

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 (mikrovlčky, cilie, mikrotubulární nebo lamelární struktury).

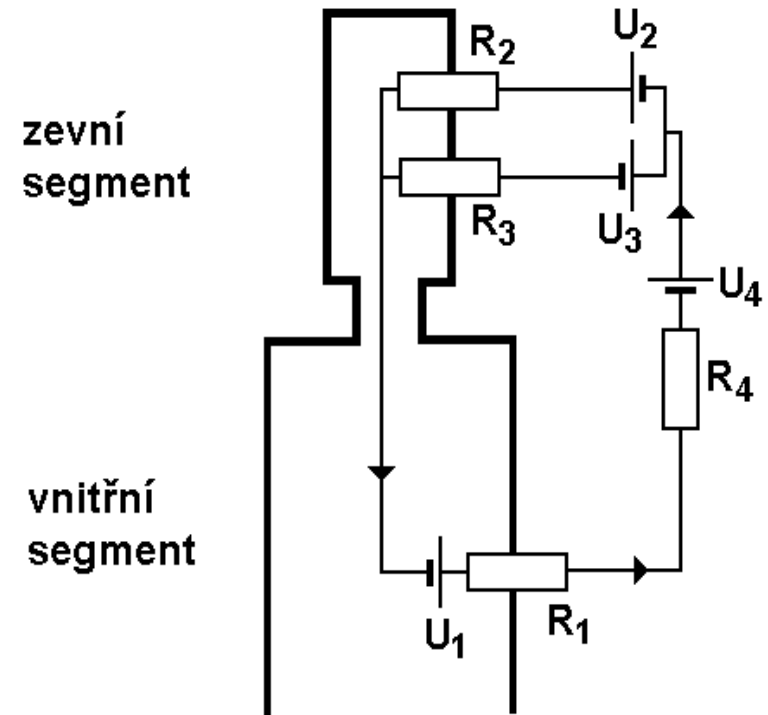
Vnitřní segment (mitochondrie, jádro ...)

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.*):

$$I_R = k_2 I_S^a,$$

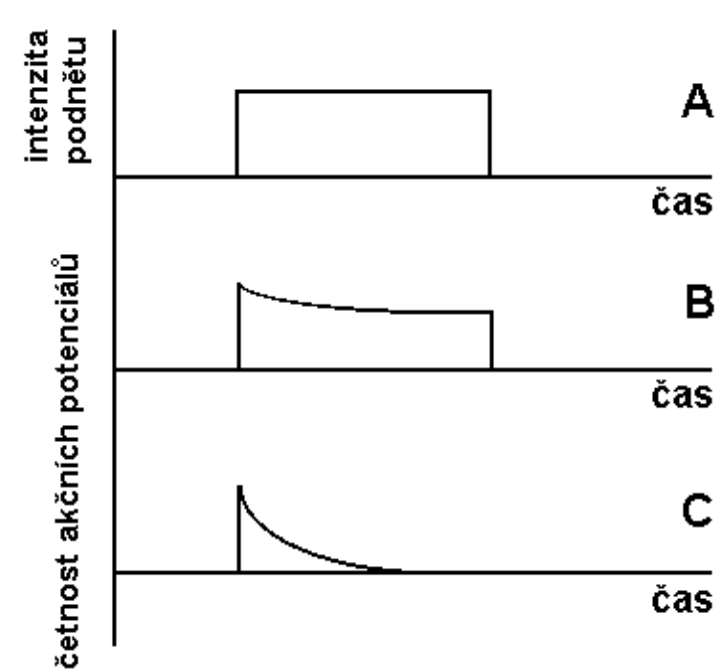
kde k_1 a k_2 jsou konstanty a a je exponent specifický pro smyslovou modalitu (číslo menší než jednička pro zvuk a světlo, někdy ale i větší – např. vnímání tepla, hmatové stimuly).

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 ρ 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 m², kolmou ke směru šíření vlnění. Intenzita zvuku je **akustický měrný výkon** [W·m⁻²].



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.

