 5) där andelen ved, kvist och bark över 3 mm var 79,7 %, finfraktionen utgjorde 19,3 % och barren utgjorde 1 % av torrsubstansen.



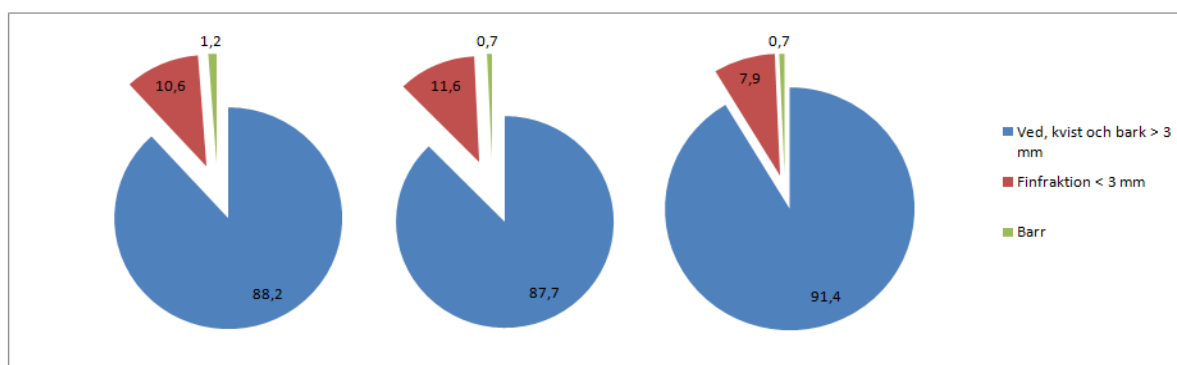
Figur 14. Fraktionsfördelningen i hela stacken.

Det går även att se en viss skillnad på fraktionsfördelningen i stacken beroende på hur länge materialet lagrats, skillnaden är tydligast gällande för barren (Se Figur 15). Barrandelen i det längst lagrade materialet (prov 1,3,5 och 7) var endast 0,6 % medan barrandelen i det nyare materialet (prov 9) var 2 %.



Figur 15. Fraktionsfördelningen i det längst lagrade materialet (till vänster) respektive det nyare materialet i stacken (i mitten) och slutligen det helt nyinkomna materialet (till höger).

Barrandelen i nivå 1 visade sig vara något högre, 1,2 %, jämfört med de nivå 2 och nivå 3 med sina 0,7 %. Andelen finfraktion visade sig vara lägst i nivå 3, (7,9 %) och högst i nivå 2 (11,6 %). Vedandelen var som högst i nivå 3 (91,6 %) och lägst i nivå 2 (87,7 %). Detta kan ses i Figur 16.



Figur 16. Fraktionsfördelningen i stacken uppdelat på de olika nivåerna. Längst till vänster visas fraktionsfördelningen i N1, i mitten visas fraktionsfördelningen i N2 och längst till höger visas fraktionsfördelningen i N3.

Fraktionsfördelningen för respektive prov kan ses i Bilaga 6.

5.7 Temperatur

I denna undersökning utfördes inga temperaturmätningar men det kunde under provtagningstillfället konstateras att temperaturvariationerna i stacken inte var betydande. Vissa delar av stacken var visserligen lite varmare än genomsnittet men det fanns ingen del som var riktigt varm, däremot fanns det några kalla områden med isklumpar.

6. Diskussion

6.1 Fukthalt

Medelfukthalten för det nyinkomna materialet till lagringsplanen på VEAB uppmättes till 47,4% vilket är lägre än den fukthalt som brukar anges för färska hyggesrester, 50-55 % (Thörnqvist 1985) Detta beror med största sannolikhet på att detta material inte var helt färskt utan lagrats en tid och därmed torkat något Denna eventuella torkning kan dock inte ha pågått länge då materialet såg tämligen färskt ut och fukthalten hos nyavverkade hyggesrester vanligtvis brukar anges till runt 50 %. De uppmätta fukthalterna för bränslet i stacken kan ha överskattats något beroende på att det under provtagningen regnade, därmed blev flisen och de papperspåsar materialet placerades i något fuktiga. Men då regnet inte var speciellt kraftigt har detta troligen endast marginell påverkan.

Medelfukthalten för den lagrade flisen i stacken uppmättes till 30,5 % vilket innebär att materialet torkat under lagringen från den normala fukthalten på ca 50-55 %, men det har även skett en torkning av bränslet vid hanteringen från hygget till värmeverket. Det går också att urskilja de olika områdena i den lagrade stacken med olika fukthalter. Materialet i stackens centrala delar var torrare än materialet i stackens övre delar. Det har alltså både skett en torkning av bränslet i stacken och en omfördelning av fukten i stacken.

Medelfukthalten för flisen i stacken som lagrats var också lägre än den medelfukthalt som Thörnqvist (1983 a) uppmätte. Detta kan till viss del förklaras av olika väderförhållanden vid provtagningen och närmsta tiden innan provtagningen. Under provtagningen regnade det medan det dagarna innan varit soligt och blåsigt.

6.2 Askhalt

Medelaskhalten i bränslestacken med det lagrade materialet uppmättes till 1,91 % för det nyinkomna materialet var medelaskhalten ännu lägre, 1,42 %. Den uppmätta medelaskhalten i bränslestacken och för det nyinkomna materialet ligger i ungefärlig nivå med den askhalt på 1,85 %, för skogsbränslen, som används av VEAB vid upphandling av trädbränsle. Den uppmätta askhalten i bränslet är dock betydligt lägre än vissa uppmätta askhalter från litteraturen bland annat uppmättes en medelaskhalt på 8,4 % i en bränslestack efter åtta månaders lagring (Thörnqvist 1983c). Generellt kan man säga att askhalten i bränslet ökar vid lagring och detta beror på att bränslet bryts ned medan de oorganiska ämnena till stor del stannar kvar. Däremot kan man anta att rena föroreningar som t.ex. grus och sand trillar längre ner i stacken ju längre tiden går. Men överlag har hanteringen av skogsbränslet förbättrats rejält med tiden vilket innebär att föroreningarna av bränslet minskar. Idag sker i princip all lagring av sönderdelade trädbränslen på hårdgjorda ytor vilket minskar askhalten i bränslet. Medelaskhalten som uppmättes i stacken ligger lägre än den askhalt som anges i litteraturen.

