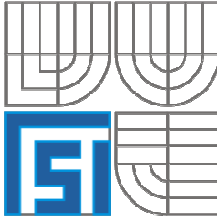


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

DEFORMAČNĚ NAPĚŤOVÁ ANALÝZA ČELISTI S ÚBYTKEM KOSTNÍ TKÁNĚ

STRESS - STRAIN ANALYSIS OF JAW WITH DECREASE BONE TISSUE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DAVID KRPALEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK FLORIAN, CSc.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá deformačně napěťovou analýzou dolní čelisti s úbytkem kostní tkáně. Nejprve byl vytvořen model geometrie pomocí grafického programu Rhinoceros 4.0 na základě získaných dat ze 3D skeneru. Ten byl převeden do výpočtového systému ANSYS Workbench 11, který využívá pro řešení metodu konečných prvků (MKP). Řešení bylo provedeno s homogenním, lineárním a izotropním modelem materiálu kostních tkání s rozdílnými hodnotami materiálových charakteristik pro kompaktní a spongiosní kost. Hodnoty silového působení třech svalů, které se účastní žvýkání, byly určeny na základě silové a momentové rovnováhy dolní čelisti. Řešení bylo provedeno pro 12 variant simulující skus v místech, kde se dříve nacházely zuby.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with stress - strain analysis of jaw with decrease of bone tissue. At first was created a model of geometry using graphic program Rhinoceros 4.0 upon acquisition by the 3D scanner. That was converted to the computational system ANSYS Workbench 11 which uses for solving the finite element method (FEM). Solving was executed with homogenous, linear and isotropic material model of bone with different characteristics for compact and cancellous bone. Forces of the three working muscles, which participate on chewing, were given on the basis of the force and moment balance mandible. Solving was executed for 12 variant simulating occlusion in places, where was earlier found teeth.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dolní čelist, úbytek kostní tkáně, deformačně napěťová analýza, metoda konečných prvků

KEYWORDS

Mandible, Jaw, Decrease Bone Tissue, Stress-strain Analysis, Finite Element Method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRPALEK, D. *Deformačně napěťová analýza čelisti s úbytkem kostní tkáně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Florián, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych poděkoval a vyslovil uznání všem, kteří mi pomáhali při vzniku této práce. Především Ing. Zdeňku Florianovi, CSc., vedoucímu mé diplomové práce za trpělivé vedení a množství praktických rad. Dále Martinu Kubičkovi za poskytnutí naskenovaného modelu čelisti a kolegům ze školy za užitečné rady.

Děkuji také svým rodičům za veškerou pomoc a podporu při studiu na této škole

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Floriana, CSc. s použitím uvedené literatury.

V Brně dne

.....

OBSAH

1. ÚVOD	9
2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE	10
3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ	11
4. REŠERŠE	12
5. METODA ŘEŠENÍ	14
6. ZÁKLADNÍ ANATOMICKÉ POZNATKY Z HLEDISKA ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	15
6.1. Základní orientace na lidském těle	15
6.2. Obecná stavba kosti	16
6.3. Dolní čelist (mandibula)	18
6.3.1. Chrup	21
6.3.2. Vývoj dolní čelisti v průběhu života.....	21
6.3.3. Čelistní kloub (articulatio temporomandibularis).....	24
6.3.4. Žvýkací svaly (musculi masticatores) a jejich funkce.....	25
6.3.5. Úpony žvýkacích svalů.....	27
6.3.6. Vektory žvýkacích svalů	28
6.3.7. Pohyby dolní čelisti	28
7. TVORBA MODELU GEOMETRIE	30
8. MODEL MATERIÁLU	34
9. KONEČNOPRVKOVÝ MODEL	35
9.1. Typy použitých prvků	35

9.2. Tvorba konečnoprvkové sítě	36
10. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK	39
10.1. Model vazeb a zatížení	39
10.1.1. Uvolnění dolní čelisti.....	40
10.1.2. Vstupní hodnoty pro výpočet sil.....	41
10.1.3. Výpočet silového působení svalů při skusu:.....	43
10.2. Aplikace okrajových podmínek	45
10.2.1. Silové okrajové podmínky	46
10.2.2. Deformační okrajové podmínky	47
11. PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ	50
11.1. Citlivostní analýza	52
11.2. Varianta A.....	54
11.2.1. Hlavní napětí σ_1	54
11.2.2. Hlavní napětí σ_3	56
11.2.3. Deformace v ose Z.....	58
11.2.4. Napětí ve směru rovnoběžném na tělo dolní čelisti.....	59
11.3. Varianta B.....	64
11.3.1. Hlavní napětí σ_1	64
11.3.2. Hlavní napětí σ_3	65
11.3.3. Deformace ose Z.....	66
11.3.4. Napětí ve směru rovnoběžném na tělo dolní čelisti.....	67
12. ZÁVĚR	71
13. POUŽITÁ LITERATURA.....	72
14. SEZNAM PŘÍLOH.....	73

1. ÚVOD

Už od pradávna se lidstvo potýká s potížemi chrupu. Dnešní doba vede na jedné straně k pohodlnému způsobu života, na druhé straně ke stresu, což má za následek vyšší výskyt onemocnění a větší konzumaci medikamentů, které mají i negativní účinky. Velkou roli hraje i naše genetická vybavenost, životospráva a péče, jakou věnujeme svému tělu. Někdy i tyto způsoby selžou a s přibývajícím věkem může dojít ke ztrátě chrupu a následnému úbytku kostní tkáně.

Náhrada zničených nebo chybějících zubů je už známa po tisíciletí, kdy zubní náhrady byly zhotovovány ze slonoviny či zvířecích kostí. Středověká zubní praxe se omezila na trhácní zubů, výměna byla zcela výjimečná. Dvacáté století přináší průlom v oblasti stomatologie a implantologie, kdy zubní technici mají stále dokonalejší prostředky k náhradě chybějících zubů.

Uvolnění a následné vypadnutí zubu, či několika zubů, nemusí být spojeno pouze s vysokým věkem. Stačí hluboký kaz nebo úraz. Nejvhodnější náhradou celého zubu je zavedení zubního implantátu do čelisti. V případě, kdy je nutná náhrada více zubů, které již není možné nahradit fixním můstkem, nebo zubními implantáty, se zhotovují snímatelné nebo fixní protézy. Zubní náhrada je nutná jak z důvodu funkčnosti chrupu, aby bylo možné kousat potravu, tak i správná artikulace a z důvodů estetických. Při ztrátě všech zubů dochází k úbytku kostní tkáně, jež má za následek snížení čelisti, která znesnadňuje použití fixní zubní náhrady.

2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE

Jak bylo uvedeno v první kapitole, pro zachování funkčnosti a dobré artikulace je třeba zvolit vhodnou zubní náhradu po celkové ztrátě zubů na čelisti. Vhodná náhrada se převážně volí podle stavu kostní tkáně. V současnosti je nejpřirozenější náhradou zubní implantát, který ale vyžaduje dostatek kostní tkáně pro jeho aplikaci a slouží jako základ pro náhradu zubu, anebo tvoří základ pro ukotvení snímatelné protézy. Při zatěžování, zejména u pacientů s úbytkem kostní tkáně v oblasti čelisti, může docházet k problémům jako například k uvolňování implantátu. Příčiny vzniku těchto problémů mohou být způsobeny kvalitou povrchu implantátu, tuhostí nebo nízké či vysoké úrovně napětí v kosti okolo implantátu. Pro návrh a aplikaci těchto implantátů je vhodné znát deformační a napjatostní odezvu čelisti na zatížení při kousání a žvýkání potravy. Určení deformace a napětí pro tvarově a materiálově složitě těleso jakým je dolní čelist s úbytkem kostní tkáně představuje vyřešení řady dílčích problémů.

3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

Z předešlé kapitoly vyplývá, že problém lze formulovat takto:

Provedení deformačně napěťové analýzy čelisti s úbytkem kostní tkáně se zatížením v místech původního uložení zubů.

Z této formulace vyplývá, že cílem diplomové práce je:

Deformačně napěťová analýza čelisti s úbytkem kostní tkáně.

Jinými slovy to znamená, že budu analyzovat deformačně napěťový stav atrofované mandibuly pro případ, že by v místech původních zubů byly umístěny implantáty.

4. REŠERŠE

Při vyhledávání literatury související s daným problémem jsem se zaměřil na oblasti týkající se materiálových vlastností kosti, silových působení a výpočtového modelování dolní čelisti.

Materiálové vlastnosti kosti dolní čelisti:

- [11] *T.M.G.J. van Eijden, P.N. van der Helm, L.J. van Ruijven, and L. Mulder: Structural and Mechanical Properties of Mandibular Condylar Bone*
- Strukturní a mechanické vlastnosti kosti kloubu na dolní čelisti

- [12] *R. B. Ashmani, W. C. Van Buskirk: The elastick properties of a human mandible*
- Elastické vlastnosti lidské dolní čelisti

- [13] *Christian Clason, Andreas M. Hinz, Heinrich Schieferstein: A Method for Material Parameter Determination for the Human Mandible Based on Simulation and Experiment*
- experimentální zjištění materiálových vlastností na posmrtně vyjmuté stařecké bezzubé čelisti

Silové působení na dolní čelisti při skusu:

- [14] *Caputo, A., Wylie, R.: Force generation and reaction within the periodontium.*
- silové působení při skusu s uvažováním periodontální lůžka

- [5] *Petrtyl M., Máca I.: Silové účinky mezi zuby při skusu*

- [15] *Petrtyl M., Máca I.*: Experimentální verifikace sil mezi zuby při kousání a žvýkání mužů

Výpočtové modelování dolní čelisti:

- [16] *James P. Ralph, Angelo A. Caputo*: Analysis of Stress Patterns in the Human Mandible
- Analýza napětí na vzorku lidské dolní čelisti
- [17] *T.M.G.J. van Eriden*: Biomechanics of the Mandible
- Biomechanika dolní čelisti
- [18] *Doina Drăgulescu, Dan Stanciu, Mirela Toth-Tașcău*: Modeling and dynamic study of human mandible
- Modelování a studie dynamiky lidské dolní čelisti
- [19] *C. Kober*: Validation of interdependency between inner structure visualization and structural mechanics simulation
- Ověření vzájemné závislosti mezi vnitřní vizuální strukturou a strukturou mechanické simulace
- [20] *C. Kober*: Anisotropic Simulation of the Human Mandible
- Anizotropní simulace lidské dolní čelisti
- [21] *Dan Stanciu*: Graphic study of human mandible stress level
- Grafická studie napětí na lidské dolní čelisti

5. METODA ŘEŠENÍ

K řešení výše uvedeného problému se nabízí několik metod modelování:

- Analogové modelování
- Podobnostní modelování
- Experimentální modelování
- Výpočtové modelování

Analogové, podobnostní a experimentální modelování nelze použít z důvodů časové a ekonomické náročnosti, problému s realizací vazeb a zatížení a náročnosti zajištění biologických vzorků. Nejvhodnější metodou pro řešení je výpočtové modelování, které je možné realizovat analytickými a numerickými metodami.

Vzhledem ke složitosti geometrie připadá v úvahu pouze numerická metoda s využitím metody konečných prvků, se kterou disponuje výpočtový systém ANSYS Workbench 11, jež je dostupný na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.

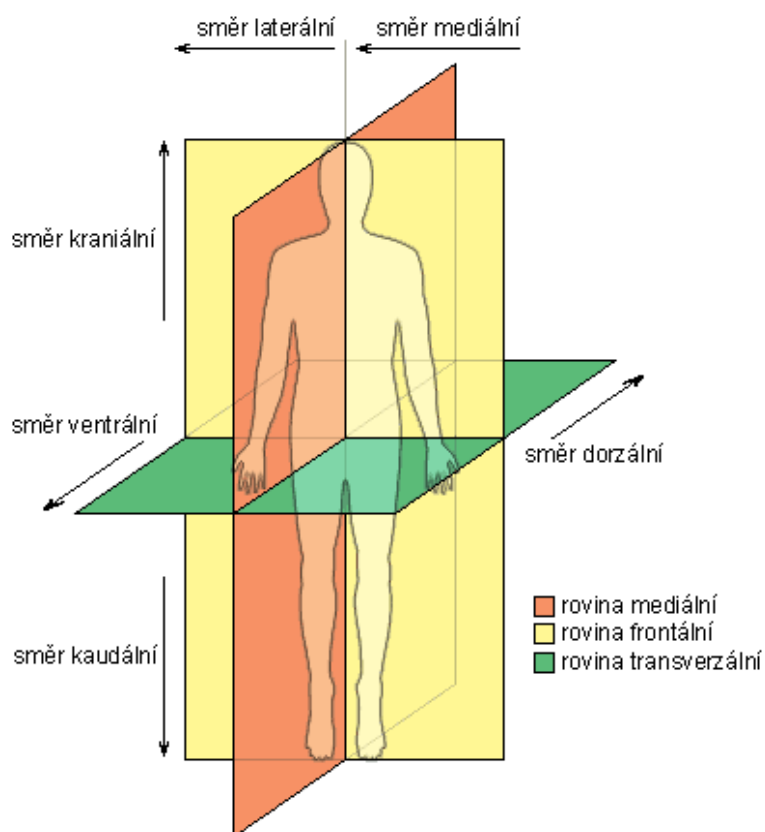
Pro tuto metodu je nutné získat poznatky o stavbě kosti a vazbách, které jsou v iteraci s čelisti pro vytvoření výpočtového modelu složeného z modelu geometrie, modelu materiálu, modelu vazeb a zatížení.

6. ZÁKLADNÍ ANATOMICKÉ POZNATKY Z HLEDISKA ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Lidské tělo se skládá ze tří základních částí, které se dále dělí na jednotlivé podčásti. Jsou jimi hlava, trup a končetiny, které se dále dělí na horní a dolní končetiny. Každá tato část má svoje vlastní funkce a tvar, jenž umožňuje organismu životaschopnost.

K popisu celého lidského těla se využívá latinského názvosloví, které bylo mezinárodně přijato.

6.1. Základní orientace na lidském těle



Obrázek 6.1 Základní anatomické roviny a směry

OZNAČENÍ ROVINY TĚLA (Obrázek 6.1)

- rovina mediální – svislá rovina procházející středem těla a dělící ho na dvě symetrické poloviny
- roviny sagitální – všechny roviny rovnoběžné s rovinou mediální
- roviny frontální – roviny svislé, rovnoběžné s čelní kostí, kolmé na rovinu mediální, dělí tělo na část přední a zadní
- roviny transversální – horizontální roviny, kolmé na všechny předešlé roviny

OZNAČENÍ SMĚRŮ (Obrázek 6.1)

- vertikální
 - směr k hlavě - kraniální (*cranialis*) nebo horní - *superior*
 - směr k pánvi - kaudální (*caudalis*) nebo dolní - *inferior*
 - na končetinách k trupu - proximální (*proximalis*), od trupu - distální (*distalis*)
- předozaďní
 - směr dopředu - ventrální (*ventralis*) nebo přední - *anterior*
 - směr dozaďu - dorzální (*dorsalis*) nebo zadní - *posterior*
- horizontální
 - směr ke střední rovině - mediální (*medialis*)
 - směr od střední roviny ke stranám - laterální (*lateralis*)
 - napravo, pravý - *dexter*
 - nalevo, levý – *sinister*

6.2. Obecná stavba kosti

Kost (*os, ossis*) je složitý, živý a plastický orgán. Kostní tkáň je jednou z tkání, které se na stavbě kosti podílí a patří mezi oporná pojiva. Základní stavebními složkami kostní tkáňe jsou: buňky (ostecyty), vlákna (kolagenní, elastická) a mezibuněčná hmota. Hlavním znakem kostní tkáňe je přítomnost pevné (tvrdé) mineralizované mezibuněčné hmoty.

Kost je v dětství schopna růstu a její vnitřní struktura podléhá celý život trvalým remodelačním změnám v závislosti na silách, které na ní působí.

Kosti můžeme třídit podle různých hledisek. Na základě uspořádání vláken v základní hmotě rozlišujeme:

- kost lamelózní (vrstevnatou) – tvoří většinu skeletu
- kost vláknitou (fibrilární) – tvoří výběžky a drsnatiny

Podle tvaru kosti rozeznáváme:

- kosti dlouhé (např. stehenní a pažní kost)
- kosti krátké (kosti zápěstní)
- kosti ploché (lopatka)
- kosti nepravidelného tvaru (dolní čelist)

Každá kost se skládá ze tří stavebních komponentů. Na povrchu je vazivová okostice (*periosteum*), pak následuje vlastní kostní tkáň (kostní kompakta a spongióza) a uvnitř kostních dutin je kostní dřev (*medulla ossium*).

OKOSTICE (*periosteum*)

Okostice je silný, tuhý, vazivový list, který pokrývá celou kost s výjimkou kloubních konců (sklovitá kloubní chrupavka). Je bohatě prokrvená a obsahuje četné citlivé (senzitivní) nervy. Krevní cévy mají velký význam pro výživu kosti. Je-li periost odtržen, porušuje se i výživa kosti.

Nervy okostice zabezpečují vedení tzv. kostní bolesti. Vlastní kostní tkáň nervy nemá – je necitlivá. Bolest při poranění kosti (např. při kostní zlomenině) je tedy zprostředkována poškozeným periostem.

KOSTNÍ TKÁŇ (kostní kompakta a spongióza)

Kostní tkáň je typem pojiva, které je typické mineralizací mezibuněčné hmoty. Podílí se na stavbě kosti. Je složena z osteofytu, kolagenních a elastických vláken a beztvárné mezibuněčné hmoty. Na povrchu kosti je kompakta, která je tvořena buď koncentricky uspořádanými lamelami, nebo destičkovými lamelami, orientovanými rovnoběžně s dlouhou osou kosti. Komplex až dvaceti soustředěných lamel s centrálním (Haversovým) kanálkem se nazývá

Haverský systém, nebo-li osteón. Uvnitř kosti je spongióza, která je složena z trámců (trabekul) a plotének tvořících prostorové struktury, jejíž tvar je výsledkem různých mechanických sil působících na kost.

KOSTNÍ DŘEŇ (*medulla ossium*).

Dřeň vyplňuje dřeňové dutiny uvnitř diafýz dlouhých kostí a drobné prostory mezi trámečky spongiózní kosti (epifýzy). Je složena z jemných sítí vazivových buněk a bohatě větvených cévních pletení.

6.3. Dolní čelist (mandibula)

Dolní čelist (Obrázek 6.2 a Obrázek 6.3) je největší a nejsilnější z obličejových kostí. Skládá se z těla a dvou vzestupných ramen, jež odstupují od těla mandibuly v pravém a levém úhlu čelisti. Tělo dolní čelisti (*corpus mandibulae*), je nepárové, parabolicky zahnuté; rameno dolní čelisti (*ramus mandibulae*), je vzestupný plochý úsek nesoucí kloubní hlavici pro spojení dolní čelisti s bází lebeční; úhel (*angulus mandibulae*) jímž předchází tělo mandibuly ve vzestupné rameno.

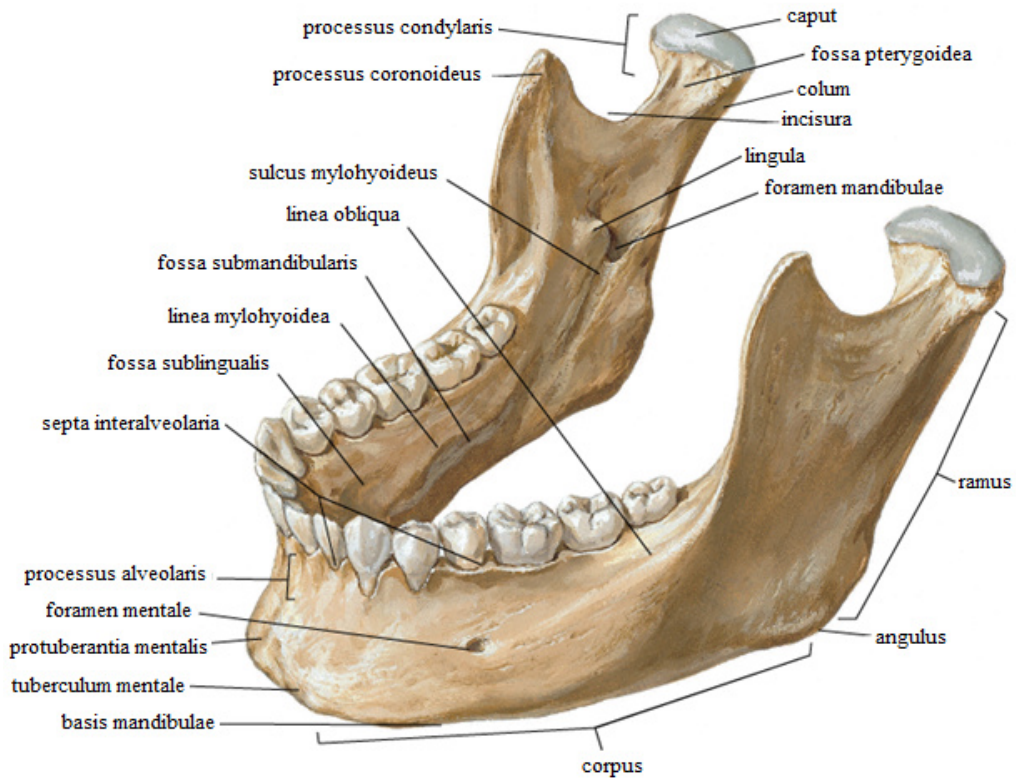
TĚLO DOLNÍ ČELISTI (*CORPUS MANDIBULAE*)

Je mohutnější při svém dolním okraji; protuberantia mentalis vystupuje ve střední čáře jako trojhranné ztlustění; foramen mentale, laterálně od protuberance, je otvor, kde končí mandibulární kanál; spina mentalis, trn na vnější straně uprostřed bradové části těla mandibuly, je místem pro připojení začátků m. genioglossus a pod ním m. geniohyoideus obou stran; fossa digastrica – párová jamka pod předchozím trnem, je místo spojení předního bříska m. digastricus s mandibulou; linea mylohyoidea – podélná, lehce skloněná, vyzdvižená čára na vnitřní straně těla čelisti, je místem úponu okraje plochého m. mylohyoideus; fovea sublingualis, jamka v místě podjazykové slinné žlázy, je vyhloubena nad linea mylohyoidea; fovea submandibularis, jamka v místě podčelistní slinné žlázy, je pod linea mylohyoidea. Pars alveolaris (*processus alveolaris*) vystává na kraniální straně těla, vytvořená analogně s maxilou jako funkční nástavec pro zuby. Po ztrátě zubu se pars alveolaris snižuje, až vymizí a dále se snižuje i tělo mandibuly; juga alveolaria se zaobleně rýsují na povrch pars alveolaris v místě

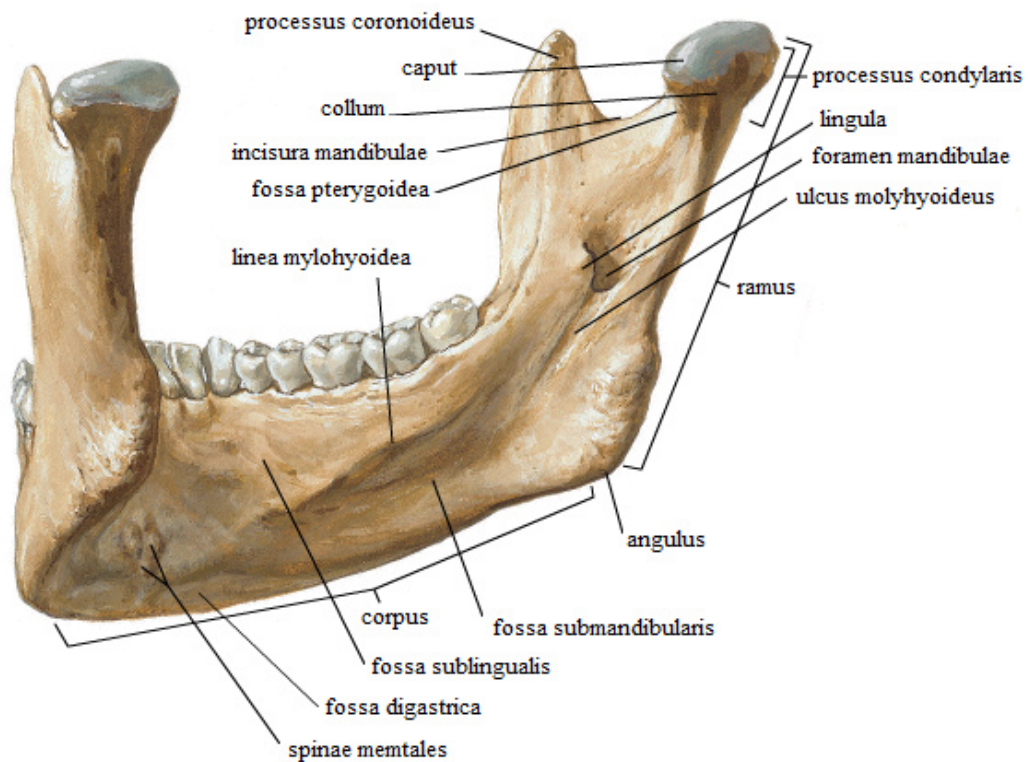
zubních kořenů; alveoli dentales, lůžka zubní, jsou otvory pro zuby ve volném okraji pars alveolaris.

