

# Přednášky z lékařské biofyziky

Úvod do biofyziky receptorů, Biofyzika sluchového analyzátoru



# Obsah přednášky

Obecné poznatky o smyslovém vnímání

Vnímání zvuku

- Vlastnosti zvuku

- Biofyzikální funkce ucha

Biofyzikální funkce vestibulárního systému



# Biofyzika vnímání

Obecná charakteristika smyslového vnímání

➤ **Smyslové vnímání** - příjem a uvědomování si informací

a) z vnějšího prostředí: Zrak, sluch, čich, chuť a hmat

b) z nitra organismu: informace o poloze, aktivním i pasivním pohybu (vestibulární aparát, nervová zakončení v muskuloskeletálním systému), změnách složení vnitřního prostředí a bolest.

➤ **Komplexní pocity**: hlad, žízeň, únava aj.

# Rozdělení receptorů



## a) Podle druhu působící energie:

- mechanoreceptory
- termoreceptory
- chemoreceptory
- fotoreceptory

adekvátními a neadekvátní podněty

## b) Podle složitosti:

- volná nervová zakončení (bolest)
- smyslová tělíska (senzitivní nervové vlákno + vazivový obal)
- smyslové buňky (součásti smyslových orgánů)

## - specifita

**nespecifické:** receptory bolesti - reagují na různé podněty.

## c) Dle místa vzniku podnětů a způsobu jejich zachycení:

- telereceptory (zrak, sluch, čich),
- exteroceptory (z povrchu organismu - kožní cití, chuť),
- proprioreceptory, ve svalech, šlachách a kloubech - informují o poloze i pohybu těla,
- interoreceptory - ve vnitřních orgánech

*Biofyzika považuje receptory především za měniče energie.*

# Převodní funkce receptorů



Primární odpověď smyslové buňky na podnět: **receptorový** (budivý, generátorový) **potenciál** a **receptorový proud** úměrný intenzitě podnětu.

Receptorový potenciál spouští **činnostní potenciál**.

čas

Amplitudová modulace receptorového potenciálu se mění ve frekvenčně modulovaný akční potenciál.

čas

**Vyšší intenzita podnětu** (receptorového potenciálu) tedy **vyvolává změnu frekvence akčních potenciálů**.

čas

# Smyslová buňka



Typická smyslová buňka má dva segmenty:

**Vnější segment** odpovídá adekvátnímu podnětu (mikrovláčky, cíle, mikrotubulární nebo lamelární struktury).

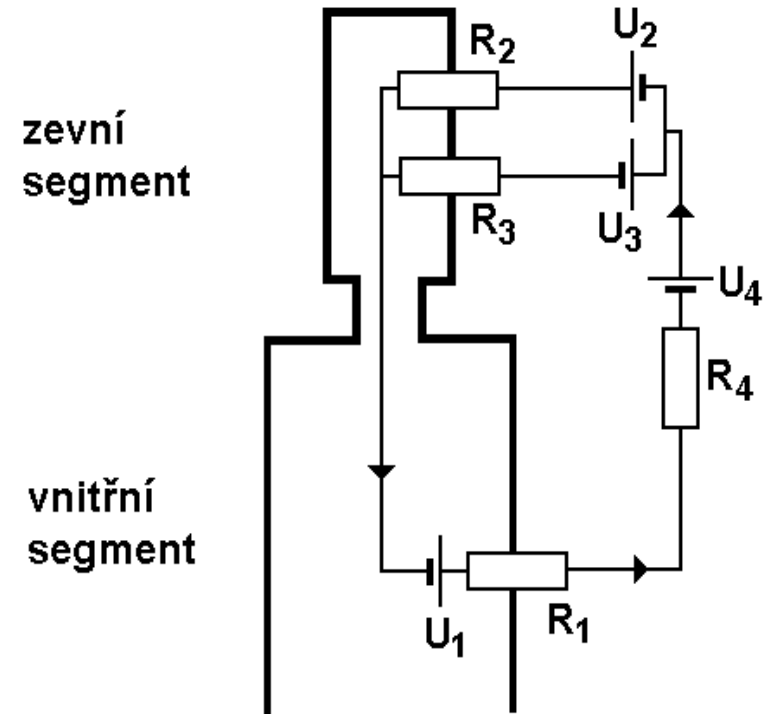
**Vnitřní segment** (mitochondrie, jádro ...)

Elektrické pochody v receptorové buňce:

Zdroj napětí je v membráně vnitřního segmentu - **difuzní potenciál  $K^+$**  (velikost  $U_1$ , rezistance  $R_1$  je dána permeabilitou pro příslušné ionty).

Depolarizace smyslové buňky je způsobena vzrůstem membránové permeability pro kationty ve vnějším segmentu ( $R_2, U_2; R_3, U_3$ ). V průběhu depolarizace tok kationtů směřuje z vnějšího do vnitřního segmentu.

V podpůrných buňkách jsou přídatné zdroje napětí ( $U_4, R_4$ ).





# Biofyzikální vztah podnětu a počítku

**Intenzita počítku roste s intenzitou podnětu nelineárně.** Dříve se soudilo, že intenzita počítku je úměrná logaritmu intenzity podnětu (*Weberův-Fechnerův zákon*). Intenzita počítku je  $I_R$  a intenzita podnětu  $I_S$ , pak:

$$I_R = k_1 \log I_S.$$

Dnes vztah vyjadřujeme spíše mocninou (*Stevensův z.*):

$$I_R = k_2 I_S^a,$$

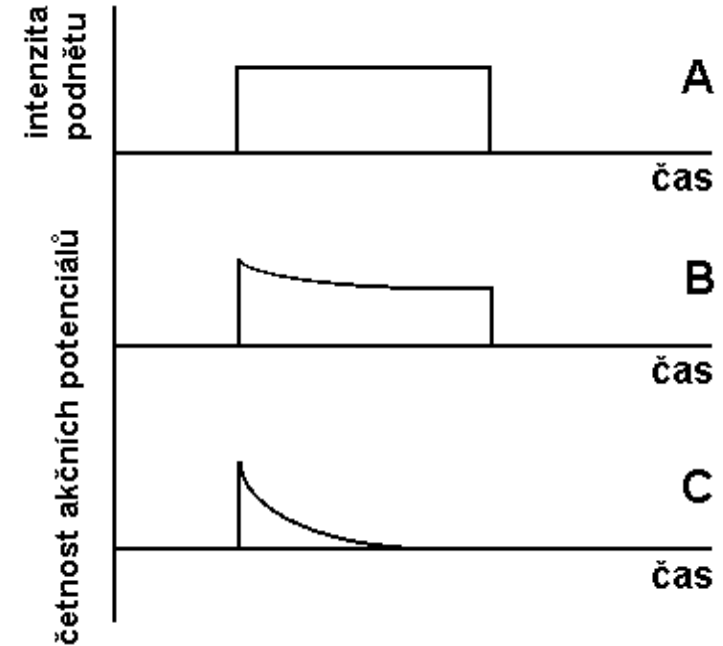
kde  $k_1$  a  $k_2$  jsou konstanty a  $a$  je exponent specifický pro smyslovou modalitu (číslo menší než jednička pro zvuk a světlo, někdy ale i větší – např. vnímání tepla, hmatové stimuly).

