



Národní konference s mezinárodní účastí  
**INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002**

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

## MODELOVÁNÍ NĚKTERÝCH VAD VNITŘNÍHO UCHA

Petr Janovský, Vojtěch Mišun

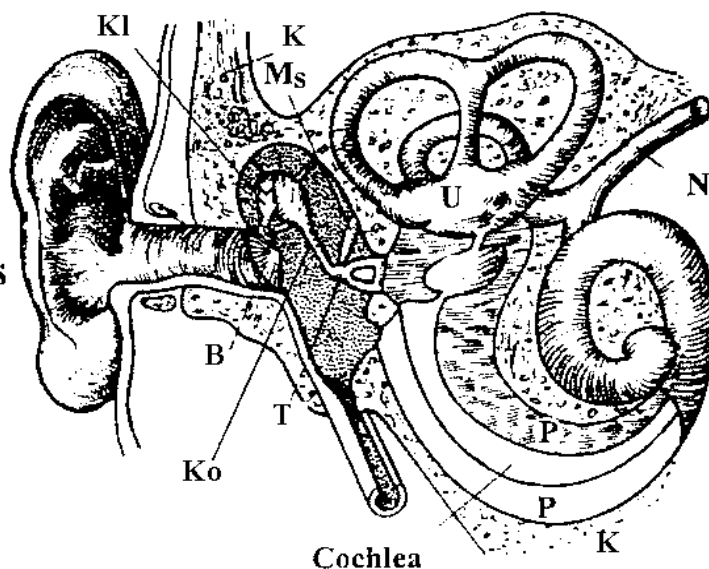
**Abstrakt.** Základním prvkem lidského sluchového orgánu, který zajišťuje frekvenční analýzu zvuku, je tzv. cochlea (hlemýžď). Tento článek se zabývá konečnoprvkovým modelem cochley a jeho parametry, potřebnými pro jeho funkci. Tento model byl vytvořen na základě teorie G. von Békésyho - běžící akustická vlna podél basilární membrány uvnitř v cochlee. Hlavním tématem tohoto článku je analyzovat některé chyby a defekty funkce cochley a jejich vliv na vnímání akustické vlny v uchu.

### ÚVOD

#### Lidské ucho

Lidské ucho se skládá ze tří částí - vnějšího, středního a vnitřního ucha (obr. 1). Zvuk vstupuje do vnějšího a středního ucha a je transformován do tekutiny vnitřního ucha. Zvuk ve formě akustických tlakových vln je nejdříve přenášen přes membránu bubínku, tyto vibrace dále postupují přes tři středoušní kůstky (kladívko, kovádlínka a třmínek) na oválné okénko cochley.

B - bubínek  
K - kost  
Kl - kladívko  
Ko - kovádlínka  
Ms - m. stapedius  
N - nerv  
P - perilymfa  
T - třmínek  
U - utriculus