RAMENO DOLNÍ ČELISTI (*RAMUS MANDIBULAE*)

Párový, je mediolaterálně oploštělý a kraniálně vybíhá ve dva výběžky. Processus condylaris, výběžek kloubní, zadní z výběžků, slouží skloubení mandibuly; Caput mandibulae, hlavice mandibuly, má tvar napříč postaveného protáhlého elipsoidu (dlouhá osa elipsoidu stojí horizontálně a míří se strany ventrolaterální dorsomediálně – takže osy obou stran se protínají za mandibulou); collum mandibulae, štíhlý krček, spojuje hlavici s ramenem mandibuly; fovea pterygoidea, mělká jamka vpředu pod hlavicí, je místem úponu m. pterygoideus lateralis. Processus coronoideus, plochý, umístěný před kloubním výběžkem, je místem úponu m. tempovalis; linea obliqua pokračuje jako hrana od předního okraje proc. Coronoideus na zevní stranu těla čelisti. Tuberositas masseterica, drsnatina na zevní ploše ramena při anšlus mandibulae, je místem úponu m. masseter (zevního svalu žvýkacího); tuberositas pterygoidea, drsnatina na vnitřní ploše ramene při anšlus mandibulae, je místem úponu m. pterygoideus medialis. Foramen mandibulae, otvor uprostřed vnitřní plochy ramus mandibulae, vede do canalis mandibulae. Canalis mandibulae, kanál dolní čelisti, jde ramenem a tělem čelisti od foramen mandibulae do foramen mentale; vede n. alveolaris inferior ze 3. větve trigeminu spolu s tepnou a žílou.



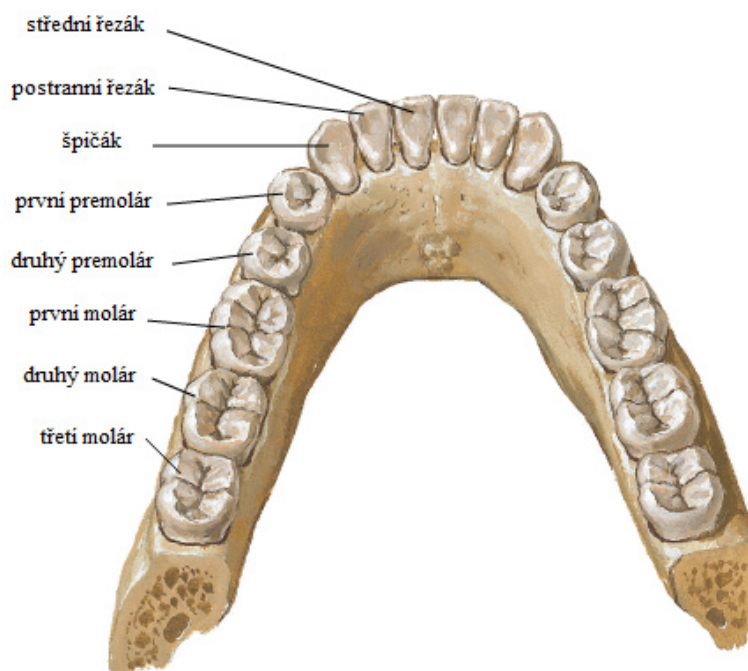
Obrázek 6.2 Dolní čelist dospělého člověka, pohled shora a anterolaterálně



Obrázek 6.3 Dolní čelist dospělého člověka, pohled zezadu a z levé strany

6.3.1. Chrup

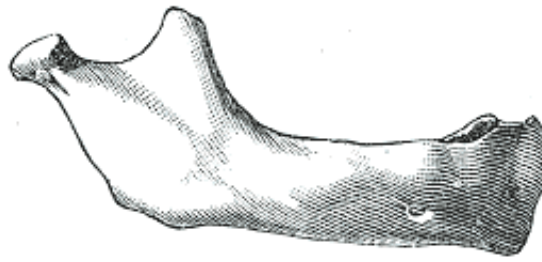
Zuby slouží k ukusování a rozměňování potravy a k artikulaci. V dospělosti ve stálém chrupu má horní i dolní čelist maximálně 16 zubů. Podle tvaru a funkce korunek se zuby dělí na řezáky (*dentes incisivi*), špičáky (*dentes canini*), třenové zuby (*dentes premolares*) a stoličky (*dentes molares*). Uspořádání zubů na dolní čelisti je zobrazeno na obrázku níže.



Obrázek 6.4 Uspořádání zubů na dolní čelisti

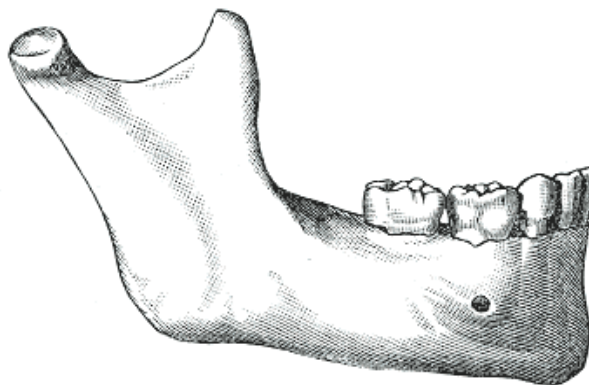
6.3.2. Vývoj dolní čelisti v průběhu života

Při narození (Obrázek 6.5) tělo dolní čelisti (*corpus mandibulae*) je pouhá skořepina, která obsahuje lůžko dvou předních zubů, špičák a dva mléčné stoličky zubů. Kanál mandibuly (*Arteria, vena et nervus alveolaris inferior*), ve kterém jsou umístěny nervy, je velký a probíhá blízko nižší části okraje kosti; foramen mentale je otevřený pod lůžkem prvních mléčných stoliček. Ramus a corpus svírají značně tupý úhel (175°) a processus condylaris je blíž linie těla dolní čelisti. Processus coronoideus je poměrně velký a vyčnívá nad úroveň processus condylaris.



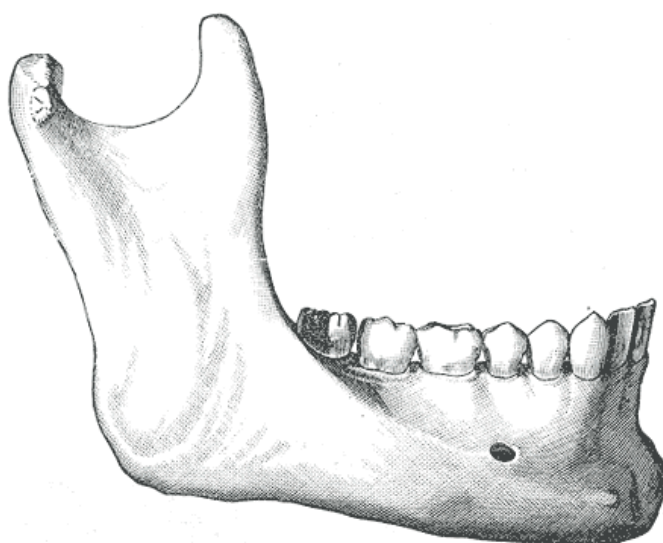
Obrázek 6.5 Dolní čelist při narození

Po narození (Obrázek 6.6) se v prvním roce obě části dolní čelisti spojí; stopa oddělení může být viditelná v začátku druhého roku, blízko okraje dásně. Corpus se stává protáhlý v celé délce, zejména v oblasti foramen mentale, aby poskytl místo pro další tři zuby, které vyrůstají v této oblasti. Šířka corpusu se zvětšuje kvůli růstu dásňové části a zároveň, aby uvolnil prostor pro kořeny zubů. Současně se corpus zhušťuje v oblasti pod zuby, aby umožnil odolávat silám žvýkacích svalstev. Kanál mandibuly je umístěn po druhém chrupu nad úrovní linea mylohyoidea a foramen mentale zaujímá pozici obvyklou v dospělosti. Úhel ramus a corpus je méně otupělý (140°).



Obrázek 6.6 Dolní čelist v dětví

V dospělosti (Obrázek 6.7) oblast pod zuby (corpus) je obvykle rovna hloubce. Foramen mentale je plně otevřený přibližně v polovině mezi horním a dolním okrajem kosti, mandibulární kanál vede téměř paralelně s linea obliqua. Ramus má skoro vertikální směr a úhel mezi ramus a corpus je $110^\circ - 120^\circ$.



Obrázek 6.7 Dolní čelist v dospělosti

Ve stáří (Obrázek 6.8) dochází k úbytku kosti v oblasti pod chrupem, po ztrátě chrupu processus alveolaris zmizí a následkem toho se přední část čelisti sníží na úroveň linea obliqua. Mandibulární kanál s foramen mentale je otevřený blízko dásně. Ramus je zakřivený a úhel mezi ramus a corpus je přibližně 140° . Processus condylaris je více nebo méně skloněna dozadu.



Obrázek 6.8 Dolní čelist ve stáří

6.3.3. Čelistní kloub (articulatio temporomandibularis)

Čelistní kloub (Obrázek 6.9) je párový a skládá se z:

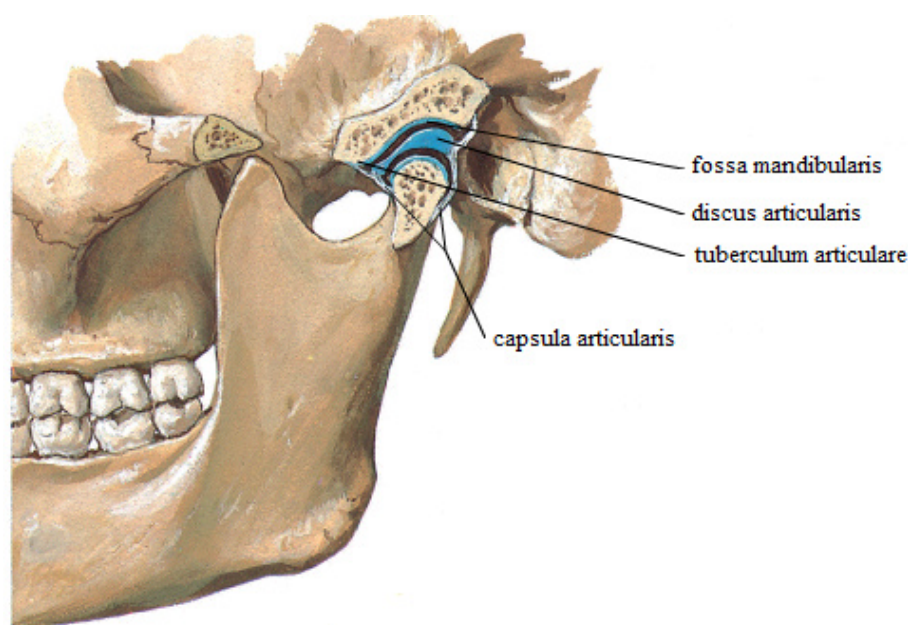
kloubní hlavice (caput mandibulae, poměrně malé, 15-20mm dlouhé, cylindrického tvaru) která je pokryta tenkou vrstvou vazivové chrupavky.

kloubní jamky (fossa mandibularis), která je uložena ve spodině spánkové kosti. Je konkávní a ventrálně přechází v konvexní plošku kloubního hrbolku. Obrysem celé kloubní plošky je esovitě prohnutá křivka skloněná vpřed a dolů. Mezi jamkou a hlavicí je uložena vazivová kloubní ploténka (destička), která tak dělí kloub na horní a dolní část.

kloubní ploténky (discus articularis), která je tuhá vazivová destička oválného tvaru. Dolní plocha je konkávní, horní plocha sedlovitá, uprostřed je ploténka ztenčená. Vazy je spojena jak s kloubním pouzdem, tak s kloubní hlavicí. Napojuje se na ni úpon zevního křídlového svalu (musculus pterygoideus lateralis).

kloubního pouzdra (capsula articularis), které je značně volné, což umožňuje rozsáhlé pohyby kloubní hlavice.

kloubní dráhy, po níž se pohybuje kloubní hlavice v kloubní jamce dopředu a dolů. Sklon se měří proti okluzní rovině a úhel kolísá mezi 5 - 55°, průměrná hodnota je stanovena na 33°.



Obrázek 6.9 Sevřené čelisti

6.3.4. Žvýkácí svaly (musculi masticatores) a jejich funkce

Ke svalům žvýkáčím (Obrázek 6.10 a Obrázek 6.11) patří m. temporalis, jdoucí od jámy spánkové k mandibule, m. masseter, rozepjatý od arcus zygomaticus k angulus mandibulae, a dva svaly na vnitřní straně mandibuly, m. pterygoideus medialis a m. pterygoideus lateralis, jdoucí od processus pterygoideus k mandibule.

Sval spánkový (musculus temporalis) je uložen ve fossa temporalis, ze které se na vnitřní straně arcus zygomaticus vějířovitě sbíhá k processus coronoideus mandibulae.

Sval přitahuje dolní čelist k horní (zavírání úst, addukce neboli elevace mandibuly). Protože většina snopců svalu jde k úponu šikmo – shora zezadu dopředu dolů, táhne sval čelist, dopředu vysunutou, směrem dozadu (retrakce neboli retropulce mandibuly).

Zevní sval žvýkácí (musculus masseter) je uložen na zevní straně mandibuly. Jde od arcus zygomaticus na ramus a angulus mandibulae. Má složitou vnitřní strukturu se snopci upínající se k vloženým šlachovým ploténkám. Tvoří rozsáhlejší pars superficialis a menší pars profunda.

Pars superficialis (povrchová hlava) - povrchová větší složka. Začátek: přední dvě třetiny arcus zygomaticus. Úpon: angulus mandibulae. Probíhá šikmo shora zpředu dolů; elevuje mandulu a přitom ji táhne dopředu.

Pars profunda (hluboká hlava) – hlubší menší složka. Začátek: zadní část arcus zygomaticus, diskokapsulární systém čelistního kloubu a někdy i fascia temporalis. Úpon: střed ramus mandibulae. Zajišťuje dráhu discus articularis při lateropulsi mandibuly a brání uskřínutí kloubního pouzdra; táhne dolní čelist dozadu.

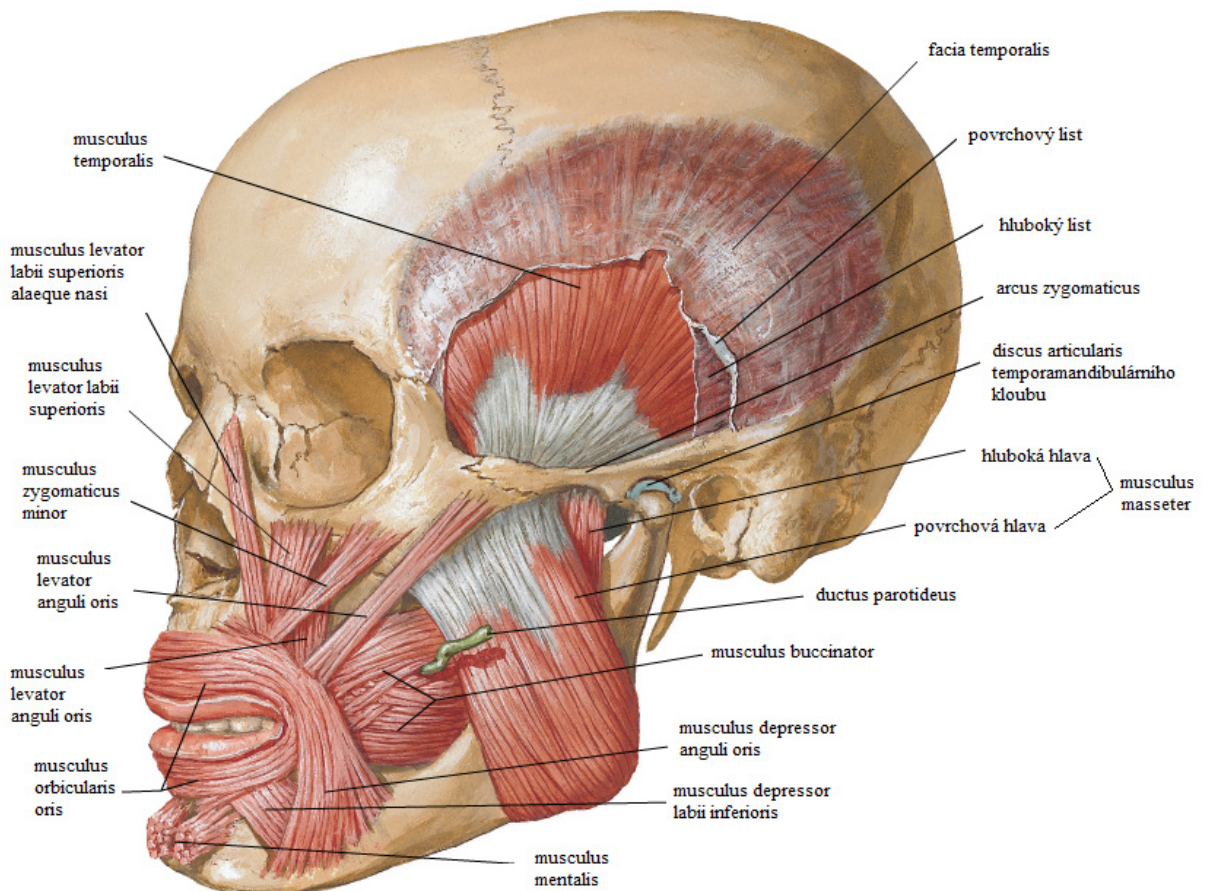
Sval způsobuje elevaci mandibuly. Povrchová část současně táhne čelist poněkud dopředu (protrakce neboli propulce mandibuly), hluboká část u novorozence, kde je nízká mandibula, táhne čelist dozadu (retrakce, retropulce). Tento rozdíl ve funkci obou částí se u novorozence a kojence uplatňuje jako střídavý předožadní pohyb mandibuly při mechanismu sání.

Vnitřní sval křídlový (musculus pterygoideus medialis) je silný oploštělý sval ve fossa infratemporalis. Jde od processus pterygoideus na tuberositas pterygoidea a je jakousi obdobou m. masseter, na vnitřní straně mandibuly.

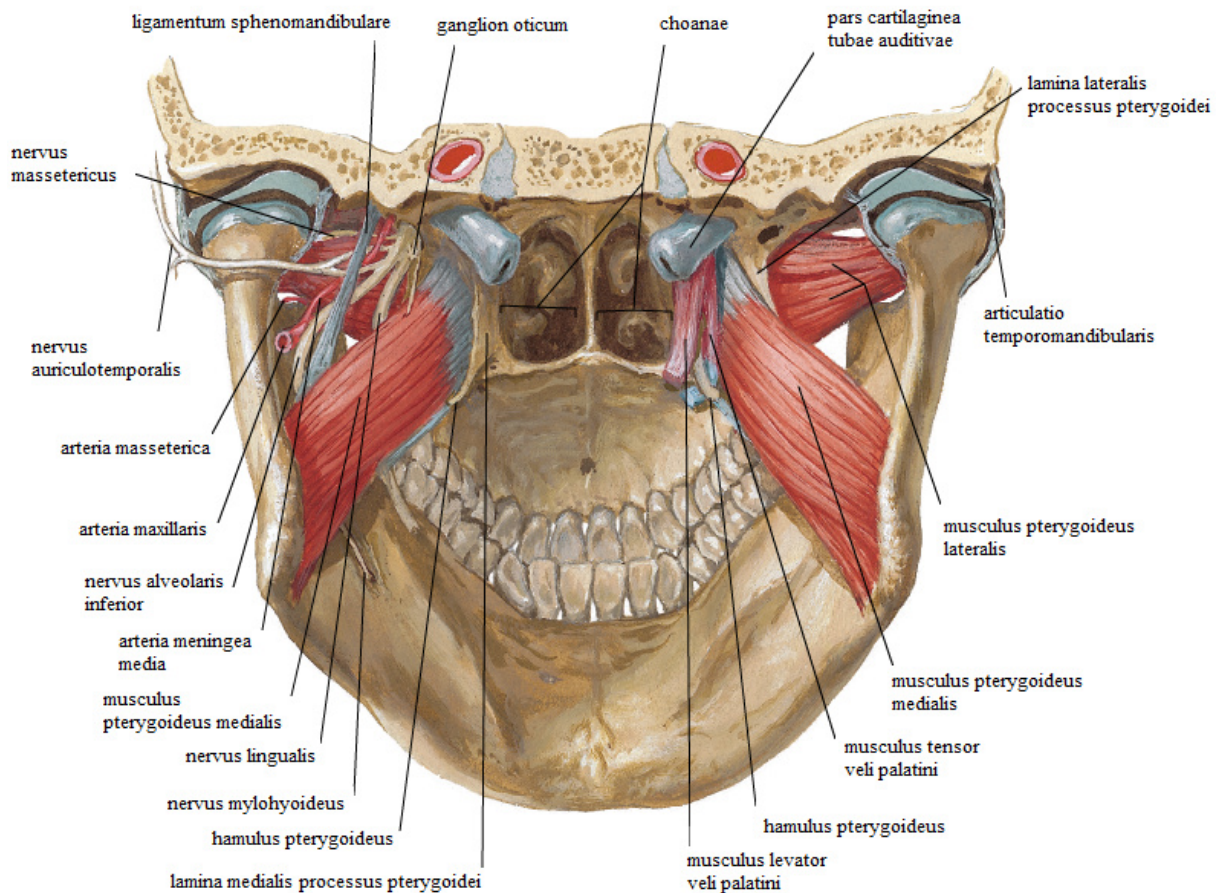
Sval při oboustranné akci elevuje mandibulu jako synergista povrchové složky m. masseter (s níž má stejný směr snopů). Protože začátek svalu je blíže ke střední čáře než úpon, táhne sval jednostranné akci mandibulu na opačnou stranu a má tedy hlavní roli při třecích žvýkacích pohybech.

