



STUDIECENTRUM VOOR ECONOMISCH EN SOCIAAL ONDERZOEK

KWANTIFIKATIE VAN GELUIDSHINDER
VEROORZAAKT DOOR HET PERSONENVERKEER
DEEL I. DATA EN TECHNISCHE KWANTIFIKATIE

H. Verbruggen

werknota 7654

januari 1976

Universitaire Faculteiten St.-Ignatius
Prinsstraat 13 - 2000 Antwerpen

D/1976/1169/03

INHOUDSTAFEL

KWANTIFIKATIE VAN GELUIDSHINDER VEROORZAAKT DOOR HET PERSONENVERKEER

DEEL I. DATA EN TECHNISCHE KWANTIFIKATIE

<u>Hoofdstuk 1. Eigen onderzoek naar de geluidsproduktie door het tramverkeer</u>	3
1.1. Beschrijving der meetplaatsen	3
1.2. Resultaten	5
1.2.1. Metingen te Antwerpen	5
1.2.2. Metingen te Brugge	9
1.3. Analyse van de resultaten	14
1.3.1. Snelheid	14
1.3.2. Straatbreedte	15
1.3.3. Kwaliteit der sporen	18
1.4. Geluidsafscherming bij het tramverkeer	19
1.4.1. Inleiding	19
1.4.2. Bronafscherming	21
1.4.3. Afscherming van de getroffen en	22
1.4.4. Geluidsschilden op draaistellen	23
1.4.5. Schuttingen langs de sporen	24
1.4.6. Kostprijs	25
<u>Hoofdstuk 2. Verwachte geluidshinder in een type-straat</u>	28
2.1. Bemerkingen vooraf	28
2.2. Prognose van het verkeerslawaaï	31
2.2.1. Prognose b.m.v. een algemene formule	31
2.2.2. Grafische simulatie	33
2.2.2.1. Wetmatigheden i.v.m. de snelheid van het autoverkeer	34
2.2.2.2. Wetmatigheden i.v.m. de geluidsproduktie van het autoverkeer	38
2.2.2.3. Hypothesen voor de simulatie voor het autoverkeer	41
2.2.2.4. Resultaten van de simulatie voor het autoverkeer	42
2.2.2.5. Het tramverkeer	46
2.2.2.6. Simulatie voor gemengd verkeer: auto's - trams	48

BIJLAGE I. Bepaling van een nieuw evenwicht in de vraag naar personen-
vervoer, bij prijszetting tegen marginale kosten

G. BLAUWENS

BIJLAGE II. Technische beschrijving van de meetsituaties met topografische
schetsen

BIJLAGE III. Grafische illustratie van de correlaties tussen geluid en
snelheid bij het tramverkeer

BIJLAGE IV. Gedetailleerde kostprijsberekening van isolatiemuren

KWANTIFIKATIE VAN GELUIDSHINDER VEROORZAAKT DOOR HET PERSONENVERKEER

DEEL I. DATA EN TECHNISCHE KWANTIFIKATIE

Eén van de facetten van de studie van de stedelijke economie is de studie van de milieufactoren die een sterke invloed uitoefenen op het dagelijkse keuzegedrag van de mensen. Deze milieufactoren vormen een externe kost voor diegene die de nadelige uitwerking ervan moet ondergaan en betekenen, als men logisch doordenkt een extern voordeel voor degene, die ze veroorzaakt: deze betaalt nl. niet voor het gebruik van een produktiefactor.

De milieuhinder die in deze werknota wordt behandeld is de geluidshinder, veroorzaakt door het vervoer van personen. De opzet is te komen tot een goede economische kwantifikatiemaatstaf.

Om dat te bereiken wordt in dit eerste deel vertrokken van een technische kwantifikatie van de geluidshinder. Er zijn een aantal meetresultaten ter beschikking, zowel van autoverkeer als van tram- en busverkeer. Er zijn ook normen voorgesteld door het Belgisch Instituut voor de Normalisatie. Hieruit is via een simulatie te berekenen wat op elk ogenblik de geluidsproduktie zou zijn op een bepaalde relatie, gegeven een bepaalde verdeling van het personenvervoer over de verkeersmodi, en wat de te verwachten normoverschrijding zal zijn. Tot zover gaat de inhoud van dit deel van deze studie.

In deze nota zal het eigen onderzoek naar de geluidsproduktie door tramvoertuigen worden gepresenteerd en gecommentarieerd. Voor de geluidsproduktie door auto's en bussen wordt verwezen naar bestaande bronnen, waaruit wij zelf ook de gegevens haalden voor de simulatie.

Het uiteindelijke doel van deze technische kwantifikatie is een batterij gegevens ter beschikking te stellen die alle dimensies bevat die nodig zijn voor de economische kwantifikatie die op zijn beurt moet kunnen inpassen in het schema dat werd opgesteld door G. BLAUWENS, en dat in bijlage I wordt meegegeven.

Er weze vooraf vermeld dat uit hoofde van het onderzoeksstandpunt, de doelstelling en de wetenschappelijke discipline die aan de basis ligt deze werknota enigszins anders is opgevat dan die over een technisch perfecte geluidsmeting. Vele details die technisch zeer belangrijk kunnen zijn maar die, eventueel op het eerste gezicht, niet bijdragen tot het gestelde doel, werden niet opgenomen. Waar ten slotte een perfect uitgevoerde geluidsmeting kan volstaan met enkele, zoniet één waarneming per geval moesten wij, om een vrij juiste benadering van het geluidsniveau te vinden, veel meer metingen verrichten met eenvoudiger middelen.

Hoofdstuk 1. Eigen onderzoek naar de geluidsproductie door het tramverkeer

Gegevens over geluidsmetingen bij tramvoertuigen zijn niet zo talrijk terug te vinden als die over het autoverkeer, in de eerste plaats omdat tramvoertuigen van stad tot stad verschillen in bouw, wieltypes, ophangingstypes, remsystemen, spoorbreedten, spooraanlegtypes, ondergrond, stroomafneming, enz... Door het SESO werden daarom in samenwerking met de "Maatschappij voor het Intercommunaal Vervoer te Antwerpen" en met de constructeur van het trammaterieel "La Brugeoise et Nivelles" te Brugge, geluidsmetingen verricht, tijdens de periode eind 1974 - begin 1975.

1.1. Beschrijving der meetplaatsen

In de Antwerpse agglomeratie werden een 8-tal plaatsen uitgekozen voor de meetoperaties met de bedoeling de invloed te testen van de snelheid op de geluidshinder en enkele bijkomende gegevens te verzamelen over de invloed van een aantal "decors" op de geluidsverspreiding. Tevens werden te Brugge op de fabrieksterreinen van "La Brugeoise et Nivelles", op een testspoor een aantal tramritten gedaan tijdens dewelke metingen werden verricht buiten en binnen het voertuig. De metingen werden als volgt gecodeerd:

1. Leopold De Waelstraat Antwerpen:	02
2. Antwerpsesteenweg Hoboken:	12
3. Lange Nieuwstraat Antwerpen:	15
4. Belgiëlei (Nerviërsstraat) Antwerpen:	23-24-25
5. Cogels-Osylei Berchem:	06
6. Warande (t.o.v. Ebes-gebouw):	26-36
7. Grote Steenweg Berchem:	27
8. Ter Heydelaan Deurne:	09

9. La Brugeoise et Nivelles Brugge (buiten): 08

De metingen 08 hebben betrekking op opnamen buiten het rijtuig. De sporen liggen in een open veld op een zandbedding en zijn van een slechte kwaliteit. Er werden 6 reeksen buitenmetingen uitgevoerd:

- 081: sporen zonder afscherming; tramrijtuig eveneens zonder afscherming;
- 082: sporen zonder afscherming; op de draaistellen van de tram staan schilden gemonteerd uit isolerend materiaal, ter grootte van de uitsparingen in de carrosserie;
- 083: de sporen worden afgeschermd door een schutting bestaande uit houten balken, met een hoogte van 0,65 m; geen schilden op de draaistellen;
- 084: een schutting van 0,65 m; schilden op de draaistellen;
- 085: een schutting van 1,15 m; geen schilden op de draaistellen;
- 086: een schutting van 1,15 m; schilden op de draaistellen.

Per reeks werden bij alle snelheden gaande van 10 tot 45 km/u, met sprongen van 5 km/u telkens 3 metingen verricht.

10. La Brugeoise et Nivelles (binnenmetingen): 18

De metingen 18 hebben betrekking op opnamen in het rijtuig, op 3 plaatsen genoteerd: ter hoogte van de voorste en achterste draaistellen, en ter hoogte van de midden-deur. Ook hier werden telkens 3 metingen verricht per snelheid en per plaats. De resultaten (de gemiddelden) vindt men terug in tabel 10 p. 11.

Ter voorbereiding van deze metingen werden een aantal proefmetingen gedaan met het doel die opstellingen te kiezen die het minst achtergrondlawaai opleverden. De buitenmetingen werden

verricht op een hoogte van 1,2 m boven de sporen en op een afstand van 7,5 m vanaf het dichtstbijzijnde spoor. Enkele metingen gebeurden op 15 m afstand. Per waarneming werden het geluid (decibelmeter op de slow-reflex en op de A-schaal ingesteld) en de snelheid (chronometer en, zo mogelijk, snelheidsmeter) genoteerd. Achteraf werden deze 2 reeksen met elkaar in verband gebracht. 2 correlaties werden telkens berekend: de lineaire en de semi-logaritmische.

De topografische en andere technische details i.v.m. de metingen vindt men terug in de technische bijlage II.

1.2. Resultaten

1.2.1. Metingen te Antwerpen

De correlatie tussen snelheid en geluidshinder staat voor elke reeks afzonderlijk vermeld in tabel 1. De gegevens zijn aangebracht op de grafieken in bijlage III.

De afleidbare regressievergelijkingen staan te lezen in tabel 2. Deze functies werden op de overeenkomstige grafieken aangeduid.

Er werd gepoogd een eventuele bijkomende verklaring te vinden voor de geluidshinder in de onderhoudsstaat van het rijtuig. Deze correlatie vindt men terug in tabel 3.

Tabel 1. Correlatie tussen de snelheid en de geluidsimmissie

Meting	Lineaire regressie		Semilog. regressie		Vrijheids- graden
	r [±]	t-waarde	r [±]	t-waarde	
02	0,946	9,69	0,991	24,18	12
06	0,936	13,00	0,944	14,02	25
09	0,925	18,17	0,969	25,76	33
12	0,712	4,76	0,719	4,85	23
15	0,772	5,82	0,813	6,68	24
23	0,830	4,21	0,843	4,42	9
24	0,737	4,88	0,752	5,10	21
25	0,723	6,78	0,766	7,72	43
26	0,863	9,22	0,889	10,45	30
27	0,965	25,59	0,979	32,37	49
36	0,815	7,43	0,833	7,98	29

±

$$r = \frac{\sigma_{yx}}{\sqrt{\sigma_y^2 \cdot \sigma_x^2}}$$

Tabel 2. Regressievergelijkingen afgeleid uit de correlaties tussen snelheid en geluidsimmissie - metingen te Antwerpen; y = dB(A); v = snelheid in km/u

Meting	Functie	
	Lineaire vorm: y = av + b	Logaritmische vorm: y = a ln v + b
02	y = 0,5071 v + 63,5919	y = 14,163 ln v + 32,0446
06	y = 0,3328 v + 70,2556	y = 11,699 ln v + 40,6283
09	y = 0,5210 v + 60,9472	y = 15,912 ln v + 23,9075
12	y = 0,3046 v + 69,8509	y = 9,995 ln v + 45,2052
15	y = 0,2281 v + 70,0112	y = 7,453 ln v + 51,6590
23	y = 0,3349 v + 62,9000	y = 9,153 ln v + 42,1085
24	y = 0,3681 v + 65,1347	y = 10,934 ln v + 39,1629
25	y = 0,2805 v + 67,6878	y = 9,128 ln v + 45,2791
26	y = 0,4860 v + 61,1795	y = 14,128 ln v + 28,2123
27	y = 0,6289 v + 62,0076	y = 18,888 ln v + 18,0497
36	y = 0,2869 v + 65,2009	y = 10,485 ln v + 38,1820

Tabel 3. Correlatie tussen het aantal km sinds de laatste slijping der wielbanden, en sinds de laatste grote revisie enerzijds, en de geluidsimmissie anderzijds

Meting	r(slijping)	t-waarde	r(revisie)	t-waarde
02	0,072	-0,09	0,065	-0,57
06	-0,103	-0,94	0,150	0,01
12	0,245	0,11	-0,197	-0,79
15	0,181	-0,63	0,069	-0,12
24	0,173	2,81	0,441	3,26
25	0,180	2,11	0,085	1,13
26	0,107	0,29	-0,071	-0,04
27	0,118	0,88	0,121	0,78
36	0,001	-0,79	0,231	-0,87
23+09	niet gemeten		niet gemeten	

Tabel 4. Verband tussen de straatbreedte (in m) en de constante b en de richtingscoëfficiënt a uit de semi-logaritmische regressievergelijkingen, en de geluidsimmissie bij 10, 15 en 50 km/u

Meting	Straatbreedte	Waarde		Geluidsimmissie		
		b	a	10 km/u	15 km/u	50 km/u
15	13,5	51,6590	7,453	68,9	73,4	80,9
12	24	45,2052	9,995	68,0	72,6	84,0
06 (a)	25	40,6283	11,699	67,5	72,0	86,3
02	25	32,0446	14,163	64,6	70,0	86,0
26	30	28,2123	14,128	60,8	66,3	83,0
09	42	23,9075	15,912	60,5	67,5	84,7
27	50	18,0497	18,888	61,5	69,2	92,0
24-25 (b)	86	+42,000	+10,000	25)63,2 24)64,3	67,8 68,8	81,8 81,9
23-36 (c)	-	-	-	-	-	-

- (a) Meting 06: de breedte van de Cogels-Osylei is 12 m van rooilijn tot rooilijn. De bebouwingslijnen liggen echter 25 m uit elkaar.
- (b) Meting 23-24-25: het rondpunt van de Belgiëlei vormt een in alle opzichten onvergelykbaar decor. Wij laten ze in deze tabel dus buiten beschouwing.
- (c) Metingen 23 en 36 hebben betrekking op metingen op een afstand van 15 m, en zijn dus eveneens onvergelykbaar met de andere reeksen.

Tabel 5. Verband tussen de rangorde der kwaliteit van de sporen (*) en de parameters a en b uit de semi-logaritmische regressie, en de geluidsimmissie bij 10, 15 en 50 km/u

Meting	Kwaliteit sporen	Rang	Waarde van		Geluidsimmissie bij		
			b	a	10 km/u	15 km/u	50 km/u
27	zeer slecht	1	18,0497	18,888	61,5	69,2	92,0
06	slecht	2	40,6283	11,699	67,5	72,0	86,3
02	gemiddeld	3	32,0446	14,163	64,6	70,0	86,1
12	gemiddeld	3	45,2052	9,995	68,0	72,6	84,0
26	vrij goed	4	28,2123	14,128	60,8	66,3	83,0
25	goed	5	45,2791	9,128	63,2	67,8	81,8
09	goed	5	23,9075	15,912	60,5	67,5	84,7
15	zeer goed	6	51,6590	7,453	68,9	73,4	80,9

(*) Er was geen voldoendegevende numerieke maatstaf voorhanden voor de kwaliteit van de sporen. De gegevens gaan terug op een louter kwalitatieve schatting opge maakt door MIVA in december 1974, en waarin veel meer elementen een rol spelen dan alleen maar diegene die de geluidsproduktie beïnvloeden.

Uit tabel 4 kwamen de volgende r-waarden naar voren:
tussen breedte van de straat

en 1° de waarde van a: + 0,94;

2° de waarde van b: - 0,93;

3° de geluidsimmissie bij 10 km/u: -0,81

15 km/u: -0,65

50 km/u: +0,77.

Tabel 5 bevat moeilijk te correleren elementen (een rangorde van kwalitatieve omschrijvingen die bovendien niet alleen betrekking hebben op de geluidsproduktie). Nochtans werd er een r-waarde vastgesteld van -0,88 tussen de rangorde van de kwaliteit der sporen en de geluidsimmissie bij 50 km/u.

1.2.2. Metingen te Brugge

De gemiddelde resultaten van elke reeks van 3 waarnemingen van de meting 08 vindt men terug op grafieken fig. 1 tot 5 en staan weergegeven in tabel 6. Tabellen 7 en 8 geven de verschillen weer die werden genoteerd tussen de verschillende meetsituaties.

Tabel 6. Gemiddelde geluidsimmissie na 3 metingen per snelheid gegroepeerd in 6 verschillende meetsituaties (voor codes zie p. 4)

Km/u	081	082	083	084	085	086
0	56,66	56,33	57,33	55,33	55,33	55,33
10	66,73	62,63	63,33	60,66	60,33	57,00
15	70,30	69,60	66,66	65,00	62,66	59,00
20	76,33	75,33	73,00	66,86	71,00	66,00
25	79,33	76,33	75,00	71,33	75,33	67,20
30	81,33	77,00	75,66	73,33	79,00	70,66
35	82,66	81,00	75,66	77,66	80,33	73,33
40	84,66	83,33	81,33	81,00	81,00	78,66
45	87,66	86,66	83,33	81,66	83,33	81,66

Tabel 7. Verschillen tussen de gemiddelde geluidsimmissies tijdens proeven met en zonder isolatieschilden op de draaistellen

Hoogte schutting naast spoor	0,0 m	0,65 m	1,15 m
Codes zie p. 4.	082-081	084-083	086-085
Km/u			
0	-0,33	-2,00	0,00
10	-4,10	-2,67	-3,33
15	-0,76	-1,66	-3,66
20	-1,00	-6,14	-5,00
25	-3,00	-3,66	-8,13
30	-4,33	-2,33	-8,34
35	-1,66	+2,00	-7,00
40	-1,33	-0,33	-2,34
45	-1,00	-1,67	-1,67

Tabel 8. Verschillen tussen gemiddelde geluidsimmissie bij trams tijdens proeven zonder en met schuttingen met resp. 0,65 en 1,15 m hoogte naast de sporen

Codes Km/u	Met schilden op de draaistellen			Zonder schilden op de draaistellen		
	084-082	086-082	086-084	083-081	085-081	085-083
0	-1,00	-1,00	0,00	+0,67	-1,33	-2,00
10	-1,97	-5,63	-3,66	-3,40	-6,40	-3,00
15	-4,60	-10,60	-6,00	-3,34	-7,64	-4,30
20	-8,47	-9,33	-0,86	-3,33	-5,33	-2,00
25	-5,00	-9,13	-4,13	-4,33	-4,00	+0,33
30	-3,67	-6,34	-2,67	-5,67	-2,33	+3,34
35	-3,34	-7,67	-4,33	-7,00	-2,33	+4,67
40	-2,33	-4,67	-2,34	-3,33	-3,66	-0,33
45	-5,00	-5,00	0,00	-4,33	-3,33	+1,00

Voor elke meetsituatie afzonderlijk werd een semi-logaritmische regressie gedraaid, wat volgende resultaten gaf:

Tabel 9. Regressievergelijkingen afgeleid uit de correlaties tussen snelheid en geluidsimmissie - meting 08 te Brugge

Meting-code	Functie, vorm: $y = a \ln v + b$ (zie ook tabel 2)	
081	$y = 13,580 \ln v + 35,000$	$r = 0,99$
082	$y = 14,449 \ln v + 30,068$	$r = 0,98$
083	$y = 12,435 \ln v + 34,296$	$r = 0,97$
084	$y = 14,429 \ln v + 25,835$	$r = 0,98$
085	$y = 16,339 \ln v + 21,632$	$r = 0,98$
086	$y = 16,173 \ln v + 17,231$	$r = 0,97$

De resultaten van de meting 18 binnenin het rijtuig worden weer-
gegeven door tabel 10.

