

Я. Л А Н И :

ОБУСЛОВЛЕННЫЕ АВТОМАШИНАМИ КОЛЕБАНИЯ ДОРОГ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ
СЕЙСМИЧЕСКИМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

Takie mérések a legelőször voltak elvégezve Magyarországon. A cikkben leírják a mérőeszközöket, a mérési módszert és az eredmények értelmezését. Megadják az energiák, amplitúdók, frekvenciák, a közlekedés útjának és a föld felületének tömegének mérési eredményeit.

J. L Á N Y I :

MEASUREMENTS OF ROAD VIBRATIONS DUE TO MOTOR VEHICLES
BY MEANS OF SEISMIC INSTRUMENTS

It is the first time that this kind of measurements has been carried out in Hungary. Author is discussing the measuring instruments, the measuring method and the interpretation of the oscillograms obtained. He presents the results concerning frequency, amplitude and energy of road vibrations as well as the results obtained for the mass of the vibrating road and the ground.

**GÉPJÁRMŰVEK ÁLTAL OKOZOTT ÚTREZGÉSEK MÉRÉSE
SZEIZMIKUS MÉRŐESZKÖZÖKKEL**

LÁNYI JÁNOS

Az Autóközlekedési Tudományos Kutató Intézet felkérésére a Geofizikai Intézet Szeizmikus Osztálya Magyarországon először végzett az útrezgésekre vonatkozó méréseket.

Ezekről a mérésekről és vizsgálatokról számol be ez a cikkem.

Közlekedés okozta rázkódásokat eddig is mértek különböző szeizmikus eszközökkel, mint pl. a dr. Geiger-féle vibrográffal, Spindler és Hoyer-féle szeizmograffal, vagy Schneck-Dankstatt-féle amplitudómérővel, valamint dr. Ambron-féle piezokvarc gyorsulásmérővel.* Ezek a készülékek, a piezokvarc gyorsulásmérő kivételével, egy rezgő, nehéz tömeg tehetetlenségi hatásán alapulnak. A céljuk azonban nem felelt meg teljesen, mert saját rezgéseiket nem sikerült kiküszöbölni, azonkívül a feljegyzett amplitúdók a készülékek aránylag kis nagyítása miatt nehezen voltak kiértékelhetők és ezért a kapott eredmények — 90 + 250 százalékos eltérést mutattak a más mérőeszközök (mint pl. a kvarc gyorsulásmérő) adataival szemben.

A piezokvarc gyorsulásmérőnél egy kb. 500 grammos acéltömeg nyomást fejt ki egy sor párhuzamosan kapcsolt és arannyal bevont piezoelektromos kvarclapra, melyekről a nyomásváltozások következtében keletkezett elektro-

* Risch: Messungen von Verkehrserschütterungen.
A kézirat 1954 április 7-én érkezett be.

mos töltések kivezethetők. Mivel ezek a kapott feszültségek igen kicsinyek, ezért azokat egy alacsony frekvenciás, elektroncsöves erősítővel fel kell erősíteni. A felerősített rezgések ezután regisztrálhatók. A regisztrálás többnyire fényérzékeny papíron történik az időjelzéssel együtt. Ennél az eljárásnál az erősítőt a gyorsulásmérővel összekötő vezetőket a káros kapacitív veszteségek csökkentése céljából rövidre kell venni és így a gyorsulásmérőt és az erősítőt egymáshoz közel kell elhelyezni. Ennek következtében az erősítő egyes alkotórészeinek rezgései az eredményt meghamisíthatják.

A mai fejlett szeizmikus mérőeszközök használata az említett mérőeszközökkel szemben számos előnyt ígér. Önrezgések csak a szeizmométernél és a galvanométer szalon léphetnek fel. Elektrodinamikus rendszerű, modern geofon önrezgésszáma 5—6 Hz között mozog, tehát a mérendő rezgésszámok alatt van, a hűros galvanométeré pedig 150—250 Hz között, ami viszont — a mérések eredménye szerint — a mérendő frekvenciáknál nagyobb. Ezenkívül a szeizmométernek és a galvanométernek önrezgése párhuzamosan kapcsolt, megfelelő nagyságú ellenállásokkal aperiodikusra csillapítható és így azok gyakorlatilag híven regisztrálják a talajmozgást. Az elektrodinamikus szeizmométer érzékenysége ezenkívül messze felülmúlja a piezokvarc gyorsulásmérő érzékenységét, úgyhogy jóval kisebb erősítést használhatunk, ami abból a szempontból előnyös, hogy a nagyobb erősítésnél jelentkező csőzörejek és az elektroncsövek és egyéb alkatrészek mikrofonikus torzításai nem jelentkezők. Végül nem megvetendő előnye ennek a mérőeszköznek, hogy jóval olcsóbb, mint a piezokvarc gyorsulásmérő készülék.

