

Elastografie

Biofyzikální ústav LF MU

Projekt FRVŠ 911/2013

- **Je neinvazivní metoda založená na diagnostickém ultrazvuku nebo magnetické rezonanci zobrazující elastické vlastnosti biologických tkání.**
- **Metoda je obdobou palpačního vyšetření.**
- **Vychází ze skutečnosti, že různé biologické tkáně mají různou elasticitu, a že změny elastických vlastností souvisejí s patologií a abnormalitami tkání.**
- **Podstatou metody je zkoumání odezvy tkání na silové působení.**

- **Mnoho patologických tkání (např. nádorových) vykazuje při UZ nebo MRI vyšetření slabý kontrast nebo je nelze zobrazit vůbec.**
- **Metody založené na mapování elastických vlastností jsou tedy velmi vhodné pro zobrazení struktury a patologie takových tkání.**
- **Měření elasticity přináší novou informaci o tkáních, kterou lze využít pro lékařskou diagnostiku.**
- **Elastografie se využívá zpravidla jako doplňková metoda pro zvýšení specifity diagnózy.**

Elastografie

Klinické aplikace

- **Játra (fibróza, cirhóza)**
- **Rakovina prsu**
- **Rakovina prostaty**
- **Mozek**
- **Srdeční dysfunkce**
- **Šlachy**
- **Neurodegenerativní onemocnění**
- **Selhání ledvin**
- **Lymfatické uzliny**
- **Štítná žláza**
- **Mléčná žláza**
- **Měkké tkáně**
- **Pankreas**
- **Kůže**
- **Cévy**
- **Gynekologie**
- **Intravaskulární elastografie**

- **Mechanické vlastnosti tkání závisí především na molekulových vazbách jednotlivých prvků tkání a na jejich mikroskopickém i makroskopickém uspořádání.**
 - **Pevnost (tuhost):** Strukturní soudržnost a odolnost látky vůči působení vnější síly.
 - **Pružnost (elasticita):** Schopnost látky vrátit se po odeznění deformující síly zpět do původního tvaru.
 - **Tvárnost (plasticita):** Schopnost látky trvale změnit svůj tvar vlivem působení deformující síly.
 - **Viskozita:** Odpor tekutiny ke smykové deformaci. Popisuje vnitřní tření a míru tekutosti kapalin a plynů.

- **Biologické tkáně jsou složité látky, které vykazují:**
 - Viskózně-elastické vlastnosti
 - Anizotropní charakter
 - Nelinearita
 - Nehomogenita
 - Paměťový efekt, adaptibilita
 - Vliv stárnutí a kondice organismu
- **Popis mechanických a hlavně elastických vlastností tkání je tedy velmi složitý a pro modelování a výpočty vyžaduje značné aproximace a zjednodušení.**

Elastografie

Hookeův zákon

- **Elastické vlastnosti tkání lze nejjednodušeji popsat Hookeovým zákonem.**
- **Vyjadřuje lineární vztah mezi deformací tělesa (ε) a vnějším napětím (σ) – silou, která tuto deformaci způsobuje.**

$$\text{modul pružnosti} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- **Konstantou úměrnosti je tzv. modul pružnosti.**

- **Mechanické napětí (σ) vzniká v tělese jako důsledek působení vnější síly a lze jej chápat jako tlak síly (F) působící na jednotku plochy tělesa (S):**

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

- **Podle směru působící síly rozlišujeme:**
 - Normálové napětí
 - Tečné (smykové) napětí

- **Deformaci tělesa popisujeme jako změnu rozměrů, objemu a tvaru tělesa působením vnější síly.**
- **Podle směru síly rozlišujeme několik deformací a každé přiřazujeme vlastní modul pružnosti:**
 - **Deformace tahem/tlakem:**
Youngův modul pružnosti v tahu/tlaku (E)
 - **Smyková deformace:**
Modul pružnosti ve smyku (G)
 - **Objemová deformace:**
Modul objemové pružnosti (K)

