



Mätosäkerhet vid CO₂ övervakning

Mats Lidbeck, Peter Lau, Gunn-Mari Löfdahl

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Mätosäkerhet vid CO₂ övervakning

Mats Lidbeck, Peter Lau, Gunn-Mari Löfdahl

Abstract

In the operators monitoring plan for Green House Gas (GHG)¹, evidence demonstrating compliance with the uncertainty thresholds for activity data and other parameters (when applicable) is expected to be included. If the so called “fall-back approach” is applied, an uncertainty analysis for the complete operation, shall be presented.

The European Directive and Decisions on GHG, is implemented in Sweden through the Decree NFS 2007:5. To support the understanding of Measurement Uncertainty by Operators, but also other concerned parties such as Accredited Verifiers and Competent Authorities, this guide has been produced at the request of the Swedish Environmental Protection Agency. The guide is focusing on the handling of liquids and to some extent to the influence of humidity in materials.

Key words: NFS 2007:5 koldioxid utsläppsrätter mätosäkerhet flödesmätare temperaturkompensering aktivitetsdata effektivt värmevärde emissionsfaktor

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2007:57
ISBN 978-91-85829-26-2
ISSN 0284-5172
Borås 2007

¹ According to the Commissions Decision 2007/589/EG, establishing guidelines for the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions, pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council.

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte och avgränsningar	7
2	Osäkerhet i aktivitetsdata	8
2.1	Definitioner	8
2.2	Om mätosäkerhet i föreskriften	9
2.3	Att beräkna mätosäkerhet för aktivitetsdata	10
2.4	Summering av osäkerheter	12
2.4.1	Okorrelerade osäkerheter för en summa	13
2.4.2	Samverkande osäkerheter för en summa	14
2.4.3	Okorrelerade osäkerheter för en produkt	14
2.5	Oljor, tillämpningsexempel	16
2.5.1	Metod a. Förbrukat bränsle mäts i anslutning till förbränning	16
2.5.2	Metod a – EO1 genom mätare (exempel A)	16
2.5.3	Metod a – EO5 genom differens mellan mätare (exempel B)	18
2.5.4	Metod a – EO5 genom nivåändring i cistern (exempel C)	21
2.5.5	Metod b. Förbrukat bränsle genom massbalansmetoden	26
2.5.6	Metod b – Inleverans av EO5 i volym (exempel D)	26
2.5.7	Metod b – Inleverans av EO5 i vikt (exempel E)	28
2.6	Fasta bränslen, tillämpningsexempel	31
2.6.1	Metod b. Förbrukat bränsle genom massbalansmetoden	31
2.6.2	Metod b – Inleverans av vikt av torv (exempel F)	31
3	Osäkerhet i emissionsfaktorer, värmevärden etc	35
3.1	Om provtagning & analysfrekvens i föreskriften	35
3.2	Provtagnings- och analysosäkerhet	35
3.3	Fukthaltsbestämning	39
Bilaga A	Mätosäkerhetsfilosofi	42
Bilaga B	Sammanställning av mätosäkerhet för flödesmätare	54

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Ett system för utsläppsrätter för koldioxid infördes år 2005, som följd av Kyotoprotokollet och EG-direktiv 2003/87/EG. Inför den andra handelsperioden som startar 2008, meddelade kommissionen genom beslut 2007/589/EG vissa nya och förändrade riktlinjer för övervakningen och rapporteringen av utsläppen av växthusgaser. Baserat på dessa, har Naturvårdsverket uppdaterat den svenska föreskriften och allmänna råd för utsläppsrätter för koldioxid, NFS 2007:5. I föreskriften framgår krav på att verksamhetsutövaren ska kunna ge belägg för att osäkerheten i övervakningsnivåerna kan följas (8 §) samt skall ha kunskap om osäkerheten i de utsläppsdata och de mätningar som utförs (Bilaga 1, 1.2.1). Föreskriften ger även möjlighet till alternativ övervakningsmetod (24 §) som inte är nivå-baserad utan där verksamhetsutövaren i en osäkerhetsanalys ska visa att hela anläggningen klarar den totala osäkerhetströskeln.

Att krav ställs på mätosäkerhet kan ses logiskt, med hänsyn till de ekonomiska värden som utsläppshandeln förväntas innebära. Om en utsläppsmängd har en stor okänd osäkerhet, kan ju mängden i praktiken vara betydligt större eller betydligt mindre än det som rapporteras, och jämförbarheten och rättvisan mellan berörda anläggningar blir osäker. Även storleken på landets totala utsläpp blir osäkrare.

1.2 Syfte och avgränsningar

Denna rapport är framtagen på uppdrag av Naturvårdsverket, i syfte att fungera som vägledning till verksamhetsutövare, ackrediterade kontrollörer och myndigheter i frågor som rör mätosäkerhet i samband med övervakningen enligt handelssystemet för utsläppsrätter. Målsättningen har varit att genom exempel ge förståelse för praktiska metoder för att beräkna mätosäkerheten hos mätinstrument och mätsystem.

Rapporten avser tillämpningen vid beräkning (dvs ej vid kontinuerlig mätning i rökgas-kanal) och är enligt uppdraget begränsad till bränslena oljor och fasta bränslen (motsvarande metod kan dock även tillämpas vid t.ex. gasformiga bränslen, om hänsyn tas till tryck- och temperaturkompensering).

2 Osäkerhet i aktivitetsdata

2.1 Definitioner

I inledningen av föreskriften NFS 2007:5, ges korta beskrivningar / förklaringar av ett antal ord som sedan används. Följande är av intresse även för denna rapport:

Utdrag ur NFS 2007:5, 3 §:

- | | |
|----|--|
| 2 | <i>Aktivitetsdata</i> : Förbrukad mängd bränsle/material. |
| 7 | <i>Bränsle/material</i> : En specifik typ av bränsle, råmaterial eller produkt som ger upphov till utsläpp av fossil eller biogen koldioxid. |
| 9 | <i>Emissionsfaktor</i> : Faktor som anger förhållandet mellan utsläppt mängd koldioxid och bränslets eller materialets energiinnehåll, massa eller volym. |
| 20 | <i>Massbalans</i> : Utsläppskälla där aktivitetsdata bestäms genom massbalansmetoden. |
| 21 | <i>Massbalansmetod</i> : Beräkningsmetod enligt Metod b i bilaga 2 avsnitt 1.1.1 eller beräkningsmetod enligt bilaga 4 avsnitt 2. |
| 22 | <i>Mätsystem</i> : System för att genom mätning fastställa en variabls värde. I mätsystemet ingår hela kedjan från mätställe till det värde som används i, eller som underlag till rapport. |
| 23 | <i>Noggrannhet</i> : Grad av överensstämmelse mellan mätresultatet och det sanna värdet på en mätstorhet (eller ett referensvärde som fastställs empiriskt med användande av internationellt accepterade och spårbara kalibreringsmaterial och standardmetoder), med beaktande av både slumpmässiga och systematiska faktorer. |
| 25 | <i>Osäkerhet</i> : En parameter förbunden med resultatet av en skattning av bredden på ett värdeområde inom vilket mätstorhetens sanna värde förmodas ligga, inbegripet effekterna av både systematiska och slumpmässiga faktorer. Osäkerheten uttrycks i procent och beskriver ett konfidensintervall som omfattar 95 % av de värden som fås fram med beaktande av varje asymmetri i spridningen av värden. |
| 28 | <i>Parti</i> : En viss mängd bränsle/material som transporteras i en omgång eller löpande över en viss tidsperiod. |
| 33 | <i>Standardförhållanden</i> ² : en temperatur på 273,15 K (dvs. 0 °C) och tryckförhållanden på 101,325 Pa, som definierar normala kubikmeter (Nm ³). |
| 35 | <i>Osäkerhetsanalys</i> : En sådan osäkerhetsanalys som beskrivs i avsnitt 1.3.1 i bilaga 1. |
| 37 | <i>Utsläppskälla</i> : En separat identifierbar punkt, massbalans eller process från vilken koldioxid släpps ut i en anläggning. |
| 43 | <i>Årsutsläpp</i> : De sammanlagda utsläppen av fossil koldioxid från en anläggning under ett kalenderår. |
| 44 | <i>Övervakning genom beräkning</i> : Fastställande av utsläpp i enlighet med bestämmelserna i bilagorna 2 – 11 genom multiplikation av värden för aktivitetsdata och emissionsfaktor samt i förekommande fall med effektivt värmevärde, oxidationsfaktor eller omvandlingsfaktor. |
| 45 | <i>Övervakningsmetod</i> : De tillvägagångssätt som används för att fastställa utsläpp, vilket innefattar val mellan beräkning och kontinuerlig mätning. Tillvägagångssätt omfattar även metod för fastställande av verksamhetsspecifika värden, övervakningsnivå, formel i bilaga, mätsystem, datahantering och kontrollsystem. |
| 46 | <i>Övervakningsnivå</i> : Den maximala osäkerhet med vilken man fastställer aktivitetsdata, emissionsfaktor, effektiva värmevärden, oxidationsfaktor eller omvandlingsfaktor. |
| 47 | <i>Övervakningsprogram</i> : En sammanhängande redovisning av hur övervakning av utsläpp ska göras på en anläggning. |

² Notera att kommatecknet i trycket avser tusentalsavgränsning samt att standardförhållanden på oljor och stadsgas definieras annorlunda i föreskriftens avsnitt 2.2 i bilaga 1

2.2 Om mätosäkerhet i föreskriften

Föreskriften tar upp frågan om mätosäkerhet dels i samband med övervakningsprogram i §8 §, dels mer detaljerat i Bilaga 1.

I 8 §, som avser när övervakningen sker genom beräkning, anges att verksamhetsutövarens övervakningsprogram skall innehålla:

4. Belägg för att osäkerheten i övervakningsnivåerna kan följas när det gäller aktivitetsdata och, i förekommande fall, andra parametrar för de nivåer som tillämpas på varje bränsle/material.

I avsnitt 1.2.1 i bilaga 1 NFS 2007:5 står bland annat följande om mätosäkerhet;

Vid övervakning genom beräkning skall verksamhetsutövaren ha kunskap om osäkerheten i de utsläppsdata som rapporteras.

För mätutrustning som används vid övervakning genom beräkning skall verksamhetsutövaren bedöma mätutrustningens mätosäkerhet för att kunna avgöra vilken övervakningsnivå som mätutrustningen uppfyller. Bedömningen av mätutrustningens mätosäkerhet skall omfatta:

- Osäkerheten hos alla komponenter i hela mätsystemet
- Osäkerhet i samband med kalibrering
- Eventuellt ytterligare osäkerhet beroende på hur mätutrustningen används i praktiken

Verksamhetsutövaren skall beräkna den osäkerhet som är förbunden med fastställandet av aktivitetsdata för varje bränsle/material. Beräkningen skall baseras på de specifikationer som tillhandahålls av leverantören av mätutrustningen. Om dessa specifikationer inte finns tillgängliga skall verksamhetsutövaren utföra en osäkerhetsbedömning av mätutrustningen. I bägge fall skall beräkningen ta hänsyn till nödvändiga korrigeringar av dessa specifikationer från effekter till följd av de faktiska användarförhållandena. Effekter kan vara utrustningens ålder, villkor i den fysiska miljön, kalibrering och underhåll. Dessa korrigeringar kan inkludera en konservativ sakkunnig bedömning.

Vid dessa beräkningar skall mätosäkerhet uttryckas som kombinerad mätosäkerhet under ett kalenderår för hela mätsystemet uttryckt som den relativa mätosäkerheten i procent av mätvärdet vid en konfidensnivå av 95 %. Även de osäkerhetssiffror som anges i övervakningsnivåer i bilaga 2 – 11 avser kombinerad mätosäkerhet under ett kalenderår för hela mätsystemet uttryckt som den relativa mätosäkerheten i procent av mätvärdet vid en konfidensnivå av 95 %.

Föreskriften ställer alltså förväntningar på att verksamhetsutövaren har kunskap om mätosäkerheten för varje bränsle/material samt anger riktlinjer för vad som förväntas ingå i bedömningen och hur resultatet skall uttryckas. Det är den praktiska tillämpningen av detta som denna rapport är avsedd att ge en vägledning till.

Vid kommersiella bränslen som hanteras med osäkerhetskrav enligt ”relevanta nationella eller internationella standarder för kommersiella transaktioner” tillåts enklare hantering. Denna tillämpning ingår dock inte i denna rapport (för tillämpningsmöjligheterna refereras till Naturvårdsverkets tolkning).

2.3 Att beräkna mätosäkerhet för aktivitetsdata

Föreskriften ger oss alltså både en förklaring/definition av ”Osäkerhet” och en guide om vilka aspekter vi behöver ta hänsyn till. Mätningar är ju sällan eller aldrig exakta, utan påverkas av ett flertal faktorer. Den mätosäkerhet vi kommer fram till, ska ju indikera inom vilket område det verkliga ”sanna” värdet ligger.

”Alla komponenter i hela mätsystemet” innebär att allt som kan påverka osäkerheten, från själva mätningen till den siffra som rapporteras i utsläppsrapporten, förväntas ingå i osäkerhetsbedömningen. Vi behöver alltså identifiera vårt mätsystem och de ingående komponenterna. I mätsystemet för aktivitetsdata ingår vanligen mätinstrumenten, signalhantering, datahantering, mätbetingelser, beräkningar, omräkningsfaktorer, kvalitetsstyrningsrutiner samt rapportering i utsläppsrapporten.

Det är praktiskt att dela upp arbetet att beräkna osäkerheten i ett antal steg:

Steg 1	Beskriv mätsystemet , vilka mätinstrument, vad mäts och hur, vad beräknas och hur, vilka omräkningsfaktorer används samt eventuellt kvalitetsstyrningsrutiner för t.ex. kalibreringsintervall.
Steg 2	Hämta osäkerhetsuppgifter från specifikationerna på använd utrustning samt osäkerheten i omräkningsfaktorer.
Steg 3	Hämta osäkerhetsuppgifter från kalibrering av utrustningen.
Steg 4	Bedöm om ytterligare osäkerheter tillkommer på grund av att mätutrustningen används utanför sina specificerade ramar.
Steg 5	Bedöm hur tiden inverkar på osäkerheten i mätningarna.
Steg 6	Bedöm om det finns osäkerhetsbidrag som härrör från hur mätningen utförs , som inte har med mätutrustningen att göra.
Steg 7	Summera osäkerhetsbidragen från steg 2 till steg 6 för mätsystemet.
Steg 8	Summera aktivitetsdata för året för det aktuella bränsle/materialet från olika mätsystem och beräkna osäkerheten för den totala mängden aktivitetsdata uttryckt som den relativa mätosäkerheten.

I följande avsnitt kommer vi att tillämpa detta för ett antal olika exempel, men generellt kan de olika stegen tillämpas enligt följande.

Steg ett skall alltid ingå, då det är i detta steg som omfattningen av mätosäkerhetsberäkningen definieras

Steg två kommer också alltid att finnas med. Helst bör instrumentleverantörens data användas, eventuellt kombinerat med egna erfarenheter. I specifikationerna från mätarleverantörerna används flera olika sätt att beskriva hur noggrann en mätare är. Det är tyvärr sällan som uttrycket mätosäkerhet används. I specifikationerna hittar vi istället uttryck som max felvisning, max fel, noggrannhet, accuracy osv. Det framgår sällan för vilket konfidensintervall som noggrannheten är angiven. Om vi inte kan få uppgiften från leverantören, måste vi göra ett antagande och då kan det vara rimligt att anta att värdet gäller vid 95% konfidensnivå.

I specifikationerna kan ibland noggrannheten även specificeras som bestående av flera komponenter, t.ex. en grundnoggrannhet plus en komponent som beskriver hur mycket som kommer till på grund av mätning vid olika temperaturer.

Mätosäkerhetsbidraget från mätutrustningen sätts alltså till de data om max felvisning, noggrannhet eller annat som har motsvarande betydelse, som vi kan hitta i specifikationen.

Men om specifikationer saknas på använd utrustning, får informationen hämtas från annat lämpligt håll. Guide för data på flödesmätare kan t.ex. hämtas från bilaga B. Osäkerheten i omvandlingsfaktorer och liknande behöver också bedömas, t.ex. densitet vid normaltillstånd, temperaturutvidgningskoefficienter för omräkning till normalkubikmeter m.m. Tänk också på att signalhanteringen kan bidra med osäkerheter, där t.ex. ström, spänning, resistans eller pulser mäts/räknas eller omvandlas.

Steg tre ingår också normalt alltid, då ju föreskriften föreskriver kalibrering. Mätosäkerheten skall framgå från kalibreringsbeviset. Det är ofta inte möjligt att kalibrera instrumentet på ett sådant sätt att all påverkan från montering och övriga mätbetingelser vid normal användning, undersöks i kalibreringen. Det innebär att osäkerheten från kalibreringen endast blir en av komponenterna i mätosäkerhetsberäkningen. Kalibrering av mätutrustningen kan ofta utföras på olika sätt, med olika stor osäkerhet som följd. Detta behöver uppmärksammas när kalibreringen beställs.

Med hjälp av kalibreringen bekräftas mätutrustningens mätförmåga och ett underlag fås för att korrigera för mätutrustningens felvisning. Det är kalibreringens viktigaste funktion och föreskrifterna förutsätter att korrektioner utförs för alla kända fel som kan påverka mätresultaten. I kalibreringsbeviset redovisas resultatet ofta antingen som korrektion eller som felvisning (det finns även andra sätt; t.ex. som en mätares K-faktor). Korrektion och felvisning har samma siffervärde men olika tecken, vilket alltså är mycket viktigt att observera. En korrektion är ett värde som skall läggas till det uppmätta värdet för att få ”rätt värde”. En felvisning är ett värde som skall dras ifrån det uppmätta värdet för att få ”rätt värde”.

Att mätvärdet har korrigerats med hänsyn till det från kalibreringen kända mätfelet, förutsätts även vara gjort i exemplen senare i denna rapport.

Om kalibrering, trots krav, skulle saknas, behöver en utredning göras av hur stor osäkerhet som kan bedömas tillkomma. Detta kan behandlas under denna punkt eller under punkt fyra.

Steg fyra kan utgå om den mätutrustning som valts, är lämplig och har dimensionerats och installerats på ett bra sätt i förhållande till aktuell mätsituation, så att man kan anta att mätutrustningen används inom sina specificerade ramar. I annat fall får osäkerhetsbidragen från användning utanför specifikationens ramar uppskattas. Det kan t.ex. gälla montering (för kort raksträcka eller rörkrökar framför flödesmätaren), omgivningstemperatur, andra mätmiljöparametrar, mätområde, underhåll och service samt egenskaper på det som skall mätas t.ex. temperatur och viskositet på oljan i en bränslemätare. Denna bedömning kan grunda sig på egna erfarenheter av liknande situationer, konsultation av instrumentleverantören eller andra som besitter kunskap på området.

I steg fem skall en bedömning av osäkerheten på grund av drift med tid och användning utföras. Kalibreringshistorik kan användas för att göra denna bedömning. Genom att titta på skillnaden i felvisning från en kalibrering till en annan kan man få en uppfattning om hur mycket instrumentet kan ändra sig mellan två kalibreringstillfällen. Om utrustningen bara är kalibrerad en gång kan tidigare erfarenheter från liknande mätförhållanden och ut-

rustningar användas samt konsultation av instrumentleverantör eller andra med kunskap inom området.

