

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar  
Környezetmérnöki mesterképzési szak (nappali) MSC  
Munka- tűzvédelem és biztonságtechnika, zajvédelem

# ZAJVÉDELEM

## Rezgéstan és hangtan

---

**MÁRKUS MIKLÓS**

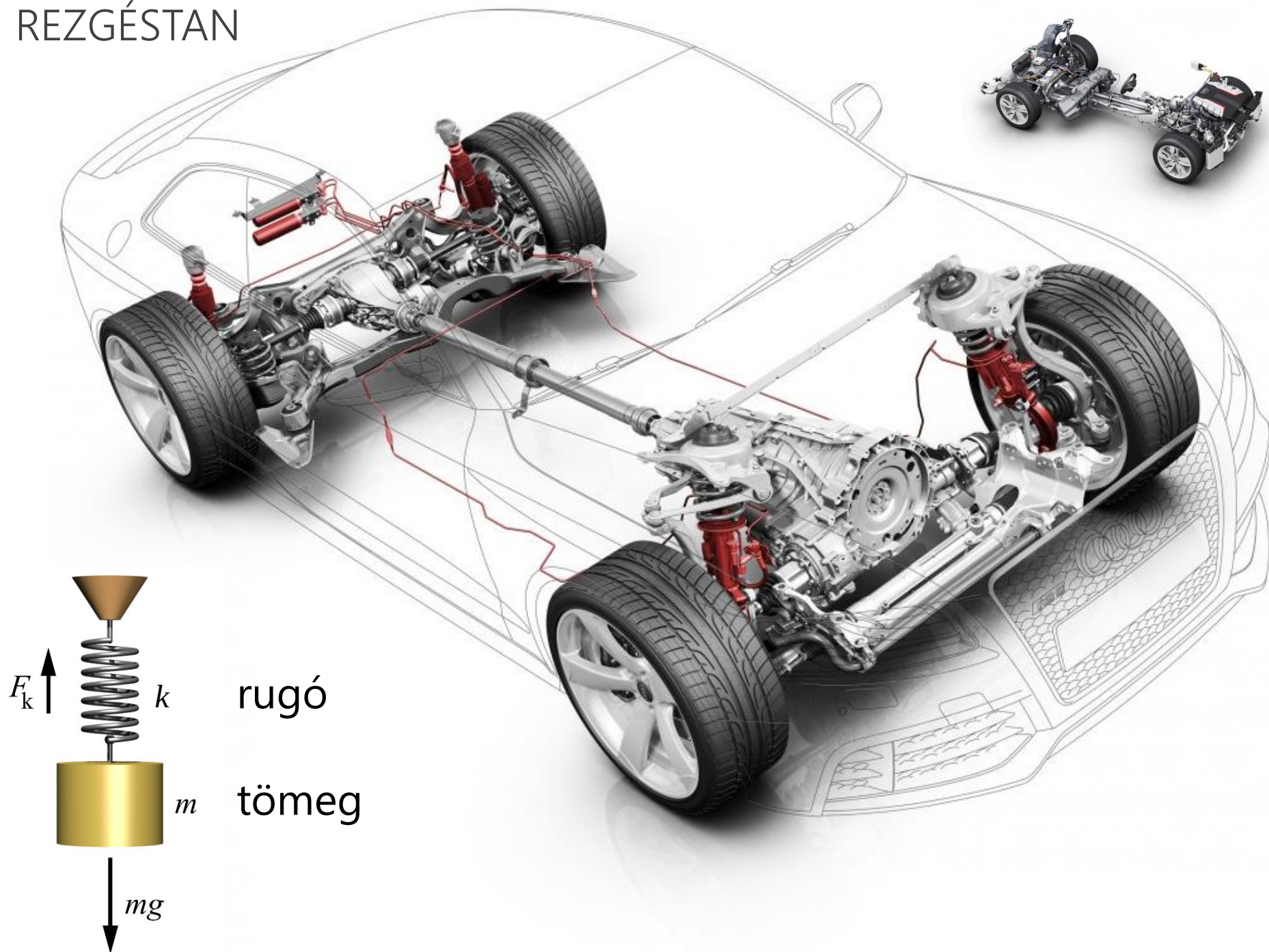
zaj és rezgésvédelmi szakértő  
[markusmiklos@fonor.hu](mailto:markusmiklos@fonor.hu)

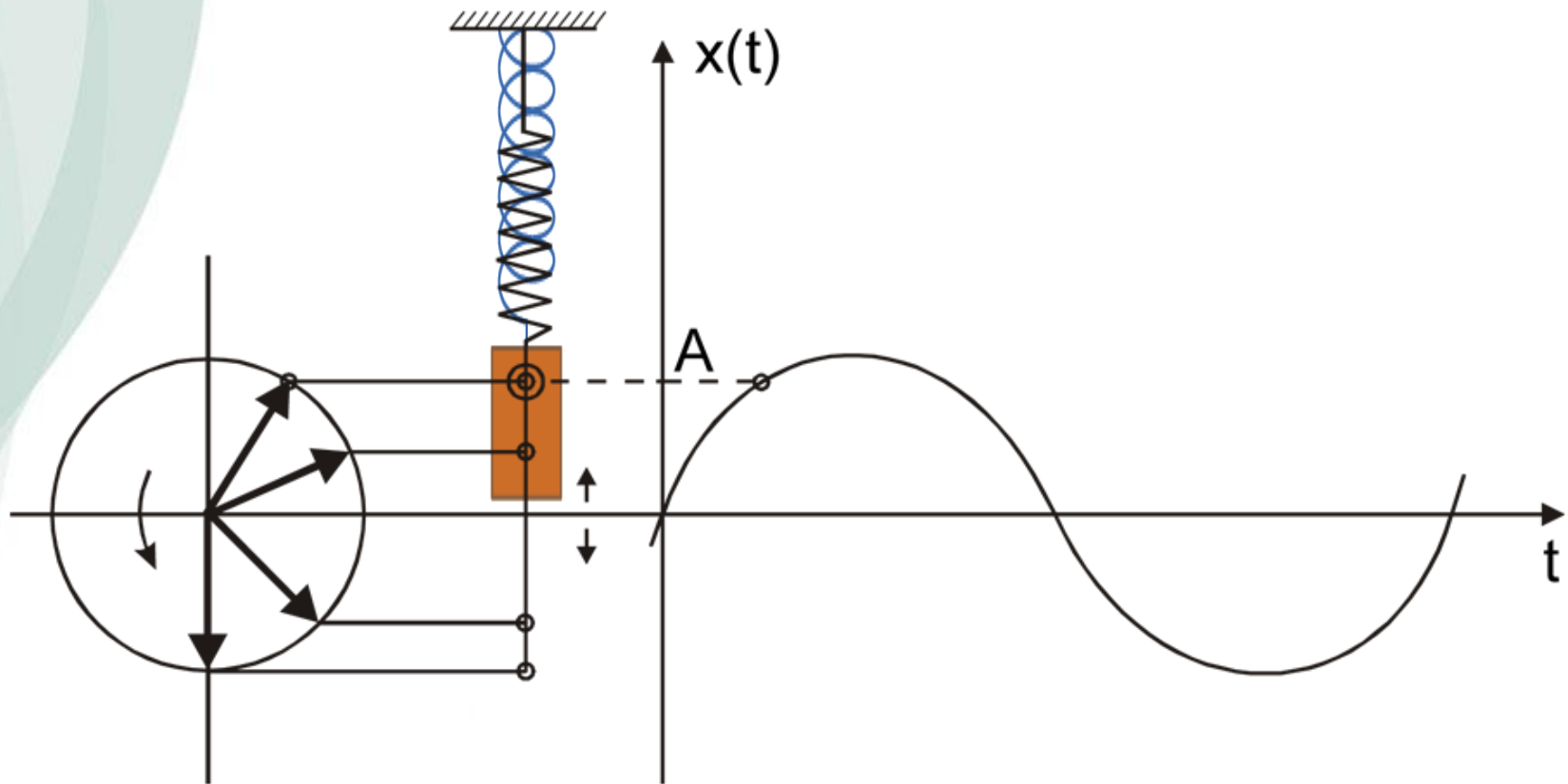


REZGÉSTAN



# REZGÉSTAN





forgó  
vektor

tényleges  
kitérés

a kitérés időfüggvénye

Egyszerű harmonikus (szinuszos)  
egydimenziós (egy szabadságfokú)  
periodikus csillapítatlan rezgés időfüggvénye:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

ahol:

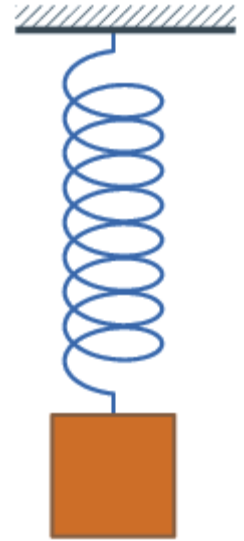
$A$  – kitérés amplitúdója (m)

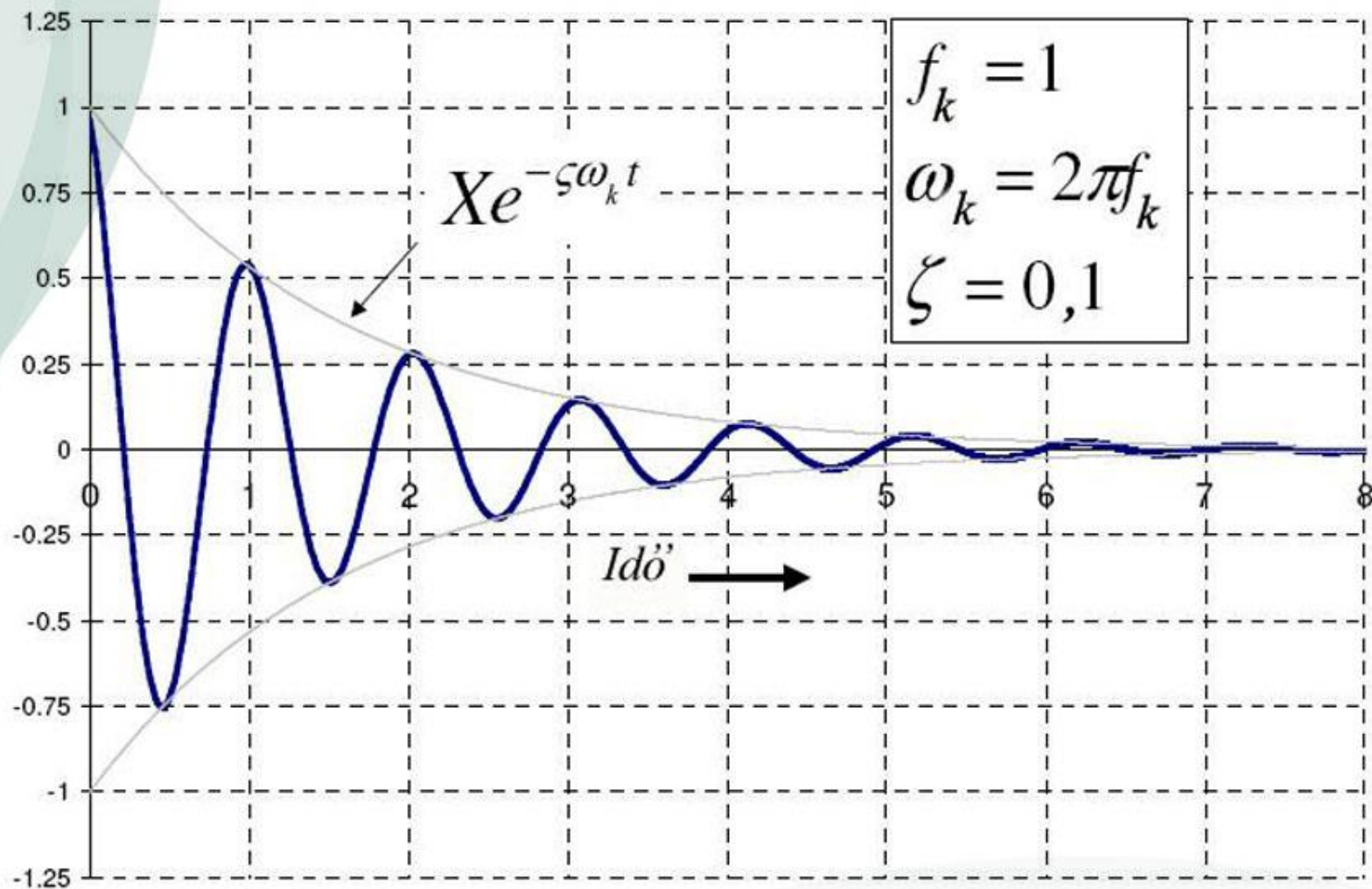
$t$  – idő (s)

