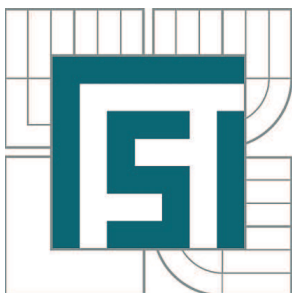


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

BIOMECHANICKÁ STUDIE ZÁPĚSTÍ HORNÍ KONČETINY

BIOMECHANICAL STUDY OF THE UPPER LIMB WRIST

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN KOUŘIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK FLORIAN, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Kouřil

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Inženýrská mechanika a biomechanika (3901T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Biomechanická studie zápěstí horní končetiny

v anglickém jazyce:

Biomechanical study of the upper limb wrist

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řešený problém je součástí aktuálního klinického problému. Revmatické a artrotické deformace zápěstních kůstek se v současné době velmi často vyskytují v klinické praxi. Diplomová práce má charakter prvotní studie v této oblasti na ÚMTMB VUT v Brně.

Cíle diplomové práce:

1. Provedení rešeršní studie dostupné literatury v oblasti řešeného problému.
2. Vytvoření modelu geometrie zápěstí horní končetiny.
3. Provedení rozboru zatěžovacích stavů zápěstí horní končetiny.
4. Vytvoření výpočtového modelu zápěstí horní končetiny.
5. Provedení řešení výpočtového modelu zápěstí horní končetiny.
6. Deformačně napěťová analýza řešených variant.

Seznam odborné literatury:

Literatura:

- [1] Čihák, R.: Anatomie 1. Praha, Avicenum, 1987
- [2] Pilný, J., Slodička, R. a kolektiv: Chirurgie ruky, ISBN 978-80-247-3295-45, Praha, Grada, 2011
- [3] Pilný, J., Čižmář, I. a kolektiv: Chirurgie zápěstí, ISBN 8072623761, Galen, 2006
- [4] Calandruccio, J, Proximal row carpectomy, Journal of the american society for surgery of the hand_ VOL. 1, NO. 2, MAY 2001

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Florian, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 6.11.2012

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na biomechanickou studii zápěstí. V jejím úvodu je rešeršní studie, která je zpracována na základě dostupné literatury. V práci je také detailně popsána anatomie jednotlivých kostí v zápěstí. Následně je provedena deformačně napěťová analýza fyziologického zápěstí v neutrální poloze. Objemový model zápěstí je vytvořen na základě CT dat. Tvorba výpočtového modelu a vlastní řešení je provedeno ve výpočtovém systému ANSYS Workbench.

ABSTRACT

This master's thesis is focused on biomechanical study of wrist. There is a literature search on this theme in the beginning of this work. The thesis is described in detail anatomy of bones in the wrist. Subsequent the stress-strain analysis of physiological wrist is implemented in a neutral position. The model of geometry of wrist is created on base of CT data. To create calculation model and the solution is implemented in the computer system ANSYS Workbench.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zápěstí, karpální kosti, deformačně napěťová analýza, MKP

KEYWORDS

Wrist, carpal bones, stress-strain analysis, FEM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUŘIL, J. *Biomechanická studie zápěstí horní končetiny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Florian, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Biomechanická studie zápěstí horní končetiny vypracoval samostatně s pomocí vedoucího práce, odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu.

V Brně dne:.....

.....

Bc. Jan Kouřil

PODĚKOVÁNÍ

Těmito slovy bych chtěl především poděkovat vedoucímu svojí diplomové práce panu doc. Ing. Zdeňku Florianovi, CSc. Za jeho ochotu, trpělivost a připomínky při psaní této diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Marciánovi, Ph.D a Ing. Davidu Krpalkovi za cenné rady týkající se řešení problému. Největší poděkování patří také mé rodině a přítelkyni, za podporu v průběhu celého studia na vysoké škole.

OBSAH:

1. Úvod	13
2. Popis problémové situace.....	15
3. Formulace problému	16
4. Rešeršní studie	17
4.1 Rešerše, týkající se anatomie zápěstí a implantátů.....	17
4.2 Rešerše, týkající se výpočtového modelování zápěstí.....	18
5. Anatomie z hlediska řešeného problému	23
5.1 Anatomické názvosloví rovin a směrů	23
5.2 Zápěstí - carpus.....	24
5.2.1 Kostí zápěstí	24
5.2.2 Morfologie zápěstí.....	25
5.2.3 Chrupavka	32
5.2.4 Klouby zápěstí.....	32
5.2.5 Vazy	34
5.2.6 Pohybové možnosti zápěstí	34
6. Artroplastika zápěstí.....	35
6.1 Zápěstní implantáty	35
7. Výpočtové modelování	38
7.1 Model geometrie.....	38
7.2 Model materiálu.....	40
7.2.1 Kostní tkáň	40
7.2.2 Chrupavka	40
7.2.3 Vazy	40
7.3 Model vazeb a zatížení	43
7.4 Konečno-prvkový model	44
8. Analýza výsledků	46
8.1 Analýza posuvů	46
8.2 Analýza kostní tkáně	48
8.2.1 Frostova hypotéza	48
8.2.2 Analýza intenzity přetvoření	49

8.3	Analýza hlavních napětí.....	50
8.4	Analýza jednotlivých kostí.....	52
8.4.1	1MC	53
8.4.2	Os scaphoideum.....	54
8.4.3	Radius	55
8.4.4	Os trapezium.....	56
9.	Závěr	59
10.	Literatura	60

1. Úvod

Horní a dolní končetina má pro život člověka zásadní význam. U všech čtyřnožců mají končetiny stejnou základní stavbu.

Dolní končetina (lat. *membrum inferius*) je párový orgán, který zajišťuje pohyb člověka ve vzpřímené poloze. V důsledku zatížení tíhou člověka je mohutnější než horní končetina, ale rozsah pohybu v kloubech dolní končetiny je menší než u horní končetiny.

Horní končetina (lat. *membrum superius*) je subtilnější. Mezi základní funkce horní končetiny patří uchopení, manipulace, opěrná funkce, ochranná funkce a komunikace. Uchopení a manipulace tvoří základ většiny činností, souvisí s prací člověka. Tato skutečnost zřejmě vedla Anaxagora (Anaxagoras asi 497 – 428 př. n. l.) k vyslovení výroku:

„Člověk je moudrý, protože má ruce.“

Na pohybech horní končetiny se integrálně podílí všechny její části. Například na abdukci ramenního kloubu se vedle kosti pažní (*humerus*) podílí i lopatky (*scapula*) a kost klíční (*clavicula*). Vzájemná integrace pohybů částí horní končetiny umožňuje člověku dosáhnout na jakékoliv místo na svém těle, i když některá místa si člověk nikdy neuvidí.

Manipulace horní končetiny se především realizuje distálním článkem, kterým je ruka (*manus*). V souladu s hlavní funkcí ruky, kterou je úchop, případně manipulace, je ruka bohatě a jemně členěna. Toto členění je zřejmé již na jejím skeletu. Skelet ruky je složen z osmi kostí zápěstních, pěti záprstních a čtrnácti článků prstů, které mezi sebou vytváří řadu kloubních spojů, umožňující rozsáhlý pohyb ruky [1].

Spojení ruky s kostí vřetenní (*radius*) je realizováno kloubem vřetenozápěstím (*articulationes radiocarpalis*), což je vejčitý (ovoidní) složený kloub. V kloubu dochází ke styku kosti vřetenní, která vytváří jamku pro dvě kosti z první řady zápěstí, které vytváří hlavici. Mezi první a druhou řadou zápěstních kostí je složený středozápěstní kloub (*articulationes mediocarpalis*). Tyto dva kloubní spoje se do značné míry podílí na veškerý pohyb v zápěstí (*carpus*) [1].

Vzhledem k tomu, že předmětem našeho zájmu je zápěstí, zaměříme další pozornost především na tuto část horní končetiny.

Značně složitá struktura zápěstí bývá častým místem úrazů. Ovšem nejsou to pouze úrazy, které by omezovaly nebo ovlivňovaly funkci zápěstí. Kromě úrazů jsou častou příčinou onemocnění zápěstí také nemoci z povolání. Zatím co onemocnění ramenního kloubu je časté například u pokladníků, pracovníků pošty, skladníků či pracovníků u výrobního pásu, onemocnění lokte je rozšířeno zejména mezi pracovníky ve stavebnictví a zedníky. Onemocnění zápěstí jsou charakteristická pro uživatele PC, a povolání, kde jsou časté mechanické vibrace a opakované pracovní úkony [2]. Existuje ovšem jedna pracovní oblast, která je riziková pro celou horní končetinu. Touto oblastí jsou sporty a to především ty, u kterých je horní končetina vystavena velké zátěži nebo velkým nárazům způsobených pádem.

Ani ten nejopatrnější člověk vyhýbající se úrazům a sportující rekreačně není od problémů souvisejících se zápěstím ochráněn. Stejně jako celý pohybový aparát člověka postihuje i zápěstí revmatoidní artritida. Revmatoidní artritida je onemocnění imunitního systému. Jedná se o dlouhodobé, invalidizující onemocnění, provázené velkými bolestmi. Toto onemocnění člověka omezuje v pohybu a brání mu vykonávat běžné každodenní aktivity a žít samostatný a nezávislý život. Příčina, která u konkrétního člověka vyvolá rozvoj nemoci, není dosud známa. Hlavním škodlivým procesem je chronický nitrokloubní zánět. Ten je způsoben vstupem bílých krvinek do kloubu a projevuje se jako otok, horkost, citlivost na dotek, bolestivost a snížená funkčnost. Po nějaké době probíhající zánět vyústí v deformaci a degradaci kloubu [3].

Léčba revmatoidní artritidy závisí na řadě faktorů. V pokročilém stádiu může být jedinou účinnou léčbou chirurgické odstranění zničeného kloubu a jeho nahrazení implantátem.

2. Popis problémové situace

Zápěstí je komplexem kostí a měkkých tkání, které jsou každodenně zatěžovány při práci v zaměstnání, sportovních aktivitách a při většině běžných každodenních činností (čistění zubu, osobní hygieně atd.). Tímto zatěžováním může být zápěstí postiženo onemocněním či úrazem, které způsobí značnou bolest a popřípadě i dysfunkci zápěstního kloubu. Avšak zápěstí je nedílnou součástí horní končetiny, kterou člověk potřebuje pro vykonávání každodenních činností. Lidé s onemocněním horní končetiny dříve či později vyhledají lékařskou pomoc. Charakter léčby závisí na charakteru a stupni onemocnění. Nejzávažnější případy je nutné řešit chirurgicky.

Pacientům s poškozeným zápěstním kloubem bývá nejčastěji implantována kloubní náhrada, která nahradí poškozený kloubní aparát. Na návrhu zápěstního implantátu, jeho vývoje a výroby, se podílí řada odborníků z různých oblastí vědy a techniky, od medicíny přes biomechaniku až po výrobní sféru. Z technické oblasti se na vývoji zápěstního implantátu významným způsobem podílí biomechanická studie, které se týkají určování mechanických vlastností jak zápěstního kloubu, tak jeho náhrady. Snahou všech pracovníků, kteří se na vývoji náhradního zápěstního kloubu podílí, je, aby se funkčnost náhrady blížila co nejvíce fyziologickému kloubu a člověk s aplikovanou náhradou kloubu mohl žít plnohodnotným životem.

Kloubní náhrada, stejně jako fyziologický kloub jsou značně mechanicky namáhané. Při jejím návrhu je nutné vyloučit predikovatelné mezní stavy, včetně deformačně napěťových. Určení hodnot podstatných mechanických veličin ve fyziologickém stavu je laboratorně a eticky značně problematické. Jednou z mála možností, jak zajistit, aby kloubní náhrada nepřetěžovala okolní živé tkáně, je výpočtové řešení deformačně napěťové analýzy fyziologického kloubu a jeho okolí. Návrh umělého kloubu je pak nutné provést tak, aby u zatíženého umělého kloubu nedošlo k meznímu stavu a namáhání okolních kostních tkání, nepřekročilo hodnoty určené u fyziologického kloubu.

Provedení deformačně napěťové analýzy zápěstního kloubu ve fyziologickém stavu výpočtovým modelováním vyžaduje řešení řady dílčích problémů v důsledku složité geometrie, materiálových vlastností a zatížení zápěstního kloubu. Deformačně napěťová analýza zápěstního kloubu ve fyziologickém stavu je jednou z prvních prací zabývajících se biomechanikou ruky řešených na ÚMTMB. Řadu dílčích problémů může být očekávána v důsledku malých zkušeností v této oblasti biomechaniky.

3. Formulace problému

Provedení deformačně napět'ové analýzy zápěstního kloubu ve fyziologickém stavu.

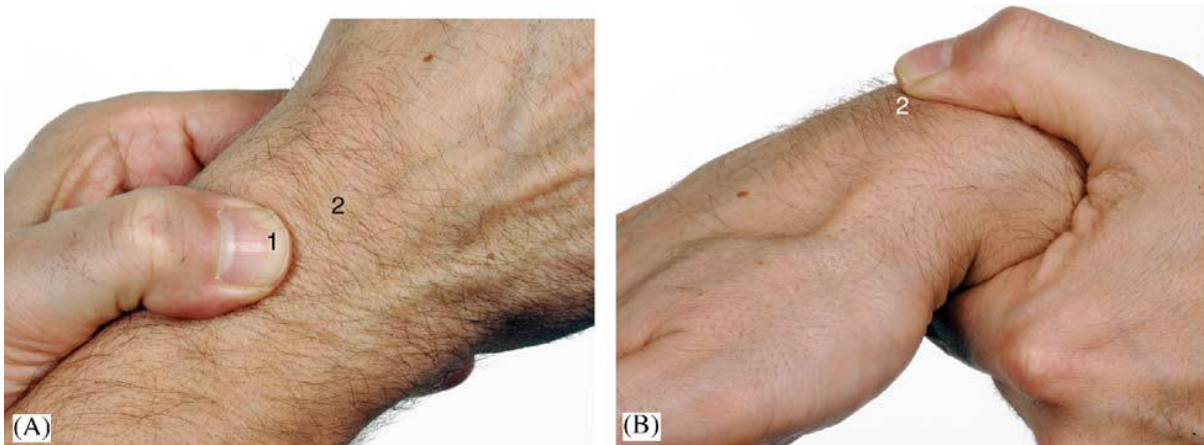
4. Rešeršní studie

Studie zabývající se zápěstím je v dnešní době velké množství. Proto rozdělíme rešerši do dvou kategorií. První kategorie bude zaměřena na anatomii zápěstí a implantáty. Druhá část se bude věnovat studiím výpočtového modelování zápěstí.

4.1 Rešerše, týkající se anatomie zápěstí a implantátů

R. Srinivar Reddy, J. Compson. **Examination of the wrist - surface anatomy of the carpal bones.** The Journal of Current Orthopaedics. June 2005, Volume 19, Issue 3

V dnešní době je řada zobrazovacích metoda pro zkoumání kostních tkání. Avšak ne vždy může některá zobrazovací metoda pomoci při lékařském vyšetření poranění či zlomeniny některých kostí v zápěstí. Tento případ nejčastěji nastává při zlomenině háku na os hamatum, kterou zřídka zpozorovat na RTG snímku. Diagnózu v takových případech lze správně určit na základě speciálních šikmých řezů. Nicméně i přes veškeré vymoženosti zobrazovacích metod, je stále aplikována v ortopedii a úrazové traumatologii základní vyšetřovací metoda. Principem základního vyšetřování jsou vizuální pohled, pocit a pohyblivost. K tomuto vyšetřování je nezbytnou součástí znalost povrchové anatomie, která je popsána v této studii. Dále tento článek stručně popisuje jednotlivé kůstky v zápěstí [4].



Obr. 4.1 (A) Prohmatání tuberculum dorsale (B) Prohmatání spojení os lunatum a os scaphoideum v zápěstní flexi, (1) tuberculum dorsale, (2) křížová jamka na úrovni spojení os lunatum a os scaphoideum [4]

D. E. T. Shepherd, A. J. Johnstone. **Desing considerations for a wrist implant.** The Journal of Medical Engineering and Physics. December 2002, Volume 24, Issue 10

Revmatoidní artritida (RA) je běžné zánětlivé onemocnění, které postihuje zápěstí. Projevy zánětu vedou k bolesti, deformitě a snížení kvality života pro pacienta. Klouby postižené RA lze úspěšně léčit operací, která nahradí nemocný spoj umělým kloubním implantátem. Tento dokument popisuje anatomii a biomechaniku zdravého zápěstí, a přezkoumává současně a minulé návrhy umělých kloubů zápěstí. Implantáty, které se v této práci popisují, jsou Swanson, Volz, Meuli, Trispherical, Guepar a další [5].

H. Whalley, I. McNab. **Injuries of the carpus**. The journal of Orthopaedics and Trauma. October 2011, Volume 25, Issue 5

Fraktury zápěstí tvoří 1/5 fraktur celé horní končetiny. Ačkoliv se zápěstí skládá z osmi malých kůstek, tak 70% veškerých fraktur v zápěstí je způsobena na os scaphoideum. Poranění zápěstí se nejčastěji vyskytuje u mladých mužů, kteří se angažují v oblasti sportu nebo v manuálních pracích s vysokou funkční náročností na ruce. U takových pacientů většinou není dostatečná léčba těchto zlomenin a má za následek katastrofální důsledky, které mohou vést ke změně pracovního místa či změně životního stylu. V tomto článku autoři popisují, k jakým frakturám dochází na jednotlivých kostech v zápěstí [6].

Richard A. Berger, **The Anatomy and Basic Biomechanics of the Wrist joint**. Journal of Hand Therapy. April – June 1996, Volume 9, Issue 2

Zápěstí se skládá z osmi karpálních kostí, které jsou kloubně spojené jak s kostmi předloktí a metakarpálními kostmi v ruce, tak mezi sebou. Toto skloubení představuje elegantní mechanismus s řadou možností pohybu. Díky tomu nám zápěstí umožňuje řadu možných pohybů (flexe, dukce, rotace,...). Každý z těchto pohybů má obvykle značně velké pohybové rozpětí, a proto je zápěstí z anatomického hlediska složitý a obtížný mechanismus pro udržení stability. Značné úsilí v současné době probíhá ke zvýšení porozumění anatomie a biomechaniky na zápěstí, který je nezbytným předpokladem pro pochopení pathomechaniky a rozvoj pro efektivní léčbu. Tento článek shrnuje některé základní funkce zápěstí a aplikuje je na základní přehled biomechaniky zápěstí. Protože tento dokument není komplexním hodnocením, lze tento jej rozdělit na čtyři oblasti [7]:

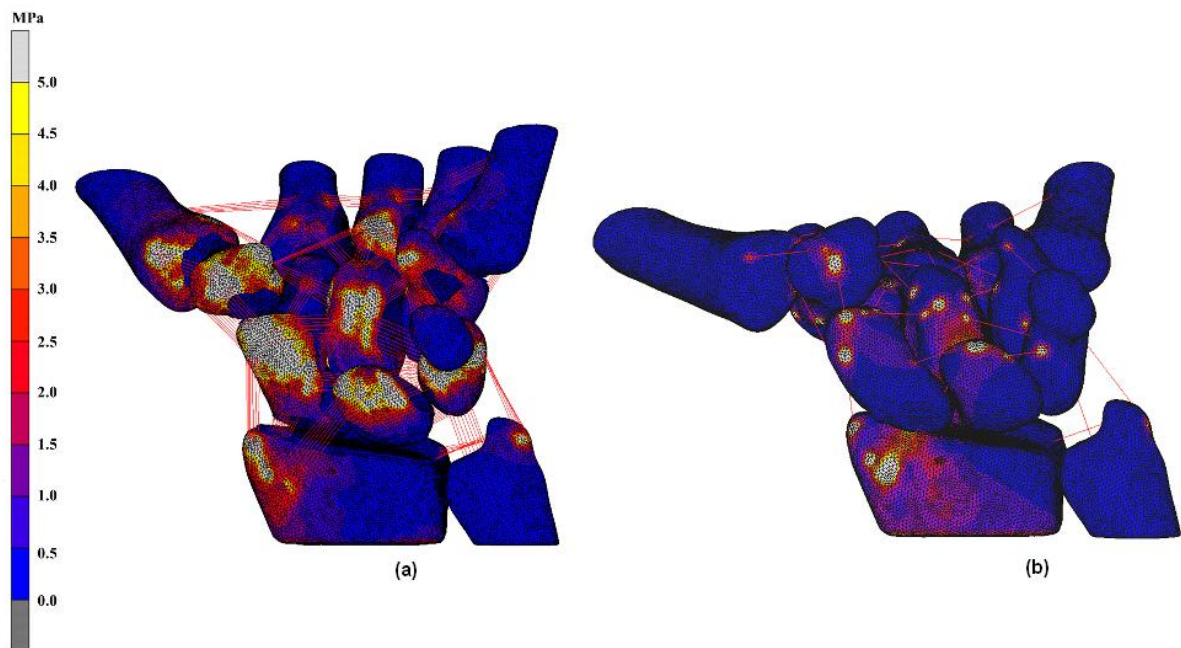
- Kostní anatomie
- Vazivová anatomie
- Neurovaskulární anatomie
- Biomechanika zápěstí

4.2 Rešerše, týkající se výpočtového modelování zápěstí

M. N. Bajuri, Mohammed Rafiq Abdul Kadir, Murali Malliga Raman and T. Kamarul **Mechanical and functional assessment of the wrist affected by rheumatoid arthritis: A finite element analysis**. The Journal of Medical Engineering and Physics. November 2012, Volume 34, Issue 9

Revmatoidní artritida je jedna z nejčastějších kloubních onemocnění. V této práci byl vytvořen výpočtový model fyziologického zápěstí a zápěstí s revmatoidní artritidou. Model zápěstí s revmatoidní artritidou byl vytvořen z dat počítačové tomografie s respektováním tří

základních projevů revmatoidní artritidy: destrukce chrupavky, vazivové laxnosti a synoviální proliferace. Synoviální proliferace je chronický zánět, kde jeden z příčin projevu je dekalifikace kostí (osteoporóza). Ta byla ve výpočtovém modelu modelovaná nižší hodnotou modulu pružnosti u kortikální a spongiózní kostní tkáně. Vzhledem k těmto projevům revmatoidní artritidy, byla výrazná změna napětí především na kloubním spojení mezi Radiem a os scaphoideum, os capitatum a os lunatum, které korelují s klinickými nálezy. Podrobnější analýzy byla provedena na distálním konci Radia a Ulny [8].