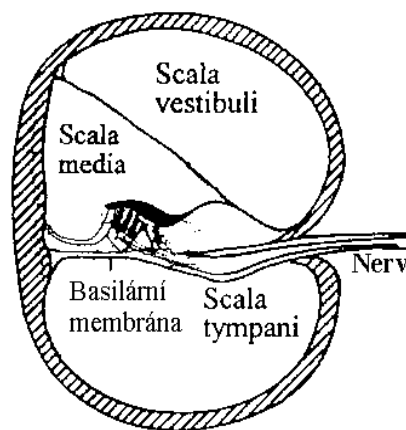
Obr. 1. Lidské ucho

## Struktura cochley

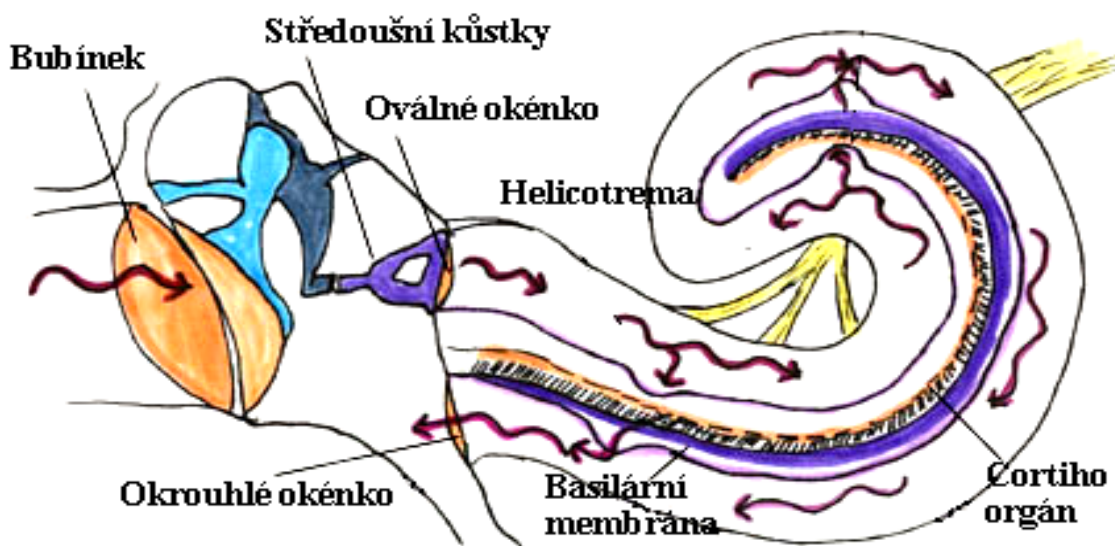
Základem vnitřního ucha (obr. 3) je šneku podobný útvar, známý jako cochlea. Lidská cochlea je asi 35 mm dlouhá a je zatočena do dvou a půl závitů. Membránou je rozdělena na dvě hlavní komory - scala vestibuli a scala tympani (obr. 2).

V nejširším místě scala vestibuli je oválné okénko, které je uzavřeno pružnou membránou. Scala vestibuli se zužuje až k místu nazvaném helicotrema, kde se stýká se scala tympani. Scala tympani se od helicotrema rozšiřuje až k okrouhlému okénku, které je také uzavřeno membránou. Obě komory jsou naplněny kapalinou - perilymfou.

Membrána, která odděluje obě komory, se nazývá basilární. Na ní leží tzv. Cortiho orgán. V Cortiho orgánu jsou umístěny nervy, které registrují výchylky basilární membrány, které vzniknou při průchodu akustického vlnění. Nad Cortiho orgánem je ještě tenká Reissnerova membrána, která odděluje komory scala vestibuli a scala media.



Obr. 2 Řez cochleou

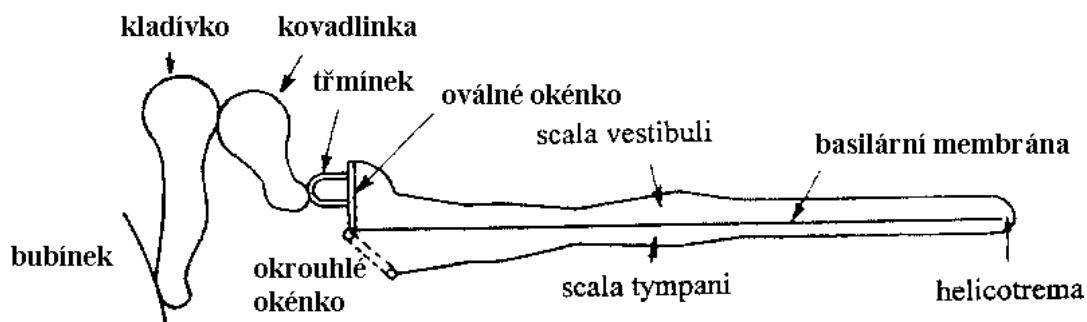


Obr. 3. Vnitřní ucho

## Funkce cochley

Na obrázku 4 je znázorněno jednoduché schéma středního a vnitřního ucha (cochlea je rozvinuta do roviny). Akustické vibrace jsou přenášeny do kapaliny vnitřního ucha - perilymfy.

Pokud je frekvence vibrací menší než 16 Hz, je změna akustického tlaku pomalá. Pak vůbec nedojde k vytvoření akustické vlny v perilymfě a změna tlaku je kompenzována pohybem membrány okrouhlého okénka.



Obr. 4. Schéma cochley

Při frekvencích vyšších než 16 Hz je už změna akustického tlaku rychlejší a dojde k vzniku akustické vlny, která běží podél basilární membrány. Vlna vybudí určité tvary kmitu membrány. Poloha míst maximálních výchylek membrány závisí na frekvenci zvuku.