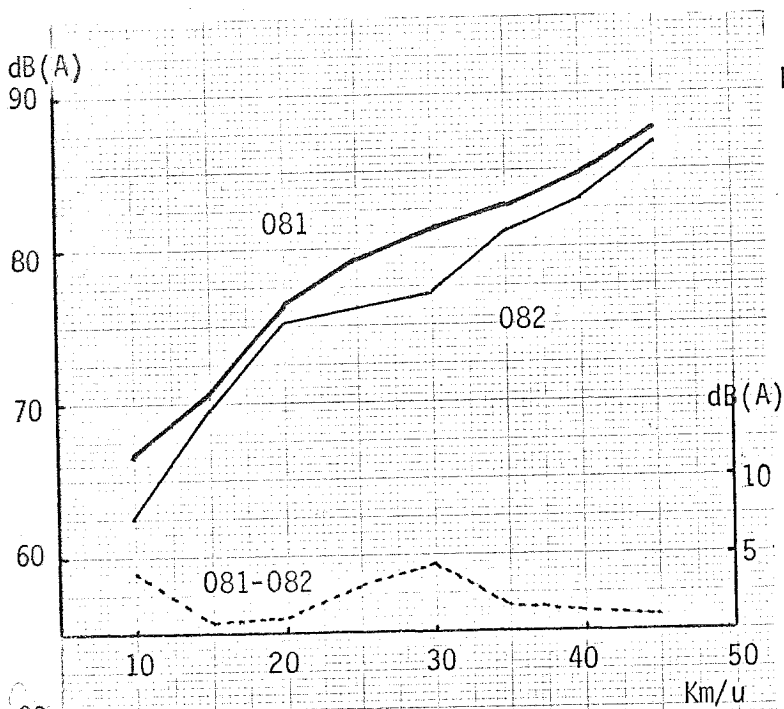
Tabel 10. Gemiddeld gemeten geluidsniveau binnen het rijtuig
bij verschillende snelheden

Km/u	Meetpunt (A)		
	1	2	3
0	64,30	68,00	67,00
10	65,20	66,50	66,20
15	67,50	68,00	69,00
20	69,66	69,66	69,66
25	71,00	71,66	71,00
30	73,00	75,00	74,33
35	75,33	76,33	76,33
40	75,33	77,33	77,66
45	79,00	79,66	77,66

(a) Meetpunt 1: ter hoogte van het voorste draai-
stel
Meetpunt 2: ter hoogte van de middenste deur
Meetpunt 3: ter hoogte van het achterste
draaistel
zie bijlage II.

Tabel 11. Regressievergelijkingen afgeleid uit de correlaties
tussen snelheid en geluidsimmissie - meting 18 te
Brugge

Meting	Functie, vorm: $y = a \ln v + b$	
181	$y = 8,505 \ln v + 44,679$	$r = 0,98$
182	$y = 8,895 \ln v + 44,399$	$r = 0,97$
183	$y = 8,141 \ln v + 46,577$	$r = 0,97$

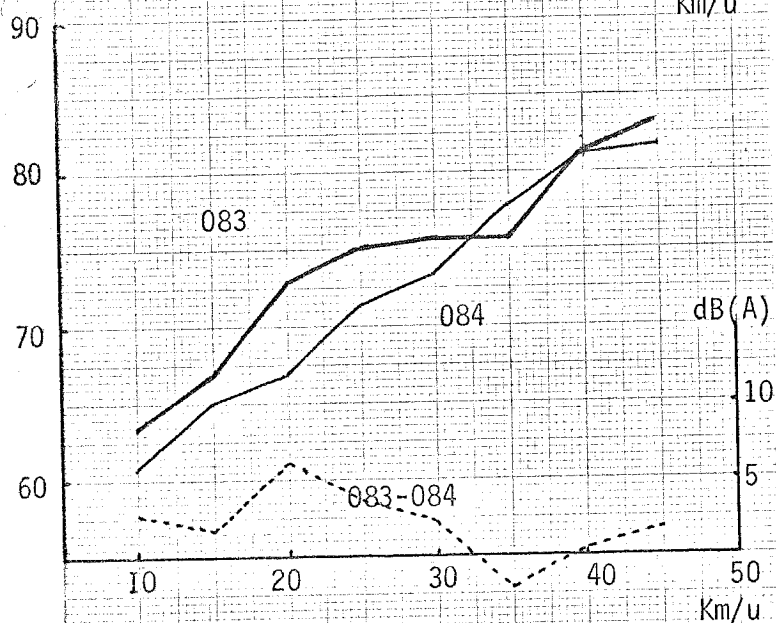


Figuur 1. Metingen te Brugge
Geluidsproductie van trams (1)

Meting 081: sporen zonder
afscherming,
draaistellen zonder
schild

Meting 082: sporen id.,
draaistellen met
schild

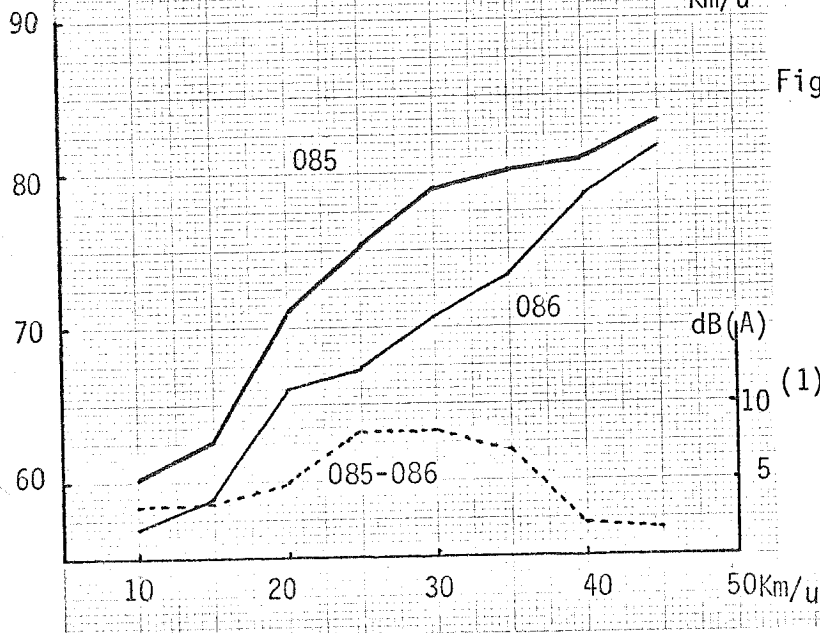
(1) Op de linker y-as staat de geluidsopname
in absolute getallen, op de rechter y-as
de verschillen tussen de geluidsopname
met en zonder schild op de draaistellen.



Figuur 2. Meting 083: sporen met afscher-
ming van 0,65 m
draaistellen zonder
schild

Meting 084: sporen id.
draaistellen met
schild

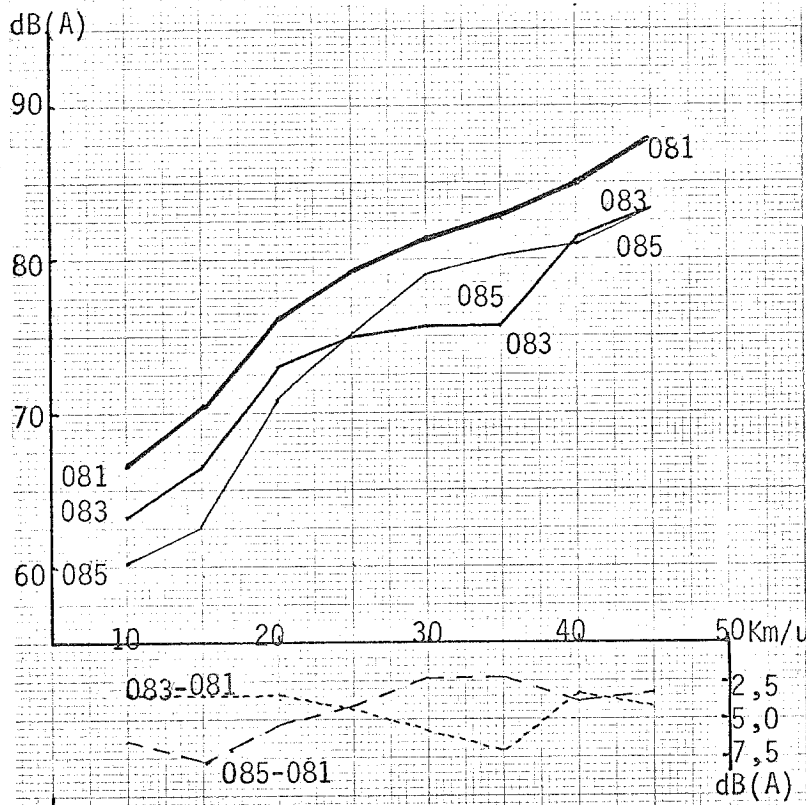
(1) id. zie figuur 1.



Figuur 3. Meting 085: sporen met afscher-
ming van 1,15 m
draaistellen zonder
schild

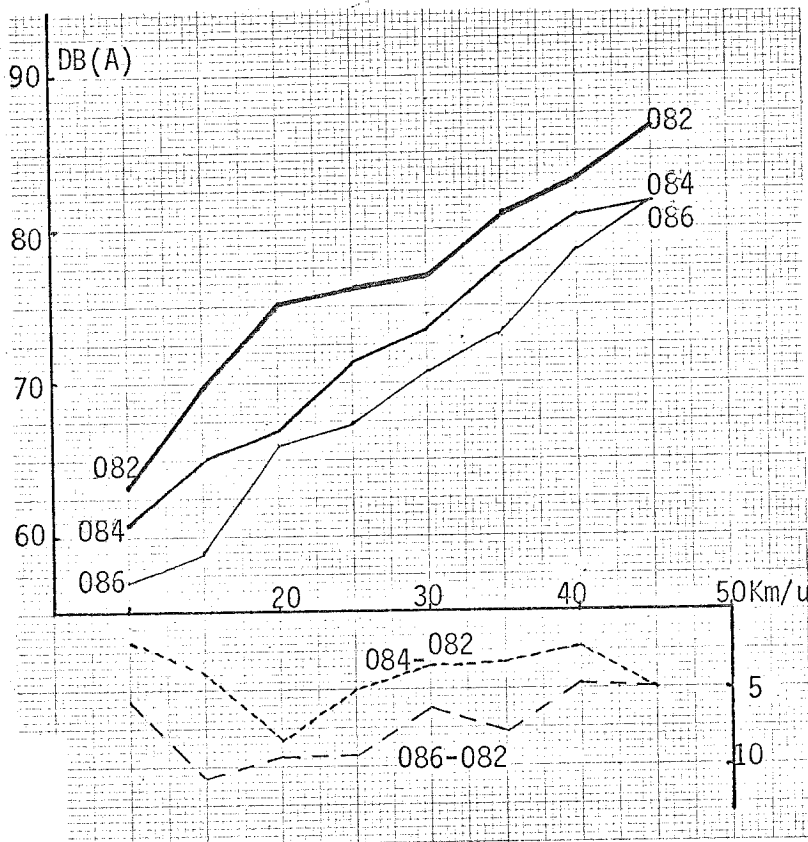
Meting 086: sporen id.
draaistellen met
schild

(1) id. zie figuur 1.



Figuur 4. Meting 081 (1)

(1) op de rechter y-as staan de verschillen tussen de geluidsoptname zonder schuttingen naast de sporen, met schuttingen van 0,65 m en van 1,15 m



Figuur 5. Meting 082, 084, 086 (1)

(1) id. zie figuur 4.

1.3. Analyse van de resultaten

1.3.1. Snelheid

De correlatie tussen snelheid en geluidsproductie is een feit waaraan ook voor het onderzoek niet werd getwijfeld. De bedoeling van het onderzoek was echter het juiste functionele verband te achterhalen tussen beide fenomenen, en eventuele andere interessante verbanden aan het licht te brengen.

Tabel 1 leert dat de semi-logaritmische benadering beter is aangepast dan de lineaire. Dit moet geen verwondering wekken omdat ook in de literatuur over geluidsmetingen bij het autoverkeer we steeds een semi-logaritmisch verband terugvonden (1) (2). Daar waar het semi-logaritmisch verband niet veel beter is dan het lineaire (cfr. metingen 06, 12, 23 en 24) gaat het telkens om metingen waarbij in hoofdzaak slechts snelheden genoteerd werden tussen 20 en 45 km/u. Bij alle andere metingen is een range beschikbaar tussen 10 en 55 km/u. Tabel 2 geeft de overeenkomstige regressievergelijkingen. Verschillend van het autoverkeer is het feit dat de semi-logaritmische curve inderdaad reeds geldig is van bij de laagste snelheden, m.a.w. vanaf 10 km/u. Bij het autoverkeer geldt die curve grosso modo slechts vanaf 25 à 30 km/u en slechts duidelijk vanaf 50 km/u. Het snelheidseffect is af te lezen uit de richtingscoëfficiënten. Wanneer het geheel der reeksen 02, 06, 09, 12, 15, 24, 25, 26 en 27 wordt beschouwd krijgt men volgende regressievergelijking:

$$y = 15,23 \ln v + 26,61 \quad r^2 = 0,71.$$

Dit betekent dus, per verdubbeling van de snelheid een toename van het geluid met 10dB(A).

In een bijkomend onderzoek werd nagegaan of de staat van het rijtuig enige invloed heeft op de geluidsproductie en zodoende de rest van de variantie kan verklaren. Twee elementen werden daarbij uitgekozen als mogelijk belangrijk: de aantal afgelegde wagenkilometer sinds de laatste slijping der wielbanden (waarbij elke oneffenheid wordt afgeslepen) en sinds de laatste grote revisie (waarbij de tram geheel wordt gedemonteerd en terug als nieuw wordt gebouwd). Geen van beide elementen kwam als

(1) Report of the Urban Motorways Project Team, to the Urban Motorways Committee, Dept. of Environment, HMSO, London, 1973, p. 37.

(2) Le bruit dû à la circulation urbaine, OESO, Paris, 1971, p. 35.

significant uit de regressie (cfr. tabel 3). Hieruit mag worden afgeleid dat noch het slijpen van de wielbanden noch het grondig reviseren enige invloed uitoefenen op de geluidsproductie. Hiermee wordt echter niet beweerd dat b.v. andere nadelige effecten op de rij-eigenschappen van de trams niet zouden verminderen (andere trillingen, het schommelen, enz...).

Verder werd onderzocht of de specifieke verschillen tussen de regressievergelijkingen van de onderscheiden meetplaatsen systematiseerbaar waren. Daaruit konden volgende bewegingen vastgesteld worden.

1.3.2. Staatbreedte

Wanneer de straatbreedte toeneemt (de breedte tussen de 2 bouwlijnen) vermindert de waarde van de intercept ($r = -0,93$), en verhoogt de richtingscoëfficiënt ($r = 0,94$) in de vergelijkingen uit tabel 2. De schommeling in de interceptwaarde werd ook vastgesteld in de literatuur betreffende geluidsmetingen bij het autoverkeer (3). Een halvering van de straatbreedte geeft daar een stijging van het geluidspeil met 5 dB(A) bij elke snelheid. Bij het tramverkeer werden de volgende regressievergelijkingen gevonden:

$$-0,91 x + 61,5 = b, \text{ waarin } x = \text{straatbreedte}$$

b = te verklaren interceptwaarde
uitgedrukt in dB(A)

Dit geeft volgende waarden:

voor x = 13,5 m	b = 49,21 dB(A)	
= 25 m	b = 38,75	$\Delta = 10,46$
= 50 m	b = 16,00	$\Delta = 22,75$

Op het eerste gezicht zou dit kunnen wijzen op een veel hoger straatbreedte-effect bij tramverkeer dan bij autoverkeer. Deze conclusie is echter voorbarig gezien de zeer grote invloed van

(3) Le bruit dû à la circulation automobile dans les villes, état de recherche et de la réglementation dans divers pays, OESO, Paris, 1969.

de richtingscoëfficiënt. Inderdaad, bij een snelheid van nauwelijks 10 en 15 km/u waarbij de richtingscoëfficiënt normaal slechts zwak meespeelt zien we reeds bij een breedte van

13,5 m	een verwachte geluidswaarde van	68,9 dB(A)	$\Delta = 4,3 \text{ à } 1,4$
25 m	"	64,6 en 67,5 dB(A)	$\Delta = 3,1 \text{ à } 6,0$
50 m	"	61,5 dB(A)	

bij 10 km/u

en bij een breedte van

13,5 m	een verwachte geluidswaarde van	73,4 dB(A)	$\Delta = 1,4 \text{ à } 3,4$
25 m	"	70,0 en 72,0 dB(A)	$\Delta = 0,8 \text{ à } 2,8$
50 m	"	69,2 dB(A)	

bij 15 km/u

In de literatuur kon nergens worden teruggevonden dat ook de richtingscoëfficiënt afhankelijk zou zijn van de straatbreedte, alhoewel hier een $r = 0,94$ werd gevonden.

Gezien het gering aantal waarnemingen, nl. 7, kan aan de geldigheid van elke conclusie op basis van de gegevens uit tabel 4 getwijfeld worden, omdat de beïnvloedende factoren veel talrijker zijn dan de hier aangehaalde. Met dergelijk beperkt aantal waarnemingen zijn verrassingen niet uitgesloten. Zo werd o.a. een vrij hoge r -waarde vastgesteld in de relatie tussen de straatbreedte en de spoor kwaliteit ($r = -0,47$). Een geldige verklaring daarvoor zou kunnen zijn dat het een vaste politiek is de sporen in smalle straten beter te onderhouden dan in brede straten. Op MIVA verzekerde men ons dat zulks niet algemeen het geval is. Enkel de sporen op meetplaats 15 (Lange Nieuwstraat) krijgen een speciale aandacht omdat de frequentie van de trams daar het hoogst ligt van het gehele net.

Er kan geen andere verklaring gevonden worden voor het aangehaalde verband, en het berust dan ook op de toevallige keuze der meetplaatsen.