Zevní sval křídlový (musculus pterygoideus lateralis) je menší než předchozí sval, uložen kraniálně od něho ve fossa infratemporalis. Jde od processus pterygoideus do fovea pterygoidea.

Sval zahajuje otevření úst tahem za dolní část hlavičky mandibuly a za discus articularis. Při oboustranné akci táhne čelist dopředu. Při jednostranné akci současně táhne čelist na protilehlou stranu a účastní se tak třecích pohybů žvýkacích.



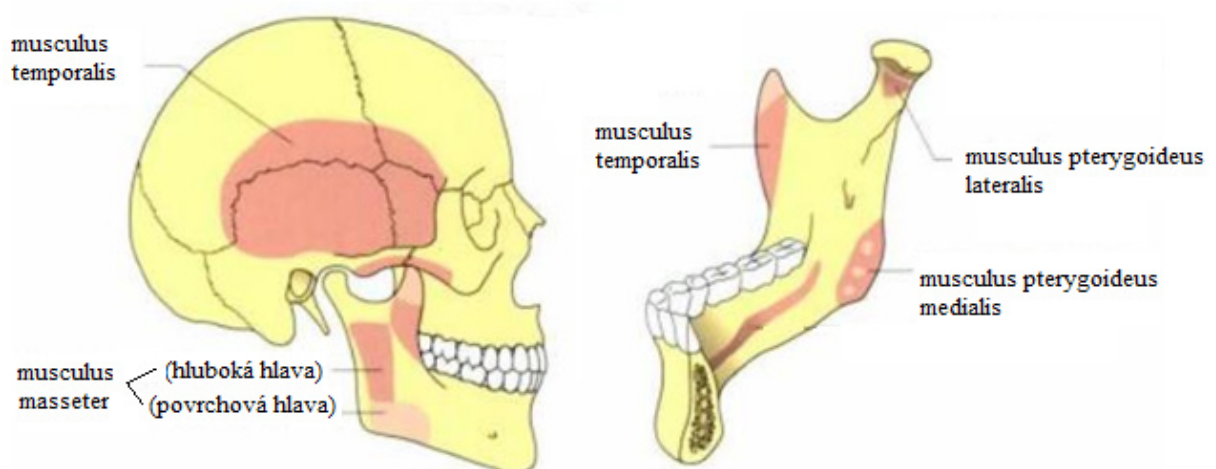
Obrázek 6.10 Žvýkací svaly – pohled na vnější stranu



Obrázek 6.11 Žvýkácí svaly – pohled na vnitřní stranu

6.3.5. Úpony žvýkácích svalů

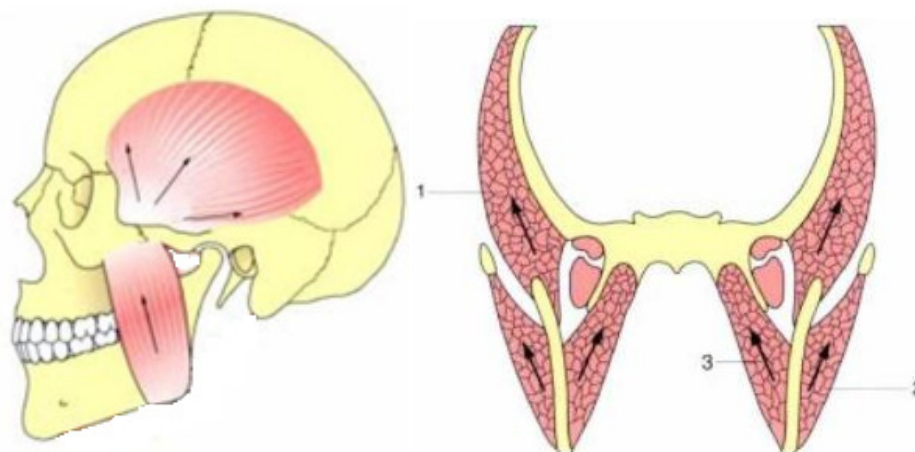
Na následujícím obrázku jsou schematicky zobrazeny počátky a konce svalů, které se účastní žvýkání.



Obrázek 6.12 a) pohled lebky z boku, b) Pohled na mediální rovinu dolní čelisti

6.3.6. Vektory žvýkacích svalů

Výsledná síla mezi dolní čelistí a lebkou je orientována směrem dopředu. Musculus masseter svírá úhel přibližně 70° vzhledem k transverzální rovině a musculus pterygoideus medialis 80° (Obrázek 6.13).



Obrázek 6.13 Vektory žvýkacích svalů a) v mediální rovině, b) ve frontální rovině (1 - m.masseter, 2 – m. pterygoideus, 3 – m. temporalis)

6.3.7. Pohyby dolní čelisti

Mezi základní pohyby dolní čelisti (Obrázek 6.14) patří:

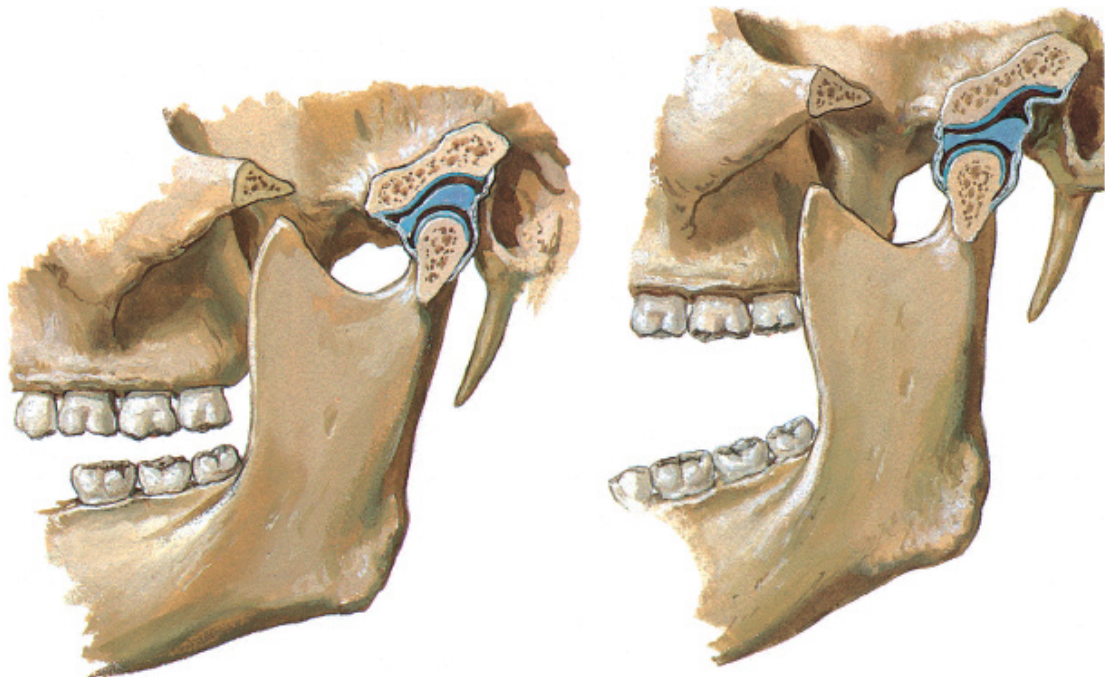
Abdukce a addukce (otevírání a zavírání) – jedná se o kombinované pohyby se složkou rotační a translační. Otevírání úst zahajuje rotace hlavičky kloubu zhruba do postavení, kdy jsou incizální hrany od sebe vzdáleny 10 mm. Při dalším otevírání přistupuje translační posun hlavičky kloubu po kloubní dráze. Otevírání působí abduktory (m. biventer, m. mylohyoideus) a zavírání silnější adduktory (m. masseter, m. temporalis, m. pterygoideus lateralis a m. pterygoideus medialis).

Při propulzi (dopředu) kloužou dolní zuby po zubech horních ze základní (habituální) polohy vpřed. V první fázi je nutné mírné pootevření, aby dolní řezáky překonaly překus horních řezáků (řezákové vedení). Dále dochází k celkovému poklesu mandibuly, který je způsoben vedením a sklonem kloubní dráhy. V distálním úseku tak vzniká klínovitá mezera mezi zubními oblouky (Christensenův fenomén). Celkový charakter tohoto pohybu ovlivňují tři

faktory: sklon kloubní dráhy, sklon řezákového vedení a sklon hrbolků molárů. Tento pohyb způsobuje m. pterygoideus lateralis při oboustranné symetrické kontrakci.

Při retropulzi (dozadu) se mandibula posouvá ze základní habituální okluze dorzálně, a to je možné pouze v nepatrném rozsahu cca 1 mm. Ze svalů ji způsobuje zejména m. biventer.

Lateropulze působí m. pterygoideus lateralis jednostranným, tedy nesymetrickým smrštěním. Při sinistropulzi je v akci pravostranný sval, který jednostranně stahuje kloubní hlavičku po kloubní dráze (kmitající kondyl), zatímco kloubní hlavička na druhé straně se posune nepatrně laterálně a ventrálně (klidový kondyl). Při dextropulzi se svaly a kloubní hlavičky vymění. Rozeznáváme zde tak stranu pracovní (zuby jsou v kontaktu a žvýkají) a stranu balanční (dotýkají se pouze některé hrbolky).



Obrázek 6.14 vlevo: mírně otevřené čelisti (převážně rotační pohyb), vpravo: široce otevřené čelisti (kombinace rotace a klouzavého pohybu)

7. TVORBA MODELU GEOMETRIE

Model dolní čelisti byl získán pomocí optického 3D skeneru ze snímacího zařízení ATOS (Obrázek 7.1) Martinem Kubíčkem v roce 2005. Dolní čelist (Obrázek 7.2) byla upevněna v kalibračním rámečku opatřený referenčními body.



Obrázek 7.1 Snímací zařízení ATOS

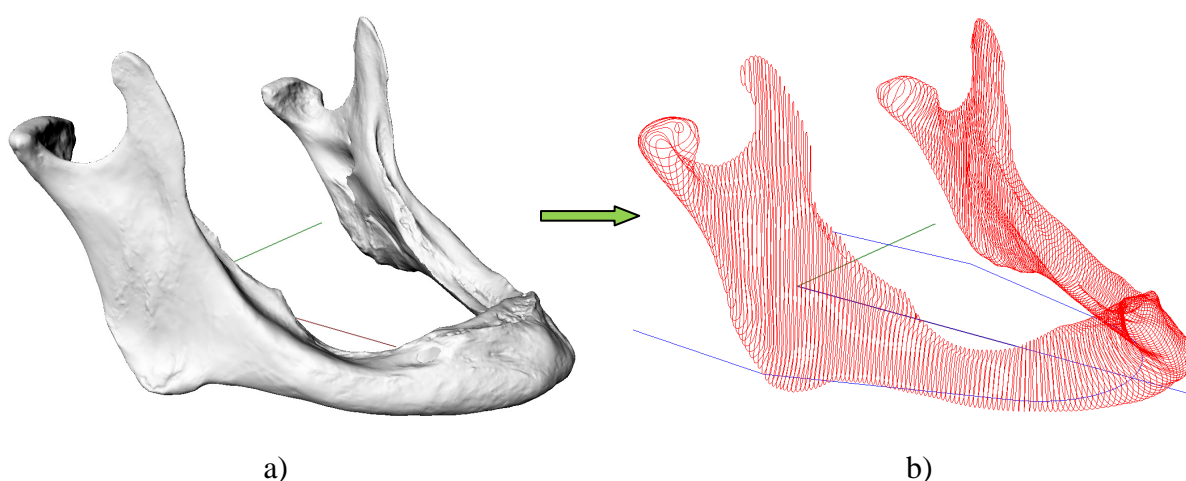
Kalibrační odchylka při snímání byla 0,015px a bylo nafoceno 154 snímků. Následně byla geometrie vyčištěna v programu Magic 9.03 a uložena do souboru STL (Standard Template Library, Obrázek 7.3 a).



Obrázek 7.2 Dolní čelist ze který vznikl model

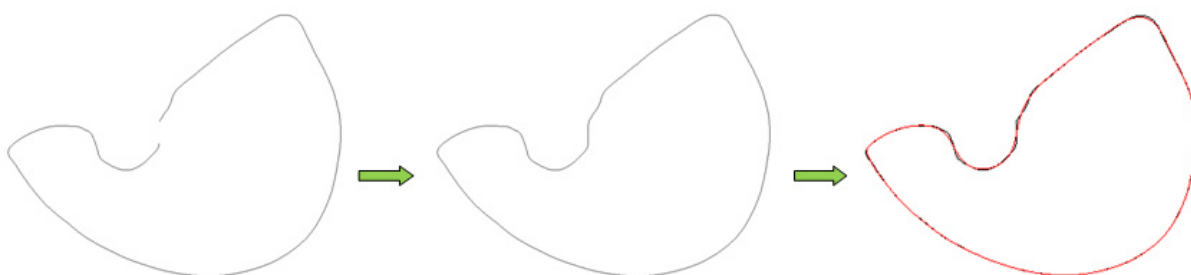
Pro další úpravu byl soubor STL načten do grafického programu Rhinoceros 4.0. Postup úpravy v tomto programu je popsán v následujících bodech:

- Pomocí příkazu MOVE (přesunutí) a ROTATE (pootočení) byl model umístěn do středu osy tak, aby mediální rovina dolní čelisti ležela v mediální rovině těla.
- V transverzální rovině byly vytvořeny křivky (Obrázek 7.3 a), rozděleny po 1 mm a následně příkazem SPLIT (rozdělit plochu izočárou) vytvořeny řezy (Obrázek 7.3 b – červené křivky).



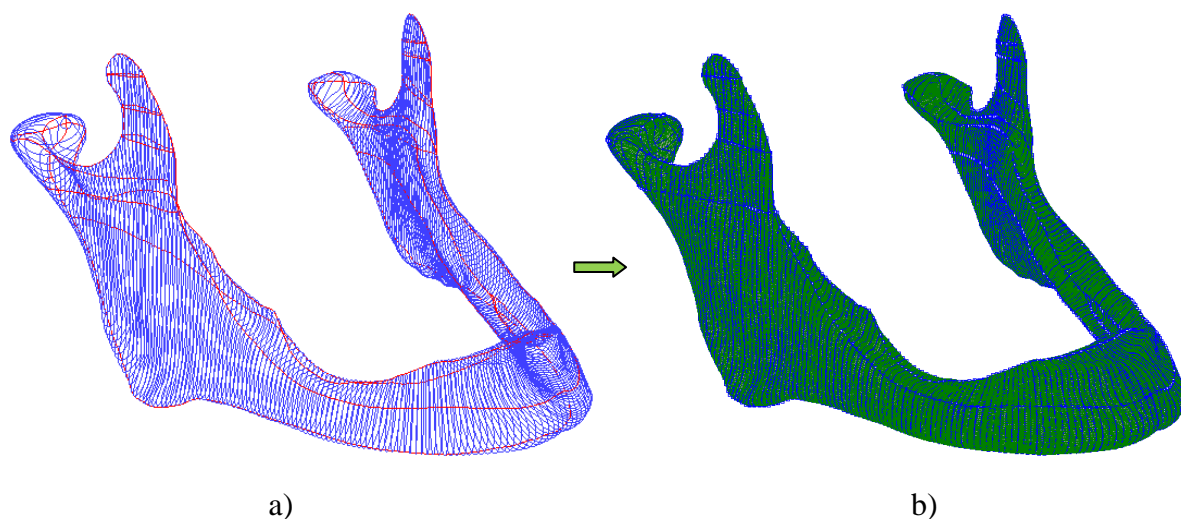
Obrázek 7.3 a) Model uložený ve formátu STL, b) Vytvořené řezy v Rhinoceros 4.0

- Křivky, které zůstaly otevřené, byly příkazem CLOSECRV (uzavřít křivku) uzavřeny a vyplněny otvory foramen mandibulae a foramen mentale narovněním křivek v těchto oblastech. Nakonec byly všechny křivky vyhlazeny příkazem FITCRV (proložit křivku v toleranci) v toleranci 1 mm (Obrázek 7.4).



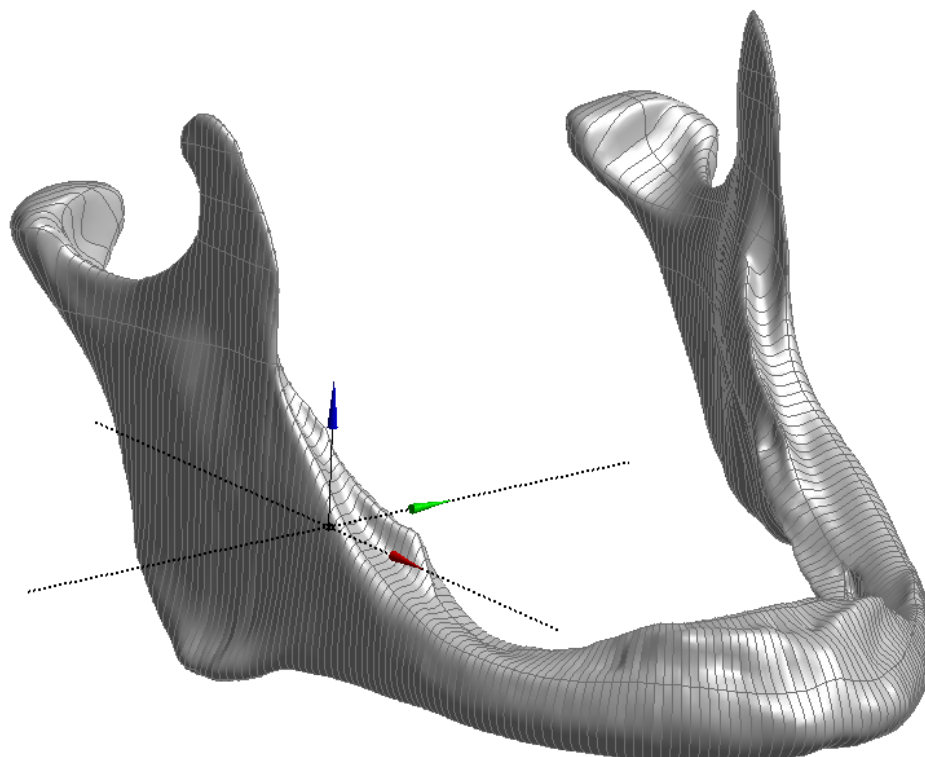
Obrázek 7.4 Postup úpravy řezu

- Upravené řezy byly spojeny hladkými křivkami - kubickými splajny (Obrázek 7.5 a – červené křivky) a následně rozděleny příkazem SPLIT (řezy). Bylo nutné vytvořit dostatečný počet křivek, aby došlo u vytvořených ploch k hladkému napojení. Při napojování kubických splajnů se muselo dávat pozor, aby se jednotlivé křivky nepřekrývaly a tím nevytvořily značně zdeformovanou plochu. Pak bylo zapotřebí ještě stejným příkazem rozdělit samotné řezy nově vytvořeným splajnem (tento krok byl zapotřebí provést kvůli vytvoření ploch, které je možné vytvořit pouze pomocí 2, 3 nebo 4 křivek). Závěrem byly na rozdělených křivkách vytvořeny plochy. Celkem vzniklo 1312 ploch, které se exportovaly do formátu IGES (Initial Graphics Exchange Specification, Obrázek 7.5 b).



Obrázek 7.5 a) Vytvoření kubického splajnu, b) Vytvoření ploch

Na závěr byl v programovém systému ANSYS Workbench 11 importován soubor IGES a z vložených ploch automaticky vytvořen objem (Obrázek 7.6).



Obrázek 7.6 Vytvořený objem v programovém systému ANSYS Workbench

8. MODEL MATERIÁLU

Dolní čelist se skládá ze dvou kostních tkání s odlišnými mechanickými vlastnostmi. Jak již bylo uvedeno, na povrchu kosti je kompakta a uvnitř spongióza. Tyto materiály vykazují nehomogenitu, anizotropii a určení těchto vlastností je velmi obtížné (zjištěné charakteristiky vykazují velký rozptyl). Vliv na tyto vlastnosti má jak věk, tak pohlaví a zdravotní stav jedince.

Vzhledem k úrovni řešeného problému model materiálu kosti je považován za homogenní, izotropní materiál vykazující lineárně pružné chování. Materiál kosti byl modelován homogenním, lineárním a izotropním modelem. Uvedený model má dvě materiálové charakteristiky, E – modul pružnosti a Poissonův poměr – μ . Jejich hodnoty jsou uvedeny níže a byly převzaty z literatury [7].

Model materiálu spongiózní kosti:

- Modul pružnosti v tahu $E = 1\,370\text{ MPa}$
- Poissonův poměr $\mu = 0,3$

Model materiálu kompaktní kosti:

- Modul pružnosti v tahu $E = 13\,700\text{ MPa}$
- Poissonův poměr $\mu = 0,3$
- Tloušťka bude definována na základě citlivostní analýzy, viz kapitola 11.1

9. KONEČNOPRVKOVÝ MODEL

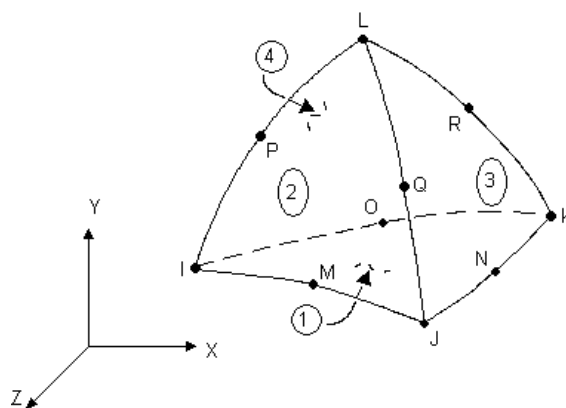
Řešení problému metodou konečných prvků (v angličtině z Finite Element Method) spočívá v diskretizaci oblasti na konečný počet rovinných nebo prostorových prvků (elementů), které jsou navzájem spojeny uzlovými body. Metoda konečných prvků patří mezi variační metody, které vycházejí z minimalizace energetického potenciálu.

