



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

SLUCH (úvod) / HEARING (introduction)

JAN ŠVEC

Katedra experimentální fyziky, Př.F. UP Olomouc

Literatura / Literature:

tyto přednášky a doplňková literatura / these lectures and additional literature:

Sedláček K. Základy audiologie, Praha: Státní zdravotnické nakladatelství, 1956.

Mrázková E, Mrázek J, Lindovská M. Základy audiologie a objektivní audiometrie. Medicínské a sociální aspekty sluchových vad, Ostrava: Ostravská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2006.

Palková Z. Fonetika a fonologie češtiny, Praha: Universita Karlova, vydavatelství Karolinum, 1994.

Young ED. Physiological acoustics. In: Springer handbook of acoustics, T. D. Rossing (ed), New York, NY: Springer, 2007, p. 429-458.

Moore BCJ. Psychoacoustics. In: Springer handbook of acoustics, T. D. Rossing (ed), New York, NY: Springer, 2007, p. 459-502.

DRUHY ZVUKŮ

Zvuky se dělí na

tóny (periodický průběh vlny) a šumy (neperiodický průběh vlny).

Tóny se dělí na čisté a složené.

Čisté tóny jsou zvuky, při kterých výchylka, zvukový tlak a rychlost mají sinusový průběh v čase. Jsou to nejjednodušší tóny. Jsou plně charakterizovány frekvencí f [Hz] a amplitudou. Spektrum čistých tónů vykazuje zesílení pouze na jedné frekvenci.

Složené tóny jsou zvuky, ve kterém je tvar zvukové vlny periodický ale není sinusový. Spektrum složených tónů je harmonické - skládá se ze základní frekvence a jejích celočíselných násobků (tzv. svrchních harmonických tónů). Svrchní harmonické tóny zodpovídají za barvu zvuku. Barva zvuku umožňuje od sebe odlišit dva různé tóny na stejné frekvenci (klavír, cimbál, kytara, trubka atd.)

Šumy jsou složené zvuky, které jsou neperiodické. Jejich spektrum je neharmonické, může být spojitě.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

SLUCH

Orgánem sluchu je ucho.

Ucho reaguje na změny tlaku prostředí (je to velice citlivý mechanoreceptor) a převádí je na nervové impulsy, které jsou poté analyzovány v mozku.

Lidské ucho vnímá zvukové vlny v rozsahu frekvencí c. **20 – 16 000 Hz** (20 000 Hz u mladých lidí).

U zvířat jsou tyto frekvenční rozsahy jiné.
(Kočka: 60 – 65 000 Hz, pes: 15 – 50 000 Hz,
možnost použití ultrazvukové píšťalky).

Některá zvířata využívají ultrazvuk k orientaci
(netopýr).



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

ZÁKLADY PSYCHOAKUSTIKY

Psychoakustika studuje vztahy mezi fyzikálními vlastnostmi zvuků a jejich percepčními atributy.

Příklady:

Akustický tlak **vs.** Hlasitost

Frekvence **vs.** Výška tónu

Frekvenční spektrum **vs.** Kvalita zvuku (tmavý, světlý, kulatý, ostrý, a pod.)

Akustický tlak **vs.** Práh slyšení

Akustický tlak & frekvence **vs.** Sluchové pole



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNÍMÁNÍ PODNĚTU: FECHNER-WEBEROVA POUČKA

(Sedláček, 1956, str.60)

Pro vyjádření závislosti mezi intenzitou podnětu a intenzitou počitku se uvádí vztah, který objevili Fechner a Weber:

Aby bylo možno rozpoznat změnu intenzity podnětu (ΔI), musí být tato změna úměrná výchozí intenzitě (I). Čím větší je intenzita podnětu (I), tím větší změnu (ΔI) je třeba provést aby ji bylo možno postřehnout.

Matematicky vyjádřeno: $(\Delta I / I) = K$, kde K je konstanta.

Minimální postřehnutelná změna intenzity ($\Delta I / I$) se nazývá **Diference limen**.

Z této poučky také vyplývá, že hlasitost zvuku je úměrná logaritmu poměru intenzity zvuku k intenzitě sluchového prahu a vyjádřit tuto poučku ve zjednodušené formě:

Intenzita počitku je úměrná logaritmu intenzity podnětu (viz dále).

VNÍMÁNÍ PODNĚTU: FECHNER-WEBEROVA POUČKA

(Sedláček, 1956, str.60)

Podle F-W poučky vnímáme přírůstek intenzity tónu po určitých kvantech. Tyto minimální přírůstky jsou úměrné hodnotě minimálního přírůstku intenzity (diference limen) $\Delta I/I$.

Tedy pro vjem minimálního přírůstku intenzity ΔX platí:

$$\Delta X = c * \Delta I/I$$

(kde c je konstanta vyjadřující přímou úměrnost a $\Delta I/I$ je diference limen pro intenzitu).

Vjem finální intenzity tónu X dostaneme sečtením všech minimálních přírůstků od prahu sluchu I_0 .

$$X = \sum(\Delta X) = \sum(c * \Delta I/I).$$

Po převedení na integrál dostaneme

$$X = c * \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = c * (\ln I - \ln I_0) = c * \ln \frac{I}{I_0}$$

Tedy vjem intenzity tónu je úměrný logaritmu poměru intenzity zvuku k intenzitě prahu zvuku.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Hladina akustické intenzity a Hladina akustického tlaku

Na základě Fechner-Weberovy poučky byly zavedeny objektivní veličiny s dekadickým logaritmem a jednotkou decibel [dB]

Hladina akustické intenzity L_I (SIL, sound intensity level)

$$L_I = 10 \log (I / I_0) \text{ [dB]}$$

Hladina akustického tlaku L_p (SPL, sound pressure level).

$$L_p = 10 \log (p^2/p_0^2) = 20 \log (p/p_0) \text{ [dB]}$$

kde $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ a $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ jsou prahové hodnoty akustické intenzity a akustického tlaku.

Pozn: $I = p \cdot v = p \cdot p / Z_0 \sim p^2$ (kde v je akustická rychlost molekul vzduchu a Z_0 je akustická impedance vzduchu)



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

PRÁH SLYŠENÍ

Nejnižší slyšitelná hladina akustického tlaku při absenci jiných zvuků.

Získána průměrováním výsledků od mnoha mladých lidí.

Platí pro čisté tóny (sinusový signál).

0 dB odpovídá:

- 1) intenzitě zvuku 10^{-12} W/m^2 a
- 2) akust. tlaku $20 \mu\text{Pa}$.

Největší citlivost sluchu je kolem **3-4 kHz**.

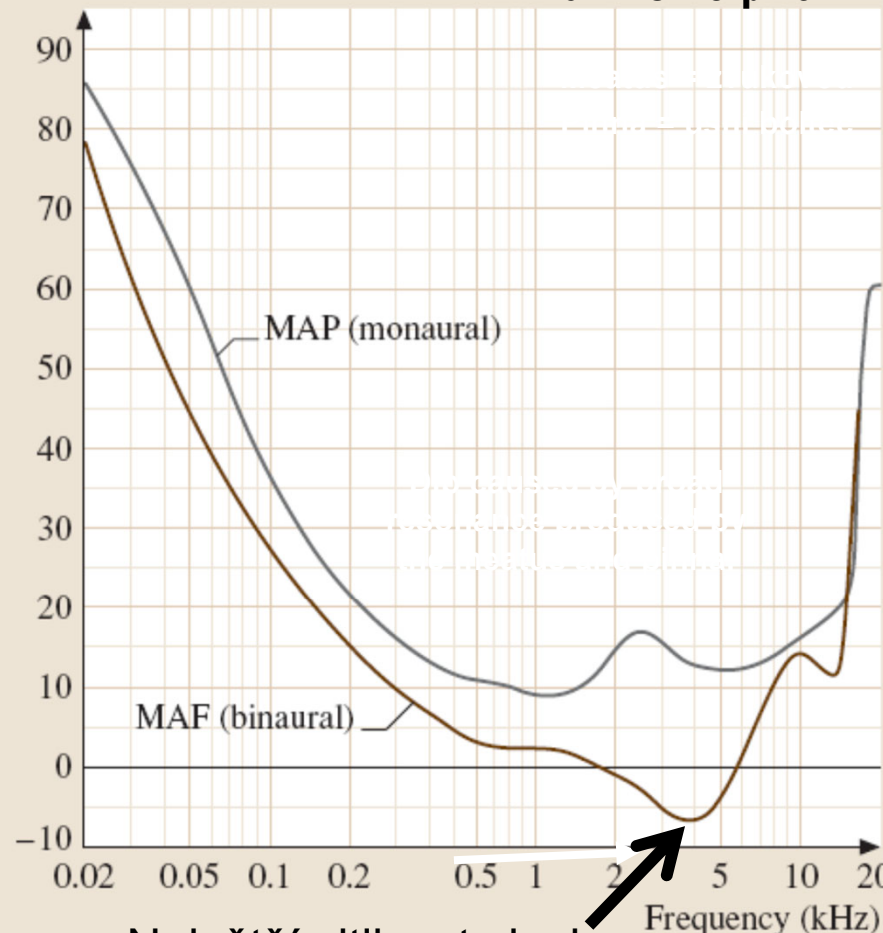
MAP (minimum audible pressure / minimální slyšitelný tlak): Hladina akustického tlaku měřená v bodě blízko bubínku. [MONAURAL]

MAF (minimum audible field / minimální slyšitelné pole): měření hladiny akustického tlaku bylo provedeno poté co byl posluchač odstraněn ze zvukového pole, v místě středu hlavy [BINAURAL].

Pozn: Zvukové pole je oblast pružného prostředí (typ. vzduchu) obsahující zvukové vlny

Absolute threshold (dB SPL)

dB re $20 \mu\text{Pa}$



Největší citlivost sluchu

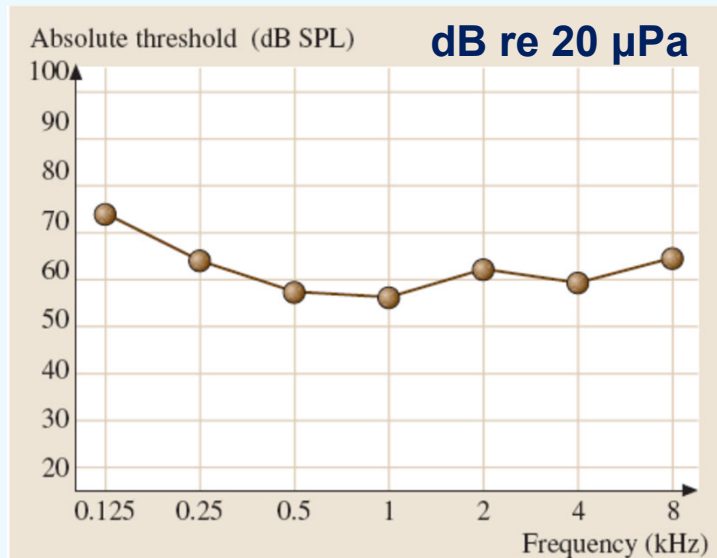
Fig. 13.1 The minimum audible sound level as a function of frequency. The *solid curve* shows the minimum audible field (MAF) for binaural listening published in an International Standards Organization (ISO) standard [13.1]. The *dashed curve* shows the minimum audible pressure (MAP) for monaural listening [13.2]

Moore BCJ. Psychoacoustics. In: Springer handbook of acoustics, T. D. Rossing (ed), New York, NY: Springer, 2007, p. 459-502.

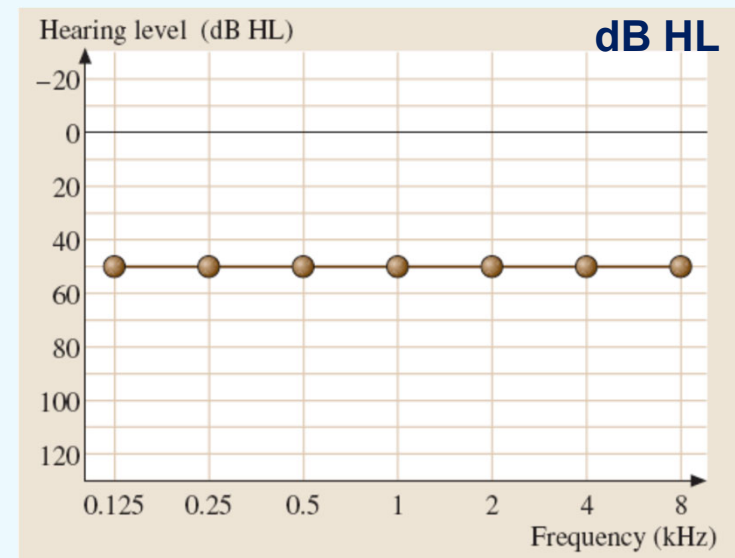
HEARING THRESHOLD: TWO WAYS OF PLOTTING PRÁH SLUCHU: DVA ZPŮSOBY GRAFICKÉHO VYJÁDŘENÍ

Patient with hearing loss of 50 dB /

Pacient se ztrátou sluchu 50 dB



Absolute levels /
Absolutní hladiny



Levels with respect to MAP – clinical
AUDIOGRAM

Hladiny vztažené k minimálnímu
slyšitelnému tlaku – klinický
AUDIOGRAM



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



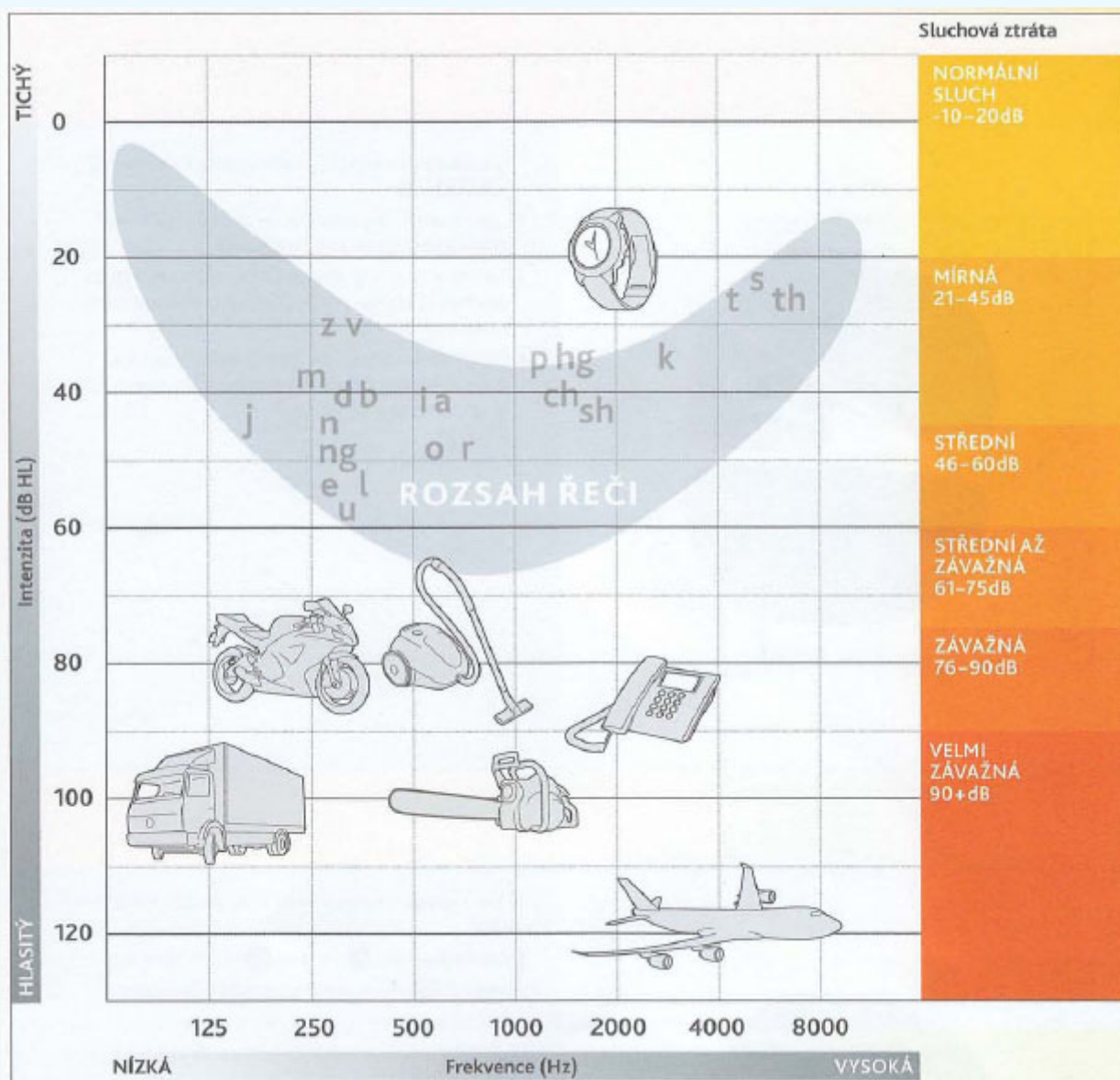
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VYJÁDŘENÍ HLADIN RŮZNÝCH ZVUKŮ FORMOU AUDIOGRAMU





evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

SLUCH, SLUCHOVÉ POLE ČLOVĚKA

Frekvenční a dynamický rozsah sluchového vnímání se graficky zobrazuje ve formě tzv. **sluchového pole**.

Nejnižší křivka na obr. udává nejtisší možné zvuky, které ucho zaregistruje - tzv. **sluchový práh pro čisté tóny**.

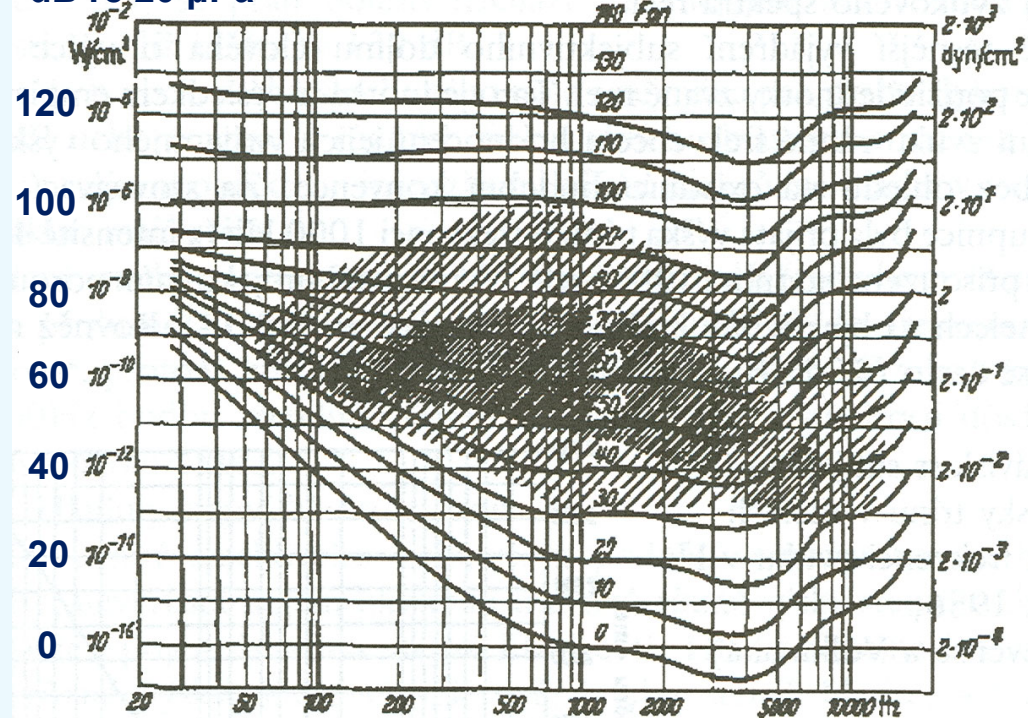
Hodnota **0 dB** je práh sluchu na frekvenci 1000 Hz a odpovídá intenzitě 10^{-12} W/m² a akustickému tlaku 20 μPa.

Ucho je nejcitlivější v oblasti kolem **3-4 kHz**.

Kolem **120 dB** je **práh nepříjemného poslechu**. Nad ním už zvuk vyvolává hmatové vjemy. Tato hladina odpovídá intenzitě kolem 1 W/m² a ak. tlaku kolem 20 Pa.

Kolem **130 dB** je **práh bolesti**.

(3-13) Sluchové pole (schéma Sedláček 1956)
dB re 20 μPa



křivky: hladiny stejné hlasitosti (nejnižší je práh slyšení);
šrafovaní: oblast, jíž využívá řeč (š.husté) a hudba (š.řidké)

Dynamický rozsah 120 dB je obrovský a odpovídá poměru intenzit $10^{12} : 1$ neboli 1 000 000 000 000 : 1 !!!



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Hladina akustického tlaku vs. Hladina hlasitosti

Citlivost lidského ucha je různá pro různé frekvence.

Pro zohlednění tohoto jevu se zavedla veličina **hladina hlasitosti**.

Jednotkou hladiny hlasitosti je 1 **fón [Ph]** (angl. Phon).

Velikosti hladin hlasitosti a hladin akustického tlaku jsou totožné na referenční frekvenci 1000 Hz.

Pro zvuky s různými frekvencemi byly stanoveny **hladiny stejné hlasitosti**.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

HLADINY STEJNÉ HLASITOSTI

Křivky stejné hlasitosti na obrázku odpovídají čistým tónům, které jsou uchem vnímány stejně hlasitě na různých frekvencích – používají se pro vyjádření tzv. **Hladin hlasitosti** tónu.

Tyto křivky byly odvozeny psychoakustickými experimenty s velkým množstvím lidí, kteří porovnávali hlasitosti zvuků o různé frekvenci.

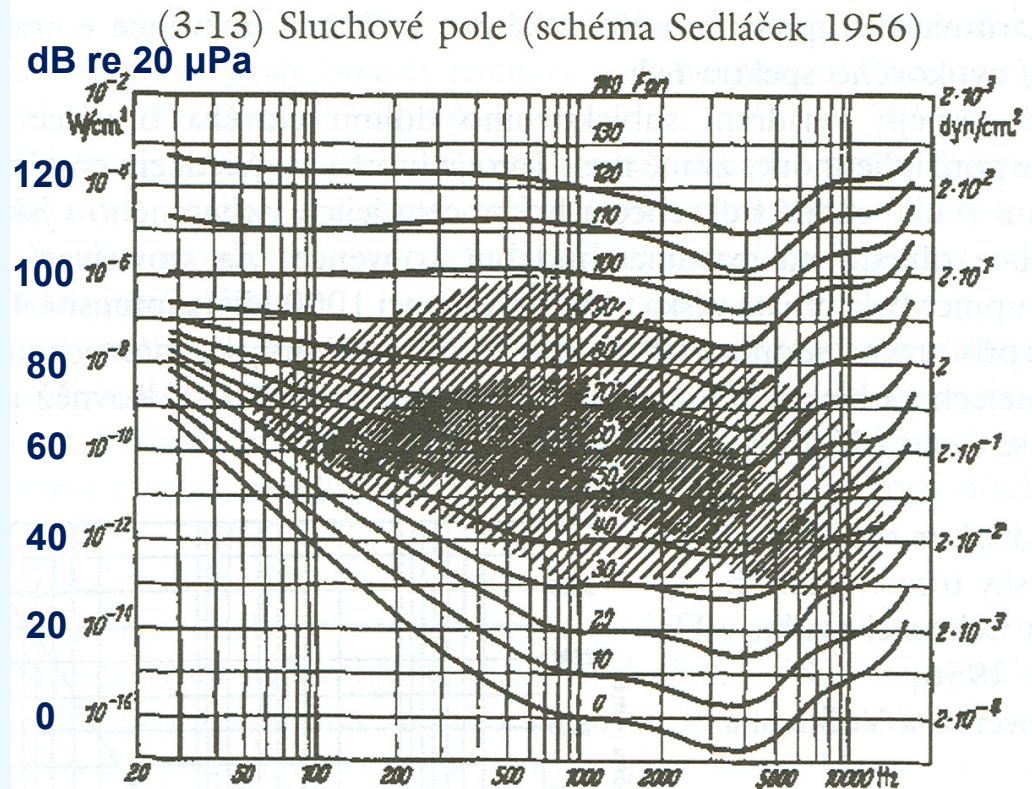
Hlasitost tónu měří subjektivní vjem síly zvuku.