A mérőeszköz, amellyel a méréseket végeztük, ilyen elektrodinamikus rendszerű torziószálas, vertikális szeizmométerből, egy ehhez tervezett négy fokozatú erősítőből és egy — hat galvanométert tartalmazó — regisztráló berendezésből állott, amelyhez még egy időjeleket szolgáltatató négyszög oszcillátort építettünk. A berendezés egyes részei szeizmikus mérésekhez készültek, azonban ezeket a célnak megfelelően ideiglenesen átalakítottuk. Így pl. a regisztráló berendezésben három galvanométer elé feszültségosztót építettünk be olyképen, hogy az egyik (szélső) galvanométer az erősítőből kijövő teljes feszültséget kapta, a második ennek kb. kétharmad részét, a harmadik pedig egyharmad részét. Ennek a célja az volt, hogy a legérzékenyebb galvanométer már aránylag nagy távolságról jelezze a gépkocsik által keltett útmozgásokat, viszont a kevésbé érzékenyek a szeizmométer közelében elhaladó autók által keltett nagy amplitudójú rezgéseket regisztrálják, amelyeknél az első galvanométer már a fényérzékeny papírról lefutó kilengéseket ad. Ez az eljárás igen jól bevált, mert — mint a mérések mutatták — a közeli és távoli gépkocsik által okozott útregések között olyan nagy amplitudó különbségek voltak, amelyek egyforma érzékenyséű galvanométerekkel nem foghatók át. A negyedik galvanométerbe vezettük a négyszög generátor jeleit, míg a másik két csatorna használaton kívül maradt. Az 1. ábrán látható a berendezés összeállítási rajza. Ezzel a berendezéssel mérték meg az útregések vertikális összetevőit a múlt év október hó 22-én Répáshután és Jávorkúton, 23-án Miskolc közelében a 3. számú műuton a 172—173 kilométerközött és 24-én a mátrafüredi műuton a 3. számú kilométerkönnél. A répáshutai és jávorkúti út hegyi terepen húzódó makadám út volt, amely triászkori kemény agyaggalából, homokkőből és mészkőből álló hegyek oldalában épült. A 3. számú műút riolit altalajon épült több rétegből álló műút, melynek rétegei alulról felfelé: 15 cm laza útalap, 10 cm kavicsos andezit, 60—70 cm lehengerelt andezit töltés és 4 cm topeka

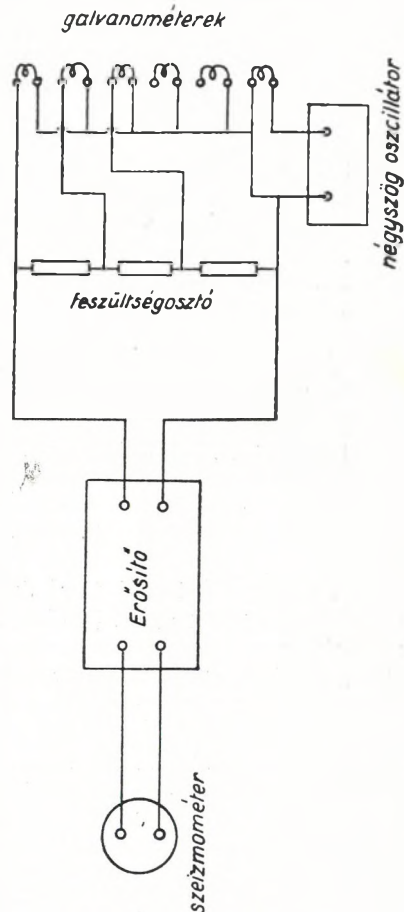
(aszfalt). A mátrafüredi műút szintén topeka út, melynek alapozása ismeretlen, altalaja pedig andezit kőzet.

A mérések oly módon folytak le, hogy a szeizmométert az út szélén helyeztük el, a kísérleti autók pedig az út közepén, a geofontól kb. 4 m távolságban elrohogtak. A felvételeket úgy vettük fel, hogy a gépkocsik által keltett rezgések a közlekedéstől a távolságig az észlelhető legkisebb amplitudóig rajta legyenek. Ez kb. 8—200 m úttávolságnak felelt meg, az autók sebességétől függően. A gépkocsik nagyrésze jókarban lévő, 3 tonnás Csepel teherautó volt, melyek megterhelés nélkül, működő motorral haladtak át a mért útszakaszon. Felvételeket készítettünk ezenkívül Skoda személyautóról és 5 tonnás, teljes terheléssel futó Csepel teherautóról is, valamint egy pótkocsival ellátott 3 tonnás Csepel teherautóról.

A felvételek kiértékelése során először is megállapítást nyert, hogy a kapott rezgések nem periódusosak. Ez várható volt, mert a többi összetevő mellett, amelyek periódusosak, mint pl. a kerékfordulatok, a motor által okozott rezgések stb. feltétlenül jelentkezni kellett az út egyenletlensége által okozott lökéseknek, amelyek nem periódusosak. Ez a körülmény igen megnehezíti a kapott rezgésgörbék matematikai analizisét. Ha egy szeizmogrammon levő görbét teljes egészében akarunk függvény formájában előállítani, akkor igen sok adathból kellene az analizist végrehajtani valamilyen közelítő módszerrel, mint pl. a Jordán-féle, vagy Fourier-féle sorbafejtéssel. Ez az eljárás nem egyszerű és a gyakorlatban nem használható.

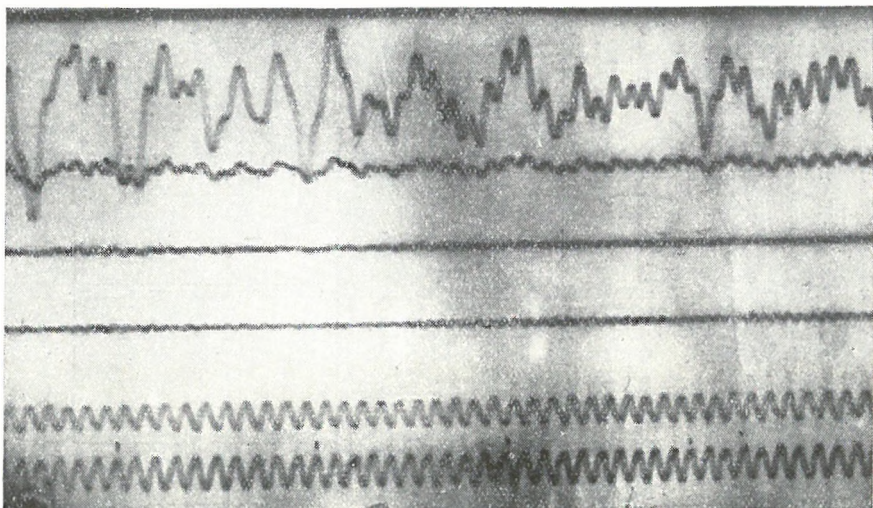
Szerencsére vannak olyan részek a szeizmogramokban, ahol bizonyos szakaszon útegyenletlenségek nem jelentkeznek és így itt a rezgések periódusosnak tekinthetők. Az így periódikusnak feltételezett függvény Fourier sorral előállítható, a számítási munka egyszerűbb, és képet nyújt a felvett rezgések harmonikus összetevőiről.

