

# Bestämning av osäkerheter vid mätning och beräkning av ljudisolering i byggnad

Vilka marginaler ska man välja vid projektering av ljudisolering konstruktions, för att inte riskera undertramp vid en kontrollmätning? Frågan är viktig för byggbranschen, av skäl som beskrivs i en artikel i *Bygg & teknik* i april 2004. De beräknings- och mätmetoder som används inom byggnadsakustiken baseras på statistiska antaganden som ger både slumpmässiga och systematiska variationer. Sådana variationer orsakar problem när man ska välja produkter och konstruktioner eller tolka mätresultat. Osäkerheter innebär affärsmässiga risker, som kompenseras med ökade säkerhetsmarginaler och högre byggkostnader.

Inom ett projekt för Nordisk Innovationscenter (före detta Nordtest) har jämförande provningar och beräkningar genomförts, som gör det möjligt att rekommendera en tekniskt och ekonomiskt försvarbar marginal som parterna kan tillämpa vid beräkningar och mätningar. Den nya ljudklassningsstandarden (SS 25267:2004) för bostäder innehåller regler om medelvärdesbildning och avsteg i enskilda fall, som också bidrar till att minska problemen med mät- och beräkningsosäkerheter. Sammantaget har riskerna på grund av osäkerhet i metoderna för ljuddimensionering och kontrollmätning därmed minskats avsevärt. Motsvarande regler planeras ingå även i lokalstandarden (SS 25268), utgåva 2.

## Nordiska laboratorier har gjort jämförande provningar

Åtta laboratorier har mätt luft- och stegljudsisolering i sju olika provuppställ-

ningar på Krokslätts fabriker i Mölndal. Vid mätningarna av luft- och stegljudsisolering i byggnaden följde operatörerna anvisningar i tre mätstandarder parallellt: Grundmetoderna i SS-EN ISO 140 del 4 (luftljud) respektive del 7 (stegljud), kompletterande anvisningar i den nya delen ISO 140-14 samt bilaga H till SS 25267.

När flera mätoperatörer mäter i samma utrymmen är det önskvärt att man kommer fram till så lika resultat som möjligt, det vill säga helst skulle ljudkälla, mätpositioner, mättider med mera väljas på samma sätt, oavsett operatör. Standarderna kan dock inte skrivas så att man får exakta anvisningar i varje enskilt fall, så det finns alltid möjlighet att variera mätproceduren inom ramarna för de generella anvisningar som ges. I jämförelseprojektet följdes standarderna så noggrant som möjligt. Efter en operatörs första mätning gick projektledaren in och diskuterade mätproceduren och påpekade eventuella avvikelser från de standardiserade metoderna. Därefter gjordes mätningen om (vid behov). Övriga mät-

ningar genomfördes utan inblandning eller korrigering.

## Mindre variationer vid låga frekvenser med de nya standarderna

Alla mätresultat analyserades i tredjedels oktavband 50–3150 Hz, från vilka de vägda sammanfattningsvärdena beräknades (motsvarande de funktionskrav som ställs i SS 25267 och -68). Delresultaten från de enskilda operatörerna jämfördes mot medelvärdet för alla operatörer för respektive mätfall, och den samlade spridningen (standardavvikelsen) beräknades. Absolutvärdena är inte så intressanta, de gäller ju bara för de konstruktioner som finns i provlokalerna. Provlokaler valdes så att betingelserna för mätning var så olika som möjligt, det vill säga små-stora rum, dämpade-ekande rum, enkel-svår rumsgeometri. Utgående från antagandet, att en praktiskt och ekonomiskt försvarbar säkerhetsmarginal bör väljas så att man med högst 5 procent sannolikhet bör få riskera att få underkänt



Några av provrummen för jämförelsemätningar på Krokslätts fabriker i Mölndal

Artikelförfattare är **Christian Simmons**, tekn lic, simmons akustik & utveckling ab, Mölndal.