Jednotkou hladiny hlasitosti je **fon** [Ph].

Na frekvenci 1000 Hz je hodnota hladiny hlasitosti ve fonech stejná jako hladina akustického tlaku v dB.

Na rozdíl od intenzity a akustického tlaku, které jsou objektivními fyzikálními veličinami je hladina hlasitosti veličina subjektivní.

Hladiny stejné hlasitosti jsou mezinárodně uznávány a standardizovány v mezinárodních normách.



křivky: hladiny stejné hlasitosti (nejnižší je práh slyšení);
šrafování: oblast, jíž využívá řeč (š.husté) a hudba (š.řídké)



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ

Člení se na 3 části:

- 1) **Vnější** ucho (boltec a zvukovod)
- 2) **Střední** ucho (bubínek, sluchové kůstky,...)
- 3) **Vnitřní** ucho (struktura hlemýždě)

Vnější a střední ucho slouží pro zachycení a vedení zvukových vln.
Vnitřní ucho zpracovává zvukový signál do podoby sluchového podnětu.

Předěl mezi vnějším a středním uchem tvoří **bubínek**.

Předěl mezi středním a vnitřním uchem tvoří **oválné** a **okrouhlé** okénko.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



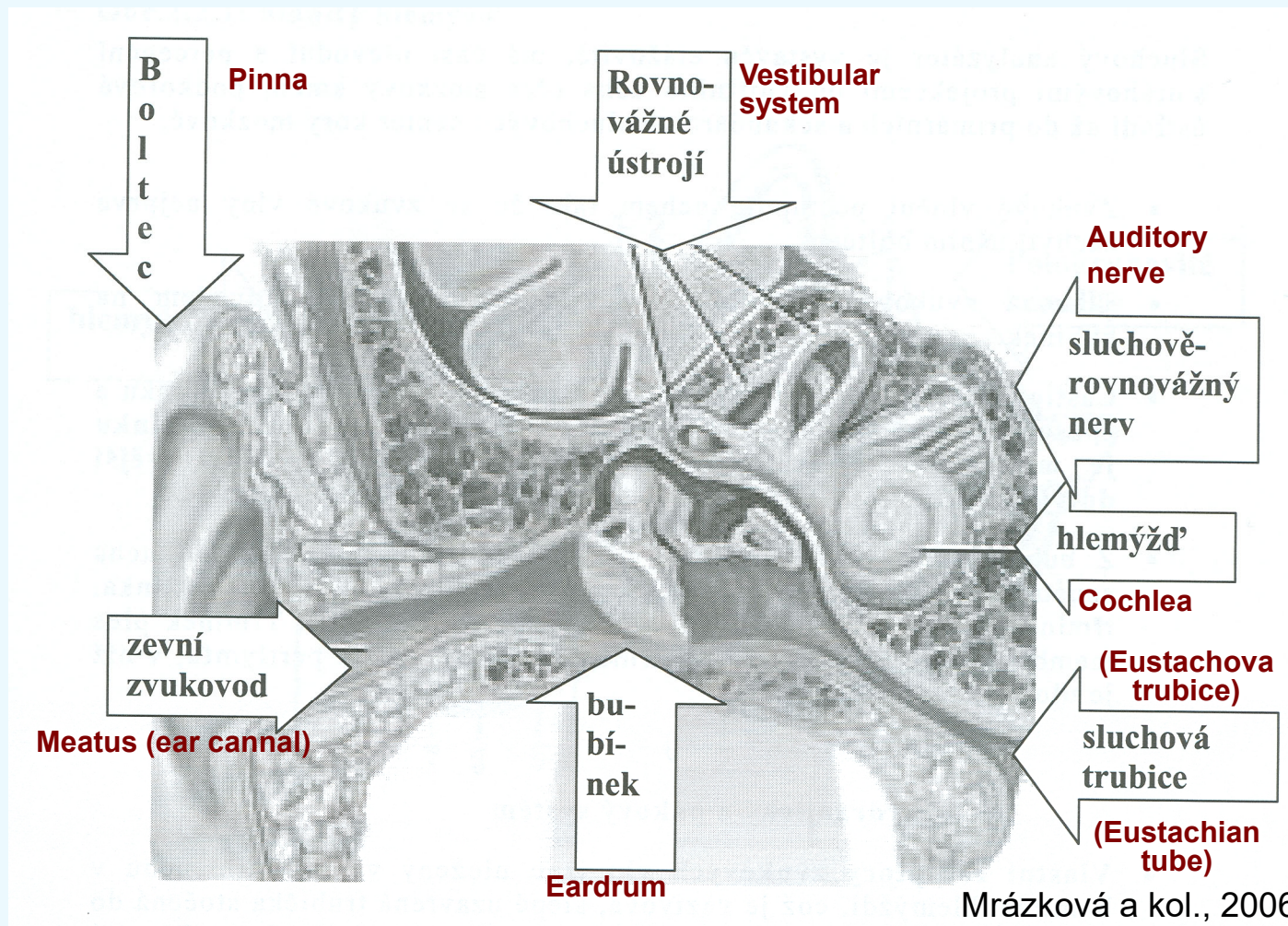
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

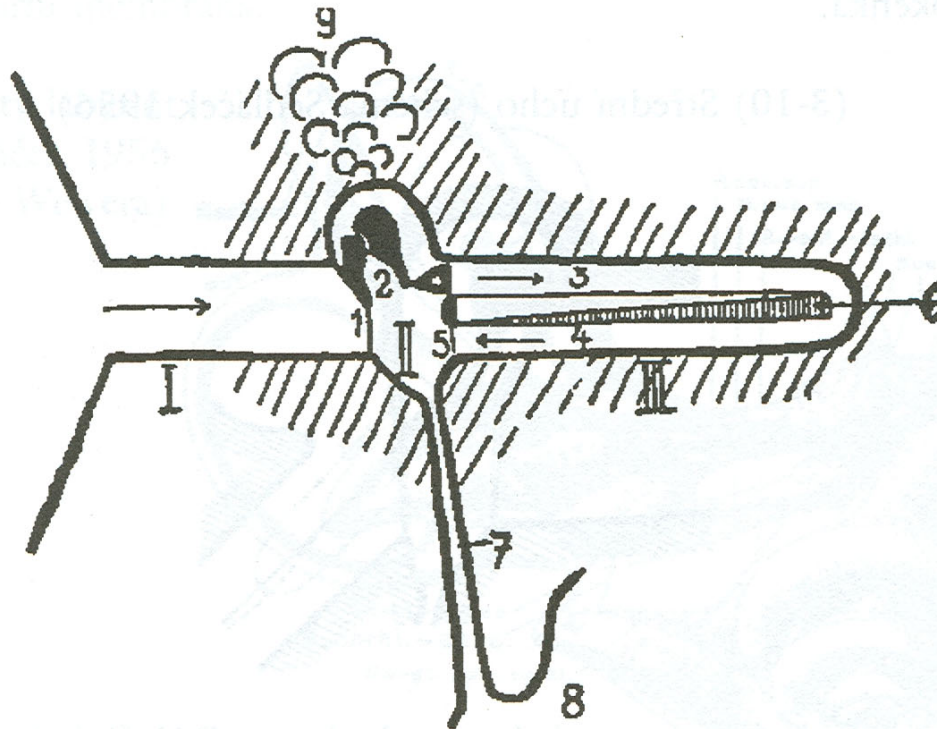
INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ / THE HEARING ORGAN



SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ – SCHÉMA / THE HEARING ORGAN - SCHEMATIC

(3-9) Schéma činnosti tří částí sluchového ústrojí (Hála-Sovák 1962)



Palková 1994, str. 91

I. Outer ear, II. Middle ear, III. Inner ear

I. Zevní ucho: přívod zvuku; II. střední ucho: převod zvuku, postup zvukových vln řetězem kůstek;
III. vnitřní ucho: přeměna zvukové energie v energii nervovou;

1-bubínek, 2-sluchové kůstky, 3-scala vestibuli, 4-scala tympani, 5-okrouhlé okénko, 6-blanitý hlemýžď a basilární membrána (závit hlemýžďe je ve schématu rozvinut), 7-Eustachova trubice, 8-nosohltan, 9-sklípky v kosti spánkové



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

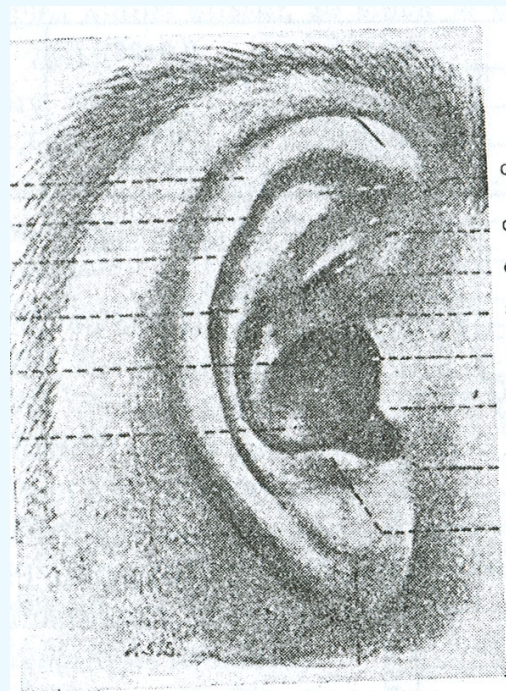
INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNĚJŠÍ UCHO

Vnější ucho tvoří boltce a zvukovod. Zachycuje zvukové vlny a vede je k membráně bubínku. Tvarování boltce má směrový účinek a částečně se podílí na tom, že si uvědomujeme směr, odkud zvukové vlnění přichází.

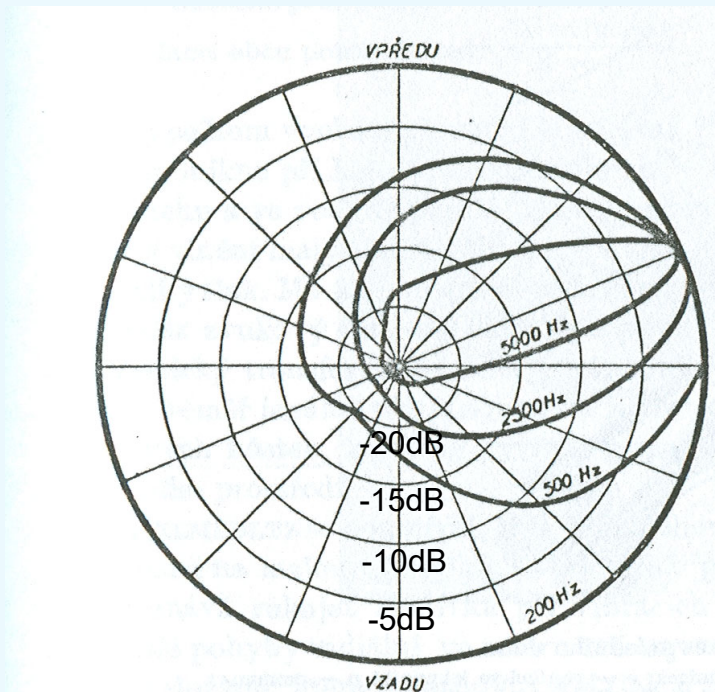
Zvukovod je dlouhý 2-3 cm a uplatňuje se také jako rezonátor.

(Cvičení: jakou rezonanční frekvenci lze očekávat od zvukovodu, uvažujeme-li, že se jedná o polouzavřenou trubici?)



lobulus

Obr. 34. Konfigurace boltce
(podle Přecechtěla).

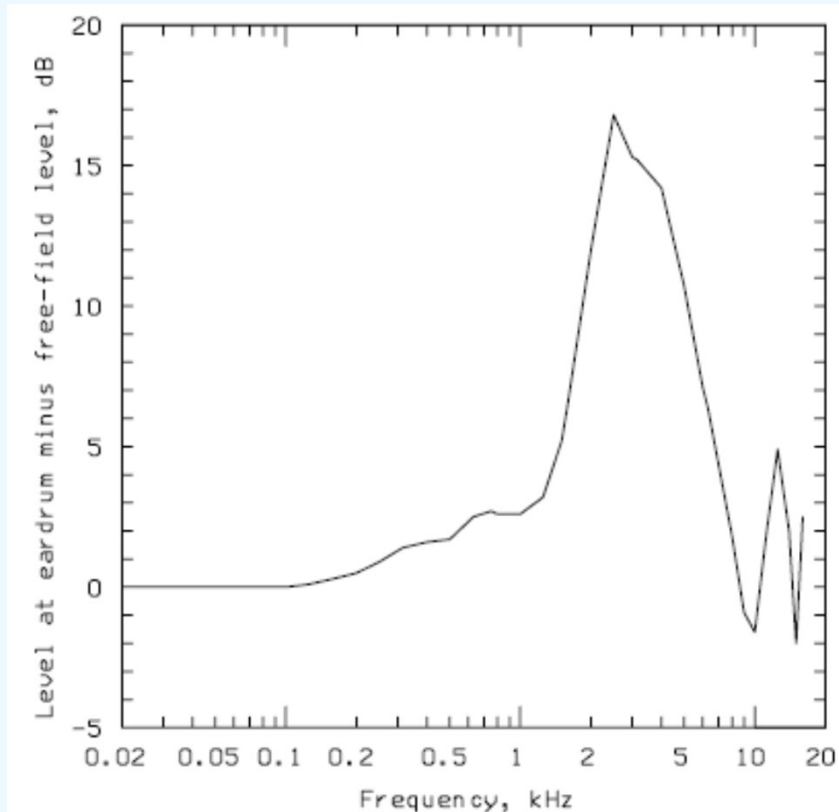


Obr. 35. Směrový účinek ucha.

Diagram znázorňuje, jak ucho (pravé) zachycuje tóny různých frekvencí z různých směrů. Do 200 Hz není směrový účinek, při vyšších frekvencích je optimální směr se strany a poněkud zepředu. (Podle Trögera.)

REZONANCE ZVUKOVODU

– RESONANCE OF THE OUTER EAR CANAL



ANSI S3.4-2007 American National Standard Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds, Melville, NY: Acoustical Society of America, 2007.

Přenosová funkce z volného pole na bubínek:

Měřena jako poměr mezi akustickým tlakem u bubínku (p_T) a akustickým tlakem vnějšího zvukového pole (p_F).

$$R = p_T / p_F$$

Vykazuje široký rezonanční vrchol kolem 2-5 kHz. Na tyto frekvence je lidské ucho nejcitlivější.

Pro většinu frekvencí je p_T větší než p_F , tzn. zvukovod zesiluje většinu frekvencí.

BUBÍNEK

Membrána o tloušťce cca 100 μm , kónicky vyklenutá do středního ucha.

Při nejnižších zvucích na prahu slyšení kmitá s amplitudou řádově v pikometrech (10^{-12} m)

Velikost těchto kmitů je srovnatelná se

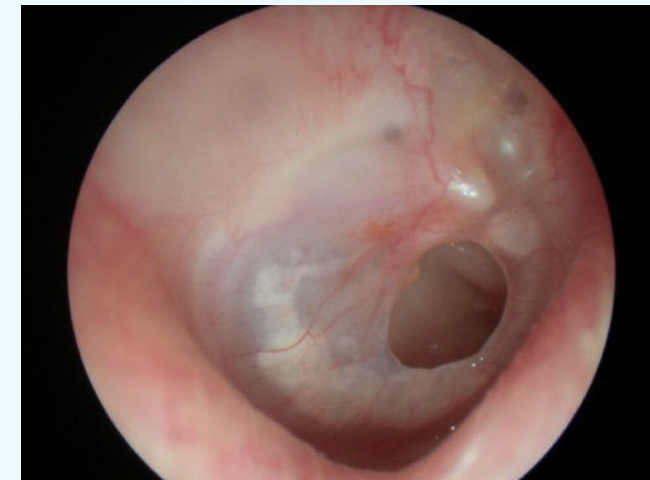
- spontánními kmity bubínku vyvolaných termálními pohyby molekul narážejících do něj
- pohyby molekul tekutiny ve vnitřním uchu.

Při nejhlasitějších zvucích při prahu bolesti kmitá s amplitudou řádově v mikrometrech (10^{-6} m)

Tvoří předěl a ochrannou bariéru mezi vnějším a středním uchem (pozor na poškození při čištění uší tyčinkou).



www.docmom.com



www.docmom.com



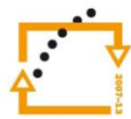
evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



**OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost**

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

STŘEDNÍ UCHO / MIDDLE EAR



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

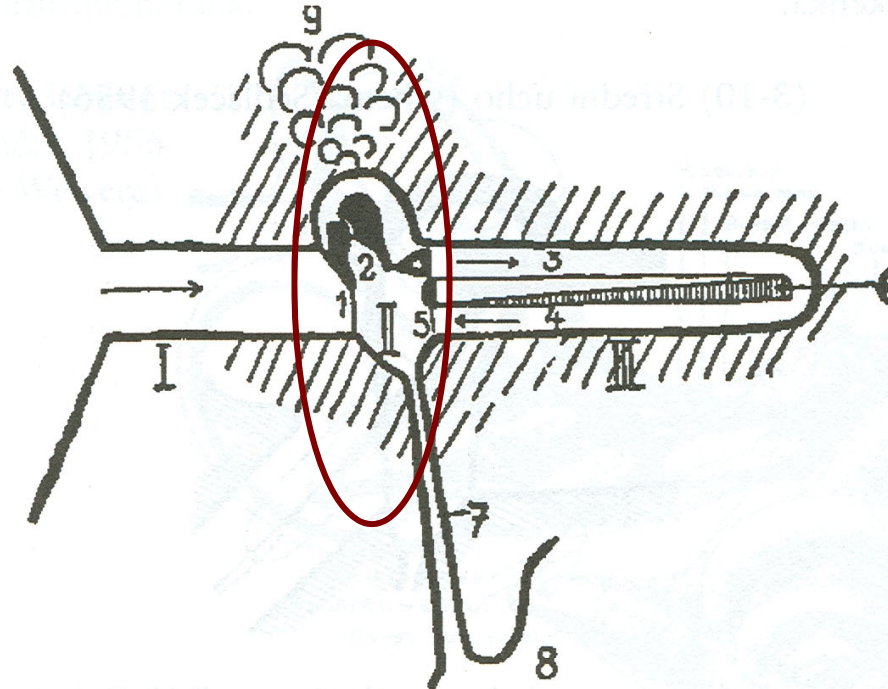


OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

STŘEDNÍ UCHO / MIDDLE EAR

(3-9) Schéma činnosti tří částí sluchového ústrojí (Hála-Sovák 1962)



Palková 1994, str. 91

I. Outer ear, II. Middle ear, III. Inner ear

I. Zevní ucho: přívod zvuku; II. střední ucho: převod zvuku, postup zvukových vln řetězem kůstek;
III. vnitřní ucho: přeměna zvukové energie v energii nervovou;

1-bubínek, 2-sluchové kůstky, 3-scala vestibuli, 4-scala tympani, 5-okrouhlé okénko, 6-blanitý hlemýžď a basilární membrána (závit hlemýžďe je ve schématu rozvinut), 7-Eustachova trubice, 8-nosohltan, 9-sklípky v kosti spánkové



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

STŘEDNÍ UCHO

- šterbinovitá dutina mezi uchem vnějším a vnitřním.
- vyplněna vzduchem a vpředu je Eustachovou trubicí spojena s nosohltanem. Eustachova trubice vyrovnává tlak vzduchu v bubínkové dutině přes tlak v nosohltanu s tlakem vnějšího prostředí. (Běžně je uzavřena – ochrana proti infekci. Otevírá se např. při žvýkání a zívání).
- na straně zvukovodu tvoří její stěnu bubínek – kónická membrána vtažená směrem do středního ucha.
- na druhém konci bubínkové dutiny se v kostěné stěně labyrintu nacházejí dvě okénka krytá pružnou blankou: horní oválné a spodní okrouhlé.
- uvnitř dutiny je řetěz tří středoušních kůstek, od bubínku v pořadí kladívko, kovadlinka a třmínek. Tyto kůstky jsou pevně spojené a při výchýlení působí jako jednotná páka.

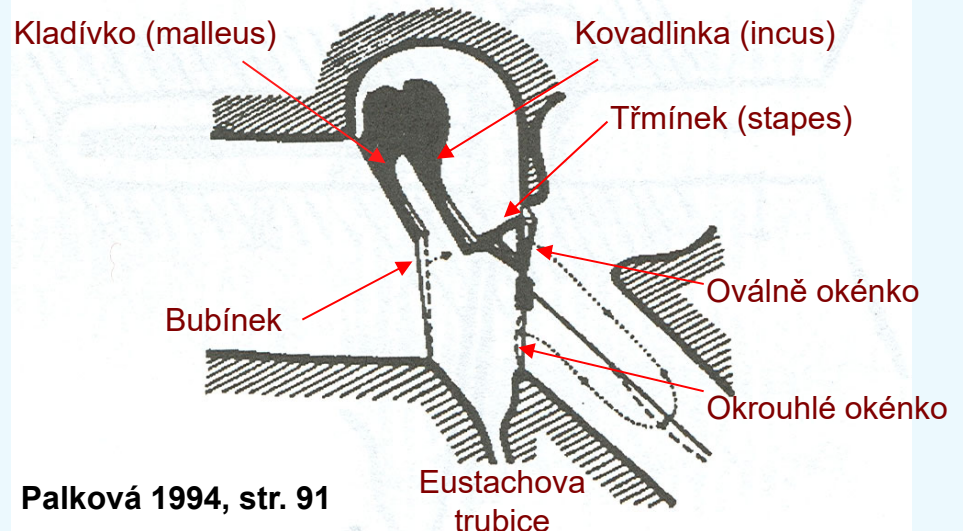
Kladívko je upevněno k bubínku a třmínek je plošně upevněn k oválnému okénku.

Na kůstky se upínají dva středoušní svaly, které umožňují **snížit citlivost sluchu** při vysokých hladinách zvuku :

M.tensor tympani – napínač bubínku, táhne bubínek směrem dovnitř a zvyšuje jeho napětí. Kontrahuje se kolem 110 dB, stah je však jen krátký.

M.Stapedius – třmínekový sval - přes krátkou šlachu se upíná na krček třmínku. Stahuje se při zvucích nad 80 dB, zvyšuje tuhost převodního systému, zhoršuje přenos zejména nízkých rekvencí, trvá tak dlouho jako akustický podnět.

(3-10) Střední ucho (schéma Sedláček 1956)





evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

STŘEDNÍ UCHO

Účelem středního ucha je přenést vibrace vzduchu ve vnějším uchu (p_T) na vibrace tekutiny ve vnitřním uchu (p_V).

Zvuková vlna ve vzduchu má velkou výchylku a malý tlak, zatímco v tekutině má malou výchylku a velký tlak.

Má-li se přenos ze vzduchu do vody díť beze ztrát energie, je nutno zvětšit tlak na úkor výchylky.

