

Datum

2016-04-15

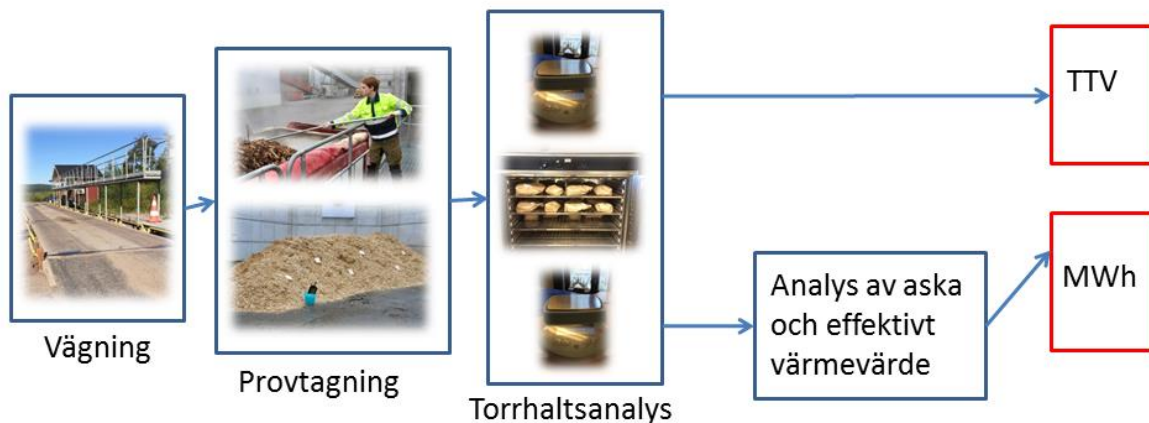
Författare

Björn Vikinge

Sven Gustafsson

Uppskattning av mätosäkerhet vid bestämning av energinnehåll i trädbränsle

En studie med anledning av Virkesmätningslagens krav på mätnoggrannhet



Innehåll

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | SAMMANFATTNING | 3 |
| 2 | INLEDNING | 4 |
| 3 | SYFTE OCH MÅL | 5 |
| 4 | MATERIAL OCH METOD | 5 |
| 4.1 | BESKRIVNING AV INMÄTNINGSPROCESSER..... | 5 |
| 4.2 | ENERGIBERÄKNINGSFORMEL | 6 |
| 4.3 | SDC:S DATAMATERIAL SAMT DATA FRÅN VÄRMEVERK..... | 7 |
| 5 | EFFEKTIVT VÄRMEVÄRDE I ABSOLUT TORRT MATERIAL | 8 |
| 5.1 | VÄTEHALTENS BETYDELSE | 8 |
| 5.2 | NATURLIG VARIATION HOS DET EFFEKTIVA VÄRMEVÄRDET..... | 9 |
| 5.3 | KÄNSLIGHET..... | 10 |
| 5.4 | VILKA H_{EFF} -VÄRDEN ANVÄNDS? | 11 |
| 6 | ASKHALT | 13 |
| 6.1 | NATURLIG ASKA OCH FÖRORENINGSASKA..... | 14 |
| 6.2 | VILKA ASKHALTER ANVÄNDS? | 14 |
| 7 | ÅNGBILDNINGSVÄRME | 15 |
| 8 | OSÄKERHETSBUDETAR FÖR OLIKA SORTIMENT | 17 |
| 8.1 | KÄLLOR TILL OSÄKERHET | 17 |
| 8.2 | OSÄKERHET FRÅN RÅVIKT TILL ENERGIINNEHÅLL | 18 |
| 9 | DISKUSSION | 22 |
| 9.1 | ENERGIBESTÄMNING I PRAKTIKEN OCH I LITTERATUREN..... | 22 |
| 9.2 | OSÄKERHETSBUDETAR | 23 |
| 9.3 | MÄTOSÄKERHETEN I RELATION TILL LAGENS KRAV | 23 |
| 9.4 | SYNTES OCH REKOMMENDATIONER..... | 24 |
| 10 | LITTERATURFÖRTECKNING | 26 |
| | BILAGA 1. SAMMANSTÄLLNING AV WA-VÄRDEN FRÅN OLIKA KÄLLOR | 27 |
| | BILAGA 2. SAMMANSTÄLLNING AV ASKHALTER FRÅN OLIKA KÄLLOR | 28 |
| | BILAGA 3 PROCEDURER FÖR BESTÄMNING AV PARAMETERVÄRDEN | 29 |
| | BILAGA 4. DATA FRÅN LABORATORIEANALYSER | 30 |
| | BILAGA 5 OSÄKERHETSBUDET | 31 |

1 Sammanfattning

Sedan 2015 inkluderas även trädbränslen i virkesmätninglagen, vilket innebär krav på kontroll och noggrannhet vid mätning av trädbränslen. Den nya lagen fastställer även att endast mätmetoder med dokumenterad noggrannhet får användas, samt att eventuella omvandlingstal inkluderas i mätmetoden. Vid betalningsgrundande trädbränslemätning mäts vanligen en leverans energiinnehåll eller torrsvikt. Vanligtvis så är dock lastens vikt och torrhalt de enda storheter som mäts för varje enskild leverans. För torrsvikt räcker dessa storheter, men för att beräkna energiinnehållet krävs även information om askhalt, effektivt värmevärde samt en ångbildningskonstant. Mätning av askhalt och effektivt värmevärde sker på vissa platser, men då vanligtvis på ett fåtal samlingsprover – vilket innebär att för det unika partiet mäts inte dessa storheter – de värden man använder för det unika partiet kan därför anses vara omvandlingstal. Omvandlingstalen omfattas av virkesmätninglagen, och den osäkerhet som de bidrar till för det enskilda partiet skall därför kunna redovisas. Denna rapport syftar till att tydliggöra osäkerheten med att använda dessa omvandlingstal.

Resultaten visar att användning av standardvärden/schablonvärde för askhalt och effektivt värmevärde innebär en ökad osäkerhet för mätningen. Totalt för hela mätningen är dock torrhaltsbestämningen den största osäkerhetsfaktorn. Den totala osäkerheten för mätmetoden, vid mätning av en leverans sönderdelade trädbränslen, håller sig inom lagens krav förutsatt att en rimlig mängd torrhaltsprover tas från leveransen.

För att öka kvalitén i mätningen bör schablonvärden för askhalt och effektivt värmevärde bättre anpassas för olika sortiment, då det finns en variation mellan sortimenten. I rapporten ges förslag på värden för några sortiment.

2 Inledning

Den, sedan 2015, nya virkesmätninglagen (VML) omfattar förutom timmer och massaved även trädbränslen (SKSFS, 2014). Lagen syftar till att ge köparen och säljaren av råvaran likvärdiga möjligheter att bedöma om ersättningen för det virke som säljs är rimlig. Tillsynsmyndigheten, samt de som utfärdar föreskrifter kopplat till VML, är Skogsstyrelsen. I föreskrifterna till virkesmätninglagen finns bl.a. partivisa noggrannhetskrav som är kopplade till den måttenhet och mätmetod som används, samt krav på obetydliga systematiska fel. Det finns även krav på kontrollverksamhet avseende den betalningsgrundande mätningen. Det mätande företaget som ansvarar för den ersättningsgrundande mätningen ska kunna redovisa kontrollresultat avseende systematisk och partivis noggrannhet för sin mätning. De måttenheter som vanligtvis används vid mätning av trädbränslen är torrvikten i ton (kallad ton torrsvikt eller TTV) eller energiinnehållet (i megawattimmar, MWh). De partivisa noggrannhetskraven för dessa måttenheter kan ses i tabell 1.

Tabell 1. Lagstiftningens partivisa noggrannhetskrav vid mätning av torrsvikt och energiinnehåll. För ett virkesparti som väger mer än 10 ton får virkespartiets bestämda totala torrsvikt, eller energiinnehåll, avvika med högst det procenttal som anges i tabellen. Baserad på (SKSFS, 2014).

| Virkespartis torrsvikt i ton | Högsta tillåtna partivisa avvikelser | |
|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| | Torrsvikt (TTV) | Energiinnehåll (MWh) |
| < 25 | 18 % | 20 % |
| 25-50 | 13,5 % | 15,5 % |
| > 50 | 9 % | 11 % |

Noggrannhetskraven ovan är specificerade för enskilda virkespartier. Skogsstyrelsen fastställer även i de nya föreskrifterna definitionen av ett virkesparti; ”Avgränsad virkeskvantitet för vilken virkessäljaren och virkesköparen avtalat om och som mäts med samma mätmetod. Kraven på virkets egenskaper är lika för hela virkeskvantiteten. Leveransen av virket äger vanligen rum vid ett tillfälle eller under en begränsad tid.”

Lagkraven som beskrivs ovan måste beaktas vid mätning av trädbränsle som omfattas av VML (det som handlas i första affärsled). Detta innebär att de mätande företagen måste veta vilken noggrannhet deras ordinarie mätning av dessa måttenheter ger. Utgångspunkten för att mäta den totala torrvikten, eller energiinnehållet, i en leverans är vanligtvis en råsvikt (lastsvikt) som fås genom vägning av leveransen på en fordonsvåg. Eftersom fordonsvågar generellt sett kan anses ha hög noggrannhet blir vågarnas bidrag till mätosäkerheten lågt. För att kunna mäta torrvikten eller energiinnehållet krävs dock att fler storheter bestäms. För torrvikten krävs torrhalten och för energiinnehållet krävs torrhalten, askhalten och det effektiva värmevärdet. Med nuvarande teknik kan inte dessa storheter mätas för hela leveransen, utan bestämning av dessa storheter sker på stickprov som uttas från leveransen. Att ta tillräckligt antal representativa prov blir därför av största vikt. Provtagningen anses generellt vara det mest kritiska momentet för den totala osäkerheten. En tumregel som ofta används när det gäller provtagning av bulkmaterial (som sönderdelade trädbränslen) är att ca 80 % av felet ligger i provtagningen, ca 15 % vid provberedning och ca 5 % i själva analysen (Strömberg & Svärd, 2012). Det finns dock studier som visar att provtagningens andel kan vara större än så; uppemot 95-98 % av den totala osäkerheten, åtminstone för extremt heterogena material som sopor (Avfall Sverige, 2008).

I praktiken sker vanligtvis provtagning ur varje leverans för att bestämma torrhalten. Noggrannheten för torrhaltsbestämningen avgörs genom att ta nya, av den ordinarie mätningen oberoende, torrhaltsprov. Sådan kontrollverksamhet är under införande på ett flertal platser. För att sedan ta steget till måttenheten MWh används ofta fasta omvandlingstal/schablonvärden på övriga ingående parametrar. Det sker alltså normalt ingen provtagning från varje leverans eller parti med syfte att bestämma askhalt och effektivt värmevärde. Detta eftersom det krävs avancerad laboratorieutrustning för att fastställa dessa värden. Vanligtvis använder man sig istället av en lågfrekvent provtagning av dessa storheter. Eftersom VML kräver att varje parti skall uppfylla noggrannhetskraven i tabell 1, innebär det att en lågfrekvent provtagning inte ger någon bra bild över mätnoggrannheten för det enskilda partiet.

Frågan som uppstår är därför vilken spridning som man kan förvänta sig inom dessa omvandlingstal/schablonvärden och hur den osäkerheten förhåller sig till osäkerheten i torrhaltsbestämningen och noggrannhetskraven i VML. På grund av att analys av aska och effektivt värmevärde kräver komplicerad laboratorieutrustning är det dessutom svårt att bedriva kontrollverksamhet rörande dessa variabler. Därför har SDC, på branschens uppdrag, initierat föreliggande sammanställning och analys av osäkerhet vid omvandling från TTV till MWh. Utredningen ska visa på vilka variationer i askhalt, ångbildningsvärme och det effektiva värmevärdet trädbränslen kan ha och vilken påverkan på mätnoggrannheten det innebär.

3 Syfte och mål

Syftet med rapporten är att belysa och kvantifiera de osäkerheter i bestämning av energiinnehåll som orsakas av parametrarna:

- effektivt värmevärde i absolut torrt trädbränsle, med beaktande av vätehaltens betydelse
- askhalt
- ångbildningsvärme.

Dessa osäkerhetsfaktorer ska ställas i relation till de parametrar som regelmässigt mäts vid virkesmätning som råvikt och torrhalt. Rapporten fokuserar på partivisa osäkerheter.

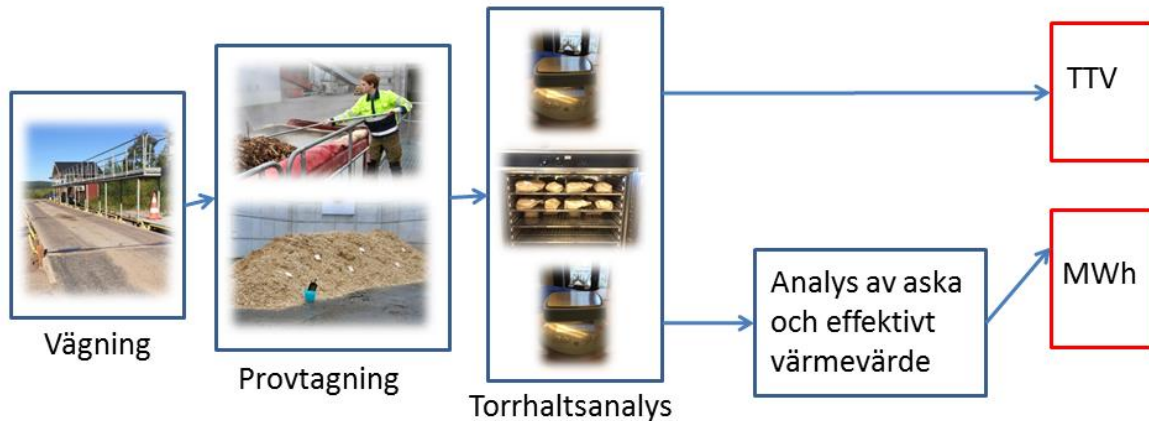
4 Material och metod

4.1 Beskrivning av inmätningprocesser

Denna rapport behandlar, och uppskattar, de osäkerheter som finns vid mätning av trädbränslen. Underlaget i rapporten bygger till stor del på litteraturstudier, samt tidigare rapporter och insamlad data av SDC:s avdelning för virkesmätning utveckling (VMU). Den bygger även på bearbetning av datamaterial från SDC:s system samt analysrapporter från två olika värmeverk.