A gyakorlatban először statisztikusan értékeltük ki a felvételeket. Utak szerint csoportosítva megállapítottuk a szemmel széjjelválasztható rezgések frekvenciáit és maximális amplitudóit. Ennek során megállapítható volt, hogy van egy alacsonyabb rezgésszámú hullám, melynek frekvenciája 10 és 20 Hz között változik, a gépkocsik sebessége, típusa és utak szerint (legtöbbször 12—16), és egy magasabb rezgésszámú, melynek frekvenciája ugyaannál az útnál állandó és kizárólag az úttól függ. Ez utóbbi az út (és a vele kapcsolatos altalaj) önrezgésszáma, melyről dobbantások felvételével meggyőződünk.



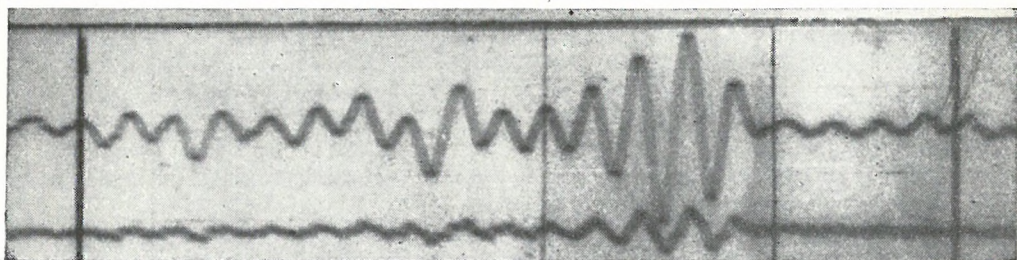
1. ábra. Összeállítási vázlat a mérőeszközről

Az alacsonyabb rezgésszámú impulzusok — Az Autóközlekedési Intézet vezetőjének és mérnökeinek véleménye és az általuk végzett mérések eredményeinek alapján — minden valószínűség szerint az alvázat tartó rúgók rezgéseitől erednek.



2. ábra. Útregzési szeizmogramm

Világosan látható továbbá a felvételeken, hogy az út önrezgésének és az alvázlengések amplitúdójának egymáshoz való aránya nem állandó végig az egész szeizmogrammon. Azon a részen, amikor az autó a geofontól távol volt, az útregzések az alváz lengései mellett alig láthatók, míg azokon a részeken, amikor a gépkocsi a szeizmométer közelében haladt el, az útregzések igen nagy amplitúdóval jelentkeznek. Ez arra enged következtetni, hogy a talaj a magasabb frekvenciájú útregzéseket nagyobb mértékben nyeli el, mint az alacsonyabb frekvenciájú alvázlengéseket.



3. ábra. A kiértékelt szeizmogrammban lévő dobbantásos részlet

Jól meg lehetett még figyelni a Doppler-effektust is.

Az alábbiakban feltüntettem a szeizmogrammból összeállított rezgésszám és maximális amplitúdó adatokat, melyekből kitűnik, hogy a 3. számú

műút rezgésszáma a 172—173 kilométerkőnél 44 Hz, a mátrafüredi műút a 3. számú kilométerkőnél 72 Hz, a jávorkuti és répáshutai makadám-úté pedig 44 és 63 Hz között változik, továbbá, hogy az amplitudók a gépjármű sebességével növekednek, amint az várható is volt.

1. táblázat

Az autókísérleti szeizmogramokon észlelt rezgések fekvenciájának összefoglaló táblázata

Sorszám	A szeizmogram helye és kette	A felvétel helye	Az út minősége	Az autó típusa	Az autó sebessége	A kiértékelhető impulzusok rezgésszáma	
1.	8/X. 23	3. sz. műút 172. km-kő	Betonút (aszfalt)	3 tonnás Csepel SD 391	53 km/ó	14	44
2.	19/X. 23	*	*	SA 680	63 km/ó	17—11	44
3.	7/X. 23	*	*	SD 463	53 km/ó	14—16	41
4.	28/X. 23	*	*	SH 764	72 km/ó	14—16	44—77
5.	17/X. 23	*	*	SD 463	63 km/ó	17	45
6.	24/X. 23.	*	*	SD 463	72 km/ó	17	44
7.	16/X. 23	*	*	SD 391 + vontatás 3 t	58 km/ó	17	44
8.	12/X. 23.	*	*	SD 463	58 km/ó	11—18	41—43
9.	1/X. 21.	mátrafüredi műút 3 km. kő	aszfalt	3 tonnás Csepel SD 391	34 km/ó	16	71
10.	4/X. 24.	*	*	SH 764	39,3 km/ó	16	71
11.	6/X. 24.	*	*	SD 463	—	17	71
12.	3/X. 24.	*	*	YO 368	28 km/ó	—	—
13.	5/X. 21.	*	*	SA 680	33,8 km/ó	19	74
14.	3/X. 22a	Jávorkút	makadám	—	—	17	44
15.	3/X. 22b	*	*	—	—	17	74
16.	4/X. 22.	*	*	—	—	—	57—58
17.	5/X. 22.	*	*	—	—	—	63