9.1. Typy použitých prvků

ANSYS Workbench při generování sítě automaticky zvolí nejvhodnější prvek. Pro objem, který představuje spongiózní tkáň vybral objemový prvek SOLID 187. Vzhledem k tomu, že dolní čelist se skládá ze dvou různých druhů kostní tkáně a při importu geometrie z IGES byl v ANSYSu vytvořen pouze objem, pro který vybral pouze jeden prvek a tak bylo nutné pro kompaktní tkáň vybrat prvek ručně. Pro tuto tkáň jsem zvolil typ prvku skořepinový SHELL, u kterého je možné předepsat tloušťku skořepiny, který bude představovat tloušťku kompaktní kosti. ANSYS Workbench disponuje řadou těchto prvků, mezi kterými jsem vybral prvek SHELL 181.

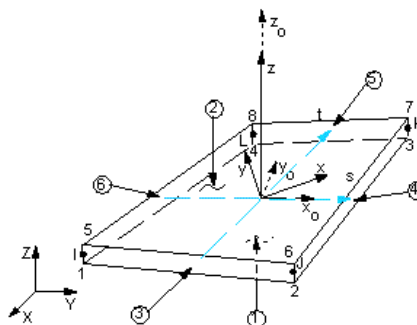
Vlastnosti použitých prvků jsou popsány níže.

- **SOLID 63** (Obrázek 9.1) – základním tvarem je čtyřstěn s kvadratickými bázovými funkcemi. Je definován deseti uzly, z nichž každý má tři stupně volnosti – posuvy ve směru x, y a z. Vytvoření sítě pomocí těchto elementů je poměrně jednoduché a rychlé. Prvek je vhodný pro tvorbu sítě na nepravidelných, tvarově složitých modelech a pro výpočet plasticity, hyperplasticity, creepu, atd...



Obrázek 9.1 Geometrie prvku SOLID 187

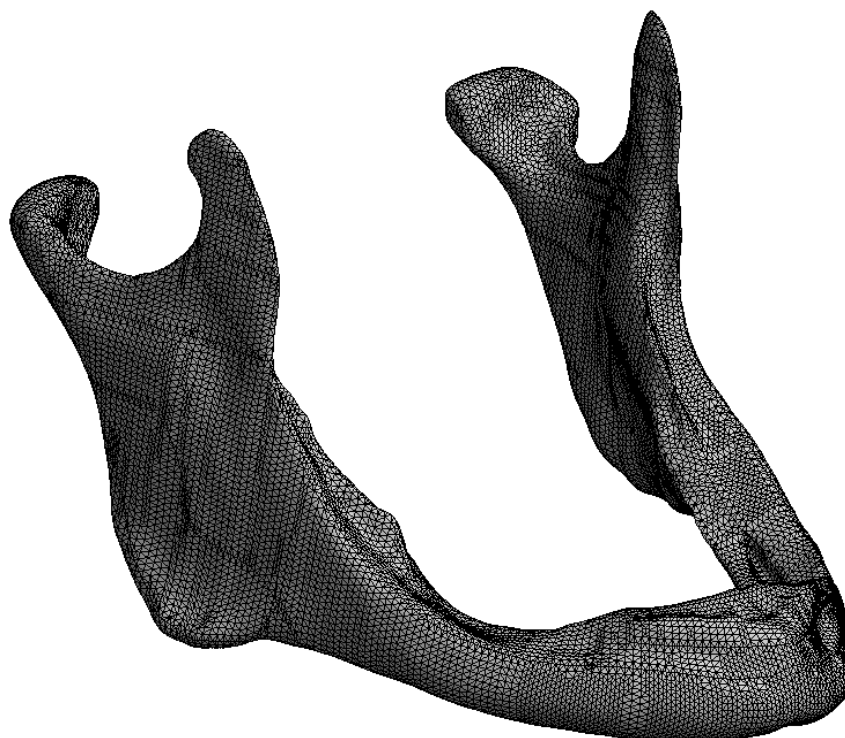
- **SHELL 181** (Obrázek 9.2) – je definován čtyřmi uzly, z nichž každý má šest stupňů volnosti – posuvy ve směru x , y , z a rotace kolem os x , y a z . Prvek se používá pro popis ohybového i membránového chování skořepin a pomocí reálných konstant je možné nastavit tloušťku. Je vhodný pro výpočet plasticity, velkých deformací, atd...



Obrázek 9.2 Geometrie prvku SHELL 181

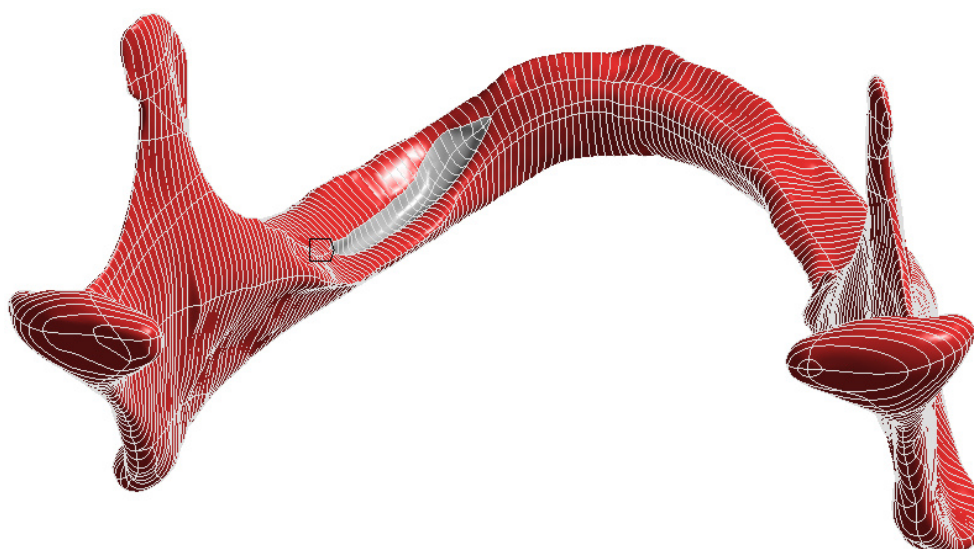
9.2. Tvorba konečnoprvkové sítě

Po načtení geometrie v ANSYS Workbench byla spuštěna Simulace ve které byla v nabídce Mesh přes nástroj Sizing nastavena velikost prvku na všechny křivky a plochy 1 mm. Následně byla na geometrii vytvořena síť (Obrázek 9.3), během níž se vytvořilo 149769 prvků (elementů) a 243997 uzlů (nodů).



Obrázek 9.3 Výpočtová síť geometrie dolní čelisti

Dále bylo nutné vložit na plochy vytvořené sítě skořepinový prvek typu SHELL. K tomu bylo zapotřebí označit a uložit vybrané plochy, na kterých bude vložen tento prvek, do „Named Selections“ (Obrázek 9.4). Byly vybrány všechny plochy kromě těch, na kterých už není kompaktní tkáň.



Obrázek 9.4 Vybrané plochy pro aplikaci skořepinového prvku SHELL 181

Do výpočetní úlohy bylo vloženo makro, které obsahuje příkazy, jež aplikuje na uložené plochy skořepinový prvek SHELL. Obsah makra je uveden níže.

```

/prep7                ! Přepnutí do preprocesoru

ET,1000,181          ! Definování prvku SHELL 181
r,1000,1.5           ! Definování reálné konstanty
                    ! (tloušťka kortiky 1,5mm)
mp,ex,1000,13700     ! Definování modulu pružnosti
                    ! v tahu 13700 MPa
mp,prxy,1000,0.3     ! Definování Poissonova čísla

mat,1000
real,1000
type,1000

cmsel,,Kortika       ! Vybrání objektů z Named
                    ! Selections
esurf,all            ! Vložení prvků na vybraných
                    ! objektech
allsel,all           ! Vybrání všech objektů

/solu                ! Přepnutí zpět do řešiče

```

Po spuštění řešení se na vybrané plochy vloží další typ prvku SHELL. Celkový počet prvků a uzlů jednotlivých typu prvků je uveden tabulce Tabulka 9.1.

Typ prvku	Počet vytvořených prvků	Počet vytvořených uzlů
SOLID 187	149769	243997
SHELL181	40664	66247
Celkem	190433	310244

Tabulka 9.1 Počet vytvořených prvků a uzlů

10. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Pohyb dolní čelisti je zajištěn kombinací svalů (kapitola 6.3.4) a čelistního kloubu (kapitola 6.3.3). Jak je uvedeno v kapitole 6.3.7, dolní čelist vykonává základní 3 pohyby. Otvírání a zavírání úst, pohyb dopředu a dozadu, pohyb vymezení doleva a doprava. Při každém z těchto pohybů se účastní jen některé svaly.

V mém případě bude uvažován pouze pohyb zavírání úst. Při předepisování okrajových podmínek budou tedy vybrány ty svaly, které se přímo tohoto pohybu účastní, dále čelistní kloub a přepokládané umístění zubů. Naopak nebudou uvažovány ty svaly, které slouží k vymezení pohybu dolní čelisti, mimické svaly a okolní tkáň.

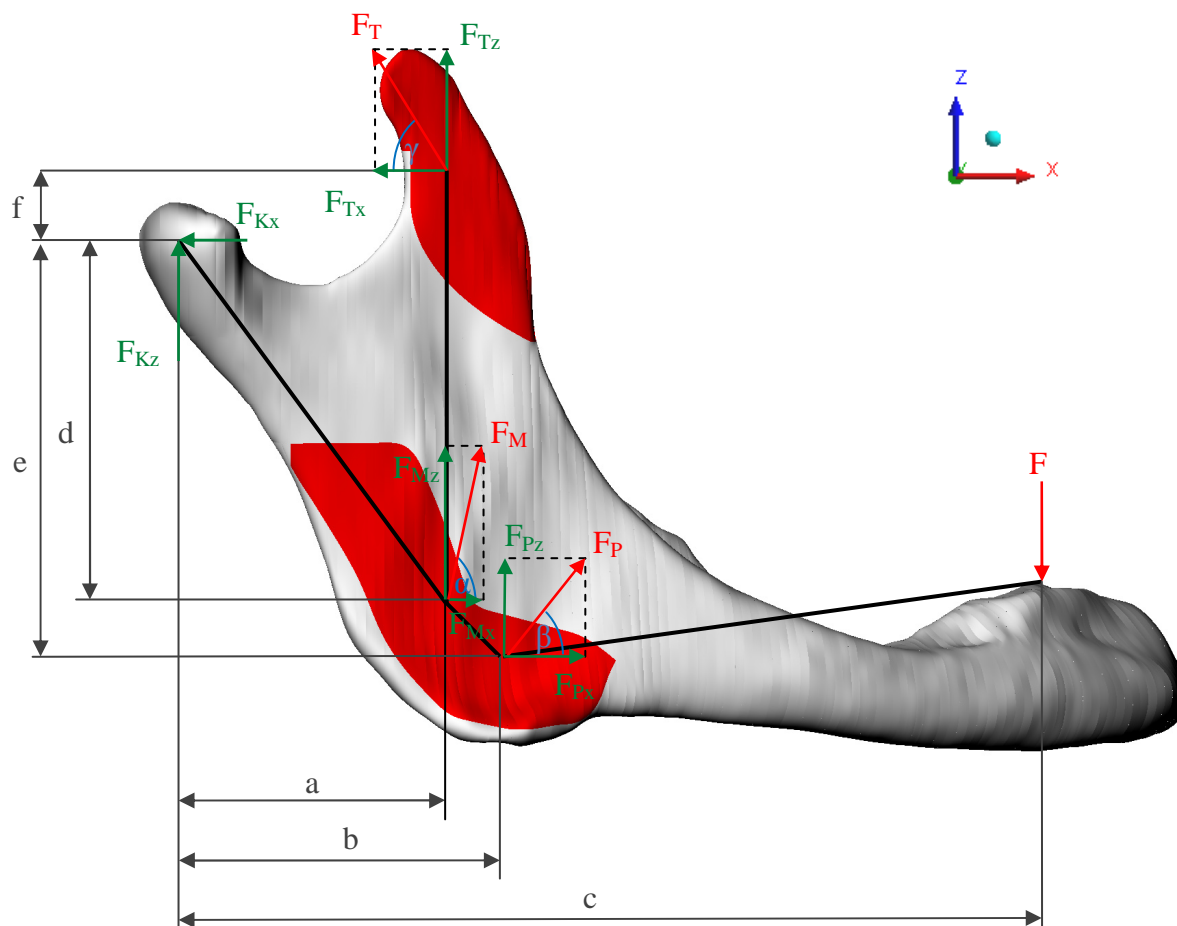
10.1. Model vazeb a zatížení

Při skusu dolní čelisti jsou zapojeny svaly *musculus masseter*, *m. temporalis*, *m. pterygoideus lateralis* a *m. pterygoideus medialis*. Sval *m. pterygoideus lateralis* působí zejména při dopředním pohybu a proto nebude při výpočtu zatížení uvažován.

Pro výpočet zatížení uvažovaných svalů je nutné vycházet ze silové a momentové rovnováhy (Obrázek 10.1 a Obrázek 10.2). Na základě obrázku 6.9 byl odhadnut střed otáčení čelistního kloubu v mediální rovině (rovina z-x), do kterého byla umístěna rotační vazba. Ve frontální rovině byla vazba vložena přibližně doprostřed kloubu. V místě zubu byla vložena síla působící v ose Z. Místa úponů svalů byly převzaty z obrázku 6.12.

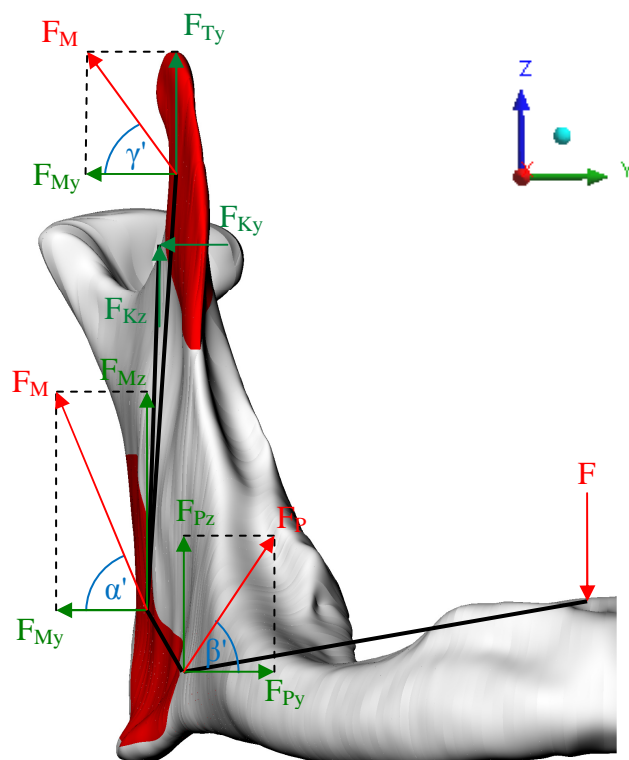
Pro jednoduchost řešení bude čelist považována za symetrickou vzhledem k mediální rovině.

10.1.1. Uvolnění dolní čelisti



Obrázek 10.1 Schéma uvolnění dolní čelisti v rovině z - x

- F_M, α – Výslednice silového působení a úhel svalu musculus masseter
- F_P, β – Výslednice silového působení a úhel svalu musculus pterygoideus
- F_T, γ – Výslednice silového působení a úhel svalu musculus temporalis
- F – Síla působící při skusu
- F_{Kx}, F_{Ky} – Vazebné síly v čelistním kloubu



Obrázek 10.2 Schéma uvolnění dolní čelisti v rovině z – y

10.1.2. Vstupní hodnoty pro výpočet sil

Velikost silového působení mezi protilehlými zuby je při kousání a žvýkání asi poloviční oproti síle vztážené k prvnímu prahu bolestivosti. Hodnoty uvedené v tabulce 10.1 jsem získal z literatury [5].

Číslo zubu	Název zubu	Síla mezi zuby [N]
1	Střední řezák	55
2	Postranní řezák	85
3	Špičák	115
4	První premolár	145
5	Druhý premolár	165
6	První molár	175
7	Druhý molár	190

Tabulka 10.1 Velikost sil mezi zuby při skusu

Vzdálenost působících sil v místě každého svalů vzhledem k rotační vazbě čelistního kloubu byla získána z geometrie v ANSYSu Workbench tak, že do ploch úponu každého svalu byl vložen nový souřadný systém a následně odečtena jeho poloha v osách X, Y a Z vzhledem k této rotační vazbě.

Přibližná poloha jednotlivých zubů v ose X byla získána z obrázku 6.4. Úhly svalu m. masseter a m. pterygoideus medialis pod kterými působí jednotlivé výslednice sil, byly získány z literatury [7]. Úhel svalu m. temporalis byl odměřením z obrázku 6.13.

Všechny odměřené a získané hodnoty potřebné pro výpočet silového působení svalů při skusu jsou uvedeny v tabulce níže.

Parametr	Číslo zubu					
	1	2	3	4	5	6
a [mm]	30					
b [mm]	33					
c [mm]	93	91	88	84	80	75
d [mm]	38					
e [mm]	45					
f [mm]	8					
α [°]	83					
β [°]	75					
γ [°]	55					
α' [°]	3					
β' [°]	21					
γ' [°]	22					

Tabulka 10.2 Rozměry dolní čelisti v rovinách z-x a z-y

10.1.3. Výpočet silového působení svalů při skusu:

Momentová rovnováha v rovině z-x k bodu K

$$\sum M_K = 0: F \cdot c - F_{Mz} \cdot a - F_{Mx} \cdot d - F_{Pz} \cdot b - F_{Px} \cdot e - F_{Tz} \cdot a - F_{Tx} \cdot f = 0$$

Po úpravě:

$$F_M[(\sin \alpha)a + (\cos \alpha)d] + F_P[(\sin \beta)b + (\cos \beta)e] + F_T[(\sin \gamma)a + (\cos \gamma)f] \\ = F \cdot c$$

Aby bylo možné vyřešit tuto rovnici o 3 neznámých, je nutné přidat 2 podmínky rovnováhy.

Podmínka rovnováhy v ose X

$$\sum F_X = 0: F_{Mx} + F_{Px} - F_{Tx} = 0$$

Po úpravě:

$$F_M(\cos \alpha) + F_P(\cos \beta) - F_T(\cos \gamma) = 0$$

Podmínka rovnováhy v ose Y

$$\sum F_Y = 0: -F_{My} + F_{Py} - F_{Ty} = 0$$

Po úpravě:

$$-F_M(\sin \alpha') + F_P(\sin \beta') - F_T(\sin \gamma') = 0$$

Řešení:

$$\begin{pmatrix} (\sin \alpha)a + (\cos \alpha)d & (\sin \beta)b + (\cos \beta)e & (\sin \gamma)a + (\cos \gamma)f \\ \cos \alpha & \cos \beta & -\cos \gamma \\ -\sin \alpha' & \sin \beta' & -\sin \gamma' \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} F_M \\ F_P \\ F_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \cdot c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \rightarrow F_M, F_P, F_T$$

Výpočet souřadnic výsledných sil:

$$F_{Mx} = F_M \cos \alpha$$

$$F_{Px} = F_P \cos \beta$$

$$F_{Tx} = F_T \cos \gamma$$

$$F_{My} = F_M \sin \alpha$$

$$F_{Py} = F_P \sin \beta$$

$$F_{Ty} = F_T \sin \gamma$$

$$F_{Mz} = F_M \sin \alpha'$$

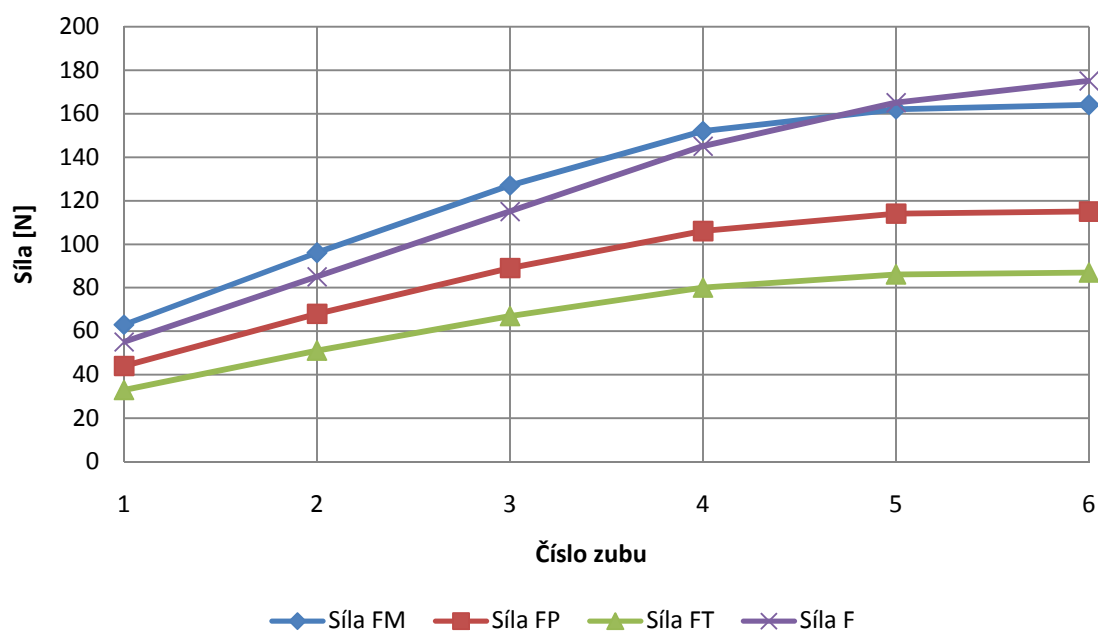
$$F_{Pz} = F_P \sin \beta'$$

$$F_{Tz} = F_T \sin \gamma'$$

Výsledné hodnoty sil a jejich souřadnic svalů při skusu jsou uvedeny v tabulce 10.3 a graficky jejich velikosti znázorněny v grafu 10.1

Síla	Číslo zubu					
	1	2	3	4	5	6
F_M [N]	63	96	127	152	162	164
F _{Mx} [N]	7,8	11,8	15,4	18,6	19,8	20
F _{My} [N]	3,4	5	6,6	8	8,4	8,6
F _{Mz} [N]	62,6	95,2	126	150,8	160,8	162,6
F_P [N]	44	68	89	106	114	115
F _{Px} [N]	11,4	17,6	23	27,4	29,6	29,8
F _{Py} [N]	15,8	24,4	32	38	40,8	41,2
F _{Pz} [N]	42,4	65,6	86	102,4	110,2	111
F_T [N]	33	51	67	80	86	87
F _{Tx} [N]	19	29,2	38,4	45,8	49,4	50
F _{Ty} [N]	12,4	19,2	25,2	30	32,2	32,6
F _{Tz} [N]	27	41,8	54,8	65,6	70,4	71,2

Tabulka 10.3 Výsledné síly svalů a jejich souřadnice



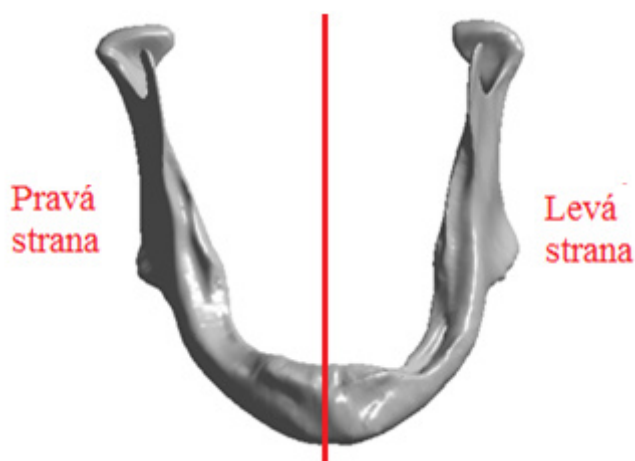
Graf 10.1 Výsledné síly

10.2. Aplikace okrajových podmínek

Pacienti, kteří přišli o chrup na dolní čelisti, jsou schopni kousat i žvýkat. Vzhledem k této skutečnosti, uvažují dvě varianty aplikace okrajových podmínek, jež první bude představovat skus do tvrdé potravy a druhá skus do měkké potravy.