I steg sex skall en bedömning göras om tillvägagångssättet för mätningen kan innebära risker för osäkerhetsbidrag som inte direkt kan hänföras till själva mätutrustningen. Som exempel kan nämnas att då antal ton bränsle mäts genom att en lastbil vägs före och efter leverans av bränslet antas att själva lastbilen har samma vikt då den kör in som när den kör ut. Detta kanske inte alltid är fallet. Om det finns möjlighet att väga lastbilen med eller utan förare/passagerare kan detta bidra till osäkerheten i mätningen. Detta bidrag kan minskas/elimineras genom rutiner och information av förare och eventuell vågpersonal. Vi kan också tänka oss att det finns möjlighet att tanka lastbilen mellan in- och utvägning. Ett annat exempel är då temperaturen skall mätas som underlag till en temperaturkompensering. Specifikationen och kalibreringen av temperaturinstrument med givare har ofta en mycket lägre mätosäkerhet än den uppskattning av t.ex. medeltemperaturen under en månad som vi egentligen vill veta.

I steg sju skall osäkerhetskomponenterna från de olika bidragen summeras till en sammanvägd osäkerhet för mätsystemet på årsbasis. Detta steg kan delas in i följande punkter;

- Lista de identifierade osäkerhetskomponenterna och storleken på dessa
- Beräkna hur stor osäkerheten blir i aktivitetsdata på grund av de i första punkten listade komponenterna var och en för sig.
- Summera osäkerhetskomponenterna i aktivitetsdata med beaktande av felfortplantningslagen³.
- Uttryck mätosäkerheten i aktivitetsdata som den relativa mätosäkerheten i procent av mätvärdet vid en konfidensnivå av 95 %.

Steg åtta ska användas om flera mätsystem används för att mäta upp den totala mängden aktivitetsdata, för att summera aktivitetsdata från de olika delströmmarna samt beräkna den totala mätosäkerheten för aktivitetsdata för bränsle/materialet på årsbasis med beaktande av felfortplantningslagen. Mer om detta i följande avsnitt.

2.4 Summering av osäkerheter

I NFS 2007:5⁴ hänvisas bland annat till GUM, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" som referens för felfortplantningslagen. I GUM beskrivs ett sätt att beräkna mätosäkerhet på ett standardiserat sätt men för att använda metoden i GUM⁵ krävs en del kunskaper i statistik och en hel del matematik på högskolenivå. I exemplen senare i detta kapitel presenteras därför en förenklad metod, som är helt godtagbar för uppskattningen av mätosäkerheten med hänsyn till kraven på maximal osäkerhet i övervakningsnivåerna.

Den förenklade beräkningen av mätosäkerheten skiljer sig från GUM framförallt genom att kombinationen av felbidragen sker på en konfidensnivå som motsvarar en standardavvikelse, för att därefter expanderas till 95 % med antagandet av en normalfördelad mätosäkerhet. Detta är också den nivå som skall användas som konfidensnivå enligt NFS 2007:5. I den förenklade beräkningsmodellen som vi kommer att använda i exemplen och som föreskrifterna också utgår ifrån, blir konfidensnivån någonstans mellan 95 % och 100 %. Beroende på storleken och typ av påverkande osäkerhetsbidrag kan det innebära

³ Innebörden av felfortplantningslagen framgår av bilaga A.

⁴ I bilaga 1 avsnitt 1.2.1. i stycket med rubriken "Beräkning av osäkerhet"

⁵ Hur GUM helt korrekt skall tillämpas framgår av bilaga A.

en liten skillnad i förhållandet till den strikta behandlingen i GUM. Detta är dock helt acceptabelt med hänsyn till förenklingen i proceduren och de satta nivåerna i föreskriften.

I bilaga 1 i föreskrifterna finns några exempel på hur summeringen av osäkerhetskomponenter går till. Där görs motsvarande förenklade ansats att summera bidragen direkt på den avsedda konfidensnivån. I exemplen skiljer man även på korrelerade och okorrelerade mätosäkerheter. Här följer en förklaring av vad det betyder⁶.

Mätosäkerheten är ett uttryck för bristen i kunskap om den uppmätta storheten. Den säger dock att det rätta värdet med 95 % sannolikhet måste ligga i intervallet mätvärdet \pm mätosäkerheten. För en viss mätning har felet en viss storlek i förhållande till ett tänkt sant värde. Men vi vet inte vilket värde eller vilket tecken som står framför, minus eller plus. Vi tänker oss nu att vi skall lägga ihop resultaten från flera olika mätningar, där varje mätning har en viss osäkerhet. Om då felet i varje enskild mätning är slumpmässigt till storlek och tecken inom angiven mätosäkerhet, borde felen till viss del ta ut varandra och den sammanlagda osäkerheten minska något. Den relativa osäkerheten i procent av summan blir då mindre än de relativa osäkerheterna i procent av varje mätvärde. Vi talar då om okorrelerade osäkerheter, dvs. de är inte på något sätt beroende av varandra.

Om vi istället tänker oss att osäkerheten kommer från ett okänt men systematiskt mätfel, som blir lika stort vid varje mätning. Då kommer felet i varje mätningen att ha samma storlek, samma tecken och felen i de olika mätningarna kommer inte alls att ta ut varandra. Den relativa osäkerheten i procent av summan kommer att vara det samma som den relativa osäkerheten i procent av varje mätvärde. Vi talar då om korrelerade osäkerheter, dvs det finns en gemensamhet mellan mätningarna som gör de på något sätt beroende av varandra.

- Okorrelerade mätosäkerheter – olika oberoende faktorer tar till del ut varandra
- Korrelerade mätosäkerheter – samma faktor påverkar varje mätning och upprepade mätningar minskar inte osäkerheten.

Föreskriften ger i avsnitt 1.2.1 i bilaga 1. följande praktiska exempel på hur felfortplantningslagen kan tillämpas i några olika fall.

2.4.1 Okorrelerade osäkerheter för en summa

Osäkerhet för en summa med okorrelerade osäkerheter för ingående termer.

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \times x_1)^2 + (U_2 \times x_2)^2 + \dots + (U_n \times x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

U_{total} är summans osäkerhet, uttryckt i procent;

U_i är termernas olika osäkerheter, uttryckt i procent av x_i som är värdet på de olika termerna

För att visa användningen av formeln och konsekvensen av summeringssättet visas här ett exempel. Vi skall summera aktivitetsdata för ett bränsle, för ett år, uppmätt med tre olika mätsystem. De tre mätsystemen bygger på tre olika mätprinciper vilket gör att vi kan anta att mätosäkerheten i resultaten från vart och ett av mätsystemen är okorrelerade.

De tre mätsystemen har uppmätt följande aktivitetsdata. 1000 kg, 2000 kg samt 4000 kg. Alla tre mätsystemen har en beräknad mätosäkerhet på 3 % av uppmätt aktivitetsdata.

⁶ Se även bilaga A för detaljer.

$$2 \approx \frac{\sqrt{(3 \times 1000)^2 + (3 \times 2000)^2 + (3 \times 4000)^2}}{1000 + 2000 + 4000}$$

När vi använder formeln och summerar osäkerheterna på detta vis minskar alltså den relativa osäkerheten från 3 % i termerna till 2 % i summan. Osäkerhetsvärdena antas, liksom i alla exempel framöver, motsvara en konfidensnivå på ca 95 %. Mer om detta kan du läsa i bilaga A.

2.4.2 Samverkande osäkerheter för en summa

Om vi hade mätt upp samma mängd aktivitetsdata med tre identiska mätsystem med samma mätdata som i förra exemplet borde vi däremot anta att osäkerheterna i termerna är korrelerade. Vi kan då använda följande formel.

$$U_{total} = \frac{(U_1 \times x_1) + (U_2 \times x_2) + \dots + (U_n \times x_n)}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

Med insatta värden enligt ovan får vi följande uttryck

$$3 = \frac{(3 \times 1000) + (3 \times 2000) + (3 \times 4000)}{1000 + 2000 + 4000}$$

Vi ser att vid summering av korrelerade osäkerheter så får vi samma viktade procentuella fel i summan som för termerna.

2.4.3 Okorrelerade osäkerheter för en produkt

För osäkerheten i en produkt kan följande formel användas för okorrelerade osäkerheter

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

Genom ett exempel visar vi användningen av formeln och konsekvensen av summerings-sättet. Vi skall beräkna den totala mätosäkerheten på levererad mängd olja i procent av levererad massa (kg) med hjälp av uppmätt volym och oljans densitet. Levererad massa i kg beräknas genom att volymen multipliceras med densiteten. Massan beräknas alltså som produkt av volym och densitet.

Volymen är uppmätt till 30 m³ med osäkerheten 0,5 % enligt uppgift från leverantören. Densiteten är hämtad från produktdatablad för EO5 på leverantörens hemsida. Hemsidan anger densiteten till 925 – 935 kg/m³ som vanligast men dock max 965 kg/m³. Det ger oss följande uppskattade data på densiteten 930 kg/m³ med en maximal osäkerhet på 35 kg/m³ eller motsvarande 3,8 %. En uppskattning av det maximala felet i densiteten fås genom att ta maxvärdet för densiteten 965 kg/m³ minus vårt uppskattade troliga värde på densiteten 930 kg/m³.

$$3,83 \approx \sqrt{0,5^2 + 3,8^2}$$

Vi ser att osäkerheten i antal ton eldningsolja blir strax över 3,8 %. Vilket är nästan det-samma som osäkerheten i densiteten. Metoden att addera okorrelerade osäkerhetskomp-onenter innebär att det är de största enskilda bidragen som nästan helt bestämmer den tota-

la osäkerheten. Som tumregel kan man göra följande antagande då mätosäkerhetsbidragen är okorrelerade;

Enskilda mätosäkerhetsbidrag som är mindre än $1/5$ av det största bidraget i en mätosäkerhetsberäkning kan strykas då de bidrar i mycket liten utsträckning till den totala mätosäkerheten.

Exempel på tillämpningar av mätosäkerhetsberäkningsmodellen i åtta steg återfinns i resterande del av detta kapitel.

2.5 Oljor, tillämpningsexempel

I detta avsnitt skall vi studera ett antal exempel där mätosäkerheten för aktivitetsdata skall beräknas med hjälp av metoden i åtta steg. Vi skall studera några typfall för att få med de vanligaste osäkerhetskomponenterna samt till viss del titta på hur informationen från kalibreringsbevis kan nyttjas och hur temperaturkompensering av oljan till normal kubikmeter kan gå till. Exempelen är kopplade till de olika övervakningsmetoder som är valbara i NFS 2007:5 bilaga 2.

2.5.1 Metod a. Förbrukat bränsle mäts i anslutning till förbränning

I avsnitt 1.1.1 i bilaga 2 NFS 2007:5 kan vi läsa följande:

Förbrukat bränsle skall mätas i anslutning till förbränningen (utan mellanlagring mellan mätning och förbränning) varvid hela mätsystemet skall ha följande största tillåtna mätosäkerhet;

Övervakningsnivå 1a: $\pm 7,5 \%$

Övervakningsnivå 2a: $\pm 5,0 \%$

Övervakningsnivå 3a: $\pm 2,5 \%$

Övervakningsnivå 4a: $\pm 1,5 \%$

2.5.2 Metod a – EO1 genom mätare (exempel A)

Eldningsolja 1 (EO1) eldas här i en oljepanna och aktivitetsdata mäts med en ringkolvmätare strax före brännaren.

Steg 1. Beskriv mätsystemet, vilka mätinstrument, vad mäts och hur, vad beräknas och hur, vilka omräkningsfaktorer används samt eventuellt kvalitetssäkringsrutiner för t.ex. kalibreringsintervall.

EO1 Förvaras inomhus i mindre cistern. Före brännaren sitter en ringkolvmätare med fast räkneverk som läses av den sista dagen i varje månad. Medeltemperaturen i lokalen under året uppskattas till 15 °C. Vissa tider är den högre, andra lägre. Ingen mätning av temperaturen eller temperaturkompensering av EO1 görs. Flödesmätaren skickas iväg för kalibrering vart femte år. Uppmätt volym olja för en månad korrigeras med hjälp av senaste kalibreringsbeviset och en uppskattning av medelflödes hastigheten under månaden. Medelflödes hastigheten beräknas genom att uppmätt volym under månaden delas med drifttiden på brännaren.

Steg 2. Hämta osäkerhetsuppgifter från specifikationerna på använd utrustning

Mätarens specifikation anger en maximal felvisning på $\pm 1 \%$ vid de aktuella månadsmedelflödet.

Steg 3. Hämta osäkerhetsuppgifter från kalibrering av utrustningen.

Kalibreringen av mätaren anger en mätosäkerhet på $\pm 0,3 \%$

Steg 4. Bedöm om ytterligare osäkerheter tillkommer på grund av att mätutrustningen används utanför sina specificerade ramar.

Vid genomläsning av specifikationen kunde inga förhållanden identifieras som skulle medföra ytterligare osäkerhetskomponenter.

Steg 5. Bedöm hur tiden inverkar på osäkerheten i mätningarna.

Största skillnaden i felvisning från en kalibrering till en annan vid samma flödes hastighet har varit 0,3 %.

Steg 6. Bedöm om det finns osäkerhetsbidrag som härrör från hur mätningen utförs som ej har med mätutrustningen att göra.

Det utförs ingen temperaturkompensering till normalkubikmeter. Ingen direkt mätning av temperaturen sker. En bedömning är att felet i den uppskattade medeltemperaturen inte kan vara större än ± 5 °C.

Steg 7. Summera osäkerhetsbidragen från steg 2 till steg 6 för mätsystemet.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Specifikation av mätare	1 %	1 %
Kalibrering av mätare	0,3 %	0,3 %
Drift	0,3 %	0,3 %
Brist i tempkorr till Nm ³	5 °C	0,45%

Osäkerheten från specifikationen, kalibreringen och driften blir de samma för mätsystemet och är angiven på 95 % konfidensnivå.

För att räkna om osäkerheten i temperatur till osäkerhet i volym behöver vi ha en ungefärlig uppskattning av oljans temperaturutvidgningskoefficient. För EO1 kan den sättas till 0,09 %/°C. Se tabell i bilaga A. Osäkerheten i mätsystemet fås genom att multiplicera temperaturutvidgningskoefficienten med osäkerheten i temperatur, 0,09 %/°C * 5 °C = 0,45 %.

Vid summeringen av osäkerhetsbidragen kan vi använda oss av formeln för summering av okorrelerade bidrag.

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \times x_1)^2 + (U_2 \times x_2)^2 + \dots + (U_n \times x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

Formeln går inte att använda rakt av. Vi kan konstatera att vi bara har ett x, nämligen vår uppmätta volym. Det blir alltså samma värde på x_1 till x_4 ovanför bråkstrecket. Under bråkstrecket blir det bara x_1 . Summan under bråkstrecket är volymen vi vill beräkna osäkerheten för. Detta innebär att vi kan eliminera x_1 ur ekvationen och få samma ekvation som för en produkt med okorrelerade osäkerheter.

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

Med insatta värden får vi följande formel.

$$1,2 \approx \sqrt{1^2 + 0,3^2 + 0,3^2 + 0,45^2}$$

Den totala mätosäkerheten för EO1 mätsystemet hamnar på ca 1,2 % i vårt fall.

Steg 8. Summera aktivitetsdata för året för det aktuella bränsle/materialet från olika mätsystem och beräkna osäkerheten för den totala mängden aktivitetsdata uttryckt som den relativa mätosäkerheten.

I vårt exempel har vi endast en brännare med EO1 på anläggningen. För att summera osäkerheten på årsförbrukningen från de tolv månadsmätningarna krävs en bedömning av om osäkerheten i månadsmätningarna är korrelerade med varandra eller ej. Då mätningen för varje månad sker med samma mätutrustning och mätsystem får vi anta att osäkerheterna är korrelerade. Vi får då samma relativa osäkerhet i procent för årsförbrukningen som för de enskilda månaderna. Punkt 7 ger svaret på mätosäkerheten i aktivitetsdata för EO1 även på årsförbrukningen. Vårt mätsystem uppfyller alltså kraven enligt övervakningsnivå 4a motsvarande en maximal mätosäkerhet på $\pm 1,5\%$.

2.5.3 Metod a – EO5 genom differens mellan mätare (exempel B)

Eldningsolja 5 (EO5) eldas i oljepanna och aktivitetsdata mäts med två ringkolvmätare genom att bilda differensen mellan tillförd olja och olja i retur.

Steg 1. Beskriv mätsystemet, vilka mätinstrument, vad mäts och hur, vad beräknas och hur, vilka omräkningsfaktorer används samt eventuellt kvalitetssäkringsrutiner för t.ex. kalibreringsintervall.

EO5 förvaras i en till 65 °C uppvärmd cistern. Före brännaren värms oljan till 68 °C. Oljetemperaturen efter sista värmningen mäts med en kalibrerad termometer. Termometern kalibreras vart annat år. Termometern läses av en gång per vecka i samband med rondering. Oljevolymer till brännaren beräknas genom differensen mellan oljevolymer till och från brännaren. Två ringkolvmätare används. Temperaturen i de båda mätarna antas vara densamma. Mätarna kalibreras vart femte år. Oljemätarna läses av den siste i varje månad. Uppmätt oljemängd per mätare justeras med hjälp av kalibreringsbevisen på mätarna. Medelflödet i mätarna beräknas genom att uppmätt volym under månaden delas med drifttiden på brännaren. Den beräknade oljevolymer till brännaren räknas om till volymer vid 15 °C med hjälp av produktdatablad EO5 från oljeleverantören.

För en typmånad kan följande mätdata antas;

Olja till brännare 25000 liter

Olja från brännare 15000 liter

Beräknad medeltemperaturtemperatur från fem veckoavläsningar 68 °C med en maximal spridning på veckoavläsningarna på ± 2 °C.

Temperaturutvidgningskoefficient beräknad från leverantörens produktdatablad EO5 sätts till 0,0745 %/°C.

Steg 2. Hämta osäkerhetsuppgifter från specifikationerna på använd utrustning samt osäkerheten i omräkningsfaktorer.

Bränslemätarnas specifikationer anger en maximal felvisning på $\pm 1\%$ vid de aktuella månadsmedelflödet.

Temperaturinstrumentets specifikation anger en maximal felvisning på $\pm 0,2$ °C.

Det maximala felet i temperaturutvidgningskoefficienten för oljan bedöms till $\pm 0,0005\%$ /°C med hjälp av tabellen över oljor i bilaga A.

Steg 3. Hämta osäkerhetsuppgifter från kalibrering av utrustningen.

Mätosäkerheten i kalibreringarna för oljemätarna är $\pm 0,3$ %

Mätosäkerheten i kalibreringen av temperaturinstrumentet är $\pm 0,2$ °C.

Steg 4. Bedöm om ytterligare osäkerheter tillkommer på grund av att mätutrustningen används utanför sina specificerade ramar.