2. táblázat

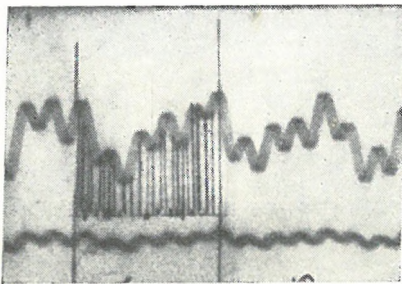
Kimutatás az útregzések szeizmogramokon lemért maximális amplitudójáról

A felvétel helye	Az út önrezgésszáma	Az autó típusa	Az autó sebessége	Max kirezgés nagysága a felvételekben	Jegyzet
3. sz. műút 173—172 km-kő	44 Hz	3 tonnás Csepel	53 km/ó	19,5 mm	} átlag 20,7 mm
„	44 „	„	„	20,5 mm	
„	44 „	„	„	22,0 mm	
„	44 „	„	55 km/ó	22,0 mm	} átlag 22,25 mm
„	44 „	„	„	22,5 mm	
„	44 „	„	72 km/ó	28,0 mm	} átlag 27,2 mm
„	44 „	„	„	26,5 mm	
„	44 „	„	„	27,0 mm	
Mátrafüredi műút 3. km-kő	72 „	Skoda szem. 3 tonnás Csepel	39 km/ó	13,0 mm	32,0 mm

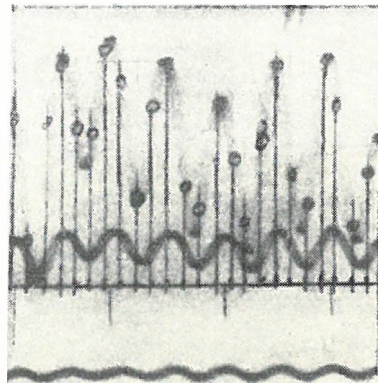
Ezután következett a szeizmogramok egyes részeinek Fourier analízise. A 3. számú műúton felvett 22/X. 23. számú szeizmogram bevonalkázott részének (4. ábra) analízise hét harmónikus összetevőt eredményezett, melyeknek amplitudóit az 6. ábrán látható vonalas spektrumból olvashatjuk ki.

Maga a függvény: $F(x) \approx 97 + (16,7 \cos x - 28 \sin x) + (21 \cos 2x + 2,6 \sin 2x) + (0,25 \cos 3x - 5,4 \sin 3x) + (2,8 \cos 4x - 1,9 \sin 4x) + (7,9 \cos 5x + 13,2 \sin 5x) - (2,5 \cos 6x + 5,5 \sin 6x) - (7,8 \cos 7x + 0,75 \sin 7x) + (0,6 \cos 8x - 0,58 \sin 8x) + (0,75 \cos 9x - 1,25 \sin 9x) - (0,75 \cos 10x + 0,58 \sin 10x)$.

A 8, 9, 10 stb. periódusos összetevők amplitudói gyakorlatilag zérusok. Az ábrából, mindjárt kitűnik, hogy csak három nagyobb amplitudójú rezgés van, amelyeknek frekvenciái 9,5, 19 és 47,5 Hz. Ez a legutóbbi az út önrezgése és ez elég jól egyezik a szeizmogrammból közvetlenül leolvasott 46 Hz-cel. Az első jól egyezik a gépkocsi hátsó rúgójának 10,35 Hz-nek mért rezgésszámával, melyet az Autóközlekedési Kutató Intézet mérnökei a mérések



4. ábra. A szeizmogram Fourier sorbafejtett része



5. ábra. A szeizmogram Fourier-analízis alá vetett része

alkalmával külön mérték. A 19 Hz-es és a további kisebb amplitudójú rezgések okozói pontosan kiderítve még nincsenek, de itt valószínűleg az első rúgó, a motor fordulatszám, esetleg a kipuffogó hangja stb. játszhatnak szerepet. Ezeknek kiderítése a további mérések egyik feladata.

Ugyancsak a 3. számú műuton felvett 10/X. 23. számú szeizmogram egyik szakaszát vetettük további Fourier-analízis alá. (5. ábra)

Ez a szakasz abban különbözik az elsőtől, hogy egy nagyobb részt analizáltunk és hogy itt az autó már közelebb volt a szeizmométerhez, mint az előbbinél. Az eredmény az alábbi függvény volt:

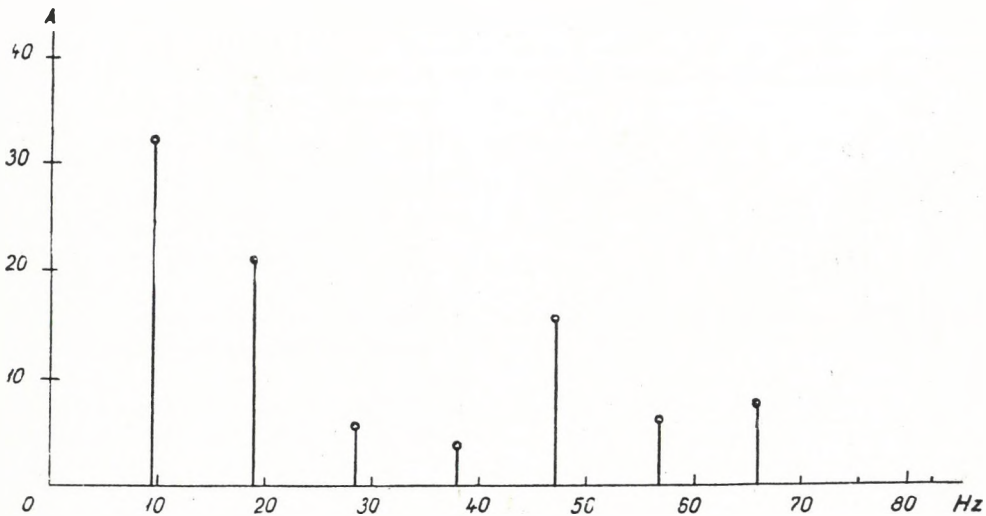
$$F(x) \approx 195 - (2,6 \cos x - 25,1 \sin x) - (31 \cos 2x + 1,25 \sin 2x) - (14,2 \cos 3x - 6,15 \sin 3x) - 11,9 \cos 4x + 8,45 \sin 4x - (3,2 \cos 5x - 12,7 \sin 5x) - (5 \cos 6x - 19 \sin 6x) + (63,6 \cos 7x - 48,8 \sin 7x) + (17 \cos 8x - 11,8 \sin 8x) + (4,25 \cos 9x - 8,9 \sin 9x) + (4,8 \cos 10x - 3,58 \sin 10x)$$

A különbség főleg az, hogy itt egy 6 Hz körüli rezgés is jelentkezik, ami a szélesebb szakasz következménye továbbá, hogy az analizált függvényszakasz ritkább felosztása következtében a felosztásoknak megfelelő magasabb frekvenciák is jelentkeznek. Itt is megjelenik azonban a két nagyobb amplitudójú alacsony frekvencia, ezúttal 12,4 és 18,6 Hz-s rezgésszámmal és az út önrezgése 43,4 Hz rezgésszámmal, de most már jóval nagyobb amplitudóval,

mint előbb. Ez alátámasztja azt a körülményt, amit a statisztikus kiértékelésnél már említettem, hogy az út önrezgésszámának amplitúdói az autó közeledtével sokkal rohamosabban nőnek, mint az alváz rúgójának rezgései, és akkor amikor a gépkocsi a szeizmométer mellett elhalad, a többi rezgés amplitúdójának sokszorosát is eléri. Összehasonlításképpen megadjuk a 6. ábrán látható szakasz spektrumát is.

Mint ebből látható, a jellegzetes két alacsony rezgésszámú alvásrúgó lengés és az útnak az önrezgése mindkét sorbafejtésben mint domináló frekvencia megtalálható.

A kiértékelési adatokból mindenesetre azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a gépkocsik többletfogyasztására és az út mentén fekvő épületek rázkódásaira, de maguknak az utaknak a tartósságára is az út egyenetlen-



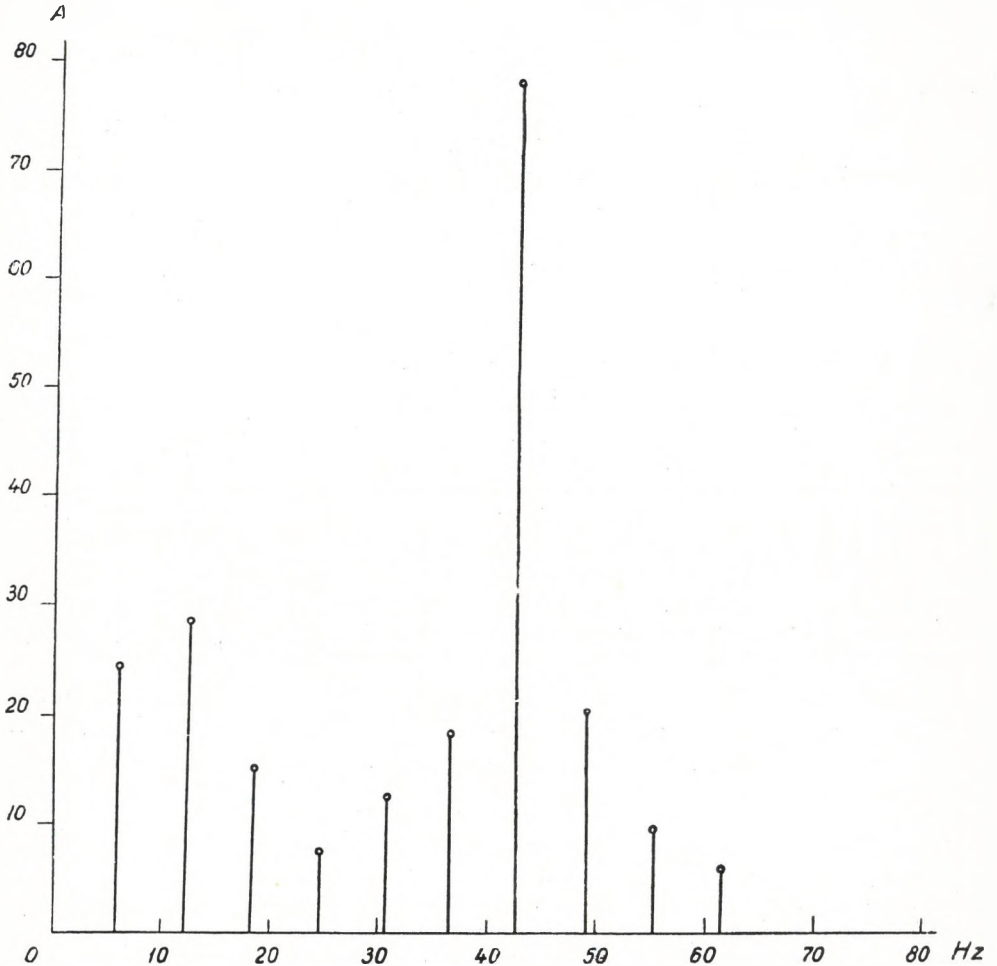
6. ábra. A Fourier-analízis eredményeképpen jelentkező harmonikus összetevők spektruma

ségén kívül, amely az alapimpulzusokat okozza, legnagyobb befolyása az út és altalaj rugalmasságának és önrezgésszámának van.