De invloed van de straatbreedte op het geluidsniveau werd ook op een andere manier onderzocht. Het gehele pakket geluidsmetingen der reeksen 02, 06, 09, 12, 15, 26, 27 (203 waarnemingen) (4) werd samengenomen en de meervoudige correlatie werd nagegaan tussen enerzijds het geluid en anderzijds het logaritme van de snelheid en de straatbreedte. Eveneens werd de proef genomen met de straatbreedte te vervangen door het logaritme ervan. Daarbij werden de volgende resultaten verkregen:

- enkelvoudige correlaties tussen geluidsimmissie en straatbreedte:

$$dB(A) = 0,10 x + 76,73, \text{ waarin } x = \text{straatbreedte in m}$$

$$r_1 = 0,20 \quad v = 202$$

$$t = 3,03$$

$$dB(A) = 2,77 \ln x + 70,63 \quad r_2 = 0,19 \quad v = 202$$

$$t = 2,75$$

- meervoudige correlaties:

$$dB(A) = 0,14 x + 16,04 \ln y + 19,93 \quad \text{waarin } x = \text{straatbreedte in m}$$

$$y = \text{snelheid in km/u}$$

$$r_3 = 0,92; F = 520; t_x = 9,94; t_y = 31,39; v = 202$$

$$dB(A) = 3,89 \ln x + 16,04 \ln y + 11,20$$

$$r_4 = 0,91; F = 490; t_x = 9,17; t_y = 30,60; v = 202$$

Hieruit blijkt een tegenstrijdigheid met de theorie. Volgens de eerste 2 geschatte relaties zou er een relatie bestaan in de zin van "hoe breder de straat des te meer lawaai". Deze relatie steunt op een zwakke correlatie ($r_1 = 0,20$ en $r_2 = 0,19$),

(4) De reeksen 23, 24 en 25 zijn onvergelykbaar in deze context, en werden dus niet meegecorrleerd.

en meet bovendien een constant verschijnsel (de richtingscoëfficiënt bedraagt nauwelijks 0,10 in de lineaire, en 2,77 in de semi-logaritmische versie). Over de meervoudige correlaties kan men dezelfde opmerkingen maken. Hieruit mag men wel de conclusie trekken dat het voorhanden getallenmateriaal, dat sterk is gekleurd door de kleine keuze van de meetplaatsen (nl. 7), niet representatief is wanneer het erom gaat de rol van de straatbreedte te bepalen in de geluidsimmissie. We moeten dus een beroep doen op de beschikbare gegevens in de literatuur over het autoverkeer. Op het eerste gezicht lijken bovendien geen elementen voorhanden die het aannemelijk zouden maken dat de zaken bij tramverkeer anders zouden liggen dan bij het autoverkeer.

1.3.3. Kwaliteit der sporen

De kwaliteit der sporen kan beoordeeld worden op het vlak van de aanleg (horizontaliteit, fundering, stabiliteit, enz...), en op het vlak van de effenheid van het loopoppervlak. In dit loopvlak kunnen zich periodieke uithollingen vormen met een 'golflengte' van 3 tot 6 cm. Ook langere ondulaties komen voor. Deze uithollingen kunnen bij treinverkeer bij hoge snelheden een verhoging van het geluidsniveau veroorzaken met 15 dB(A) (5). In ons onderzoek was het niet mogelijk de kwaliteitsomschrijving uit tabel 5 om te zetten in een kwantitatieve maatstaf. Hierdoor is het niet correct dit element in te schakelen in de hoger uitgewerkte meervoudige correlatie. Men kan er echter van overtuigd zijn dat de spoorkwaliteit het grootste deel van de resterende variantie zou kunnen verklaren. De summiere kwaliteitsomschrijving uit tabel 5 gaf, bij een snelheid van 50 km/u, b.v. een correlatie te zien van $r = 0,88$. Bij lagere snelheden is de kwaliteit der sporen niet doorslaggevend gebleken in de geluidsproductie.

(5) STUBER C., Reducing the impact of Railway Noise, in Railway Gazette International, December 1974, pp. 475 - 479.

1.4. Geluidsafscherming bij het tramverkeer

1.4.1. Inleiding

Over schuttingen en geluidsschermen is in de literatuur over trillingsmechanika reeds veel te doen geweest. De wetten van de geluidsverstrooiing langs schermen zijn niet door eenvoudige wiskundige formules te berekenen. Momenteel wordt nog druk geëxperimenteerd om meer inzicht te krijgen in de mechanismen die werken bij allerhande soorten isolatie en afscherming. Een eerste kennismaking met de literatuur (6) laat uitschijnen dat niet minder dan 9 variabelen een doorslaggevende rol spelen:

- hoogte van het scherm boven de grond
- hoogte van de geluidsbron boven de grond
- hoogte van de opvanger boven de grond
- dikte van het scherm
- richting van opstelling van het scherm (loodrecht of schuinhellend t.o.v. de grond)
- Hertz-frequentie van de af te schermen trillingen
- vorm van de geluidsgolven
- gebruikte materiaal
- windrichting en -snelheid.

(6) SCHOLLES W.E. & SALVIDGE A.C. & SARGENT J.W., Motorway Noise Propagation and Screening, in Journal of Sound and Vibration, 38(3), 1975, pp. 281 - 303.

ZYUN-ITI MAEKWA, Environmental Sound Propagation, in 8th Internat. Congress on Acoustics, London, July 1974, pp. 29 - 46.

JONASSEN H., The Efficiency of some different types of acoustical barriers in some different situations, in Protection acoustique des zones d'habitation par des écrans, Compte Rendu, Lab. de mécanique et d'acoustique, Marseille, 18 - 20 febr. 1975, 10 pp.

RAPIN J.M., Enseignement des premières expériences d'utilisation d'écrans acoustiques en urbanisme, in id., 12 pp.

KURZE U.J., Technical background for the draft of UDI 2720, Noise control by means of shielding, in id., 11 pp., 19 fig.

Een predicterende formule opstellen die geldig is voor alle geluidsschermen is iets dat zeker buiten het bestek van deze studie valt. Het ligt op het onderzoeksdomein van de acustica. Nochtans ligt hierin de oorzaak dat de schijnbare tegenstrijdigheden op bepaalde plaatsen in tabellen 7 en 8 niet per sé op een fout in de aflezing hoeven te wijzen maar volkomen normaal het gevolg kunnen zijn van de afwisseling der overheersende hertz-frequentiegebieden in het geluid op een bepaald ogenblik.

Algemeen, dus zonder rekening te houden met een onderscheid tussen zones binnen en buiten de geluidsschaduw, wordt de geluidsbestrijding aan de bron als het meest effectief aangezien (7). Ook vanuit het principe van toerekening der milieukosten aan de veroorzaker van de vervuiling is deze soort bestrijding de meest logische: de kosten ervan zullen normaal immers ten laste komen van de bron waarop zij wordt toegepast: de ontwikkeling van een stillere motor veronderstelt onderzoekswerk waarvan de kosten uiteindelijk worden gedragen door de gebruikers. Deze gebruikers zijn de bron van lawaai. Door de hogere prijs zal hun aantal verminderen. Ook het monteren van schilden op de trams zou normalerwijs kunnen doorberekend worden aan de gebruiker.

Het beoogde doel wordt langs de vrije ondernemerswil en langs de vrije concurrentie om nochtans niet bereikt. Wanneer de geluidsisolatie niet simultaan op alle vervoerswijzen wordt toegepast, of wanneer de geluidsnormen niet gelijktijdig voor alle vervoerswijzen van kracht worden, wordt de concurrentiële positie van de goed geïsoleerde, door de verhoging van zijn exploitatieprijs in het gedrang gebracht, en vlucht de vraag, tegen alle goede bedoelingen in, weg van de milieuvriendelijke naar de nog niet geïsoleerde en dus milieuschadelijke vervoerswijzen. In zekere zin kan men hier spreken van een bredere toepassing van de wet van Gresham.

(7) MYNCKE H. & VANDENBERGHE H., Geluid en Geluidshinder, Ned. Boekhandel, Antwerpen, 1975, p. 102.

Het op die manier ten laste leggen van de milieukosten aan de veroorzaker ervan is een politiek geladen zaak. In die sfeer is het dan ook denkbaar dat de overheid de isolatiekosten op zich neemt door b.v. onderzoeken of verbeteringen te subsidiëren, of gewoonweg door over te schakelen van bronbestrijding naar bescherming van de getroffen en. Bij deze laatste mogelijkheid weze er nochtans aan herinnerd dat men zich dan verwijderd van een toerekening van de milieukosten aan de veroorzaker, en dat men niet verhinderd heeft dat na het aanbrengen van de isolatie de geluidsproduktie weer zou stijgen zodat uiteindelijk de immissie bij de getroffen en niet ver beneden het vroegere peil zal gelegen zijn.

1.4.2. Bronafscherming

- De Greater London Council onderzocht verschillende types hermetische afscherming als b.v. betonnen muren, huizen, dammen, enz... De resultaten hebben betrekking op een wegafscherming, geplaatst op 3 meter van de rand van de weg. (8)

Tabel 12. Geluidsdemping door hermetische afschermingen op 3 m

Hoogte van het scherm	Geluidsdemping	
	op 30 m afstand van de weg	op 70 meter afstand van de weg
1,5 m	9 à 15 dB(A)	14 à 20 dB(A)
5 m	17 à 22 dB(A)	20 à 27 dB(A)
10 m	22 à 25 dB(A)	26 à 31 dB(A)

- Zwitserse en Scandinavische onderzoeken gaven een daling van het geluid te zien met maximum 5 dB(A) bij 100 meter dikke schermen van uit elkaar staande bomen. Het eigen onderzoek naar geluidsproduktie door trams (cfr. supra) tussen compacte hagen van 0,5 m breedte en 0,8 m hoogte gaf een geluidsdemping van

(8) Le Bruit dû à la circulation Urbaine, op.cit. pp. 64 - 65.

ca. 4 à 5 dB(A) t.o.v. vergelijkbare metingen elders. Het is nochtans niet duidelijk of de geluidsafname niet gedeeltelijk moet toegeschreven worden aan de spoorqualiteiten. Er weze wel op gewezen dat de hoogte van de hagen ongeveer overeenkwam met de hoogte van de uitsparingen in het koetswerk voor de draaistellen.

- Een speciaal ontworpen "regelbeplanting" (10 m beplanting per 18 m afstand) veroorzaakt volgens Myncke en Vanderberghe 13 dB(A) geluidsniveauperlaging op 64 m diepte en 21 dB(A) op 100 m diepte (9).

1.4.3. Afscherming door de getroffene

- De Building Research Association geeft volgende getallen i.v.m. geluidsdemping door vensters (10):

- open vensters: - 14 dB(A);
- gesloten vensters: - 25 dB(A);
- dubbele vensters: - 45 dB(A).

Deze getallen wijken ver af van die van het Zwitserse "Bundeslabo für Materialienprüfung" (11):

- open venster: - 5 à 10 dB(A);
- gesloten venster: - 15 à 25 dB(A);
- dubbele venster: - 20 à 35 dB(A) (2 vensters met verschillende glasdikten, op 20 cm van elkaar).

De resultaten van het "Nordiske Komite för Bygningsbestemmelser" (NKB) (12) (- 30 dB(A) bij dubbele beglazing), die van het Franse "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment" (13)

(9) MYNCKE H. & VANDENBERGHE H., op.cit. p. 109.

(10) Le bruit dû à la circulation urbaine, op.cit., p. 67 e.v.

(11) id., p. 67 e.v.

(12) id., p. 125 e.v.

(13) id., p. 97 e.v.

(- 0 tot - 5 dB(A) bij open vensters en - 10 tot - 15 dB(A) bij gesloten vensters) en die van Myncke en Vandenberghe (14) ondersteunen eerder de Zwitserse onderzoeken. Dit laatste vermeldt ook dat bij een halvering van de raamopening het geluid met 3 dB(A) afneemt.

1.4.4. Geluidsschilden op draaistellen

Bij wijze van proef werd een geluidsschild gemonteerd op de draaistellen om de carrosserie-openingen af te schermen (zie bijlage II). Deze schilden waren voorlopig gemaakt uit houtvezelplaat van 2 cm dikte, langs de binnenzijde bekleed met Exophon, een geluidsabsorberend materiaal dat tegelijk een ontdreunende werking uitoefent op de plaat waarop het aangebracht is (15).

Uit de meetresultaten blijkt dat het geluidsniveau door deze schilden afneemt, vooral bij snelheden rond 25 à 30 km/u, cfr. tabel 7. Bij hogere snelheden is de afname kleiner. Het gemiddelde verschil over de 6 proeven beliep ongeveer 2 dB(A) bij 10 à 15 km/u, ongeveer 4 à 5 dB(A) bij 20 à 30 km/u, en 1,5 à 2 dB(A) bij hogere snelheden. Dit verloop kan karakteristiek zijn voor het gebruikte materiaal: het zou kunnen zijn dat de verminderende isolatiecapaciteit bij hogere snelheden het gevolg is van het meetrillen van het schild, of van het feit dat bepaalde niet-opgeslorpte geluidsfrequenties veel sterker worden, of dat de bevestigingsmethode nader moet bestudeerd worden.

Bij een nauwkeuriger onderzoek van de vorm van dat schild en zijn bevestiging kan het geluidsafschermend vermogen algemeen groter worden en bij hogere snelheden ook blijven.

(14) MYNCKE H. & VANDENBERGHE H., op. cit., p. 111.

(15) Exophon.-Asophon, geproduceerd door Idikell (Keller, Ned., Weert).

1.4.5. Schuttingen langs de sporen

Eveneens bij wijze van proef werden de sporen langs de zijde van de mikrofoon afgeschermd door een schutting, samengesteld uit op elkaar gelegde houten balken van ca. 7 cm dikte, tot op een hoogte van 0,65 m en van 1,15 m. Deze schutting werd opgesteld op 1,5 m uit het midden der sporen, d.w.z. op 1 m van het dichtstbijzijnde spoor en op 40 cm van het koetswerk van de tram (zie afbeelding in bijlage II).

Het geluidsdempend effect wordt weergegeven op de grafieken in fig. 4 en 5. Het effect is sterker dan dat van de schilden op de draaistellen. Bij snelheden van 10 tot 25 km per uur ligt het rond de 4 à 5 dB(A) bij een scherm van 1,15 m.

Bij hogere snelheden schommelt de absorptie rond 4 à 5 dB(A).

De nadelen van schermen naast de sporen zijn talrijk.

De doelmatigheid van een scherm is beperkt tot een zone erachter waarvan het volume afleidbaar is uit de hoogte en de vorm van het scherm en zijn plaats t.o.v. de geluidsbron.

Hoe dichter het scherm bij de geluidsbron is opgesteld des te groter wordt het gebied dat in de geluidsschaduw valt en des te hoger de geluidsschaduw reikt. Binnen deze schaduw is de isolatie verre van compleet wegens de diffractie van de geluidsgolven. Buiten de schaduw is er helemaal geen isolatie. Door de aanwezigheid van isolatiemuren dicht bij de sporen worden spoorwerken en werken aan het bovenleidingsnet bemoeilijkt wat kan aanleiding geven tot een merkkelijk rendabiliteitsverlies bij de hulpdiensten van het vervoerbedrijf..

Wanneer een woonwijk op deze wijze doelmatig moet worden geïsoleerd betekent dit de bouw van kilometerlange schermen, wat natuurlijk hoge kosten met zich brengt. Er moet ook rekening gehouden worden met de hinder die dergelijke constructies met zich brengen in de vorm van contactverstoring, visuele hinder, e.a. Gezien deze bezwaren is het duidelijk dat de aanwendbaarheid van dergelijke schermen eerder beperkt is tot

plaatselijke goed overwogen en architectonisch, akoestisch en planologisch bestudeerde stukken.

De geluidsvermindering in de geïsoleerde zone is daartegenover opmerkelijk groter dan bij de toepassing van draaistelschilden. Draaistelschilden hebben het voordeel van een zeer beperkte materiaalinzet waarmee het geluid aan de bron wordt afgeschermd en dat uiteraard overal waar het rijtuig gebruikt wordt.

De schilden moeten dan wel op alle wagens aangebracht worden. Wanneer het aldus algemeen zou worden toegepast, zou het worden vervaardigd uit polyester, met langs de binnenzijde een laag Exophon.

1.4.6. Kostprijs

De kostprijs per schild zou 2.250 F bedragen, plaatsing inbegrepen, zonder winstmarge, per tram met 2 draaistellen (4 schilden) dus 9.000 F (16). In casu voor Antwerpen betekent dat:

$$9.000 \times 166 \text{ (trams)} = 1.494.000 \text{ F}$$

Voor de schermen dient een ingewikkelde kostprijsberekening te worden gemaakt met het karakter van een lastenboek. Enkele kostprijzen van voor de hand liggende materialen en constructie-types werden nagegaan:

- een bakstenen muur van 28 cm dikte en met 0,65 m, 1 m of 1,15 m hoogte;
- een muur samengesteld uit prefab-betonelementen.

De uiteindelijke prijs voor bakstenen muurtjes bedraagt per meter (17):

(16) Een polyesterplaat, breedte 52 cm, dikte 1,5 cm, bestreken met een laag Exophon aan één zijde kost, volgens de prijsopgave van La Brugeoise & Nivelles (aug. '75) 1000 F/m, bevestiging inbegrepen, winstmarge niet inbegrepen.

(17) Prijzen per 1.9.1975.

Hoogte	0,65 m	1 m	1,15 m
Fundering	2273,-	2273,-	2273,-
Bovengrondse muur	2418,-	3720,-	4278,-
Afdekprofiel	900,-	900,-	900,-
Totaal	5591,-	6893,-	7451,-

Voor de details van de kostprijsberekening: zie bijlage IV.

Deze prijzen zijn aannemersprijzen aan opdrachtgever, exclusief werfinrichtingskosten, verkeershinder, en signalisatiekosten.

De vaste kosten zijn de fundering en de afdekking, samen 3173,- F. Dit blijft constant bij verhoging van de muur. De kosten die met de hoogte mee variëren zijn de kosten voor het bovengrondse deel, a rato van 372,- F per 10 cm hoogte. De marginale kosten nemen dus af per bijkomende hoogte tot op een zeker punt. Vanaf daar moet de gehele constructie breder worden gemaakt zodat de kostprijs dan fors gaat stijgen. Deze kritische hoogte is niet eenduidig te bepalen, omdat die afhankelijk is van de verwachte druk van buitenuit, de lengte van het bouwwerk, de kromming, de trillingen en de klimatologische omstandigheden. Normaal kan een muur tot 1,50 of 2 m hoogte wel met een dikte van 28 cm volstaan.

Prefab-elementen in gewapend beton, met veelzijdige toepassingsmogelijkheden kunnen zeer goede diensten bewijzen, wegens hun eenvoudige plaatsingsmethode (zij moeten slechts neergezet worden op een gestabiliseerde plaats, b.v. een betonzooltje van ca. 10 cm dikte en 50 cm breedte. Er zijn praktisch geen werfkosten. De plaatsing kan door de technische diensten van de openbare besturen zelf gebeuren, zonder daarbij beroep te moeten doen op een aannemer. Bij een verandering in de toestand kunnen zij snel weer opgeruimd en elders herbruikt worden.