Beräknad mätosäkerhet, i decibel, dB:	Standardavvikelse, samtliga fall	90% konfidensintervall (1,6*standardavvikelsen), samtliga fall	Standardavvikelse, enkla utrymmen	90% konfidensintervall (1,6*standardavvikelsen), enkla utrymmen
$R'_w$	1,0	1,7	0,7	1,1
$R'_w + C$	1,2	1,9	0,8	1,3
$R'_w + C_{tr}$	1,3	2,2	0,9	1,5
$R'_w + C_{50-3150}$	1,3	2,1	0,7	1,1
$R'_w + C_{tr,50-3150}$	1,7	2,7	0,8	1,3

Tabell 1a. Osäkerhet i vägda luftljudsreduktionstal vid jämförelsemätning i Nordtestprojekt 04030.

vid en kontrollmätning (på grund av mätosäkerhet), valdes det dubbelsidiga konfidensintervallet till 90 procent och den så kallade täckningsfaktorn till 1,6. Marginalen mot underkänt 5 procent enbart på grund av mätosäkerhet antas alltså motsvara 1,6 gånger standardavvikelsen. Marginal vid dimensionering diskuteras nedan. Sammanfattningsvis erhöles följande spridning vid provningarna, tabell 1a och b:

Vid beräkningen av standardavvikelsen i  $R'_w$  och  $R'_w + C_{50-3150}$  inkluderades först alla sju mätfallen (kolumnerna 2 och 3 i tabell 1a). Resultaten visas i figur 1, där också standardavvikelsen från ISO 140-2 (hämtad från tidigare jämförelseprovningar) lagts in som en jämförelse. Osäkerheten i reduktionstalet beror av osäkerheten i var och en av termerna

$$R = L_s - L_m + 10\log(ST/0,16V)$$

där  $R$  är reduktionstalet,  $L_s$  sändarrumets ljudtrycksnivå,  $L_m$  mottagarrumets ljudtrycksnivå,  $S$  arean av skiljekonstruktionen,  $T$  efterklangstiden och  $V$  mottagarrumets volym.  $10\log(ST/0,16V)$  skrivs nedan  $10\log(S/A)$ . I analysen av mätresultaten visas osäkerheten i ljudnivåskillnaden mellan sändar- och mottagarrum  $L_s - L_m$  och rumstermen  $10\log(S/A)$ .

Man kan se i figur 1, att huvuddelen av mätosäkerheten kommer från ljudnivåskillnaden, det vill säga  $L_s - L_m$ , vilket kan förklaras av att de slumpmässiga variationerna i både sändar- och mottagarrum aderas. Osäkerheten i den tredje termen i reduktionstalet,  $10\log(S/A)$  beror både av efterklangstidsmätningen och bestämningen av skiljearea och mottagarrumsvolym. Diskussioner med operatörerna, och de exempel som analyserades, visar att det borde gå att minska denna tredje term genom att förbättra instruktionerna om hur area och volym ska bestämmas. Man bör även kräva att regressionsberäkningen av efterklangsförloppen ska kontrolleras (justeras) manuellt. Den automatiska utvärderingen som görs i ljudanalysatorn slår väldigt fel i vissa fall, särskilt vid låga frekvenser. Att spridningen i figur 1 ändå inte blev större beror på att felet till viss del jämnas ut av den medelvärdesbildning som görs enligt standardens instruktioner. I rapporten föreslås att metoden med avbrutet brus ersätts av

Beräknad mätosäkerhet, i decibel, dB:	Standardavvikelse, samtliga fall	90% konfidensintervall (1,6*standardavvikelsen), samtliga fall
$L'_{n,w}$	0,7	1,1
$L'_{n,w} + C_I$	0,7	1,2
$L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$	0,8	1,3

Tabell 1b. Osäkerhet i vägda stegljudsnivåer vid jämförelsemätning i Nordtestprojekt 04030.

rumsimpulssvar, som ger en säkrare regressionsberäkning.

