

# Audiovizuální technika

přednášející: Libor Husník (audio)

Karel Fliegel (video)

# 1. část semestru – audio technika

1. Vnímání zvuku, fyziologická akustika (+ ukázky)
2. Šíření zvuku ve volném prostoru, zvukové signály
3. Elektroakustické měniče
4. Prostorová akustika
5. Ozvučování
6. Zpracování a záznam signálu (František Rund)

# Fyziologie sluchu

## 1. přednáška

Audiovizuální technika

# Budeme se zabývat technologiemi působící na naše smysly – sluch a zrak

Ale již dnes se dělají pokusy i s jinými smysly:

**Čichová informace** – např. sál v muzeu vůní v Grasse, kde k audiovizuálnímu programu se do prostoru přivádějí vhodně zvolené vonné esence

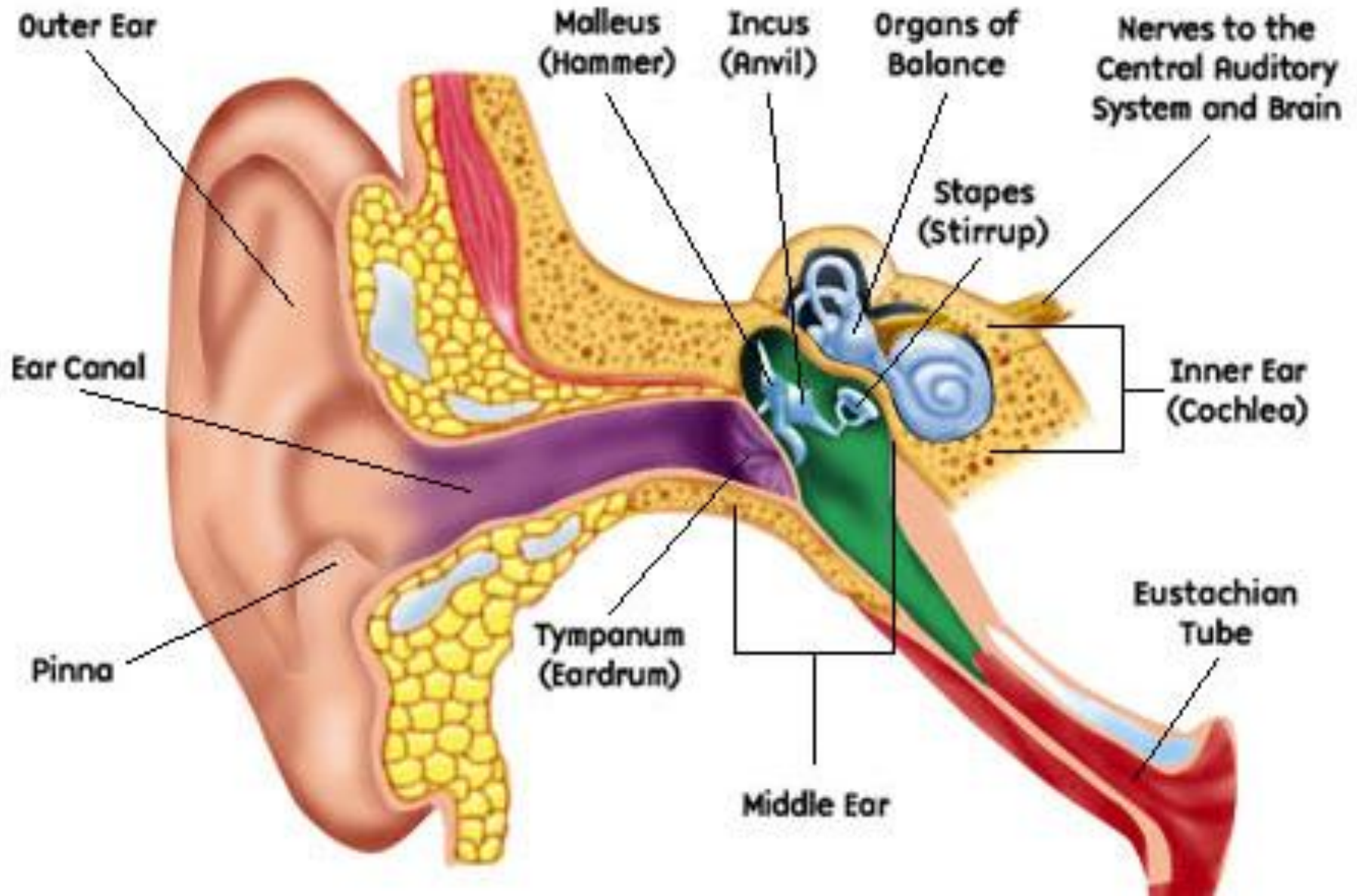
**Hmatová informace** – programované otřesy sedaček diváků („4D“ filmy)

Anatomie – jak to vypadá

Fyziologie – jak to funguje

Psychologická akustika – jak to na nás působí

# Anatomie lidského ucha



## **Vnější ucho:**

**boltec** (koncentrace zvukových vln, lokalizace)

**zvukovod** (součást ochrany, transport energie, 24-27mm, oválný průřez 8x6mm, rezonátor v oblasti řeči 1-4 kHz)

**bubínek** (membrána – akusticko-mechanický převod)

**Střední ucho:**

**kladívko – kovádlíka – třmínek**

(impedanční transformace 360x, tlak se zvyšuje cca 19x. Vyplývá z poměru ploch bubínku a oválného okénka)

**oválné okénko – vstup do vnitřního ucha**



## **Střední ucho:**

při vysokých hladinách hlasitosti se **svaly** (musculus tensor tympani, musculus stapedius) napnou, zmenší mechanický přenos soustavy a ochraňují tak sluchový systém před nadměrnou hlukovou expozicí. Je tam však určitá časová prodleva.

**Eustachova trubice** – vyrovnání tlaku před a za bubínkem

## Vnitřní ucho:

**hlemýžď** (mechanicko – elektrochemická  
přeměna) 2,5 závitů

tříkomorová stočená trubice (scala  
vestibuli, scala tympani, scala media),  
rozdělená bazilární a Reisnerovou  
membránou, mezi kterými je Cortiho  
orgán. Vše je v kapalině.

## Vnitřní ucho:

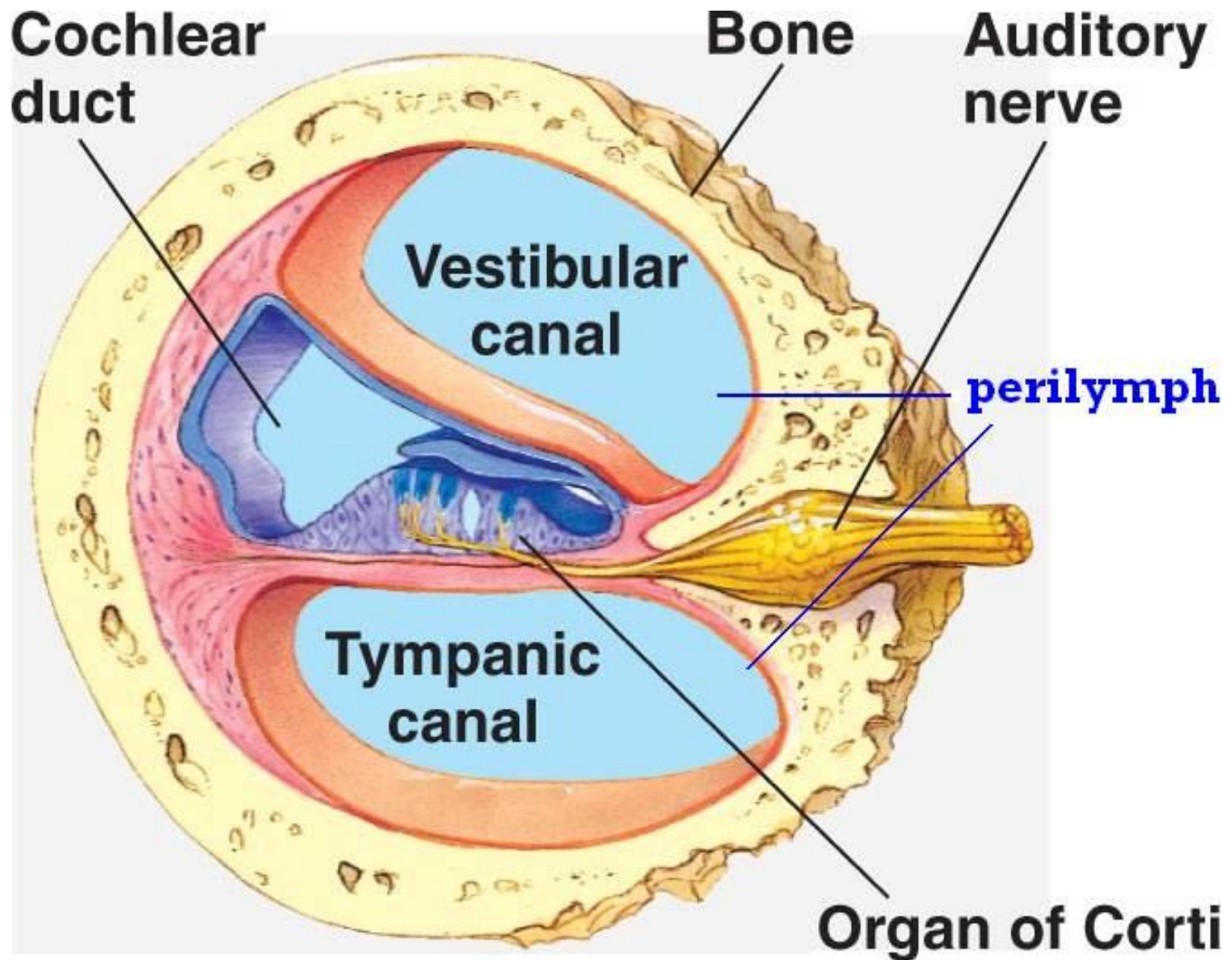
zvuk vstupuje oválným okénkem, vytváří postupnou vlnu po bazilární membráně, excituje vlasové buňky (součást Cortiho orgánu, jsou to senzorické neurony), počítky jsou pak přenášeny po nervech