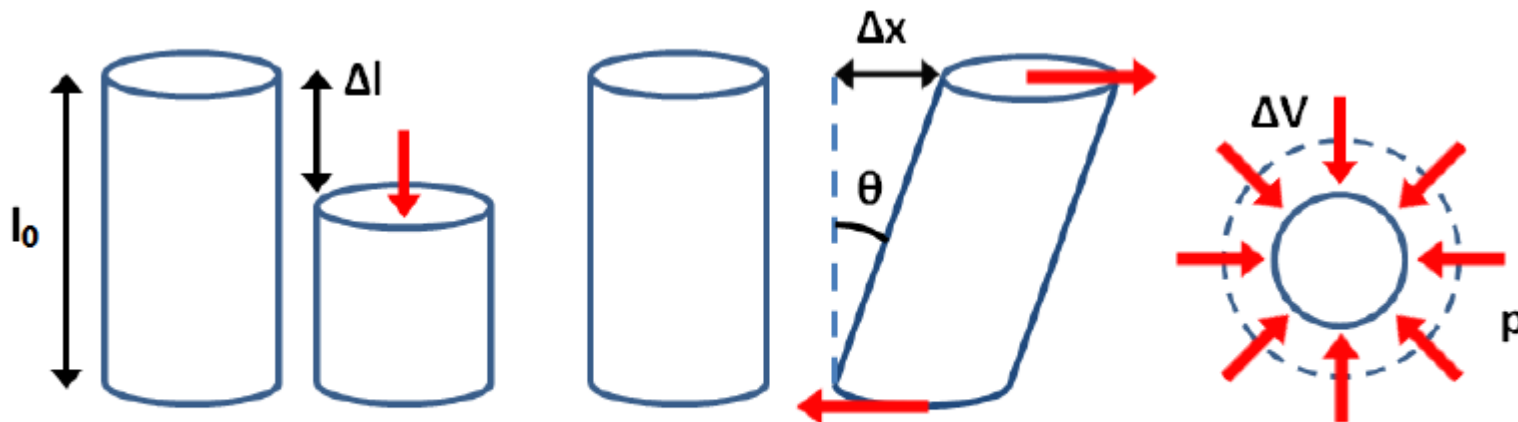
Elastografie

Deformace

$$\varepsilon_E = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\varepsilon_G = \frac{\Delta x}{l_0}$$

$$\varepsilon_K = \frac{\Delta V}{V_0}$$



Obrázek 4.1: Deformace tahem/tlakem, smyková deformace a objemová deformace.

Elastografie

Elasticita tkání

Tabulka 4.1: Elasticita biologických tkání

Tkáň		Youngův modul (<i>kPa</i>)
Prsní tkáň	normální tuk	18-24
	normální žláza	28-66
	fibrózní tkáň	96-244
	karcinom	22-560
Prostata	normální anterior	55-63
	normální posterior	62-71
	BPH	36-41
	karcinom	96-241
Játra	normální	0,4-6,0
	cirhotická	15-100
Tepna		700-3000
Chrupavka		790
Šlacha		800
Zubní sklovina		20 000 000-84 000 000
Stehenní kost		11 000 000-20 000 000

