

Bijlagen KiM-notitie 'Hoe beïnvloedt de snelheid van auto's de reistijd en negatieve effecten van autogebruik?'

Bijlage 1

De methode, in formules

B1.1 Reistijd

De reistijd (t) volgt uit formule voor afgelegde afstand (s) bij constante snelheid (v):

$$s = v \cdot t, \text{ ofwel: } t = s/v \quad \text{B1.1}$$

De verhouding τ van de reistijd t_v bij een willekeurige snelheid en de reistijd t_{100} bij $v=100\text{km/h}$ is

$$\tau = t_v/t_{100} = 100/v, \text{ met } v \text{ in [km/h]} \quad \text{B1.2}$$

In woorden: reistijd is omgekeerd evenredig met de snelheid. Neemt de snelheid toe, dan neemt de reistijd af met de reciproke waarde van de snelheid.

B1.2 Verkeersveiligheid

Over de relatie tussen snelheid en verkeersveiligheid is veel literatuur bekend. Inmiddels is er in de wetenschap behoorlijke consensus over die relatie. Bijlage 1 biedt een literatuuroverzicht van de talrijke, soms tegenstrijdige bevindingen in de laatste decennia, en beschrijft ook de thans gangbare beschrijving van de relatie tussen snelheid en verkeersonveiligheid.

Voor verkeersveiligheid is het begrip *risico* gangbaar: dat is de kans op een (dodelijk) ongeval per afgelegde afstand van een weggebruiker waarbij die weggebruiker overlijdt. Hier beperken we ons tot de relatie tussen snelheid en de kans op *dodelijke* ongevallen, en we spitsen die toe op de snelheid van gemotoriseerd verkeer en de ongevallen met gemotoriseerde voertuigen. Dit lichten we toe aan het slot van deze paragraaf.

Het overlijdensrisico is uiteraard ook afhankelijk van de inrichting van de weg, het overige verkeer, weersomstandigheden, verlichtingsomstandigheden, enzovoort. Voor de relatie met de snelheid wordt, in de meest geciteerde literatuur, voor al deze omstandigheden een gemiddelde aangehouden.

De relatie tussen het overlijdensrisico en de snelheid, voor gemiddelde omstandigheden, is volgens de conclusie in bijlage 1 exponentieel:

$$R_v = a \cdot e^{b \cdot v}, \text{ met } b \text{ in h/km en } v \text{ in km/h} \quad \text{B1.3}$$

Hier is R het overlijdensrisico (kans op overlijden van een weggebruiker per afgelegde afstand van die weggebruiker) en a is een constante met als eenheid [verkeersdoden/km]. Deze constante is hoog voor onveilige bestuurders, een onveilige weg, veel ander verkeer, etcetera, en laag wanneer al deze omstandigheden gunstig zijn.; v is de snelheid [km/h] en b is een constante met de eenheid van $1/v$. Met v in km/h is b in h/km.

Bij een snelheid van 100 km/h heeft R een bepaalde waarde, afhankelijk van a en b : deze waarde noemen we R_{100} . De verhouding tussen R_v en R_{100} noemen we ρ en kunnen we schrijven als:

$$\rho_v = R_v/R_{100} = a \cdot e^{b \cdot v} / a \cdot e^{b \cdot 100} \text{ ofwel: } \rho_v = e^{b \cdot (v-100)} \quad \text{B1.4}$$

Hieruit volgt dat het risico op een dodelijk verkeersongeval exponentieel toe-(of af-)neemt met een toe-(of af-)name van de snelheid. Volgens de verzamelde bevindingen uit de wetenschappelijke literatuur is de waarde van b ongeveer gelijk aan 0,067 h/km voor het risico op verkeersdoden.

$$\rho_v = e^{0,067 \cdot (v-100)} \text{ (met } v \text{ in km/h)} \quad \text{B1.5}$$

Over de relatie tussen snelheid van een weggebruiker en de kans op een ongeval waarbij die weggebruiker ernstig gewond raakt is ook veel bekend, maar de relatie tussen niet-dodelijke ernstige ongevallen en snelheid is niet eenduidig. En per definitie is die relatie ook anders dan die voor dodelijke ongevallen, omdat ongevallen al bij een lagere snelheid tot ongevallen met gewonden kunnen leiden. We geven vijf redenen waarom we ongevallen met ernstig gewonden buiten beschouwing laten:

1. Er zijn verschillende soorten letsel, en de gehanteerde definitie voor wat nu precies een ernstig verkeersgewonde is, is in de loop der jaren, en voor verschillende landen, niet gelijklopend.
2. Dodelijke ongevallen worden in de samenleving en in beleid doorgaans vaker genoemd en eerder als probleem erkend.
3. De omstandigheden die leiden tot een ernstig ongeval zijn veel moeilijker te achterhalen omdat niet-dodelijke ongevallen eer veel slechter (namelijk: vaak in het geheel niet) worden geregistreerd. Wel kennen we dan, bijvoorbeeld uit gegevens van gewonden in ziekenhuizen, een schatting van het aantal verkeersgewonden, maar niet de omstandigheden van het ongeval. Dit is een wereldwijd probleem.
4. In Nederland is het overgrote deel van de ernstig verkeersgewonden een fietser die van de fiets is gevallen. Deze ongevallen zijn niet gerelateerd aan de snelheid van auto's.
5. De relatie tussen snelheid en de kans op een verkeersongeval met ernstig gewonden is vergelijkbaar met de relatie tussen snelheid en een dodelijk ongeval. Ook die relatie verloopt exponentieel: de kans op een verkeersgewonde neemt exponentieel toe met de snelheid. Sterker nog: in veel literatuur over dit onderwerp wordt de relatie tussen snelheid en (willekeurige) letselongevallen onderzocht, waarbij alle soorten letsel over één kam worden geschoren. De relatie tussen snelheid en de kans op een ongeval hangt af van de ernst van de verwonding. Verschillend samengestelde soorten letsel of verschillende definities (of registraties) van wat een ernstig ongeval is, bepalen dan de precieze relatie die de onderzoekers vinden.

B1.3 Emissie van CO₂ van een benzineauto

Voor de bepaling van de CO₂-emissie bij verschillende snelheden, hebben we gebruik gemaakt van twee TNO-rapporten: [Supporting analysis on real-world light-duty vehicle CO₂-emissions](#) voor de beschrijving van de fysica, en van [CO₂ in-service verification test campaign and methodology development for light-duty vehicles - Publications Office of the EU \(europa.eu\)](#) voor de benodigde gegevens. Op basis van de gegevens en formules in deze TNO-rapporten hebben we in Bijlage 2 een eenvoudige formule voor de CO₂-emissie e bij verschillende snelheden opgesteld. Deze formule geldt voor een moderne Ford Fiësta die op benzine rijdt. We hebben voor de Ford Fiësta gekozen omdat voor deze auto de benodigde gegevens voorhanden zijn.

$$e_v = 1054/v + 31,2 + 0,15626 \cdot v + 0,0076752 \cdot v^2 \text{ (g/km, } v \text{ in km/h)} \quad \text{B1.6}$$

De emissie e_v is in g/km, v is in km/h. De dimensies van de parameters volgen hieruit.

In deze vergelijking staan vier termen: De eerste term houdt verband met de emissie door wrijvingsverliezen in de motor. Als de motor draait, gebruikt de motor energie, zelfs als de auto stilstaat. In dat geval is de motor, *per km*, erg inefficiënt. Vandaar dat bij deze term de snelheid in de noemer staat. De tweede term is gebaseerd op de rolweerstand van de auto. Deze term is constant, omdat de rolweerstand niet van de snelheid afhangt. Omdat er, zeker bij hoge snelheid, meer energie nodig is door de luchtwrijving zijn er nog een derde en vierde term nodig. De extra energie (per km) die nodig is om de luchtwrijving te compenseren neemt toe met de snelheid. Die toename is bij lage snelheid lineair met de snelheid, maar neemt bij hogere snelheid kwadratisch met de snelheid toe.