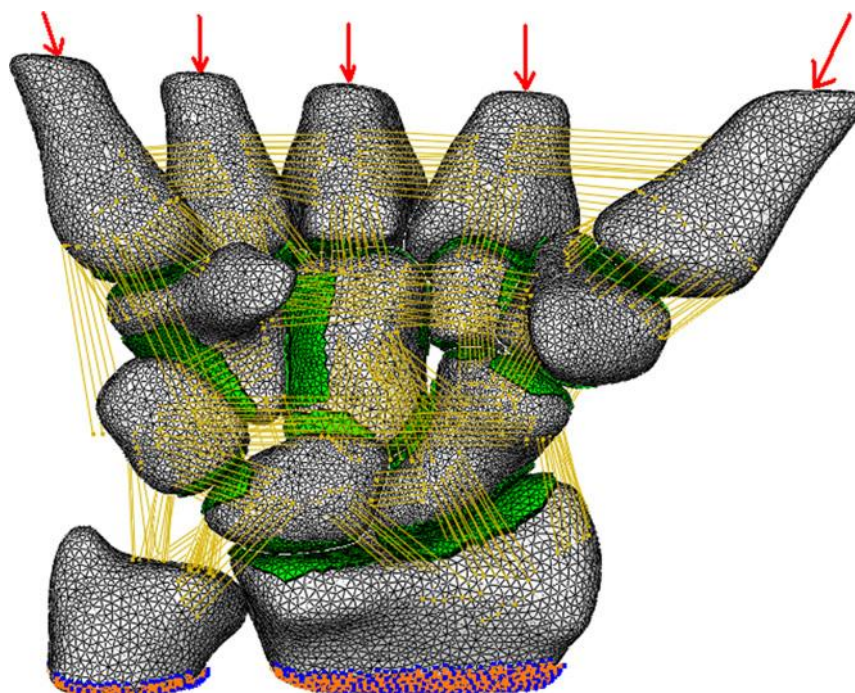
Obr. 4.2 Redukované napětí σ_{HMMH} (a) výpočtový model zdravého zápěstí (b) výpočtový model s RA [8]

Magnús K. Gíslason, Benedict Stansfield, David H. Nash. **Finite element model creation and stability considerationsof komplex biological articulation: The human wrist joint.** The Journal of Medical Engineering and Physics. June 2010, Volume 32, Issue 5

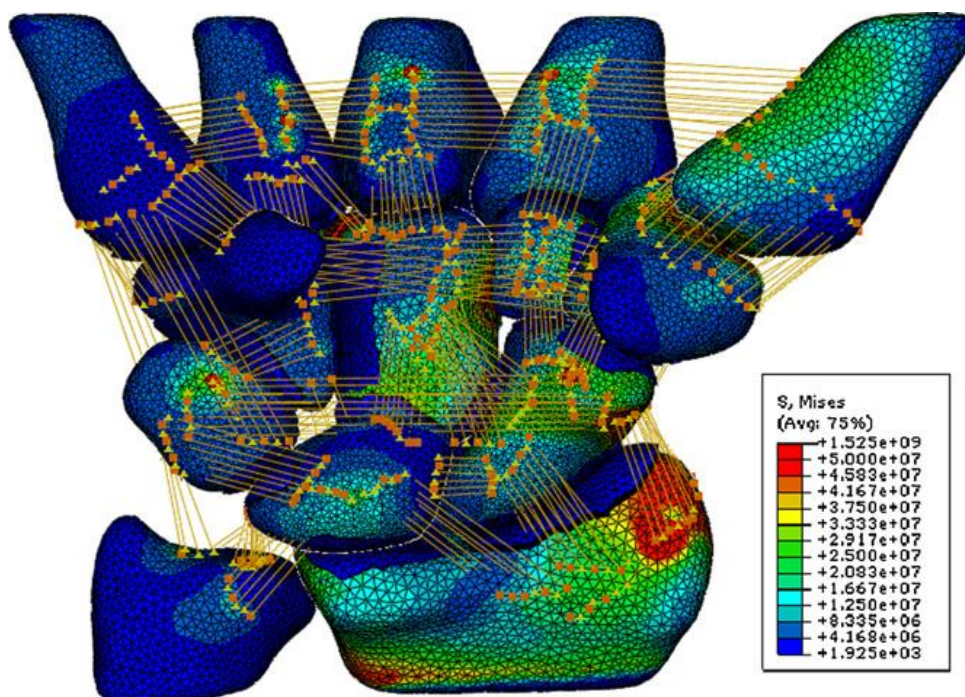
I přes značný rozvoj v metodě konečných prvků jsou zápěstí a kotník stále složitým kloubním spojením pro vytvoření výpočtového modelu. V počátku studii byla tato kloubní spojení řešena jako 2D úloha. V 1995 vytvořili Anderson a Daniel jeden z prvních rovinných modelů. Tento model představoval přenos zatížení v radiocarpálním kloubu, který byl modelován Radiem, os scaphoideum a os lunatum. V prvních pokusech pro vytvoření trojrozměrného modelu zápěstí nebylo zcela jednoduché, z důvodu velkého počtu kontaktů v modelu a vzájemná fixace všech kostí [9].

V této studii byl vytvořen výpočtový model zápěstí. Pozornost je věnovaná problémům souvisejícím s geometrií modelu, hustotou sítě, modelování kontaktů a úpravami ovlivňujícími konvergenci. Prezentované údaje poskytují vodítko pro výpočtáře při aplikaci konečných prvků ve složitých kloubech lidského těla. Výpočtový model je tvořen vysoce kvalitní povrchovou trojúhelníkovou sítí, s maximálním důrazem na rovnoúhlost jednotlivých prvků, s cílem vytvořit vysoce kvalitní povrchovou síť. K tomu, aby byla dosažena vysoká kvalita sítě, nebylo dbáno přesnosti geometrie jednotlivých kostí (Obr. 4.3). Při řešení

problému kontaktu v jednotlivých kloubech zápěstí byl použit pokutový algoritmus, který předepíše dostatečnou tuhost. Řešení bylo provedeno ve výpočtovém systému Abaqus [9].



Obr. 4.3 Výpočtový model [9]



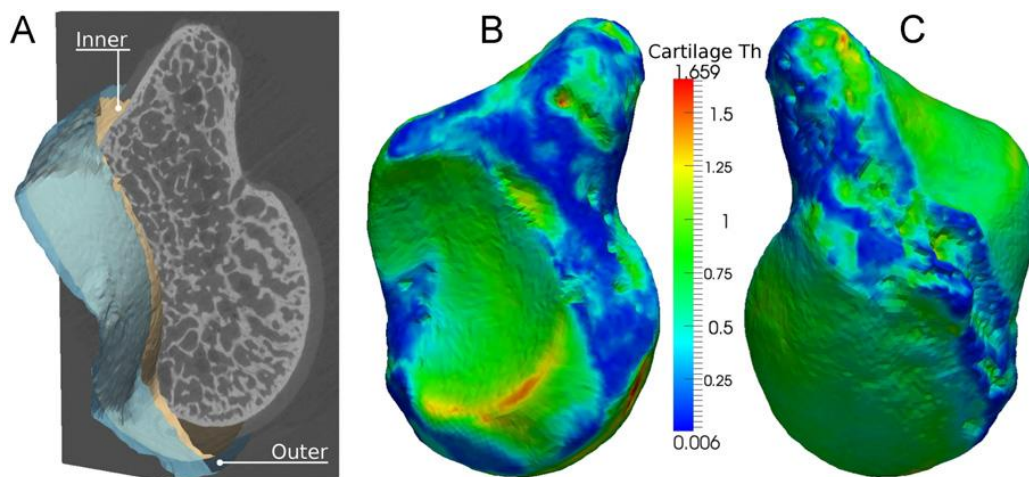
Obr. 4.4 Redukované napětí σ_{HMH} [9]

Peter Varga, Philip Schefzig, Ewald Unger, Winfried Mayr, Philippe K. Zysset a Jochen Erhar. **Finite element based estimation of contact areas and pressures of the human scaphoid in various functional positions of the hand.** Journal of Biomechanics Volume 46, Issue 5, 15 March 2013, Pages 984–990

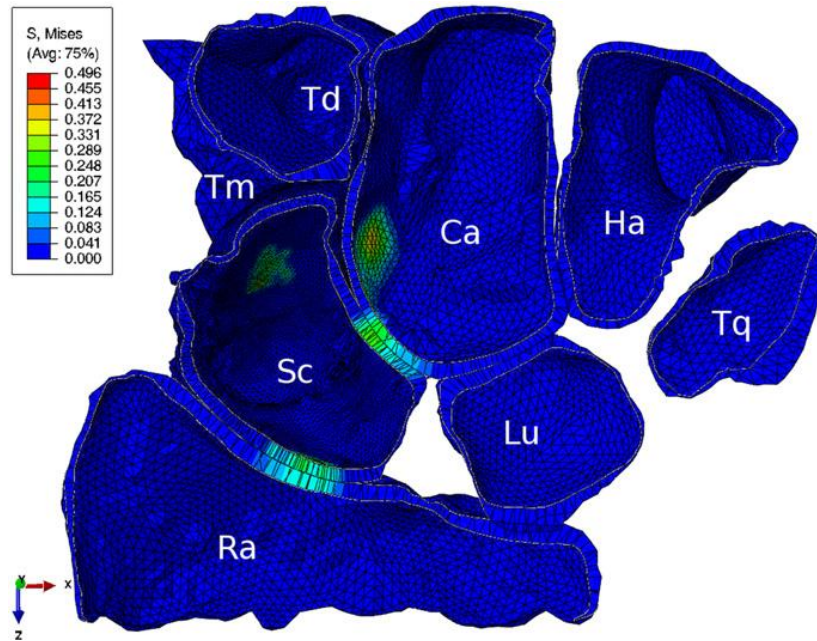
Os scaphoideum je jedna z nejčastějších zlomených karpálních kostí. Pro dobré hojení zlomeniny je nezbytná znalost sil a momentů působících na os scaphoideum. Proto cílem této studie bylo zhodnotit kontaktní síly působící na intaktní os scaphoideum v různých funkčních zápleštních polohách pomocí MKP modelu. Pozice karpálních kostí a geometrie kloubních chrupavek byly získány pomocí vysokého rozlišení CT a začleněny do konečno-prvkového modelu v osmi funkčních polohách. CT snímky byly pořízeny od ženského dárce bez zlomenin a implantátu v předloktí a všechny příslušné chrupavky byly bez artritidy. V první fázi byly CT snímky pořízeny v různých polohách zápěstí. Následně byly jednotlivé kosti separovány a očištěny od vazů a šlach, kde za pomoci μ CT (microCT40, Scanco) byla nasnímána tloušťka chrupavek na jednotlivých kostech (Obr 4.5). Chrupavky byly modelovány jako lineárně elastický materiál s modulem pružnosti v tahu 5MPa a Poissonovým číslem 0,3 [10].

Poznátky v této studii byly následující:

- tloušťka chrupavky byla heterogenní pro každou kost a významně se liší mezi karpálními kostmi
- tato heterogenita do značné míry ovlivnila MKP výsledky
- síly působící na os scaphoideum v nezátíženém zápěstí jsou významné



Obr. 4.5 Tloušťka chrupavky na μ CT obrazu (os scaphoideum). (A) Identifikace vnitřního a vnějšího okraje chrupavky, (B a C) vizualizace tloušťky chrupavky v mm [10]



Obr. 4.6 Redukované napětí σ_{HMH} v kontaktu chrupavek při zatížení v neutrální poloze. Zkratky v modelu; Sc: os scaphoideum, Ra: Radius, Lu: os lunatum, Ca: os capitatum, Ha: os hamatum, Tq: os triquetrum, Td: os trapezoideum, Tm: os trapezium [10]

Joseph M. Mansour. **Biomechanics of Cartilage**, Biomechanical principles, part 1, charter 5

Chrupavky existují v různých formách a mají celou řadu funkcí v lidském těle. V závislosti na jejich složení jsou chrupavky klasifikovány jako kloubní (také známé jako hyalinní), elastické a vazivové chrupavky. V pohyblivém kloubním spojení se nachází kloubní chrupavka, která je nosnou plochou a umožňuje pohyb mezi dvěma sousedícími kostními segmenty. Tento článek se zabývá mechanickým chováním a funkcí kloubní chrupavky pohybujících se kloubů, kde hlavními body jsou [11]:

- Popis struktury a složení chrupavky ve vztahu k jeho mechanickému chování
- Prozkoumání vlastnosti materiálu chrupavky, co znamenají fyzikálně a jak mohou být stanoveny
- Popis druhů mechanických poruch chrupavek
- Popis kloubního mazání
- Popis etiologie osteoporózy ve smyslu mechanických faktorů

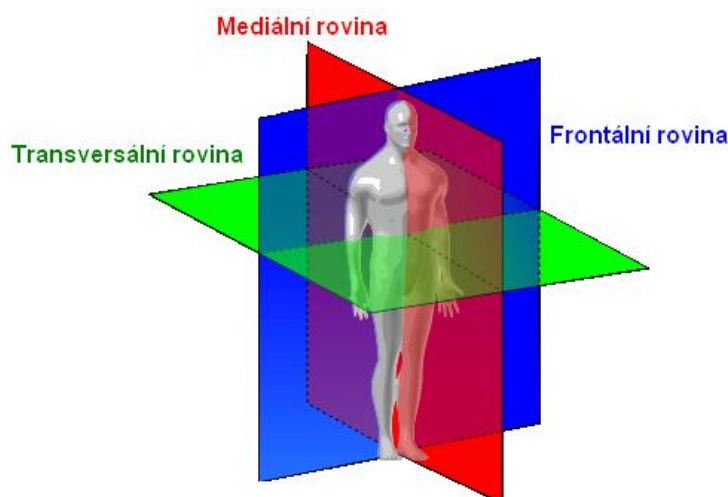
5. Anatomie z hlediska řešeného problému

V této kapitole uvedeme základní anatomické názvosloví jednotlivých částí lidského těla. Dále se zaměříme na podrobnější popis horní končetiny a především zápěstí, který nám poskytne řadu informací týkajících se struktury zápěstního kloubu v souvislosti s řešeným problémem.

5.1 Anatomické názvosloví rovin a směrů

Základní roviny lidského těla

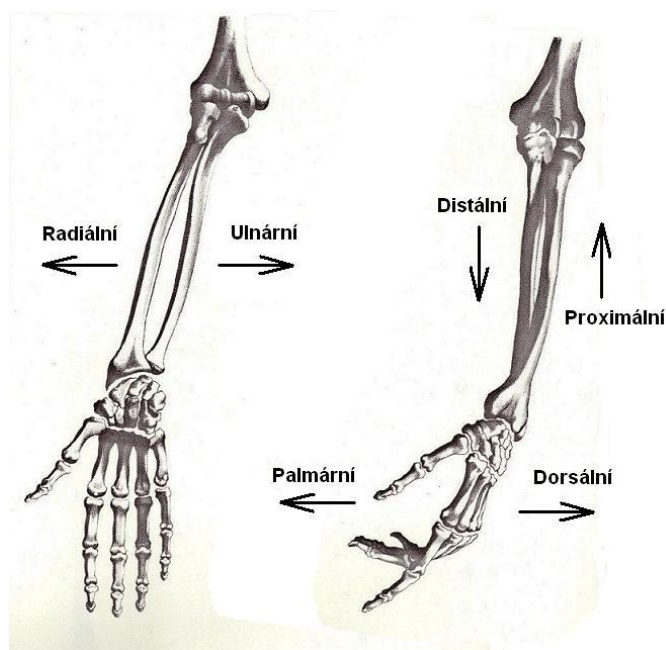
- | | |
|-----------------------------|---|
| <i>Rovina mediánní</i> | - rovina svislá, jde zepředu dozadu a dělí stojící tělo na dvě zrcadlové poloviny |
| <i>Roviny sagitální</i> | - všechny roviny rovnoběžné s rovinou mediální |
| <i>Rovina frontální</i> | - vertikální, kolmá na rovinu mediánní a na roviny sagitální |
| <i>Rovina transversální</i> | - horizontální, probíhá tělem napříč a je kolmá na rovinu mediánní a rovinu frontální |



Obr. 5.1 Základní roviny lidského těla [32]

Směry na horní končetině

- | | |
|-------------------|---|
| <i>Proximální</i> | - směr k trupu |
| <i>Distální</i> | - směr od trupu |
| <i>Radiální</i> | - vnější, směrem od středu (v základním anatomickém postavení) |
| <i>Ulnární</i> | - vnitřní, směrem do středu (v základním anatomickém postavení) |
| <i>Palmární</i> | - dlaňový směr |
| <i>Dorsální</i> | - hřbetní směr |



Obr. 5.2 Směry horní končetiny [33]

5.2 Zápěstí - carpus

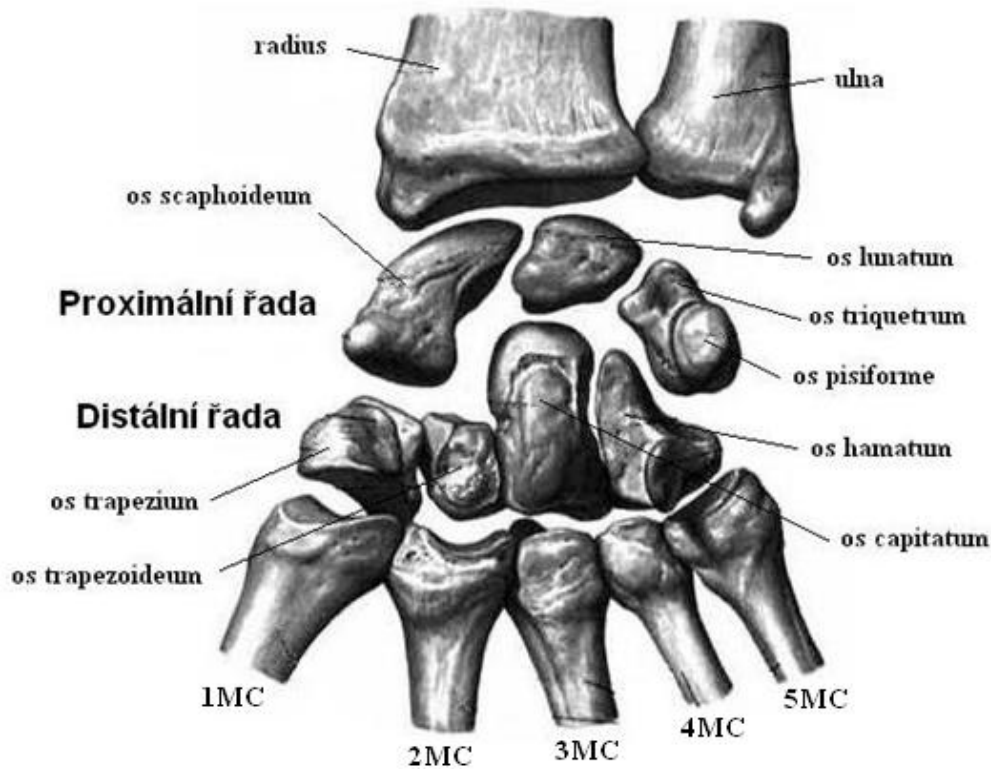
Zápěstí je jedno z nejkomplicovanějších kloubních spojení v lidském těle, které spojuje předloktí s rukou. Toto spojení je složeno z kostí, vazů a šlach, které jsou odpovědné za pohyb a stabilitu zápěstí. Jedním z důvodů složitosti zápěstí je to, že každá karpální kost tvoří kloubní spojení s kostí vedle ní. To znamená, že to, co nazýváme kloubním spojením zápěstí, se vlastně skládá z malých kloubních spojů. Tato kloubní spojení budou popsány v kapitole Klouby zápěstí.

5.2.1 Kostí zápěstí

Kosti zápěstí řadíme dle základní stavby do krátkých kostí. Jejich charakteristikou je nepravidelný tvar, s nepravidelnými kloubními plochami. Krátké kosti mají také na povrchu tenkou vrstvu kompakty (*substantia corticalis*) a hustější spongiosu, která přenáší a rozděljuje tlak na funkčně podmíněné linie spongiosy [12].

Zápěstí se skládají z osmi kůstek, které můžeme rozdělit do dvou řad (proximální a distální). Proximální řada je kloubně spojena s *Radii* a *Ulnou* (kost vřetení a kost loketní) a skládá se z *os scaphoideum* (kost loďkovitá), *os lunatum* (kost poloměsíčitá), *os triquetrum* (kost trojhranná) a *os pisiforme* (kost hrášková).

Distální řada je kloubně spojena s metakarpálními kostmi (dále psáno MC) a skládá se z *os trapezium* (kost mnohohranná větší), *os trapezoideum* (kost mnohohranná menší), *os capitatum* (kost hlavová) a *os hamatum* (kost hákovitá).



Obr. 5.3 Palmární pohled na kosti zápěstí [34]

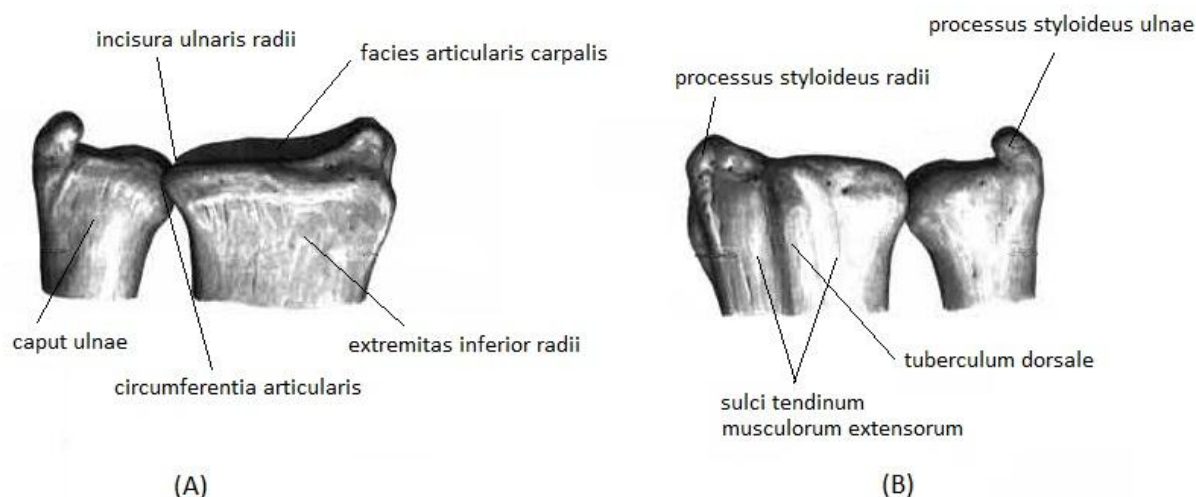
5.2.2 Morfologie zápěstí

Morfologie je vědní obor, který se zabývá tvarem. V biologickém oboru to znamená vnější stavbou organismu. To zahrnuje aspekty jako je tvar, struktura, barvu či vzor. Tento obor je protikladem fyziologii, která se zabývá především funkcí. V této kapitole je tedy popsána stavba jednotlivých kostí v zápěstí.