6.3 Energiinnehåll

Det kalorimetriska värmevärdet uppmättes till 19,4-20,4 MJ/kg TS med ett medelvärde på 20,1 MJ/kg TS. Detta kan jämföras med det kalorimetriska värmevärdet för helt färska hyggesrester på ca 20-21 MJ/kg (Thörnqvist 1985). Det kalorimetriska värmevärdet i stacken ligger även väldigt nära de värden på mellan 18,6 och 20,3 MJ/kg TS som uppmättes av

Thörnqvist (1983 c) under ett års lagring av sönderdelade hyggesrester. Det effektiva värmevärdet för bränslet i stacken beräknades till mellan 16,1 och 18,2 MJ/kg TS enligt formler angivna i Thörnqvist (1983 c) och Lehtikangas (1999), det lägsta effektiva värmevärdet på 16,1 MJ/kg TS kan förklaras av en högre fukthalt (45,6 %) i denna mätpunkt (N1.9-10) jämfört med övriga punkter. Det motsatta förhållandet gäller i mätunkten N2.3-4 där den lägsta fukthalten (13,3 %) uppmättes vilket innebär det högsta effektiva värmevärdet, 18,2 MJ/kg TS, i denna undersökning. I medeltal beräknades det effektiva värmevärdet till 17,4 MJ/kg TS för det lagrade bränslet och 15,9 MJ/kg TS för det nyinkomna materialet.

Fukthaltens betydelse blir extra tydlig då det effektiva värmevärdet beräknas enligt SIS-CEN TS 14918: 2005, där det effektiva värmevärdet beräknas på råvikten. Det lägsta effektiva värmevärdet beräknades då till 8,9 MJ/kg i mätpunkten N1.9-10 och det högsta effektiva värmevärdet beräknades till 15,8 MJ/kg. I medeltal beräknades det effektiva värmevärdet för bränslet i stacken till 12,2 MJ/kg för det lagrade bränslet och 8,9 MJ/kg syns återigen fukthaltens samband tydligt eftersom det nyinkomna bränslet hade en medelfukthalt på 47,4 % medan det lagrade bränslet i stacken hade en medelfukthalt på 30,5 %.

Det effektiva värmevärdet på 15,9 MJ/kg TS som beräknades för det nyinkomna bränslet kan tyckas lågt men beror av höga fukthalter och relativt låga kalorimetriska värmevärden i två av proverna. De låga värdena på det kalorimetriska värmevärdet kan tyda på en hög lövandel i den nyinkomna flisen vid just detta tillfälle.

När det gäller det effektiva värmevärdet räknades det om för att gälla bränslets volym kan dock en skillnad göras gällande. Hyggesrester utan bark har vid en fukthalt på 40 % ett effektivt värmevärde på 8400 MJ/m³f vilket kan jämföras med 7772 MJ/m³f, beräknat som ett medelvärde och en lägre fukthalt (30,5 %). Anledningen till att ett lägre värmevärde erhållits är att torr-rådensiteten i medeltal minskat i förhållande till färskt material, 435 respektive 470 kg/m³f.

6.4 Substansförluster och energiförluster

Torr-rådensiteten i mätpunkten N3.6 uppmättes till 292,3 kg/m³f vilket skiljer sig rejält från de andra mätningarna. Detta beror troligen på att något gick fel under just den mätningen men det skulle också kunna vara så att det just på den platsen i stacken skett stora substansförluster. I mätpunkten N3.2 uppmättes en ganska hög torr-rådensitet men då den inte ansågs orimligt hög behölls den i beräkningar. Överlag erhöles en relativt stor spridning på resultaten av densitetsmätningarna, vilket delvis kan förklaras av olika mätfel.

Men eftersom flera av mätningarna visade på relativt höga värden på torr-rådensiteten kan dessa resultat även tolkas som att bränslestacken innehöll relativt låga mängder av barr, detta visade sig också stämma när fraktionsfördelningen undersöktes. I medeltal uppmättes torr-rådensiteten för bränslet i stacken till ca 435 kg/m³f. Detta kan jämföras med torr-rådensiteten på 470 kg/m³f som angetts gälla för färsk hyggesrester, vilket innebär att torr-rådensiteten minskat med ca 7 %. Om man istället antar att flisen i stacken endast består av endast gren och vedfraktionen i GROT, vilket innebär en torr-rådensitet på 590 kg/m³f, har torr-rådensiteten minskat med nästan 25 %. Vilken den verkliga substansförlusten är ligger någonstans mellan dessa två beroende på bränslemixens utseende vilket bland annat visade sig i undersökningen av fraktionsfördelningen.

De största substansförlusterna och energiförlusterna sker i början av lagringen, under de tre första månaderna (Thörnqvist och Jirjis 1990). Båda dessa är starkt kopplade till bränslets medelfukthalt. Energiförlusterna och substansförlusterna efter ca tre månaders lagring är 5,1 respektive 5,9 %. Därefter avtar hastigheten både för energiförlusterna och substansförlusterna, efter ca sju månaders lagring är den totala energiförlusten 7,9 % och den totala substansförlusten 11,3 % (Thörnqvist och Jirjis 1990).

Substansförlusterna i bränslet har skattats utifrån bränslets torr-rådensitet vilken uppmättes till $435 \text{ kg/m}^3\text{f}$ för bränslet i stacken efter lagring medan torr-rådensiteten antas varit ca $480 \text{ kg/m}^3\text{f}$ vid sönderdelningen detta ger en substansförlust på ca $45 \text{ kg/m}^3\text{f}$ eller ca 9 %.

Energiförlusterna i stacken har skattats utifrån det effektiva värmevärdet per m^3f . Det effektiva energiinnehållet i stacken beräknades till ca $7700 \text{ MJ/m}^3\text{f}$ medan energiinnehållet i samma material vid sönderdelning beräknades till ca $8060 \text{ MJ/m}^3\text{f}$. Detta ger en total energiförlust på $360 \text{ MJ/m}^3\text{f}$ eller ca 4,5 %.

6.5 Mikroorganismer

Mängden mikrosporer som uppmättes i proverna visade sig vara väldigt höga, i medeltal $1,5 \cdot 10^{11}$ st/kg TS vilket kan jämföras med mängden helt färska hyggesrester där mängden mikrosporer varierar mellan 10^6 och 10^7 st/kg TS (Thörnqvist 1984). Misstankar om höga halter av mikrosporer uppkom redan vid insamlingen och vid vidare hantering av proverna. Det kan ha skett en viss överskattning av antalet sporer vid undersökningen i mikroskop, men denna överskattning har endast marginell påverkan.