Cochlea může být tedy chápána jako hydro - mechanický frekvenční analyzátor, umístěný ve vnitřním uchu. Jeho hlavním úkolem je provádět frekvenční dekompozici akustického signálu v reálném čase.

Šířka membrány je proměnlivá - u helicotremy je membrána nejširší a směrem k okrouhlému okénku se zužuje. Také její tloušťka a mechanické vlastnosti nejsou konstantní. Proto při nízkých frekvencích zvuku je místo maximální výchylky membrány blízko helicotremy. Se zvyšující se frekvencí zvuku se toto místo posouvá směrem k okrouhlému okénku. Nervy, rozmístěné podél membrány, pak tedy mohou předat mozku informace o slyšeném zvuku.

## MODEL FUNKCE COCHLEY

### Popis modelu

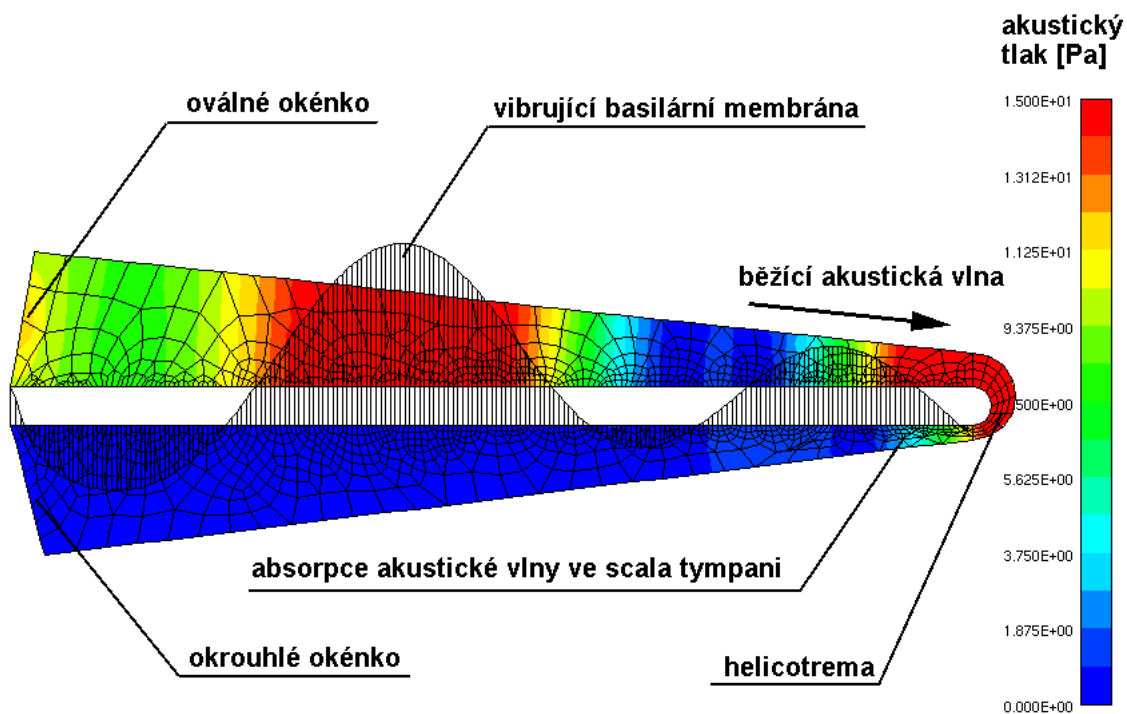
Konečnoprvkový model cochley byl sestaven na základě výše popsané funkce. Aby bylo dosaženo specifických spektrálních vlastností basilární membrány, musí tato mít přesně definované geometrické a materiálové charakteristiky, které jsou proměnné po její délce. Protože prostorový tvar cochley je velmi složitý, byly tyto vlastnosti studovány nejdříve na rovinném modelu.

Model se skládá ze dvou částí, které jsou v interakci - cochlea, která je naplněna perilymfou a basilární membrána. K modelování byla použita metoda konečných prvků. V současnosti existují dva modely, na kterých lze simulovat funkci vnitřního ucha - rovinný model celé cochley (obr. 5) a prostorový model samotné basilární membrány (obr. 6). Podle toho, jestli chceme zkoumat funkci celého vnitřního ucha, nebo se zabývat jen spektrálními vlastnostmi membrány pak volíme vhodný model.