Morfologie Radii a Ulny

Předloktí horní končetiny tvoří dvě dlouhé kosti (*Radius* a *Ulna*). Jelikož jsou tyto kosti kloubně spojeny i s *humerem* (pažní kost), které tvoří loketní kloub, je morfologie zaměřena pouze na distální část předloktí.

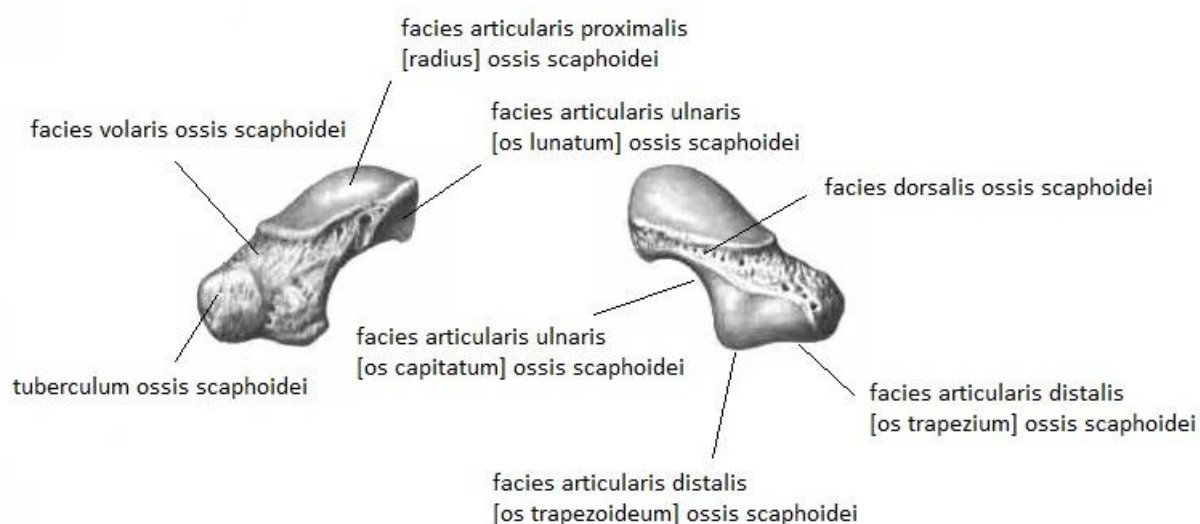
Radius se v předloktí nachází na laterální straně. *Extremitas inferior radii* představuje mohutné rozšíření na distálním konci, které dále laterálně vybíhá v bodcovitý výběžek *processus styloideus radii* sloužící k úponu svalů. Na dorsální straně se nachází dva žlábkové *sulci tendinum musculorum extensorum* pro uchycení šlach extenzorů, které jsou odděleny hrbolečkem *tuberculum dorsale*. Na ulnární straně je válcový zářez *incisura ulnaris radii* pro spojení s *Ulnou*. V kloubní spojení s karpálními kostmi je mírná prohlubeň *facies articularis carpalis* pro *os scaphoideum* a *os lunatum*. *Caput ulnae* (hlavice ulny) má na laterální straně po obvodu *circumferentia articularis* (kloubní plocha) pro spojení s *incisura ulnaris radii*. Na ulnární straně se nachází *processus styloideus ulnae* (bodcovitý výběžek ulny) k němuž je připojen *discus articularis* a ulnární kolaterální vaz [13] [14].



Obr. 5.4 Distální část Radii a Ulny (A) palmární pohled (B) dorsální pohled [34]

Morfologie karpálních kostí

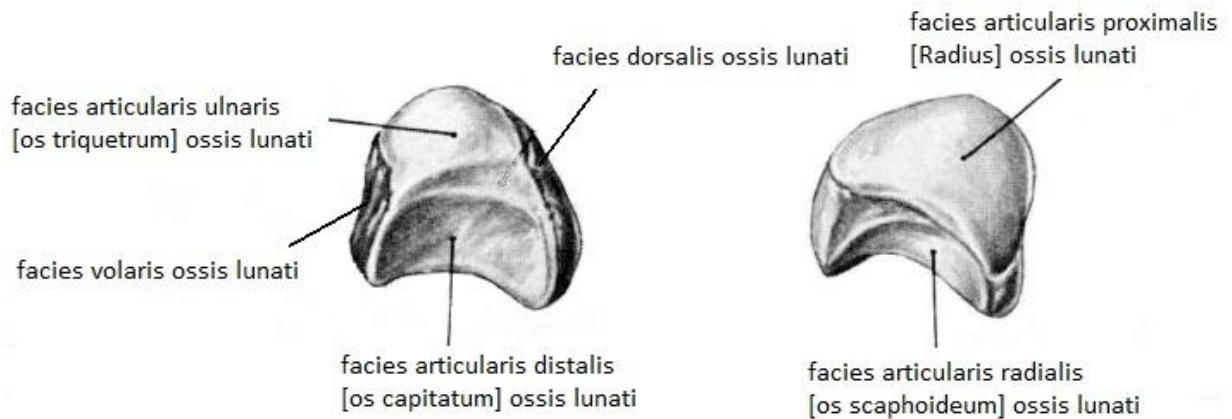
Karpální kosti se skládají z osmi kostí, které dělíme do dvou řad (proximální a distální). V proximální řadě na radiální straně se nachází *os scaphoideum*. Na *os scaphoideum* se nachází pět kloubních plošek, *facies articularis distalis ossis scaphoidei* pro *os trapezoideum*, *facies articularis proximalis ossis scaphoidei* pro *Radius*, *facies articularis ulnaris ossis scaphoidei* pro *os lunatum* a *facies articularis ulnaris ossis scaphoidei* pro *os capitatum*. Uprostřed *os scaphoideum* z proximoulnárního konce na distoradiální je mírně zúžený žlábek *facies dorsalis ossis scaphoidei*. Distálně od *facies articularis proximalis ossis scaphoidei* palmárně vybíhá *tuberculum ossis scaphoidei*, mezi nimiž leží konkávně *facies volaris ossis scaphoidei* [12] [13] [14].



Obr. 5.5 *os scaphoideum* [34]

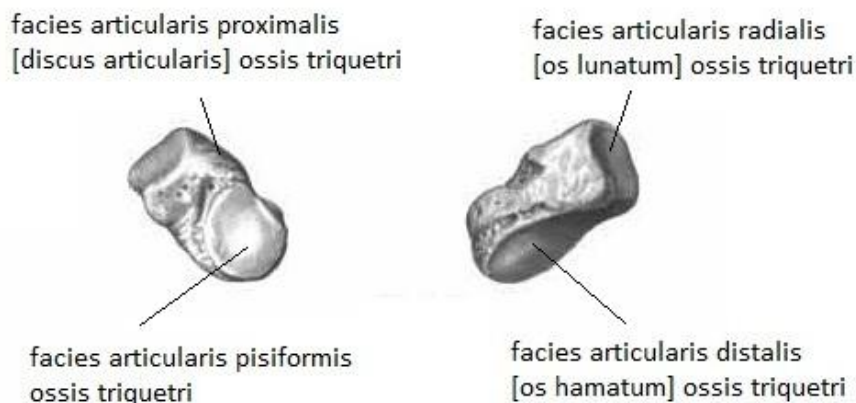
Os lunatum leží uprostřed proximální řady, která má poloměsíčitý tvar. Kost má šest plošek, z toho čtyři jsou potaženy kloubní chrupavkou. *Facies volaris ossis lunati* a *facies dorsalis ossis lunati* nejsou nosné plošky, tudíž nejsou pokryta kloubní chrupavkou. Radiální

ploška, *facies articularis radialis ossis lunati*, je výrazně konkávní, která je v kontaktu s *os scaphoideum*. Tato ploška sousedí s konkávní *facies articularis distalis ossis lunati*, která je ve styku s *os capitatum*. Proximálně od *facies articularis radialis ossis lunati* je *facies articularis proximalis ossis lunati*, které přiléhá na *facies carpalis radii*. *Facies articularis ulnaris ossis lunati* je ulnárně směřující ploška pro *os triquetrum* [4] [12] [13] [14].



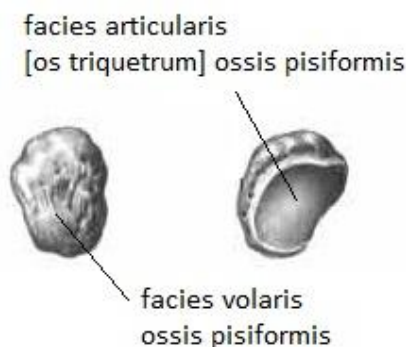
Obr. 5.6 os lunatum [35]

Os triquetrum se nachází ulnárně na straně v proximální řadě zápěstí. Má nepravidelný trojhranný tvar, s oválnou ploškou *facies articularis pisiformis ossis triquetri* pro *os pisiforme*. V radiální části na *facies articularis proximalis ossis triquetri* se stýká s *discus articularis*, který jí odděluje od ulny. Malá rovná, ve tvaru půloválu *facies articularis radialis ossis triquetri* se na radiální straně stýká s *os lunatum*. Ta téměř kolmo přechází na distální směr, lehce zvlněnou *facies articularis distalis ossis triquetri* pro styk s *os hamatum* [4] [13] [14].



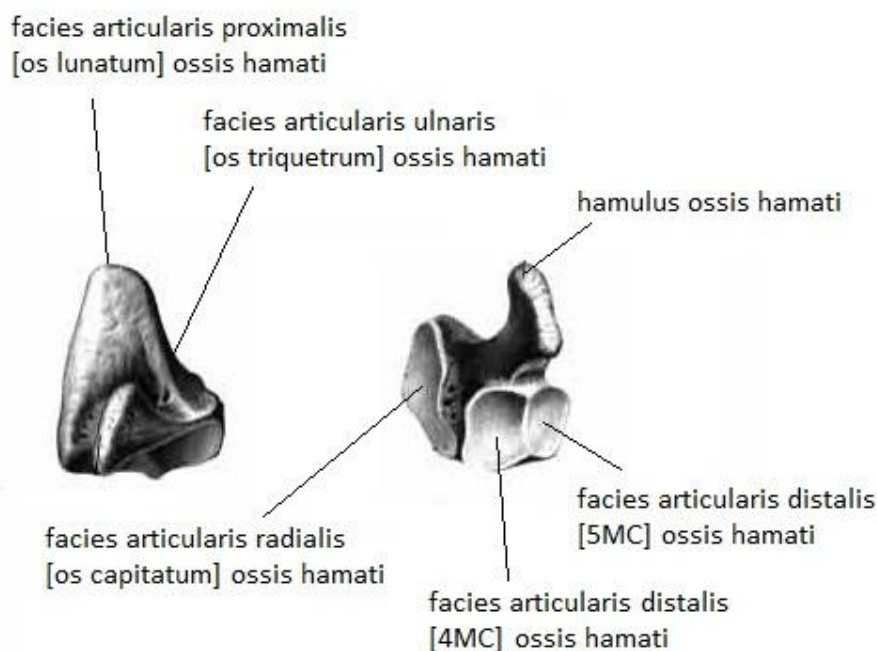
Obr. 5.7 os triquetrum [34]

Os pisiforme má ovoidní tvar o velikosti hrachového zrna. Na mírně konkávní *facies articularis ossis pisiformis* má jediné kloubní spojení s *os triquetrum*. Na palmární straně je silně konvexní *facies volaris ossis pisiformis*. *Os pisiforme* hraje stejnou roli v zápěstí jako česka v koleni [4] [13] [14].



Obr. 5.8 os pisiforme [34]

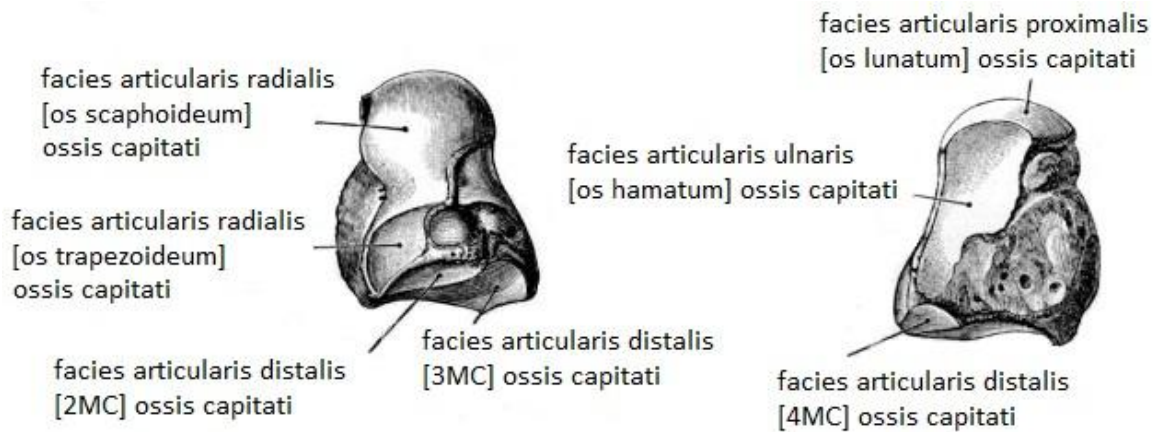
Os hamatum se nachází v distální řadě na ulnární straně. *Os hamatum* je zvláštní hákovitým výběžkem *hamulus ossis hamati* na palmární ploše, na který se upíná *ligamentum pisohamatum*. Při pohledu z dorzální strany má typický klínový tvar. Klín tvoří distální kloubní plochy *facies articularis distalis ossis hamati* určená pro 4MC a 5MC. Na ulnární straně se nachází *facies articularis ulnaris ossis hamati* pro *os triquetrum*. Na radiální straně *facies articularis radialis ossis hamati* je ze tří čtvrtin potažena kloubní chrupavkou určena pro *os capitatum*. Zbývající ploška slouží jako úpon pro *ligamentum capitolhamatum interosseum*. Na *facies articularis proximalis ossis hamati* je zaoblená hrana, na kterou dosedá *os lunatum* [4] [13] [14].



Obr. 5.9 os hamatum [34]

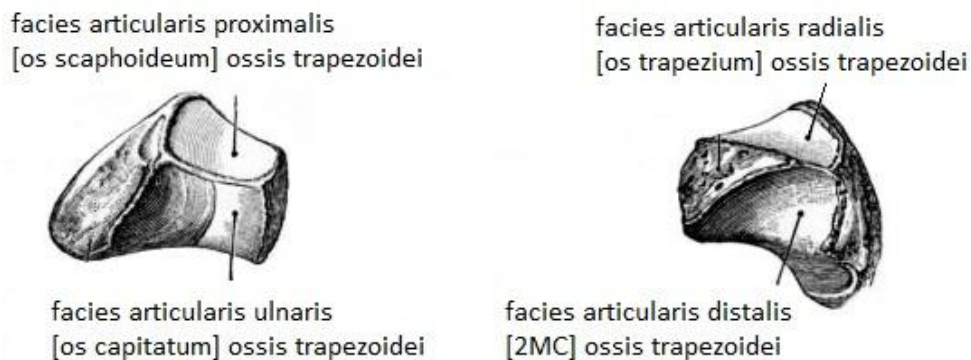
Os capitatum je největší z karpálních kostí. Svůj název dostal podle proximální části, která připomíná hlavici. Celá hlavice je téměř pokryta chrupavkou a lze jí rozdělit na tři fasety *facies articularis proximalis ossis capitati*, *facies articularis radialis ossis capitati*, *facies articularis ulnaris ossis capitati* určené pro *os lunatum*, *os scaphoideum* a *os hamatum*. Mezi fasety pro *os lunatum* a *os scaphoideum* je dobře patrná zaoblená hrana. Faseta pro *os*

hamatum je takřka rovná. Na distální části radiální straně kosti se na *facies articularis radialis ossis capitati*, lichoběžníkového tvaru, stýká s *os trapezoiudeum*. Distální kloubní plocha je oddělena nízkou hranou na ulnární větši, lehce zvlněnou *facies articularis distalis ossis capitati* pro 3MC a *facies articularis distalis ossis capitati* pro 2MC. Na distální straně kosti se také může nacházet drobná *facies articularis distalis ossis capitati* pro 4MC [13] [14].



Obr. 5.10 os capitatum [35]

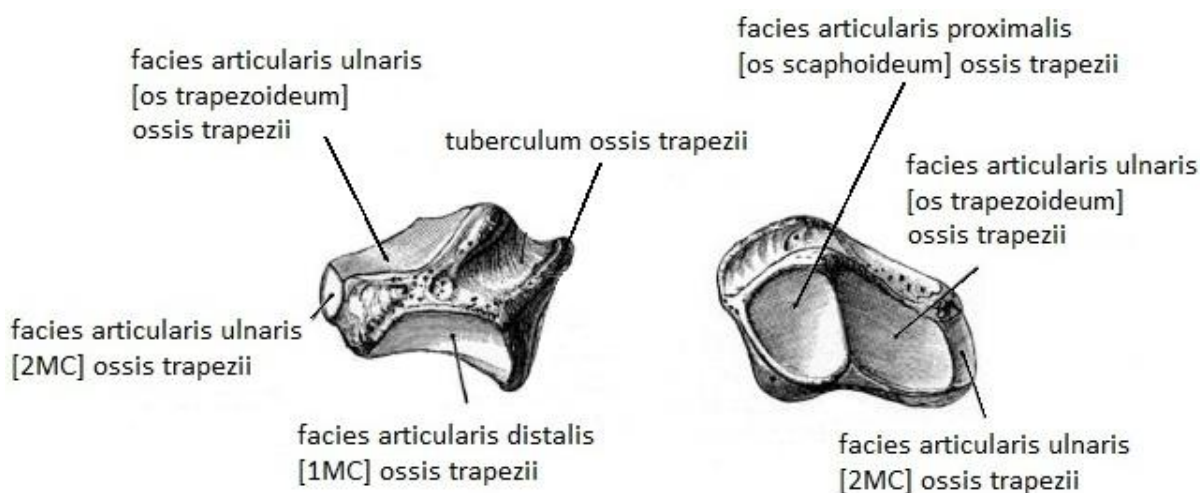
Os trapezoideum je karpální kost složitěho tvaru, jež svým tvarem ze strany připomíná botičku. Na proximální straně se na konkávní *facies articularis proximalis ossis trapezoidei* stýká s *os scaphoideum* a na radiální straně mírně konvexní *facies articularis radialis ossis trapezoidei* s *os trapezium*. Na distální straně, která je od radiální plochy zřetelně oddělena drsnou ploškou, se nachází *facies articularis distalis ossis trapezoidei* pro styk s 2MC. Ulnární, konkávní *facies articularis ulnaris ossis trapezoidei* lichoběžníkového obrysu se stýká s *os capitatum* [13] [14].



Obr. 5.11 os trapezoideum [35]

Os trapezium má, jako předchozí kost, nepravidelný tvar. Charakteristické je pro ni sedlovitě prohloubená *facies articularis distalis ossis trapezii*, která se kloubí s 1MC. Na proximální straně se nachází, čtvercová, lehce konkávní *facies articularis proximalis ossis trapezii* pro *os scaphoideum*. Na ulnární straně je konkávní, lehce zvlněná *facies articularis ulnaris ossis trapezii* pro *os trapezoideum* a distálně od *facies articularis ulnaris [os trapezoideum] ossis trapezii* leží drobná *facies articularis ulnaris ossis trapezii* pro styk hrotu

na 2MC. Distoulnárním směrem vyčnívá mírný hrbolek *tuberculum ossis trapezii* na jehož konci se upínají svaly [13] [14].

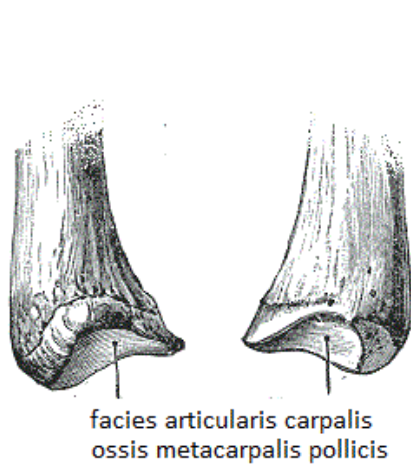


Obr. 5.12 os trapezium [35]

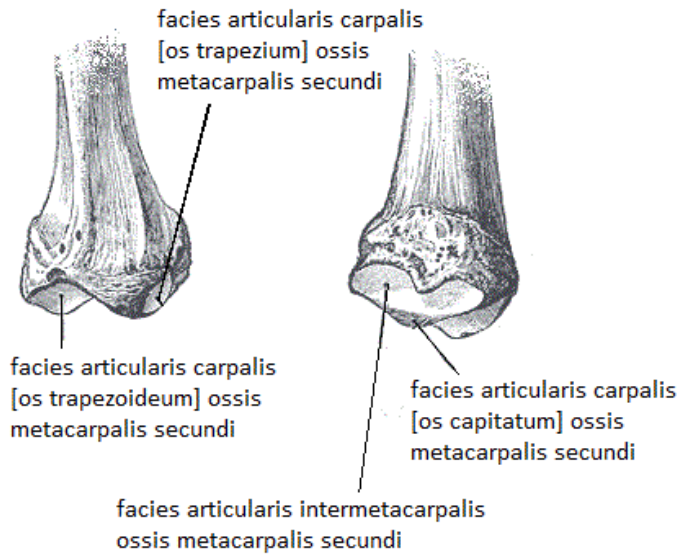
Morfologie metakarpálních kostí

Stejně jako u kostí předloktí, tak i u metakarpálních kostí je popsána část kostí, která je blíže ke karpálním kostem. Jedná se tedy pouze o proximální část metakarpálních kostí.