Lagring av buntade hyggesrester skulle kunna innebära en minskad mängd mikrosporer vilket i sint tur skulle ge en bättre arbetsmiljö och mindre energiförändringar hos bränslet. Det ses tydligt vid en jämförelse mellan de resultat från denna undersökning och den lagringsundersökning utförd av Flinkman & Thörnqvist (1986). Resultat i denna undersökning visade på en stor mängd mikrosporer ($1,5 \cdot 10^{11}$ st/kg TS) jämfört med $9 \cdot 10^{10}$ st/kg TS.

En metod för att få mer klarhet i mängden mikrosporer hade varit att undersöka mängden levande mikrosporer genom en odling för att på så vis se om det fanns några skillnader. Det är även intressant att mängden mikrosporer var lägre i det nylevererade bränslet, $5 \cdot 10^{10}$ st/kg TS jämfört med $1,5 \cdot 10^{11}$ st/kg TS i det lagrade materialet.

6.6 Fraktionsfördelning

Barrandelen i bränslestacken visade sig vara väldigt låg, endast 0,9 % i medeltal jämfört med 26,2 % för helt färska hyggesrester (Thörnqvist 1983a). Vad som kunde urskiljas med blotta ögat kunde var att barrandelen i stacken var låg och att andelen finfraktion skulle vara hög. Men andelen barr i stacken visades sig vara mycket lägre än det som angetts för lagrat material där andelen barr varierade mellan 10,4 och 13,6 % under ett års lagring med ett medelvärde på 12 % (Thörnqvist 1983c). När det gäller vedandelen i stacken visade den sig vara något högre (88,7 %) jämfört med tidigare undersökningar, där ved och bark tillsammans utgjorde 71 % av torrsubstansen (Thörnqvist 1983 c). Andelen finfraktion i stacken bestämdes till 10,4 % vilket är betydligt högre än de 4 % finfraktion i en stack under ett års lagring som bestämdes av Thörnqvist (1983c). Vid jämförelse mellan det lagrade materialet i stacken och

det nyinkomna materialet visade det sig att barrandelen var densamma, 0,9 respektive 1 %. Den största skillnaden mellan materialen visade sig ligga i andelen finfraktion, 10,4 respektive 19,3 %, med en skillnad på ca 9 procentenheter. Denna skillnad skulle kunna bero på att finfraktionen under lagringen och hanteringen trillar av bränslet och hamnar på marken. Någon sådan tendens kunde dock inte upptäckas i stacken utan istället visade sig andelen finfraktionen vara som störst i stacken mellersta lager (N2). De provpunkter med högst andel finfraktion gav ofta höga askhalter,

Det kan finnas flera olika faktorer som påverkat resultatet för fraktionsfördelningen i bränslet en kan vara att en viss del av barren brutits sönder under skakningen och därmed sorterats in som finfraktion men detta skulle endast ha marginell påverkan. Det är då troligare att mängden barr varit låg redan från början antingen genom att det varit mycket ren vedflis i stacken eller att hyggesresterna fått barra av på hygget innan sönderdelningen skett. Troligtvis har även bränslet lagrats på terminal en viss tid innan det levererades till VEAB, därmed kan en del av barren trillat av under denna lagring och hantering.

6.7 Hur bör bränslet lagras?

Tidigare forskning verkar vara överens om att energi och kvalitetsförlusterna hos bränslet är sammankopplade med självuppvärmningen, uttorkningen och den mikrobiella aktiviteten i bränslet. Därmed kan det tyckas självklart att bränslet bör lagras så att dessa minimeras. Det verkar även vara så att temperaturstegringen i stacken är en funktion av partikelstorlek och stackstorlek. Ju större partiklar (flisbitar) desto högre kan stacken byggas. Olika trädränslen i samma stack bidrar till ökad temperatur. Speciellt gäller detta då ett lager finfraktion hamnar i ett område med grövre fraktioner, t.ex. ett sågspånslager mitt i en flisstack vilket leder till ökad temperatur i stacken. Ett av de säkraste sätten att minska temperaturhöjningarna och energiförlusterna skulle kunna vara att torka ned bränslet under sin fibermättnadspunkt, men detta är inget realistiskt alternativ då Sandviksverket är optimerat för fuktigare bränsle. Enligt Thörnqvist och Jirjis (1990) sker de största energiförlusterna under lagringens tre första månader för att sedan avta. Den stora energiförlusten i början av lagringen kan tänkas bero på att tillväxten av mikroorganismer är som störst i början av lagring, likaså är självuppvärmningen som störst den första tiden. Med tanke på mängden mikrosvampar som hittades i stacken, $1,5 \cdot 10^{11}$ st/kg TS, kan det även nämnas att bränslet bör lagras så pass länge att en torkning sker men inte så pass länge att tillväxten av mikroorganismer blir för stor. Mikroorganismerna står för en stor del av substansförlusterna vid lagringen samt att sporena ger upphov skadliga hälsoeffekter hos personalen som hanterar bränslet. Vid stora substansförluster, låg torr-rådensitet, efter lagringen minskar även energiinnehållet (med avseende på volymen), därför bör det sönderdelade bränslet lagras så kort tid som möjligt. Men tiden bör inte vara så kort att ingen torkning hinner ske då detta leder till ett ökat effektivt värmevärde. Torkningen verkar i första hand även vara beroende av stackens höjd, vilken ej bör överstiga 6 till 7 m för sönderdelade hyggesrester.

Det finns mycket forskning som säger att energi- och substansförlusterna kan minskas rejält om bränslet inte sönderdelas förrän efter lagringen. Vid lagring av ej sönderdelade hyggesrester erhålls även ett torrare bränsle, mindre tillväxt av mikroorganismer, ingen temperaturhöjning. Därför bör bränslet sönderdelas så sent som möjligt i kedjan från hygge till panna.

Eftersom de största energi- och substansförlusterna sker i början av lagringen och minskar efter en tids lagring är det rimligt att använda sig av "SIFU" (Sist In Först Ut). På detta sätt

tillåts inte substans och energiförlusterna på färskt material att bli så stora. Trots detta bör inte något sönderdelat bränsle lagras längre än absolut nödvändigt.