Vergelijking 2.6 geeft de emissie in g per km. Als we $v = 100 \text{ km/h}$ invullen vinden we de emissie in g per km als de auto 100 km/h rijdt.

$$e_v = 1054/100 + 31,2 + 0,15626 \cdot 100 + 0,0076752 \cdot 100^2 \text{ (g/km)} \quad \text{B1.7}$$

$$e_{100} = 10,54 + 31,2 + 15,626 + 76,752 = 134 \text{ (g/km)} \quad \text{B1.8}$$

De verhouding ϵ tussen de emissie bij een willekeurige snelheid en die bij een snelheid van 100 km/h is gelijk aan de uitdrukking B1.6 voor e_{100} [de emissie bij willekeurige snelheid], gedeeld door $e_{100} = 134$ [de emissie bij een snelheid van 100 km/h , volgens B1.8]

$$\epsilon_v = e_v/e_{100} = [1054/v + 31,2 + 0,15626 \cdot v + 0,0076752 \cdot v^2]/134 \quad \text{B1.9}$$

B1.4 Geluid

Een rijdende auto brengt geluid voort, met de motor en de banden. Ook een stilstaande auto met draaiende motor maakt geluid. Dit geluid kan hinder veroorzaken. De hoeveelheid hinder van auto's voor omwonenden van wegen hangt van allerlei factoren af: achtergrondgeluid, de samenstelling van het verkeer, de verkeersintensiteit en de gereden snelheid. Een drukke weg, of een weg met veel vrachtverkeer veroorzaakt meer geluidsoverlast dan een rustige weg met weinig vrachtverkeer. Hier beperken we ons tot de bijdrage aan die geluidsoverlast van één auto, door de geluidssterkte van die auto te bepalen.

Geluidssterkte wordt uitgedrukt in decibel [dB], die een logaritmische schaal volgt. De geluidsproductie van een enkele auto is, voor snelheden van 40 km/h of meer, logaritmisch afhankelijk van de snelheid:

$$L = a + b \log v \quad \text{B1.10}$$

Hierin is L de geluidssterkte (om precies te zijn: het geluidsvermogen) in dB, a en b zijn constanten die afhangen van allerlei factoren zoals de afstand tot de geluidsbron, het type auto met bijbehorende motorkarakteristieken en de eenheid van v : als de snelheid wordt uitgedrukt in km/h heeft b een andere waarde dan wanneer v wordt uitgedrukt in mijl/h of m/s . De geluidssterkte van autoverkeer is bovendien een optelsom van het geluid van het meest nabije deel van het verkeer, maar ook van verder weg gelegen delen van de weg waarop het verkeer rijdt. Naarmate men sneller rijdt, neemt de geluidssterkte van al deze bijdragen in dezelfde mate toe (hoewel de veroorzaakte *overlast* van dit geluid vooral wordt bepaald door de bijdrage op het hoogste niveau).

In deze analyse bepalen we de verhouding van de geluidssterkte bij snelheid v ten opzichte van de geluidssterkte bij 100 km/h op basis van bovenstaande formule, als eenvoudige benadering van het effect van de snelheid op de geluidssterkte.

Voor een lichte auto, rijdend op dicht asfalt is, volgens bijlage 3 van deze notitie, $a = 45,8 \text{ dB}$ en $b = 30 \text{ dB}$.

$$L = 45,8 + 30 \log v, \text{ met } v \text{ in km/h}$$

B1.11

Als $v=100$ km/h is L:

$$L = 105,8 \text{ dB}$$

B1.12

Bij een willekeurige snelheid v is de verhouding tussen de geluidssterkte bij die snelheid, en bij de snelheid van 100 km/h, λ , gegeven door:

$$\lambda_v = [45,8 + 30 \log v]/105,8$$

B1.13

Bijlage 2

The mathematical relation between crash risk and speed; a summary of findings based on scientific literature

B2.1 Introduction

There is hardly any subject that is researched more than the relation between road safety and speed. This is because we all know that higher speed implies a longer distance to come to a stop if anything goes wrong, and heavier crashes between road users with more energy to be dissipated and stronger forces to be dealt with. Speed can be measured, crashes can be counted, hence it has been a fruitful field of investigation and mathematical model fitting for many decades. One would expect that the relation between risk (i.e. the number of crashes per distance travelled, so as to correct for differences in travel) and speed would be established and well known by now. Unfortunately, this is not true.

There are almost as many results as there are researchers. For many policy makers, this forest of publications and reports doesn't exactly make it easy to decide which publication to take as a guide. This paper is meant to shed a light on the most important scientific publications and help policy makers find their way. We start with a small choice of some of the issues that have led to confusion, and then proceed with a description of some of the more established results, their differences and properties. Finally we present a guide meant to help decide which compass to sail on.

B2.1.1 Variations in definitions of speeds and crash risk

There is massive research literature on the relation between speed and crash rate. Results show a wide variety of possible relations, largely because both speed and crash rates are also defined in various ways.

Speed is taken as (e.g.):

- speed of a single sampled vehicle
- speed, just before a crash, of a crashed vehicle, reconstructed from in depth crash research.
- average of locally observed speeds in a traffic sample on a specific road or set of roads
- speed limit of a specific road

Crash rate is taken as (e.g.)

- the number of crashes in the last three years (as stated by each driver)
- the number of crashed vehicles divided by the number of vehicles that did not crash (in a control group)
- the number of crashes in a specific period (before and after a change in speed limit) on a specific road or group of roads

And then, sometimes not the speeds, but the differences in speed between subsequent vehicles, or between an individual speed and the mean speed are brought into the discussion.

B2.1.2 The severity of crashes and crash report rates

Research regarding the relation between speed and crash risk is based on numbers of observed (or claimed) crashes, and as we know from e.g. ETSC's Pin Flash 35, even fatal crashes are not always reported, while less severe crash data are even much less complete. Also, fatal crash data are often far too scarce to use as a basis for quantitative research. Hence, all results may suffer from the influence of underreporting, which is worse for less severe crashes. As crash severity is likely to be correlated with speed, this implies that police crash report rates may vary with speed, i.e.

report rates may be lower for lower speed. It is difficult to verify this assumption, but on the other hand, it is likely there is at least some truth in it, and it is therefore a good idea not to take the data at face value, especially data of injury crashes in year to year comparisons. The uncertainty of report rates justifies a careful approach in data analyses in before-after studies.

The number of people killed, or injured, per fatal (or serious) crash constitutes another possible flaw in the reported data. These numbers are different in different countries, and this may well be caused by differences in underreporting of crashes with less victims. Hence, analyses of the relation between speed and the number of casualties per crash may be hindered by this possible report rate effect.

B2.1.3 Mathematical relations

The results of speed-crash research invariably show that higher speeds are associated with a higher crash rate. The formulas used to quantify this relation come in different categories that are perhaps not always very well understood by all readers and sometimes even authors. Two of the most important types of mathematical relations are:

- the power law: crash risk r is proportional to speed raised to a certain power, or $r = a \cdot v^b$.
- an exponential law: crash risk r is proportional to an exponential function of speed, or $r = a \cdot e^{b \cdot v}$.

Here, a and b are constants, where a often depends on speed limit, average speed, the exact choice for the definition of r , etc.

An important property of the power law is that the elasticity between r and v is constant and equal to b . The elasticity is the factor between change in speed and change in risk. E.g. if $b=4$, this means that if speed increases by 10%, risk increases by 40%. This is true for the entire range of speeds for which the power law is (supposed to be) valid. The exponential function does not have that property. On the contrary, if the relation between risk and speed follows an exponential function, elasticity changes with speed permanently. The higher the speed, the higher the elasticity.

These two function types are not easily distinguished in practice, based on data. One needs quite a number of data in a wide range of speeds, collected in well controlled experiments, to establish a specific power sufficiently accurately, or to be certain that the data follow a power law and not an exponential function, or the other way around. Hence when data are fitted to either function, reasonably good fits can be obtained for both functions at the same time.