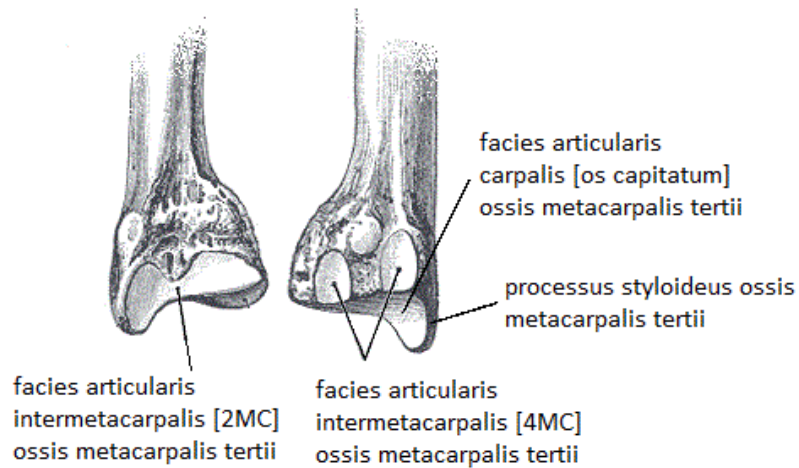
Na 1MC je sedlovitá *facies articularis carpalis ossis metacarpalis pollicis*, která se stýká s *facies articularis distalis ossis trapezii*. Na 2MC se nachází konkávní *facies articularis carpalis ossis metacarpalis secundi* pro *os trapezoideum*, rovná, páskovitá *facies articularis carpalis ossis metacarpalis secundi* pro *os capitatum*, oválná *facies articularis carpalis ossis metacarpalis secundi* pro *os trapezium*. Na ulnární straně se nachází rozsáhlá kloubní ploška *facies articularis intermetacarpalis ossis metacarpalis secundi* se která se stýká s podlouhlou *facies articularis intermetacarpalis ossis metacarpalis tertii* na 3MC. 3MC se stýká s karpální kostí *os capitatum* na mírně konkávní *facies articularis carpalis ossis metacarpalis tertii*. Na dorsální straně dorsoradiálně vybíhá *processus styloideus ossis metacarpalis tertii*, na který se upíná sval. Na ulnární straně se nachází dvě oválné *facies articularis intermetacarpalis ossis metacarpalis tertii* pro kontakt dvou oválných *facies articularis intermetacarpalis ossis metacarpalis quarti* na 4MC. Na rovné *facies articularis carpalis ossis metacarpalis quarti* se 4MC stýká s *os hamatum*. Na radiální straně 4MC se nachází obvykle poloměsíčitá *facies articularis intermetacarpalis ossis metacarpalis quarti* pro kontakt s *facies articularis intermetacarpalis ossis metacarpalis quinti* na 5MC. Proximální část na 5MC je sedlovitě prohnutá *facies articularis carpalis ossis metacarpalis quinti* pro skloubení s *os hamatum*. Na ulnární straně se nachází *tuberculum ossis metacarpalis quinti* pro úpon svalu [13].



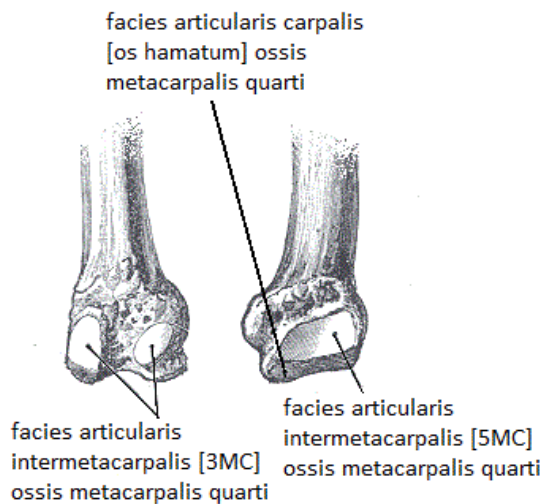
Obr. 5.13 1MC (proximální část) [36]



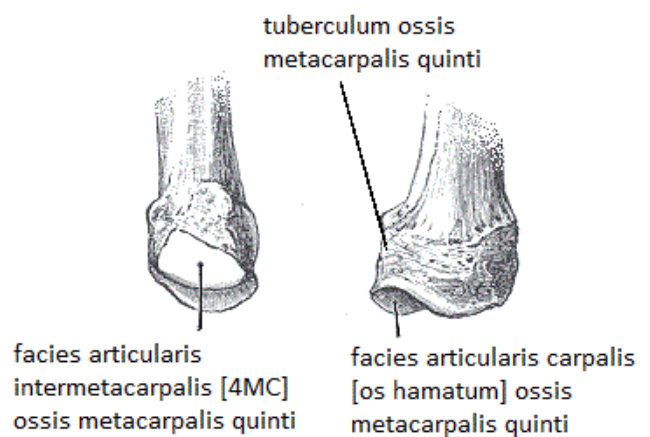
Obr. 5.14 2MC (proximální část) [36]



Obr. 5.15 3MC (proximální část) [36]



Obr. 5.16 4MC (proximální část) [36]

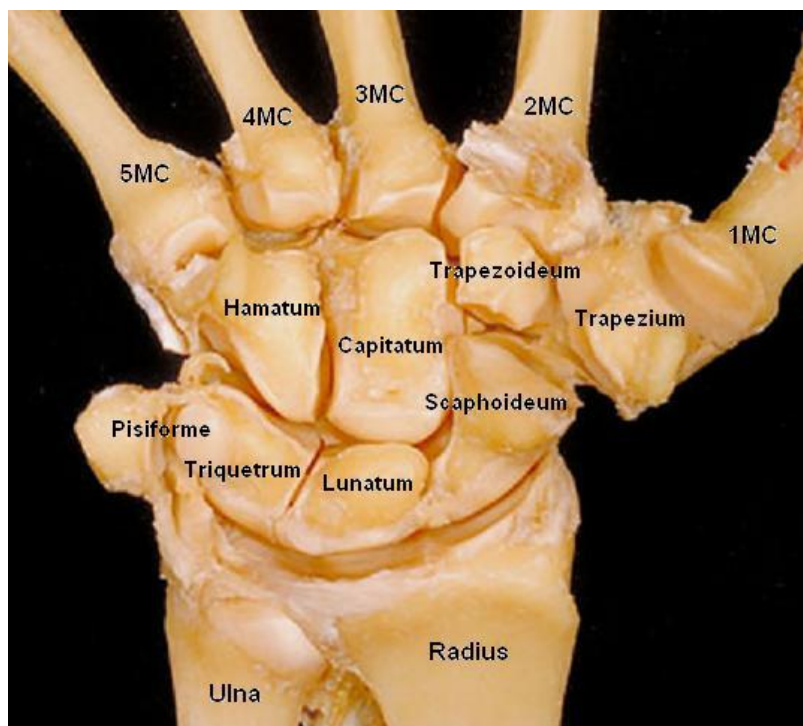


Obr. 5.17 5MC (proximální část) [36]

5.2.3 Chrupavka

Kloubní chrupavky pokrývají povrchy kloubních spojení. Jelikož kosti zápěstí tvoří komplex kloubních spojů, nachází se kloubní chrupavka převážně na celém povrchu jednotlivých kůstek (Obr. 5.5). Kloubní chrupavku tvoří hyalinní chrupavka, která neobsahuje krevní a mízní cévy a jsou bez nervů. Chrupavka je složena ze tří vrstev (*perichondrium*, *chondroblasty* a *chondrocyty*), které obsahují především kolagen a elastin a vytváří pórovitou strukturu. Tato struktura je vyplněna synoviální tekutinou [15].

Kromě přenášení tlakového zatížení v kloubním spojení kostí a tlumení rázových zatížení má důležitou funkci pro snižování koeficientu tření mezi styčnými plochami kostí, stýkajících se v kloubním spojení. Při pohybu v kloubu dochází ke kombinaci valení a tření. Při tření je ve styku stále stejná oblast jednoho tělesa v průběhu vzájemného pohybu po povrchu tělesa druhého. Důležité je si uvědomit, že velikost třecí síly nezávisí na velikosti styčných ploch, pouze na velikosti normálové síly a koeficientu tření. Chrupavka spolu se synoviální tekutinou výrazně snižuje koeficient tření mezi kloubními plochami, které jsou ve vzájemném styku.



Obr. 5.18 Kloubní chrupavky v zápěstí [37]

5.2.4 Klouby zápěstí

I když je zápěstí složené z nepravidelných kůstek, které mezi sebou vytvářejí různé tvarové kloubní spojení, lze tyto spoje rozdělit do čtyř celkových kloubních ploch.

- Radiokarpální kloub

- Mediokarpální kloub
- Karpometakarpální kloub
- Mezičláňkové klouby

Radiokarpální kloub – *Articulationes radiocarpalis*

Kloub se nachází na distálním konci předloktí a proximální řady zápěstí. Jamka skloubení je na distálním konci radia tvořena dvěma sousedícími plochami pro os scaphoideum a os lunatum. Jamka ulnářně pokračuje jako povrch *discus articularis*, který vyplňuje prostor mezi ulnou a os triquetrum. Tímto vložení je ulna vyřazena z přímého skloubení s karpálními kostmi. Hlavice skloubení je složena z os scaphoideum, os lunatum a os triquetrum. Tato sestava má podobu eliptické plochy [12].

Mediokarpální kloub – *Articulationes Mediocarpalis*

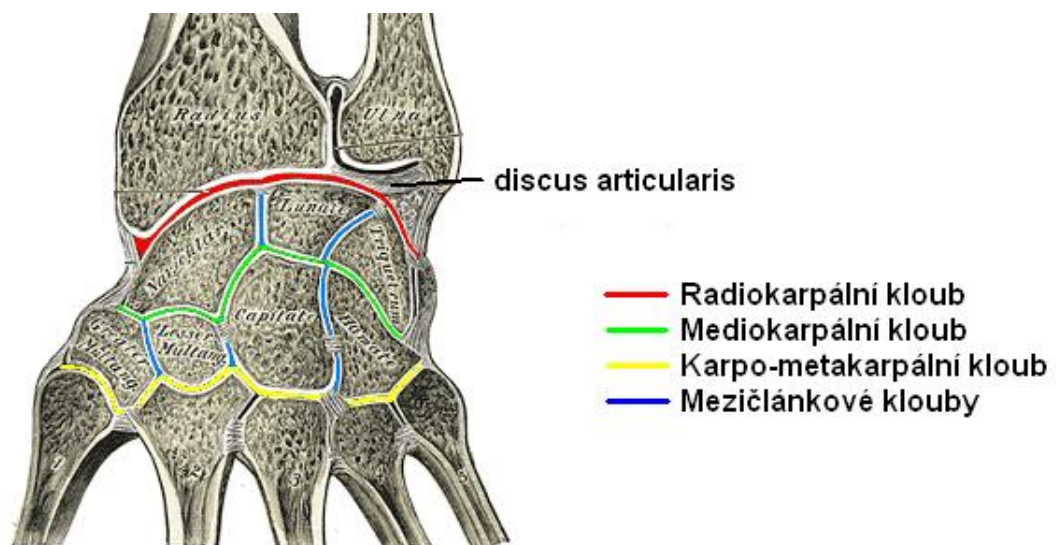
Mediokarpální kloub je skloubení proximální řady s řadou distální. Je tvořena komplexem několika kloubů. Tvary kloubních ploch jsou mnohem složitější než je tomu u radiokarpálního kloubu. To je způsobeno individuálním tvarem jednotlivých kůstek. Z dorsálního pohledu má kloub tvar písmene S [12].

Karpometakarpální kloub – *Articulationes carpometarpales*

Klouby karpometakarpální z anatomického hlediska patří do kloubů zápěstí, ovšem z funkčního hlediska s výjimkou 1MC jsou prakticky nepohyblivé. Tohle spojení je doplněno intermetakarpální kloubem (*articulationes intermetarpales*), který vzájemně spojuje 2MC až 5MC [14].

Mezičláňkové klouby – *Articulationes intercarpales*

Tyto klouby vykazují menší pohyblivost. Hlavním úkolem kloubů je fixace jednotlivých sloupců kůstek. K této fixaci přispívá i kloubní pouzdra a vazy [12].



Obr. 5.19 Klouby zápěstí [38]

5.2.5 Vazy

Kloubní pouzdra kloubů uvedených v předchozí kapitole jsou poměrně slabá, a proto hlavní význam pro stabilitu zápěstí mají zesilující vazy. Ovšem vazy v zápěstí jsou poněkud odlišné oproti vazům, jaké můžeme vidět např. u kolene či ramene. Je to proto, že vazy u zápěstí jsou zabudovány do kloubního pouzdra nebo se nachází intraartikulárně v těsném prostoru mezi jednotlivými kůstkami [14].

Vazů v zápěstí je velká řada a lze je dělit podle jejich genetického původu (*intrinsické* a *extrinsické*), podle lokalizace (*palmární* a *dorsální*, *radiokarpální* a *medioarpální*) nebo podle funkce (*vedoucí – guidinga omezující – constraining*) [14].

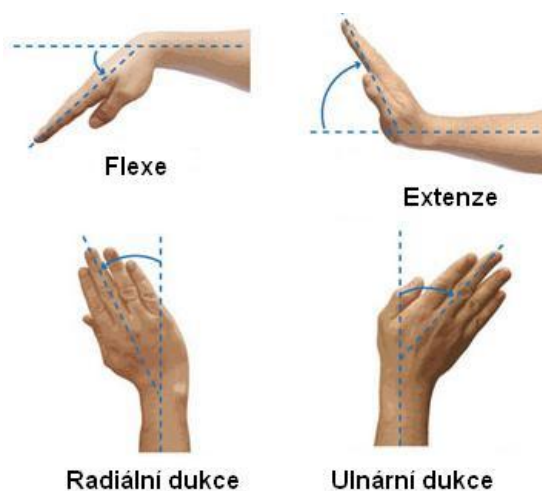
5.2.6 Pohybové možnosti zápěstí

Zápěstí, jakož to kloubní spojení předloktí s rukou, umožňuje různé pohyby ve velkém rozsahu. Tyto pohyby můžeme rozdělit na:

- flexi a extenzi
- radiální a ulnární dukci
- cirkumdukci (kombinace předchozích pohybů)

Flexe a extenze představuje rotaci *os capitatum* a *os lunatum*. Pohyb ostatních kostí v zápěstí je bezvýznamný. Celkový rozsah flexe se pohybuje v rozmezí 80 až 90 stupňů a extenze 70 stupňů. *Os capitatum* a *os lunatum* leží v proximální a distální řadě a je třeba si uvědomit, že na tyto řady nejsou upnuty žádné ze svalů vykonávající pohyb. Flexory a extenzory se upínají na 2. 3. a 5. MC a tah těchto svalů je přenášen přes nepohyblivý karpometakpální kloub [14] [16].

Radiální a ulnární dukce pohybuje proximální a distální řadou ulnárně a radiálně. Při radiální dukci se posouvá distální řada radiálně a proximální řada ulnárně. Při ulnární dukci je pohyb řad opačný. Rozsah těchto pohybů dosahuje při radiální dukci 15 až 20 stupňů a při ulnární dukci 45 stupňů. Při radiální a ulnární dukci se mění postavení *os scaphoideum*. Tento pohyb kůstky využívají lékaři na rtg snímku, při podezření na zlomeninu skafoidea [14] [16].



Obr. 5.20 Pohyby zápěstí [39]

6. Artroplastika zápěstí

Artroplastika je chirurgická oprava kloubu, kdy se nahrazuje pohybový kloubní aparát nebo se provádí osteotomie. Tento zákrok se provádí za účelem úlevy od bolesti a obnovení funkčnosti kloubů, které jsou postižené revmatoidní artritidou nebo jiným traumatem. I když artroplastika je dobře zavedená procedura pro mnoho kloubů, její použití v zápěstí je méně časté. V zápěstí lze provádět řadu artroplastických zákroků. Jedno z možných řešení je resekční artroplastika, kdy se odstraní část kloubu. Resekční artroplastiku lze provádět na karpometakarpálním kloubu (CMC) u pacientů s těžkou artrózou. U pacientů s revmatoidní artritidou či frakturou zápěstí je standardním postupem artrodéza. Lze také provádět totální artroplastiku zápěstí, kdy je nahrazeno kloubní spojení. Při totální artroplastice zápěstí ovšem nelze duplikovat mechanismus, který zahrnuje mnoho kloubních spojů mezi Radii, Ulnou a karpálními kostmi. Nejběžnější náhrada kloubního spojení při totální artroplastice zápěstí, je aplikace endoprotézy [21] [22] [23] [24].

6.1 Zápěstní implantáty

I když první implantát byl navržen chirurgem Themistocles Gluckem v roce 1890, který byl vyroben ze slonoviny, byla artroplastika zápěstí uplatněna až s příchodem implantátu Swanson v roce 1960. Tento implantát se skládá z jednoho kusu, kde kloubní komponent byla vyrobena ze silikonové pryže (Obr. 6.1). Proximální dřík zapadal do dřevňového kanálu v Radiu a distální dřík procházel otvorem v os capitatum do dřevňového kanálu v 3MC. I když tento implantát poskytuje dostatečný rozsah pohybů zápěstí, potýká se s problémem, kdy 50% pacientům se po 72 měsících navrátila bolest, která byla způsobena uvolňováním dříku v dřevňovém kanálu. Vzhledem k těmto komplikacím byl tento implantát značně omezen u pacientů s náročnými požadavky a je aplikován u starších pacientů [5] [23] [25].



Obr. 6.1 Implantát Swanson [25]

První opravdová artroplastika zápěstí přišla s implantátem Mueli (Obr. 6.2) a Volz (Obr. 6.3) v roce 1970. Konstrukce implantátu Mueli byla provedena v řadě verzí, avšak tento implantát se skládá ze dvou komponent a je vyroben z kovového materiálu (titanové slitiny). U tohoto implantátu už nedocházelo k axiálnímu posuvu, který bývá u implantátu Swanson. Radiální komponent obsahuje kulovou hlavici a dva dříky, které artikulují do dřevňového kanálu Radiu. Hlavice radiálního komponentu zapadá do jamky karpálního komponentu, kde zdvojený dřík artikuluje do 2MC a 3MC. Podobnou konstrukci představuje implantát Volz, kde na radiálním komponentu je kulová hlavice s dvěma poloměry zakřivení. Toto provedení

bylo jedno z prvních pokusu o dvouosý pohyb implantátu. I když z počátku tento implantát obsahoval dva dřívky na distálním komponentu pro artikulaci s 2MC a 3MC, následně byl karpální komponent nahrazen jedním dřívkem, který skrz os capitatum artikuluje do 3MC. Radiální část je vyrobena z chromové slitiny kobaltu s polyetylenovým konkávním povrchem. Při aplikaci obou implantátů je zapotřebí velké množství kostní resekce pro vložení. Přes slibné první výsledky, i tyto implantáty nakonec vykazovaly velkou míru uvolňování komponent z dřevného kanálu, které vedlo k prasknutí implantátu. Nevýhodou těchto implantátů je i přesné centrování protézy při aplikaci v zápěstí, které je nezbytné pro dobrou funkci [5] [25] [26].



Obr. 6.2 Implantát Mueli [25]



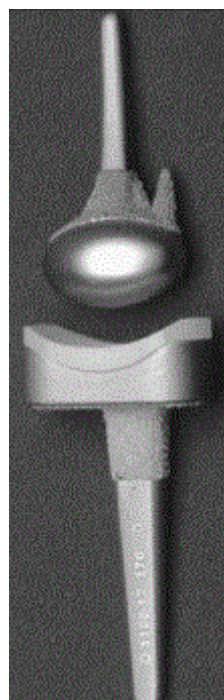
Obr. 6.3 Implantát Volz [25]

Inovací endoprotéz bylo provedení dvouosého implantátu, který měl elipsoidní tvar hlavice. V roce 1979 zkonstruoval Guépar necementovaný implantát. Tento implantát byl opět zkonstruován ze dvou částí vyrobených z kovu a polyetylenu (Obr. 6.4). Implantát byl na karpální části fixován pomocí šroubů, které byly šroubovány do 2MC a 3MC. Radiální část byla cementována do dřevného kanálu v Radiu. V letech 1978 až 1982 byl vyvinut Beckenbaughem dvouosý implantát (BIAX) s podobnou konstrukcí, kde kloubní spoj byl elipsoidního tvaru (Obr. 6.5). Radiální část implantátu byla necementována. Distální část tvoří velký dřív, který je artikulován do 3MC a malý dřív, který artikuluje do os trapezoideum. Z výsledných revizí pacientů s arthroplastikou s těmito implantáty byly zjištěny výrazně lepší výsledky, než u předešlých implantátů. Od doby Swansonova implantátu došlo i k řadě dalších provedení implantátů, které byly obdobné konstrukce jako předchozí implantáty. Jedním z provedení představuje implantát Menon, který byl navržen v roce 1980 Jay

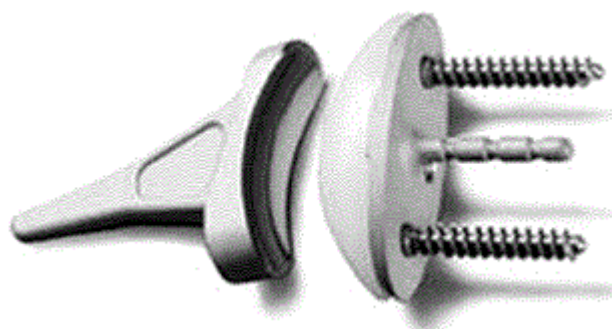
Menonem. Tento implantát má podobnou konstrukci jako u implantátu Guépar. Avšak při aplikaci tohoto implantátu je prováděna menší resekce kostí. Implantát prošel řadou inovací a je dnes nejčastěji používán [5] [25] [27].