Elastografie

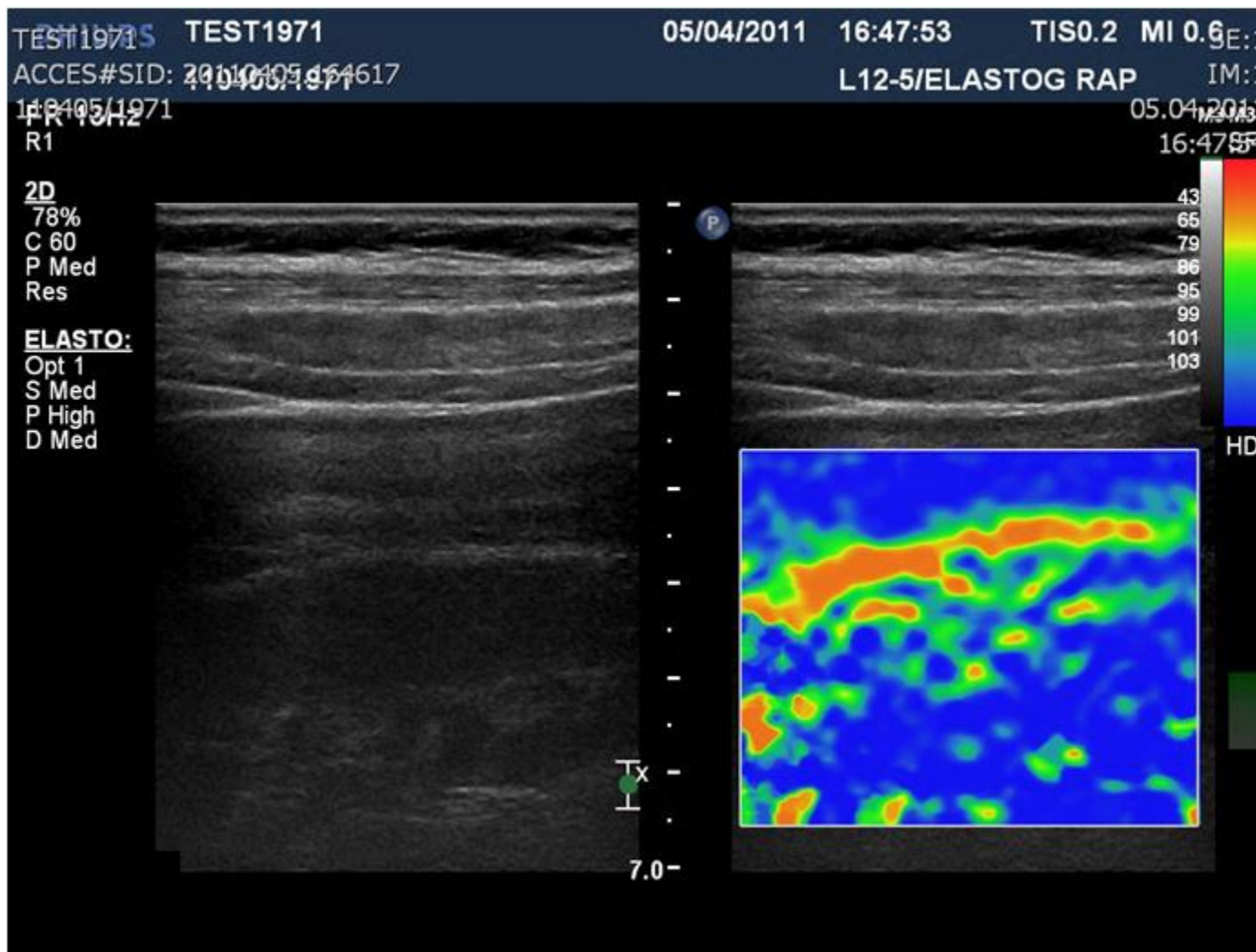
Elasticita tkání

- **Zvýšená elasticita může být známkou patologických tkání. Snížená elasticita může značit místa s tekutým obsahem (např. cysty).**
- **Rozdíly v tuhosti mohou odlišovat také benigní a maligní charakter ložisek.**
 - **Maligní nádory:** asi 30 až 270 kPa
 - **Benigní ložiska:** asi 1 až 70 kPa

Ultrazvuková elastografie

- **Výstupem ultrazvukové elastografie je ultrazvukový B-obraz překrytý barevnou mapou. Každému bodu tkáně je přiřazena určitá barva, která kóduje jeho elastické vlastnosti.**
- **Měkké tkáně bývají obvykle kódovány teplými odstíny (červená, žlutá), tuhé tkáně pak studenými barvami (modrá, fialová).**
 - **Statická (kompresní) elastografie**
 - **Dynamická (shear waves) elastografie**

