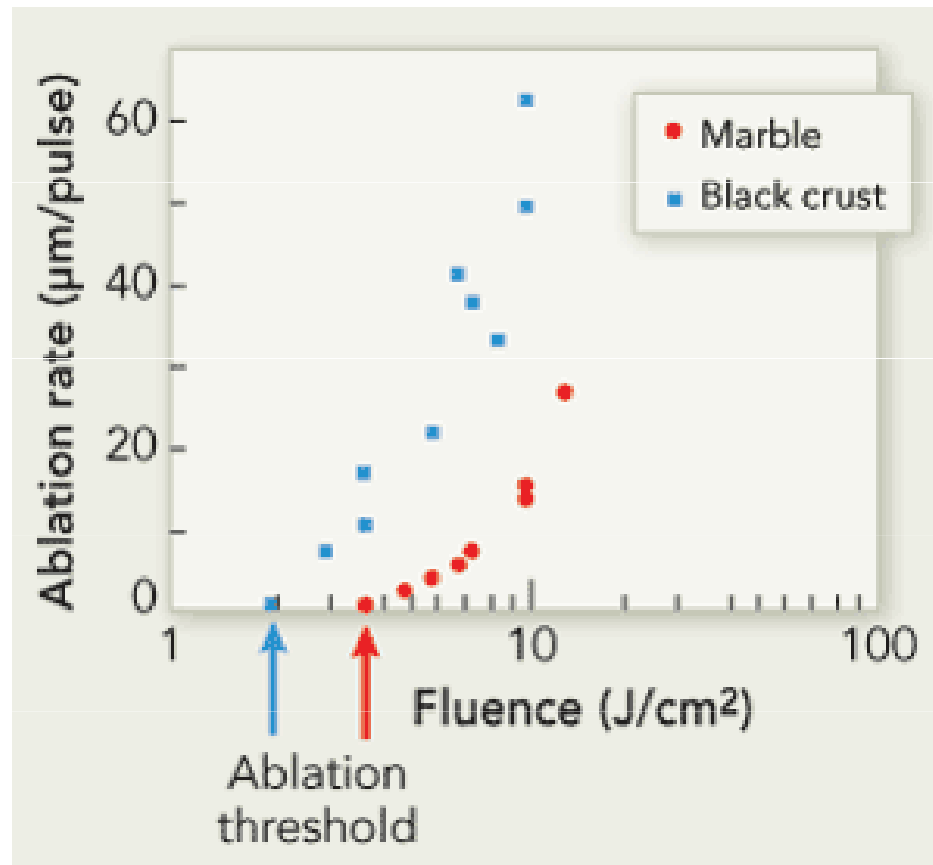


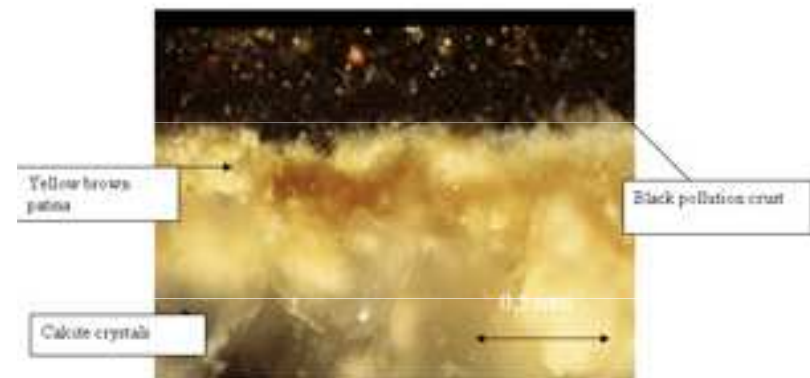
# Interakce laseru s materiálem a laserové čištění

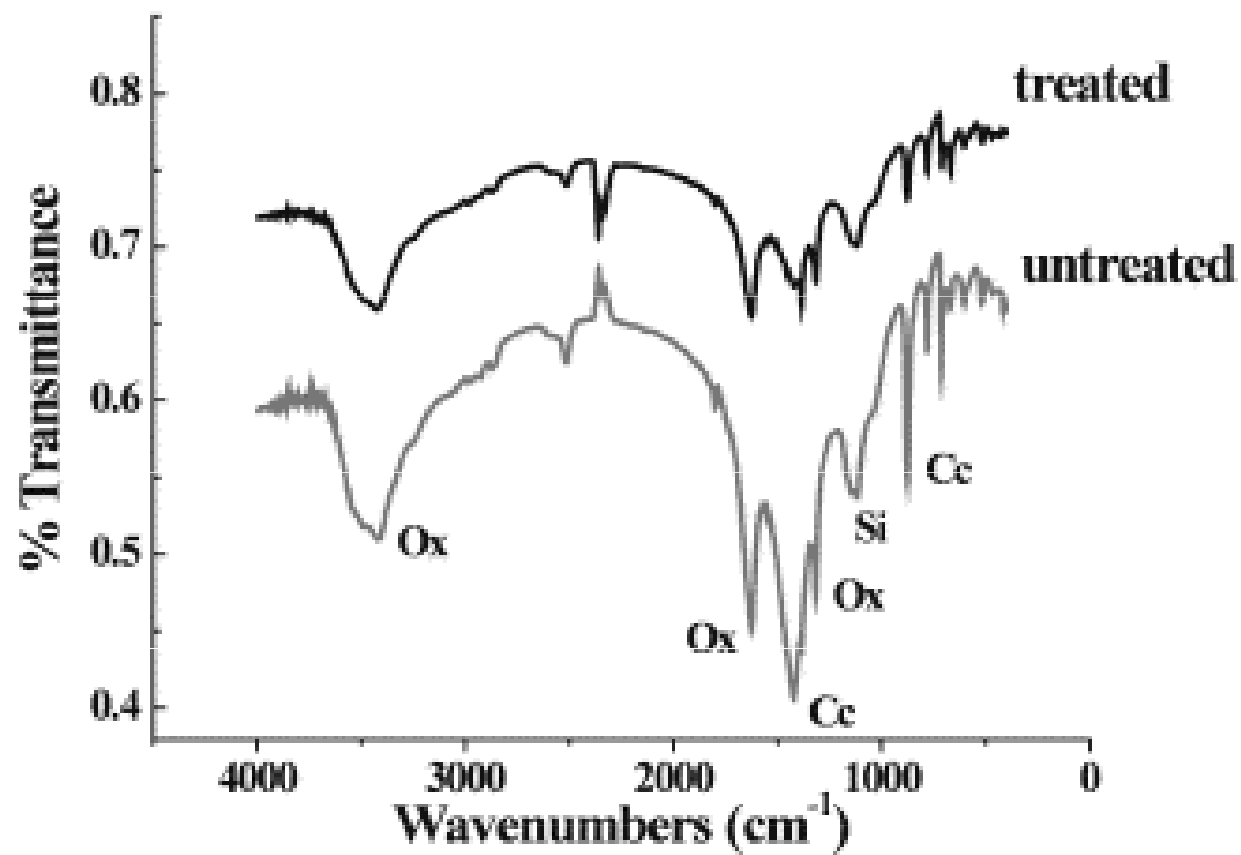


# Laserové čištění

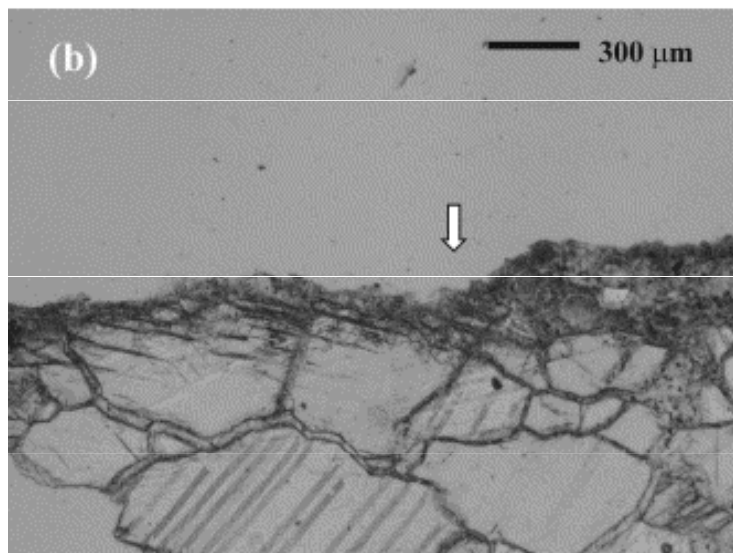
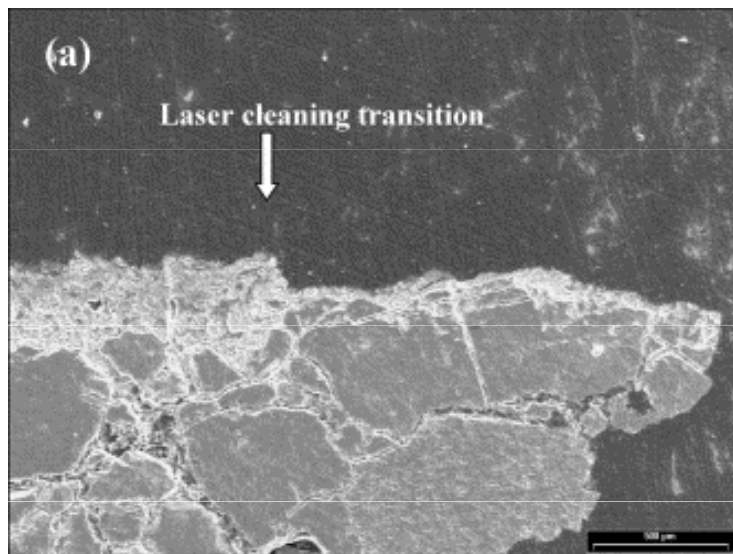


# Kámen

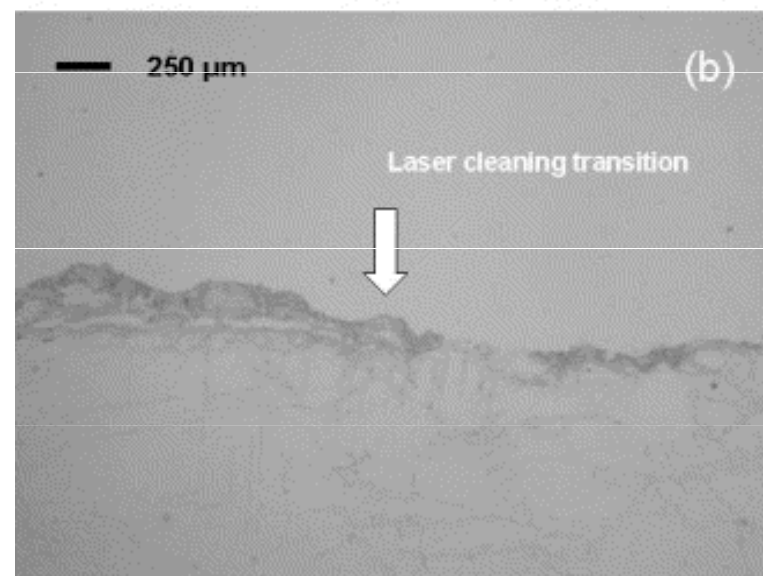
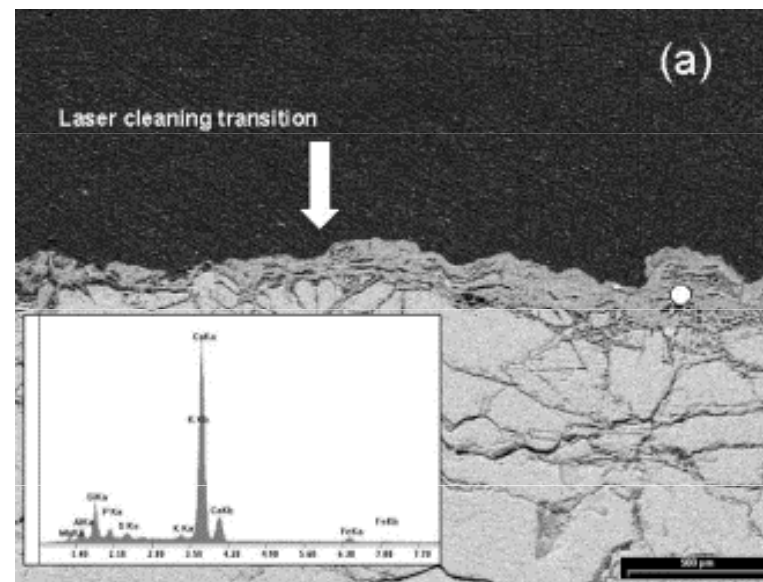




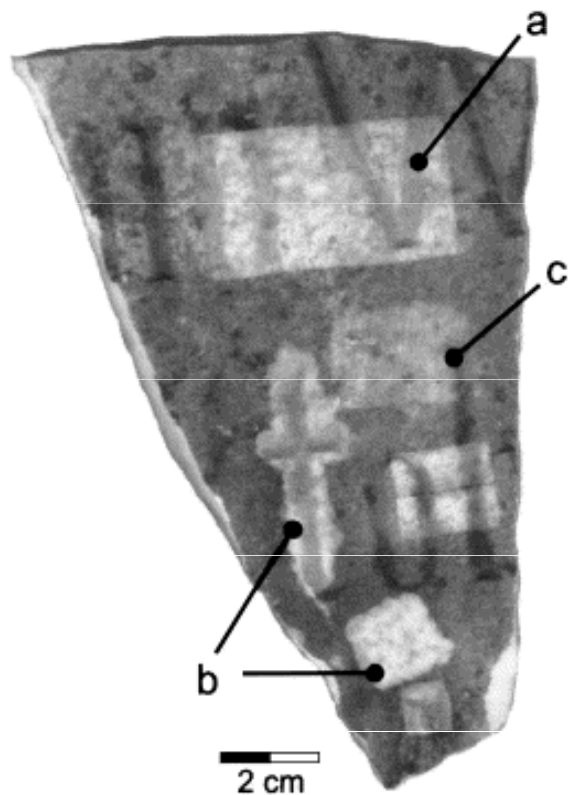
FTIR spektra patiny na mramoru před a po působení Nd:YAG laseru at 2.5 J/cm<sup>2</sup>;  
 Ox: oxalates; Cc: calcite; Si: silicates.



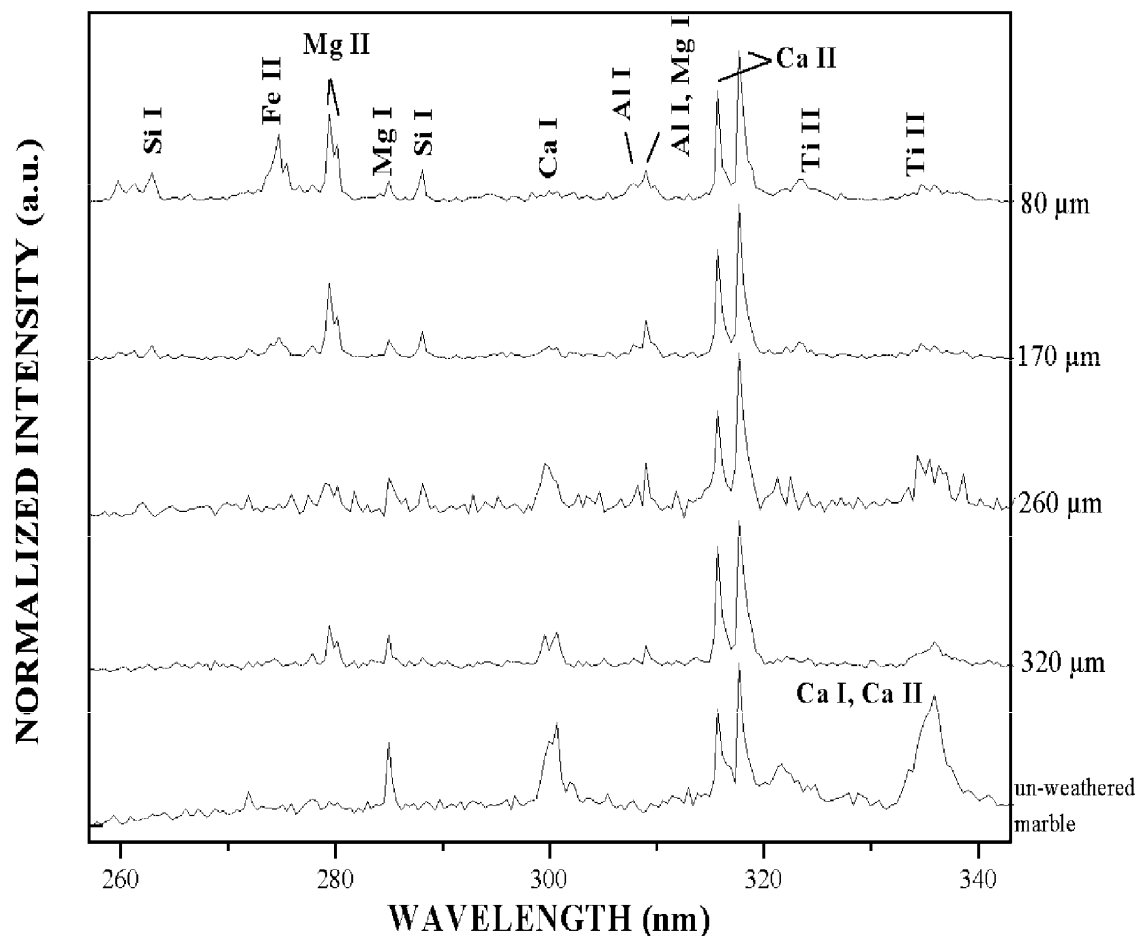
Tenký řez dendritické krusty na Pentelickém mramoru ozářeném Nd:YAG laser at  $2.5 \text{ J/cm}^2$ . Obraz v SEM (53X BS) (a) a polarizačním mikroskopu (b). Šipka indikuje rozhraní mezi ozářenou a neožářenou oblastí vzorku.



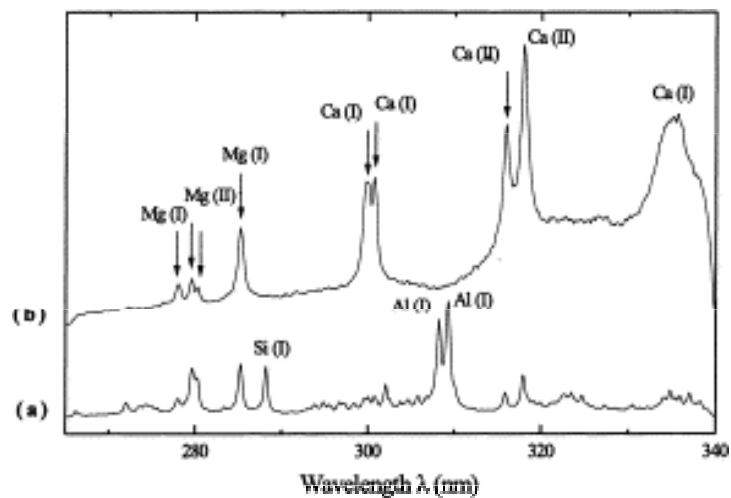
Tenký řez patiny na Pentelickém mramoru ozářeném Nd:YAG laser at  $2.5 \text{ J/cm}^2$ . Obraz v SEM (53X BS) (a) a polarizačním mikroskopu (b). Šipka indikuje rozhraní mezi ozářenou a neožářenou oblastí vzorku. Analýza plochy metodou SEM–EDX je v rámečku.



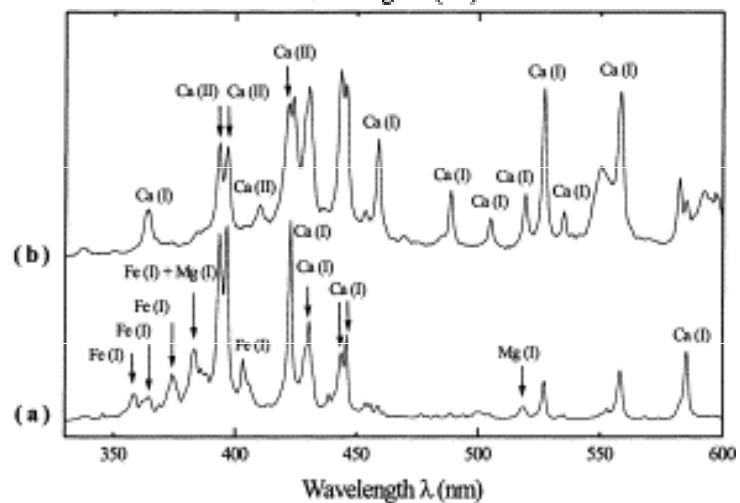
Výsledky čištění biogenně inkrustovaného mramoru. (a)  $\lambda=355$  nm,  $H=0.48$  J/cm<sup>2</sup>,  $n=10$  and a spot overlap of  $\delta\approx 50\%$ ; (b)  $\lambda=5324$  nm,  $H=1.07$  J/cm<sup>2</sup>,  $n=10$  and  $\delta\approx 50\%$  and (c)  $\lambda=1064$  nm,  $H=1.45$  J/cm<sup>2</sup>,  $n=10$  and  $\delta\approx 50\%$ .



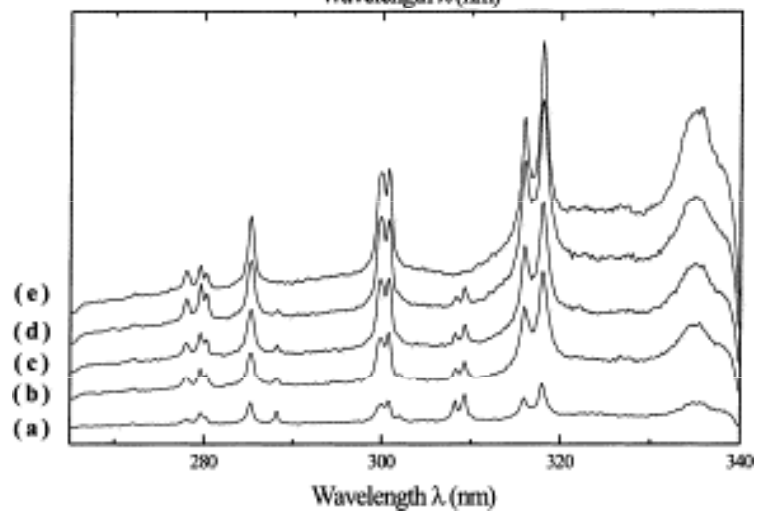
LIBS spektra ablatovaného materiálu z dendritickej krusty v různé hloubce na Pentelickém mramoru, normalizovaná na intenzitu čáry Ca II 317.93 nm.



LIBS spectra of the biogenické inkrustace mramoru ve spektrální oblasti 265–340 nm. (a) Puls 2 biogenní krusty; (b) puls 2 povrchu mramoru bez povrchové vrstvy.



LIBS spectra of the biogenické inkrustace mramoru ve spektrální oblasti 325–600 nm. (a) Puls 2 biogenní krusty; (b) puls 2 povrchu mramoru bez povrchové vrstvy.



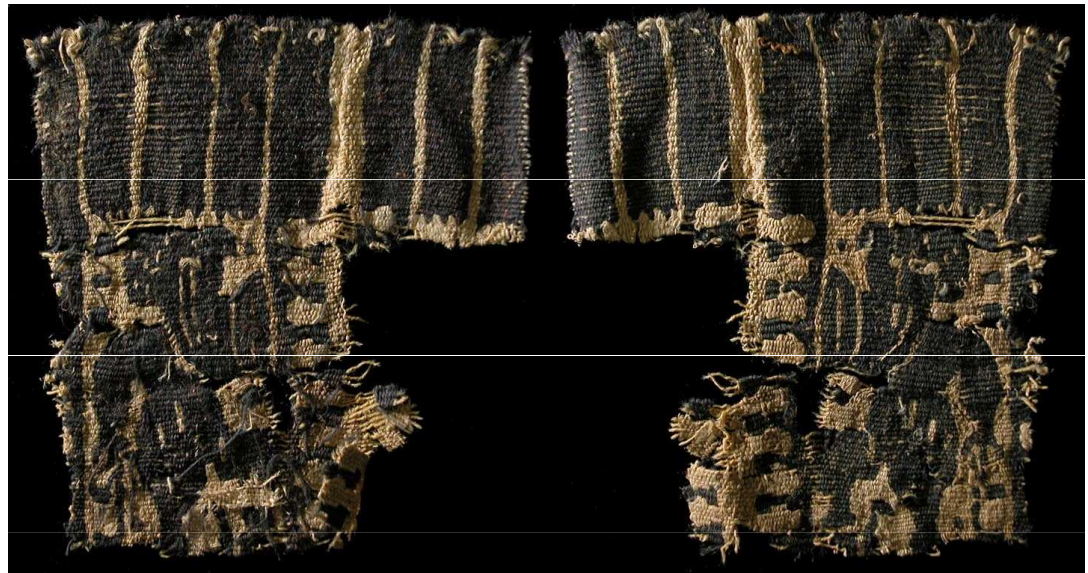
Kumulativní LIBS spektra během odstraňování biogenní inkrustace na mramoru: (a) 3. puls; (b) 5. puls; (c) 7. puls; (d) 9. puls (e) čistý povrch.