En viktig del i att förstå, och kunna uppskatta, de osäkerheter som finns är att beskriva hela förloppet som krävs för att mäta en enskild leverans. Mätningförloppet består av tre huvudsteg (figur 1). Det första steget är vägning av leveransens vikt. Nästa steg är uttag av prov, och det tredje steget är analys av proven. När dessa tre steg är utförda kan man beräkna leveransen energiinnehåll, eller torrsvikt. För torrsvikten krävs info från vägningen av leveransen, samt leveransens torrhalt (provtagning + analys). Vill man istället beräkna energiinnehållet i leveransen krävs det förutom

uppgifter om vikten och torrhalten även info om leveransens effektiva värmevärde, askhalt samt en ångbildningskonstant. Dessa storheter, förutom ångbildningskonstanten, går att få fram genom uttag av prov, samt analys i laboratorium på olika sätt. Detta är dock en mer komplicerad process, och mer komplex utrustning krävs. Därför väljer de flesta som handlar med trädbränsle att i förhand göra upp om en askhalt och ett effektivt värmevärde som man använder för alla leveranser i partiet, alternativt tar man och samlar ihop stora samlingsprover från en mängd leveranser för att sedan analysera dess medelvärde (se bilaga 3). Beroende på vilken måttenhet man vill bestämma ingår det med andra ord olika osäkerhetsfaktorer att ta hänsyn till (se sammanställning nedan).



Figur 1. Bild över mätningstegen för att nå fram till måttenheterna torrsvikt (TTV) och energiinnehåll (MWh).

Osäkerhetsfaktorer för TTV

- Fordonsvågen
- Torrhaltsbestämning (omräkning från råsvikt till torrsvikt). Denna kan delas upp i provtagning och torrhaltsanalys.

Tillkommande osäkerhetsfaktorer för MWh

- Materialets värmevärde
- Askhalt
- Ångbildningskonstanten

4.2 Energiberäkningsformel

Analyserna i föreliggande studie baseras på SDC:s energiberäkningsformel, även kallad EB-nyckeln. EB-nyckeln introducerades i VIOL under 2013 och ersatte då 13 olika formler som tidigare fanns för att beräkna energiinnehåll (SDC, 2013). Anledningarna var att synliggöra hur energiberäkningen går till, öka transparensen i affärerna och harmonisera arbetssättet.

Ekvation 1. Beräkning av en leverans energiinnehåll

$$E = V_{rå} * \left((h_{eff}) * \left(1 - \frac{A}{100} \right) - H_2 \right) * \frac{TH}{100} - \Delta H_{vap} * \left(1 - \frac{TH}{100} \right)$$

Ingående parametrar:

E = Energiinnehållet (MWh)

$V_{rå}$ = Vedsvikt, lastens råsvikt (ton)

h_{eff} = effektivt värmevärde i askfri torrsubstans (MWh/ton)

- A = askhalt i viktprocent av torrsubstans (%)
 H_2 = energi i bundet väte (MWh/ton) – används endast för torvleveranser
 TH = torrhalt (andel torrsubstans) i viktprocent (%)
 ΔH_{vap} = ångbildningsvärme (MWh/ton vatten)

4.3 SDC:s datamaterial samt data från värmeverk

För att belysa vilka värden som används mest frekvent i energiberäkningsformeln har data från SDC använts. Datamaterialet omfattade drygt 500,000 inmätta leveranser under kalenderåret 2014.

Varje leverans motsvarar vanligtvis ett lastbilsladd med trädbränsle. Ett parti omfattar något eller några billast. Varje parti regleras av avtal mellan köpare och säljare. För varje avtal anger användarna värden för värmevärde, askhalt och ångbildningsvärme. Avtalen kan se olika ut, men de flesta följer i stort sett ”Avtalsmall för träd- och torvbränslen” (Svensk fjärrvärme, 2005) som gemensamt tagits fram av branschorganisationerna Svensk Fjärrvärme, Svenska Torvproducentföreningen och Svenska Trädbränsleföreningen. I föreliggande rapport hänvisas i några avsnitt till avtalsmallen, som för övrigt innehåller samma energiberäkningsformel som i SDC:s EB-nyckel.

SDC:s VIOL-system inkluderar ett stort antal sortimentskoder som leveranser kan delas upp på. I denna rapport lyfts fyra av dessa sortiment fram; stamvedsflis (63), grothflis (64), sågspån (80) samt bark (85). Dessa huvudsortiment kan också preciseras ytterligare i undergrupper, dels utifrån trädslag och dels utifrån s.k. egenskapskoder, där olika hantering av material kan registreras (SDC, 2015). Exempel på detta ses i tabell 2. Denna indelning används dock inte nuläget i särskilt stor omfattning för sönderdelade trädbränslena, men skulle kunna vara intressant i framtiden.

Tabell 2. Undergrupper till sortimentet grothflis. Genom att byta ut T:et och E:et i huvudkoden kan man tillägna olika leveranser olika egenskaper. För trädslagkoder finns ytterligare koder för mer sällsynta trädslag.

| Huvudkod för grothflis | Trädslagkoder (T) | Egenskapskoder (E) |
|------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| 64TE | 0=Barrträd | |
| | 1=Tall | 1=grönt, flisat |
| | 2=Gran | 2=grönt, krossat |
| | 3=Lövträd | 3= flisat (tidigare hantering okänd) |
| | 4=Björk | 4=krossat (tidigare hantering okänd) |
| | 5=Asp | 5= avbarrat, flisat |
| | 6=Bok | 6=avbarrat, krossat |
| | 7=Al | 7=täckt välta, flisat |
| | 8=Ek | 8=täck välta, krossat |
| | 9= Barr- och lövträd | |

Förutom dessa data har även Ena Energi i Enköping och E.ON. i Örebro tillhandahållit laboratorieanalyser från insamlade prover, som använts i kapitel 8 och kan ses i bilaga 5.

5 Effektivt värmevärde i absolut torrt material

Det finns flera olika sätt att uttrycka ett materials värmevärde, varför det alltid är viktigt att notera vilken typ av värmevärde som det refereras till i exempelvis laboratorieanalyser. I SDC:s energiberäkningsformel (och i avtalsmallen) anges det effektiva värmevärdet för ask- och fuktfri substans (h_{eff}) medan det i forskningslitteraturen i huvudsak refereras till W_a -värden, som är det effektiva värmevärdet för fuktfri substans inkl. naturlig aska. Även kalorimetriskt värmevärde används inom forskningslitteratur, vilket definieras som den värmemängd som avges vid fullständig förbränning av torrt material under konstant tryck, inklusive den värme som krävs för att bilda vatten av vätet i träet.

För att fastställa h_{eff} för ett trädbränslesortiment krävs mätning och omvandling via flera räkneoperationer. Gängse sätt att mäta h_{eff} i trädbränsle är att först mäta det kalorimetriska värmevärdet (W_{kal}) i en bombkalorimeter (Lehtikangas, 1999). W_{kal} anges i MWh/ton torrsbstans (TS) inklusive naturlig aska. Därefter görs avdrag för den energi som krävs för att förångas det vatten som bildas av syre och väte i materialet (ekvation 2). Genom denna beräkning erhåller man det effektiva värmevärdet för fuktfri substans inkl. naturlig aska (W_a) (baserat på Lehtikangas (1999)). Nästa steg i räkneprocessen för att kunna jämföra W_a med h_{eff} är att kompensera för materialets naturliga aska enligt följande samband (ekvation 3).

Ekvation 2. Omvandling av W_{kal} till W_a

Enhet: MWh/ton TS

$$W_a = W_{\text{kal}} - \left(0,678 * 9 * \frac{H_2}{100}\right)$$

Där 0,678 = vattnets ångbildningsvärme vid 25 °C (MWh/ton)

9 = antalet delar vatten bildade av en del väte (≈ 9)

H_2 = bränslets vätehalt i viktsprocent av torrsbstansen (%)

Ekvation 3. Omvandling av W_a till h_{eff}

$$h_{\text{eff}} = \frac{W_a}{(100 \% - \text{naturlig askhalt } \%)}$$

I normalfallet används schablonvärden/medelvärden för det effektiva värmevärdet i askfri TS (h_{eff}), men emellanåt görs provserietagningar där man mäter energivärdet på laborativ väg för att på så sätt kalibrera gängse schablonvärden för kommande inmättningsperiod. Även i avtalsmallen för trädbränsle (Svensk fjärrvärme, 2005) använder man sig av det effektiva värmevärdet i torr och askfri substans. Där hänvisas även till ett erfarenhetsmässigt medelvärde för $h_{\text{eff}} = 5,33$ MWh/ton askfri TS, även om det påpekas att variation kring detta värde ofta förekommer.

5.1 Vätehaltens betydelse

Trädbränslets vätehalt har betydelse för det effektiva värmevärdet då vätet i träet, tillsammans med syre, bildar vatten som måste förångas vid förbränning. En högre vätehalt innebär alltså att mer vatten bildas vid förbränning. För de flesta trädbränslesortiment är vätehalten ca 6 % och därmed kan uttrycket inom parentes i ekvation 2 approximeras till 0,37 MWh/ton TS. Lövedsbark har dock högre vätehalt (Lehtikangas, 1999) där björk har högst vätehalt med upp till 9 %, vilket innebär att det krävs mer energi för att förångas det vatten som bildas av syre och vätet i materialet. Detta skall

beaktas när det effektiva värmevärdet (h_{eff}) beräknas utifrån ekvation två och tre eftersom man annars riskerar att överskatta h_{eff} värdet för lövvedsbark (tabell 3). Är detta beaktat skall inte vätehalten inkluderas vid beräkning av energiinnehåll, enligt ekvation ett. För björkbarken kompenserar dock den höga suberinhalten (ett vaxämne i nävern) och ger ett högt effektivt värmevärde för just björkbark (Ringman, 1996).

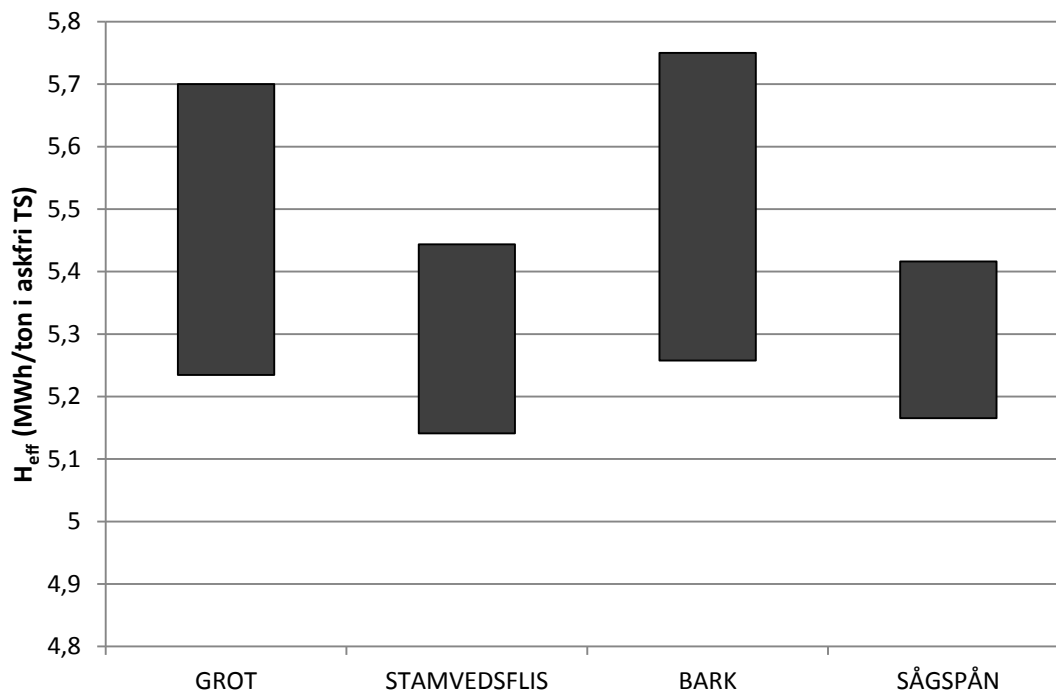
Tabell 3. Exempel på konsekvens av att använda fel vätehalt (TS=torrsubstans).

| Material | Askhalt (% av TS) | Vätehalt (% av TS) | W_{kal} (kalorimeriskt värmevärde, MWh/ton) | W_a (effektivt värmevärde i TS, MWh/ton) | H_{eff} (effektivt värmevärde i askfri TS, MWh/ton) |
|--------------|-------------------------|--------------------------|---|---|--|
| Lövträdsbark | 3 % | 6 % | 5,60 | 5,24 | 5,40 |
| Lövträdsbark | 3 % | 9 % | 5,60 | 5,05 | 5,21 |

Om fel vätehalt används efter bombkalorimeteranalys vid omvandlingen från W_{kal} till W_a leder det till systematiska fel i bestämningen av det effektiva värmevärdet med, som maximalt, 3,5 – 4 % (beroende på storleken på det kalorimetriska värmevärdet, samt vilken vätehalt som egentligen borde användas). Sambandet mellan högre vätehalt och lövvedsbark kan vara viktigt att beakta för leveranser som innehåller varierande mängder med lövvedsbark. I föreliggande arbete antas att vätehalten är 6 % i de fall kalorimetriska värmevärden konverterats till motsvarande värden för W_a eller h_{eff} . Vätehalten beaktas därför inte vidare i den här studien.