Zij kunnen een gecombineerd doel hebben. Zo kunnen zij b.v. eveneens deel uitmaken van siermuurtjes of bloembakken. De kostprijs blijft zeer afhankelijk van de realiseerbare omzet. De uiteindelijke prijs voor deze prefab-elementen bedraagt per meter (18):

Hoogte	0,65 m	1 m	1,15 m
Fundering	400,-	400,-	400,-
Plaatsing	80,-	80,-	80,-
Element	860,-	1320,-	1510,-
Totaal	1340,-	1800,-	1990,-

Voor de details van de kostprijsberekening: zie bijlage IV.

Deze prijzen zijn exclusief het vervoer van fabriek naar werf, en exclusief de exploitatiekosten van een kraanwagen. De vaste kosten zijn de fundering en de plaatsing, samen 480,-F. De kosten die met de hoogte van de muur mee variëren zijn de kostprijs van het element, a rato van 132,- F per 10 cm.

Er zijn nog talloze andere mogelijkheden buiten de 2 berekende. Een zeer efficiënt middel is de aanleg van zanddammen. Een kostprijsberekening daarvan moet rekening houden met de werfomstandigheden, de zandsoort, de aanvoer ervan, de beplanting, het terreinbeslag, de taludvorm, enz... Door het relatief grote terreinbeslag is de aanwending uiteraard beperkt. De prijs kan voordelig worden wegens de goedkope techniek en het geringe onderhoud.

Houten schuttingen kunnen aan een bepaald stadsbeeld soms een accent geven, maar de aanwending op grote schaal stelt zware onderhoudsproblemen wil men niet na 2 à 3 jaar tot een globale vervanging overgaan, en is bovendien vrij duur. Schuttingen in metaal hebben ongeveer dezelfde bezwaren.

(18) Kataloogprijzen op 15.9.1975.

Hoofdstuk 2. De verwachte geluidshinder in een type-straat

2.1. Bemerkingen vooraf

De eenheid geluidsintensiteit waarin verkeerslawaai normaal gemeten wordt is de Decibel(A)-schaal. De dB(A)-schaal kent aan de verschillende hertz-frequentiegebieden ongeveer hetzelfde gewicht toe als het menselijk gehoor. Daardoor is deze schaal bijzonder goed aangepast voor sociaal-economisch studiewerk. De dB-eenheden staan in een logaritmisch verband tot de hoeveelheid trillingsenergie die wordt opgevangen op een meetpunt. Een verdubbelde energie-uitstraling veroorzaakt dus ongeveer 3 dB(A) meer opgemeten geluid. Dit volgt uit de formule (19):

$$\text{Geluidsintensiteitsniveau } L_i = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB})$$

De geluidsuitstraling van een puntbron (b.v. van één auto) verloopt volgens de formule van een boloppervlak:

$$\text{opp.} = 4\pi r^2$$

Bij de verdubbeling van de straal (d.i. de afstand tussen geluidsbron en meetpunt) wordt de oppervlakte 4 maal zo groot. De uitgestraalde energie komt per oppervlakte-eenheid dus viermaal zwakker over. Dit geeft een geluidsvermindering van

$$10 \log 4 \text{ (dB(A))} = 6 \text{ dB(A)}$$

Voor een lineaire bron (b.v. een drukbereden weg) verloopt de uitstraling volgens de formule van de zijwand van een cilinder:

$$\text{opp.} = 2\pi r.H$$

waarin H de lengte is van de aslijn.

(19) I = gemeten geluidsintensiteit; I_0 = ref. geluidsintensiteit
 $10 \log 2 = 3,0103$.

Een verdubbeling van de cilinderstraal levert ook een verdubbeling van de cilinderzij-oppervlakte op. Dit betekent een verzwakking van de geluidsenergie met factor 2 per oppervlakte-eenheid of:

$$10 \log 2 \text{ (dB(A))} = 3 \text{ dB(A)}$$

Bij geluidsmetingen zijn 6 uitdrukkingen gebruikelijk, nl. de L_1 , de L_{10} , de L_{50} en de L_{90} , de L_m en de L_{eq} -grenzen.

De L_1 -grens geeft een geluidsniveau in dB(A) aan dat gedurende 1 % van de opnametijd wordt overschreden. Dit geeft dus, geprojecteerd op de tijdsas, 1 % weer van de totale lengte van deze as.

De L_{10} , de L_{50} en L_{90} -grenzen zijn naar analogie de geluidsniveaus die overschreden worden gedurende 10, 50 resp. 90 % van de totale tijdsduur van de geluidsopname.

De L_m -grens geeft de gemiddelde geluidsintensiteit over een periode. De L_{eq} -grens geeft een equivalent continu geluidsniveau dat eenzelfde belasting zou geven als het beschouwde veranderlijk geluid.

L_{eq} is dus per definitie gelijk aan (20):

$$L_{eq} = \frac{q}{\log 2} \log \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^{\frac{20 \log 2}{q}} dt \right\}$$

of, vereenvoudigd (met $q = 3$):

$$L_{eq} = 10 \log \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^2 dt \right\}$$

(20) MYNCKE H. & VANDENBERGHE H., Geluid en Geluidshinder, monografieën Leefmilieu Nu, Ned. Boekhandel, Antwerpen, 1975, p. 46.

waarin T = meetperiode

$p(t)$ = veranderlijke geluidsdruk

p_0 = referentie-geluidsdruk (= 20 micropascal)

q = aantal dB waarmee het geluidsdrukniveau dient te worden verhoogd om op de helft van de oorspronkelijke tijd dezelfde geluidsdosis te geven.

Wanneer het geluidsdrukniveau op afzonderlijke tijdstippen wordt genoteerd, en deze notities kunnen worden samengebracht in een frequentieverdeling kan voor L_{eq} de volgende formule worden gebruikt:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum^i N_i \times 10^{\frac{L_i}{10}} \right), \text{ waarin}$$

L_i = centrum van de i -de klasse

N_i = aantal elementen in de klasse i

N = totaal aantal elementen in de populatie.

Als de verschillende opgemeten geluidsterkten zich verdelen volgens een Gauss-kurve, en L_{50} dus gelijk is aan het gemiddelde geluidsniveau dan

$$L_{eq} = L_{50} + 0,43 (L_1 - L_{50})$$

Bij snelheden lager dan 50 km/u staat de geluidsproduktie niet meer duidelijk in verband met de snelheid. Bij 40 km/u kan een auto zowel in 2de, 3de als 4de versnelling rijden, wat telkens een andere produktie van geluidsenergie voor gevolg heeft.

De produktie hangt af van de arbeid die door de motor op het ogenblik van de meting geleverd wordt. Bij het aanzetten en het optrekken is dat beduidend meer dan bij constante snelheid. In drukke stadstraten worden niet zelden geluidspieken genoteerd van ongeveer 90 dB(A), terwijl de gemiddelde snelheid er nauwelijks 30 à 40 km/u bedraagt.

Tijdens een beperkte geluidsmeting van autobusverkeer in de Cogels-Osylei te Berchem-Antwerpen werd inderdaad geen duidelijk verband waargenomen, vooral niet bij lage snelheden. Het resultaat is een heteroskedastische puntenwolk. Bij een snelheid van 23 km/u komen zowel 79 als 88 dB(A) voor. Vanaf 37 km/u kan men enigszins spreken van een zeker herkenbaar eenvoudig verband. Onder die snelheid doen zich 2 fenomenen voor:

Primo: bij een vermindering van de snelheid neemt het bandengeruis en de luchtverplaatsing af. Wanneer een personenwagen of autobus in ontkoppeling rijdt aan lage snelheid zal de geluidsproduktie-kurve dus ongeveer liggen in het verlengde van het rechter deel van de grafiek.

Secundo: bij een trage snelheid is de kans groot dat de chauffeur in een lagere versnelling aanzet. De motor levert dan zeer veel energie en de geluidsproduktie zal bijgevolg zeer hoog liggen.

Hiermee hangt trouwens ook samen dat, wanneer een verkeersregeling in een stad geen perfecte synchronisatie van de verkeerslichten inhoudt, men een meerproduktie mag verwachten van 5 à 10 dB(A), (L_{eq}), en méér naarmate de snelheid daalt.

2.2. Prognose van het verkeerslawaai

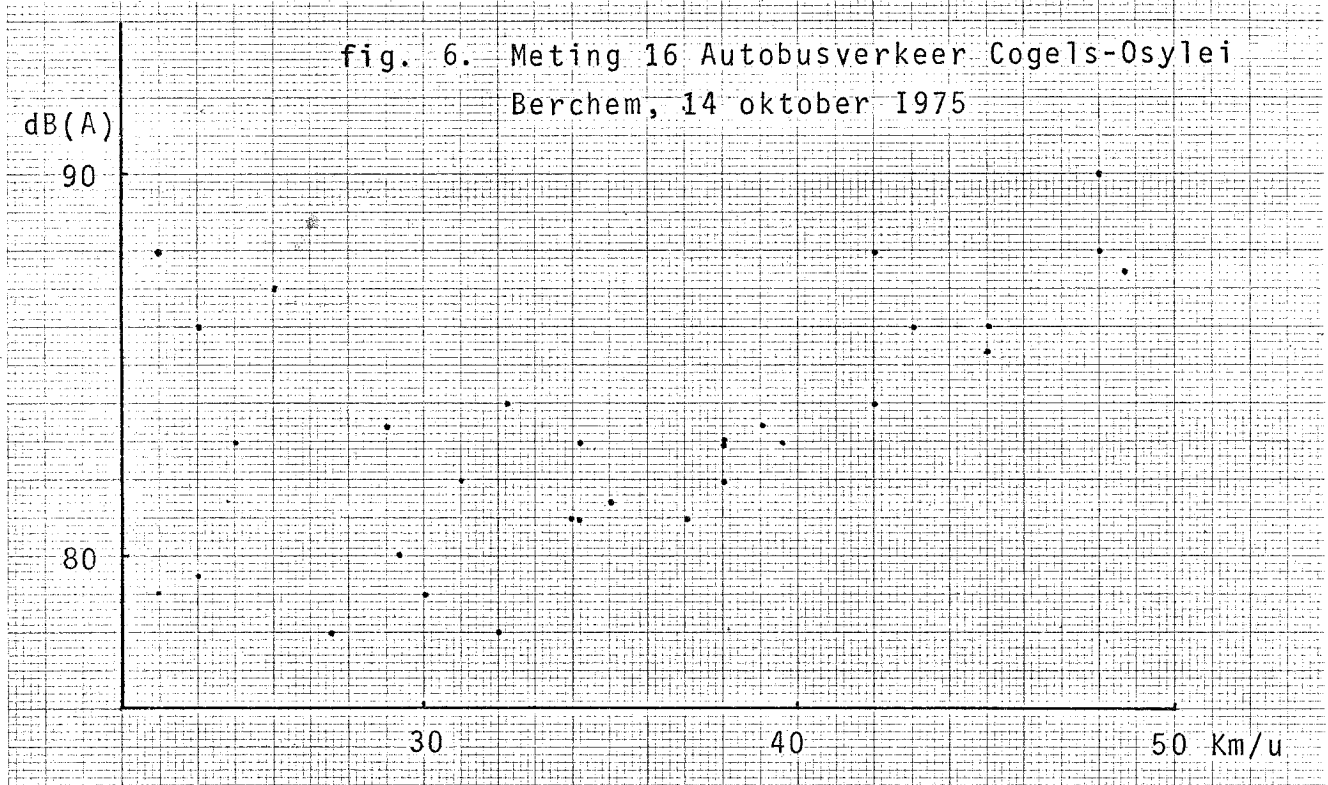
2.2.1. Prognose b.m.v. een algemene formule

W. KLEIN geeft als prognosefuncties voor het maximale verkeerslawaai, gemeten op een afstand van 7,5 m: (21)

- door personenwagens: $L_{max} = 30 \log v + 20 \text{ dB(A)}$ /1/
(v = snelheid in km/u)
- door vrachtwagens = $30 \log v + 28 \text{ dB(A)}$ /2/
- door vrachtwagens met aanhanger
= $30 \log v + 31 \text{ dB(A)}$ /3/

(21) KLEIN W., Verkeerslawaai, in Kursus Hogere Akoestiek, Hoofdstuk 12, KVIV, Antwerpen, 28 pp., 1974.

fig. 6. Meting 16 Autobusverkeer Cogels-Osylei
Berchem, 14 oktober 1975



waaruit een toename van 9 dB(A) valt af te leiden bij een verdubbeling van de snelheid. Deze functies gelden slechts boven de 50 km/u.

Voor de prognose van L_{eq} over de periode van één uur geeft W. Klein bij vrij doorstromend verkeer:

$$L_{eq} = 21 + 15 \log V_p - 10 \log r + 10 \log n + 0,1 p - D \text{ dB(A) /4/}$$

$$\text{of} = 21 + 6,5 \ln V_p - 4,4 \ln r + 4,4 \ln n + 0,1 p - D \text{ dB(A)}$$

waarbij

V_p = gemiddelde snelheid van personenwagens in km/u

r = afstand tot de as van de dichtstbijzijnde rijbaan in m

n = verkeersdichtheid in voertuigen/uur (beide richtingen samen)

p = % zwaar verkeer

D = extra demping d.m.v. absorptie (22).

De uitwerking van de formules /1, 2, 3, en 4/ vindt men terug in tabel 13.

-
- (22) Kale grond levert een absorptie van 0,5 dB(A) per 100 m
 kort gras: 1,5 à 2 dB(A)
 lage beplanting: 2,5 dB(A)
 struikgewas: 4 à 5 dB(A)
 bos: 10 à 15 dB(A)
 Deze waarden dienen bijgeteld bij de afname die normaal door de afstandsvergroting gerealiseerd wordt.

Tabel 13. Snelheid en geluidshinder door het wegverkeer, in L_{\max} en L_{eq} , op 7,5 m, zonder demping, op een droge asfaltweg

Snelheid	L_{\max} Geluidshinder in dB(A)			L_{eq} bij 1200 wagens/u /4/ in dB(A)		
	pers.w. /1/	vrachtw. /2/	vrachtw.+ aanhangw. /3/	enkel pers.w.	25 % vrachtw.	100 % vrachtw.
50	71,0	79,0	82,0	68,5	71,0	78,5
60	73,3	81,3	84,3	69,8	72,3	79,8
70	75,4	83,4	86,4	70,8	73,3	80,8
80	77,1	85,1	88,1	71,7	74,2	81,7
90	78,6	86,6	89,6	72,5	75,0	82,5
100	80,0	88,0	91,0	73,1	75,6	83,1
120	82,4	90,4	93,4	74,3	76,8	84,3

2.2.2. Grafische simulatie

Er wordt als opdracht gesteld 1680 reizigers door een straat te vervoeren op één uur tijd. Dit kan gebeuren b.m.v. 1200 auto's (gemiddelde bezetting 1,4 reizigers per auto), of b.m.v. 38 trams (gemiddelde bezetting 44 reizigers). Dit betekent voor beide vervoersmodi een bezetting van ong. 1/3 van hun capaciteit. De bezetting per auto kan statistisch geverifieerd worden. Wanneer men een hogere gemiddelde bezetting zou voorstellen, zou dit betekenen dat automobilisten zouden gedwongen worden meer personen in hun wagen te laden dan zij spontaan willen. Ongeacht of zulke maatregel verantwoord zou zijn of niet, verliest de auto hiermee toch zijn karakter van individueel vervoermiddel. Daarom houden wij ons in deze simulatie aan de 1,4 reizigers per wagen.

Anders liggen de zaken bij het tramvervoer waar b.v. op de spitsen de bezetting van 44 reizigers per wagen gemakkelijk overschreden wordt, en zelfs tot 80 kan oplopen, zonder dat zulks de definitie van het vervoermiddel verandert. Het is bovendien mogelijk grotere eenheden in te zetten, in casu te Antwerpen is het mogelijk 2 tramrijtuigen te koppelen zodat per wagenstel 160 reizigers kunnen worden vervoerd.

De alternatieven die dus onderzocht worden zijn:

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1) 1200 auto's à 1,4 reizigers/auto | |
| 2) 38 trams à 44 reizigers/tram | |
| 3) 20 trams à 80 reizigers/tram | Deze 2 alternatieven zijn |
| 4) 10 dubbeltrams à 160 " " | gemakkelijk afleidbaar uit |
| | de simulatie van het vorige |
| | alternatief. |

2.2.2.1. Wetmatigheden i.v.m. de snelheid van het autoverkeer

=====

- a) De waargenomen snelheden in het verkeer op een bepaalde plaats volgt meestal de standaard-normale verdeling. Dikwijls kunnen nochtans onder invloed van verkeerslichten of andere toestanden afwijkingen geconstateerd worden.
- b) De gemiddelde snelheid is een functie van de initiële toestand van de rijweg en van de verkeersdichtheid.
- c) De standaarddeviatie is eveneens afhankelijk van de verkeersdichtheid, en kan tevens sterk beïnvloed worden door het bestaan van een gesynchroniseerd verkeerslichtenstelsel.

ad.a) Op de histogrammen op fig. 7 en 8, afgeleid uit gegevens van de "Highway Capacity Manual" (23) komt duidelijk de standaard-normale verdeling tot uiting. Deze gegevens hebben echter te maken met ideale wegomstandigheden, zonder opstopping.

(23) Highway Capacity Manual 1965, Highway Research Board, spec. rep. 87, Washington D.C., 1966, pp. 47 - 50.

ad.b) De gemiddelde snelheid op een bepaald ogenblik is een gegeven dat uit elke steekproef eenvoudig kan bepaald worden (24).

(24) De gemiddelde snelheid kan echter ook voorspeld worden door middel van de volgende formule, die de tijd t geeft nodig voor het afleggen van een traject:

$$t = t_0 (1 + k N)$$

t_0 is de tijd nodig bij afwezigheid van alle verkeer, en karakteriseert dus de initiële toestand van de weg

N geeft de bezetting van de weg weer

k parameter

G. POMPILJ stelt voor k volgende waarde vast:

$$k = \frac{6}{N_0}$$

waarin N_0 de maximale theoretische wegcapaciteit voorstelt.