Vid genomläsning av specifikationerna kunde inga förhållanden identifieras som skulle medföra ytterligare osäkerhetskomponenter.

Steg 5. Bedöm hur tiden inverkar på osäkerheten i mätningarna.

Största skillnaden från en kalibrering till en annan för flödesmätarna vid samma flödes-hastighet har varit 0,2 %.

Största skillnaden från en kalibrering till en annan för temperaturinstrumentet vid aktuell temperatur har varit 0,2 °C.

Steg 6. Bedöm om det finns osäkerhetsbidrag som härrör från hur mätningen utförs som ej har med mätutrustningen att göra.

Införingsdjupet för temperaturgivaren är ganska kort vilket innebär att temperaturinstrumentet troligen mäter en för låg temperatur. Det maximala felet på grund av införingsdjupet bedöms till 2 °C.

Steg 7. Summera osäkerhetsbidragen från steg 2 till steg 6 för mätsystemet.

För att summera osäkerhetsbidragen behöver vi utföra beräkningen av den temperaturkorrigerade förbrukade oljemängden.

Tillförd olja med mätare 1 var 25 000 liter.

Olja i retur från mätare 2 var 15 000 liter.

Förbrukad olja vid 68 °C var $25\,000 - 15\,000 = 10\,000$ liter.

Förbrukad olja vid 15 °C blir $10\,000 * (1 - 0,000745*(68 - 15)) = 9\,605$ liter.

Vi ser att omräkningen till normal kubikmeter innebär att volymen ändras ca 4 %.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Specifikation av mätare 1	1 %	2,5 %
Specifikation av mätare 2	1 %	1,5 %
Specifikation av tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Utvidningskoefficient	0,0005 %/°C	0,026 %
Kalibrering av mätare 1	0,3 %	0,75 %
Kalibrering av mätare 2	0,3 %	0,45 %
Kalibrering av tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Drift mätare 1	0,2 %	0,5 %
Drift mätare 2	0,2 %	0,3 %
Drift tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Beräkning av medeltemp.	2 °C	0,15 %
Införingsdjup tempgiv.	2 °C	0,15 %

Summeringen av osäkerhetskomponenterna.

$$3,1 \approx \sqrt{2,5^2 + 1,5^2 + 0,015^2 + 0,026^2 + 0,75^2 + 0,45^2 + 0,015^2 + 0,5^2 + 0,3^2 + 0,015^2 + 0,15^2 + 0,15^2}$$

Summeringen av osäkerhetskomponenterna ger en total osäkerhet för systemet på ca 3,1 %. Systemet uppfyller därmed kraven i övervakningsnivå 2a med en maximal mätosäkerhet för aktivitetsdata på ± 5 %

Resultatet av månadens uppmätning av aktivitetsdata för EO5 från den aktuella brännaren blir 9 605 liter $\pm 3,1$ %.

I detta exemplet måste vi räkna om de procentuella osäkerheterna för flödesmätarna till vad det blir för procentuellt fel i beräknad oljeförbrukning. Enligt specifikation av mätare 1 blir osäkerheten i volym 1 % av 25000 liter, lika med 250 liter. 250 liter är i sin tur 2,5 % av 10000 liter vilket alltså blir osäkerheten i mätsystemet för förbrukad olja på grund av specifikationen för mätare 1. Samma resonemang gäller för mätare 2 med skillnaden att 15000 liter får användas i beräkningarna. För oljemätarna sker omräkningen på samma sätt vad gäller kalibreringsosäkerheten och driften med undantag för att procentuella osäkerheten är annorlunda.

Osäkerheten i temperaturmätningen räknas om till osäkerhet i mätsystemet genom att multiplicera med temperaturutvidningskoefficienten exempelvis specifikation av temp-instrument $0,2 \text{ }^\circ\text{C} \times 0,0745 \text{ } \%/^\circ\text{C} = 0,015$ %

Osäkerheten i temperaturutvidningskoefficienten räknas om till en osäkerhet i mätsystemet genom att multiplicera med den beräknade temperaturdifferensen mellan aktuellt tillstånd $68 \text{ }^\circ\text{C}$ och normaltillståndet $15 \text{ }^\circ\text{C}$ enligt $0,0005 \text{ } \%/^\circ\text{C} \times (68 \text{ }^\circ\text{C} - 15 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,026$ %.

Med tumregeln att bidrag som är mindre än en femtedel av det största kan strykas får vi följande tabell.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Specifikation av mätare 1	1 %	2,5 %
Specifikation av mätare 2	1 %	1,5 %
Kalibrering av mätare 1	0,3 %	0,75 %
Drift mätare 1	0,2 %	0,5 %

$$3,1 \approx \sqrt{2,5^2 + 1,5^2 + 0,75^2 + 0,5^2} \quad (\text{mera exakt } 3,052)$$

Vid avrundning till en decimal får vi samma resultat i detta fall med eller utan de mindre bidragen. Det är alltså viktigast att hitta de största bidragen. För att kunna stryka de mindre behövs ändå en uppskattning av hur stora dessa är.

Steg 8. Summera aktivitetsdata för året för det aktuella bränsle/materialet från olika mätsystem och beräkna osäkerheten för den totala mängden aktivitetsdata uttryckt som den relativa mätosäkerheten.

På anläggningen finns tre olika pannor med olika mätsystem för EO5. För vart och ett av systemen har en mätosäkerhetsutredning enligt steg 1 till 7 utförts. För varje mätsystem

har årsförbrukningen räknats fram enligt punkt 8 i exempel A. De tre mätsystemen har gett följande resultat;

System 1	120 m ³ ±3,1 %
System 2	160 m ³ ±2,8 %
System 3	110 m ³ ±3,5 %

I detta fallet kan vi anta att osäkerheten i de olika mätsystemen är oberoende från varandra. Vi kan då använda oss av följande formel för summeringen;

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \times x_1)^2 + (U_2 \times x_2)^2 + \dots + (U_n \times x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

Med insatta värden får vi följande formel;

$$1,8 \approx \frac{\sqrt{(3,1 \times 120)^2 + (2,8 \times 160)^2 + (3,5 \times 110)^2}}{|120 + 160 + 110|}$$

Med antagandet att mätsystemens osäkerheter ej är korrelerade får vi en total mätosäkerhet på årsförbrukningen på cirka 1,8 %. Detta skulle uppfylla kraven för övervakningsnivån 3a ±2,5 %

Om vi istället antar att mätsystemens osäkerheter är korrelerade (ömsesidigt beroende) får vi använda följande formel;

$$U_{total} = \frac{(U_1 \times x_1) + (U_2 \times x_2) + \dots + (U_n \times x_n)}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

Med insatta värden får vi följande;

$$3,1 \approx \frac{(3,1 \times 120) + (2,8 \times 160) + (3,5 \times 110)}{|120 + 160 + 110|}$$

Det blir en viss skillnad i mätosäkerheten beroende på vilket antagande som görs vad avser korreleringen mellan de olika mätsystemens osäkerhet. Sanningen ligger ofta någon stans mellan ytterligheterna helt okorrelerade eller helt korrelerade. Vi kan med ovanstående resonemang konstatera att vi med stor sannolikhet klarar övervakningsnivå 2a ±5 % samt eventuellt även övervakningsnivån 3a ±2,5 %.

2.5.4 Metod a – EO5 genom nivåändring i cistern (exempel C)

EO5 eldas i oljepanna och aktivitetsdata mäts genom nivåändring i en stor cistern.

Steg 1. Beskriv mätsystemet, vilka mätinstrument, vad mäts och hur, vad beräknas och hur, vilka omräkningsfaktorer används samt eventuellt kvalitetssäkringsrutiner för t.ex. kalibreringsintervall.

EO5 förvaras i en cylindrisk stående cistern med radien ca 4 meter och höjden ca 8 meter. Cisternen kalibreras vart 10 år. Vid kalibreringen erhålls en tanktabell där volymen upp till ytan fås som en funktion av avståndet från en pejlplatta i botten på cisternen till väts-

keytan. Nivån i cisternen mäts med ett kalibrerat pejlband. Cisternen varmhålls vid ca 65 °C. Temperaturen i cisternen mäts med tre temperaturgivare på olika ställen nära botten på cisternen. Temperaturmätutrustningen är kalibrerad. Nivån i tanken mäts vid varje månadsskifte samt före och efter påfyllning. I samband med nivåmätningen registreras temperaturen från de tre temp.givarna. Den beräknade volymen olja i cisternen räknas om från aktuell temperatur till normalkubikmeter. Under en normalmånad förbrukas ca 2/3 av tankens volym.

Temperaturutvidgningskoefficient beräknad från leverantörens produktdatablad EO5 sätts till 0,0745 %/°C.

För att uppskatta mätosäkerheten i mätsystemet kan osäkerheten i differensen mellan två inventeringar för två på varandra följande månader utföras. I exemplet nedan har ingen påfyllning av cisternen gjorts under månaden.

Steg 2. Hämta osäkerhetsuppgifter från specifikationerna på använd utrustning samt osäkerheten i omräkningsfaktorer.

Pejlbandets specifikation anger ett maximalt fel på ± 1 mm.

Temperaturinstrumentets specifikation anger en maximal felvisning på $\pm 0,2$ °C.

Det maximala felet i temperaturutvidgningskoefficienten för oljan bedöms till $\pm 0,0005$ %/°C med hjälp av tabellen över oljor i bilaga A.

Steg 3. Hämta osäkerhetsuppgifter från kalibrering av utrustningen.

Tanktabellen från kalibreringen av cisternen anger en mätosäkerhet på max $\pm 0,5$ %.

Kalibreringen av pejlbandet anger en mätosäkerhet på max $\pm 0,4$ mm.

Kalibreringen av temperaturmätutrustningen anger en mätosäkerhet på $\pm 0,2$ °C.

Steg 4. Bedöm om ytterligare osäkerheter tillkommer på grund av att mätutrustningen används utanför sina specificerade ramar.

Vid genomläsning av specifikationerna kunde inga förhållanden identifieras som skulle medföra ytterligare osäkerhetskomponenter.

Steg 5. Bedöm hur tiden inverkar på osäkerheten i mätningarna.

Största skillnaden från en kalibrering till en annan för temperaturinstrumentet vid aktuell temperatur har varit 0,2 °C.

Korrektionen för avläst längd på pejlbandet har som mest ändrats med 0,2 mm mellan två kalibreringar.

Störst skillnaden för en viss nivå i tanktabellen mellan två kalibreringar har varit 0,2 %.

Steg 6. Bedöm om det finns osäkerhetsbidrag som härrör från hur mätningen utförs som ej har med mätutrustningen att göra.

Avläsningen av pejlbandet vid mätningen av nivån i tanken bedöms kunna göras med ett maximalt fel på ± 3 mm.

Medeltemperaturen från de tre temperaturgivarna som används som underlag till att korrigera aktuell volym till normalkubikmeter antas ligga max ± 3 °C från den verkliga medeltemperaturen i oljan.

Steg 7. Summera osäkerhetsbidragen från steg 2 till steg 6 för mätsystemet.

För att summera osäkerhetsbidragen till den önskade osäkerheten i differensen mellan två inventeringar kan vi utföra en osäkerhetsberäkning för varje inventering.

Inventering 1.

Pejlad nivå i tanken 7500 mm vilket enligt tanktabellen motsvarar 376,99 m³.

Medeltemperaturen från de tre temperaturgivarna är 64,5 °C.

Volymen vid 15 °C blir då $376,99 * (1 - 0,000745 * (64,5 - 15)) = 363,09$ m³.

Inventering 2.

Pejlad nivå i tanken 2200 mm vilket enligt tanktabellen motsvarar 110,58 m³.

Medeltemperaturen från de tre temperaturgivarna är 66,5 °C.

Volymen vid 15 °C blir då $110,58 * (1 - 0,000745 * (66,5 - 15)) = 106,34$ m³.

Mätosäkerhetstabell från Inventering 1

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Specifikation pejlband	1 mm	0,013 %
Specifikation av tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Utvidgningskoefficient	0,0005 %/°C	0,025 %
Tanktabell	0,5 %	0,5 %
Kalibrering pejlband	0,4 mm	0,005 %
Kalibrering av tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Drift tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Drift pejlband	0,2 mm	0,003 %
Drift tanktabell	0,2 %	0,2 %
Avläsning pejlband	3 mm	0,04 %
Avvikelse i medeltemp	3 °C	0,22 %

Omräkning från osäkerhet i nivåavläsningen i mm till osäkerhet i volymen i procent kan uppskattas genom att beräkna den relativa osäkerheten i nivåavläsningen. Osäkerheten i nivån från specifikation på pejlbandet kan beräknas som osäkerheten i specifikationen delat med det avlästa nivåvärdet gånger hundra för att få det till procent, $1 \text{ mm} / 7500 \text{ mm} * 100 = 0,013 \%$. Detta förfaringssätt ger en tillförlitlig omräkning då cisternen kan liknas vid en rak stående cylinder.

Osäkerheten i temperaturmätningen räknas om till osäkerhet i mätsystemet genom att multiplicera med temperaturutvidgningskoefficienten exempelvis specifikation av tempinstrument $0,2 \text{ °C} * 0,0745 \text{ \%}/\text{°C} = 0,015 \%$

Osäkerheten i temperaturutvidgningskoefficienten räknas om till en osäkerhet i mätsystemet genom att multiplicera med den beräknade temperaturdifferensen mellan aktuellt tillstånd 64,5 °C och normaltillståndet 15 °C enligt $0,0005 \text{ \%}/\text{°C} * (64,5 \text{ °C} - 15 \text{ °C}) = 0,025 \%$.

Osäkerheterna från tanktabellen behöver ej räknas om.

Summeringen av osäkerhetskomponenterna som är minst en femtedel av det största bidraget ser ut enligt följande.

$$0,58 \approx \sqrt{0,5^2 + 0,2^2 + 0,22^2}$$

Summeringen av osäkerhetskomponenterna ger en total osäkerhet för inventering 1 på ca 0,58 %. Resultatet av inventeringen blir enligt följande;

Inventerad volym vid 15 °C är 363,09 m³ ±0,58 %.

Inventering 2.

Pejlad nivå i tanken 2200 mm vilket enligt tanktabellen motsvarar 110,58 m³.

Medeltemperaturen från de tre temperaturgivarna är 66,5 °C.

Volymen vid 15 °C blir då 110,58 * (1 - 0,000745 * (66,5 - 15)) = 106,34 m³.

Mätosäkerhetstabell från Inventering 2

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Specifikation pejlband	1 mm	0,045 %
Specifikation av tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Utvidningskoefficient	0,0005 %/°C	0,025 %
Tanktabell	0,5 %	0,5 %
Kalibrering pejlband	0,4 mm	0,018 %
Kalibrering av tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Drift tempinstr.	0,2 °C	0,015 %
Drift pejlband	0,2 mm	0,009 %
Drift tanktabell	0,2 %	0,2 %
Avläsning pejlband	3 mm	0,14 %
Avvikelse i medeltemp	3 °C	0,22 %

Omräkning från osäkerhet i nivåavläsningen i mm till osäkerhet i volymen i procent kan uppskattas genom att beräkna den relativa osäkerheten i nivåavläsningen. Osäkerheten i nivån från specifikation på pejlbandet kan beräknas som osäkerheten i specifikationen delat med det avlästa nivåvärdet gånger hundra för att få det till procent, 1 mm / 2200 mm * 100 = 0,045 %. Detta förfaringsätt ger en tillförlitlig omräkning då cisternen kan liknas vid en rak stående cylinder.

Osäkerheten i temperaturmätningen räknas om till osäkerhet i mätsystemet genom att multiplicera med temperaturutvidningskoefficienten exempelvis specifikation av tempinstrument 0,2 °C x 0,0745 %/°C = 0,015 %

Osäkerheten i temperaturutvidningskoefficienten räknas om till en osäkerhet i mätsystemet genom att multiplicera med den beräknade temperaturdifferensen mellan aktuellt tillstånd 64,5 °C och normaltillståndet 15 °C enligt 0,0005 %/°C x (64,5 °C - 15 °C) = 0,025 %.

Osäkerheterna från tanktabellen behöver ej räknas om.

Summeringen av osäkerhetskomponenterna som är minst en femtedel av det största bidraget ser ut enligt följande.

$$0,60 \approx \sqrt{0,5^2 + 0,2^2 + 0,14^2 + 0,22^2}$$

Summeringen av osäkerhetskomponenterna ger en total osäkerhet för inventering 2 på ca 0,60 %. Resultatet av inventeringen blir enligt följande;

Inventerad volym vid 15 °C är $106,34 \text{ m}^3 \pm 0,60 \%$.

Differensen mellan mätningarna blir $363,09 \text{ m}^3 - 106,34 \text{ m}^3 = 256,75 \text{ m}^3$

Den totala osäkerheten för differensen kan beräknas enligt följande om vi antar att osäkerheterna vid de olika nivåerna är okorrelerade;

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \times x_1)^2 + (U_2 \times x_2)^2 + \dots + (U_n \times x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

Med insatta värden får vi följande formel;

$$0,86 \approx \frac{\sqrt{(0,58 \times 363,09)^2 + (0,60 \times 106,34)^2}}{|363,09 - 106,34|}$$

Med antagandet att mätsystemens osäkerheter ej är korrelerade får vi en total mätosäkerhet för en normalmånad på cirka 0,86 %. Detta skulle uppfylla kraven för övervakningsnivån $1a \pm 1,5 \%$

Resultatet av månadens uppmätning av aktivitetsdata för EO5 från cisternen blir $256,75 \text{ m}^3 \pm 0,86 \%$.

Steg 8. Summera aktivitetsdata för året för det aktuella bränsle/materialet från olika mätsystem och beräkna osäkerheten för den totala mängden aktivitetsdata uttryckt som den relativa mätosäkerheten.

All EO5 på anläggningen kommer från den aktuella cisternen. Osäkerheten i den summerade årsförbrukningen kan sättas till samma relativa osäkerhet i procent som den beräknade osäkerheten per månad då osäkerheten i månadsvolymerna troligen till största delen är korrelerade.

2.5.5 Metod b. Förbrukat bränsle genom massbalansmetoden

I avsnitt 1.1.1 i bilaga 2 NFS 2007:5 kan vi läsa följande;

Förbrukat bränsle skall beräknas enligt följande massbalansmetod:

$$\text{Bränsle C} = \text{Bränsle P} + (\text{Bränsle S} - \text{Bränsle E}) - \text{Bränsle O}$$

där

Bränsle C: bränsle som förbränts under kalenderåret

Bränsle P: bränsle som köpts in under kalenderåret

Bränsle S: bränsle i lager vid början av kalenderåret

Bränsle E: bränsle i lager vid slutet av kalenderåret

Bränsle O: bränsle som använts för andra ändamål (transport eller återförsäljning)

Härvid skall Bränsle P mätas direkt med mätutrustning som resulterar i följande största tillåtna mätosäkerhet för hela mätsystemet;

Övervakningsnivå 1b: $\pm 7,5 \%$

Övervakningsnivå 2b: $\pm 5,0 \%$

Övervakningsnivå 3b: $\pm 2,5 \%$

Övervakningsnivå 4b: $\pm 1,5 \%$

2.5.6 Metod b – Inleverans av EO5 i volym (exempel D)

Massbalans med inleverans av EO5 i volym, där vi skall beräkna mätosäkerheten för inköpt mängd.