V první variantě (Varianta A, tvrdá potrava) předpokládané původní místo zuby bude nahrazeno bodem, do kterého se předepíše deformační okrajová podmínka, jež zabrání posuvu v ose Z. Ve druhé variantě (Varianta B, tvrdá potrava) bude původní místo zuby nahrazeno plochou, do kterého se taktéž předepíše deformační okrajová podmínka se zabráněním posuvu v ose Z.

Kvůli nesymetrické čelisti bude u obou variant výpočet a analýza provedena zvlášť na levé a pravé straně (Obrázek 10.3). Typ a poloha, do které bude vložena okrajová podmínka nahrazující zub, je uvedena v tabulce níže.



Obrázek 10.3 Označení stran na dolní čelisti

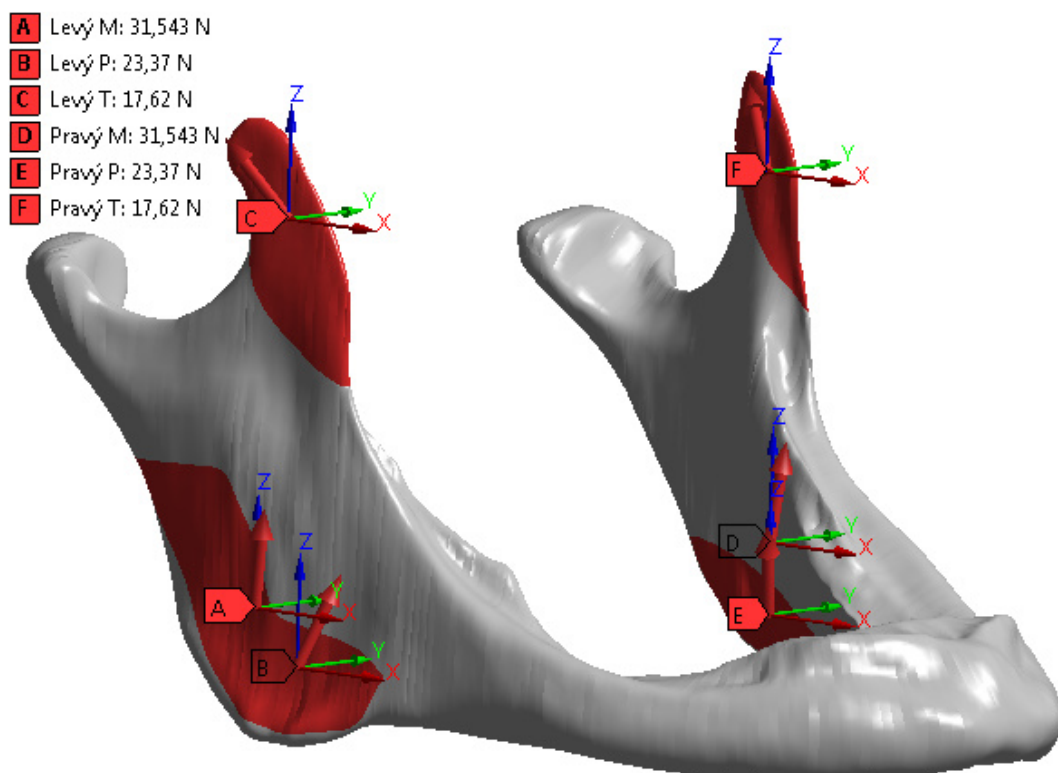
Číslo zubu / označení podvarianty	Varianta A		Varianta B	
	Pravá strana	Levá strana	Pravá strana	Levá strana
1	X	X	X	X
2	X	X	X	X
3	X	X	X	X
4	-	-	X	X
5	-	-	X	X
6	-	-	X	X

Tabulka 11.2 Varianty řešení

Např. do výpočtové varianty „Varianta A – Pravá 1“ budou do míst úponů svalů vloženy síly vypočtené pro zub č. 1 z tabulky 10.3 a okrajová podmínka, která zabrání posuvu v ose Z bude vložena do bodu původního místa zubu.

10.2.1. Silové okrajové podmínky

Do míst úponu jednotlivých svalů se postupně vložili souřadnice vypočtených sil, které na ně působí při skusu. Na pravou i levou stranu se aplikovaly stejně velké síly, jen v ose Z na levé straně čelisti inverzní (Obrázek 10.4).



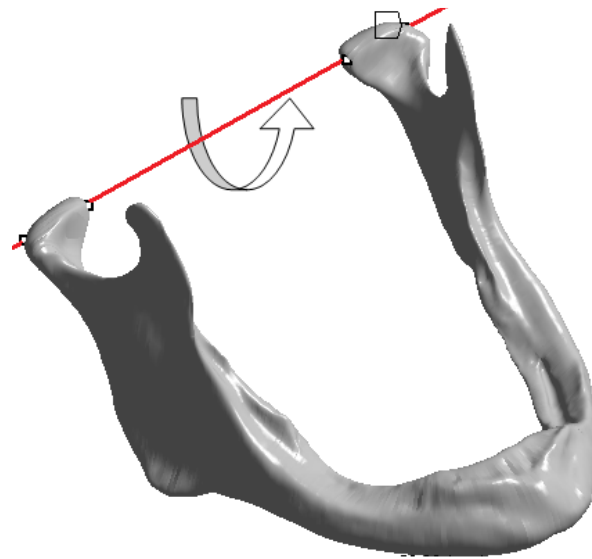
Obrázek 10.4 Vložené silové okrajové podmínky na dolní čelisti

10.2.2. Deformační okrajové podmínky

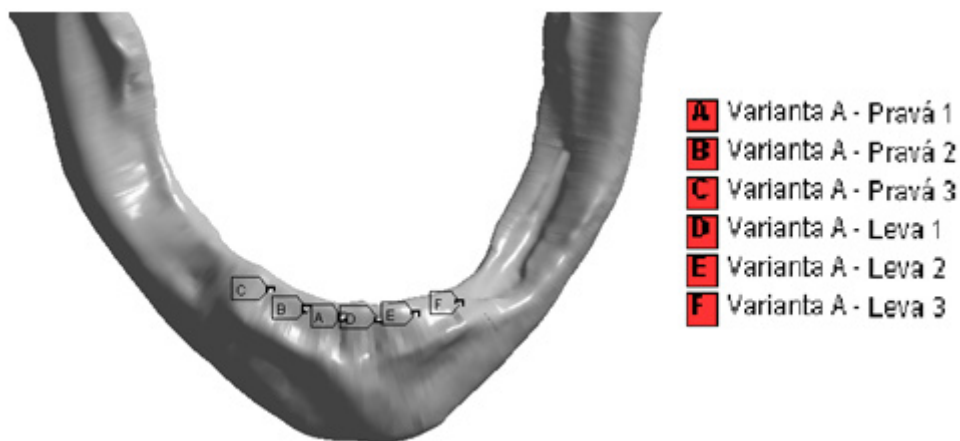
Aby model čelisti vykonával rotační pohyb kolem kloubu jako skutečná čelist, byl model v oblasti kloubu protnut v Rhinoceru lajnou a tím vznikly 4 body. Do těchto byly pak vloženy deformační okrajové podmínky se zabráněním pohybu ve všech směrech, jež umožní modelu rotaci kolem osy Y (Obrázek 10.5).

U varianty A byla do jednoho z bodů uvedených na obrázku 10.6 na základě dané podvarianty vložena okrajová podmínka, která zabráni pohybu v ose Z.

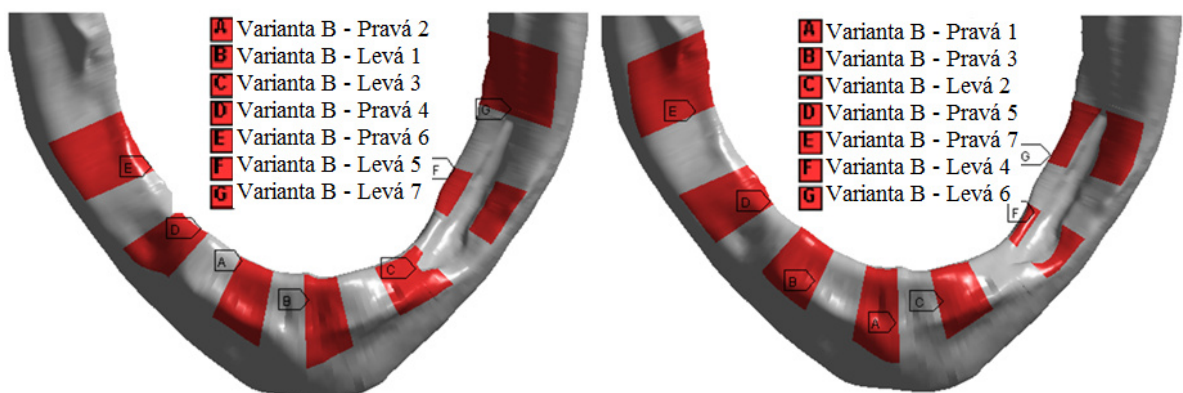
V případě varianty B je stejná okrajová podmínka vložena na plochu taktéž na základě dané podvarianty. Plochy se všemi podvariantami jsou zobrazeny na obrázcích 10.7.



Obrázek 10.5 Deformační okrajové podmínky nahrazující kloub

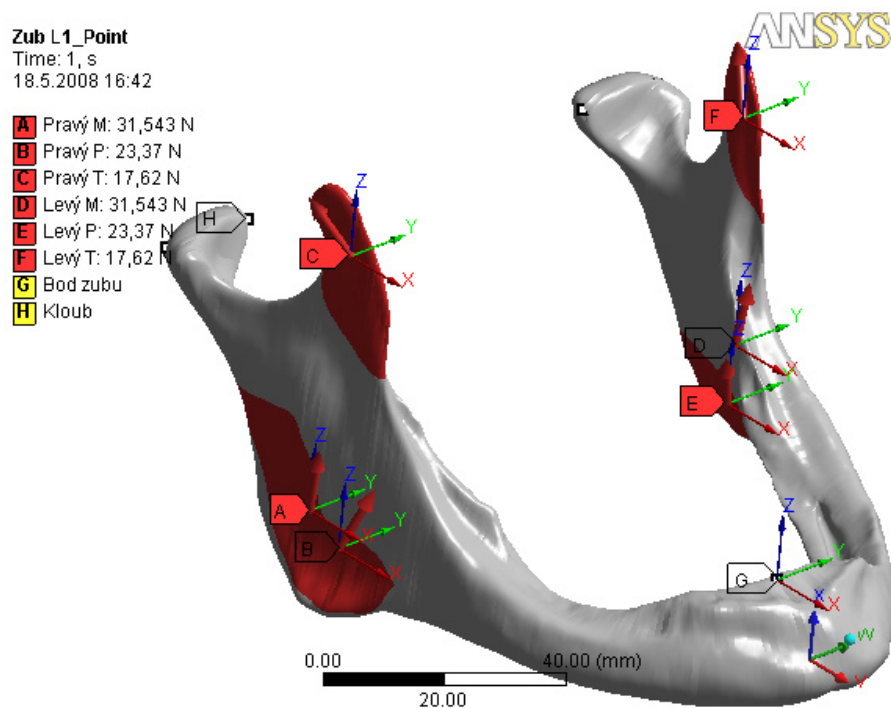


Obrázek 10.6 Body pro výpočtovou variantu A

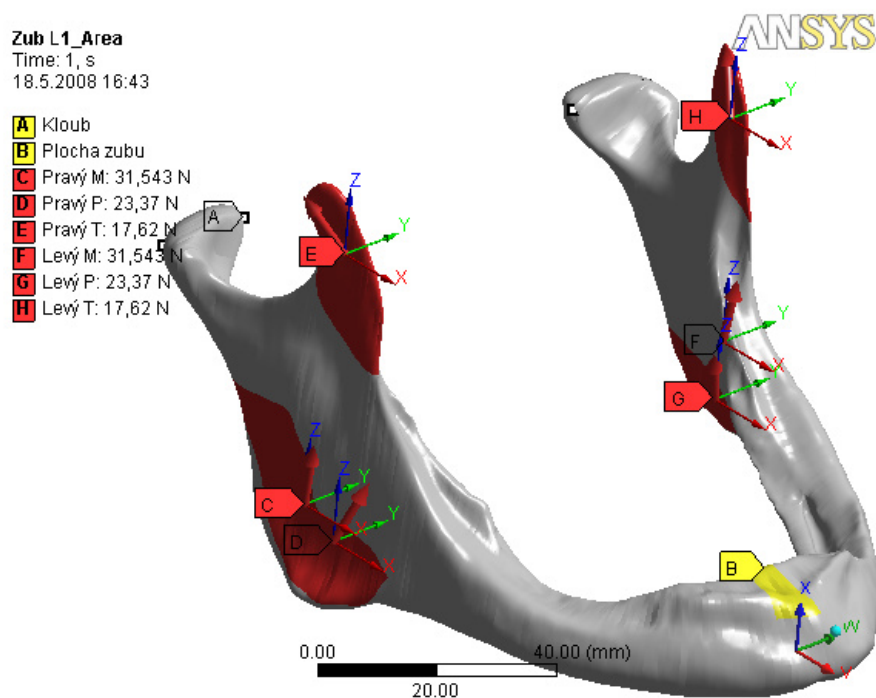


Obrázek 10.7 Plochy pro výpočtovou variantu B

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny veškeré okrajové podmínky použité při výpočtu Varianty A a B



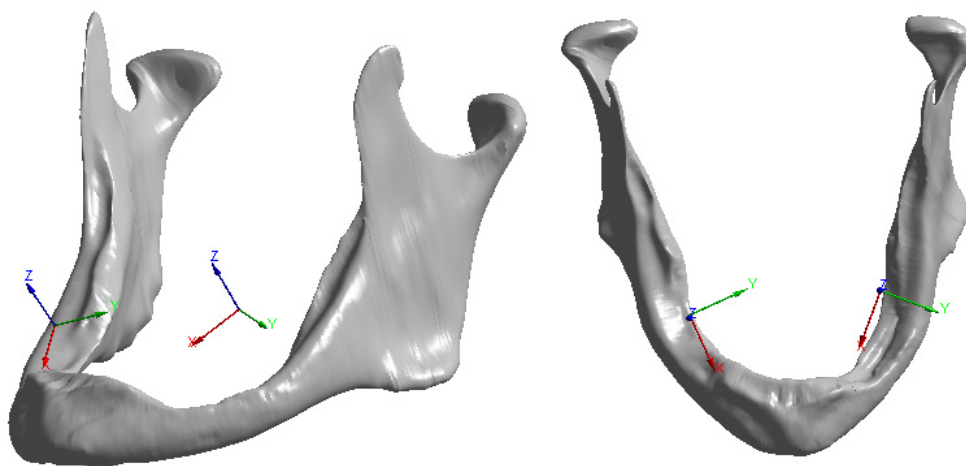
Obrázek 10.8 Varianta A – Pravá 1: Dolní čelist se zobrazenými silovými a deformačními okrajovými podmínkami



Obrázek 10.9 Varianta B – Pravá 1: Dolní čelist se zobrazenými silovými a deformačními okrajovými podmínkami

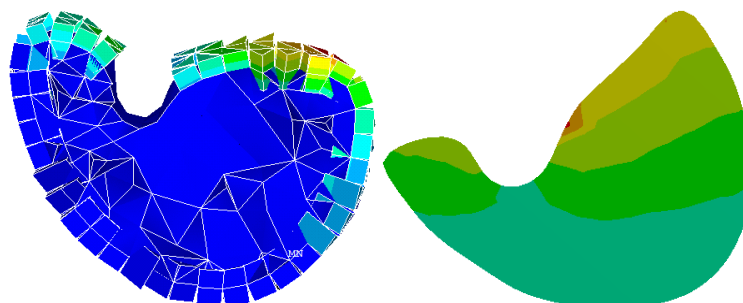
11. PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Při prezentaci a následné analýze byla pro každou z variant vyhodnocována velikost deformace v ose Z a hlavních napětí σ_1 , σ_3 . Dále pro vyhodnocení napětí (přetvoření) ve směru podélném k tělu dolní čelisti byl vytvořen nový souřadný systém, jehož osa X leží ve směru těla dolní čelisti. Souřadný systém byl vytvořen pro pravé i levé straně dolní čelisti (viz Obrázek 11.1).



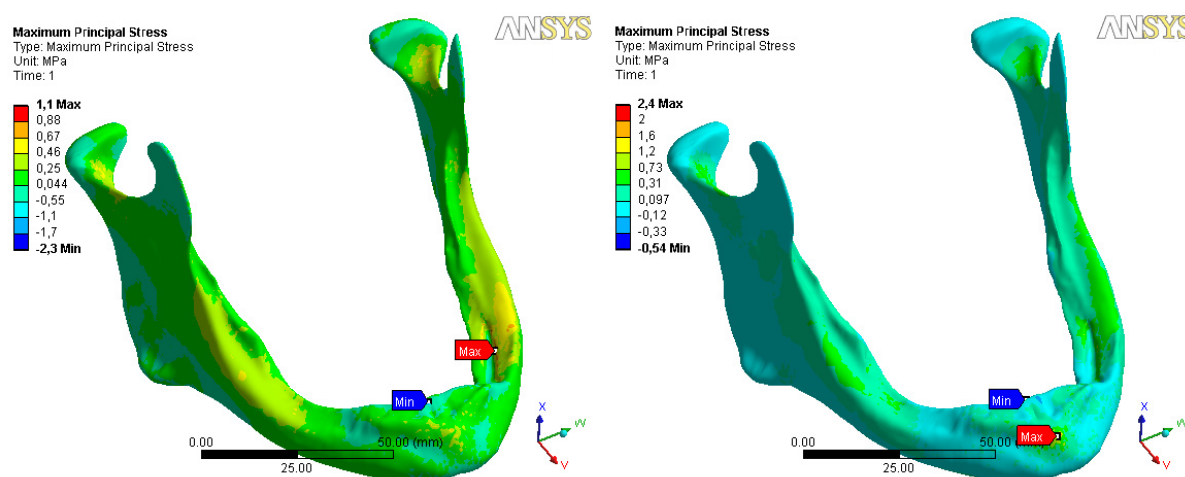
Obrázek 11.1 Vytvořený souřadný systém pro určení napětí ve směru podélném na těla dolní čelisti

Vyhodnocení všech výsledků kromě řezů bylo provedeno v programovém systému ANSYS Workbench 11. Řezy musely být vyhodnoceny v klasickém ANSYS 11 kvůli vloženému skořepinovému prvku aplikovaného na plochy, které ANSYS Workbench nezobrazuje korektně a v řezech nebyl vidět přechod, jež vzniká kvůli rozdílným materiálovým hodnotám mezi kompaktní a spongiózní tkání. Rozdílné zobrazení je zobrazeno na obrázku 11.2.



Obrázek 11.2 Rozdíly v zobrazení řezu v klasickém systému ANSYS (vlevo) a ANSYS Workbench (vpravo)

U všech řešených variant a jejich podvariant vzniká největší koncentrace hlavního napětí σ_1 , σ_3 a napětí ve směru o osy X v místě vazby, jež zabraňuje pohybu v ose Z, vazby nahrazující kloub a na rozhraní, kde končí kompaktní tkáň. Tato místa vytváří koncentrátor napětí, který neodpovídá fyziologickému stavu dolní čelisti. Proto nebudou výsledky v těchto místech uvažovány. Zkreslené hodnoty, které tyto koncentrátory vytváří, jsou zobrazeny v případě varianty A i B na obrázku 11.3.



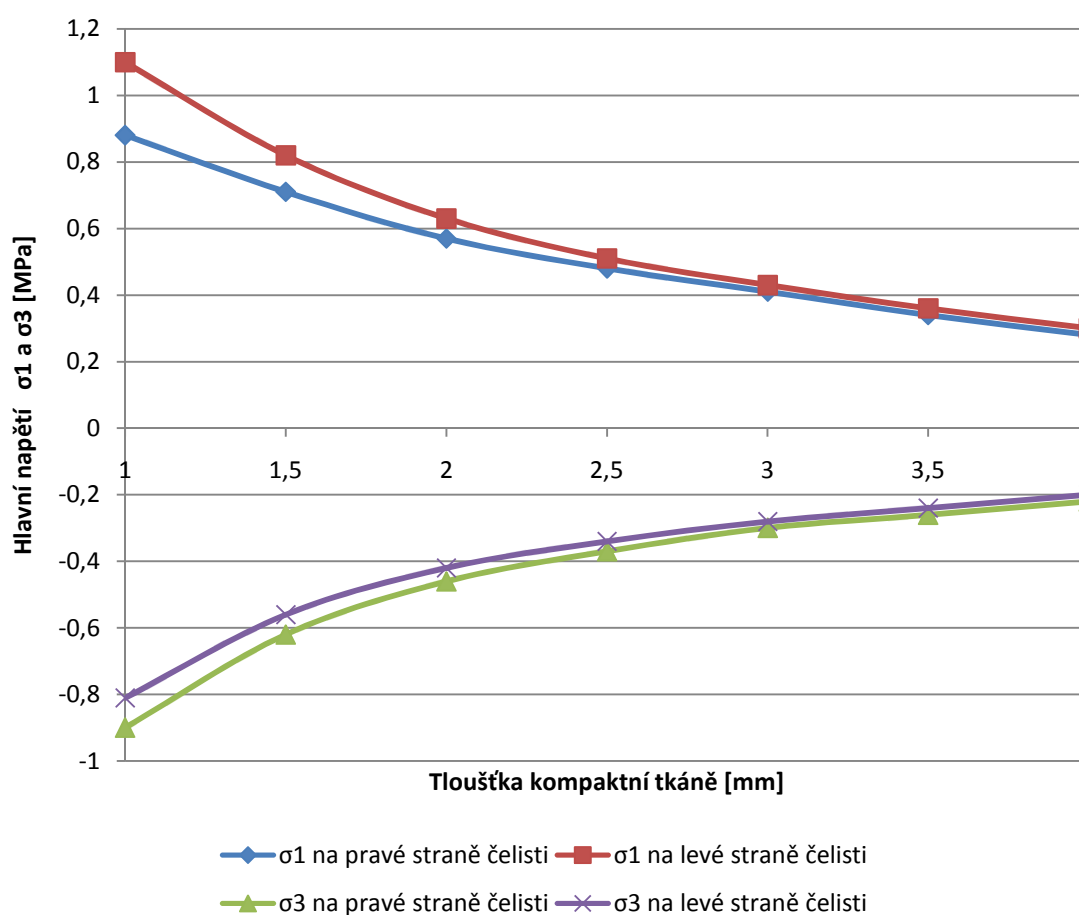
Obrázek 11.3 Zkreslené hodnoty u hlavního napětí σ_1 u Varianty A – Pravá 1 (vlevo) a Varianty B – Pravá 1 (vpravo)

Dále byla provedena citlivostní analýza pro Variantu A – Pravá 1, jež měla za úkol zjistit, jaký vliv má tloušťka kompaktní tkáňe na výsledné hodnoty napětí a deformace. Tloušťka byla měněna v rozmezí od 1mm do 4mm s přírůstkem po 0,5mm.