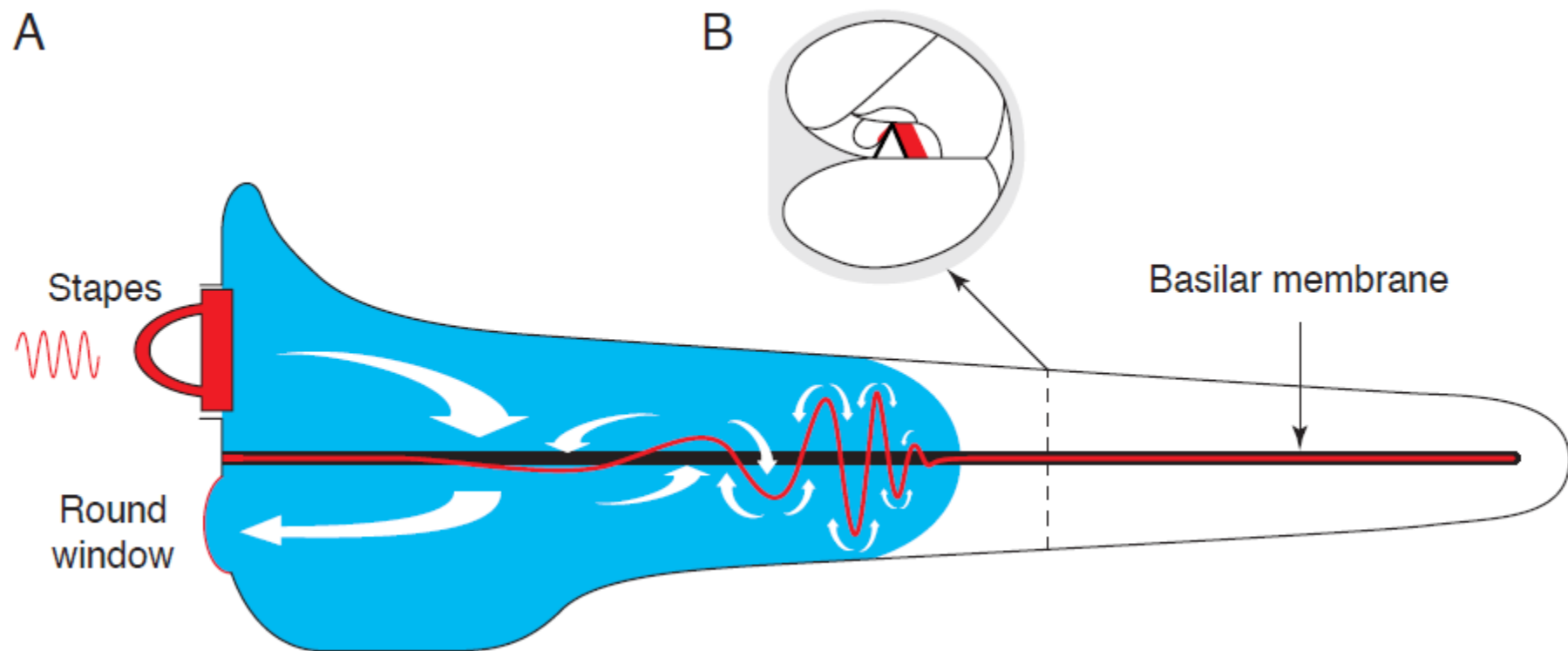
Na začátku hlemýždě se detekují vysoké tóny a na konci nízké

## **Vnitřní ucho:**

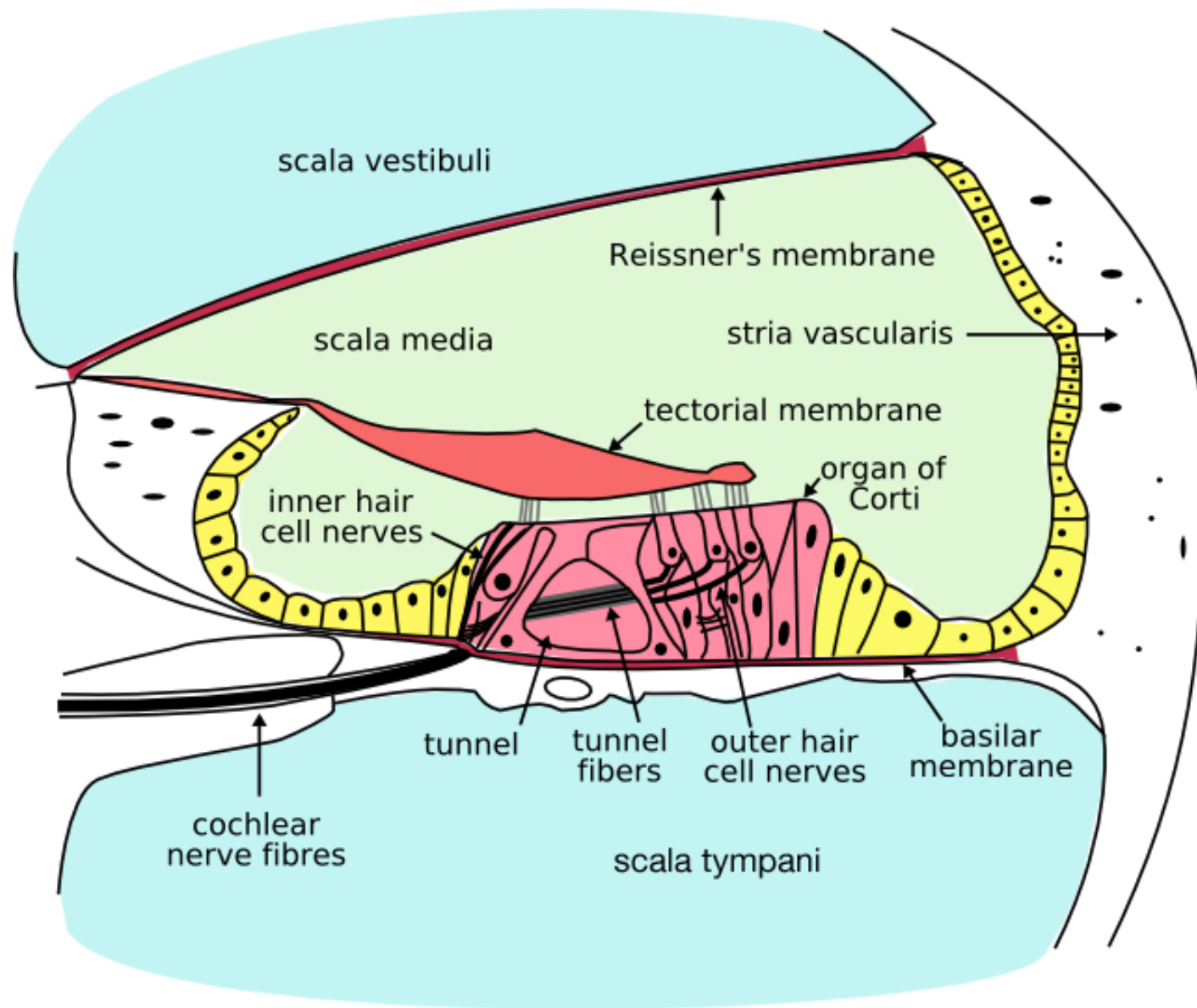
Na konci dráhy je okrouhlé okénku  
(pružná membrána, aby mohla  
nestlačitelná kapalina v hlemýždi kmitat)

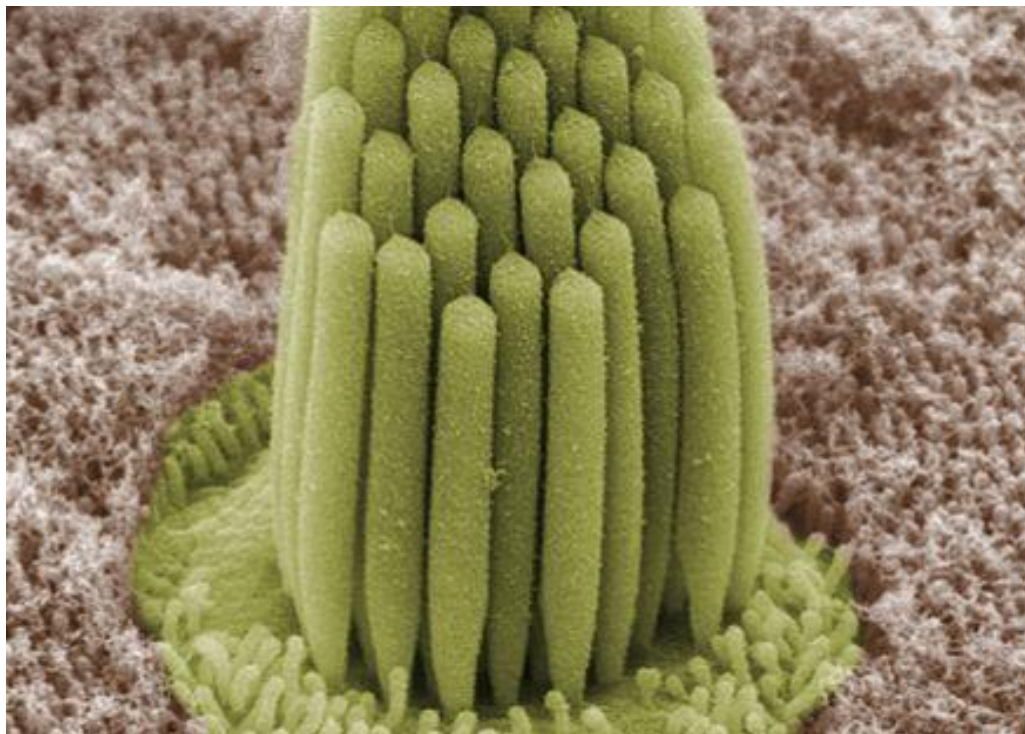
jak vše funguje – teorie slyšení





Rozvinutý zjednodušený hlemýžd' pro názornost.