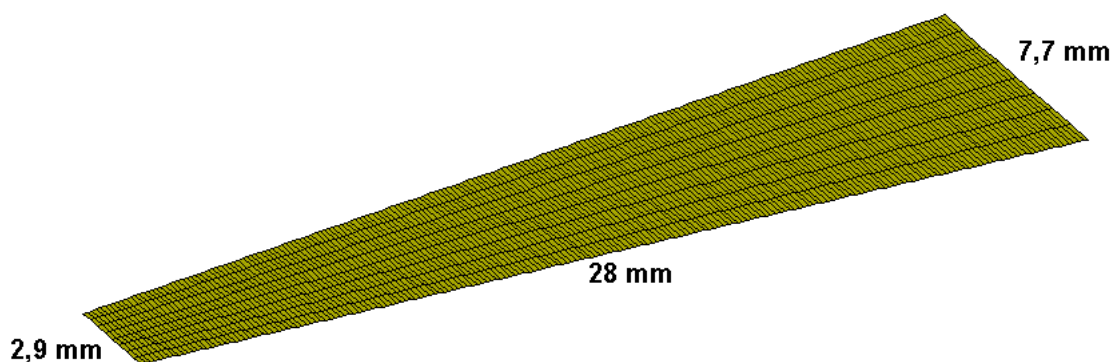
Připomeňme si základní podmínky, nutné pro správnou funkci cochley:

- správný průběh rovinné akustické vlny ve scale vestibuli
- odpovídající spektrální a modální vlastnosti basilární membrány v celém rozsahu slyšitelných frekvencí
- absorpce zvukových vln ve scale tympani

Nedodržení těchto podmínek, způsobené různými defekty cochley, má za následek zkreslené vnímání zvuku a má vliv jak na frekvenci zvuku, tak na jeho amplitudu.



Obr. 5. Konečnoprvkový rovinný model cochley



Obr. 6. Konečnoprvkový prostorový model basilární membrány

Správná funkce cochley je zobrazena na obr. 5. Oválné okénko vibruje a vytváří běžící rovinnou akustickou vlnu. V závislosti na frekvenci vlnění (zvuku) je vybudzen určitý tvar kmitu basilární membrány.

### Spektrální a modální vlastnosti modelu basilární membrány

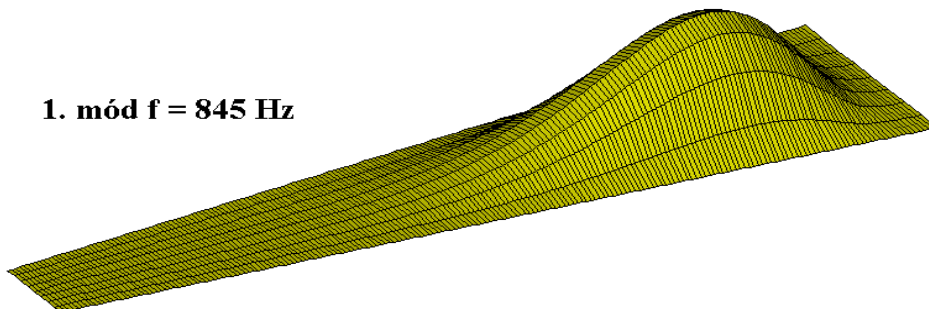
V tab.1 jsou uvedeny vlastní frekvence membrány a na obr. 7 jsou znázorněny některé tvary kmitu. Tvary kmitu mohou být buď symetrické (podle podélné osy membrány) nebo nesymetrické. Pro dekompozici akustického signálu jsou využívány pouze symetrické (rovinná vlna nemůže nesymetrické tvary kmitu vybudit).