Celkem bylo provedeno 24 výpočtů (18 variant řešení), z toho 6 výpočtů pro Variantu A, 12 výpočtů pro Variantu B a 6 výpočtů zaměřených na citlivostní analýzu. Vzhledem k tomu, že řešená úloha byla poměrně jednoduchá (jedná se o lineární úlohu), tak celková doba všech výpočtů trvala cca 3 hodiny. Pro řešení byla použita školní výpočtová stanice s procesorem Intel Centrino Core 2 Duo 2GHz a operační pamětí 2GB RAM.

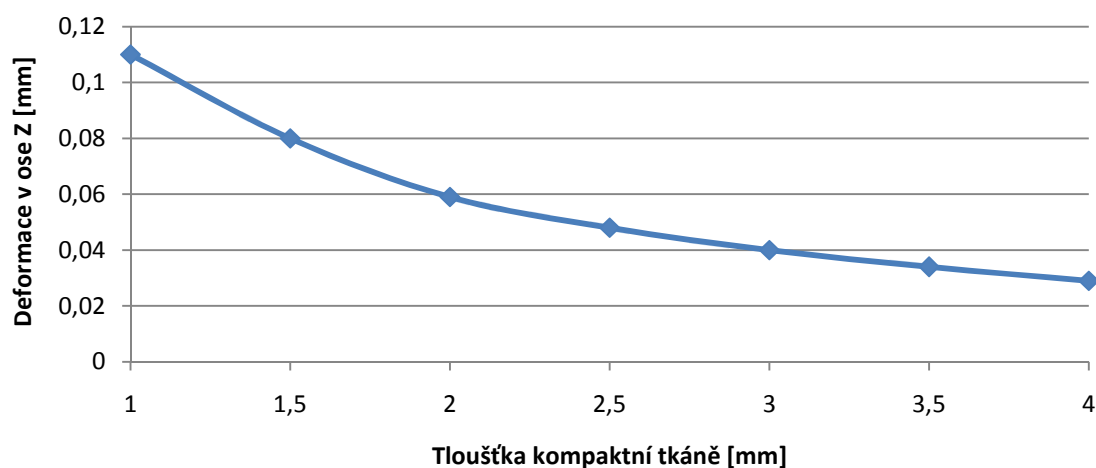
11.1. Citlivostní analýza

Citlivostní analýza pro hlavní napětí σ_1 a σ_3 ukazuje, že se zvyšující se tloušťkou kompaktní tkáně klesá hlavní napětí σ_1 a σ_3 (Graf 11.1). Místa, kde se tyto napětí projevují, jsou popsány v následující kapitole. Nejvýraznější pokles napětí je v rozmezí mezi 1 – 2 mm a nejnižší v rozmezí 3 – 4 mm, kdy se hodnoty liší přibližně jen o cca 0,05MPa.



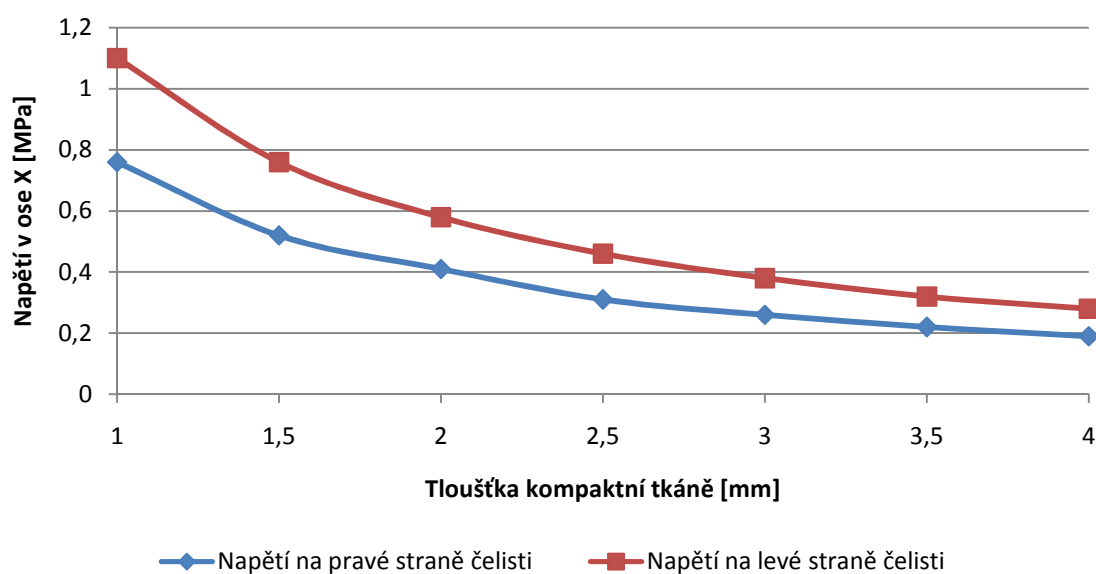
Graf 11.1 Citlivostní analýza hlavního napětí σ_1 a σ_3 u varianty A – Pravá 1

V případě deformace (Graf 11.2) v ose Z dochází ke stejnému stavu. Největší změna je v rozmezí 1 – 2 mm, kdy deformace klesla z 0,11mm na 0,06 mm. Vzhledem k malým deformacím jsou tyto změny velmi malé a téměř nulová změna deformace nastává už od 3 mm tloušťky kompaktní tkáně.



Graf 11.2 Citlivostní analýza deformaci v ose Z u varianty A – Pravá 1

Při porovnání citlivostní analýzy pro hlavní napětí σ_1 a σ_3 (Graf 11.1) a analýzy napětí v ose Z (Graf 11.3) jsou hodnoty na pravé straně dolní čelisti stejné. Rozdíly v napětí mezi levou a pravou stranou se zmenšují jen nepatrně, jak je vidět na grafu 11.4. Napětí při tloušťce kompaktní tkáně 4mm je na levé straně čelisti 0,19 MPa a na pravé straně 0,28 MPa.



Graf 11.3 Citlivostní analýza napětí v ose Z u varianty A – Pravá 1

Na základě předešlých grafů, kdy hodnoty největšího napětí a deformace jsou při tloušťce kompaktní tkáně 1 mm, jsem zvolil pro další řešení hodnotu tloušťky 1,5 mm a to z důvodu, že nebylo možno rozříznout vzorek dolní čelisti, pro zjištění této tloušťky.

11.2. Varianta A

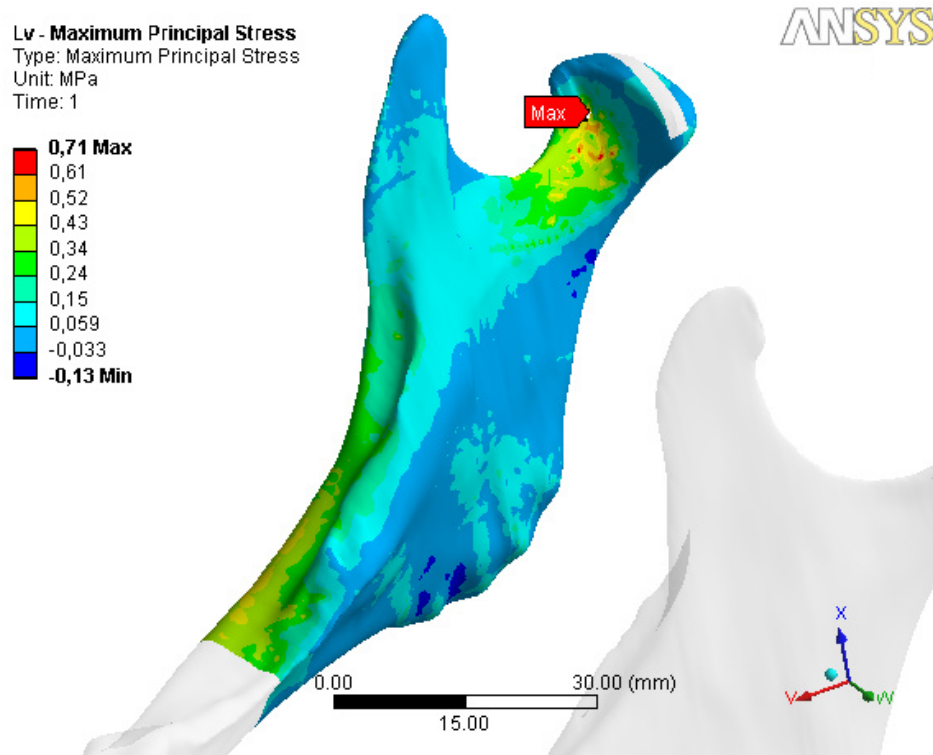
Jak je uvedeno v kapitole 10.2.2, bylo provedeno 6 variant výpočtů simulujících skus do tvrdé potravy. Z důvodů velkého úbytku kostní tkáně po stranách dolní čelisti, který řešený model disponuje, byly vloženy body deformačních okrajových podmínek pouze v přední části dolní čelisti.

Hodnoty zatížení, kterými působí jednotlivé svaly v daných podvariantách, byly vzaty z tabulky 9.3 v kapitole 9.

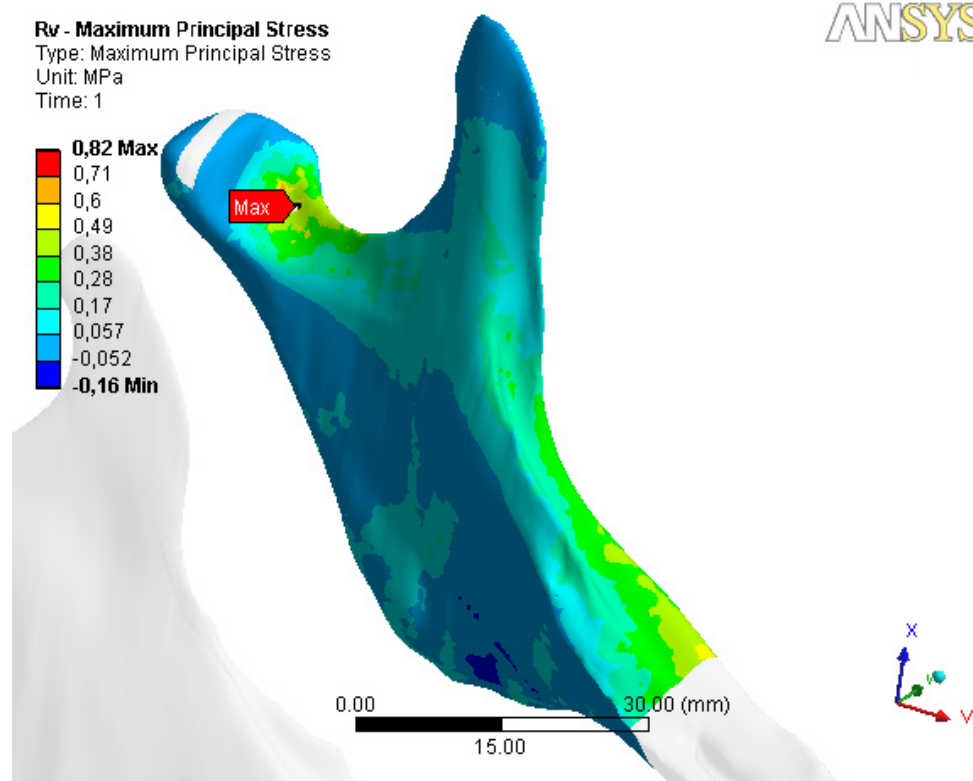
11.2.1. Hlavní napětí σ_1

Místo maximálního hlavního napětí σ_1 u varianty A se nachází přibližně na stejném místě na pravé a levé straně dolní čelisti (v oblouku mezi Caput mandibulae a Processus coronoideus). Proto je zde vykresleno pouze hlavní napětí jen u varianty A – Pravá 1. Hodnoty z ostatních podvariant jsou uvedeny v Tabulce 11.1.

Při řešení dalších variant se maximální hlavní napětí σ_1 v některých případech prohodí z pravé na levou stranu. Z tohoto důvodu jsou v tabulce uvedeny hodnoty u každé podvarianty na obou stranách a maximální hodnota je zvýrazněna tučně.



Obrázek 11.4 Varianta A – Pravá 1: Hlavní napětí σ_1 – pohled na pravou stranu čelisti

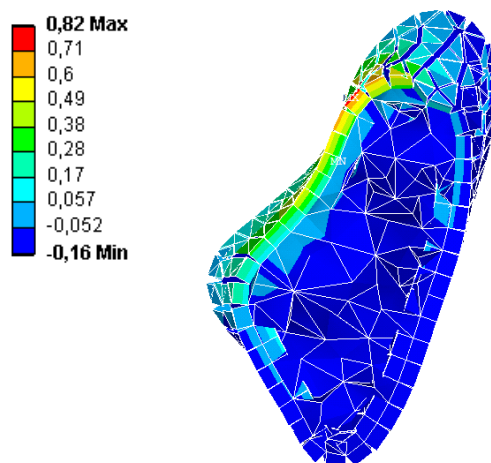
Obrázek 11.5 Varianta A – Pravá 1: Hlavní napětí σ_1 – pohled na levou stranu čelisti

Číslo podvarianty	Varianta A – Pravá				Varianta A - Levá			
	Pravá strana		Levá strana		Pravá strana		Levá strana	
	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]
1	0,71	4,71e-4	0,82	5,59e-4	0,70	4,89e-4	0,84	5,61e-4
2	1,20	7,67e-4	1,23	8,70e-4	1,10	7,75e-4	1,60	9,60e-4
3	1,80	1,06e-3	1,60	1,17e-3	1,40	1,06e-3	2,60	1,61e-3

Tabulka 11.1 Varianta A: Hodnoty hlavních napětí σ_1 a přetvoření ϵ_1

Z výsledných hodnot uvedených v tabulce 11.1 je patrné, že největší hodnota hlavního napětí σ_1 nastává až u Varianty A – Levá 3, kdy napětí oproti variantě Pravá 3 vzrostlo až o 0,8MPa. Tato odchylka je způsobená velkým úbytkem kostní tkáně na levé straně dolní čelisti, na které již není kompaktní tkáň.

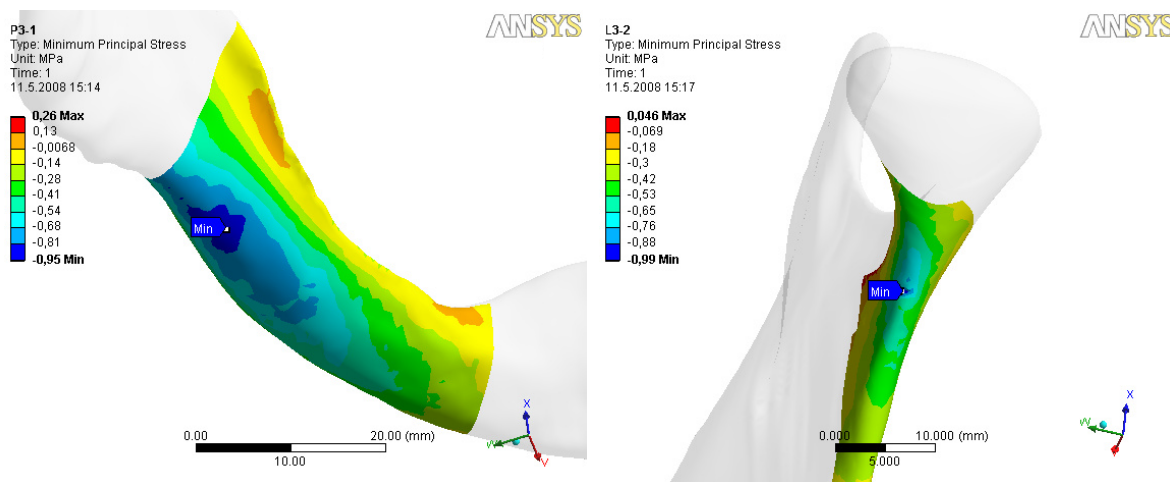
Z řezu na obrázku 11.6 je zřejmé, že napětí se přenáší především přes skořepinový prvek (kompaktní tkáň). Ve spongiózní tkáni vzniká jen minimální napětí.



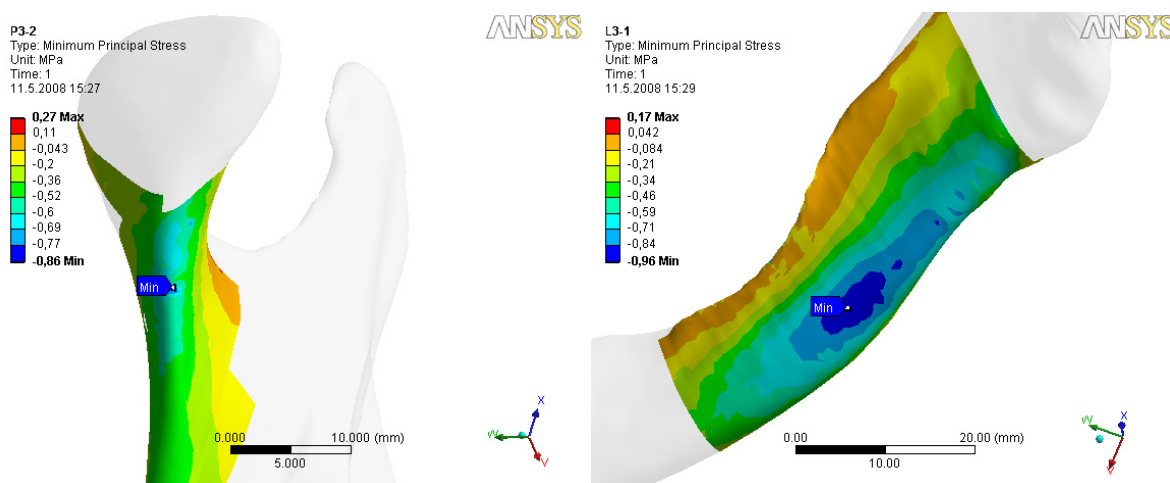
Obrázek 11.6 Varianta A – Pravá 1: Řez maximálního hlavního napětí σ_1 na levé straně

11.2.2. Hlavní napětí σ_3

Místo hlavního napětí σ_3 se střídá v závislosti na pozici okrajové podmínky zubu nahrazující skus. U varianty A - Pravá je největší napětí σ_3 na levé straně čelisti zhruba uprostřed na spodní části těla dolní čelisti (Obrázek 11.7 - vlevo) a na pravé straně čelisti v místě zvaném colum (Obrázek 11.7 - vpravo). V opačném případě, kdy okrajová podmínka leží na levé straně se místa maximálního hlavního napětí σ_3 prohodí. Na levé straně dolní čelisti leží maximum v místě colum (Obrázek 11.8 - vlevo) a na pravé straně uprostřed na spodní části těla dolní čelisti (Obrázek 11.8 - vpravo).



Obrázek 11.7 Varianta A – Pravá 2: Hlavní napětí σ_3 – pohled na levou a pravou stranu čelisti

Obrázek 11.8 Varianta A – levá 2: Hlavní napětí σ_3 – pohled na levou a pravou stranu čelisti

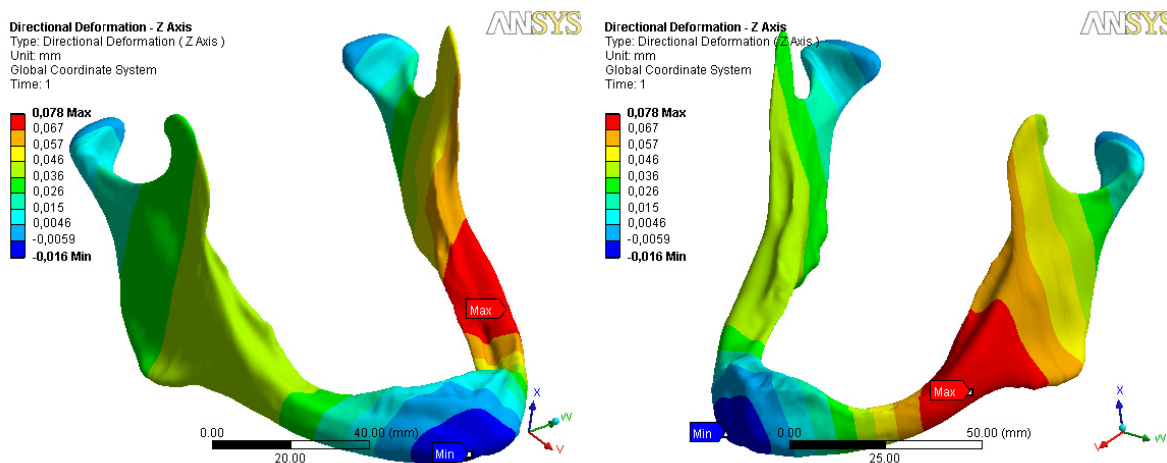
Průběhy napětí v případě Varianty A – Pravá 1, 3 a Levá 1, 3 jsou podobné. Z tohoto důvodu uvedu jejich největší hodnoty pouze v tabulce níže.

Číslo podva- rianty	Varianta A – Pravá				Varianta A - Levá			
	Pravá strana		Levá strana		Pravá strana		Levá strana	
	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]
1	-0,62	-3,81e-4	-0,56	-3,82e-4	-0,53	-3,73e-4	-0,52	-3,40e-4
2	-0,99	-6,08e-4	-0,95	-6,41e-4	-0,96	-6,60e-4	-0,86	-5,41e-4
3	-1,30	-8,20e-4	-1,30	-8,96e-4	-1,50	-9,78e-4	-1,30	-8,19e-4

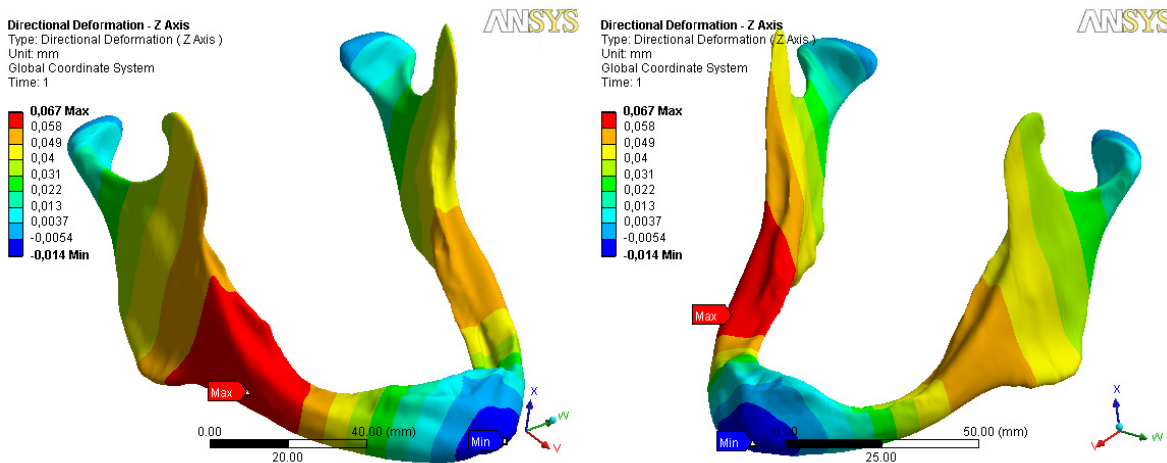
Tabulka 11.2 Varianta A: Hodnoty hlavních napětí σ_1 a přetvoření ϵ_1

11.2.3. Deformace v ose Z

Deformace (posuvy) jsou největší v oblasti spodní části těla dolní čelisti blízko angulus mandibulae. Průběhy pro variantu A – Pravá a Levá 1 jsou zobrazeny na obrázcích níže. Jelikož místa maximálních hodnot jsou pro další podvarianty velmi podobné, tak jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.3.