Vláskové buňky



Vše je v pohybu znázorněno třeba zde....

<https://www.youtube.com/watch?v=qgdqp-oPb1Q>

...ale je mnoho dalších podobných....

# Teorie slyšení

1. Místní teorie (= rezonanční Helmholtzova teorie): každá část bazilární membrány je zodpovědná za zpracování určité části kmitočtového spektra  
problém – nevysvětluje přenos kmitočtů pod 120Hz

## Teorie slyšení – pokr.

2. Kmitočtová teorie – zvuk rozkmitá bazilární membránu a vyšlou se nervové impulzy, jejichž kmitočet odpovídá kmitočtu zvuku. Ale později se zjistilo, že není možno takto reprezentovat vyšší kmitočty

# Teorie slyšení

## 3. Teorie obrazů – vlasečnice jsou excitovány v obrazcích a z jejich tvaru usuzujeme na charakter zvuku

Dnes se považuje za pravděpodobné, že nf jsou vnímány dle kmitočtové teorie a vf dle místní teorie, oblast jejich platnosti se překrývá. Výzkum stále ve vývoji

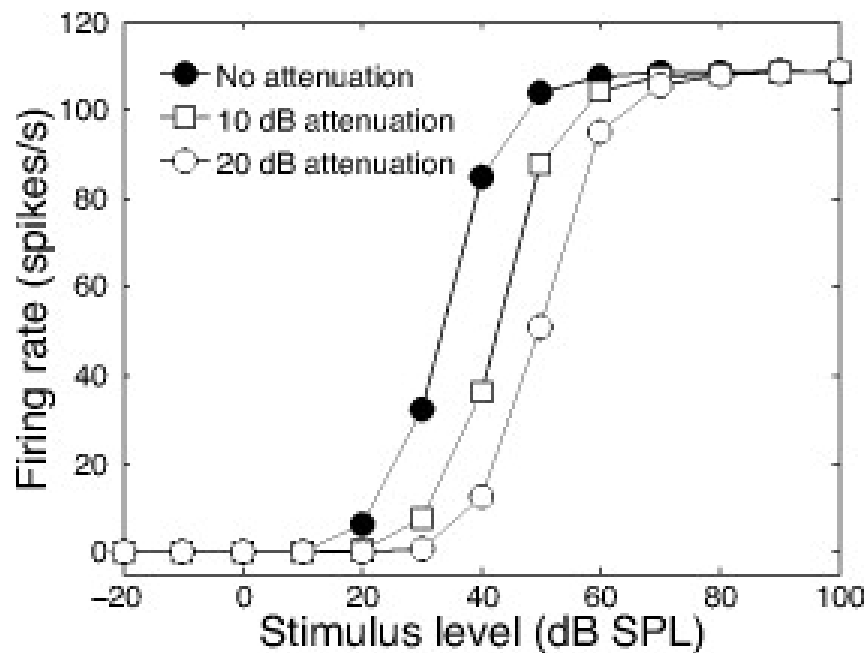
# Fyziologická akustika

Funkční vlastnosti sluchu

Základní charakteristikou je nelinearita sluchové dráhy

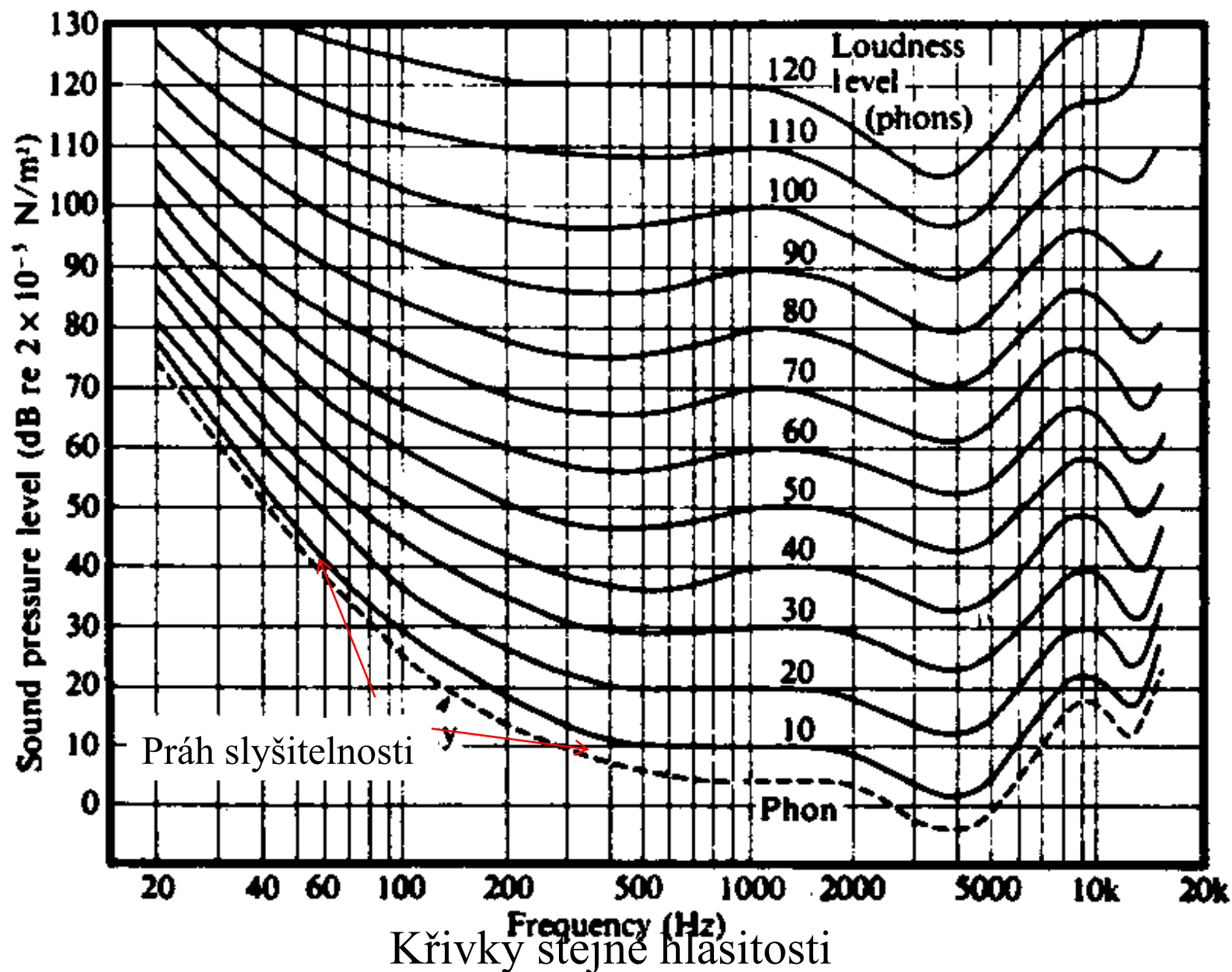
**Tedy sluchový vjem není lineární funkcí fyzikálního podnětu (zvuku)**

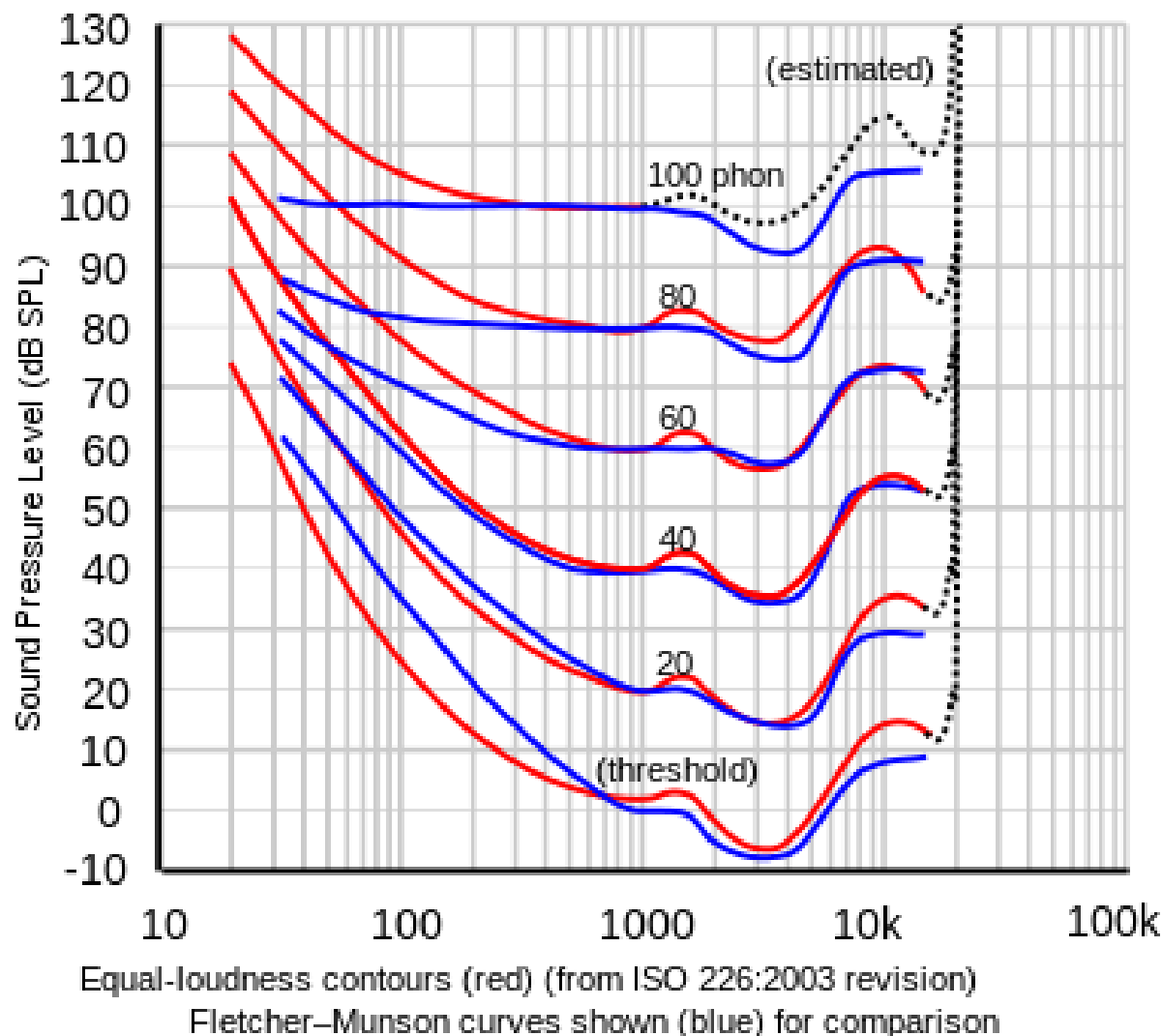
## Příklad příčiny nelinearity ucha



Vztah mezi hladinou akustického tlaku podnětu a akčním potenciálem hlemýždě  
(počet akčních potenciálů = spikes)