$\omega$  – körfrekvencia (rad/s) =  $2\pi f$

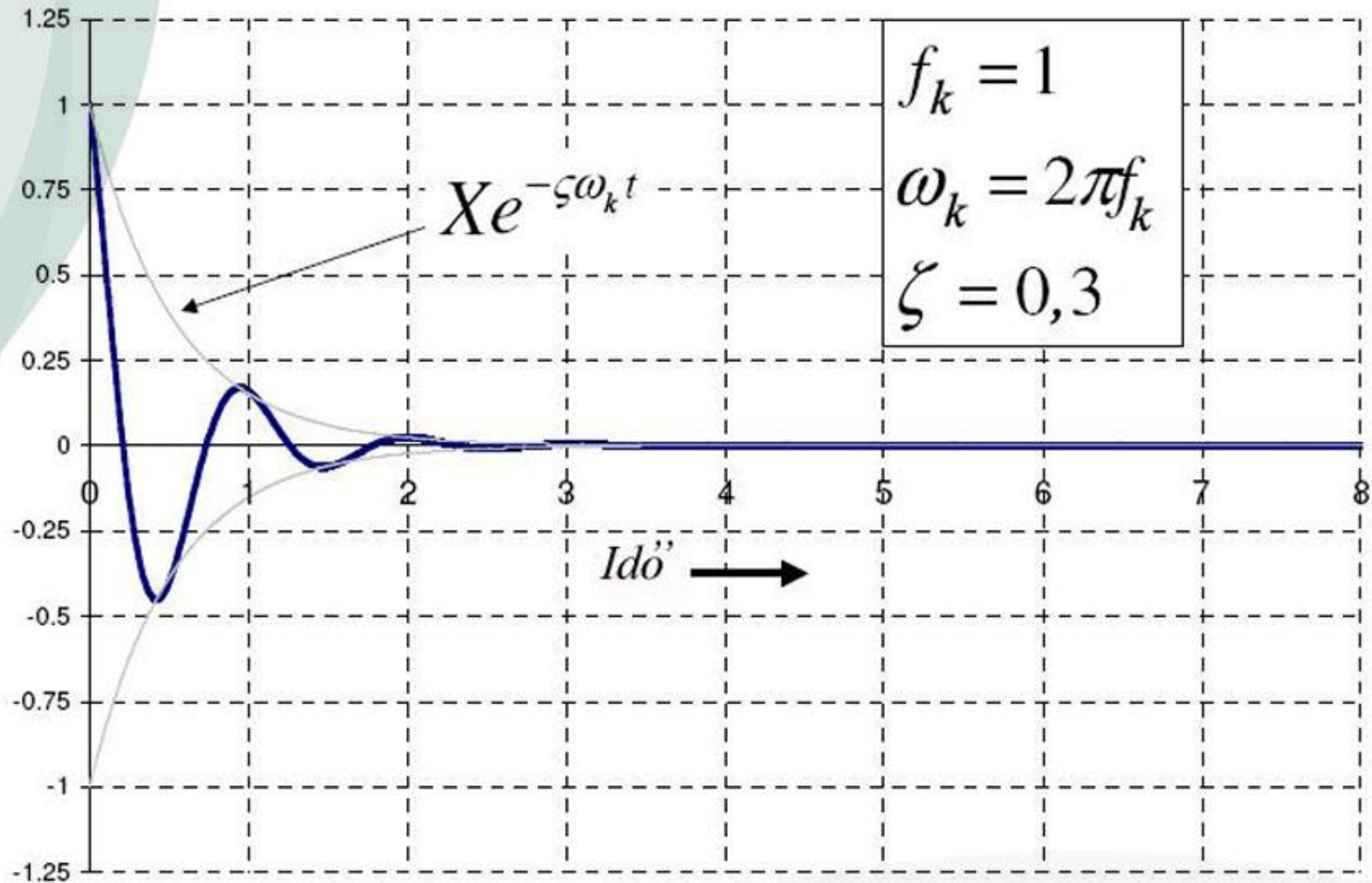
$f$  – frekvencia, a másodpercenkénti rezgések száma (Hz)

$\varphi$  – a fázisszög kezdeti értéke (rad)





Csillapított szabadrezgés 0,1-es csillapítási tényezővel



Csillapított szabadrezgés 0,3-as csillapítási tényezővel

Rezonanciafrekvencia (def.): más néven sajátfrekvencia ( $f_0$ ) a gerjesztett rendszer olyan jellemzője ahol a rezgés-amplitúdónak (a legnagyobb kitérésnek) maximuma van (rezonancia lép fel).

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{m \cdot C}}$$

ahol:

$f_0$  – a rendszer sajátfrekvenciája (Hz)

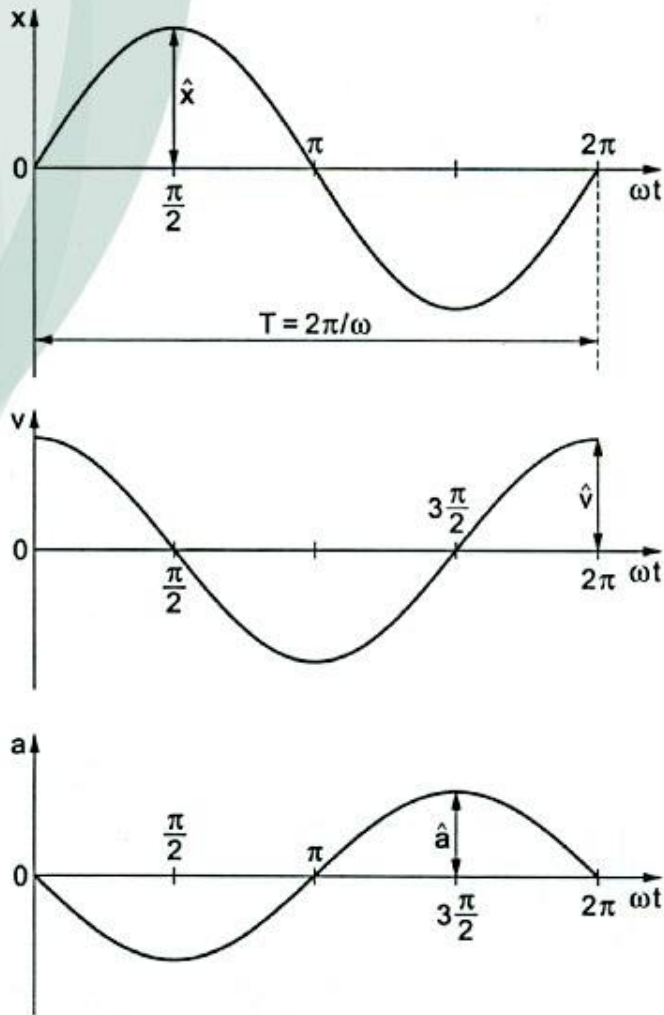
$\omega$  – körfrekvencia (rad/s)

$m$  – rezgő tömeg (kg)

$k$  – rugómerevség (N/m)

$C$  – rugóengedékenység (m/N)

# RESONANCE



$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$$

Rezgésjellemzők időfüggvénye

HANGTAN



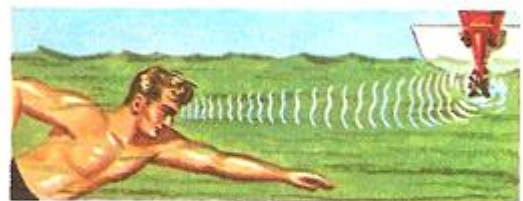
Hang (def.): valamilyen **rugalmas** közegben **nyomáshullám** (mechanikai hullám) formájában terjedő **rezgés**.

Hangforrás (energiaforrás) >  
**léghang** / **folyadékhang** / **testhang**

Zaj (def.): **szubjektív** megítélés szerint nem kívánt / kellemetlen / **zavaró** / káros hatású **hang**.



**Vibrations travel through SOLIDS**  
You can hear through a solid because it too transmits vibrations.



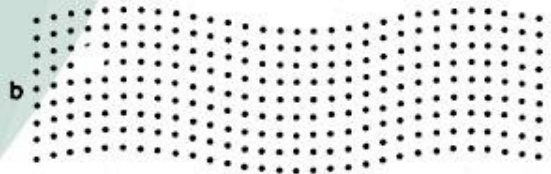
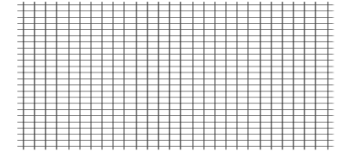
**Vibrations travel through LIQUIDS**  
A liquid also transmits vibrations, making it possible to hear underwater, for instance.



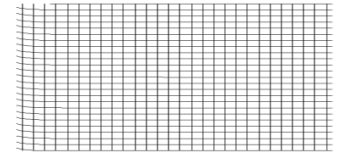
**... But NOT through a VACUUM**  
You cannot hear through a vacuum; there is nothing to carry the vibrations (sound) to your ears.



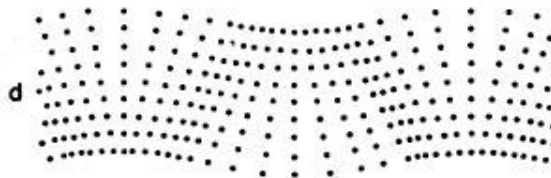
longitudinális (hosszanti) hullám



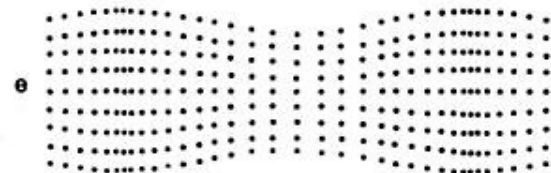
transzverzális (merőleges) hullám



Rayleigh-féle hullám



hajlítási hullám



tágulási hullám

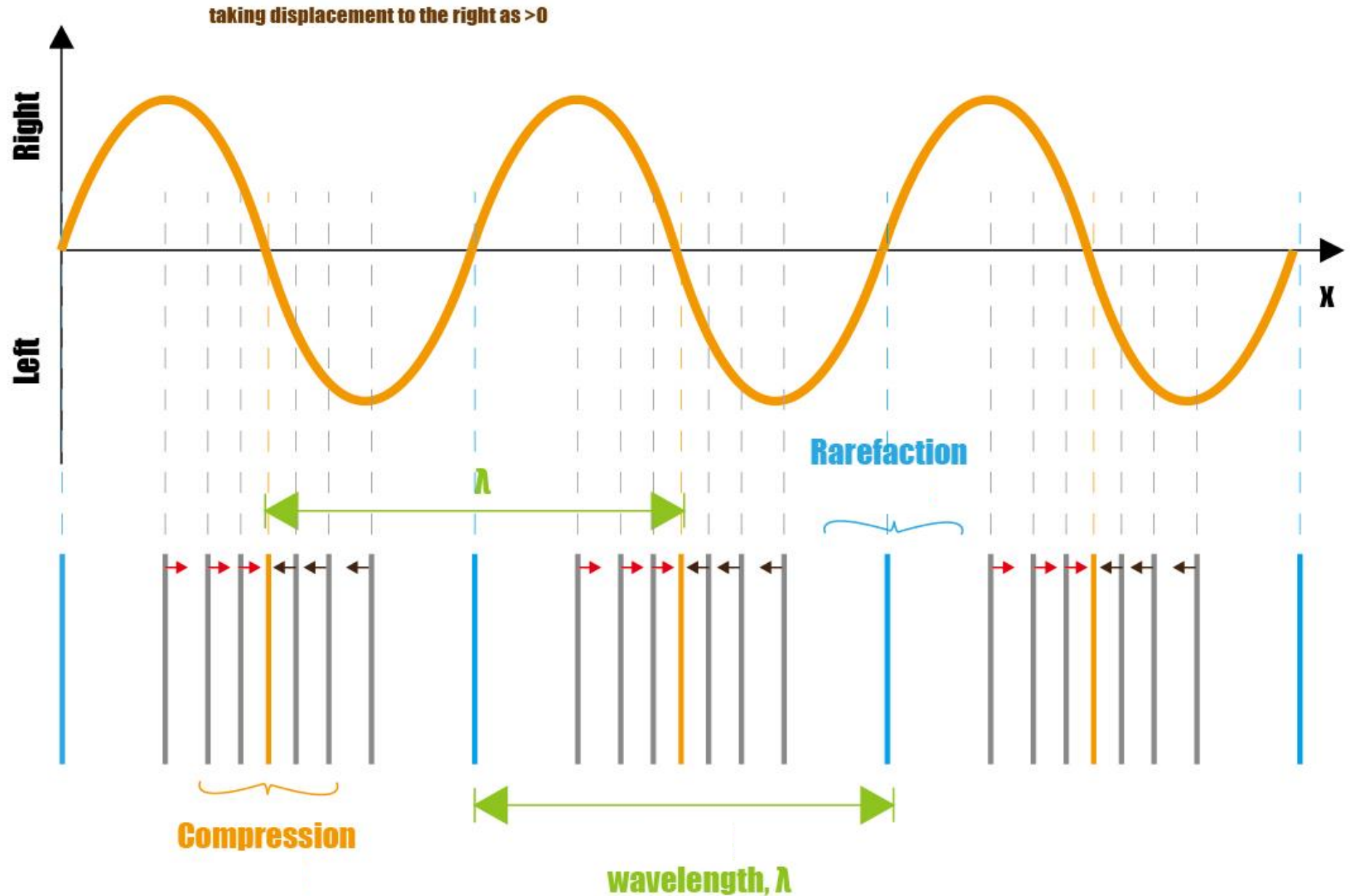
## Hullámterjedés formái



Transverse Wave



Longitudinal Wave



Hangnyomás (def.): a *hangforrás* folyamatosan mechanikai energiát ad át a körülötte lévő közegnek, így *a közegben nyomásingadozást okoz* (tehát hangot kelt), ennek következtében a  $p_{\text{lég}}$  légköri nyomáshoz egy kismértékű nyomásingadozás adódik, melyet **hangnyomásnak** nevezzük.