Obr. 6.4 Implantát Guépar [25]



Obr. 6.5 Implantát Biax [25]



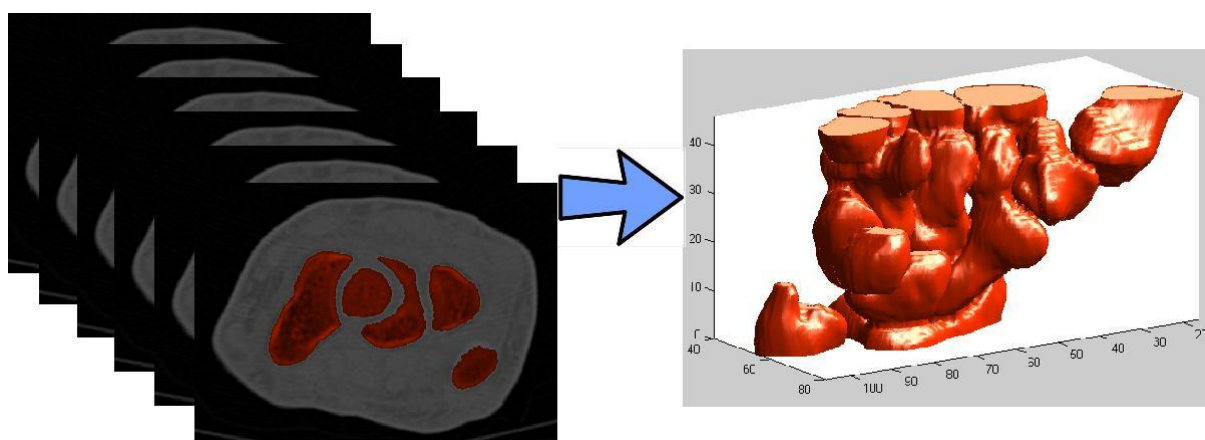
Obr. 6.6 Implantát Menon [25]

7. Výpočtové modelování

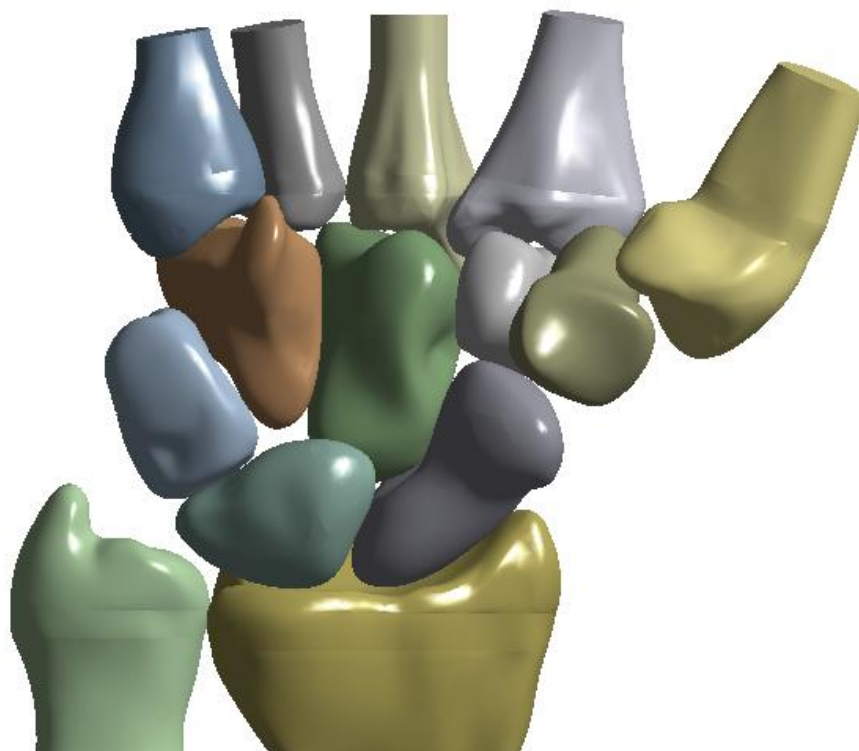
V následující kapitole bude popsán postup tvorby výpočtového modelu za pomoci výpočtového modelování. Vytvoření výpočtového modelu, bude zapotřebí vytvořit čtyři dílčí modely. Model geometrie, model materiálu, model vazeb a zatížení a konečno-prvkový model.

7.1 Model geometrie

Pro vytvoření modelu geometrie je zapotřebí CT snímky s karpálními kostmi. CT záznam je pořízen v neutrální poloze, který obsahoval 46 snímků s tloušťkou 1 mm a rozlišení jednotlivých snímků 512x512 pixelů. CT snímky jsou načteny do programu STL Model Creator, který byl vytvořen kolektivem doktorandů na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Přes manuální segmentaci obrazu jsou vybrány z CT snímku pouze ty oblasti, které náleží kostní tkáni. Po segmentaci všech jednotlivých kostí je vygenerována polygonální síť, která je uložena do formátu STL. Jelikož polygonální síť popisuje pouze povrch tělesa, je potřeba převést jednotlivé kosti na objemová tělesa. Proto je STL formát exportován do CAD softwaru Catia. V modulu Digitized Shape Editor jsou za pomoci příkazů Mesh Smoothing a Automatic surface vyhlazeny a následně převedeny STL modely na objemová tělesa. V dalším softwaru SolidWork je také zapotřebí vymodelovat kosti, které z CT snímku nebyly dostatečně vyobrazeny. Jednalo se především o 1 - 5MC, Radius a Ulnu.



Obr. 7.1 Tvorba STL modelu



Obr. 7.2 Model geometrie

Jelikož CT snímky neobsahují měkké tkáně, mezi které patří i chrupavka, jsou za pomoci anatomie vymodelovány plochy na jednotlivých kostech. Plochy jsou následně převedeny na objemové těleso, které představují chrupavky.



Obr. 7.3 Model chrupavky

7.2 Model materiálu

Určení materiálových charakteristik biologické tkáně je velice obtížné. Veškeré biologické materiály vykazují různé mechanické vlastnosti, které jsou ovlivněny svojí strukturou, lokalizací, směrem zatěžování, historií zatěžování, atd. To způsobuje, že tkáně mají nelineární chování. Ve výpočtovém modelu byl použit homogenní, izotropní, lineárně pružný materiál, kde každý dílčí model materiálu (kortikální tkáň, spongiózní tkáň, chrupavka, vazy) je definován různými materiálovými charakteristiky (E , μ). Tyto modely materiálů a vlastnosti byly převzaty z řad studií, které přibližně popisují chování všech tkání a jsou popsány v jednotlivých podkapitolách.

7.2.1 Kostní tkáň

Kosti zápěstí jsou složeny z kortikální a spongiózní tkáně, které mají odlišnou strukturu. Kortikální tkáň tvoří tvrdou a pevnou strukturu, která vytváří dostatečně tuhou oporu pro tlakové a tahové namáhání. Spongiózní tkáň má trámečkový charakter. Trámečky jsou orientovány do směru hlavních napětí. Obě při mechanickém namáhání vykazují nelineární chování. Ve většině publikovaných biomechanických studií byla kortikální i spongiózní kostní tkáň modelována homogenním, izotropním, lineárně pružným modelem materiálu (Hookovský model materiálu). Vzhledem k tomu, že předložená diplomová práce je jednou z prvních prací z oblasti biomechaniky ruky, řešených na ÚMTMB, byl pro model materiálu použit Hookovský model materiálu. Materiálové charakteristiky, které byly převzaty z literatury [30] [31], jsou uvedeny v tab. 7.1.

Kostní tkáň	Modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo μ [-]
Kortika	18000	0,2
Spongióza	100	0,25

Tab. 7.1 Materiálové vlastnosti kostní tkáně

7.2.2 Chrupavka

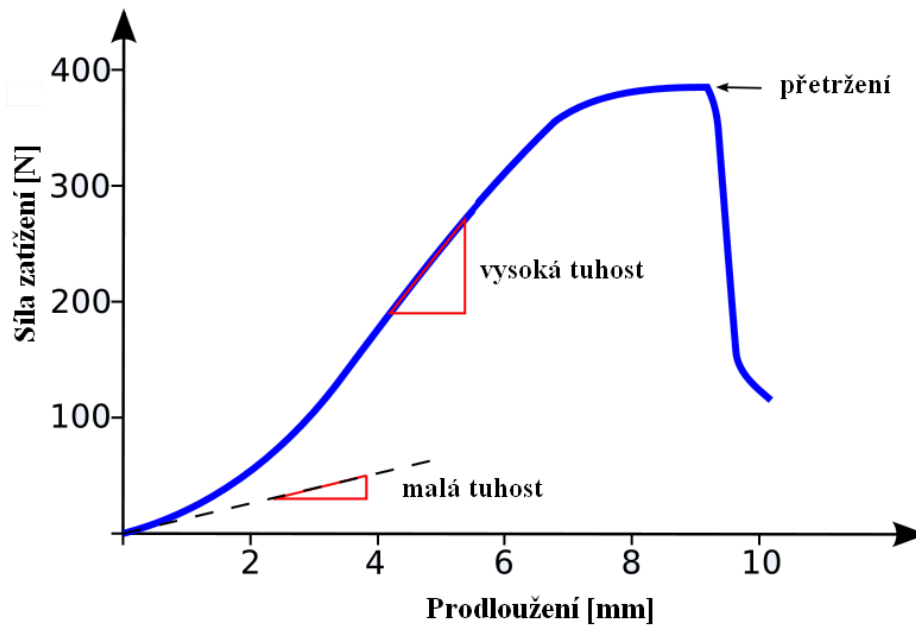
Zdravá kloubní chrupavka je pevná a pružná. Tlumí rázy, zabraňuje lokálnímu namáhání povrchu kloubu a chrání povrch kosti. Chrupavka je vyživovaná synoviální tekutinou, která při cyklickém namáhání je nasávaná a vytlačovaná z chrupavky. Spolu se synoviální kapalinou chrupavka snižuje pasivní odpor artikulujících ploch.

Ve výpočtovém modelu byla chrupavka modelována Hookovským materiálem. Materiálové charakteristiky byly převzaty z literatury [29] [30]. Předepsaná hodnota modulu pružnosti v tahu $E = 10$ MPa a poissonovo číslo $\mu = 0,45$ [-].

7.2.3 Vazy

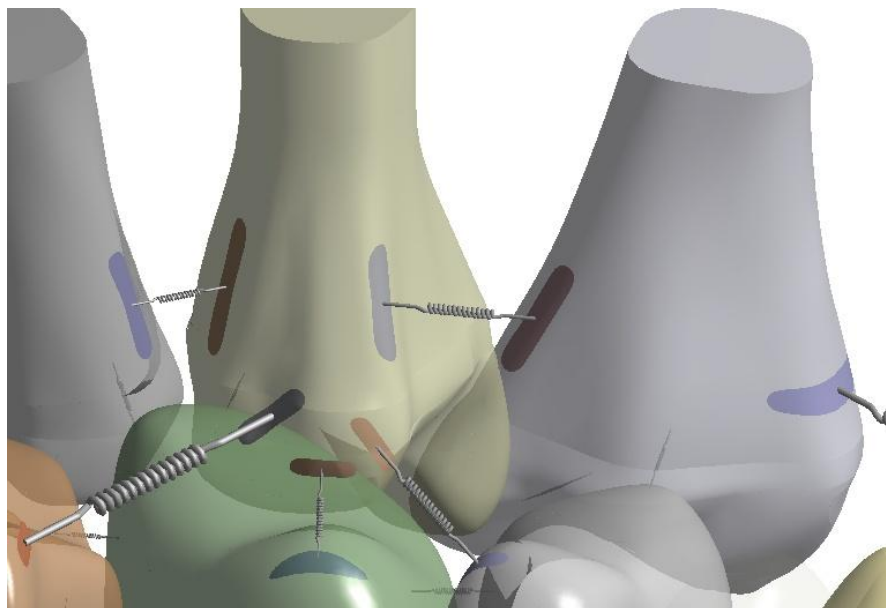
Závislost mezi zatěžující silou a prodloužením vazy je nelineární. K tomuto závěru došli autoři všech studií zabývajících mechanickými vlastnostmi vazů. Na obr. 7.4 je tato závislost pro konstantní sílu s nositelkou rovnoběžnou s vlákny vazy. Ve výpočtovém modelu

(v předložené práci) byl použit model homogenní, izotropní, lineárně pružný. Tuhosti odpovídající pracovní oblasti jednotlivých vazů, jsou převzaty z literatury [28] [31].



Obr. 7.4 Charakteristika zatížení vazů [40]

Zápěstí obsahuje přibližně šedesát vazů [28]. Do výpočtového modelu je zahrnuto pouze čtyřicet vazů, které jsou postačující z hlediska stability zápěstí v neutrální poloze. Modely vazů jsou uchyceny na kostech pomocí ploch v místech odpovídajících anatomické poloze úponů vazů. Na obrázku 7.5 jsou vidět příslušné plochy a modely vazů. V tabulce 7.2 jsou uvedeny hodnoty tuhostí jednotlivých vazů, které byly použity ve výpočtovém modelu.



Obr. 7.5 Vazby v modelu geometrie

Název vazů	spojení		Tuhost (N/mm)
Ligamenta metacarpaliapalmaria	Spoj mezi jednotlivými MC		100
Palmar carpometacarpal	Hamatum	5MC	100
Palmar carpometacarpal	Hamatum	3MC	100
Palmar carpometacarpal	Capitatum	3MC	100
Palmar trapeziometacarpal	Trapezoideum	1MC	24
Palmar hamatecapitate	Hamatum	Capitatum	325
Palmar apitatetriquetral	Capitatum	Triquetrum	300
Palmar hamatetriquetral	Hamatum	Triquetrum	50
Palmar capitatetrapezoid	Capitatum	Trapezoideum	300
Radialarcuate	Capitatum	Scaphoideum	40
Palmar trapezio-trapezoid	Trapezium	Trapezoideum	300
Scaphotrapezial	Scaphoideum	Trapezium	150
Volar lonotriquetral	Lunatum	Triquetrum	350
Ulnotriquetral	Triquetrum	Ulna	40
Ulnolunate	Lunatum	Ulna	40
Shortradiolunate	Lunatum	Radius	75
Palmar scapholunate	Scaphoideum	Lunatum	230
Radial collateral carpal	Scaphoideum	Radius	10
Palmar trapeziometacarpal	Trapezium	Radius	24
Dorsal carpometacarpal	Hamatum	5MC	300
Dorsal intercarpal	Hamatum	Triquetrum	300
Dorsal carpometacarpal	Hamatum	4MC	300
Dorsal carpometacarpal	Capitatum	4MC	300
Dorsal carpometacarpal	Capitatum	3MC	300
Capitohamate	Capitatum	Hamatum	325
Capitotrapezial	Capitatum	Trapezoideum	300
Dorsal carpometacarpal	Trapezoideum	2MC	100
Dorsal intercarpal	Trapezium	Trapezoideum	110
Dorsal carpometacarpal	Trapezium	1MC	100
Dorsal radiotrapezium	Trapezium	Radius	50
Dorsal intercarpal	Scaphoideum	Trapezoideum	150
Dorsalradioscaphoid	Scaphoideum	Radius	40
Dorsal intercarpal	Capitatum	Scaphoideum	150
Dorsal intercarpal	Capitatum	Lunatum	150
Dorsal intercarpal	Scaphoideum	Lunatum	230
Dorsal radiolunate	Lunatum	Radius	75
Dorsal radiotriquetrum	Triquetrum	Radius	27

Tab. 7.2 Tuhosti jednotlivých vazů

7.3 Model vazeb a zatížení

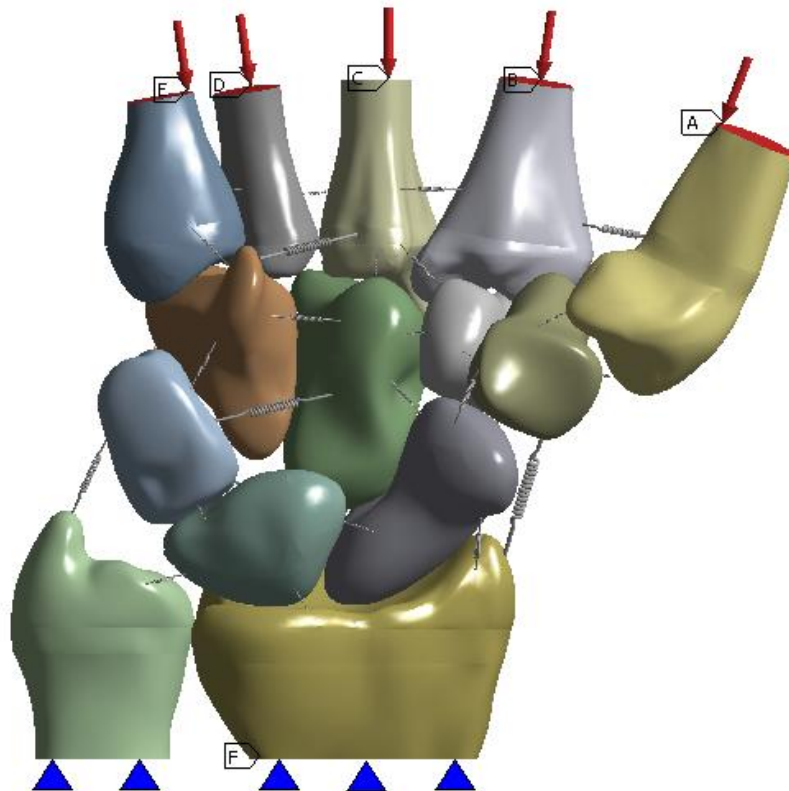
V řešeném stavu se ruka vzhledem k radiu a ulně nepohybuje. Také jednotlivé kůstky zápěstí se vzájemně nepohybují. Celá ruka i jednotlivé kůstky jsou ve statické rovnováze.

Statická rovnováha je zajištěna vazbami. Pokud deformace ulny a radiu je nepodstatná a ulna s rádiem se v řešeném stavu nepohybují, pak mají vlastnosti základního tělesa. Uvedený stav je modelován vhodnými okrajovými podmínkami. V místě styku (kloubní chrupavky) mezi jednotlivými kůstkami je modelován kontaktem s koeficientem tření 0.3. Modely vazeb vazů mezi jednotlivými prvky byly popsány v předchozí kapitole.

Mechanická interakce mezi ossa metacarpi a ossa digitorum manus (zatížení) je vyjádřena rozloženým silovým působením s konstantní hodnotou. Hodnoty na jednotlivých ossa metacarpi byly převzaty z literatury [8] a jsou uvedeny v tabulce 7.3.

	1MC	2MC	3MC	4MC	5MC
Zatížení (MPa)	0,20	0,16	0,13	0,15	0,09

Tab. 7.3 Zatížení na metakarpálních kostech



Obr. 7.6 Model zatížení a vazeb

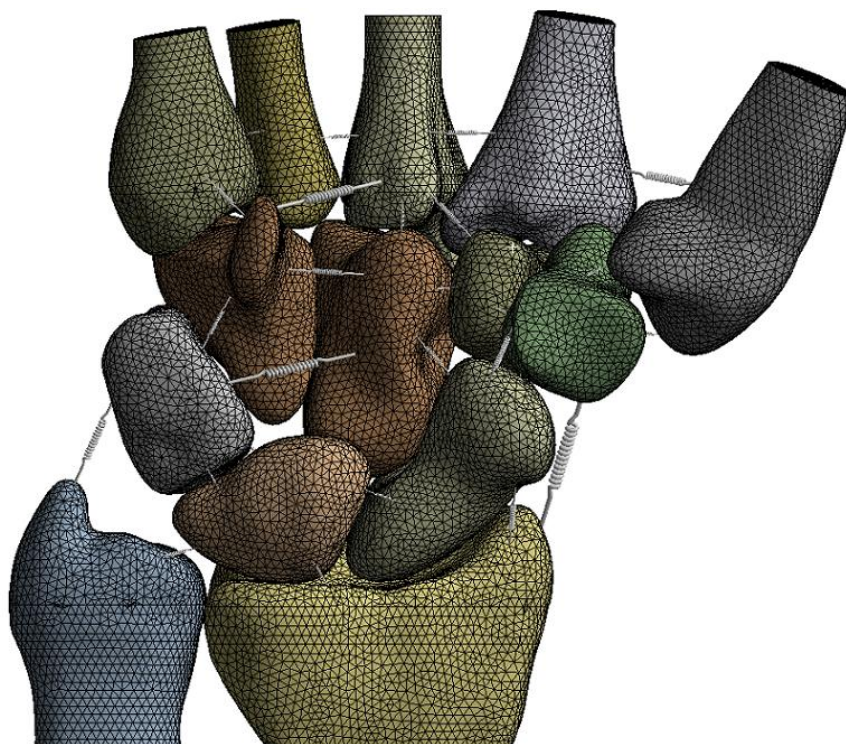
7.4 Konečno-prvkový model

V dalším kroku je třeba provést diskretizaci modelu geometrie. Diskretizaci je provedena generací konečno-prvkové sítě ve výpočtovém softwaru ANSYS 14.5. Při generaci sítě je použito 5 typů MKP prvků: SOLID 185, SHELL 181, LINK 180, CONTA 174 a TARGE 170.

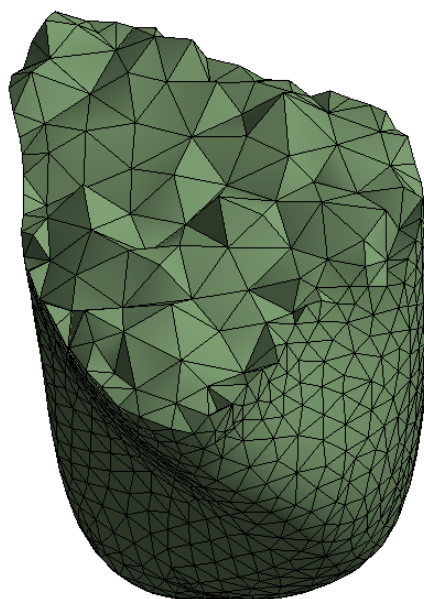
Prvek SOLID 185 je objemový čtyřboký prvek s počty uzlů 4, kde v každém uzlu jsou tři stupně volnosti. Prvek SHELL 181 je 4 uzlový skořepinový prvek se šesti stupni volnosti v každém uzlu. LINK 180 je 3D prutový prvek se třemi stupni volnosti. V modelu je prvek nastaven pouze pro tahové zatížení. CONTA 174 a TARGE 170 jsou kontaktní prvky.