N_0 wordt theoretisch berekend door:

$$N_0 = (1 + 0,8 (c - 1)) \frac{3600 V_0}{(4 + V_0)}$$

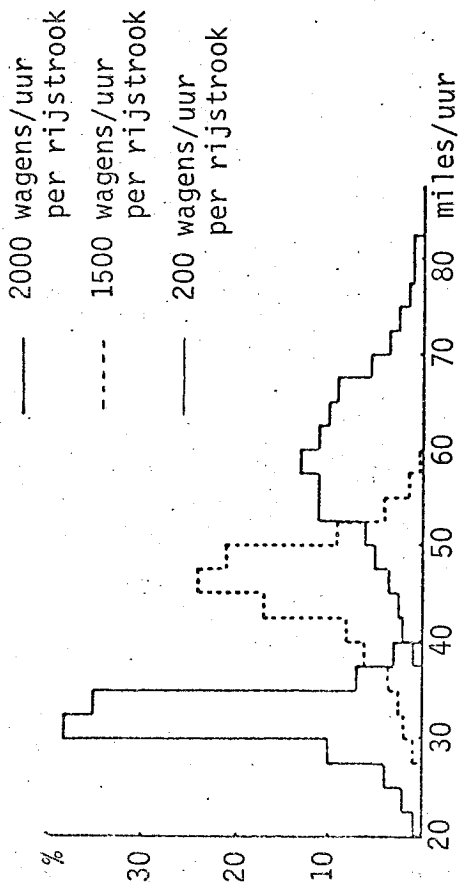
waarin c het aantal rijstroken weergeeft en V_0 de initiële snelheid (in m/sec) overeenkomstig t_0

Bron: POMPILJ G., Models for Traffic in Rome, in Mathematical model building in Economics and Industry, C. Griffin & Co Ltd., London, 1968, pp. 85 e.v.

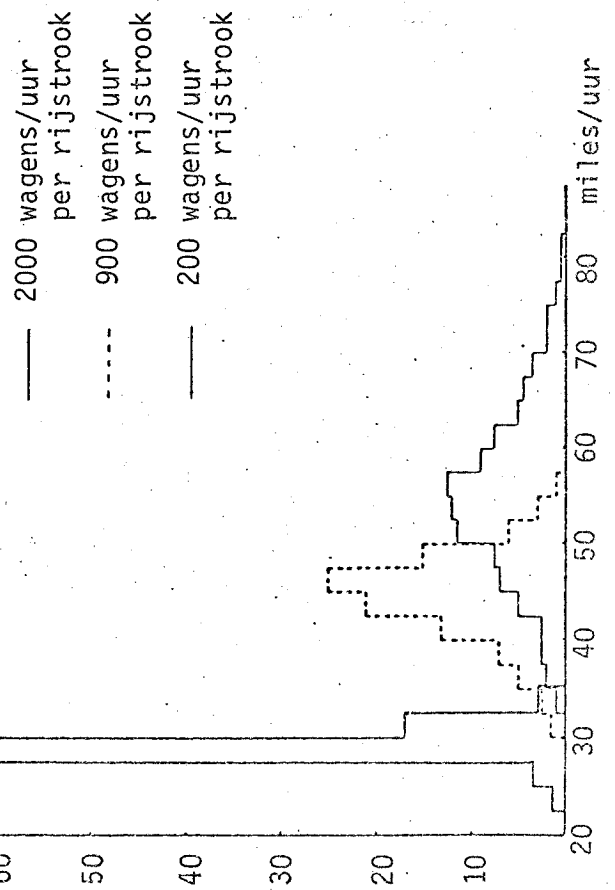
Voor gelijkaardige modellen zie b.v. ook:

HEERE E. & AKKERMANS S., Verband tussen snelheid, dichtheid en intensiteit, in Verkeerstechniek, 1973 nr. 5, pp. 224 - 229.

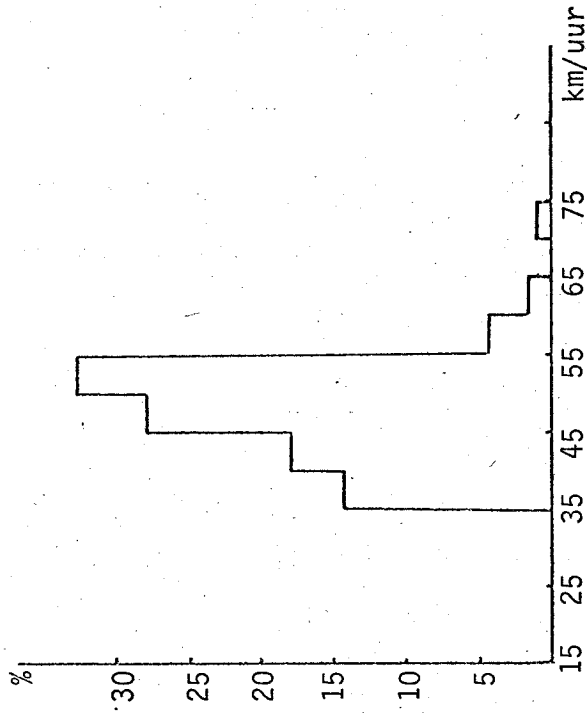
Figuur 7. Typische snelheidsverdeling van personenwagens bij verschillende wegbezettingen, per rijstrook, op autowegen



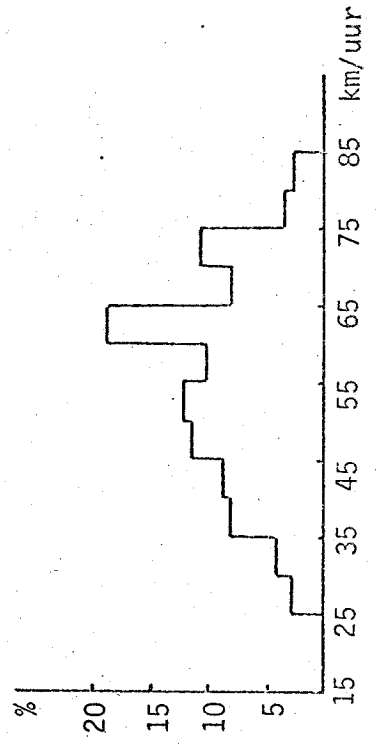
Figuur 8. Typische snelheidsverdeling van personenwagens bij verschillende wegbezettingen, per rijstrook, op gewone 2-baanswegen buiten de stad



Figuur 9. Snelheidsverdeling Belgiëlei bij goede Lichtsynchronisatie



Figuur 10. Snelheidsverdeling St.-Michielskaai, niet beïnvloed door Lichtsynchronisatie



ad.c) Bij een toenemende verkeersdrukke is er steeds minder uitwijkruimte voorhanden, zodat haast geen inhaalmanoevers kunnen worden uitgevoerd. De daarmee samenhangende file-vorming heeft een quasi uniforme snelheid tot gevolg. Wanneer er integendeel weinig verkeer is kan elke automobilist autonoom zijn snelheid bepalen.

Dit is o.a. goed afleesbaar uit de histogrammen die werden opgesteld op basis van gegevens uit de "Highway Capacity Manual". Zie fig. 7 en 8. De kenmerkende parameters uit deze histogrammen staan in tabel 14.

Tabel 14. Parameters uit de grafieken 7 en 8

	Fig. 7: autosnelwegverkeer			Fig. 8: Tweebaanswegverkeer		
Wagens per rijstrook en per uur	2000	1500	200	2000	900	200
Gemiddelde snelheid in miles/u	32,0	45,2	59,1	29,2	43,9	54,4
σ (25)	3,0	5,4	8,5	1,5	4,8	9,2

De histogrammen op fig. 9 en 10 zijn het resultaat van steekproeven genomen door de Antwerpse verkeerspolitie op 24 september 1975 op de Belgiëlei, richting Harmonie, kruispunt Haringrodestraat (fig. 9) en op de St.-Michielskaai, richting zuid (fig. 10). Hier vindt men geen standaard-normale verdeling meer terug, wat kan te wijten zijn aan de kleinere omvang van de steekproeven, maar het belangrijkste dat deze grafieken aan het licht brengen is het zeer grote verschil in spreiding t.o.v. het gemiddelde. De Belgiëlei is voorzien van een vrij goed gesynchroniseerd stel verkeerslichten (richtsnelheid 50 km/u), terwijl op de St.-Michielskaai over kilometers geen verkeerslichten voorkomen.

$$(25) \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (x_i - \bar{x})^2 f_i}$$

De parameters zijn samengebracht in onderstaande tabel.

Tabel 15. Parameters uit grafieken 9 en 10

Parameters	Belgiëlei	St.-Michielskaai
Gemiddelde snelheid in km/u	47,68	55,73
σ	6,15	13,35

2.2.2.2. Wetmatigheden i.v.m. de geluidsproduktie van het auto-
 =====
 verkeer
 =====

Zoals vroeger reeds werd vastgesteld moet voor snelheden lager dan 50 km/u uitgekeken worden naar andere regels i.v.m. de geluidsproduktie, omdat de snelheid het geluid niet voldoende meer verklaart.

Over de verdeling van de versnellingsstoestand van een reeks auto's op een bepaalde plaats is weinig bekend. De opgespoorde onderzoeken over het bepalen van versnellingsverdelingen en -variatiëes hebben slechts betrekking op het gedrag van één automobilist gedurende een rit van een bepaalde lengte onder gegeven verkeersomstandigheden (26), of onder de assumpties van de "autovolgtheorie" (27).

Het heeft dus weinig zin de geluidsproduktie te gaan afleiden door een nochtans exactere omweg, langs de versnellingsvariatiëe. Er kunnen wel aanvaardbare hypothesen gemaakt worden over het te verwachten geluidsniveau. De heteroskedastische puntenwolk waarover sprake op blz. 31 zal met haar ondergrens in het verlengde liggen van de geluidsimmissiefunctie boven de 50 km/u, zoals ze werd berekend in tabel 13 op blz. 33 met de formule van W. Klein.

(26) BROUWER C., Versnellingsruis in Stadsverkeer, in Verkeers-
techniek, 1974 nr. 8, pp. 438 e.v.

(27) MORESCO E. & REGTERSCHOT D., Een onderzoek naar versnellings-
 variatiëe, in Verkeerstechniek, 1973 nr. 9, pp. 442 e.v.

Dit geeft dus de onderstaande tabel.

Tabel 16. Geëxtrapoleerde getallen voor de geluidshinder in L_{\max} en L_{eq} (cfr. tabel 13)

Snelheid in km/u	L_{\max} Geluidshinder in dB(A)			L_{eq} bij 1200 wagens/u in dB(A) /4/		
	pers.w. /1/	vrachtw. /2/	vrachtw.+ aanh.w./3/	0 % vrachtw.	25 % vrachtw.	100 % vrachtw.
40	68,1	76,1	79,1	67,1	69,6	77,1
30	64,3	72,3	75,3	65,2	67,7	75,2
20	59,0	67,0	70,0	62,6	65,1	72,6

De getallen uit formule /1/ worden bevestigd voor de snelheid van 30 km/u door Frietzsche's berekeningen voor de geluidsminima in dezelfde omstandigheden (28).

Frietzsche levert ook met een steekproef van 13 personenwagens, volgas aanzettend in tweede versnelling vanaf 20 km/u waarden tussen 71 en 84 dB(A) met een gemiddelde van 76 dB(A)(29) die kunnen worden beschouwd als liggend op de bovengrens.

Hillquist geeft eveneens resultaten van metingen verricht op een afstand van 16,7 m. Deze staan vermeld in tabel 16.

Om deze gegevens vergelijkbaar te maken met die uit andere metingen op 7 1/2 m moet men bij elke waarde ongeveer 6 dB(A) bijtellen. Dit is in de tabel gebeurd (30). Modi noch gemiddelden zijn gegeven. Ook staat niet bij de gegevens vermeld of de onder- en bovengrenzen absolute uitersten zijn. Uit de kontekst blijkt dat dit waarschijnlijk niet het geval is.

(28) FRIETZSCHE G., op. cit. p. 8.

(29) id., op. cit., p. 4.

(30) HILLQUIST R., Operation noise levels of automobiles, Engineering Publication 4748, General Motors, Milford, Michigan, 1971.

De proeven die ervoor aan de basis lagen hadden plaats met een "conventional full-sized 1971 4-door hardtop with standard engine and exhaust system". Ook uit vergelijkingen met andere geluidsstudies als b.v. Frietzsche blijkt dat andere zowel hogere als lagere waarden voorkomen rond de bovengrens.

Tabel 17. Geluidsimmissie (L_{\max}) van een type-wagen (zie hoger), onder- en bovengrenzen, gemeten op 7 1/2 m
Bron: Hillquist - in dB(A)

Snelheid in km/u	Ondergrens	Bovengrens	Δ
10	59	79	20
20	62	82	20
30	65	83	18
40	68	84	16
50	71	85	14
60	74	86	12
70	76	87	11
80	78	90	12
90	79	84	5
100	80	86	6
110	81	88	7
120	82	89	7

Hieruit blijkt dat de opgegeven ondergrenzen vrij goed terug te vinden zijn met de formule /1/ van W. Klein ter berekening van L_{\max} . De knik in de bovengrens vindt zijn oorsprong in het overschakelen naar de hoogste versnelling en door het bereiken van de maximum toegelaten snelheid op de Amerikaanse wegen. Deze knik niet te na gesproken vindt men hierin duidelijk het heteroskedastisch verband terug. Dit verband wordt gekenmerkt door dezelfde parameters als die welke de functie van de gemiddelden kenmerken, met daarbij ook de standaarddeviatie die in functie staat tot de variabele op de x-as.

$$\sigma_i = kx_i \quad \text{of} \quad \sigma_i = k^{x_i}$$

2.2.2.3. Hypothesen voor de simulatie voor het autoverkeer

- * In tabel 17 is het gemiddeldenverloop niet gegeven en scheidt de knik in de bovengrens een bijkomend probleem. Voor de simulatie zal men dus verder werken met een hypothetische geluidsimmissiefunctie zoals voorgesteld in tabel 18.

Tabel 18. Hypothetische geluidsimmissiefunctie

Snelheid in km/u	Ondergrens in dB(A)	Bovengrens in dB(A)	Verskil tss. de grenzen in dB(A)	Gemiddelden in dB(A)	σ
10	59,0	79,5	20,5	69,2	6,833
20	62,2	81,5	19,3	71,8	6,433
30	65,3	83,0	17,7	74,1	5,900
40	68,3	84,1	15,8	76,2	5,267
50	71,1	84,9	13,8	78,0	4,600
60	73,7	85,5	11,8	79,6	3,933
70	76,0	85,9	9,8	80,9	3,267
80	77,9	86,1	8,2	81,9	2,733
90	79,2	86,1	6,9	82,7	2,300
100	80,2	86,1	5,9	83,2	1,967
110	81,0	86,2	5,2	83,6	1,733
120	81,5	86,2	4,7	83,9	1,567

ondergrens $y = 23,2 \log v + 32,0$

bovengrens $y = 6,5 \log v + 73,3$ $y = \text{dB(A)}$ $v = \text{snelheid}$

gemiddelden $y = 14,9 \log v + 53,0$ in km/u

- * Deze grenzen die hier vermeld staan zullen beschouwd worden als de $\bar{v} \pm 1,5 \sigma$ -grenzen van een normale verdeling, dit in samenhang met wat staat op blz. 39. D.w.z. dat dus 86,6 % der waarnemingen binnen de 2 grenzen valt.

De σ -functie wordt: $y = -5,5 \log v + 13,4$ $y = \sigma$

$v = \text{snelheid}$
in km/u

- * I.v.m. de snelheid zal gebruik gemaakt worden van een normale verdeling met een gemiddelde van 50 km/u en een standaarddeviatie van 7.

2.2.2.4. Resultaten van de simulatie voor het autoverkeer =====

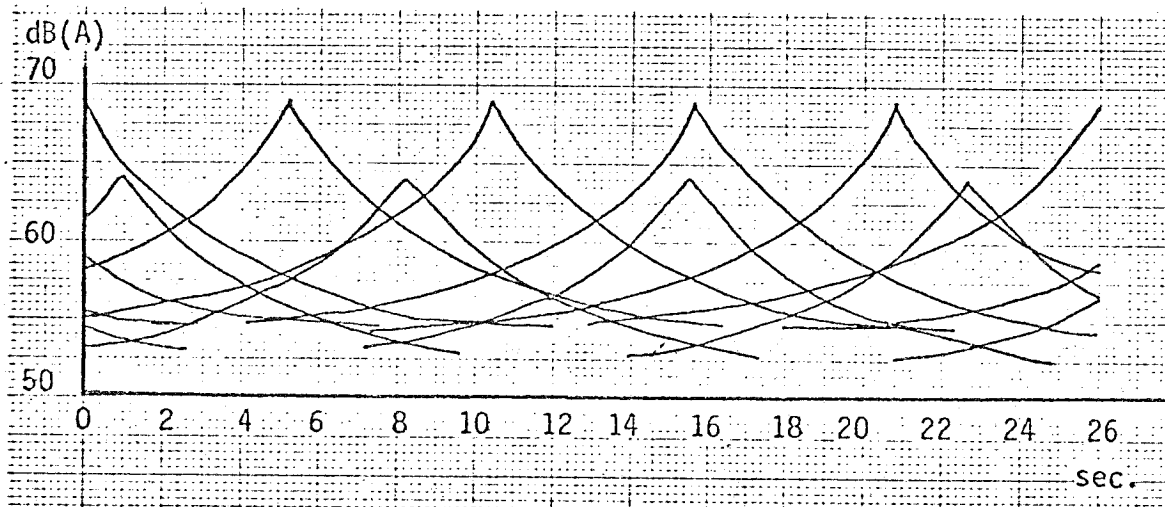
Op fig. 11 wordt de geluidsinmissie afgebeeld van enkele op elkaar volgende personenwagens die rijden met een snelheid van 40 of 60 km/u, waargenomen gedurende een opnametijd van 26 seconden, en die telkens een uniforme geluidsproduktie veroorzaken. Deze grafiek illustreert dat men op elk ogenblik het geluid opvangt van meerdere wagens tegelijk. De totale waargenomen geluidsintensiteit is in zulk geval echter geenszins de som van de individuele geluidsprodukties, maar wordt bepaald door bij het volume van de sterkste bron een aantal decibels te voegen dat zelf van de sterkte der afzonderlijke bronnen afhankelijk is. Deze regel van de geluidssomming is weergegeven in figuur 12 (31).

Met behulp van de figuren 11 en 12 kan dus afgeleid worden wat het uiteindelijke geluidsniveau zal zijn dat over een bepaalde periode wordt voortgebracht door het gesimuleerde autoverkeer in zijn geheel.

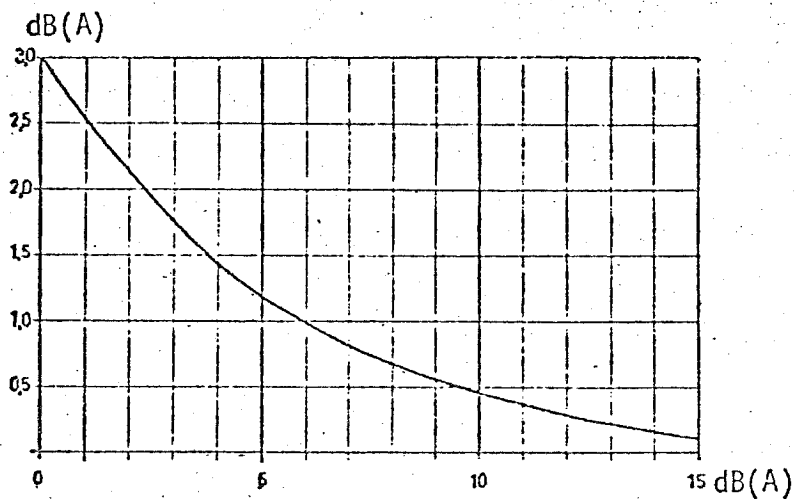
De hoger aangehaalde wetmatigheden werden als hypothesen gesteld. Bij middel van een random-generator werden door de computer 400 willekeurige tijden aangeduid op een tijdsas van 1200 seconden. Deze tijden werden gebruikt als begintijden van de geluidsoptnamen. Tegelijkertijd werd aan elke begintijd (dus aan elke ingelezen autorit) met een Gauss-kansverdeling een bepaalde snelheid toegekend, en tevens via een heteroskedastisch verloopende Gauss-kansverdeling een maximale geluidspiek toegewezen.