Asi nejdůležitější charakteristika lidského ucha

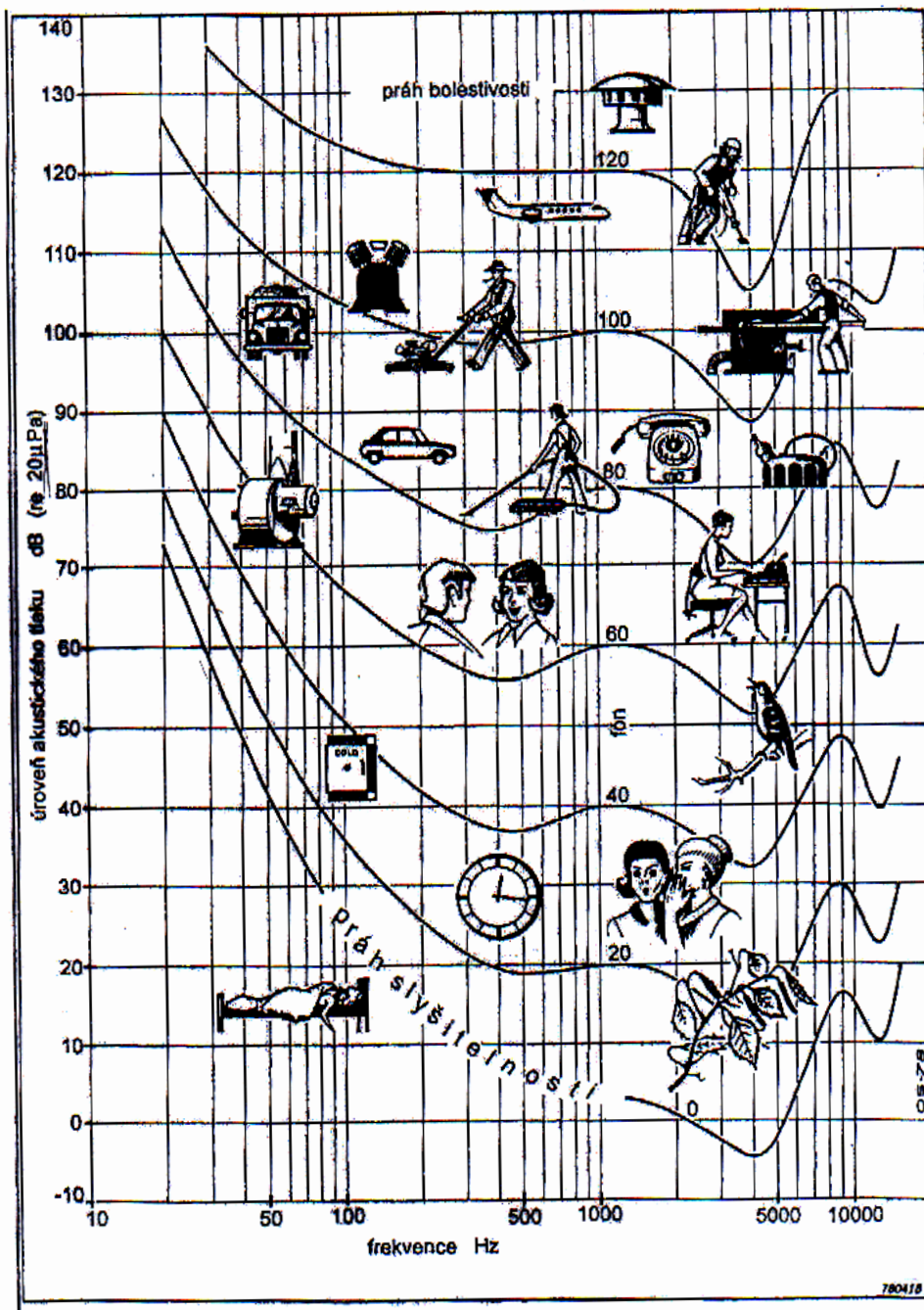




Porovnání Fletcher-Munsonových křivek stejné hlasitosti (modrá). Pro ně je práh slyšitelnosti na 1kHz 0dB.

Současné křivky stejné hlasitosti (červená) dle ISO už tuto „normalizaci“ nemají.