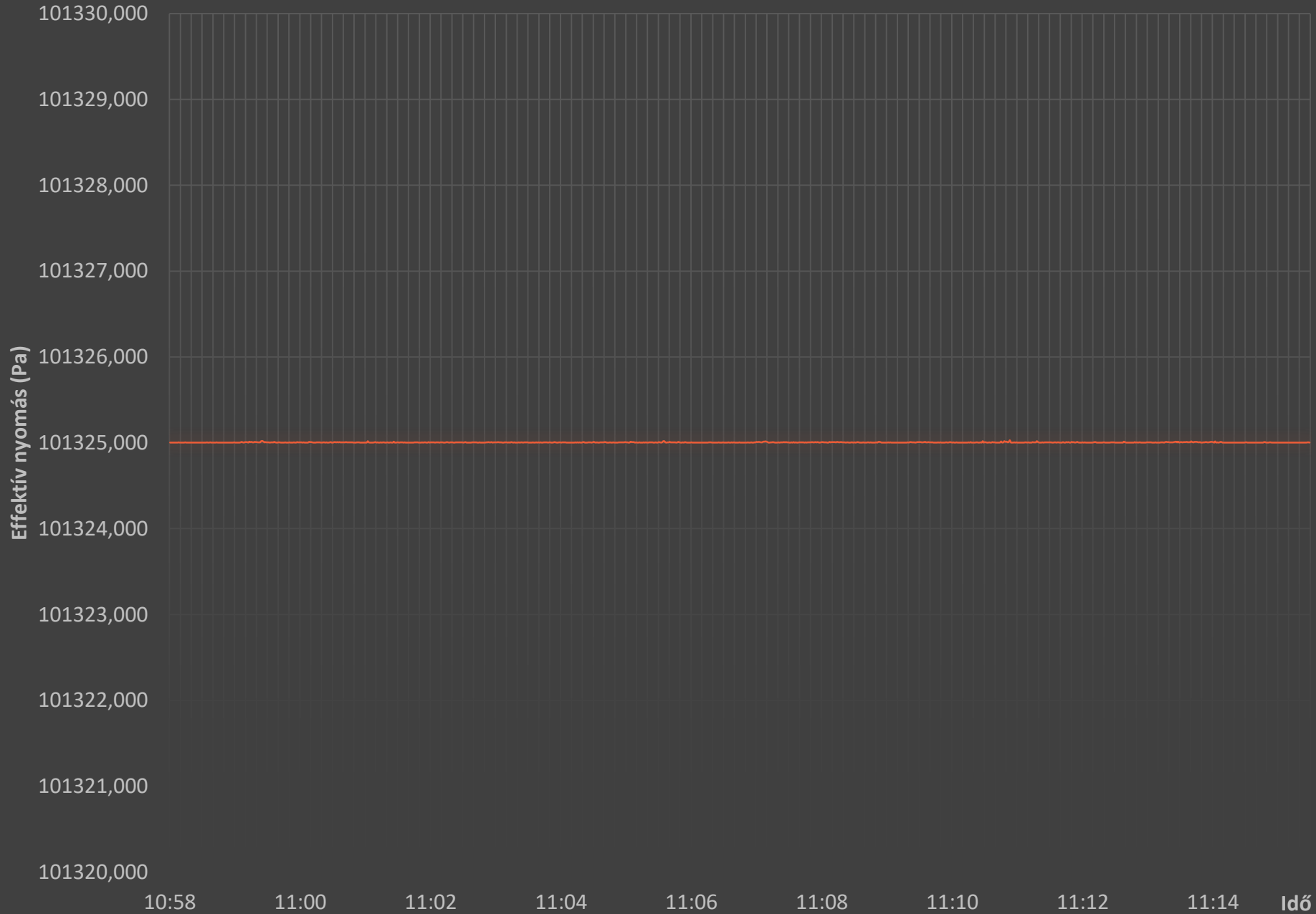
Jele:  $p$ , mértékegysége: Pascal [Pa].

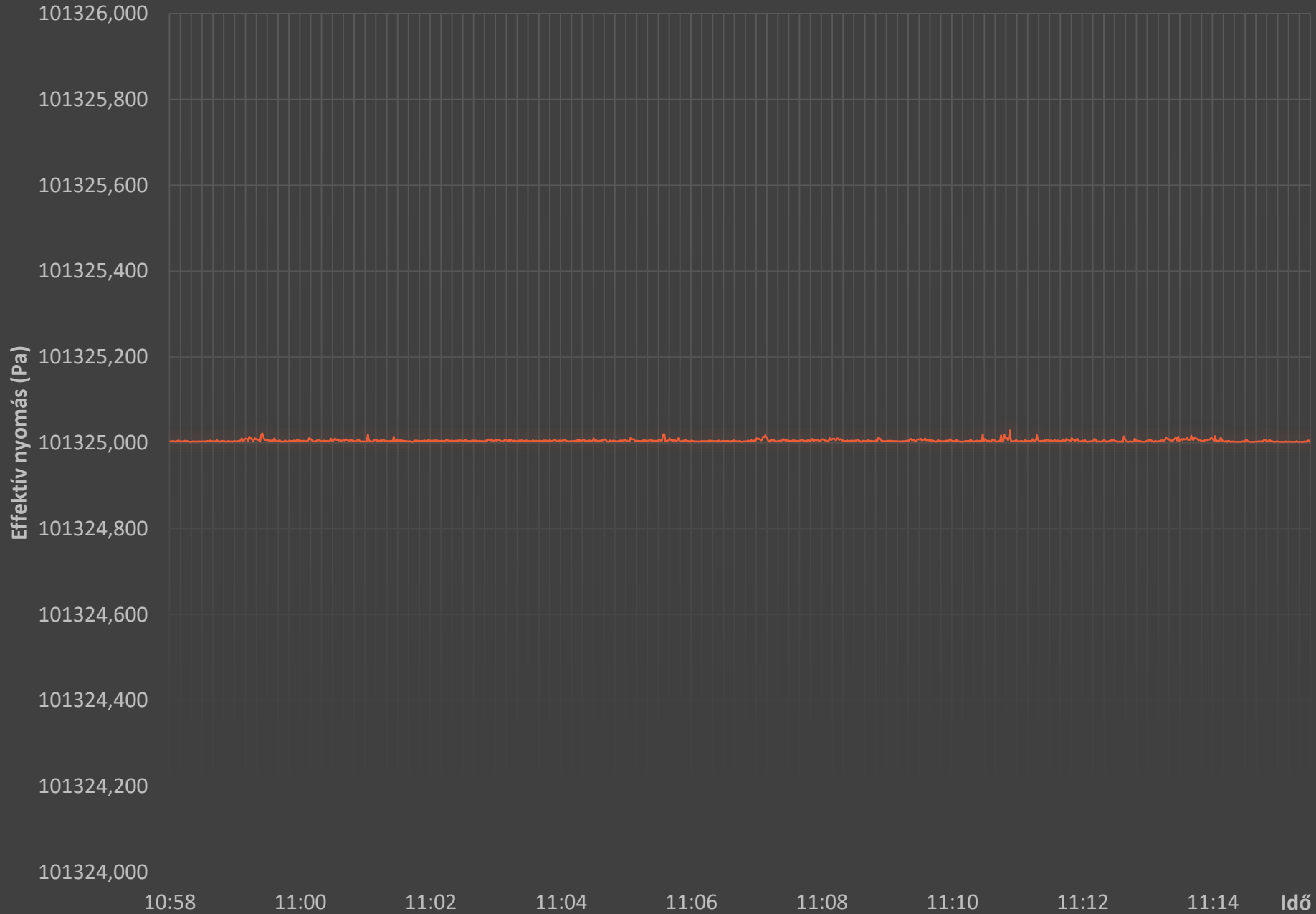


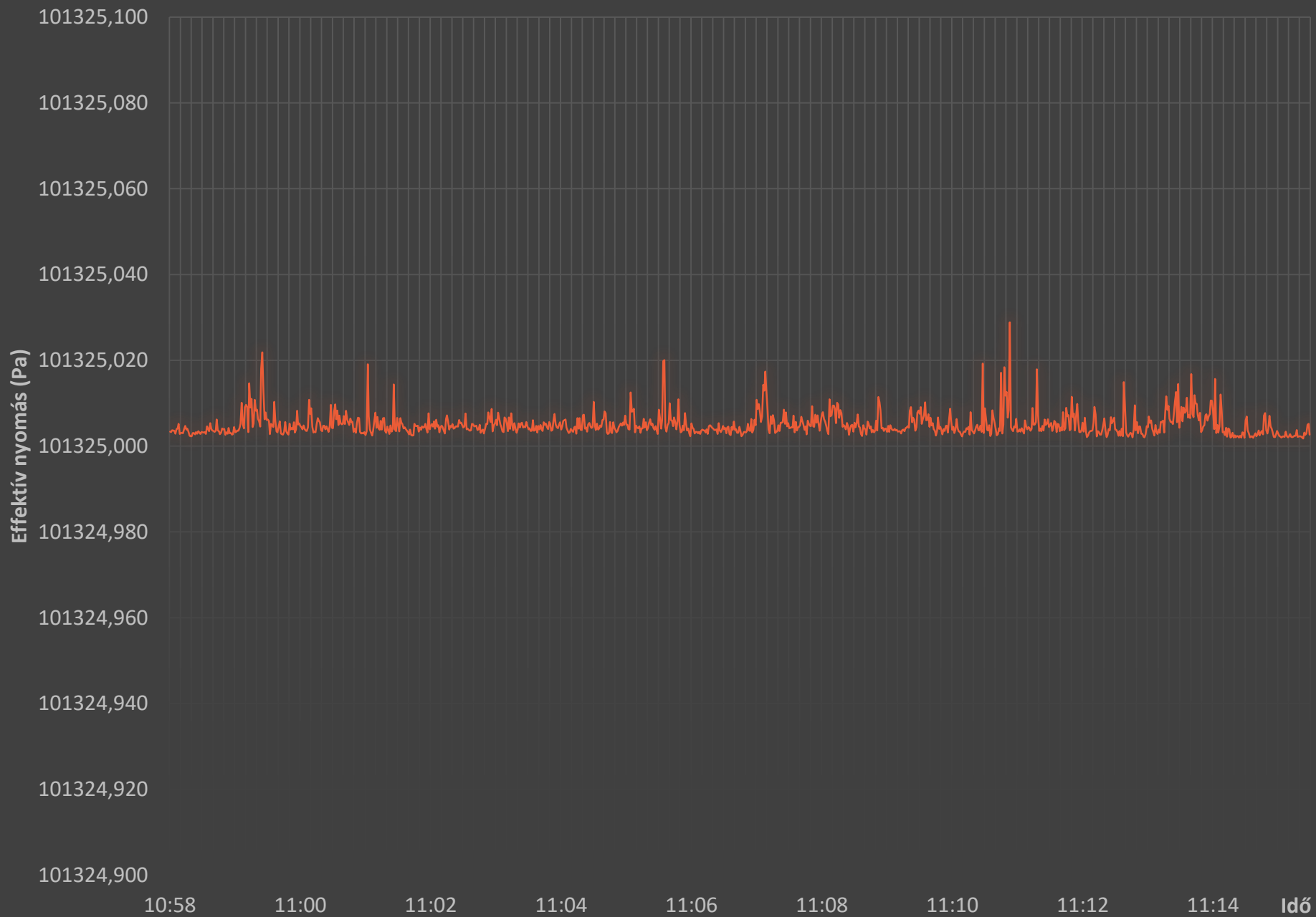
A normál légköri nyomás:  $p_{\text{lég}} = 101325 \text{ Pa} \approx 10^5 \text{ Pa}$

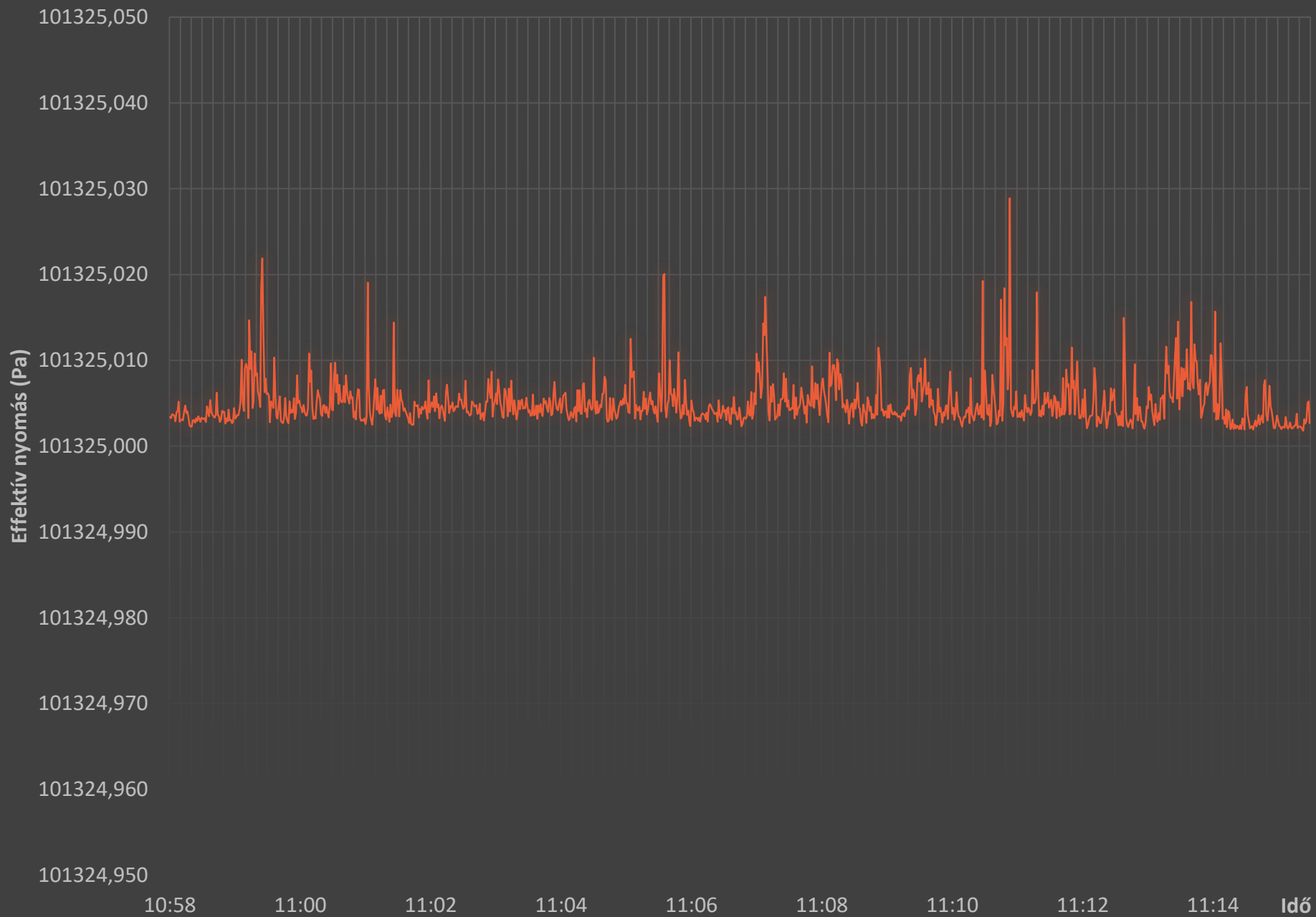
Az éppen meghallható hangnyomás:  $p_0 = 0,00002 \text{ Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