# Textilie



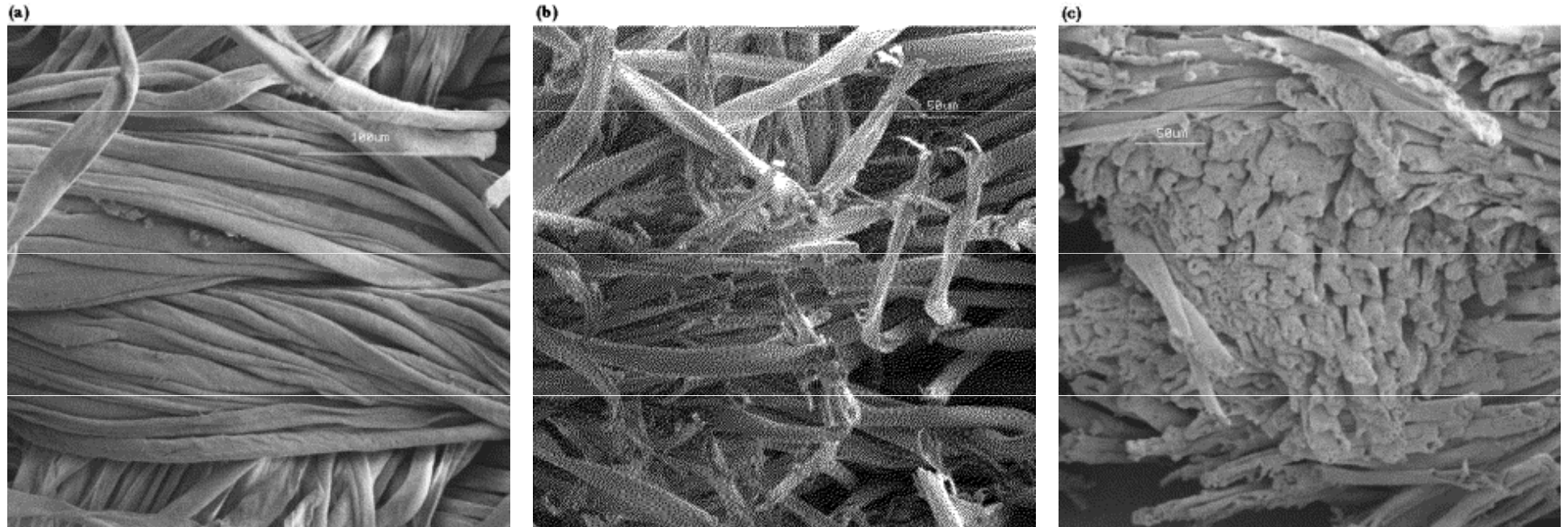
Čínské hedvábí, cca 2400 let staré



Koptská textilie, 5.-7. stol.



# Celulózová vlákna



Mikrosnímek (elektronový mikroskop) povrchu čsé bílé bavlny: a) před ozářením; b) po 100 pulsech, 1064 nm, 3.7 J/cm<sup>2</sup>; c) po 100 pulsech, 266 nm, 0.5 J/cm<sup>2</sup>.

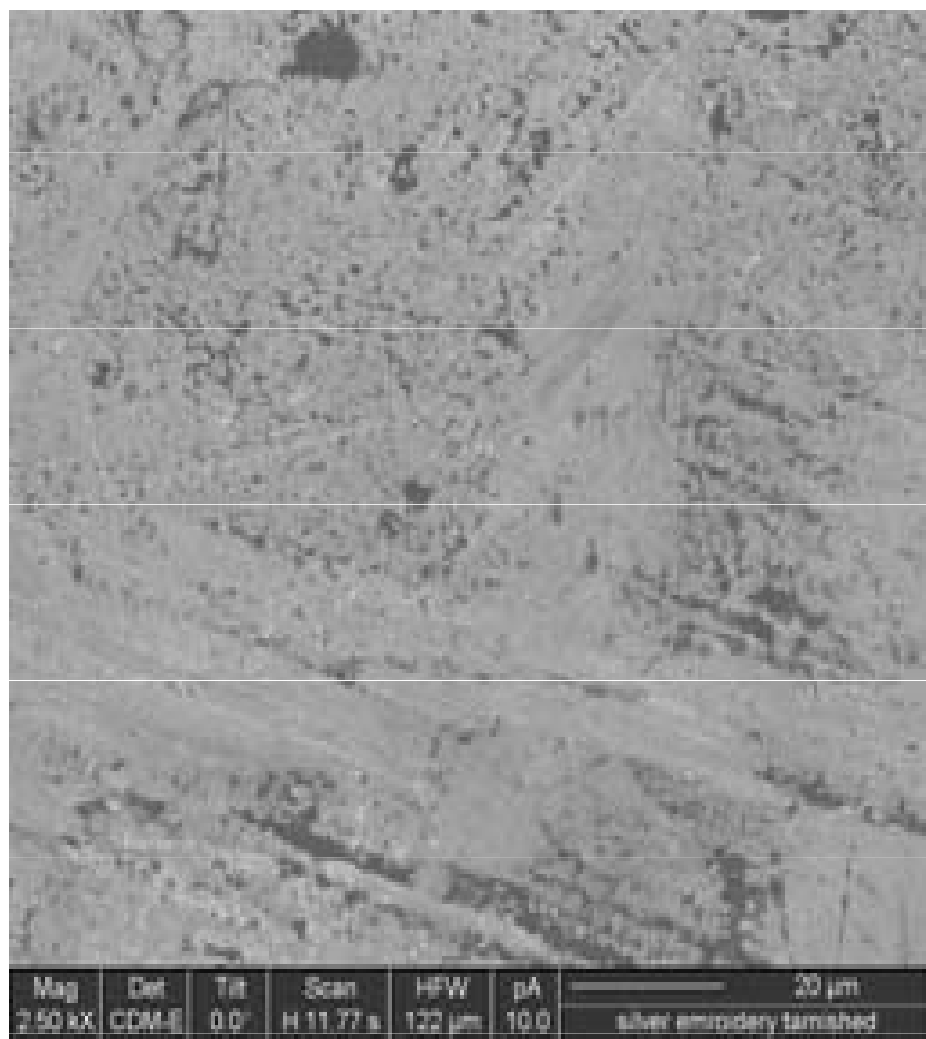
# Brokát



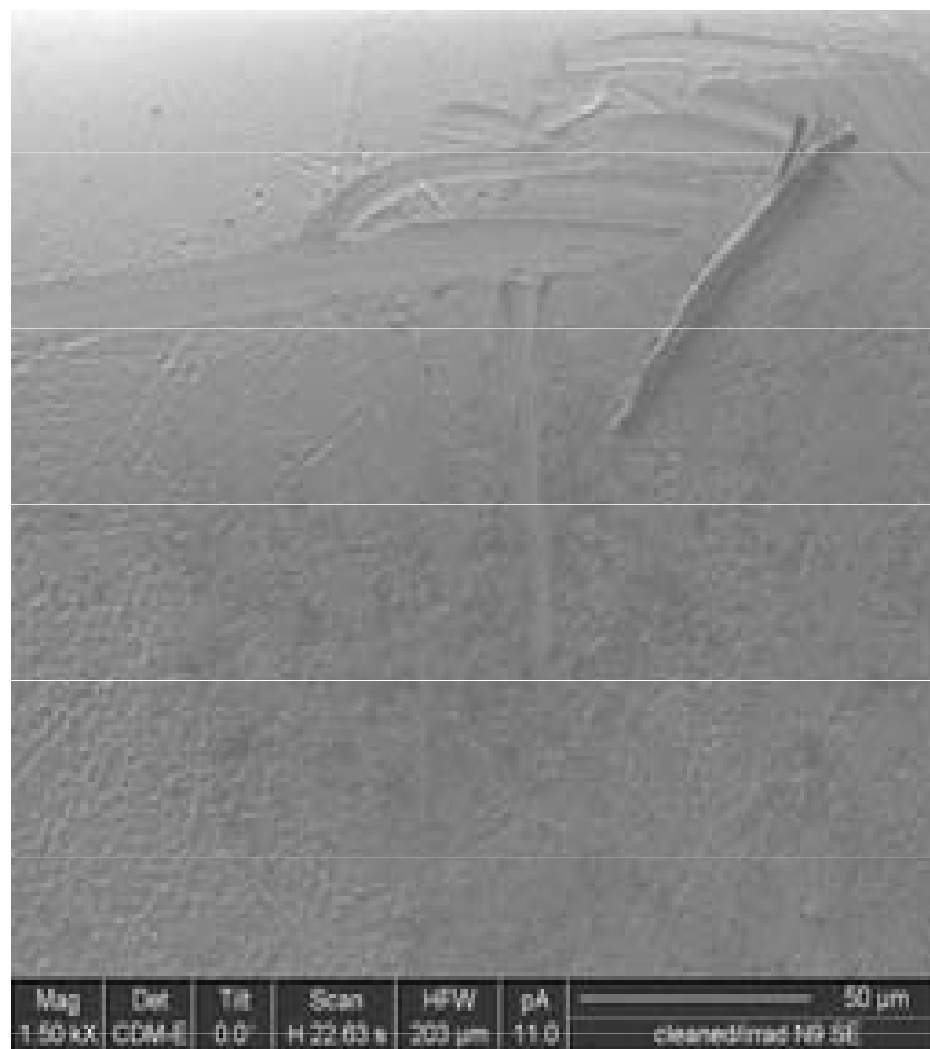
Jezdecký oblek (18. stol.)



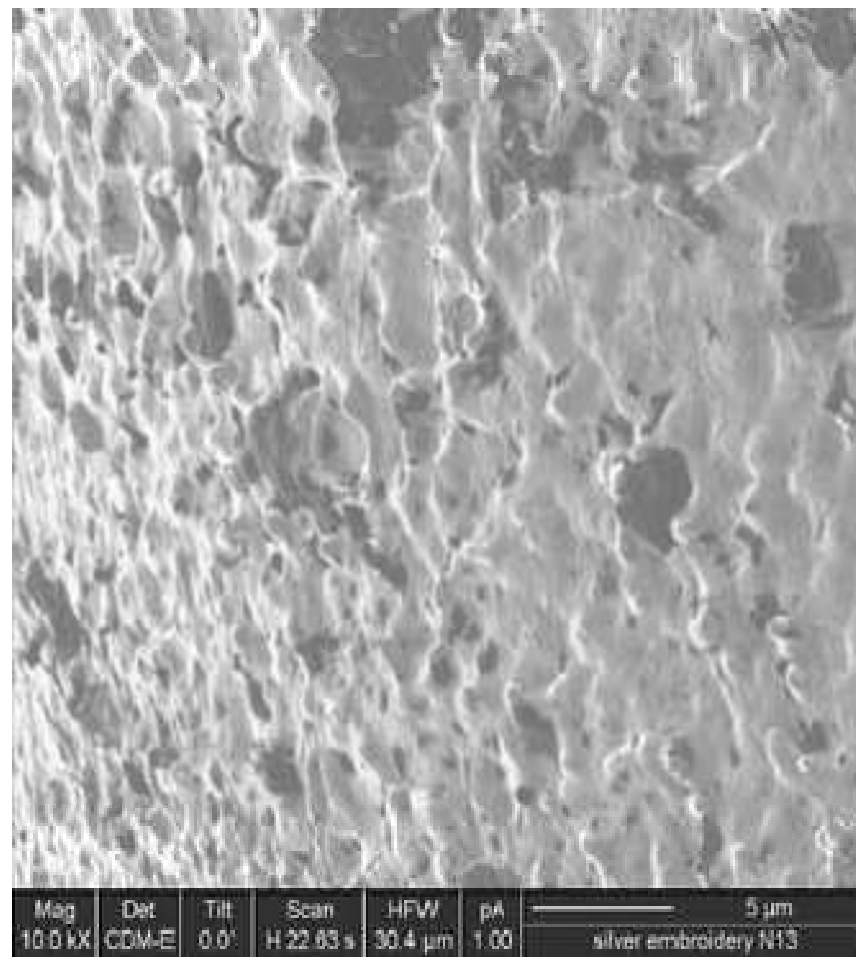
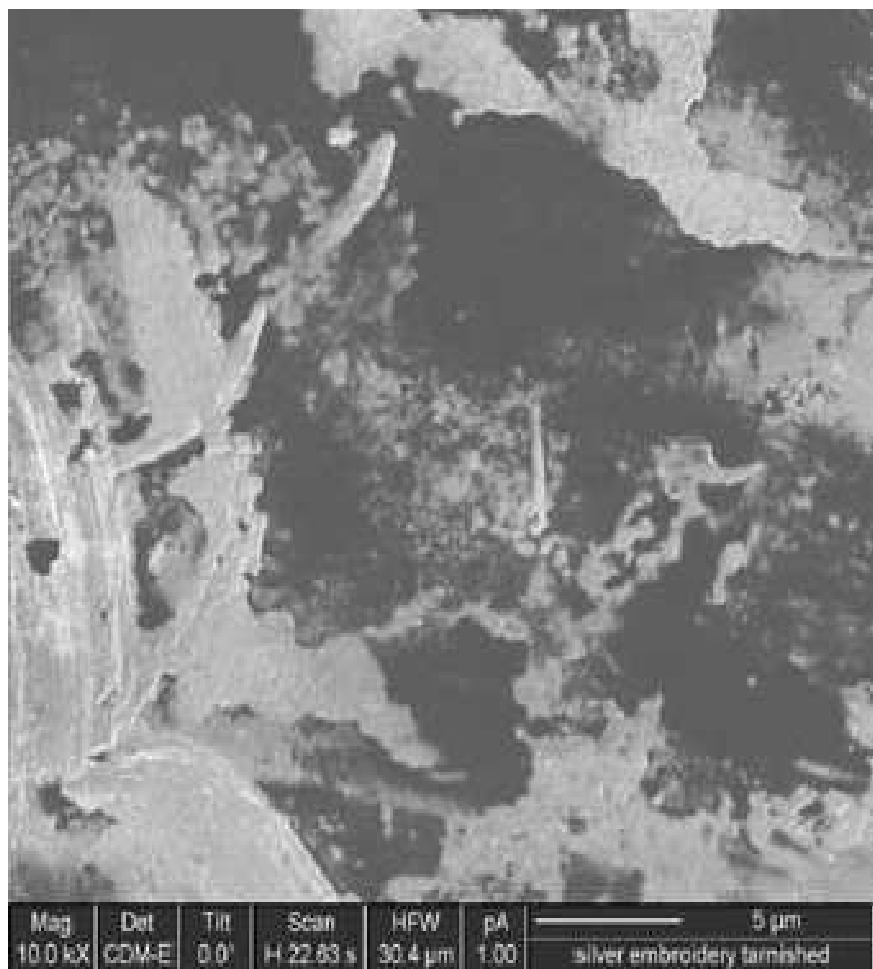
Čištěná plocha



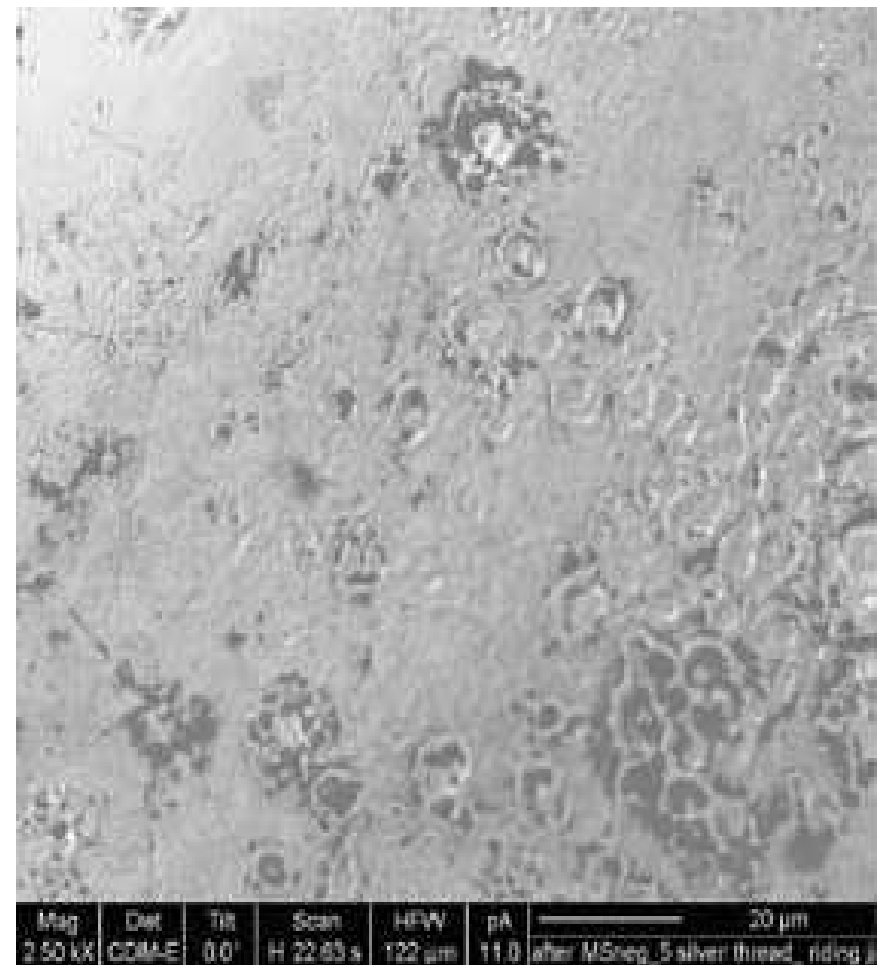
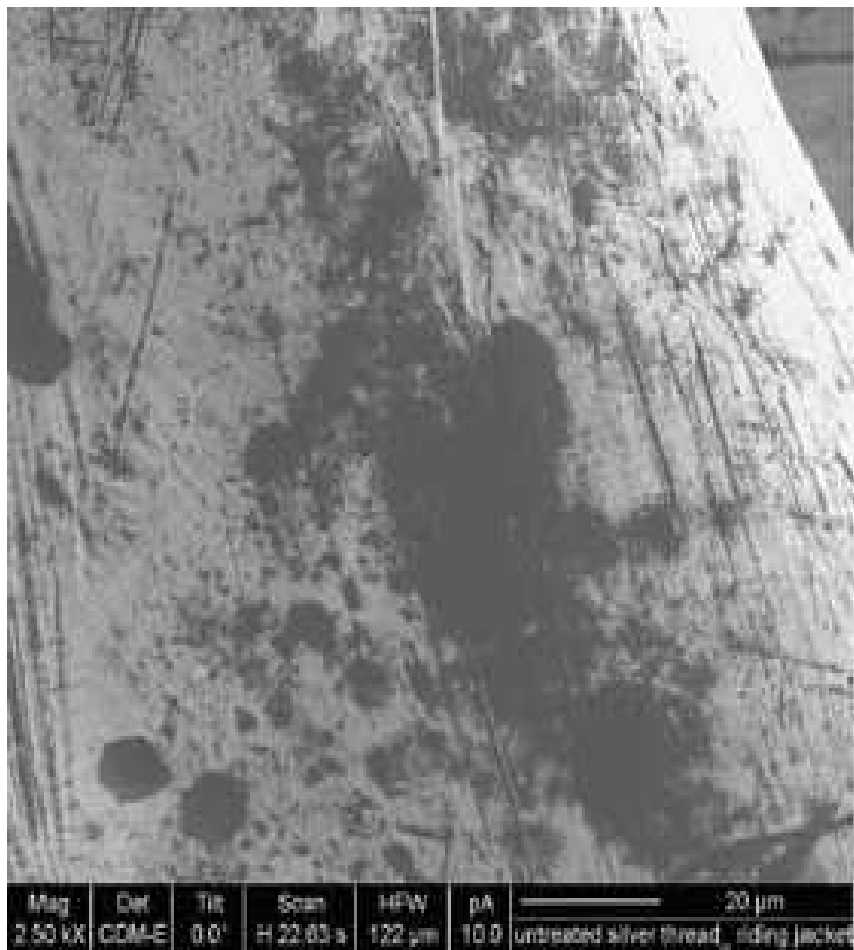
Povrch zmatnělé stříbrné nitě před ozářením laserem



Stříbrná nit po ozáření laserem

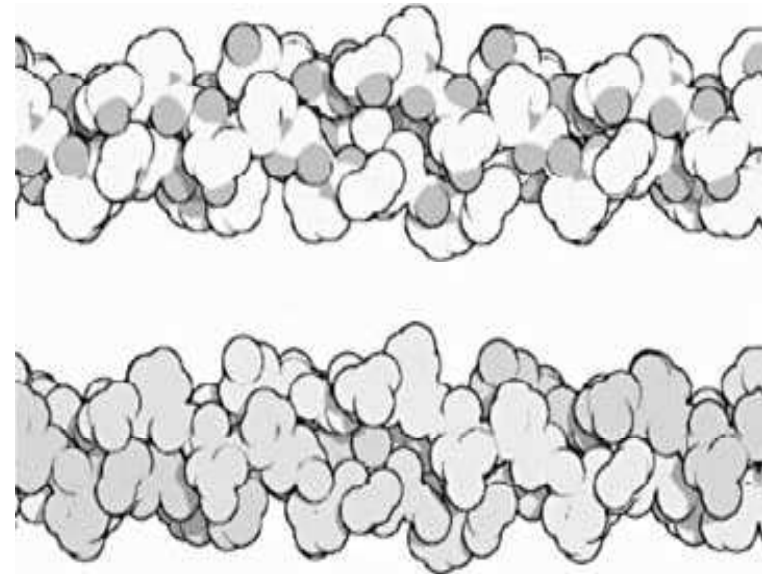
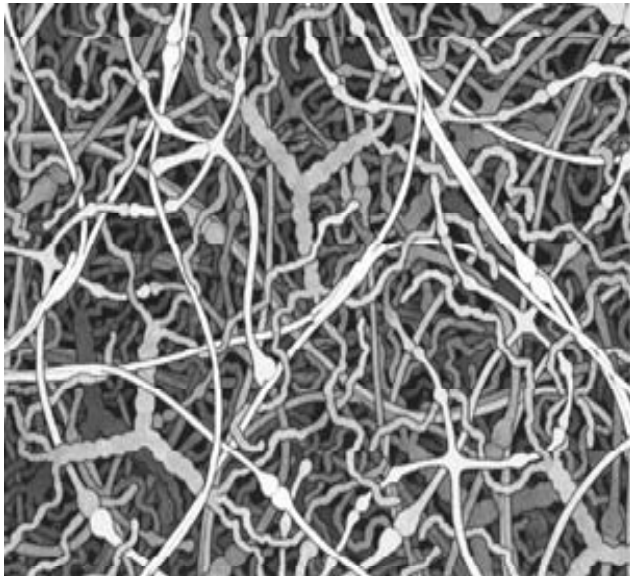


Povrch stříbrné nitě před a po ozáření laserem 532 nm s fluencí  $0.6 \text{ J/cm}^{-2}$



Stříbrná nit z jezdeckého obleku před (vlevo) a po (vpravo) laserovém čištění při 532 nm s  $2 \text{ J/cm}^{-2}$

# Pergamen



Kollagen – hlavní složka pergamenu (simulace).

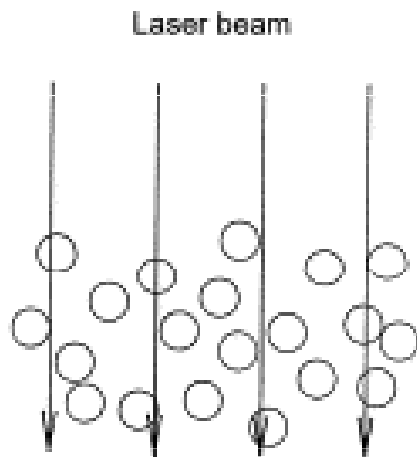
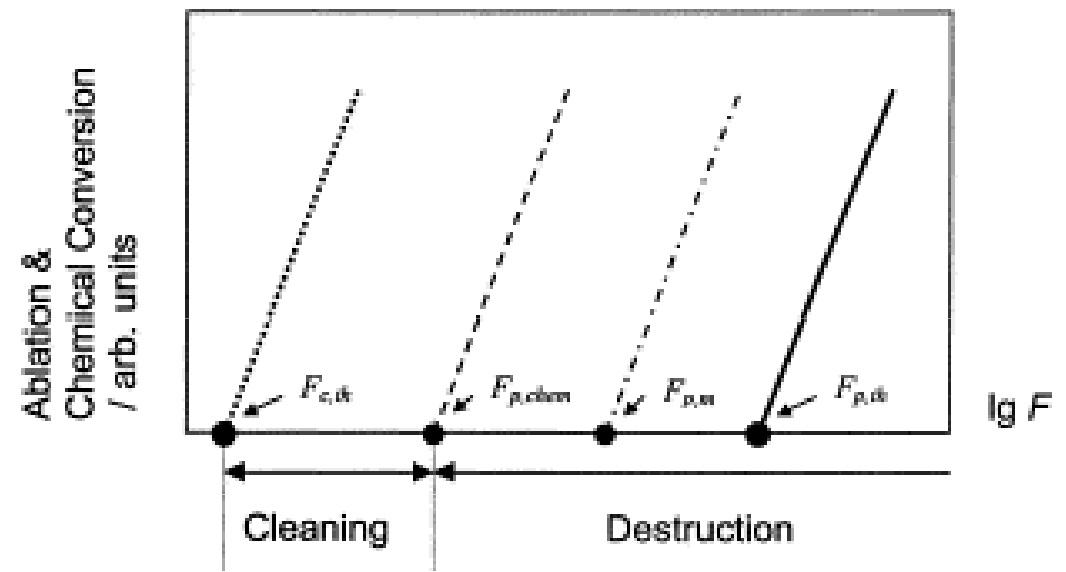
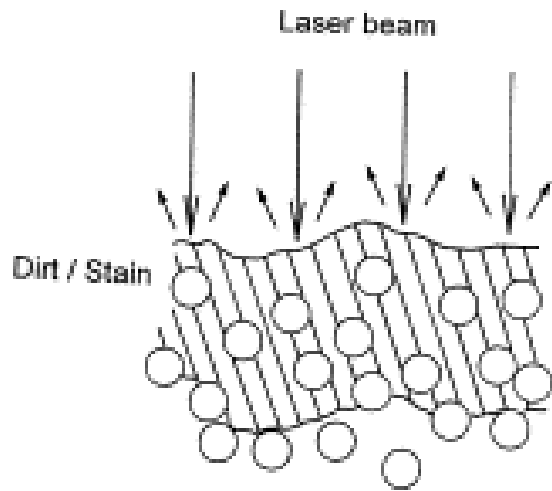


Schéma parametrů laserového čištění pro pergamen (a také papír). Chemická konverze / ablace vs.  $\lg$  (fluence):

Prahy fluence laseru pro ablaci konaminantů (proces čištění) ( $F_{c,th}$ ) a ablace ( $F_{p,th}$ ), morfologických změn ( $F_{p,m}$ , e.g. tavení), a nevratné chemické změny ( $F_{p,chem}$ ) pergamenu. Rozpětí fluencí pro nedestruktivní čištění leží mezi  $F_{c,th}$  a  $F_{p,chem}$ .  $F_{p,chem}$  se může shodovat s  $F_{p,m}$  a  $F_{p,th}$ .