Steg 1. Beskriv mätsystemet, vilka mätinstrument, vad mäts och hur, vad beräknas och hur, vilka omräkningsfaktorer används samt eventuellt kvalitetssäkringsrutiner för t.ex. kalibreringsintervall.

EO5 levereras till anläggningen med tankbilar. Tankbilarna fylls vid bränsleleverantörens depå från en cistern via en utlastningsmätare. Vid påfyllningen av tankbilen mäts också temperaturen på den ilastade oljan. Vid leverans av oljan på anläggningen lämnas ett leveranskvitto som anger volymen och temperaturen. Varje levererad volym räknas om till volymen vid $15 \text{ }^\circ\text{C}$ med hjälp av oljans temperaturutvidgningskoefficient och uppgiften om leveranstemperatur. Normal leveranstemperatur är ca $65 \text{ }^\circ\text{C}$. De omräknade volymerna summeras till totalt levererad volym EO5 under året. Det är denna mängd som benämns bränsle P i NFS 2007:5 bilaga 2 avsnitt 1.1.1. Bränsle P skall mätas med en viss maximal mätosäkerhet beroende på beslutad övervakningsnivå.

Temperaturutvidgningskoefficient beräknad från leverantörens produktdatablad EO5 sätts till $0,0745 \text{ } \%/^\circ\text{C}$.

Steg 2. Hämta osäkerhetsuppgifter från specifikationerna på använd utrustning samt osäkerheten i omräkningsfaktorer.

I detta exemplet utförs mätningarna av bränsleleverantören. Vi har inte tillgång till mätutrustningens specifikationer. Bränsleleverantören har angett att volymen mäts med en maximal osäkerhet på $\pm 0,5 \%$ samt att mätosäkerheten i temperaturmätningen är $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Det maximala felet i temperaturutvidgningskoefficienten för oljan bedöms till $\pm 0,0005 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ med hjälp av tabellen över oljor i bilaga A.

Steg 3. Hämta osäkerhetsuppgifter från kalibrering av utrustningen.

Kalibreringen av mätutrustningen ligger under bränsleleverantörens kontroll. Bränsleleverantören har intygat att kalibreringar utförs på använd utrustning samt att osäkerheten från kalibreringarna är medräknade i osäkerheterna på levererad volym och uppmätt temperatur.

Steg 4. Bedöm om ytterligare osäkerheter tillkommer på grund av att mätutrustningen används utanför sina specificerade ramar.

Ingår i bränsleleverantörens angivna osäkerheter.

Steg 5. Bedöm hur tiden inverkar på osäkerheten i mätningarna.

Ingår i bränsleleverantörens angivna osäkerheter.

Steg 6. Bedöm om det finns osäkerhetsbidrag som härrör från hur mätningen utförs som ej har med mätutrustningen att göra.

Det finns en viss osäkerhet i om det är samma mängd olja som levereras till anläggningen som den mängd som fylls i tankbilen vid depån. Beroende på hur varm oljan är samt hur tankbilen lutar vid leveransen av oljan kan det bli olika mycket kvar i tankbilen. En uppskattning av hur stort detta fel skulle kunna vara är svårt att göra. Vi antar att det kan variera ± 100 liter för en leverans på 40 m^3 . Det ger ett procentuellt mätosäkerhetsbidrag på $\pm 0,25 \%$ som en grov uppskattning.

Steg 7. Summera osäkerhetsbidragen från steg 2 till steg 6 för mätsystemet.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Volymmätning från lev.	0,5 %	0,5 %
Temp.mätning från lev.	0,5 °C	0,037 %
Utvidningskoefficient	0,0005 %/°C	0,025 %
Tömning av tankbil	0,25 %	0,25 %

Volymmätningen från leverantören behöver ej räknas om.

Osäkerheten i temperaturmätningen räknas om till osäkerhet i mätsystemet genom att multiplicera med temperaturutvidningskoefficienten $0,5 \text{ °C} \times 0,0745 \text{ \%/°C} = 0,037 \%$

Osäkerheten i temperaturutvidningskoefficienten räknas om till en osäkerhet i mätsystemet genom att multiplicera med den beräknade temperaturdifferensen mellan aktuellt tillstånd ca 65 °C och normaltillståndet 15 °C enligt $0,0005 \text{ \%/°C} \times (65 \text{ °C} - 15 \text{ °C}) = 0,025 \%$.

Summeringen av osäkerhetskomponenterna som är minst en femtedel av det största bidraget ser ut enligt följande.

$$0,56 \approx \sqrt{0,5^2 + 0,25^2}$$

Summeringen av osäkerhetskomponenterna ger en total osäkerhet för systemet på ca $0,56 \%$. Systemet uppfyller därmed kraven i övervakningsnivå 4a med en maximal mätosäkerhet för aktivitetsdata på $\pm 1,5 \%$

Osäkerheten på grund av skillnader i förhållanden vid fyllning och tömning av tankbilen räknades fram under punkt 6.

Steg 8. Summera aktivitetsdata för året för det aktuella bränsle/materialet från olika mät-system och beräkna osäkerheten för den totala mängden aktivitetsdata uttryckt som den relativa mätosäkerheten.

Den största komponenten i mätosäkerhetsberäkningen kom från volymmätningen hos leverantören. Denna volym mäts upp med samma mätutrustning varje gång. Det innebär att osäkerheterna för olika leveranser till största delen är korrelerade. Det ger till följd att osäkerheten för den totala volymen EO5 summerad över året också kommer att ha ca 0,6 % i mätosäkerhet.

2.5.7 Metod b – Inleverans av EO5 i vikt (exempel E)

Här används Eldningsolja 5 som köps in i vikt.

Steg 1. Beskriv mätsystemet, vilka mätinstrument, vad mäts och hur, vad beräknas och hur, vilka omräkningsfaktorer används samt eventuellt kvalitetssäkringsrutiner för t.ex. kalibreringsintervall.

EO5 levereras med tankbil som vägs på lastbilsvåg före och efter leverans. Lastbilsvågen kalibreras varje år. Lastbilsvågen kontrolleras och rengörs varje vecka eller vid behov enligt en underhållsrutin. På vintern värms vitala delar på vågen för att minska risker för fel i vägningen på grund av isbildning. Den levererade massan EO5 räknas om till volymen vid 15 °C med hjälp av oljans densitet vid 15 °C. Densiteten erhålls från leverantören av oljan. Leverantören analyserar densiteten på oljan efter varje påfyllning av cisternen på depån. Leverantören meddelar ändringar av densiteten för leveranserna via e-post. Leverantören har visat att analysen av densiteten sker på ett ackrediterat laboratorium. De omräknade volymerna summeras till totalt levererad volym EO5 under året. Det är denna mängd som benämns bränsle P i NFS 2007:5 bilaga 2 avsnitt 1.1.1. Bränsle P skall mätas med en viss maximal mätosäkerhet beroende på beslutad övervakningsnivå.

Typisk densitet på EO5 vid 15 °C är 930 kg/m³.

Steg 2. Hämta osäkerhetsuppgifter från specifikationerna på använd utrustning samt osäkerheten i omräkningsfaktorer.

Lastbilsvågens specifikation anger att vågen skall visa rätt inom ±1 skaldel motsvarande 50 kg.

Mätosäkerheten i den levererade densitetsinformationen är ±5 kg/m³.

Steg 3. Hämta osäkerhetsuppgifter från kalibrering av utrustningen.

Lastbilsvågen kalibreras med en osäkerhet på ±2 skaldelar motsvarande ±100 kg.

Steg 4. Bedöm om ytterligare osäkerheter tillkommer på grund av att mätutrustningen används utanför sina specificerade ramar.

I lastbilsvågens specifikation står det att vägning skall ske skyddat från vind. Vår våg står helt oskyddad under bar himmel. Försök har utförts med lastbil med släp och kontrollvikter vid olika tidpunkter med och utan vind. De största skillnaderna mellan vindstilla och normalvind som kunde registreras var ca 250 kg.

Steg 5. Bedöm hur tiden inverkar på osäkerheten i mätningarna.

Lastbilsvågen kalibreras och vid behov justeras varje år. Den största justeringen som utförts i samband med en kalibrering av vågen är 100 kg.

Steg 6. Bedöm om det finns osäkerhetsbidrag som härrör från hur mätningen utförs som ej har med mätutrustningen att göra.

Vägning av lastbilen före och efter leverans förutsätter att lastbilen har samma vikt vid båda vägningarna. Detta är inte alltid fallet. Vägningen av lastbilen kan ske med eller utan chaufför och med eller utan passagerare. Vi antar ett mätosäkerhetsbidrag på ± 150 kg på grund av detta.

Steg 7. Summera osäkerhetsbidragen från steg 2 till steg 6 för mätsystemet.

Vi summerar osäkerheterna för invägningen av full lastbil med släp. Normalvikt ca 58 ton.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Från spec av våg	50 kg	0,09 %
Vågkalibrering	100 kg	0,17 %
Vind	250 kg	0,43 %
Drift	100 kg	0,17 %
Vikt lastbil	150 kg	0,26 %

Osäkerheterna i massa i kg räknas om till procent av den invägda vikten 58 ton. Exempelvis från spec av vågen, $50 \text{ kg} / 58000 \text{ kg} * 100 = 0,09 \%$

$$0,56 \approx \sqrt{0,09^2 + 0,17^2 + 0,43^2 + 0,17^2 + 0,26^2}$$

Mätosäkerheten för en invägning blir ca $\pm 0,56 \%$.

Vi summerar osäkerheterna för utvägningen av tömd lastbil med släp. Normalvikt ca 20 ton.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Från spec av våg	50 kg	0,25 %
Vågkalibrering	100 kg	0,50 %
Vind	250 kg	1,25 %
Drift	100 kg	0,50 %
Vikt lastbil	150 kg	0,75 %

Osäkerheterna i massa i kg räknas om till procent av den invägda vikten 20 ton. Exempelvis från spec av vågen, $50 \text{ kg} / 20000 \text{ kg} * 100 = 0,25 \%$

$$1,64 \approx \sqrt{0,25^2 + 0,50^2 + 1,25^2 + 0,50^2 + 0,75^2}$$

Mätosäkerheten för en utvägning blir ca $\pm 1,64 \%$.

Osäkerheten i den levererade omräknade volymen kommer från de båda vägningarna samt från osäkerheten i densiteten.

Den omräknade volymen, motsvarande 15 °C, fås genom formeln $(58000 \text{ kg} - 20000 \text{ kg}) / 930 \text{ kg/m}^3 = 40,86 \text{ m}^3$.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Invägning	0,56 %	0,86 %
Utvägning	1,64 %	0,86 %
Densitet	5 kg/m ³	0,54 %

Den relativa osäkerheten i in- och utvägningen i procent räknas om till den relativa osäkerheten i differensen mellan in- och utvägning i procent. Den procentuella osäkerheten i differensen blir samma procentuella osäkerhet i den omräknade volymen. Exempelvis för osäkerheten i invägningen blir formeln $0,56 \% * 58000 / (58000 - 20000) = 0,86 \%$.

Osäkerheten för densiteten i kg/m³ räknas om till den relativa osäkerheten i procent av aktuellt densitetsvärde på oljan. $5 \text{ kg/m}^3 / 930 \text{ kg/m}^3 * 100 = 0,54 \%$. Den procentuella osäkerheten för densiteten blir samma procentuella osäkerhet i den omräknade volymen.

Vi summerar de olika osäkerhetskomponenterna för den omräknade levererade volymen EO5.

$$1,33 \approx \sqrt{0,86^2 + 0,86^2 + 0,54^2}$$

Den beräknade mätosäkerheten i den levererade volymen EO5 ,vid 15 °C, i en leverans blir ca $\pm 1,33 \%$. Detta uppfyller övervakningsnivå 4b motsvarande maximalt $\pm 1,5\%$ mätosäkerhet i aktivitetsdata för bränsle P.

Steg 8. Summera aktivitetsdata för året för det aktuella bränsle/materialet från olika mätsystem och beräkna osäkerheten för den totala mängden aktivitetsdata uttryckt som den relativa mätosäkerheten.

Då mätosäkerheten för en leverans uppfyller högsta övervakningsnivå 4b motsvarande maximalt $\pm 1,5\%$ mätosäkerhet i aktivitetsdata för bränsle P behöver vi inte fundera på om osäkerheterna i de olika leveranserna är korrelerade. Mätosäkerheten i den under året levererade volymen EO5 kan sättas till ca $\pm 1,3 \%$.

De två största osäkerhetskomponenterna i vägningen, vind och lastbilsvikten är troligtvis inte korrelerade till största delen. Det innebär att vid summering av många laster så kommer osäkerheten från dessa komponenter att minska. Den verkliga mätosäkerheten för under året levererad volym EO5 är alltså troligtvis något lägre än $\pm 1,3 \%$.

2.6 Fasta bränslen, tillämpningsexempel

2.6.1 Metod b. Förbrukat bränsle genom massbalansmetoden

I avsnitt 1.1.1 i bilaga 2 NFS 2007:5 kan vi läsa följande:

Förbrukat bränsle skall beräknas enligt följande massbalansmetod:

$$\text{Bränsle C} = \text{Bränsle P} + (\text{Bränsle S} - \text{Bränsle E}) - \text{Bränsle O}$$

där

Bränsle C: bränsle som förbränts under kalenderåret

Bränsle P: bränsle som köpts in under kalenderåret

Bränsle S: bränsle i lager vid början av kalenderåret

Bränsle E: bränsle i lager vid slutet av kalenderåret

Bränsle O: bränsle som använts för andra ändamål (transport eller återförsäljning)

Härvid skall Bränsle P mätas direkt med mätutrustning som resulterar i följande största tillåtna mätosäkerhet för hela mätsystemet;

Övervakningsnivå 1b: $\pm 7,5 \%$

Övervakningsnivå 2b: $\pm 5,0 \%$

Övervakningsnivå 3b: $\pm 2,5 \%$

Övervakningsnivå 4b: $\pm 1,5 \%$

2.6.2 Metod b – Inleverans av vikt av torv (exempel F)

Här ska vi alltså bestämma osäkerheten för inleveransen i vikt av torv.

Steg 1. Beskriv mätsystemet, vilka mätinstrument, vad mäts och hur, vad beräknas och hur, vilka omräkningsfaktorer används samt eventuellt kvalitetssäkringsrutiner för t.ex. kalibreringsintervall.

Torv levereras med lastbil som vägs på lastbilsvåg före och efter leverans. Lastbilsvågen kalibreras varje år. Lastbilsvågen kontrolleras och rengörs varje vecka eller vid behov enligt en underhållsrutin. På vintern värms vitala delar på vågen för att minska risker för fel i vägningen på grund av isbildning. Den levererade massan torv räknas om till torr torv med hjälp av fuktanalyser på varje leverans. Provtagning, provberedning och analys av inlevererad torv med avseende på fukthalt sker enligt rekommendationerna i standarderna SS 187113, SS 187114 samt SS 187170 med vald precision max $\pm 2 \%$ absolutfel i fukthaltsbestämningen. Torven levereras från tre olika torvtäkter med ungefär lika mycket från varje täkt under året. Torven delas in i partier där varje parti består av mängden torv från en täkt under en månad. Totalt alltså 36 partier per år. Den torra mängden torv summeras till inköpt mängd torr torv under året. Det är denna mängd som benämns bränsle P i NFS 2007:5 bilaga 2 avsnitt 1.1.1. Bränsle P skall mätas med en viss maximal mätosäkerhet beroende på beslutad övervakningsnivå. En normalleverans av flis väger ca 30 ton med en fukthalt på ca 50 %.

Steg 2. Hämta osäkerhetsuppgifter från specifikationerna på använd utrustning samt osäkerheten i omräkningsfaktorer.

Lastbilsvågens specifikation anger att vågen skall visa rätt inom ± 1 skaldel motsvarande ± 50 kg.

Standarden SS 187113 Biobränslen och torv - Provtagning anger en osäkerhet i fukthalten på $\pm 2 \%$ absolut vid det provtagningsförfarande och den provtagningsfrekvens som an-

vänds. Från varje leverans av torv tas två delprov som blandas och analyseras. Vart och ett av de 36 partierna är på minst 240 ton.

Steg 3. Hämta osäkerhetsuppgifter från kalibrering av utrustningen.

Lastbilsvågen kalibreras med en osäkerhet på ± 2 skaldelar motsvarande ± 100 kg.

Utrustningen till fukthaltsmätningen, våg, tråg, värmeskåp och temperaturreglering är kalibrerad och kontrollerad samt uppfyller kraven i SS 187170 Biobränslen och torv – Bestämning av total fukthalt. Enligt provtagningsstandarden SS 187113 ingår osäkerheten i själva fukthaltsbestämningen i osäkerheten ± 2 % absolut från steg 2.

Steg 4. Bedöm om ytterligare osäkerheter tillkommer på grund av att mätutrustningen används utanför sina specificerade ramar.

I lastbilsvågens specifikation står det att vägning skall ske skyddat från vind. Vår våg står helt oskyddad under bar himmel. Försök har utförts med lastbil med släp och kontrollvikter vid olika tidpunkter med och utan vind. De största skillnaderna mellan vindstilla och normalvind som kunde registreras var ca 250 kg.

Steg 5. Bedöm hur tiden inverkar på osäkerheten i mätningarna.

Lastbilsvågen kalibreras och vid behov justeras varje år. Den största justeringen som utförts i samband med en kalibrering av vågen är 100 kg

Steg 6. Bedöm om det finns osäkerhetsbidrag som härrör från hur mätningen utförs som ej har med mätutrustningen att göra.

Vägning av lastbilen före och efter leverans förutsätter att lastbilen har samma vikt vid båda vägningarna. Detta är inte alltid fallet. Vägningen av lastbilen kan ske med eller utan chaufför och med eller utan passagerare. Vi antar ett mätosäkerhetsbidrag på ± 150 kg på grund av detta.

Steg 7. Summera osäkerhetsbidragen från steg 2 till steg 6 för mätsystemet.

Vi summerar osäkerheterna för invägningen av full lastbil med släp. Normalvikt ca 58 ton.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Från spec av våg	50 kg	0,09 %
Vågkalibrering	100 kg	0,17 %
Vind	250 kg	0,43 %
Drift	100 kg	0,17 %
Vikt lastbil	150 kg	0,26 %

Osäkerheterna i massa i kg räknas om till procent av den invägda vikten 58 ton. Exempelvis från spec av vågen, $50 \text{ kg} / 58000 \text{ kg} * 100 = 0,09 \%$

$$0,56 \approx \sqrt{0,09^2 + 0,17^2 + 0,43^2 + 0,17^2 + 0,26^2}$$

Mätosäkerheten för en invägning blir ca $\pm 0,56 \%$.