Kvůli značně nepravidelné geometrii kostí jsou vytvořeny mezi chrupavkou a kostí kontakty typu FRICTIONAL, které zahrnují koeficient tření s hodnotou 0,3. U chrupavek na metakarpálních kostech musel být aplikován na jedné straně chrupavky kontakt typu BONDED.

MKP model obsahuje 182 712 prvků a 45 308 uzlů. Na povrchu kostí je vytvořena síť skořepinových prvků SHELL 181 o velikosti prvku 1 mm s definovanou tloušťkou 1,5 mm, modelující vrstvu kortikální kostní tkáně. Objemové prvky na spongiózní tkáni mají velikost 2 mm. Velikost prvků na chrupavkách je 2 mm.



Obr. 7.7 MKP model zápěstí



Obr. 7.8 MKP model spongiózní tkáně

8. Analýza výsledků

V této kapitole byla provedena deformačně napěťová analýza řešeného problému. Dle náročnosti byl výpočtový model řešen na počítačích UMTMB s následujícími parametry:

Processor: Intel(R) Core(TM) i5 CPU, 760 @ 2.8GHz

Paměť: 8 GB RAM

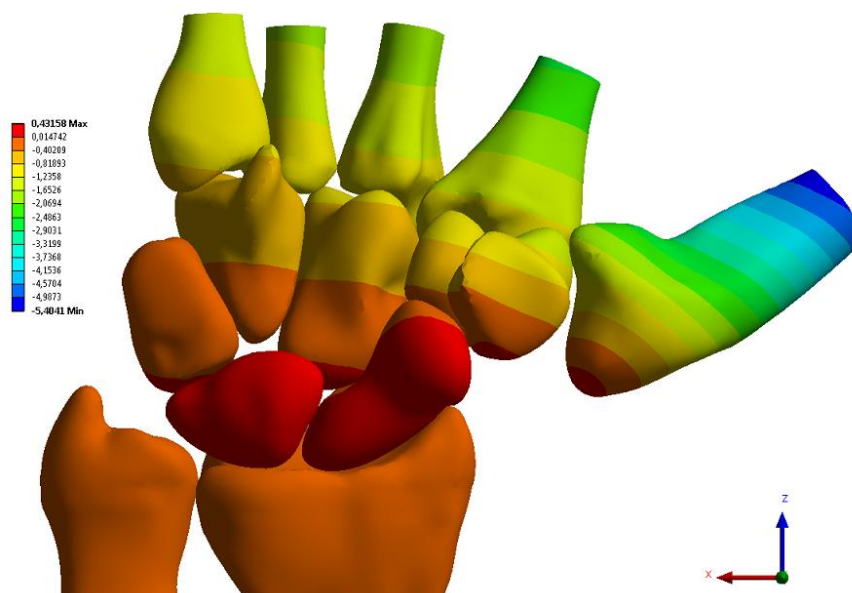
Grafická karta: ATI Radeon HD 3870

Typ systému: 64bitový operační systém

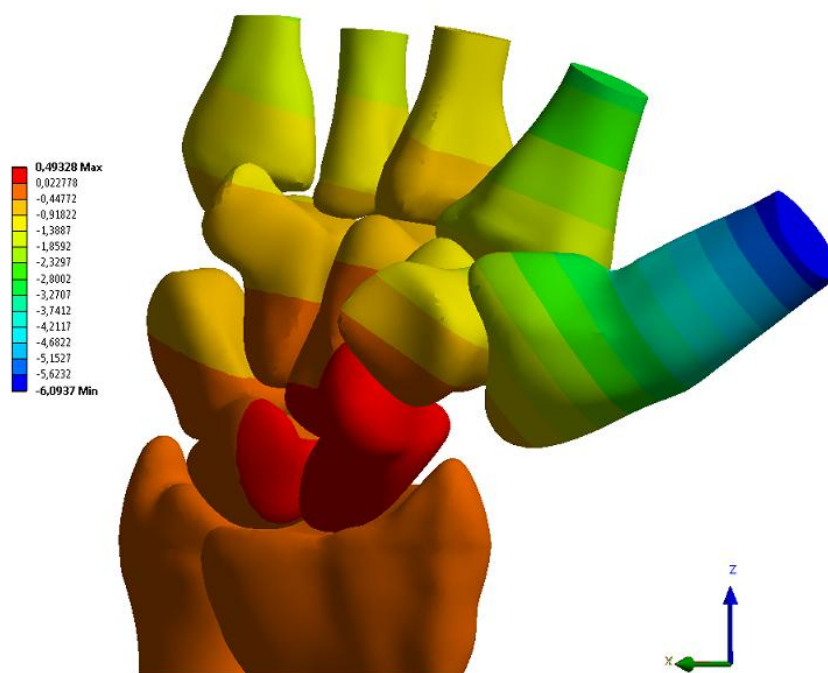
Analýza byla vyhodnocena na jednotlivých posuvech, redukovaném přetvoření ε_{HMH} a hlavních napětí σ_1 a σ_3 celého zápěstí. Dále bude analýza zaměřena na jednotlivé kosti v zápěstí, které budou podrobněji analyzovány.

8.1 Analýza posuvů

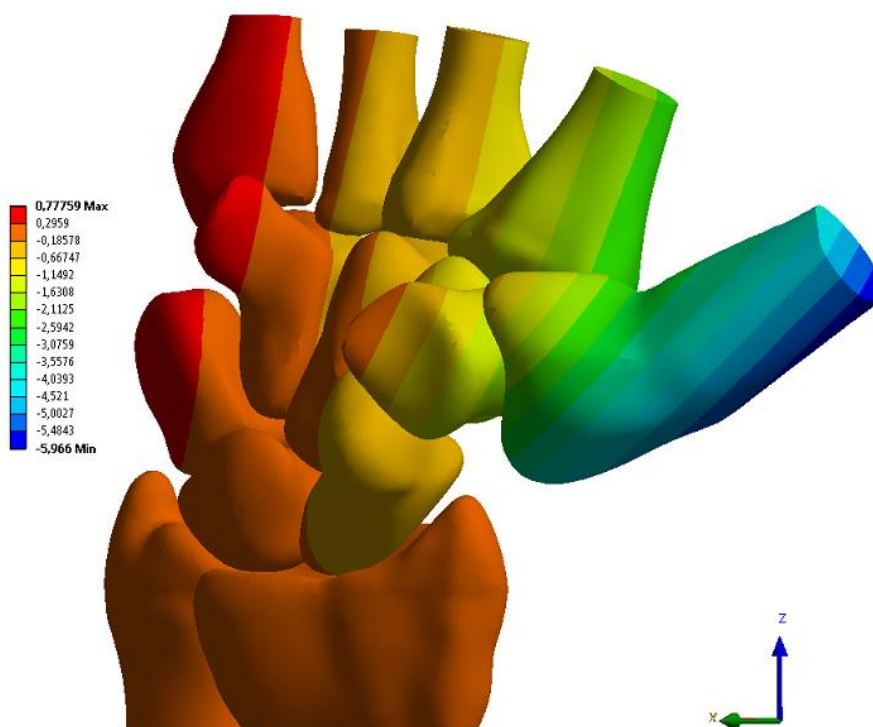
Na obrázcích 8.1 až 8.4 je grafické zobrazení posuvu v jednotlivých osách i celkový posuv. Jednotlivé posuvy, z důvodu vyšší rozlišnosti, jsou posuvy ve čtyřnásobném měřítku. Z jednotlivých posuvů lze vyhodnotit, že k největšímu posuvu dochází na 1MC. Tento významný posuv na 1MC je důvodem vyššího zatížení než u ostatních MC. Také značným podílem tohoto posuvu je fixace 1MC k ostatním kostem. Ve skutečnosti je kost fixována nejen vazy, ale i šlachy, svaly a také kožní tkáň. U celkového posuvu lze vidět, že u jednotlivých karpálních kostí v zápěstí nedochází ke značnému posuvu.



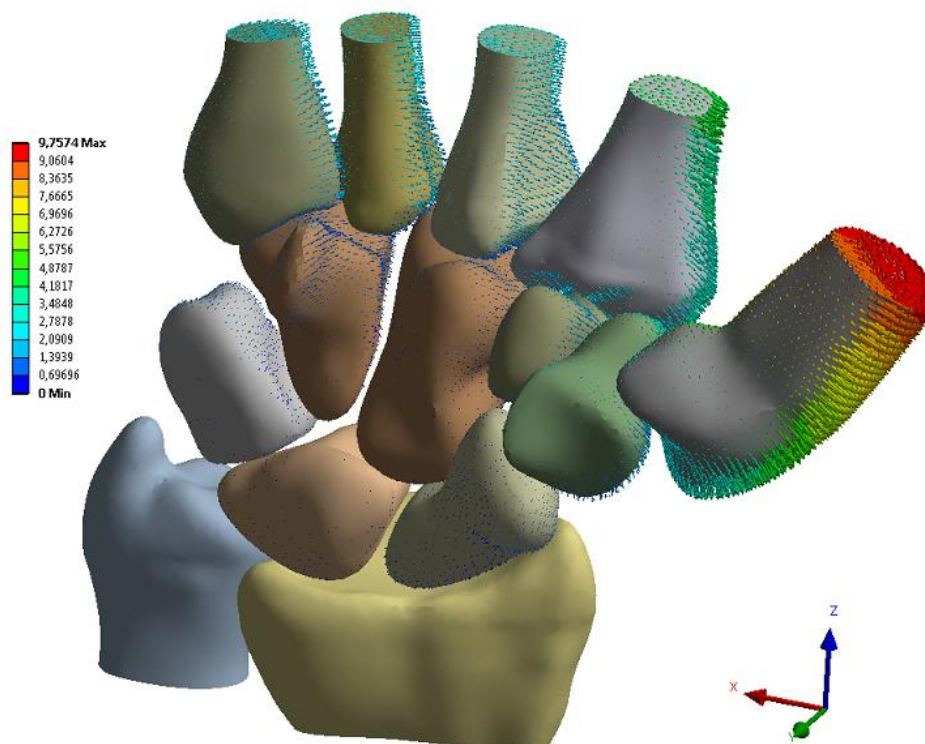
Obr. 8.1 Posuvy v ose X



Obr. 8.2 Posuvy v ose Y



Obr. 8.3 Posuvy v ose Z



Obr. 8.4 Celkové posuvy

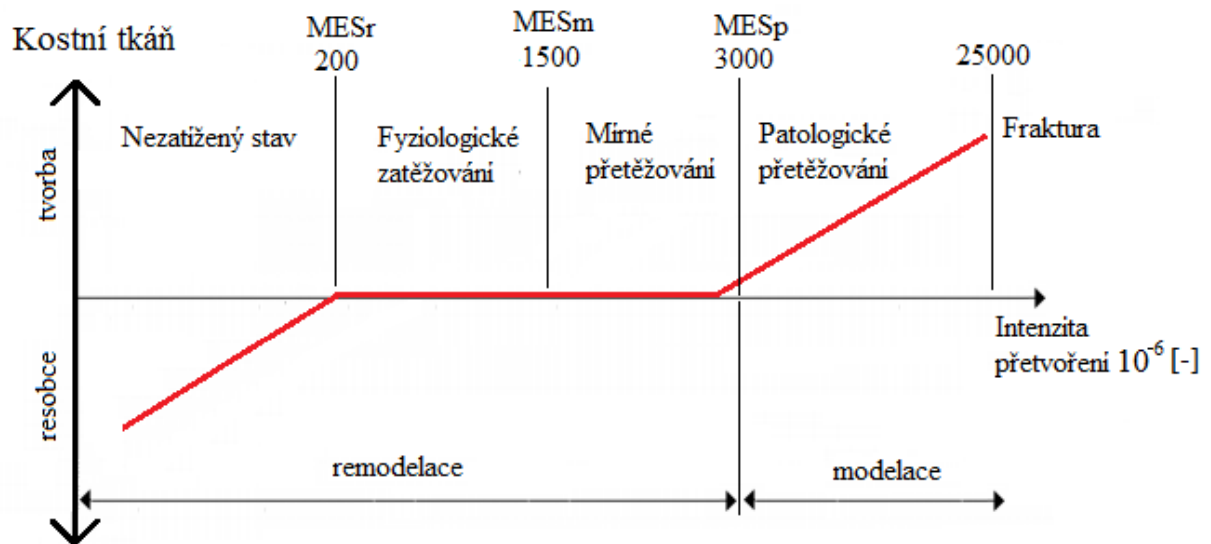
8.2 Analýza kostní tkáně

8.2.1 Frostova hypotéza

Jedním z největších problémů biomechaniky je vymezení mezních stavů a pro tyto stavy určení charakteristik.

Kostní tkáň v lidském těle se neustále mění. Nastává růst, osifikace, modelace a remodelace. Charakter této obměny kostní tkáně je závislá na mechanickém namáhání. Touto závislostí se již zabýval a první zákonitosti publikoval Julius Wolf (1836-1902).

V roce 1964 Harold M. Frost navrhl hypotézu, popisující růst a úbytek kostní tkáně, v závislosti na intenzitě přetvoření (mechanostat). Intenzita přetvoření je bezrozměrná veličina. Hodnota intenzity přetvoření pro technické materiály je i při značném namáhání malá (je 1-3). Proto se můžeme setkat se 106 násobkem přetvoření – $1000 \cdot 10^{-6}$ [-]. Hypotéza je rozdělena na čtyři stádia (Obr. 5.21), které jsou odděleny minimálním efektivním přetvořením remodelace, modelace a opravy (MES_r, MES_m, MES_p) [17] [18].

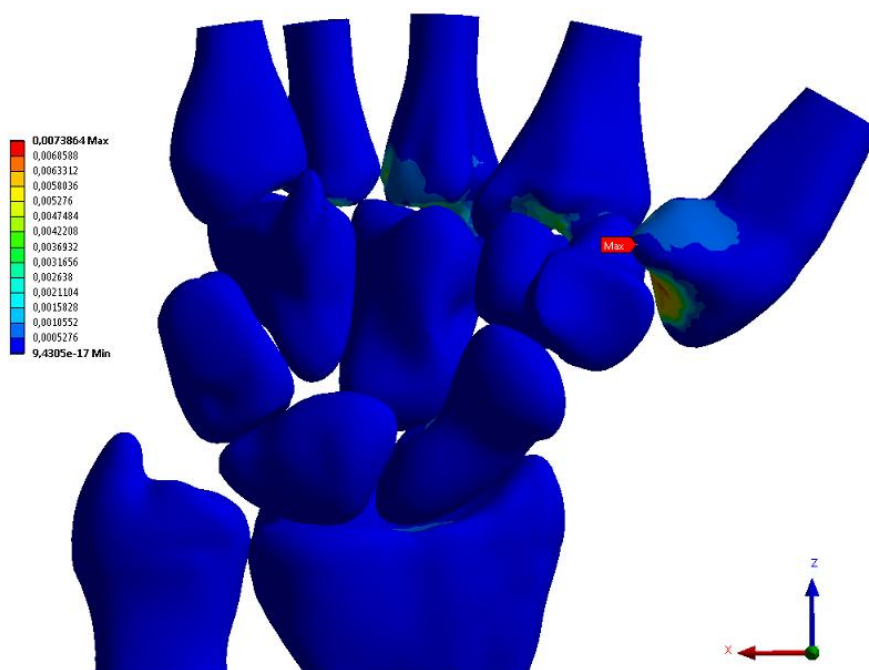
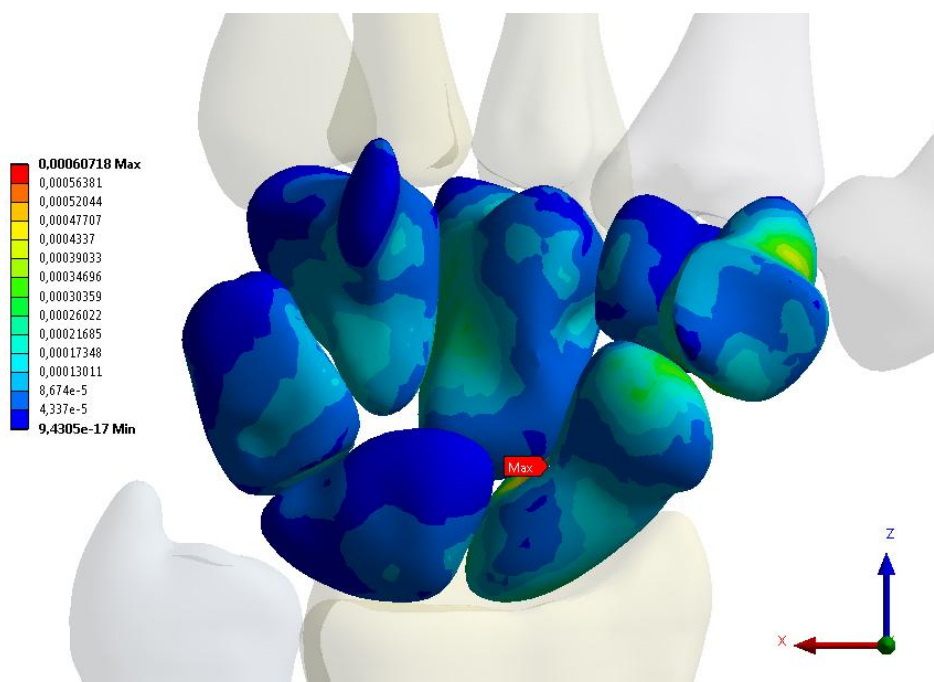


Obr. 8.5 Vliv přetvoření na změnu kostní tkáně [18]

V prvním stadiu je intenzita přetvoření v rozmezí $(0-200) \times 10^{-6}$ [-]. Namáhání kostní tkáně je malé a dochází k úbytku množství kostní tkáně. V tomto stádiu se nejčastěji vyskytují astronauti nebo lidé ležící dlouhodobě. Druhé stádium je v rozmezí $(200-1500) \times 10^{-6}$ [-]. V tomto stádiu se kostní tkáň nachází ve fyziologickém zatěžování. Ve třetím stádiu do hodnoty 3000×10^{-6} [-] je kostní tkáň mírně přetěžována. V těchto stádiích dochází k remodelaci kostní tkáně. Ve čtvrtém stádiu dochází k patologickému přetěžování kostní tkáně a dochází k nárůstu kostní tkáně (modelace). Kost ztrácí pružnost a zvyšuje se pevnost, čímž se dostává do křehkého stavu. V kostní tkáni také dochází mikrotrhlinám a kost je v procesu opravy. Při dosažení hodnoty $25\,000 \times 10^{-6}$ [-] dochází k fraktuře kosti [18] [19] [20].

8.2.2 Analýza přetvoření

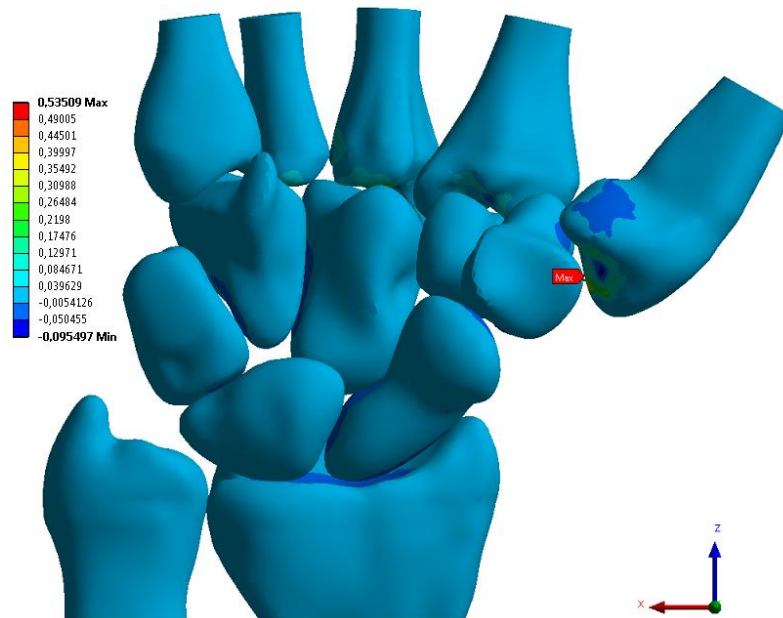
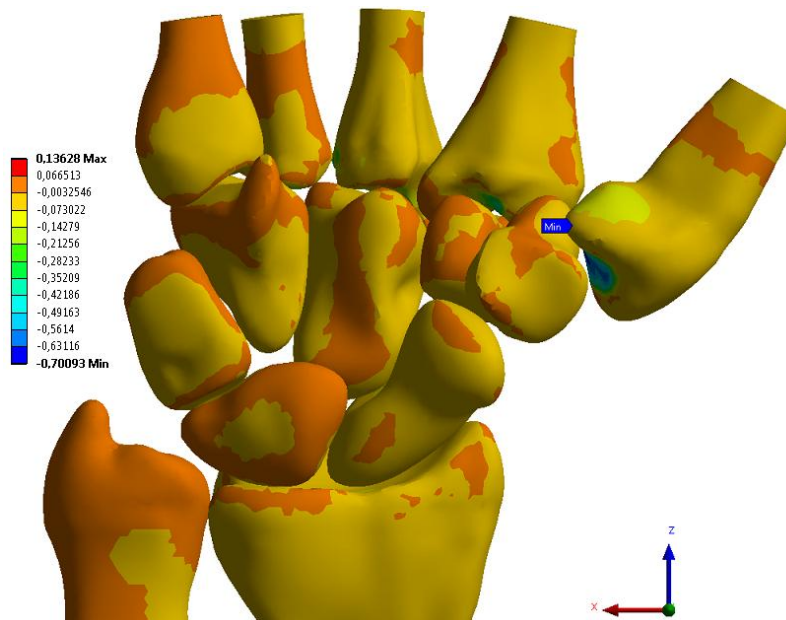
Z vykreslení redukovaného přetvoření celého modelu zápěstí je zřetelné, že k největší intenzitě přetvoření dochází v karpometakarpálním kloubu. Nejvyšší hodnota dosahuje na 1MC v kortikální tkáni o velikosti 0,0074 [-] (Obr. 8.6). Ovšem při vykreslení přetvoření celého modelu nelze rozeznat velikost přetvoření v ostatních kostech. Proto bylo vykresleno přetvoření pouze na karpálních kostech (Obr. 8.7). Zde už je viditelná intenzita přetvoření na jednotlivých karpálních kostech, i když mnohem menší než na 1MC. K největší intenzitě přetvoření o velikosti 0,0006 [-] dochází v kortikální tkáni na os scaphoideum v místech kloubního spojení s os capitatum. Os scaphoideum a 1MC jsou podrobněji analyzovány v kapitolách 8.4.1 a 8.4.2. K maximální intenzitě přetvoření na jednotlivých kostech nedocházelo vždy na kortikální tkáni. Jednou z mnoha karpálních kostí, kdy maximální přetvoření dochází ve spongiózní tkáni je os trapezium (kap. 8.4.4).