**Vztah počítku k hraničním intenzitám podnětu lépe vyjadřuje zákon mocniny.**

# Adaptace

Je-li intenzita podnětu delší dobu konstantní, snižuje se u většiny receptorů dráždivost. Tento jev se nazývá **adaptace**.

Míra adaptace je pro různé receptory různá. U vnímání bolesti je adaptace nízká - ochranný mechanismus.



## Průběh adaptace

A - podnět,

B - receptor s pomalou adaptací,

C - receptor s rychlou adaptací



# Biofyzika vnímání zvuku



S akustickou impedancí se znovu setkáváme i u ultrazvukové diagnostiky!!

## Fyzikální vlastnosti zvuku:

**Zvuk** - mechanické kmity pružného prostředí,  $f = 16$  až  $20\ 000$  Hz. Pružným prostředím se šíří jako kmity částic kolem rovnovážných poloh. V plynu a kapalině se šíří jako **vlnění podélné** (střídavé zhušťování a zředování částic), v pevných látkách též jako vlnění příčné.

Rychlost šíření - **fázová rychlost (c)** závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí, především na pružnosti a teplotě.

Součin  $\rho \cdot c$ , kde  $\rho$  je hustota prostředí, je **akustický vlnový odpor (akustická impedance)**. Rozdíl akustických impedancí dvou prostředí určuje velikost odrazu při dopadu zvukové vlny na jejich rozhraní.

**Zvuk: jednoduchý** (čistý) nebo **složený**. Složené zvuky: **hudební** (periodický charakter) a **nehudební** - hluk, šum (neperiodický charakter).



# Hlavní znaky zvuku: výška, barva a síla

**Výška** je určena kmitočtem.

**Barva** zastoupením harmonických kmitočtů ve spektru.

Síla, přesněji **intenzita** - množství energie prošlé za 1 s plochou 1 m<sup>2</sup>, kolmou ke směru šíření vlnění. Intenzita zvuku je **akustický měrný výkon** [ W·m<sup>-2</sup>].



# Hladina intenzity

Srovnání intenzit dvou zvuků umožňuje veličina zvaná **hladina intenzity**. Vzhledem k velkému rozpětí slyšitelných intenzit ( $>10^{12}$ ) byl zaveden logaritmus tohoto poměru s jednotkou bel (B), v praxi decibel (dB). **Hladina intenzity  $L$ :**

$$L = 10 \cdot \log(I/I_0) \quad [dB]$$

Referenční intenzita zvuku (prahová intenzita tónu 1 kHz)  
 $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (referenční akustický tlak  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ ).



# Hlasitost, sluchové pole

**Hlasitost** je subjektivně vnímaná intenzita přibližně úměrná logaritmu intenzity zvukového podnětu. Ucho je **nejcitlivější** pro frekvence 1-5 kHz.

**Jednotka hlasitosti: 1 son.** Odpovídá při naslouchání oběma ušima počitku vyvolanému referenčním tónem o 40 dB.

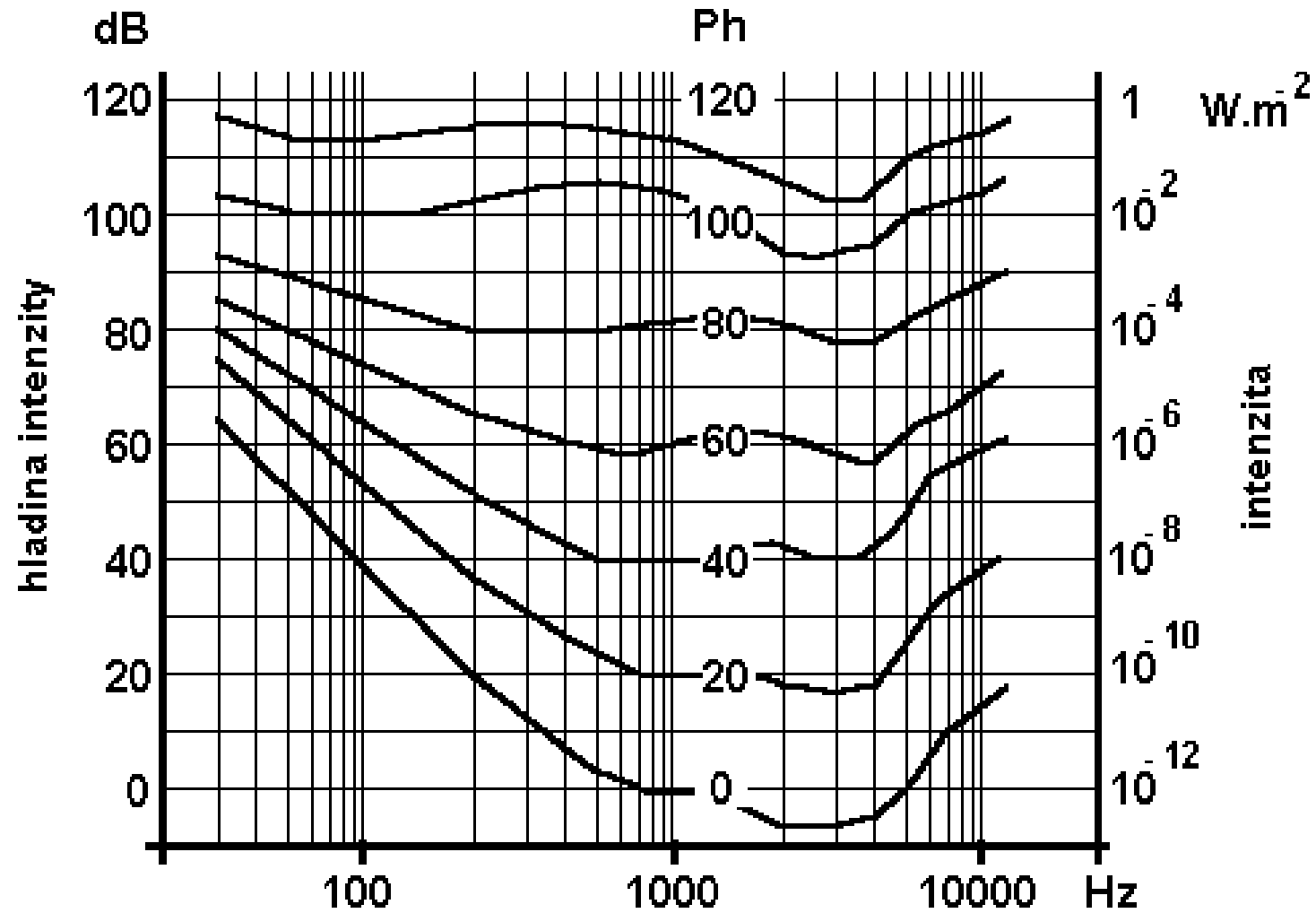
**Hladinu hlasitosti udáváme ve fónech (Ph).** 1 fón odpovídá hladině intenzity 1 dB pro referenční tón. Pro jiné tóny se hladina hlasitosti od hladiny intenzity liší.