Tillväxten av mikroorganismer är betydligt större i sönderdelat bränsle i jämförelse med bränsle som inte sönderdelats. Detta tillsammans med att energi- och substansförluster är högre i sönderdelat bränsle jämfört med bränsle som inte sönderdelats borde göra det intressant att överväga buntat skogsbränsle.

Nedan följer tre förslag på hur hanteringen skulle kunna se ut vid Sandviksverkets nya lagringsyta.

Förslag 1:

Sönderdela bränslet på plats och bygg en bränslestack enligt modell från cellulosaindustrin. Detta innebär att en bandtransportör tar bränsleflisen och annat sönderdelat trädbränsle från flishuggen/tippfickan sju meter upp. Bandet förs horisontellt så långt att lagret med sönderdelat trädbränsle räcker 3 till 5 dagar. En rörlig avskrapare för trädbränslet gör att det sönderdelade materialet läggs i en avlång stack med bredden 12 m. Trädbränslet förs från stacken till pannan genom att två skruvar rör sig fram och åter utmed stackens botten. Trädbränslet skruvas in mot stackens centrum där det transporteras till pannan med en bandtransportör. Om trädbränslet som köps in är av olika kvalitet är det möjligt att mixa bränslet vid flisningen respektive tippningen i tippfickan så att en homogen bränsemix erhålls. Skogsbränslet körs in osönderdelat (gärna buntat) till Sandviksverket.

Detta förslag ger ett homogent bränsle ur kvalitetssynpunkt, samtidigt som mängden mikrosvampar, substansförluster och energiförluster minimeras. Dessutom är risken för spontan självantändning extremt låg.

Förslag 2:

Bygg samma typ av stackningsanordning som i förslag 1 men kör in allt trädbränsle sönderdelat.

Detta förslag ger ett något mindre homogent bränsle, sannolikt med ett lägre energiinnehåll och en något större risk för självantändning. Förslaget är ”hetare” och därför känsligare för externa störningar.

Förslag 3:

Kör in trädbränslet såväl sönderdelat som osönderdelat. Det sönderdelade trädbränslet läggs upp i 6 till 7 m höga stackar, med ca 45° rasvinkel, vilket ger stackens bredd ca 12 till 14 meter. En stack krävs för varje sortiment (barrhyggesrester, lövhyggesrester, stamved, bark, sågspån, stubbflis osv) för att minska brandrisken. Det bör vara 5 till 6 meter mellan varje stack för att räddningstjänsten skall kunna skära av stacken i händelse av brand. Det osönderdelade trädbränslet läggs upp i stackar som täcks med papp i väntan på sönderdelning.

Detta förslag är en konventionell metod som kräver stora utrymmen för lagring av sönderdelade trädbränslen. Förslaget är det med störst risk för självantändning, störst risk för stora mängder mikrosvampar, störst energiförluster vid lagring och även det minst homogena trädbränslet

7. Slutsats

Utifrån de utförda analyserna och jämförelser med tidigare forskning har följande slutsatser kunnat dras:

Under tiden för lagring har bränslet torkat, i jämförelse med nyavverkade hyggesrester, samt att det skett en omfördelning av fukten i stacken. Medelfukthalten i stacken bestämdes till 30,5 % och man kunde tydligt se att fukthalten var lägre i stackens mitt jämfört med stackens ytterdelar.

Askhalten i stacken, 1,91 %, var lägre än den medelaskhalt på 5,8 % som uppmättes av Thörnqvist (1983c) under ett års lagring.

Det kalorimetriska värmevärdet för bränslet i stacken visade sig ligga väldigt nära de vanligtvis angivna värdena för sönderdelade skogsrester. Detsamma gäller för det effektiva värmevärdet. Detta innebär att energiinnehållet räknat per kg inte förändras under lagringen, däremot om energiinnehållet räknas om med avseende på volymen så kan en stor försämring ses.

Torr-rådensiteten för bränslet i stacken uppmättes till $435 \text{ kg/m}^3\text{f}$, om detta jämförs med den av Thörnqvist (1985) angivna torr-rådensiteten hos färska hyggesrester på $470 \text{ kg/m}^3\text{f}$. Detta innebär en minskning av torr-rådensiteten med 7 %.

Mängden mikrosvampar i stacken uppmättes till $1,5 \cdot 10^{11}$ st/kg TS, vilket är en stor ökning i jämförelse med den mängd, mellan 10^6 och 10^7 st/kg TS (Thörnqvist 1984), som vanligtvis kan finnas i färska hyggesrester.

Fraktionsfördelningen i hela stacken visade på en väldigt låg andel barr och finfraktion. Detta skulle innebära att bränslet i stacken till stor del består av ren stamvedsflis, eller att det under hanteringen av bränslet trillat av en stor del finfraktion och barr.

För att minimera energiförluster hos bränslet är det viktigt att det sker en torkning, därför bör inte stackens höjd överstiga 6-7 m. Både energiförlusterna och substansförlusterna är enligt Thörnqvist och Jiris (1990) som störst i början av lagringen, under de tre första månaderna. Dessa är starkt kopplade till bränslets medelfukthalt. Energiförlusterna och substansförlusterna efter ca tre månaders lagring är 5,1 respektive 5,9 %. Därefter avtar hastigheten både för energiförlusterna och substansförlusterna, efter ca sju månaders lagring är den totala energiförlusten 7,9 % och den totala substansförlusten 11,3 %.

För att minska energiförluster, substansförluster, återfuktning och tillväxten av mikroorganismer är det fördelaktigt att sönderdela bränslet så sent som möjligt i kedjan från hygge till panna.

Energiförlusterna i stacken har skattats utifrån det effektiva värmevärdet per m^3f till ca $360 \text{ MJ/m}^3\text{f}$ eller ca 4,5 %. Substansförlusterna i bränslet har skattats utifrån bränslets torr-rådensitet till ca $45 \text{ kg/m}^3\text{f}$ eller ca 9 %.

8. Referenser

8.1 Tryckta källor

Alvarez, H., (2006): *Energiteknik – Del 1*. Tredje upplagan. Studentlitteratur, Lund

Asplund, F., (1985): *Correct Determination of Efficiency with Special Reference to Small Boilers*. Information No 447. Styrelsen för teknisk utveckling, Stockholm

Carlström, B., Thörnqvist, T & Werner, S., (1981): *Bestämning av mängden svampdiasporer i bränsleflis*. Rapport nr 124. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Egnell, G., (2009): *Skogsskötselserien nr 17 – Skogsbränsle*. Skogsstyrelsen.