Modelové schéma UV čištění pergamenu a papíru:

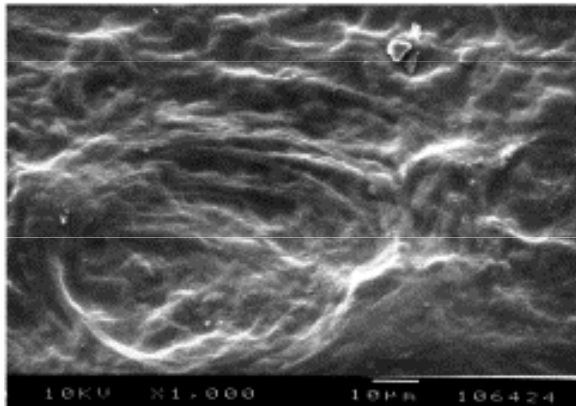
během ablace cizorodého materiálu (nečistoty, skvrny) z povrchové vrstvy.  
po čištění.

Použití fluence pod ablační substrátu dovoluje „etch-stop“ a zachování materiálu.

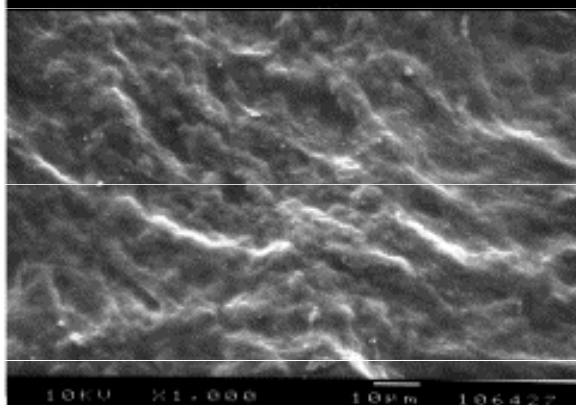


$F$  [ $\text{J cm}^{-2}$ ]  
0

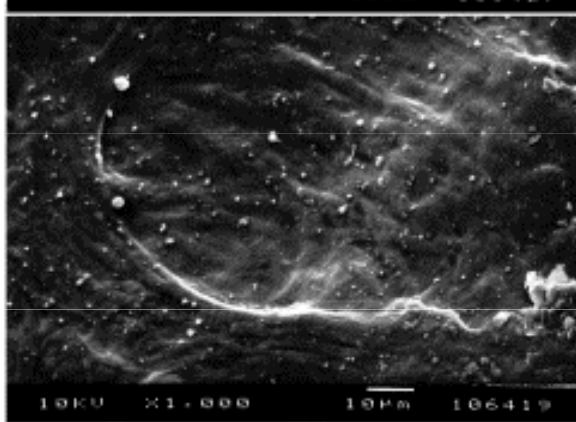
$\lambda = 308 \text{ nm}$



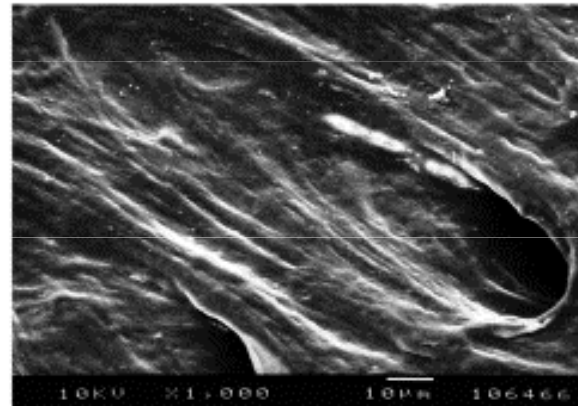
0.38



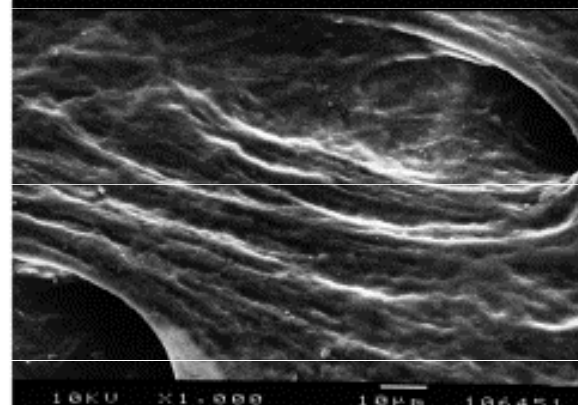
0.55



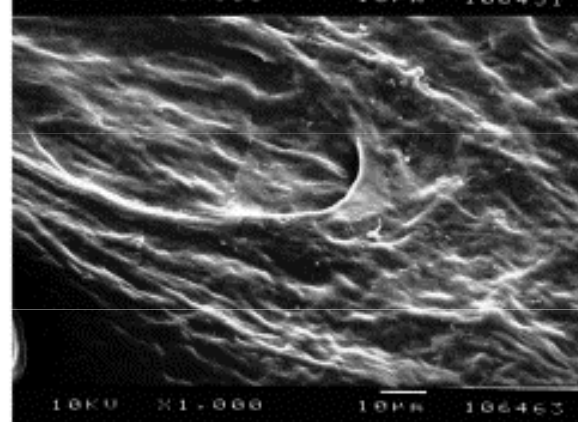
$\lambda = 1064 \text{ nm}$



0.86

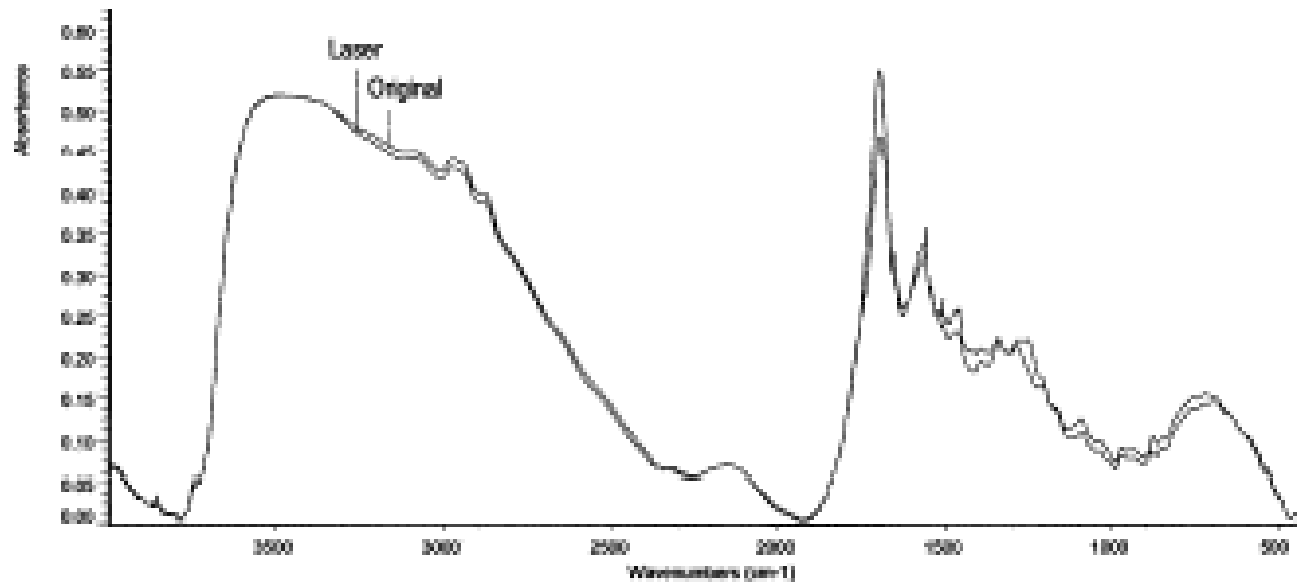


1.14

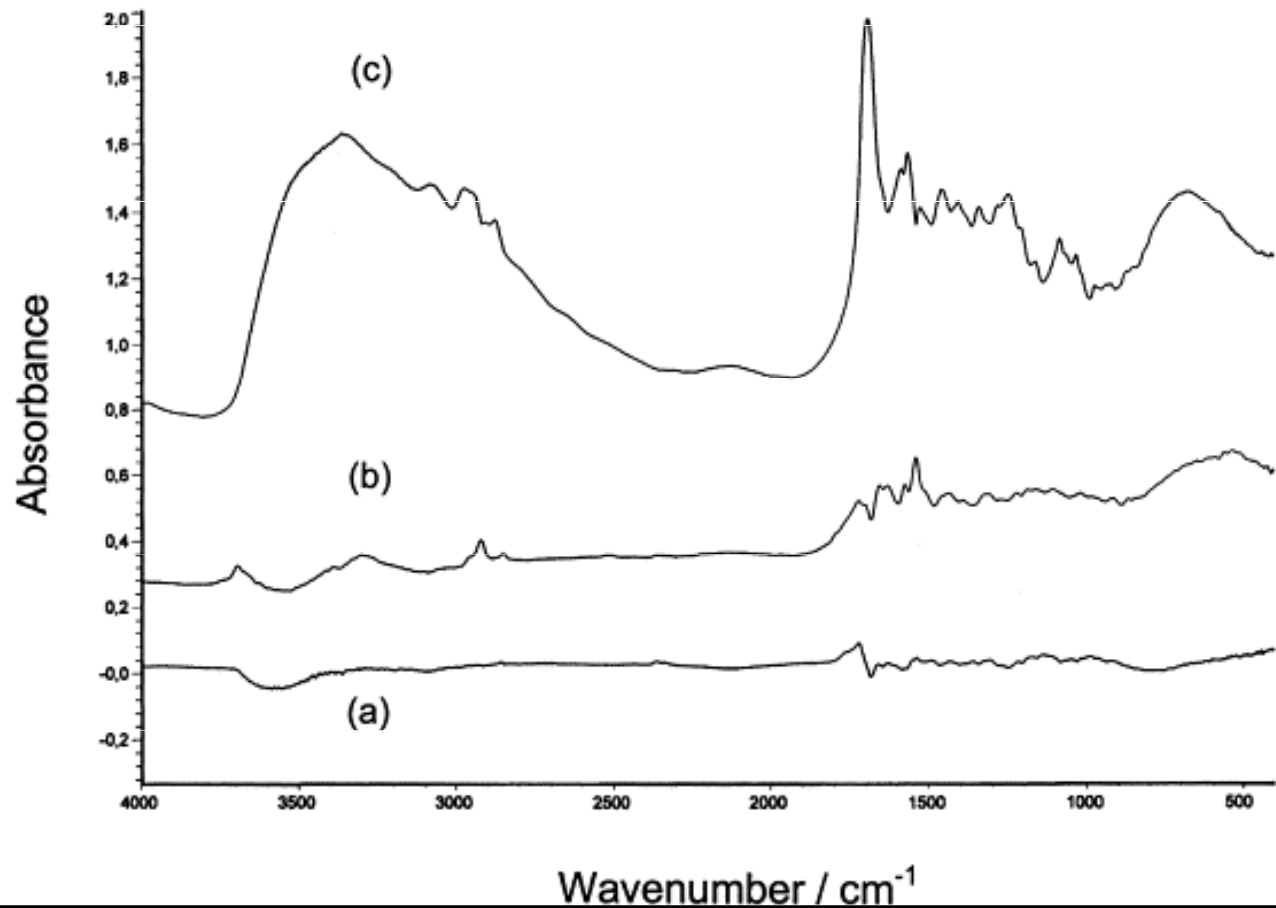


Elektronová micrografie recentního pergamenu pro lasery  $\lambda = 308 \text{ nm}$  a  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ .

DRIFT (difusní reflectanční  
infračervená FT  
spectroskopie) starého  
pergamenu před a po ozáření  
laserem  $0.38 \text{ J cm}^{-2}$ ,  
 $\lambda = 308 \text{ nm}$ .



DRIFT (difusní reflectanční  
infračervená FT spectroskopie)  
spektra pergamenu (c) a  
příslušné změny působením  
laseru 308 nm a  $F=0.4 \text{ J/cm}^2$   
(a),  $F=0.8 \text{ J/cm}^2$  (b).



Staré pergameny mohou být čištěny bez patrného poškození, pokud je fluence laseru pod ablační mezí, jejíž hodnota závisí na charakteru materiálu (pro starý pergamen  $0.38 \text{ J cm}^{-2}$  ).

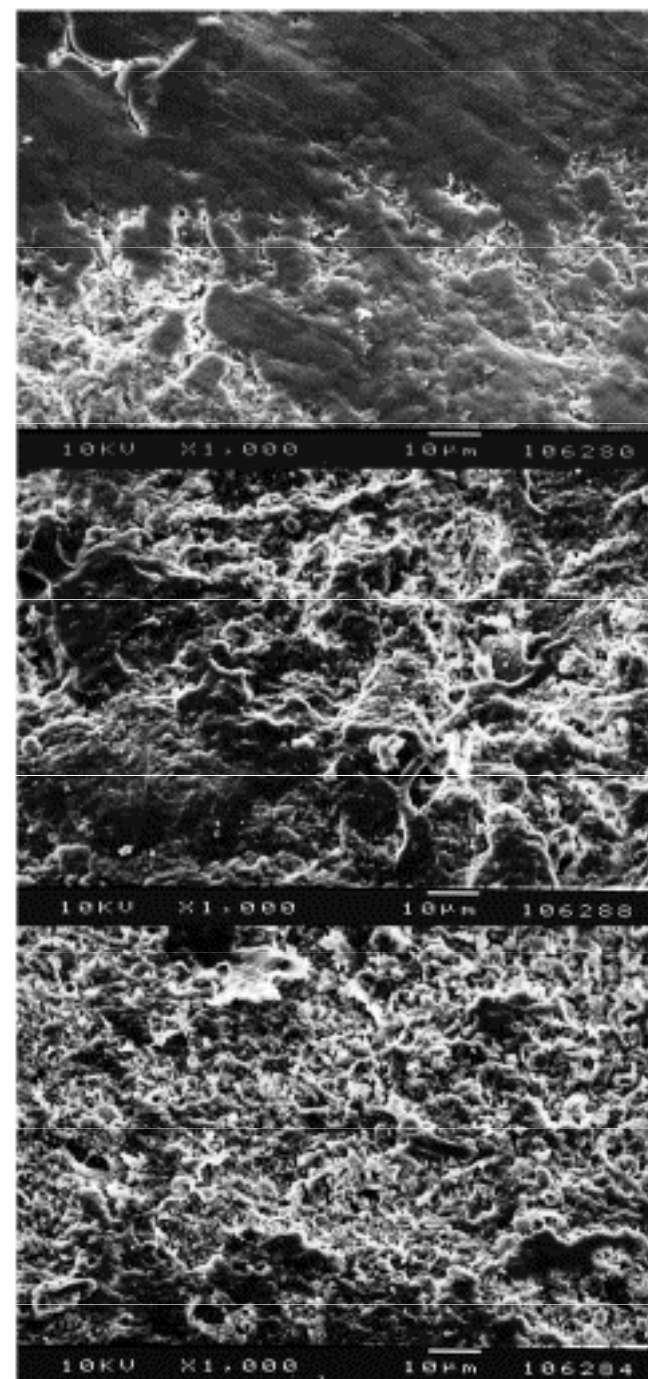
Laserem indukovaná autoxidace pergamenu se objevuje až spolu s morfologickými změnami, nad prahem destrukce (tavení a odpařování materiálu). Stáří pergamenu značně ovlivňuje práh destrukce, nelze proto při volbě parametrů laseru používat experimentální data pro recentní materiál.

Působení laseru na starý kolagen vede ke konformačním změnám, tj. k okrouhlým sférickým povrchovým útvarům při fluencích menší než ablační práh. Navíc, významný podíl želatiny ve starém pergamenu se odpaří při nižších fluencích než intaktní fibrilární kolagenní matrice.

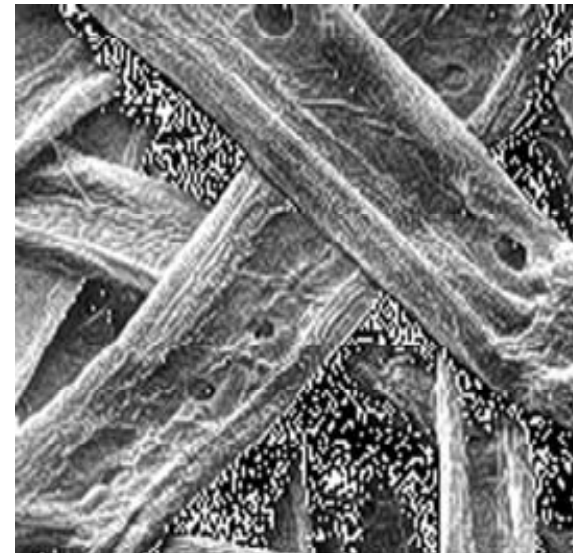
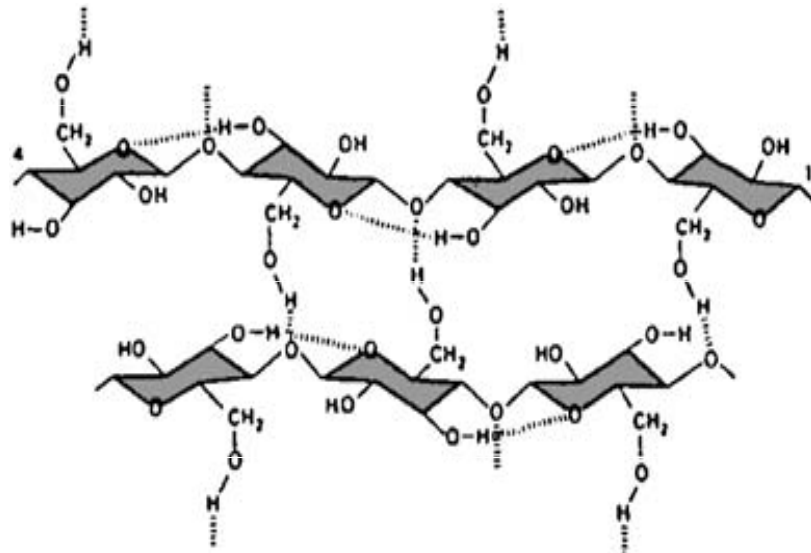
Electron micrographs of ancient parchment .Laser treatment at  $\lambda = 308 \text{ nm}$ .

$F [\text{J cm}^{-2}]$   
0

$\lambda = 308 \text{ nm}$



# Papír



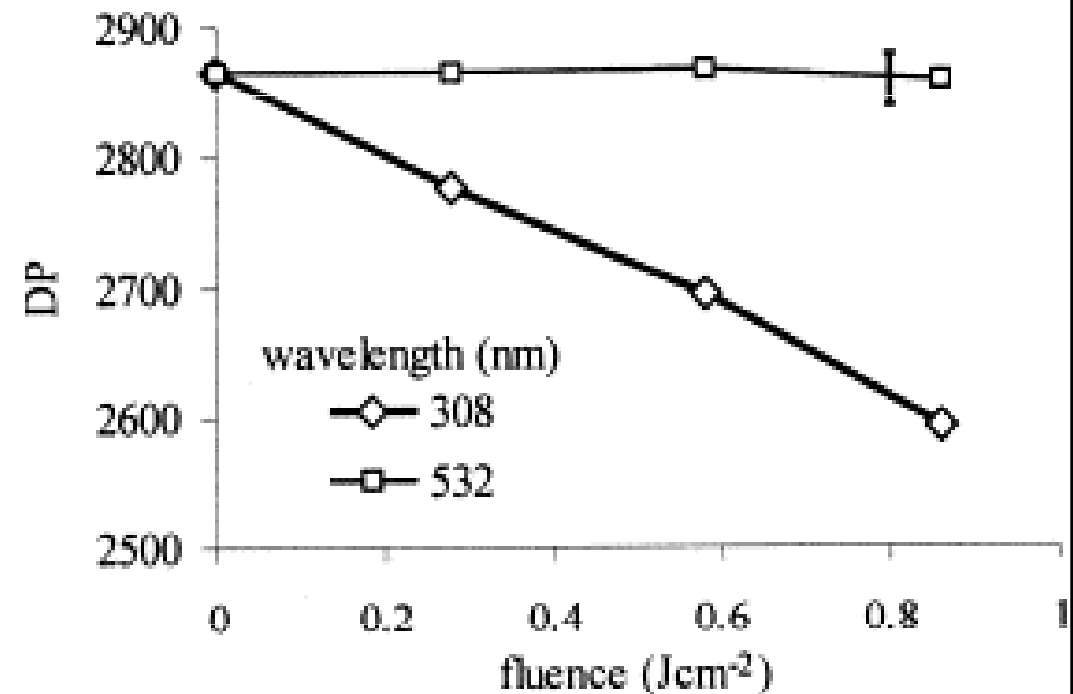
## Celulóza.

*Left* : struktura celulózy s vodíkovými můstky.

*Right* : fibrily papíru (SEM).

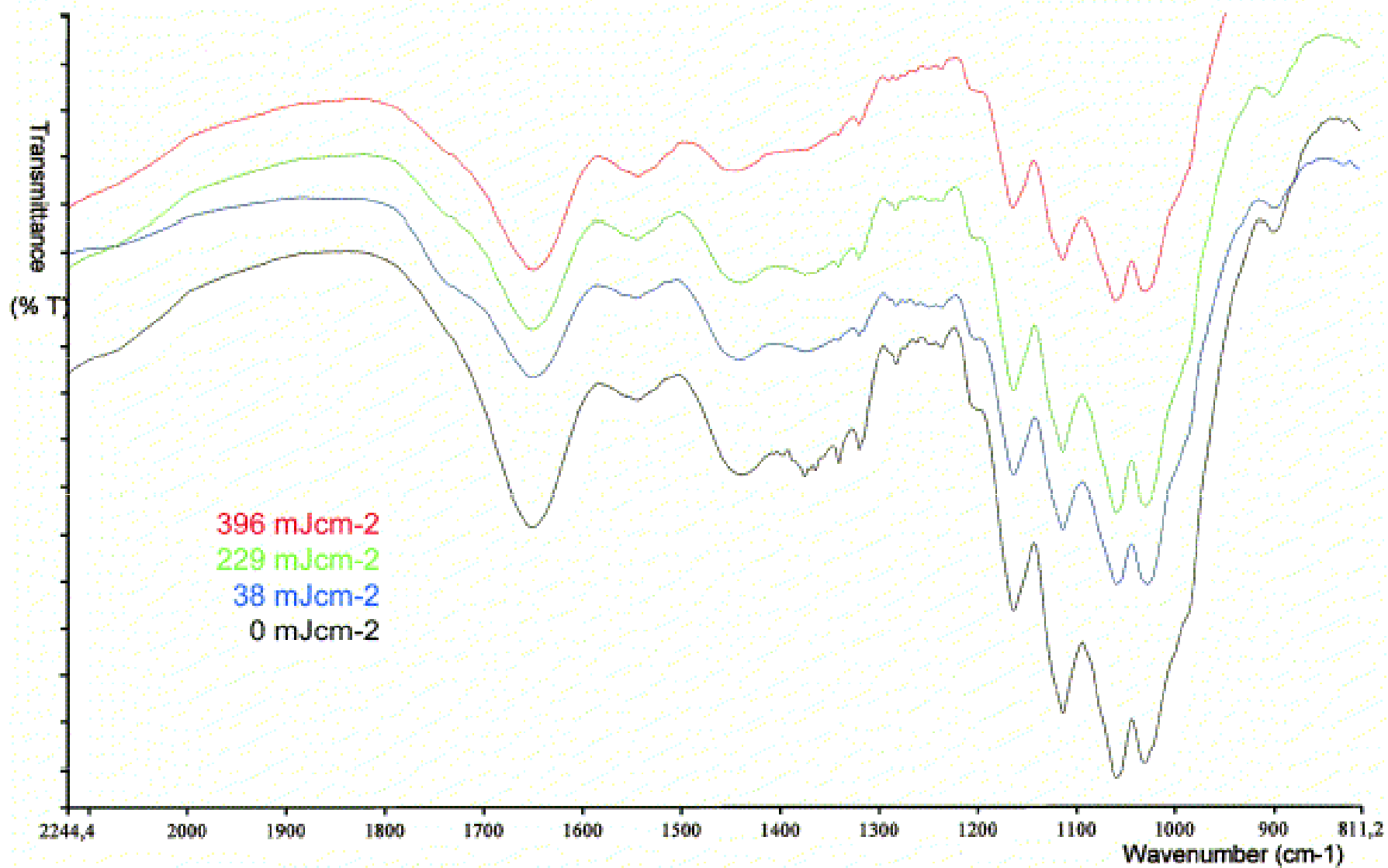
1. “*ochmýření*” povrchu papíru způsobené razantnímu vypuzení částic, ležících mezi fibrózní struktúře která vede k „naježení“ vláken.
2. “*tenčení*” tloušťky papíru v důsledku odablatování materiálu.
3. “*zuhelnatění*” nebo “*karbonizace*” papíru důsledku laserového záření.
4. “*žloutnutí*” nebo diskolorace povrchu papíru.