Twintig seconden na de inleestijd zal de aldus omschreven auto deze maximale geluidspiek bereiken en 20 seconden later stopt de geluidsoptname voor die wagen. Op elk ogenblik binnen deze tijdspanne van 40 seconden kan men de afstand bepalen tussen het meetpunt en de wagen, en met dat gegeven dus ook het aantal decibel dat hij op elk tijdstip laat optekenen.

(31) BROCH J.T., Acoustic Noise Measurements, Brüel & Kjaer, 1971.



Figuur 11. Geluidsimmissie door personenwagens rijdend in 2 files, één aan 40 en één aan 60 km/u



Het verschil in dB(A) tussen 2 geluidsbronnen dient afgelezen van de x-as. Op de y-as vindt men de overeenkomstige waarde die moet worden bijgeteld bij het hoogste gemeten niveau van de bronnen afzonderlijk

Figuur 12. Optelschema voor geluidsniveaus

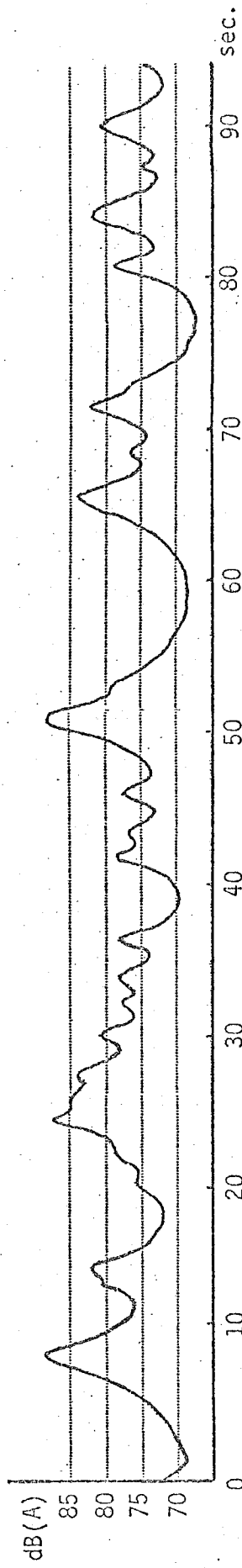


Fig.13. Totale geluidsmissie door het gesimuleerde autoverkeer

— geluidsmissie van de trams afzonderlijk
 - - - - sommatie van de geluidsmissie van trams
 in een overlappingsgebied

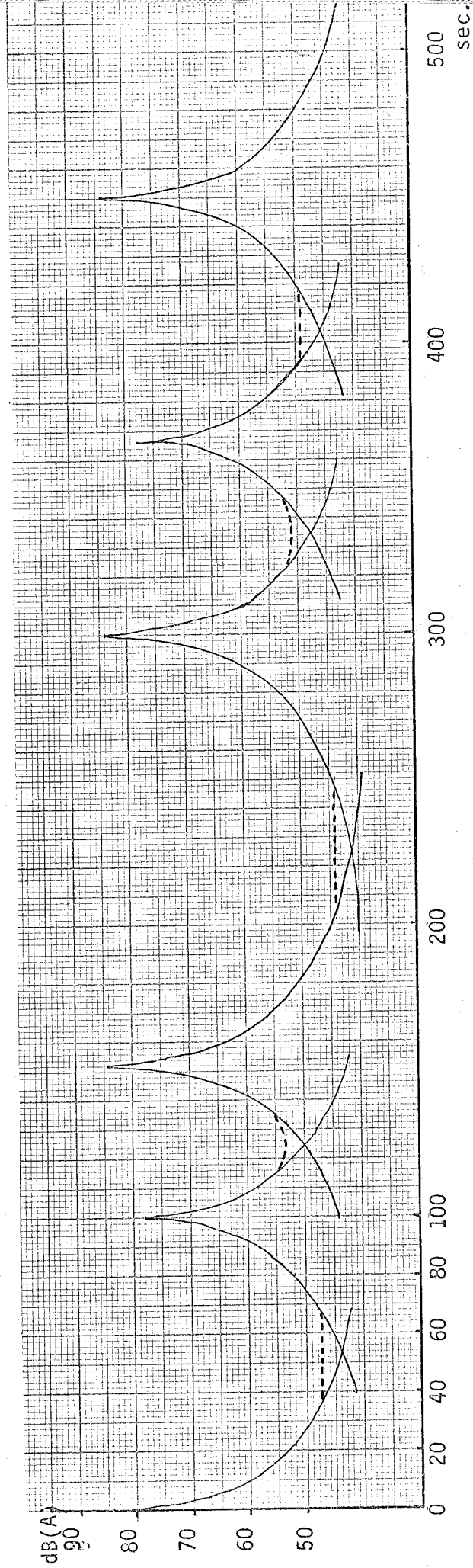


Fig.14. Geluidsmissie op één meetpunt door tramverkeer aan 30 en 50 km/u

Deze geluidsopname wordt afzonderlijk opgetekend voor alle wagens die op dat ogenblik binnen de meetzone vallen (d.w.z. in de periode van 20 sec. vóór en na het geluidsmaximum). Daarna worden de afzonderlijke geluidsopnamen die op een tijdstip voorkomen gecombineerd volgens de reeds aangehaalde optelprocedure (zie fig. 12), en het aldus verkregen aantal decibel is de simulatie van de opgemeten geluidsterkte van het globale verkeer op dat ogenblik. Dit programma wordt uitgevoerd voor elke 0,2 sec., over een willekeurige tijdspanne. Een fragment daaruit vindt men in fig. 13. De frequentieverdeling die uit deze simulatie kan opgesteld worden levert direct de L_1 , L_{10} , L_{50} en L_{90} -grenzen.

Tabel 19. L_i -waarden in dB(A), berekend vanuit de simulatie, gemeten op 7 1/2 m afstand van de rijweg

L_i	dB(A)
L_1	86,3
L_{10}	82,1
L_{50}	75,6
L_{90}	69,0
L_{max}	88,7
L_{min}	66,4
L_{eq}	78,75
L_i	
$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$	

2.2.2.5. Het tramverkeer

=====

Er wordt verondersteld dat van de 38 trams er 24 rijden aan 50 km/u, en 14 aan 30 km/u. Dus alle 150 seconden rijdt een tram voorbij aan 50 km/u en alle 265 seconden één aan 30 km/u. Gemeten op 7 1/2 m inmitteert een tram ongeveer 78 dB(A) bij 30 km/u en 84 dB(A) bij 50 km/u. Men stelt nu een tijdstabel op van de geluidshinder door een tram (tabel 20) en geeft de geluidsimmissie van het gehele tramverkeer weer t.o.v. de tijdsas van figuur 14. De verdere procedure loopt parallel met die voor het autoverkeer. De sommaties als gevolg van geluidsoverlappingen werden eveneens reeds aangebracht op figuur 14.

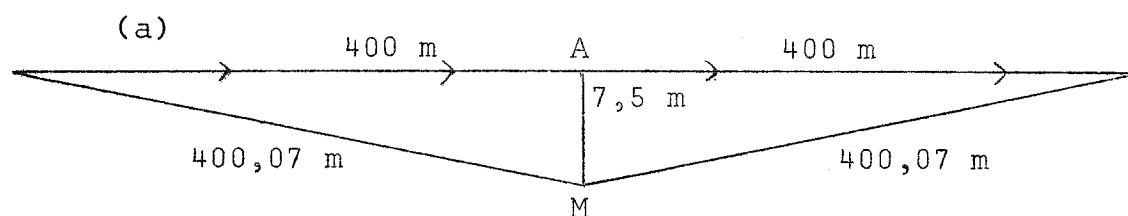
Wanneer de bezetting van de tramrijtuigen wordt verhoogd tot 80 reizigers per tram, betekent dit een debiet van 20 trams per uur, of één tram per 180 seconden.

Wanneer de trams zouden gekoppeld rijden en per stel ongeveer 160 reizigers worden vervoerd, bekomt men één tramstel per 360 seconden. De geluidsimmissie zou dan nochtans per voorbijrijdend stel 3 dB(A) hoger liggen.

De tijdsfrequentietabel van het voorkomende geluid, uitgedrukt in verschillende L_i -niveaus vindt men terug onder tabel 21.

Tabel 20. Geluidsimmissie door één tram bij snelheden van 30 en 50 km/u, op 7 1/2 m gemeten

Afstand van de tram in meter (a) (b)		Passagetijdstip van de tram in sec. voor of na de doortocht in A		Geluidsimmissie (puntbron) in dB(A), waargenomen in M	
tot A	tot M	bij 30 km/u	bij 50 km/u	bij 30 km/u	bij 50 km/u
400	400,07	- 48,0	- 28,80	44	50
200	200,14	- 24,0	- 14,40	50	56
100	100,28	- 12,0	- 7,20	56	62
50	50,56	- 6,0	- 3,60	62	68
45	45,62	- 5,4	- 3,24	63	69
40	40,70	- 4,8	- 2,88	64	70
35	35,79	- 4,2	- 2,52	65	71
30	30,92	- 3,6	- 2,16	66	72
25	26,10	- 3,0	- 1,80	67	73
20	21,36	- 2,4	- 1,44	68	74
15	16,77	- 1,8	- 1,08	71	76
10	12,50	- 1,2	- 0,72	73	79
5	9,01	- 0,6	- 0,36	75	81
0	7,50	0	0	78 (c)	84 (c)
5	9,01	+ 0,6	+ 0,36	75	81
10	12,50	+ 1,2	+ 0,72	73	79
enz..



(b) Naarmate de afstand toeneemt, neemt de homogeneïteit van het straatdecor af. Dit kan voor gevolg hebben dat het geluid meer dan voorzienbaar gaat dalen.

(c) Gemiddelde waarden uit eigen metingen.

Tabel 21. L_i -waarden in dB(A) berekend vanuit de simulatie, gemeten op 7 1/2 m afstand, bij resp. 38, 20 of 10 trams/uur

L_i	Tramverkeer		
	44 reiz./tram (38 trams/u)	80 reiz./tram (20 trams/u)	160 reiz./tram (10 trams/u)
L_1	81,4	78,0	74,0
L_{10}	68,8	62,4	55,5
L_{50}	53,1	48,1	41,3
L_{90}	43,0	39,6	39,4
L_{max}	84,0	84,0	87,0
L_{min}	42,8	39,4	39,3
L_{eq} (a)	67,7	63,0	62,6
(a) $L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_i N_i \times 10^{L_i/10} \right)$			

2.2.2.6. Simulatie voor gemengd verkeer: auto's - trams

a) Effect van de hoeveelheid verkeer

De in de opgave vermelde stroom van 1680 reizigers per uur wordt in de werkelijkheid vervoerd door een combinatie van individuele en gemeenschappelijke vervoermiddelen. Enkele combinaties zijn weergegeven in tabel 22.

Tabel 22. Aantal wagens/uur bij spreiding van het vervoer van 1680 reizigers over de 2 vervoersmodi

Aantal auto's	Aantal trams		
	a rato van x reizigers per wagen		
a rato van 1,4 reiz./wagen	x = 44	x = 80	x = 160
1200	0	0	0
1000	7	4	2
800	13	7	4
600	19	11	6
400	26	14	7
200	32	17	9
0	38	21	11

Tabel 23. Resultaten van het dB(A)-simulatieprogramma

A. w = verkeersdrukke in auto's/uur								
w	Leq [#] dB(A)	L ₁ dB(A)	L ₁₀ dB(A)	L ₅₀ dB(A)	L ₉₀ dB(A)	\bar{x} dB(A)	$\bar{\sigma}$ dB(A)	L ₁₀ -L ₉₀ dB(A)
400	75,4	85,6	80,3	69,6	60,6	70,0	6,9	19,7
600	76,1	86,1	81,0	71,7	64,0	71,9	6,1	17,0
800	76,9	86,1	81,4	73,5	66,2	73,3	5,5	15,2
1000	78,4	86,2	81,7	74,4	67,3	75,7	4,9	14,4
1200	78,8	86,3	82,3	75,6	69,0	75,7	4,9	13,3
1800	80,0	86,7	83,4	77,6	71,7	77,7	4,5	11,7
2400	81,3	87,8	84,7	79,7	74,2	79,6	3,9	10,5
B. w = in trams/uur								
1	51,6	55,0	36,1	33,7	33,5	34,6	3,7	2,6
2	54,0	62,5	37,1	44,6	33,8	35,5	4,9	3,4
4	56,4	67,5	42,2	36,0	34,1	37,6	6,3	8,1
8	59,5	72,7	48,3	36,5	35,4	42,2	8,6	13,7
11	60,0	74,8	58,4	39,8	36,8	42,5	8,6	21,7
21	63,2	77,6	62,6	49,6	40,4	50,5	8,6	22,2
28	67,7	81,2	71,2	55,1	44,8	56,7	9,6	26,4
w = gekoppelde tramstellen/uur								
10	62,6	77,6	61,2	40,5	36,8	44,9	10,2	24,4
$\# \text{ Leq} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_i N_i \times 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$ <p> L_i = centrum van de i^{de} klasse; N_i = aantal elementen in de klasse i; N = totaal aantal elementen in de populatie. </p>								

Om het aantal dB(A) te berekenen veroorzaakt door dit gecombineerde verkeer is het noodzakelijk geweest bijkomende simulaties uit te voeren van kleinere of grotere verkeersstromen. De resultaten hiervan vindt men in tabel 23 A voor het autoverkeer, en in tabel 23 B voor het tramverkeer.

Bij deze tabel dient opgemerkt dat zij enkel de geluidsimmissie weergeeft waarvoor de in de linkse kolom aangeduide voertuigen verantwoordelijk zijn, dus zonder achtergrondlawaai. Wanneer tevens ook het achtergrondlawaai zou opgenomen zijn, zou het bijna onmogelijk zijn geluidswaarden onder de 50 dB(A) te bekomen en zou ook de vrij grote spreiding die wordt gevonden bij het tramverkeer veel kleiner blijven.

Uit de gegevens van tabel 23 kunnen regressievergelijkingen worden afgeleid voor de schatting van L_{eq} , L_{10} en L_{50} .

De L_{eq} -grens is gebruikelijk bij voorschriften en normen in Duitsland, Nederland en binnenkort waarschijnlijk ook België.

De L_{10} -grens wordt in Groot-Brittannië en de L_{50} -grens in Zwitserland en Scandinavië gebruikt.

Deze regressievergelijkingen kunnen worden opgesteld op basis van het aantal wagens, of op basis van het aantal vervoerde personen, bij een uniforme gemiddelde snelheid.

Voor het autoverkeer geeft dit: bij 50 km/u gemiddeld:

$$\begin{aligned}
 L_{eq} \text{ auto} &= 3,40 \ln w_A + 54,63 && \text{waarbij } w_A = \text{aantal auto's} \\
 &= 3,40 \ln r_A + 53,48 && \text{waarbij } r_A = \text{aantal reizigers} \\
 &&& \text{(d.i. 1,4 per auto)} \\
 \\
 L_{10} \text{ auto} &= 2,37 \ln w_A + 65,37 \\
 &= 2,37 \ln r_A + 64,93 \\
 \\
 L_{50} \text{ auto} &= 5,54 \ln w_A + 36,32 \\
 &= 5,54 \ln r_A + 34,45
 \end{aligned}$$

De uitwerking van $L_{eq \text{ auto}}$ geeft de resultaten uit tabel 24.

Tabel 24. Geschatte $L_{eq \text{ auto}}$ in dB(A) bij verschillende verkeersstromen in het autoverkeer bij 50 km/u gemiddeld

Aantal wagens/u	Aantal reizigers/u	$L_{eq \text{ auto}}$ in dB(A)
1200	1680	78,8
1000	1400	78,2
800	1120	77,4
600	840	76,4
400	560	75,0
200	280	72,6
100	140	70,2

Voor het tramverkeer geeft dit bij snelheden tussen 30 en 50 km/u, met een gemiddelde van 42,6 km/u:

- Algemeen, waarbij L_{eq} afhankelijk wordt gesteld van het aantal ingezette trams,

$$L_{eq \text{ tram}} = 4,27 \ln w_t + 50,89 \text{ waarbij } w_t = \text{aantal trams}$$

$$L_{10 \text{ tram}} = 10,24 \ln w_t + 31,65$$

$$L_{50 \text{ tram}} = 5,81 \ln w_t + 29,85$$

- Wanneer L_{eq} afhankelijk wordt gesteld van het aantal reizigers bij 44 reizigers per wagen:

$$L_{eq_{t44}} = 4,27 \ln r_{t44} + 34,76 \text{ waarbij } r_t = \text{aantal reizigers}$$

$$L_{10_{t44}} = 10,24 \ln r_{t44} - 7,08$$

$$L_{50_{t44}} = 5,81 \ln r_{t44} + 7,88$$

bij 80 reizigers per wagen :

$$L_{eq_{t80}} = 4,27 \ln r_{t80} + 32,20$$

$$L_{10_{t80}} = 10,24 \ln r_{t80} - 13,20$$

$$L_{50_{t80}} = 5,81 \ln r_{t80} + 4,41$$

bij 160 reizigers per wagenstel (32):

$$L_{eq_{t160}} = 4,27 \ln r_{t160} + 29,24 + 3 \quad \text{wat ongeveer overeen-}$$

komt met $L_{eq_{t80}}$

De uitwerking van $L_{eq_{tram}}$, $L_{eq_{t44}}$, $L_{eq_{t80}}$ en $L_{eq_{t160}}$ geeft

de resultaten van tabel 25.

b) Effect van de snelheid

De invloed van de snelheid op de geluidsimmissie door het tramverkeer werd reeds weergegeven door de formule op p. 14.

$$dB(A) = 15,23 \ln v + 26,61$$

(32) De vergelijkingen $L_{10_{t160}}$ en $L_{50_{t160}}$ kunnen niet op dezelfde manier opgesteld worden omdat de laatste term, die bij L_{eq} 3 wordt (dubbele wagens), onbekend blijft bij L_{10} en L_{50} . De L_{eq} -grens heeft mathematisch goed gedefinieerde eigenschappen, wat blijkt uit zijn formule (zie p. 29 en 30) terwijl de L_{10} en L_{50} -grenzen niet per formule kunnen worden berekend, tenzij bij een situatie waarin de frequentieverdeling van de geluidsopnamen een Gausskurve volgt.