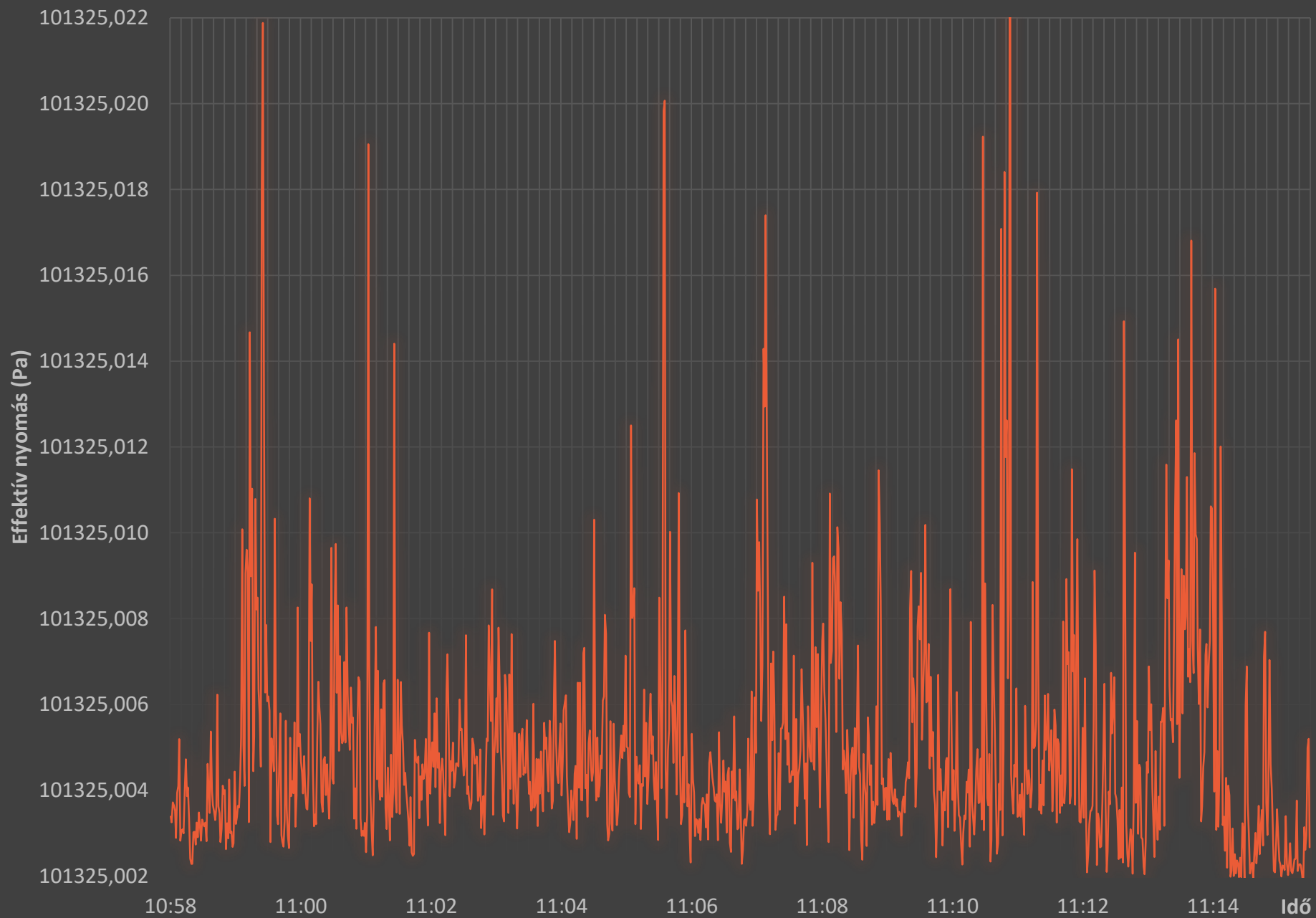
A **20 Pa** nagyságrendű hangnyomás már fájdalomérzetet kelthet!











A hangnyomás effektív értéke (def.): a hang fizikai jellemzésére leggyakrabban használt érték, mely a hangnyomás  $p(t)$  időfüggvényének négyzetes középértéke (*RMS értéke*):

$$p_{eff} = \sqrt{p^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

*Szinuszosan* változó hangnyomás esetén:

$$\int_0^T \hat{p}^2(t) dt = T \frac{\hat{p}^2}{2} \quad \text{mely alapján} \quad p_{eff} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}} = 0,707 \hat{p}$$

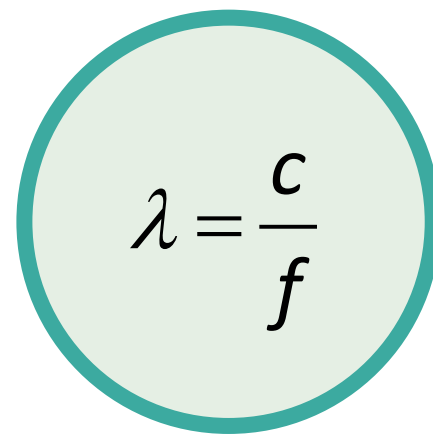
# HANGTAN

Frekvencia (def.): a másodpercenként ismétlődő teljes hullámperiódusok száma, az *időbeli periodicitás* jellemzője.

Jele:  $f$ , mértékegysége: [Hz].

Hullámhossz (def.): a hullám azonos fázisú pontjainak távolsága,  
a *térbeli periodicitás* jellemzője.

Jele:  $\lambda$ , mértékegysége: méter [m].


$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Hangsebesség (def.): a hullámterjedés sebessége a közegben, mely alapvetően a *közeg sűrűségének a függvénye*.

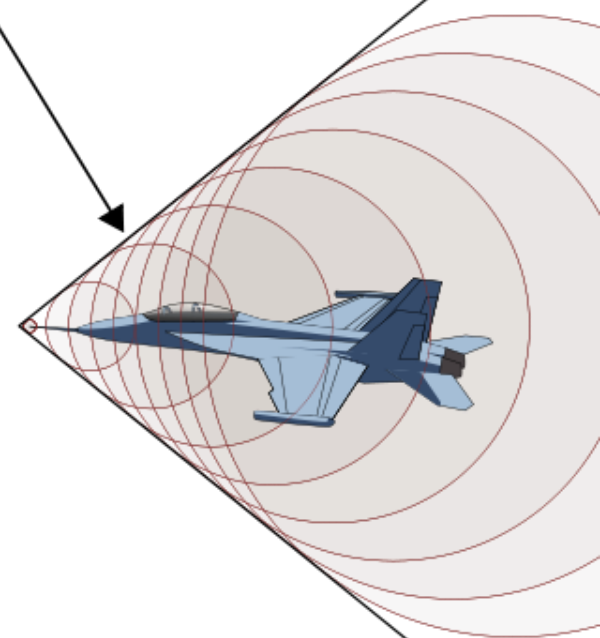
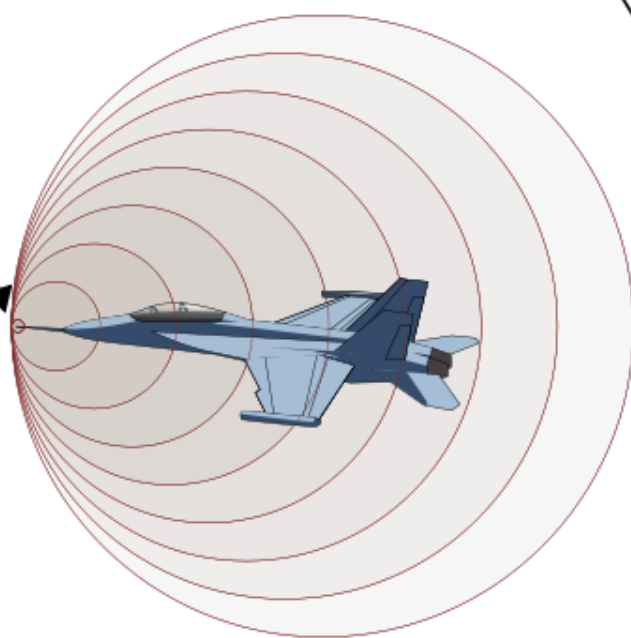
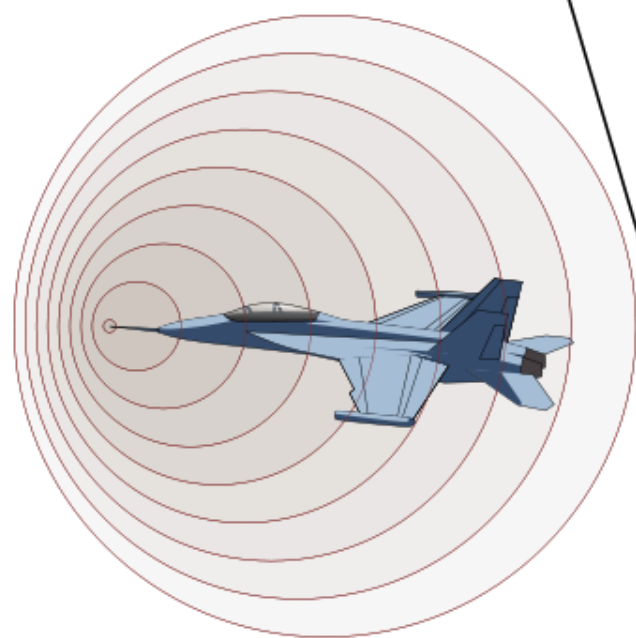
Nem a közeg részecskéinek pillanatnyi rezgése sebessége ( $v$ )!

Jele:  $c$ , mértékegysége: [m/s].