Abban az esetben ugyanis, ha a gépkocsi alvázának és az útnak saját frekvenciája egyenlő, akkor rezonancia lép fel, melynek következtében az autó energiájának jórésze (talán az egész) vertikális rezgőmozgássá alakul át, az úton pedig és a környező épületeken veszélyes nagyságú kirezgések léphetnek fel. Abban az esetben pedig, ha az útburkolat és az altalaj nem hajlamos rezgésre, illetőleg önrezgésszáma erősen különbözik a gépjármű alvázának frekvenciájától, akkor az útmozgás amplitúdói kicsinyek és a rezgések által végzett munkateljesítmény is csekély lesz. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a gépkocsi mozgási energiájából kevesebbet ad át az útnak, tehát benzinfogyasztása is kevesebb lesz, maga az út és a környező épületek pedig kevésbé rázkódnak és így kevésbé sérülnek meg. Mindenesetre ajánlatos lenne további méréseket végezni különböző utakon, mert a rendelkezésre álló anyag jelenleg nem elég ahhoz, hogy ezt a kérdést számszerűleg és pontosan eldönthessük. Hasonló további mérési eredmény esetén célszerűnek mutatkozna az

ország valamennyi főútvonalát ebből a szempontból megmérni és egyúttal a kísérleti gépkocsik benzinfogyasztását is ellenőrizni.

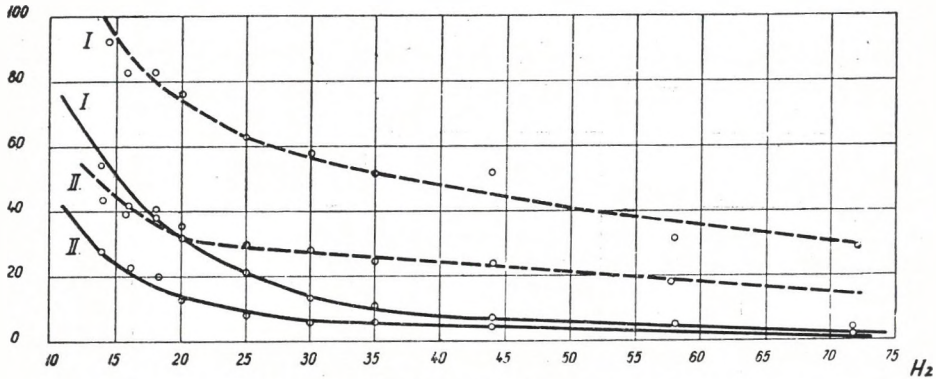
Az útrezgések tényleges amplitudóinak megállapítása céljából ahhoz az eljáráshoz folyamodtunk, hogy a vertikális rázópadot egy hangfrekvenciás generátor szinuszos rezgéseivel ráztuk és a rázópad kilengéseit mikrosz-



7. ábra. A 10/X. 23 szeizmogramm sorbafeltett részének spektruma

kóppal figyeltük. A rezgéseket az erősítőn keresztül a regisztráló berendezés segítségével fényképeztük ugyanúgy, mint az a terepen történt. A fényképezett amplitudóknak megfelelő mikroszkóp leolvasások adják azt az arányt, ami a talaj valóságos kilengései és a fényképezett amplitudók között van. Az erősítő és a regisztráló azonos működését még oly módon is ellenőriztük, hogy a terepen a felvételek alkalmával és a rázópadon történő mérésnél is az erősítőre egy pontosan ugyanolyan kis feszültséglökést adtunk és annak lefényképezett amplitudóját összehasonlítottuk. A két amplitudónak természetesen egyformának kellett lennie.

Ezt a mérést két különböző amplitudójú (I. és II. görbe a 8. ábrán) és különféle frekvenciájú szinuszos gerjesztéssel végeztük el. A 8. ábrán szaggatott vonallal kötöttük össze az azonos amplitudójú, de különböző frekvenciájú gerjesztéssel létrehozott galvanométer kitéréseket, míg folytonos vonallal a gerjesztő amplitudókat.



8. ábra. Grafikon

Méréseinkből kitűnik, hogy az arányosság jó közelítéssel, 5,5%-os átlagos hibával valóban fennáll, azaz a mikroszkópon észlelt kilengések tényleg arányosak a lefényképezett amplitudókkal.

A következő táblázatban a szeizmogramokban lemért maximális amplitudóknak megfelelő útregések nagyságát tüntettem fel. A tényleges amplitudó és a rezgésszám ismeretében az útregések sebessége és gyorsulása könnyen kiszámítható, ha feltételezzük, hogy a rezgések szinuszos formájúak. Ez — mint az előzőekben kifejtettem — megközelítőleg fennáll.