Ultrazvuková elastografie



Ultrazvuková elastografie

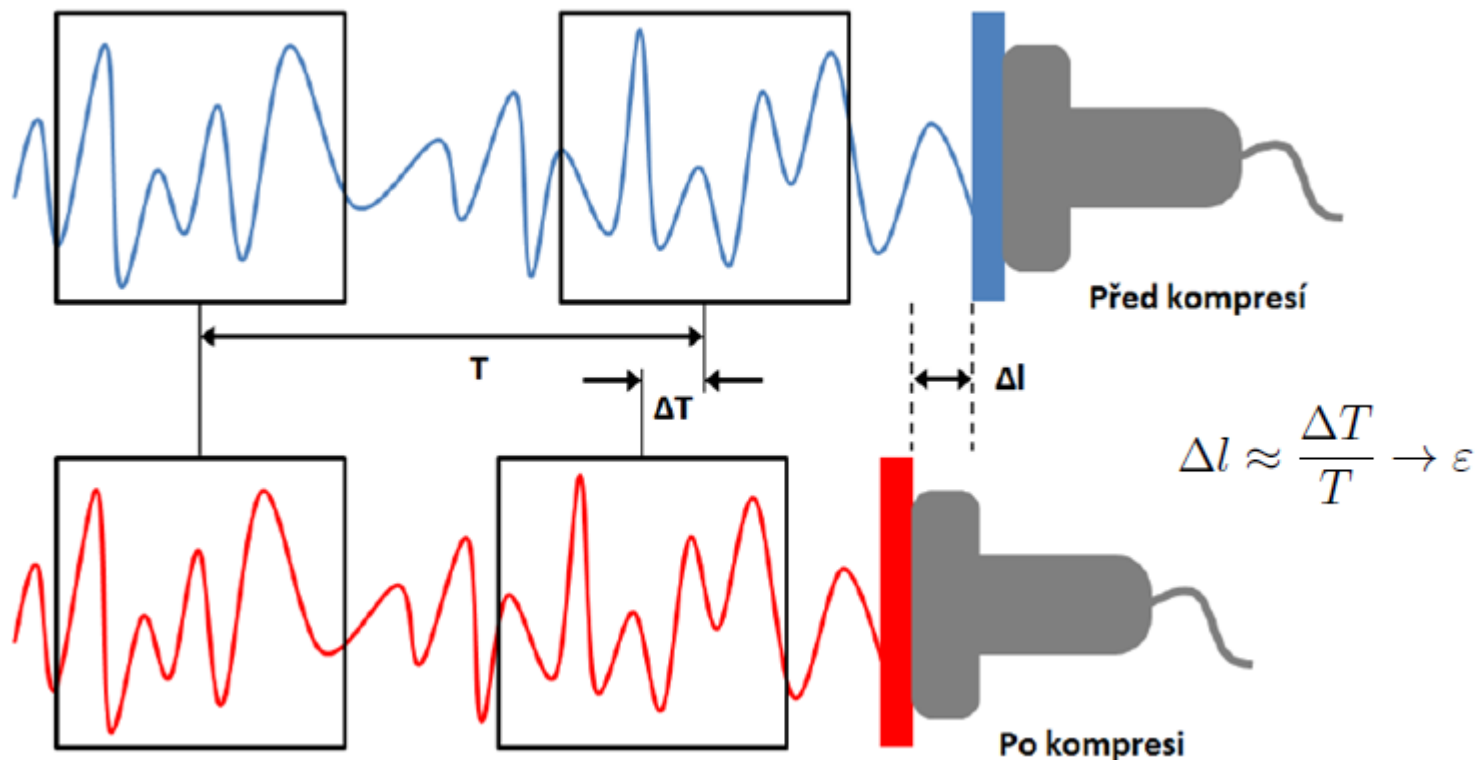
Statická (kompresní) elastografie

- **Elasticita se určuje na základě rozdílu UZ signálu před a po kompresi tkáně.**
- **Stlačení tkáně: přímo měřící UZ sondou, externí zařízení, akustický tlak fokusovaného UZ paprsku nebo fyziologické pohyby v organismu.**
- **Deformace se pro každý bod tkáně určuje korelačními algoritmy z dvojic obrazů před a po kompresi.**

Ultrazvuková elastografie

Statická (kompresní) elastografie

- Nejčastěji se posun tkáně vyhodnocuje jako časový rozdíl UZ signálů (paprsky A-módu) odražených v různých hloubkách tkáně před a po stlačení.