1 Ph je nejmenší rozdíl hlasitosti, který ucho dovede rozlišit. Pro tón 1 kHz odpovídá zvýšení hlasitosti o 1 Ph zvýšení fyzikální intenzity o 26%.

Spojíme-li v grafu prahové intenzity slyšitelných frekvencí, dostaneme **nulovou izofónu** (křivku stejné hlasitosti).

Pro každou frekvenci lze najít intenzitu, při níž pocit zvuku přechází v bolest - **práh bolesti**. Oblast hladin intenzity mezi prahem slyšení a prahem bolesti je **sluchové pole**.

# Sluchové pole



# Hladina hlasitosti některých zvuků

Druh zvuku	Hladina hlasitosti [Ph]
 Šepot	10 - 20
 ticho v lese	20 - 30
 normální hovor	40 - 60
 pouliční hluk	60 - 90
 Sbíječka	100 - 110
 tryskový motor	120 - 130

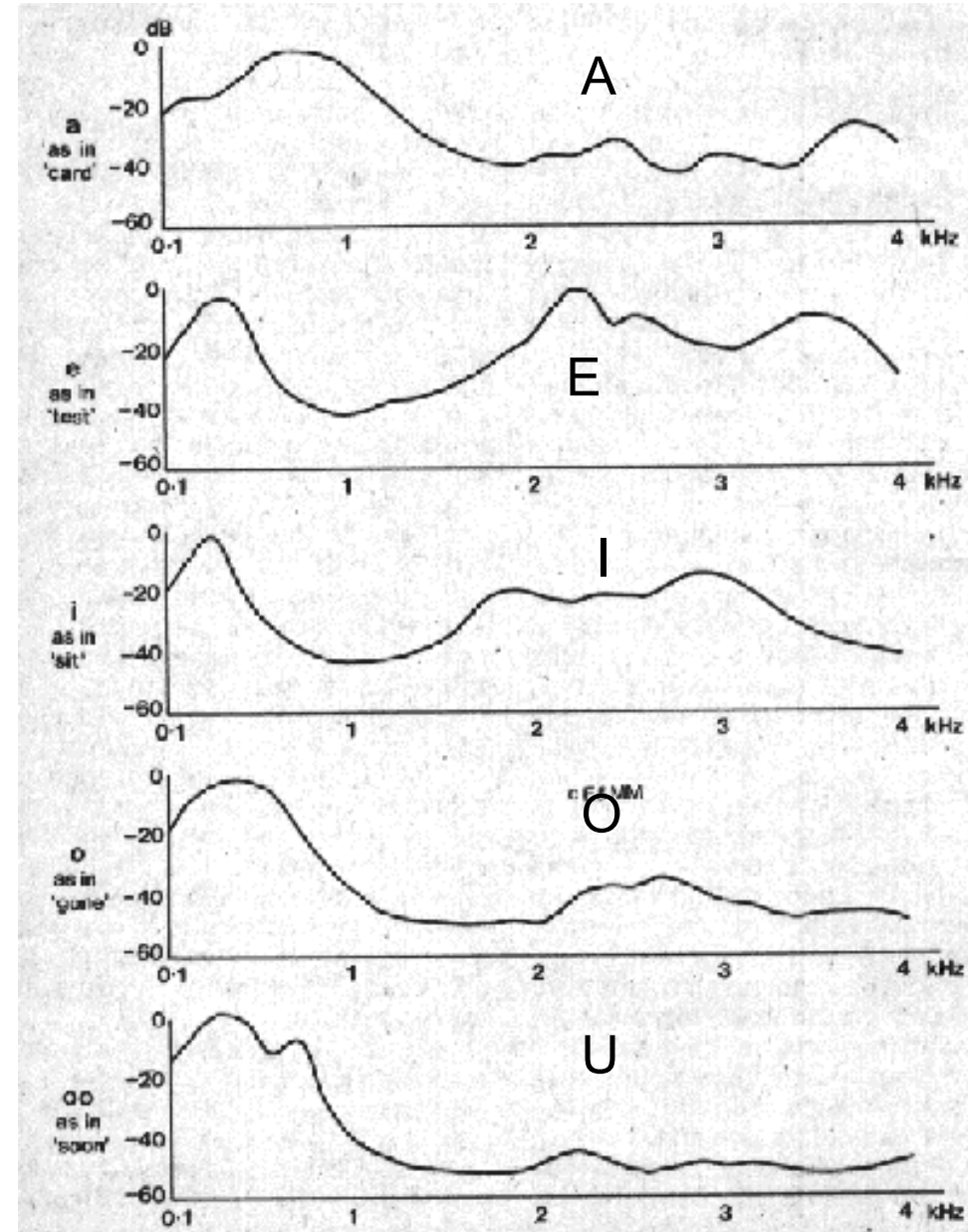
# Zvukové spektrum

Analýzou složených zvuků dostáváme frekvenční rozložení amplitud a fází jejich složek - **zvukové spektrum**.