3. táblázat

Útregések maximális amplitudója

A felvétel helye	Az autó típusa	Az autó sebessége	Amplitudó- μ -ban	Jegyzet
3 sz. műút 173—172. km-kő	3 tonnás Csepel	53 km/ó	1,56	átlag 1,65
"	"	"	1,64	
"	"	"	1,76	átlag 1,78
"	"	55 km/ó	1,76	
"	"	"	1,80	átlag 2,17
"	"	72 km/ó	2,24	
"	"	"	2,11	
"	"	"	2,16	
"	Skoda szem.	"	1,04	
Mátrafüredi műút 3. km-kő	3 tonnás Csepel	39 km/ó	0,96	

- Ha A a kirezgés amplitudója,
 v_{\max} a maximális sebesség,
 a_{\max} a maximális gyorsulás,
 ω a körfrekvencia,
 P a talajrezgés ereje,
 N a munkateljesítmény,
 m a rezgést végző tömeg $\text{kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$,

akkor

$$v_{\max} = A \cdot \omega$$

$$a_{\max} = A \cdot \omega^2$$

$$P_{\max} = m \cdot A \cdot \omega^2$$

$$N_{\max} = m \cdot A^2 \cdot \frac{\omega^3}{\pi}$$

A 4. táblázat a lemért amplitudók és ütrezgésszámok alapján kiszámított sebességeket és gyorsulásokat tünteti fel.

Sor-szám	Az út ön-rezgésszáma Hz	Amplitudó- μ -ban	Sebesség max. $A \cdot \omega$	Gyorsulás max $A \cdot \omega^2$	Jegyzet
1.	44	1,56	$431 \cdot 10^{-4}$ cm/s	11,96 cm/s ²	Szeiz- mono- méter az út szélén
2.	44	1,64	453	12,45	
3.	44	1,76	486	13,40	
4.	44	1,76	486	13,40	
5.	44	1,80	497	13,68	
6.	44	2,24	628	17,10	
7.	44	2,11	582	16,10	
8.	44	2,16	596	16,42	
9.	44	1,04	287	7,90	
10.	72	0,96	433	19,60	

Ezeknél az adatoknál azonban a valóságban kb. 10—20 százalékkal nagyobb amplitudók és így nagyobb sebességek és gyorsulások lépnek fel, mert — mint a cikk elején már említettem — a geofont az úttest szélén, a robogó gépjármű kerekeitől kb. 4 méterre helyeztük el és így az adatok csak az úttest szélének amplitudóira stb. vonatkoznak. Szükséges volna tehát a méréseket oly módon megismételni, hogy a szeizmométer az úttest közepén legyen elhelyezve és az autó fölötté haladjon át úgy, hogy kerekei közrefogják. Így a valóságnak inkább megfelelő adatokat kapnánk a maximális amplitudókról és a rezgések sebességéről és gyorsulásáról.

A fellépő erők és munkateljesítmények megállapítása igen nagy nehézségeket okoz. Ezekhez ugyanis ismernünk kellene a rezgést végző talajrészek tömegét is. Ennek a tömegnek a kiszámítása azonban jóformán megoldhatatlan matematikai nehézségekbe ütközik, mert maximális amplitudóval csak a gépkocsi alatt közvetlenül levő talajrész rezeg. Ettől távolabb levő részek mindig kisebb kirezgéseket végeznek míg végül a kilengés zérus lesz. Azonkívül az út és altalaj különböző szerkezeti és anyagi összetétele következtében nem tekintető homogénnek és izotropnak, tehát a rezgések nem egyformán terjednek minden irányban. Ismerni kellene tehát a gépkocsitól jókora távolságban, minden irányban és mélységben az út és a talaj részletes szerkezetét, anyagi minőségét, stb., ami gyakorlatilag teljesíthetetlen feltétel. Ismerni kellene továbbá az amplitudókat az út függvényében, melyek kiszámítási nehézségeire már a cikk közepén, a kiértékelési résznél rámutattam.

Abból a megfontolásból kiindulva, hogy az úttest maga — építési módja következtében — sokkal szilárdabb egységet alkot, mint a környező talaj, és hogy a felszíni hullám jellegű ütrezgések a mélységgel exponenciálisan csökkennek, tájékoztató megközelítésül a következő módszert alkalmaztam. Feltételeztem, hogy a rezgő tömeg az úttestnek az a szakasza, amely az

impulzus középponttól kétoldalt a gyakorlatilag már zérus amplitudójú helyek között van. Ezt a távolságot a szeizmogrammokból állapítottam meg, amelyek — mint a cikk elején már említettem — oly módon készültek, hogy az autók által okozott útregzések az észlelés határán belül mind láthatók. Mivel a gépkocsi sebessége ismeretes és a szeizmogrammok időjelzéssel vannak ellátva, a maximális amplitudójú és a zérus kilengésű részek közötti távolság könnyen kiszámítható. Legyen ez a távolság r , az út szélessége b , akkor a rezgő paralelepipedon köbtartalma megközelítőleg

$$K = b \frac{r^2}{5}$$

mert a rezgő úttest vastagsága, a felszíni rezgéseknek a mélységgel exponenciális csökkenése következtében kb. $0,1 r$. A rezgő tömeg pedig

$$m = \frac{b \cdot r^2 \cdot f}{5g} \text{ kgs}^2 \cdot \text{cm}^{-1},$$

ahol f a fajsúly.

Az átlagos amplitudó meghatározására azt a közelítő módszert választottam, hogy az r távolságon belül a rezgéskörbét (lehetőleg periódusonként) szakaszokra bontottam, minden egyes szakaszban meghatároztam a közepes amplitudókat és ezeknek számtani középértékét vettem.

$$A_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n F_k(r),$$

ahol $F_k(r)$ a rezgésgörbe r függvényértéke az adott k pontban. Ekkor a max. erő

$$P_{\max} = \frac{b \cdot r^2 \cdot f \cdot \omega^2}{5 \cdot g \cdot n} \sum_{k=1}^n F_k(r)$$

és a teljesítmény

$$N_{\max} = \frac{b \cdot r^2 \cdot f \cdot \omega^3}{5 \cdot \pi \cdot g \cdot n^2} \left[\sum_{k=1}^n F_k(r) \right]^2$$

Ilyen módon néhány szeizmogrammot értékeltem ki és a táblázatban feltüntetett eredményeket kaptam:

Még egy közvetett módszer is használható. Ha megmérjük a gépkocsi alvázának vertikális kilengéseit és a kilengések rezgésszámát, akkor az autó tömegének ismeretében a gépjármű vertikális mozgásának minden tényezője kiszámítható, természetesen annak feltételezésével, hogy ez a mozgás is szinuszos formájú.