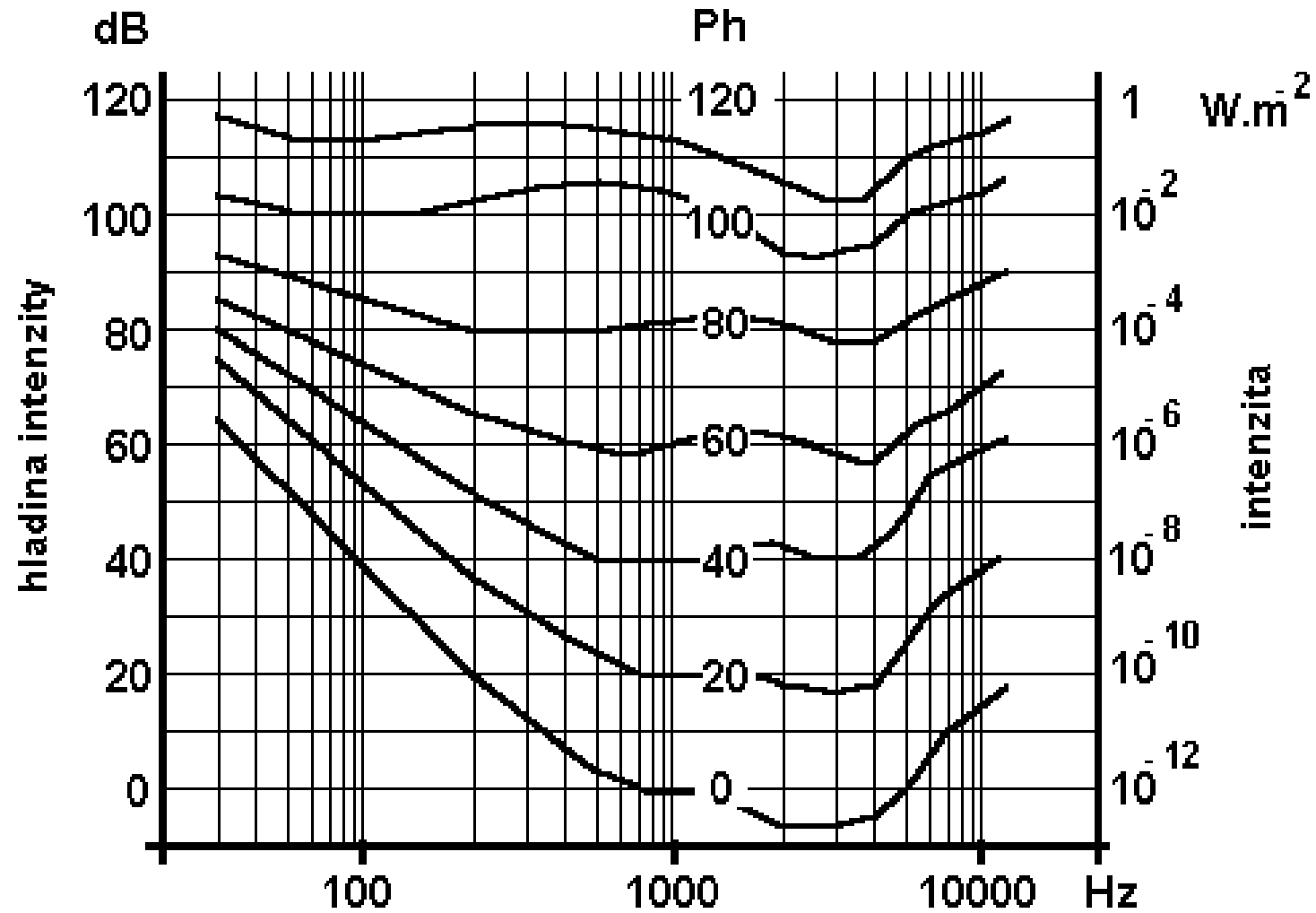
Hladinu hlasitosti udáváme ve fónech (Ph). 1 fón odpovídá hladině intenzity 1 dB pro referenční tón. Pro jiné tóny se hladina hlasitosti od hladiny intenzity liší.