Bezprostřední vliv záření excimerového (308 nm) a Nd:YAG (532 nm) laseru pro různé fluence na stupeň polymerace (degree of polymerization, DP) celulózy (Whatman).



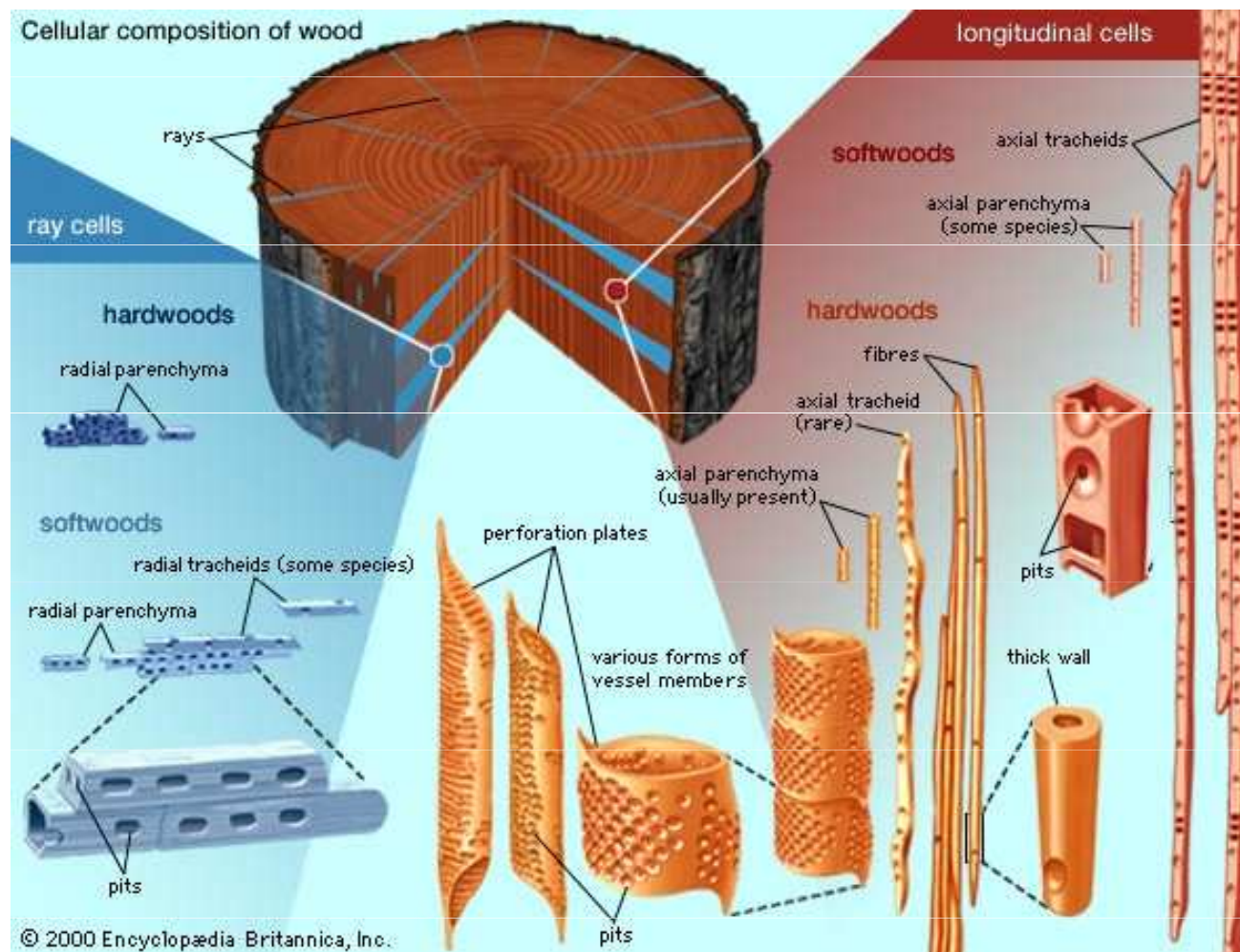
# CENTRO DE RESTAURACION DE BIENES CULTURALES

JUNTA DE CASTILLA Y LEON

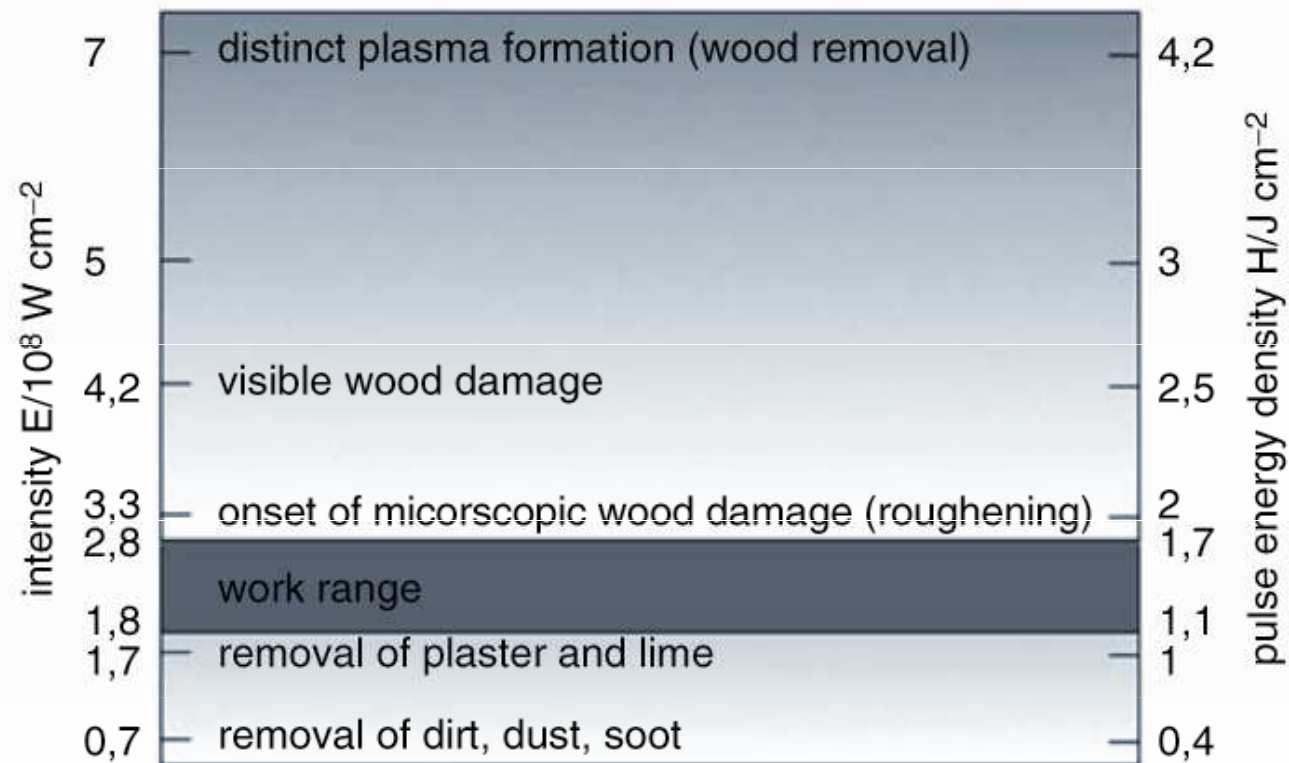


Papír vykazující oxidaci v důsledku laserového záření.

# Dřevo







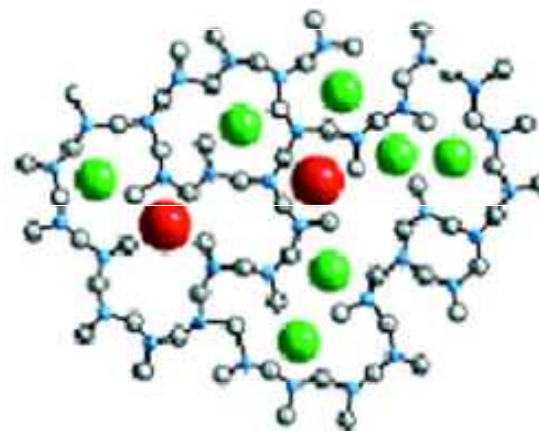
**Fig. 3.** Threshold values for layer removal and wood damage for the Nd:YAG laser NL 102

# Sklo

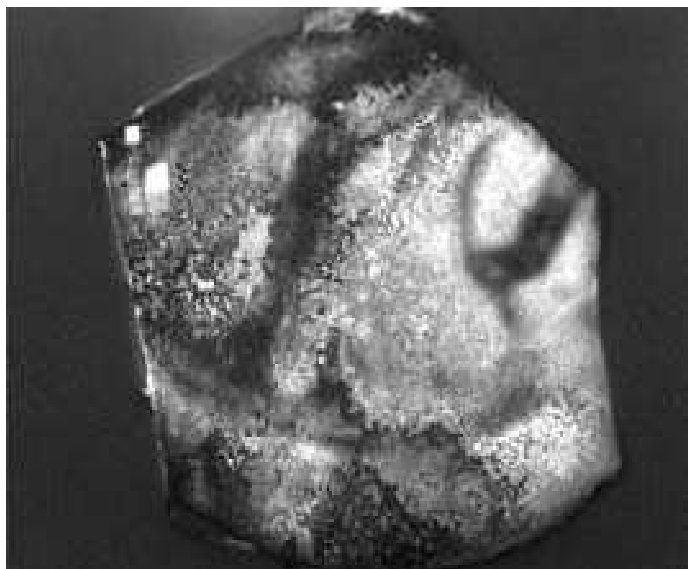


Římská říše, cca 2. stol. n. l.

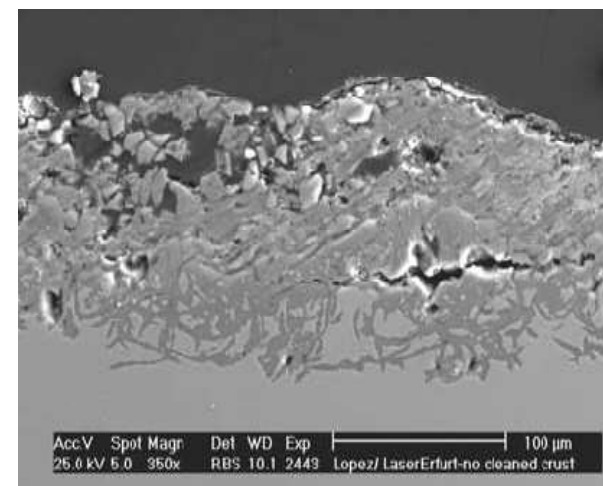
The structure of  
soda-lime-silica float glass



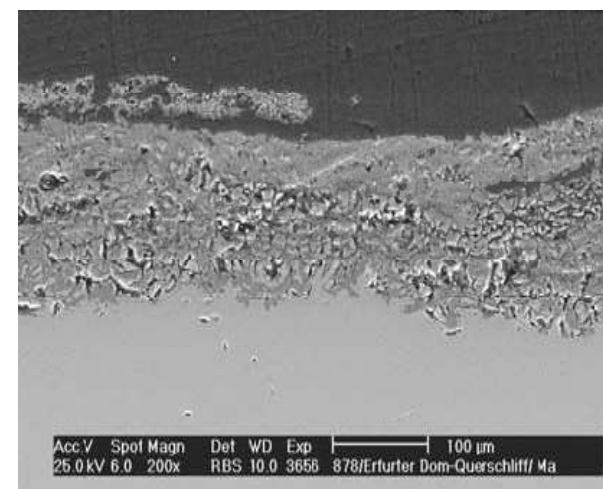
Původní sklo z katedrály v Erfurtu se silnou korozní krustou; čištění probíhalo v levé části



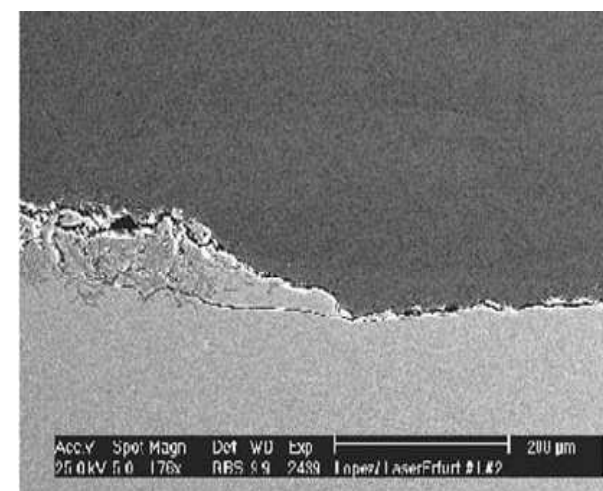
Sklo nečištěné (SEM průřezu)



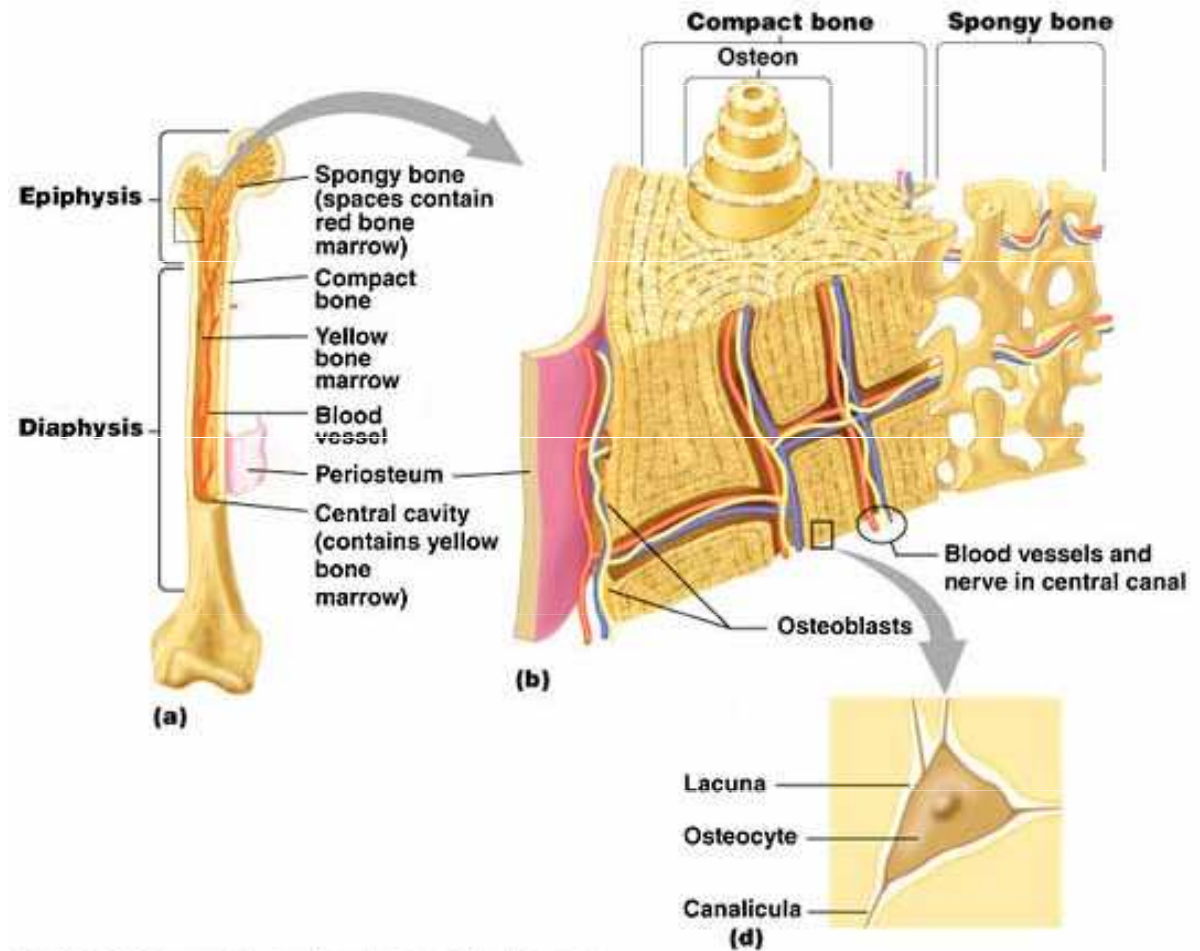
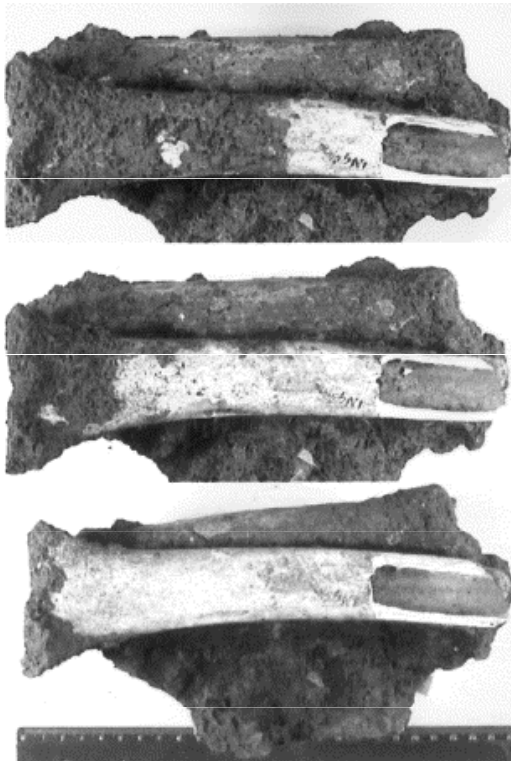
Sklo chemicky čištěné, pasta s uhlíčanem amonným (SEM průřezu)

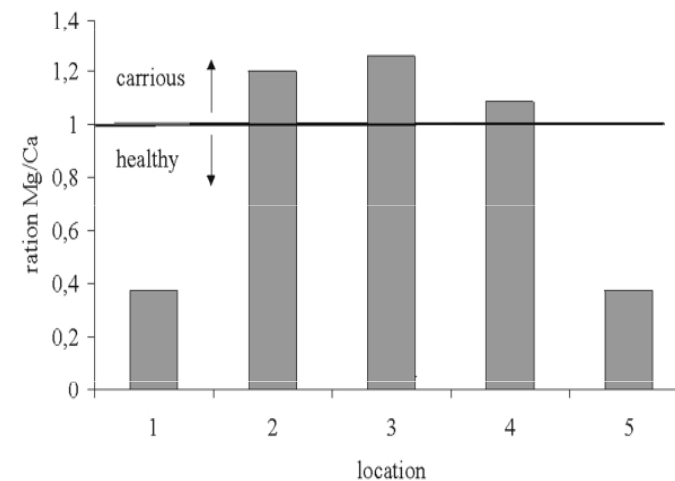
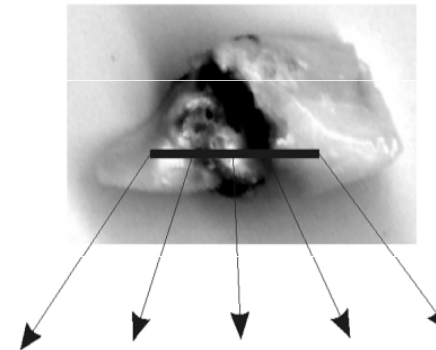
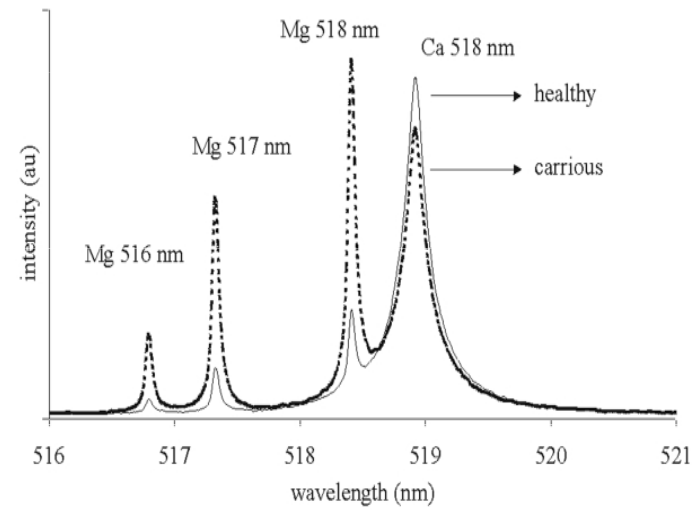
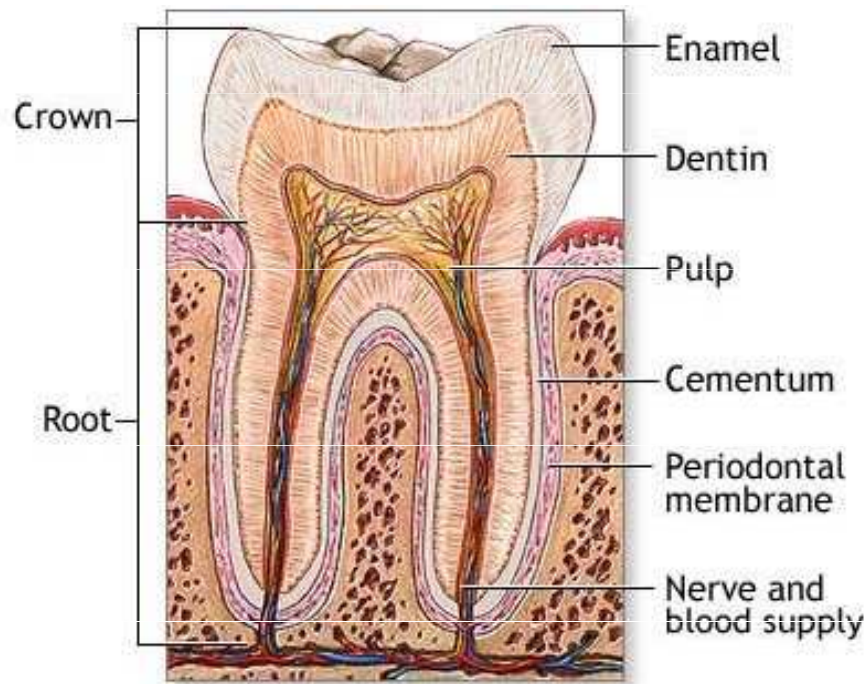


Sklo čištěné laserem: vlevo s 0.75 J/cm<sup>2</sup> a 50 pulsy; vpravo s 2.0 J/cm<sup>2</sup> a 200 pulses (SEM průřezu)



# Kalcifikované tkáně





## LIBS

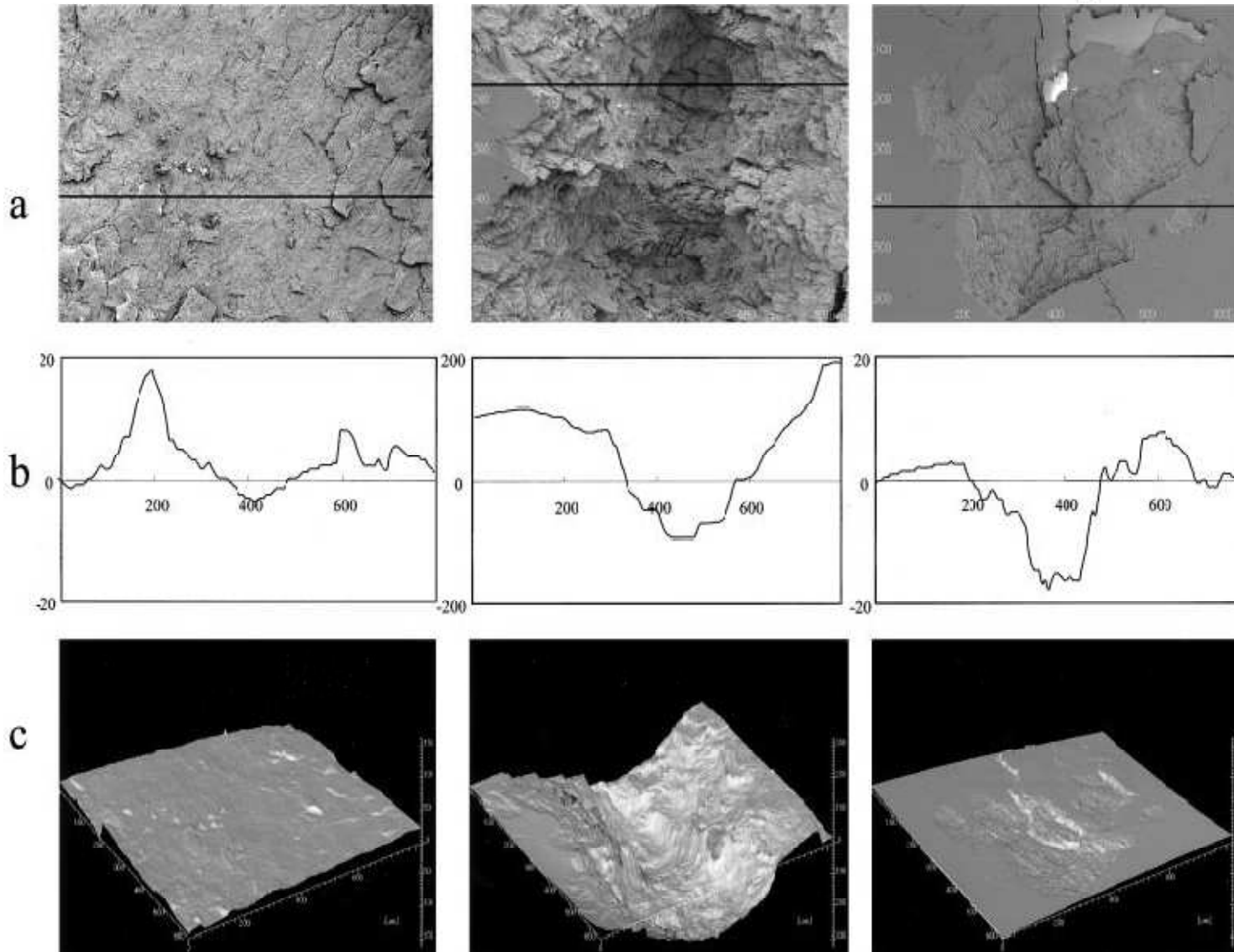
Lineární sken poměru obsahů Mg a Ca. Rostoucí obsah Mg jasně identifikuje části zubu zasažené kazem.