Obrázek 11.9 Varianta A – Pravá 1: Deformace v ose Z – pohled na pravou a levou stranu čelisti



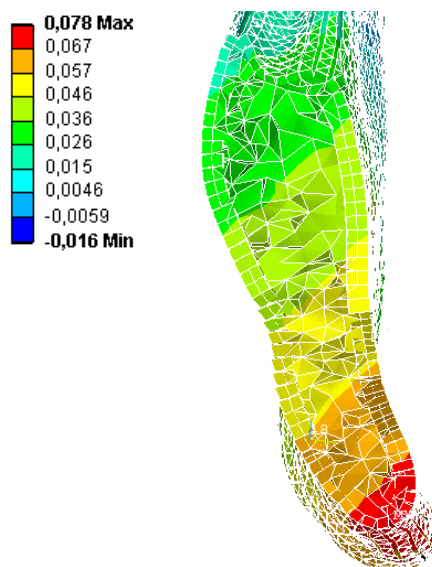
Obrázek 11.10 Varianta A – Levá 1: Deformace v ose Z – pohled na pravou a levou stranu čelisti

Největší deformace v ose Z jsou vždy na druhé straně dolní čelisti, než na které je vložena deformační okrajová podmínka.

Číslo podvarianty	Varianta A – Pravá	Varianta A – Levá
	Deformace [mm]	
1	0,08	0,07
2	0,17	0,15
3	0,29	0,30

Tabulka 11.3 Varianta A: Hodnoty deformací v ose Z

Na obrázku 11.11 je zobrazen řez v místě maximální deformace



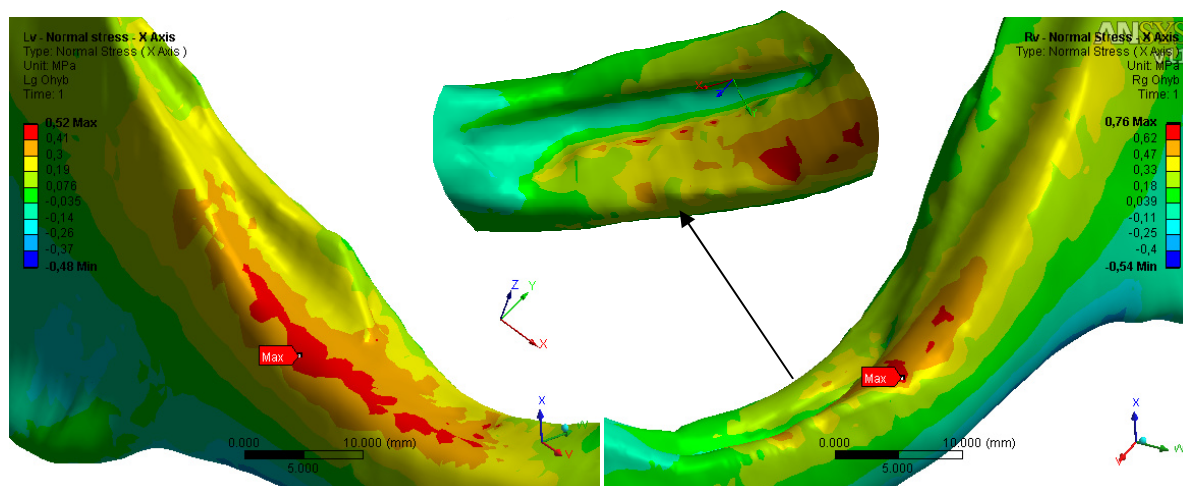
Obrázek 11.11 Varianta A Pravá 1: Řez v místě maximální deformace

11.2.4. Napětí ve směru rovnoběžném na tělo dolní čelisti

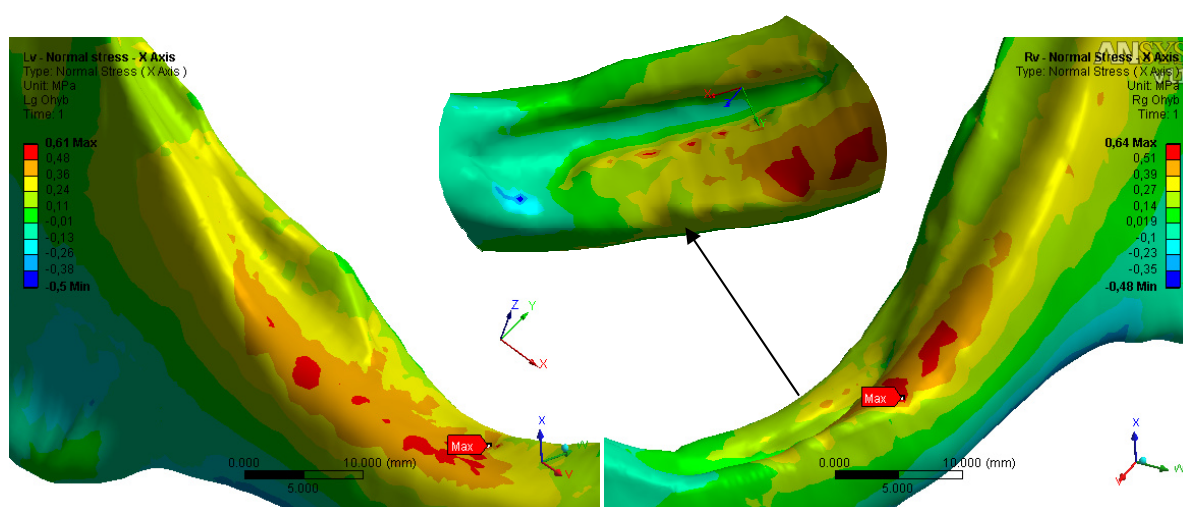
Místa maximálních napětí a jejich průběhů v souřadném systému rovnoběžném na tělo dolní čelisti nejsou stejná u všech podvariant jako v předchozích případech, proto jsou zde vykresleny výsledky pro každou z podvariant zvlášť. Pro lepší orientaci jsou taktéž výsledky zapsány tabulce 11.4.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny výsledky v přiblížení na horní část těla dolní čelisti linea obliqua. Jak bylo uvedeno na začátku této kapitoly, na levé straně dolní če-

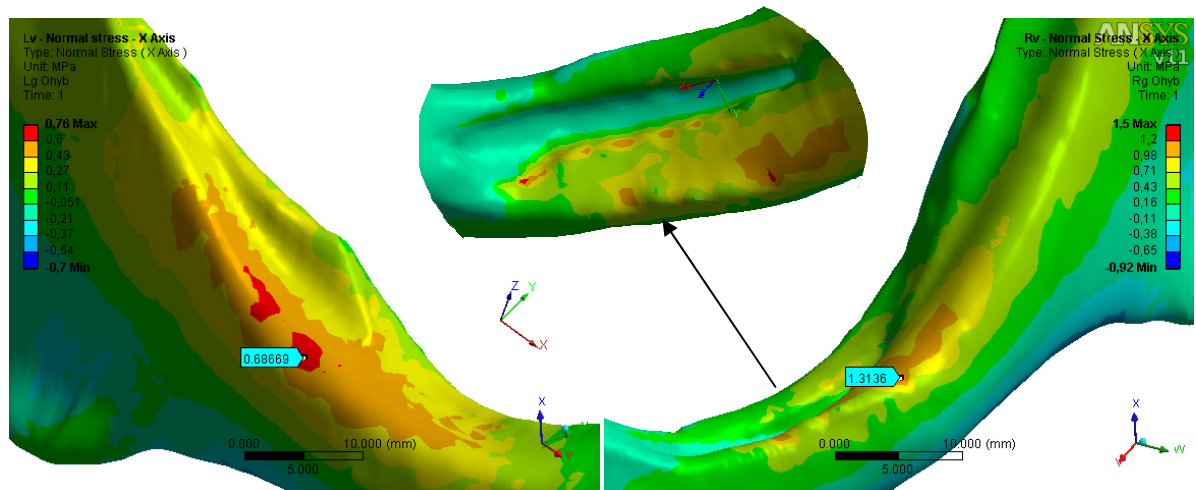
listi v okolí místa s velkým vybráním, jehož vnitřní plocha není tvořena ze spongiózní tkáně (není pokryt skořepinovým prvkem), v přechodu mezi místem, kde je a již není kompaktní tkáň, vzniká koncentrace napětí díky tomuto přechodu. Proto napětí v těchto místech nebudou analyzována, i když jsou na obrázcích vykresleny.



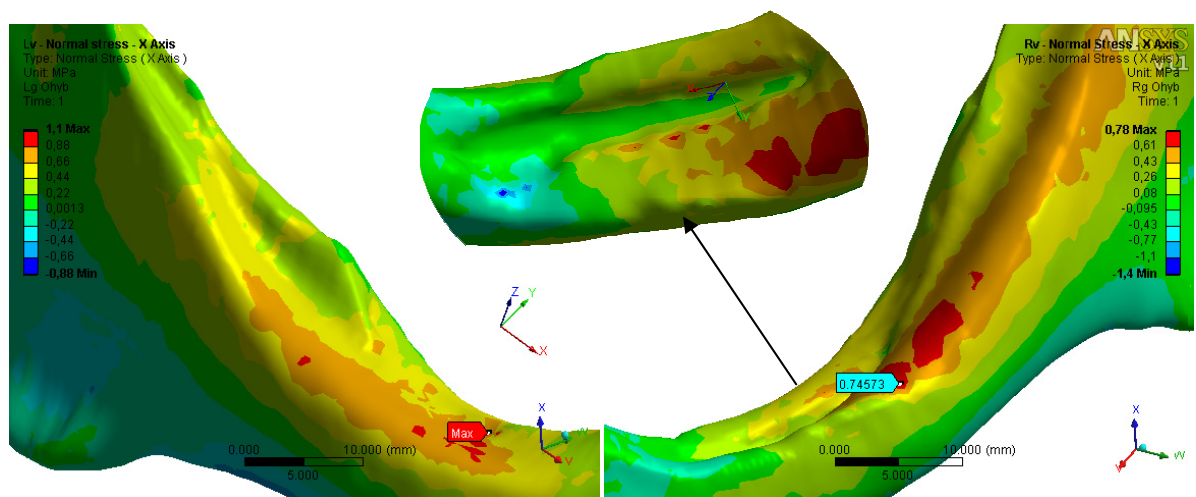
Obrázek 11.12 Varianta A – Pravá 1: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



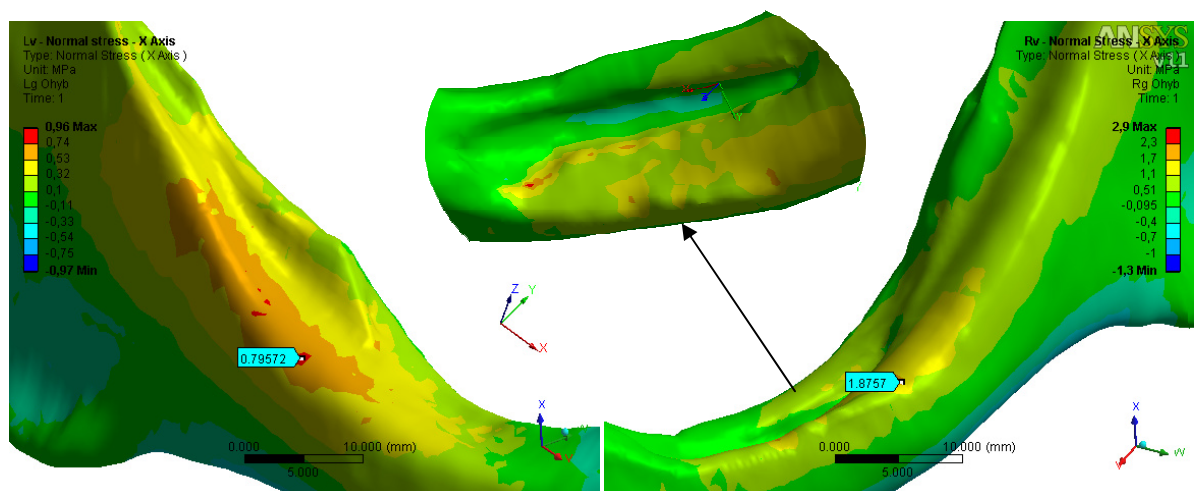
Obrázek 11.13 Varianta A – Levá 1: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



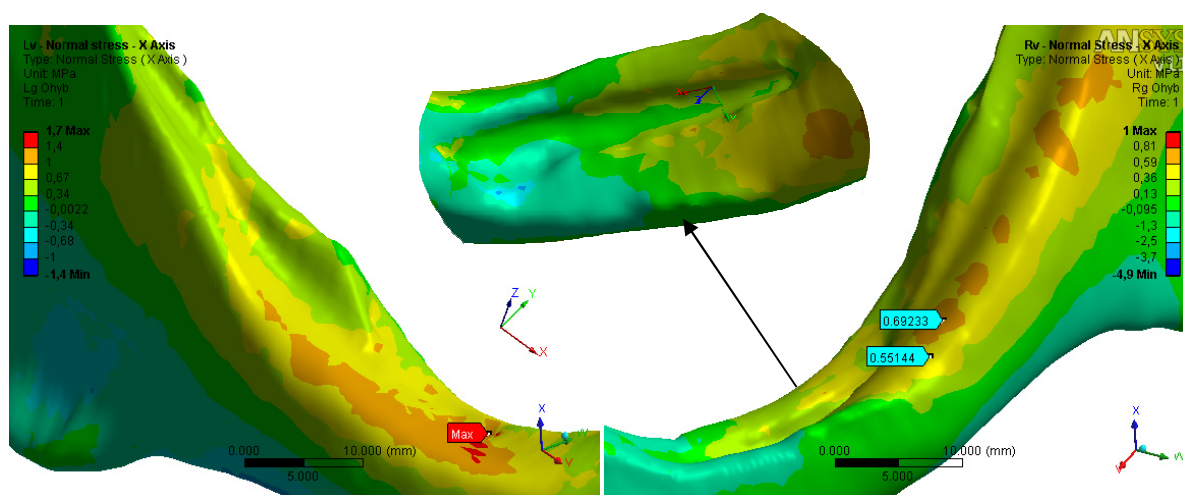
Obrázek 11.14 Varianta A – Pravá 2: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



Obrázek 11.15 Varianta A – Levá 2: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



Obrázek 11.16 Varianta A – Pravá 3: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



Obrázek 11.17 Varianta A – Levá 3: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu

Číslo podva- rianty	Varianta A – Pravá				Varianta A - Levá			
	Pravá strana		Levá strana		Pravá strana		Levá strana	
	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]
1	0,52	3,40e-4	0,76	4,57e-4	0,61	3,60e-4	0,64	3,85e-4
2	0,69	4,51e-4	1,31	7,91e-4	1,10	5,96e-4	0,75	4,43e-4
3	0,96	4,96e-4	1,89	1,13e-4	1,70	8,88e-4	0,69	3,96e-4

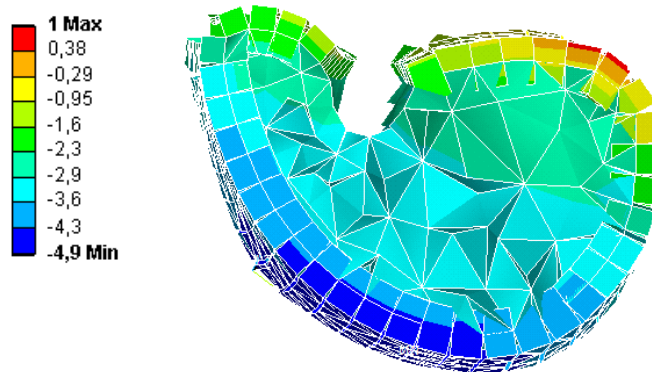
Tabulka 11.4 Varianta A – Hodnoty napětí a přetvoření ve směru osy X

U Varianty A - Pravá je vyšší hodnota napětí v ose X vždy na levé straně dolní čelisti. Rozdíly v hodnotách mezi pravou a levou stranou u těchto podvariant jsou výraznější až u okrajové podmínky umístěné v místě druhého a třetího zubu, kdy rozdíl činí téměř až 1 MPa. Poloha těchto napětí je na obou stranách stejná. Průběhy jsou velmi podobné na pravé straně. Na levé straně, kde je část oblasti bez skořepinového prvku, dochází v přední části čelisti (v blízkosti foramen mentale) ke zvýšení napětí a v jeho okolí změně průběhů v případě přesunutí okrajové podmínky u podvarianty Pravá 2 a výrazněji u Pravá 3.

U Varianty A - levá je hodnota největšího napětí u podvarianty Levá 2 a 3 na pravé straně dolní čelisti. U podvarianta Levá 1 jsou rozdíly hodnotách na obou stranách čelisti

velmi malé a můžeme je považovat za stejné. To že u této podvarianty neleží větší hodnota na pravé straně čelisti je způsobená nesymetrií. Poloha těchto napětí je ve všech případech stejná, kromě podvarianty Levá 3 na levé straně čelisti (Obrázek 11.17 vlevo) jež má za následek pravděpodobně velký úbytek kostní tkáně na této straně.

Na obrázku níže je zobrazen řez na levé straně dolní čelisti v místě největšího vybrání, kde již není kompaktní tkáň.



Obrázek 11.18 Varianta A – Levá 3: Řez na levé straně

11.3. Varianta B

V této variantě bylo provedeno celkem 12 výpočtů, které simulují skus/žvýkání do měkké potravy, kdy dojde k rozložení deformační okrajové podmínky na plochu. Místa, do kterých byly tyto podmínky vloženy, jsou uvedeny v kapitole 10.2.2.

Zatížení, kterými působí jednotlivé svaly, zůstalo v prvních třech variantách stejné jak v případě Varianty A. Pro další tři varianty byly použity hodnoty uvedené v tabulce 9.3 v kapitole 9.

U každé podkapitoly je uvedena srovnávací analýza s Variantou A.

11.3.1. Hlavní napětí σ_1

Poloha a průběhy hlavních napětí σ_1 je obdobná jako u varianty A (Obrázek 11.4 a Obrázek 11.5). Proto je zde uvedena pouze tabulka s výslednými hodnotami pro obě strany dolní čelisti. Kvůli střídání největšího napětí mezi pravou a levou stranou čelisti, je tato hodnota zvýrazněna tučně.

Číslo podvarianty	Varianta A – Pravá				Varianta A - Levá			
	Pravá strana		Levá strana		Pravá strana		Levá strana	
	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]
1	0,63	4,34e-4	0,78	5,33e-4	0,63	4,48e-4	0,80	5,36e-4
2	0,95	6,48e-4	1,20	8,19e-4	0,98	7,08e-4	1,30	8,27e-4
3	1,20	8,27e-4	1,60	1,09e-3	1,30	9,52e-4	1,80	1,09e-3
4	1,40	9,73e-4	1,80	1,31e-3	1,50	1,16e-3	2,30	1,40e-3
5	1,50	1,02e-3	1,90	1,40e-3	1,70	1,24e-3	2,30	1,42e-3
6	1,40	9,60e-4	1,90	1,43e-3	2,10	1,41e-3	1,90	1,16e-3

Tabulka 11.5 Varianta B: Hodnoty hlavních napětí σ_1 a přetvoření ϵ_1

Z tabulky vyplývá, že hodnoty hlavních napětí jsou podobné σ_1 variantě A. U Varianty B - Levá 3 nedochází k tak velkému skoku napětí, jak došlo u varianty A. Nárůst napětí s posuvem plochy deformační okrajové podmínky probíhá plynule a změna jejich hodnot klesá už od čtvrté podvarianty. V posledních dvou podvariantách dochází na jedné straně čelisti k mírnému nárůstu a na druhé straně k mírnému poklesu hlavního napětí.

11.3.2. Hlavní napětí σ_3

Poloha a průběhy hlavních napětí σ_3 jsou opět obdobné jako u Varianty A (Obrázek 11.7 a Obrázek 11.8). Z tohoto důvodu je zde taktéž uvedena pouze tabulka maximálních napětí. Tučným písmem jsou znázorněny největší hodnoty napětí pro lepší orientaci.

Číslo podvarianty	Varianta A – Pravá				Varianta A - Levá			
	Pravá strana		Levá strana		Pravá strana		Levá strana	
	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]	Napětí [MPa]	Přetvoření [-]
1	-0,51	-3,19e-4	-0,44	-2,93e-4	-0,42	-2,85e-4	-0,44	-2,89e-4
2	-0,79	-4,91e-4	-0,73	-4,88e-4	-0,70	-4,65e-4	-0,71	-4,57e-4
3	-1,00	-6,36e-4	-1,00	-6,81e-4	-0,99	-6,80e-4	-0,96	-6,73e-4
4	-1,20	-7,03e-4	-1,30	-8,46e-4	-1,40	-1,36e-3	-1,20	-7,23e-4
5	-1,20	-7,09e-4	-1,50	-2,81e-3	-1,60	-2,40e-3	-1,10	-7,05e-4
6	-0,97	-5,89e-4	-1,60	-2,05e-3	-1,80	-3,64e-3	-0,91	-6,78e-4

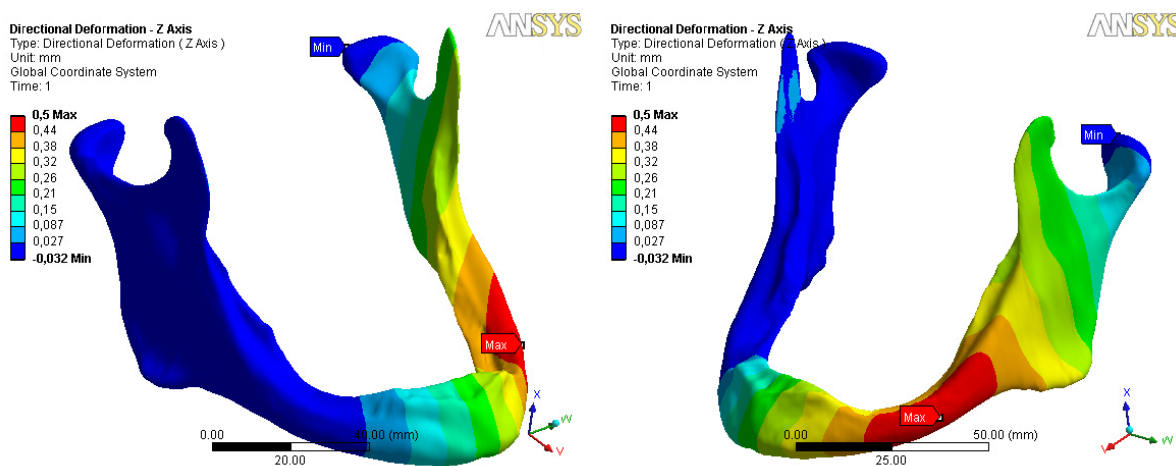
Tabulka 11.6 Varianta B: Hodnoty hlavních napětí σ_3 a přetvoření ϵ_1

V případě podvarianty 1 a 2 došlo k přehození maximálního napětí mezi pravou a levou stranou v porovnání s Variantou A. Ale vzhledem k velmi malým rozdílům, v řádu setin MPa, je tato skutečnost zanedbatelná. Při dalším porovnání došlo u prvních třech podvariant k poklesu hlavního napětí. Rozdíly v hodnotách mezi pravou a levou stranou jsou taktéž velmi malé. Větší rozdíl se objevily až posledních dvou podvariantách.