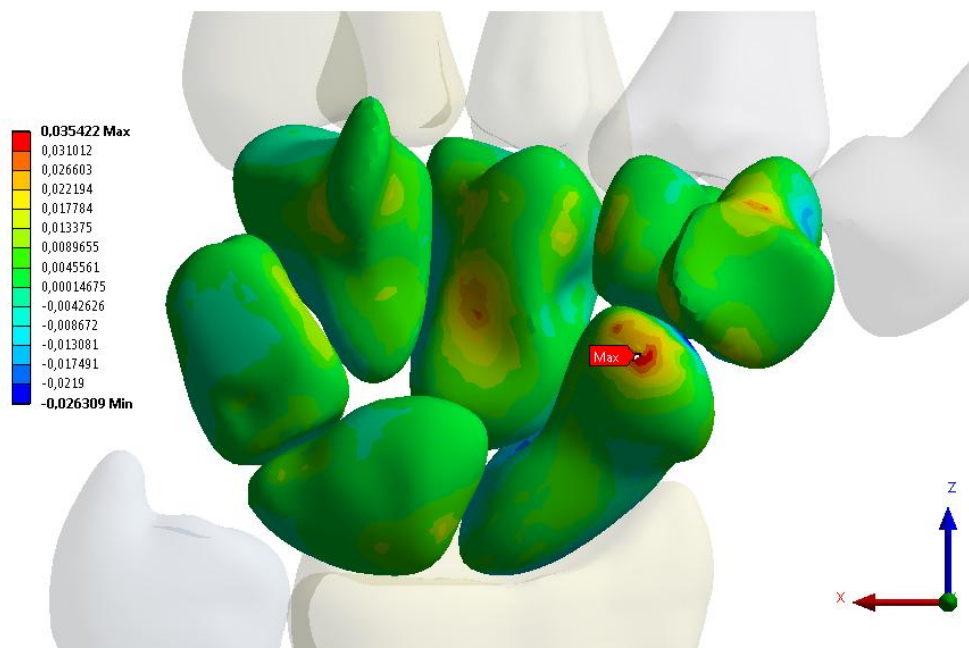
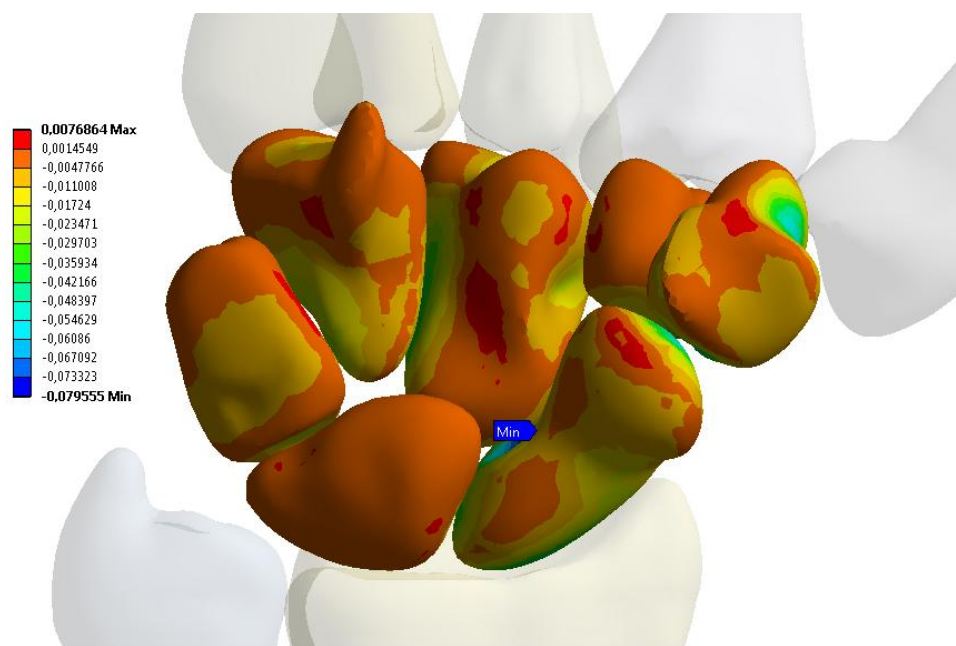
Obr. 8.6 Redukované přetvoření ε_{HMH} Obr. 8.7 Redukované přetvoření ε_{HMH} na karpálních kostech

8.3 Analýza hlavních napětí

Z vykreslení hlavních napětí σ_1 (Obr. 8.8) a σ_3 (Obr. 8.9) celého zápěstí je jako u přetvoření zřetelné, že maximální hodnoty hlavních napětí σ_1 a σ_3 byly dosaženy na 1MC. Také jako u přetvoření byla provedena analýza pouze na karpálních kostech (Obr. 8.10 a Obr. 8.11).

Na karpálních kostech byly nejvyšší hodnoty hlavního napětí σ_3 , na jednotlivých kostech, vždy v místě kontaktu. Nejvyšší hlavní napětí σ_3 bylo na os scaphoideum v místech kloubního spojení s os capitatum jako u redukovaného přetvoření. Hlavní napětí σ_1 bylo také na os scaphoideum v tuberculum ossis scaphoidei na palmární straně v místě uchycení vazů (Obr. 8.9). Převážná část hlavních napětí σ_1 na karpálních kostech byla v místech uchycení vazů.

Obr. 8.8 Hlavní napětí σ_1 Obr. 8.9 Hlavní napětí σ_3

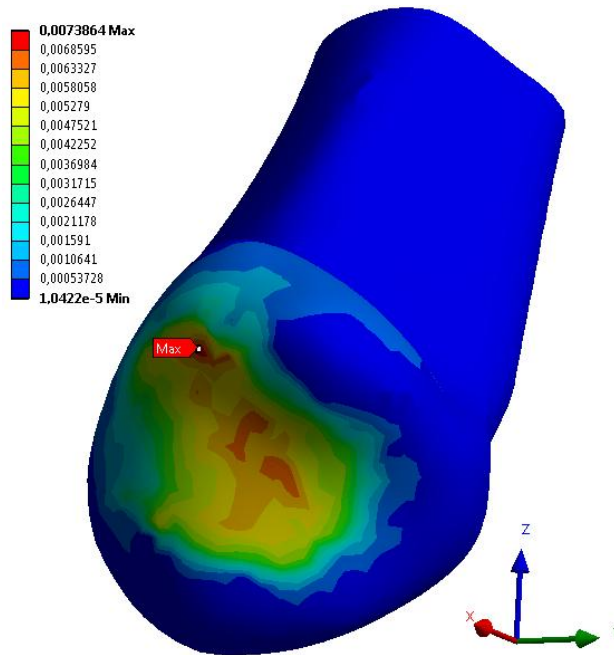
Obr. 8.10 Hlavní napětí σ_1 na karpálních kostechObr. 8.11 Hlavní napětí σ_3 na karpálních kostech

8.4 Analýza jednotlivých kostí

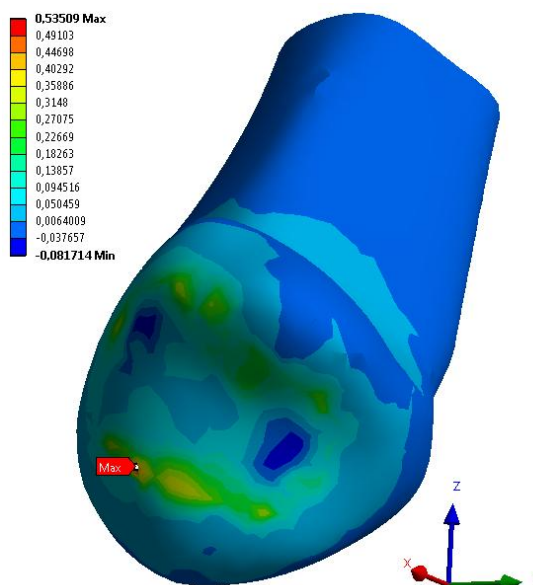
V analýze jednotlivých kostí je provedeno podrobnější přezkoumání vybraných kostí. Jedná se především o 1MC, které vykazovalo největší hodnoty intenzity přetvoření a hlavních napětí v celém zápěstí. Z karpálních kostí je analyzováno os scaphoideum a os trapezium. Také je provedena analýza na radiu, kde je zobrazeno rozložení napětí od os scaphoideum a os lunatum.

8.4.1 1MC

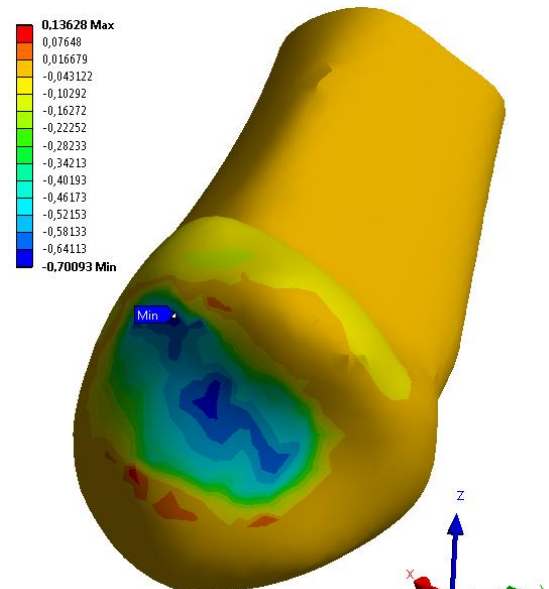
Jak bylo řečeno v kapitolách 8.2 a 8.3, k nevyššímu redukovanému přetvoření a hlavních napětí σ_1 a σ_3 dochází na 1MC. Maximální intenzita přetvoření dosahovala hodnoty v místě kontaktu o velikosti 0,0074 [-] (Obr. 8.12). Hlavní napětí σ_1 vykazovalo nejvyšší hodnotu 0,535 MPa na hranici kontaktní oblasti (Obr. 8.13) a hlavní napětí σ_3 o velikosti -0,701 MPa v oblasti kontaktu (Obr. 8.14).



Obr. 8.12 Redukované přetvoření ε_{HMH} na 1MC



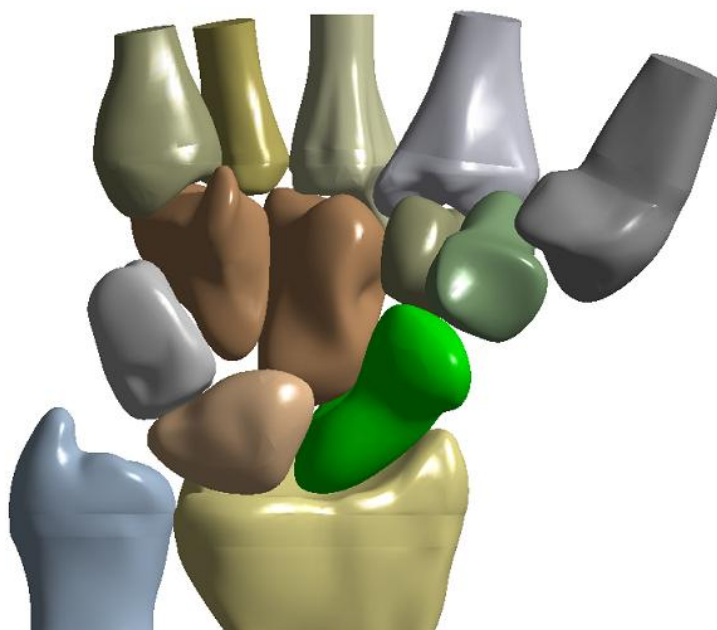
Obr. 8.13 Hlavní napětí σ_1 na 1MC



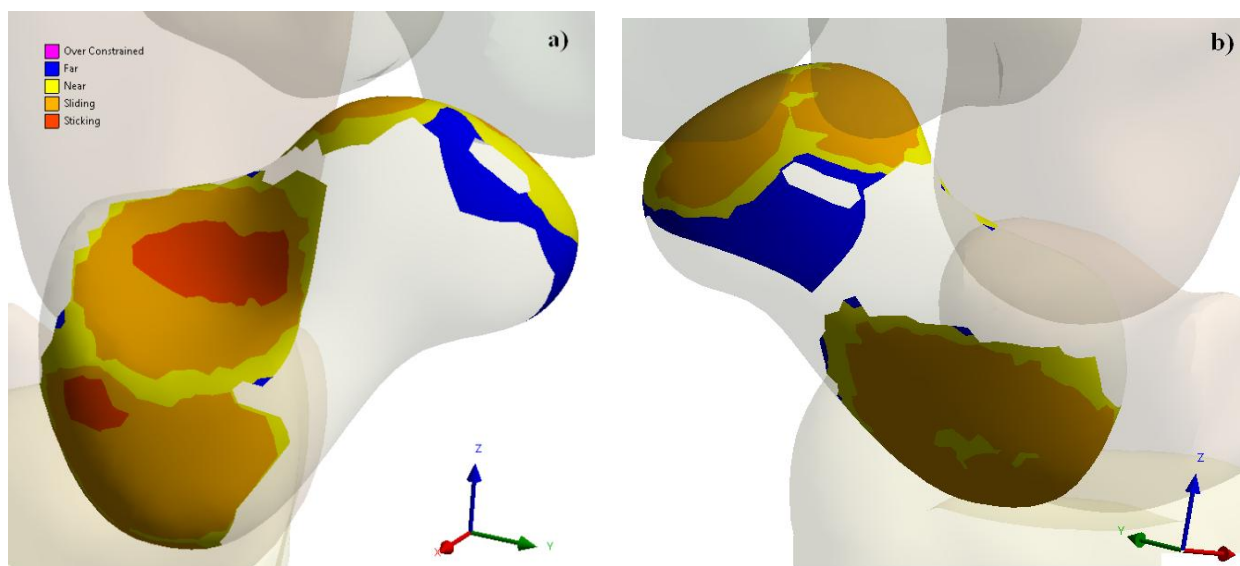
Obr. 8.14 Hlavní napětí σ_3 na 1MC

8.4.2 Os scaphoideum

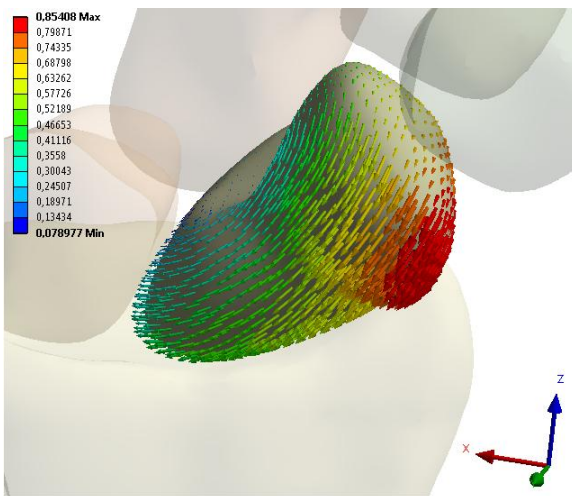
Os scaphoideum vykazovalo nejvyšší redukované přetvoření i hlavní napětí σ_1 a σ_3 ze všech karpálních kostí. To je zapříčiněno polohou kosti (Obr 8.15), na kterou působí zatížení všech MC kostí, přes příslušné karpální kosti a je zatlačována do radia. Veškeré karpální kosti vykazovaly převážně skluzný kontakt. Nicméně na os scaphoideum v místě kloubního spojení s os capitatum je výrazná plocha kde nedochází ke skluznému kontakt (Obr. 8.16). Díky tomu v daném místě dochází k maximálnímu redukovanému přetvoření o hodnotě 0,0006 [-] (Obr. 8.18). V tomto místě bylo také dosaženo nejvyšší hlavní napětí σ_3 o velikosti -0,079 MPa (Obr. 8.19). Nejvyšší hodnota hlavního napětí σ_1 o velikosti 0,0354 MPa byla dosažena v místě působení vazového úponu (Obr. 8.20).



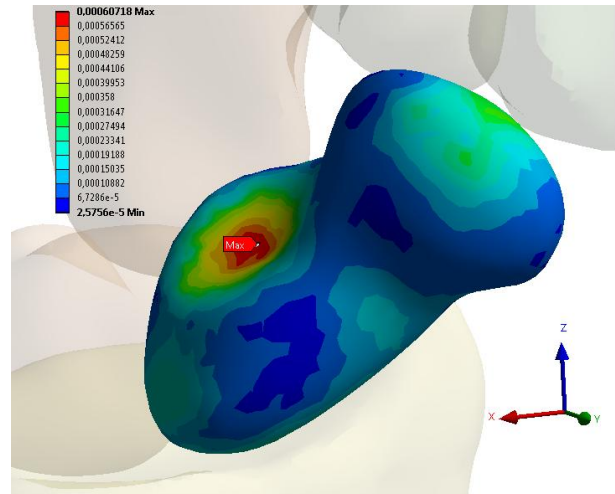
Obr. 8.15 Poloha os scaphoideum v modelu zápěstí (palmární pohled)



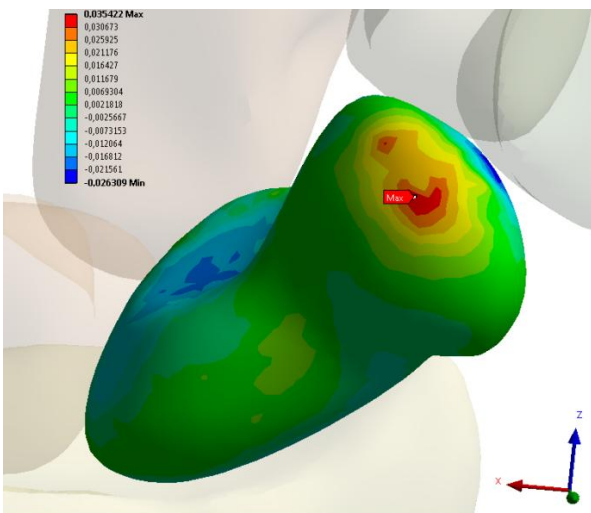
Obr. 8.16 Status kontaktů: a) místo kontaktu s os capitatum a os lunatum (palmární pohled), b) místo kontaktu s 1MC, os trapezoideum a Radii (dorsální pohled)



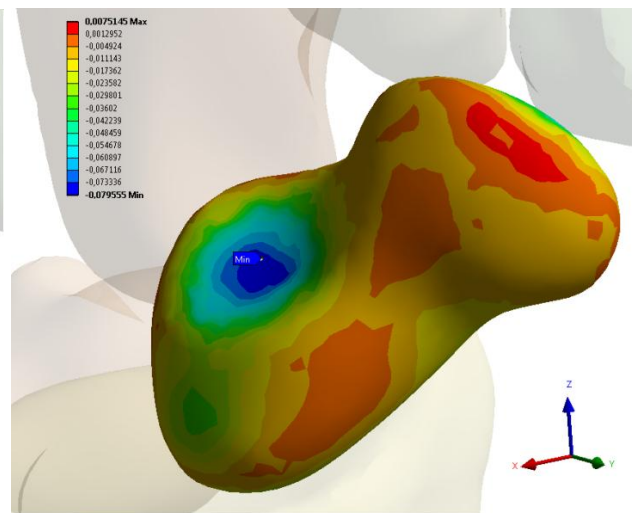
Obr. 8.17 Celkový posuv na os scaphoideum



Obr. 8.18 Redukované přetvoření ϵ_{HMH} na os scaphoideum



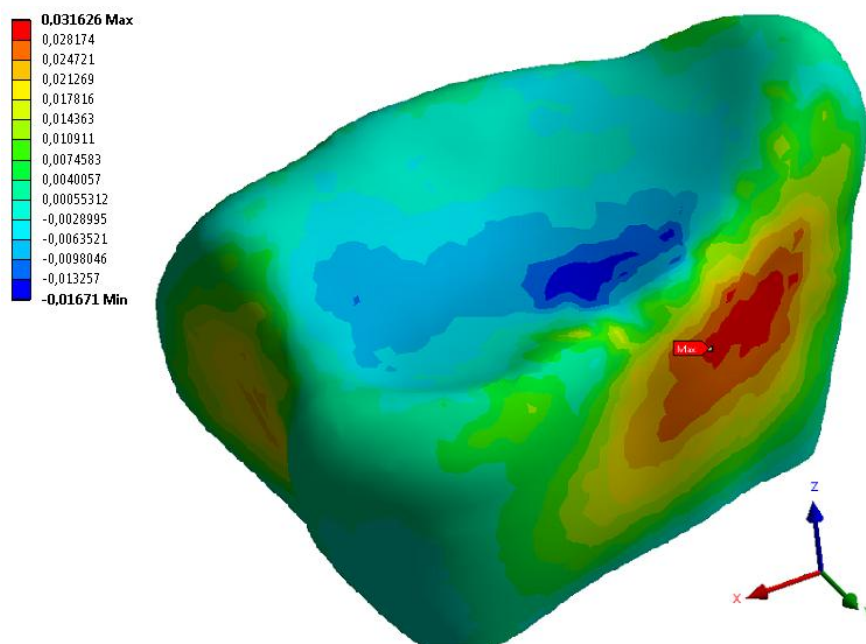
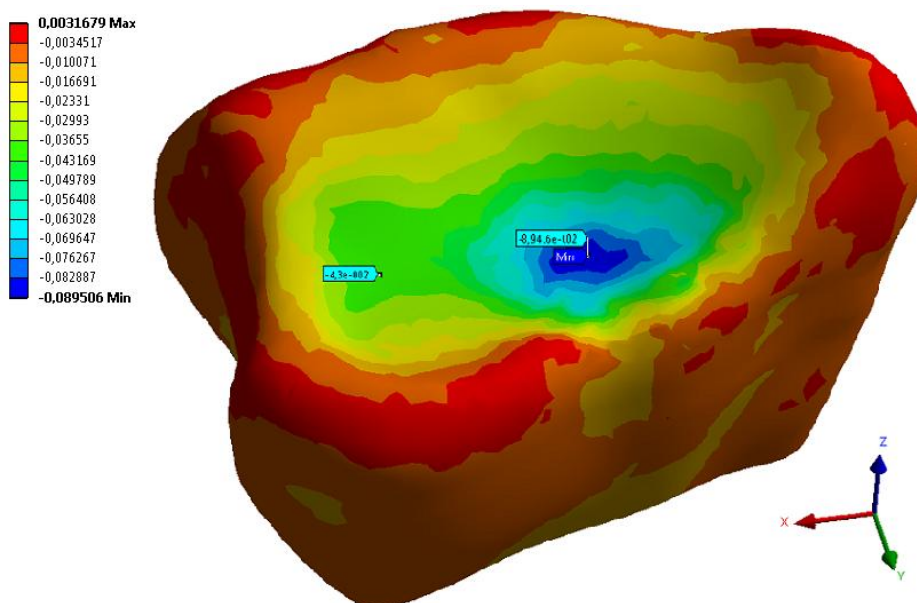
Obr. 8.19 Hlavní napětí σ_1 na os scaphoideum