Tabulka 1. Vlastní frekvence modelu basilární membrány

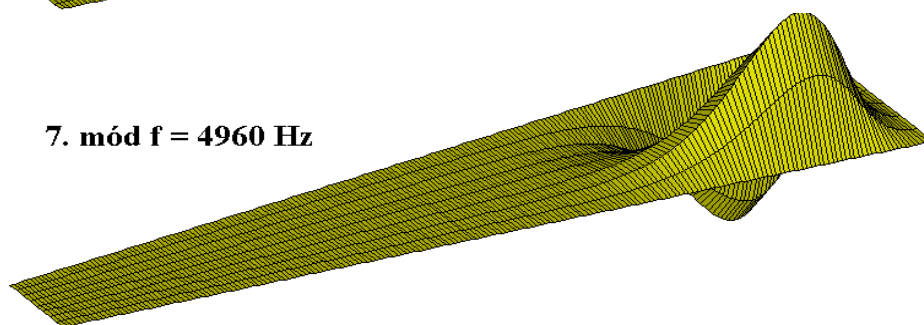
|                  |      |      |       |      |       |       |       |       |       |       |
|------------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| i                | 1-s  | 2-s  | 3-s   | 4-s  | 5-s   | 6-s   | 7-ns  | 8-s   | 9-s   | 10-ns |
| $f_{oi}$<br>[Hz] | 845  | 1746 | 2573  | 3318 | 4015  | 4671  | 4960  | 5312  | 6025  | 6821  |
| i                | 11-s | 12-s | 13-ns | 14-s | 15-ns | 16-ns | 17-s  | 18-ns | 19-s  | 20-ns |
| $f_{oi}$<br>[Hz] | 6868 | 7844 | 8450  | 8497 | 9456  | 9971  | 10175 | 11431 | 11514 | 12521 |