Overlapping

Shock Cone

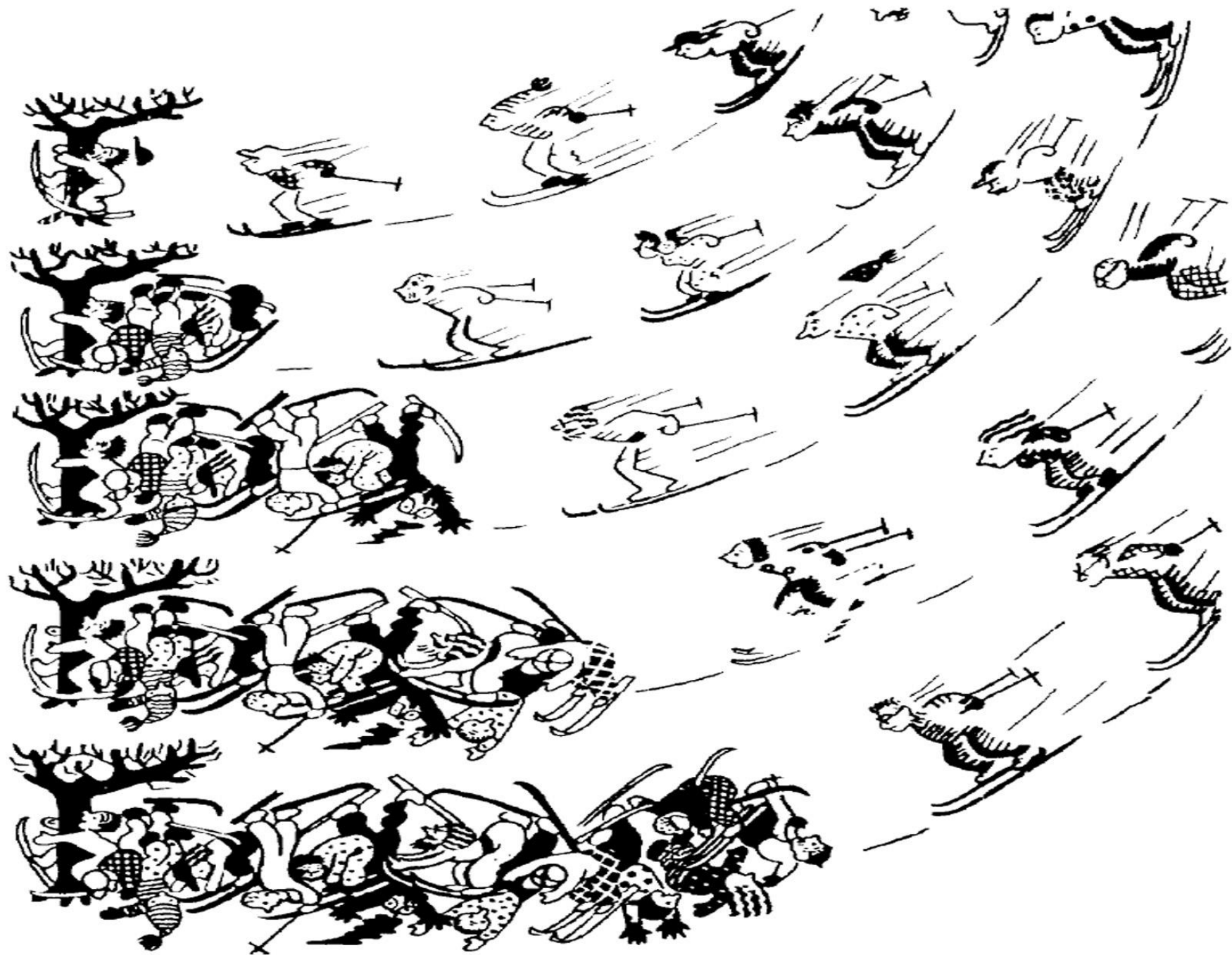


Wavefronts

Subsonic  
speed

Mach  
One

Supersonic  
speed



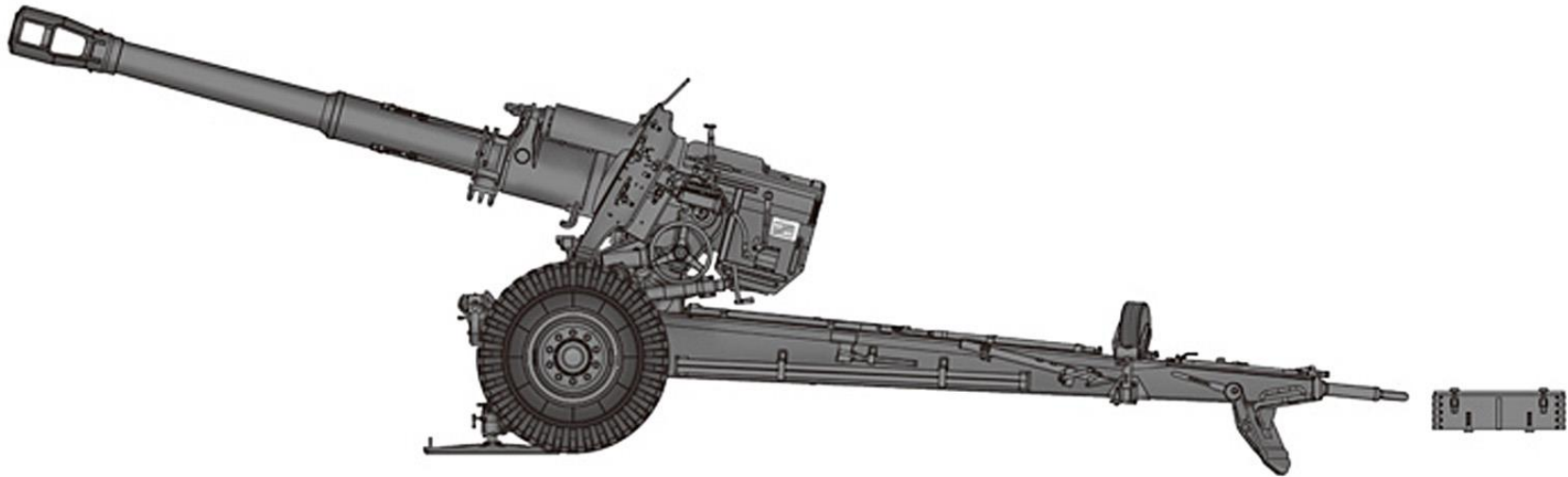


A ZAJFORRÁS

D-20 152 mm tarackágyú

# D-20 152 mm tarackágyú

1950-től gyártott szovjet gyártmányú vontatott tüzérségi löveg



## **ZAJFORRÁS:**

saját tömeg: **5700 kg**

lőszer tömege: **43,51 kg**

lövedék kezdősebessége: **600 m/s**

maximális lőtávolság: **17,4 km**

## **HELYSZÍN:**

MH BHK **Bakonykúti** Kiképző bázis

**25. Klapka György** Lövészdandár

kezelő személyzet: **6 fő**

lőszer: **2-es és 4-es töltet**

# Mérőrendszer

BK 2250



~~1/4" mikrofon~~



~~1/4" mikrofon~~



1/8" mikrofon

< 184 dB







**KEZELŐ**

**CSAK PIHEN**

**MÉRÉSI PONT**

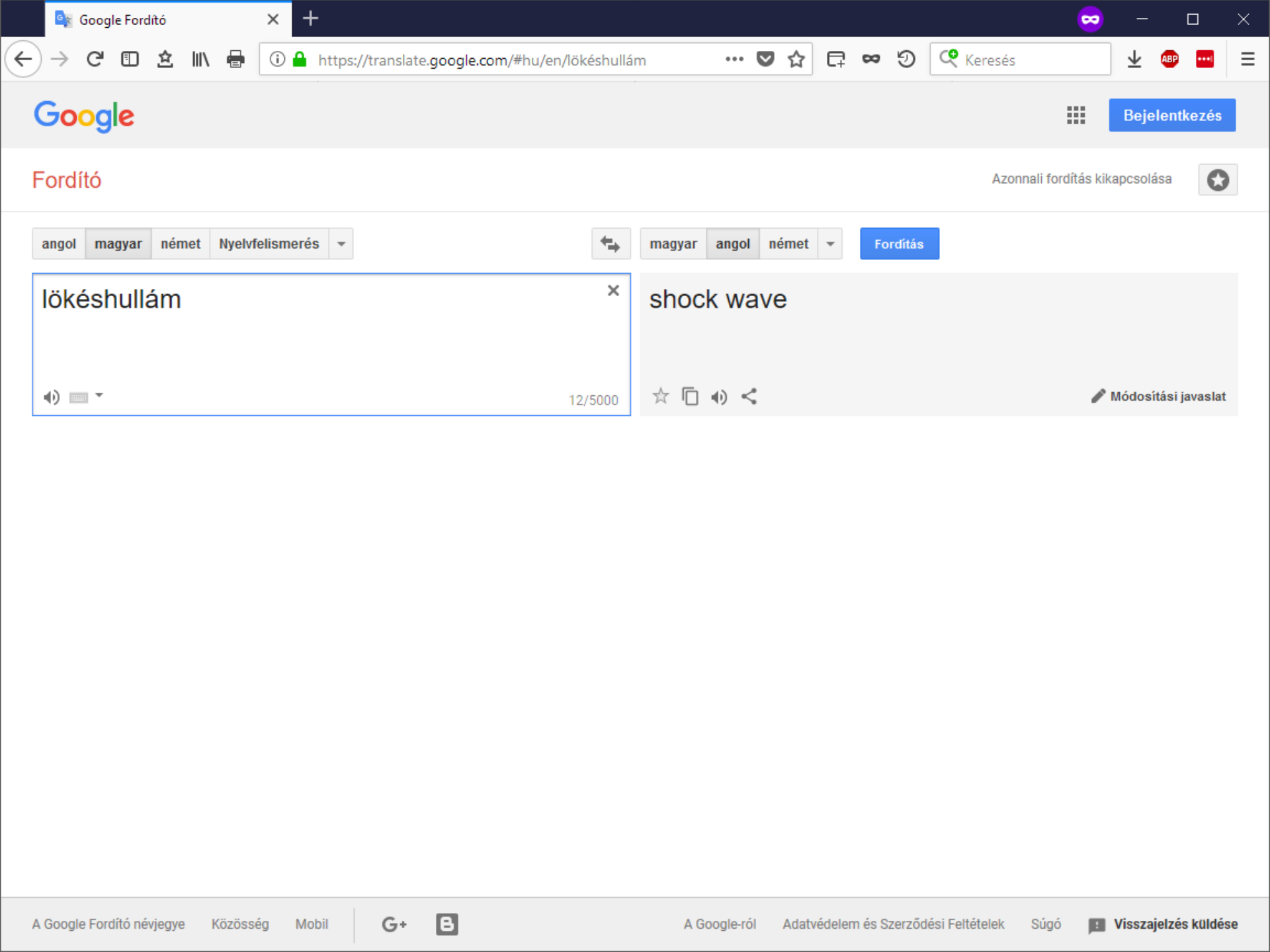


**Robbanás?**

**Nyomáshullám?**

**Lökéshullám?**

**Hanghullám?**





# SHOCKWAVE

A MICHAEL BAY FILM

# TRANSFORMERS

DARK OF THE MOON



Hugoboss, Transformers, and all other characters are trademarks of Hasbro. © 2011 Hasbro. All Rights Reserved.

[TransformersMovie.com](http://TransformersMovie.com)

IMAX 3D is a registered trademark of IMAX Corporation.



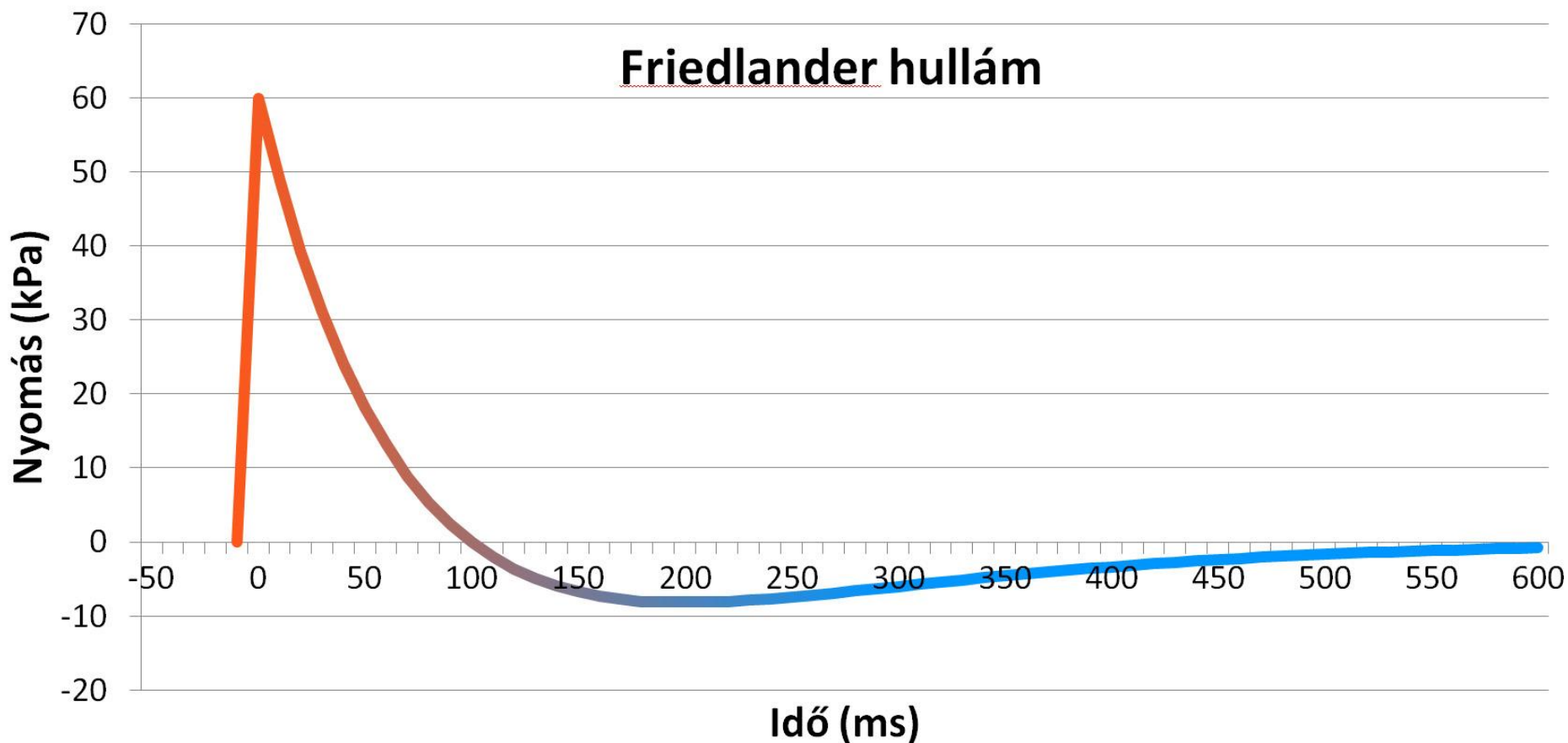
© 2011 Paramount Pictures. All Rights Reserved.