Tabel 25. Geschatte L_{eq} 's in dB(A) bij verschillende verkeersstromen in het tramverkeer, bij gemiddeld 42,6 km/u

A Aantal reizigers per uur	Aantal wagens/uur bij			$L_{eq,t44}$	$L_{eq,t160}$ $L_{eq,t80}$
	44 inzittenden	80 inz.	160 inz.		
3200	73	40	20	69,2	66,6
2400	55	30	15	68,0	65,4
1600	38	21	11	66,3	63,7
1440	33	18	9	65,8	63,2
1280	30	16	8	65,3	62,7
1120	26	14	7	64,7	62,1
960	22	12	6	64,1	61,5
800	19	10	5	63,4	60,7
640	15	8	4	62,3	59,7
480	11	6	3	61,1	58,6
320	8	4	2	59,4	56,8
160	4	2	1	56,8	54,1

B wagens [#] /uur	L_{eq} tram	wagens [#] /uur	L_{eq} tram
73	69,3	14	62,1
55	68,0	13	61,8
40	66,6	11	61,1
38	66,3	10	60,7
33	65,8	9	60,3
26	64,7	7	59,2
21	63,9	6	58,6
19	63,4	4	56,8
17	62,9	2	54,1
		1	50,8

* Hier wordt bedoeld "enkele wagens". Bij het rijden met gekoppelde wagens dient het L_{eq} -niveau met 3 dB(A) te worden verhoogd.

b) De invloed van de snelheid op het L_{eq} -niveau

De simulaties voor het autoverkeer bij 1200 wagens per uur gaven volgende L_{eq} -niveaus:

- bij gemiddeld 50 km/u en $\sigma = 7$ km/u : $L_{eq} = 78,8$ dB(A)
- bij gemiddeld 25 km/u en $\sigma = 3,5$ km/u : $L_{eq} = 78,5$ dB(A)
- bij gemiddeld 15 km/u en $\sigma = 2,1$ km/u : $L_{eq} = 79,0$ dB(A)

Bij een vermindering van de gemiddelde snelheid daalt L_{eq} praktisch niet. Dit is aannemelijk. Enerzijds brengt een halvering van de snelheid wel een vermindering van de geluidsmaxima mee, maar anderzijds treedt er een grotere spreiding op van de geluidsmaxima rond het gemiddelde en is er bovendien een verdubbeling van de opvangtijd door de mikro. De geluidscurve voor elke auto wordt dus mogelijk wel lager maar zeker breder, zodat de oppervalkte onder de curve praktisch constant blijft. In het stadsverkeer bij snelheden voornamelijk onder de 60 km per uur kan men bijgevolg vooropstellen dat de geluidsimmissie enkel afhankelijk zal zijn van de frequentie der ritten, zoals weergegeven is in de formules voor L_{eq} auto op p. 50.

Bij het tramverkeer werd daarentegen een merkelijke vermindering van het L_{eq} -niveau vastgesteld: bij 60 trams/uur stelde men vast:

- bij gemiddeld 42,6 km/u : $L_{eq} = 69,7$ dB(A)
- bij gemiddeld 31,5 km/u : $L_{eq} = 66,7$ dB(A)
- bij gemiddeld 21,3 km/u : $L_{eq} = 62,2$ dB(A)

Dit gaf een relatie als volgt:

$$L_{eq} = 10,85 \ln \bar{v} + 28,08$$

Wanneer dit effect wordt ingebracht in de reeds gekende formule voor L_{eq} voor het tramverkeer bekomen we :

$$\begin{aligned}
 L_{eq \text{ tram}} &= 10,85 \ln \bar{v} + 4,27 \ln w_t + 11,46 \\
 L_{eq_{t44}} &= 10,85 \ln \bar{v} + 4,27 \ln r_{t44} - 4,57 \\
 L_{eq_{t80}} &= 10,85 \ln \bar{v} + 4,27 \ln r_{t80} - 7,44 \\
 L_{eq_{t160}} &= 10,85 \ln \bar{v} + 4,27 \ln r_{t160} - 10,41 + 3
 \end{aligned}$$

c) Assemblage van het model

Wanneer de in de tabellen 24 en 25 B gevonden waarden bij elkaar worden geplaatst volgens de combinaties die in tabel 22 zijn aangegeven, komt men via de gekende optelprocedure voor decibels (cfr. fig. 12) tot de resultaten van tabel 26.

Tabel 26. L_{eq} , veroorzaakt door het vervoer van 1680 reizigers met een combinatie van tram en auto's

Verkeer				L_{eq} -niveau bij combinatie van		
per auto (50 km/u gemidd.)	per tram (42,6 km/u gemiddeld) met					
		44pl.	80pl.	160 pl.	I-II	I-III
I	II	III	IV			
1200	0	0	0	78,8	78,8	78,8
1000	7	4	2	78,2	78,2	78,2
800	13	7	4	77,5	77,4	77,4
600	19	11	6	76,4	76,3	76,3
400	26	14	7	75,4	75,2	75,3
200	33	17	9	74,5	74,3	74,4
0	38	21	11	66,3	63,6	63,6

Het L_{eq} -niveau voor het gehele personenverkeer zal kunnen berekend worden aan de hand van volgend model:

$$L_{eq \text{ pers.}} = \max(L_{eq \text{ tram}}, L_{eq \text{ auto}}) + 3 e^{-0,1831} |L_{eq \text{ auto}} - L_{eq \text{ tram}}|$$

waarbij de term $3 e^{-0,1831} |L_{eq \text{ auto}} - L_{eq \text{ tram}}|$ de optelprocedure uit fig. 12 voorstelt.

Wanneer andere geïsoleerde L_{eq} -niveau's uit de bestudeerde omgeving bekend zijn (b.v. achtergrondlawaai; fabriekslawaai; goederenverkeer, luchtverkeer enz...) kan men om het globale geluidsniveau te kennen dezelfde formule gebruiken. Daarbij sommeert men de L_{eq} 's per paar. De resultaten daarvan worden weer per paar gesommeerd, tot men uiteindelijk de $L_{eq \text{ tot.}}$ bereikt.

De algemene vorm van de formule, voor de somming van 2 L_{eq} 's van resp. geluidsbronnen A en B is :

$$L_{eq \text{ tot.}} = \max(L_{eqA}, L_{eqB}) + 3 e^{-0,1831} |L_{eqA} - L_{eqB}|$$

Voor de opname van het goederenvervoer in het model bestaat wel een vuistregel, nl. dat bij een toename van het aandeel zwaar verkeer met 10 % men het L_{eq} -niveau ongeveer met 1 dB(A) moet verhogen (33). Het probleem is echter dat niet alle goederenverkeer onder de categorie zwaar verkeer valt en vice versa. In een studie door A. De Graeve en J. Nouwynck (34) wordt vertrokken van het feit dat één vrachtwagen tienmaal meer lawaai veroorzaakt dan een personenwagen. Wanneer per 100 wagens 10 vrachtwagens voorkomen heeft men dus een personenwagen equivalent van 190. Wanneer 100 personenwagens als basis (x) wordt genomen maken 190 personenwagens $x + 10 \log 1,9$ dB(A) of $x + 2,8$ dB(A). Zo verder redenerend komt men tot de tabel 27.

Tabel 27. L_{eq} -verhoging bij verhoging van het aandeel zwaar verkeer in het totale verkeer

Aandeel zwaar verkeer in het totale verkeer %	L_{eq} -verhoging
10	$x + 2,8$
20	$x + 4,5$
30	$x + 5,7$
40	$x + 6,6$
50	$x + 7,4$
60	$x + 8,1$
70	$x + 8,6$
80	$x + 9,1$
90	$x + 9,6$
100	$x + 10,-$

Er wordt evenwel opgemerkt dat deze getallen slechts onder zeer bepaalde voorwaarden geldig zijn. Zij werden bovendien opgesteld aan de hand van metingen op autosnelwegen. Het verkeer in een stad wijkt daar qua decor natuurlijk grondig van af. Het is echter niet de bedoeling uitvoerig op dit aspect van de geluidsmeting in te gaan.

(33) KLEIN W., Verkeerslawaai, in op. cit.

(34) DE GRAEVE A. & NOUWYNCK J., Les bruits dûs à la circulation automobile et leur influence sur la conception des routes et des bâtiments, in Tijdschrift der Openbare Werken van België, pp. 393 e.v.

Men kan bij deze werkwijze het verwijt maken dat er geen globaal model voor de geluidshinder wordt aangeboden. Hier-
tegenover staat nochtans dat deze studie niet in de eerste
plaats een globale behandeling van de geluidshinder beoogt,
maar wel een element wil aanbrengen in de juiste kostprijsbe-
rekening (de marginale sociale kosten) van het personenvervoer.
Het doel van deze nota is geweest de omvang van de geluids-
hinder geëmitteerd door 2 vervoermiddelen tijdens hun functie
van het vervoer van personen afhankelijk te stellen van varia-
belen (dichtheid van het verkeer, aantal reizigers en onrecht-
streeks ook de snelheid), die passen in een globaal stelsel
dat met de vervoerprijs, de vervoersnelheid, en de vervoer-
dichtheid samen een nieuw evenwicht zal te zien geven in de
intermodale uitsplitsing van de vraag naar personenvervoer.

BIJLAGE I. BEPALING VAN EEN NIEUW EVENWICHT IN DE VRAAG NAAR
 PERSONENVERVOER, BIJ PRIJSZETTING TEGEN MARGINALE
 SOCIALE KOSTEN

Dr. G. BLAUWENS

1. KOSTENFUNCTIES

a) Snelheden V_a , V_b , V_t , V_v

V_a = snelheid van het autoverkeer op de onderzochte relatie
 = $V_a(x_a, x_b, x_t, G)$
 = functie van het op die relatie gepresteerde aantal reiziger-kilometer per auto (x_a), per bus (x_b) en per tram (x_t), en van de gepresteerde ton-km (G) in het goederenvervoer over de weg.

G is een exogene veranderlijke

V_b = snelheid van het busverkeer
 = $V_b(x_a, x_b, x_t, G)$
 = id.

V_t = snelheid van het tramverkeer
 = $V_t(x_a, x_b, x_t, G)$
 = id.

Wanneer een tramlijn is samengesteld uit verschillende baanvakken (met telkens een verschillende storingsfrequentie) moeten x_a , x_b en x_t anders geparаметreerd worden.

V_v = snelheid van het voetgangersverkeer
 = k
 = een constante.

Wanneer relaties voorstad-stad worden bestudeerd zal het aantal voetgangers verwaarloosbaar klein zijn. In binnenstadsrelaties daarentegen kunnen zeer hoge waarden worden gevonden.

Het is evident dat een invloed uitgaat van de hoeveelheid verkeer op de snelheid ervan, wegens de beperkte ruimte die ter beschikking staat.

Het optreden van x_a , x_b en G zal de snelheid V_a steil doel dalen, het optreden van x_t hangt af van de traminfrastructuur. Een tram op eigen bedding zal V_a nauwelijks beïnvloeden. Een tram op de straat daarentegen zeer sterk.

Bij het busverkeer zijn de verwachtingen analoog. Bij het tramverkeer op eigen bedding oefenen x_a , x_b en G weinig invloed uit. x_t wel, zij het dan slechts bij het bereiken van de capaciteitsgrens.

b) Milieukosten $C = C(x_a, x_b, x_t, x_v, G)$

De milieukosten zijn, grosso modo, functie van de hoeveelheden verkeer, x_a , x_b en x_t die milieuhinder veroorzaken en van de hoeveelheid voetgangers x_v die deze hinder ondergaan.

c) Geldelijke transportoffers K_a, K_b, K_t (autogebruikers, busmaatschappij en trammaatschappij)

$$K_a = K_a(x_a, x_b, x_t, G)$$

$$K_b = K_b(x_a, x_b, x_t, G)$$

$$K_t = K_t(x_a, x_b, x_t, G)$$

$$K_v = 0$$

Met deze kosten worden bedoeld alle geldoffers, andere dan fiscale, door diegenen die het vervoer produceren, niet meegerekend de tijdskosten van de reizigers, m.a.w. K_a = de exploitatiekosten van alle per auto gepresterde reiziger-km, de tijdskosten van de chauffeurs en de accijns op de benzine niet meegerekend. K_b en K_t zijn de volledige exploitatiekosten van tram en bus, hierin ook meegerekend de personeelskosten van de chauffeur, maar niet meegerekend het accijns op de dieselolie.

Ook deze geldelijke transportoffers zijn telkens functie van de trafiek van de 3 vervoersmodi in de zin zoals V_a , V_b en V_t , maar ditmaal omgekeerd. Eventueel zou kunnen gesteld worden

$$K_a = \alpha \frac{1}{V_a} x_a$$

$$K_b = \beta \frac{1}{V_b} x_b$$

$$K_t = \tau \frac{1}{V_t} x_t$$

- Bij een lagere snelheid V_a stelt men immers een hogere bedrijfskost van de auto vast.

- Bij bus- en tramverkeer heeft een lagere snelheid vooral gevolgen op de wageninzet en de personeelskosten per plaats-km. Het aantal aan te bieden plaats-km per tijdseenheid moet constant blijven bij een dalende snelheid. Dit brengt een grotere wageninzet en een hogere personeelskost mee. Hieruit resulteert een groter wagenpark en een ruimer personeelsbestand.

d) Sociale kosten (Milieukosten + geldelijke transportoffers + tijdskosten)

$$U = C + K_a + K_b + K_t + \left(\frac{x_a}{V_a} + \frac{x_b}{V_b} + \frac{x_t}{V_t} + \frac{x_v}{V_v} \right) w$$

waarin w de waarde is van een eenheid tijd.

De sociale kosten van een bepaalde verkeersstructuur is gelijk aan de milieukosten C plus :

$$\text{voor het autoverkeer: } K_a + \frac{x_a}{V_a} w$$

$$\text{voor het busverkeer: } K_b + \frac{x_b}{V_b} w$$

$$\text{voor het tramverkeer: } K_t + \frac{x_t}{V_t} w$$

$$\text{voor het voetgangersverkeer: } \frac{x_v}{V_v} w$$

e) Marginale sociale kosten

Door de sociale kosten, zoals bepaald onder d, af te leiden naar de hoeveelheid autoverkeer vindt men de sociale kosten die worden veroorzaakt door de toename met één eenheid van het autoverkeer (1 reiziger-km). Analoog is het mogelijk de marginale sociale kosten van één eenheid toename van het autobusverkeer en idem van het tramverkeer te berekenen.

1. Marginale sociale kosten van 1 bijkomende plaats-km per auto

$$\frac{\delta U}{\delta x_a} = \frac{\delta C}{\delta x_a} + \frac{\delta K_a}{\delta x_a} + \frac{\delta K_b}{\delta x_a} + \frac{\delta K_t}{\delta x_a} + w \left(\frac{1}{V_a} - \frac{x_a}{V_a^2} \frac{\delta V_a}{\delta x_a} - \frac{x_b}{V_b^2} \frac{\delta V_b}{\delta x_a} - \frac{x_t}{V_t^2} \frac{\delta V_t}{\delta x_a} \right)$$

2. Id. van 1 bijkomende plaats-km per autobus

$$\frac{\delta U}{\delta x_b} = \frac{\delta C}{\delta x_b} + \frac{\delta K_a}{\delta x_b} + \frac{\delta K_b}{\delta x_b} + \frac{\delta K_t}{\delta x_b} + w \left(\frac{1}{V_b} - \frac{x_a}{V_a^2} \frac{\delta V_a}{\delta x_b} - \frac{x_b}{V_b^2} \frac{\delta V_b}{\delta x_b} - \frac{x_t}{V_t^2} \frac{\delta V_t}{\delta x_b} \right)$$

3. Id. van 1 bijkomende plaats-km per tram

$$\frac{\delta U}{\delta x_t} = \frac{\delta C}{\delta x_t} + \frac{\delta K_a}{\delta x_t} + \frac{\delta K_b}{\delta x_t} + \frac{\delta K_t}{\delta x_t} + w \left(\frac{1}{V_t} - \frac{x_a}{V_a^2} \frac{\delta V_a}{\delta x_t} - \frac{x_b}{V_b^2} \frac{\delta V_b}{\delta x_t} - \frac{x_t}{V_t^2} \frac{\delta V_t}{\delta x_t} \right)$$

2. VRAAGFUNCTIE

Als hypothese wordt gesteld dat de verdeling van een gegeven hoeveelheid verkeersvraag tussen de verkeersdragers onderling slechts functie is van 2 veranderlijken: de prijs P en de snelheid V.

We krijgen dus:

$$x_a = x_a(V_a, V_b, V_t, P_a, P_b, P_t)$$

$$x_b = x_b(V_a, V_b, V_t, P_a, P_b, P_t)$$

$$x_t = x_t(V_a, V_b, V_t, P_a, P_b, P_t)$$

$$x_v = x_v(V_a, V_b, V_t, P_a, P_b, P_t)$$

De calibrering van deze vraagfuncties gebeurt aan de hand van gegevens van de huidige verkeersstructuur.

3. VASTSTELLEN VAN DE VRAAG, GEPRIJSD TEGEN MARGINALE SOCIALE KOSTEN

In de gegeven vraagvergelijkingen vervangen we

P_a door $\frac{\delta U}{\delta x_a}$; P_b door $\frac{\delta U}{\delta x_b}$; P_t door $\frac{\delta U}{\delta x_t}$; die we kennen uit punt 1.e)

$$x_a = x_a(V_a, V_b, V_t, \frac{\delta U}{\delta x_a}, \frac{\delta U}{\delta x_b}, \frac{\delta U}{\delta x_t})$$

$$x_b = x_b(V_a, V_b, V_t, \frac{\delta U}{\delta x_a}, \frac{\delta U}{\delta x_b}, \frac{\delta U}{\delta x_t})$$

$$x_t = x_t(V_a, V_b, V_t, \frac{\delta U}{\delta x_a}, \frac{\delta U}{\delta x_b}, \frac{\delta U}{\delta x_t})$$

$$x_v = x_v(V_a, V_b, V_t, \frac{\delta U}{\delta x_a}, \frac{\delta U}{\delta x_b}, \frac{\delta U}{\delta x_t})$$

4. EVENWICHT

Het evenwicht wordt bepaald door een stelsel van 10 vergelijkingen in 10 onbekenden: 3 marginale sociale kosten (=prijzen), 3 snelheden en 4 verkeersstromen.

$$\left. \begin{aligned} V_a &= V_a(x_a, x_b, x_t, G) \\ V_b &= V_b(x_a, x_b, x_t, G) \\ V_t &= V_t(x_a, x_b, x_t, G) \end{aligned} \right\} \text{3 snelheden}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta U}{\delta x_a} &= f_a(x_a, x_b, x_t, x_v) \\ \frac{\delta U}{\delta x_b} &= f_b(x_a, x_b, x_t, x_v) \\ \frac{\delta U}{\delta x_t} &= f_t(x_a, x_b, x_t, x_v) \end{aligned} \right\} \text{3 marginale sociale kostenfuncties} \\ \text{(cfr. verdere specificatie op p. 4)}$$

$$\left. \begin{aligned} x_a &= x_a(V_a, V_b, V_t, \frac{\delta U}{\delta x_a}, \frac{\delta U}{\delta x_b}, \frac{\delta U}{\delta x_t}) \\ x_b &= x_b(V_a, V_b, V_t, \frac{\delta U}{\delta x_a}, \frac{\delta U}{\delta x_b}, \frac{\delta U}{\delta x_t}) \\ x_t &= x_t(V_a, V_b, V_t, \frac{\delta U}{\delta x_a}, \frac{\delta U}{\delta x_b}, \frac{\delta U}{\delta x_t}) \\ x_v &= x_v(V_a, V_b, V_t, \frac{\delta U}{\delta x_a}, \frac{\delta U}{\delta x_b}, \frac{\delta U}{\delta x_t}) \end{aligned} \right\} \text{4 vraagvergelijkingen}$$

Wanneer vertrokken wordt van de hypothese dat de globale hoeveelheid vervoer $x_a + x_b + x_t + x_v$ gelijk blijft en dus gegeven is, geeft dit stelsel de nieuwe verkeersstructuur aan: de snelheden voor de 3 vervoersmodi, de 3 marginale sociale kosten en de verdeling van het globale verkeer over de 4 modi.