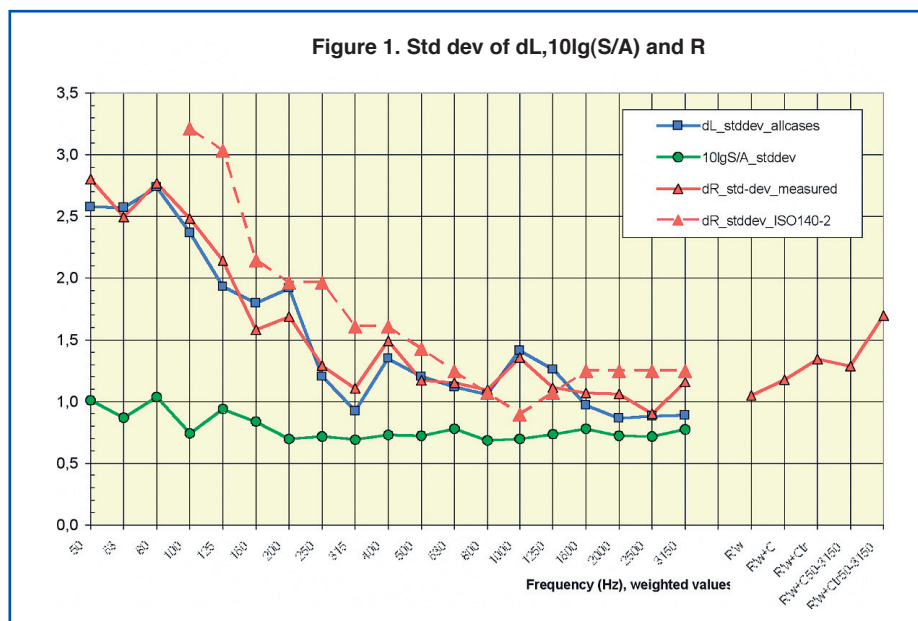
Efter analys av vilka faktorer som gav störst bidrag till den sammanlagda osäkerheten plockades två fall bort. Det ena fallet innehöll mätning från ett smalt telefonrum (2 m brett, ej diffust ljudfält, närfält till högtalaren). Det andra fallet var mätning från ett stort öppet receptionsutrymme in till ett kontor uppe på en entre-solvåning (snett ovanför, se bild med pil på föregående sida). Figur 2 på sidan 32 visar mätresultaten när de två fallen tagits bort. Resultaten från figur 1 finns med, med smala streckade linjer, som jämförelse. Mätosäkerheten minskade markant, men spridningen i ljudnivåskillnad mellan sändar- och mottagarrummen ger fortfarande en betydande osäkerhet.

I båda de fall som lyfts ur föreföll det vara svårt för operatörerna att tolka mät-

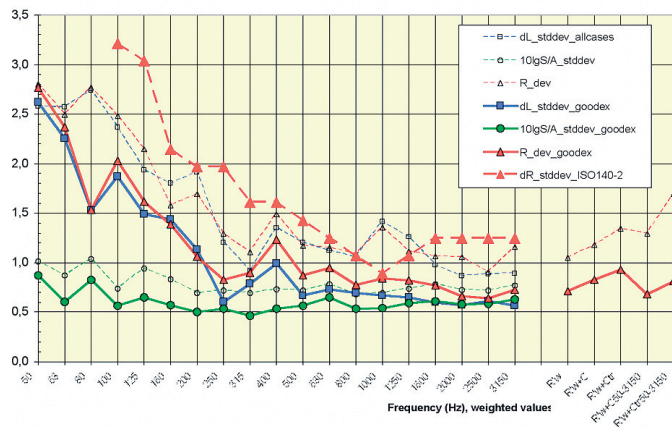
standarderna när det gällde var högtalare och mätmikrofoner skulle placeras ut. Operatörerna gjorde ganska olika val, utan att någon därmed bröt mot standarderna. Beskrivningarna behöver alltså "stramas till" på något sätt, fast det är inte så lätt att formulera något som täcker in alla tänkbara fall. Kolumnerna 4 och 5 i tabell 1a visar de reducerade osäkerheterna, som kan användas för att skatta mätosäkerheten för de använda metoderna om mättrummen är "enkla" och ljudfälten kan antas vara diffusa (enligt värderingsmetod i ISO 140-14).

### Twist mellan mätoperatörer – hur tolkar man resultat?

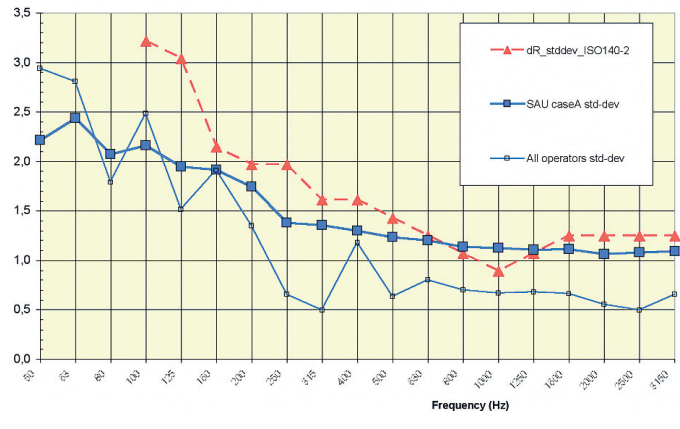
Om man hamnar i den situationen, att operatör A mäter underkänt och operatör B mäter godkänt (båda från välrenommerade och ackrediterade mätinstitut), vad