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

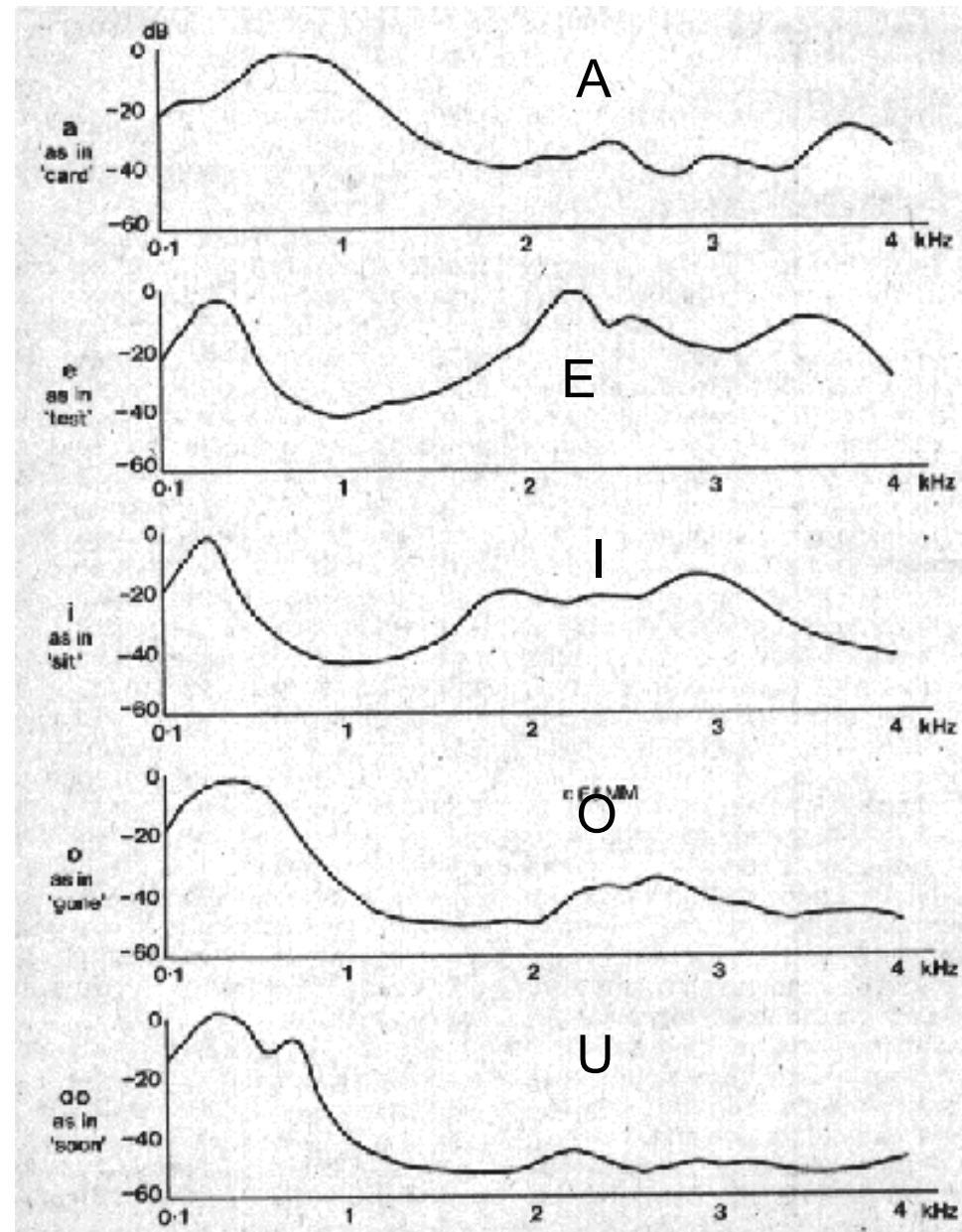
Zvukové spektrum

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

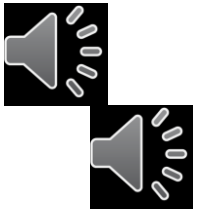
U samohlásek: pásové spektrum. Harmonické frekvence základního tónu tvoří skupiny - **formanty** - pro danou samohlásku charakteristické.

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° 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 mm^2) a sluchové kůstky - kladívko, kovadlinka a třmínek. Rukojeť kladívka je přirostlá k bubínku, třmínek k oválnému okénku (3 mm^2).