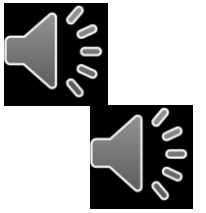
**U samohlásek: pásové spektrum.** Harmonické frekvence základního tónu tvoří skupiny - **formanty** - pro danou samohlásku charakteristické.

**Souhlásky:** neperiodické, mají spojité (šumové) akustické spektrum.

Tímto jsem učinili *velmi malou* odbočku ke vzniku lidského hlasu – jinak viz učebnice.



# Biofyzikální funkce ucha



Převod zvuku do vnitřního ucha se děje pomocí ucha vnějšího a středního.

**Zevní ucho:** boltec a zevní zvukovod. Optimálně slyšitelné zvuky dopadají zepředu pod úhlem asi  $15^\circ$  vzhledem k ose uší.

**Zevní zvukovod je rezonátor**, zesiluje kmitočty 2-6 kHz s maximem v pásmu 3-4 kHz, (+12 dB). Uzávěr zvukovodu zhoršuje slyšení o 40 - 60 dB.

**Střední ucho:** bubínek (asi  $60 \text{ mm}^2$ ) a sluchové kůstky - kladívko, kovadlinka a třmínek. Rukojeť kladívka je přirostlá k bubínku, třmínek k oválnému okénku ( $3 \text{ mm}^2$ ).

**Eustachova trubice** vyrovnává tlaky na obou stranách bubínku.

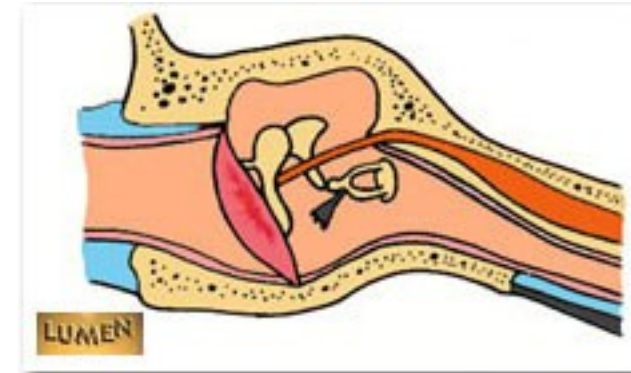
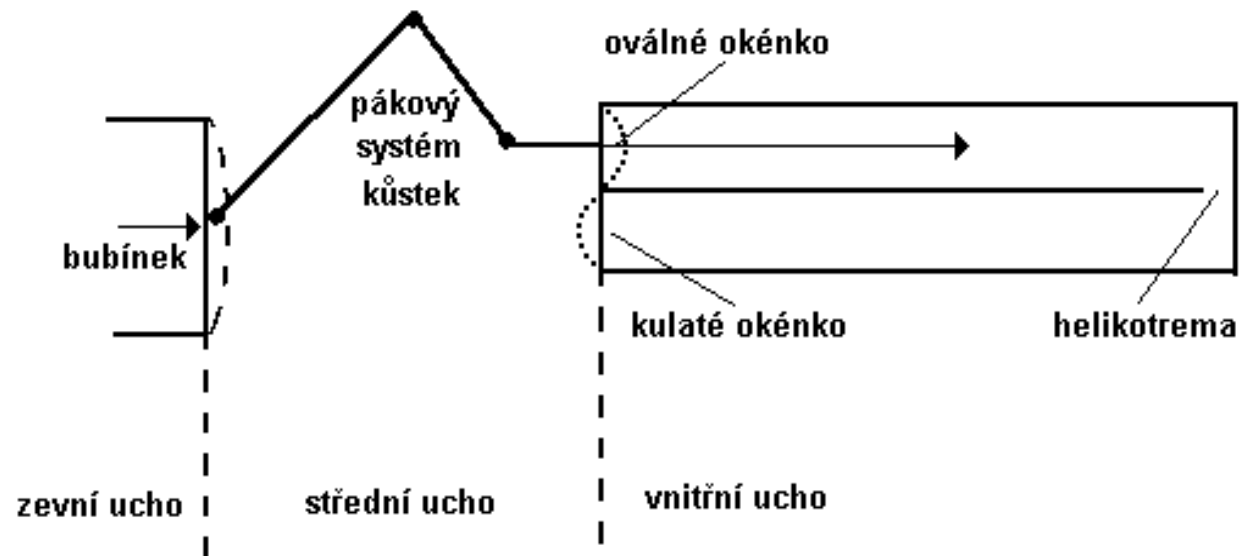
**Velký rozdíl akust. impedancí** vzduchu ( $3,9 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a tekutiny vnitřního ucha ( $15 \text{ 700 kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) by vedl k velké ztrátě intenzity (asi 30 dB) v důsledku mohutného odrazu. Toto je vyrovnáno poměrem ploch a změnou amplitudy a tlaku zvukového vlnění (ve vzduchu velká amplituda a malý tlak, v tekutém prostředí naopak).

Převod akust. vlnění z bubínku na menší plochu oválného okénka (20x zvýší tlak).



# Pístový převod akustického vlnění

a pákový systém kůstek. Kladívko a kovadlinka tvoří nerovnoramennou páku (1,3x zvětší sílu). Tzv. pístový převod.



**Ochrana před silnými zvuky:** Pružné spojení kůstek a reflexní činnost svalů (*m. stapedius*, *m. tensor tympani*) tlumí silné zvuky až o 15 dB.

# Mechanismus recepce akustických signálů



**Vnitřní ucho** je uloženo ve skalní kosti jako labyrint, v němž jsou receptory sluchového a vestibulárního analyzátoru.

Sluchová část labyrintu je tvořena spirálním, asi 35 mm dlouhým kostěným kanálkem - **hlemýžděm - cochleou**. Základnu hlemýždě odděluje od středoušní dutiny přepážka se dvěma okénky.