**Figure 2. Std dev of dL, 10lg(S/A) and R – excluding the D (tel.room) & E (reception) cases**



**Figure 3. CaseA: Standard deviation of R – All operators vs SAU estimate from (Ls, Lm, T, S/V)**



gör man då? I studien gjordes ett kompletterande prov av projektledaren. Ljudfälten i både sändarrum och mottagarrum mättes mycket detaljerat (76 respektive 44 fasta positioner), och spridningen mellan olika mikrofonpositioner jämfördes dels med "normalvärden" enligt ISO 140-14, dels användes de till att beräkna vilken konfidens man fått i sändarrumsnivåerna, mottagarrumsnivåerna och efterklangstiderna. Slumpmässiga variationer i skiljearea och mottagarrumsvolym studerades också inom projektet. En generell standardavvikelse om 0,5 dB lades till för att ta hänsyn till skillnader i mätutrustning mellan operatörerna. Varianserna för de olika termerna i luftljudsisoleringsformeln adderades därefter, och jämfördes med den spridning man fått genom att låta nio operatörer mäta i samma provrum (vilket man inte kan göra normalt), se figur 3.

Figur 3 visar att den skattning av osäkerheten som gjordes med standardavvikelser för var och en av termerna i reduktionstalet (fet blå linje med fyrkanter) ligger ganska nära spridningen mellan operatörernas mätresultat (tunn blå linje) vid de lägre frekvenserna. Vid höga frekvenser blir skillnaderna mellan operatörerna betydligt mindre än vad som skattades. Den röda streckade linjen med triangelmärken

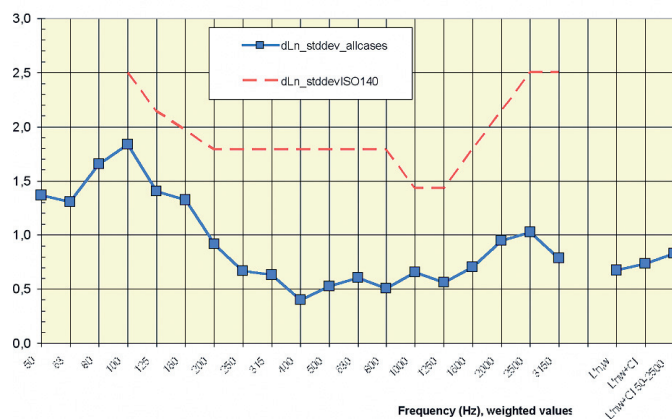
är den mätosäkerhet som anges i ISO 140-2, som baseras på en tidigare jämförelseprovning.

Det är intressant att notera, att mätosäkerheten vid låga frekvenser är lägre i denna studie än i ISO-studien. Förklaringen är rimligen den, att antalet mikrofonsväp (antal fixa positioner) och den sammanlagda mättiden har utökats väsentligt jämfört med äldre mätstandarder. En arbetsgrupp inom ISO, där undertecknad deltar, kommer att arbeta vidare med skattningar av mätosäkerhet i individuella mätningar. På sikt är förhoppningen att analysatorn själv beräknar mätresultatets osäkerhet från spridningen mellan delmätningarna. Men det finns ett antal svårigheter som behöver lösas innan detta kan bli praxis i mätstandarderna. Eftersom det finns ett tryck från de europeiska ackrediteringsmyndigheterna (EA) på ISO och CEN att få till en sådan ändring, kommer den förr eller senare, men det vore bra om inte mätmetoderna försvåras alltför mycket. Risken finns att metoderna blir så besvärliga att man inte kommer att mäta alls, vilket vore illa med tanke på behoven av erfarenhetsåterföring med mera.