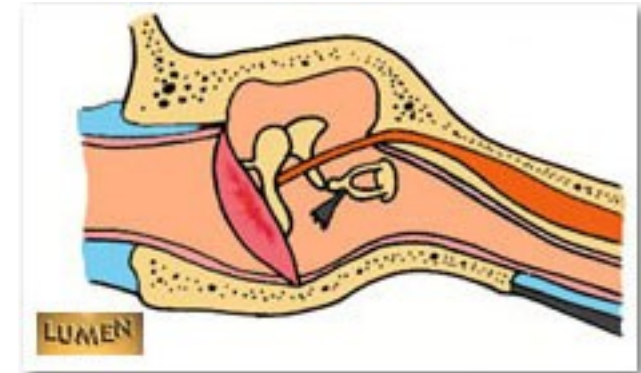
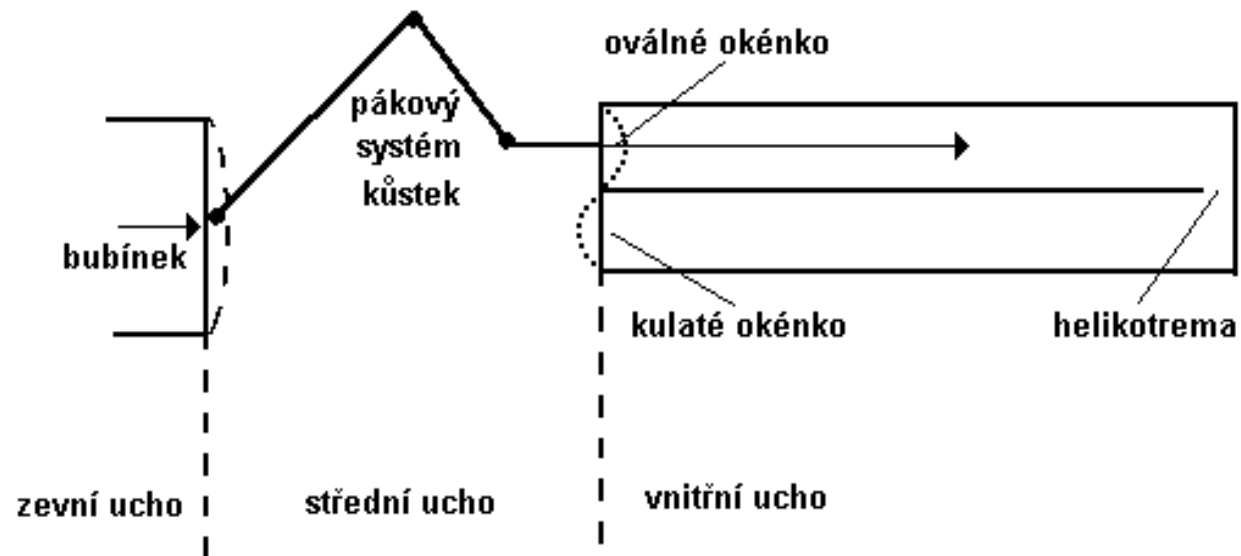
Eustachova trubice vyrovnává tlaky na obou stranách bubínku.

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.

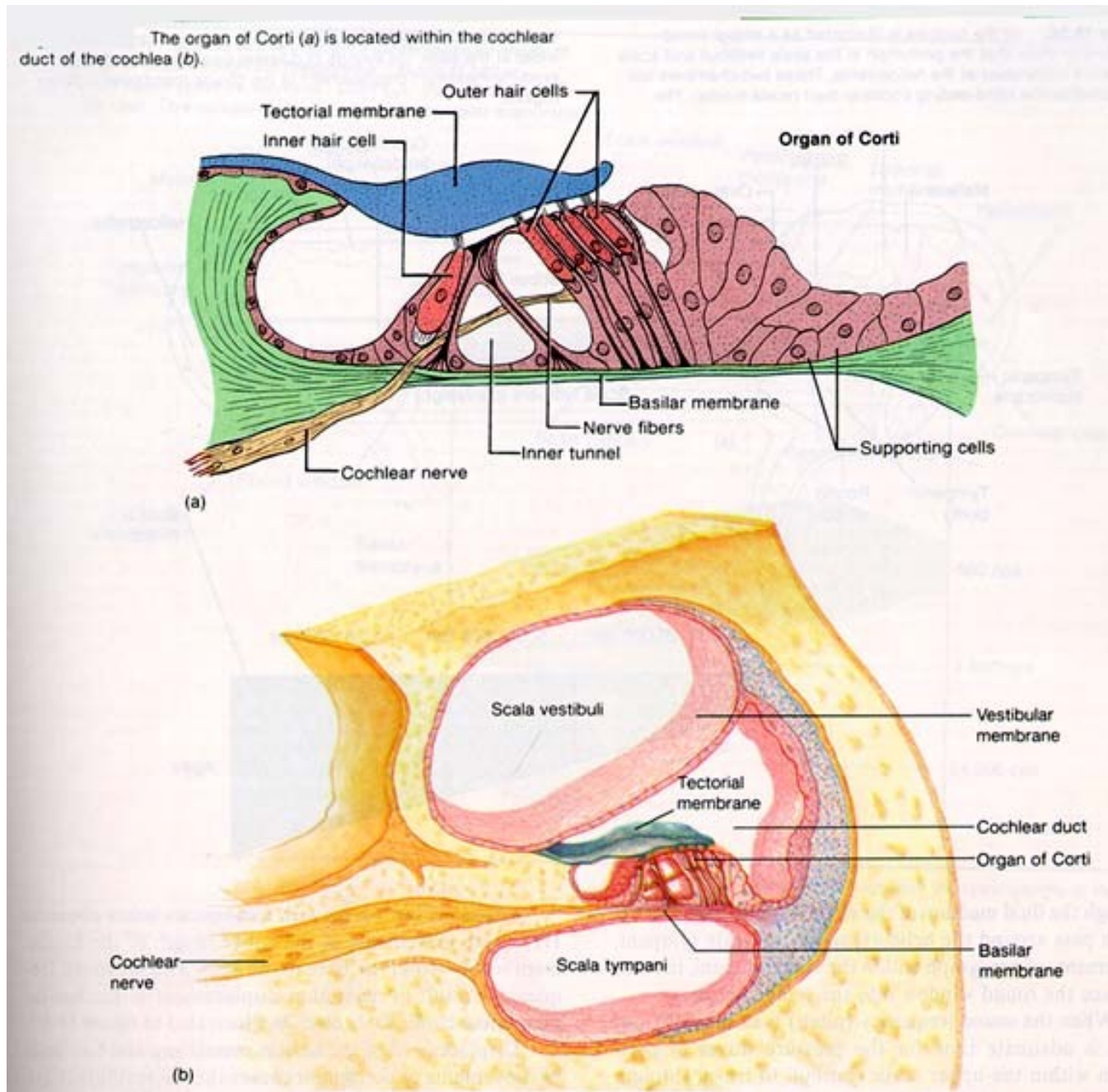
Na oválné okénko nasedá třmínek, níže uložené okrouhlé okénko je volné.