5.2 Naturlig variation hos det effektiva värmevärdet

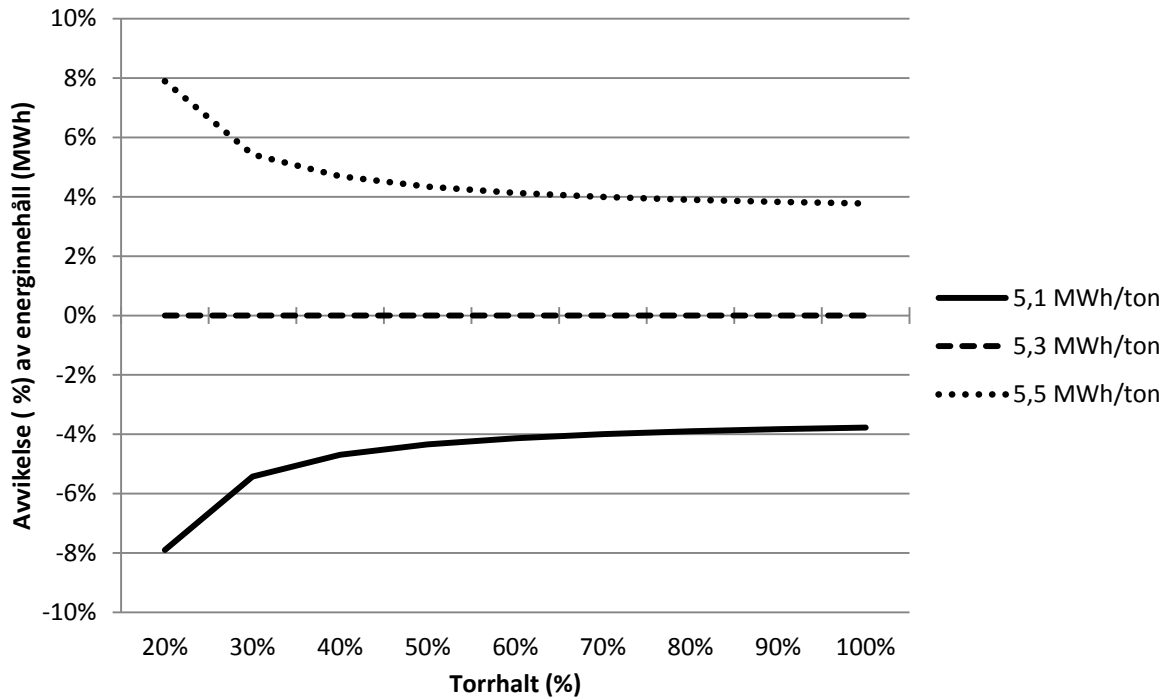
I detta arbete har en mängd W_a – värden från olika rapporter sammanställts i bilaga ett för att ge en bild över den variation som finns. Dessa redovisade värden är dock oftast W_a – värden, vilka inte direkt kan jämföras med de h_{eff} – värden som används i EB-nyckeln (W_a är inklusive naturlig aska). För att lättare kunna relatera till värden som angetts i litteraturen har därför dessa värden omvandlats till h_{eff} – värden. Detta kräver egentligen info om den naturliga askhalten i det aktuella materialet (ekvation 3) vilket saknas. Därför har genomsnittliga värden för askhalter använts för att kunna omvandla dessa värden. Till detta har även adderats material från laboratorieanalyser från två värmeverk. De sammantagna resultaten visar en uppskattning av den naturliga spridningen i effektivt värmevärde i askfri TS (h_{eff}) som verkar finnas i de utvalda sortimenten (figur 2). Att det finns en spridning beror på att den kemiska sammansättningen mellan, och inom, träd varierar. De delar som innehåller mycket extraktivämnen och lignin har de högsta värmevärdena (Lehtikangas, 1999).



Figur 2. Förväntad naturlig partivis variation av det effektiva värmevärdet i askfri TS (heff) för några utvalda sortiment. Baserat på (Nylinder & Törnmarck, 1986)(Olofsson, 1975 genom Ringman, 1996) (Gärdenäs, 1989) (Jirjis & Lehtikangas, 1993) (Strömberg & Svärd, 2012) (Törnqvist, 1984) (Törnqvist, 1986) (Törnqvist & Jirjis, 1990) samt laboratorieanalyser (bilaga 4) har grafen skapats för att illustrera vilken variation av det effektiva värmevärdet som kan förekomma mellan partier inom ett sortiment. Observera att detta är max/min-värden för dessa sortiment, samt att alla sortiment förutsätts komma från barrträd.

5.3 Känslighet

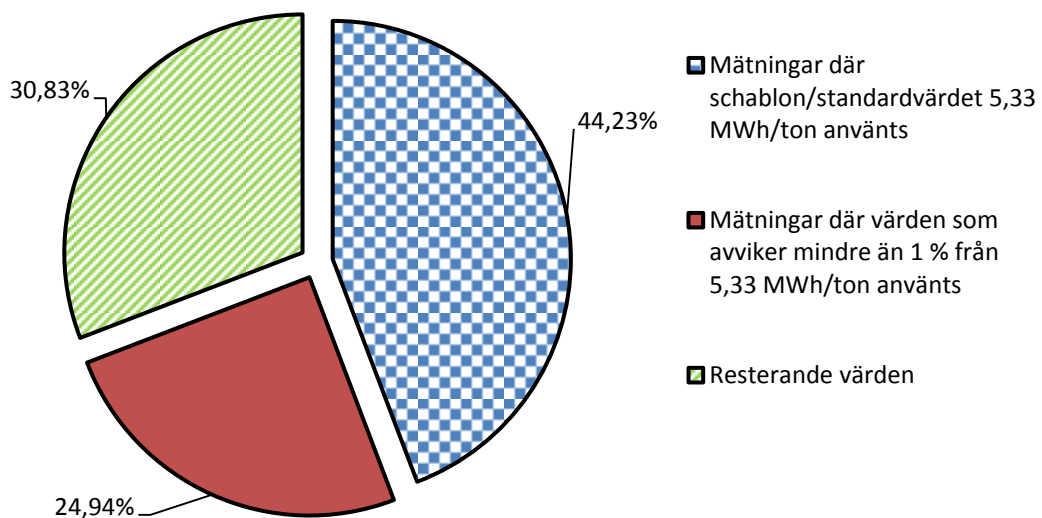
Mot bakgrund av att det föreligger spridning i h_{eff} värden, finns det ett värde i att kvantifiera konsekvenserna av att använda felaktiga h_{eff} -värden i EB-nyckeln. I figuren nedan illustreras hur energiinnehållet i ett ton trädbränsle påverkas av olika h_{eff} - värden vid olika torrhalter.



Figur 3. Hur det totala energiinnehållet (MWh) i träbränsle påverkas av olika effektiva värmevärden och torrhalter. Det aktuella materialet antas ha en askhalt på 2 % och en ångbildningskonstant på 0,678 MWh/ton.

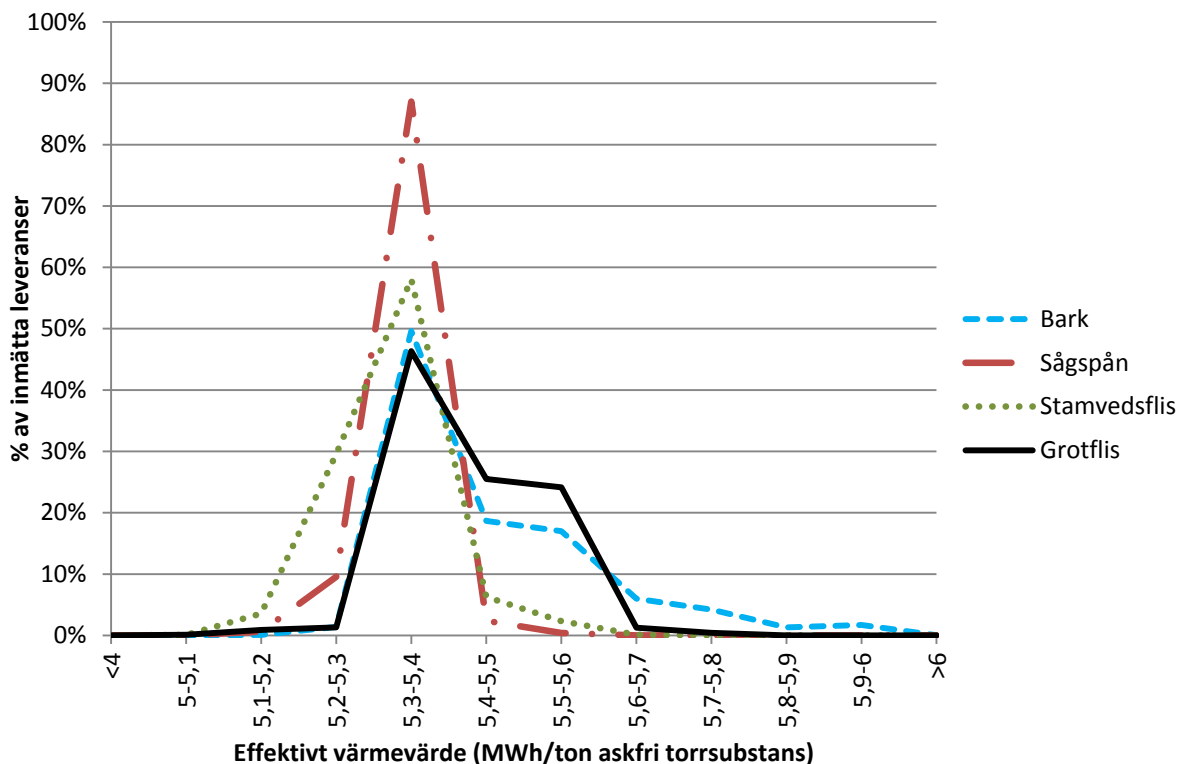
5.4 Vilka h_{eff} -värden används?

För att kunna jämföra de effektiva värmevärden (h_{eff}) som används av aktörer på marknaden, med de värden som man utifrån studerad litteratur kan konstatera vara rimliga gjordes en frekvensanalys av SDC:s data över inmätta leveranser. Det visade sig att värdet 5,33 MWh/ton askfri TS användes för cirka 44 % av samtliga inmätta leveranser. Hos ytterligare ca 25 % av leveranserna användes närliggande h_{eff} -värden. För övriga 31 % av leveranserna användes mer avvikande värden. Se figur nedan.



Figur 4 Frekvensanalys av använda h_{eff} -värden i datamaterialet från SDC. Alla sortiment sammanslagna.

Datamaterialet omfattar en mängd sortiment varav flera representerar små volymer. För att tydligare visa på spridningen i de använda h_{eff} -värdena analyserade fyra sortiment noggrannare. För sortimenten stamvedsflis, grothflis, sågspån och bark kan man därför i figur 5 se hur frekvent olika h_{eff} -värden används för de olika sortimenten. Frekvensdiagrammet visar på lite olika mönster för de olika sortimenten, vilka överlag stämmer väl överens med uppgifter från litteraturen (bilaga 1). Observera dock att värden i bilaga ett är W_a -värden, vilket innebär att kompensation för materialets aska måste göras enligt ekvation 3 för att nå fram till h_{eff} -värdet.



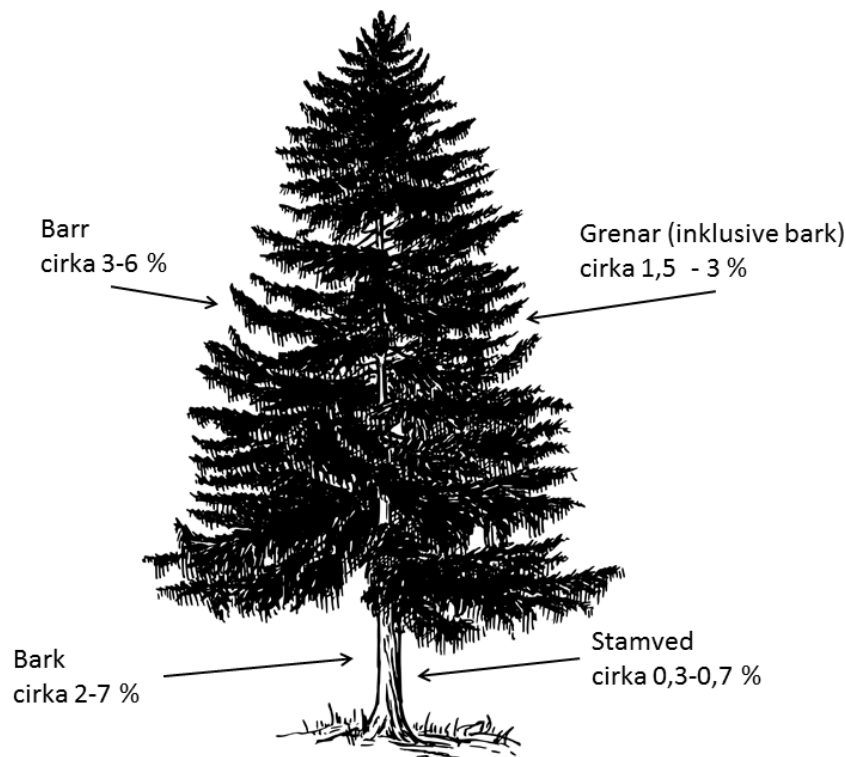
Figur 5. Diagrammet visar med vilken frekvens (av inmätta leveranser) som olika h_{eff} -värden används för fyra olika sortiment, baserat på SDC-data.