Mód : s – symetrický, ns - nesymetrický

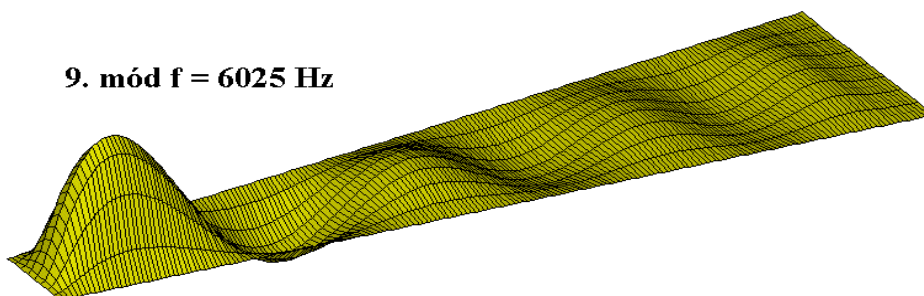
**1. mód  $f = 845$  Hz**



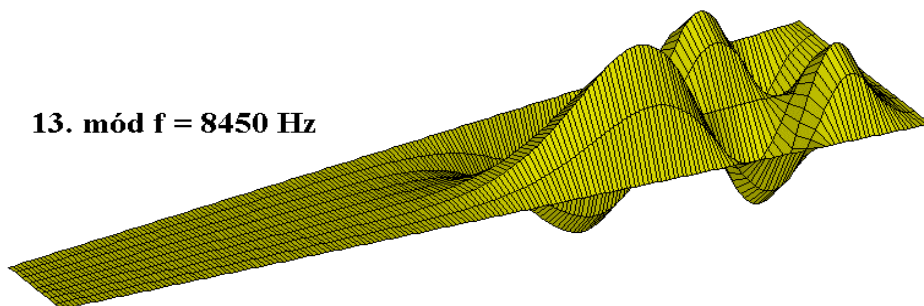
**7. mód  $f = 4960$  Hz**



**9. mód  $f = 6025$  Hz**



**13. mód  $f = 8450$  Hz**



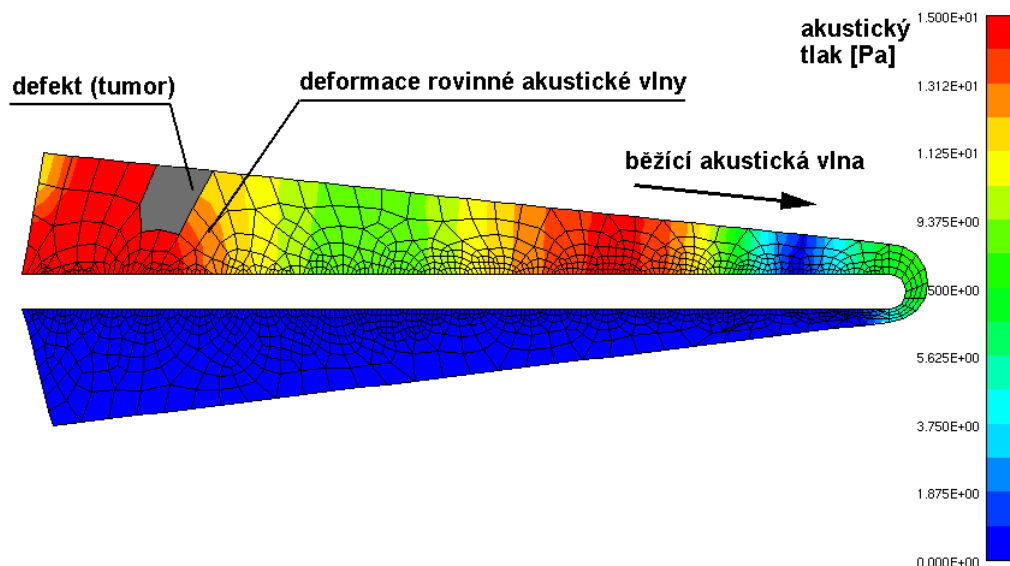
Obr. 7. Některé tvary kmitu modelu membrány

## VADY COCHLEY

Pokud není dodržena některá z výše popsaných podmínek, nutných pro správnou funkci cochley, nefunguje vnitřní ucho správně. Buď je zkreslen vstupní zvukový signál, nebo celá cochlea funguje špatně. V následujících odstavcích budou prezentovány některé vady cochley, jejich modelování a jejich vliv na funkci vnitřního ucha.

### Deformace běžící rovinné akustické vlny

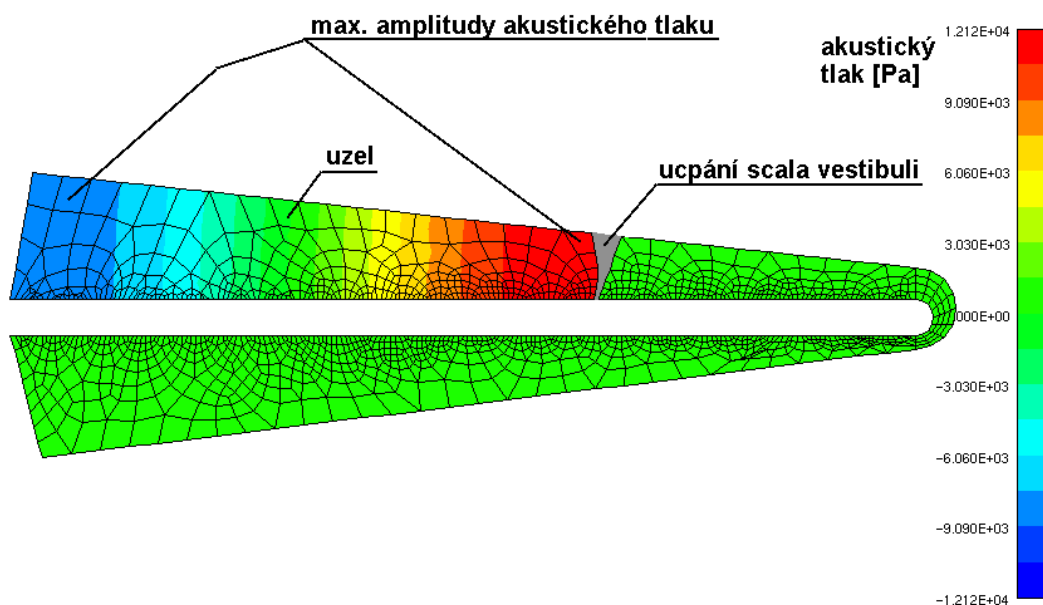
Změna tvaru běžící akustické vlny může nastat tehdy, je-li změněna geometrie scaly vestibuli v důsledku různých defektů (tumor, částečné ucpání apod.). Na obr. 8 je tento defekt modelován jako tumor na horní stěně komory. Je vidět, že tumor způsobuje změnu tvaru izobar běžící akustické vlny - nejsou rovinné. Výsledná akustická vlna je tedy prostorová. V blízkosti tumoru to tedy má za následek horší vybuzení tvaru kmitu basilární membrány a zkreslené vnímání zvuků (tónů), jejichž frekvence je stejná jako vlastní frekvence tvaru kmitu membrány, jehož maximální výchylka leží v blízkosti defektu.