Ultrazvuková elastografie

Statická (kompresní) elastografie

- **Metoda tkáňového Dopplera:**
- Prostřednictvím dopplerovského měření je při deformaci počítána rychlost pohybu tkáně.
- Z časové sekvence obrazů rychlosti pohybu tkáně se následně vyhodnocuje gradient rychlosti.
- Na základě gradientu rychlosti je nakonec odhadována elasticita zobrazovaných tkání.
- Pro dosažení rychlostí pohybu dostatečných pro výpočet musí být tkáň stlačována až o několik milimetrů.

Ultrazvuková elastografie

Statická (kompresní) elastografie

- **Metoda založená na radiační síle UZ paprsku (ARFI):**
- Využívá velkého akustického tlaku fokusovaného UZ ke kompresi tkáně. Velikost radiační síly roste s intenzitou UZ a je největší ve fokusační zóně.
- K vytvoření měřitelných posunů tkáně je zapotřebí velmi intenzivního UZ pulzu.
- Posun tkáně se zjišťuje zobrazovacími (čtecími) pulzy vyslanými před a po aplikaci intenzivního pulzu.
- Posuny jsou vyhodnoceny jako změny UZ signálu (paprsky A-módu) před a po kompresi tkáně.

Ultrazvuková elastografie

Statická (kompresní) elastografie

- **Výhody:**
 - Jednoduchost, dostupnost, cena.
 - Zobrazení v reálném čase.
- **Nevýhody:**
 - Často neznáme velikost deformačního napětí, proto nelze elastické vlastnosti tkáně (E) určit kvantitativně. Elasticita se pak odhaduje pouze na základě deformace.
 - Každý elastogram je víceméně originál, pořízený za daných podmínek. Problematické je srovnání elastogramů.
 - Kvalita obrazu i jeho analýza závisí na zkušenostech lékaře.
 - Elasticitu lze měřit pouze ve směru UZ paprsku.

Ultrazvuková elastografie

Dynamická (shear waves) elastografie

- **Je založena na střižných vlnách (shear waves), které vznikají jako odezva tkáně na mechanické vibrace s nízkou frekvencí a šíří se tkáněmi v příčném směru.**
- **Zdroje vibrací: fyziologické pohyby v organismu, externí vibrátory nebo pulzy akustického tlaku vytvořené fokusovaným UZ paprskem.**
- **Rychlost šíření střižných vln je nízká (cca 1-10 m/s) a závisí hlavně na elasticitě (E) a hustotě (ρ) tkání:**

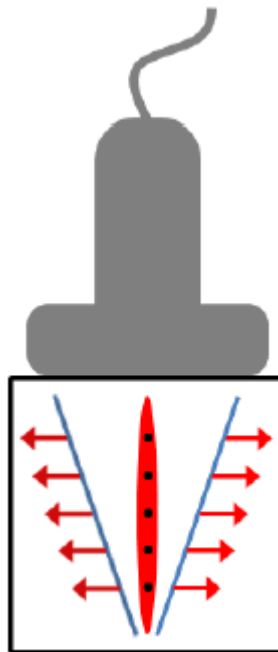
$$v_s = \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$$

- **Hustota tkání (ρ) je známá: asi $1047 \pm 5 \text{ kg/m}^3$.**

Ultrazvuková elastografie

Dynamická (shear waves) elastografie

- **Vytvoření střížných vln pomocí akustického tlaku fokusovaného UZ paprsku.**
- **Sondy umožňují vytvořit více fokusačních zón v různých hloubkách tkáně.**



Ultrazvuková elastografie

Dynamická (shear waves) elastografie

- **Aby bylo možné rychlost šíření střižných vln tkáněmi určit, je nutné snímkovat zájmovou oblast s velmi vysokou opakovací frekvencí (5 000 až 20 000 Hz).**
- **Při rychlosti střižných vln cca 1-10 m/s totiž tyto vlny opouštějí snímanou oblast za velmi krátkou dobu*. Při opakovací frekvenci konvenčních UZ systémů (50-60 Hz) se vlny ze scény vytratí již během pořizování snímku a nelze je detekovat.**

* Např. pro velikost oblasti 10 cm opustí vlny scénu za 0,1-0,01 s.