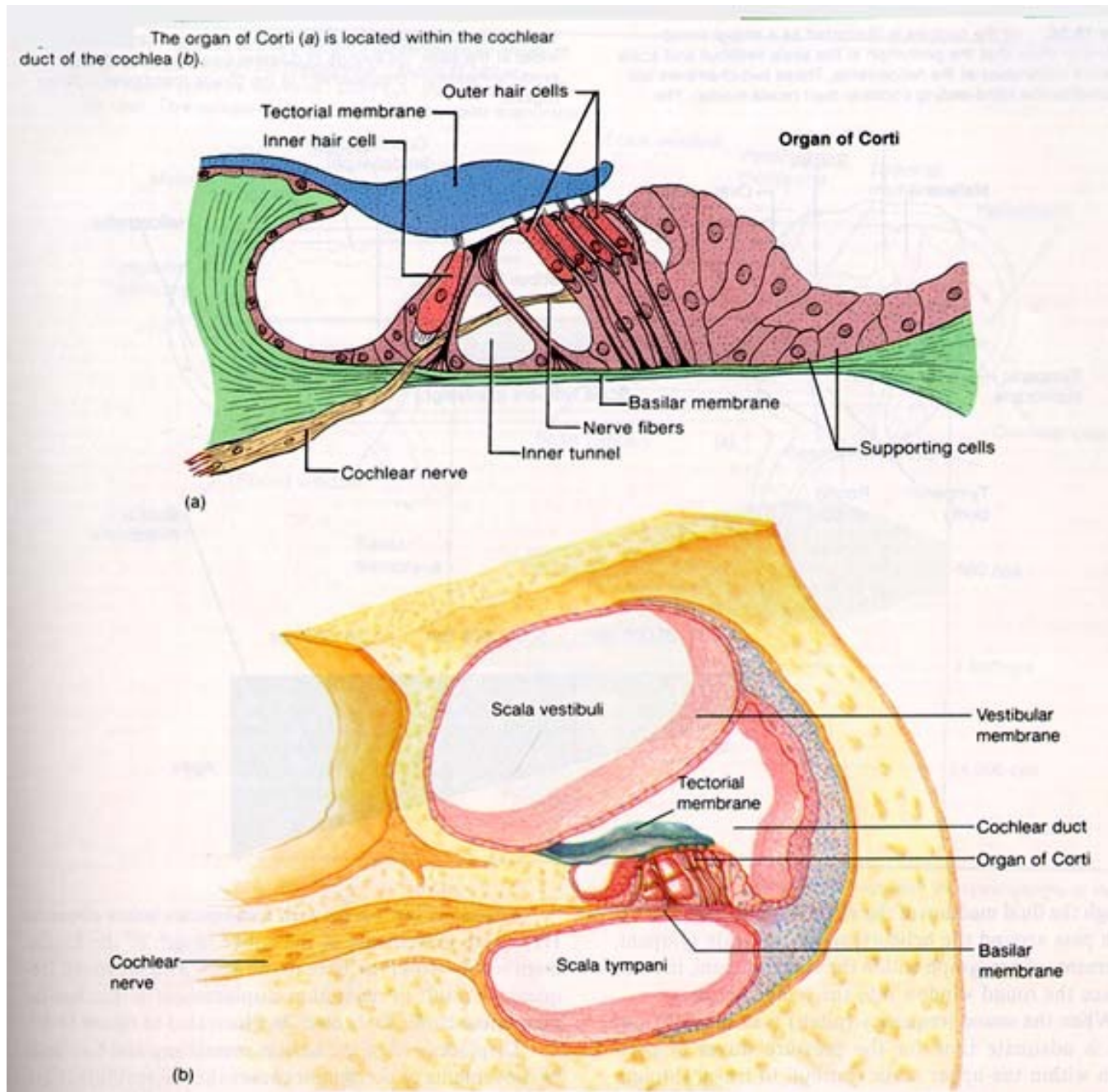
Na oválné okénko nasedá třmínek, níže uložené okrouhlé okénko je volné.

Hlemýžd' je rozdělen na dvě části podélným kostním výběžkem *lamina spiralis* a pružnou **membrana basilaris**. *L. spiralis* je nejširší při bázi hlemýždě, kde je *memb. basilaris* nejužší, asi 0,04 mm (0,5 mm při vrcholu hlemýždě).

Zde je v bazilární membráně **helikotrema**, spojující prostor nad (*scala vestibuli*) a pod bazilární membránou (*scala tympani*).