Vi summerar osäkerheterna för utvägningen av tömd lastbil med släp. Normalvikt ca 28 ton.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Från spec av våg	50 kg	0,18 %
Vågkalibrering	100 kg	0,36 %
Vind	250 kg	0,89 %
Drift	100 kg	0,36 %
Vikt lastbil	150 kg	0,53 %

Osäkerheterna i massa i kg räknas om till procent av den invägda vikten 28 ton. Exempelvis från spec av vågen, $50 \text{ kg} / 28000 \text{ kg} * 100 = 0,36 \%$

$$1,17 \approx \sqrt{0,18^2 + 0,36^2 + 0,89^2 + 0,36^2 + 0,53^2}$$

Mätosäkerheten för en utvägning blir ca $\pm 1,17 \%$.

Osäkerheten i den levererade omräknade massan torr torv i ett parti kommer från in- och utvägningarna samt från osäkerheten i fukthalten. Osäkerheten i fukthalten gäller för ett helt parti och inte för en enskild leverans. Vi kan ändå räkna osäkerheten för en leverans och anta att detta gäller för ett helt parti om vi räknar med att osäkerheten i fukthalten är $\pm 2 \%$ absolut. Procenträkning är lite lurigt när absolutvärden och relativa värden blandas. I detta fall har vi en uppmätt fukthalt på 50 % med en osäkerhet på $\pm 2 \%$ absolut. Detta innebär att fukthalten ligger i intervallet 48 % till 52 %. Den relativa osäkerheten i procent av fukthalten blir $2 \% / 50 \% * 100 = 4 \%$

Den levererade vikten torr räknas, med hjälp av fukthalten 50 %, om till torr torv via ekvationen $(58 \text{ ton} - 28 \text{ ton}) * (1 - 0,50) = 15 \text{ ton torr torv}$.

Osäkerhetskomponent	Bidrag från källa	Bidrag till mätsystemet
Invägning	0,56 %	1,09 %
Utvägning	1,17 %	1,09 %
Fukthalt	2 % absolut	4,00 %

Den relativa osäkerheten i in- och utvägningen i procent räknas om till den relativa osäkerheten i differensen mellan in- och utvägning i procent. Den procentuella osäkerheten i differensen blir samma procentuella osäkerhet i den omräknade volymen. Exempelvis för osäkerheten i invägningen blir formeln $0,56 \% * 58000 / (58000 - 28000) = 1,09 \%$.

Osäkerheten för fukthalten i procent absolut räknas om till den relativa osäkerheten i procent av aktuellt fukthaltsvärde. $2 \% / 50 \% * 100 = 4,00 \%$. Den procentuella relativa osäkerheten för fukthalten blir samma procentuella osäkerhet i den omräknade massan torr torv.

Vi summerar de olika osäkerhetskomponenterna för den omräknade levererade massan torr torv.

$$4,3 \approx \sqrt{1,09^2 + 1,09^2 + 4,00^2}$$

Den beräknade mätosäkerheten i den levererade massan torr torv i ett parti blir ca $\pm 4,3\%$. Detta uppfyller övervakningsnivå 2b motsvarande maximalt $\pm 5,0\%$ mätosäkerhet i aktivitetsdata för bränsle P.

Steg 8. Summera aktivitetsdata för året för det aktuella bränsle/materialet från olika mätsystem och beräkna osäkerheten för den totala mängden aktivitetsdata uttryckt som den relativa mätosäkerheten.

Då vi skall summera de olika partierna till en årsmängd inköpt torr torv kommer årsmängdens relativa osäkerhet att vara något mindre än den relativa osäkerheten för ett enskilt parti. Det är dock svårt att säkert säga hur mycket mindre då det endast är de slumpmässiga felen i osäkerhetsberäkningen som tenderar att minska med fler ingående partier i årsmängden. Då aktivitetsdata skall redovisas som torr torv är det svårt att klara en högre övervakningsnivå än 2b utan att öka antalet delprov för fukthaltsbestämningen.

3 Osäkerhet i emissionsfaktorer, värmevärdet etc

3.1 Om provtagning & analysfrekvens i föreskriften

I avsnitt 3.2.4 i bilaga 1 NFS 2007:5 kan vi läsa följande;

Fastställandet av relevant emissionsfaktor, effektivt värmevärde, oxidationsfaktor, omvandlingsfaktor, kolinnehåll, biomassafraktion eller uppgifter om sammansättning skall följa vedertagen praxis för representativ provtagning. Verksamhetsutövaren skall tillhandahålla bevis för att de prov som erhållits är representativa och utan systematiska fel. Varje värde skall endast användas för den leveransperiod eller bränsleparti eller materialparti som det var avsett att representera.

I allmänhet kommer analysen att göras på ett prov som är en blandning av ett större antal (t.ex. 10 – 100) prov som samlats in under en tidsperiod (t.ex. från en dag till flera månader) under förutsättning att bränsle- eller material-provet kan lagras utan att sammansättningen ändras.

Provtagningsförfarandet och analysfrekvensen skall utformas så att det säkerställs att årsgenomsnittet för den relevanta parametern fastställs med en maximal osäkerhet som understiger en tredjedel av den maximala osäkerheten enligt den godkända övervakningsnivån för bränsle/materialets aktivitetsdata.

....

3.2 Provtagnings- och analysosäkerhet

Provtagning innebär att en liten del av ett större parti bränsle/material väljs ut för att undersöka egenskaper på provet som sedan kan relateras till hela partiet. Det är inte provets egenskaper vi vill veta utan partiets egenskaper. Genom att ta ut flera prover och göra analyser på dessa och därefter räkna ut ett medelvärde för egenskapen, får vi ett mer representativt värde för hela partiet. Att vi får olika värde på egenskapen på olika prov beror oftast på att det finns variationer i partiet. Vi kallar dessa variationer för inhomogenitet. Variationerna i mätvärden beror också på hanteringen och neddelningen av provet samt analysförfarandet. I NFS 2007:5 ställs krav på en viss precision⁷ på provtagnings- och analysförfarandet. Det sammantagna felet från provtagningen och analysfrekvensen skall understiga en tredjedel av den maximala osäkerheten enligt den godkända övervakningsnivån för bränslets/materialets aktivitetsdata. Verksamhetsutövaren skall dessutom tillhandahålla bevis för att de prov som erhållits är representativa och utan systematiska fel.

För att erhålla representativa prov utan systematiska fel skall man använda någon tillämplig standard för provtagning. För biobränslen och torv kan t.ex. SS 18 71 13 ”Biobränslen och torv – Provtagning” användas. Denna standard kan rekommenderas som utmärkt läsning för att förstå grunderna i provtagningsförfarandet för att minska systematiska fel och utjämna slumpmässiga fel genom att välja lämpligt antal prov och därmed erhålla representativa värden på de önskade egenskaperna.

Vi kan konstatera att det finns två huvudproblem då vi vill få representativa värden på en egenskap för ett parti. Dels de systematiska felet som gör att ett framräknat medelvärde från ett antal analyser ligger under eller över det sanna värdet. Dels de slumpmässiga fe-

⁷ Precision avser här en största tillåtna spridning av en uppmätt egenskap mellan olika prov. Den bestäms med hjälp av standardavvikelsen.

len som gör att spridningen i de olika analysresultaten gör att medelvärdet blir osäkert. Systematiska fel minimeras genom att en provtagningsstandard följs. Den beskriver;

- Hur stora prov som skall tas ut för att alla fraktioner i partiet skall bli representerade.
- Var proven skall tas ut
- Hur proven skall tas ut
- Konstruktion av provtagningsutrustning
- Hur många prov som skall tas ut för att uppnå en viss precision
- Hantering av uttagna prover
- O.s.v.

För att bevisa att inga signifikanta systematiska fel finns i provtagningsförfarandet, skall det kunna visas att det finns en relevant provtagningsstandard samt att den följs i tillämpliga delar.

För att visa att precisionen motsvarande maximalt en tredjedel av tillåten osäkerhet i aktivitetsdatans övervakningsnivå är uppfylld, krävs statistisk analys av provtagningsresultaten. För att uppnå kravet på precision krävs att tillräckligt många prov används för att bilda årsmedelvärdet för den sökta egenskapen. Är det ett mycket homogent parti, t.ex. oljan i en stor cistern, krävs få prov, medan det i ett inhomogent parti, t.ex. torv från en säsong från en torvtäkt, krävs många prov för att få ett representativt prov på t.ex. effektivt värmevärde. För att visa att spridningen är tillräckligt låg får vi göra några antaganden samt några matematiska beräkningar. Vi får anta att våra prover är utan systematiska fel då de är uttagna i enlighet med vår provtagningsstandard, behandlade, neddelade och analyserade enligt andra relevanta standarder samt att inhomogeniteten i partiet kan antas vara normalfördelad. Med dessa antaganden kan vi ange provresultatet med ett medelvärde och standardavvikelse mellan våra prover samt medelvärdets standardavvikelse. Standardavvikelsen är ett mått på inhomogeniteten i vårt parti. Med hjälp av aktuell standardavvikelse kan vi kontrollera om vi har uppnått önskad precision i vårt provtagningsförfarande. Vi kan också använda oss av standardavvikelsen i tidigare provdata för att optimera vår provtagningsfrekvens eller ta reda på ungefär hur många prov som behövs för att uppnå önskad precision.

Exempel på medelvärde, standardavvikelse och medelvärdets standardavvikelse. Vi har från inleveranserna från en torvtäkt varje månad slumpmässigt tagit ut ett prov för att bestämma effektivt värmevärde. Resultaten redovisas i nedanstående tabell.

Månad	TJ/ton
1	20,01
2	21,23
3	19,89
4	19,98
5	20,12
6	20,35
7	20,07
8	19,73
9	20,56
10	20,43
11	19,56
12	20,18
Medelvärde	20,176
Standardavvikelse mellan månadsvärden	0,436 motsvarande 2,16 %
Medelvärdets standardavvikelse	0,126 motsvarande 0,62 %

Medelvärde beräknas enligt följande;

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n},$$

Där \bar{x} med ett streck över betecknar medelvärdet,
 x_1 betecknar värdet för månad ett upp till x_n som betecknar månad 12 och
 n betecknar antalet månader som ingår i medelvärdet.

Standardavvikelsen s beräknas enligt följande;

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}},$$

Standardavvikelsen är ett mått på hur mycket de enskilda värdena i snitt avviker från medelvärdet. Om vi hade tagit ut tolv prover varje månad och analyserat dessa tolv prover var för sig och noterat analysresultaten i en utökad tabell och räknat medelvärde och standardavvikelse för första, andra o.s.v. t.o.m. tolfte provet, så hade vi fått tolv årsmedelvärden med tillhörande standardavvikelse. Standardavvikelsen för prov ett, två o.s.v. hade varit någorlunda lika. Om vi däremot räknar fram ett medelvärde på de tolv årsmedelvärdena med tillhörande standardavvikelse så skulle vi se att denna standardavvikelse varit mindre än för var och en av proven. För att uppskatta standardavvikelsen på medelvärdet används följande formel;

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}},$$

Standardavvikelsen för medelvärdet kan alltså uppskattas genom att dela standardavvikelsen för proven med roten ur antalet prov som användes för att beräkna medelvärdet.

Precisionen som skall uppnås är angiven med en konfidensnivå motsvarande 95 %. Med standardavvikelsen täcks en konfidensnivå motsvarande ca. 68 %. För att standardavvikelsen skall få en konfidensnivå motsvarande 95 % måste den multipliceras med två. Detta samband gäller om vi förutsätter normalfördelade sampel⁸.

I vårt exempel i tabellen ovan blev medelvärdets standardavvikelse ca. 0,62 %. Detta blir alltså ca. 1,24 % på konfidensnivån 95 %. Med det aktuella provtagningsförfarandet, vilka övervakningsnivåer klarar vi?

Övervakningsnivå aktivtetsdata	Osäkerhet i aktivtetsdata	Osäkerhet i provtagning	Godkänt?
1a	±7,5 %	±2,5 %	Ja
2a	±5,0 %	±1,7 %	Ja
3a	±2,5 %	±0,8 %	Nej
4a	±1,5 %	±0,5 %	Nej

Med aktuellt provtagningsförfarande klarar vi alltså precisionskraven för övervakningsnivån 1a och 2a då medelvärdets standardavvikelse uttryckt på konfidensnivån 95 % är mindre än maximal provtagningsosäkerhet. (1,24 % < 1,7 %)

⁸ Undersökningar av en egenskap på slumpmässigt tagna sampel (prov) ger värden vars förekomst fördelar sig klockformigt kring ett medelvärde som är det mest vanligt förekommande.

Om vi har beslut som säger att vi skall följa övervakningsnivå 4a, hur många prov behöver vi då ta ut för att uppnå önskad precision?

För att få en uppskattning av hur många prov vi behöver ta per år kan vi använda formeln för medelvärdeets standardavvikelse. Vi behöver stuva om i formeln och lösa ut n som står för antalet prov. Värdet på standardavvikelsen har vi i tabellen. Medelvärdeets standardavvikelse ersätts med halva värdet på precisionsgränsen. Detta för att precisionsgränsen är satt på konfidensnivån 95 %. I formeln skall vi räkna med konfidensnivån 68 %. Formeln för antalet prov blir enligt följande;

$$n = \frac{s^2}{s_x^2},$$

Antalet prov bestäms alltså ur relationen seriens mot medelvärdeets standardavvikelse. Ju större kvot desto fler prov. I vårt exempel från tabellen med månadsvärden hämtar vi värdet på standardavvikelsen 2,16 %. Värdet på medelvärdeets standardavvikelse sätts till 0,25 % motsvarande halva kravgränsen för osäkerheten i provtagningen från nivå 4a i tabellen med övervakningsnivåerna.

$$75 \approx \frac{2,16^2}{0,25^2} = \frac{4,6656}{0,0625}$$

Vi ser att det skulle behövas ca 75 prov per år för att uppfylla precisionskraven för övervakningsnivå 4a.

Om vi har ett litet antal historiska data som underlag till vår standardavvikelse finns det risk för att vi underskattar antal nödvändiga provuttag. Då få prov används för att beräkna standardavvikelsen kan man använda en t -faktor för att minska risken för underskattning av antalet provuttag. Vi får då en något annorlunda formel för beräkningen av antalet prov. Följande formel skall användas då mindre än 10 historiska data används för att beräkna antalet provuttag.

$$n = \frac{(t_v \times s)^2}{(2 \times s_x)^2}$$

t_v är t -faktorn som hämtas i tabellen nedan,

s är den uträknade standardavvikelsen från de historiska data,

s_x är det maximala medelvärdeets standardavvikelse beräknad från kravet på aktivitetsdata.

T -faktorn hämtas i tabellen nedan. Faktorn används för att räkna om den framräknade standardavvikelsen till en konfidensnivå motsvarande 95 %. T -faktorn varierar med antalet frihetsgrader. Antalet frihetsgrader är lika med antalet värden som användes för att beräkna standardavvikelsen minus ett.

$v = n - 1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_v	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26

Om vi antar att vi endast hade fyra tidigare värden när vi räknade fram standardavvikelsen till 2,16 %. Hur många prov hade vi då behövt ta ut? Insättning i formeln ger följande resultat.

$$189 = \frac{(3,18 \times 2,16)^2}{(2 \times 0,25)^2}$$

Vi hade då behövt ta ut 189 prov på ett år för att uppfylla kravet på precision i fastställandet av värmevärdet.

Ett alternativt sätt att uppskatta antalet prov som behövs för att uppnå kravet på precision då historiska data ej finns att tillgå är följande. Uppskatta ett intervall med lägsta och högsta tänkbara värde på egenskapen som skall mätas. Låt oss som exempel utgå ifrån tabellen med månadsvärden på effektivt värmevärde för torv. Anta lägsta värdet till 19,5 TJ/ton och högsta till 21,5 TJ/ton eller $20,5 \pm 1,0$ TJ/ton. Därefter delas intervallbredden 1,0 TJ/ton med roten ur tre för att få ett värde som motsvarar en standardavvikelse. Vi får då ca. 0,58 TJ/ton motsvarande en standardavvikelse. Vi räknar om det till procent, $0,58/20,5 \times 100$ och får 2,8 %. För att räkna ut hur många prov vi behöver ta för att uppnå precisionskravet för nivå 4a byter vi ut 2,16 mot 2,8 i uträkningen ovan och får ca. 125 prov per år. Denna metod är konservativ vilket innebär att den ger, med rätt uppskattade gränser, ett något större antal prov än vad analysen av verkliga prov ger.

Vi ser att med olika mycket kunskap om förväntad spridning i våra mätningar så får vi också olika antal nödvändiga provuttag. Beräkningarna av antalet nödvändiga prov skall därför ses som en grov uppskattning. Det är därför viktigt att allteftersom provresultaten för året erhålls göra uppdaterade beräkningar på antalet nödvändiga provuttag. För varje nytt provresultat ökar kunskapen om den förväntade spridningen i mätningarna.

Vid årets slut bör en kontroll av uppnådd precision i bestämningen av den aktuella faktorn, effektivt värmevärde, emissionsfaktor, fraktion i blandbränsle eller annat, göras. Kontrollen kan användas för att justera antalet provuttag under kommande utsläppår. Om det beräknade antalet provuttag för ett år är mindre än tio stycken skall t-faktorn användas för att räkna om medelvärdets standardavvikelse till konfidensnivån 95 %. Vid fler än tio provuttag kan faktorn två användas för omräkning till konfidensnivån 95 %. En jämförelse görs sedan med en tredjedel av den maximala mätosäkerheten för aktivitetsdata för att kontrollera att precisionskravet är uppfyllt.

3.3 Fukthaltsbestämning

De bränslen och material som innehåller en stor andel fukt t.ex. torv och biobränslen i form av sågverksflis, bark, GROT o.s.v. är styvmoderligt behandlade i föreskrifterna. När det gäller bränslen fungerar beräkningsmodellerna och kraven på mätosäkerhet i föreskrifterna bäst när de appliceras på bränslen utan fukt. För torv och fasta biobränslen med stor andel fukt kommer osäkerheten i fuktbestämningen att påverka beräkningarna av både effektivt värmevärde och emissionsfaktorn. Om övervakningsprogrammet och beslutet från länsstyrelsen innebär att aktivitetsdata för torven skall övervakas som torr torv belastar osäkerheten från fuktbestämningen den för aktivitetsdata istället för osäkerheten i emissionsfaktor och det effektiva värmevärde. I båda fall kommer det största osäkerhetsbidraget troligtvis från fukthaltsbestämningen. Skillnaden är att kravet på osäkerhet i fukthaltsbestämningen, i fallet med aktivitetsdata i leveranstillstånd, blir ca 1/3 av kravet jämfört med att aktivitetsdata skall redovisas i torrt tillstånd. Detta är förbisett i underlagen till föreskrifterna. Det finns inga direkta krav på osäkerheten i fuktbestämningen i föreskrifterna utan kraven blir indirekta. Antingen genom att bränsle/materialet skall redovisas i torrt tillstånd. Då blir kravet på osäkerheten i fuktbestämningen en del i osäkerhetsbudgeten för aktivitetsdata. Eller så skall aktivitetsdata redovisas i leveranstillstånd och då skall istället värmevärdet och emissionsfaktorn räknas om till leveranstillstånd med hjälp av fukthalten. Kravet på osäkerhet i bestämningen av värmevärde och emis-

sionsfaktorn blir då 1/3 av högsta tillåtna osäkerhet i övervakningsnivån för aktivitetsdata.