- Ha m_1 a gépkocsi tömege $\text{kgs}^2 \text{cm}^{-1}$,
 A_1 az amplitudó,
 ω_1 a gépjármű vertikális rezgésének körfrekvenciája,

A rezgő talajtömeg energiája

Sorszám	Az út önrezgés-száma Hz	A rezgő út-rész felhossza r	Az út szélessége b	A számított rezgő úttömeg $\frac{b \cdot r^2 \cdot t}{5g}$	A számított közepes amplitúdó
1.	44	2430 cm	1500 cm	3610 kgs ² · cm ⁻¹	0,32
2.	44	2676 cm	1500 cm	4360 kgs ² · cm ⁻¹	0,50
	Középtérték:			3980 kgs ² · cm ⁻¹	0,41

akkor

$$P_{1\max} = m_1 \cdot A_1 \cdot \omega_1^2.$$

Feltételezzük továbbá, hogy ezt az energiát a gépjármű teljes egészében átadja az úttestnek (és az altalajnak), akkor

$$n_1 \cdot A_1 \cdot \omega_1^2 = m_2 \cdot A_2 \cdot \omega_2^2,$$

ahol m_2 a rezgő úttest és altalaj tömege, A_2 az úttest rezgésének amplitúdója és ω_2 az úttest önrezgésszámának körfrekvenciája. Az egyenletről

$$m_2 = m_1 \frac{A_1 \cdot \omega_1^2}{A_2 \cdot \omega_2^2}.$$

A két amplitúdó és a két rezgésszám ismeretében a rezgést végző talajtömeg meghatározható, mert az autó tömege mindig ismeretes.

Az Autóközlekedési Kutató Intézet mérései szerint a gépkocsi alvázának rezgései 10,35 frekvenciájúak, a kilengések nagysága pedig 1–10 mm értékek között mozog Prága 1,5 tonnás tekerautónál. Ha ezeket az adatokat a Csepel 3 tonnás gépkocsira is vonatkoztatjuk és így az átlagos amplitúdót 5 mm-nek, a rezgésszámot pedig 10,35 Hz-nek vesszük, akkor

$$m_2 = 3920 \text{ kgs}^2 \cdot \text{cm}^{-1},$$

$$P_{\max} = 15 \text{ 100 kg},$$

$$N_{\max} = 0,66 \text{ mkg}.$$

A két számítási mód eredményei elég jól egyeznek, ami valószínűvé teszi azt, hogy a rezgő tömeg ilyen elképzelése megközelíti a valóságot. Természetesen további mérések szükségesek ahhoz, hogy ez az elméleti megfontolás igazolást nyerjen.

Feltűnő a két számítási eredményből a gépkocsi rezgések és a rezgő úttest munkateljesítményének nagy különbsége. Míg a gépjármű vertikális rezgései által végzett munkateljesítmény kb. 1500 mkg, addig a rezgő úttömegé nem egészen 1 mkg. Ebből egyrészt az következik, hogy az autó rezgési energiáját nem adja át teljes egészében az úttestnek (ami természetes, mert sokat elvesz a rúgózás, gumiabroncs, stb.), másrészt pedig az, hogy az autótól kapott energiát az úttest túlnyomórésztben elnyeli és az meleggé alakul át.

5. táblázat

és munkateljesítménye

A sebesség max $A_k \cdot \omega$	Gyorsulás max $A_k \cdot \omega^2$	Erő max $m \cdot A_k \omega^2$	Munkatelje- sítmény max $m \cdot A_k \omega^3$	Jegyzet
$885 \cdot 10^{-5} \text{cm/s}$	$2,46 \text{ cm/s}^2$	8 870 kg	0,40 mkg	Fajsúly
$1385 \cdot 10^{-5} \text{cm/s}$	$3,84 \text{ cm/s}^2$	16 720 kg	0,74 mkg	
$1135 \cdot 10^{-5} \text{cm/s}$	$3,15 \text{ cm/s}^2$	12 795 kg	0,57 mkg	$f = 2$

Ismét hangsúlyozni kívánom, hogy a rendelkezésre álló anyagmennyiség még kevés, és hogy a mérések továbbfolytatására feltétlenül szükség van, ha erre a kérdésre is határozottabb és végleges választ akarunk kapni. Szükséges volna még a mérések további kiterjesztése a rezgések mindkét horizontális összetevőjére is. A megfelelő anyag birtokában azután — azt hiszem — tisztázni lehet azokat a ma még sok vonatkozásban felderítetlen jelenségeket, amelyeket az útra ható dinamikus erőhatások hoznak létre.

Munkatársak: A Geofizikai Intézet részéről: Szemerédy P. Károly, Brezony József. Az Autóközlekedési Tudományos Kutató Intézet részéről: Prohászka László igazgató, Muzsnay László, Hidy László, Gaál Tibor, Simkó Aladár, Dancs Tibor, Major Ferenc, Rácz Lajos mérnökök.

Felhasznált irodalom: dr. Vásárhelyi Boldizsár: Útépités tan. dr. Ing. Risch: Messungen von Verkehrserschütterungen. A Kalahne: Grundzüge der mathematisch physikalischen Akustik.