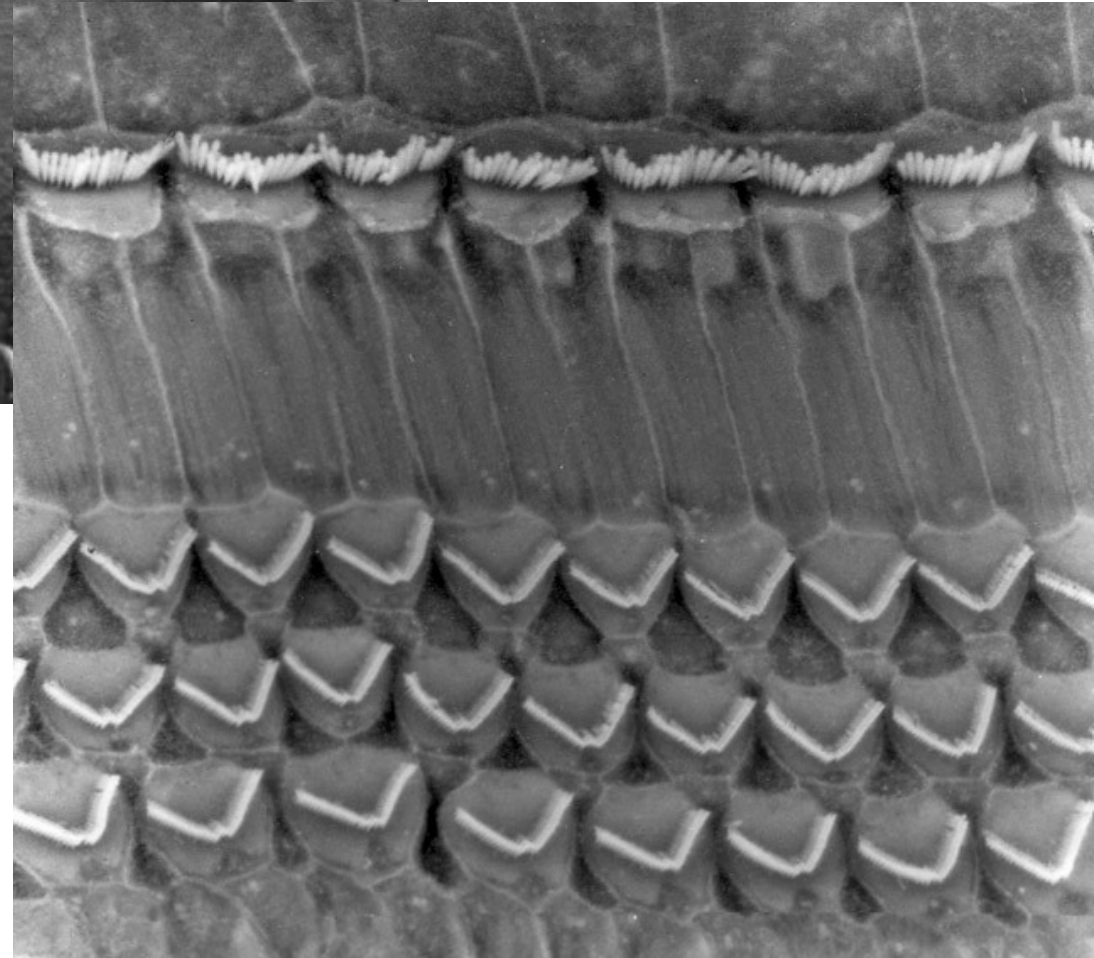
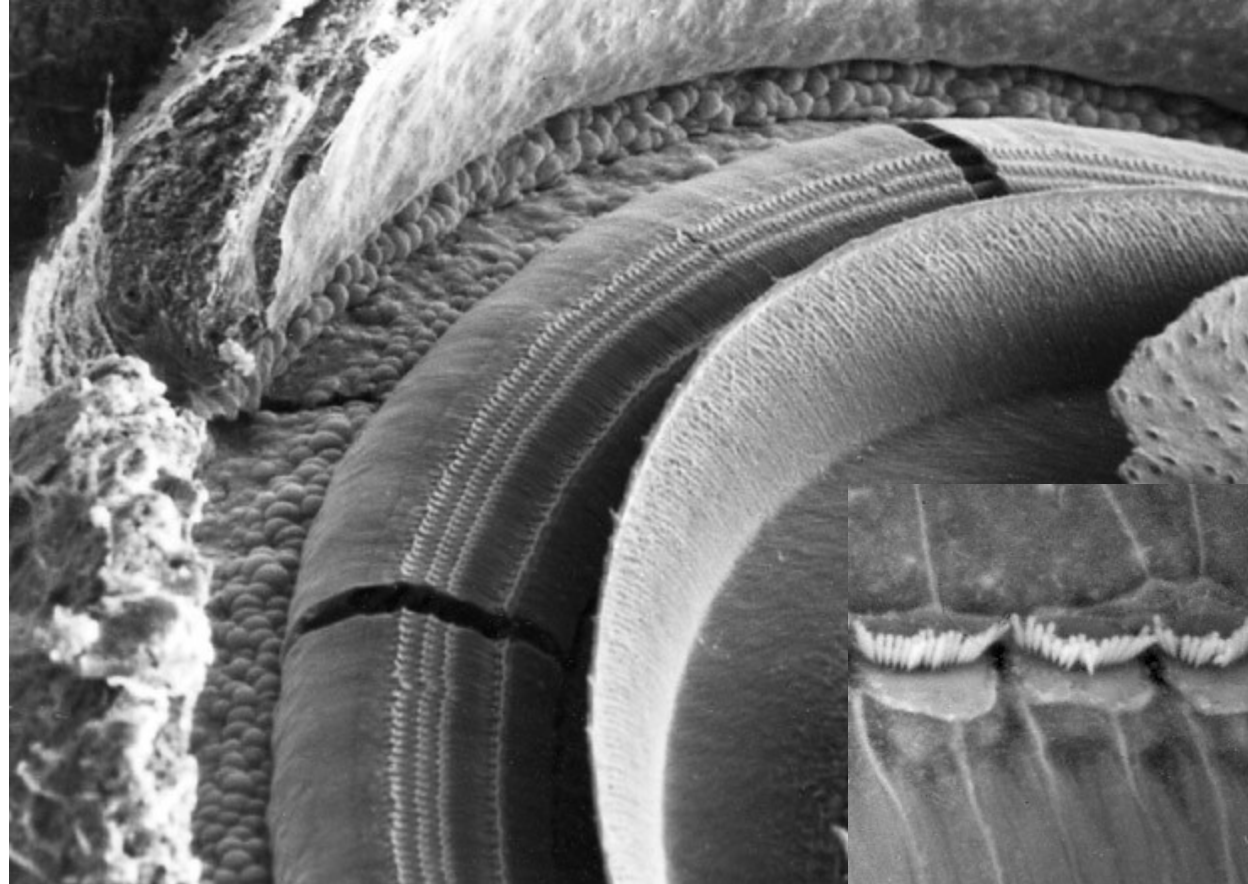
# Cortiho orgán

• <http://www.sfu.ca/~saunders/l33098/Ear.f/corti.html>





[www.sickkids.on.ca/auditorysciencelab/pictures1.asp](http://www.sickkids.on.ca/auditorysciencelab/pictures1.asp)



Obrázky získané pomocí SEM. Cortiho orgán s řadami vláskových buněk. Nahoře celkový pohled po odstranění vestibulární (Reissnerovy) a taktoriální membrány. Vpravo detail vláskových buněk

# Cortiho orgán



**perilymfa** - iontové složení jako likvor, bílkovin 2× více.

**endolymfa** - obsah bílkovin jako likvor, avšak jen 1/10 iontů  $\text{Na}^+$  a 30× víc  $\text{K}^+$  - připomíná intracelulární tekutinu.

**Cortiho orgán:** obkladné, nosné a smyslové buňky.

Smyslové buňky C. orgánu: **buňky vláskové** (vnitřní a vnější). V hlemýždi je asi 4000 vnitřních a 20 000 zevních vláskových buněk.

Smyslové vlásky - stereocilie - deformuje **tektoriální membrána**. Ohnutí vlásků k *lamina spiralis* vede k depolarizaci, ohnutí vlásků ke *stria vascularis* způsobuje hyperpolarizaci.

Podráždění zevních buněk vibracemi vyvolá jejich aktivní kmitavý pohyb o stejné frekvenci, který se přenáší přes tektoriální membránu na vnitřní vláskové buňky. Takto dochází i k **zesílení akustických kmitů**.