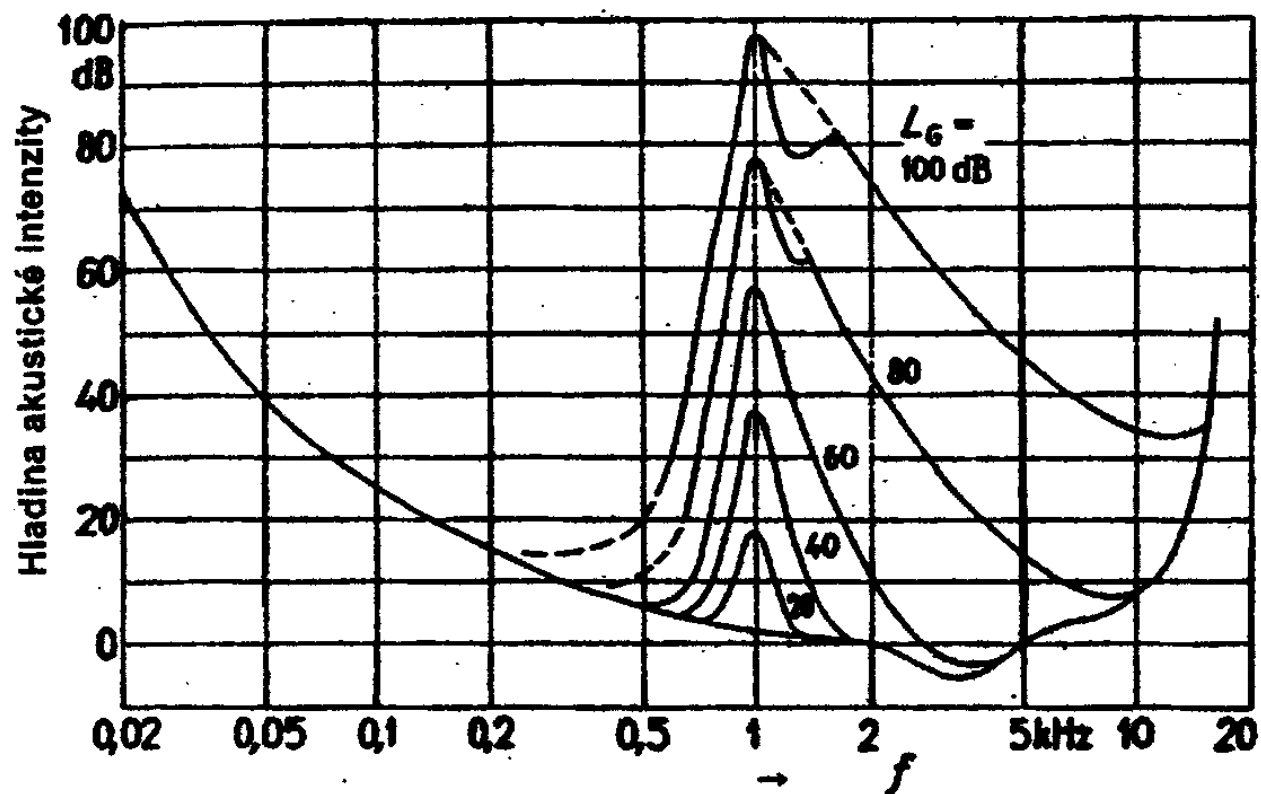




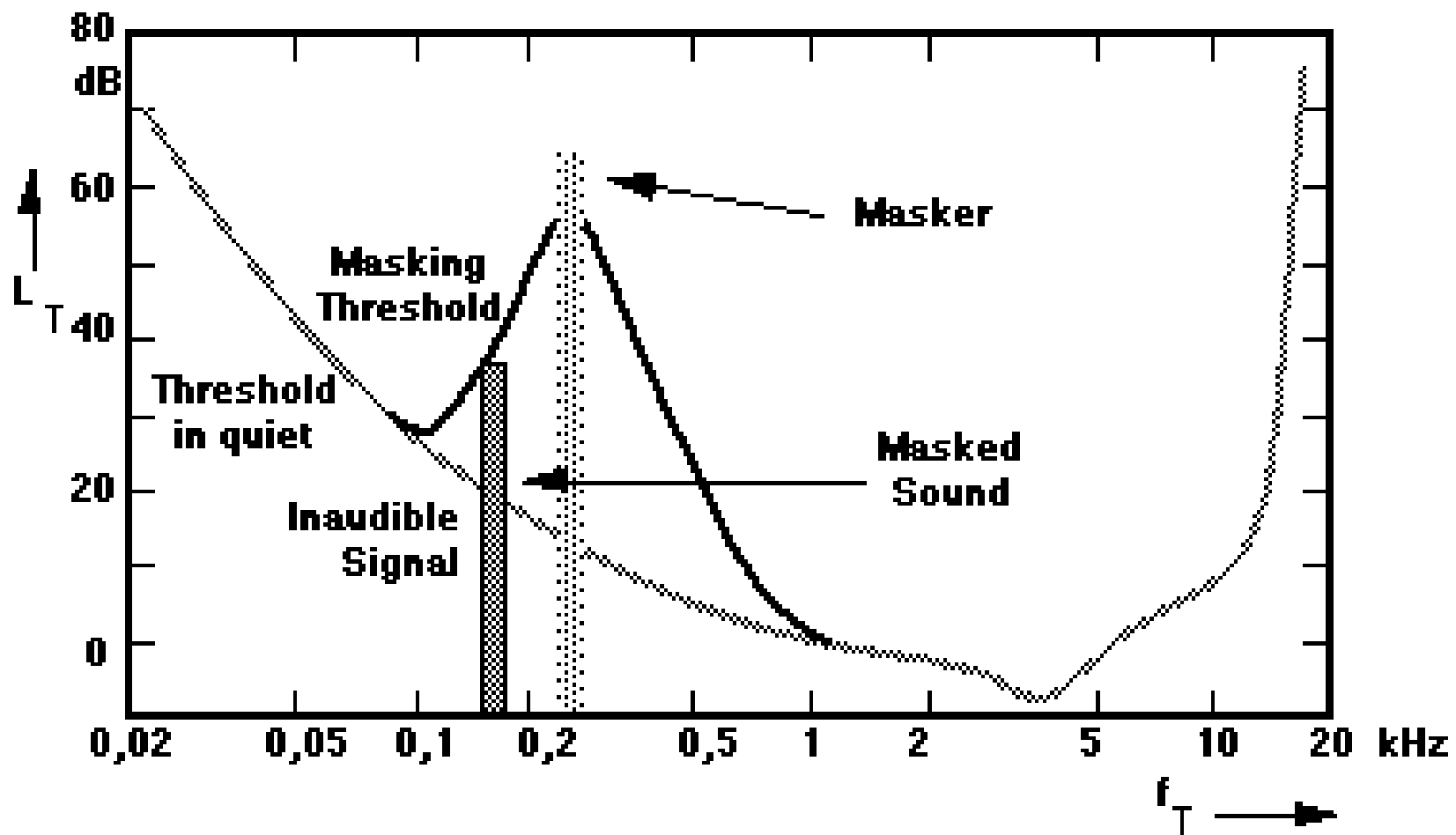
# Maskování

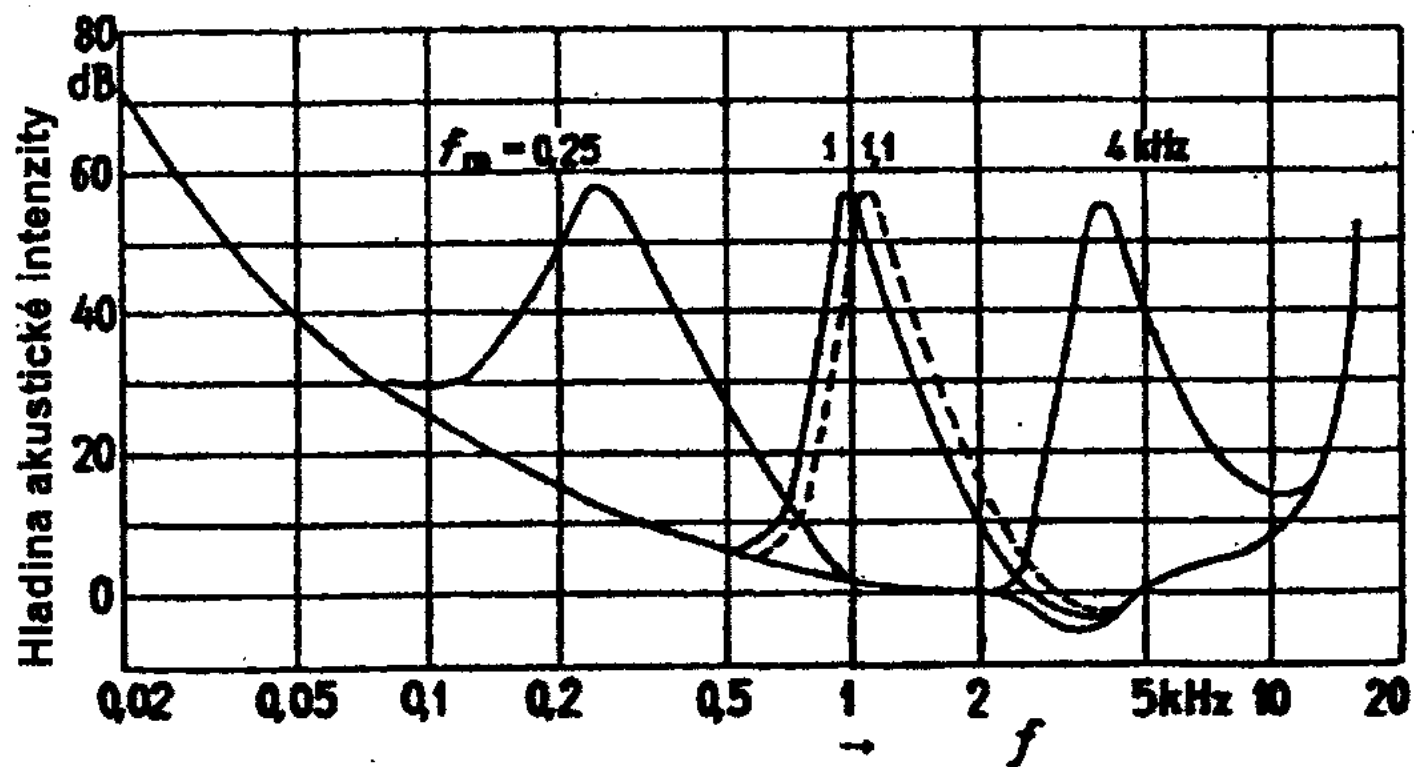
**zvýšení prahu slyšitelnosti působením určitého tónu (šumu) – maskujícího zvuku pro maskované tóny.**

Když jsou vláskové buňky excitovány určitým signálem (maskujícím), nejsou schopny přijímat další informace (od maskovaných signálů)



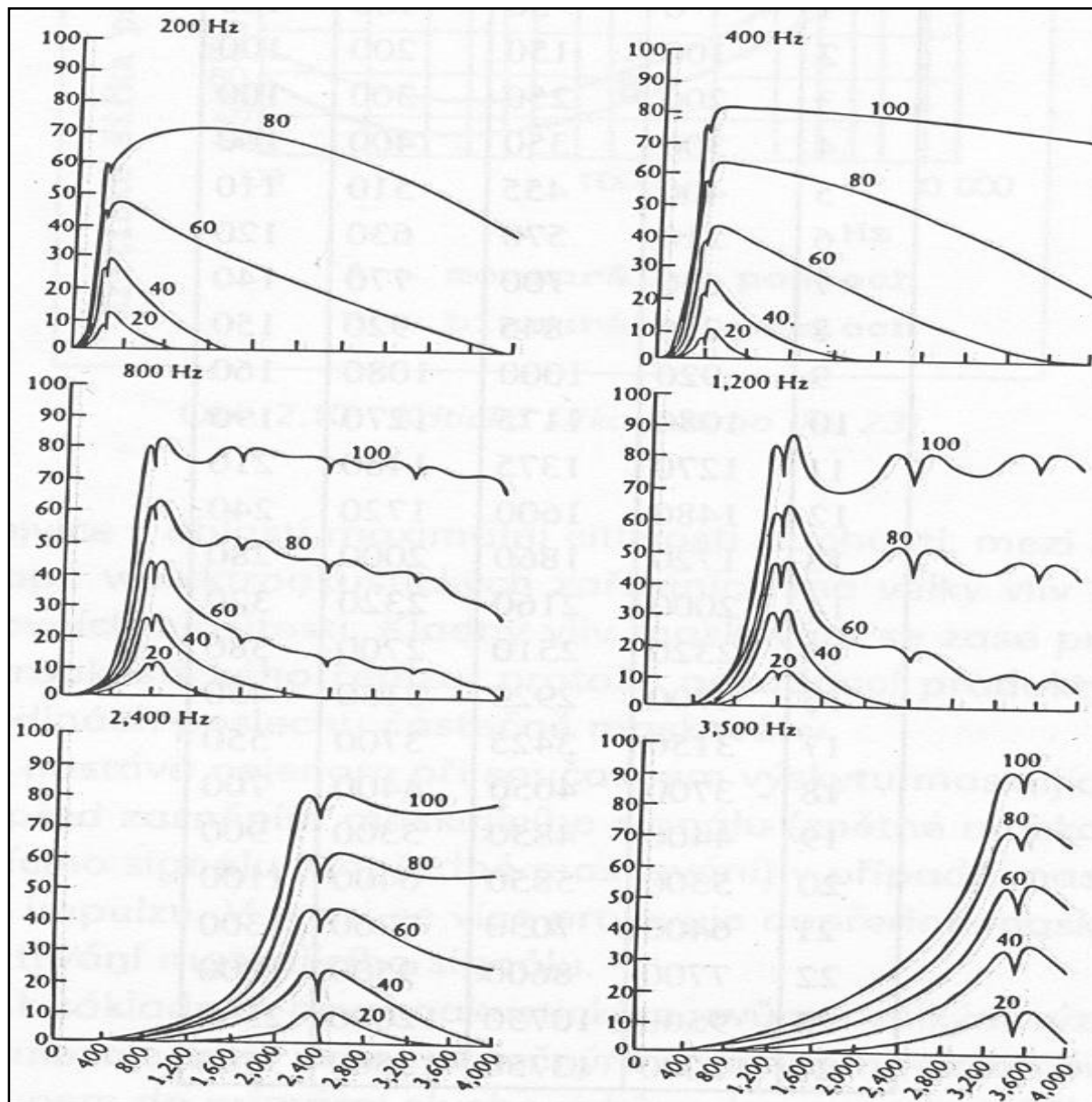
obr. 7: maskovací prahy úzkopásmových šumových signálů se šířkou pásma 90Hz se středem na frekvenci 1kHz, pro různé hladiny hlasitosti  $L_g$





obr. 8: Maskovací prahy pro různé střední frekvence

„klasický“ obrázek maskujících prahů slyšitelnosti



Ale dost často maskovací prahy vypadají o dost jinak než „trojúhelníkové kopečky“