## Lökéshullám hullámfrontja

- hirtelen fellépő nagy túlnyomás
- adiabatikus folyamat
- nagy felületi hőmérséklet
- **szuperszonikus** terjedés

## Dekompressziós zóna

- légnyomáscsökkenés
- szívóhatás
- **szubszonikus** terjedés



# LÖKÉSHULLÁM RECEPT

## Robbanás feltételei:

- éghető anyag **koncentrációja**
- közeg: **oxigénforrás**
- gyújtóhatás: **hőenergia**
- égés sebessége **>100 m/s**

## Lökéshullám feltételei:

- elegendően **nagy energia**  
(amplitúdó)
- elegendően **nagy sebesség**  
(szuperszonikus)





Hangintenzitás (def.): a hanghullám akusztikai energiát szállít terjedésének irányában, az egységnyi idő alatt egységnyi felületen merőlegesen átáramló hangenergia a hangintenzitás (vektormennyiség). Jele:  $I$ , mértékegysége:  $[W/m^2]$ .

$$I = \lim \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot v \cdot dt = \overline{p(t) \cdot v(t)} = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 \cdot c_0} \quad \text{vagyis} \quad I \sim p_{eff}^2$$

Hangteljesítmény (**def.**): valamely hangforrás hangteljesítménye a hangforrás által az időegység alatt minden irányban kisugárzott hangenergia. Jele:  $P$ , mértékegysége: Watt [W].

$$P = \oint_S I_n \cdot dS \quad \text{vagyis} \quad P = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot S$$

A hangteljesítmény *forrásjellemző* (zajemisszió), mely **nem** távolságfüggő.

SZINTEK



**Szint (def.):** két mennyiség arányának *logaritmikus* mértéke, amit széles körben használnak az akusztika, a fizika és az elektronika területén.

Jele:  $L$ , alapvetően *dimenzió nélküli mennyiség*, azonban a *tízes alapú logaritmussal* meghatározott szint mértékegysége: bel [B], ennek tizede a **decibel** [dB].

$$L = 10 \cdot \lg \frac{\text{paraméter}}{\text{alapérték}} = 10 \cdot \lg \frac{x}{x_0}$$

Hangnyomásszint:

Jele:  $L$

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$L = 10 \cdot \lg \frac{\overline{p^2(t)}}{p_0^2} = 20 \cdot \lg \frac{p_{eff}}{p_0}$$

Hangteljesítményszint:

Jele:  $L_W$

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

$$L_W = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0}$$

Hangintenzitás szint:

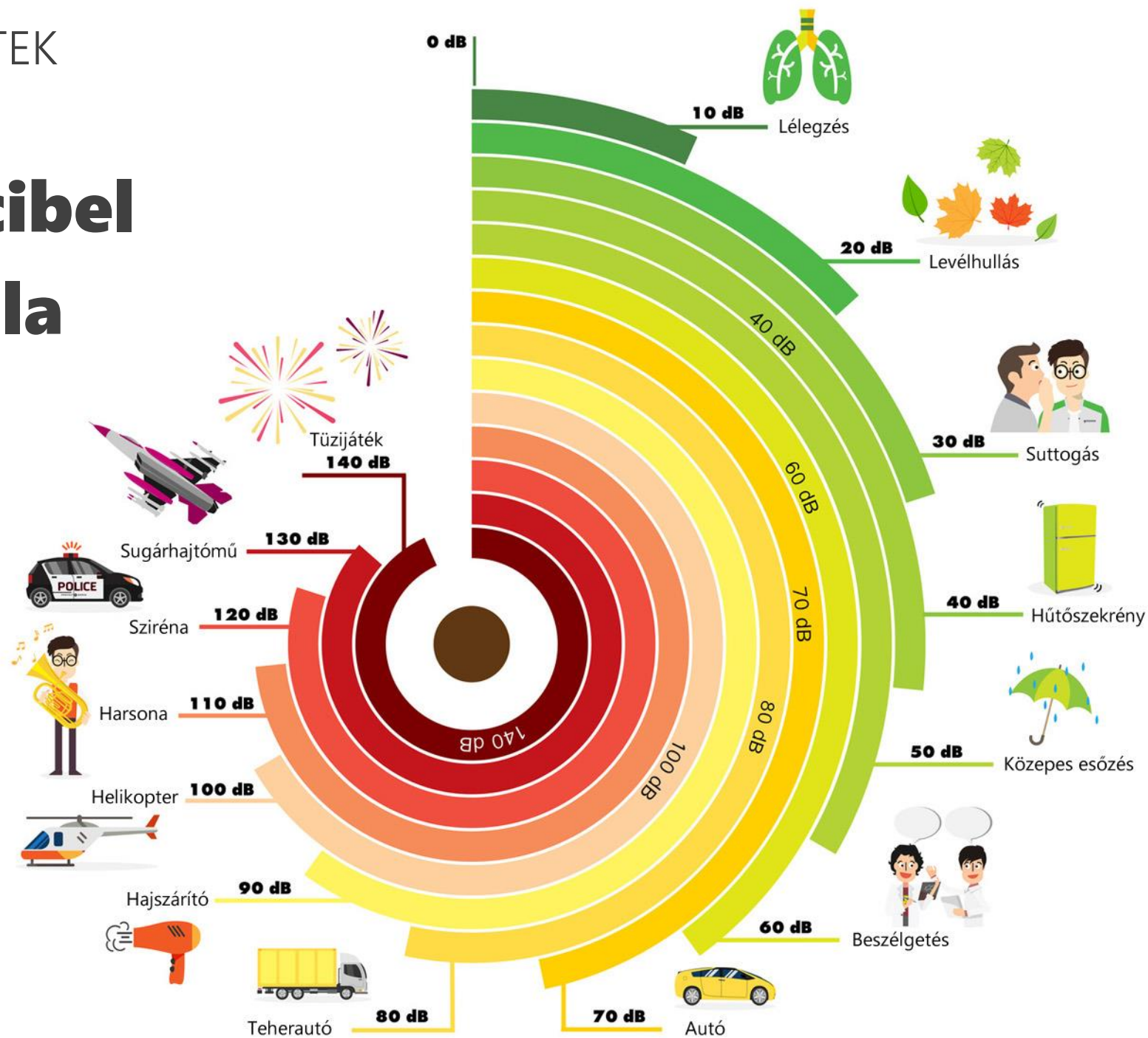
Jele:  $L_I$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

$$L_I = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}$$

SZINTEK

# decibel skála





HEARING DAMAGE

NHRA Dragsters



155-160dB

Gunfire



145-155dB

Fireworks



145-150dB



HEARING  
DAMAGE  
WITH REPETITION

Loudest Rock Concert



135-145dB

Loudest Human Scream  
(BY THE UK'S JILL DRAKE IN LONDON, 2000)



128dB

Vuvuzela



127dB

Trumpet



115dB

Baby crying



110dB



MOSTLY OK, BUT  
HEARING DAMAGE  
WITH REPEATED  
EXPOSURE

Michelle Larcher de Brito  
(THE LOUDEST TENNIS GRUNT!)



109dB

Loudest Recorded Burp



107dB

Mérőszám visszaszámítása:

$$L = 10 \cdot \lg 10^{0,1 \cdot L}$$

Szintek összeadása:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg(10^{0,1 \cdot L_1} + \dots + 10^{0,1 \cdot L_n}) = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_i}$$

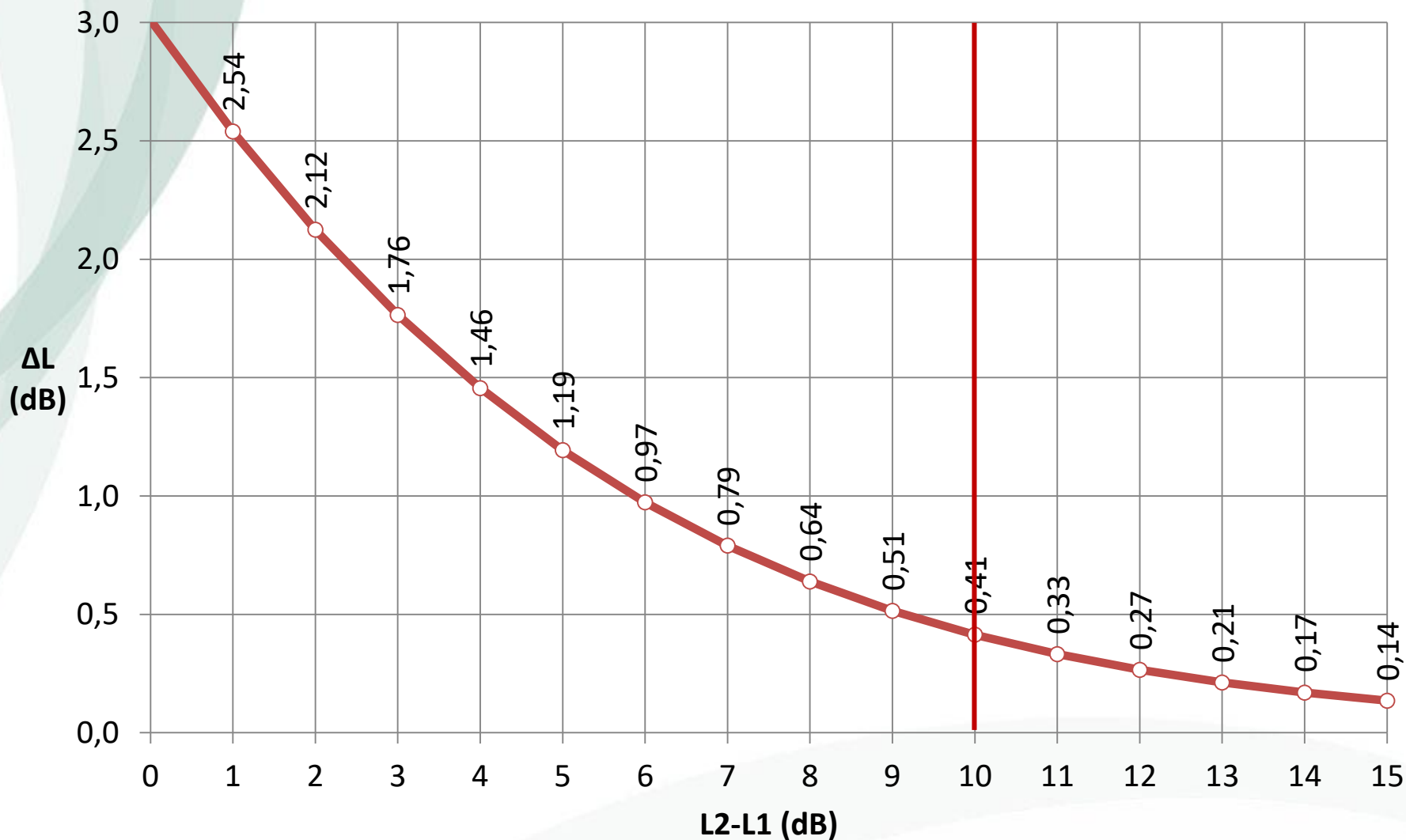
Szintek többszöröse:

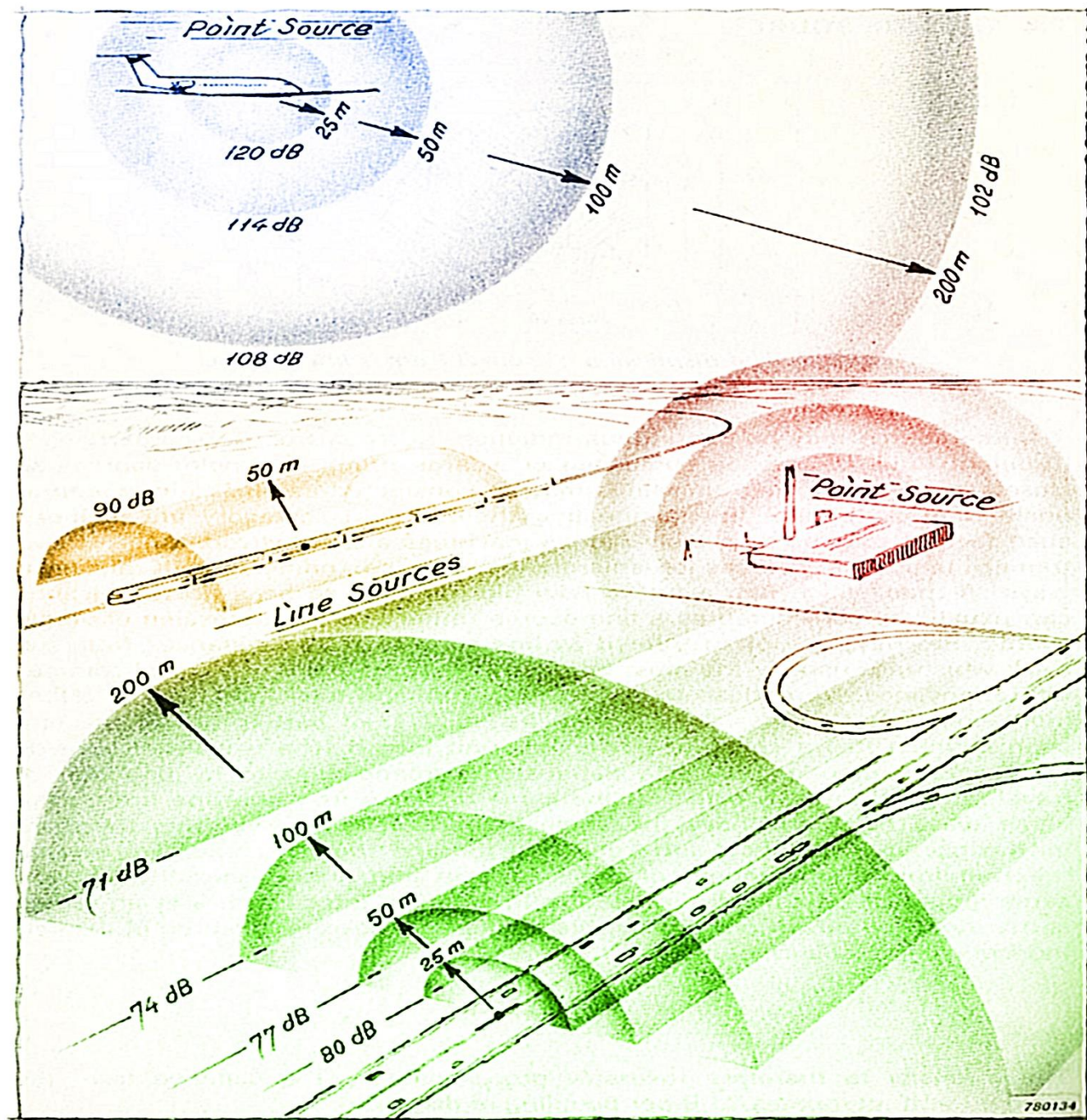
$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg(n \cdot 10^{0,1 \cdot L_1}) = L_1 + 10 \cdot \lg n$$