För bibränslen där aktivitetsdata skall redovisas vid verkligt tillstånd blir kravet på mätosäkerhet vid framräkningen av effektivt värmevärde mycket tuffa även om övervakningsnivån på aktivitetsdata är satt till $1b \pm 7,5 \%$. Kravet på maximal mätosäkerhet för det effektiva värmevärdet blir då $\pm 2,5 \%$. Om provtagningsstandarden SS 187113 följs med den rekommenderade precisionen $\pm 2 \%$ absolut kommer mätosäkerheten för det effektiva värmevärdet att överstiga $\pm 4 \%$ enbart på grund av osäkerheten i fukthaltsbestämningen.

Om vi inkluderar länsstyrelsens beslut i fukthaltsproblematiken kommer vi fram till följande slutsats. Om övervakningsnivån för aktivitetsdata för torv skall sättas antingen för torr torv eller för torv i leveranstillstånd så kommer övervakningsnivån som skall uppnås i de båda fallen att bli olika. För aktivitetsdata i leveranstillstånd kanske nivå $3b \pm 2,5 \%$ är möjlig. För torr torv blir det svårt att nå högre nivå än $2b \pm 5,0 \%$ på grund av osäkerheten i fuktbestämningen. Eftersom kraven på osäkerhet i emissionsfaktor och effektivt värmevärde ställs i förhållande till kraven på aktivitetsdata blir konsekvenserna att skillnaden i krav på fuktbestämningen blir ännu större än vid samma övervakningsnivå. Detta är inte rimligt och visar på att fukt i bränsle/material är ett problemområde. Ovanstående resonemang behöver beaktas i ansökan till länsstyrelsen om utsläpp av koldioxid.

Skillnaden i kravet på osäkerheten i fukthaltsbestämningen vid aktivitetsdata för torv vid leveranstillstånd eller torrt tillstånd kan exemplifieras med hjälp av uppgifterna i exempel F i avsnitt 2.6.2. I exempel F redovisas aktivitetsdata för torv i torrt tillstånd. Osäkerheten i fukthaltmätningen ingår då i osäkerheten för aktivitetsdata. Med de aktuella data som presenteras skulle ansökan till, och beslutet från, länsstyrelsen innebära en beslutad övervakningsnivå $2b$ motsvarande en maximal mätosäkerhet i aktivitetsdata på $\pm 5 \%$. Maximal osäkerhet i värmevärdet skulle då bli ca $\pm 1,7 \%$, motsvarande en tredjedel av osäkerheten för aktivitetsdata. Osäkerheten för det effektiva värmevärdet gäller då för torr torv.

Om vi istället hade ansökt om tillstånd för att beräkna aktivitetsdata i leveranstillstånd, skulle osäkerheten från fukthaltmätningen inte ingå i osäkerheten för aktivitetsdata. Vi hade då fått ett beslut på övervakningsnivån $3b$ motsvarande en maximal mätosäkerhet på $\pm 2,5 \%$ för aktivitetsdata. Maximal osäkerhet för det effektiva värmevärdet vid leveranstillstånd hade då blivit ca $\pm 0,8 \%$. I osäkerheten för det effektiva värmevärdet vid leveranstillstånd ingår dels osäkerheten i det effektiva värmevärdet vid torrt tillstånd samt osäkerheten i fukthaltsbestämningen via omräkningen av värmevärdet till leveranstillstånd. I grova drag kan vi tänka oss att osäkerheten i det effektiva värmevärdet vid torrt tillstånd bidrar lika mycket som fukthalten till osäkerheten i det effektiva värmevärdet vid verkligt tillstånd.

$$0,8 = \sqrt{(U \text{ fukthalt})^2 + (U \text{ effektivt värmevärde})^2}$$

Osäkerhetskomponenterna i det effektiva värmevärdet i verkligt tillstånd, från fukthalten respektive effektivt värmevärde blir då ca $\pm 0,6 \%$.

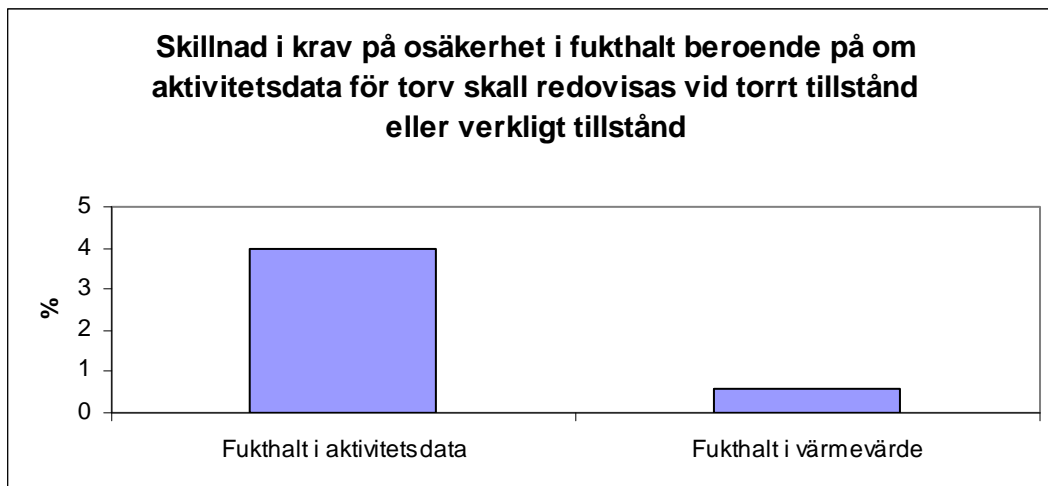


Fig.1: Exempel på skillnad i krav på osäkerhet i fukthalt, beroende på aktivitetsdata ska redovisas vid torrt (se exempel F, avsnitt 2.6.2) eller verkligt tillstånd

Bilaga A Mätosäkerhetsfilosofi

Här följer en fördjupning ("överkurs") för den mättekniskt intresserade, som vill förstå mer om bakgrunden till de olika hanteringarna i osäkerhetsberäkningarna.

Alla mätningar påverkas av faktorer som vi sällan har tillräcklig kontroll över och som vi inte heller kan hålla tillräcklig konstanta. Därmed kan resultatet av en mätning anta olika värden. Vilket värde som är rätt går inte att avgöra. Inflytandet av olika störfaktorer ger ett "sämre" resultat än om de inte funnits. Man talar ofta om att de medför oönskade mätfel och indelar dessa i två grupper nämligen systematiska och slumpmässiga effekter.

Systematiska effekter

Den första gruppen, de systematiska effekterna, kännetecknas av att de påverkar en mätning på samma sätt varje gång. Ett instrument som är feljusterat och alltså visar fel, utgör ett sådant exempel. Ett annat är att ett mätresultat påverkas av rådande yttre förhållanden på ett lagbundet sätt. Om dessa inte är relevanta för den sökta informationen ger instrumentet ett felaktigt värde. CO₂ utsläppet från olja eller gas beror t.ex. enbart på dess massa. Ofta mäts dock volymen, som ökar/minskar med temperatur- och tryckförhållanden. Den behöver då korrigeras till de referensbetingelser för vilka värmevärden och emissionsfaktorer är bestämda. Ett tredje exempel är att använda värdet från en givare rakt av, utan hänsyn att den sitter monterad på ett annat ställe än där man helst vill mäta.

Vi talar om mätosäkerhet först när alla dessa störkällors påverkan är upphävda, antingen genom aktiva åtgärder att minimera dem eller genom lämpliga korrektioner att kompensera för dem. Detta förutsätter dock att felkällorna är identifierade och kvantifierade i sin påverkan. Därefter avser man med mätosäkerheten den okända påverkan som rimligtvis finns kvar, då en perfekt kompensation inte är möjlig. Vidare skall mätosäkerheten omfattas av systematiska effekter, vars inverkan är okända. Kvaliteten i en osäkerhetsbedömning kommer därmed att stå och falla med den mättekniska kunskapen om den faktiska mätsituationen.

Slumpmässiga effekter

Den andra gruppen av effekter, de slumpmässiga, orsakas av att påverkan varierar över tiden. Detta skapar en spridning i upprepade mätresultat. Beroende på vilken typ av mätning vi ser framför oss, så kan det vara fråga om skiftningar i yttre miljön som fukt, temperatur, lufttryck, elektromagnetiska störningar, instabiliteter på nätspänningen, vibrationer etc. Men även mätmetod, provberedning, handhavande av instrument och en rad andra faktorer skapar en variation vars omfång slår igenom som spridningen i mätresultatet, om vi bara tillät alla variationer att äga rum vid väldigt många upprepade mätningar.

Spridning som mätosäkerhetens ursprung

Sammantaget kan vi slå fast att när inflytandet från de viktigaste systematiska effekterna på mätresultatet är minimerat, så leder de kvarvarande faktorer till en slumpartad variation i mätresultatet. Den variationen utgör ett mått på mätosäkerheten. Om vi har en metod att bestämma den tänkbara variationen kan vi definiera mätosäkerheten som den variation kring det erhållna värdet som vi måste räkna med kan inträffa. Ett mätresultat ses således aldrig som ett enda värde utan som en värdemängd. Mäter vi en enda gång är det mätvärdet endast en av slumpen bestämd möjlig representant ur denna mängd av möjliga resultat. Bredden på resultatintervallet karakteriserar mätosäkerheten. Den ses som en statistisk överlagring av alla variationer i de påverkande störfaktorerna, som också kallas instorheter. Vid upprepade mätningar kan några enskilda värden betraktas som ett stickprov från ett oändligt stort antal värden. I idealfallet representerar stickprovet den bakomlig-

gande populationen⁹ som ges av en normalfördelning¹⁰ kring dess medelvärde och med en bredd som närmelsevis karakteriseras av stickprovets standardavvikelse.

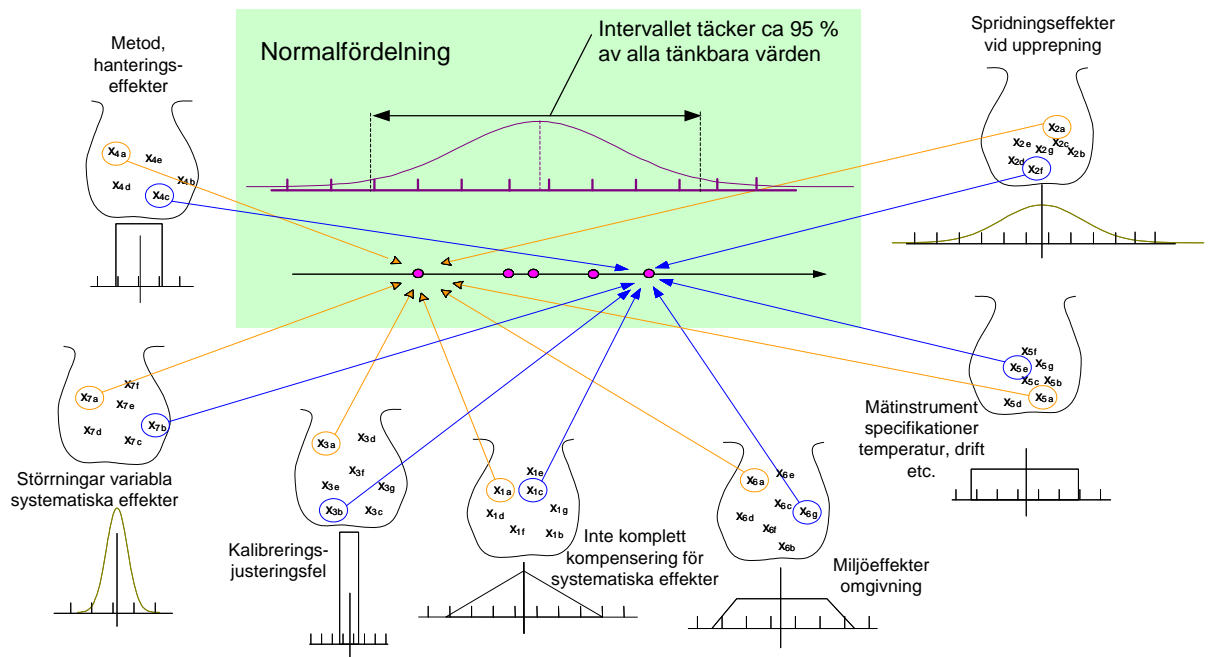


Fig.2: Överlagringen av många påverkansfaktorer leder till en slumpmässig spridning i resultatet som följer en normalfördelning. Osäkerheten motsvarar intervallbredden.

Ur ett statistiskt perspektiv kan man betrakta en mätning som ett slumpmässigt val ur flera urnor som innehåller de olika varierande påverkansfaktorerna. Den aktuella kombinationen av dessa bestämmer det tillhörande mätvärdet. Somliga kombinationer är mera sannolika eller frekventa än andra. Medelvärde ger därför alltid en bättre uppskattning av det mest vanliga av alla tänkbara mätvärden (populationens centrala värde eller typvärde) än ett enskilt resultat.

Om stickprovet inte är för litet och alla påverkansfaktorer varierar representativt inom sina förväntade gränser, täcker stickprovets standardavvikelse¹¹ s ett värdeintervall på $\pm s$ kring medelvärde som innehåller ca 68 % av alla värden som rimligen kan förväntas. Det dubbla intervallet $\pm 2s$ innehåller ca 95 % av de tänkbara utfallen från en mätning och anger då en sannolikhetsnivå på 95 % (synonymer är konfidensnivå eller täckningsnivå). För att jämföra kvalitén i en mätning, metod, provning etc. måste man välja en gemensam konfidensnivå för osäkerhetsangivelsen och 95 % är av flera skäl den nivå som används mest.

⁹ Population är ett begrepp ur den matematiska statistiken och betecknar en mängd med en gemensam egenskap som skall undersökas.

¹⁰ Normalfördelningen beskriver en egenskap i en population, t.ex. längden, vikten hos en viss grupp människor som är symmetrisk kring det vanligaste värdet och blir allt mer sällsynt ju längre/tyngre eller korta/lätta personer man tittar på.

¹¹ Standardavvikelse är ett mått för variationen i en datamängd t.ex. den genomsnittliga avvikelser från den vanligaste rekrytlängden.

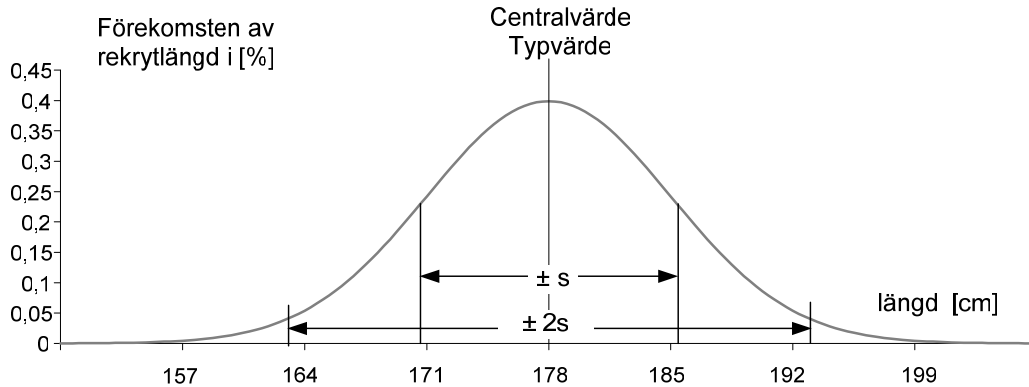


Fig. 3: Exempel på en normalfördelning. Populationen består av manliga rekryterna som i genomsnitt är ca 178 cm långa. Av alla rekryter i en årskull (100 %) har 68 % en längd mellan 170 och 186 cm och 95 % mellan 162 och 194 cm.

Den matematiska statistiska ansatsen i GUM

I GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) föreställer man sig att mätvärdet y till utstorheten Y kan ges ett matematiskt samband med en rad instorheter X_i .

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

Ett i CO₂-samband lämpligt exempel för detta är den volym V_{ut} som under en period har förbrukats ur en cylindrisk cistern. Sambandet till olika andra mätstorheter som vätskenivå h_i i början och slutet av perioden, den relevanta cisterndiametern $d(h_i)$ som framgår ur en kalibreringstabell och till respektive oljetemperatur T_i framgår av efterföljande modellekvation. Alla tillhörande mätningar eller tankinformationer är behäftade med små fel som vi måste ta hänsyn till när vi vill bedöma osäkerheten i den bestämda oljevoly-men. För själva temperaturkorrektionen ges i slutet av detta kapitel ett exempel på en detaljerad osäkerhetsberäkning (se ekvation (13)).

$$V_{ut} = h_1 \cdot \frac{d^2(h_1)}{4} \cdot \pi \cdot (1 - \beta \cdot (T_1 - 15)) - h_2 \cdot \frac{d^2(h_2)}{4} \cdot \pi \cdot (1 - \beta \cdot (T_2 - 15))$$

Instorheterna kan ses som både mätvariabler ur vilka utgångsstorhetens mätvärde y beräknas direkt och/eller som störande påverkansfaktorer som "förfalskar" mätvärdet indirekt. I enklaste fall kan ekvation (1) ges följande form:

$$y_{mät} = y_{sant} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_i + e_1 + e_2 + \dots + e_j \quad (2)$$

Utan att man normalt tänker på det, kan vi säga att det uppmätta värdet $y_{mät}$ innehåller det sanna värdet y_{sant} (bästa tänkbara värdet). Överlagrat finns dock slumpmässiga ε_i och systematiska bidrag e_i som skapar en osäkerhet kring y_{sant} . När alla korrektioner är utförda har alla ε_i och e_i i medel värdet noll, men de skapar var och en ett osäkerhetsbidrag som vi värderar som ett spridningsbidrag, likt en mätbar standardavvikelse.

$$u(\varepsilon_1), \dots, u(\varepsilon_i), \quad u(e_1), \dots, u(e_j) \quad (3)$$

Här sätts likhetstecken mellan en spridning pga. av faktor ε_1 som mäts med standardavvikelsen $s(\varepsilon_1)$ och den osäkerhet denna spridning ger upphov till $u(\varepsilon_1)$.

En av osäkerhetsanalysens viktigaste uppgifter är att hitta alla systematiska bidrag $u(\mathbf{e}_i)$ av betydelse (signifikant storlek) och korrigera för dessa. De bidrag som då är kvar ger tillsammans osäkerheten $U(y_{\text{mät}})$. Den kan uttryckas som

$$U(y_{\text{mät}}) = k \cdot u(y_{\text{mät}}) \quad (4)$$

Här betecknar $U(y_{\text{mät}})$ den totala eller expanderade mätosäkerheten och täckningsfaktorn väljs till $k=2$ och då avses 95 % täckningsnivå (konfidensnivå, sannolikhetsnivå). Med $u(y_{\text{mät}})$ betecknas den samlade effekten av alla störbidrag och den står i centrum för GUM.