Od vnitřních buněk vychází asi 95% neuronů (20 axonů od jedné buňky), od zevních buněk asi 5% neuronů - nervová zakončení 10ti zevních buněk se spojují v 1 axon. Nervových vláken vychází z hlemýždě asi 25 - 30 tis.



# Mechanismus vnímání zvuku

**Békésyho teorie postupující vlny.** Zvuk rozkmitá bazilární membránu a oblast maxima rozkmitu se posouvá s kmitočtem od vrcholu hlemýžďe k jeho bázi.

Předpoklad: smyslové buňky jsou **citlivé i na změnu rychlosti** výchylky tektoriální membrány.

Receptory v hlemýždi provádějí hrubou frekvenční analýzu, další zpracování přísluší sluchovým centřům.

Zvuk přichází k receptorům trojím způsobem: **Vedením kůstkovým, vedením kostním** (práh asi o 40 dB vyšší) a vedením vzduchovým (kruhovým okénkem - málo).

# Elektrické jevy spojené s recepcí zvuku



Perilymfa a endolymfa se liší v obsahu  $K^+$  a  $Na^+$ . Endolymfa se obsahem  $K^+$  blíží intersticiu. Mezi endolymfou a perilymfou je klidový potenciálový rozdíl **+ 80 mV - endokochleární potenciál.**

Velké vláskové buňky C. orgánu mají proti perilymfě záporný potenciál -80 mV. **Potenciálový rozdíl mezi endolymfou a vláskovými buňkami je asi 160 mV.**

Podráždění C. orgánu budí **kochleární mikrofonní potenciál**, snímatelný z hlemýždě. Při vyšších frekvencích se maximum mikrofonního potenciálu posouvá k bázi hlemýždě, v souladu s teorií postupující vlny. C. orgán není jen měnič energie, ale spíše biologický zesilovač.

**Negativní sumační potenciál** je způsoben podrážděním vnitřních vláskových buněk Cortiho orgánu.

Mechanismus vzniku výsledného **akčního potenciálu** vedeného sluchovým nervem není dosud zcela vysvětlen. Předpokládáme: Kochleární mikrofonní potenciál a též negativní sumační potenciál se podílejí na vzniku akčního potenciálu.

# Otoakustická emise



Vnitřní ucho je samo též zdrojem zvuku, který se může objevit po podráždění zvukem z okolí i spontánně. Tyto zvuky jsou ovšem tak slabé, že je sami většinou nemůžeme zaslechnout. Vznikají patrně chvěním zevních vláskových buněk s frekvencí 500 – 4500 Hz.

Zjišťuje se především jejich výbavnost u novorozenců.





# Biofyzikální funkce vestibulárního systému



**Vestibulární systém** - vnímání polohy a zrychlení - umístěn v kanálcích skalní kosti, labyrintu. Tvořen třemi **polokruhovitými kanálky**, ležícími ve třech vzájemně kolmých rovinách. Kanálky vycházejí z **utrikulu**, spojeného se **sakulem**. Komunikují s *ductus cochlearis*.

Jedno ústí každého kanálku je rozšířeno v **ampulu**, přepaženou ampulární **kristou**. Na spodině utrikulu je vyvýšenina **macula utriculi**, na stěně sakulu **macula sacculi**. Ampulární kristy a makuly jsou tvořeny smyslovým epitelem, složeným z **vláskových buněk** a buněk podpůrných. Součástí v.s. jsou gelatinózní **kupuly** na ampulárních kristách a **statolitové membrány** na makulách. Jejich funkcí je dráždit stereocilie smyslových buněk. Ve statolitových membránách jsou **statokonie** - krystalky  $\text{CaCO}_3$  - zvyšují hmotnost gelatinózní membrány.



# Biofyzikální funkce vestibulárního systému

**Polokruhové kanálky umožňují analýzu rotačního pohybu hlavy.**

Receptory ampulárních krist reagují na úhlové zrychlení. Kupuly krist pracují jako zákločky, které se prouděním endolymfy vychylují a dráždí ohýbáním vlásky smyslových buněk.

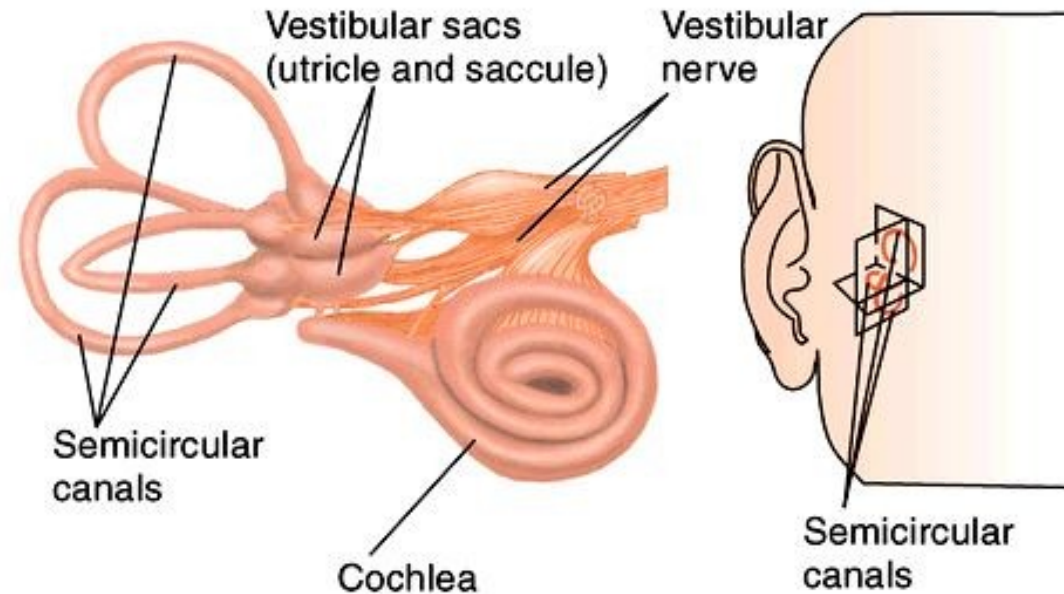
**Receptory utrikulu a sakulu reagují na lineární zrychlení a gravitaci.** Při změně polohy hlavy se statolitová membrána posune vůči vláskům smyslových buněk, které tím podráždí. Největší význam mají pro udržení vzpřímeného postavení těla, tj. pro tzv. **statické reflexy**.