Men vergelijkt dit evenwicht met het bestaande evenwicht waarin

$$P_a = \frac{K_a}{x_a} + \text{accijns per reiziger-km};$$

$$P_b = \text{prijs van het busticket nu};$$

$$P_t = \text{prijs van het tramticket nu}.$$

Deze vergelijking moet vooral betrekking hebben op
1° de wijziging der vervoerstromen x_a , x_b , x_t en x_v ;
2° de vermindering van sociale kosten U .

5. KOSTEN-BATENSTUDIES I.V.M. INVESTERINGEN IN DE VERKEERSINFRA- STRUCTUUR

Het stelsel geeft een nieuw evenwicht tussen de verschillende vraagfuncties der verkeersmodi. Wanneer aanvaard wordt dat dit soort prijszetting, leidend tot een sociaal optimum, ook feitelijk toegepast wordt, dan kan het bekomen evenwicht gelden als een uitgangspunt voor kosten-batenstudies die betrekking hebben op investeringen i.v.m. weg-, tram-, of busverkeer. Investerings waarvan de baten zuiver uit de betalingsbereidheid van de reiziger kunnen berekend worden. Immers de reizigers zullen dan in alle transportmiddelen met hun echte sociale kosten geconfronteerd worden. Dit maakt de betalingsbereidheid van de reiziger voor een bepaald vervoermiddel tot een zuiver criterium van het sociaal nut van dat vervoermiddel.

Via het stelsel kan ook, door verschillende prijzen te imputeren voor de vervoersmedia de vraagfunctie voor elk medium bepaald worden. Meteen ook is de concurrentiële prijselasticiteit bekend. (De sectoriële prijselasticiteit is tot nog toe niet in de studie opgenomen: er werd immers vertrokken van de hypothese dat $x_a + x_b + x_t + x_v$ een constant gegeven is). Zo is het o.a. mogelijk de betalingsbereidheid te meten voor metrovervoer bij middel van integratie. Wanneer de metro wordt ingevoerd in het stelsel ontstaat een nieuw evenwicht dat kan vergeleken worden met het vorige.

BIJLAGE II. BESCHRIJVING DER MEETPLAATSEN

N.B.: De nummers bij de figuren verwijzen naar een aparte reeks afbeeldingen die ter inzage is op het Studiecentrum voor Economisch en Sociaal Onderzoek.

1. Leopold de Waelstraat Antwerpen (zuid), lijn 3 pendeldienst. Meting nr. 02, 30 september '74, 13 geldige waarnemingen. Breedte straat: ong. 25 m, tussen 2 gesloten gevelrijen, bomen op de stoep. De tramsporen liggen in een kasseibe-strating op houten dwarsliggers. Zie hieromtrent de figuren 1 en 4. De geluidsopname werd uitgevoerd op 7 1/2 m afstand en op 1,2 m hoogte (zie fig. 6).
2. Antwerpsesteenweg Hoboken, lijnen 2 en 4. Meting nr. 12 op 30 september '74, 24 geldige waarnemingen. Breedte straat: 24 m tussen 2 gesloten gevelrijen. De tramsporen liggen er op een eigen bedding afgedekt met zand, zonder enige beplanting, op houten dwarsliggers, cfr. figuur 2 en 7. Het bovenaanzicht is als in de Leopold de Waelstraat, cfr. fig. 4.
3. Lange Nieuwstraat Antwerpen (t.o.v. nr. 45), lijnen 2, 3, 10, 11. Meting nr. 15, op 3 oktober '74, 25 geldige waarnemingen. Breedte: ong. 13,5 m tussen 2 gesloten gevelrijen. De tramsporen liggen in een aparte afgebakende rijstrook in kasseien, zonder bijkomende afschermingen, op houten dwarsliggers, cfr. fig. 2 voor de dwarsdoorsnede, fig. 5 voor het bovenaanzicht en fig. 8 voor de topografie.
4. Belgiëlei Antwerpen, lijnen 2 en 15. Meting nr. 23 op 22 oktober '74, 10 geldige waarnemingen op 15 m afstand van het spoor; meting nr. 24 op 22 oktober '74, 22 geldige waarnemingen op 7,5 m afstand van het spoor. Het opnametoestel werd

parallel met de sporen geplaatst. Bij alle andere metingen werd het toestel haaks op de sporen gericht; meting nr. 25 op 3 oktober '74, 44 geldige waarnemingen op 7,5 m van het spoor. De metingen gebeurden op een ovaal plein met hagen, bloemenperken en bomen. De tramsporen liggen er op een eigen kiezelbedding, afgeschermd door een ligusterhaag van ong. 80 cm hoogte en 50 cm dikte, op houten dwarsliggers. Cfr. de dwarsdoorsnede op fig. 1, bovenaanzicht op fig. 4, de topografie op fig. 12.

Tussen de resultaten van metingen 24 en 25 werden geen grote verschillen waargenomen, zodat men kan aannemen dat de oriëntatie van de micro (haaks of parallel t.o.v. de geluidsbron) weinig invloed heeft gehad in dit geval nl. bij afwezigheid van terugkaatsende wanden.

5. Cogels-Osylei Berchem, lijn 11.

Meting nr. 06, op 14 oktober '74, 26 geldige waarnemingen, de opnameplaats ligt tussen 2 niet gesloten en niet vlakke gevelrijen. Zie fig. 13.

De tramsporen liggen in een kasseibestrating en zijn aangelegd volgens hetzelfde type als de Leopold de Waelstraat (cfr. fig. 1 en 4).

6. Mechelsesteenweg (t.o.v. EBES), Antwerpen, lijnen 7 en 15.

Meting nr. 26 op 14 oktober '74, 31 geldige waarnemingen op 7,5 m afstand;

meting nr. 36 op 15 oktober '74, 30 geldige waarnemingen op 15 m afstand.

De sporen liggen op een aparte kiezelbedding, van de kant van het Albertpark uit gezien achter een rij struiken (Rododendron) met een hoogte van 1,5 tot 2 m. Deze struiken zijn niet erg compact; zie fig. 9. De spooraanleg is van het type "Antwerpsesteenweg Hoboken" (zie fig. 4 voor het bovenaanzicht en fig. 2 voor de dwarsdoorsneden.

7. Grote Steenweg Berchem (tussen Jan Moorkensstraat en Koninklijkelaan), lijnen 7 en 15.

Meting nr. 27 op 23 oktober '74, 50 geldige waarnemingen.

De sporen liggen op een brede aparte kiezelbedding, omgeven door grasveldjes zonder verdere afscherming. De spooraanleg is van het type "Antwerpsesteenweg Hoboken" (zie fig. 4 voor het bovenaanzicht en fig. 2 voor de dwarsdoorsnede).

Fig. 10 geeft de topografie weer op de meetplaats.

8. Ter Heydelaan Deurne (tussen Blivenstraat en Van Waelwijkstraat), lijn 12.

Meting nr. 09 op 14 januari '75, 35 geldige waarnemingen.

De sporen liggen op een aparte kiezelbedding, zonder afscherming, aangelegd zoals weergegeven op fig. 3 voor wat betreft de dwarsdoorsnede en fig. 5 voor het bovenaanzicht.

Fig. 11 geeft de topografie weer.

BIJLAGE III. GRAFISCHE VOORSTELLING VAN DE CORRELATIES TUSSEN
GELUID EN SNELHEID BIJ HET TRAMVERKEER

Ter inzage op het Studiecentrum voor Economisch en Sociaal
Onderzoek.

BIJLAGE IV. KOSTPRIJSBEREKENING VAN ISOLATIEMUREN

1. Kostprijs van een bakstenen muur per lopende meter (1)

- een betonnen sokkel als fundering: $0,075 \text{ m}^3 \text{ à } 8000 \text{ F/m}^3 =$	600,-F
- metselwerk ondergronds als fundering:	
$1 \text{ m} \times 0,65 \text{ m} \times 0,28 \text{ m} = 0,13 \text{ m}^3 \text{ à } 6500 \text{ F/m}^3 =$	1183,-F
- isoleerlaag tegen vocht: $1,30 \text{ m}^2 \text{ à } 80 \text{ F/m}^2 =$	104,-F
- graafwerk: $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0,80 \text{ m} = 0,8 \text{ m}^3 \text{ à } 300 \text{ F/m}^3 =$	240,-F
- aanvulling na werk: $0,575 \text{ m}^3 \text{ à } 200 \text{ F/m}^3 =$	115,-F
- vervoer: $0,225 \text{ m}^3 \text{ à } 150 \text{ F/m}^3 =$	31,-F
	<hr/>
Kostprijs fundering:	2273,-F
- metselwerk muur met 0,65 m hoogte:	
metselwerk: $0,28 \times 0,65 \times 1 \text{ m} = 0,182 \text{ m}^3 \text{ à } 6500 \text{ F/m}^3 =$	1183,-F
opleg gevelsteen: $0,65 \text{ m}^2 \times 2 = 1,3 \text{ m}^2 \text{ à } 800 \text{ F/m}^2 =$	1040,-
voegwerk: $1,3 \text{ m}^2 \text{ à } 150 \text{ F/m}^2 =$	195,-F
	<hr/>
Kostprijs muur :	2418,-F
- id. muur met 1 m hoogte:	
metselwerk: $0,28 \times 1 \times 1 = 0,28 \text{ m}^3 \text{ à } 6500 \text{ F/m}^3 =$	1820,-F
opleg gevelsteen: $1 \text{ m}^2 \times 2 = 2 \text{ m}^2 \text{ à } 800 \text{ F/m}^2 =$	1600,-F
voegwerk: $1 \text{ m}^2 \times 2 = 2 \text{ m}^2 \text{ à } 150 \text{ F/m}^2 =$	300,-F
	<hr/>
Kostprijs muur :	3720,-F
- id. muur met 1,15 m hoogte:	
metselwerk: $0,28 \times 1,15 \times 1 = 0,322 \text{ m}^3 \text{ à } 6500 \text{ F/m}^3 =$	2093,-F
opleg gevelsteen: $1,15 \text{ m}^2 \times 2 = 2,3 \text{ m}^2 \text{ à } 800 \text{ F/m}^2 =$	1840,-F
voegwerk: $1,15 \text{ m}^2 \times 2 = 2,3 \text{ m}^2 \text{ à } 150 \text{ F/m}^2 =$	345,-F
	<hr/>
Kostprijs muur :	4278,-F

(1) Prijzen per 1.9.1975, exclusief werfinrichtingskosten en signalisatie.

- Wanneer het muurtje wordt afgedekt met een Eternit-profiel moet een toeslag van 900 F/m gerekend worden. Hiertegenover staat een **beduidend** langere levensduur van het bouwsel.

- De uiteindelijke prijs voor de muurtjes bedraagt per meter:

A ₁ bij 0,65 m hoogte:	fundering	2273,-
	bovengrondse muur	2418,-
	afdekprofiel	900,-
		<hr/>
		5591,-

B ₁ bij 1,00 m hoogte:	fundering	2273,-
	bovengrondse muur	3720,-
	afdekprofiel	900,-
		<hr/>
		6893,-

C ₁ bij 1,15 m hoogte:	fundering	2273,-
	bovengrondse muur	4278,-
	afdekprofiel	900,-
		<hr/>
		7451,-

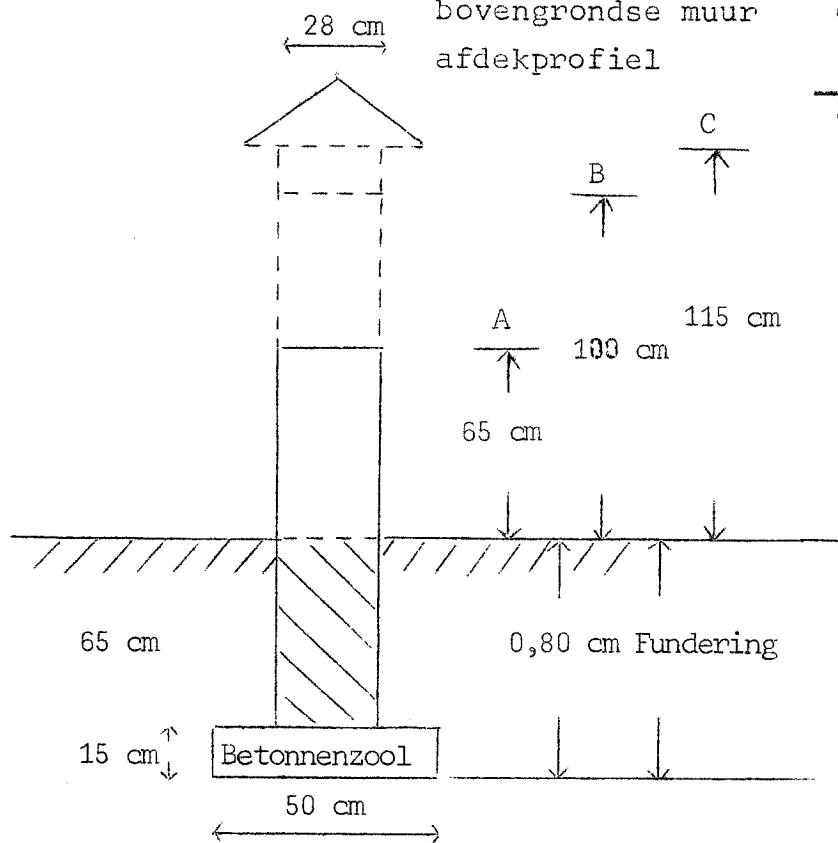


Fig. 1. Schema van de te bouwen muur in baksteen

2. Kostprijs van prefab-elementen in gewapend beton

Katalogoprijzen aan aannemers voor werken bij particulieren (kleine hoeveelheden) geven (1):

voor een muur van 105 cm hoogte: + 860 F per 1/2 m,
 voor " 80 cm hoogte: + 655 F per 1/2 m,
 voor " 55 cm hoogte: + 450 F per 1/2 m.

Voor de tot nu toe in deze studie gebruikte maten betekent dit:

voor 115 cm : + 1890 F per m
 voor 100 cm : + 1640 F per m
 voor 65 cm : + 1070 F per m.

Wanneer deze elementen in grote hoeveelheden (vanaf b.v. 5000 stuks) worden afgenomen door de overheid betekent dit een prijsvermindering met ca. 20 %.

Dit betekent dus:

voor 115 cm: + 755 F per 1/2 m of 1510 F per m
 voor 100 cm: + 660 F per 1/2 m of 1320 F per m
 voor 65 cm: + 430 F per 1/2 m of 860 F per m.

De funderingskosten bedragen per lopende meter:

$$0,10 \times 0,50 \times 1 = 0,05 \text{ m}^3 \text{ beton } \grave{\text{a}} 8000,-\text{F/m}^3 = 400,-\text{F/m}^3$$

De plaatsingskosten kunnen per element berekend worden als volgt: 2 arbeiders à 10 minuten = 20 min. à 120 F brutourverdiensite = 40 F per element of 80 F/m.

De uiteindelijke prijs voor deze prefab-gewapend beton-elementen bedraagt dus per meter:

A ₁ bij 0,65 m hoogte: fundering	400,-F
plaatsing	80,-F
elementen	<u>860,-F</u>
	1340,-F

(1) Katalogoprijzen op 15.9.1975, exclusief vervoer en exploitatie van een kraanwagen.

B	bij 1 m hoogte:	fundering	400,-F
		plaatsing	80,-F
		elementen	<u>1320,-F</u>
			1800,-F

C	bij 1,15 m hoogte:	fundering	400,-F
		plaatsing	80,-F
		elementen	<u>1510,-F</u>
			1990,-F

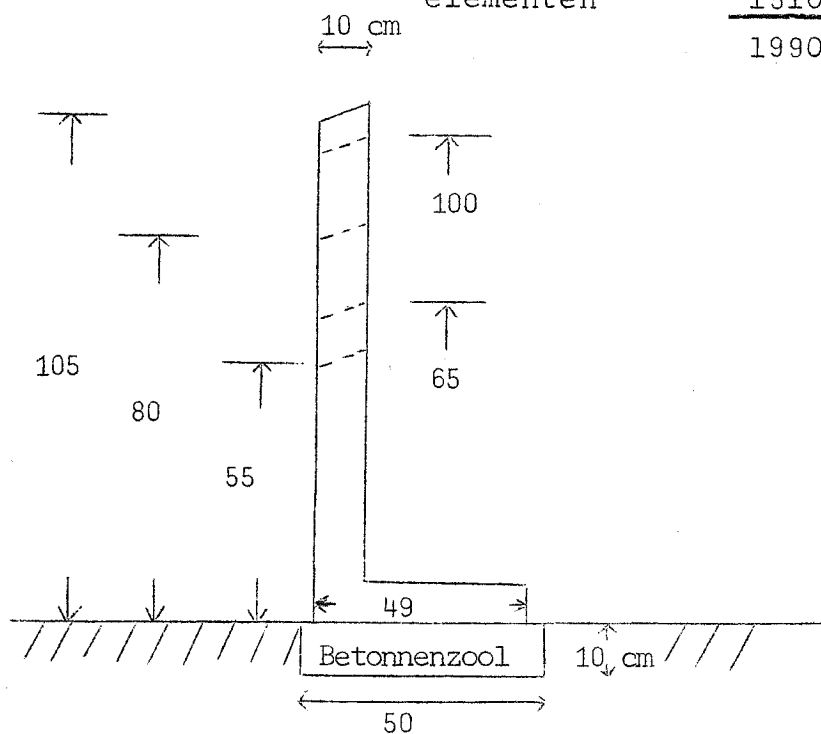


Fig. 2. Schema van de te bouwen muur in prefab-elementen.