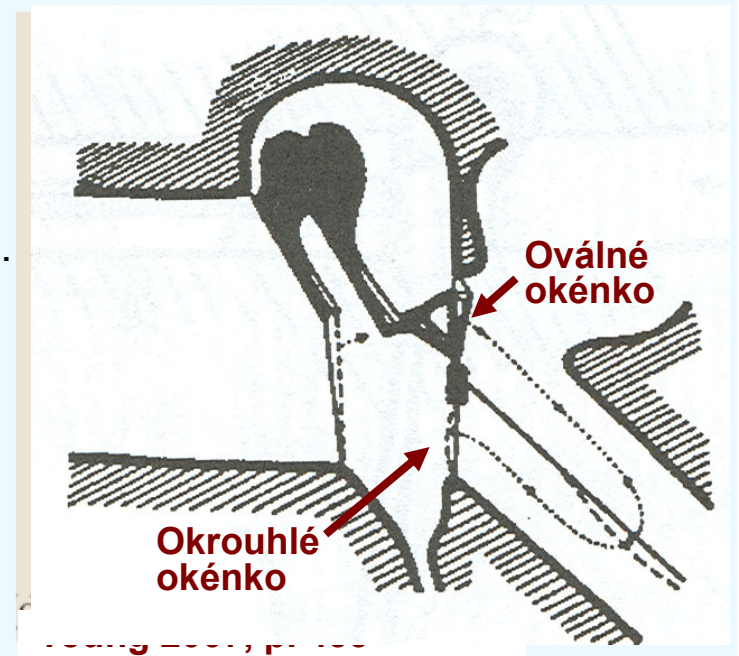
System kůstek plní tuto funkci (akustický transformátor) – plocha ploténky třmínku (oválného okénka, A_{OV}) je značně menší než plocha bubínku (A_{TM}) čímž umožní dosáhnout větší tlak. [pressure is increased by the ratio $p_T/p_V = A_{TM}/A_{OV}$]

Zároveň je délka páky kovádlíky L_I menší než délka páky kladívka L_M , což také umožňuje zvětšit tlak. [pressure is increased by the ratio L_M/L_I]

Při plném porušení převodní funkce kůstek se zvýší práh sluchu přibližně o 30 dB.

Plocha třmínku vychyluje oválné okénko a tím stlačí tekutinu vnitřního ucha – perilymfu.

Tlak v perilymfě se vyrovnává přes okrouhlé okénko jeho vychýlením na opačnou stranu oproti oválnému okénku.





evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

ZKRESLENÍ ZVUKU V PŘEVODNÍM APARÁTU

Převodní aparát ucha není lineární a vykazuje zkreslení amplitudy.

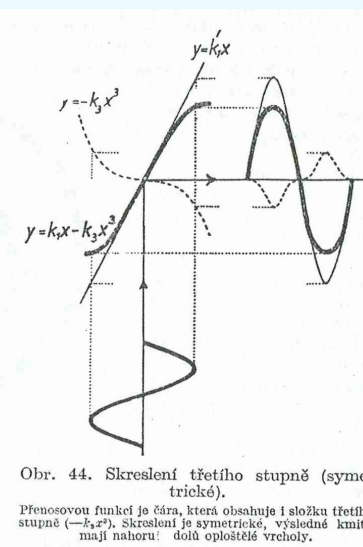
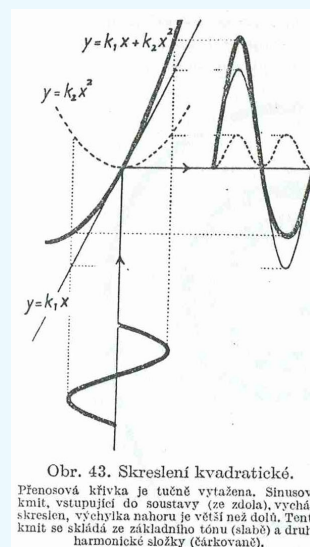
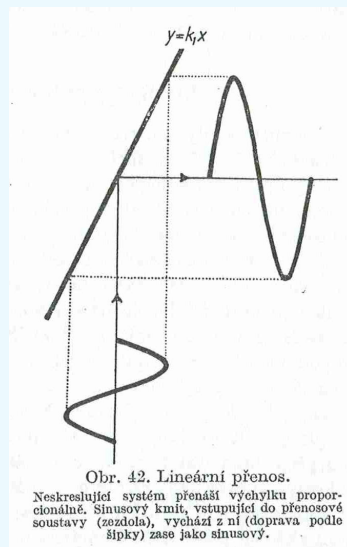
U lineární soustavy má kmit vystupující stejný tvar jako kmit vstupující.

Lineární přenos je dán funkcí $y = kx$.

U nelineární soustavy se tvar kmitu mění – ze sinusového se stane nesinusovým

Nelinearita může být různého řádu, např. kvadratická (s funkcí $y = k_1x + k_2x^2$). Při zkreslení 2. stupně (kvadratickém) se objevuje kromě základního tónu i druhá harmonická frekvence. Kmity jsou pak nesymetrické vůči ose x (toplatí obecně při zkreslení sudého stupně). (Obr. 43).

Při zkreslení 3. stupně ($y = k_1x - k_3x^3$, obr. 44) - a obecně lichého stupně - jsou naopak výsledné kmity symetrické vůči ose x . Toto zkreslení odpovídá časté situaci, kdy výchylka je omezoována při překročení určité hodnoty.





evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

ZKRESLENÍ ZVUKU V PŘEVODNÍM APARÁTU

Ucho vykazuje zkreslení při tónech na hladinách vyšších než 40 dB nad prahem.

Výchylky bubínku i sluchových kůstek nejsou na obě strany symetrické.

Bylo zjištěno, že při zavádění čistých tónů do sluchového orgánu vznikají v něm sudé i liché harmonické tóny – tzv. **aurální harmonické tóny**.

Čím větší je intenzita zaváděného tónu tím větší je zkreslení a relativní obsah aurálních tónů.

Při zavedení dvou čistých tónů vznikají vlivem amplitudového zkreslení vedle aurálních harmonických tónů i tzv. **tóny kombinační**.

Jejich frekvence je dána součtem nebo rozdílem frekvencí základních tónů – tzv. **tóny sumační a diferenční**.

Kombinační tóny 1.řádu ($a+b$, $a-b$) vznikají při zkreslení 2.stupně.

Při zkreslení vyšších stupňů vznikají kombinační tóny i vyšších řádů.
(Kombinační tóny 2. řádu při zkreslení 3.stupně jsou $2a+b$, $2b+a$, $2a-b$, $2b-a$).



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

DEMONSTRACE VZNIKU KOMBINAČNÍCH TÓNŮ

Acoust. Sci. & Tech. 27, 6 (2006)

INVITED REVIEW

Combination tone: Absent but audible component

Kaoru Ashihara*

*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST,
1-1-1 Higashi, Tsukuba, 305-8566 Japan*

Primární tóny

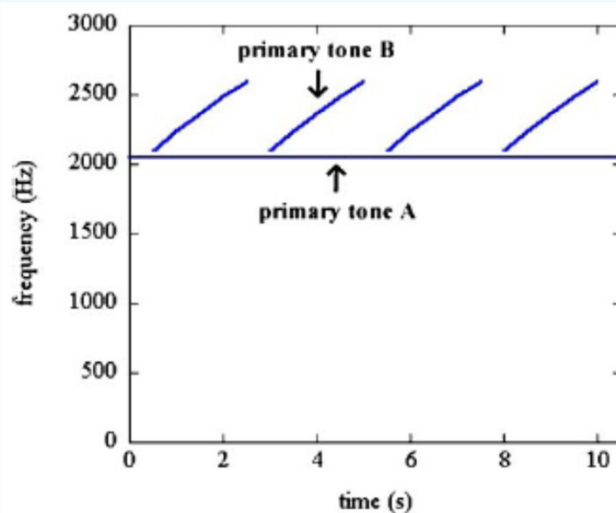


Fig. 2 Two primary tones are illustrated on a time-frequency plane. Primary tone A is a continuous pure tone. Primary tone B consists of ascending sweeps.

Primární tóny a kombinační tóny vznikající v uchu

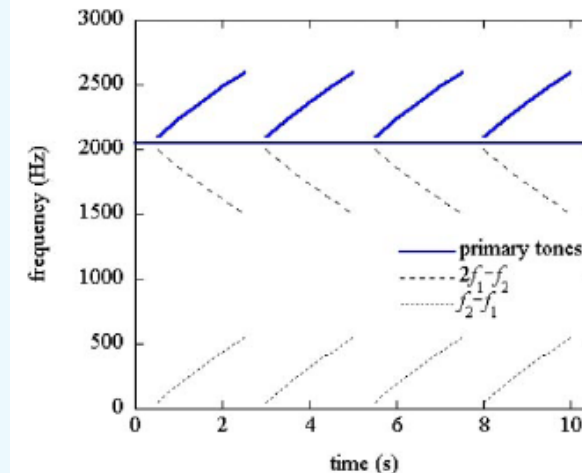


Fig. 3 Combination tones that are supposed to be induced by the primary tones are shown. The primary tones are represented by solid lines. The broken lines and dotted lines represent the $2f_1 - f_2$ and $f_2 - f_1$ components, respectively.



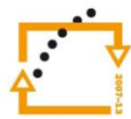
evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



**OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost**

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO / INNER EAR



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO

Vnitřní ucho (také nazýváno labyrint) je uloženo ve skalní kosti.

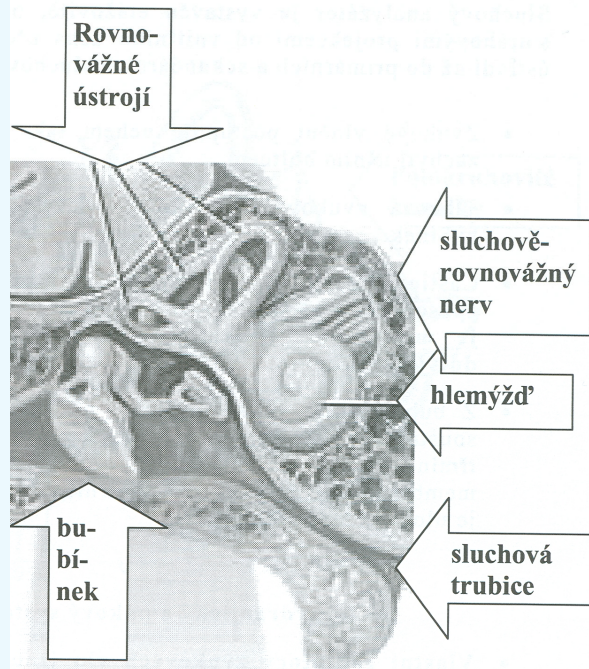
Obsahuje rovnovážné ústrojí (vestibulární aparát) a ústrojí sluchové – hlemýžď (cochlea).

Hlemýžď přenáší tlak z oválného okénka na tekutinu (perilymfu), která jej dále vede prostorem scala vestibuli („sv“) k vrcholu hlemýždě (helikotrema) a poté prostorem scala tympani („st“) zpět k okrouhlému okénku.

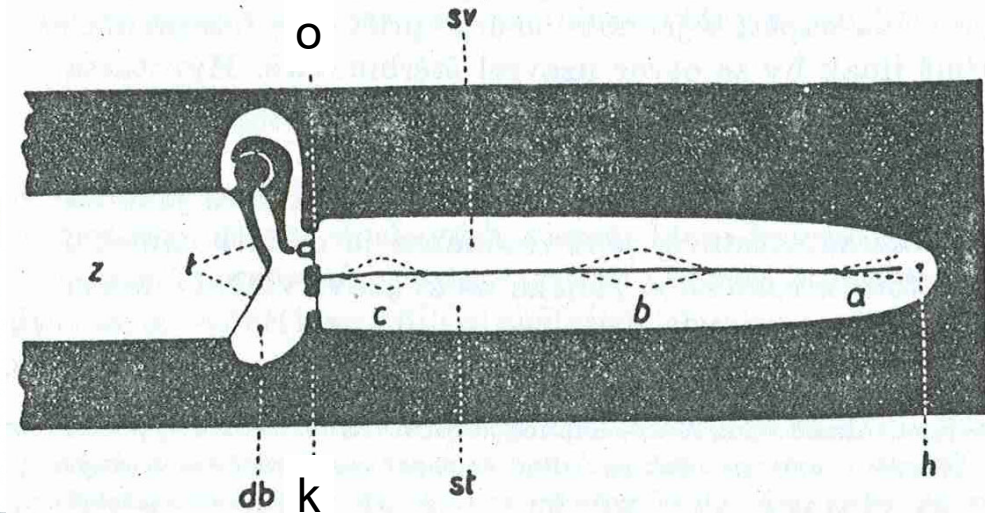
Kmity tekutiny rozkmitávají basilární membránu, na které jsou umístěny vláskové buňky (hair cells).

Vláskové buňky jsou vlastními receptory zvuku, které převádějí mechanické kmity na nervové impulsy.

Nervové impulsy jsou vedeny sluchovým nervem do mozku.



Mrázková a kol., 2006



Obr. 53. Schema kmitání basilární membrány podle teorií vlnových.
Z — zvukovod, t — bubínek, db — dutina bubínková, k — kulaté okénko, o — oválné okénko, sv — scala vestibuli, st — scala tympani, a — kmitání basilární membrány při tónech hlubokých, b — při tónech středních, c — při tónech vysokých, h — helicotrema.

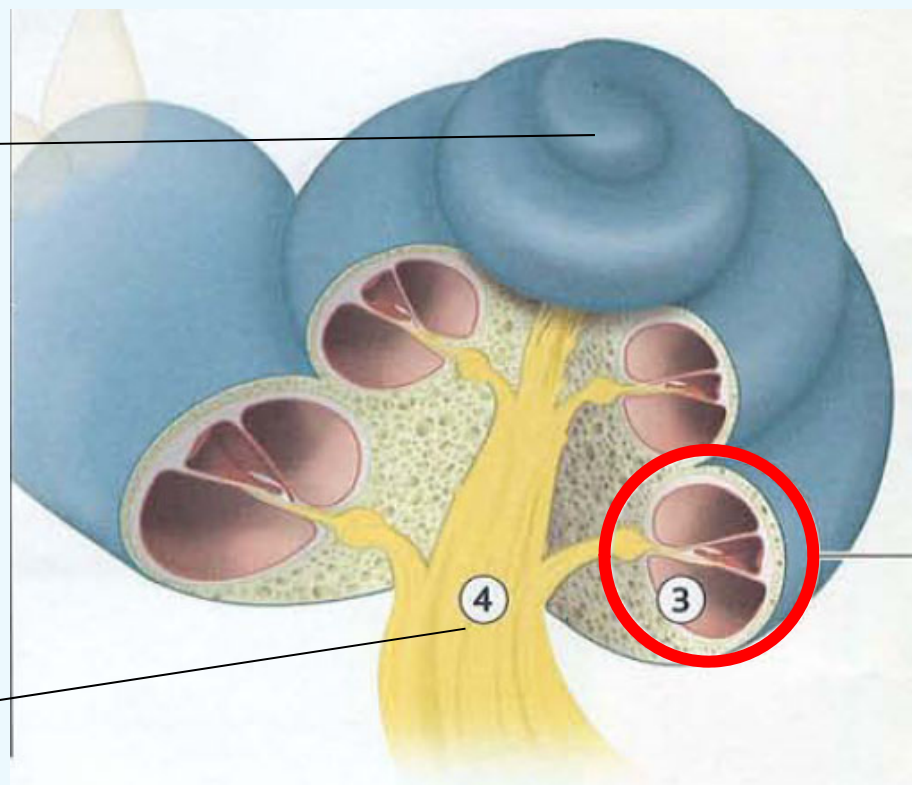
Sedláček, 1956, str. 108

VNITŘNÍ UCHO – řez hlemýžděm

Hlemýžď je kanálek stočený do tvaru prostorové spirály se 2 3/4 závití.
Je membránami rozdělen do 3. částí:

Špatně nakresleno –
(příliš mnoho závitů)

Sluchový nerv





evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – řez hlemýžděm

Hlemýžď je kanálek stočený do tvaru prostorové spirály se 2 3/4 závitů.

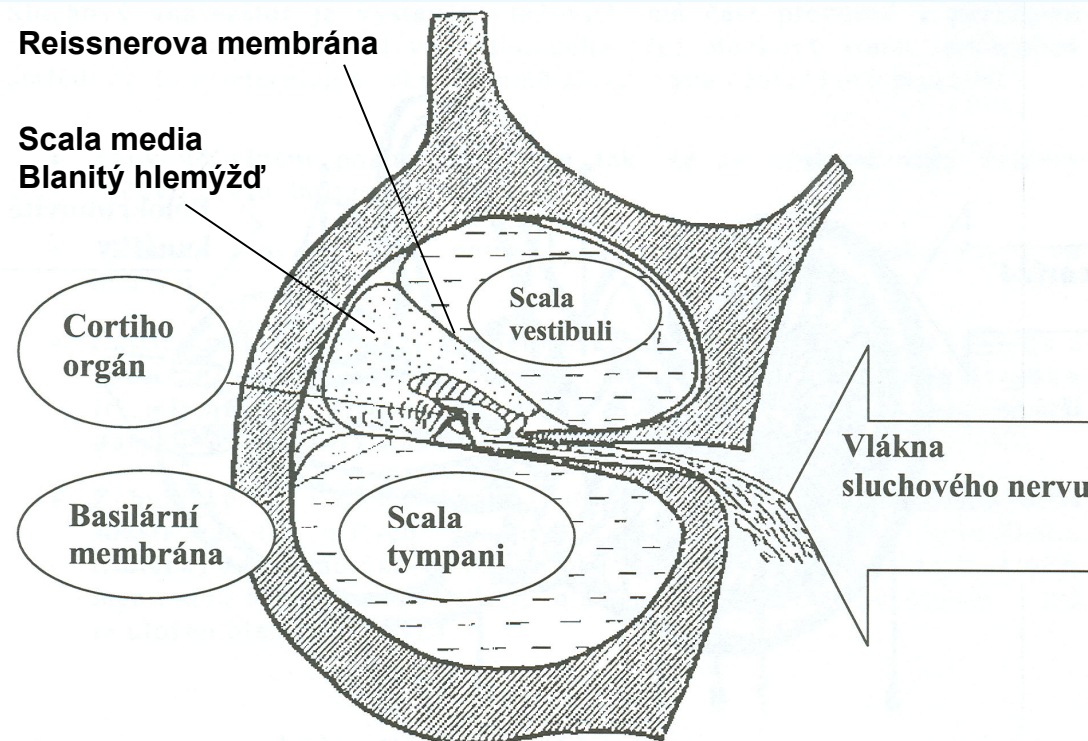
Je membránami rozdělen do 3. částí:

- 1) **Scala vestibuli** – vyplněna tekutinou (perilymfou)
- 2) **Scala tympani** – vyplněna tekutinou (perilymfou)
- 3) **Scala media** - ductus cochlearis, blanitý hlemýžď – vyplněn odlišnou tekutinou (endolymfou).

Blanitý hlemýžď je oddělen od SV a ST dvěma membránami:

- a) **Basilární** membránou
- b) **Reissnerovou** membránou

V blanitém hlemýždi je umístěn smyslový tzv. **Cortiho orgán (Cortiho ústrojí)**, jehož základní součástí jsou **vláskové buňky**.





evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

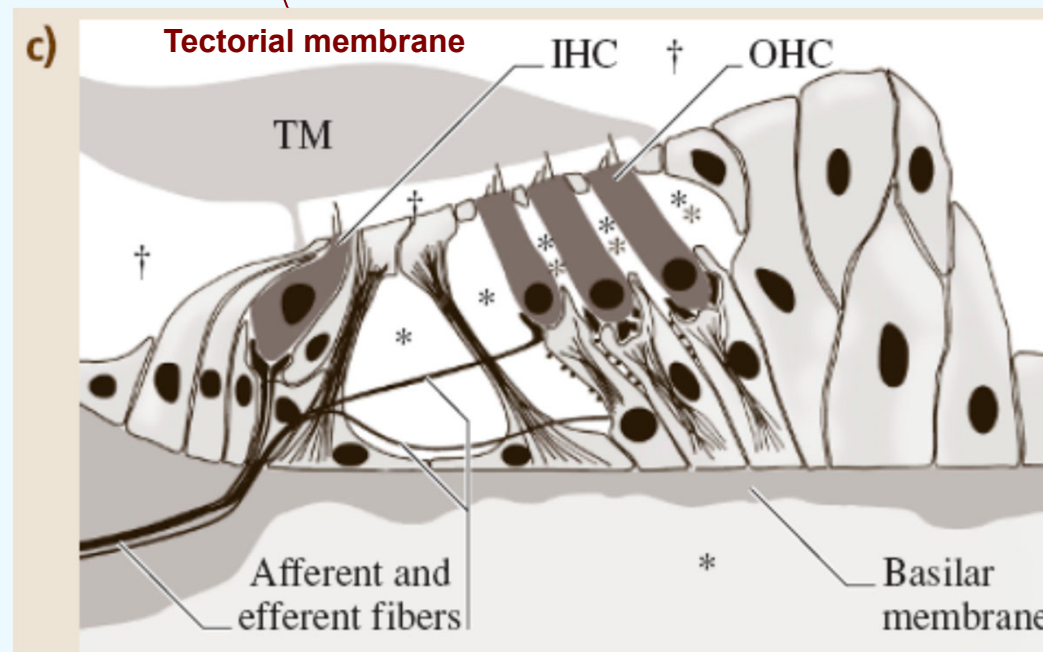
INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO –Cortiho ústrojí

Cortiho ústrojí (angl. The Organ of Corti) – stará se o převod zvuku na nervové impulsy.

Hlavní části jsou :

- Bazilární membrána** (poskytuje oporu Cortiho ústrojí)
- Vnější vláskové buňky (Outer hair cells) (OHC, 3 řady)**
- Vnitřní vláskové buňky (Inner hair cells) (IHC, 1 řada)**
- Tektoriální membrána (Tectorial membrane)** (dotýká se shora vlásků vláskových buněk)
- Nervová vlákna** napojující se na vláskové buňky



Young 2007, p.435



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – Šířka basilární membrány

Basilární membrána je nejužší (kolem 100 μm) u vstupu (baze) hlemýždě a rozšiřuje se směrem k vrcholu (apex) hlemýždě (ve vrcholu šířka cca 500 μm).

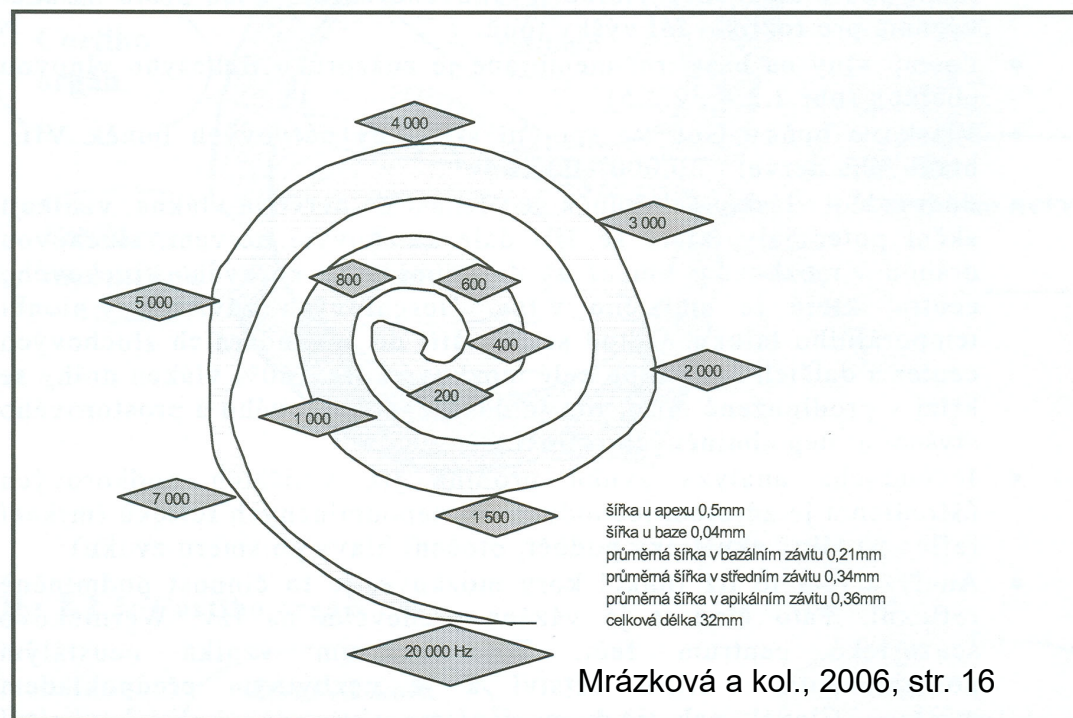
Se šířkou basilární membrány korespondují místa kde jsou registrovány různé frekvence zvuků.