Studerar man de h_{eff} värden som använts av marknadens aktörer för riktiga leveranser ser man att tyngdpunkten av de använda värdena för alla sortiment ligger kring 5,33 MWh/ton askfri torrs substans. För sågspån finns en mycket tydlig tyngdpunkt mellan 5,3–5,4 MWh/ton askfri TS. Sågspån är ren ved och väldigt homogent vilket innebär att det borde vara låg spridning för detta sortiment. Värden mellan 5,3–5,4 MWh/ton askfri TS stämmer bra med den studerade litteraturen. Vad gäller bark verkar det användas lite högre värden för h_{eff} . Värden mellan 5,3–5,4 är fortfarande väldigt frekventa (cirka 50 %) men resterande värden tenderar att ligga något högre, framförallt i spannet från 5,4–5,7 MWh/ton askfri TS. Även spridningen för olika värden är relativt stor. Dessa värden är i linje med studerad litteratur, där det finns stöd för att använda något högre h_{eff} -värden för bark. Observera att detta gäller för bark från barrträd. Även för stamvedsflis är mönstret ganska tydligt. Också här ligger tyngdpunkten mellan 5,3–5,4 MWh/ton askfri TS, och spridningen kring detta värde är något större än för sågspånet. Då stamvedsflis, som är en blandning av ren stamved och bark, är mer heterogent är den större spridningen helt naturlig. Att det relativt frekvent förekommer värden mellan 5,2–5,3 kan tyckas vara märkligt, speciellt då barken generellt har ett

högre h_{eff} – värde än stamved. Förklaringen till detta beror dock troligen på att det är vanligt med en hög andel lövträd i stamvedsflisen. Lövträd har generallt ett något lägre h_{eff} – värde (Malmqvist & Voxblom 1991 genom Ringman 1996), främst på grund av deras högre vätehalt i barken. Det finns relativt få värden för stamvedsflis i litteraturen, därför skulle även värden för trädflis jämföras med de använda värdena för stamvedsflis. Väger man in den höga lövandelens betydelse borde värdena som används av aktörerna på marknaden vara rimliga. Grotflis uppvisar liknande mönster som för barken, men med en lite mindre spridningsbild. Här verkar värden mellan 5,3–5,6 vara dominerande, vilket överlag stämmer bra med litteraturen, även om tyngdpunkten kanske borde ligga mellan 5,5–5,6 istället för mellan 5,3–5,4 MWh/ton askfri TS.

6 Askhalt

Trä är uppbyggt av framförallt kol (C), syre (O) och väte (H) som tillsammans bildar de tre viktigaste beståndsdelarna av trädet; cellulosan, hemicellulosa och ligninet. Utöver dessa ämnen finns det även en del mineralämnen som träden tagit upp ur marken (Lehtikangas, 1999) och som trädet behöver för att kunna växa. Mineralämnena är främst koncentrerade till de delar av trädet som stödjer trädets livsfunktioner (barr/löv och bark). Exempel på mineralämnena är kalcium (Ca), kalium (K), kväve (N) och magnesium (Mg). Vid förbränning av trä bildas aska av dessa oorganiska mineralämnen – det är detta som är trädets naturliga askhalt. Askhalten varierar mellan olika trädkomponenter, trädslag och växtplatser. Stamveden har generellt den lägsta askhalten och barr och bark den högsta (figur 6). Den naturliga askhalten i olika sortiment beror med andra ord på vilka olika träkomponenter som ingår i sortimentet, men kan även variera med växtplats och trädslag.

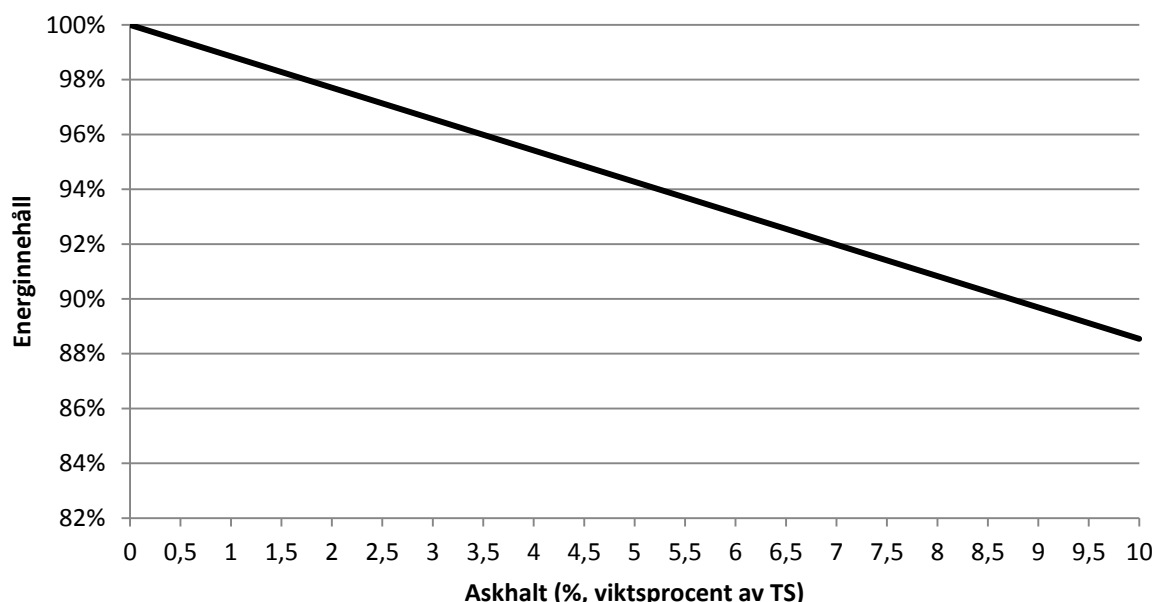


Figur 6. Naturliga askhaltsvärden (i viktsprocent av torrsubstans) för trädets komponenter, baserat på (Ringman, 1996) (Nylinder & Törnmarck, 1986) (Hakkila 1978 genom Lehtikangas 1999) (Lehtikangas, 1991).

6.1 Naturlig aska och föroreningsaska

I verkligheten förekommer både naturlig aska och föroreningsaska. Föroreningsaskan härrör från hanteringen av trädbränslet, då nedsmutsning av exempelvis sand och grus innebär en ökande askhalt. Skogsbruket har sedan 80-talet konsekvent arbetat med att minska föroreningsaskan och problemet torde generellt sett vara betydligt mindre idag än då, bl.a. tack vare s.k. grot-anpassad slutavverkning. Emellertid kan problemen tillta i omfattning om drivningsförhållandena är svåra p.g.a. blöt väderlek. Den askhalt som används vid energibestämning är den totala askhalten i det levererade materialet, alltså både den naturliga askan och föroreningsaskan.

Askhalten påverkar den totala energin man kan förvänta sig få ut vid förbränning av en leverans negativt (figur 7) varför man vill att materialet som förbränns skall ha låga askhalter. Den naturliga askan i materialet kommer dock alltid att finnas kvar, den går inte att eliminera. Det enda man kan göra för att påverka den naturliga askhalten i materialet är att försöka minimera inslaget av de träkomponenter som har högre askhalt (exempelvis barr). Grot som avbarras på hygget innan det flisas upp är ett bra exempel hur man kan sänka askhalten.



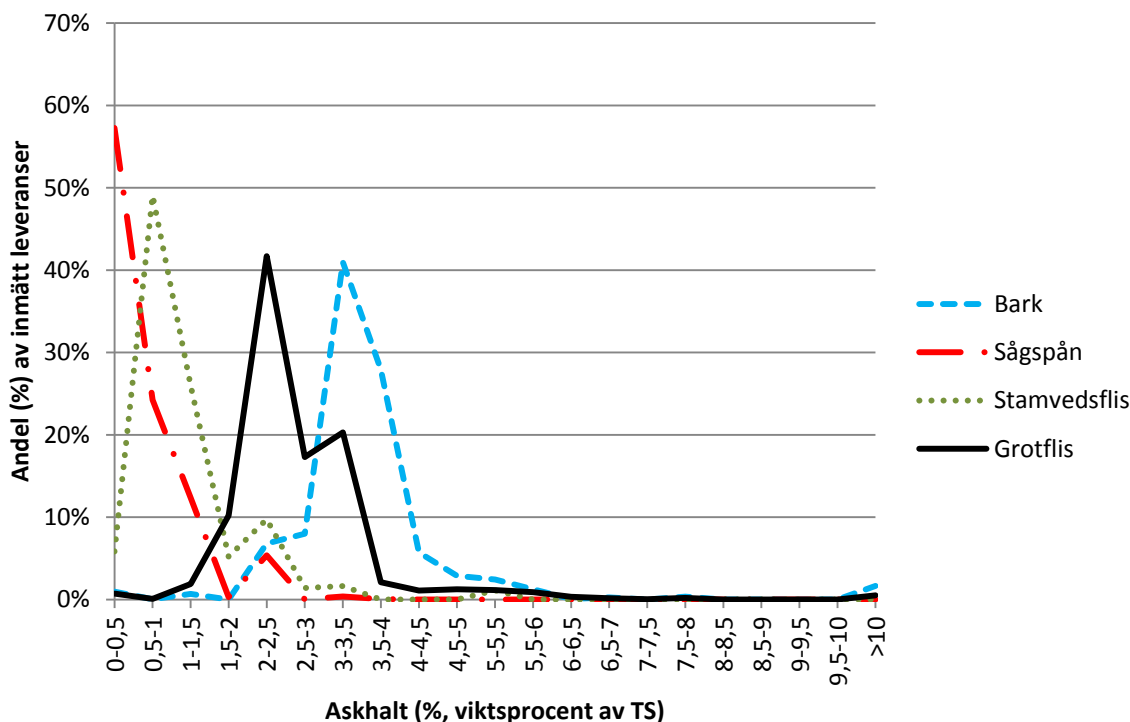
Figur 7. Askhaltens inverkan på energiinnehållet i en leverans. Ju högre askhalt desto lägre energiinnehåll. Observera att askhalten inkluderar naturlig + föroreningsaska – det är alltså omöjligt att nå 0 % aska. Bilden illustrerar hur det totala energiinnehållet påverkas av olika askhalter.

6.2 Vilka askhalter används?

I detta avsnitt jämförs askhaltsvärden från leveranser av några utvalda sortiment med askhaltsvärden som är rimliga utifrån litteraturstudier. För ändamålet gjordes därför frekvensanalyser på vilka askhaltsvärden som använts för respektive sortiment. För parametern askhalt finns inget ”vedertaget” schablonvärde¹. Däremot förekommer några frekvent använda askhaltsvärden hos några sortiment. I bilaga två har askhalter från litteraturen för olika sortiment sammanställts. Precis

¹ Motsvarande 5,33 MWh/ton TS askfri substans i fallet med h_{eff} -värden

som för det effektiva värmevärdet i askfri TS har fyra sortiment (stamvedsflis, grotflis, sågspån och bark) valts ut för noggrannare frekvensanalys av använda askhalter (figur 8).



Figur 8. Diagrammet visar med vilken frekvens (av inmätta leveranser) som olika askhalter (%) används för fyra olika sortiment.

Studerar man de askhaltsvärden som använts av marknadens aktörer, för riktiga leveranser, ser man att det finns en tydligare variation mellan olika sortiment. För sågspånet ligger mer än 90 % av det inmätta energivärdet på askhalter mellan 0-1,5 %. Då sågspån i princip är ren ved (som har en ungefärlig naturlig askhalt mellan 0,3 – 0,7 %) är inte detta förvånande, och helt i linje med litteraturen. Det finns dock leveransen där högre askhalter angetts, detta borde dock handla om föroreningsaska. Vad gäller bark, så är de använda askhalterna högre, med en majoritet av leveranserna (nästan 70 %) mellan 3-4 % aska. Barken uppvisar dessutom en större spridning av inmatade värden än sågspånet- vilket stämmer bra överens med studerad litteratur. Stamvedsflisen består av stamved + bark, men mestadels stamved. Askhalter hos leveranserna är högre än de för sågspån och uppvisar en något större spridning. 95 % av leveranserna har en askhalt lägre än 2,5 %, vilket stämmer bra överens med litteraturen. För grotflis är spridningen ytterligare något större, och tyngdpunkten ligger mellan 1,5–3,5 % aska. För grotflis kan man förvänta sig en ganska stor variation beroende på andel barr som sitter kvar, hur grova grenar som ingår i grotflisen, m.m. Majoriteten av de askhalter som använts för leveranserna är rimliga och speglar den naturliga variation man kan förvänta sig.

7 Ångbildningsvärme

Ångbildningsvärmens beskriver hur mycket energi som måste tillföras för att förångna vattnet (fukten) i en leverans. Vid ett givet tryck och temperatur (på vattnet) är den energi som krävs konstant för varje enhet med vatten i materialet. Ångbildningskonstanten ligger exempelvis på 0,678 MWh/ton

vid 25°C. I ”Avtalsmall för träd- och torvbränslen” (2005) används 0,678 MWh/ton vatten som standardvärde. Ångbildningskonstanten går inte att mäta, utan det man mäter är mängden vatten i leveransen (genom att bestämma torrhalt) som sedan multipliceras med ångbildningskonstanten för att kunna beräkna energiåtgången för att förångna vattnet i materialet.

För fruset material är inte värmevärdeformeln direkt tillämplig, eftersom ångbildningskonstanten förutsätter att allt vatten är i flytande form. För material med temperatur kring 0°C (och lägre) är det svårt att avgöra mängden vatten som finns i flytande respektive fryst form. Detta eftersom det bundna vattnet i materialet inte uppför sig på samma sätt som det fria vattnet. Att beräkna den exakta energiåtgången för att smälta och förångna fruset material är möjligt, men kräver mycket information om materialets exakta temperatur och andel bundet vatten (Härkonen, 2011). En grov skattning kan dock vara att addera smältvärmens (energi som krävs för att smälta is) till ångbildningsvärmens för nollgradigt vatten, vilket gjorts i exemplet i tabell 4. Avgörande faktor för hur stor påverkan detta har på det totala energiinnehållet är främst materialets torrhalt, vilket exemplet i tabell 4 tydliggör. Uppgifter från två värmeverk, Göteborgs Energi och Örebro Energi, pekar på att den genomsnittliga verkningsgraden vid eldning av fruset material minskar med ungefär 5 %, alltså något mer än vad exemplet antyder. Torrhalten på det material som då eldades är dock inte känd. Denna skillnad kan bero på att även andra kvalitetsproblem kan uppstå vid kalla temperaturer, exempelvis inblandning av snö och is i leveransen, som också påverkar verkningsgraden. För de flesta sönderdelade trädbränslen är det även under vintern relativt sällsynt med fruset material (beror såklart på var materialet kommer ifrån), varför detta dock borde kunna ignoreras i de flesta fall. Under särskilt kalla vintrar, när mycket material levereras fruset, så kan dock detta leda till överskattningar av energiinnehållet i det bränsle som mäts in om inte ångbildningskonstanten justeras. I tabell 4 anges den ungefärliga ångbildningskonstanten för trädbränsle vid några olika temperaturintervall, vilket kan jämföras med de värden som använts för verkliga leveranser, se tabell 5.