Energimyndigheten., (2008): *Energiläget i siffror 2008*. Statens energimyndighet, Eskilstuna

Energimyndigheten., (2009): *Energiläget 2009*. Statens energimyndighet, Eskilstuna

Flinkman, M., Thörnqvist, T., (1986): *Lagring av buntade träddelar och hyggesrester*. Rapport nr 180. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Jirjis, R., (1995): *Storage and drying wood fuel*. Institutionen för skogens produkter, Uppsala

Jirjis, R & Norden, B., (2005): *Bränslekvalitet och arbetsmiljö vid lagring och hantering av grotstockar*, Rapport nr. 7. Institutionen för bioenergi, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Kommissionen mot oljeberoende.,(2006): *På väg mot ett oljefritt Sverige*. Stockholm

Lehtikangas, P., (1999) Andra upplagan: *Lagringshandbok för trädbränslen*. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Nilsson,B., (2007): *Skogsbränslehantering – Effektivitet och kostnader för olika hanteringsmetoder för grotuttag*. Examensarbete nr: TD 090/2007. Avdelningen för Skog och Träteknik, Växjö Universitet, Växjö

Rupar-Gadd, K., (2006): *Biomass Pre-treatment for the production of Sustainable Energy – Emissions and Self-ignition*. PhD thesis No 88/2006. Avdelningen för Bioenergiteknik, Växjö Universitet, Växjö.

SIS-CEN TS 14918: 2005: *Fasta biobränslen - Metod för bestämning av kalorimetriskt värmevärde*. Swedish Standards Institute.

Thörnqvist, T., (1983 a): *Lagring av sönderdelade hyggesrester*. Rapport nr 137. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Thörnqvist, T., (1983 b): *Lagring av hyggesrester sönderdelade i olika fraktioner*. Rapport nr 146. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Thörnqvist, T., (1983 c): *Bränsleflisens förändring under ett års lagring*. Rapport nr 148. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Thörnqvist, T., (1984): *Hyggesrester som råvara för energiproduktion – Torkning, lagring, hantering och kvalitet*. Rapport nr 152. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Thörnqvist, T., (1985): *Trädbränslekvalitet – vad är det?*. Uppsats nr 14. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Thörnqvist, T., (1986): *Projekt storskalig säsongslagring av trädbränsle – en sammanfattning av etapp 1*. Uppsats nr 188. Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Thörnqvist, T., (1987): *Bränder i stackar med sönderdelat trädbränsle*. Uppsats nr 163. SIMS, Institutionen för virkeslära, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Thörnqvist, T. & Jirjis, R., (1990). *Bränsleflisens förändring över tiden - Vid lagring i stora stackar*. Rapport nr 219. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala

Österholm, L-H & Andersson, L., (1987) *Bestämning av värmevärde för fasta bränslen*. Värmeforsk, rapport nr 273.

8.2 Elektroniska källor

NE 2010: Hemsidan för NE, hämtad 23 november 2010

http://www.ne.se/energiprincipen?i_h_word=termodynamikens+f%C3%B6rsta+lag

8.3 Bildkällor

iCampus. (2010) iCampus hemsida 2010-06-09

<http://www.icampus.ucl.ac.be/courses/SBIM2520/document/genemol/secondesemaine/CELLS/count.html>

9. Bilagor

Bilaga 1. Fukthalt

Tabell. 1. Fukthalten för samtliga mätpunkter i stacken och det nyinkomna materialet.

Kod	Vikt rå (g)	Vikt TS (g)	Massa vatten (g)	Fukthalt (%)
NY,1	750,6	389,3	361,3	48,1
NY,3	634,6	376,5	258,1	40,7
NY,5	792,3	369,3	423,0	53,4
N1,1	561,5	356,6	204,9	36,5
N1,3	581,3	390,2	191,1	32,9
N1,5	781,2	444,1	337,1	43,2
N1,7	619,3	338,7	280,6	45,3
N1,9	731,4	398,0	333,4	45,6
N2,1	484,1	325,1	159,0	32,8
N2,3	331,2	287,0	44,2	13,3
N2,5	656,0	420,1	235,9	36,0
N2,7	358,2	276,7	81,5	22,8
N2,9	632,0	424,8	207,2	32,8
N3,1	361,6	279,1	82,5	22,8
N3,3	454,4	345,1	109,3	24,1
N3,5	386,9	289,6	97,3	25,1
N3,7	326,8	253,9	72,9	22,3
N3,9	426,6	329,4	97,2	22,8

Bilaga 2. Askhalt

Tabell. 1. Askhalten för samtliga mätpunkter i stacken och det nyinkomna materialet

Kod	Prov 1 Askhalt (%)	Prov 2 Askhalt (%)	Prov 3 Askhalt (%)	Medelaskhalt (%)
NY,1	1,11	1,03	1,09	1,08
NY,3	1,53	1,92	1,86	1,77
NY,5	1,39	1,29	1,52	1,40
N1,1	1,36	1,15	1,31	1,27
N1,3	2,10	2,09	1,92	2,04
N1,5	3,15	3,20	2,74	3,03
N1,7	1,02	1,00	1,16	1,06
N1,9	1,70	0,82	1,23	1,25
N2,1	1,43	2,13	1,78	1,78
N2,3	1,79	1,23	1,56	1,52
N2,5	4,50	3,80	3,85	4,05
N2,7	1,99	1,69	1,61	1,76
N2,9	1,33	1,51	2,16	1,67
N3,1	1,91	1,44	1,58	1,64
N3,3	1,25	1,27	1,69	1,40
N3,5	3,17	2,65	2,74	2,85
N3,7	1,11	1,49	1,25	1,28
N3,9	1,61	2,73	1,91	2,08

Bilaga 3. Energiinnehåll

Tabell. 1. Det kalorimetriska värmeverdet ($q_{V,gr,d}$) för samtliga utförda analyser och dess medelvärmeverde, samt det effektiva värmeverdet för torrt absolut material ($q_{V,net,d}$) och fuktigt material ($q_{V,net,m}$).