Ultrazvuková elastografie

Dynamická (shear waves) elastografie

- **Výhody:**
- Kvantitativní popis elasticity (Youngův modul).
- Zobrazení v reálném čase.
- Detekce milimetrových lézí a velmi přesná lokalizace.
- Každý elastogram je pořízen stejným způsobem. Obrazy lze snadněji srovnávat a analyzovat (reprodukovatelnost).
- Jednoduchá obsluha. Kompresi tkáně provádí přístroj dle nastavených parametrů.

Ultrazvuková elastografie

Dynamická (shear waves) elastografie

- **Nevýhody:**
- Náročná technologie a vyšší cena. Vyžaduje ultrarychlé zobrazování a speciální UZ sondy.
- Při kompresi tkáně akustickým tlakem UZ vlnění je nutné volit dostatečnou intenzitu vln, aby měly generované střížné vlny delší dosah a menší útlum.
- S vyšší intenzitou UZ vln souvisí větší riziko biologických účinků UZ a konstrukční problémy (zahřívání sondy).

Ultrazvuková elastografie

Intravaskulární elastografie

- **Princip měření je obdobný jako u statické ultrazvukové elastografie.**
- **Ultrazvukový snímač se zavádí do snímané cévy v podobě katétru.**
- **Komprese: pulsace cévy nebo intravaskulární balónek.**
- **Detekce trombů a aterosklerotických plátů.**

Magnetická rezonanční elastografie (MRE)

- **Elasticita tkáně je určena na základě rychlosti šíření střížných vln, které vznikají v tkáni jako odezva na nízkofrekvenční mechanické vlny (asi 50-500 Hz).**
- **Zdroj mechanických vln: akustická, pneumatická nebo elektromagnetická zařízení.**
- **Šíření vln je detekováno speciálními fázově-kontrastními metodami citlivými na pohyb.**
- **Z rychlosti šíření vln lze kvantitativně určit elasticitu tkáně (Youngův modul):**

$$E = 3\rho v_s^2 = 3\rho(f\lambda)^2$$

Magnetická rezonanční elastografie (MRE)

Klinické aplikace

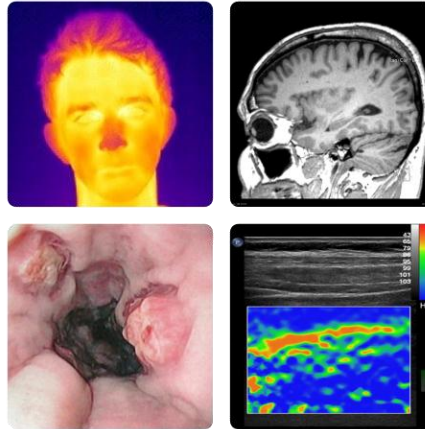
- **Vyšetření jater, ledvin, a mozku.**
- **Patologie lze s výhodou hodnotit také:**
 - **prsní tkáň a prostata**
 - **srdce a cévy**
 - **slezina, slinivka břišní**
 - **plice**
 - **kosti, chrupavky a svalstvo**
 - **oko**
 - **mícha**
 - **aj.**

Magnetická rezonanční elastografie (MRE)

- **Výhody:**
- Rychlost vyšetření (asi 15-30 s)
- Nevyžaduje SW ani HW doplňky ke klasickým MRI
- Měření v libovolné rovině těla
- Klinické uplatnění
- Možnost zařadit do protokolu MR vyšetření

- **Nevýhody:**
- Cena

- **Chybné výsledky způsobují deformace vyvolané jinými silami (tlukot srdce, pulsace cév, dýchání, aj.).**
- **Chyby způsobené v blízkosti tuhých nepohyblivých struktur (např. kosti), kde se měkká tkáň deformuje jinak než stejná tkáň v jiném místě.**
- **Omezený dosah měření vzhledem ke krátkému dosahu kompresních sil.**
- **Obecné limitace ultrazvuku a magnetické rezonance.**



Děkuji za pozornost !