Obr. 8.20 Hlavní napětí σ_3 na os scaphoideum

8.4.3 Radius

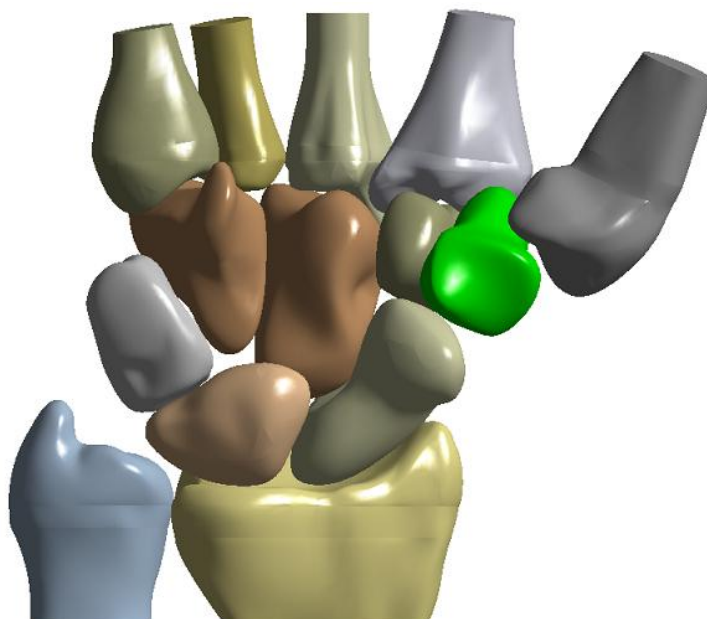
Na radiu působí při tlakovém zatížení zápěstí os scaphoideum a os lunatum. Maximální hlavní napětí σ_1 bylo dosaženo hodnoty 0,0316 MPa na extremitas inferior radii, který představuje rozšířený distální konec kosti. Hlavním napětí σ_3 dosahovalo maximální hodnoty -0,0095 MPa od os scaphoideum (Obr. 8.21). Od os lunatum na radiu dosahovalo maximální hlavní napětí σ_3 hodnoty -0,0043 MPa (Obr. 8.22).

Obr. 8.21 Hlavní napětí σ_1 na radiuObr. 8.22 Hlavní napětí σ_3 na radiu

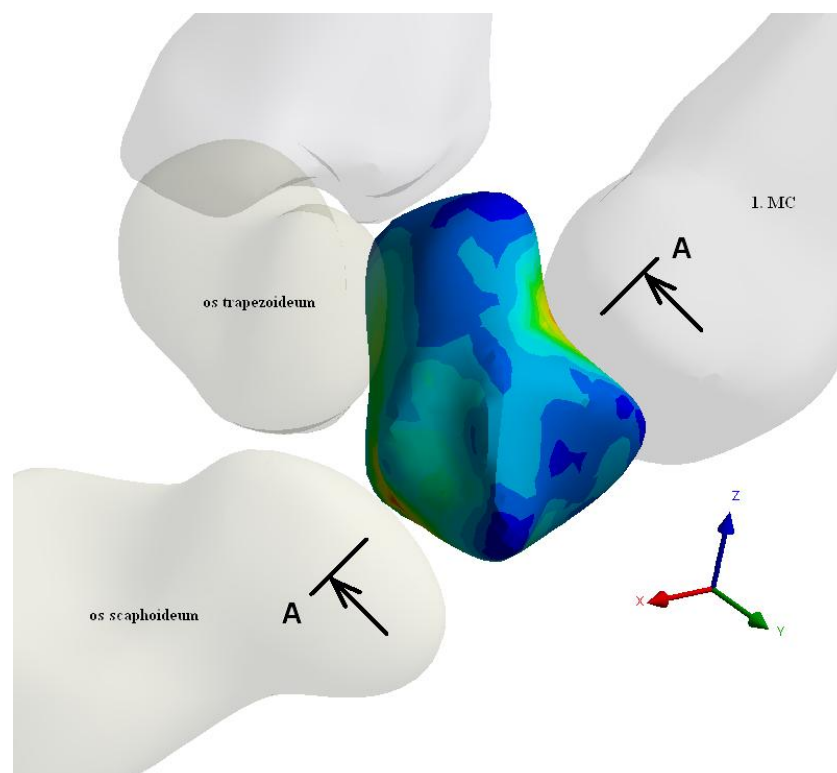
8.4.4 Os trapezium

Os trapezium se nachází mezi 1MC a os scaphoideum (Obr. 8.23). Vlivem polohy os trapezium v zápěstí je tlakově namáháno od obou kostí. Díky tomu dochází k maximální intenzitě přetvoření nikoliv na kortikální tkáni, ale ve spongióze. Na obrázku 8.24 je vyznačen myšlený řez, který detailněji ukáže průběh redukovaného přetvoření ε_{HMH} od tlakového zatížení 1MC a os scaphoideum ve spongiózní tkáni (Obr. 8.25).

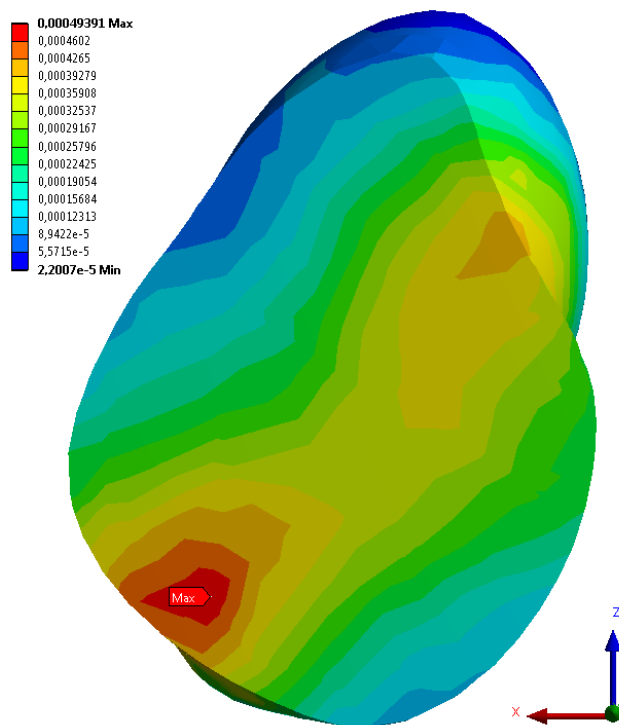
Důsledkem způsobu zatížení je hlavní napětí σ_1 na dorsální a palmární straně o hodnotě 0,0354 MPa (Obr. 8.26). Hlavní napětí σ_3 dosáhlo maximální hodnoty -0,0677 MPa v místě kloubního spojení s os scaphoideum (Obr. 8.27).



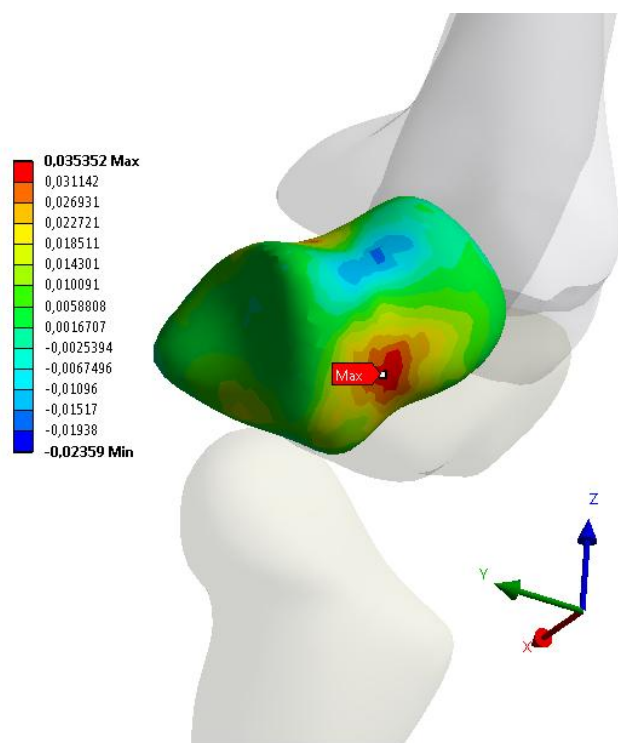
Obr. 8.23 Poloha os trapezium v modelu zápěstí (palmární pohled)



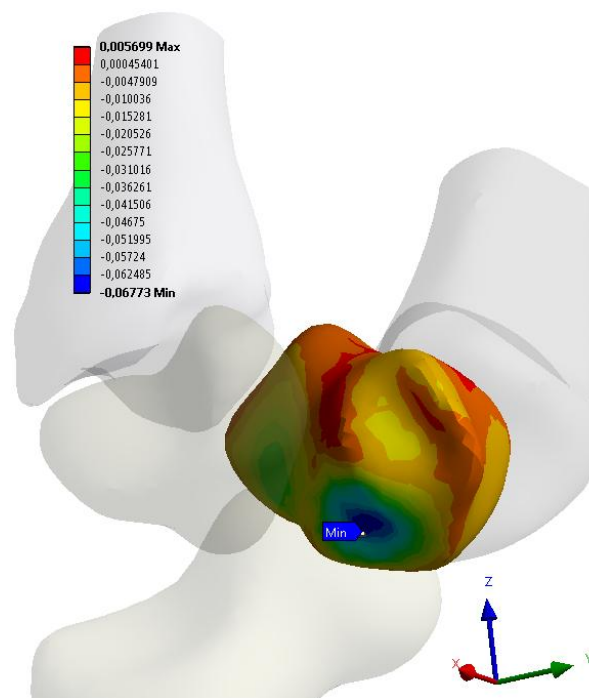
Obr. 8.24 Myšlený řez na os trapezium



Obr. 8.25 Redukované přetvoření ϵ_{HMH} (řez na os trapezium)



Obr. 8.26 Hlavní napětí σ_1 na os trapezium



Obr. 8.27 Hlavní napětí σ_3 na os trapezium

9. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést deformačně napěťovou analýzu zápěstí. Pro řešení formulovaného problému byl vytvořen výpočtový model fyziologického zápěstí v neutrální poloze, který se skládal z podrobného popisu dílčích modelů: model geometrie, model materiálu, model vazeb a zatížení a konečno-prvkový model. Model geometrie byl vytvořen na základě CT snímků. Materiálové hodnoty a velikost zatížení na výpočtovém modelu byly převzaty z literatury [8] [28] [29] [30] [31], které se zabývaly deformačně napěťovou analýzou zápěstí. V deformačně napěťové analýze bylo vyhodnocováno velikost přetvoření a hlavní napětí v celém modelu zápěstí. Následně byly vybrány jednotlivé kosti, na kterých byla provedena podrobnější analýza.

Velikost zatížení bylo převzato z literatury [8], která se zabývala zápěstím s revmatoidní artritidou. Výpočtový model zápěstí s revmatoidní artritidou vykazuje velké deformace i při malém zatížení. Tyto hodnoty zatížení byly použity i v předložené diplomové práci, proto hodnoty napětí a přetvoření na fyziologický model zápěstí jsou malé.

V deformačně napěťové analýze se ukázalo, že největší intenzita přetvoření bylo v místě kontaktu na 1MC o velikosti 0,0074 [-]. Dle Frostovy hypotézy lze konstatovat, že kostní tkáň je ve stavu patologického přetěžování. V karpálních kostech byla nejvyšší hodnota intenzity přetvoření řádově 10krát menší. Kostní tkáň karpálních kostí jsou ve stavu fyziologického zatěžování, dochází k jejich fyziologické remodelaci.

Maximální hodnoty hlavních napětí o velikosti $\sigma_1 = 0,535$ MPa a $\sigma_3 = -0,701$ MPa jsou na kostní tkáni prvního metakarpu.

Hlavní napětí v karpálních kostech také dosahovaly výrazně nižší hodnoty. Nejvyšší hodnota hlavního napětí v oblasti karpálních kostí, byly v místě vazového úponu na os scaphoideum a dosahovala hodnoty $\sigma_1 = 0,035$ MPa. V místě kloubního spojení mezi os scaphoideum a os capitatum byla hodnota extrémního třetího napětí $\sigma_3 = -0,079$ MPa.

Cíle předepsané této diplomové práci byly bez výjimky splněny.

10. Literatura

- [1] Kineziologie horní končetiny: Ruka. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://vos.palestra.cz/skripta/kineziologie/6a5.htm>
- [2] Rizikové faktory sedavého životního stylu: Bolesti horní končetiny a jejich kompenzace. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.fsps.muni.cz/algie/pages/kapitola6.html>
- [3] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Revmatické nemoci [online]. c2012 [cit. 3. 05. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Revmatické_nemoci&oldid=8794354>
- [4] SRINIVAS REDDY, R. a J. COMPSON. (i) Examination of the wrist—surface anatomy of the carpal bones. *Current Orthopaedics*. 2005, vol. 19, issue 3, s. 171-179. DOI: 10.1016/j.cuor.2005.02.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268089005000381>
- [5] SHEPHERD, D.E.T a A.J JOHNSTONE. Design considerations for a wrist implant. *Medical Engineering*. 2002, vol. 24, issue 10, s. 641-650. DOI: 10.1016/S1350-4533(02)00148-0. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350453302001480>
- [6] WHALLEY, Helen a Ian MCNAB. (iii) Injuries of the carpus. *Orthopaedics and Trauma*. 2011, vol. 25, issue 5, s. 336-343. DOI: 10.1016/j.mporth.2011.07.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877132711001011>
- [7] BERGER, Richard A. a Ian MCNAB. The Anatomy and Basic Biomechanics of the Wrist joint. *Journal of Hand Therapy*. 1996, vol. 9, issue 2, s. 84-93. DOI: 10.1016/S0894-1130(96)80066-4. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894113096800664>
- [8] BAJURI, M.N., Mohammed Rafiq Abdul KADIR, MuraliMalliga RAMAN a T. KAMARUL. Mechanical and functional assessment of the wrist affected by rheumatoid arthritis: A finite element analysis. *Medical Engineering*. roč. 32, č. 5, s. 523-531. ISSN 13504533. DOI: 10.1016/j.medengphy.2011.12.020. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135045331100347X>
- [9] GÍSLASON, Magnús K., Benedict STANSFIELD a David H. NASH. Finite element model creation and stability considerations of complex biological articulation: The human wrist joint. *Medical Engineering*. 2010, vol. 32, issue 5, s. 523-531. DOI: 10.1016/j.medengphy.2010.02.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350453310000445>
- [10] VARGA, Peter, Philip SCHEFZIG, Ewald UNGER, Winfried MAYR, Philippe K. ZYSSET a Jochen ERHART. Finite element based estimation of contact areas and

- pressures of the human scaphoid in various functional positions of the hand: The human wrist joint. *Journal of Biomechanics*. 2013, vol. 46, issue 5, s. 984-990. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2012.11.053. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002192901200735X>
- [11] MANSOUR Joseph M. *Biomechanics of Cartilage, Biomechanical principles, part 1, charter 5*. Dostupné z: <http://cnx.org/content/m27924/latest/23-Reading%20-%20Mansour.pdf>
- [12] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie. 3., upr. a dopl. vyd. Editor Miloš Grim, Oldřich Fejfar. Praha: Grada, 2011, 534 s. ISBN 97880247381781*
- [13] VIRTUÁLNÍ UČEBNICE PRO STUDIUM MORFOLOGIE KOSTRY ČLOVĚKA: Ossa membri superioris. [online]. [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://www.exprow.jecool.net/ossa_membri_superioris.html#?scroll=0
- [14] BARTONÍČEK, Jan. *Základy klinické anatomie pohybového aparátu. Praha: Maxdorf, 2004, 256 s. ISBN 80-734-5017-8.*
- [15] WikiSkriptá: Chrupavka. [online]. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Chrupavka>
- [16] Patobiomechanika a Patokinesiologie Kompendium: Klouby ruky. [online]. [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompendium/anatomie/hk_ruka_klouby.php
- [17] Mechanostat. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mechanostat>
- [18] JEE, W.S.S. Principal in bone physiology, *Journal of Musculoskel and Neuron Interact*, September 2000 Volume 1, Number 1. Dostupné z: <http://www.ismni.org/jmni/pdf/1/jee.pdf>
- [19] FROST, Harold M. Bone's Mechanostat: A 2003 Update. *The Anatomical Record Part A*. 2003, č. 2, s. 1081-1101. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ar.a.10119/pdf>
- [20] KHAN, Karim. *Physical activity and bone health. Champaign, IL: Human Kinetics, c2001, xii, 275 p. ISBN 08-801-1968-3.*
- [21] ORTOPEDIE-TRAUMATOLOGIE: Artroplastika. [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.ortopedie-traumatologie.cz/pojmy-artroplastika>
- [22] ORTOPEDIE-TRAUMATOLOGIE: Resekční artroplastika karpometakarpálního (CMC) kloubu (metoda dle Burton-Pellegriniho). [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.ortopedie-traumatologie.cz/pojmy-artroplastika>

- [23] ADAMS, Brian D. Total wrist arthroplasty for rheumatoid arthritis. International Congress Series. 2006, vol. 1295, s. 83-93. DOI: 10.1016/j.ics.2006.03.031. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0531513106003207>
- [24] Carlson JR, Simmons BP. Total wrist arthroplasty. Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons September/October 1998, Volume 6, No 5,
- [25] BERGER, Richard A a Arnold-Peter C WEISS. Hand surgery. Philadelphia: Lippincott Williams, c2004, 2 v. ISBN 078-172-8746-12.
- [26] GUPTA Amit, Total wrist arthroplasty. A Supplement to The American Journal of Orthopedics 2008, s. 12-16. Dostupné z: <http://www.amjorthopedics.com/PDF/037080012s.pdf>
- [27] COBB Tyson K., BECKENBAUGH Robert D. Biaxial total-wrist arthroplasty. Operative Techniques in Orthopaedics April 1996, Volume 6, No 2, pp 77-82
- [28] BAJURI, M. N., Mohammed Rafiq ABDUL KADIR, Malliga Raman MURALI a T. KAMARUL. Biomechanical analysis of the wrist arthroplasty in rheumatoid arthritis: a finite element analysis. Medical.roč. 51, 1-2, s. 175-186. ISSN 0140-0118. DOI: 10.1007/s11517-012-0982-9. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11517-012-0982-9>
- [29] GUO, Xin, Yubo FAN, Zong-Ming LI a T. KAMARUL. Effects of dividing the transverse carpal ligament on the mechanical behavior of the carpal bones under axial compressive load: A finite element study. Medical Engineering .roč. 31, č. 2, s. 188-194. ISSN 13504533. DOI: 10.1016/j.medengphy.2008.08.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350453308001367>
- [30] EZQUERRO, F., S. JIMÉNEZ, A. PÉREZ, M. PRADO, G. DE DIEGO aA. SIMÓN. The influence of wire positioning upon the initial stability of scaphoid fractures fixed using Kirschner wires: A finite element analysis. Medical Engineering.roč. 32, č. 5, s. 523-531. ISSN 13504533. DOI: 10.1016/j.medengphy.2006.08.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135045330600169X>
- [31] SCHUIND, F., W.P. COONEY, R.L. LINSCHIED, K.N. AN a E.Y.S. CHAO. Force and pressure transmission through the normal wrist. A theoretical two-dimensional study in the posteroanterior plane. Journal of Biomechanics .roč. 28, č. 5, s. 587-601. ISSN 00219290. DOI: 10.1016/0021-9290(94)00093-J. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002192909400093J>
- [32] Orientace na lidském těle. [online]. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Orientace_na_lidsk%C3%A9m_t%C4%9Ble
- [33] Arm & Hand Bones on One Side of the Page and the Upper Arm and Shoulder is on the Reverse by Giuseppe del Medico to Frame or for Paper Arts [online] [cit. 2013-03-

- 11] Dostupné z: <http://www.etsy.com/listing/104178142/arm-hand-bones-on-one-side-of-the-page>
- [34] Анатомический портал: Кисть, manus [online] [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://anatomy-portal.info/tekahtml/osteologia/memsuplibmanus.html>
- [35] Professional Health Systems: Carpals. [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.prohealthsys.com/resources/grays/osteology/carpals.php>
- [36] The Encyclopedia of Science: metacarpal [online] [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/metacarpal.html>
- [37] The New York Times: An Atlas of the Human Body [online] [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: http://www.nytimes.com/slideshow/2008/04/21/science/Bassett_8.html
- [38] The Art of Medicine [online] [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://medicinaedoctor2015.webs.com/skeletalsystem.htm>
- [39] Physical Therapy Management Of Colles Fracture – Morphopedics [online]. [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://morphopedics.wikidot.com/physical-therapy-management-of-colles-fracture>
- [40] Wikiskripta: Mechanické charakteristiky pojivové tkáně. [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Mechanick%C3%A9_charakteristiky_pojivov%C3%A9_tk%C3%A1n%C4%9B