Tabell 4. Approximativa värden för ångbildningskonstanten vid några olika temperaturintervall, samt hur stor påverkan användning av standardvärdet 0,678 har på energibestämningen för material i de olika temperaturintervallen. Beräkningen av det relativa energiinnehållet utgår från en 40 tons leverans med 40 % respektive 60 % torrhalt, ett effektivt värmevärde på 5,3 MWh/ton och 1 % askhalt. För fuktigare material blir påverkan större.

| Materialets temperatur | Ångbildningskonstant (MWh/ton vatten) | Avvikelse i energiinnehåll (%) vid användning av 0,678 som ångbildningskonstant. (40 % torrhalt) | Avvikelse i energiinnehåll (%) vid användning av 0,678 som ångbildningskonstant. (60 % torrhalt) |
|------------------------|---------------------------------------|--|--|
| Under 0°C | 0,787 | -3,87 % | -1,52 % |
| 0-10°C | 0,692 | -0,5 % | -0,19 % |
| 10-20°C | 0,685 | -0,25 % | -0,1 % |
| 20-30°C | 0,678 | 0 % | 0 % |
| 30-40°C | 0,672 | 0,21 % | 0,08 % |
| 40-50°C | 0,665 | 0,46 % | 0,18 % |
| 50-60°C | 0,658 | 0,71 % | 0,28 % |
| 60-70°C | 0,652 | 0,92 % | 0,36 % |
| 70-80°C | 0,645 | 1,17 % | 0,46 % |
| 80-90°C | 0,634 | 1,56 % | 0,61 % |
| 90-100°C | 0,630 | 1,7 % | 0,67 % |

I datamaterialet från SDC återfinns 93,6% av värdena inom intervallet 0,678 – 0,694 MWh/ton och ytterligare 3,8 % precis utanför. Värden större än 0,695 förekommer inte för flytande vatten, och är

troligtvis ett resultat av man försökt kompensera för fruset material. Värdet för ångbildningskonstanten vid 25°C används vanligen som standardvärde i avtal och laboratorieanalyser, vilket är anledningen till att detta värde är så frekvent.

Tabell 5. Frekvensanalys av använda ångbildningskonstanter i datamaterialet från SDC. För en majoritet av leveranserna har värdet 0,678 MWh/ton använts. Även värdet 0,694 används frekvent, vilket är ångbildningskonstanten vid 0°C.

| Ångbildningsvärme | Frekvens | |
|-------------------|----------|---------|
| 0,660 | <0,05% | |
| 0,670 | <0,05% | |
| 0,676 | <0,05% | |
| 0,677 | 0,35% | |
| 0,678 | 65,39% | } 93,6% |
| 0,680 | 7,89% | |
| 0,681 | <0,05% | |
| 0,685 | <0,05% | |
| 0,687 | 0,28% | |
| 0,690 | 0,80% | |
| 0,691 | 0,08% | |
| 0,692 | 0,21% | |
| 0,694 | 18,98% | |
| 0,695 | 3,45% | |
| 0,720 | 0,24% | |
| 0,743 | 0,06% | |
| 0,775 | 0,32% | |
| 0,778 | 1,41% | |
| 0,780 | 0,26% | |
| 0,814 | 0,19% | |
| 0,964 | <0,05% | |
| 2,440 | <0,05% | |
| 9,695 | <0,05% | |
| | 100,00% | |

8 Osäkerhetsbudgetar för olika sortiment

8.1 Källor till osäkerhet

Till denna rapport har gjorts en hel del litteraturstudier för att försöka se vilken variation i askhalt, effektivt värmevärde och ångbildningsvärme som man kan förvänta sig inom olika sortiment. Alla rapporter har funnit något varierande resultat (se bilaga 1 och 2), men dessa rapporters angivna värden kan användas för att försöka beskriva den variation som kan finnas mellan olika partier inom olika sortiment. Genom att sammanställa max-/minvärden samt sammanställningar över spridningar för de olika sortimenten kan man se hur stor variationsbredd som finns inom ett sortiment. Dessa värden har sedan använts för att göra osäkerhetsbudgetar vid bestämning av MWh direkt från råvikt. Syftet med budgetarna är att exemplifiera vilken påverkan användning av standardvärden (eller medelvärden) på vissa variabler har på den totala osäkerheten i mätningen av en enskild leverans, eller ett parti.

De olika variablerna som påverkar vid bestämning av energiinnehåll (ekvation 1) i en leverans är; råvikt, torrhalt, effektivt värmevärde i askfri TS, askhalt och ångbildningsvärme. Det finns för samtliga dessa variabler en naturlig variation mellan olika leveranser, samt en osäkerhet i hur vi bestämmer denna variabel. Variablernas ingående variation och osäkerhet beskrivs här kortfattat.

Råvikt: vägning av en leverans på lastbil sker vanligtvis på en fordonsvåg. Dessa vågar anses överlag väldigt noggranna. För fordonsvågar som används av VMK-auktoriseraade mätande företag gäller att (vid laster över 10 ton) får den maximala avvikelser vid daglig/veckovis kontroll vara ±

200 kg (SDC, 2014). Kraven vid typgodkännande och verifiering är mycket striktare och tillåter maximalt ± 30 kg avvikelse för laster över 40 ton.

Torrhalt: provtagning på materialet i leveransen för att sedan bestämma dess torrhalt med hjälp av (vanligtvis) ugn. Torrhalten har två olika osäkerhetskällor; dels själva uttaget av provet där man riskerar att inte få ett representativt prov och dels vid torkningen (torrhaltanalysen). Osäkerheten i torkningen beror i sin tur på temperaturen i ugnen och vägningen av provet före och efter torkning. I detta exempel antas osäkerheten i torkningen vara försumbar och sätts till 0. Av VMU utförd kontrollmätning visar att dålig provtagning kan ge mycket stor spridning, men att även korrekt tagna prover leder till viss spridning. I analysen antas att torrhaltprovet är ett generalprov baserat på sex väl fördelade provtagningspunkter i ett tippat lass – då VMU har mycket data som visar spridningen vid denna typ av provtagning. Utförs provtagning på ett sätt som ger sämre representativitet för det uttagna provet ökar spridningen kraftigt (se exempel i figur 11). I formeln för att beräkna energiinnehåll (ekvation 1.) används torrhalten två gånger. Dels vid bestämning av mängden torrs substans och dels vid beräkning av energiförbrukning vid förångning av vattnet i materialet.

Effektivt värmevärde: en parameter som varierar något med leveransens/partiets unika egenskaper (andel ved/bark/barr m.m). Vanligtvis tas väldigt få prov för att mäta denna parameter – istället används standardvärden eller samlingsprover, som skickas för analys med glesa mellanrum. I bilaga 3 beskrivs översiktligt procedurerna för löpande bestämning av parametervärden med hjälp av ett tänkt exempel. Baserat på olika forskningsrapporter, och laboratorieanalyser från värmeverk har en figur över den antagna naturliga variationen för de analyserade sortimenten tagits fram, se figur 2.

Askhalt: askhalten mäts oftast med glesa intervall på stora samlingsprover. Viss variation finns inom sortiment vad gäller den naturliga askhalten, men det är främst leveranser med föroreningar som kan få höga askhalter. I exemplet med osäkerhetsbudgetar tas endast hänsyn till den påverkan som den naturliga askhaltens variation har på energiinnehållet. För att se hur eventuell föroreningssaska påverkar det totala energiinnehållet, se figur 7.

Ångbildningsvärme: beskriver den energi som krävs för att bilda ånga av det vatten som finns i leveransen. Vid specifik temperatur är detta värde konstant (per enhet vatten), men kan skilja sig lite beroende på leveransens temperatur. För standardvärdet antas en temperatur på 25°C. Osäkerheten här är kopplat till bestämningen av torrhalt, då mängden vatten är avgörande för denna parameters storlek, samt vilken ångbildningskonstant man använder.

8.2 Osäkerhet från råvikt till energiinnehåll

Baserat på genomgången i föregående avsnitt har följande osäkerhetsbudgetar konstruerats för fyra leveranser av olika sortiment. Beräkningarna av osäkerhetsbudgetarna bygger på GUM-metoden (Guide to Uncertainty in Measurement), som är standard för att beräkna osäkerheter vid olika typer av mätningar (JCGM, 2008). Budgetarna utgår från energiberäkningsformeln (ekvation 1) där sedan en osäkerhetsfaktor uttryckt som en (1) standardavvikelse (en standardosäkerhet), för respektive parameter har lagts till formeln för att se dess påverkan på slutresultatet. Dessa osäkerhetsfaktorer har sedan summerats och multiplicerats med två för att ge ett intervall som svarar mot en konfidensnivå på cirka 95 %. Beräkningarnas struktur och använda osäkerhetsfaktorer kan ses i bilaga 5. För att fastställa/skatta storleken på de ingående osäkerheterna (standardosäkerheterna) har lite olika data använts för olika parametrar. För det effektiva värmevärdet och askhalten har (Gärdenäs, 1989) (Jirjis & Lehtikangas, 1993) (Lehtikangas, 1991) (Lehtikangas, 1999) (Nylinder &

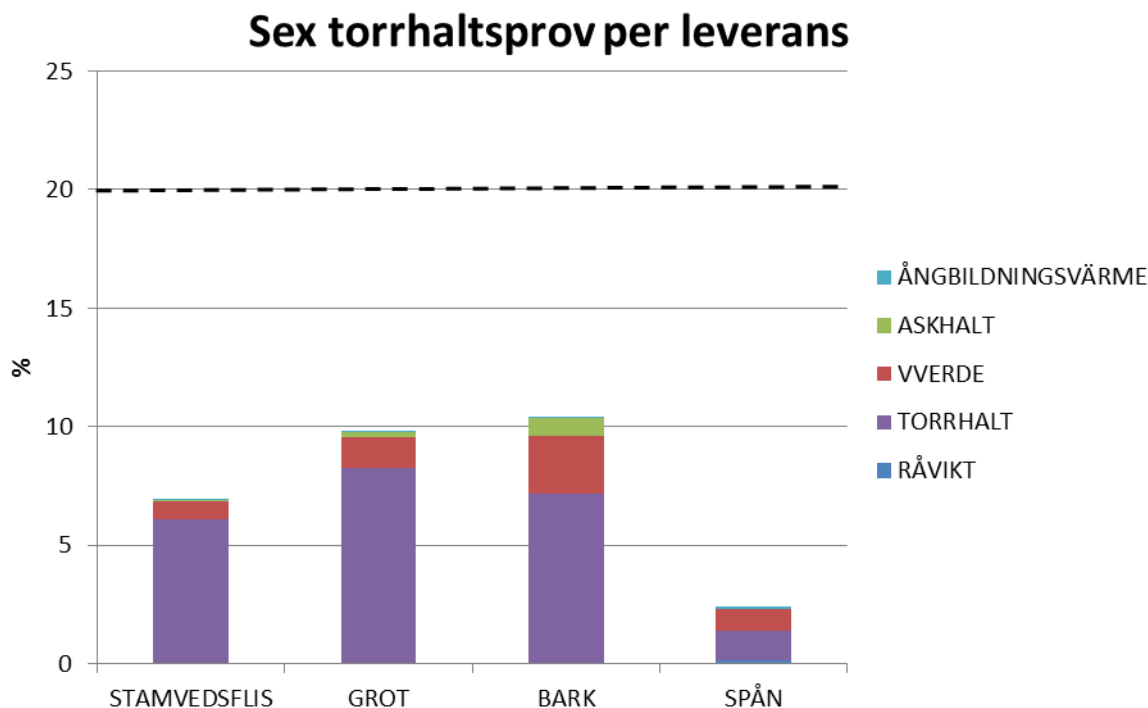
Törnmarck, 1986) (Ringman, 1996) (Törnqvist, 1984) (Törnqvist, 1986) (Törnqvist & Jirjis, 1990) (Strömberg & Svärd, 2012) samt ett flertal laboratorieanalyser av olika trädbränslesortiment (se bilaga 4) använts för att beräkna standardosäkerheter. För fordonsvågen har osäkerheten beräknats utifrån maximalt tillåtna avvikelser för statistiska fordonsvågar vid daglig/veckovis kontroll (SDC, 2014). För torrhalten har spridningen vid kontrollprovtagning (utförd av VMU) använts (Björklund & Eriksson, 2013) (Opublicerad data). Dessa kontrollerdata inkluderar dock mestadels grot-leveranser – därför har vissa extrapoleringar/skattningar fått göras utifrån förväntat resultat på övriga sortiment. Kontrollprovtagningen har utförts genom att insamla tio väl fördelade prov på varje kontrollerad leverans och jämföra medelvärdet av torrhalten för dessa tio prov med den ordinarie mätningens torrhalt. De använda värdena för standardosäkerhet kan ses i bilaga 5.

Tabell 6. Ingående parametrar och antaganden i osäkerhetsbudgetarna för de fyra sortimenten.

| Parameter | Värde | Kommentar |
|--|--|---|
| Råvikt (ton) | 40 | Vägd på fordonsvåg |
| Torrhalt (%) | Stamvedsflis- 60 Grotflis- 55 Bark- 50 Spån- 45 | Provtagning har skett från tippad leverans. Ett generalprov baserat på sex provtagningspunkter. |
| Ångbildningsvärme (MWh/ton vatten) | 0,678 | Materialet temperatur är okänd – men någonstans mellan 10 – 40 ° C. |
| Effektivt värmevärde (MWh/ton i askfri TS) | Stamvedsflis- 5,30 Grotflis- 5,40 Bark- 5,45 Spån- 5,27 | Här antas att medelvärde för de olika sortimenten har använts för den enskilda leveransen. |
| Askhalt (% av TS) | Stamvedsflis- 0,8 Grotflis- 2 Bark- 3 Spån- 0,3 | Här antas att endast naturlig aska finns i leveransen. |

För ett enskilt värmeverk är troligen variationen för askhalt och effektivt värmevärde något mindre än vad som anges i analysen, eftersom varje värmeverk har ett begränsat upptagningsområde och en enhetligare hantering av materialet som kommer in till värmeverket.