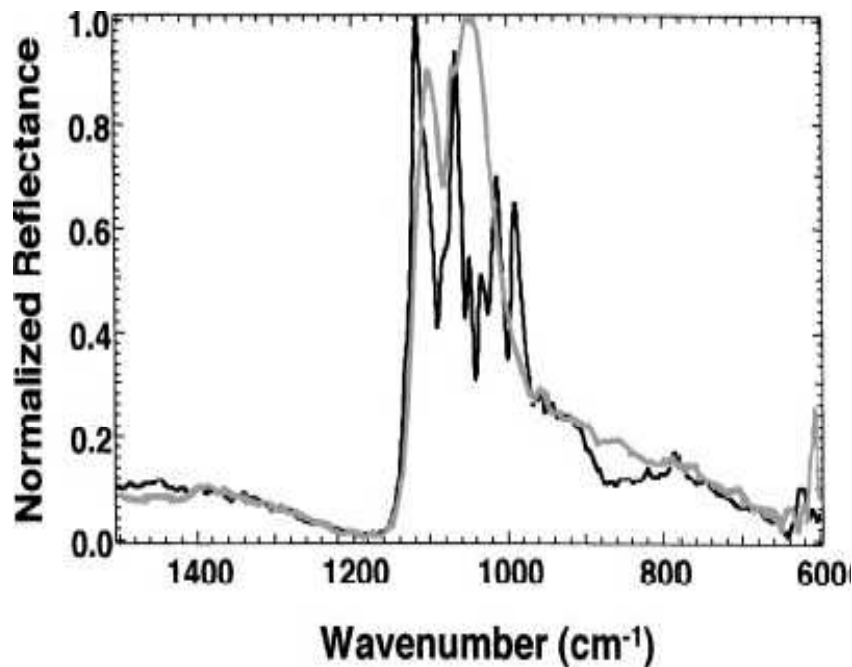
Nd:YAG

Er:YAG

CO<sub>2</sub>



Nd:YAG, Er:YAG, a CO<sub>2</sub> laserem ozářená sklovina: SEM images, (b) depth profiles, and (c) 3D images. Note that the depth scale in (b) of Er:YAG is 10 times larger.



SR-FTIR spektra kravské zubní skloviny z ablačního kráteru vytvořeného (free-running) Er:YAG laserem (200 J/cm<sup>2</sup>) s (šedá čára) a bez (černá čára) vrstvičkou vody.

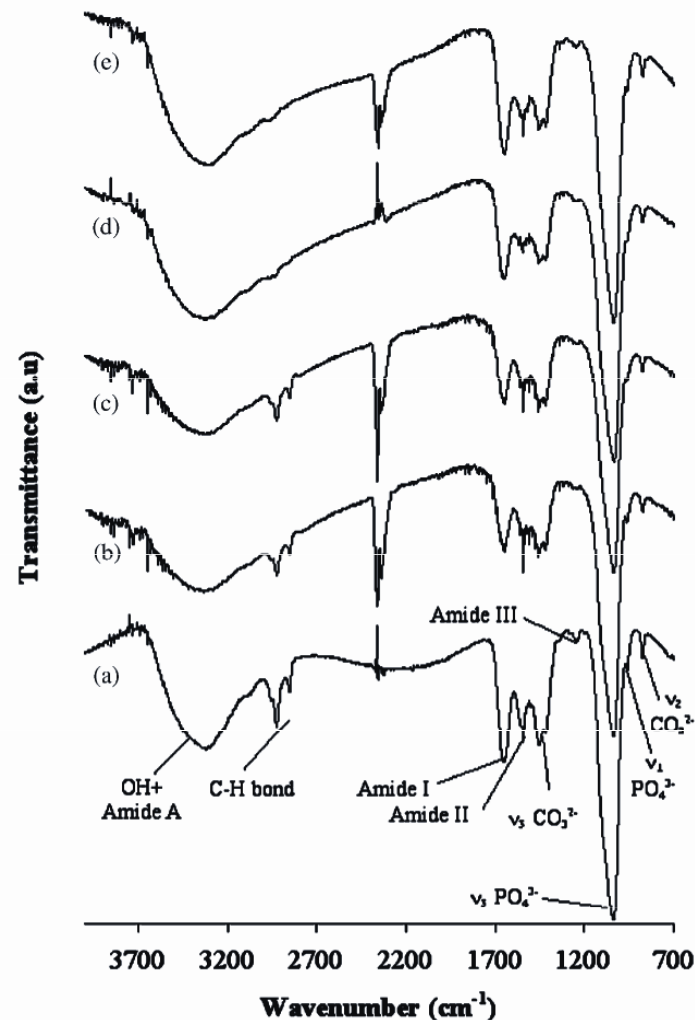
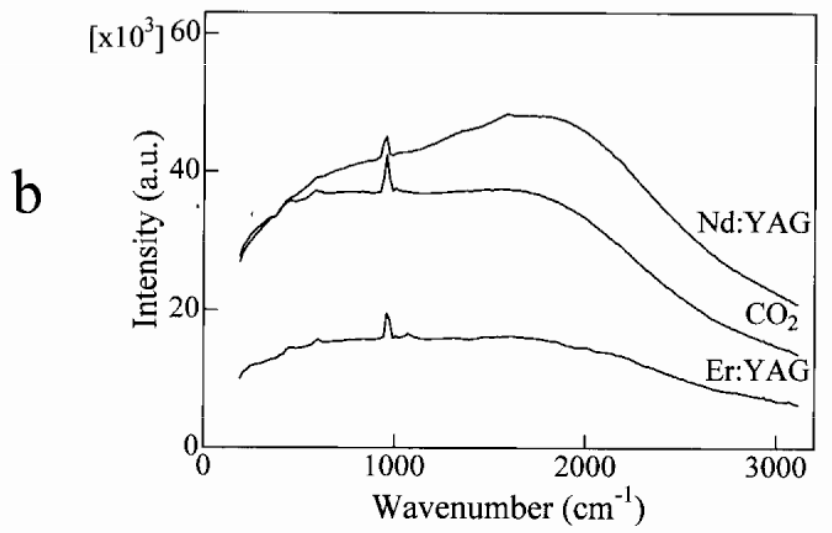
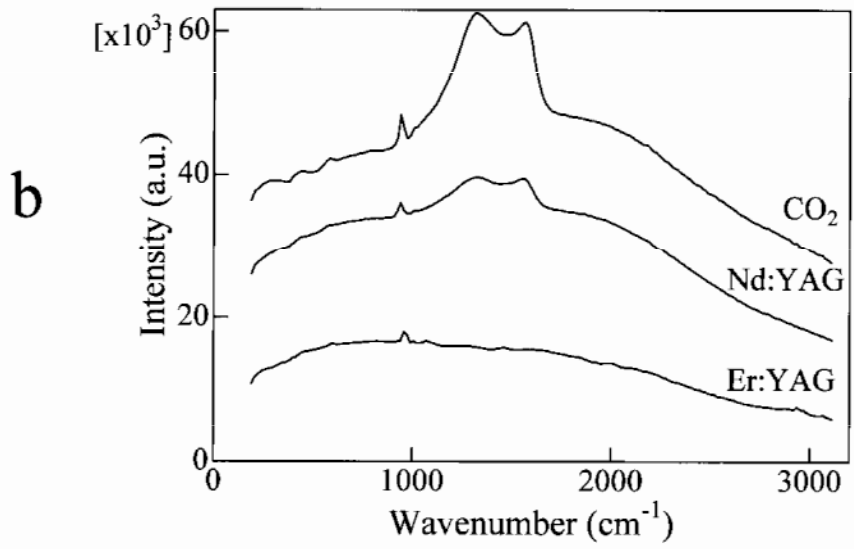
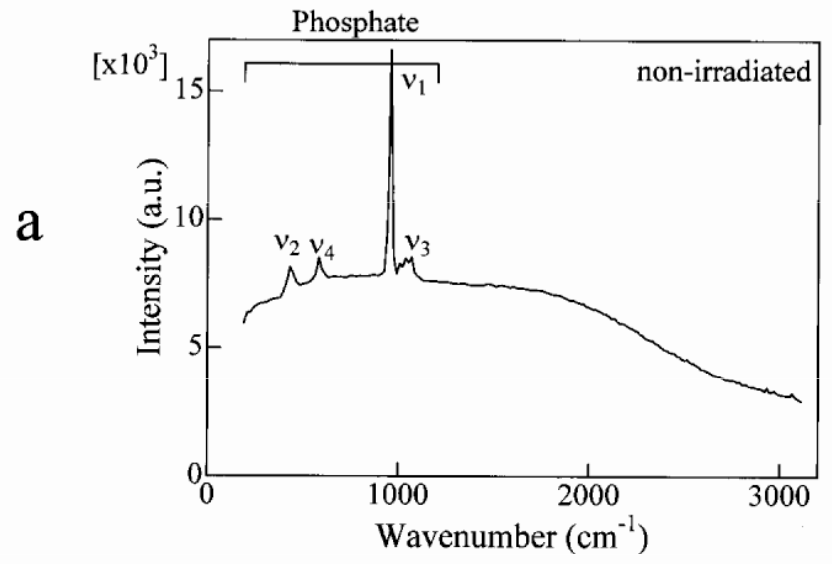
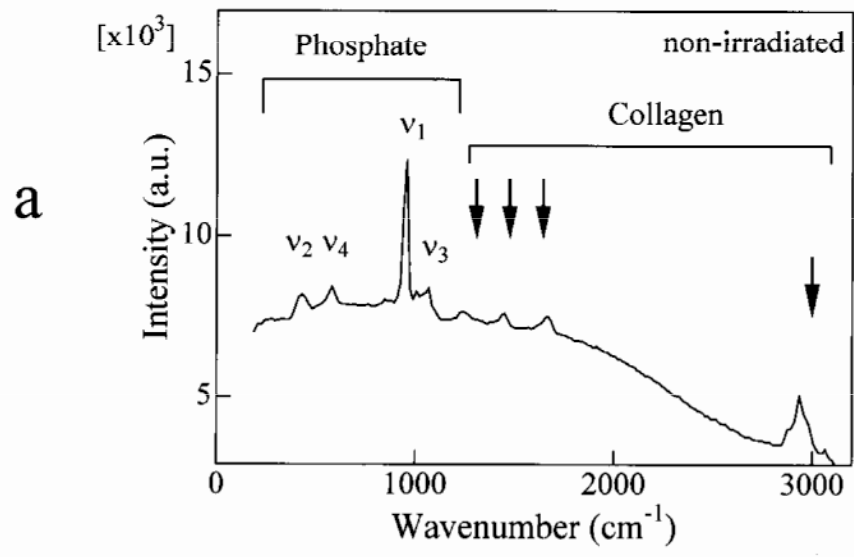


Fig. 9. Infrared spectra of (a) unprocessed dentin and dentin treated with (b) 1 J/cm<sup>2</sup>, (c) 4 J/cm<sup>2</sup>, (d) 10 J/cm<sup>2</sup> and (e) 20 J/cm<sup>2</sup>.

Ablace kosti (—), dentinu (---) a cementu (—): hloubka kráteru na puls (m) versus fluence na puls (J/cm<sup>2</sup>) pro frekvence 5 a 10 Hz. (a) 1 Hz, 100 s (100 pulsů); (b) 5 Hz, 100 s (500 pulsů); (c) 10 Hz, 50 s (500 pulsů).





**Figure 6.** Raman spectra of (a) nonirradiated and (b) laser-irradiated dentin.

**Figure 7.** Raman spectra of (a) nonirradiated and (b) laser-irradiated enamel.

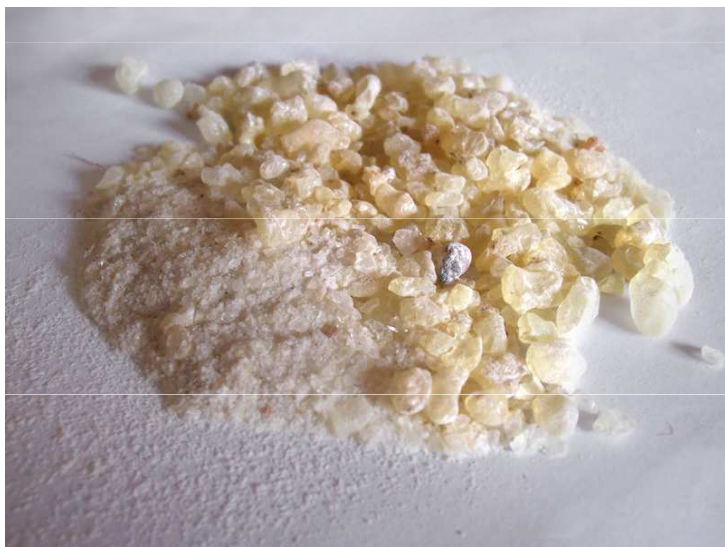
# Laky



Malba na dřevě, 21.dynastie. Mumie z Bab el-Gasus (darované caru Alexandru III v roce 1893). Přítomen lak původní i recentní.



Viola, recent



dammara



mastix

Laky jsou obvykle tetracyklické nebo pentacyklické organické látky s karbonylovou nebo hydroxylovou skupinou. UV záření je některými funkčními skupinami laků a jejich deradačních produktů silně absorbováno a pokud ablace produkuje reaktivní radikály a ionty může docházet k fotooxidaci. Chemické rozdíly byly zjištěny mezi damarou a mastixem při ozařování vlnovou délkou 248nm, protože damara vykazuje při 248 nm mnohem slabší absorpci než mastix. Může docházet i k depolymerizaci nebo zesíťování (cross-linking). Ukazuje se, že odstranění 10–15  $\mu\text{m}$  z degradované povrchové vrstvy laku nezpůsobí žádné poškození zbylého filmu.

# Pigmenty

Přítomnost *barviva* zvyšuje účinek ablace v UV oblasti, a změny absorpčních charakteristik a termického chování laserového procesu vedou často ke změně zbarvení čištěného objektu. To musíme vzít v úvahu, používáme-li laserovou desorpci jako metodu čištění.



# Olovnaté pigmenty

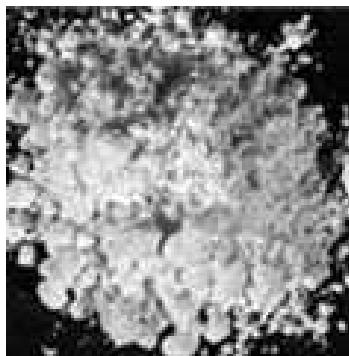
Atomic number	
<b>82</b>	
<b>Pb</b>	Symbol
Lead	Name of element
<b>207.2</b>	Atomic weight
2-8-18-32-18-4	
Electron configuration	



## Olovnatá běloba

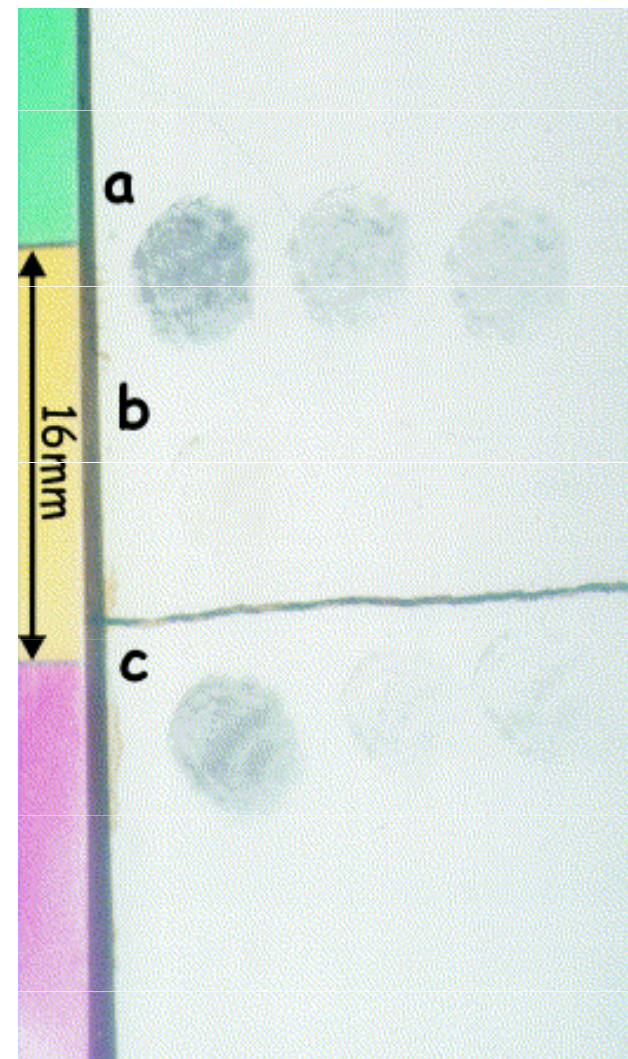
(Lead white, basic lead carbonate)

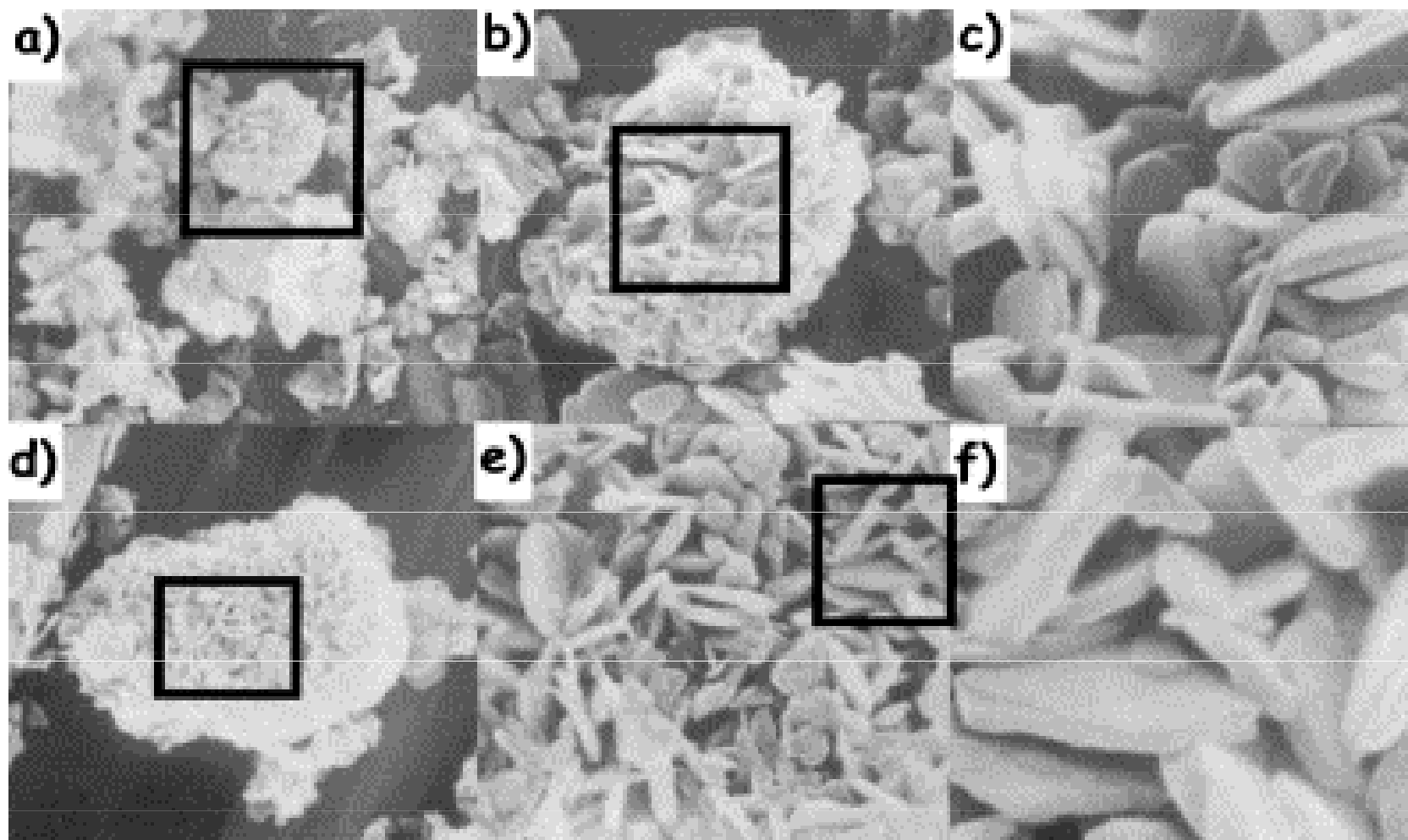
Přímým zahříváním na nižší teploty (nad 700 °C) přechází na žlutý massicot (lead monoxide, PbO). Působení Nd:YAG laseru bylo pozorováno dočasné zčernání, trvání barevné změny úzce souviselo s množstvím energie dodané laserem (několik hodin až dní). Např. 1 puls s fluencí 300 mJ/cm<sup>2</sup> způsobil vznik našedlé skvrny, která vymizela za 6–8 h.



Laserem indukovaná discolorace olovnaté běloby.

V horní řadě (a) jsou stopy těsně po ozáření laserem, v dolní řadě (c) stopy den po ozáření, ve střední (b) stopy den po ozáření v přítomnosti vyšší koncentrace kyslíku.



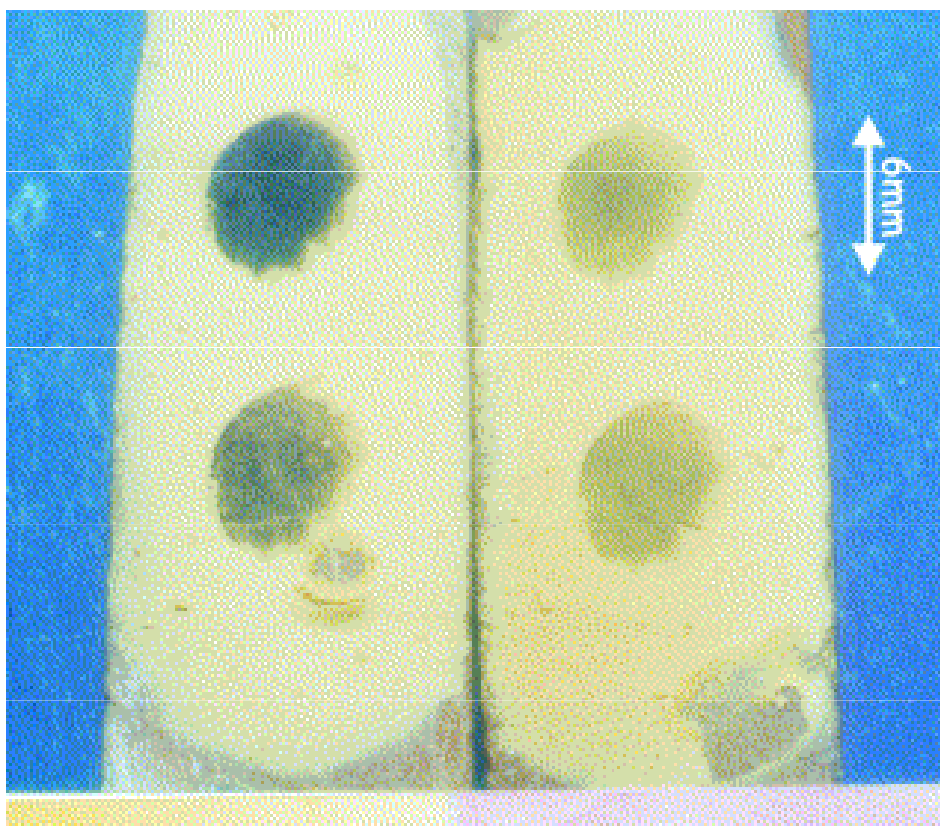


STEM neozářené (a, b, c) a laserem ozářené (d, e, f) olovnaté běloby ( $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ ) zvětšení  $\times 5$  (a, d),  $\times 15$  (b, e) a  $\times 50$  (c, f) tis. Oba povrchy jsou velmi podobné, bez zjevných rozdílů.