# Časové aspekty maskování

## **zpětné a dopředné maskování**

K maskování nedochází jen při současné existenci maskujícího a maskovaného signálu, ale i při jejich nesoučasném působení na lidský sluch. Proto se rozlišuje **frekvenční a časové maskování**

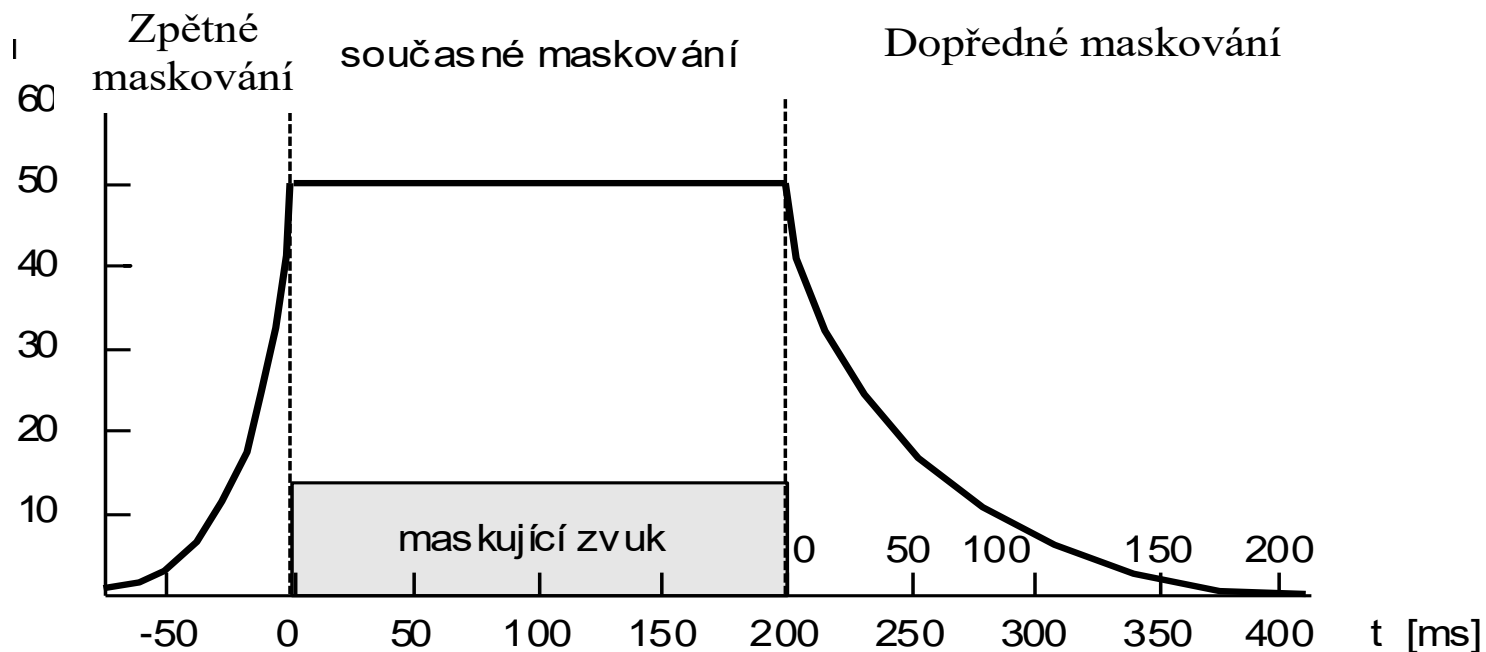
# Časové aspekty maskování

**zpětné maskování** – silnější signál, co následuje předběhne při zpracování hlasitější (vyvinuto pro obranu)

**dopředné maskování** – maskující signál zahltí sluchový systém po dobu delší než sám existuje

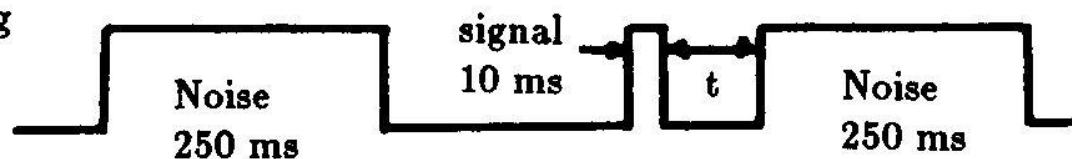


Hladina  
zvuku  
[dB]



Příklad časové závislosti míry maskování při délce signálu 200 ms

### Backward Masking



Finally, the masker is presented before the tone, again with  $t = 100$  ms, 20 ms, and 0.

### Forward Masking



Ilustrace poslechové ukázky dopředného a zpětného maskování

Proč je maskování důležité?

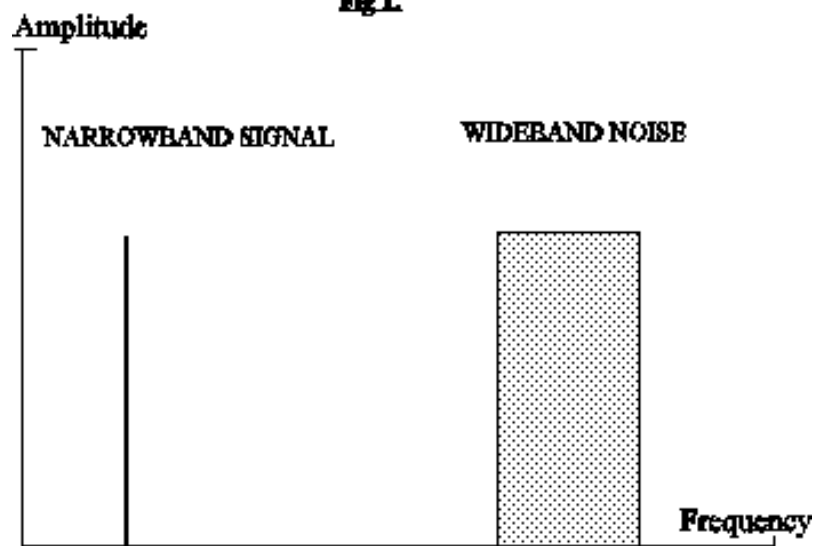
Třeba pro algoritmy komprese zvuku,  
které jsou založeny na potlačení  
(kódování s nižší rychlostí)  
redundantních a irelevantních složek.

# Kritická pásma

definice pomocí maskování  
či vjemu hlasitosti

- experimentálně

Fig 1.



Amplitude

Fig 2.

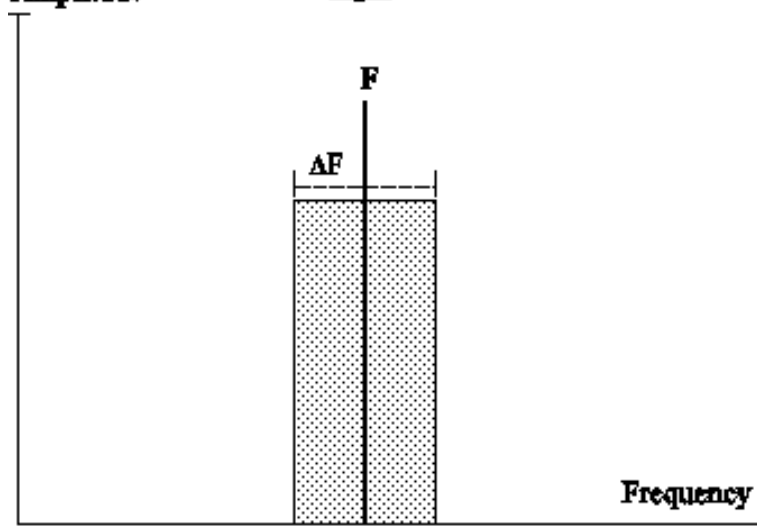
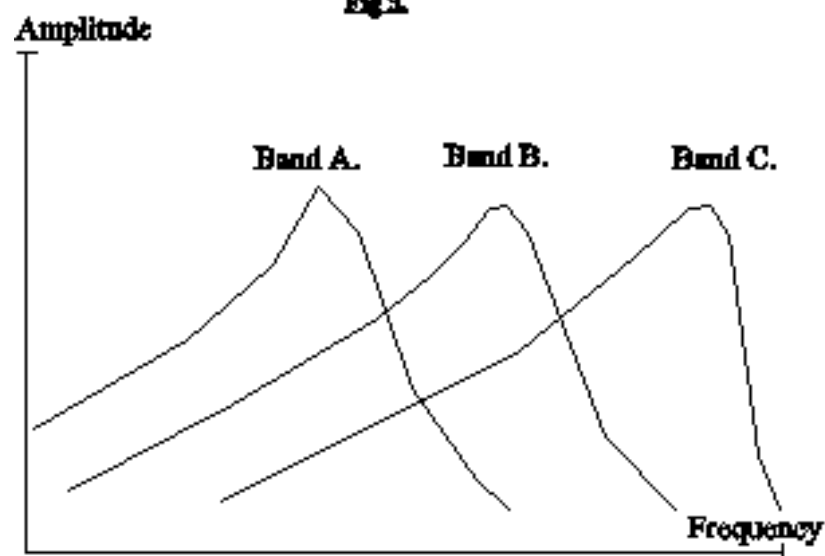
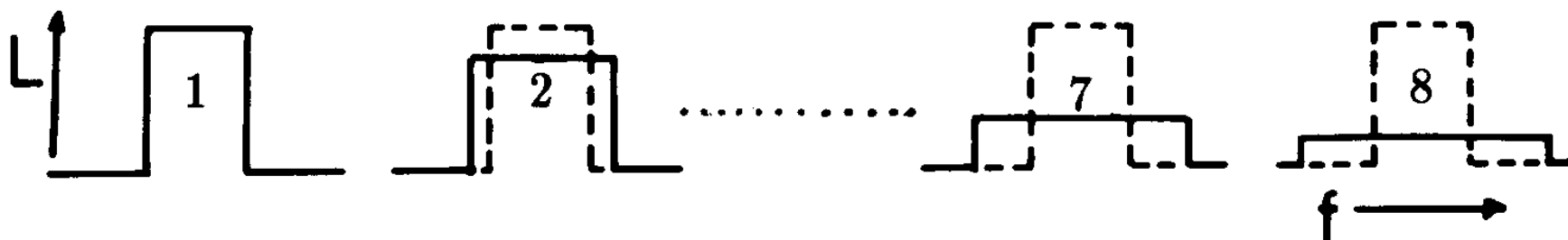