Obr. 8. Změna geometrie scaly vestibuli

Na obr. 9 je znázorněn defekt, kdy scala vestibuli je úplně ucpána. Vzniká odraz vlnění zpět a dochází k vytvoření stojatého vlnění v této části scaly vestibuli. Frekvence stojatých vln je rovna vlastní frekvenci příslušné uzavřené dutiny. Vlastní tvary kmitu basilární membrány, které mají maximum vpravo od místa ucpání, nemohou být vybuzeny. Jak je vidět na obrázku, první akustický mód má uzel (nulový akustický tlak) přibližně uprostřed uzavřené dutiny, takže membrána ani v tomto místě nemůže být vybuzena. Maximální velikosti akustických tlaků jsou pak na levém a pravém konci dutiny, takže tvary kmitu membrány, které mají maxima v těchto místech, mohou být vybuzeny i malými akustickými tlaky. Stále přítomný akustický šum (hluk pozadí) tedy sám o sobě může tyto tvary kmitu vybudit.

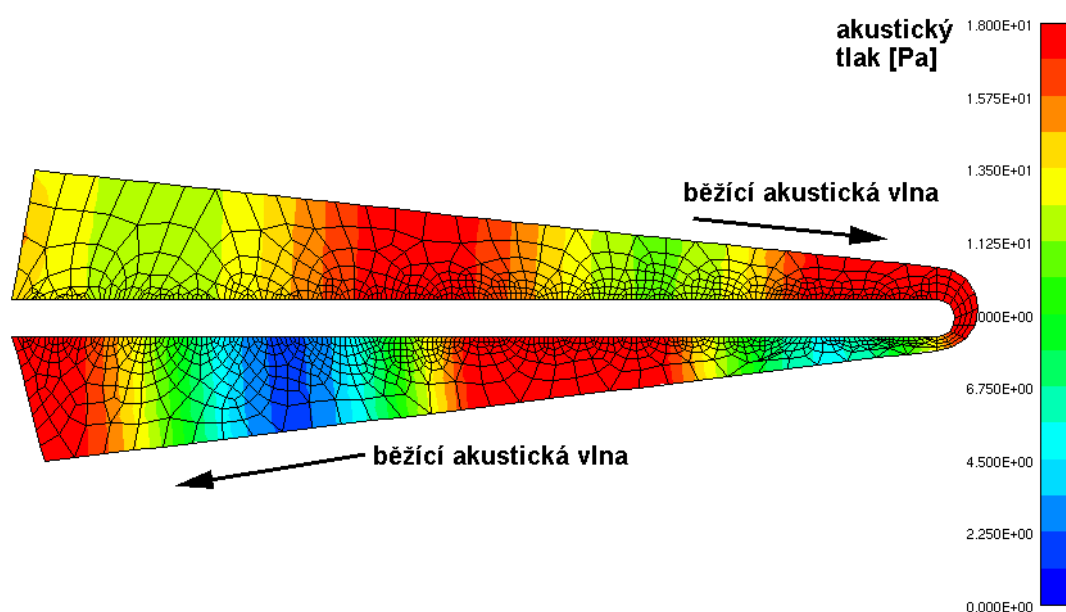
Pacienti trpící touto poruchou tedy stále slyší vysoký tón, jehož výška souvisí s vlastní frekvencí uzavřené dutiny.



Obr. 9. Ucpání scala vestibuli

Tumor, který je umístěn mimo vertikální rovinu symetrie basilární membrány, může také deformovat tvar běžící akustické vlny. Tato vlna pak může vybudit nesymetrické tvary kmitu basilární membrány - viz. obr. 7, 7. mód a 13. mód. Člověk s touto poruchou má pak zkreslené vnímání zvuku. Normální akustická vlna totiž nemůže tyto nesymetrické tvary kmitu vybudit.

Někdy se také může stát, že v důsledku patologické změny vlastností stěn scala tympani nedojde k pohlcení běžící vlny. Vlna pak běží až k okrouhlému okénku, od něj se odráží a běží nazpět (obr. 10). Dochází opět k poruše vybuzení kmitů membrány a ke zkreslenému vnímání zvuku. Zvuk může být slyšet i nějakou dobu poté, co již zanikl.