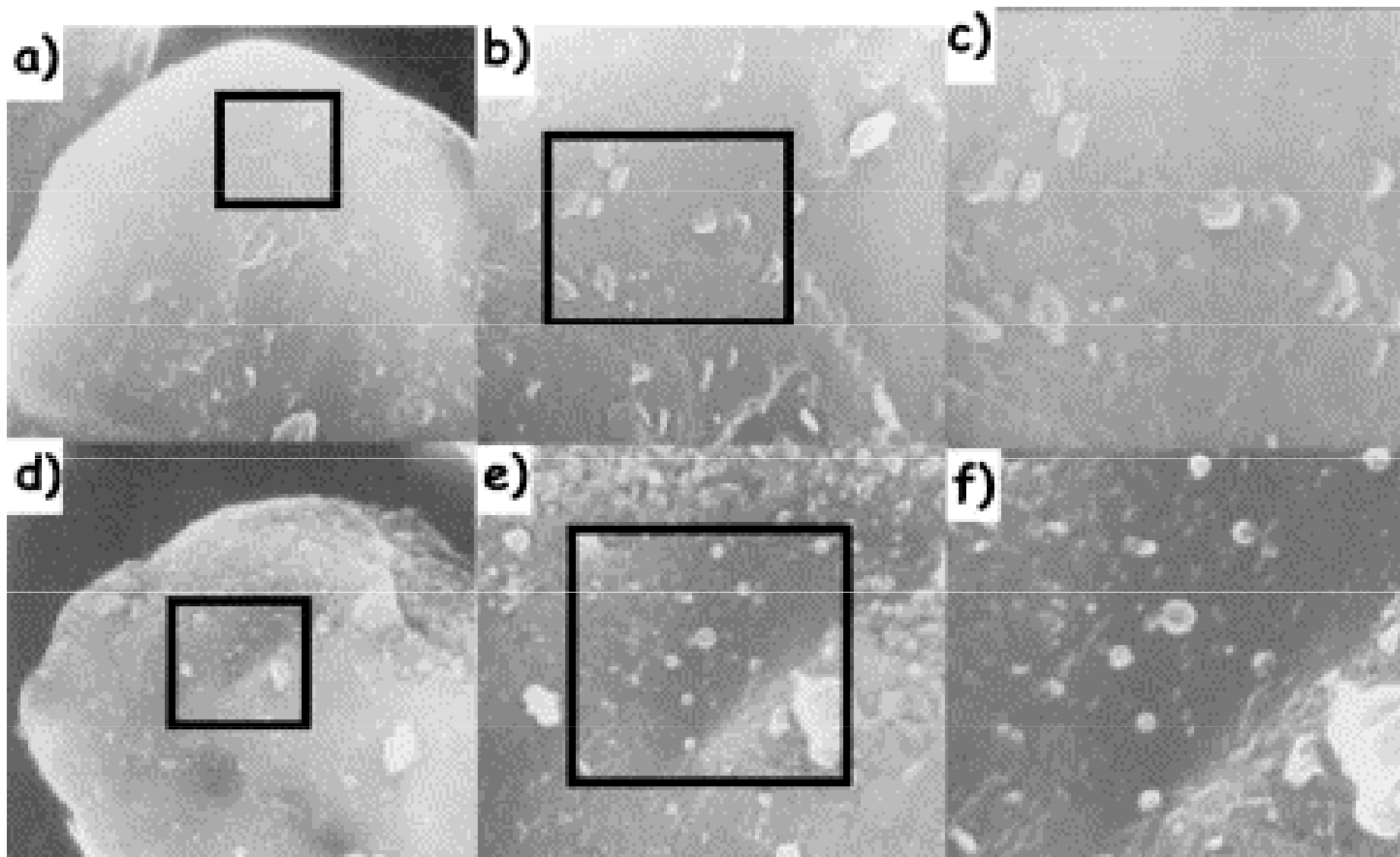
## Massikot

(PbO) má velmi vysokou teplotu rozkladu (nad 1 000 °C). Laserové záření způsobilo definitivní a radikální zčernání povrchu. Vysvětlením může být redukce PbO na kovové olovo.



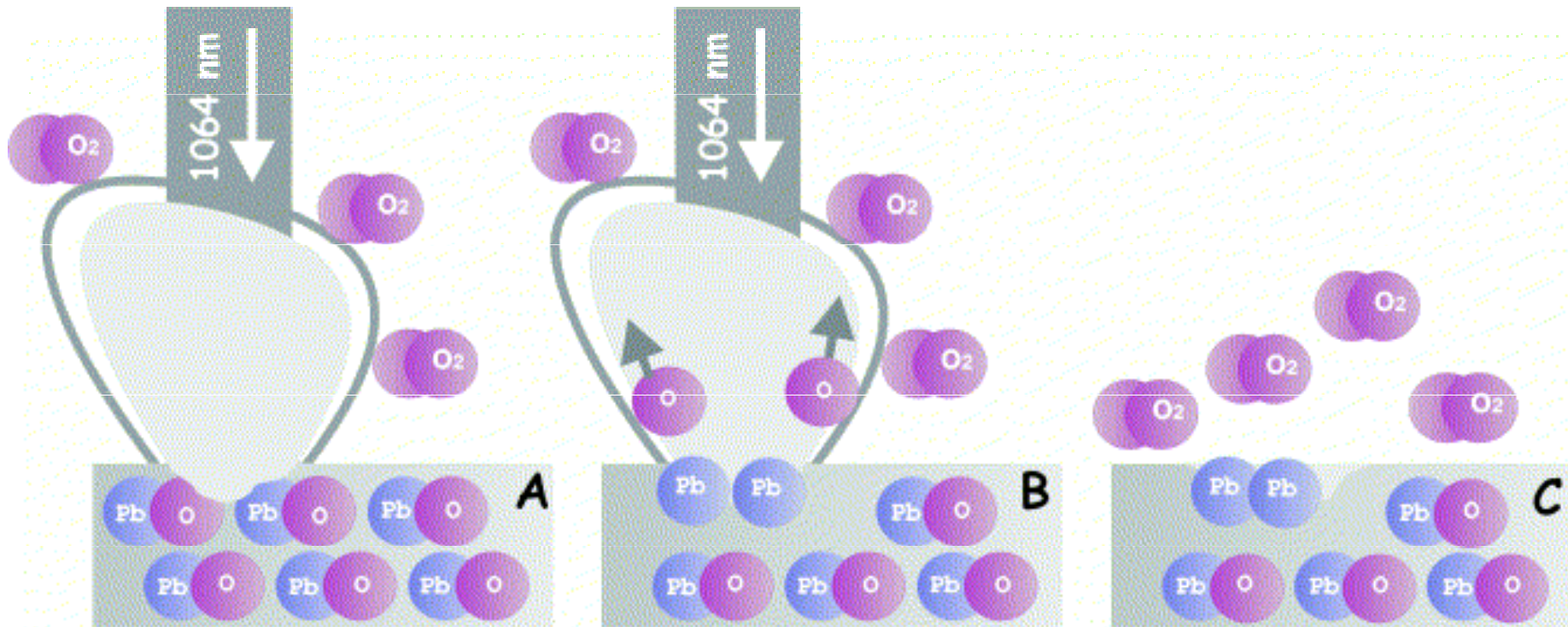
Laserem indukovaná discolorace massikotu.

Vlevo: stopy bezprostředně po ozáření  
Vpravo: stopy den po ozáření v přítomnosti vyšší koncentrace kyslíku.



STEM neozářeného (a, b, c) a laserem ozářeného (d, e, f) massikotu (PbO), zvětšení:  $\times 10$  (a, d),  $\times 30$  (b, e) a  $\times 50$  (c, f) tis. Útvary na (e a f) jsou s největší pravděpodobností globuly Pb.

# Mechanismus diskolorace



Laserovou ablací se nad povrchem vytváří plazma, způsobující lokální úbytek kyslíku (a). Vznikají příznivé podmínky pro rozklad PbO na prvky. (b). Po odeznění pulsu a rozptýlení plazmatu může zpětná oxidace vést k opětovnému zbarvení (c).

## Suřík

minium (**Red lead**, lead tetra-oxide) je světle červený pigment, který lze připravit zahříváním (za určitých podmínek) olovnaté běloby ( $\text{PbCO}_3$ ). Je to velmi toxický pigment, vhodný hlavně pro olejomalby, ve vodových barvách a freskách má tendenci tmavnout. Přímé zahřívání vede k jeho přeměně na žlutý massicot. Působení laseru vede ke vzniku černé povrchové vrstvičky, podobně jako u olovnaté běloby, ale pomaleji.



# Ostatní olovnaté pigmenty

*Lead chromate* nebo *red chrome* ( $Pb(OH)_2 \cdot PbCrO_4$ )<sub>2</sub>

pod zářením 248 nm lead chromate od 0.25 J/cm<sup>2</sup> černá, nad 0.375 J/cm<sup>2</sup> jsou částice pigmentu odstraněny

*Naples yellow* ( $BiVO_4$ ,  $Pb(SbO_3)_2$  or  $Pb(SbO_4)_2$ )

(lead antimonate) discoloration je nejzjevnější při 355 nm a změna barvy (redukce) je důsledkem fotochemické reakce

*Chrome yellow* ( $PbCrO_4$ )

redukce podobně jako u Neapolské žluti. Při 1064 nm pigment reaguje jen slabě, zatímco působením 248 nm zčerná.

# Železnaté pigmenty



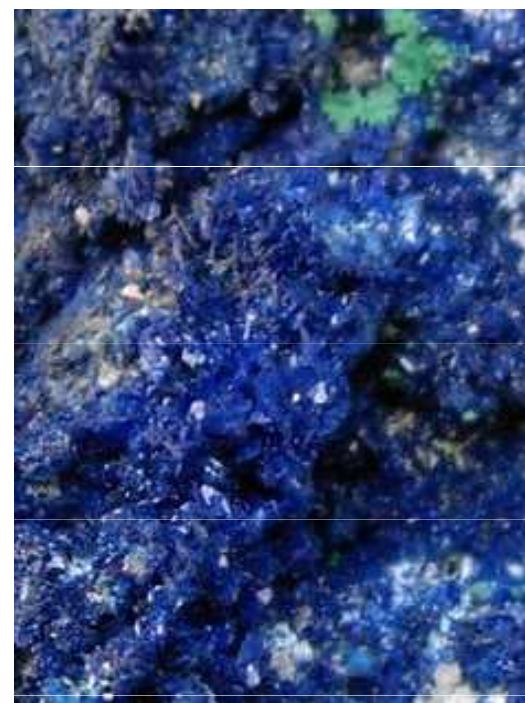
*Žlutý okr* (hlavně FeOOH) a *přírodní sienna* (goethit, FeOOH) mají podobné vlastnosti: zahříváním přecházejí na hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), který má charakteristickou tmavě červenou barvu. Důsledkem působení laseru (po 2 až 3 pulsech  $300 \text{ mJ/cm}^2$ ) je pouze mírné ztmavnutí.



*Pálená sienna* (hematit,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) má velmi vysokou teplotu rozkladu (přes  $1\,500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a žhání vede pouze k přechodnému ztmavnutí. Působení laseru vedlo k mírnému ztmavnutí (po 3 pulsech  $300 \text{ mJ/cm}^2$ ).



# Měďnaté pigmenty





*Malachit* (bazický uhličitan měďnatý,  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) je považován za středně stabilní a stálý pigment. Nebývá ovlivněn silným světlem a teoreticky se očekává zčernání v kontaktu s pigmenty obsahujícími síru nebo vlivem atmosféry. Původně světle zelená barva začíná tmavnout při teplotách nad  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , přechází na žlutou/nazelenalou (při  $300\text{ }^\circ\text{C}$ ) a nakonec zčerná (nad  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ). Ozářením Nd:YAG laserem malachit tmavne, ale potřebuje víc než 10 pulsů aby zčernal. Tmavý prášek je tvořen hlavně  $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ , zatímco černý hlavně  $\text{CuO}$ . Po ozáření mění nastálo barvu, uhličitan a hydroxid se mění na černý  $\text{CuO}$ , který je zřejmě zodpovědný za změnu barvy. Barevná změna malachitu může být také důsledkem změny na tenorit ( $\text{CuO}$ ) a kuprit ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).



*Verdigris* ( $\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) nevykazuje žádnou barevnou změnu působením laseru. Zvyšování fluence i počtu pulsů vede spíše ke štěpení pigmentu než k diskoloraci.



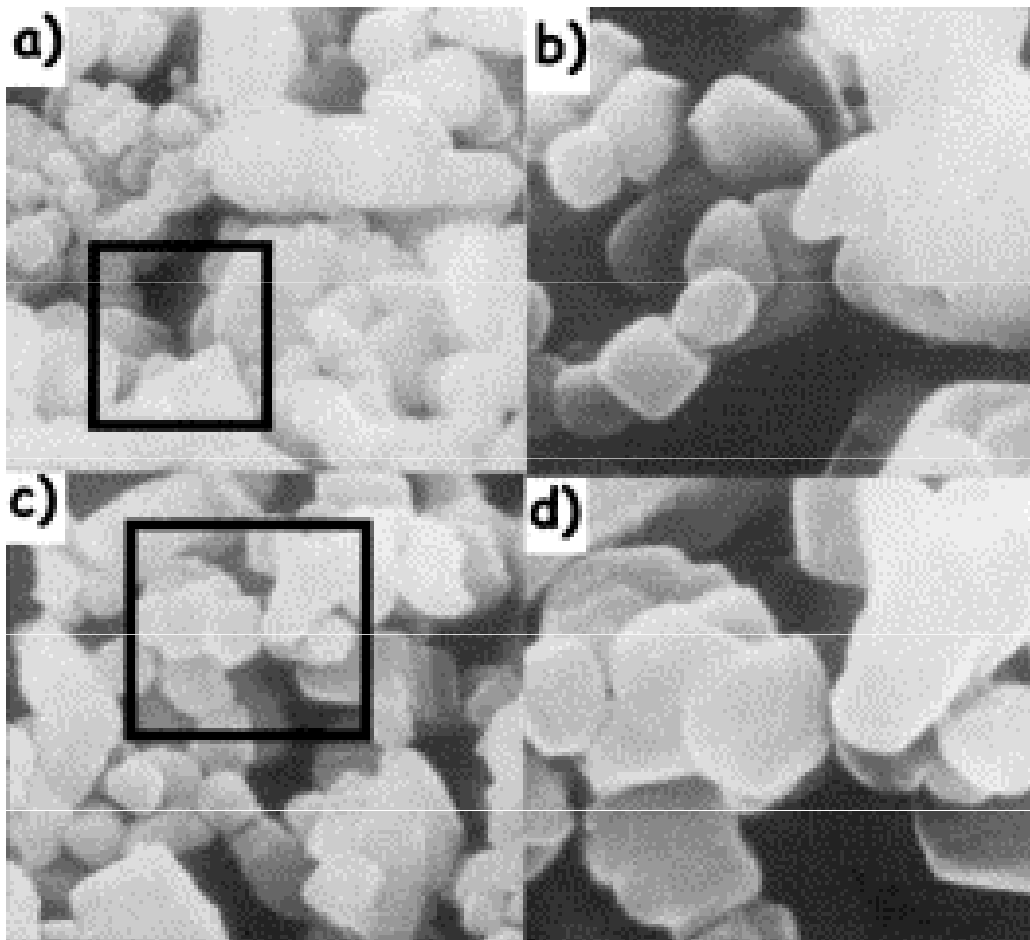
# Rumělka

(vermilion, mercuric sulphide) se v přírodě vyskytuje jako cinnabarit. Je stabilní vůči alkáliím i většině kyselin, nereaguje s ostatními pigmenty, ale různě se mění působením světla.

Tmavnutí rumělky je světlem indukovaný jev, kdy červený hexagonální cinnabarit ( $\alpha$ -HgS) je transformován na metastabilní černý metacinnabarit ( $\alpha'$ -HgS). Na rychlost této transformaci mají vliv velikost částic, vlhkost, druh pojiva a především doba expozice.

Působení tepla vykazuje přechodnou změnu na tmavě červeno-fialovou mezi 200 a 350 °C a stálou do černa při teplotách nad 356 °C. Červeno-fialový produkt je stále  $\alpha$ -HgS, zatímco černý  $\alpha'$ -HgS. Naopak, laseru vystavené vzorky se kompletně zbarvily do černa s kovovým vzhledem. Jde patrně o důsledek vzniku černého Hg<sub>2</sub>S.

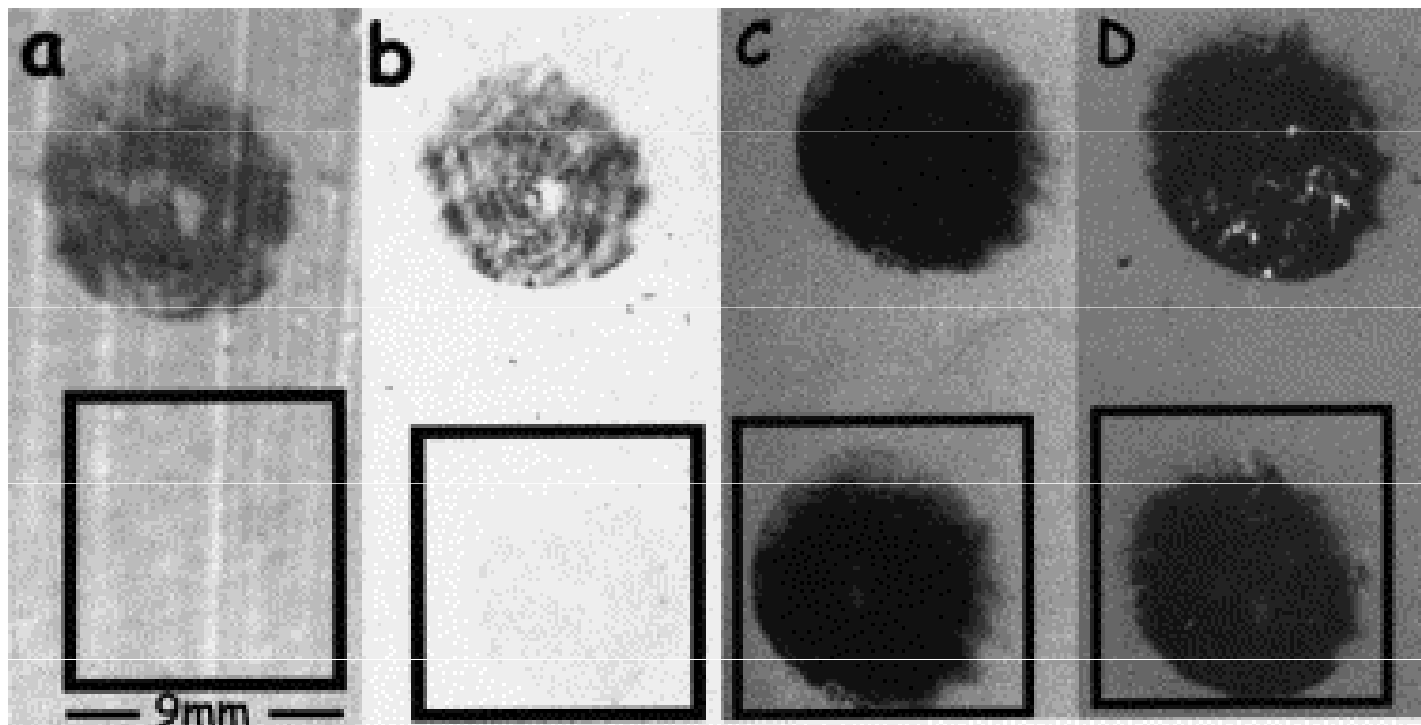
Rumělka je velmi citlivá na infračervené záření i když jsou použité fluence velmi malé (50–100 mJ cm<sup>-2</sup>). Discolorace je velmi zřetelná a stálá, v produktu jsou zastoupeny redukované stavy Hg<sub>2</sub>S a kovová Hg. Dříve se předpokládala hypotéza o polymorní transformaci červeného hexagonálního cinnabaritu,  $\alpha$ -HgS, na černý kubický meta-cinnabarit,  $\alpha'$ -HgS – ta se nepotvrdila.



STEM ozářené (a, b) a laserem neozářené (c, d) rumělky (HgS) zvětšení  $\times 20$  (a, c) a  $\times 50$  (b, d) tis.



Při laserové ablaci se nemění tvar krystalu – to ukazuje že nedochází k transformaci červeného hexagonálního HgS na černý kubický HgS. Za podmínek laserové ablace intenzivní tepelná změna a nedostatek kyslíku v důsledku vzniku plazmatu, je HgS rozkládán, síra se uvolňuje a redukuje se elementární Hg.



Vliv Nd:YAG záření na suřík (a); olovnatou bělobu (b); masikot (c) a rumělkou (d);

Nahoře: stopy laseru bezprostředně po ozáření (2 pulsy 300 mJ)

Dole: stopy laseru po 1 týdnu

# Ostatní pigmenty

## *Zinková běloba (ZnO)*

Pozorováno zešednutí vlivem laserového záření, nejspíš v důsledku redukce ZnO na Zn. Diskolorace se mění zpět na bílou za týden. Pro fluenci 0.6 J/cm<sup>2</sup> (at 1064 nm) je popsána diskolorace na hnědo/šedou.



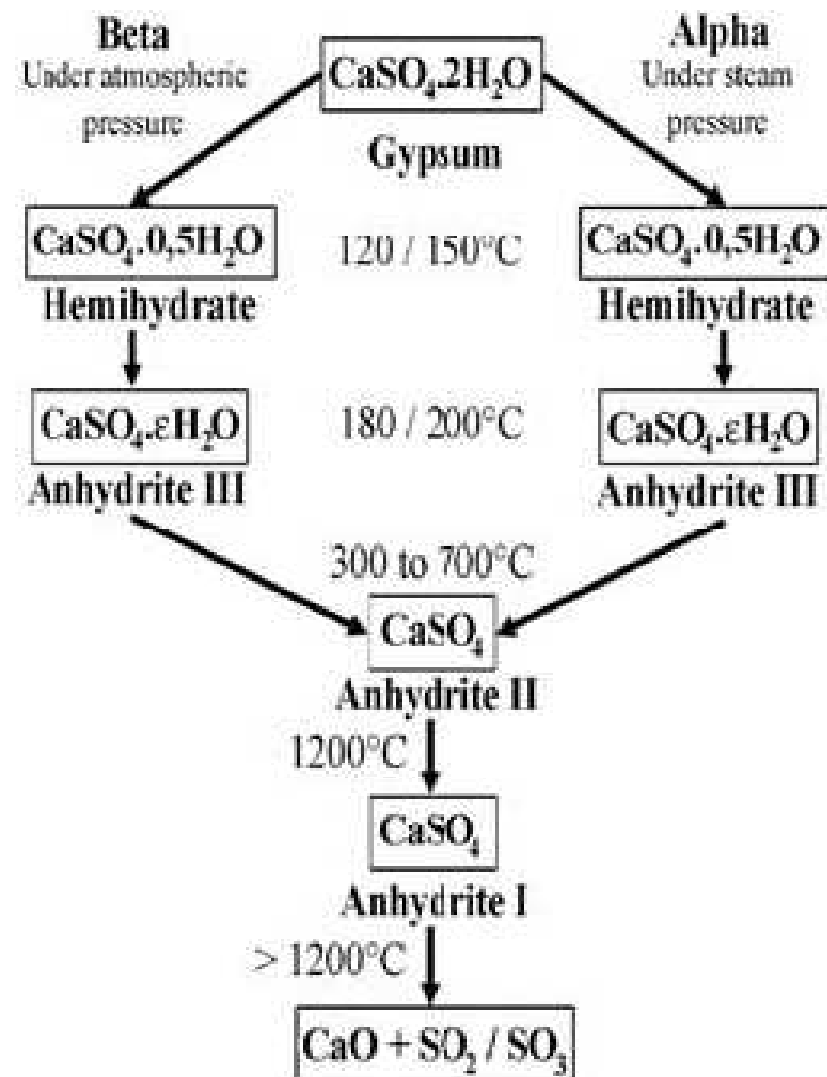
## *Titanová běloba (TiO<sub>2</sub>)*

Barva pigmentu přechází na modrošedou pro 0.6 J/cm<sup>2</sup> (at 1064 nm). Discolorace může být způsobena buď zvětšením částic pigmentu nebo rozkladem oxidů.