Prov	Analys 1	Analys 2	Analys 3	Medelvärde	$q_{V,net,d}$ (MJ/kg)	$q_{V,net,m}$ (MJ/kg)	$q_{V,net,m}$ (MJ/m ³ f)
	$q_{V,gr,d}$ (MJ/kg)	$q_{V,gr,d}$ (MJ/kg)	$q_{V,gr,d}$ (MJ/kg)	$q_{V,gr,d}$ (MJ/kg)			
NY,1	19,6	19,6	19,1	19,4	18,2	8,3	3454,0
NY,3	20,0	20,2	19,9	20,0	18,7	10,2	-
NY,5	19,0	18,9	18,8	18,9	17,7	7,0	3043,0
N1,1	19,9	19,9	20,0	19,9	18,7	11,0	5472,0
N1,3	20,1	20,1	19,9	20,0	18,8	11,8	4530,1
N1,5	20,0	20,0	19,8	19,9	18,7	9,6	4482,3
N1,7	20,0	20,0	19,9	20,0	18,7	9,2	4169,0
N1,9	19,1	19,8	19,5	19,5	18,2	8,9	3541,8
N2,1	20,3	20,4	20,4	20,3	19,1	12,1	5528,0
N2,3	20,0	20,0	19,7	19,9	18,6	15,8	8172,7
N2,5	20,5	20,4	20,3	20,4	19,1	11,4	4727,5
N2,7	19,3	19,3	19,3	19,3	18,0	13,4	5297,3
N2,9	19,9	20,0	19,7	19,9	18,6	11,8	5606,6
N3,1	19,9	19,8	19,9	19,9	18,6	13,9	7326,1
N3,3	20,1	19,5	21,1	20,2	19,0	13,9	5854,6
N3,5	19,3	19,3	19,2	19,2	18,0	12,9	-
N3,7	19,7	19,6	19,7	19,7	18,4	13,8	4852,9
N3,9	20,2	20,2	20,2	20,2	18,9	14,1	6626,0

Tabell. 2. Det kalorimetriska värmevärdet (W_k) för samtliga utförda analyser och dess medelvärmvärde, samt det effektiva värmevärdet för torrt absolut material (W_a) och fuktigt material (W_{eff}).

Prov	Medelvärde			
	W_k (MJ/kgTS)	W_a (MJ/kgTS)	W_{eff} (MJ/kgTS)	W_{eff}^3 (MJ/m ³ TS)
NY,1	19,4	18,1	15,8	6576
NY,3	20,0	18,7	17,0	-
NY,5	18,9	17,6	14,8	6427
N1,1	19,9	18,6	17,2	8542
N1,3	20,0	18,7	17,5	6696
N1,5	19,9	18,6	16,8	7802
N1,7	20,0	18,7	16,6	7538
N1,9	19,5	18,1	16,1	6433
N2,1	20,3	19,0	17,8	8169
N2,3	19,9	18,6	18,2	9386
N2,5	20,4	19,1	17,7	7321
N2,7	19,3	18,0	17,3	6815
N2,9	19,9	18,5	17,3	8276
N3,1	19,9	18,6	17,8	9434
N3,3	20,2	18,9	18,1	7661
N3,5	19,2	17,9	17,1	0
N3,7	19,7	18,3	17,6	6208
N3,9	20,2	18,9	18,1	8530

Bilaga 4. Torr-rådensitet

Tabell. 1. Torr-rådensiteten för samtliga prov uttryckt i kg/m^3 . Analysen av prov nummer NY, 4 ströks då analysen misslyckades, även analysen av prov nummer N3,6 ströks ur beräkningar beroende på det extremt låga värdet.

Kod	Torr-rådensitet (kg/m^3)
NY,2	415,4
NY,4	-
NY,6	434,7
N1,2	496,6
N1,4	382,4
N1,6	465,7
N1,8	453,0
N1,10	400,1
N2,2	458,3
N2,4	516,3
N2,6	413,6
N2,8	394,9
N2,10	477,1
N3,2	528,9
N3,4	422,5
N3,6	(292,3)
N3,8	352,1
N3,10	470,2

Bilaga 5 Svampsporer

Tabell. 1. Antalet mikrosporer för samtliga mätpunkter i stacken och det nyinkomna materialet uttryckt i st/kgTS.

Kod	Volym Bürker-cell (l)	Medelvärde av antal sporer per cell (st)	Koncent- ration (st/l)	Antal sporer (st/prov)	Torr-vikt (kg)	Antal sporer (st/kgTS)
NY,2	4E-09	3,0	7,5E+08	3,8E+08	0,008	4,5E+10
NY,4	4E-09	3,3	8,33E+08	4,2E+08	0,007	6,3E+10
NY,6	4E-09	3,0	7,5E+08	3,8E+08	0,009	4,2E+10
N1,2	2,5E-10	2,5	1E+10	5E+09	0,015	3,4E+11
N1,4	4E-09	4,0	1E+09	5E+08	0,008	6,0E+10
N1,6	1E-09	3,2	3,17E+09	1,6E+09	0,012	1,3E+11
N1,8	1E-09	1,8	1,83E+09	9,2E+08	0,006	1,5E+11
N1,10	1E-09	2,0	2E+09	1E+09	0,010	9,6E+10
N2,2	4E-09	8,0	2E+09	1E+09	0,009	1,1E+11
N2,4	2,5E-10	1,3	5,33E+09	2,7E+09	0,015	1,8E+11
N2,6	1E-09	3,2	3,17E+09	1,6E+09	0,014	1,1E+11
N2,8	1E-09	2,8	2,83E+09	1,4E+09	0,009	1,6E+11
N2,10	1E-09	1,3	1,33E+09	6,7E+08	0,007	9,3E+10
N3,2	2,5E-10	1,5	6E+09	3E+09	0,010	2,9E+11
N3,4	1E-09	6,3	6,33E+09	3,2E+09	0,014	2,3E+11
N3,6	1E-09	2,8	2,83E+09	1,4E+09	0,011	1,3E+11
N3,8	4E-09	5,3	1,33E+09	6,7E+08	0,013	5,0E+10
N3,10	1E-09	1,8	1,83E+09	9,2E+08	0,012	7,6E+10

Bilaga 6. Fraktionsfördelning

Tabell. 1. Fraktionsfördelningen för samtliga prov uttryckt som g TS och % av TS.