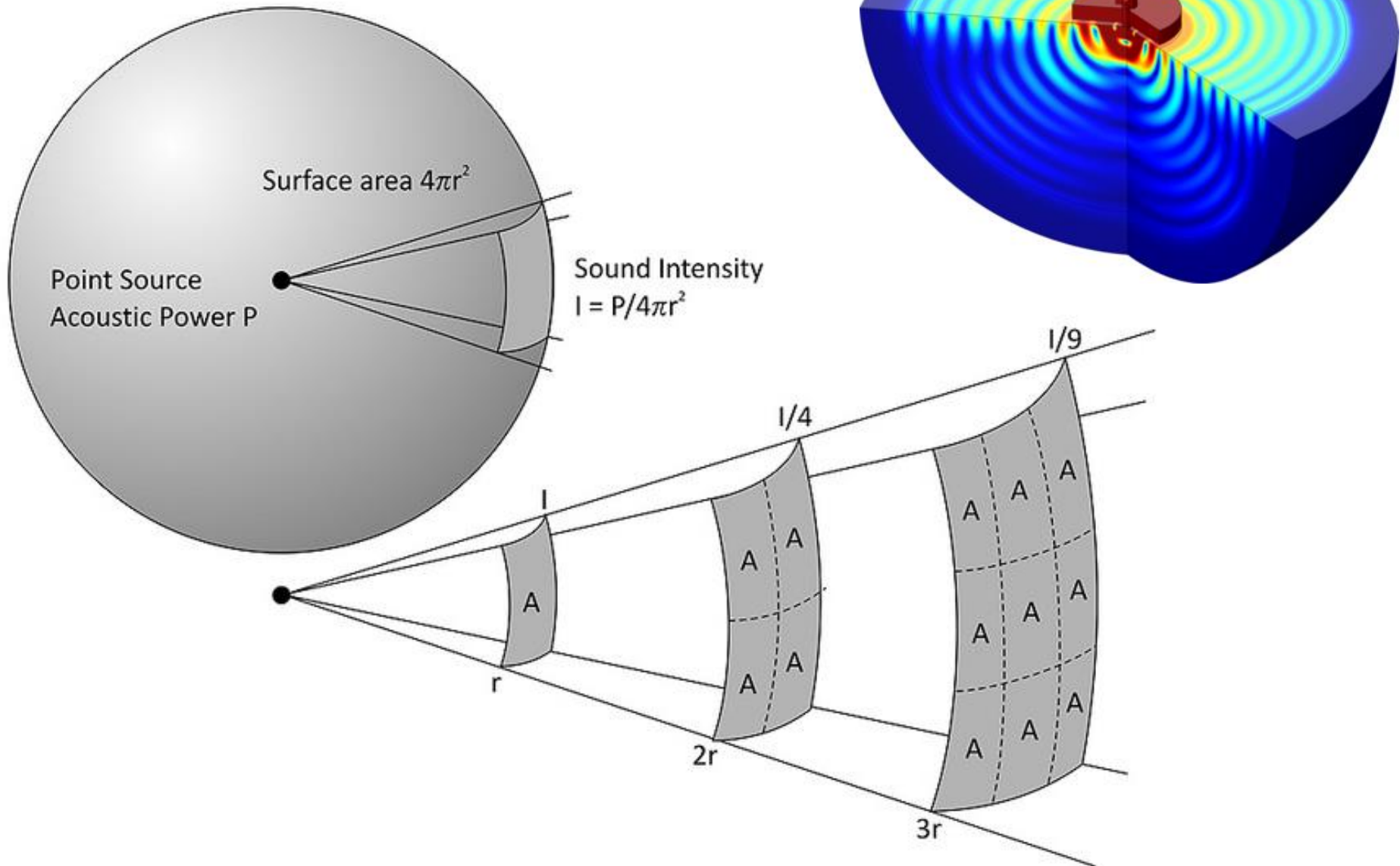
Szintek átlaga:

$$\bar{L}_{\Sigma} = 10 \cdot \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_i}$$

## Diagram két szint energetikai összegzéséhez







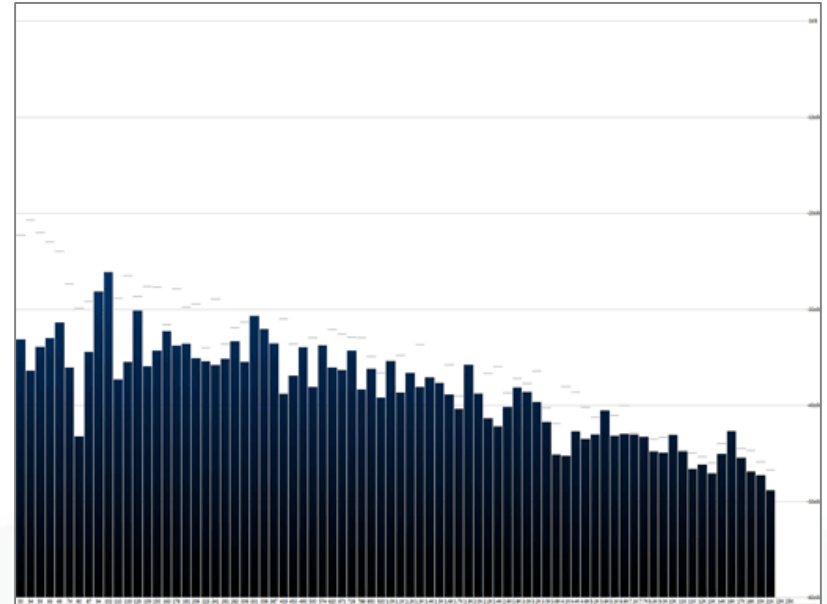
# FREKVENCIA ANALÍZIS

FREQUENCY  
BAND

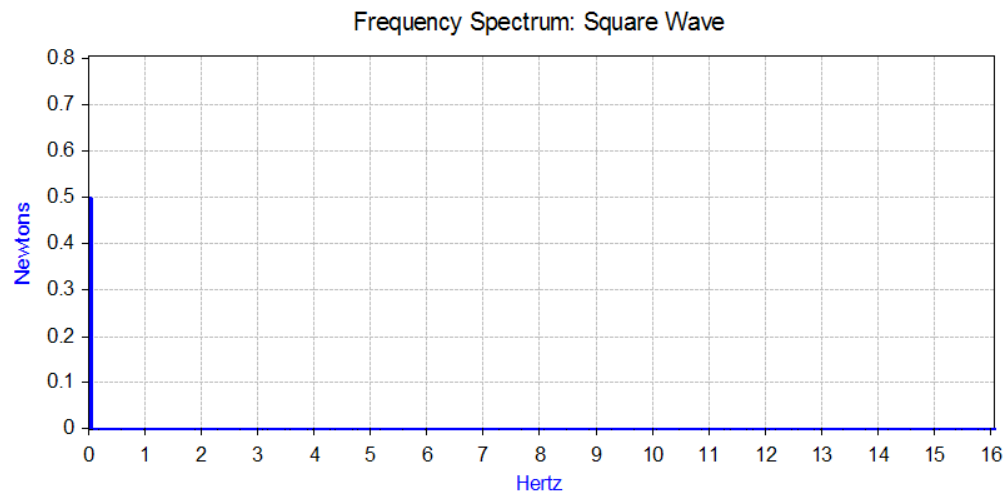
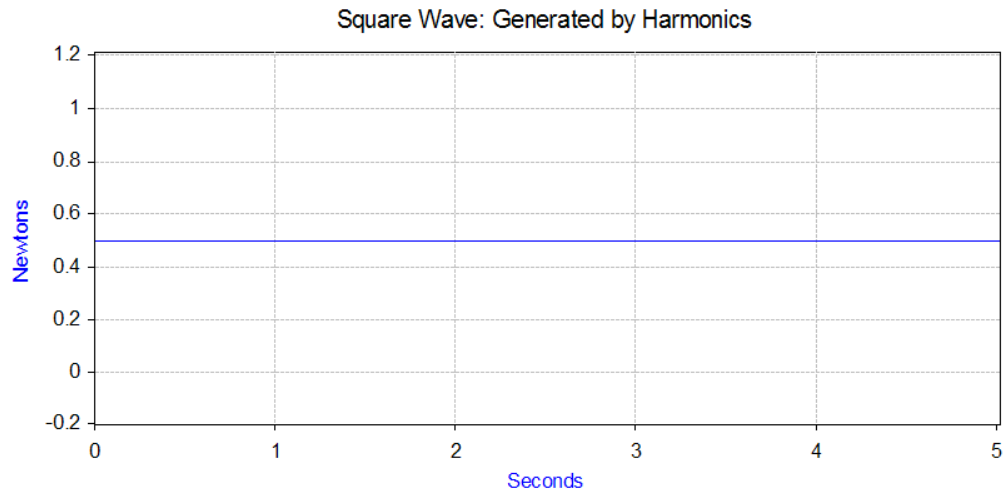


# FREKVENCIA ANALÍZIS

Hangszínekép (def.): az összetett hang (nem szinuszos *tisztahang*) részhangjainak jellemzésére használatos eljárás, mely a részhangok energiájának frekvencia szerinti megadása, gyakori megnevezése a *spektrum*. Megkülönböztetünk **vonalas** (diszkrét részhangokat tartalmazó) és **folytonos** (folytonosan eloszló részhangokat tartalmazó) hangszíneképet:

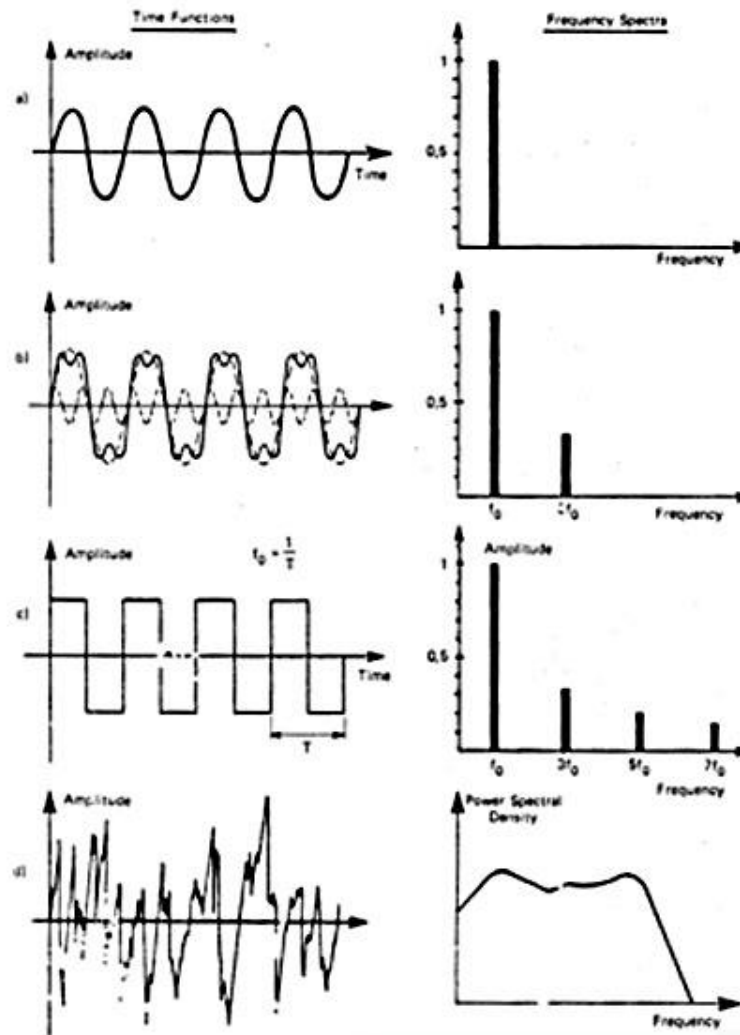


# FREKVENCIA ANALÍZIS



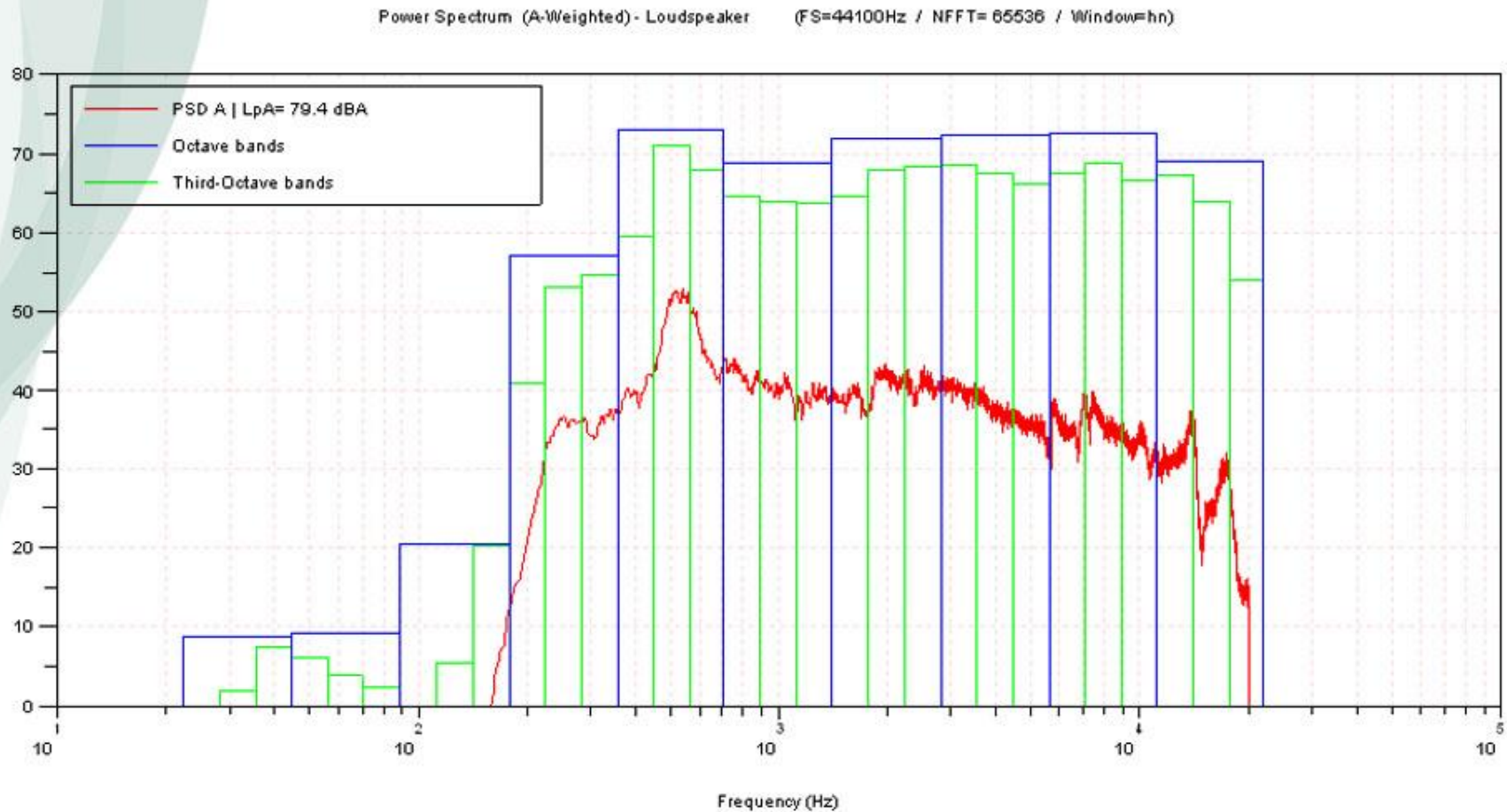
Színkép előállítása Fourier-transzformációval

# FREKVENCIA ANALÍZIS



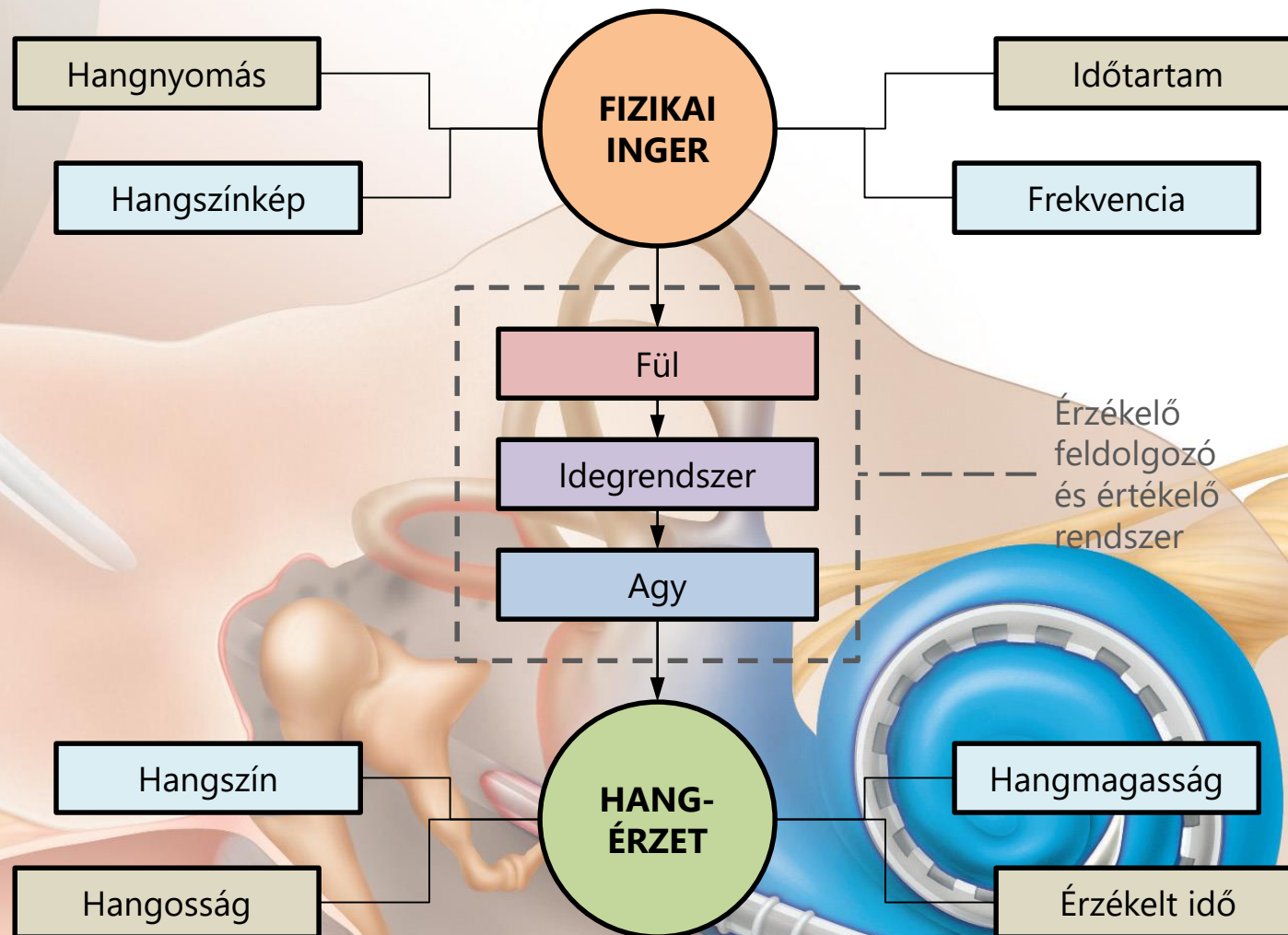
Jelformák és színeképek

# FREKVENCIA ANALÍZIS



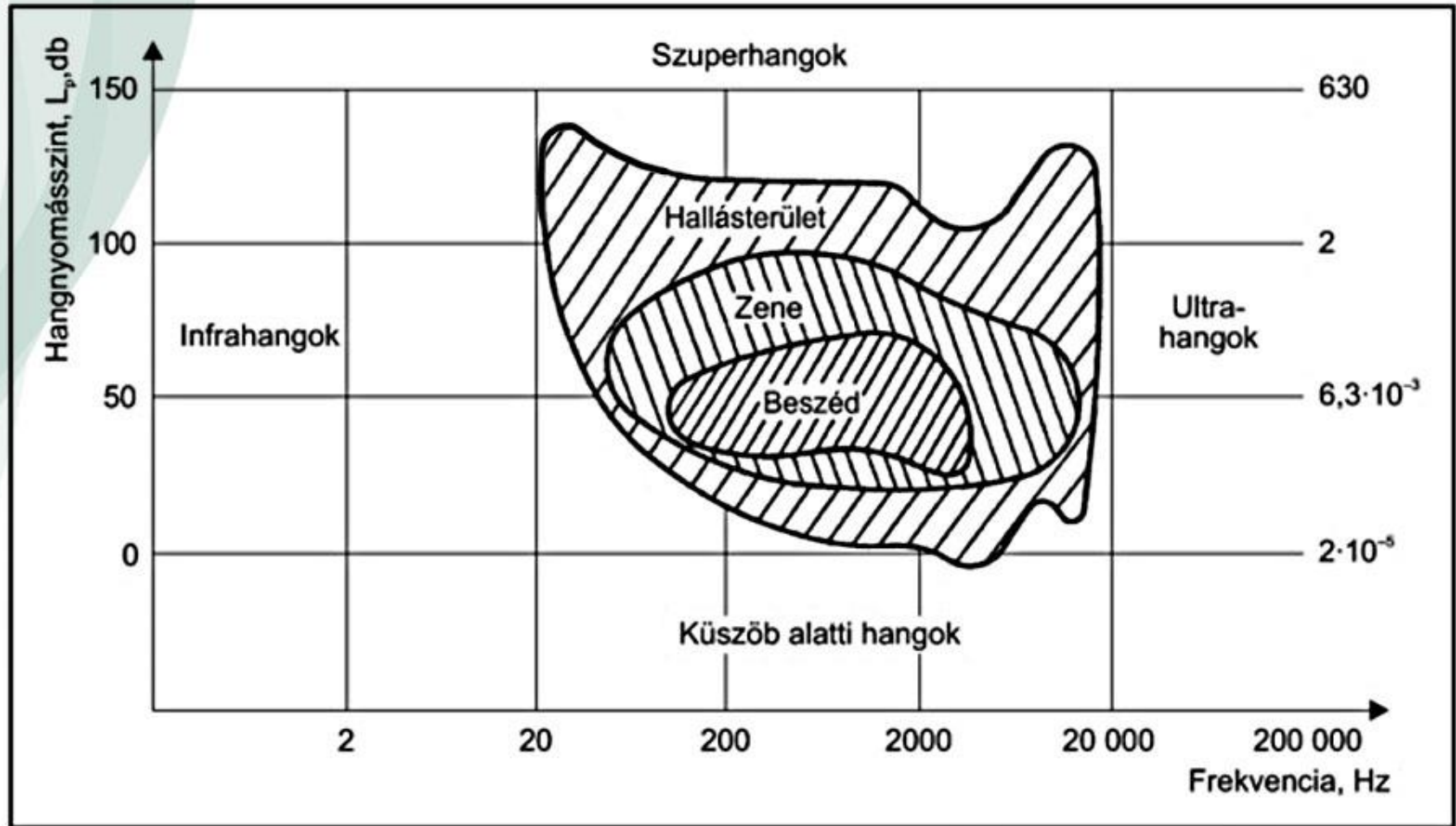
Oktáv és tercsáv spektrum felbontás

# FREKVENCIA ANALÍZIS



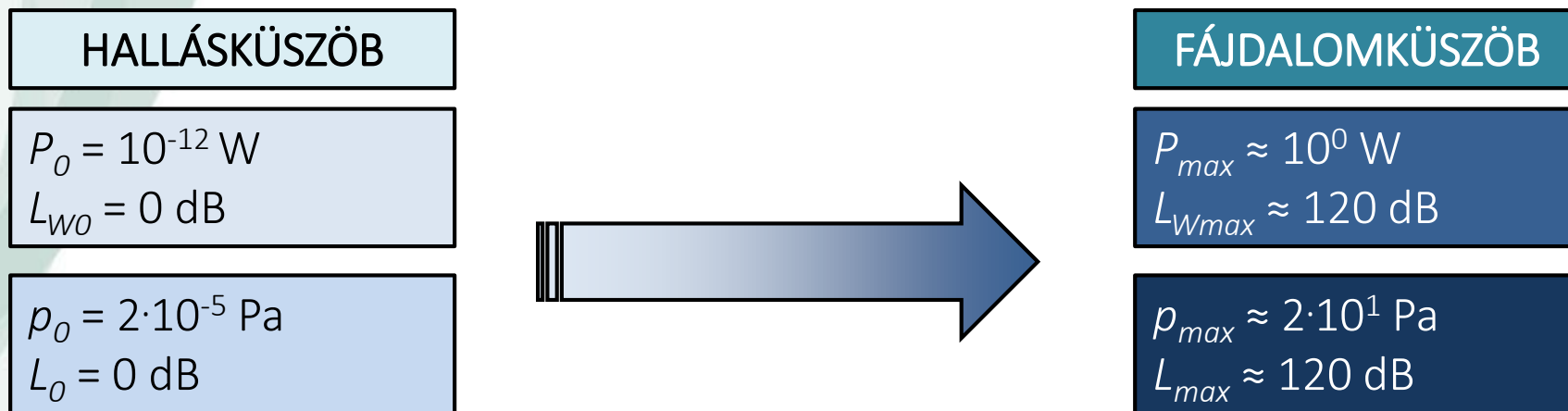
A hangérzet kialakulása (*Tarnóczy Tamás*)

# FREKVENCIA ANALÍZIS



Az emberi hallástartomány

Az emberi hallás dinamikatartománya:



Az emberi hallás frekvenciatartománya:

