In Geen Jaar Ingenieur, of hoe de logaritme Jan belet een *echte* ingenieur te worden.

Een ingenieur maakt dimensieloos om het inzicht, niet om zijn berekeningen te controleren. Een ingenieur is scrupuleus en gebruikt slechts dimensieloze argumenten van wiskundige functies.

Deze diepe maar radicale ideeën zijn een selectie van Jan's evangelie, gepredikt tijdens de ochtenddiensten[1] die wij de afgelopen jaren mochten meemaken.

Ik wil hier aantonen hoe niet-vanzelfsprekend deze ideeën zijn, omdat de *echte ingenieur* toch anders denkt. Ik zal een paar voorbeelden geven die weliswaar anekdotisch maar zeer serieus zijn, omdat ze komen uit een gebied waar de botsing tussen maatschappij en techniek in wet en regelgeving geïnstitutionaliseerd is, te weten lawaainormen en vliegtuigcertificatie.

Het grote bereik van ons gehoor, zowel in amplitude als frequentie, maakt dat we voor deze variabelen geen bruikbare fysiologische referentie hebben, waardoor onze waarneming van geluid ruwweg logaritmisch afhankelijk is van de fysische basisvariabelen (vrij naar de wet van Weber). Als gevolg hiervan speelt in de akoestische perceptieleer de logaritme een grote rol. Zo is een basiseenheid van geluidsniveau, de SPL (Sound Pressure Level), gedefinieerd als 20 maal de logaritme van de verhouding tussen de drukfluctuaties *p(t)*, L_2-gemiddeld over een afgesproken periode *T*, en een referentiewaarde p_{ref}.

Vanwege bepaalde eigenschappen van de logaritme die bij iedere middelbare scholier bekend *waren*, kunnen we in plaats van te delen, de logaritme van de middelingstijd maal de referentiewaarde ook als constante aftrekken, en voilà: daar verschijnt al de eerste wiskundige functie met dimensievol argument.

$$SPL = 20\log\left(\sqrt{\int_0^T p(t)^2\,dt}\right) - 20\log(Tp_{ref})\,.$$

"Wat is daar verkeerd aan?" raad ik u denken. Niets, als het hierbij bleef. Deze SPL is echter de bouwsteen van allerlei andere normen. Een seconde geluid representeert een praktisch oneindig-dimensionale grootheid, die zich, in combinatie met de variabele gevoeligheden van de burger, slechts met veel moeite 1-dimensionaal laat ordenen middels een norm. Als deze norm (dwz. het niet voldoen eraan) bovendien geld gaat kosten, zodat we juristen en politici in ons natuurwetenschappelijk wereldje moeten toelaten, dan wordt het duidelijk dat bij het tot stand komen van zo'n norm het hanteren van elementaire wiskundige rekenregels zo ongeveer het laatste is waar men zich druk om maakt.

In het bij elkaar goochelen van een norm worden logaritmes van drukken met tamelijk arbitraire factoren vermenigvuldigd, opgeteld bij logaritmes van aantallen en gevoelsfactoren, waarna er tenslotte een passende constante bij wordt opgeteld om een getal te krijgen dat positief is, niet te klein en niet te groot, zodat het resultaat wetenschappelijk klinkt.

Een voorbeeld is de officiële bepaling van het EPNL (Effective Perceived Noise Level), een maat voor het op de grond waargenomen operationele lawaai van een tijdens start of landing passerend vliegtuig. Voordat een vliegtuig gecertificeerd wordt en verkocht mag worden, moet

[1] a.k.a. koffiepauzes

het (in ons deel van de beschaafde wereld) beneden een bepaalde EPNL waarde scoren[2]. Ik heb hieronder een samenvatting van de procedure tot deze norm gevoegd[3] (de complete procedure bevat nog vele tabellen, grafieken, voorbeelden, uitzonderingen, en voorschriften voor de aanvlieg- en start-paden).