	NY,1		NY,3		NY,5	
	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]
Ved, kvist och bark > 3 mm	161,1	81,9	134,6	76,6	140,2	80,2
Finfraktion < 3 mm	34,8	17,7	36,7	20,9	34,2	19,6
Barr	0,7	0,4	4,4	2,5	0,4	0,2
Total	196,6		175,7		174,8	

	N1,1		N1,3		N1,5		N1,7		N1,9		Medel
	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [%]
Ved, kvist och bark > 3 mm	169,0	90,6	173,5	84,6	190,4	91,2	141,6	92,5	151,0	82,2	88,2
Finfraktion < 3 mm	14,7	7,9	29,6	14,4	16,4	7,9	11,3	7,4	28,3	15,4	10,6
Barr	2,9	1,6	2,0	1,0	2,0	1,0	0,2	0,1	4,3	2,3	1,2
Total	186,6		205,1		208,8		153,1		183,6		

	N2,1		N2,3		N2,5		N2,7		N2,9		Medel
	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [%]
Ved, kvist och bark > 3 mm	139,1	83,9	159,0	96,0	170,6	79,3	103,3	89,8	177,9	89,4	87,7
Finfraktion < 3 mm	23,4	14,1	6,4	3,9	44,4	20,6	11,6	10,1	18,5	9,3	11,6
Barr	3,3	2,0	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	2,7	1,4	0,7
Total	165,8		165,7		215,2		115,0		199,1		

	N3,1		N3,3		N3,5		N3,7		N3,9		Medel
	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [g]	TS [%]	TS [%]
Ved, kvist och bark > 3 mm	136,9	92,5	154,3	96,7	134,9	88,4	116,3	91,5	144,2	87,7	91,4
Finfraktion < 3 mm	10,3	7,0	5,1	3,2	17,3	11,3	10,4	8,2	16,5	10,0	7,9
Barr	0,8	0,5	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4	0,3	3,7	2,3	0,7
Total	148,0		159,5		152,6		127,1		164,4		

Bilaga 7. Energiinnehåll i bränslet beräknat med beräkningsmall i leveransavtal med VEAB.

Betalningen för bränsle levererat till VEAB beräknas utifrån bränslets effektiva värmevärde, angett i enheten MWh/ton. Beräkningen utgår ifrån bränslets totalvikt, inklusive bränslefukt. Den beräkningsmall som ligger till grund för det effektiva värmevärdet för det fuktiga bränslet ser ut som följer:

$$W_{eff} = \left(W_a \times B \times \left(1 - \frac{F}{100} \right) - 2,5 \times \frac{F}{100} \right) \times \frac{1}{3,6}$$

W_{eff} = Bränslets effektiva värmevärde uttryckt i MWh/ton inklusive vatten

W_a = Det torra och askfria bränslets effektiva värmevärde uttryckt i MJ/kg TS. Beräknas enligt följande formel:

$$W_a = \left(W_k \times B - 2,5 \times \frac{8,94}{100} \times 5,8 \right) \times \frac{1}{B}$$

W_k = Bränslets kalorimetriska värmevärde, som torr och askfri substans. I vanliga fall utgår VEAB ifrån 19,2 MJ/kg.

B = Bränslets brännbara del. Beräknas enligt följande formel:

$$B = \frac{(100 - askhalten)}{100}$$

där askhalten sätts till 1 % för ren stamvedsflis och 1,85 % för skogsrester

F = Bränslets fukthalt uttryckt i %.

2,5 = Vattnets ångbildningsvärme uttryckt i MJ/kg

8,94 = Antalet bildade delar vatten från en del väte i bränslet

5,8 = Genomsnittlig vätehalt i trädbränsle

Det effektiva värmevärdet för bränslet beräknades enligt beräkningsmallen ovan med indata på kalorimetriskt värmevärde, fukthalt och askhalt enligt resultat från analyserna utförda inom detta arbete. Därefter beräknades det effektiva enligt formler definierade på sidan XX, samt att formlerna korrigeras för den uppmätta askhalten med följande formel:

$$W_b = W_a \times \left(1 - \frac{askhalten}{100} \right)$$

Denna formel tar hänsyn till bränslets totala askhalt beroende på att beräkningsmallen från VEAB utgår från bränslets totala askhalt. Även för denna beräkning användes data från analyserna utförda inom ramen för detta arbete. Resultaten av de båda beräkningarna kan ses i tabellen på nästkommande sida.

Tabell. 2. En jämförelse mellan effektivt värmevärde enligt beräkningsmall från VEAB och formler angivna i SIS-CEN TS 14918: 2005

Kod	Beräkningsmall [VEAB] Enl. analys		Beräkningsmall [VEAB] Enl. analys	
	W_a (MJ/kg)	$q_{V,net,d}$ (MJ/kg)	W_{eff} (MWh/ton)	$q_{V,net,m}$ (MWh/ton)
NY,1	18,12	18,17	2,25	2,31
NY,3	18,68	18,75	2,74	2,83
NY,5	17,60	17,66	1,88	1,94
N1,1	18,62	18,68	2,99	3,06
N1,3	18,71	18,78	3,19	3,29
N1,5	18,60	18,68	2,55	2,67
N1,7	18,68	18,74	2,49	2,56
N1,9	18,14	18,20	2,39	2,46
N2,1	19,02	19,09	3,26	3,35
N2,3	18,56	18,62	4,31	4,40
N2,5	19,05	19,14	3,00	3,17
N2,7	17,98	18,05	3,63	3,73
N2,9	18,55	18,61	3,18	3,26
N3,1	18,57	18,63	3,76	3,85
N3,3	18,92	18,97	3,77	3,85
N3,5	17,91	17,99	3,44	3,58
N3,7	18,35	18,40	3,75	3,83
N3,9	18,86	18,93	3,80	3,91

Som kan ses skiljer sig inte resultaten åt vid beräkning av det effektiva värmevärdet för torrt material mellan formlerna. Däremot är det en ganska stor skillnad mellan resultaten för det effektiva värmevärdet för fuktigt material. För det nyinkomna bränslet låg det effektiva värmevärdet, beräknat som medelvärde, på 2,29 MWh/ton beräknat enligt beräkningsmall respektive 2,36 MWh/ton beräknat enligt formler angivna i SIS-CEN TS 14918: 2005. För det lagrade bränslet var det effektiva värmevärdet för fuktigt bränsle 3,35 MWh/ton beräknat enligt beräkningsmall och 3,40 MWh/ton angivna i SIS-CEN TS 14918: 2005.