# Statokinetický orgán



## ► The Labyrinths of the Inner Ear

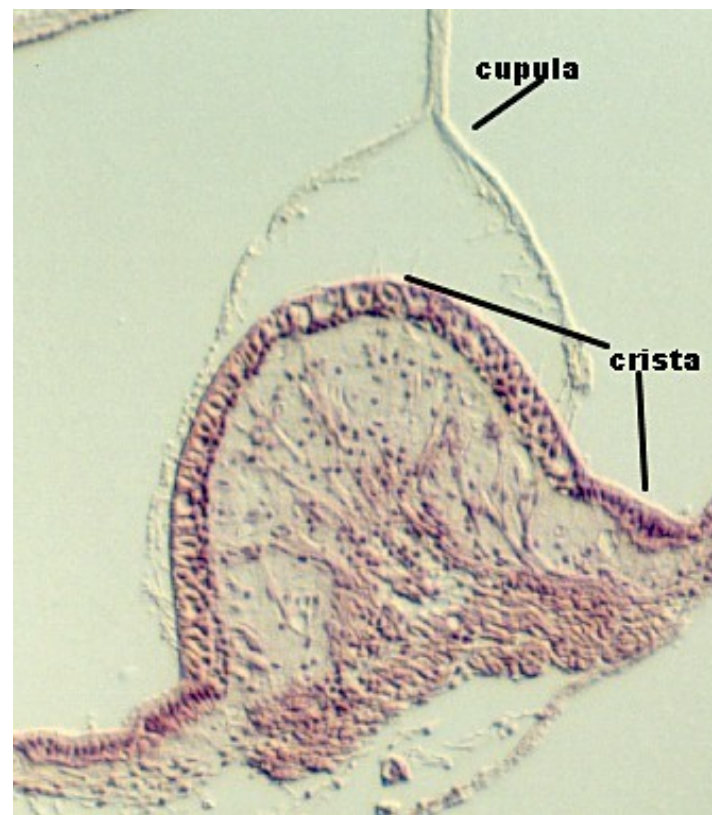
Polokruhové kanálky leží v rovinách na sebe kolmých!!



•<http://www.driesen.com/innerearlabrynth.jpg>

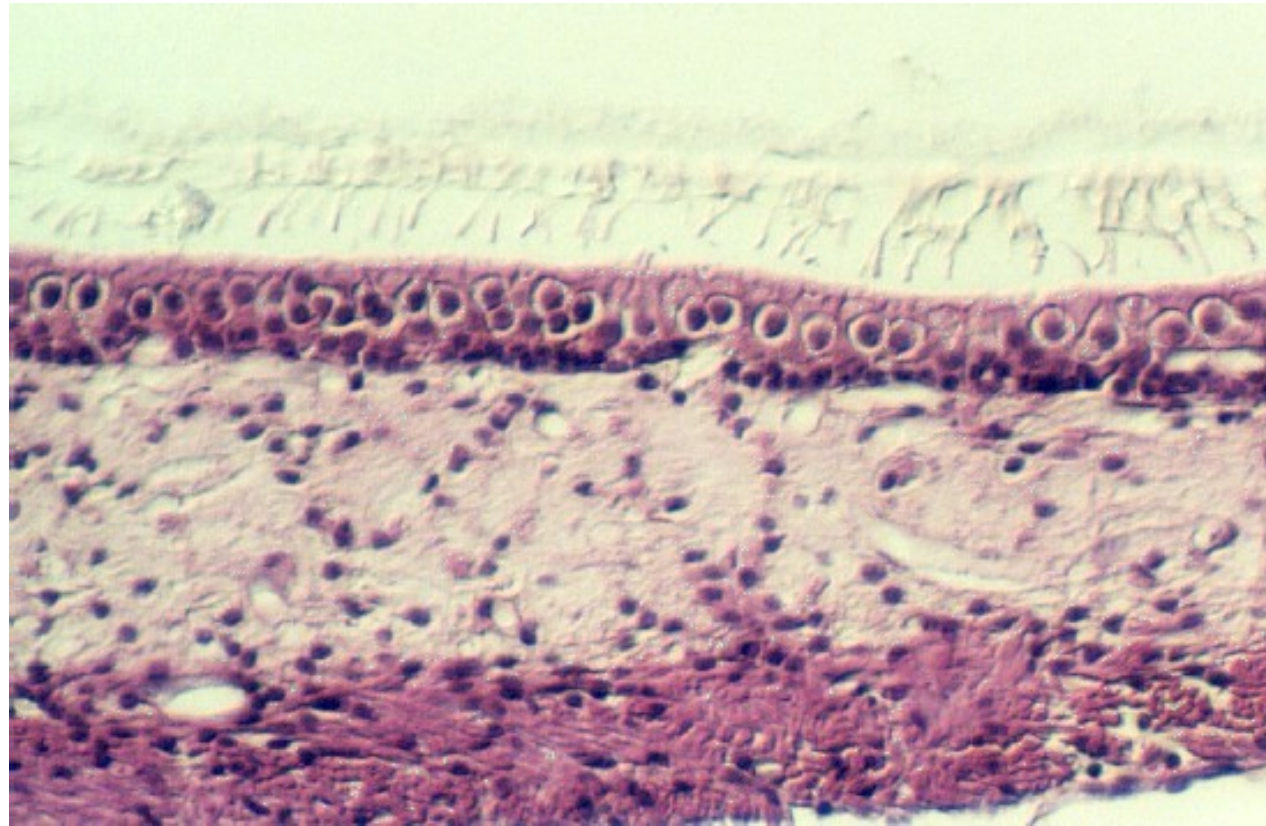


← **Funkce kupul a**  
← **ampulárních krist**



• <http://cellbio.utmb.edu/microanatomy/Ear/crista1.jpg>

# Statolitová (otolitová) membrána v sakulu



•[cellbio.utmb.edu/.../Ear/organization\\_of\\_the\\_inner\\_ear.htm](http://cellbio.utmb.edu/.../Ear/organization_of_the_inner_ear.htm).

**M U N I**  
**M E D**

**Autor:**

**Vojtěch Mornstein**

**Obsahová spolupráce:**

**Ivo Hrazdira, Carmel J. Caruana**

**poslední revize a ozvučení: březen 2021**