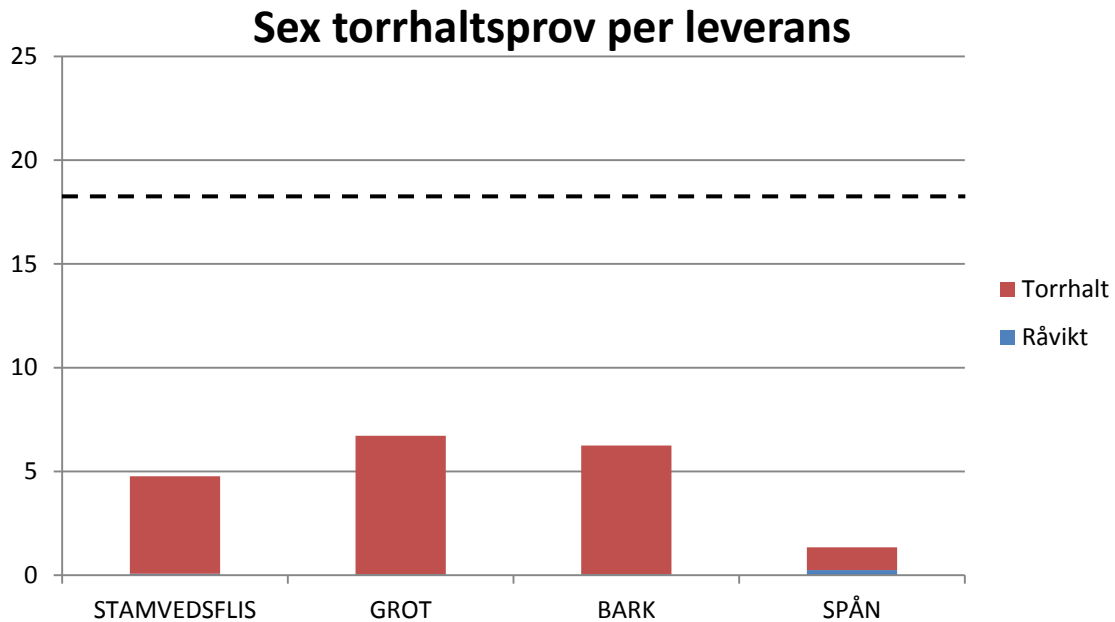
Osäkerheten i beräkningarna uttrycks som utvidgad mätosäkerhet. Detta innebär en täckningsfaktor på två standardavvikelser för osäkerheten. Denna täckningsfaktor kan förväntas täcka in 95 % av alla inmätningar enligt de, i budgeten, givna förutsättningarna. Kraven i VML gäller dock alla partier, vilket innebär att det krävs att man ligger en bra bit under kravnivåerna i lagen för att vara säker på att inga mätningar skall hamna på fel sida om lagen. Används istället en täckningsfaktor på tre standardavvikelser kan man förvänta täcka in 99,73 % av inmätningarna enligt de i budgeten givna förutsättningarna. Används täckningsfaktor tre så ökar totala osäkerheten i detta kapitel exempel med 50 %.



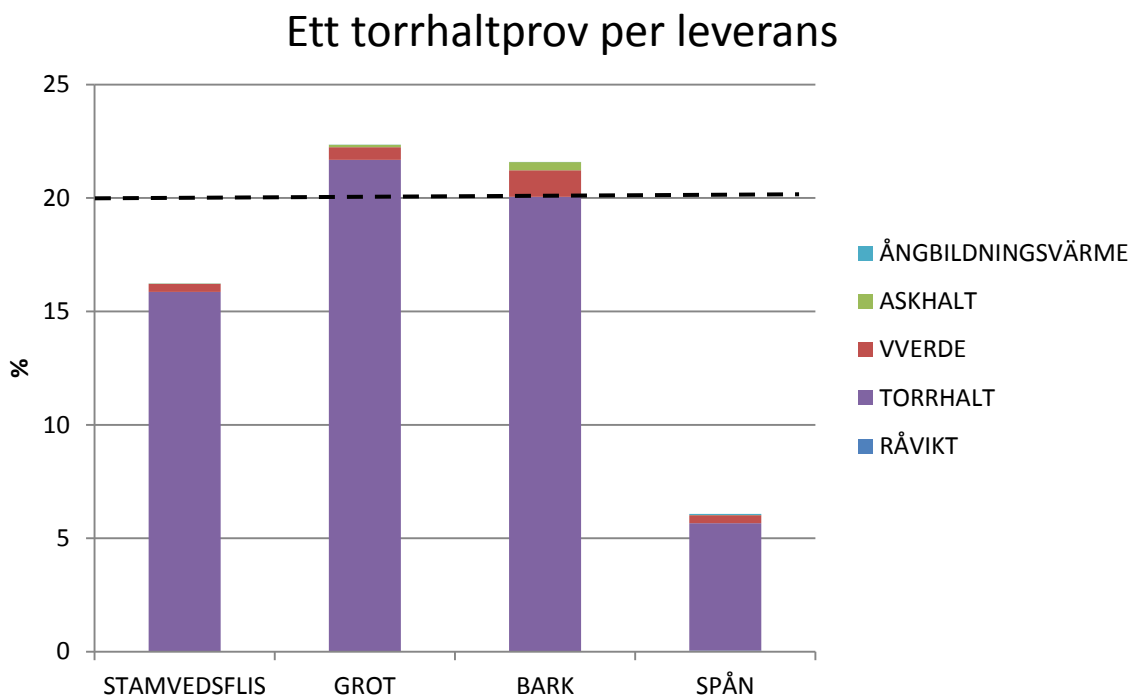
Figur 9. Relativ utvidgad mätosäkerhet (täckningsfaktor = 2) vid mätning av en leverans energiinnehåll. Uppställt på olika sortiment enligt förutsättningarna i tabell 6. De ingående parametrarnas osäkerhet är uppdelade på färger. VML:s krav på maximala avvikelse vid denna partistorlek (se även tabell 1 för andra partistorlekar) kan ses som en streckad linje. Observera att den utvidgade mätosäkerhet förväntas täcka 95 % av inmätningarna, och att noggrannhetskraven i VML gäller för alla partier.

Osäkerhetsbudgeten visar att torrhaltsbestämningen är den faktor som främst påverkar osäkerheten i mätningen. Det är främst den första delen av beräkningen, när mängden torrs substans fastställs som påverkar energiinnehållet i slutändan. Även det effektiva värmevärdet påverkar ganska mycket, främst i de lite mer heterogena materialen grot och bark. Askhalten påverkar främst i grot och bark, som vanligtvis har en större variation när det gäller askhalten. Osäkerheten vid vägning och vilken ångbildningskonstant som används har väldigt liten påverkan på slutresultatet. Sammanfattningsvis leder större heterogenitet i materialet till större osäkerhet vid mätningen. Figur 9 visar den relativa utvidgade mätosäkerheten vid mätning av en leverans energiinnehåll. Om man istället väljer att mäta leveransens torrsvikt (TTV) ändras detta något, då inte alla instorheter från energibestämningen används i bestämningen av torrsvikt. Osäkerheten vid mätning av TTV blir med andra ord något lägre, vilket kan ses i figur 10.

Osäkerhetsbudgetarna i figur 9 och 10 förutsätter att man tar sex delprov (som blandas till ett generalprov) för varje leverans. Om man istället skulle ta endast ett prov per leverans kommer osäkerheten i torrhaltbestämningen att öka kraftigt (se figur 11). I detta fall är avvikelsen inom vilken 95 % av inmätningar förväntas vara inom, nära eller utanför lagkraven för de flesta sortiment. Det funkar med andra ord inte att endast ta ett delprov per leverans för partier som motsvarar en lastbil med släp i storlek med sortiment med stor variation.



Figur 10. Relativ utvidgad mätosäkerhet (täckningsfaktor = 2) vid mätning av en leverans torrsvikt. Uppställt på olika sortiment enligt förutsättningarna i tabell 6 (endast råvikten och torrhalten påverkar här dock). De ingående parametrarnas osäkerhet är uppdelade på färger. VML:s krav på maximala avvikelse vid denna partistorlek kan ses som en streckad linje. Observera att den utvidgade mätosäkerhet förväntas täcka 95 % av inmätningarna, och att noggrannhetskraven i VML gäller för alla partier.



Figur 11. Relativ utvidgad mätosäkerhet (täckningsfaktor =2) vid mätning av en leverans energiinnehåll. Uppställt på olika sortiment enligt förutsättningarna i tabell 6, förutom att endast ett delprov för torrhaltsbestämning tas per leverans. De ingående parametrarnas osäkerhet är uppdelade på färger. VML:s krav på maximal avvikelse vid denna partistorlek kan ses som en streckad linje. Observera att den utvidgade mätosäkerhet förväntas täcka 95 % av inmätningarna, och att noggrannhetskraven i VML gäller för alla partier.

9 Diskussion

9.1 Energibestämning i praktiken och i litteraturen

Undersökningen visar att det används olika termer för att beskriva värmevärdet i olika material. I SDC:s EB-nyckel (och avtalsmallen från Svensk fjärrvärme) ingår parametern h_{eff} (effektivt värmevärde i askfri torrsbstans) medan i det många forskningsrapporter redovisas W_a -värde (effektivt värmevärde i torrsbstans inklusive naturlig aska). Vid jämförelser mellan h_{eff} -värde och W_a -värde måste därför hänsyn tas till aska enligt ekvation 3. Detta samband är även viktigt att notera när man studerar analysrapporter, då det värmevärdet kan redovisas på flera olika sätt.

Såväl de undersökta forskningsrapporterna som frekvensanalyserna visar att de två stora sortimenten; grothflis och bark, har en relativt stor naturlig spridning i W_a/h_{eff} och askhalt. Både grothflis och bark är heterogena material vilket är en del av förklaringen till detta. Vad gäller sortimenten sågspån och stamvedsflis uppvisar de en mindre spridning, vilket förklaras av att de är mer homogena. Då både det effektiva värmevärdet och askhalten varierar inom och mellan träd (beroende på den kemiska sammansättningen i träet) är det viktigt att notera att varje enskilt parti kommer ha sitt unika värde för dessa parametrar. I praktiken är det dock svårt att utföra kompletta laboratorieanalyser för alla enskilda partier. Det borde därför vara bättre att använda väl underbyggda medelvärden för olika sortiment, kanske även per leverantör för att få bra värden för dessa parametrar. Hos företag som utfört analyser av askhalt och effektiva värmevärden finns det ofta bra data på medelvärden för olika sortiment/leverantörer inom det enskilda företaget/värmeverkets upptagningsområde. För aktörer som inte använder sig av analysrapporter förslås medelvärden för några olika sortiment i tabell 7. Att dela upp på olika sortiment borde vara bättre än att använda schablonvärdet för h_{eff} på 5,33 MWh/ton askfri TS för samtliga sortiment. Askhalten kan variera mycket kraftigare än det effektiva värmevärdet, speciellt om det förekommer föroreningsaska. Föreslagna medelvärden för några sortiment ges ändå i tabell 7, men det är viktigt att notera att dessa värden förutsätter att ingen föroreningsaska finns i materialet.

En annan möjlighet för att öka noggrannheten i energibestämningen kan även vara att dela upp ytterligare inom sortiment på olika egenskapskoder för att få mer exakta skattningar av det effektiva värmevärdet och askhalten. Ett exempel är grothflis där askhalt sjunker vid lagring, framför allt eftersom finfraktioner (barr) faller av. Det borde vara möjligt att ta hänsyn till olika egenskaper hos materialet (avbarningsstatus m.m.) vid inmätning med hjälp av egenskapskoder i VIOL-systemet för att på så sätt öka noggrannheten i energivärdesbestämningen för enskilda leveranser och partier av grothflis, och kanske även andra sortiment. Denna möjlighet utnyttjas knappt i dagsläget.

Rundvedssortiment för energiändamål handlas huvudsakligen i något fastkubikmetermått och har därför inte behandlats vidare i detta arbete. Handelsmåtten för flisad rundved är däremot ofta MWh. Spridning i W_a/h_{eff} och askhalt för dessa veddominerade sortiment är inte särskilt stor, men det är ändå viktigt att rättvisande h_{eff} och askhalter används för respektive flissortiment. Det kan i sammanhanget framhållas att h_{eff} - värden för leveranser som innehåller stor andel lövved eventuellt bör justeras nedåt (se avsnitt 5.1) för att kompensera för deras högre vätehalt och lägre effektiva värmevärde. Kanske skulle det även här gå att använda egenskapskoderna för att koda för olika inblandningar av löv/andel bark – för att på så sätt få bättre värden för h_{eff} och askhalter.

I föreliggande arbete ingick att också studera parametern ångbildningsvärme. Denna parameter är en fysikalisk konstant, som beror på materialets temperatur. För material som har temperaturer mellan 0-50°C så har konstanten ett ganska snävt intervall som det varierar inom, vilket innebär att eventuella fel blir små om ett felaktigt värde används. Frekvensanalyserna visar att värdet 0,678 MWh/ton är de mest frekvent använda värdet för ångbildningskonstanten. Värdet 0,694 MWh/ton, dvs. ångbildningskonstanten vid 0°C, används också relativt frekvent vilket kan tyda på ett försök att återspegla utomhustemperaturen under den kalla tiden på året. För material som håller temperaturer under 0°C är dock sambandet mellan temperatur och ångbildningsvärme mer komplicerat. För alla leveranser, där man inte med säkerhet vet att de är frusna, rekommenderas därför att man använder ett standardvärde på 0,678 MWh/ton som ångbildningskonstant. För leveranser som man med säkerhet vet kommer att levereras frusna så kan det finnas anledning att höja ångbildningskonstanten. För att exakt kunna beräkna det minskade energiinnehåll som detta innebär, krävs det dock ganska invecklade beräkningar (se exempelvis Härkonen, 2011), alternativt att man använder information om förändrad verkningsgrad från värmeverken, eller den grova approximation som finns i denna rapport, när fruset trädbränsle förbränns.