Het is interessant te zien hoe weinig wiskundig de procedure geworden is, ook al liggen er herkenbare ideeën onder. Het leest als een belastingaangiftebiljet, met opdrachten om waarden te omcirkelen, en verschillen tussen, dan wel sommaties over, stapjes te nemen waar het zoveel eenvoudiger was om te spreken van afgeleide en integraal. Meestal zijn de coëfficiënten getallen in 2 cijfers, soms wordt op wonderlijke wijze een 2-log exact in 10-log omgeschreven. In plaats van een eenvoudige macht van 10 wordt men haast op een dwaalspoor gebracht met de “antilog”. Tenslotte wordt in de “duurcorrectie” (D) dezelfde “Maximum Tone-Corrected Perceived Noise Level” (PNLTM) afgetrokken, die er in het eindresultaat (EPNL) weer bij wordt opgeteld[4].

Hoe hilarisch ook, deze EPNL is een zeer serieuze zaak. Een vliegtuig dat het niet haalt is onverkoopbaar en daarom alleen al gaat deze norm over miljarden $/€’s.

Van een andere aard is de norm die bepaalt of een vliegveldomgeving met teveel lawaai belast wordt. Zoals bekend, werd de groei van Schiphol in het recente verleden in hoge mate beperkt door het (te) lage totale geluidsquotum dat bij wet was toegekend. Omdat deze koek in november al op was, moest Schiphol’s lawaai daarna tot 31 december worden gedoogd. Om de daaruit volgende politieke crisis op te lossen is de volgende truc toegepast, die per definitie legaal is, maar wel de sterke verdenking aan zich heeft dat op slinkse wijze van de onkunde van de gemiddelde burger en politicus is gebruik gemaakt.

Een vliegveld is geen vliegtuig, en EPNL’s zijn niet een goede maat voor het lawaai rond een vliegveld. Hierin moet zowel het lawaai per vliegtuig, als hoe vaak en wanneer het optreedt meetellen. In de jaren zestig heeft de commissie Kosten hiertoe een onderzoek (enquete) gedaan, teneinde te komen tot een mooie maat voor de geluidsbelasting in een punt $\boldsymbol{x}$ op de grond. Dit werd iets wat er zo uitziet:

$$B(x) = 20\log\left(\sum_{i=1}^{N} g_i 10^{\frac{1}{15}L_i}\right) - 157\,,$$

met de naam *Kosteneenheden* (Ke). Hierbij duidt i op de i-de vliegbeweging, g een dagdeel-gewichtsfactor, L de gemeten SPL (mits boven 65 dB), en 15 en 157 leuke constanten. Als je alles constant neemt, en de afkap negeert, dan wordt dit

$$B = 20\log N + \frac{20}{15}L - 157\,.$$

---

[2] Naar verluidt ging Fokker hiervoor altijd naar een woestijn in Spanje omdat de klimatologische omstandigheden in combinatie met overigens volkomen overbodige motor de-icing al een dB-tje scheelde.

[3] van: http://rgl.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgFinalRule.nsf/

[4] Waarschijnlijk is dit ook een voorbeeld van de schijnbewegingen, die oud-premier Kok indertijd deed verzuchten dat er maar 7 mensen in Nederland waren die dit begrepen. Hij overdreef, want hij bedoelde alleen maar dat hij er niets van begreep, maar toch …

Als de jaarlijkse afname van lawaai per nieuw gebouwd vliegtuig is te schatten op 0.3 dB, dan volgt hier dus direct uit hoeveel N mag toenemen bij gelijkblijvende B[5]:

$$\frac{\Delta N}{N} = -\frac{1}{15}\Delta L = \frac{1}{50} = 2\% \,.$$

Let hierbij op de factor 15. Een kleinere factor laat meer groei toe. Daarom kwam het Schiphol wel zeer goed uit dat met ingang van 2004 de L_{den}-norm (Day-Evening-Night) in alle Europese landen verplicht werd. Deze norm ziet er zo uit (als we weer alles constant nemen):

$$L_{den} = 10 \log N + L - \text{const} \,.$$

We krijgen nu een maximaal toegestane relatieve groei van

$$\frac{\Delta N}{N} = -\frac{1}{10}\Delta L = \frac{3}{100} = 3\% \,.$$

Anderhalf keer zoveel dus door een factor 10, waar eerder 15 stond. Zo ziet de burger tot zijn verbazing dat langzaam maar zeker, met afnemende L, Schiphol steeds beter aan de norm voldoet, terwijl er toch niets is veranderd…………

Om kort te gaan, er blijft werk aan de winkel.