Fig 3.

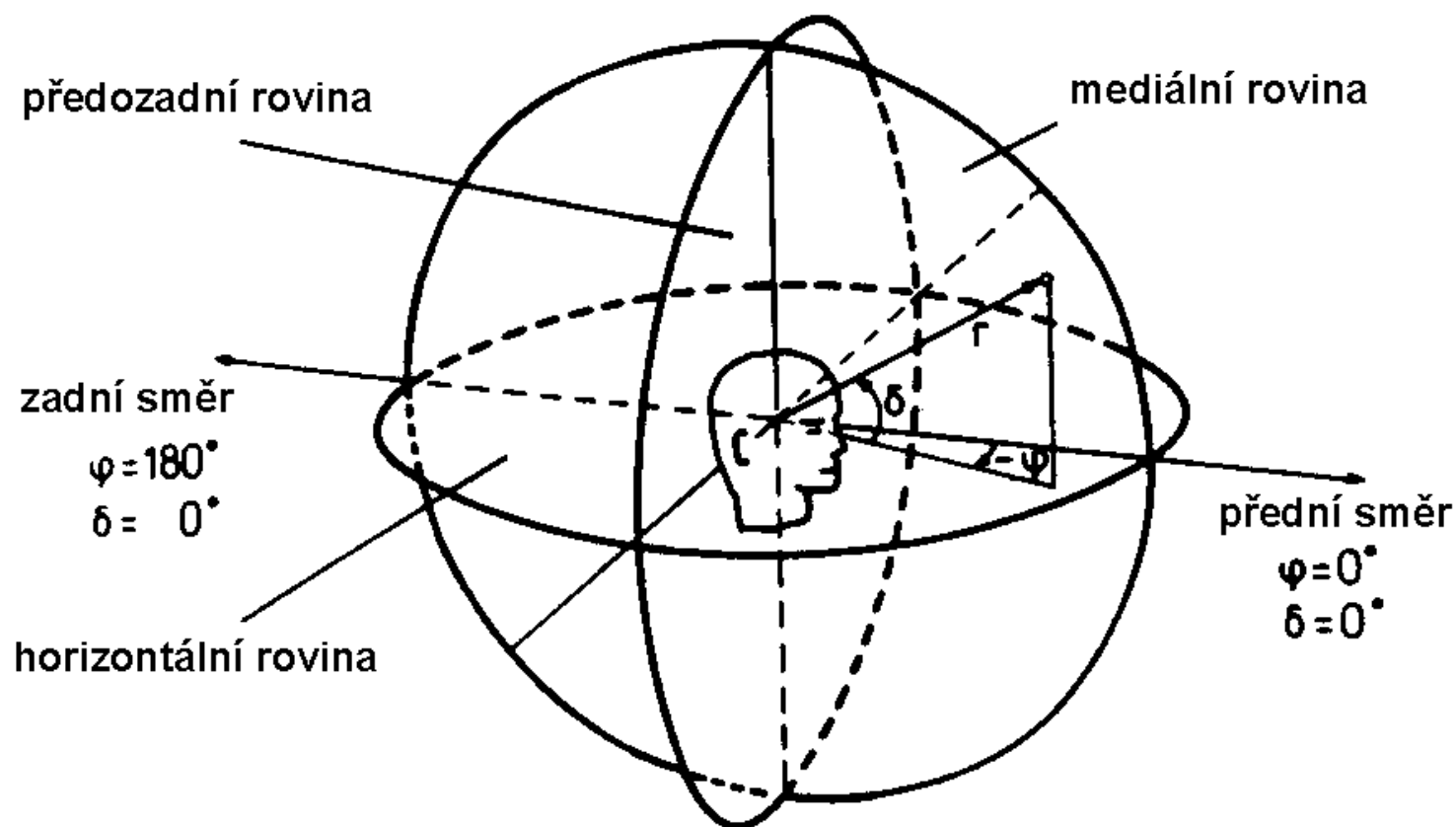


# Kritická pásma – důkaz pomocí hlasitosti



I když porovnávané signály mají stejnou energii, když šířka pásma přesáhne kritické pásmo, tak se jeví jako hlasitější

# Lokalizace zdrojů zvuku



Pro prostorový zvuk!!!!

# Princip lokalizace

v horizontální rovině:

časové a dráhové meziušní rozdíly

Zvuková vlna se šíří k hlavě, dopadne na bližší ucho, začne se šířit okolo hlavy, tím se různě tlumí různé kmitočty, tedy i intenzitní a spektrální rozdíly.

Problém s předozadní lokalizací.

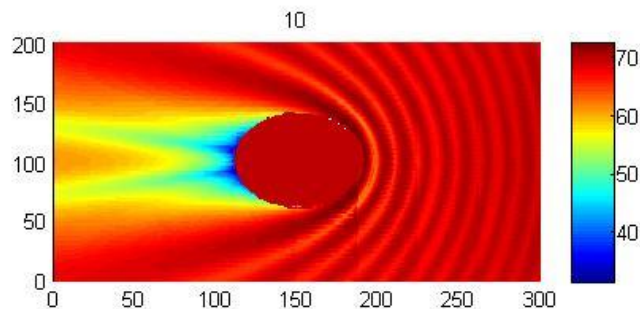
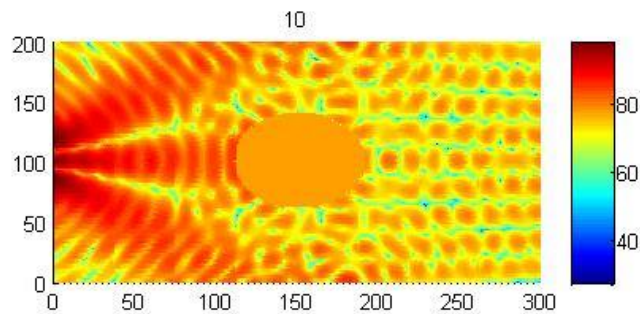
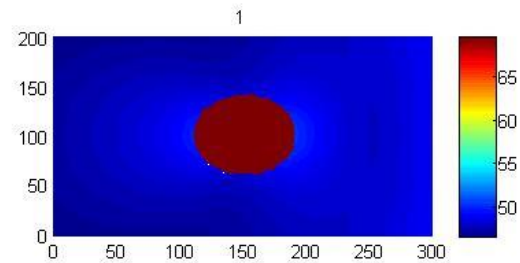
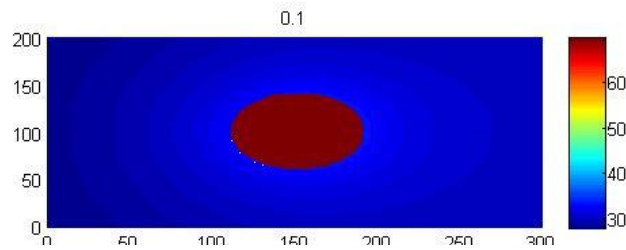
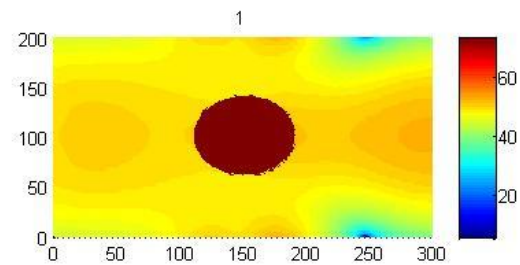
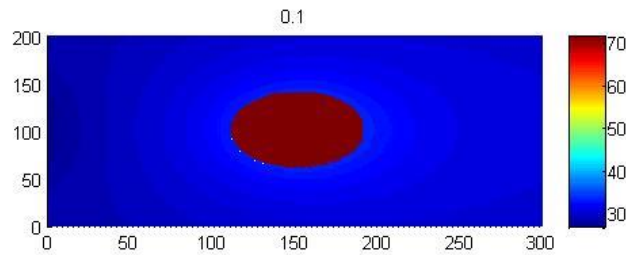
# Princip lokalizace

v mediální rovině: filtrace boltcem,  
zkušenost

vzdálenost: hlasitost (pouze v určitém  
rozmezí)



## Pole kolem koule (hlavy) v horizontální rovině pro $kR = 0,1 \quad 1 \quad 10$



Na nízkých kmitočtech jsou rozdíly zanedbatelné, se zvyšujícím se kmitočtem rostou