In a graph where both speed data and risk data are plotted, the data show a curved relation. When a decision has to be made upon the choice of the mathematical function of this relation, it is not easy to see whether an exponential or a power function should be chosen. Both are curved, and both often look more or less suitable. To help decide which is best, it is often a good idea to plot the data in a graph with either linear or logarithmic axes, before deciding which mathematic form to choose for further analysis. If the data follow an exponential function, they will show as a straight line when risk is plotted on a logarithmic axis and speed on a linear axis. If the data follow a power law, this can be shown by plotting the data in a double logarithmic figure (i.e. with both the speed and the risk axis being logarithmic). Excel facilitates these types of graphs; simply right-click on the axis of a figure in Excel and tick the logarithmic axis box.

B2.1.4 Is it kinetic energy we deal with? And if not, what is the better alternative?

Many papers and reports regarding road safety and speed suggest it is the release of kinetic energy $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ that is the source of all the damage. Actually, this is not true. Even in the case of an almost perfectly elastic collision between two objects with people inside, where virtually all energy is conserved, people may be killed. The actual problem with road crashes is not the kinetic energy, but the change in momentum (i.e. the product of speed and mass), Δmv , also called *thrust*, that requires the brain and other body parts to decelerate very fast. Even if a body is perfectly protected from external damage, a very fast stop due to a crash may cause fatal injuries and death. The effect of many protective gears such as a helmet, is not only to prevent the

penetration of sharp objects into the brain, but also to low down the speed change. This is not the same as absorbing energy.

The thrust on a decelerating body changing from speed = v to zero speed in a short crash time Δt equals $mv = F\Delta t$, which means that the human body experiences a force F during a short time interval Δt . Hence the force F equals $mv/\Delta t$. Assuming the available distance s to come to a stop (the distance between the front of the car and the body of the car occupant, or the crumple zone) is approximately fixed, simple linear acceleration equations yield: $s = v\Delta t + \frac{1}{2}a(\Delta t)^2$ and $0 = v + a\Delta t$; the latter implies $a = -v/\Delta t$, and substitution in the first equation yields $s = v\Delta t - \frac{1}{2}v\Delta t = \frac{1}{2}v\Delta t$. Hence $\Delta t = 2s/v$. Hence, as Δt decreases with increasing speed (the crashing vehicle has to come to a stop in a shorter time when speed is high), the force as a consequence of the crash is proportional to v^2 .

We conclude that in a crash, the force on the body (and the brain), $F = mv/\Delta t = \frac{1}{2}mv^2/s$, is proportional to v^2 , just like the kinetic energy, $\frac{1}{2}mv^2$, is. Nevertheless, the difference between this force and kinetic energy is very important. It explains that even if vehicles have a perfect crumple zone which absorbs virtually all energy, they still can't prevent occupants from being killed when speeds are high, especially when the vehicle is small and the crumple zone (and thus the Δt) is small as well. It is not the dissipation of energy that constitutes the danger, it is the deceleration, the thrust and the force on the body during the crash. Due to this force, even if the car occupant is strapped in a seat belt and well protected by the car around him or her, the brain, thrust forward inside the skull which is violently decelerated, can get fatally damaged. And of course, other parts of the body (such as the neck) may also be fatally damaged by these forces.

B2.2 The most important findings in the scientific road safety research literature

B2.2.1 Single speed observations of drivers and their three-year crash history in general

Maycock et al (G Maycock (TRL), PJ Brocklebank (Thorburn Colquhoun) and R D Hall (University of Southampton), Road layout design standards and driver behaviour, TRL report 332, 1998, ISSN 0968-4107 researched drivers') observed speeds (on A roads, not excluding congestion) of drivers, and self-reported three-year crash history of those drivers. They found (page 14) that the number of crashes increases with the 13th power of observed speed (measured at one of several specific sites). However, they do not give the standard deviation of their elasticity parameter (i.e. of the value of the power, in this case 13), and further state that quite some unexplained variance remains, suggested to be attributable to other variables such as experience and annual distance travelled. They further give some unsupported statements:

1. They state: "*The usual figure quoted is that a 1 mph change in mean speed results in 5 per cent change in accidents - an effect size probably corresponding to an elasticity of between 1 and 2.*". This 1 mile/h – 5% risk change relation seems to refer to Finch' result (see section 2.4 of this appendix). Finch's result implies an exponential relation between crash frequency and speed. An important property of such an exponential relation is that the elasticity varies with speed. When speed equals 20 mile/h, a 1 mile/h increase yields 5%, and hence the elasticity equals 1. When speed equals 40 mile/h, a 1 mile/h speed increase yields 2.5%, hence the elasticity is 2. For a speed of 100 mile/h the elasticity would be 5. Maycock et al's conclusion (the part of the sentence following "probably") is highly remarkable: Finch's relation certainly cannot be associated with an elasticity between 1 and 2 (except for speeds below 40 mile/h).

2. They state: "*...the fact that there is a strong association between speed and accidents does not necessarily mean that there is a causal link between the two - it seems more likely that the association arises from the fact that both speed and accidents are related in similar ways to the same variables - particularly age, experience and exposure.*" Hence, they suggest that it is more likely that age, experience and distance travelled (I assume that this is what they denote by exposure) explain the high correlation between high speed and crash frequency, than that speed itself can be considered a causal factor. There is some sense in this: it seems trivial that speed behaviour is a consequence of human choices that, in turn, correlates with e.g., driver experience. But in that case, it would be logical to model speeding

behaviour as a function of human behaviour variables such as experience and consider speed as the outcome that is more closely related to crash consequences than experience or age themselves. I would therefore rather suggest that age and experience influence speed behaviour, and speed influences crash frequency (although we shouldn't rule out the fact that inexperience would add to risk within a group of drivers showing similar speed behaviour).

Given that roads could be binned into different mean-speed-regions, drivers who usually drove in congestion circumstances and drivers who usually used uncongested roads would end up in groups with different speeds.

Quimby (<https://pdfs.semanticscholar.org/05cd/5448d637a9518764b6a1f2775ef776c2017f.pdf>, Quimby, A., Maycock, G., Palmer, C., Buttress, S., 1999. The factors that influence a driver's choice of speed: a questionnaire study. TRL Report No. 325. Transport Research Laboratory TRL, Crowthorne, Berkshire) does the same type of research, but with free speed observations only. They find a less steep increase of crash frequency with speed, with an elasticity of 7.8.

Aarts and van Schagen (L. Aarts, I. van Schagen / Accident Analysis and Prevention 38 (2006) 215–224) show both results in one graph. It is unclear what explains this difference. Essentially, for roads with the same average speeds, Quimby's sample essentially shows more crashes at low speeds (compared to Quimby's average of 67km/h) than Maycock's sample (with an average of 83km/h), while Quimby's increase with speed is less steep than Maycock's. Differences in driver travel behaviour may be substantial.

In Figure B1, the two results with several combinations of linear and logarithmic scales for comparison.

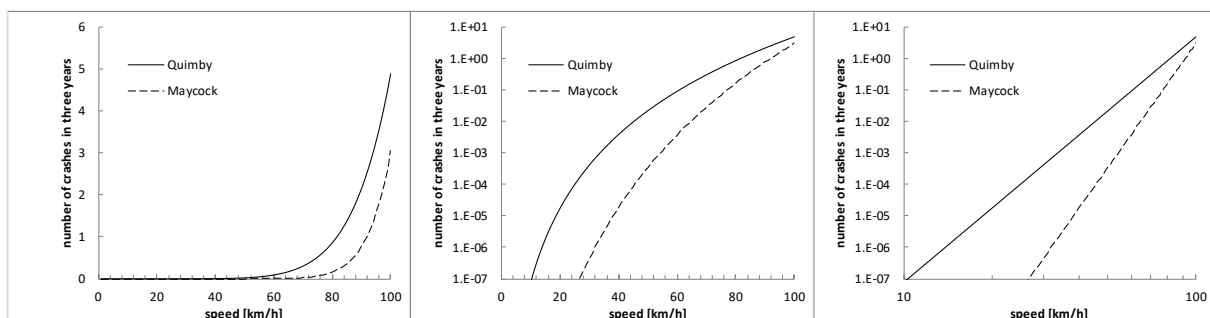


Figure B1, results for Maycock's ($v_{average} = 67$ km/h) and Quimby's ($v_{average} = 83$ km/h) research with different combinations of linear and logarithmic scales, for easy comparison. The double logarithmic graph in the right panel was chosen to show the straight lines that appear as a consequence of the power laws.

Mark that both research results are based on a single speed observation for each driver, and a three-year history of crashes related to this single observation. These crashes can have happened anywhere, and they do not have even the slightest relation to this single speed-observation on this specific road. The results of Maycock and Quimby refer to drivers, not roads and crash-speeds. It is unclear to what extent their results can be used to relate speed on a road to the risk on that road. It could be that e.g. slow drivers (in free traffic conditions) usually don't drive on motorways, while they do drive on other (more unsafe roads) more often, thus explaining their higher numbers of crashes.

Aarts and van Schagen state that Maycock's as well as Quimby's suggestion, that their results translate into an elasticity, is valid for small speed differences only. This is correct. The application of the power law implies that elasticities can be derived for the entire speed range, but these elasticities are proportional to speed.

B2.2.2 In depth research of crash vehicles' speed, and crash rate based on a comparison of crash speeds with control group speeds

Kloeden (Kloeden, C.N., McLean, A.J., Glonek, G., 2002. Reanalysis of travelling speed and the rate of crash involvement in Adelaide South Australia. Report No. CR 207. Australian Transport Safety Bureau ATSB, Civic Square, ACT. Kloeden, C.N.,

McLean, A.J., Moore, V.M., Ponte, G., 1997. Travelling speed and the rate of crash involvement. Volume 1: findings. Report No. CR 172. Federal Office of Road Safety FORS, Canberra. Kloeden, C.N., Ponte, G., McLean, A.J., 2001. Travelling speed and the rate of crash involvement on rural roads. Report No. CR 204. Australian Transport Safety Bureau ATSB, Civic Square, ACT.) researched the relation between serious crashes and speed by reconstruction of the speed prior to a crash and comparing this speed to the average speed of other vehicle's speeds (at the same location, time of day etcetera). This research strongly differs from the former group, as their research directly relates the reconstructed pre-crash-speed to a factor that is proportional to the probability of a crash at that speed.

They find a result for 60km/h urban roads and for 80km/h (and higher) rural roads. For rural roads, speed limits for the crash vehicles were 80km/h (17), 90km/h (2), 100km/h (43) and 110km/h (21); we can safely say these roads have a speed limit of approximately 100 km/h. Based on Kloeden's data, and fitting data of crash vehicles with speeds at least equal to mean control group speed, (hence ignoring slow crash vehicle results), we find the following results:

- For urban 60km/h roads, crash rates increase with $e^{0.16v}$, suggesting a 16% increase in risk per km/h speed increase.
- For rural 80-110 km/h roads, crash rates increase with $e^{0.11v}$, suggesting an 11% increase in risk for any 1km/h speed increase.

These results are not very accurate, because crash vehicle speeds were binned into speed groups with a 10km/h width, and the number of crash vehicles was rather low for most groups, and control group sizes were also rather small for higher speeds.

B2.2.3 Fatality rate for pedestrians in pedestrian-car crashes, as a function of passenger car impact speeds

Kloeden's results, as they are based on crash speeds, by its nature, could best be compared to results such as those of Rosén et al. (E. Rosén et al. Accident Analysis and Prevention 43 (2011) 25-33) who looked into the probability of a pedestrian to die in a crash with a passenger car with a specific speed. His results suggest a 9% risk increase per km/h speed increase for speeds up to 60km/h, as follows from a fit using Rosén's result, as shown in Figure B2. The accuracy of this parameter is again very poor, as it is based on few data, with a substantial variation.

Kloeden's and Rosén's research are based on reported crashes and mix fatal and serious crashes. It is therefore likely that less severe (lower speed) crashes are missing from the dataset, whereas extremely severe high-speed crashes are more likely to be included in the dataset. If this is indeed the case, Kloeden's results are tilted towards higher exponential parameter values.

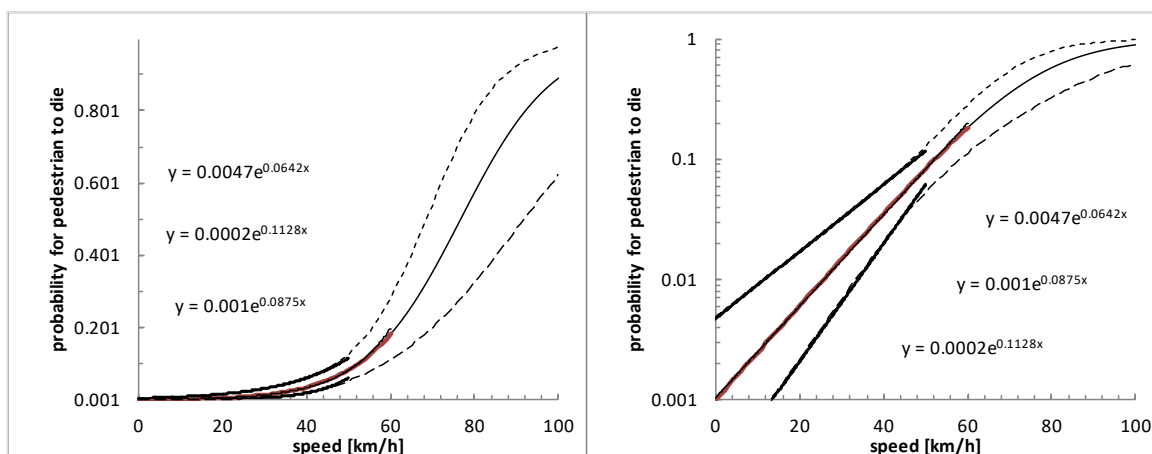


Figure B2. Results of Rosén et al. for the relation between the probability for a pedestrian to be killed in a car and the speed of that car (thin solid line). Dotted lines denote uncertainty margins, thick solid lines denote exponential trend lines.

B2.2.4 The relation between average speed and crash risk before and after a speed limit change

Finch et al (Finch, D.J., Kompfner, P., Lockwood, C.R., Maycock, G., 1994. Speed, speed limits and crashes. Project Record S211G/RB/Project Report PR 58. Transport Research Laboratory TRL, Crowthorne, Berkshire.) analysed observed mean speed data and crash frequency data before and after speed limit changes in several countries. They found an *exponential* relation between crash risk and speed, expressed as a *linear* relation between relative crash risk *change* and absolute speed change. These two are equivalent, because an exponential relation between risk and speed ($r = a \cdot e^{b \cdot v}$) implies that when v increases by 1 km/h, i.e. $v_2 - v_1 = 1$ km/h, the corresponding risks have a fixed ratio: $r_2/r_1 = e^b$ and the relative risk change $(r_2 - r_1)/r_1 = r_2/r_1 - 1$ is a value that is more or less constant for small values of b . Unfortunately, this relation cannot be extended to larger speed differences without accepting that the risk ratio changes with the size of the speed difference. E.g. for $v_2 - v_1 = 2$ km/h, $r_1/r_2 = e^{2b}$. For small values of b the relation between relative speed change and risk change is "almost linear", e.g. for $b = 0.03$ [h/km], $e^b - 1 = e^{0.03} - 1 \approx 0.030$, and $e^{2b} - 1 = e^{0.06} - 1 \approx 0.062$, hence it is slightly larger than twice the value of e^b . As a consequence, the larger the difference in speed, the more the change in risk ratio will deviate from the presumed linear relation.

Finch did not point this out. He indeed observed that for large changes in speed, his results seem to deviate from the desired linear relation, as could have been expected because he used the exponential relation as a starting point, and this relation is bound to show this deviation. Finch subsequently treats the result as if the fit needs a correction term in the mathematical expression for risk. This correction term evidently is not needed. In fact, it is superfluous, as his simple exponential result explains his data nicely. This is illustrated in Figure B3, where Finch's results (taken from the graph in the report) are plotted again. The values of "percent change in accident" i.e. $(r_2 - r_1)/r_1$ are rewritten as a relative risk, i.e. r_1/r_2 , and the speed values (in mile/h) are transferred to values in km/h.

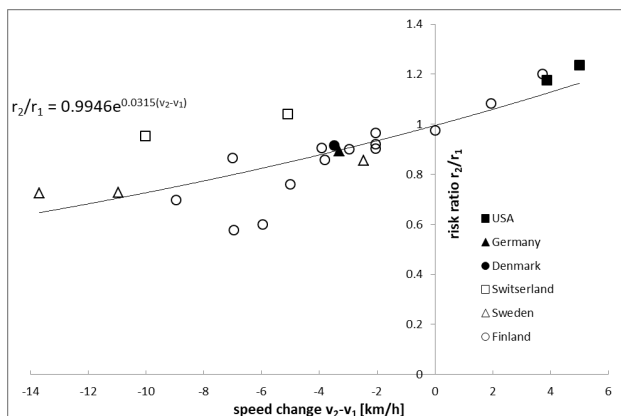


Figure B3; data from Finch, plotted and fitted with an exponential function. The formula in the graph represents the exponential trend line, as obtained with Excel. Different symbols correspond to different countries, in agreement with Finch's data.

B2.2.5 Nilssons power model and Elvik's evaluation

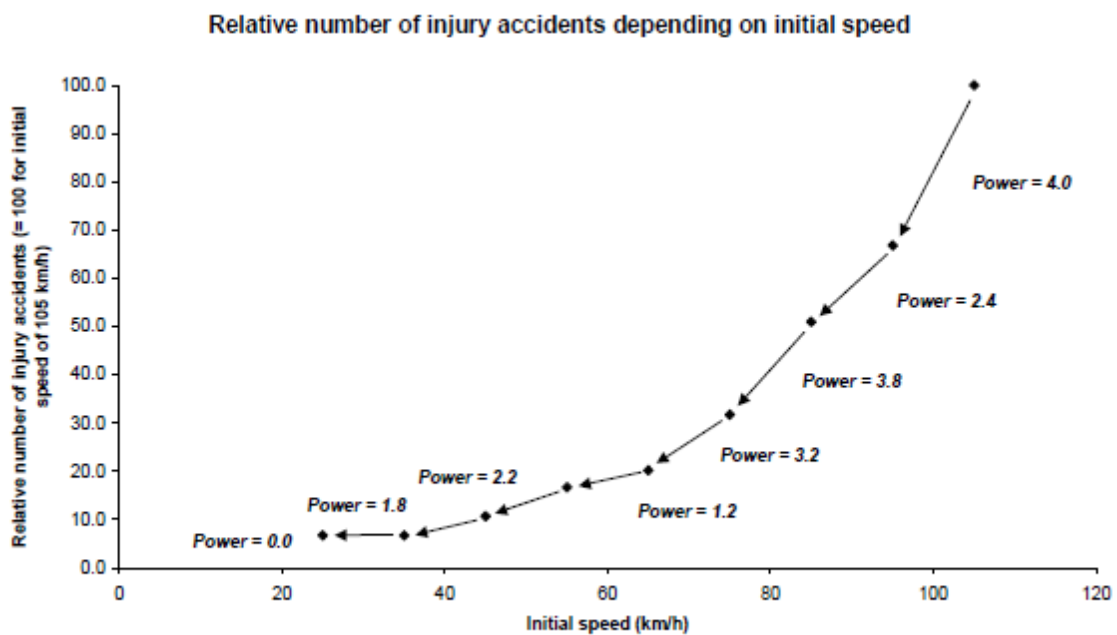
In the eighties of the 20th century, Nilsson (Nilsson, G., 1982. The effects of speed limits on traffic crashes in Sweden. In: Proceedings of the international symposium on the effects of speed limits on traffic crashes and fuel consumption, Dublin. Organisation for Economy, Co-operation, and Development (OECD), Paris.) postulated his power laws regarding the relation between speed and risk. He later supported his power laws with experimental evidence and increased the complexity of the model by distinguishing fatal crashes and fatalities, serious injury crashes and injured, etc. (Nilsson, G., 2004. Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety. Bulletin 221, Lund Institute of Technology, Lund.). More recently, Elvik et al (Rune Elvik, Peter Christensen, Astrid Amundsen, Speed and road accidents, An evaluation of the Power Model, TØI report 740/2004, Oslo) revisited these power laws, presenting a meta-analysis with a legible

overview of relevant papers regarding before-after studies of speed limit changes or enhanced enforcement policies.

Nilssons original postulate suggested a fourth power relation between road death risk and speed and a third power for serious injuries. In his 2004 publication he gave ranges of powers for fatalities and injured. Elvik et al showed that the powers need adjustment depending on crash severity, and they also found different results for different methodological approaches, with sometimes large standard errors, which give room for multiple interpretations.

Elvik et al also consider other models, e.g. they present their data in the same variable space as Finch, i.e. with a change in speed vs a risk ratio. There, just like Finch, they suggest a linear relation, while actually presenting an exponential relation (e.g. in Figure 20 of the report). Further, they recognize the fact that for very low speeds (say 5km/h) a power law such as Nilssons fourth power law is unlikely to be valid. Hence, they present the result of an analysis of a subset of their data that allowed for stratification by initial speed. This very interesting analysis shows that the actual power of speed is higher for high speed roads than for lower speed roads.

Now, this is very interesting indeed, because a power law with higher powers for higher speed regimes actually points at an exponential relation! Figure B4 shows a cut and paste copy of Figure 21 of Elvik et al., 2004



Source: TØI report 740/2004

Figure B4. a cut and paste copy of Figure 21 in Elvik et al., 2004.

The data, as presented in Figure B4, were taken and plotted as if representing an exponential function (i.e. with a logarithmic vertical scale, so as to show a straight line in case the data are indeed representing an exponential function. The result is shown in Figure B5, where, indeed, a virtually straight line appears, that represents an exponential function of relative risk as a function of speed change, with an exponential parameter of $0.037/(km/h)$. This is very similar to Finch's result (c.f. paragraph 2.4).

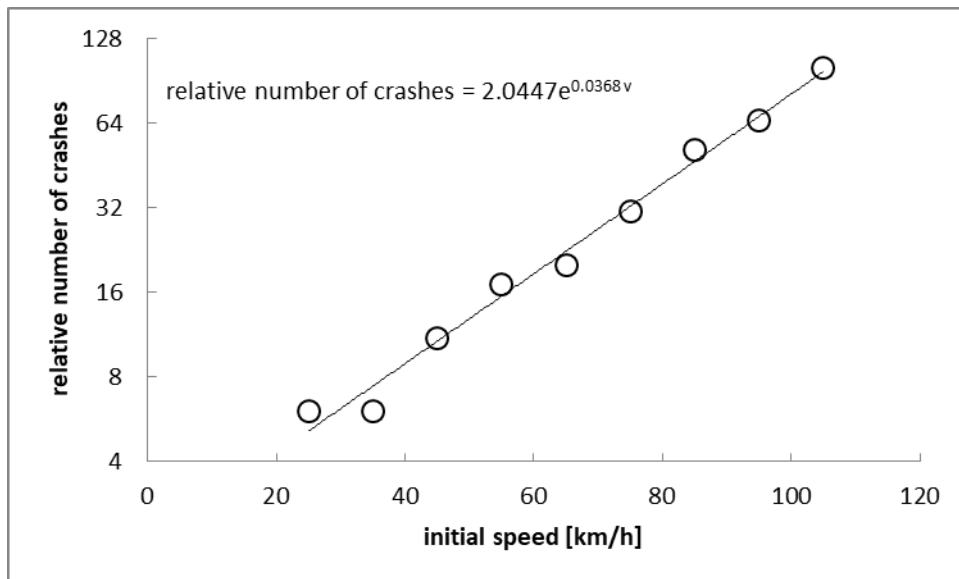


Figure B5 Data from Figure B4, plotted on a loglinear scale so as to illustrate the exponential relation between crash risk and speed. This relation is represented by the solid line, as produced by Excel's trend line function. Mark that the constant 2.044 is meaningless, as the vertical axis is scaled so as to have the data point at $v=100\text{km/h}$ correspond to 100.

Elvik et al conclude that these results do not justify an alternative model, because they suspect the results to be insufficiently accurate. However, this argument also holds for the proposed power law, as the power they propose is supposed to be valid for all speeds, which clearly is not transparently argued. We may therefore conclude that the available results do not conclusively prove that Nilsson's power laws are more valid than Finch's exponential law.

In (Elvik, R. (2009). The Power Model of the relationship between speed and road safety: update and new analyses. TØI Report 1034/2009. Oslo, Institute of Transport Economics TØI.), Elvik comments on the 2007 publication by stating that three re-analyses of the original study have been made, e.g. Cameron and Elvik, (M.H. Cameron, R. Elvik, Accident Analysis and Prevention 42 (2010) 1908–1915), all concluding that the effect of a given relative change in speed depends on the initial level of speed. They establish that this is not consistent with the power model. The problem is solved by applying two different sets of power models, one for rural and highway high speed roads and for urban and residential low speed roads.

Finally, in 2013, in (Elvik, R. (2013). A re-parameterisation of the Power Model of the relationship between the speed of traffic and the number of accidents and accident victims. In: Accident Analysis & Prevention, vol. 50, p. 854-860.) Elvik concludes that an exponential function better describes the relation between crash risk and speed, with an exponent of approximately $0.034/(\text{km/h})$ for injuries, which is much alike Finch's result and the result obtained in figure 5. For fatal crashes he denotes an exponent of approximately 0.069 per km/h, i.e. approximately twice the parameter for injuries, and more alike the parameter derived from Rosén's data (cf Figure 2). Elvik's results for fatalities suggests that the data tend to deviate from the exponential fit for high speeds, which is also in agreement with Rosén's result (c.f. paragraph 2.3).

B2.3 Can Nilsson's and Finch's results be valid at the same time?

Let's assume for a moment that Finch's results (and Elvik's eventual 2013 results) are valid, and that crash risk r increases with average speed v according to $r = a e^{-0.03v}$, or perhaps with a slightly different exponent, a being any suitable constant and Finch's constant 0.03 in h/km. This would mean that a change in average speed for a specific road would very likely resemble a power law, with a power that depends on the mean speed on that road, and approximately equal to 4 near speeds between 80km/h and 100km/h, but lower for lower average speed values (and higher if Elvik's exponent for fatal crashes is correct).

There is no obvious reason why this should not be true. The available evidence for Nilssons law leaves room for deviations or different powers, as data tend to show as rather widely distributed clouds in the speed change vs crash risk change diagrams.

B2.4 Conclusion

Elviks 2013 paper clearly shows that the relation between crash risk and speed is exponential, and not a power law. Of course, within a small range of speeds and speed differences, the data may well display a power law relation such as described by Nilsson. However, the power parameter would depend on speed, and thus have only limited validity.

For injuries, Elvik found that risk is proportional to $e^{0.034v}$, with v in km/h and the parameter 0.034 in 1/(km/h). This is in good agreement with Finch's result, who's data give rise to an exponential relation with a parameter of 0.037/(km/h). Finch also analysed non-fatal crashes mainly.

For road deaths, Elvik found that risk is proportional to $e^{0.067v}$. This is somewhat similar to Rosen's result for the probability of a pedestrian to be killed in a crash with a car with speed v . Therefore these values are likely to be of the right order of magnitude.

It is our view that Elviks 2013 paper currently constitutes the most accurate description of the relation between crash risk on a road and the mean speed on a road. It is not entirely contradictory to Nilssons laws, but these power laws have a much more limited range of validity.

Those who would still want to continue to use Nilssons laws are advised to derive the power they should apply from Elviks results, according to the following rule:

When risk r relates to speed v according to $r = a \cdot e^{\beta v}$ and speed is changed from v_1 to v_2 , (i.e. mean speed changes by a proportion $(v_2 - v_1)/v_1$), then risk will change from $a e^{\beta v_1}$ to $a e^{\beta v_2}$ and the proportion of risk change will be (independent of the constant a): $(r_2 - r_1)/r_1 = (e^{\beta v_2} - e^{\beta v_1})/e^{\beta v_1} = e^{\beta(v_2 - v_1)} - 1$.

The appropriate power, necessary to describe the relation between the relative change in speed and the relative change in risk, can be found by filling in the values, e.g. when mean speed changes from 100km/h to 90 km/h and $\beta = 0.034$ h/km we find:

$$(v_2 - v_1)/v_1 = (90 - 100)/100 = -0.1 = -10\% \quad \text{B2.1}$$

and

$$(r_2 - r_1)/r_1 = e^{\beta(v_2 - v_1)} - 1 = e^{-0.34} - 1 = 0.71 - 1 = -0.29 = -29\%. \quad \text{B2.2}$$

This suggests a power of 2.9 or approximately 3, *based on the exponential relation, and valid for this speed range only!*

Other relations found, such as those of Malcolm et al, merely describe the relation between risk and speed for drivers, but this is a completely different relation than the one we mean to describe here, namely the relation if risk on a road and the mean speed on that road.

NB

An earlier version of this Appendix appeared in 2013 as an appendix to Pin Flash 35 of the European Transport Safety Council. It was proofread and approved by dr Anna Vadeby, dr Rune Elvik and the late Prof. Richard Allsop.

Bijlage 3

Berekening van de CO₂-emissie bij verschillende snelheden

Basis voor de berekening is de TNO-analyse in [Supporting analysis on real-world light-duty vehicle CO₂-emissions | TNO Publications](#). We verwijzen naar dit rapport als het *analyserapport van TNO*.

We voeren de berekening uit voor een moderne Ford Fiësta met benzinemotor. Voor dit model heeft TNO veel gegevens beschikbaar. Die gegevens zijn te vinden in afbeelding 4.2, tabel 4.2 en tabel 4.4 in [CO₂ in-service verification test campaign and methodology development for light-duty vehicles - Publications Office of the EU \(europa.eu\)](#). We verwijzen naar dit rapport als het *gegevensrapport van TNO*.

De basisnatuurkunde van een rijdende auto

Om met constante snelheid v te rijden, moet een auto steeds een kracht F leveren om allerlei weerstandskrachten te overwinnen, vooral de rolweerstand (van banden en aandrijfsysteem) en de luchtweerstand. Daarnaast is nog energie nodig om de motor draaiend te houden. Zelfs als de auto stilstaat en de motor loopt, wordt brandstof verbruikt. De motor verricht arbeid om die kracht te leveren. Als de auto zich met constante snelheid v over een afstand d verplaatst, is daarvoor energie W nodig. Deze bedraagt $W = F \cdot d$. De benodigde energie *per afgelegde afstand* is gelijk aan de kracht: $W/d = F$.

De basisnatuurkunde van een automotor

De motor heeft energie nodig om zijn arbeid te verrichten. De meeste brandstofauto's in Nederland gebruiken benzine, daarom voeren we onze berekening uit voor benzine als brandstof. Overigens maakt het voor het *relatieve* effect van snelheid op het energiegebruik en de CO₂-emissie nauwelijks verschil of we uitgaan van benzine of diesel. Voor het absolute effect maakt het wel uit: de CO₂-emissie van een dieselmotor is lager dan die van een benzinemotor (in hetzelfde type auto)

Een simpele formule voor de CO₂-emissie van een eenparig rijdende auto.

In de berekening bepalen we energiegebruik en CO₂-emissie *per afgelegde afstand*, (waarbij de afstand is uitgedrukt in km). De uitdrukking voor de CO₂-emissie per afgelegde afstand, e , is dan als volgt, op basis van paragraaf 4.2, blz 53 van het analyserapport van TNO:

$$e \text{ [gCO}_2\text{/km]} = e_w + Q \cdot [\text{rolweerstand} + \text{luchtweerstand}] \quad \text{B3.1}$$

Hier is Q van de geleverde energie afhankelijke emissie (g/km) die vrijkomt bij verbranding van de fossiele brandstof die de kracht levert die nodig is om de wrijvingskrachten en verliezen te compenseren. e_w is de emissie door motorwrijvingsverliezen.

Deze formule geldt in het algemeen. Wat we nu nodig hebben zijn waarden voor de motorwrijvingsverliezen e_w , Q , de rolweerstand en de luchtwrijving

Gegevens

Voor de gegevens die nodig zijn voor de berekening van de snelheidsafhankelijke uitstoot baseren we ons op recente gegevens voor de Ford Fiësta. Gegevens over deze auto zijn goed uit metingen bekend. Deze metingen zijn beschreven in het gegevensrapport van TNO.

De emissie per km (Q).

Voor de Ford Fiësta laat TNO op blz 55 van het *gegevensrapport van TNO* zien hoe de uitstoot samenhangt met de geleverde energie. Om die samenhang te bepalen kunnen we gebruik maken van afbeelding 4.2 op blz. 57 van dit rapport.

De waarden van de meetgegevens in deze afbeelding staan in tabel 4.4 van het genoemde rapport. In de kolom *CO₂ measured* in deze tabel staat de CO₂-emissie in g/km voor allerlei verschillende waarden van de energie die de motor tijdens de meting moest leveren. Het gaat bij al deze gegevens om de emissie voor een meting over een afstand van 23,25 km gedurende

Op basis van de meest linkse en meest rechtse waarden in de afbeelding (die levert de meest nauwkeurige berekening) schatten we een lineaire relatie tussen geleverde energie en CO₂-emissie. De waarden van deze twee punten zijn:

$$\begin{aligned} \text{RLVL-HOT: } & (2,90 \text{ kWh; } 139,43 \text{ g/km}) & \text{B3.2} \\ \text{RLVH-HOT: } & (3,38 \text{ kWh; } 158,76 \text{ g/km}) \end{aligned}$$

Omdat de emissies zijn bepaald over 23,25 km moeten we de emissie vermenigvuldigen met 23,25 km, waardoor de eenheid [km] verdwijnt.

De helling van de rechte lijn tussen deze twee punten bepaalt de emissie per geleverde energie in kWh (1 kWh = 3600 kJ):

$$Q = 23,25 \cdot (158,76 - 139,43) / (3,38 - 2,90) = 937 \text{ g/kWh} = 0,26 \text{ g/kJ} \quad \text{B3.3}$$

De CO₂-emissie per kJ is derhalve 0,26 g/kJ. Dit impliceert ook dat de emissie, per Newton (eenheid van kracht), 0,26 g/N·km is. Dat zit zo:

Voor de uitoefening van een kracht van 1N over een afstand van 1 km (1000m) is een energie van 1 kJ nodig die dus leidt tot een CO₂-emissie van 0,26 g. De emissie per afgelegde afstand is dan dus 0,26 g/km voor elke newton:

$$Q = 0,26 \text{ g/N} \cdot \text{km} \quad \text{B3.4}$$

Deze emissie is berekend voor een rijdende auto, en is exclusief de emissie die het gevolg is van de energie die nodig is om de motor op gang te houden (de motorverliezen).

De motorverliezen

De gegevens uit de tabel die we hebben gebruikt om de uitstoot per vermogen te bepalen, kunnen we ook gebruiken om de CO₂ uitstoot te berekenen als de motor geen netto vermogen levert, en alleen zichzelf draaiend houdt. We gebruiken we de twee waarnemingen uit B2.2, De lijn door deze twee punten snijdt de verticale as (als de waarde van de geleverde energie gelijk aan 0 is) bij de waarde e_w . De berekening gaat als volgt:

Als een lijn wordt gegeven door $y = a + b \cdot x$, dan volgt a uit: $a = y - b \cdot x$. Met $b = 0,26 \text{ g/N} \cdot \text{km}$, en het punt $(x,y) = (2,90 \text{ kWh ; } 139,42 \text{ g/km})$, ofwel (936 J; 23,25 · 139,42 g, in 23,25 km)

$$e_w = 23,25 \cdot 139,42 - 936 \cdot 2,90 = 527 \text{ g/1800s} = 0,29 \text{ g/s} \quad \text{B3.5}$$

Dit is de emissie van de auto die losstaat van het geleverde vermogen voor het rijden, dus ook als de auto stilstaat, en dus geen afstand aflegt. Het is een emissie per seconde, dus niet per km. De emissie per km hangt af van de snelheid. Als de auto rijdt met een snelheid van $v \text{ km/h}$, dan legt deze per tijd t een afstand $s = v \cdot t$ af, waaruit volgt dat de emissie in een uur (3600 s) gelijk is aan

$$\begin{aligned} e_w \text{ (in een uur)} &= 3600 \cdot 0,29 \text{ g} \\ \text{Afgelegde afstand in een uur} &= v \text{ km} \\ e_w &= 3600 \cdot 0,29 / v \text{ g/km} = 1054 / v \text{ g/km} \end{aligned} \quad \text{B3.6}$$

De rolweerstand is een (bij goede benadering) constante kracht met een waarde R . Die waarde is afhankelijk van de massa van de auto, de kwaliteit van de banden, en de mate waarin de chauffeur een rechte lijn rijdt. In het *analyserapport van TNO* wordt dit uitgelegd in paragraaf 3.1.1.1. Afgezien van de rolweerstand van de banden, is er bij een rijdende auto ook sprake van interne wrijving van andere delen van de auto, lagers, aandrijf-as, differentieel, versnellingsbak.

Volgens tabel 4.2 van het *gegevensrapport van TNO* bedraagt de rolweerstandskracht R :

$$R = 119,77 \text{ N (afgerond } 120 \text{ N)} \quad \text{B3.7}$$

De luchtweerstand L is een kracht, evenredig met het frontoppervlak van de auto en de vormafhankelijke weerstandcoëfficiënt. Deze luchtweerstand neemt toe met de snelheid. De relatie bevat een lineaire term ($f_1 \cdot v$) en een kwadratische term ($f_2 \cdot v^2$). Voor de Ford Fiësta:

$$L = 0,601 v + 0,02952 v^2 \text{ (N; } v \text{ in km/h)} \quad \text{B3.8}$$

Table 4.2: CoC CO₂ value check by application of the interpolation method, as described in Regulation 2017/1151 Annex XXI Sub-Annex 7 section 3. Test numbers 1.L, 1.H and 2.L, 2.H show the IP family information for the VL and VH of the Volvo and Ford respectively.

#	Vehicle	f0	f1	f2	TM	CED WLTC 3b	CoC CO ₂	IP Check CO ₂	ΔCO ₂
[-]	[-]	[N]	[Nh/km]	[Nh ² /km ²]	[kg]	[kWh]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
1.L	Volvo VL	105.60	1.348	0.03683	1976	4.16	178	178	0.00
1.1	Volvo L	109.10	1.348	0.03750	2018	4.24	180	180.21	-0.21
1.2	Volvo M1	143.50	1.348	0.03683	2021	4.39	184	184.43	-0.43
1.3	Volvo M2	147.20	1.348	0.03712	2058	4.45	186	186.14	-0.14
1.H	Volvo VH	198.30	1.348	0.04167	2172	4.99	201	201	0.00
2.L	Ford VL	98.80	0.601	0.02980	1239	2.93	123	123	0.00
2.1	Ford M1	119.85	0.601	0.02952	1313	3.09	129	127.94	1.06
2.2	Ford M2	119.77	0.601	0.02952	1312	3.09	129	127.90	1.10
2.3	Ford H	142.04	0.601	0.03138	1325	3.29	134	134.05	-0.05
2.H	Ford VH	138.20	0.601	0.03330	1375	3.38	137	137	0.00

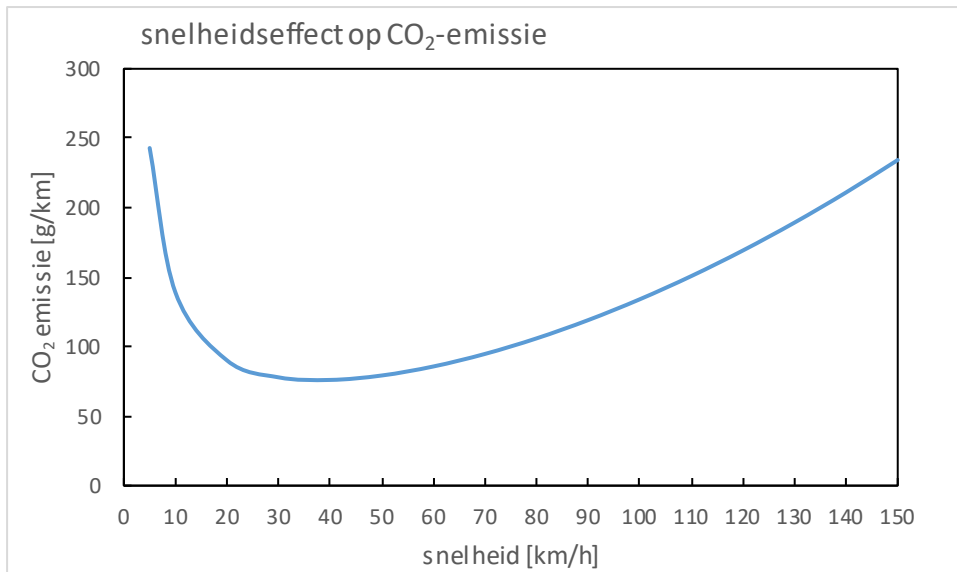
De uiteindelijke formule

Op basis van vergelijking B2.1, waarin we de vergelijkingen B2.5 voor e_w , B2.4 voor Q , B.2.7 voor de rolweerstand en B2.8 voor de luchtweerstand invullen, kunnen we nu een eenvoudige formule voor de CO₂-emissie van een auto opstellen:

$$e = 1054/v + 0,26 \cdot (120 + 0,601 v + 0,02952 v^2) \text{ (g/km, } v \text{ in km/h)} \quad \text{B3.9}$$

We vereenvoudigen deze vergelijking nog iets door de vermenigvuldiging in de laatste drie termen uit te schrijven:

$$e = 1054/v + 31,2 + 0,15626v + 0,0076752 v^2 \text{ (g/km, } v \text{ in km/h)} \quad \text{B3.10}$$



De afbeelding hiernaast laat het resultaat zien van de emissie in g/km bij verschillende snelheden

Andere factoren die energiegebruik beïnvloeden

Daarnaast zijn er nog allerlei andere fysische invloeden: Een koude motor gebruikt meer energie, banden kunnen slijten, de uitlijning van de wielen kan door een aanrijding met een stoeprandje een beetje ongunstiger worden, er wordt geremd en opgetrokken, enzovoort. In deze berekening laten we al deze factoren buiten beschouwing. We gaan uit van een gemiddelde auto die met constante snelheid rijdt.

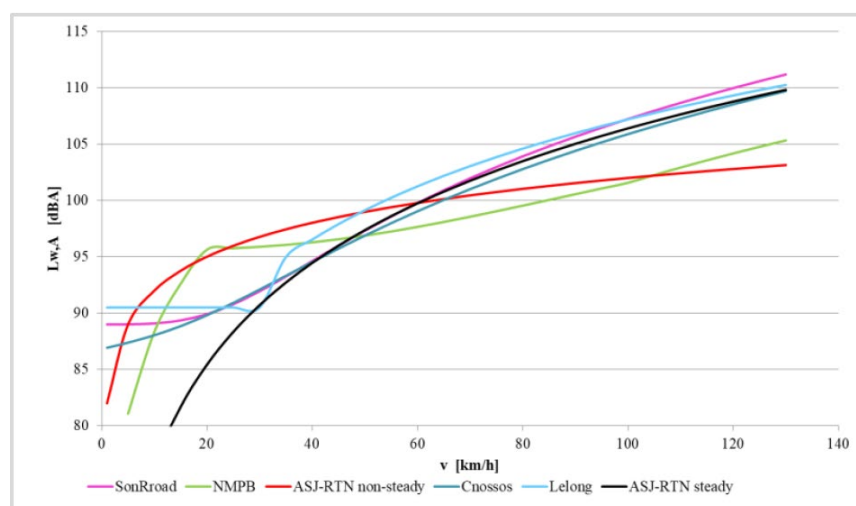
Deze bijlage is geschreven in samenspraak met dr Norbert Ligterink (TNO), die de berekeningen heeft gecontroleerd.

Bijlage 4

Berekening van de geluidssterkte bij verschillende snelheden

Een overzicht van allerlei modellen die de geluidshinder van verkeer beschrijven, is te vinden in: Ibili, Fidelma & Adanu, Emmanuel & Adams, Charles Anum & Andam-Akorful, Samuel & Turay, Simeon Stevenson & Ajayi, Samuel. (2021). Traffic noise models and noise guidelines: A review. Noise & Vibration Worldwide. 53. 095745652110526. 10.1177/09574565211052693.

Deze analyse beperkt zich tot het geluid van *een enkele auto*. Op basis van Graziuso, Gabriella & Mancini, Simona & Quartieri, J. & Guarnaccia, Claudio. (2020). Evaluation of Single Vehicle Noise Emission in Different Speed Conditions. Journal of Physics: Conference Series. 1603. 012031. 10.1088/1742-6596/1603/1/012031 kunnen we vaststellen dat de relatie tussen de snelheid van een auto en het vermogen van het voortgebrachte geluid, in dB, niet eenduidig is, vooral bij lage snelheden. Voor hogere snelheden ($v > 40 \text{ km/h}$) zijn de modellen echter in goede overeenstemming met elkaar, hetgeen blijkt uit figuur 1 in dit artikel:



De curve volgens ASJ-RTN steady wordt beschreven in Shinichi Sakamoto, Road traffic noise prediction model ``ASJ RTN-Model 2018'': Report of the Research Committee on Road Traffic Noise, Acoustical Science and Technology, 2020, Volume 41, Issue 3, Pages 529-589, Released on J-STAGE May 01, 2020, Online ISSN 1347-5177, Print ISSN 1346-3969, <https://doi.org/10.1250/ast.41.529>, https://www.istage.jst.go.jp/article/ast/41/3/41_E20301/article/-char/en.

Sakamoto et al gaat uitvoerig in op de relatie tussen snelheid van auto's die al of niet in een stabiele toestand (steady) rijden, of accelereren, moeten stoppen voor een tolstation, over een rechte of slingerende weg langs een waarneempunt rijden, etc. Ook besteedt het artikel aandacht aan het feit dat elke auto bij het langsrijden een eerst aanzwellend, en dan weer afnemend geluid produceert. De berekende geluidsbelasting is het totale effect van het geproduceerde geluid.

We hanteren hier de eenvoudigste van de beschreven varianten van dit model, waarbij auto's met een constante snelheid rijden. Uiteraard is de geluidshinder afhankelijk van de afstand tot de bron. De afstand-afhankelijke component laten we hier buiten beschouwing, omdat die niet van invloed is op de relatie met de snelheid. We hanteren de gegevens van Sakamoto et al, voor dichte voertuigen die rijden over dicht asfalt.

De formule die Sakamoto et al geven is van de vorm:

$$LWA = a + b \log(v) \quad B4.1$$

Voor een lichte auto, rijdend op dicht asfalt is, volgens Sakamoto et al, $a = 45,8 \text{ dB}$. Voor motoren is $a = 49,6 \text{ dB}$ en voor zware voertuigen $53,2 \text{ dB}$. In al deze gevallen is $b = 30 \text{ dB}$.