Sjoerd Rienstra, Malden 16 juni 2007

[5] Differentieer *N(L)* impliciet naar *L*. Aardige som voor cursus Calculus.

Section A36.4 Calculation of Effective Perceived Noise Level From Measured Data

A36.4.2 *Perceived noise level.*

A36.4.2.1 Instantaneous perceived noise levels, *PNL(k)*, must be calculated from instantaneous one-third octave band sound pressure levels, *SPL(i, k)* as follows:

Step 1: For each one-third octave band from 50 through 10,000 Hz, convert *SPL(i, k)* to perceived noisiness *n(i, k)*, by using the mathematical formulation of the noy table given in section A36.4.7.

Step 2: Combine the perceived noisiness values, *n(i, k)*, determined in step 1 by using the following formula:

$$N(k) = n(k) + 0.15\left\{\left[\sum_{i=1}^{24} n(i,k)\right] - n(k)\right\} = 0.85\,n(k) + 0.15\sum_{i=1}^{24} n(i,k)$$

where *n(k)* is the largest of the 24 values of *n(i, k)* and *N(k)* is the total perceived noisiness.

Step 3: Convert the total perceived noisiness, *N(k)*, determined in Step 2 into perceived noise level, *PNL(k)*, using the following formula:

$$PNL(k) = 40.0 + \frac{10}{\log 2}\log N(k)$$

A36.4.3 *Correction for spectral irregularities.*

A36.4.3.1 Noise having pronounced spectral irregularities (for example, the maximum discrete frequency components or tones) must be adjusted by the correction factor *C(k)* calculated as follows:

Step 1: After applying the corrections specified under section A36.3.9, start with the sound pressure level in the 80 Hz one-third octave band (band number 3), calculate the changes in sound pressure level (or "slopes") in the remainder of the one-third octave bands as follows:

- *s(3,k)* = no value
- *s(4,k) = SPL(4,k) - SPL(3,k)*
- …..
- *s(24,k) = SPL(24,k) - SPL(23,k)*

Step 2: Encircle the value of the slope, *s(i, k)*, where the absolute value of the change in slope is greater than five; that is where:

$$\left|\Delta s(i,k)\right| = \left|s(i,k) - s(i-1,k)\right| > 5$$

Step 3: (1) If the encircled value of the slope *s(i, k)* is positive and algebraically greater than the slope *s(i-1, k)* encircle *SPL(i, k).*
(2) If the encircled value of the slope *s(i, k)* is zero or negative and the slope *s(i-1, k)* is positive, encircle *SPL(i-1, k).*
(3) For all other cases, no sound pressure level value is to be encircled.

Step 4: Compute new adjusted sound pressure levels *SPL'(i, k)* as follows:
(1) For non-encircled sound pressure levels, set the new sound pressure levels equal to the original sound pressure levels, *SPL'(i, k) = SPL(i, k).*
(2) For encircled sound pressure levels in bands 1 through 23 inclusive, set the new sound pressure level equal to the arithmetic average of the preceding and following sound pressure levels as shown below:
SPL'(i,k) = ½ [SPL(i-1,k) + SPL(i+1,k)]
(3) If the sound pressure level in the highest frequency band (*i* = 24) is encircled, set the new sound pressure level in that band equal to:
SPL'(24,k) = SPL(23,k)+s(23,k)

Step 5: Recompute new slope *s'(i, k)*, including one for an imaginary 25th band, as follows:

- *s'(3,k) = s'(4,k)*
- *s'(4,k) = SPL'(4,k) - SPL'(3,k)*
- …..
- *s'(24,k) = SPL'(24,k) - SPL'(23,k)*
- *s'(25,k) = s'(24,k)*

Step 6: For i, from 3 through 23, compute the arithmetic average of the three adjacent slopes as follows:

$$\left|\bar{s}(i,k)\right| = \tfrac{1}{3}\left|s'(i,k) + s'(i+1,k) + s'(i+2,k)\right|$$

Step 7: Compute final one-third octave-band sound pressure levels, *SPL" (i,k)*, by beginning with band number 3 and proceeding to band number 24 as follows:

- *SPL"(3,k) = SPL(3,k)*
- *SPL"(4,k) = SPL"(3,k) + s(3,k)*
- …..
- *SPL"(24,k) = SPL"(23,k) + s(23,k)*

Step 8: Calculate the differences, *F (i,k)*, between the original sound pressure level and the final background sound pressure level as follows:

F(i,k) = SPL(i,k) - SPL"(i,k)

and note only values equal to or greater than 1.5.