9.2 Osäkerhetsbudgetar

Osäkerhetsbudgetarna för stamvedsflis, grotflis, sågspån och bark i kapitel 8 utgör essensen i föreliggande arbete. Trots den stora mängden empiriska data som ligger till grund för forskningsrapporterna, har inte standardavvikelser (spridningar) för W_a/h_{eff} och askhalt på partinivå redovisats förutom i en rapport (Nylinder & Törnmark, 1986). De data, förutom torrhalt, som används i EB-nyckeln vid inmätning baseras ofta på schablonvärden eller medelvärden. De kan därför inte användas för att bestämma osäkerheten för ett enskilt parti. Osäkerhetsbudgetarna i föreliggande arbete bygger därför på beräkning av osäkerhetsfaktorer, utifrån tillgänglig data. Där det har gått att beräkna en standardavvikelse, har denna använts, i övriga fall har standardosäkerheter beräknats utifrån max-/minvärden och förväntade avvikelser. Speciellt i fallet effektivt värmevärde vore det önskvärt med mer omfattande data för enskilda partier, men det har dessvärre inte gått att uppbringa. De löpande laboratorieanalyser som görs (se exempel i bilaga 4) är gjorda för enskilda leverantörer och sortiment över en period, men inte för enskilda partier.

9.3 Mätosäkerheten i relation till lagens krav

Osäkerhetsbudgetarna i figur 9-11 visar att den parameter i EB-nyckeln, som är behäftad med störst osäkerhet är torrhaltsbestämningen. Torrhaltsbestämningen uppgår i de flesta exempel till minst 80 % av den totala osäkerheten. Vid mätning av energiinnehåll är h_{eff} (effektivt värmevärde i askfri torrsubstans) den faktor som påverkar osäkerheten mest efter torrhalten. För en skogsägare, som levererar 40 (råa)ton flisad barrgrot, visar figur 9 att den totala relativa utvidgade osäkerheten (95 % - ig konfidensnivå) är ca 10 % (antaget 55 % torrhalt). Detta gäller förutsatt att torrhaltsprovet baseras på provtagning från sex punkter i leveransen. Motsvarande relativa utvidgade osäkerhet för bark ligger på ca 11 %, men notera att bark sällan omfattas av VML. För övriga sortiment i osäkerhetsbudgetarna är den relativa osäkerheten lägre. Detta speglar att det finns en större variation (både till torrhalt, askhalt och effektivt värmevärde) i bark och grot jämfört med andra sortiment. Osäkerhetsbudgetarna visar även hur stor påverkan korrekt provtagning har på den totala osäkerheten (figur 9 och 11). För att säkerställa att mätningen sker inom lagens krav är det med andra ord provtagningen (av torrhaltsprover) som är den absolut viktigaste delen, vilket stämmer bra överens med tidigare slutsatser (Örnemark, 2014).

9.4 Syntes och rekommendationer

Syftet med studien var att belysa hur mycket större osäkerhet man kan förvänta sig när man går från måttenheten ton torrsvikt till MWh. Lagstiftningen tillåter två procentenheter högre partivisa avvikelser för MWh än ton torrsvikt. Detta motiveras med att MWh är svårare att bestämma, då det krävs mer avancerad laboratorieutrustning för att bestämma askhalt och värmevärde. Resultaten av föreliggande studie tyder på att det för grot och bark är en rimlig relation mellan lagkraven. För stamved och spån är den tillkommande osäkerheten på en något lägre nivå. Det skall dock förtydligas att noggrannhetskraven i VML endast omfattar de partier som handlas i förstaled – sågspån och bark är vanligtvis restprodukter från en första förädling av materialet – varför det sällan görs affärer i förstaled för dessa sortiment.

Osäkerhetsbudgetarna i denna rapport är beräknade utifrån enskilda leveranser av trädbränsle vilket inte direkt går att likställa med partier. För partier som består av flera leveranser blir den totala osäkerheten lägre, eftersom man vanligtvis utför torrhaltsmätningar på varje enskild leverans. Detta innebär att medelfelet för torrhaltsbestämningen sjunker kraftigt när prov tas från varje leverans i ett stort parti (Björklund & Eriksson, 2013). För parametrarna askhalt och effektivt värmevärde tas dock sällan några prov för enskilda partier, deras osäkerhet kommer inte att sjunka när fler leveranser ingår i ett parti. För stora partier kommer alltså osäkerheten från den naturliga spridningen i askhalt och effektivt värmevärde att öka i betydelse i förhållande till osäkerheten från torrhaltsbestämningen. Detta innebär att om man vill öka mätnoggrannheten för stora partier, där man redan idag tar adekvat antal torrhaltsprov från varje leverans, måste man börja med provtagning av partiets askhalt och effektiva värmevärde. Denna rapport behandlar de partivisa felen, men askhalter och effektiva värmevärde är även parametrar som skulle kunna påverka de systematiska felen i mätningen, vilket kan vara värt att notera.

Frekvensanalyserna visar att en majoritet av använda parametervärden ligger inom rimliga intervall, även om tyngdpunkten av de använda h_{eff} -värdena i några fall ligger väldigt lågt. Föreliggande undersökning visar att högre h_{eff} -värden för bark och grot bör användas än det frekvent använda h_{eff} -värdet 5,33 MWh/ton askfri TS.

Tabell 7. Förslag till medelvärden för h_{eff} och askhalt hos några sortiment, som förutsätts bestå av material från barrträd.

| Sortiment | Effektivt värmevärde (h_{eff}) | Askhalt (endast naturlig) |
|--------------|--|------------------------------|
| Stamvedsflis | 5,3 | 0,7 |
| Grot | 5,5 | 2,3 |
| Bark | 5,5 | 3,5 |
| Sågspån | 5,3 | 0,3 |

För leveranser där man inte förväntar sig någon föroreningsaska går det att använda schablonvärden/medelvärden och ändå uppnå hög noggrannhet i sina mätningar. Om däremot stor risk för signifikant förhöjda halter av föroreningsaska befaras, borde regelbundna askanalyser göras för enskilda partier för att fastställa den totala askhalten (naturlig aska + föroreningsaska), t.ex. genom att låta ett slumpmässigt urval av torrhaltsprov gå till askanalys.

Förslag för marknaden – hur vi ska använda EB-nyckeln:

- Ångbildningskonstant: en fysikalisk storhet som i grundläget låses vid 0,678 MWh/ton. Ångbildningskonstanten ska gå att ändra, exempelvis när fruset material levereras- men endast då bägge parter är införstådda och överens om vad det innebär.
- Effektivt värmevärde: För de aktörer som inte utför provtagning rekommenderas att schablonvärden/medelvärden används. Dessa skall dock varieras beroende på sortimentet, och inte utgå från 5,33 MWh/ton i samtliga fall. Aktörer som sysslar med provtagning av variabeln skall fortsätta kunna ändra detta värde efter resultaten i deras analysrapporter.
- Askhalt: även här kan schablonvärden/medelvärden för olika sortiment användas, åtminstone när det gäller naturliga askhalter. Utöver det rekommenderas provtagning och förhandling om vilka askhalter som ska användas i EB-nyckeln. Det gäller speciellt när man kan förvänta sig föroreningsaska i leveranserna.

10 Litteraturförteckning

- Avfall Sverige. (2008). *Karakterisering av fasta inhomogena avfallsbränslen - inverkan av metoder för provtagning och provberedning*. Malmö: Avfall Sverige.
- Björklund, L., & Eriksson, U. (2013). *Torrhaltsbestämning på sönderdelat trädbränsle*. Sundsvall: SDC.
- Gärdenäs. (1989). *Kvalitetsvariationer i avverkningsrester - Södra Sverige. Rapport 209*. Uppsala: Institutionen för virkeslära, SLU.
- Härkonen, M. (2011). *Heat value of the wet wood*. Forestpower.net.
- JCGM. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. JCGM.
- Jirjis, & Lehtikangas. (1993). *Bränslekvalitet och substansförluster vid vältlagring av hyggesrester. Rapport 236*. Uppsala: Institutionen för virkeslära, SLU.
- Larsson, F., & Nylinder, M. (2008). Projekt: Omräkningstal och värmevärdesbeskrivningar för skogsbränslen på dagens svenska marknad. *Arbetsdokument*. Uppsala: SLU.
- Lehtikangas, P. (1991). *Avverkningsrester i hyggeshögar - avbarrning och bränslekvalitet*. Uppsala: SLU.
- Lehtikangas, P. (1999). *Lagringshandbok för trädbränslen*. Uppsala: Institutionen för virkeslära, SLU.
- Nylinder, M., & Törnmarck, J. (1986). *Mätning av bränsleflis, spån och bark*. Uppsala: SLU.
- Ringman, M. (1996). *Trädbränslesortiment; Definitioner och egenskaper*. Uppsala: SLU.
- SDC. (2013). Information om central energiberäkning i Viol. Sundsvall.
- SDC. (2014). *Anvisning för kontroll och underhåll av statisk fordonsvåg. SDC:s instruktioner för kontroll av mätning*. Sundsvall: SDC.
- SDC. (den 14 09 2015). VIOL Koder v.6.8. Sundsvall.
- SKSFS. (11 2014). Skogsstyrelsens föreskrifter om virkesmätning. Jönköping: Skogsstyrelsen.
- Strömberg, B., & Svärd, S. (2012). *Bränslehandboken*. Stockholm: Värmeforsk.
- Svensk fjärrvärme. (2005). *Avtalsmall för träd- och torvbränslen med tillhörande kommentarer*. Svensk Fjärrvärme, Svenska Torvproducentföreningen, Svenska Trädbränsleföreningen.
- Törnqvist. (1984). *Hyggesrester som råvara för energiproduktion - Torkning, lagring, hantering och kvalitet. Rapport nr 219*. Uppsala: Institutionen för virkeslära, SLU.
- Törnqvist. (1986). *Projekt storskalig säsongslagring - en sammanfattning av etapp 1. Rapport nr 188*. Uppsala: Institutionen för virkeslära, SLU.
- Törnqvist, & Jirjis. (1990). *Bränsleflisens förändring över tiden - vid lagring i stora stackar. Rapport nr 219*. Uppsala: Institutionen för virkeslära, SLU.
- Örnemark, U. (2014). *Uppskattning av mätosäkerhet för några tillämpningar inom området virkesmätning*. Ulricehamn: Emendo dokumentgranskning HB.

Bilaga 1. Sammanställning av Wa-värden från olika källor

W_a - Effektivt värmevärde i absolut torr substans, MWh/tTS inkl. aska

| Sortiment | Studie | Intervall | | Medelvärde | Riktvärde | Kommentar |
|--------------------------|----------------------------|-----------|------|------------|-----------|---|
| | | Min | Max | | | |
| 10 Massaved | Nylinder, Törnmark, 1986 | 5,20 | 5,35 | 5,44 | 5,42 | <i>Stam: tall, sid 9</i> |
| | | 4,99 | 5,28 | | | <i>Stam: gran, sid 9</i> |
| | | 4,84 | 5,31 | | | <i>Stam: Björk, sid 9</i> |
| 41 Träddelar -" -" | Ringman, 1996 | | | | | <i>Hela träd, gallring: tall, sid 82</i> |
| | | | | | | <i>Hela träd, gallring: gran, sid 82</i> |
| | | | | | | <i>Hela träd, gallring: björk, sid 82</i> |
| 51 Grot | Thörnqvist, 1984 | 5,38 | 5,45 | 5,44 | 5,42 | <i>W_{kal} -0,36, Sid 63</i> |
| | Jirjis & Lehtikangas, 1993 | 5,36 | 5,47 | | | <i>W_{kal} -0,36, Sid 17</i> |
| | Gärdenäs, 1989 | 5,05 | 5,38 | | | <i>W_{kal} -0,36, Sid 42</i> |
| 60 Energiskog | Ringman, 1996 | 5,08 | 5,14 | | | <i>Sid 110</i> |
| 63 Stamvedsflis | Thörnqvist, 1986 | | | 5,04 | | <i>Flisad ekstamved, lös, W_{kal} -0,36, sid 29</i> |
| 64 Grotflis | Thörnqvist, 1984 | 5,21 | 5,32 | | | <i>W_{kal} -0,36, sid 64</i> |
| | Thörnqvist, 1983 | | | 5,24 | | <i>W_{kal} -0,36, sid 27</i> |
| | Thörnqvist, 1986 | | | 5,40 | | <i>Flisade hyggesrester, lös, W_{kal} -0,36, sid 29</i> |
| | Thörnqvist & Jirjis, 1990 | 5,31 | 5,50 | 5,39 | | <i>W_{kal} -0,36, sid 36</i> |
| 65 Träddelsflis | Ringman, 1996 | | | 5,44 | | <i>Tall, sid 82</i> |
| | | | | 5,33 | | <i>Gran, sid 82</i> |
| | | | | 5,29 | | <i>Björk, sid 82</i> |
| | | | | 0,00 | | |
| 70 Sågverksflis | Ringman, 1996 | | | 5,37 | | <i>Tall, sid 37</i> |
| | | | | 5,28 | | <i>Gran, sid 37</i> |
| 80 Sågspån | Nylinder, Törnmark, 1986 | 5,23 | 5,34 | 5,28 | | <i>Barr, olagrad</i> |
| | | 5,18 | 5,24 | 5,22 | | <i>Barr, lagrad</i> |
| 82 Kutterspån | Ringman, 1996 | 5,14 | 5,19 | | | |
| 84 Sågverksflis, torr | Ringman, 1996 | | | | | <i>Samma som för råflis</i> |
| 85 Bark | Nylinder, Törnmark, 1986 | 5,15 | 5,55 | | | <i>Tall, sid 9</i> |
| | | 4,95 | 5,51 | | | <i>Gran, sid 9</i> |