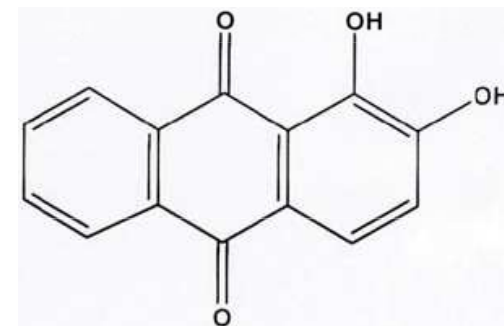
# Sádra

(White gypsum,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) je velmi stabilní, pod hodnotou fluence pod  $3 \text{ J/cm}^2$  nevykazuje žádné chromatické nebo morfologické změny.



Dehydration of the gypsum  
function of the temperature

# Organické pigmenty



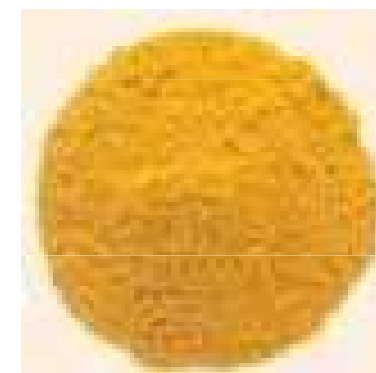
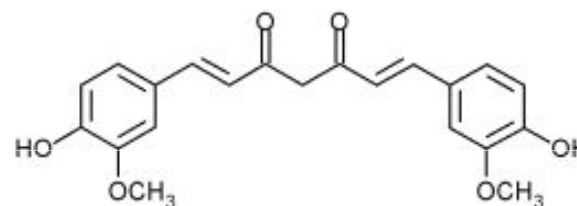
*Mořenový lak (Al-Ca komplexní sůl alizarinu)*

Působením laserového záření se barva mění působením laserového záření z červené na bílou. Tato diskolorace byla pozorována pro všechny vlnové délky Nd: YAG laseru kromě 1064 nm kde byl práh vyšší. Chemické vysvětlení tohoto jevu chybí.

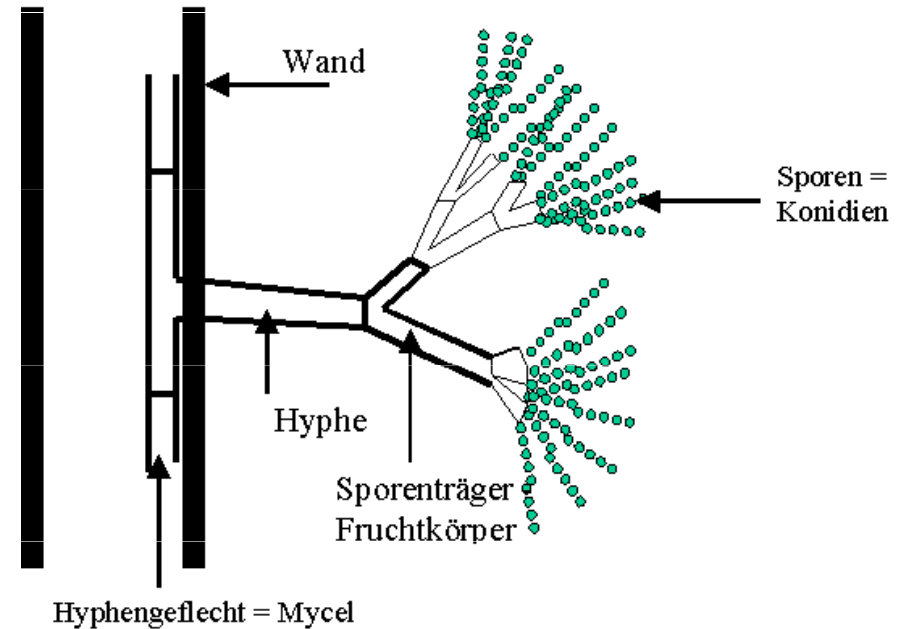
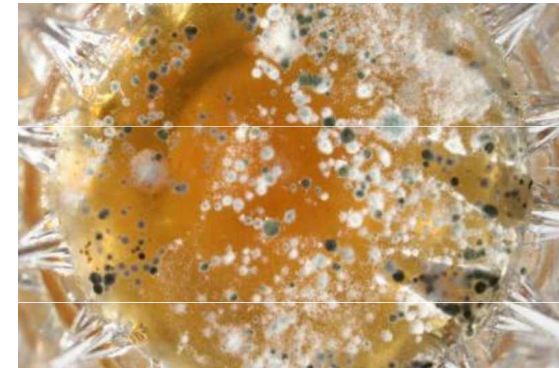
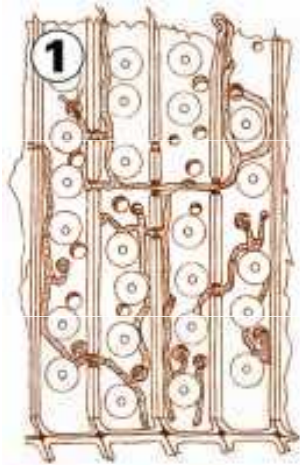


*Kurkumin (C<sub>21</sub>H<sub>20</sub>O<sub>6</sub>)*

Zůstává prakticky nezměněn pod UV laserovým zářením (248 nm) pro nízké fluence (0.11 J/cm<sup>2</sup>). Pro vyšší fluence, (0.4 J/cm<sup>2</sup>) vykazuje pigment slabou diskoloraci.



# Mikroorganismy



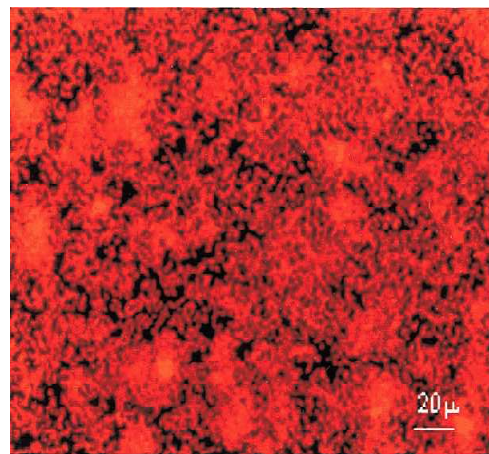


# Likvidace mikroorganismů

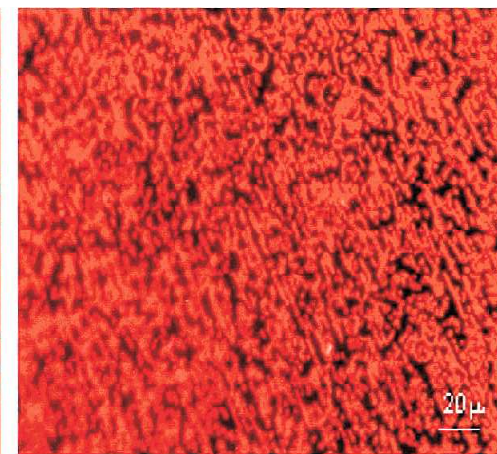
## Epifluorescenční obrázky bakteriálních kolonií v biofilmech

(po obarvení 0.01% akridinovou oranží).

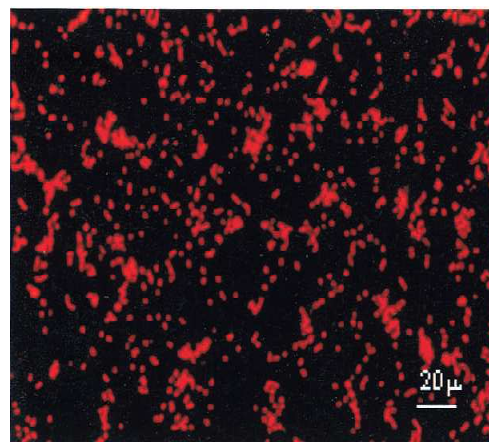
- (a) sklo neozářené;
- (b) sklo 10min ozářené fluencí 0.05J/cm<sup>2</sup>;
- (c) sklo 10min ozářené fluencí 0.1J/cm<sup>2</sup>;
- (d) titan neozářený;
- (e) titan 10-min irradiated with fluence 0.05 J/cm<sup>2</sup>;
- (f) titan 10-min irradiated with fluence 0.1 J/cm<sup>2</sup>.



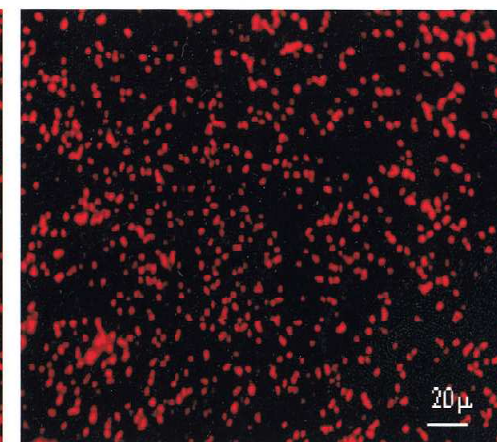
(a)



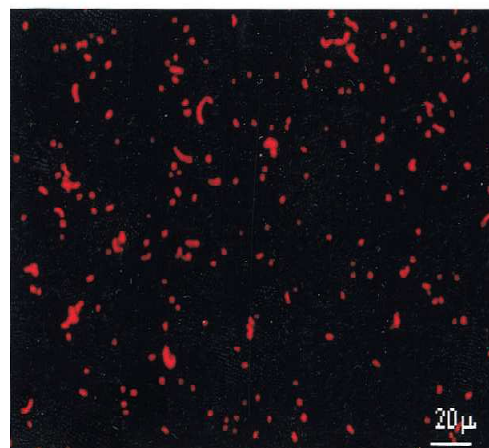
(d)



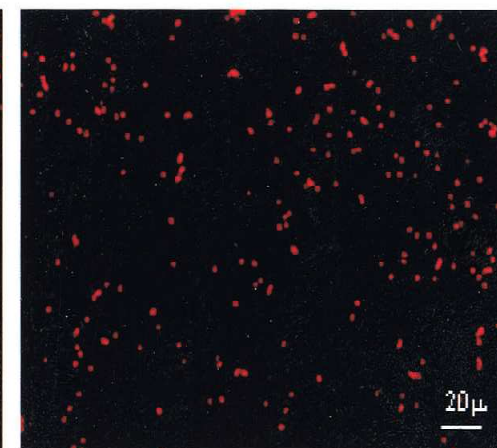
(b)



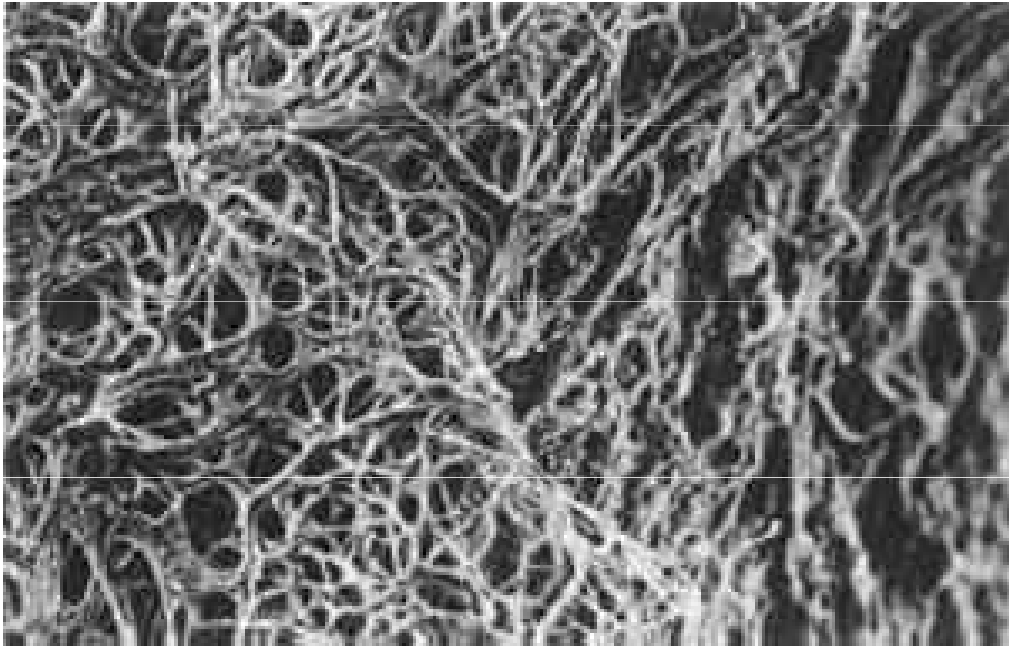
(e)



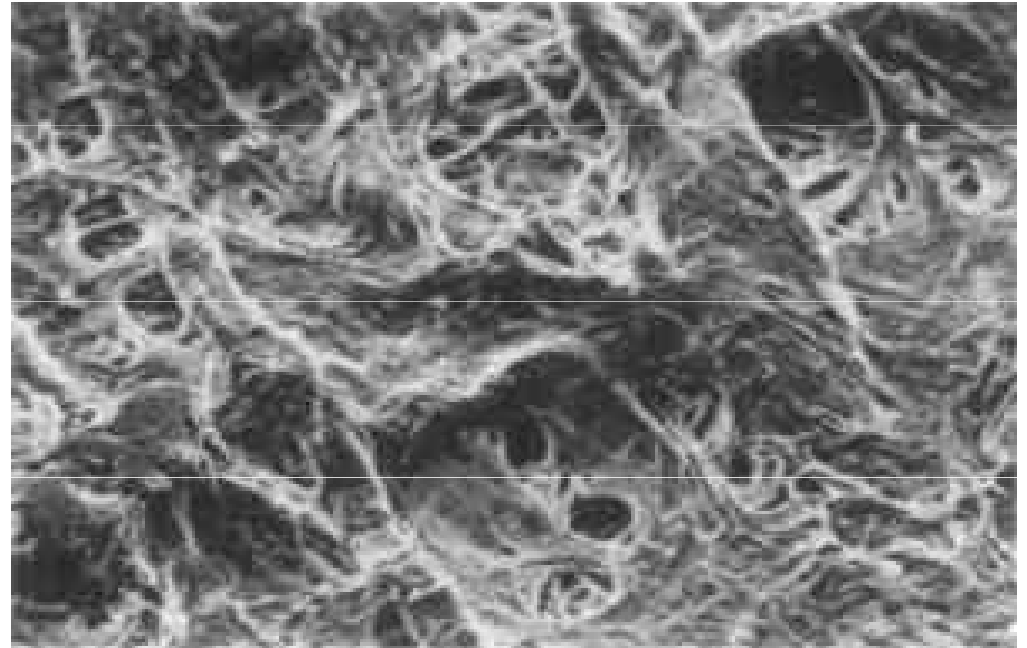
(c)



(f)

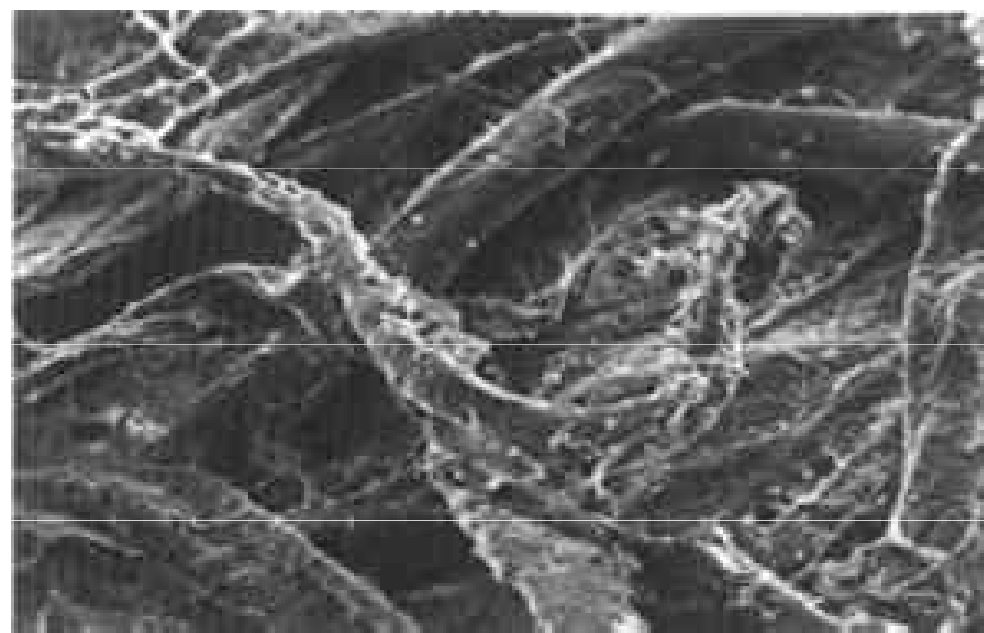
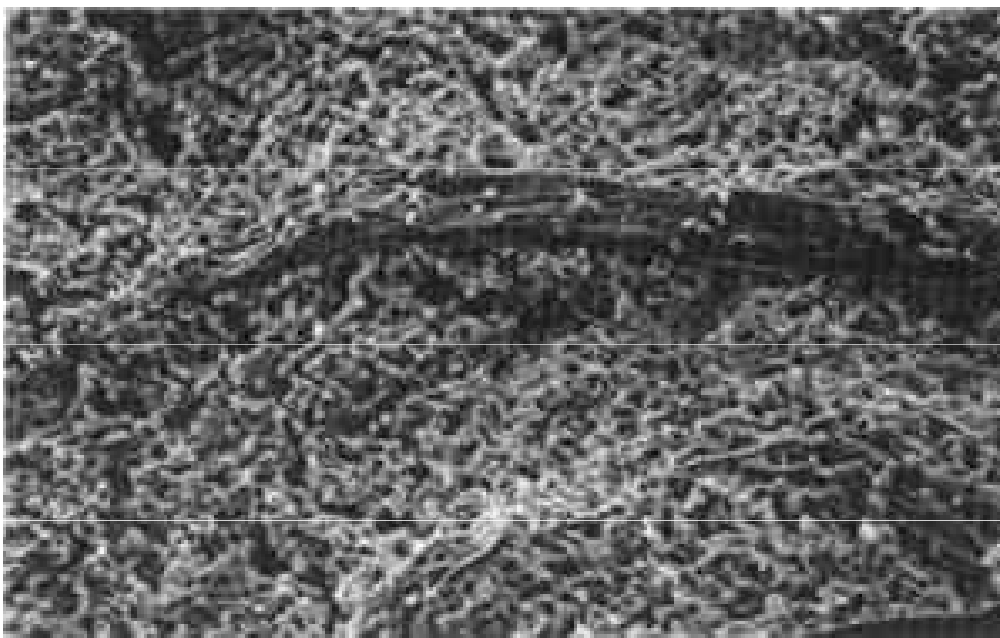


Filamenty *Fusarium oxysporum* na papíru. SEM.  
124x



Vlákna papíru po čištění barvivovým laserem. Zabarvení sice nezmizelo, plísňové filamenty však ano, jsou patrné i 5–10  $\mu\text{m}$  dírky, kudy pronikaly do papíru. SEM. 124x





*Penicillium notatum*. Spóry na papíru (SEM), 232x

Vlákna papíru po odstranění spór  
*Penicillium notatum* pomocí Nd: YAG  
laseru. Vlákna jsou téměř identická s vlákny  
původního papíru. SEM. 216x

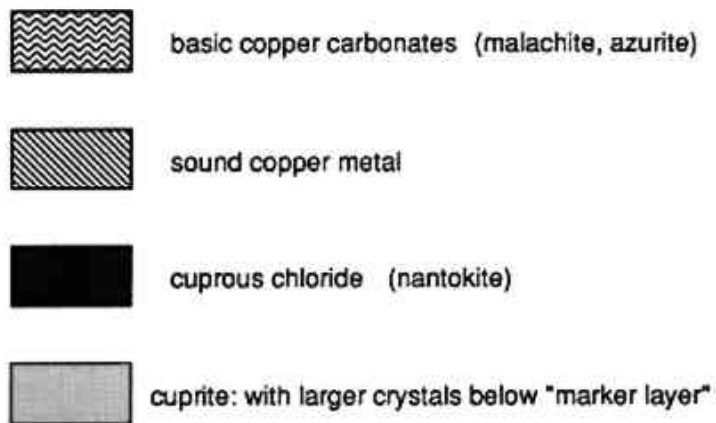
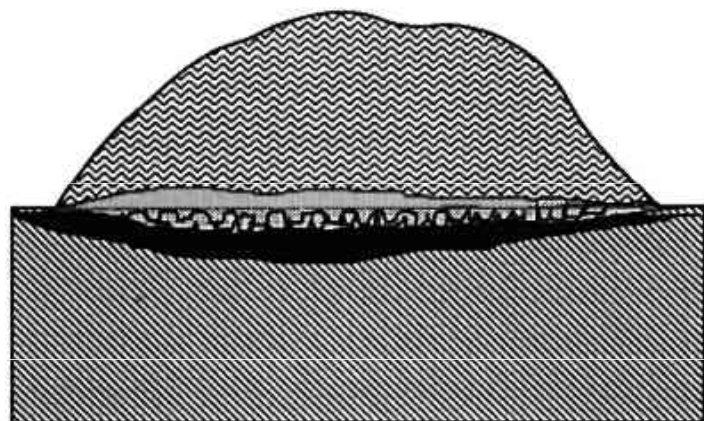




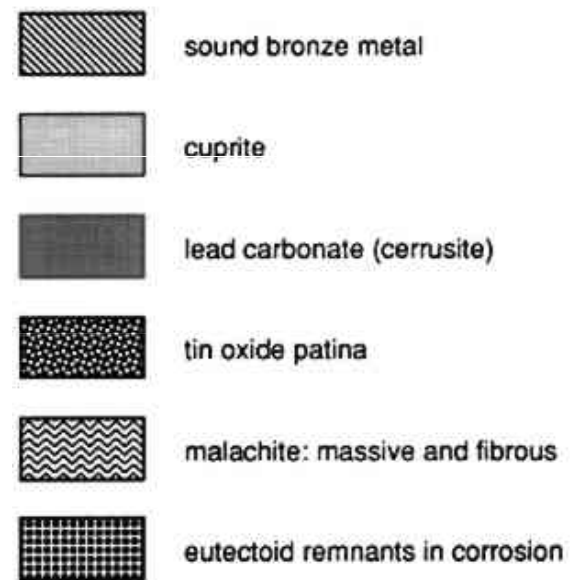
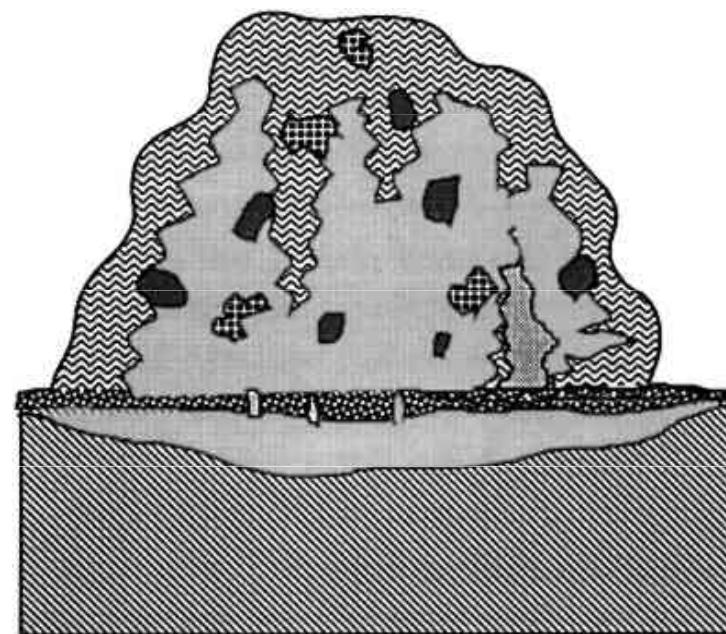
# Kovy



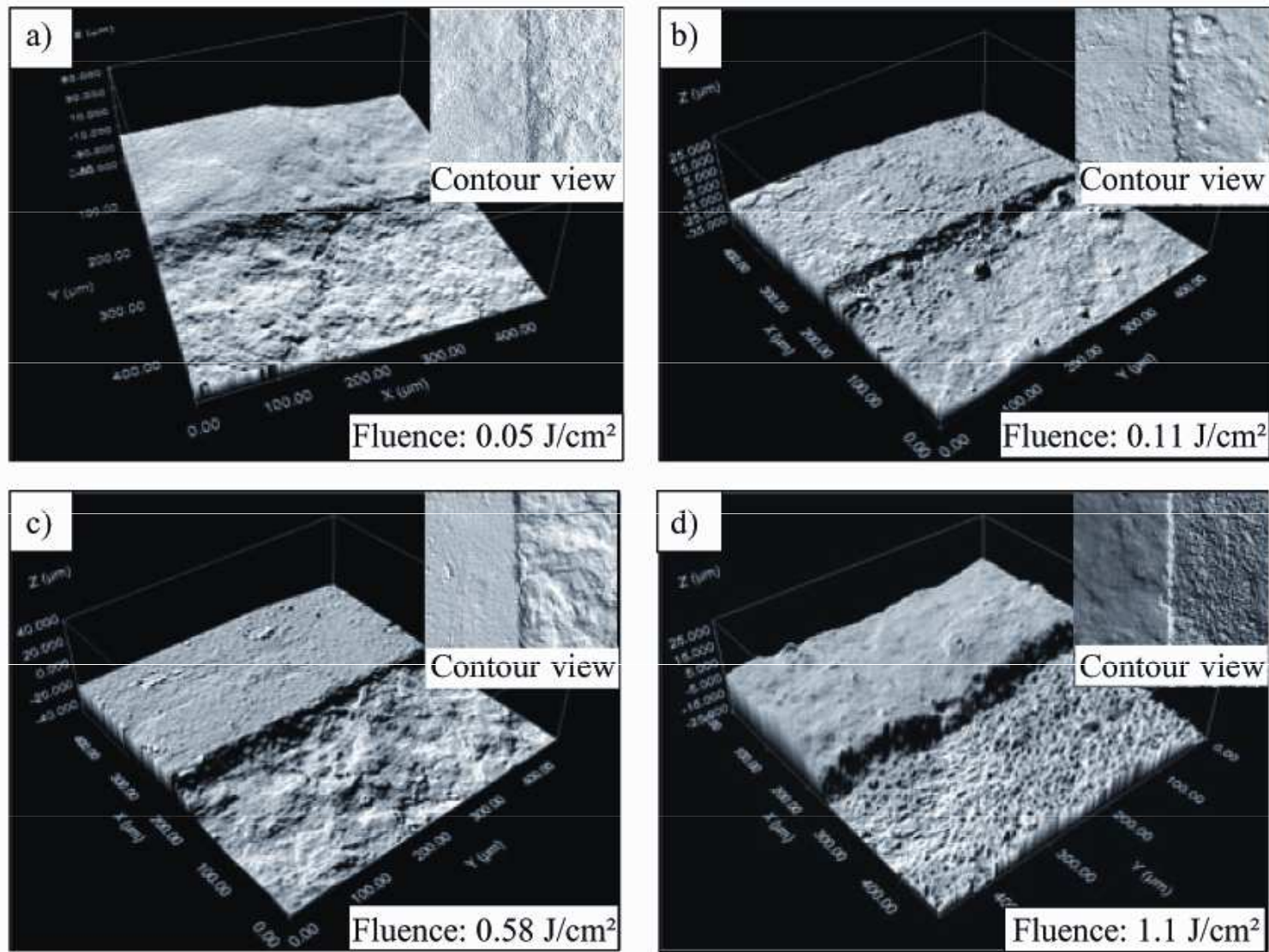
# Měď a bronz



Koroze mědi



Koroze bronzu



**Fig. 5.** Confocal microscopy pictures of a fs-laser treated outdoor bronze object (“Friedrich III statue”) showing the surface topography at different laser fluences (pulse duration: 150 fs, focus diameter: 50 μm, pulse-to-pulse distance: 15 μm, repetition rate: 10 kHz).