Haasův jev (jev precedence) :

pokud slyšíme dva signály ze dvou zdrojů, které začnou zářit postupně v intervalu kratším než 30 ms, musí být druhý zdroj o 7 – 10 dB silnější, abychom ho správně zaměřili (využití při dozvučování)

# Psychologická akustika

studium vztahu mezi fyzikálními veličinami a počitky (vjemy)

(problém, zda je rozdíl mezi počitkem a vjemem)

Stupně měření:

detekce (práh vjemu)

rozlišení (dvou rozdílných stimulů)

kvalifikace (o co se jedná)

kvantifikace (kolik toho je)

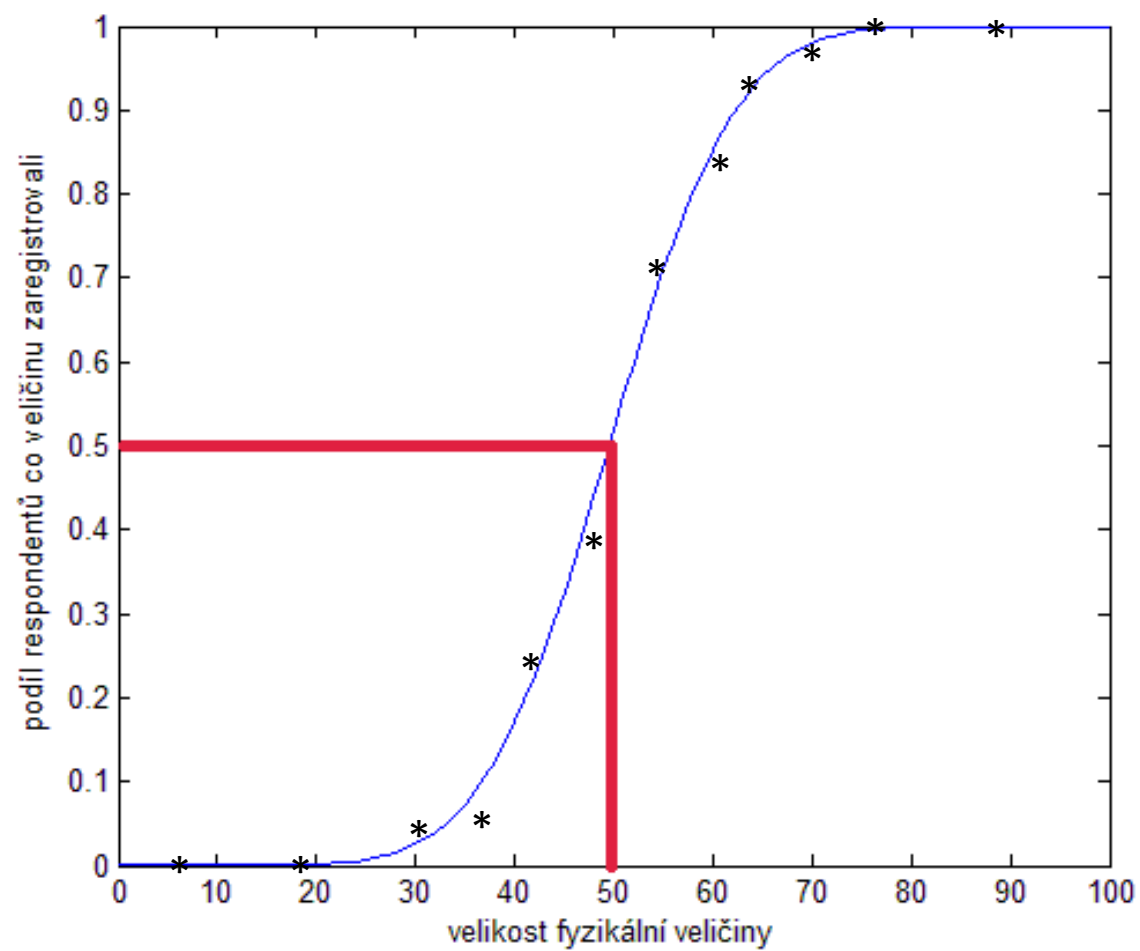
Zjišťování prahu (slyšitelnosti)

= přechod od hodnocení vjem je / vjem není

Psychometrická funkce

$$F(Ni) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Ni} \exp\left[-\frac{(Ni - m)^2}{2\sigma^2}\right] dNi$$

práh pro dané podmínky je hodnota  $F(N) = 0,5$



\* Naměřené hodnoty

## Weberův zákon a Fechnerův zákon (jsou dva!!!!)

S – stimulus (fyzikální veličina, fyzikálně měřitelná)

R – response (počitek, zjistitelný pouze psychometrickými metodami)

---

Weberův zákon:  $\Delta S = K.S;$

K...Weberův poměr, konstanta (skoro)

---

Fechnerův zákon:  $R = C.\log S$

S je měřen v násobcích prahové hodnoty

---

Skutečnost, že člověk vnímá logaritmicky vedla k definici decibelu a příslušných hladin:

$$L_I = 10 \cdot \log(I/I_0), I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

$$L_W = 10 \cdot \log(W/W_0), W_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

$$\underline{L_p = 20 \cdot \log(p/p_0), p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}}$$

Pro rovinnou vlnu se tyto hodnoty rovnají.

A proč DECibely? Člověk rozliší změnu hladiny přibližně 1 dB.



JND (just noticeable difference), právě postřehnutelný rozdíl

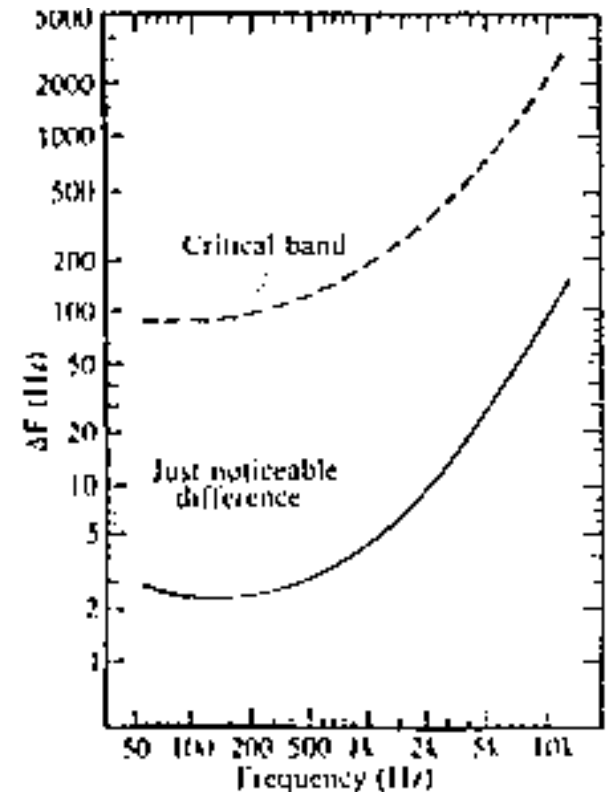
pro hladinu akustického tlaku:

kmítočtově závislé, pro každý subjekt jiné, přibližně 1-2 dB

pro kmítočet:

kmítočtově závislé, v pásmu nejvyšší

citlivosti přibližně 2-3 Hz



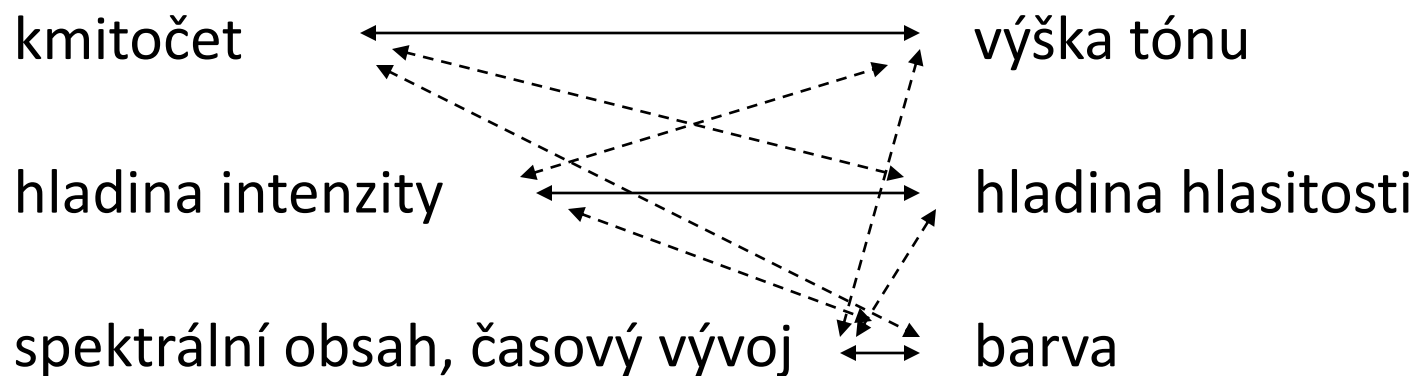
## Časové prahy slyšení

registrace změny:	2ms
sluchový vjem, maskování	10 ms
uvědomění si signálu	50 ms
vjem hlasitosti	100 ms
vjem výšky	25-250 ms

## Princip akustické neurčitosti

$\Delta f \cdot \Delta t = \text{konst.}$  (konst = 0,1, závisí na intenzitě a obálce)

## Vztah mezi fyzikálními a psychoakustickými veličinami



Hlasitost  $H[\text{son}]$  = je subjektivní hlasitost referenčního tónu 1000 Hz při hladině signálu 40 dB. Pokud se tento tón jeví 2x hlasitější, je jeho hlasitost 2 sony.

Nad hladinou hlasitosti 40 Ph odpovídá zdvojnásobení hlasitosti v sonech vzestup hladiny hlasitosti přibližně o 10 Ph. Pod isofonou 40 Ph je toto zvýšení o 5 Ph. (Tedy limity Weberova a Fechnerova zákona)

Hladina hlasitosti  $S = 33,2 \cdot \log H + 40$