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*).

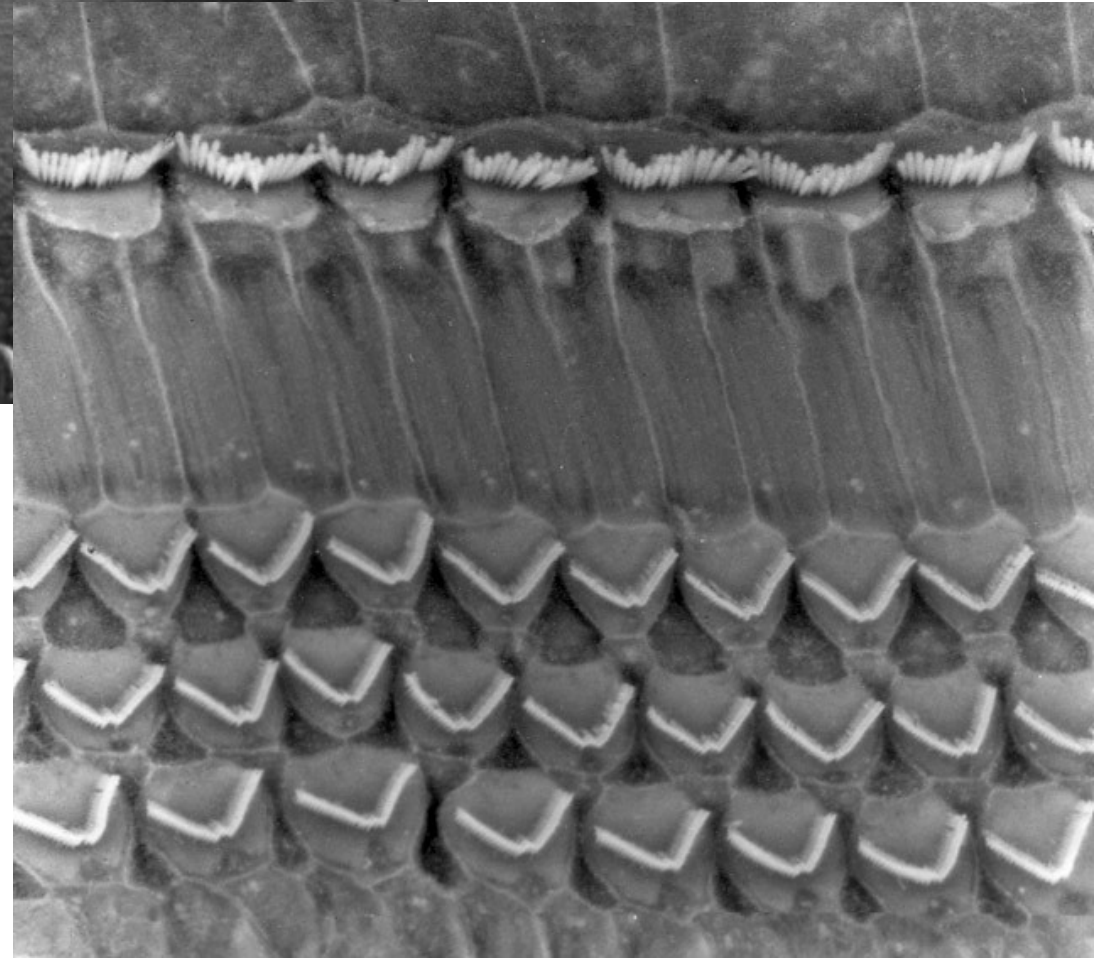
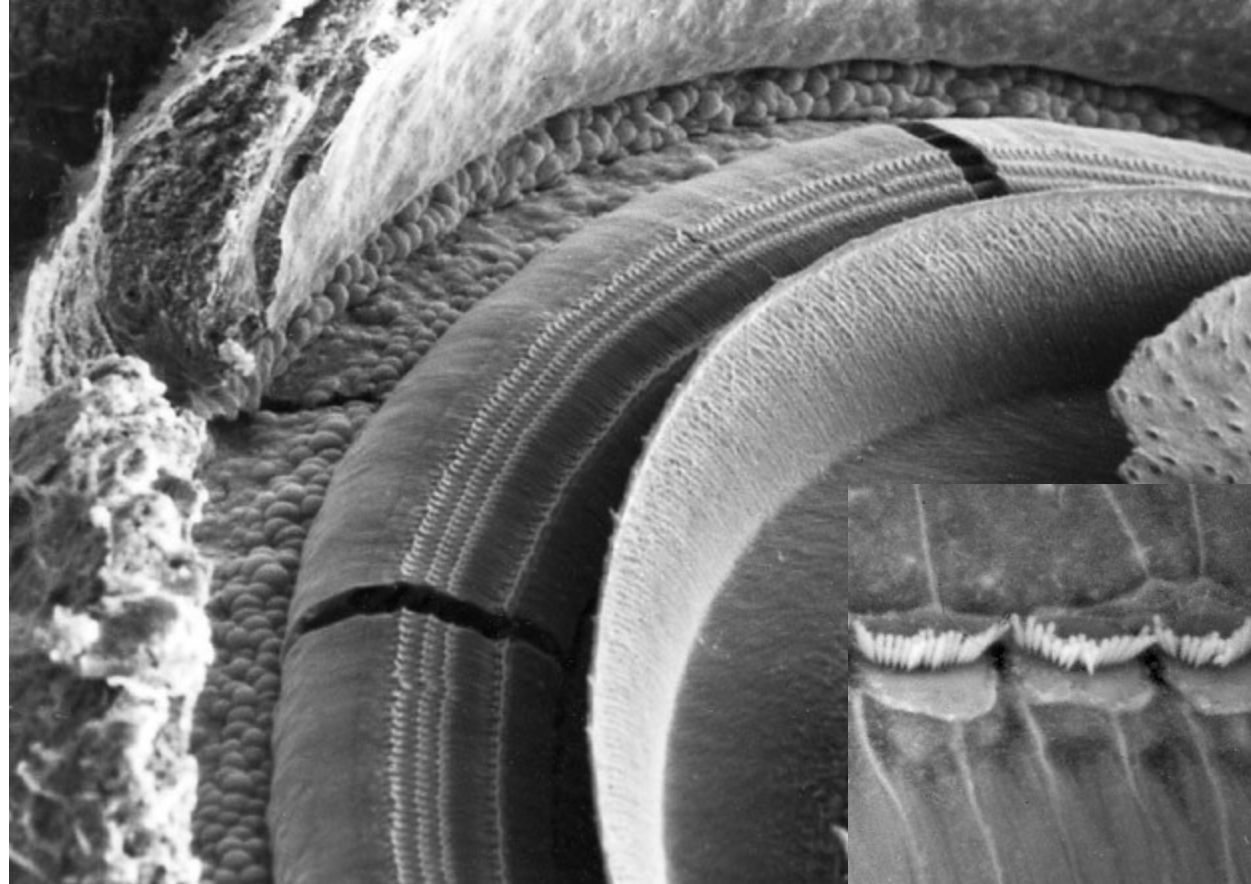
Cortiho orgán

•<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 tektorální 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 Na^+ a 30× víc 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 tektonální 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 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 záklopkky, které se prouděním endolymfy vychylují a dráždí ohýbáním vlásky smyslových buněk.