Nejvyšší zvuky (20 000 Hz) jsou registrovány u vstupu do hlemýždě.

Ve vrcholu (apex) hlemýždě (u helikotremy) jsou registrovány tóny nehlubší.

Rozprostření tónů o různých frekvencích na různá místa basilární membrány a potažmo na různá vlákna sluchového nervu se označuje termínem „**místní kódování**“ (angl. „**place coding**“)

Obr.2.2.4.: Schéma znázorňuje šířku basilární membrány v celém jejím průběhu. Je velmi jasně znázorněno její postupné rozšiřování směrem k vrcholu hlemýždě. Zároveň jsou vyznačeny přibližné lokalizace maxim amplitud vibrací na bazální membráně při stimulacích různými frekvencemi. Je patrné, že na počátku bazálního závitů je basilární membrána nejužší a nejtužší, směrem k vrcholu se postupně rozšiřuje a její tuhosti ubývá. Ze schématu je patrné, že v bazálním závitě jsou natěsnány frekvence od 20 000 Hz po 1 500 Hz, ve druhém a vrcholovém závitě se umísťují pouze frekvenční rozpětí mezi 1 500 Hz až 18 Hz.



Mrázková a kol., 2006, str. 16



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – Teorie slyšení

Mechanismus vnímání sluchu není doposud objasněn zcela do detailu.

Z historického hlediska jsou tři druhy teorií (Sedláček, 1956, str.94):

1) Teorie místní – hluboké a vysoké tóny se liší tím, že stimulují Cortiho orgán v různých částech hlemýždě. Každému tónu přísluší určitá nervová vlákna, jimiž se tento tón promítá do centrální nervové soustavy (tzv. místní kódování). Teorie místní předpokládají analýzu v hlemýždi na základě mechanických dějů.

2) Teorie frekvenční („telefonní“) – podráždění zvukem je rozloženo v celém průběhu hlemýždě. Nervové vzruchy reprodukuje frekvenci i tvar vlny zvukového děje a jejich analýza se provádí v centrální nervové soustavě. Hlemýžď působí jako mikrofón, který mění zvukové vibrace na nervové vzruchy, jež reprodukuje frekvenci i tvar zvukové vlny (tzv. časové kódování).

3) Smíšené teorie – spojují obě předchozí teorie, jež se navzájem doplňují. Předpokládají místní analýzu v hlemýždi, která je doplněna analýzou centrální. Současná data podporují tento pohled.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – Teorie slyšení

Helmholtzova rezonanční teorie (Sedláček, 1956, str.95):

Má největší význam v historii výzkumu o sluchových vjemech.

Uveřejněna v letech 1857-63 v Helmholtzově slavné knize „Die Lehre von den Tonempfindungen“, která dlouho tvořila základ vědomostí o vnímání zvuků.

Spojil známý princip rezonance, Fourierovu poučku, Ohmův zákon o analýze směsi zvuků a podrobné anatomické nálezy Cortiho.

Princip rezonance: Objekty (rezonátory) se nejvíce rozkmitávají když frekvence přicházejících kmitů odpovídá jejich vlastní (rezonanční) frekvenci.

Fourierova poučka – každý složitý zvuk lze rozložit na řadu čistých tónů.

Ohmův zákon – pro slyšení více tónů je rozhodující poměr intenzity jednotlivých složek; fázové poměry lze měnit aniž se změní charakter zvuku.

Helmholtz hledal rezonátory rozmístěné ve sluchovém orgánu – předpokládal, že těmito rezonátory jsou transversální fibrily basilární membrány, které jsou napnuty zejména v příčném směru. Tyto fibrily se chovají jako řada izolovaných strun naladěných na různé frekvence. Různé naladění strun je dosaženo různou šířkou basilární membrány (délka strun) a různým napětím.

Při zvuku se rozkmitá basilární membrána v příslušném místě a chvění přenese na Cortiho orgán a vláskové buňky. (Tzn. tato teorie je typickým zastáncem místního kódování)

Vstoupí-li do hlemýždě čistý tón, rozechvěje se basilární membrána pouze v jednom místě. (Vysoké tóny se rozechvějí u baze a hluboké u vrcholu hlemýždě)

Vstoupí-li složený tón, rozechvěje se více míst a podle těchto míst se provede frekvenční analýza.

Helmholtzova teorie nevysvětluje všechny jevy, ale její princip – mechanická rezonance v hlemýždi a místní rozvrstvení hlubokých a vysokých tónů platí dodnes.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – Teorie slyšení

Békésyho vlnová teorie (Sedláček, 1956, str.99):

Vychází z experimentálních měření na modelech i preparátech zvířecích a lidských labyrintů. Publikována od roku 1928 v několika pracích.

Békésy za svůj výzkum obdržel v roce 1961 Nobelovu cenu.

Békésy zjistil, že basilární membrána má jen velmi malé napětí v příčném směru a její elasticita je malá – vyvrátil tak Helmholtzovu teorii izolovaných strun.

Scala vestibuli do níž vstupují zvukové vlny prostřednictvím třmínku, může být považována za trubici s pevnými stěnami, jejíž jedna stěna je poddajná. Touto stěnou je ductus cochlearis (blanitý hlemýžď).

Po této stěně se šíří tlaková vlna jejíž rychlost je značně menší než rychlost šíření zvuku v tekutině.

Békésy zjistil, že tato rychlost je na začátku hlemýždě asi 30 m/s, při vrcholu sotva 10 m/s. Tak malá rychlost umožňuje vznik rezonance i v malých rozměrech hlemýždě.

Békésy vyplnil preparát labyrintu tekutinou, v níž byly částice kovu, do kostěného labyrintu vytvořil pozorovací okénka, do nichž zatmelil sklíčka. Pohyby kmitajících částí pak pozoroval a měřil ve stroboskopickém světle.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – Teorie slyšení

Békésyho měření (Sedláček, 1956, str.100):

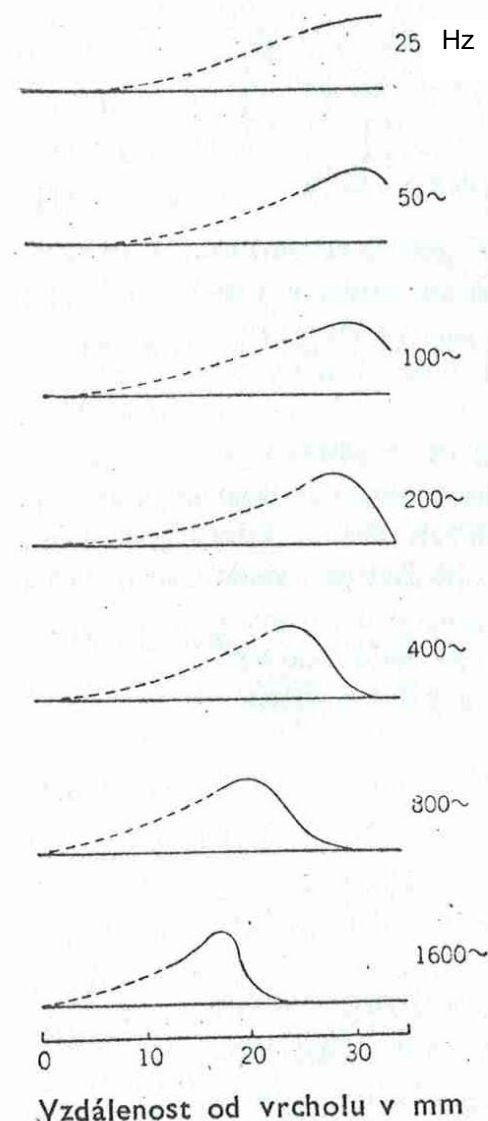
Békésy zjistil, že hluboké tóny rozechvějí Cortiho orgán nejvíce při vrcholu hlemýždě, zatímco vysoké hned při bazi hlemýždě. (Důkaz pro místní kódování).

Maxima výchylek jsou však poměrně široká a vždy je rozechvěna poměrně široká část basilární membrány. Na základě těchto plochých křivek nelze vysvětlit velkou rozlišovací schopnost lidského sluchu pro různé frekvence.

Maxima vibrací nejsou způsobena rezonancí řady příčných elementů jak uvažoval Helmholtz, ale tím, že se vlna šíří po basilární membráně zpomalující se rychlostí.

Přesný mechanismus vzniku vrcholu na basilární membráně není doposud do detailu objasněn (Young 2007).

Z anatomického hlediska je dělicí částicí kochleárního kanálku celý ductus cochlearis. Reissnerova membrána je však velmi tenká, její hmota a pružnost nepatrná, takže neklade odpor vibracím tekutiny. Odpor zvukovým vlnám klade teprve basilární membrána, na níž je uložen Cortiho orgán.



Obr. 49. Rozkmity basilární membrány při dráždění tóny různé frekvence podle *Békésyho*.

Relativní rozkmity basilární membrány při různých frekvencích vy-měřené ve stroboskopickém světle.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – Teorie slyšení

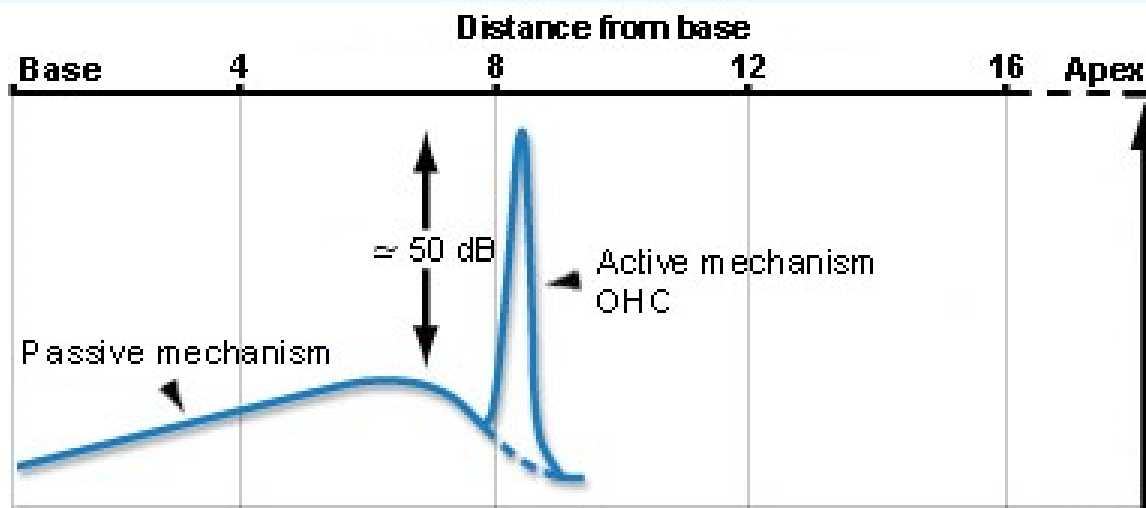
Aktivní mechanismus (<http://www.cochlea.org/en/spe/cochlea-function.html>):

Teorie postupující vlny a mechanické filtrování frekvencí se ukazuje příliš jednoduchá na to, aby vysvětlila výbornou schopnost kochley rozlišovat jednotlivé frekvence.

Na konci dekády 1990 ukázali Johnstone a Boyle na živých zvířatech že kmitání basilární membrány je větší a více soustředěné do jednoho místa, než jak ukázal Bekesy.

Tento objev pomohl objasnit rozlišovací frekvenční schopnost kochley. V současnosti je zřejmé, že rozdíl mezi pozorováními Bekesyho a Johnstona jsou vlivem aktivních biologických mechanismů, které působí na kmity basilární membrány u živých bytostí (viz dále).

Pro čisté tóny, aktivní mechanismus zesiluje kmity bazilární membrány až o 50 dB v úzké výseči Cortiho orgánu, který zesiluje citlivost kochley v tomto místě (další mechanismus pro **místní kódování**). To umožňuje od sebe odlišit dva čisté tóny s blízkými frekvencemi (tato vlastnost se nazývá frekvenční selektivita).



Toto úzké naladění frekvencí je úzce spojeno s elektromotilitou vnějších vláskových buněk (OHC), a je definováno vlákny sluchového nervu a vnitřními vláskovými buňkami (IHCs) které generují nervové vzruchy.

<http://www.cochlea.org/en/spe/cochlea-function.html>

VNITŘNÍ UCHO – Teorie slyšení

Činnost vláskových buněk:

Vnitřní vláskové buňky fungují jako receptory zvuku a převodníky mechanického kmitání na akční potenciály nervů.

Ukazuje se, že vnitřní vláskové buňky mají uvnitř zabudován rezonátor – reagují na tóny o pouze určitých frekvencích. Tento rezonátor umožňuje zúžit místní rozlišení frekvence ze širokého vrcholu kmitů basilární membrány. (Další evidence pro princip místního kódování).

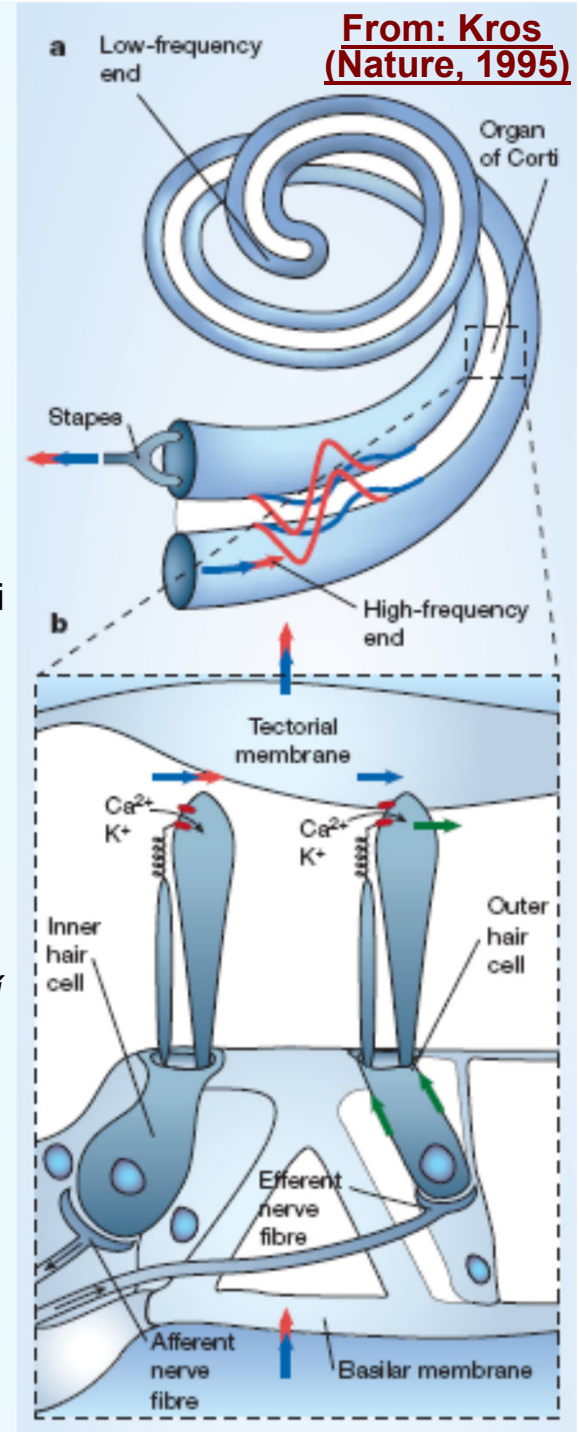
Vnější vláskové buňky fungují jako aktivní frekvenčně selektivní mikrozesilovače kmitání. Jsou schopny při stimulaci aktivně měnit svou délku. Brownell a kol. (1985) zjistili, že elektrická stimulace vnějších vláskových buněk působí prodloužení a zkrácení jejich buněčných těl. Tato vlastnost je frekvenčně selektivní – různé vnější vláskové buňky jsou podobně jako vnitřní vláskové buňky naladěny na určité frekvence.

Při poškození vnějších vláskových buněk výrazně vzroste práh sluchu.

Při poškození vnitřních vláskových buněk se poškodí vnímání příslušných frekvencí.

C. Kros. Hearing: aid from hair force. *Nature* 433 (7028, Feb 24): 810-811, 2005.

b, Cross-section through part of the organ of Corti. Shearing between tectorial and basilar membranes opens channels in the bundles of outer hair cells, causing K^+ and Ca^{2+} ions to flow in. The cochlear amplifier in these cells (green arrows, force generator in the hair bundle and/or prestin protein in the cell membrane) enhances the vibrations in different parts of the organ of Corti (blue arrows, no amplification; red arrows, amplifier active). This boosts the membranes' motion and, via fluid coupling, the hair bundles of the inner hair cells. Afferent nerve fibres contact the inner hair cells and signal sound reception to the brain; efferent nerve fibres allow the brain to control outer hair cells. Arrows indicate motion in the excitatory direction.



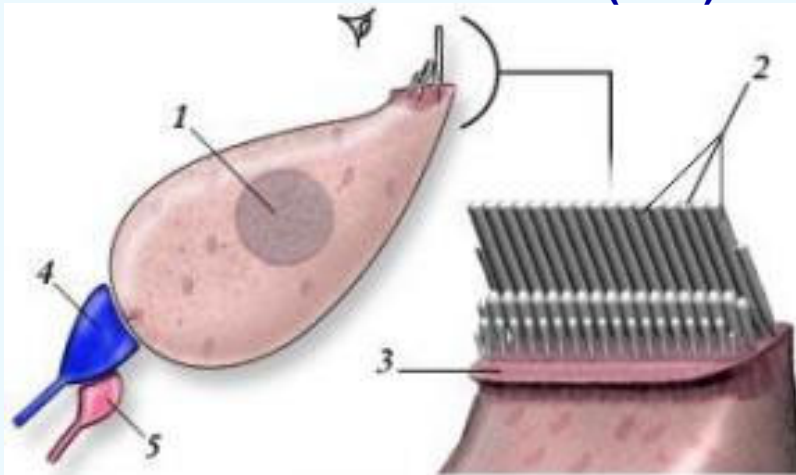
Vnitřní a vnější vláskové buňky - struktura

Ve vnitřním uchu člověka je cca 3,500 vnitřních a asi 12,000 vnějších vláskových buněk.

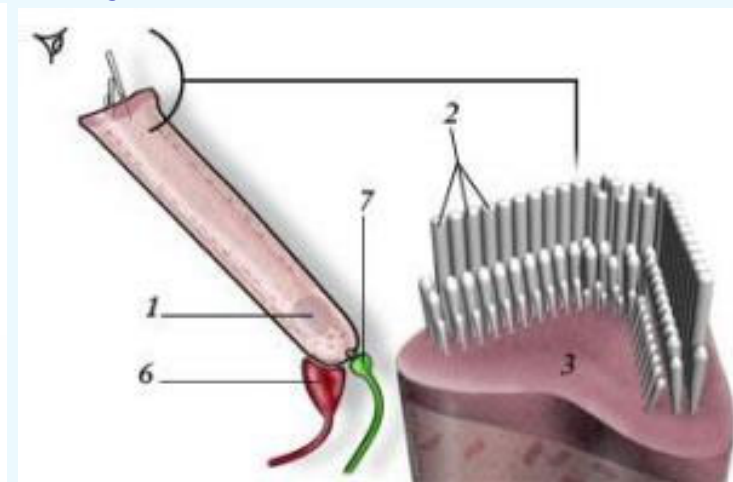
Toto číslo je velmi nízké v porovnání s miliony fotoreceptorů na retině nebo chemoreceptorů v nose.

Vláskové buňky nemají, podobně jako neurony, schopnost se množit – konečný počet vláskových buněk je dosažen ve velmi raném stádiu vývoje (cca po 10 týdnech těhotenství); poté může v kochle vláskových buněk pouze ubývat.

Vnitřní vlásková buňka (IHC)



Vnější vlásková buňka (OHC)



Obr : 1. Jádru, 2. Stereocilia (vlásky), 3. Kutikulární ploténka, 4. Radiální aferentní zakončení (dendrit neuronu typu I), 5. Laterální eferentní zakončení, 6. Mediální eferentní zakončení, 7. Spirální aferentní zakončení (dendrit neuronu typu II)

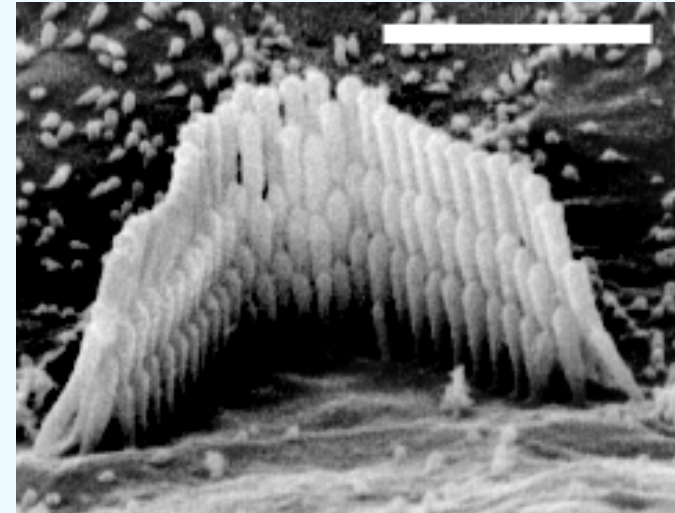
Vnitřní a vnější vláskové buňky - organizace

Vnitřní vláskové buňky (Inner Hair Cell, IHC)



Lineární uspořádání stereocílií u IHC

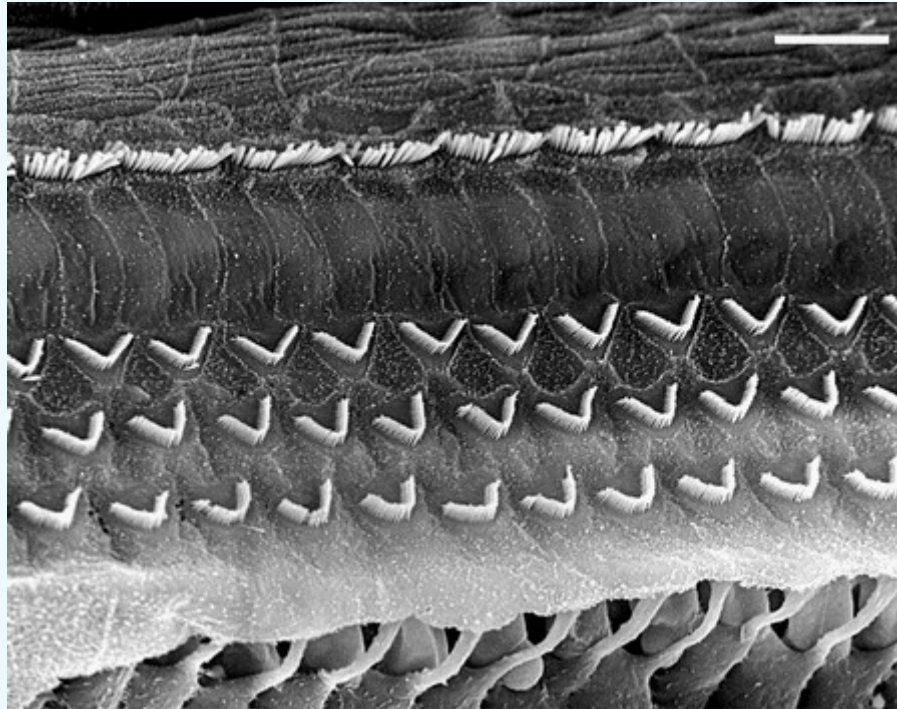
Vnější vláskové buňky (Outer Hair Cell, OHC)



"W" uspořádání stereocílií u OHC.