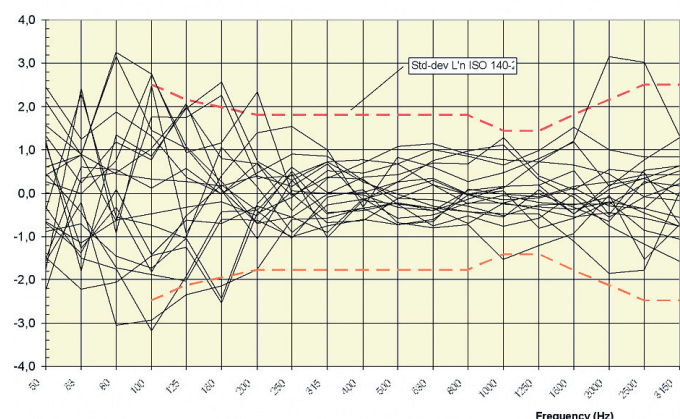
Det förefaller alltså, som att man kan analysera provrummen i ett fall där man

har en tvist, och se om den skillnad som två operatörer har kommit fram till verkar rimlig. Är skillnaden mindre än det statistiskt bestämda konfidensintervallet kan man anse att båda operatörerna har mätt korrekt och att skillnaden ligger inom gränserna för den osäkerhet som betingas av mätmetoderna och de aktuella provrummen. SS 25267 anger att man kan ta det aritmetiska medelvärdet av båda provningarna som ett slutligt resultat (underförstått att alla delprovningar ska vara korrekt utförda). I princip är det inget som hindrar, att om en operatör mäter underkänt, så är det tillåtet att ändra mikrofon- och högtalarpositionerna inom ramen för standardernas anvisningar och mäta om. Resultatet är medelvärdet av båda delmätningarna, om spridningen dem emellan är rimlig med hänsyn till standardavvikelsen inom respektive delmätning. Detta kan verka krångligt, men kan motiveras med att ett underkännande måste vila på saklig grund, eftersom man åsamkar någon part stora kostnader för åtgärder som i princip kan bero på slumpmässiga variationer i mätresultaten. Beställaren av en ljudmätning brukar vara positiv till att man försöker bestämma resultatet så noggrant som möjligt, och nu erbjuder standarderna

**Figure 4. Std dev of dLn, cases A, B, D, F**



**Figure 5. Overview of all dLn, all cases**



möjligheter att öka precisionen vid behov.

## Stegljudsnivå

Även variationerna i stegljudsnivå provades, om än inte i samma omfattning. Minst fyra av de totalt åtta operatörerna mätte stegljudsnivåer i fyra olika fall. Spridningen visas i *figurerna 4* och *5*.

Spridningen är något lägre än vad tidigare erfarenheter visar (ISO 140-2). Detta beror sannolikt på att mättiderna och antalet positioner har utökats, vilket stabiliserar medelvärdena. Ett av mätrommen hade en ojämn parkettbeläggning, som släppt från bjälklaget på flera ställen. Variationerna mellan mätpositionerna var därför större än normalt i detta rum.

Bakgrundsljud kan påverka en mätning negativt. Metoderna för att hålla uppsikt över dessa varierade mellan operatörerna, och här finns utrymme för förbättringar. Vissa analysatorer visar den högsta ljudtrycksnivå som förekommit under en mätsekvens, vilket ger en relativt säker indikation om det förekommit en störning. Under jämförelseprovningarna slogs ventilationen av och på (timerstyrd), med relativt höga ljudnivåer som följd. En av operatörerna hade en egenutvecklade metod för övervakning, där  $L_{\max} - L_{\text{eq}}$  hämtades in i datorn varje sekund, och avvikelser över medelvärdet markerades i respektive frekvensband. Stegljudsfallet ovan visar vikten av att mätoperatören lyssnar på ljudet från hammarapparaten och även håller uppsikt över analysatorn under mätning. Antalet positioner för hammarapparaten ska utökas om det finns skäl till detta. Tillverkarna av analysatorer skulle kunna förbättra programvarorna, så att bakgrundsljud eller plötsliga förändringar markeras tydligt och operatörens uppmärksamhet påkallas.

## Beräkning av ljudisolering, jämförelse med fältmätningar

Dimensionering av ljudisolerande konstruktioner kan utföras på basis av beräkningar enligt SS-EN 12354 del 1, -2 och -3. Inom projektet provades även beräkningar på ett antal fiktiva konstruktioner, där fyra av de åtta operatörerna deltog (varav två hade erfarenhet av metoderna). Beräkningsfallen var inte väl dokumenterade, vilket ofta är fallet i uppdrag där en konsult ombeds bedöma ljudisoleringen. Resultatet visar det man kunde misstänka, att man får en viss spridning mellan beräkningsresultat om operatörerna är oerfarna med metoderna (programvaran) och beräkningsförutsättningarna är otillräckligt beskrivna.