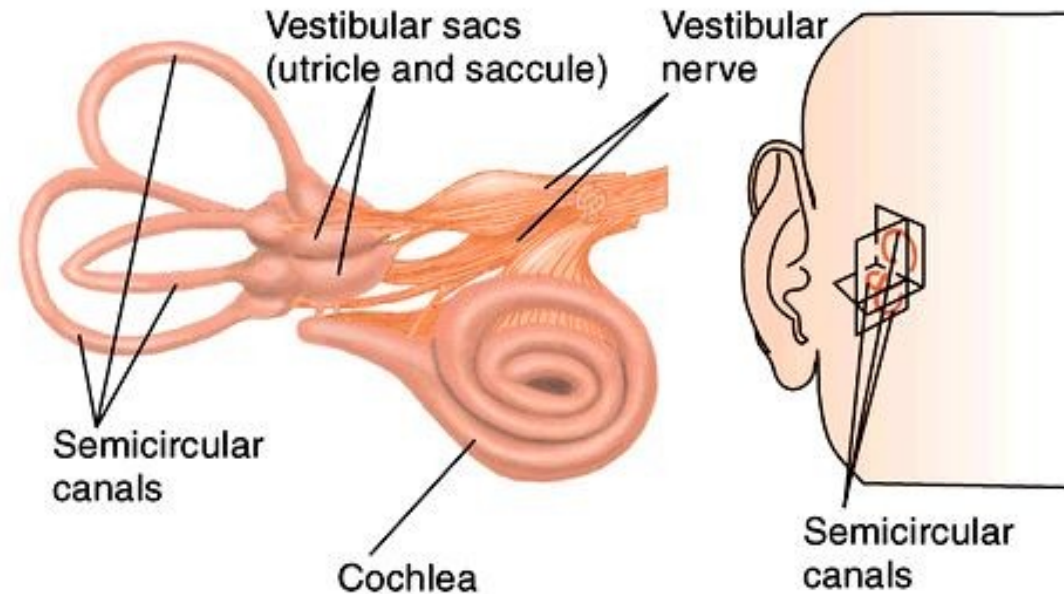
Receptory utrikulu a sakulu reagují na lineární zrychlení a gravitaci. Při změně polohy hlavy se statolitová membrána posune vůči vláskům smyslových buněk, které tím podráždí. Největší význam mají pro udržení vzpřímeného postavení těla, tj. pro tzv. **statické reflexy**.

Statokinetický orgán



► The Labyrinths of the Inner Ear

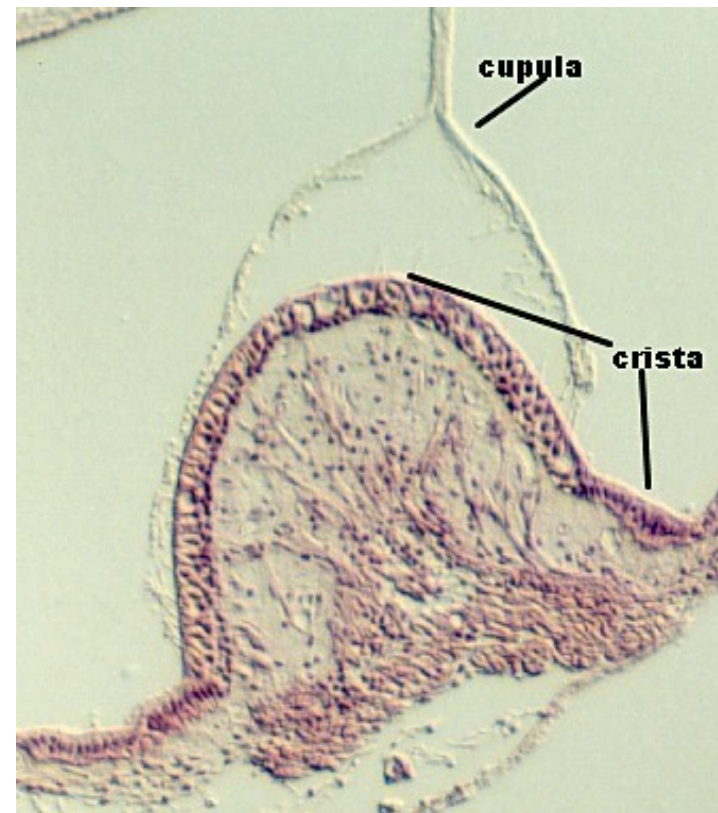
Polokruhové kanálky leží v rovinách na sebe kolmých!!