Kombination av olika osäkerhetskomponenter

$u(y_{\text{mät}})$ betecknar den kombinerade osäkerheten på standardnivå (motsvarar en standardavvikelse) och kombinationen ges av "Gauss' felfortplantningslag". Om alla bidrag är oberoende av varandra (dvs. det finns ingen samverkan, samvariation, korrelation dem emellan) sker kombinationen som addition av varianser. Variansen utgör det centrala begreppet i statistiken och är kvadraten av standardavvikelsen.

$$u^2(y_{\text{mät}}) = \text{var}(y_{\text{mät}}) = c_{\varepsilon_1}^2 \cdot u^2(\varepsilon_1) + \dots + c_{\varepsilon_i}^2 \cdot u^2(\varepsilon_i) + c_{e_1}^2 \cdot u^2(e_1) + \dots + c_{e_j}^2 \cdot u^2(e_j) \quad (5)$$

Kombinationssättet i ekvation (5) kallas ofta kvadratisk addition och den kombinerade osäkerheten kan ses som en varians som beror på de enskilda instorheternas varians.

Analysens uppgift är nu att hitta och skatta de olika osäkerhetsbidrag $u(\varepsilon_i)$ och $u(e_j)$ och sedan även bestämma deras respektive viktning bidrag till osäkerheten i mätresultatet. Det senare sker med hjälp av känslighetskoefficienterna c_{ε_i} och c_{e_j} . I det enkla fallet av ekvation (2), dvs. bidragen summeras, är alla känslighetskoefficienterna lika med 1. Om ekvation (2) har en mer komplicerad form kommer de olika $u(e_i)$ och $u(\varepsilon_i)$ att ha olika stark inflytande på $u(y_{\text{mät}})$ och känslighetskoefficienterna kommer att vara olika.

Variansen kan anges som i (5) med absoluta värden med enheter som ton, m^3 , $^\circ C$ etc. Då ser känslighetskoefficienternas enhet till att produkterna alltid har samma enhet som $y_{\text{mät}}$. Ibland är det dock bekvämt att ange osäkerhetsbidragen i relation till värdet på den uppmätta storheten och räkna i procent. Då fås även osäkerheten i $y_{\text{mät}}$ i procent och känslighetskoefficienterna blir för det mesta lika med 1, vilket gör beräkningen ofta mycket enklare och mera överskådlig.

Att vi har gjort en åtskillnad på slumpmässiga och systematiska effekter har ett syfte. De senare kräver en korrektion om de är betydelsefulla (signifikant) medan de första bara kan reduceras genom många mätningar och medelvärdesbildning. Förhoppningen är att de slumpartade effekterna jämnar ut sig över tiden och till stor del tar ut varandra.

I den fortsatta arbetsgången kan vi nu behandla alla bidrag lika. Uppgiften är att på olika sätt skatta deras storlek på standardnivå. Det senare gör vi på två principiellt olika sätt. Antingen har vi flera mätvärden på en influensstorhet och då går det att beräkna standardavvikelsen enligt ekvation (7). Då förväntas att de är normalfördelade (möjligen t-fördelade) eller så bestäms en standardavvikelse utifrån en antagen fördelning av ett skattat maximalt värdesintervall. Den första tekniken kallas en typ A-utvärdering, den andra en typ B-utvärdering. De betraktas som likvärdiga och beräkningen baseras enbart på den tillgängliga informationen över möjlig variationsbredd av effekten i fråga.

Skattning av enskilda bidrag på standardnivå – Beräkning av standardavvikelsen

Fall 1: Antagen normalfördelning och uppmätta värden

Antag som exempel att temperaturen över en observationsperiod haft följande värden (enheten °C):

$$x_1 = 20,6; \quad x_2 = 20,9; \quad x_3 = 19,9; \quad x_4 = 20,5; \quad x_5 = 20,7; \quad x_6 = 20,4$$

Då karakteriseras detta stickprov av medelvärdet x_m enligt ekvation (6)

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{20,6 + 20,9 + 19,9 + 20,5 + 20,7 + 20,4}{6} = 20,5 \quad (6)$$

Spridningen mellan värdena inom samplet ges av standardavvikelsen enligt ekvation (7)

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{(20,6 - 20,5)^2 + (20,9 - 20,5)^2 + (19,9 - 20,5)^2 + (20,5 - 20,5)^2 + (20,7 - 20,5)^2 + (20,4 - 20,5)^2}{6 - 1}}$$

(7a)

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n - 1}} = 0,341 \quad (7b)$$

Standardavvikelsen är inget annat än det genomsnittliga avståndet mellan alla värden och deras beräknade medelvärde om man bortser från avståndets tecken. Att man inte delar med antalet värden n utan med ett värde mindre $n-1$ kallas för antal frihetsgrader och beror på att man i ett så litet sample underskattar den spridningen som skulle erhållits med många fler mätvärden. Chansen är större för att träffa ett värde nära medelvärdet, än för ett långt avlägset värde, helt enkelt därför att det finns fler i mitten. I själva värdet räcker inte detta försök till statistisk kompensation och för små sample, $n < 10$, bör man dessutom bredda spridningsmättet genom att multiplicera standardavvikelsen med en så kallad t-faktor¹² (behandlas här inte vidare).

Därmed ansätter vi osäkerhetsbidraget från det bästa temperaturvärdet som representerar perioden till:

Om vi vill uttrycka en temperaturosäkerhet pga. den variation som varit under hela mättiden ansätter vi följande osäkerhetsbidrag baserad på samplets spridning:

$$u(\varepsilon_i) = s(x_i) \quad (8a)$$

¹² t-faktorn ger standardavvikelsen en riktigare statistiskt vikt. Den tas från t-fördelningen som är den verkliga fördelningen för slumpmässiga händelser och som styrs av stickprovets storlek. Normalfördelningen är ett specialfall när stickprovet är stort minst $n=50$.

Använder vi för en fortsatt beräkning temperaturmedelvärdet under mättiden så uttrycks dess osäkerhet genom medelvärdets standardavvikelse:

$$u(\varepsilon_i) = s(x_m) \quad (8b)$$

Och den blir mindre ju fler mätvärden som medelvärdet baseras på. Den beräknas enligt (9).

$$s(x_m) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \frac{0,341}{\sqrt{6}} = 0,139 \quad (9)$$

Fall 2: Antagen rektangulärfördelning

När inga mätdata för en påverkansfaktor föreligger, men dess variation ändå bedöms leda till en spridning, kan man tillgripa typ-B utvärderingsmetoden. Den förutsätter att man kan uppskatta spridningen. Detta görs enklast genom att skatta ett övre och ett nedre värde som den störande faktorn i värsta fall kan anta och påverka med. Därmed intecknas 100 % av dess variation. Sedan halveras intervallet och standardavvikelsen bestäms genom division med roten ur 3.

Ett exempel utgör osäkerhetsbidraget från t.ex. ett digitalt visande instrument och som avser instrumentets upplösning. Vi antar att instrumentet visar 22 °C. Underförstått är då att alla osynliga siffror bakom den sista som visas är lika sannolika. Det tillhörande sifferintervallet går då från 21,5 till 22,5 °C och har därmed 1 °C bredd. Av detta gör vi ett symmetriskt intervall med bredden $\pm 0,5$ °C, som då täcker 100 % av alla tänkbara värden. För att få en sannolikhet för instrumentets avläsningsosäkerhet som motsvarar standardnivån (rektangulärfördelningens standardavvikelse) används ekvation (10)

$$u(\varepsilon_i) = \pm \frac{\text{instrumentupplösning}}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{1^\circ\text{C}}{2 \cdot \sqrt{3}} = \pm 0,2887 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10)$$

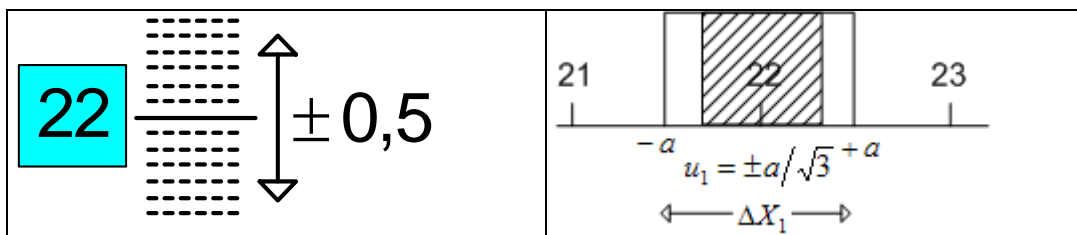


Fig. 4: Hos ett digitalt visande instrument används en rektangulärfördelning för att skatta osäkerhetsbidraget från avläsningen. Intervallbredden är här $a=0,5$ °C.

Detta intervall täcker sedan ca 58 % av variationen. Användningen av en rektangulär sannolikhetsfördelning förekommer mest frekvent och nyttjas när man inte har någon närmare kunskap om hur den verkliga fördelningen kan se ut.

Fall 3: Antagen triangulärfördelning

På liknande sätt används en triangulär sannolikhetsfördelning för vissa skattningar. Skillnaden är den att det halverade intervallet som täcker 100 % av den möjliga variationen delas med roten ur 6. Användningen utgår ifrån sannolikhetsfördelningen att de extrema värden, dvs. intervallets övre och nedre gräns, uppträder väldigt sällan, medan förekomsten av värden i intervallets mitt är mycket mera sannolikt. Ett exempel är avläsningsosäkerheten hos ett visarinstrument. Där antar man en maximal felavläsning till höger och vänster om det värde man tror att instrumentet visar. I denna typ av bedömning har inte alla tänkbara felavläsningar samma förväntade sannolikhet. Man anger då ett sådant bidrag på följande sätt på standardnivå.

$$u(\varepsilon_i) = \pm \frac{\text{bredd på största pos. till neg. avläsningsfel}}{2 \cdot \sqrt{6}} = \pm \frac{1^\circ\text{C}}{2 \cdot \sqrt{6}} = \pm 0,204^\circ\text{C} \quad (11)$$

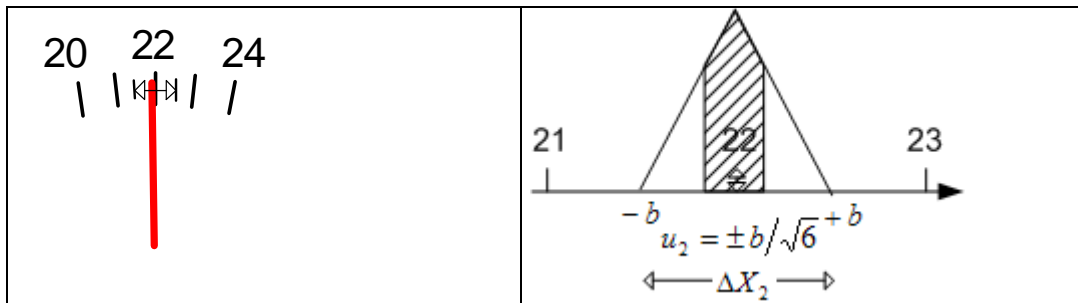


Fig. 5: Hos ett analogt visande instrument används en triangelfördelning för att skatta avläsningsosäkerheten. Standardavvikelsen $\pm s$ täcker då 65 % av alla värden inom intervallet.

Det finns andra fördelningar som man kan använda för en skattad spridning med tillhörande sannolikhetsfördelning, men de används mycket sällan.

Korrelation mellan osäkerhetsbidrag

Vid kombination av osäkerhetsbidrag används oftast den kvadratiske additionen som visat med ekvation (2). Förutsättningen är då att de olika bidragen $u(\varepsilon_i)$ är sinsemellan oberoende, dvs okorrelerade. Man kan enkelt exemplifiera detta grafiskt för två bidrag $u(\varepsilon_1)$ och $u(\varepsilon_2)$ (utan hänsyn till känslighetskoefficienterna). Den statistiska kombinationen visas i figur 5a till c. Mest vanligt är att det inte finns något samband mellan olika bidrag, som i fall b). Oberoende betyder grafiskt att pilarna som symboliserar bidragens storlek står i rät vinkel till varandra. I fallet med enbart två bidrag föreligger den situation som vi känner som Pytagoras sats: Längden för hypotenusan beräknas ur roten över summan av katetrarnas kvadrater.

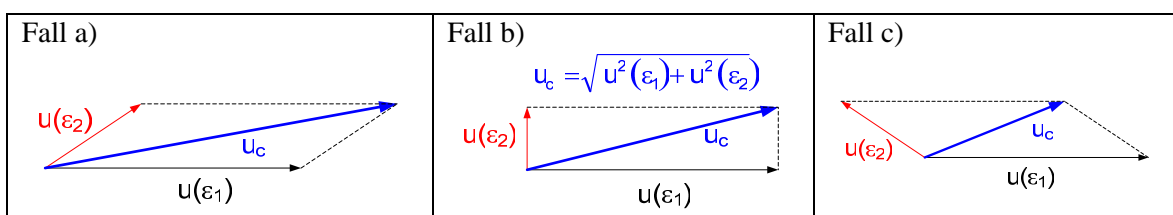


Fig. 6: Tre tänkbara kombinationssätt för osäkerhetsbidrag. a) positivt korrelerat, b) okorrelerat, c) negativt korrelerat. Fall b) är ett specialfall, men mest vanligt.

Fall b) indikerar också bildligt att ett litet bidrag $u(\varepsilon_2)$ gör u_c obetydligt längre än $u(\varepsilon_1)$. Detta gäller inte lika entydigt för korrelerade osäkerhetsbidrag. Positiv korrelation betyder att om $u(\varepsilon_1)$ ökar i värde, så gör även $u(\varepsilon_2)$ det. Grafiskt innebär det att vinkeln mellan båda blir mindre än 90 grader, vilket gör den kombinerade osäkerheten u_c i fall a) större än i fall b). Omvänd betyder negativ korrelation i fall c) att vinkeln blir större än 90 grader och u_c därmed kortare. Graden av korrelation uttrycks genom vinkelns avvikelse från 90 grader. Vid total positiv korrelation mellan $u(\varepsilon_2)$ och $u(\varepsilon_1)$ blir den 0 grader och kombinationen u_c blir den linjära summan och därmed maximal osäkerhet.

Korrelationen mellan osäkerhetsbidrag är svårt att bedöma utan ett rikligt statistiskt material. Men en total positiv korrelation är mycket ovanlig. Misstänker man korrelation av fall b) används ofta linjär addition trots att man därmed lätt överskattar den totala osäkerheten i ett mätresultat.

Generellt kombineras två osäkerhetsbidrag enligt ekvation (12), där de två första termerna anger den oberoende/slumpmässiga variationen i de två bidragen och den tredje det korrelerade/systematiska bidraget mellan dem. Graden av korrelation anges med en korrelationskoefficient $r(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ som varierar mellan -1 och +1¹³. Oberoende är likvärdigt med att $r(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ blir noll.

$$u_c = \sqrt{u^2(\varepsilon_1) + u^2(\varepsilon_2) + 2 \cdot u(\varepsilon_1) \cdot u(\varepsilon_2) \cdot r(\varepsilon_1, \varepsilon_2)} \quad (12)$$

Vad kan en korrelation bestå av? Ökande temperatur kan t.ex. påverka två störfaktorer i samma riktning; ökar den ena så gör även den andra det och osäkerheten växer starkare. Vid misstankar om korrelationsbeteende bör man i första hand titta på de två största bidragen eftersom de ofta dominerar den totala summan. Alla bidrag som är mindre än en femtedel av det största kan i princip försummas (tumregel).

I CO₂ sammanhang är summeringen över flera källor till samma aktivitetsdata en kritisk punkt, där möjlig korrelation måste beaktas. Summerar man t.ex. oljevolymen mätt med samma mätare över 12 månatliga avläsningar, så är de direkt beroende i så motto att mätaren troligen har samma (stora eller lilla) felvisning i alla 12 avläsningar. Den är inte nödvändigtvis huvudbidraget till den månatliga volymosäkerheten, men detta fel har ingen tendens att jämma ut sig. Den procentuella osäkerheten i summan minskar inte så mycket som den skulle gjort om det inte funnits ett sådant beroende.

Helt annorlunda förhåller det sig om man summerar årsvolymen från flera olika mätpunkter till en årsförbrukningen av samma aktivitetsdata och mätning sker med helt olika mätmetoder och utrustningar. Används däremot identiska flödesmätare vid t.ex. olika brännare så måste återigen korrelation misstänkas. Mätarna kan t.ex. ha kalibrerats mot samma referensmätare i en kalibrering. Om osäkerhetsbidraget därifrån utgör en dominerande komponent så är positiv korrelation påbjuden. Så är fallet även pga. förslitning som troligen påverkar identiska mätare på likartat sätt och därför också deras felbeteende. Även en mätarservice som utförts på alla mätare utan efterföljande kalibrering – justering – kalibrering, kan vid årssummering bli en korrelerande faktor. Ett annat korrelationsskapande fel uppkommer om temperaturkorrektionen sker med fel volymutvidgning. Dock bör det eventuella felet ge ett så litet bidrag att korrelationsproblematiken drunknar i andra osäkerhetsbidrag.

Den generella regeln i ekvation (9) som antyder att många mätningar leder till en kraftig reduktion av mätosäkerheten, och som även borde vara tillämpbar vid summeringar över

¹³ Vid fullständig korrelation, $r(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \pm 1$ gäller $u_c = u(\varepsilon_1) \pm u(\varepsilon_2)$ dvs. linjär addition.

året¹⁴, gäller alltså bara för slumpmässiga faktorer och oberoende dem emellan. I alla andra fall, och om korrelation kan misstänkas för de stora bidragen, bör linjär addition av osäkerhetsbidragen tillämpas, även om verkligheten ligger någonstans i mitten.¹⁵ Detta har formlerna i avsnitt 2.4.1 och 2.4.2 som naturvårdsverket har anvisad tagit hänsyn till.

Exempel på osäkerhetsanalys för en temperaturkorrektion

I följande avsnitt visas i ett exempel hur osäkerhetsfilosofin praktiskt tillämpas. Osäkerheten avser den utförda temperaturkorrektionen från en "trolig" (dsv. inte känd) mättemperatur till en referenstemperatur av 15 °C. Detta osäkerhetsbidrag ingår som del i en större analys om osäkerheten i utsläppt CO₂ mängd under året från ett definierat bränsle, t.ex. EO1 eller EO5. Exemplet redovisas i en exceltabell i [Fig. 7](#), som bör läsas parallellt med följande förklaringar.

$$\text{Utgångspunkt är formeln för temperaturkorrektionen} \quad V_{15^\circ} = V_{T^\circ} \cdot (1 - \beta(T^\circ - 15)) \quad (13)$$

Formeln avser att räkna om den vid temperaturen T° mätta volymen till volymen vid referenstemperaturen 15 °C. Osäkerheten i volymen V_{15°} beror då på själva osäkerheten i den med flödesmätaren uppmätta volymen V_{T°}, osäkerheten i den uppmätta eller skattade oljetemperaturen T° och osäkerheten i dess temperaturutvidgningskoefficient β. Dessutom är formel (13) en förenkling mot verkligheten och utgör i sig ett osäkerhetsbidrag.

Vi utgår därmed från fyra bidrag som vi kan lista u₁ till u₄ i exceltabellen i [Fig. 7](#).

Under perioden registrerades V_{T°} = 8000 m³. Bidraget u₁ avser en mätarosäkerhet δV_{T°} på 1,5 % vilket motsvarar 120 m³. Denna information tas från bilaga B och baseras på ett antaget standardiserat värde för mätartypen i fråga. Då inget vidare är förutsatt, antas att alla felvisningar inom detta spann på ±1,5 % har en normalfördelad sannolikhet och att det täcker 95 % av alla tänkbara felvisningar. Omräkningen till en standardavvikelse sker då genom delning med täckningsfaktor k=2 (symbol N för normalfördelning) och hamnar på 60 m³. Denna osäkerhet slår igenom på volymvärdet vid referenstemperatur enligt känslighetskoefficienten c_{V_{T°}}. Dess värde är 0,9965 (ingen måttenhet) och beräknas antingen som en partiell derivering eller differenskvot. Båda beräkningssätt finns angivna som formler under tabellen. Produkten av dessa två tal ger det första osäkerhetsbidraget u₁=59,8 m³.

Nästa bidrag u₂ kommer från temperaturen som säkerligen har varierat under mätperioden. Om vi har flera enskilt uppmätta siffervärden bildar vi standardavvikelsen för skattningen av bidraget. Om vi, som i detta exempel, inte har några siffror så skattar vi ett rimligt medelvärde T° = 19 °C, som kan ha gällt under mätperioden. Därefter skattar vi en osäkerhet δT° = 1,5 °C i detta värde, som är starkt beroende av vår kunskap om mätbetingelserna under perioden. Detta betyder att vi antar att temperaturen aldrig har legat under 17,5 och aldrig över 20,5 °C. Hälften av detta intervall reduceras till 0,87 °C på standardnivå när vi utgår från en rektangulärfördelning (delat med √3). Hur denna osäkerhet slår ut på volymen vid 15 °C bestäms av känslighetskoefficienten c_{T°} = -6,984 för vilken det igen finns två beräkningsformler angivna under tabellen. Produkten av dessa två delar

¹⁴ Här avses summans relativa eller procentuella osäkerhet i motsats till den absoluta osäkerhet i t.ex. m³.

¹⁵ Den strikta behandlingen av korrelationsproblematiken sker med hjälp av en korrelationskoefficient som kan variera mellan -1 och +1. Det besvärliga är inte själva beräkningsgången; den finns beskriven i GUM. Svårigheten ligger helt i bedömningen av korrelationskoefficientens storlek.

i osäkerhetskomponenten u_2 är -6 m^3 . (Förtecknet beror helt på det formelmässiga sambandet och spelar pga. av kvadreringen ingen roll).

Rätt volymutvidgningskoefficient β finner man i API-tabellerna (American Petroleum Institute). Dess värde beror på skillnaden mellan T° och 15°C samt produktens densitet. Om tabellerna inte finns tillgängliga (de är inte heller helt lättlästa) kan möjligen alternativa vägar sökas för att nyttja tillgänglig information. En sådan väg visas här.

Från leverantörens, i detta fall Preems, produktinformationsblad kan man sammanställa värden i tabellen nedan. Den presenterar ett medelvärde för volymutvidgningen över lämpligt temperaturintervall och mellan olika specifikationsgränser för oljans densitet, exempelvis är den för EO1 0,0901 % vid en ändring om en grad vid -5°C och något större vid 30°C . Vid 19°C kan vi anta medelvärdet 0,0905. Detta gäller vid en låg densitetsgräns. Motsvarande gäller för en hög densitet och en medeldensitet som man kan utgå ifrån om man inte har bättre kunskap om de exakta förhållandena.

Tabell 1 – exempel på data för temperaturutvidgning av två brännoljor

	Låg densitet	Medel densitet	Hög densitet	
EO1*	810	825	840	kg/m^3
Medelutvidgning -5 till 30°C	0,0905	0,0873	0,0843	$\%/^\circ\text{C}$
Olinjaritet över temp.intervall	0,0901 -0,0911	0,0871 -0,0877	0,0839-0,0848	$\%/^\circ\text{C}$
EO5*	925	930	935	kg/m^3
Medelutvidgning 40 till 70°C	0,0750	0,0745	0,0740	$\%/^\circ\text{C}$
Olinjaritet över temp.intervall	0,0748 – 0,0752	0,0743 – 0,0747	0,0738 - 0,0742	$\%/^\circ\text{C}$

* från Preem produktinformation

Vi använder för EO1 en utvidgningsfaktor $\beta = 0,000873$ (obs fet siffra i tabellen – här kommer två nollor till när man räknar absolut och inte i procent som tabellvärden är angivna). Osäkerheten ges av en maximal skillnad pga. densitetsosäkerhet inom intervallet på $\delta\beta = 0,000032$ (halva intervallet mellan 0,000905 och 0,000843). Med samma procedur som förut (delat med $\sqrt{3}$) blir bidraget på standardnivå 0,000018 och känslighetsfaktorn 32000. Produkten ger osäkerhetskomponenten $u_3 = 0,6 \text{ m}^3$.

Slutligen är det valda β ett medelvärde över en temperatur från -5 till 30°C . Variationen i β är då som störst $\pm 0,0005 \%/^\circ\text{C}$, vilket blir till $\delta_{\text{modell}} = 0,000005$. Med samma behandling fås komponent $u_4 = 0,1 \text{ m}^3$.

Hur stort de fyra komponenternas bidrag är på den kombinerade osäkerheten på standardnivå framgår av sista kolumnen, där u_1 står för huvuddelen. Med större osäkerhetsskattning på δT° hade naturligtvis även dess bidrag varit större. Det beräknade värdet för $u(V_{15^\circ})$, $60,1 \text{ m}^3$ är den kombinerade standardosäkerheten, dvs. roten ur den kvadratiske summeringen av u_1 till u_4 med täckningsfaktor $k=1$ som i idealfall skall täcka 68 % och vara normalfördelat.

$$u(V_{15^\circ}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \quad (14)$$

$$U(V_{15^\circ}) = 2 \cdot u(V_{15^\circ}) = 2 \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 120,2 \quad (15)$$

Den expanderade osäkerheten $U(V_{15^\circ})$ i den under perioden uppmätta volymen efter temperaturkorrigering är då $120,2 \text{ m}^3$ eller $1,51 \%$, dvs. obetydligt mer än flödesmätarens ursprungliga bidrag. En riktig temperaturkorrigering från antagna 19 till $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ger ett knappt märkbart osäkerhetsbidrag till osäkerheten i själva mätningen.

Detta får dock inte tolkas som att man kan strunta i korrigeringen. Detta framgår om man jämför den korrigerade volymen 7972 m^3 med den uppmätta på 8000 m^3 . Skillnaden på 28 m^3 är inte bara gynnsam ur verksamhetsutövarens synvinkel utan en utebliven korrektion står för ett systematiskt fel på $0,35 \%$.

Kanske verkar detta med hänsyn till mätosäkerheten för volymen på $1,5 \%$ litet. Man bör då betänka att korrigering gällde för en temperaturdifferens från 19 till $15 \text{ }^\circ\text{C}$ dvs. på bara fyra grader. Det systematiska felet växer naturligtvis med denna differens. I fallet med EO5 som ofta eldas vid $55 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$ skulle motsvarande uteblivna korrektion lätt svara mot tre till fyra procent fel, medan korrektionen skulle ta bort det och osäkerheten blir ett försumbart tillskott.

Excel-tabellen kallas allmänt för en osäkerhetsbudget och ger en snabb översikt över de väsentliga bidragen och hur man kommit fram till slutresultatet.

Formel för temperaturkorrektion till referenstemperatur $V_{15^\circ} = V_{T^\circ} \cdot (1 - \beta(T^\circ - 15))$

ingångsstorhet	ID	värde	skattning	enhet	fördelning	standard nivå	känsligh. koef.	enhet	osäkerhetskompon	enhet	andel av total osäkerhet	
X_i		x_i	δx_i		Φ_i	$u(x_i) = \delta x_i \cdot \Phi_i$	c_i		$u_i = u(x_i) \cdot c_i$		%	
Osäkerhets bidrag												
u1 Osäkerhet i uppmätt volym - flödesmätare	V_{T°	8000	δV_{T°	120	m^3	N	60,00	0,9965	-	59,8	m^3	99,0
u2 Temperaturosäkerhet vid mätning	T°	19	δT°	1,5	$^\circ C$	R	0,87	-6,9840	$m^3/^\circ C$	-6,0	m^3	1,0
u3 Osäkerhet i temperaturutvidgning - oljespecifikation	β	0,000873	$\delta \beta$	0,000032	-	R	0,0000	32000	m^3	0,6	m^3	0,0
u4 Osäkerhet i linjär expansionsmodell			δ_{modell}	0,000005		R	0,0000	32000	m^3	0,1	m^3	0,0
Redovisad volym E01	V_{15°	7972,1	m^3	kombinerat standard osäkerhet				k=1	60,1	k=1		

utgångsstorhet

resultat
 $U(V_{15^\circ})$ expanderad osäkerhet för temperaturkorrektion

k=2 **120,2** **1,5%**

Beräkning av känslighetskoefficienterna med differenskvot (vänster) eller med partiell derivering (höger)

$$C_{V_T} = \frac{(V_{T^\circ} + \delta V_{T^\circ}) \cdot (1 - \beta \cdot (T^\circ - 15)) - (V_{T^\circ} - \delta V_{T^\circ}) \cdot (1 - \beta \cdot (T^\circ - 15))}{2 \cdot \delta V_{T^\circ}}$$

0,99651

$$C_{V_T} = \frac{\partial V_{15^\circ}}{\partial V_{T^\circ}} = 1 - \beta(T - 15)$$

$$C_T = \frac{V_{T^\circ} \cdot (1 - \beta \cdot (T^\circ + \delta T^\circ - 15)) - V_{T^\circ} \cdot (1 - \beta \cdot (T^\circ - \delta T^\circ - 15))}{2 \cdot \delta T^\circ}$$

-6,984

$$C_T = -\frac{\partial V_{15^\circ}}{\partial T^\circ} = -\beta V_{T^\circ}$$

$$C_\beta = \frac{V_{T^\circ} \cdot (1 - (b + \delta \beta) \cdot (T^\circ - 15)) - V_{T^\circ} \cdot (1 - (b - \delta \beta) \cdot (T^\circ - 15))}{2 \cdot \delta \beta}$$

-32000

$$C_\beta = \frac{\partial V_{15^\circ}}{\partial \beta} = V_{T^\circ} \cdot (T - 15)$$

$$C_{modell} = C_\beta$$

$$u(x_1) = \delta T^\circ \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{1,5}{1,73} = 0,87$$

$$u(V_{15^\circ}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{59,8^2 + (-6)^2 + 0,6^2 + 0,1^2} = 60,1$$

Fig. 7: Exempel på uppställningen av en osäkerhetsberäkning

Bilaga B Sammanställning av mätosäkerhet för flödesmätare

Det finns en mängd olika typer av volym/flödes/massflödesmätare som kan användas för att mäta oljeleverans eller oljeförbrukning. Mätarleverantören bör kunna tillhandahålla data både för förväntad mätosäkerhet vid användning och information om lämplig installation och lämpligt underhåll. Följande tabell kan dock användas som en generell guide, även om data kan skilja beroende av utförandet (fabrikat).

Volymetriska, dvs mätare med en mekanisk funktion där vätskevolymen direkt driver mätfunktionen, är vanligast för den här typen av oljemätning. Här finns det även typgodkända mätare att tillgå, som är provade att ha förutsättningar att klara en maximal felvisning av $\pm 0,5\%$ om de är kalibrerade eller verifierade och rätt installerade och använda. Användning av en typgodkänd mätare kan alltså ge en ökad trygghet.

Tabellen anger en vanlig osäkerhet, $U(V)$ ¹⁶, som mätarna kan klara, förutsatt att angivna betingelser också uppfylls. Mätosäkerheten är generellt högre inom det lägsta flödesområdet för alla typer av mätare. Här indikeras rimligt användbart mätområde för den aktuella tillämpningen. Att utnyttja en mätare utanför det flödesområde som anges nedan, är olämpligt eftersom beteendet och felvisningen ändras, ofta betydligt, och mycket beroende på vätskans viskositet.

Guide för kalibreringsintervall indikeras för respektive mätartyp. Generellt gäller dock att det är lämpligt att inledningsvis kalibrera oftare (varje eller vart annat år, beroende på kravet på mätosäkerhet), för att senare öka intervallet, om mätaren visat sig vara stabil.

<p>Generella förutsättningar</p> <p>För att klara indikerad osäkerhet $U(V)$ och flödesområde enligt nedan förutsätts:</p>	<p>För alla typer av mätare, att</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kalibreringsresultatet, dvs uppgiften om mätarens felvisning, används för att korrigera mätresultatet. • Installationen följer leverantörens rekommendationer eller generella riktlinjer för mätprincipen. • Max tillåtet tryckfall över mätaren inte överskrids (vid högviskösa (tjocka) medier, behöver max flöde ofta reduceras). • Oljan inte är korrosiv (vissa bio-oljor kan t.ex. påverka livslängden) • Om mätaren inte används kontinuerligt, behöver det säkras att den står oljefyllt för att förhindra korrosionsskador och/eller lagerhaveri. • Underhåll, vanligen årligt, utförs enligt tillverkarens rekommendation. • Om t.ex. en strömsignal (4 – 20 mA) används, bör dess osäkerhetsbidrag utvärderas separat och adderas.
--	--

¹⁶ $U(V)$ är alltså en indikation på vanligt förekommande mätosäkerhet vid användning och kan i princip ses motsvara uppgifter som mätarleverantörerna förväntas ange i sin specifikation. Mätosäkerheten från kalibreringen tillkommer (om den är så stor att den har väsentlig betydelse) samt eventuella ytterligare osäkerheter som kan komma från störningar i installationen i en icke-ideal montering, slitage och drift över tiden etc.

Ytterligare uppgifter om olika typer av mätinstrument finns i rapporten ”Mätteknik för koldioxidutsläpp – principer och kostnader för övervakning inom ramen för EU:s system för handel med utsläppsrätter för koldioxid”, SP RAPPORT 2004:30.

En guide för osäkerheter för olika mätartypers principer finns även i Kommissionens Beslut 2004/156/EG, där genomgående förväntade mätosäkerheter anges med ett större intervall.

Osäkerhetsangivelsen avser konfidensnivån 95 – 100 %	Specifika förutsättningar per mätartyp (i tillägg till generella)
<p>Volymetriska mätare</p> <p>U(V): ± 0,5 % 10 -100 % av max mätområde</p>	<p>Ovalhjulmätare, Skruvmätare, Kolvmätare, Ringkolvmätare, Rotormätare</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rengöring och omkalibrering/justering vanligen minst vart annat år (upp till vart femte år för viskösa smörjande oljor och när mätaren visat sig stabil), eller när 3500 timmar ggr. maxflödet har passerat mätaren. • Årlig kontroll av inbyggt eller externt partikelfilter. • Årlig smörjning av eventuellt mekaniskt räkneverk <p>Förväntad livslängd upp till 25 år (i väl smörjande medie).</p>
<p>Vortexmätare</p> <p>U(V): ± 1,5 % 10 -100 % av max. mätområde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Centrerad inbyggnad i rör med rätt innerdiameter (D). • Raksträckor minst 15 D före och 5 D efter mätaren. • Installationsmontaget ska vara fritt från vibrationsproblem & kompressionschocker skall undvikas. • Rengöring och omkalibrering/justering minst vart femte år. • Årlig inspektion av mätgivaren för frekvens, störcroppens utseende (bluff body) och ev. korrosion på inre rörvägg. <p>Förväntad livslängd upp till 10 år.</p>
<p>Coriolismätare</p> <p>U(V): ± 0,5 % 5 -100 % av max mätområde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Spänningsfri inbyggnad (speciellt för äldre modeller). • Regelbunden kontroll av nollpunkten (vätskefyllt med stängda ventiler) (månatligen om temperaturen varierar mer än ca 10 °C). • Rengöring och omkalibrering/justering vart annat år och om den visar sig vara stabil, därefter minst vart femte år. Kalibreringen utförs gärna på plats med mätaren i sin installation. <p>Förväntad livslängd upp till 10 år.</p>
<p>Ultraljudsmätare (ej clamp-on)</p> <p>U(V): ± 0,5 % 5 -100 % av max mätområde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Raksträckor minst 10 – 50 D (beroende på antalet ljudspår) före och 5 D efter mätaren. • Mediet är känt och ljudhastigheten rätt inprogrammerad i instrumentet. • Inga störningar nära mätarfrequensen. • Rengöring och omkalibrering/justering minst vart femte år. <p>Förväntad livslängd upp till 15 år.</p>
<p>Venturirör</p> <p>U(V): ± 1,5 % 20 -100 % av max mätområde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Raksträckor enligt ISO 5167-3 (tabell 3) • Ledningar till tryckgivare skall vara vätskefyllda och symmetriska och monterade lutande ner mot givaren. • Årlig omkalibrering av differensstryckgivare. • Vart femte år omkalibrering av hela mätinstrumentet. • Årlig visuell inspektion på beläggningar, korrosion, slitage på ytor. <p>Förväntad livslängd upp till 30 år.</p>

Osäkerhetsangivelsen avser konfidensnivån 95 – 100 %	Specifika förutsättningar per mätartyp (i tillägg till generella)
<p>Strypskivemätare</p> <p>U(V): ± 1,5 % 20 -100 % av max mätområde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Raksträckor enligt ISO 5167-2. Behovet beror av diameterförhållandet β mellan hål och rör samt vilka flödesstörningar som finns i anslutning till raksträckan. • Ledningar till tryckgivare skall vara vätskefyllda och symmetriska och monterade lutande ner mot givaren. • Årlig omkalibrering av differenstryckgivare. • Vart femte år omkalibrering av hela mätinstrumentet. • Årlig visuell inspektion av beläggningar, korrosion, slitage på ytor och kanter. <p>Förväntad livslängd upp till 30 år</p>
<p>Turbinmätare</p> <p>U(V): ± 1 % 10 -100 % av max mätområde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Raksträckor minst 10 D uppströms och 5 D nedströms. • Montering av partikelfilter före mätaren. • Installation så att trycket efter mätaren inte är för lågt (fritt utlopp ska undvikas). • Rengöring och omkalibrering/justering vart annat år och, om den visar sig vara stabil, därefter minst vart femte år – med rätt medieviskositet. • Årlig visuell inspektion av beläggningar, korrosion, slitage på turbinen (rotor). • Om mätaren ”övervarvats” (flöde > 120% av max) bör en funktionskontroll genomföras omgående. • Osäkerheten kan eventuellt minskas genom linjarisering; detta är dock olämpligt om mätaren används till olika medieviskositeter. <p>Förväntad livslängd upp till 10 år.</p>

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut utvecklar och förmedlar teknik för näringslivets utveckling och konkurrenskraft och för säkerhet, hållbar tillväxt och god miljö i samhället. Vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling. Vår forskning sker i nära samverkan med högskola, universitet och internationella kolleger. Vi är drygt 850 medarbetare som bygger våra tjänster på kompetens, effektivitet, opartiskhet och internationell acceptans.



SP är organiserat i åtta tekniska enheter och fyra dotterbolag.



SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 BORÅS

Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02

E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

www.sp.se

Mätteknik

SP Rapport 2007:57

ISBN 978-91-85829-26-2

ISSN 0284-5172

A Member of

 United Competence