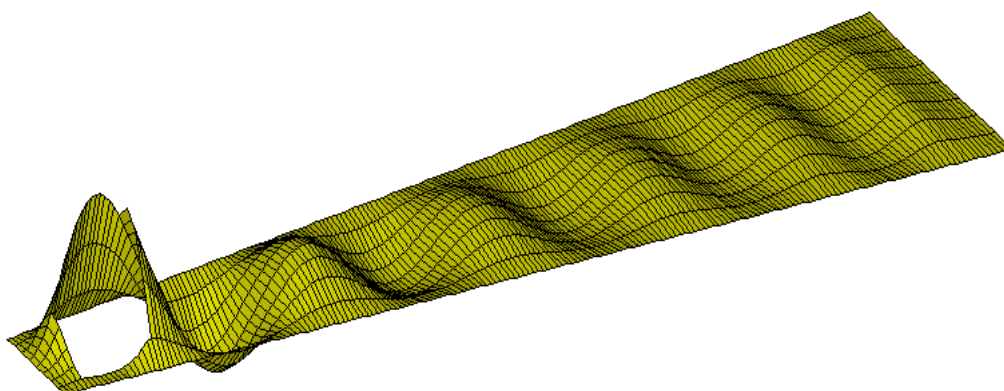
Obr. 10. Porucha absorpce ve scala tympani

## Deformace basilární membrány

Různé poruchy a defekty se mohou objevit také u basilární membrány. Zde jsou prezentovány dva defekty, které mohou mít vliv na správnou funkci cochley.

Prvním defektem je protržení basilární membrány na straně oválného okénka, kde je velmi tenká (obr. 11.). Běžící akustická vlna pak nemůže efektivně vybudit tvary kmitu membrány, které mají maximum v blízkosti defektu. Pacient pak slyší pouze omezený rozsah frekvencí.

V závislosti na velikosti a poloze defektu pak mohou být vybudeny také některé nesymetrické tvary kmitu membrány. Následkem je opět zkreslené vnímání zvuku.



Obr. 11. Protržení basilární membrány, 11. tvar kmitu

Další defekt, který se může objevit, je tumor na některém místě membrány. Dochází ke změně spektrálních a modálních vlastností membrány. Dalším vlivem tumoru může být také rostoucí počet nesymetrických tvarů kmitu, které jsou vybuzovány běžící akustickou vlnou. V konečném důsledku dochází ke změně intenzity některých slyšených tónů, některé frekvence mohou být zcela potlačeny (částečná hluchota).

## ZÁVĚR

Tento článek se zabýval analýzou některých defektů různých částí cochley a jejich vlivem na vnímání slyšeného zvuku.

Správná funkce cochley, tj. dekompozice zvukového signálu do jednotlivých frekvenčních složek, může být porušena některou z výše uvedených vad. Některé vady mohou mít vliv pouze na změnu spektrálních a modálních vlastností membrány a na změnu tvaru běžící akustické vlny. Pak dochází pouze k mírně odlišné frekvenční dekompozici zvuku, ale ucho v podstatě funguje. Naproti tomu jiné defekty mohou výrazně změnit vnímání zvuku - člověk slyší stále vysoký tón, nebo určitou část frekvenčního spektra neslyší vůbec.

Modelování defektů funkce vnitřního ucha může přinést řadu nových poznatků. Ukazuje se, že konečnoprvkový model cochley a basilární membrány je schopen simulovat řadu různých defektů vnitřního ucha a jejich vliv na vnímání zvuku.

**Poděkování.** Článek vznikl za podpory grantového projektu GA ČR č. 106/98/K019 a vědecko-výzkumného projektu č. J22/98:262100001.

## **LITERATURA**

1. von Békésy, G. Experiments in hearing. McGraw Hill, New York, 1960
2. Seikel, J. A., King, D. W., Drumright, D. G. Anatomy And Physiology For Speech, Language And Hearing. Singular Publishing Group, Inc., San Diego, 2000
3. Salt, A. N. Cochlear Anatomy. Dep. Of Otolaryngology, Washington University School Of Medicine, St. Louis
4. Mišun, V. Sound Analysis Model Of Cochlea System. Proc. Of The Seventh International Congress On Sound And Vibration, Garmisch-Partenkirchen, pp. 2267-2274, 2000
5. Janovský, P. Modelování lidského sluchu. Hluk a kmitanie v praxi, pp.51-56, Kočovce, 2001