Tabell. 1. En jämförelse mellan effektivt värmevärde enligt beräkningsmall från VEAB och formler angivna i bl.a. Lethikangas (1999) och Thörnqvist (1983)

Kod	Beräkningsmall [VEAB]	Enl. analys	Beräkningsmall [VEAB]	Enl. analys	Enl. analys
	W_a (MJ/kg)	W_b (MJ/kgTS)	W_{eff} (MWh/ton)	W_{eff} (MWh/tonTS)	$W_{eff,Rå}$ (MWh/ton)
NY,1	18,12	17,91	2,25	4,34	2,25
NY,3	18,68	18,35	2,74	4,63	2,75
NY,5	17,60	17,34	1,88	4,04	1,88
N1,1	18,62	18,37	2,99	4,71	2,99
N1,3	18,71	18,33	3,19	4,76	3,19
N1,5	18,60	18,05	2,55	4,50	2,56
N1,7	18,68	18,47	2,49	4,57	2,50
N1,9	18,14	17,91	2,39	4,40	2,40
N2,1	19,02	18,68	3,26	4,86	3,26
N2,3	18,56	18,27	4,31	4,97	4,31
N2,5	19,05	18,30	3,00	4,70	3,01
N2,7	17,98	17,66	3,63	4,71	3,64
N2,9	18,55	18,23	3,18	4,73	3,18
N3,1	18,57	18,26	3,76	4,87	3,76
N3,3	18,92	18,64	3,77	4,96	3,77
N3,5	17,91	17,41	3,44	4,61	3,45
N3,7	18,35	18,10	3,75	4,83	3,75
N3,9	18,86	18,47	3,80	4,93	3,81

Som kan ses skiljer sig inte resultaten åt vid beräkning av det effektiva värmevärdet för torrt material mellan formlerna. Däremot är det en ganska stor skillnad mellan resultaten för det effektiva värmevärdet för fuktigt material. Detta beror på att formlerna enligt Lethikangas (1999) och Thörnqvist (1983) beräknar det effektiva värmevärdet för fuktigt bränsle (W_{eff}) per kg TS, vilket innebär absolut torrt material. Formlerna för det effektiva värmevärdet för fuktigt bränsle (W_{eff}) i beräkningsmallen däremot är angivna för bränslets totala vikt (fukten inräknad). Beroende på detta beräknades även det effektiva värmevärdet för fuktigt material ut i enheten MJ/kg Rå ($W_{eff,Rå}$). För det nyinkomna bränslet låg det effektiva värmevärdet, beräknat som medelvärde, på 2,29 MWh/ton beräknat enligt beräkningsmall respektive 4,34 MWh/ton TS och 2,29 MWh/ton beräknat enligt formler från Lethikangas (1999) och Thörnqvist (1983). För det lagrade bränslet var det effektiva värmevärdet för fuktigt bränsle 3,30 MWh/ton beräknat enligt beräkningsmall och 4,80 MWh/ton TS och 3,37 MWh/ton enligt formler från Lethikangas (1999) och Thörnqvist (1983).

De beräknade värdena i ovanstående tabell kan inte direkt jämföras med det beräknade medelvärdet för det effektiva värmevärdet hos bränslet som inkom till VEAB under perioden 2009-07-01 till och med 2009-08-14 (se Bilaga 8 .Tabell. XX). Detta medelvärde beräknades utifrån ett antaget kalorimetriskt värmevärde på 19,2 MJ/kg och en askhalt på antingen 1 eller 1,85 %, beroende på om bränslet bestod av ren stamvedsflis eller skogsrester. Under denna period beräknades medelvärdet för det effektiva värmevärdet till 3,44 MWh/ton.

Bilaga 8. Fukthalt, kalorimetriskt och effektivt värmevärde samt askhalt för bränsle inkommet till VEAB under perioden 2009-07-01 till och med 2009-08-14.

Tabell. 1. Medelvärden för fukthalt, effektivt värmevärde för fuktigt material, kalorimetriskt värmevärde och askhalt för bränsle inkommet till VEAB under perioden 2009-07-01 till och med 2009-08-14.

Datum	Fukthalt (%)	W_{eff} (MWh/ton)	W_{kal} (MJ/kg)	Askhalt (%)
2009-07-01	28,24	3,56	19,20	1,85
2009-07-02	28,09	3,58	19,20	1,71
2009-07-03	30,72	3,42	19,20	1,77
2009-07-06	25,50	3,73	19,20	1,85
2009-07-07	33,52	3,25	19,20	1,77
2009-07-08	32,27	3,32	19,20	1,85
2009-07-09	30,89	3,40	19,20	1,85
2009-07-10	32,17	3,34	19,20	1,68
2009-07-13	30,17	3,45	19,20	1,76
2009-07-14	29,93	3,47	19,20	1,68
2009-07-15	30,33	3,44	19,20	1,85
2009-07-16	29,37	3,50	19,20	1,68
2009-07-17	31,31	3,49	19,20	1,85
2009-07-20	29,57	3,49	19,20	1,71
2009-07-21	34,85	3,18	19,20	1,51
2009-07-22	39,70	2,89	19,20	1,57
2009-07-23	44,65	2,60	19,20	1,53
2009-07-24	33,06	3,28	19,20	1,85
2009-07-27	28,10	3,33	19,20	1,64
2009-07-28	29,61	3,49	19,20	1,66
2009-07-29	29,47	3,49	19,20	1,76
2009-07-30	29,81	3,48	19,20	1,64
2009-07-31	30,51	3,43	19,20	1,85
2009-08-03	25,44	3,74	19,20	1,57
2009-08-04	31,57	3,26	19,20	1,85
2009-08-05	26,19	3,69	19,20	1,85
2009-08-06	28,36	3,56	19,20	1,85
2009-08-07	24,99	3,77	19,20	1,43
2009-08-10	27,59	3,60	19,20	1,85
2009-08-11	27,37	3,62	19,20	1,85
2009-08-12	28,85	3,54	19,20	1,57
2009-08-13	26,96	3,64	19,20	1,85
2009-08-14	28,75	3,55	19,20	1,34

Lnu.se

Institutionen för teknik

351 95 Växjö
tel 0772-28 80 00, fax 0470-76 85 40