Všimněte si tří řad stereocílií o různé délce

Vnitřní a vnější vláskové buňky - uspořádání



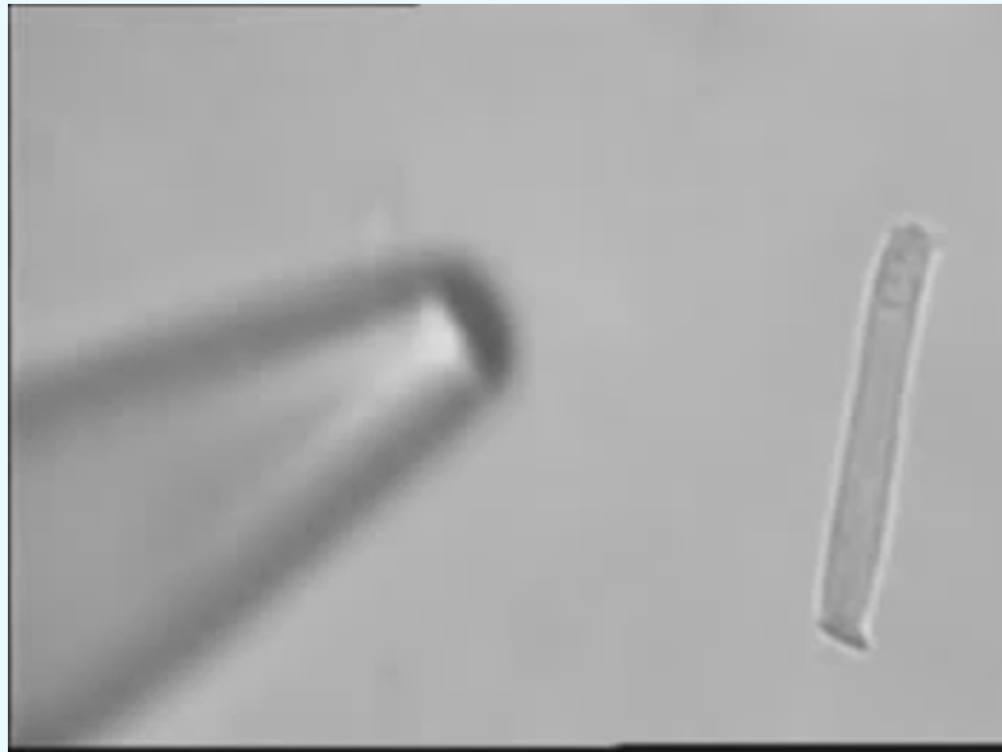
M Lenoir

Obrázek: Uspořádání vláskových buněk a jejich vlásků (stereocílii) ve vnitřním uchu, v blízkosti okrouhlého okénka.

Mikrofotografie povrchu vnitřních vláskových buněk (horní řada) a vnějších vláskových buněk (3 řady níže), oddělené tzv. Cortiho sloupci.

Pod vnějšími vláskovými buňkami ve zlomu jsou zobrazeny falangeální výběžky (phalangeal processes) Deiterových buněk níže.

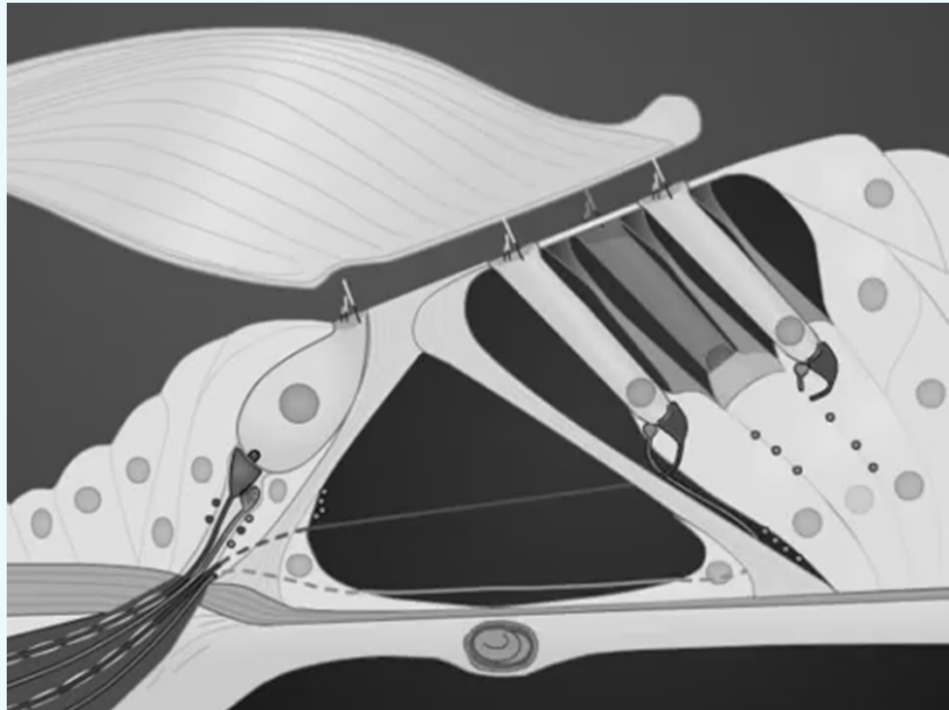
Pohyblivost vláskových buněk



Video:

A cochlear outer hair cell from guinea pig was inserted into a microchamber (a glass electrode) and voltage stimulation (from Japanese music) was applied to the cell through the microchamber. Outer hair cell changed its length (contraction and elongation) in response to the voltage stimulation.

Funkce Cortiho orgánu - animace



Funkce Cortiho orgánu pro tiché zvuky (např. řeč) mohou být schematicky shrnuty do 5 bodů:

(1) Zvukové vlny přenesené perilymfou způsobí rozkmitání bazilární membrány nahoru a dolů. Pasivní napětí mobilizuje basilární membránu od báze (vysoké tóny) k apexu (nízké tóny) kochley.

(2) Stereocilia vnějších vláskových buněk které jsou vloženy do tektoriální membrány, se ohýbají když se basilární membrána zdvihá, což způsobí depolarizaci buněk (influx of K^+ ionů).

(3) Excitované vnější vláskové buňky reagují kontrakcí (= elektromotilita). Vzhledem k vazbě mezi vnějšími vláskovými buňkami, bazil. Membránou a retikulární laminou, tento aktivní mechanismus vytváří energii která zesiluje původní kmity. Také to hraje roli při aktivním mechanismu výběru frekvencí.

(4) Dojde k excitaci vnitřní vláskové buňky vlivem jejího kontaktu s tektoriální membránou.

(5) Aktivuje se synapse mezi vnitřní vláskovou buňkou a nervovými vlákny sluchového nervu a signál je poslán do mozku.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



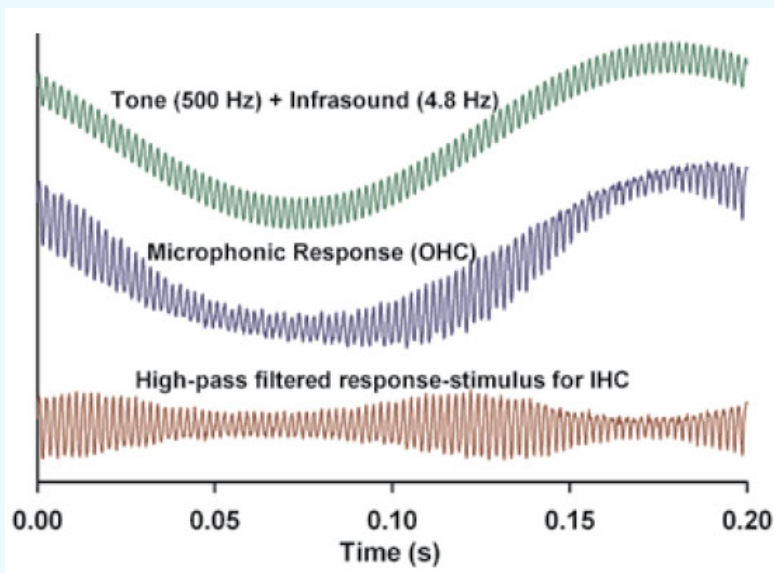
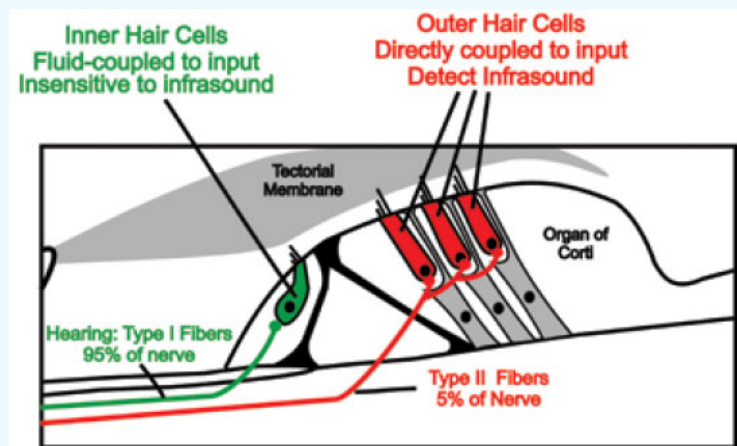
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – Vnější vláskové buňky, infrazvuk a větrné elektrárny



Obrázky č. 1 a 2
z publikace Salt
a Lichtenhan
2014

Zatímco vnitřní vláskové buňky reagují pouze na zvuk v rozmezí 20 Hz – 20 kHz, nejnovější výzkumy prozrazují, že vnější vláskové buňky reagují i na infrazvukové frekvence nižší než 20 Hz.

Tato citlivost způsobuje amplitudovou modulaci zvuků, které jsou již v pásmu slyšitelnosti.

Tento jev může částečně vysvětlit, proč někteří lidé mohou nepříznivě vnímat větrné elektrárny, které produkují infrazvukové vlny.





MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

VNITŘNÍ UCHO – otoakustické emise

Při zavedení krátkého zvukového impulsu do ucha, ucho odpoví také zvukem, který je možno registrovat mikrofonom umístěným v uchu. Jev byl popsán v roce 1978 Kempem. Tento zvuk vzniká aktivitou vnějších vláskových buňek (vnější vláskové buňky aktivně zakmitají jako odpověď na zvukovou vlnu) a nazývá se **otoakustická emise**.

Evokované emise jsou výbavné u 98% populace a jsou využívány pro objektivní audiometrii (objektivní vyšetření sluchu).

Pokud se vybaví otoakustická emise, znamená to, že vnitřní ucho je v pořádku. Otoakustické emise jsou s výhodou používány pro vyšetření sluchu kojenců (screening).

Možnost zjištění sluchové vady / hluchoty ve velmi ranném věku s tím, že je zde možnost nastolení sluchu pomocí kochleárního implantátu.

Existují i spontánní otoakustické emise – zvuky, vznikající ve vnitřním uchu bez stimulace.

Tyto však nejsou tak časté.

Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system

J. Acoust. Soc. Am. 64(5), Nov. 1978

D. T. Kemp

Auditory Perception Research Laboratory, The Royal National Throat, Nose and Ear Hospital, Gray's Inn Road, London, England WC1X 8DA

(Received 5 April 1978; revised 10 July 1978)

A new auditory phenomenon has been identified in the acoustic impulse response of the human ear. Using a signal averaging technique, a study has been made of the response of the closed external acoustic meatus to acoustic impulses near to the threshold of audibility. Particular attention has been paid to the waveform of the response at post excitation times in excess of 5 ms. No previous worker appears to have extended observations into this region. The response observed after about 5 ms is not a simple extension of the initial response attributable to the middle ear. The oscillatory response decay time constant was found to change from approximately 1 ms to over 12 ms at about this time. The slowly decaying response component was present in all normal ears tested, but was not present in ears with cochlear deafness. This component of the response appears to have its origin in some nonlinear mechanism probably located in the cochlea, responding mechanically to auditory stimulation, and dependent upon the normal functioning of the cochlea transduction process. A cochlear reflection hypothesis received some support from these results.

PACS numbers: 43.66.Ba, 43.63.Kz, 43.63.Rf



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

KOCHLEÁRNÍ TRANSDUKCE

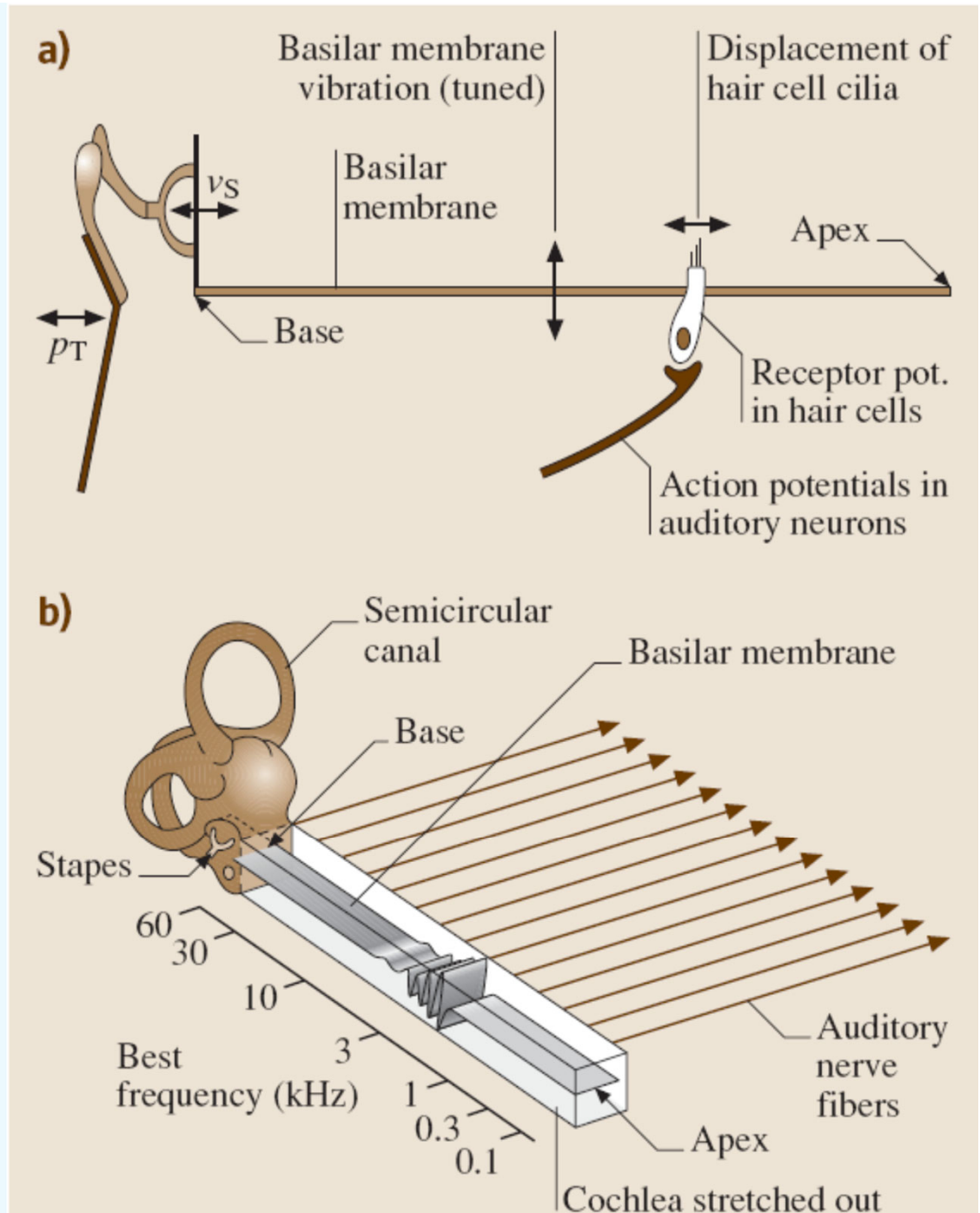
Fig. 12.6 (a) Souhrn kroků v přímém kochleární transdukcii (zesílení a převod zvuku kochleou).

(b) Schematický diagram ukazující bazilární membránu v napřímené kochleai a podstata frekvenční analýzy.

Momentka vychýlení bazilární membrány (značně zvětšena) při tónu s frekvencí kolem 3 kHz.

Frekvenční stupnice vlevo ukazuje místa maximálních vychýlení membrány při různých frekvencích pro kochleu kočky. Pro lidskou kochleu frekvenční stupnice běží od 20 do cca 15kHz.

Řada sluchových nervových vláken (Auditory nerve fibers) je ukázána paralelními čarami vpravo. Každé vlákno inervuje vláskovou buňku v jednom místě bazilární membrány, takže citlivost vlákna je maximální na frekvenci odpovídající tomuto místu. Jinými slovy, separace frekvencí učiněná bazilární membránou je uchována v nervových vláknech. (Další poznatek o [místním kódování](#)).



From: Young 2007, p.437



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Časové kódování zvuku ve sluchovém orgánu

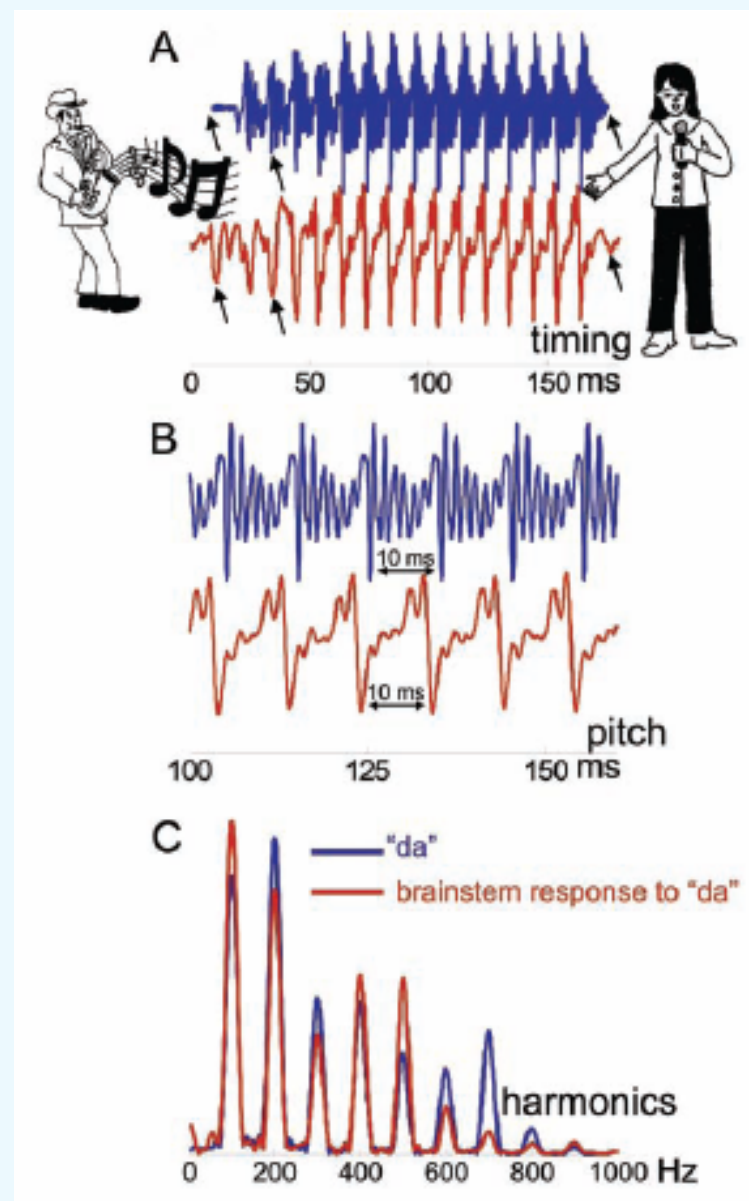
Bylo zjištěno, že sluchové nervy jsou schopny přenést komplexní časový průběh zvukové vlny až do sluchového centra v mozgovém kmeni (auditory centre in brainstem).

Obrázek vpravo (A,B) ilustruje modře původní zvuk a červeně signál zaznamenaný elektrodami z mozkového kmene.

Je evidentní, že signál z mozkového kmene reprodukuje periodu původního signálu. Jsou zde přítomny i příslušné harmonické složky, i když jen do určité frekvence (vysoké harmonické frekvence jsou zde odfiltrovány).

Jakým způsobem dochází k takovému **časovému kódování** ve sluchovém orgánu?

N. Kraus and T. Nicol. The musician's auditory world.
Acoustics Today 6 (3):15-25, 2010. Fig.3.





evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

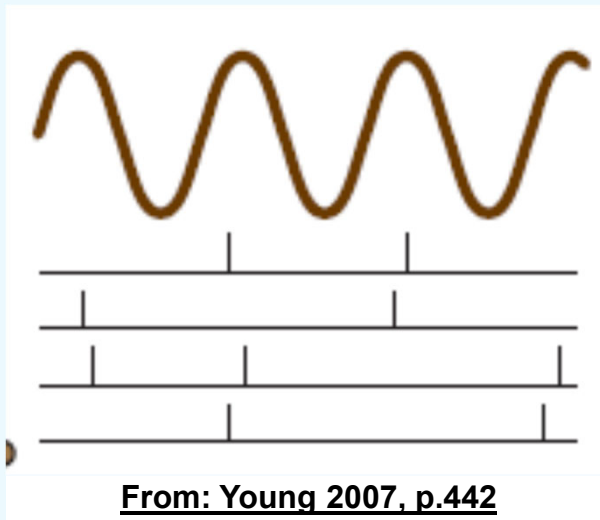
Vyjádření zvuku ve sluchovém nervu

Vlákna sluchového nervu (AN fibers) vyjadřují tvar vlny zvuku (jeho jemnou strukturu) **fázovou synchronizací** (phase-locking) s podnětem. Dochází tak k tzv. **časovému kódování**.

Obr. 12.8c : Sinusoidní vlna (čistý tón) a příklady impulzních řad ve 4 vláknech sluchového nervu jako odezva na tento podnět.

Odezvové impulsy se neobjevují náhodně ale ve specifické fázi podnětu – v tomto příkladu v blízkosti kladného vrcholu podnětové vlny.

Fázová synchronizace není naprosto přesná – impulsy se nevybudí při každém cyklu a vyrovnání impulsů lehce kolísá.



From: Young 2007, p.442

Young 2007, Fig.12-8(c, Inset): The phase-locked spike trains.

Impulsy jsou vybudeny více vláskovými buňkami a přenášeny více nervovými vlákny. Poté se jednotlivé neúplné řady impulsů sečtou a vykompenzují. Fourierova transformace řady impulsů má obecně největší vrchol na frekvenci shodné s frekvencí podnětu.

Fázová synchronizace nervových vláken (AN phase-locking) je důležitá pro **percepci lokalizace zvuku**. Relativní doba mezi výskytem impulsů z obou uší je používána pro výpočet doby zpoždění zvukové vlny při šíření kolem hlavy a tak poskytuje informaci o úhlu zdroje zvuku.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

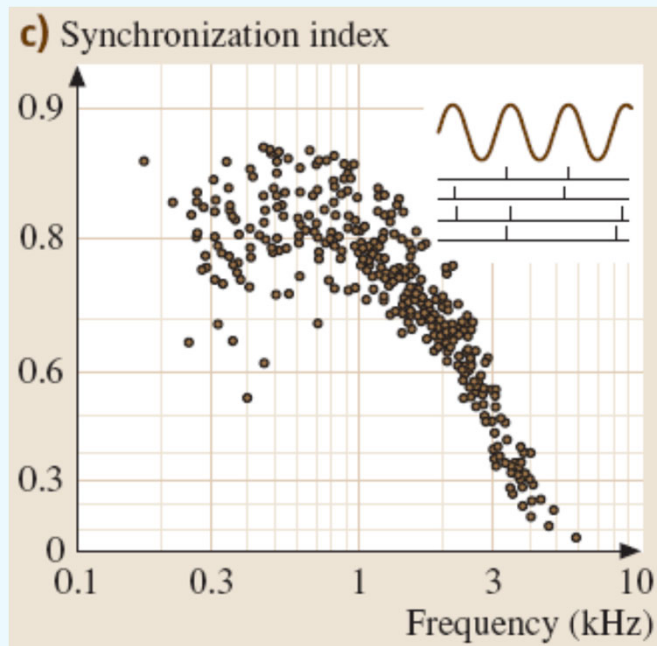
INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Vyjádření zvuku ve sluchovém nervu

Synchronizace fáze se vyskytuje při frekvencích do několika kHz (různě u různých živočichů).