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

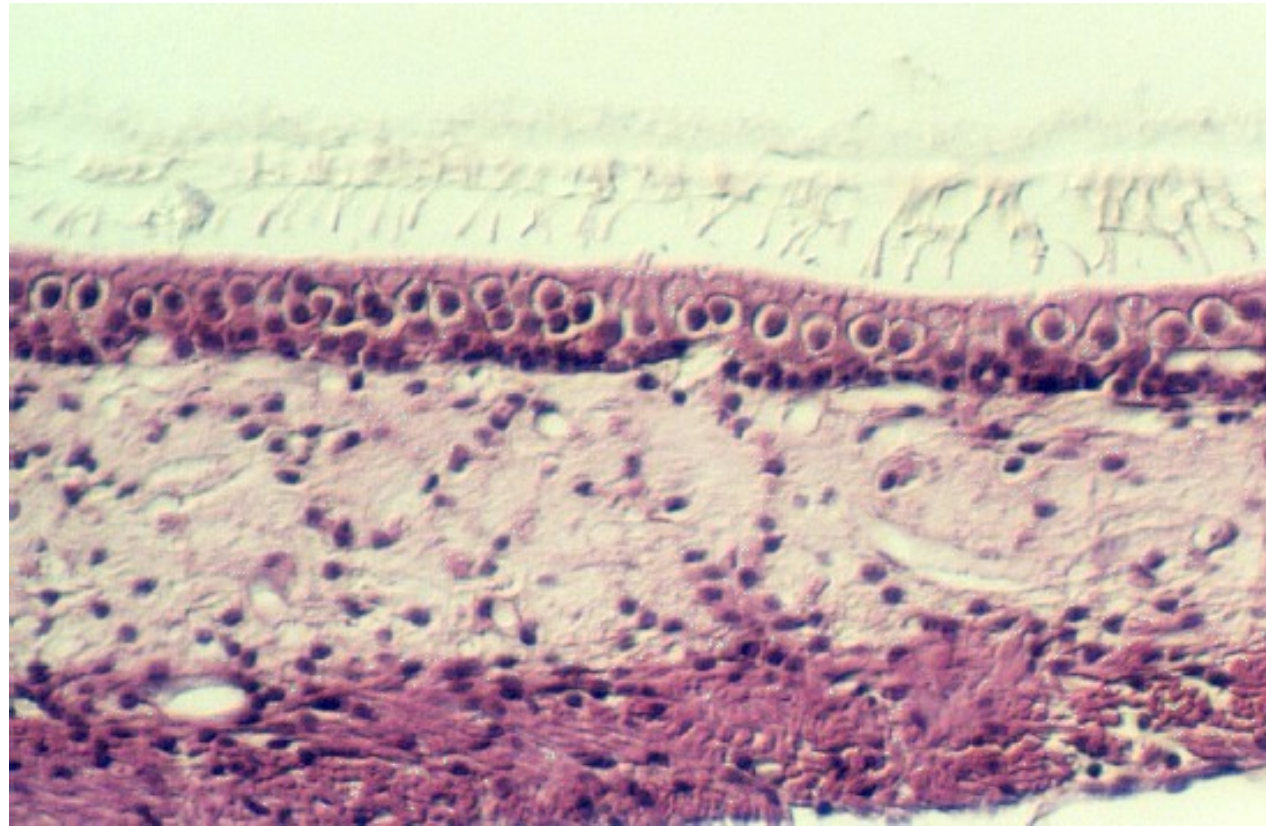


← **Funkce kupul a**
← **ampulárních krist**



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

Statolitová (otolitová) membrána v sakulu



•cellbio.utmb.edu/.../Ear/organization_of_the_inner_ear.htm.

M U N I
M E D

Autor:

Vojtěch Mornstein

Obsahová spolupráce:

Ivo Hrazdira, Carmel J. Caruana

poslední revize a ozvučení: březen 2021