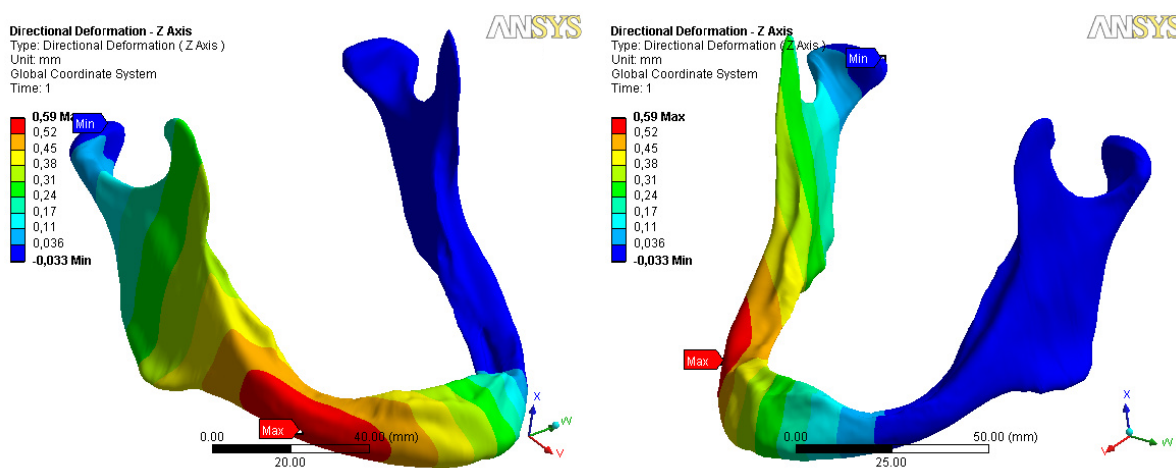
11.3.3. Deformace ose Z

Deformace (posuvy) v prvních dvou podvariantách jsou velmi podobné Variantě A (viz Obrázek 11.9 a Obrázek 11.10). S postupnou změnou okrajové podmínky (Varianta A – Levá, Pravá od 1 až po 6) se maximum přesouvá blíž k přední části dolní čelisti. Poslední stav deformace včetně jeho průběhů společně s jeho největší hodnotou je zobrazen na obrázcích níže.

Hodnoty ze všech podvariant jsou uvedeny v tabulce 11.7.



Obrázek 11.19 Varianta B – Pravá 6 : Deformace v ose Z – pohled na pravou a levou stranu čelisti



Obrázek 11.20 Varianta B – Levá 6 : Deformace v ose Z – pohled na pravou a levou stranu čelisti

Číslo podvarianty	Varianta B – Pravá	Varianta B – Levá
	Deformace [mm]	
1	0,06	0,05
2	0,11	0,10
3	0,17	0,17
4	0,25	0,31
5	0,36	0,43
6	0,5	0,59

Tabulka 11.7 Varianta B: Hodnoty deformací v ose Z

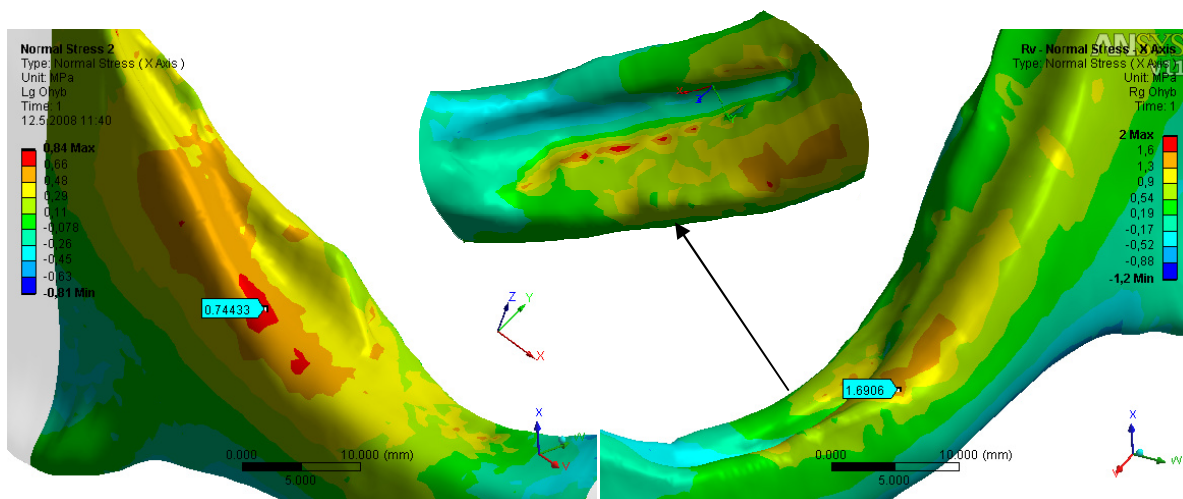
Změna mezi pravou a levou variantou, při které dochází k větší deformaci, nastává již od třetí podvarianty. Tato skutečnost je způsobena posuvem maximální deformace blíže do středu těla dolní čelisti, jež u levé strany dolní čelisti je velmi zeslabena velkým úbytkem kostní tkáně.

Při porovnání s Variantou A jsou hodnoty deformace velmi podobné, akorát u třetí podvarianty dochází k nižší deformaci cca o 0,13 mm.

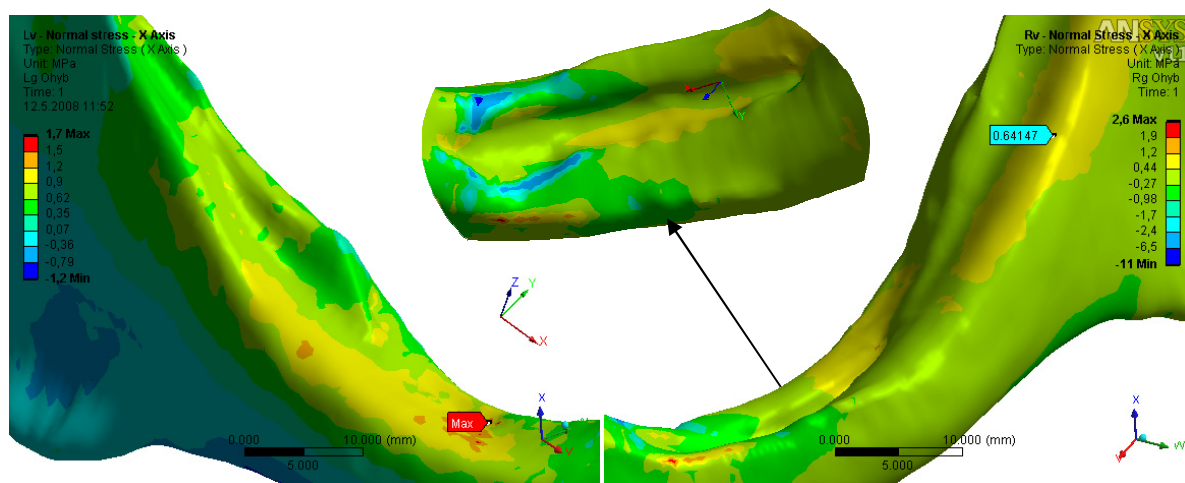
11.3.4. Napětí ve směru rovnoběžném na tělo dolní čelisti

Průběhy napětí v prvních třech podvariantách jsou stejné jako u předchozí Varianty A. Liší se pouze hodnotami, které jsou uvedené v tabulce 11.8. Protože další případy, kdy dochází k umístění okrajové podmínky v místech původního uložení zubu č. 4, 5, 6, které nebyly řešeny ve Variantě A, jsou jejich průběhy zobrazeny na následujících obrázcích.

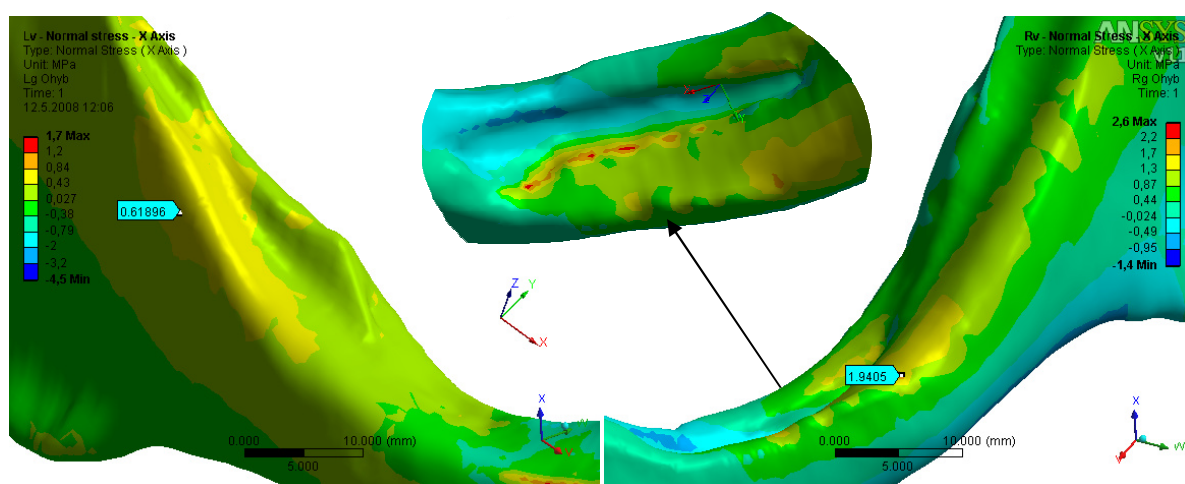
V případě, že maximální napětí je ovlivněno vazbami, jež při vyhodnocování tohoto napětí neuvažují, je největší napětí označeno šipkou s uvedenou hodnotou napětí v daném místě.



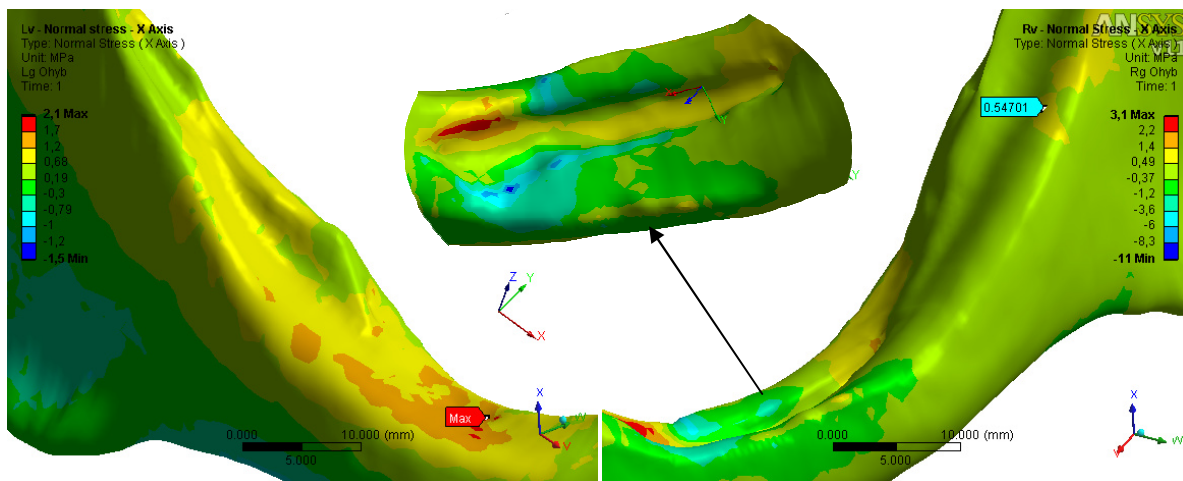
Obrázek 11.21 Varianta B – Pravá 4: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



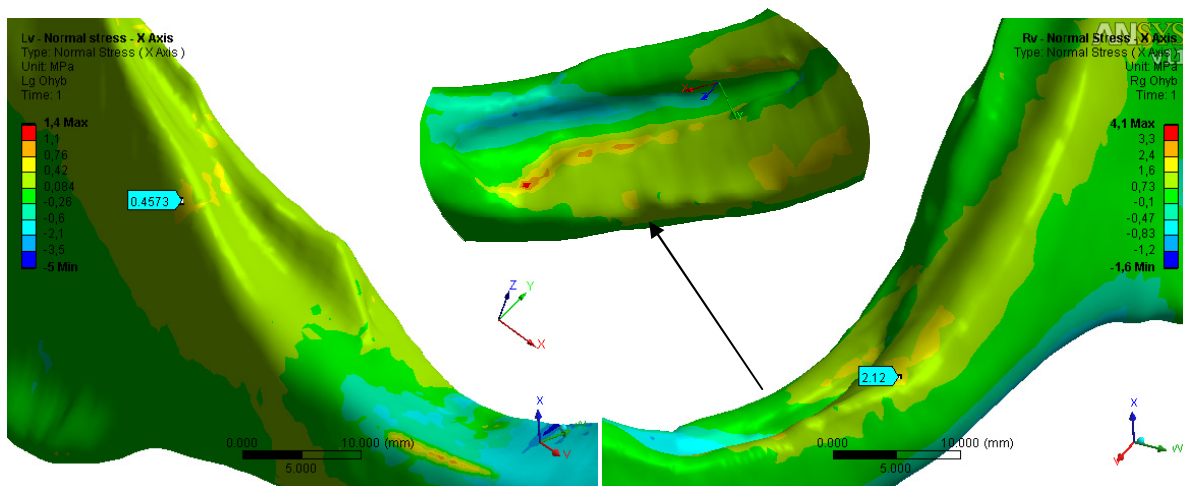
Obrázek 11.22 Varianta B – Levá 4: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



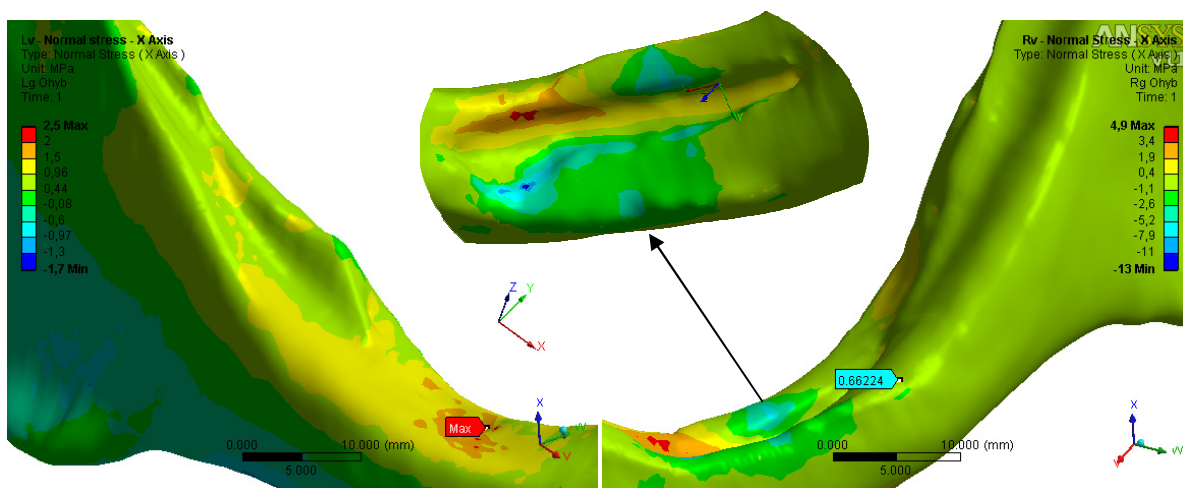
Obrázek 11.23 Varianta B – Pravá 5: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



Obrázek 11.24 Varianta B – Levá 5: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



Obrázek 11.25 Varianta B – Pravá 6: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu



Obrázek 11.26 Varianta B – Levá 6: Napětí ve směru osy X-Detailní pohled na pravou a levou stranu

Číslo podva- rianty	Varianta A – Pravá				Varianta A - Levá			
	Pravá strana		Levá strana		Pravá strana		Levá strana	
	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]	Napětí [MPa]	Přetvo- ření [-]
1	0,42	2,67e-4	0,54	3,21e-4	0,47	2,91e-4	0,47	2,82e-4
2	0,60	3,80e-4	0,94	6,51e-4	0,84	4,88e-4	0,64	3,86e-4
3	0,72	4,59e-4	1,30	9,11e-4	1,20	7,00e-4	0,73	4,27e-4
4	0,74	4,93e-4	1,69	1,14e-3	1,70	9,64e-4	0,64	3,80e-4
5	0,61	5,59e-4	1,94	1,35e-3	2,10	1,67e-3	0,55	3,43e-4
6	0,45	2,76e-4	2,12	1,74e-3	2,50	1,82e-3	0,66	3,94e-4

Tabulka 11.8 Varianta B – Hodnoty napětí a přetvoření ve směru osy X

Největší hodnoty leží vždy na druhé straně dolní čelisti, než na které došlo k zamezení pohybu okrajovou podmínkou. Napětí v prvních třech případech oproti Variantě A kleslo zhruba o 1/3. Při dalším posuvu okrajové podmínky roste největší napětí lineárně až k hodnotě 2,5 MPa jako v případě Varianta B – Levá 6 na pravé straně. Na volné straně napětí u 4 a 5 podvarianty mírně klesá. Dochází rovněž k většímu ovlivnění okolí v místě okrajové podmínky, jak je patrné například z obrázku 11.25. Poloha a průběhy v okolí největšího napětí jsou u posledních třech podvariantách stejné jako u Varianty A.

12. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provedení deformačně napěťové analýzy čelisti s úbytkem kostní tkáně. Kvůli orientaci byly nejprve uvedeny základní anatomické poznatky z hlediska řešeného problému. Dále byl vytvořen model geometrie dolní čelisti s úbytkem kostní tkáně, díky němuž vznikl výpočtový model.

Výpočtový model byl řešen ve dvou variantách. První představovala skus do tvrdé potravy s uvažováním pouze přední části těla dolní čelisti, a druhá představující skus do měkké potravy. U této varianty byla uvažována celá oblast horní strany těla čelisti.

Z výsledků deformačně napěťové analýzy vyplývá, že hlavní napětí σ_1 vychází v oblouku mezi kloubem a processus coronoideus. Největšího hodnota hlavního napětí σ_3 se střídá v závislosti na straně, u které došlo k zabránění posuvům mezi ramenem a tělem dolní čelisti. V případě napětí působící v horní části těla dolní čelisti se největší hodnoty objevily v místě zvaném linea obliqua. Ve všech případech napětí dosahuje nejvyšší hodnoty 2,5 MPa a z důvodů rozdílných materiálových hodnot je v kontaktní kosti toto napětí řádově větší než ve spongiosní. Deformace se opět střídá mezi pravou a levou stranou v oblasti přibližně uprostřed těla dolní čelisti. Největší hodnota dosáhla hodnoty 0,59 mm a to na levé straně z důvodů velkého úbytku kostní tkáně, jež je na této straně.

13. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Radomír Čihák: Anatomie 1, druhé, upravené a doplněné vydání, Grada Publishing, a.s., 2001*
- [2] *Frank H. Netter: Anatomický atlas člověka, překlad 3. vydání, Grada Publishing, a.s.*
- [3] *Ivan Dylevský: Somatologie, EPAVA, Olomouc, 2000*
- [4] *Axel Bumann, Ulrich Lotzmann: TMJ Disorders and Orofacial Pain: The Role of Dentistry in a Multidisciplinary Diagnostic Approach, Thieme, 2002*
- [5] *Petrtyl M., Máca I.: Silové účinky mezi zuby při skusu. Sborník konference SKEL-TE 2000*
- [6] *Přemysl Janíček: Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky, CERM, 2008*
- [7] <http://nr.stpi.org.tw/ejournal/proceedingB/v25n1/45-49.pdf>
- [8] <http://www.worldacademicunion.com/journal/1746-7233WJMS/WJMSvol2no2paper7.pdf>
- [9] <http://www.bartleby.com/107/44.html>
- [10] http://www.szsvzs.cz/zt/anatomie_lebky.htm
- [11] <http://jdr.iadrjournals.org/cgi/content/full/85/1/33>
- [12] <http://jdr.iadrjournals.org/cgi/reprint/54/4/814.pdf>
- [13] http://www-m6.ma.tum.de/~clason/preprints/CMBBE_S218_04.pdf
- [14] <http://www.dent.ucla.edu/pic/members/force/index.html>
- [15] <http://www.umt.fme.vutbr.cz/osem/pdf/ean2001/Petrtyl.pdf>
- [16] <http://adr.iadrjournals.org/cgi/reprint/1/1/64.pdf>
- [17] <http://crobm.iadrjournals.org/cgi/reprint/11/1/123.pdf>
- [18] <http://cmpicsu.upt.ro/cvm/Dragulescu-Stanciu-Tascau.pdf>
- [19] <http://ipj.quintessenz.de/index.php?content=issues&doc=poster&select=329>
- [20] <http://www.zib.de/Publications/Reports/ZR-04-12.pdf>
- [21] <http://cmpicsu.upt.ro/zat/Stanciu.pdf>

14. SEZNAM PŘÍLOH

Součástí této diplomové práce je 1 ks DVD obsahující elektronickou podobu textové části práce, výpočtový model a výsledky všech variant řešení. DVD obsahuje tři složky s následujícími soubory:

Diplomová práce

- Deformačně napěťová analýza čelisti s úbytkem kostní tkáně.docx
- Deformačně napěťová analýza čelisti s úbytkem kostní tkáně.doc
- Deformačně napěťová analýza čelisti s úbytkem kostní tkáně.pdf

Konečnoprvkový model a výsledky řešení

- Dolni_celist.dsdb

Model geometrie

- Celist.stl
- Celist_rezy_Plane_X.iges
- Celist_Rhinoceros.3dm
- Celist_Rhinoceors.iges