Obr. 12.8c ukazuje míru fázové synchronizace prostřednictvím synchronizačního indexu (definován níže) v závislosti na frekvenci tónu.

Data jsou od kočky – zde je fázová synchronizace nejsilnější pod 1 kHz a zmizí kolem 6 kHz.



From: Young 2007, p.442

Fázová synchronizace vždy vykazuje dolnoproputnost: Je silná na nízkých frekvencích a neexistující na vysokých frekvencích.

Nejvyšší frekvence při které lze pozorovat fázovou synchronizaci je různá u různých živočichů – je nižší u hlodavců než u koček [12.83].

Jaká je tato frekvence u lidí? Pro zjištění použijte simulátor CochSim!

Young 2007, Fig.12-8(c): Strength of phase-locking in a population of AN fibers to a BF tone plotted as a function of BF. Phase-locking is measured as the synchronization index, equal to the magnitude of the Fourier transform of the spike train at the stimulus frequency divided by the average rate. The inset illustrates phase-locked spike trains.



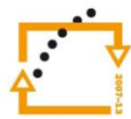
evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



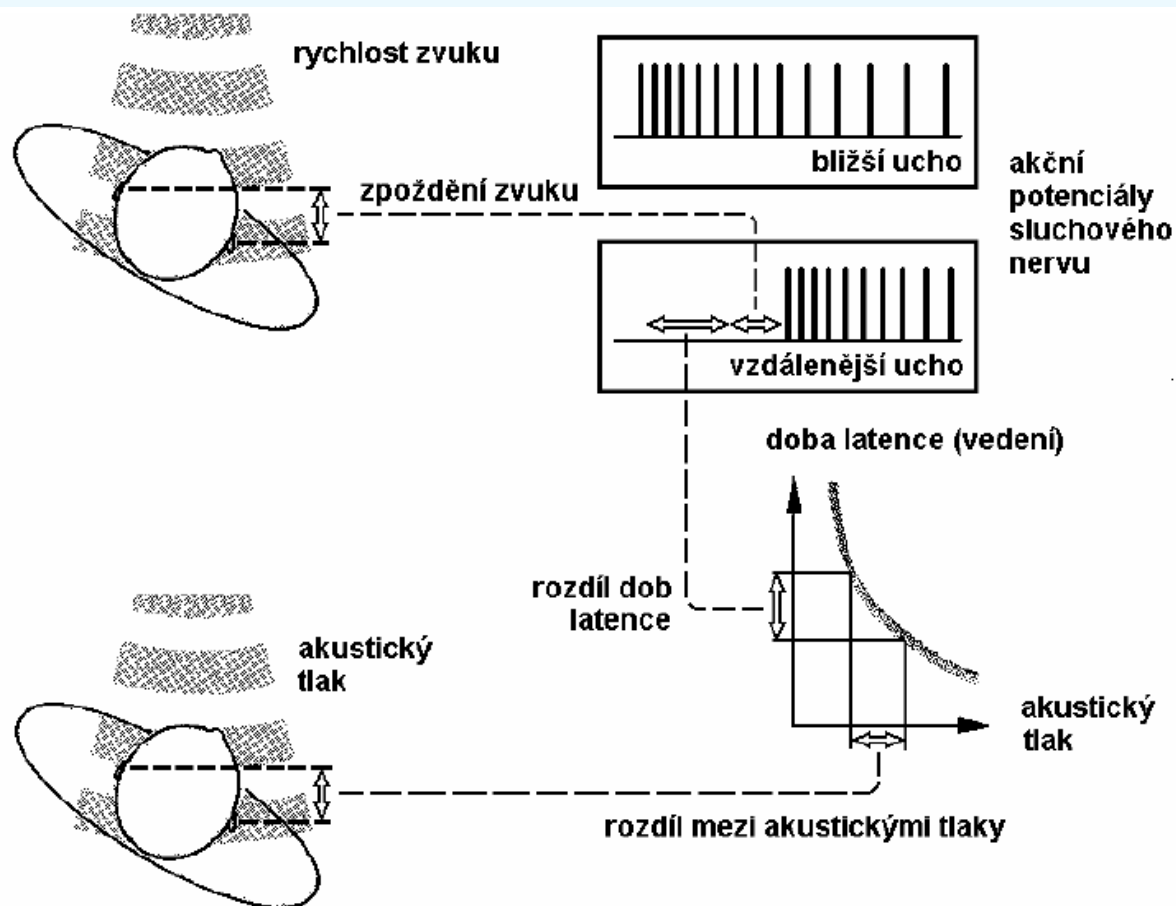
OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Lokalizace zvukového zdroje

Směr odkud zvuk přichází je rozpoznáván podle:

- 1) Zpoždění zvuku mezi bližším a vzdálenějším uchem
- 2) Rozdílu akustického tlaku v obou uších (ubývání akustického tlaku se vzdáleností + směrový účinek vnějšího ucha)

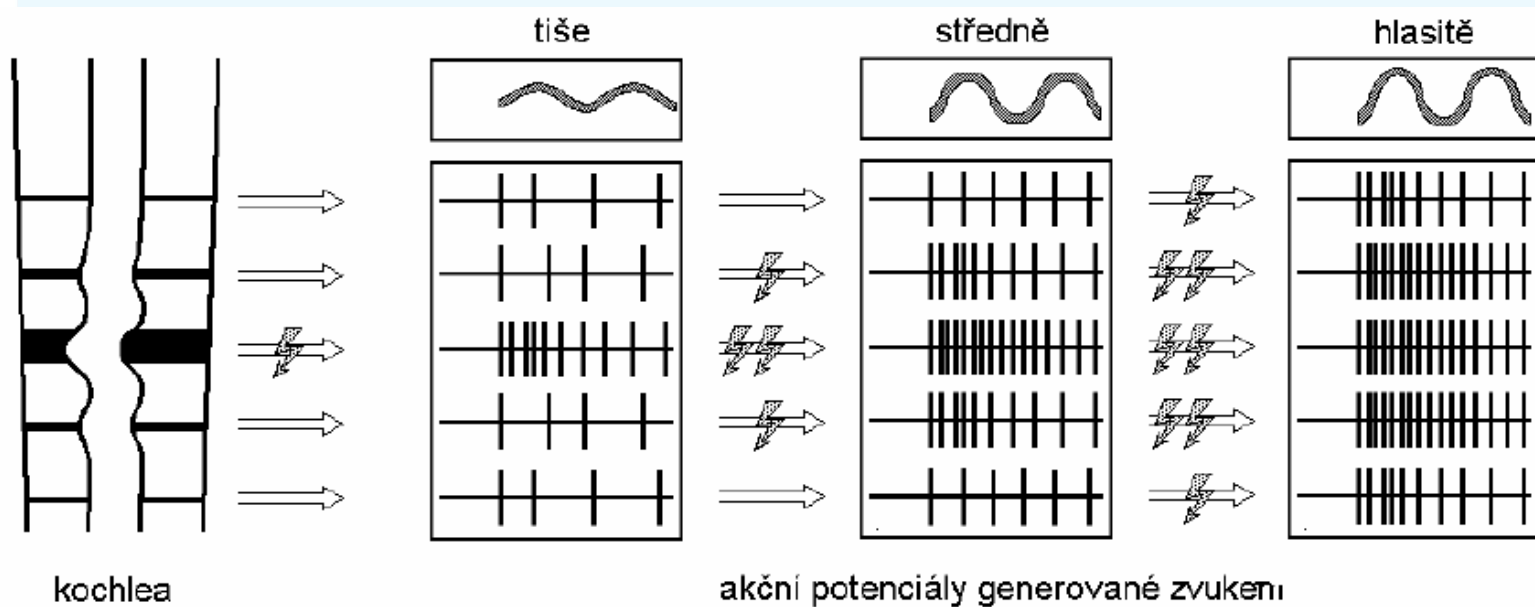


Obr.5.9 Principy
lokalizace zvukové-
ho zdroje (podle [8])

Kódování intenzity zvuku ve vnitřním uchu

Zvyšování intenzity zvuku se projeví:

- 1) Zvětšením počtu impulsů v jednotlivých nervových vláknech (méně impulsů je vynecháváno)
- 2) Rozšířením množství excitovaných nervových vláken. Největší excitace je v místě vlákna, které odpovídá frekvenci tónu. Okolní vlákna jsou excitována také – tím více, čím větší je intenzita zvuku.



Obr.5.4 Závislost lokální elektrické kochleární odezvy na hlasitosti přijímaného zvuku (podle [8])

Demonstrace kochleární funkce

<http://www.cochlea.org/en/spe>



GENERAL AUDIENCE

FRANÇAIS | ENGLISH | ESPAÑOL | PORTUGUÊS

Journey into the world of Hearing

STUDENTS AND PROFESSIONALS

- SOUND
- EAR
- COCHLEA
- AUDITORY BRAIN
- DEVELOPMENT AND PLASTICITY
- AUDIOMETRY
- PATHOLOGY
- REHABILITATION
- RESEARCH LINES

Cochlear

Website director: Rémy Pujol.
Graphics, drawings, animations: Stéphane Blatrix.
Web engineer, administrator: Stéphane LeMerre.
Designer assistant: Benjamin Chaix.

This section 'Students and Professionals' is a new generation of the well known 'Promenade around the cochlea' still on line. Beside the material originally in 'Promenade', this new site will deal with other aspects of the auditory physiology and pathology, and incorporate rehabilitation and current research? In the meantime, it is worth visiting the 'General Audience' section.

All rights reserved © 2009-2010 NeurOreille and the authors (Intellectual property law 85-660, July 3rd 1985). This website is for educational purposes only. It cannot be used for commercial benefit. All schemes, drawings and pictures belong to their respective authors. For permission to non-commercial use of any element of this site, please see "Contact" below.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



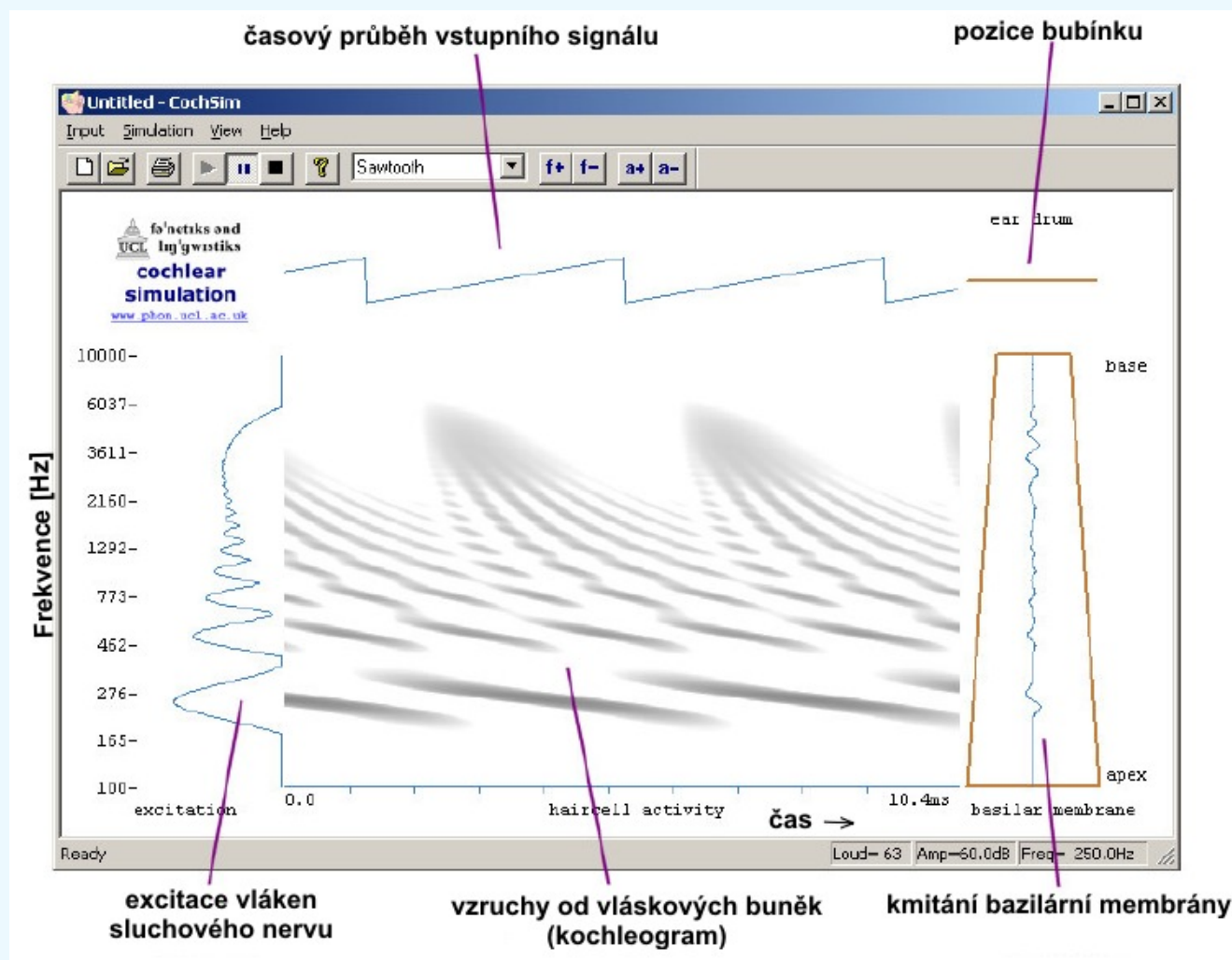
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Simulace kochleární funkce



CochSim software by Mark Huckvale (University College London)

Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences

Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

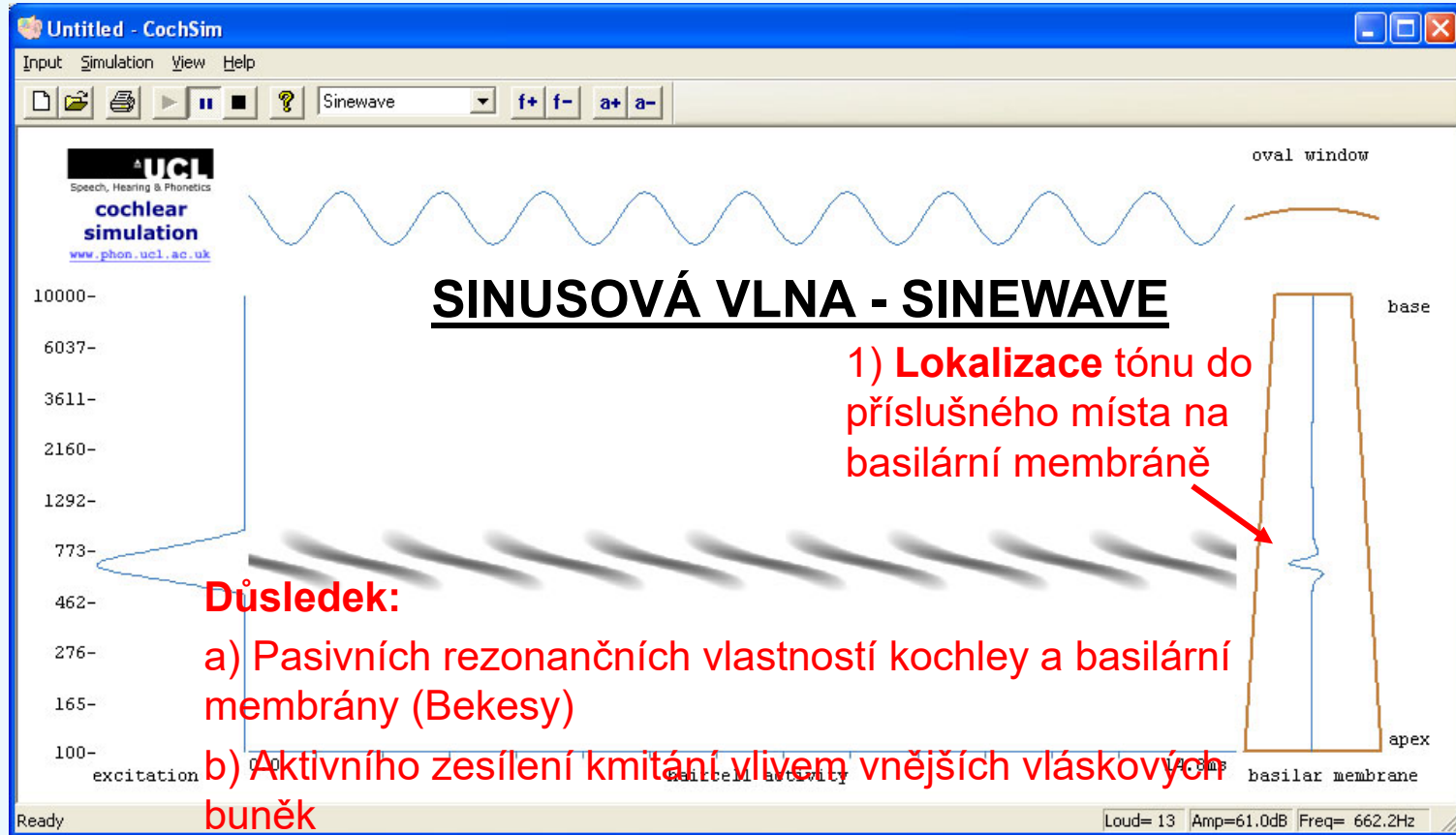


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

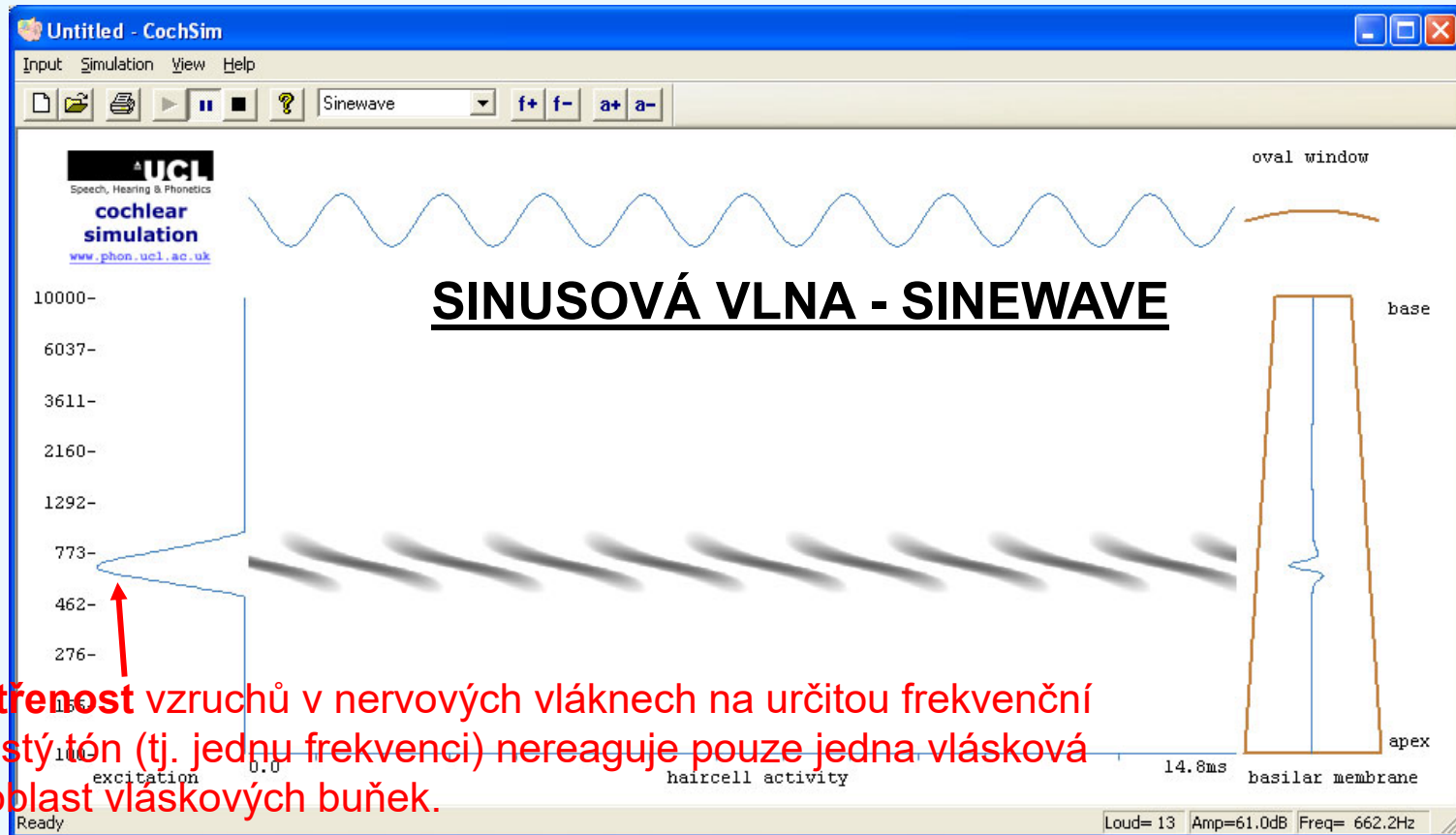


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce



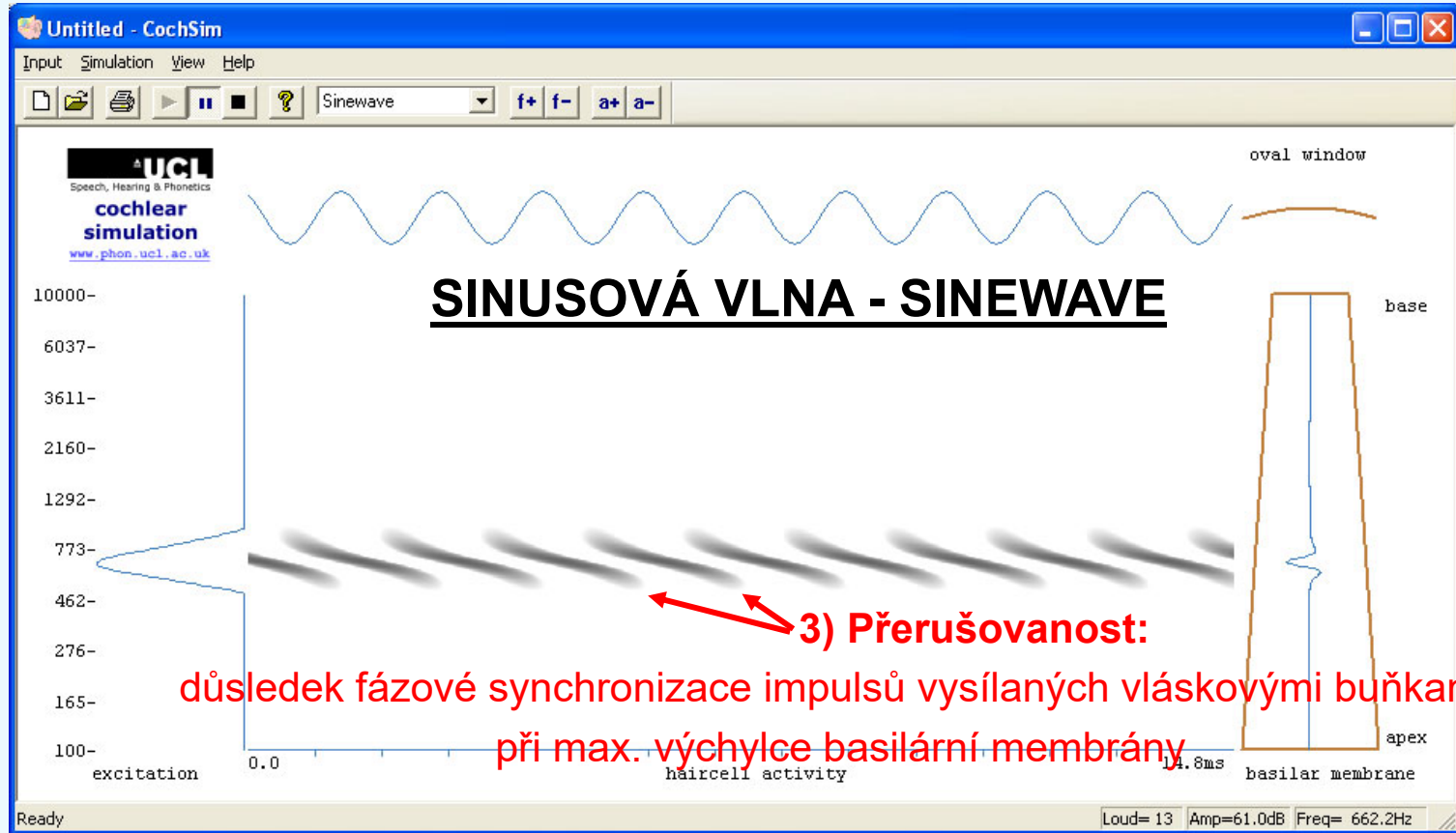
2) **Rozprostřenost** vzruchů v nervových vláknech na určitou frekvenční oblast: na čistý tón (tj. jednu frekvenci) nereaguje pouze jedna vlásková buňka, ale oblast vláskových buňek.

CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

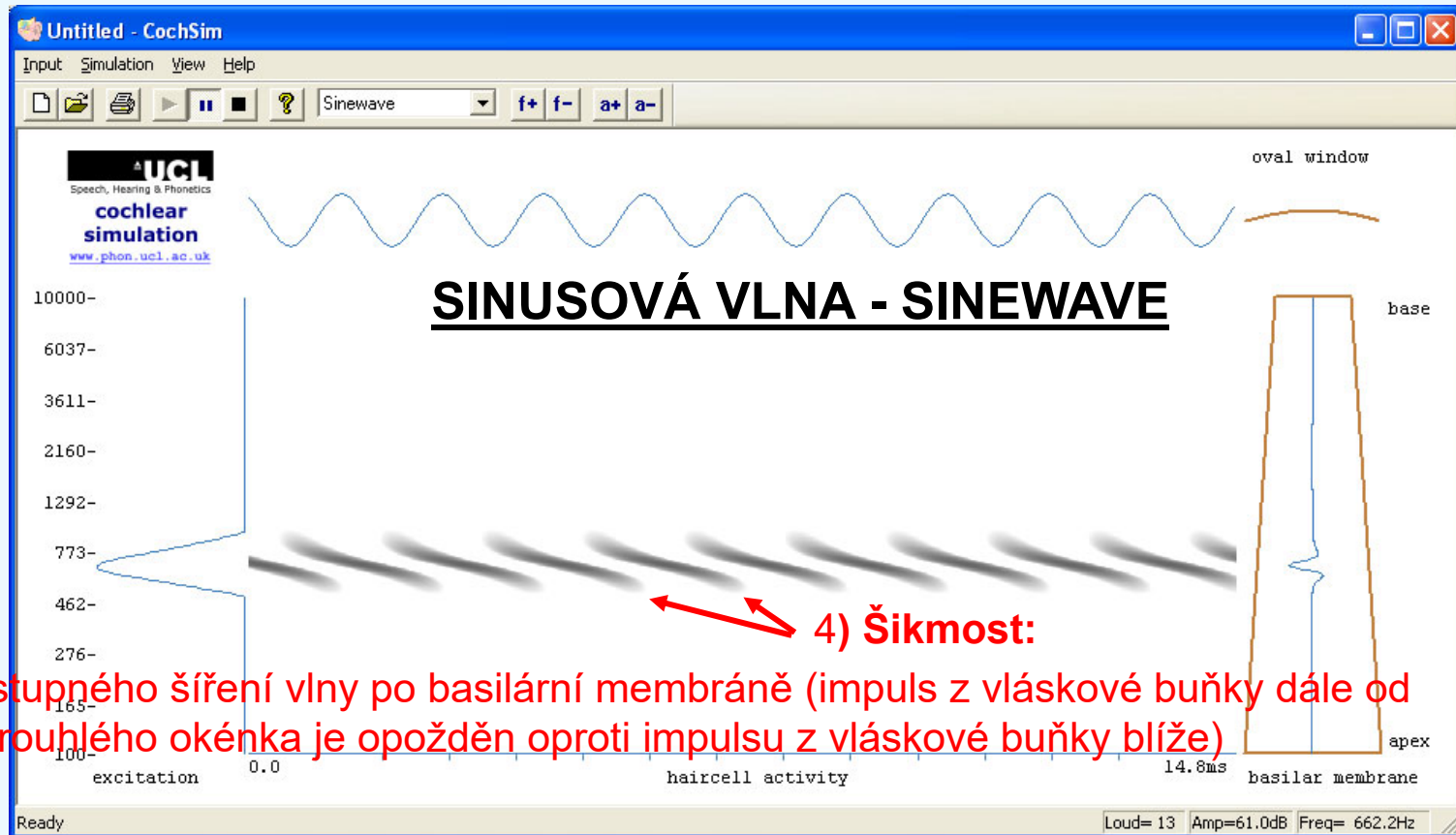


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

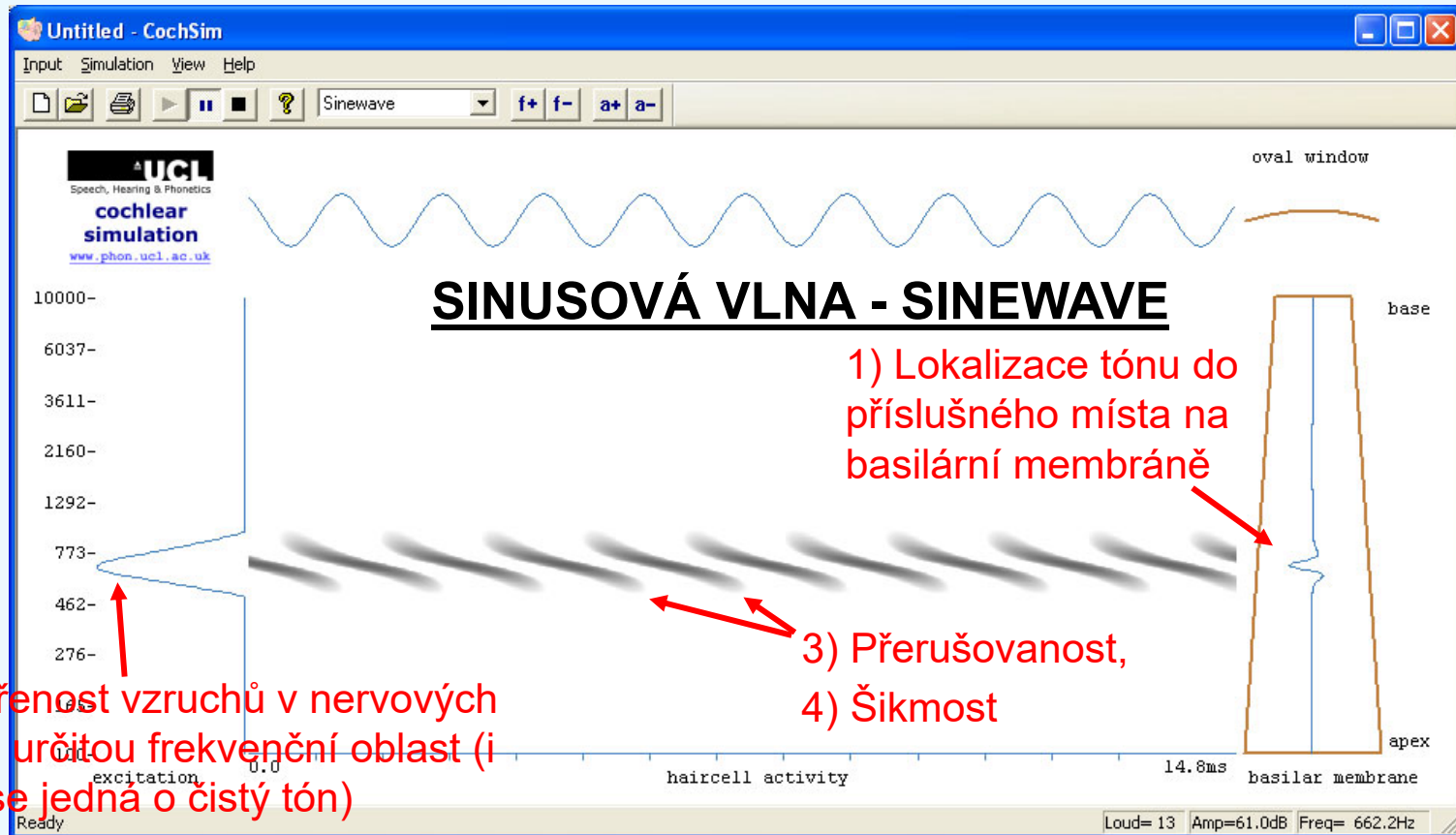


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

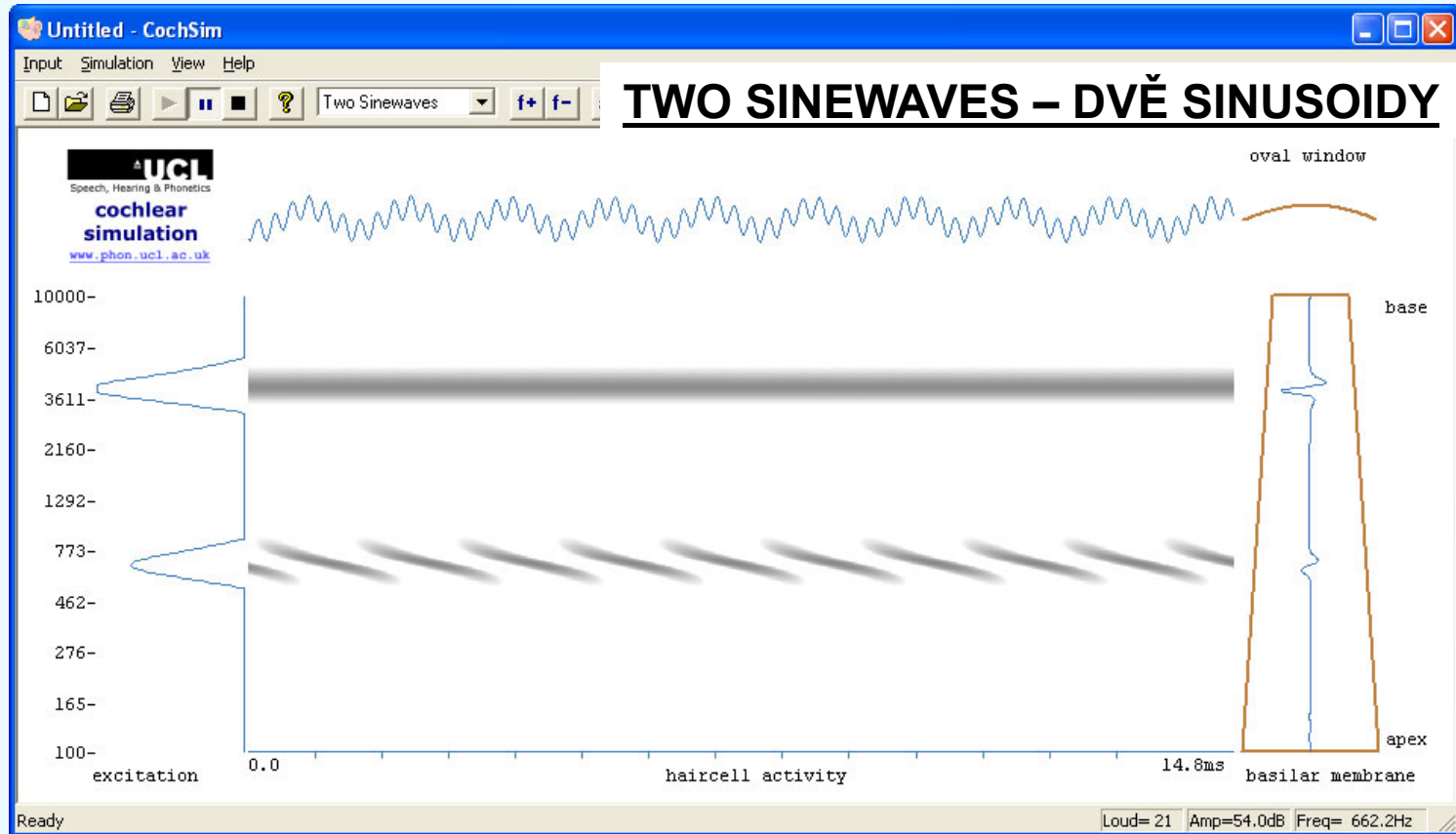


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce



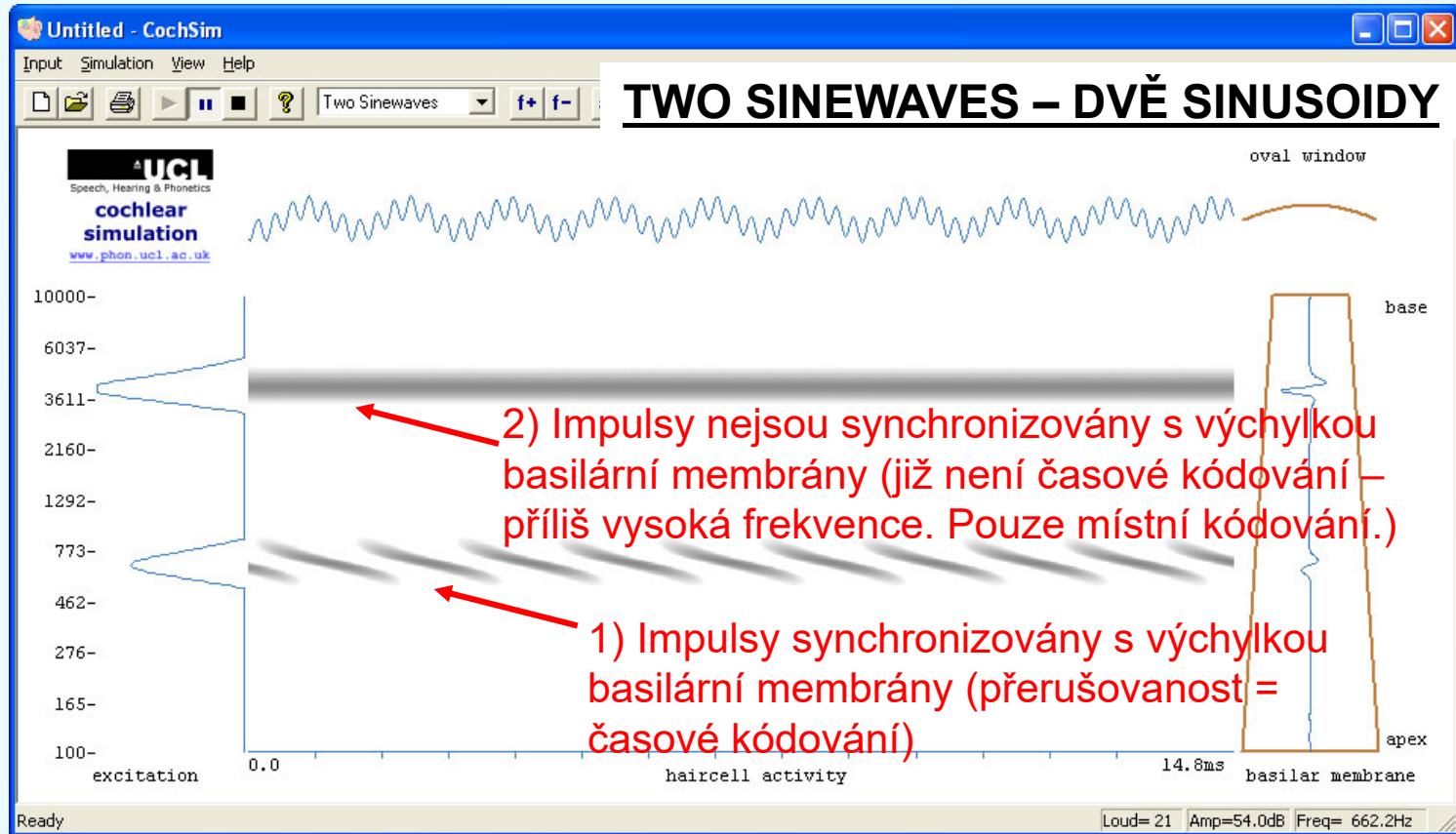
CochSim software by Mark Huckvale (University College London)

Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

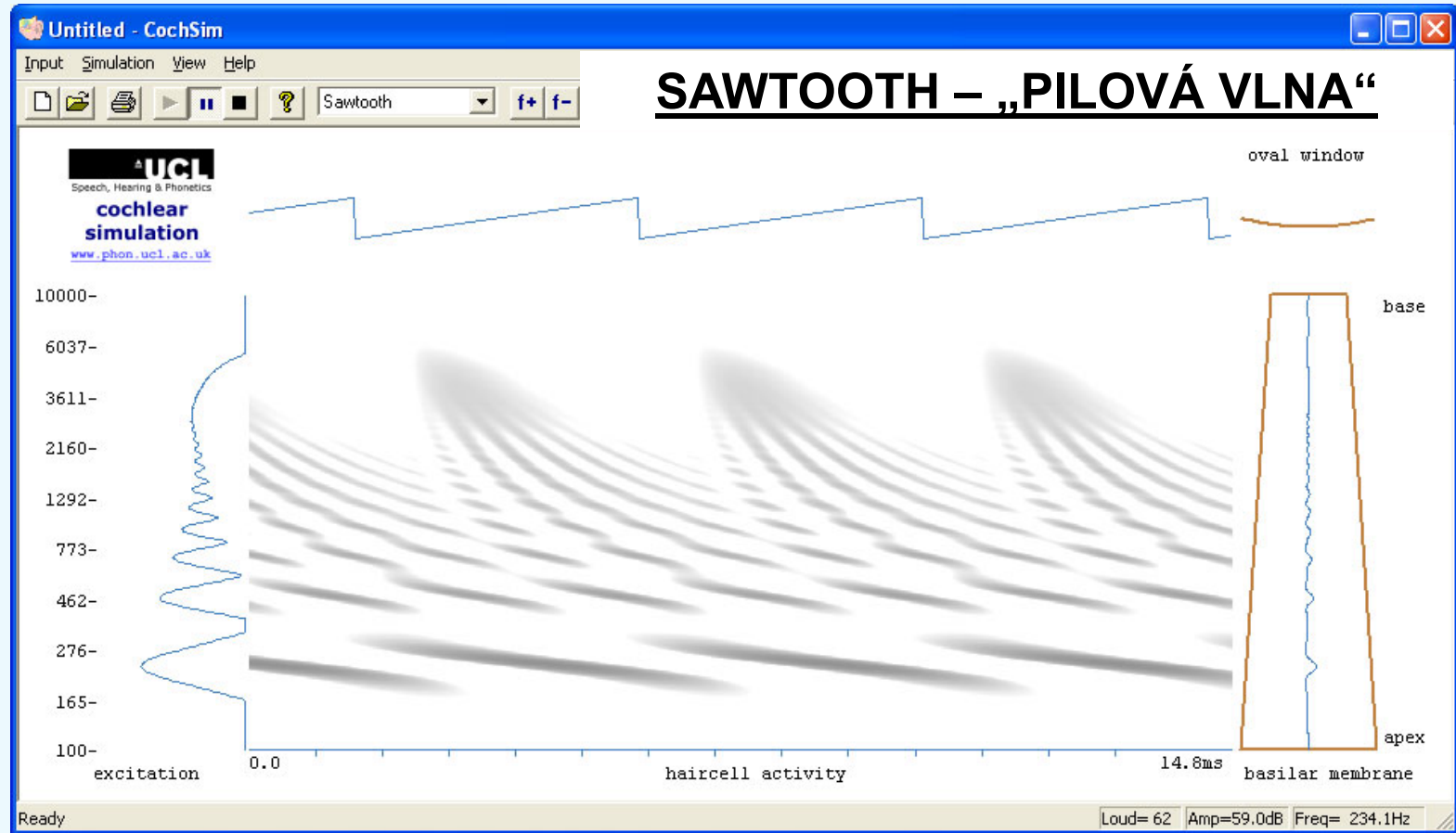


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

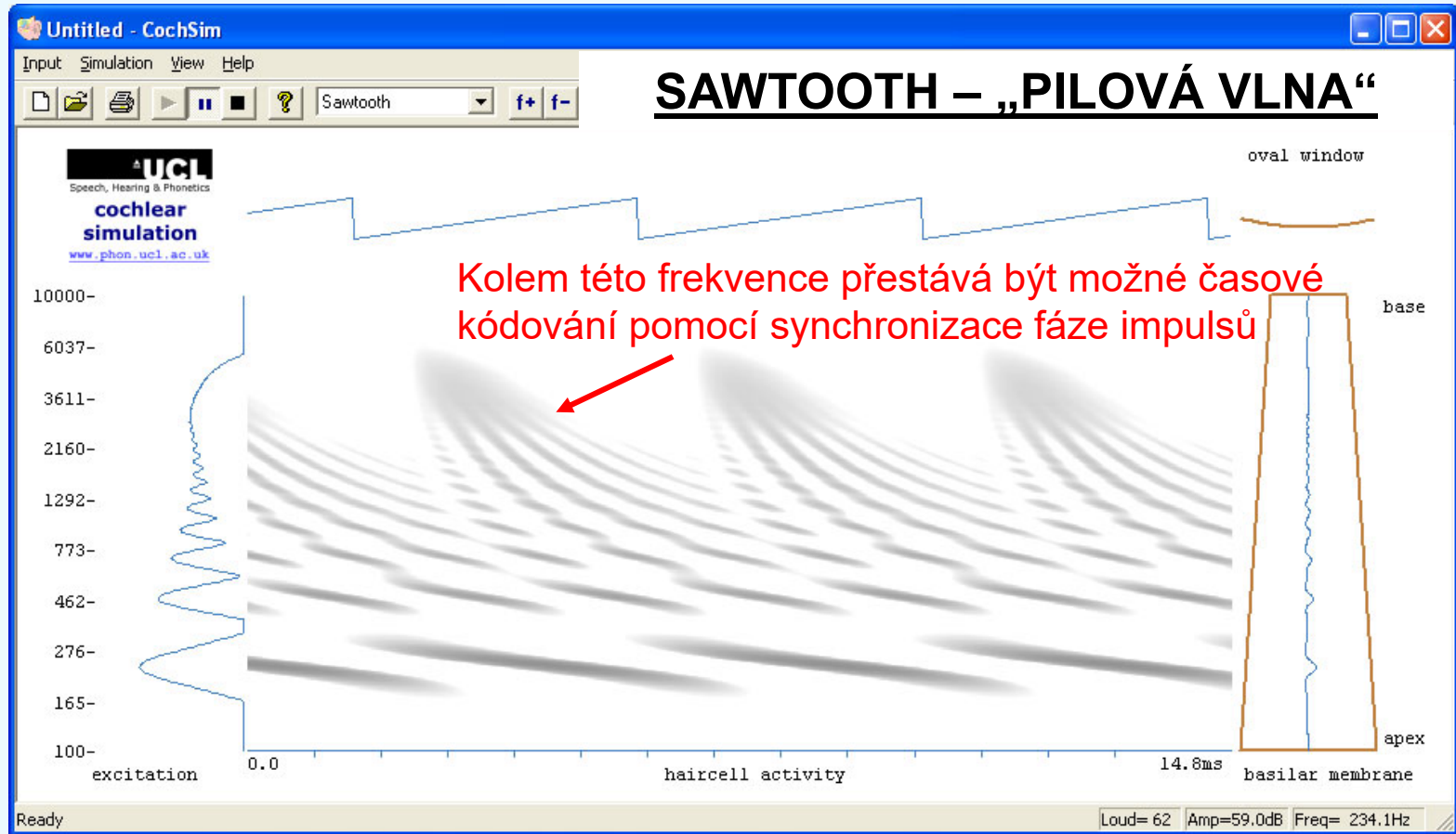


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

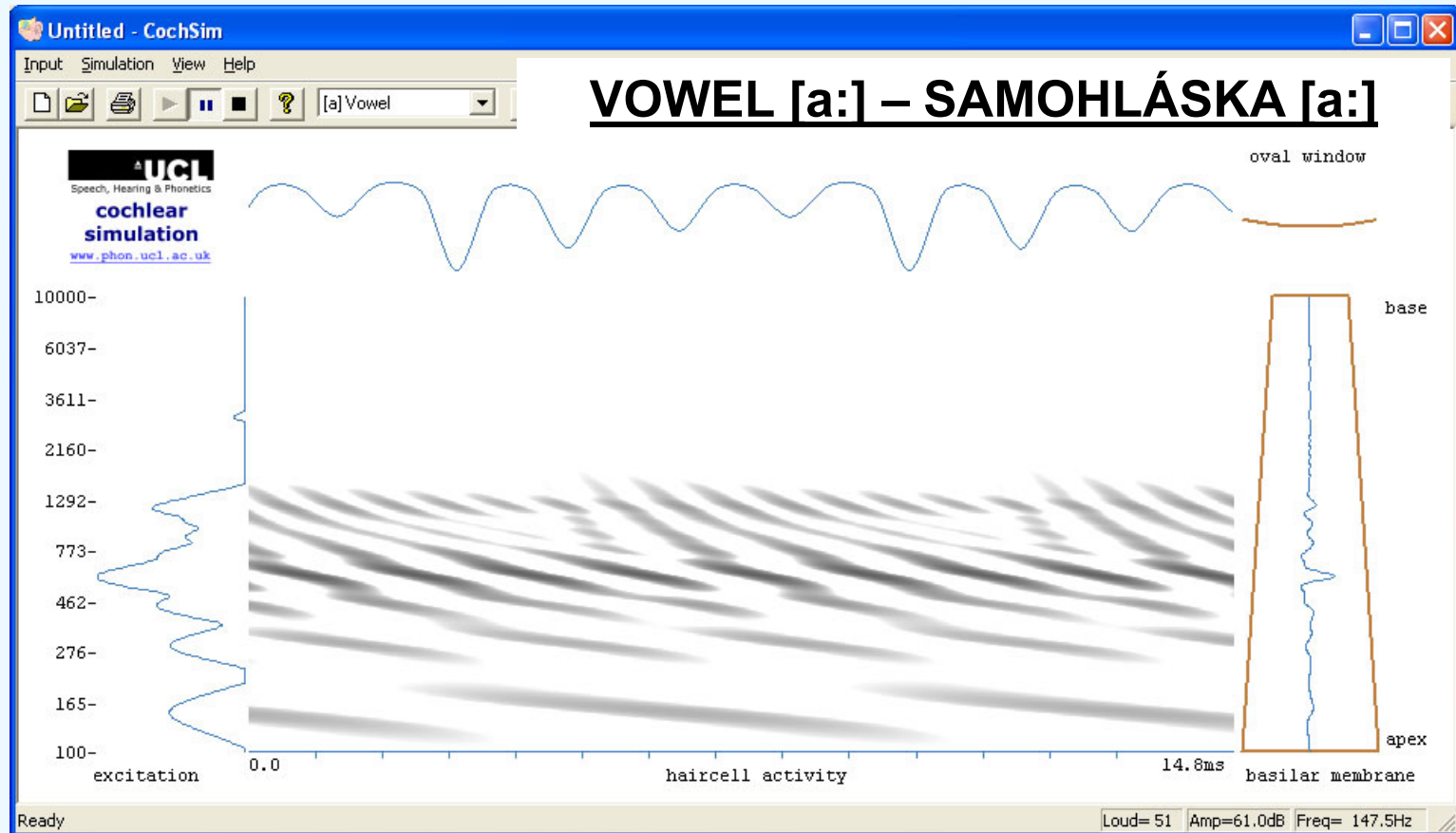


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce

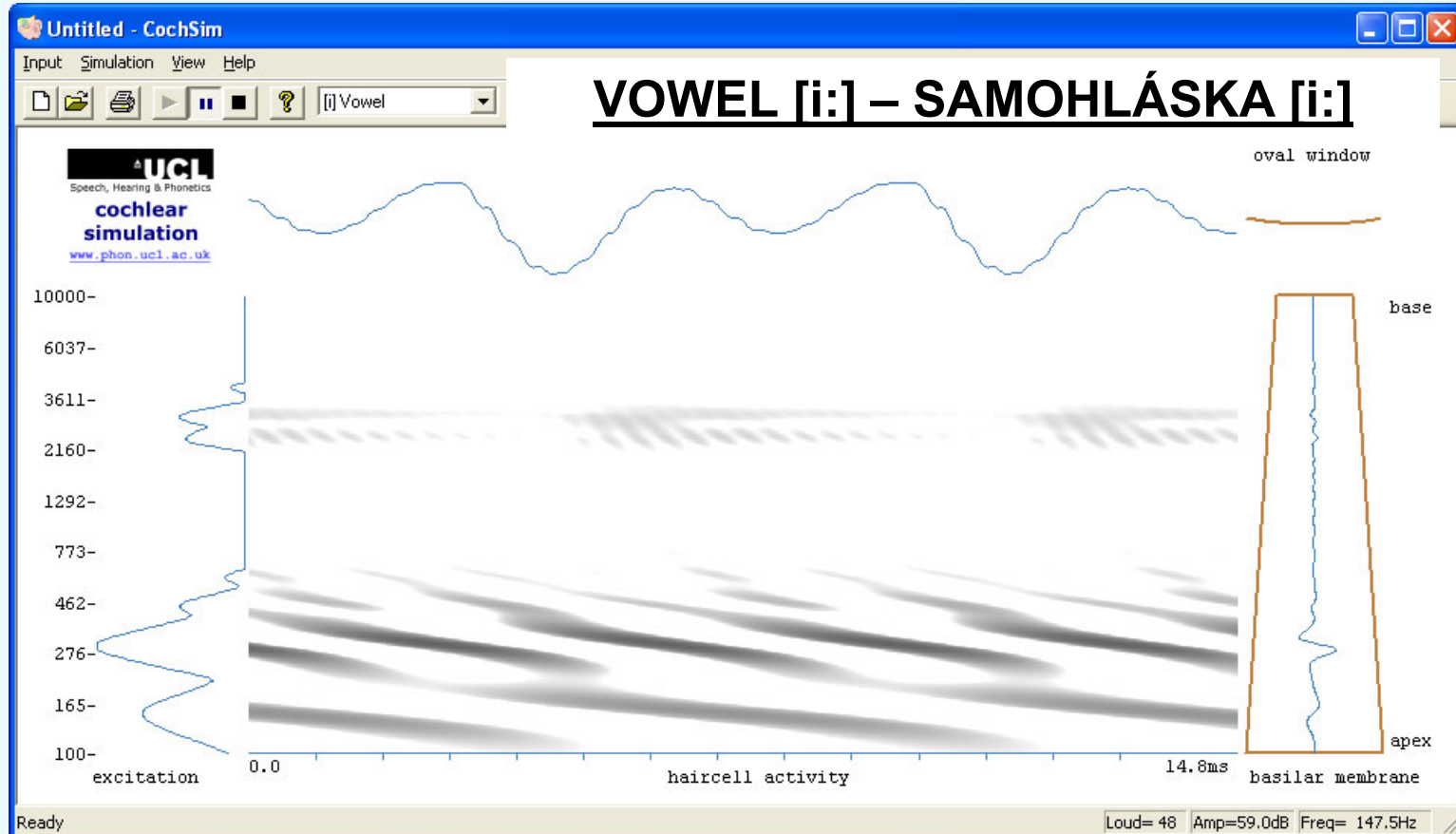


CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences



Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce



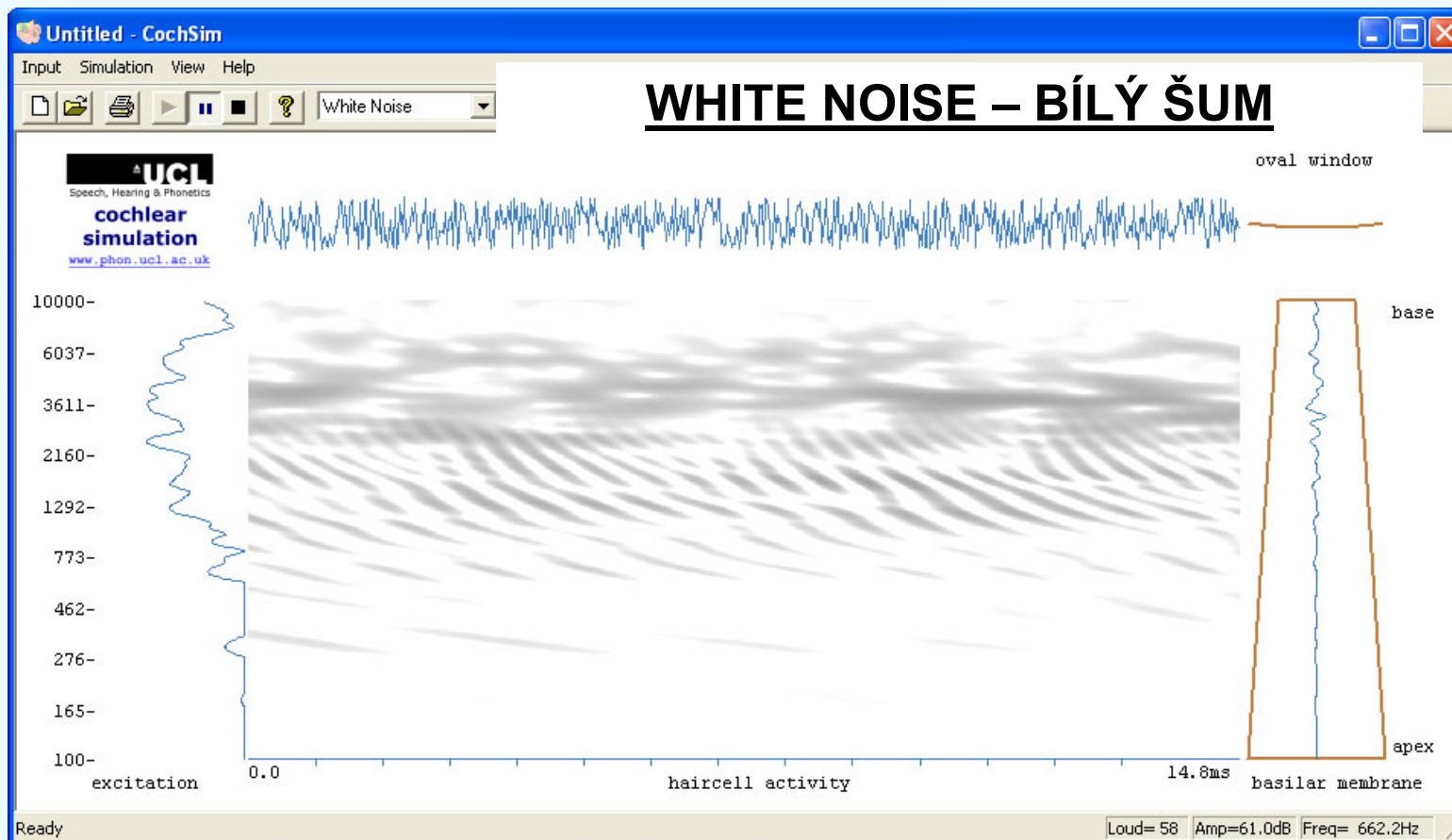
CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>



UCL Division of Psychology and Language Sciences

**Pozn: Bílý
šum
obsahuje
rovnoměrně
všechny
frekvence**

Simulation of the cochlear function / Simulace kochleární funkce



CochSim software by Mark Huckvale (University College London)
Freely downloadable from <http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/cochsim/>

UCL Division of Psychology and Language Sciences





evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Šíření zvukové energie a informace ve sluchovém systému (Kent 1997, p. 223)

Akustická energie (černé šipky) jakožto i informace (světlé šipky) se šíří ve dvou směrech: dopředu i dozadu.

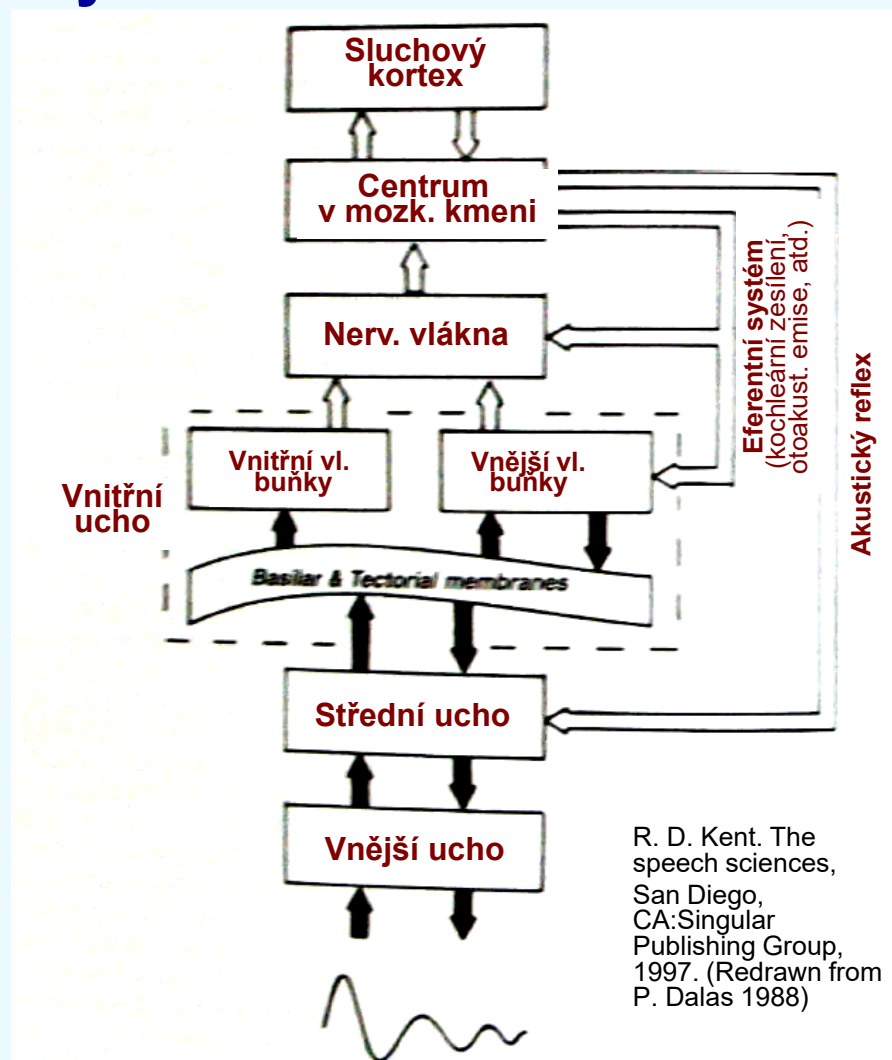
ŠÍŘENÍ ZVUK. ENERGIE:

Dopředu – přenáší zvukové vibrace z vnějšího světa k vláskovým buňkám.

Zpětné – zvuk šířící se sluchovým orgánem opačným směrem.

Zapříčiněn:

- 1) Odrazy od povrchů vnějšího, středního a vnitřního ucha
- 2) Aktivitou vnějších vláskových buněk



R. D. Kent. The speech sciences, San Diego, CA: Singular Publishing Group, 1997. (Redrawn from P. Dalas 1988)

R. D. Kent. The speech sciences, San Diego, CA: Singular Publishing Group, 1997. (Redrawn from P. Dalas 1988)

Fig. 6-14: Flow of energy and information in the auditory system.

The **dark** arrows represent energy flow.

The **unfilled** arrows represent information flow.

Šíření zvukové energie a informace ve sluchovém systému (Kent 1997, p. 223)

Akustická energie (černé šipky) jakožto i informace (světlé šipky) se šíří ve dvou směrech: dopředu i dozadu.

ŠÍŘENÍ INFORMACE:

Dopředu – začíná ve vláskových buňkách a přenáší informaci o zvuku nervovými vlákny do centrálního nervového systému (tj. mozkového kmene a sluchového kortexu v kůře mozkové).

Zpětně – zapřičiňuje:

- 1) Akustický reflex ve středním uchu
- 2) Kochleární zesílení, otoakustické emise, další komplexní děje

R. D. Kent. The speech sciences, San Diego, CA: Singular Publishing Group, 1997. (Redrawn from P. Dalas 1988)

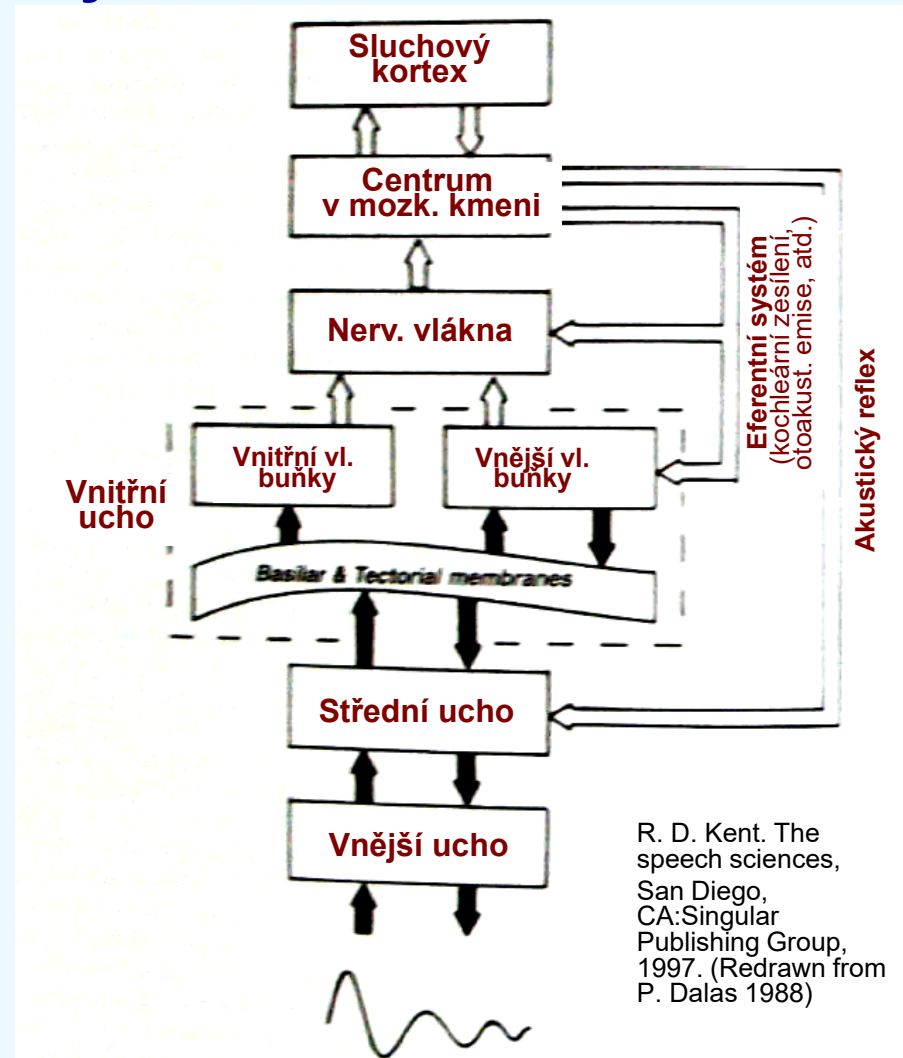


Fig. 6-14: Flow of energy and information in the auditory system.

The **dark** arrows represent energy flow.

The **unfilled** arrows represent information flow.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

Slyšení při kostním vedení zvuku (Sedláček 1956, str. 165)

Nejúčinnější slyšení je dosaženo standardní cestou – převodem vibrací přes bubínek a sluchové kůstky do tekutiny vnitřního ucha.

K sluchovému vjemu dochází ale i když dojde k rozkmitání tekutiny vnitřního ucha přímým převodem zvuku lebečními kostmi – tzv. kostním vedením.

Kostní vedení umožní sluch při poruše převodního aparátu středního ucha. Práh sluchu je však výrazně zvýšen o cca 40 dB. (Zvuky jsou vnímány o 40 dB slaběji).

Kostní vedení bývá využíváno pro diagnostiku vad sluchu.

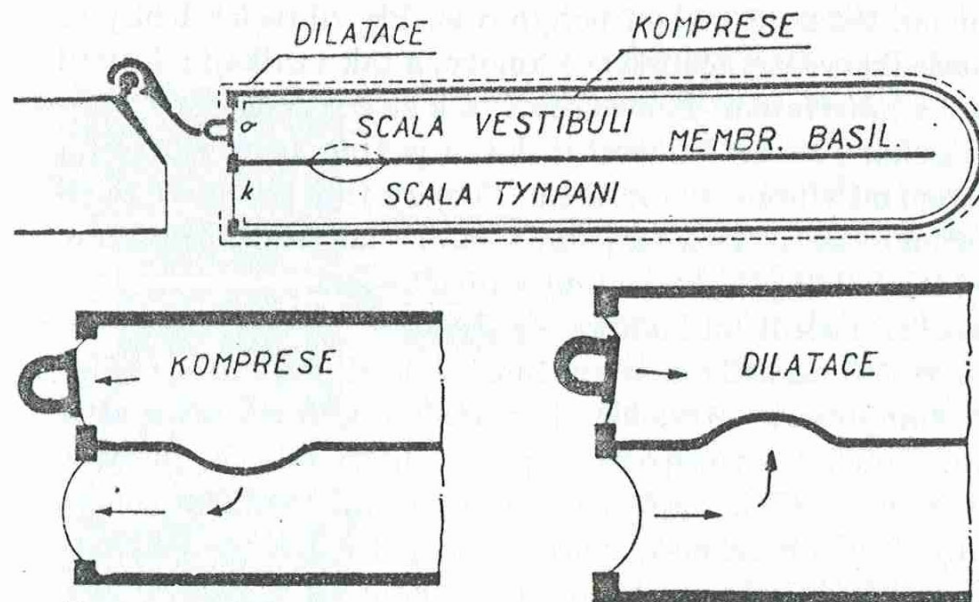
Při kostním vedení se zvuková vlna projeví jako střídavá koncentrická komprese labyrinthu.

Celý labyrint mění periodicky svůj objem. Tlak se vyrovnává přes obě okénka – při kompresi se obě okénka vyklenou ven, při dilataci dovnitř.

- To je rozdílné od vzdušného vedení, kdy obě okénka kmitají v protifázi.

Oválné okénko s třmínkem je tužší než okénko okrouhlé a vychyluje se méně. To vede k rozkmitání tekutiny a basilární membrány.

Při zvýšení tuhosti oválného okénka (např. vlivem zvýšené tuhosti převodního aparátu při onemocnění středního ucha) dochází k větším výchylkám tekutiny a k zesílení kostního vedení.



Obr. 78. Kompresní složka kostního vedení.

Nahoře: přehledné schema, dole: pohyby obou okének ve fázi komprese a dilatace.



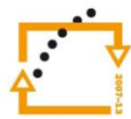
evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



**OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost**

INVESTICE
DO ROZVOJE
VZDĚLÁVÁNÍ

KONEC DÍLU