Step 9: For each of the relevant one-third octave bands (3 through 24), determine tone correction factors from the sound pressure level differences *F (i, k)* and Table A36-2.

Step 10: Designate the largest of the tone correction factors, determined in Step 9, as *C(k)*. (An example of the tone correction procedure is given in the current advisory circular for this part). Tone-corrected perceived noise levels *PNLT(k)* must be determined by adding the *C(k)* values to corresponding *PNL(k)* values, that is:

PNLT(k) = PNL(k) + C(k)

A36.4.4 Maximum tone-corrected perceived noise level

A36.4.4.1 The maximum tone-corrected perceived noise level, *PNLTM*, must be the maximum calculated value of the tone-corrected perceived noise level *PNLT*(k). It must be calculated using the procedure of section A36.4.3. To obtain a satisfactory noise time history, measurements must be made at 0.5 second time intervals.
Note : In the absence of a tone correction factor, *PNLTM* would equal *PNLM*.

A36.4.4.2 After the value of *PNLTM* is obtained, the frequency band for the largest tone correction factor is identified for the two preceding and two succeeding 500 ms data samples. This is performed in order to identity the possibility of tone suppression at *PNLTM* by one-third octave band sharing of that tone. If the value of the tone correction factor *C(k)* for *PNLTM* is less than the average value of *C(k)* for the five consecutive time intervals, the average value of *C(k)* must be used to compute a new value for *PNLTM*.

A36.4.5 *Duration correction.*

A36.4.5.1 The duration correction factor *D* determined by the integration technique is defined by the expression:

$$D = 10\log\left[\left(\frac{1}{T}\right)\int_{t(1)}^{t(2)} \text{antilog}\frac{PNLT}{10}\,dt\right] - PNLTM$$

where *T* is a normalizing time constant, *PNLTM* is the maximum value of *PNLT*, *t*(1) is the first point of time after which *PNLT* becomes greater than *PNLTM*-10, and *t*(2) is the point of time after which *PNLT* remains constantly less than *PNLTM*-10.

A36.4.5.2 Since *PNLT* is calculated from measured values of sound pressure level (*SPL*), there is no obvious equation for *PNLT* as a function of time. Consequently, the equation is to be rewritten with a summation sign instead of an integral sign as follows:

$$D = 10\log\left[\left(\frac{1}{T}\right)\sum_{k=1}^{d/\Delta t} \Delta t.\text{antilog}\frac{PNLT(k)}{10}\right] - PNLTM$$

where Δt is the length of the equal increments of time for which *PNLT(k)* is calculated and *d* is the time interval to the nearest 0.5s during which *PNLT(k)* remains greater or equal to *PNLTM*-10.

A36.4.5.3 To obtain a satisfactory history of the perceived noise level use one of the following: (a) Half-Second time intervals for Δ*t*; or (b) a shorter time interval with approved limits and constants.

A36.4.5.4 The following values for *T* and Δ*t* must be used in calculating *D* in the equation given in section A36.4.5.2:
T = 10 s, and Δ*t* = 0.5s (or the approved sampling time interval).
Using these values, the equation for D becomes:

$$D = 10\log\left[\frac{1}{T}\sum_{k=1}^{2d} \text{antilog}\frac{PNLT(k)}{10}\right] - PNLTM - 13$$

where *d* is the duration time defined by the points corresponding to the values PNLTM-10.

A36.4.6 *Effective perceived noise level*.
The total subjective effect of an airplane noise event, designated effective perceived noise level, *EPNL*, is equal to the algebraic sum of the maximum value of the tone-corrected perceived noise level, *PNLTM*, and the duration correction *D*. That is:

EPNL = PNLTM + D

where *PNLTM* and *D* are calculated using the procedures given in sections A36.4.2, A36.4.3, A36.4.4. and A36.4.5.