Bilaga 2. Sammanställning av askhalter från olika källor

Askhalt, % av torrsvikt

| Sortiment | Studie | Intervall | | Medelvärde | Riktvärde | Kommentar |
|-----------------------|--|---------------------|---------------------|------------|------------|---|
| | | Min | Max | | | |
| 10 Massaved | Ringman, 1996 | 1 | 1,5 | | 1 | Sid 99. Värdena avser nedklassad massaved. I det senare fallet avses rötskadad massaved. |
| 41 Träddelar | Ringman, 1996 | | | | | Sid 83. Denaturliga askhalten bör ligga mellan ren ved och hyggesrester, dvs. mellan 0,4 och 2%. |
| 51 Grot | Thörnqvist, 1984 Jirjis & Lehtikangas, 1993 Gärdenäs, 1989 | 1,3 1,79 1,77 | 2,1 2,32 3,15 | 2,10 | | Sid 60. Det högre värdet gäller för nyavverkade hyggesrester Sid 16. Täckta vältor. Innehåller även standardavvikelser. Sid 35 |
| 60 Energiskog | Ringman, 1996 | 1 | 1,12 | | | Sid 110. Ringman nämner en annan källa också som anger 2 - 4%. |
| 63 Stamvedsflis | Ringman, 1996 | 1 | 1,5 | | 1 | Sid 99 |
| 64 Grotflis | Ringman, 1996 Thörnqvist, 1986 Thörnqvist & Jirjis, 1990 | 2,5 1,8 1,7 | 3 3,3 3,1 | | | Sid 69. Intervallet gäller för flisade hyggesrester i södra Sverige. Det lägre värdet gäller före lagring, det högre efter lagring Sid 34 |
| 65 Träddelsflis | Ringman, 1996 | | | | | Sid 86. Beror på trädslagsblandning och fördelning stam - grenar. |
| 70 Sågverksflis | Ringman, 1996 | 0,4 | 0,5 | | | Sid 38. Intervallet avser stamvedsflis. |
| 80 Sågspån | Ringman, 1996 | 0,4 | 0,5 | | 0,3 | Sid 45 |
| 82 Kutterspån | Ringman, 1996 | 0,4 | 0,5 | | | Sid 47. Intervallet avser stamvedsflis. |
| 84 Sågverksflis, torr | Ringman, 1996 | 0,4 | 0,5 | | 0,3 | Sid 42. Intervallet avser stamvedsflis. |
| 85 Bark | Ringman, 1996 | | | | 2,2 2,8 | Sid 52. Barrträd Sid 52. Björk |

Bilaga 3 Procedurer för bestämning av parametervärden

Exempel: grotfllisleveranser till ett värmeverk



En vanlig grotfllisleverans



$$\frac{TH_1+TH_2+TH_3+TH_4+TH_5+TH_6+TH_7+TH_8+TH_9+TH_{10}+TH_{11}+TH_{12}}{12} = \text{Medeltorrhalt}$$

$$\text{Värmevärde} = \text{Vedvikt} \cdot \left(\left(h_{\text{eff}} \cdot \left(1 - \frac{A}{100} \right) \cdot \frac{TH}{100} - \Delta H_{\text{vap}} \cdot \left(1 - \frac{TH}{100} \right) \right) \right)$$

t.ex. 33 ton
Schablonvärde 5,33
Schablonvärde 2,1%
Konstant: 0,678

Vedvikt = virkets råvikt, ton
 h_{eff} = effektivt värmevärde i askfri TS (torrsubstans) MWh/ton
 TH = torrhalt i viktsprocent (%)
 A = askhalt i viktsprocent av TS (%)
 ΔH_{vap} = ångbildningsvärme per ton vatten i bränslet

Till SDC

Inmätningssrapport:
 Värmevärde: 85 MWh
 Vedvikt: 33 ton
 Torrhalt: XX,X ton
 ...
 ...

En gång i kvartalet



Stickprover från generalprov skickas till BELAB

Bombkalorimeter-
analys Askhalts-
bestämning Elementar-
analys

Analysrapport:

W_{kal} ...
 Askhalt...
 Vätehalt...
 h_{eff} ...

Dessa analysvärden används för att justera schablonvärden för nästkommande period för resp. sortiment vid just det här värmeverket.

Bilaga 4. Data från laboratorieanalyser

Nedan visas exempel på laboratorieanalyseresultaten från E.on. i Örebro och Ena Energi i Enköping. Varje analys representerar ett antal leveranser från olika partier från specifika leverantörer tagna under en viss tidsperiod. Resultaten visar att det är spridning i nedanstående parametervärden inom ett visst sortiment, vilket är i överensstämmelse med resultaten från litteraturgenomgången. Vidare kan observeras att grot och bark generellt sett har högre h_{eff} -värden än de veddominerade sortimenten stamvedsflis och sågspån. Skillnaderna är dock mindre för motsvarande W_a -värden p.g.a. högre askvärden i grot och bark. Vissa askvärden avviker kraftigt p.g.a. föroreningsaska och har markerats med gul färg. Följaktligen är W_a -värdena avsevärt lägre i dessa fall.

| Sortiment | Kraftvärmeverk | Askhalt | W_a | h_{eff} |
|---|-------------------|------------|--------------------|-------------------------|
| | | % | MWh/tTV inkl. aska | MWh/tTV askfri substans |
| 63 Stamvedsflis | E.on. Örebro | 0,7 | 5,178 | 5,212 |
| | | 0,6 | 5,214 | 5,246 |
| | | 0,6 | 5,263 | 5,294 |
| | | 0,8 | 5,169 | 5,209 |
| | | 1 | 5,181 | 5,231 |
| | | 0,6 | 5,219 | 5,253 |
| | Ena Energi | 1 | 5,171 | 5,225 |
| | | 1,1 | 5,167 | 5,222 |
| | | 0,9 | 5,206 | 5,251 |
| | | 1 | 5,17 | 5,223 |
| | | 1 | 5,17 | 5,223 |
| | Medelvärde | | 0,84 | 5,19 |
| 64 Grot | E.on. Örebro | 3 | 5,455 | 5,625 |
| | | 2,9 | 5,345 | 5,506 |
| | | 3,2 | 5,201 | 5,373 |
| | | 3,5 | 5,425 | 5,624 |
| | | 7,5 | 5,117 | 5,529 |
| | | 7,4 | 5,116 | 5,525 |
| | | 1,9 | 5,282 | 5,382 |
| | | 18,8 | 4,394 | 5,413 |
| | Ena Energi | 2,6 | 5,535 | 5,685 |
| | | 2,3 | 5,323 | 5,54 |
| | | 2,6 | 5,176 | 5,316 |
| | | 3,3 | 5,351 | 5,531 |
| | | 3,1 | 5,424 | 5,598 |
| | | 2,5 | 5,559 | 5,699 |
| | | 2,8 | 5,454 | 5,612 |
| | | 9,5 | 4,964 | 5,483 |
| | | 15 | 4,513 | 5,307 |
| | | 3,1 | 5,424 | 5,598 |
| | | 2,3 | 5,413 | 5,542 |
| | | 13,9 | 4,609 | 5,353 |
| Medelvärde (exkl. gulmarkerad rutor) | | 2,8 | 5,2 | 5,51 |
| 80 Sågspån | E.on. Örebro | 0,4 | 5,258 | 5,278 |
| | | 0,37 | 5,28 | 5,299 |
| | | 0,32 | 5,301 | 5,318 |
| | | 0,28 | 5,276 | 5,291 |
| | | 0,32 | 5,373 | 5,39 |
| | | 0,6 | 5,174 | 5,205 |
| | Medelvärde | | 0,38 | 5,28 |
| 85 Bark / 89 Stådbark | E.on. Örebro | 4,1 | 5,335 | 5,562 |
| | | 3,5 | 5,317 | 5,51 |
| | | 3 | 5,47 | 5,641 |
| | | 3,2 | 5,34 | 5,515 |
| | | 5,9 | 5,214 | 5,543 |
| | | 3,1 | 5,235 | 5,403 |
| | Medelvärde | | 3,8 | 5,32 |

Bilaga 5 Osäkerhetsbudget

Beräkningarna av osäkerhetsbudgetar bygger på en standardmetod för att beräkna noggrannhet vid mätningar, GUM (JCGM 2008). Beräkning av osäkerheten vid inmätning av trädbränsle baseras på energiberäkningsformeln. För varje parameter har en osäkerhetsfaktor (standardosäkerhet) beräknats. En standardosäkerhet motsvarar en standardavvikelse. Budgeten belyser hur faktorernas respektive osäkerhet påverkar osäkerheten för bestämning av det totala energiinnehållet. Beräkningarna har ställts upp i Excel enligt samma metodik som Örnemark (2014).

| Rad | Kolumn | A | B | C | D | E | F |
|-----|--------------------------|-------------------|--------|-----------------|---------|----------|--------|
| 1 | | | Råvikt | Eff. Värmevärde | Askhalt | Torrhalt | Hvap |
| 2 | | Antagna värden | 40 | 5,3 | 0,8 | 60 | 0,678 |
| 3 | | Standardosäkerhet | 0,115 | 0,0582 | 0,231 | 1,6 | 0,0098 |
| 4 | Råvikt | 40 | 40,115 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| 5 | Eff. Värmevärde | 5,3 | 5,3 | 5,3582 | 5,3 | 5,3 | 5,3 |
| 6 | Askhalt | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,031 | 0,8 | 0,8 |
| 7 | Torrhalt | 60 | 60 | 60 | 60 | 61,6 | 60 |
| 8 | Hvap | 0,678 | 0,678 | 0,678 | 0,678 | 0,678 | 0,6878 |
| 9 | | | | | | | |
| 10 | MwH | 115,3 | 115,7 | 116,7 | 115,0 | 119,1 | 115,2 |
| 11 | Avvikelse | | 0,3 | 1,4 | -0,3 | 3,8 | -0,2 |
| 12 | Avvikelse i kvadrat | | 16,6 | 0,1 | 1,9 | 0,1 | 14,4 |
| 13 | osäkerhet (k) för MwH | | 4,1 | | | | |
| 14 | osäkerhet x 2 (U) | | 8,1 | | | | |
| 15 | Andelar av osäkerhet (%) | | 0,7% | 11,6% | 0,5% | 87,1% | 0,1% |
| 16 | Relativ osäkerhet (%) | | 7,1 | | | | |

Överst i arket (rad 1) ses de olika ingående parametrarna, på (rad 2) de antagna värdena i exemplen och (rad 3) de antagna osäkerhetsfaktorerna (standardosäkerhet). De antagna värdena har ställts upp på motsvarande vis till vänster i arket (kolumn A, rad 4-8).

I första steget sätts de antagna värdena för respektive parameter in i arket (raderna 4-8). I de gulmarkerade rutorna används de antagna värdena, men här adderas osäkerhetsfaktorn till det värdet.

I nästa steg beräknas energiinnehållet (på rad 10) enligt ekvation 1 med de ingående parametrarna i respektive kolumn. Värdet i rad 10, kolumn A (115,3) motsvarar en leverans som endast använder de antagna värdena (se kolumn A), utan någon standardosäkerhet adderad till någon parameter. För övriga kolumner adderas osäkerheten för respektive parameters kolumn till energibestämningen.

Därefter beräknas avvikelsen i varje kolumn på rad 11 genom att ta varje enskild kolumns energivärde (rad 10, kolumn B-F) i förhållande till standardleveransen (rad 10, kolumn A). Det man ser på rad 11 är alltså hur många MWh avvikelse man får av respektive parameters osäkerhetsfaktor i förhållande till en leverans med endast de antagna värdena.

För att i nästa steg beräkna spridningen kring denna parameter kvadrerar man den (beräknar variansen, se rad 12) innan de kvadrerade avvikelserna summeras längst till vänster på rad 12. Anledningen till att dessa kvadreras är att vissa av avvikelserna är större än standardleveransen (115,3) och vissa är mindre. Skulle man summera dessa direkt kommer de positiva och negativa

värden att påverka varandra så att osäkerheten sjunker. För att kringgå detta kvadreras alla avvikelser innan de summeras – exakt på samma sätt som vid beräkning av standardavvikelse.

Nästa steg (rad 13, kolumn A) är att ta kvadratroten ur den sammanlagda kvadrerade avvikelserna (rad 12, kolumn A) som då blir den sammanlagda osäkerhetsfaktorn (motsvarande en standardavvikelse för energibestämningen).

Denna sammanlagda standardosäkerhet multipliceras sedan på rad 14 med två för att då omfatta c:a 95 % av inmätningarna (2 x standardavvikelsen förväntas innefatta c:a 95 % av spridningen) – den utökade standardosäkerheten. Vi kan förvänta oss att 95 av 100 inmätningar av en leverans med de givna förutsättningarna har mindre avvikelse än denna osäkerhet (rad 14, kolumn A, $\pm 8,1$ MWh).

För att ställa detta i relation till energiinnehållet i leveransen, förutsatt de antagna värdena delar vi 8,1 (rad 14, kolumn A) med 115,3 (rad 10, kolumn A) för att få den relativa osäkerheten. Den relativa osäkerheten för leveransen kan ses i rad 16, kolumn A (i procent).

Det enda som nu kvarstår är att beräkna vilken av de ingående parametrar som har störst inverkan på den totala osäkerheten. Detta gör man genom att ställa varje kolumns kvadrerade avvikelse (varians) i förhållande till den sammanlagda kvadrerade avvikelserna (rad 12). Genom att dela den kvadrerade avvikelserna för varje kolumn med den sammanlagda kvadrerade avvikelserna kan man se hur stor andel av osäkerheten som varje parameter uppgår till (rad 15, kolumn B-F).

För alla testade sortiment har olika standardosäkerheter använts, dessa listas nedan. För H_{eff} , aska och torrhalt har beräknade standardavvikelser använts vilka då har antagits vara normalfördelade. För råvikt har den maximalt tillåtna avvikelserna vid daglig/veckovis kontroll använts, den har då antagits varit rektangelfördelad vilket inneburit $(0,2/\sqrt{3}) = 0,115$. För ångbildningskonstanten har samma antagande använts, men här med skillnaden mellan 0-gradig och 25-gradig ångbildningskonstant; $(0,017/\sqrt{3}) = 0,0098$.

| | Råvikt | H_{eff} | Aska | Torrhalt | | Ångb.konst. |
|--------------|--------|------------------|-------|----------|--------|-------------|
| | | | | 6 prov | 1 prov | |
| Stamvedsflis | 0,115 | 0,058 | 0,23 | 1,6 | 3,9 | 0,0098 |
| Grot | 0,115 | 0,087 | 0,7 | 2 | 4,9 | 0,0098 |
| Bark | 0,115 | 0,122 | 1,2 | 1,7 | 4,1 | 0,0098 |
| Spån | 0,115 | 0,033 | 0,075 | 0,4 | 1 | 0,0098 |