Projektledaren gjorde därefter kompletterande jämförelser av cirka 40 byggnader med tung stomme, där man hade gjort fältmätningar vertikalt. Dessa fall analyserades med programvara Bastian (version 2.1). Vid denna jämförelse fick man alltså fram en sammanlagd osäkerhet

Standardavvikelse, 4 operatörer, 7 beräkningsfall			
$R'_w$	$R'_w + C_{50-3150}$	$L'_{n,w}$	$L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$
3,0	3,0	2,6	2,3
Standardavvikelse, 4 operatörer, 6 beräkningsfall (1 fall diagonalt uteslutet)			
$R'_w$	$R'_w + C_{50-3150}$	$L'_{n,w}$	$L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$
2,6	2,6	1,8	1,4

Tabell 2. Standardavvikelse vid beräkning av sju byggnadsfall i Nordtestprojekt 04030.

från såväl beräkningar som fältmätningar i de aktuella fallen. Provningsrapporterna beskriver sällan alla ingående byggelement i detalj. Vid beräkning måste man därför göra vissa antaganden om konstruktioner, baserat på vad som kan anses typiskt för den aktuella byggnadstypen eller verksamheten. Den studie från SBUF som beskrivs i en separat artikel

de ska väljas så att de systematiska felen (mot ett antal fältmätningar) blir nära noll. Säkerhetsmarginalen ska kompensera för de slumpmässiga avvikelserna.

När det gäller lätta konstruktioner finns för närvarande inte samma underlag för en rekommendation om säkerhetsmarginaler. I SS 25267 bilaga F rekommenderas 4–5 dB marginal vid dimensionering.

DIFFERENS BERÄKNAD-MÄTT LJUDISOLERING:	$R'_w$	$R'_w + C_{50-3150}$	$L'_{n,w}$	$L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$
...systematiskt, mellan medelvärdena	-0,17	0,42	1,87	1,91
...slumpmässigt, standardavvikelse	2,3	1,6	4,4	2,9
...90%-konfidens (5% marginal)	3,5	3,0	5,1	2,7

Tabell 3. Standardavvikelse vid jämförelse beräkning-mätning av 40 byggnadsfall i Nordtestprojekt 04030.

PRAKTISKA SÄKERHETSMARGINALER VID DIMENSIONERING AV TUNGA KONSTR. MED BASTIAN (MOT KONTROLLMÄTNING ENLIGT STANDARD):	$R'_w$	$R'_w + C_{50-3150}$	$L'_{n,w}$	$L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$
	2	3	2	3

Tabell 4. Rekommenderade säkerhetsmarginaler vid dimensionering av ljudisolerande tunga konstruktioner med väl kända konstruktioner (Nordtestprojekt 04030).

gav viss vägledning. Indata för beräkning togs från den databas som hör till Bastian. Resultatet visas i *tabell 3*.

Man kan alltså förvänta sig cirka 3 dB spridning (5 dB i  $L'_{n,w}$ ) mellan beräkning och mätning vertikalt i byggnader med tung stomme, om konstruktionerna inte är noggrant dokumenterade. Om man istället räknar med konstruktioner som är väl kända (de har beräknats och mätts många gånger) och har god kvalitet i utförandet på platsen, kan marginalerna minskas för de aktuella konstruktionerna. För de fall man har bra indata rekommenderas därför något mindre marginaler vid dimensionering med Bastian, enligt *tabell 4*.

Säkerhetsmarginalerna i tabell 4 ska nu inte tas för givna för all framtid. Industrin kan bidra till att minska osäkerheterna genom att ha god kvalitetsstyrning i sin produktion, göra laboratoriemätningar och fältmätningar, och efterhand bestämma säkerhetsmarginaler som fungerar för deras produkter alternativt korrigera de indata som gäller för produkterna. Huvudprincipen för valet av indata bör vara att

Härvid förutsätts att rätt indata kan väljas vid beräkning. I artikeln om SBUF:s databasprojekt, på sidan 34 i detta nummer av Bygg & teknik, diskuteras denna fråga vidare.

Projektrapport 04030 kan beställas från [www.nordicinnovation.net](http://www.nordicinnovation.net) eller [www.simmons.se](http://www.simmons.se).