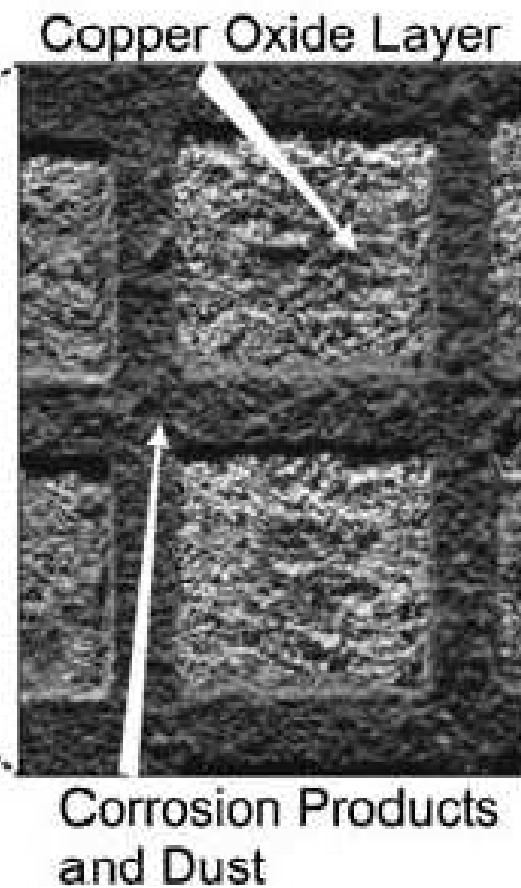
**Bronze Sculpture  
(Adrian de Vries)**



**First Experimental Setup during  
Scanning fs-Laser-Cleaning**



**First Cleaning Results**

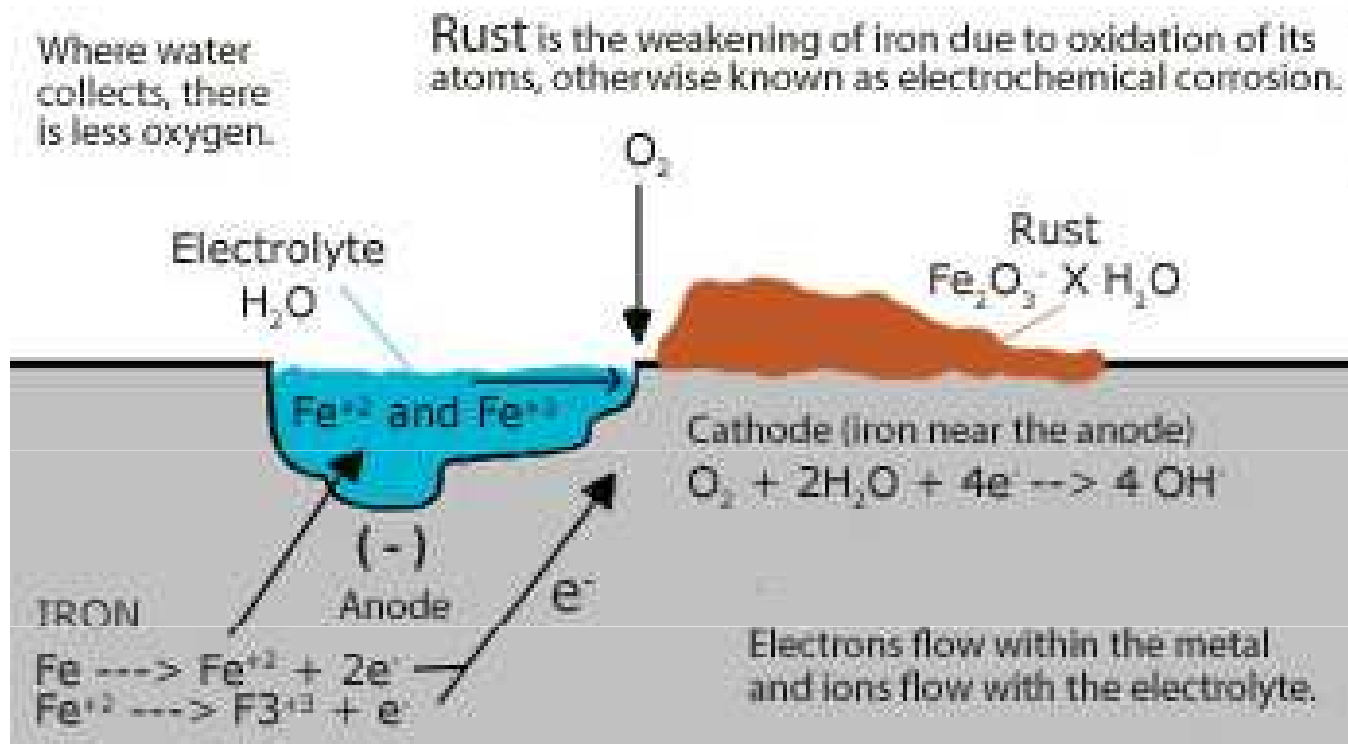


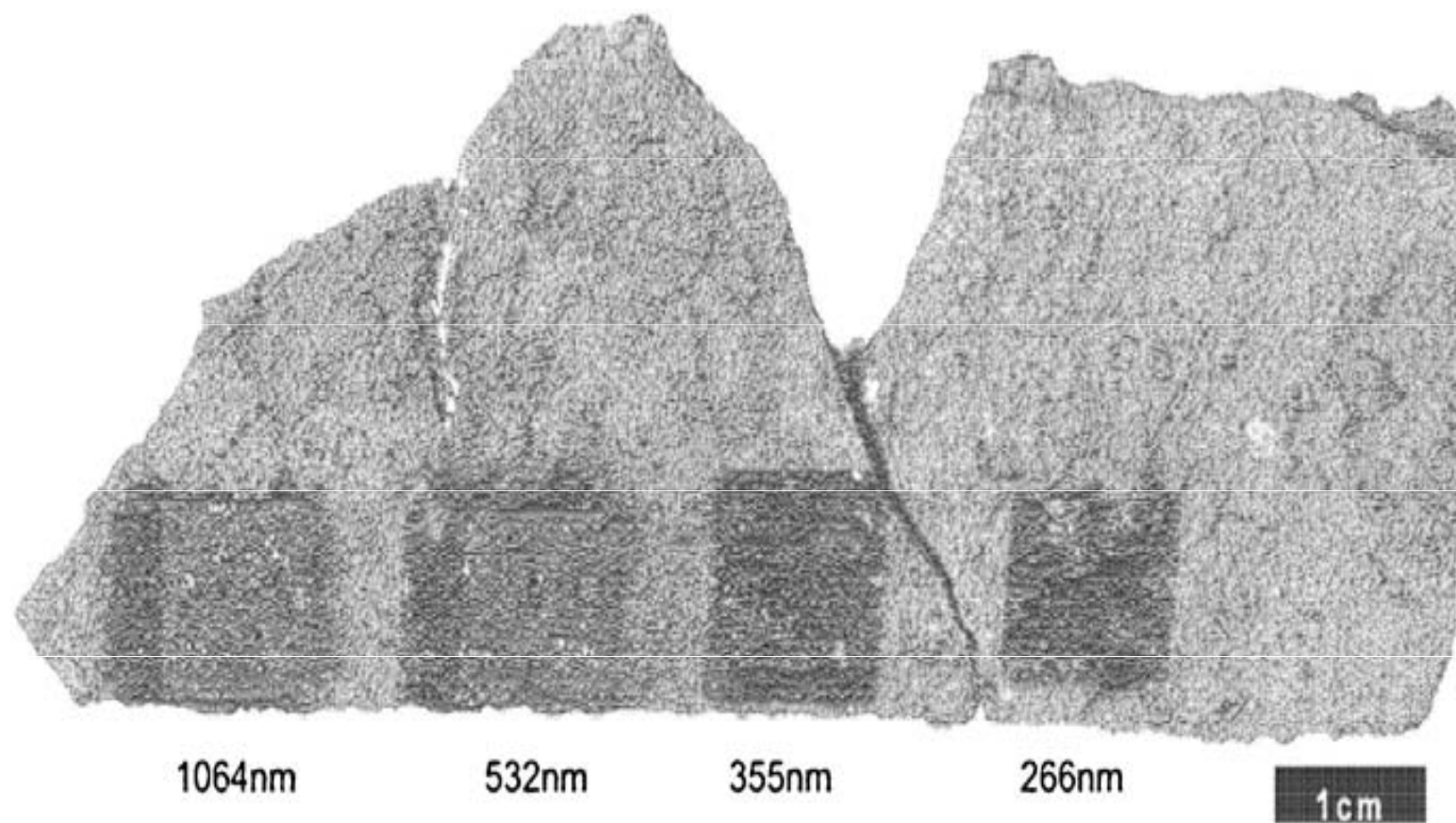
Fotografie bronzové sochy (Arian de Vries, 1648)

# Železo



Římské puklice štítů (4. stol. n. l.)





Černání železných fragmentů (římský tábor u Cologne) pro různé vlnové délky Nd:YAG lasersu.



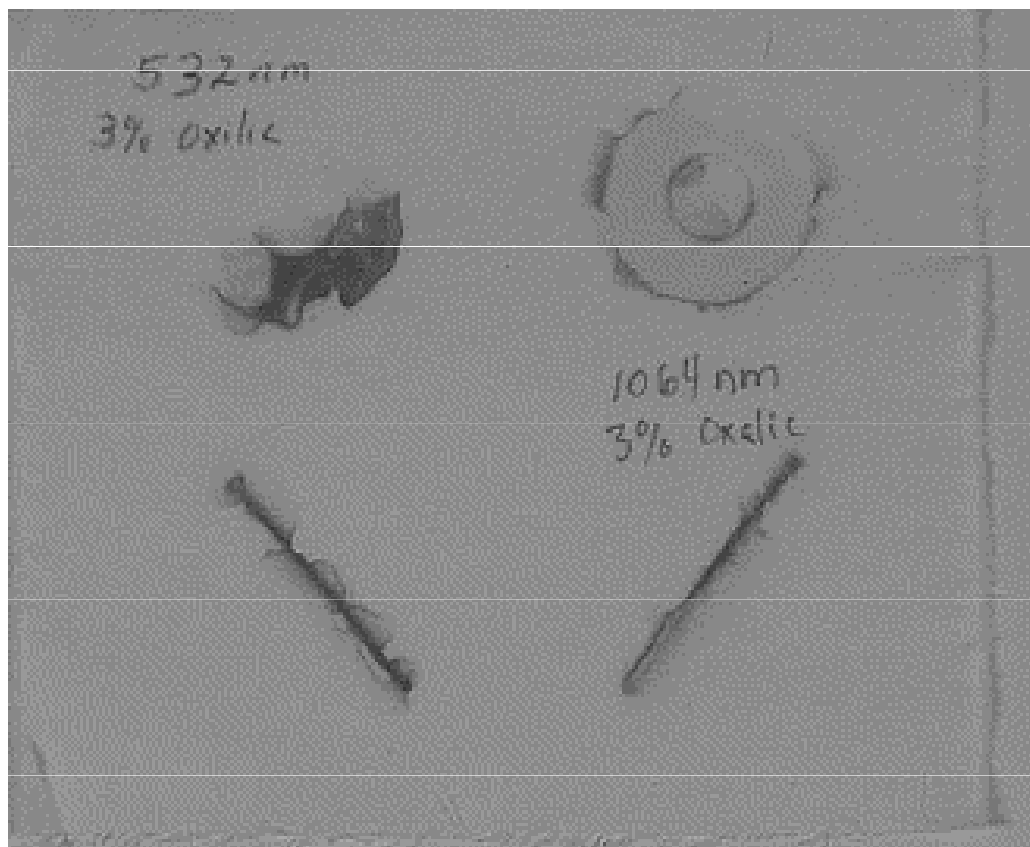
**Fig. 6.** Liquid film (ethanol) on the surface also removes silica grains; *left*: laser cleaned ( $\lambda = 1064$  nm) with ethanol liquid film; *right*: laser cleaned ( $\lambda = 1064$  nm) without ethanol liquid film

# Využití chemických látek při laserovém čištění

= látky přidávané jako matrice, účastníci se na čištění využívají laserového plazmatu.

**Pozor!** Tyto látky mohou mít vliv nejen na průběh ablace, ale také dlouhodobější následky. Rozpouštědla a kyseliny mohou poškozovat fragilní substráty, a zbytky *matrice* nebo zbytků po čištění mohou mít dlouhodobý škodlivý efekt.

**Kapaliny** (rozpouštědla a slabé kyseliny) mohou usnadnit odstranění skvrn z textilu, pergamenu a papíru. Mechanismy jsou různé, včetně odpaření (steaming) a laserem indukované disperze v kapalině i plynné fázi, a zvýšení reaktivity v kapalině za zvýšených teplot. (odstranění inkoustu, tuhy a sazí z textilu a papíru pomocí laseru a rozpouštědel a rzi z celulózy použitím laserů a kyseliny šťavelové).



Bavlněná látka s skvrnami od rzi. Skvrna nahoře vlevo, která byla původně kompletním kruhem, byla částečně odstraněna laserem (532 nm) za přítomnosti roztoku kyseliny šťavelové.



***Reaktivní plyny*** jsou užitečné vytvářením určitého typu atmosféry, usnadňující odstranění degradovaných nebo zmatnělé povrchy např. stříbra, podporou elektrochemického narušení matné vrstvy. (ablace těkavých složek a možnost čistit i fragilní povrchy).

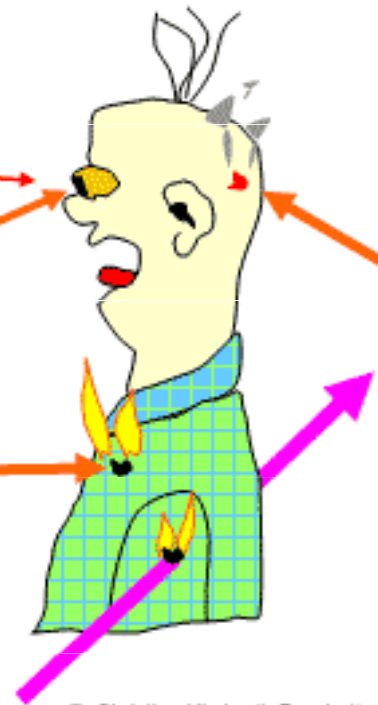


Daguerreotypie před a po čištění laserem indukovaným vodíkovým plazmatem.

# Bezpečnost práce s laserem

## Laser Safety Issues

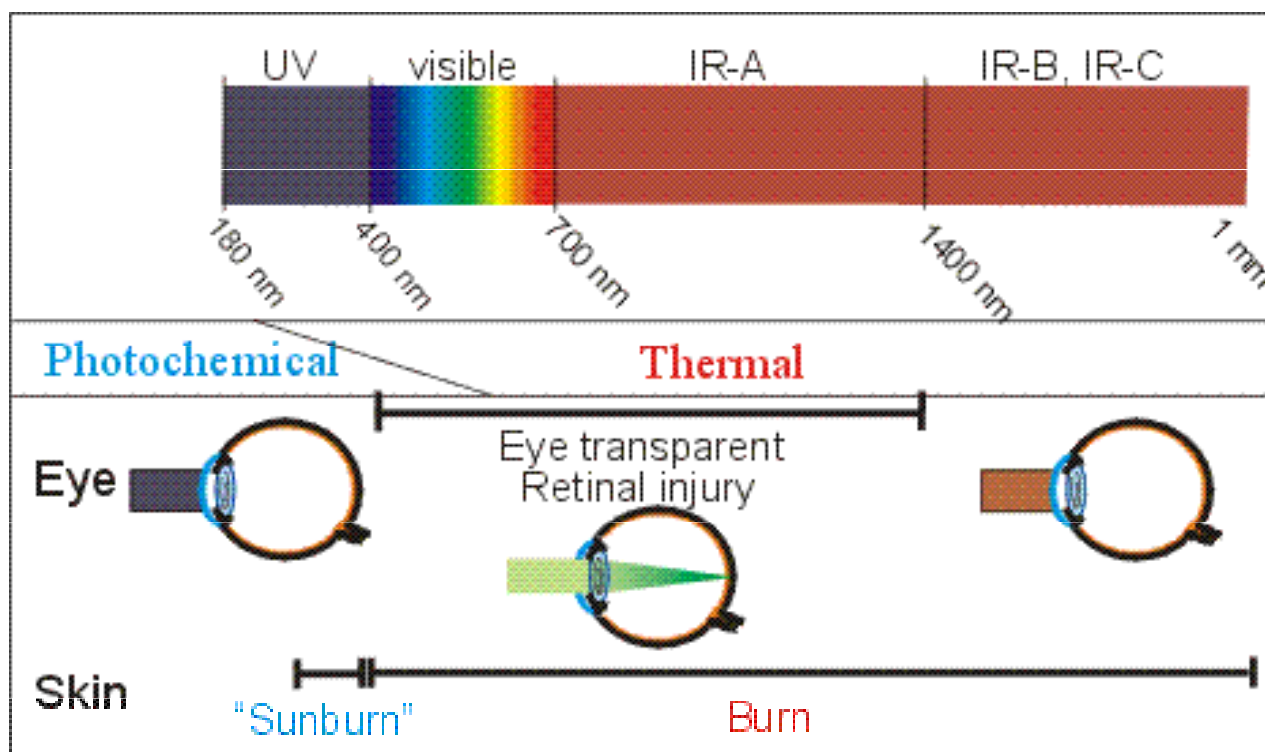
- **Laser pointer, 3 mW:**  
rather bright; could quickly damage the retina,  
but: blinking reflex helps
- **Small Nd:YAG laser, 100 mW:**  
invisible – no blinking reflex!  
⇒ rather dangerous for the eyes
- Larger **Nd:YAG laser, 10 W:**  
burns skin and clothes
- Small **Nd:YAG laser** für **Q-switched pulses:**  
very hazardous even for small average output power
- Industrial high power **Nd:YAG or CO<sub>2</sub> laser, 1-10 kW:**  
for welding; not beneficial for skin and eyes!



© Christine Kirchraih Pascholta

# Biologické efekty laserového záření

Laserové záření působící na lidskou tkáň způsobuje různý stupeň poškození. Největší nebezpečí představuje laserové záření pro lidské oko, menší, ale ne zanedbatelné pro lidskou kůži.



Faktory hrající roli při poškození tkání jsou:

vlnová délka laserového záření

spektrální absorpce, reflexe a transmise tkáně

intenzita ozáření dopadajícího laserového svazku

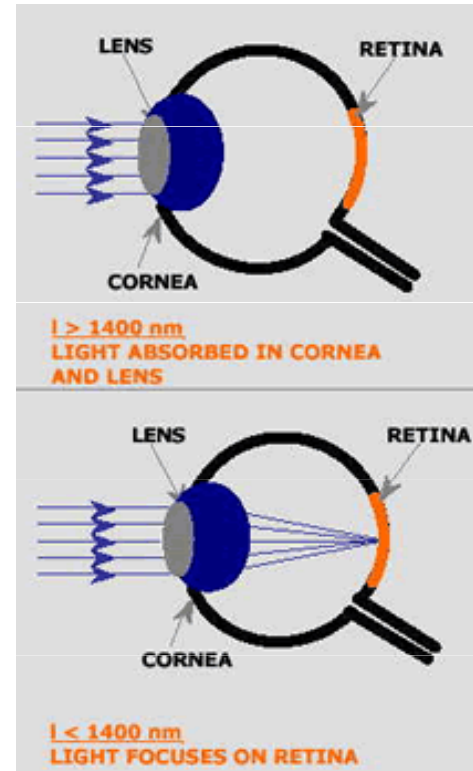
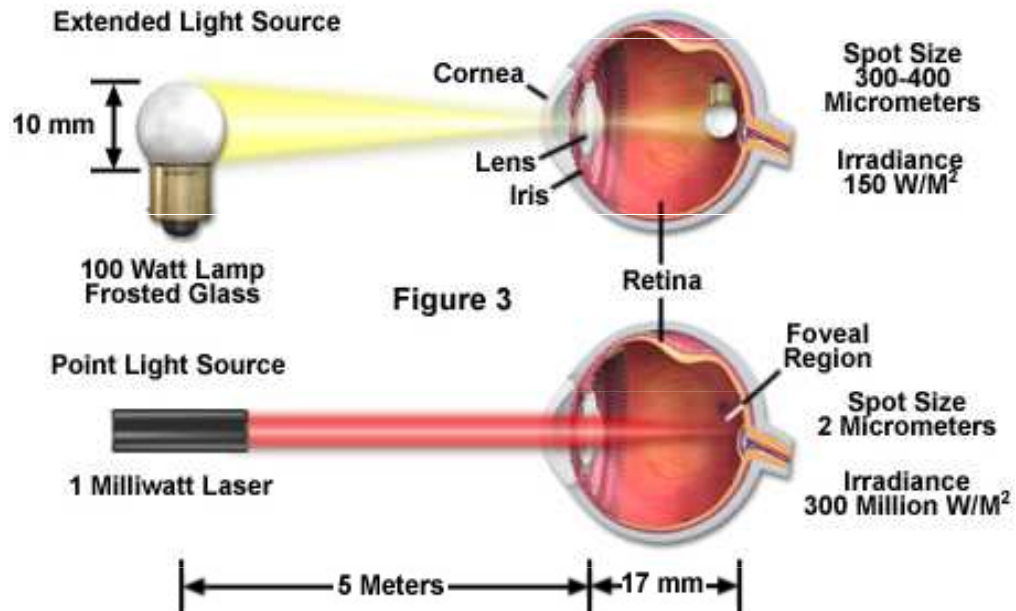
velikost ozářené tkáně

doba ozáření

velikost pupily

umístění poškozené sítnice

### Extended and Point Source Power Density at the Retina



## Třídy bezpečnosti laserů

Lasery jsou podle rostoucí úrovně nebezpečí rozděleny do 4 tříd:

- Třída 1:** lasery jsou obecně považovány za bezpečné, buď díky nízkému výkonu, nebo proto, že jejich umístění v zařízení neumožňuje expozici (Př.: CD přehrávač, laserová tiskárna)
- Třída 2:** lasery jsou považovány za bezpečné dokud safe as long as nobody deliberately stares into the beam. Lasery této třídy emitují pouze viditelné záření, takže nezpůsobují poškození oka po dobu, která je třeba k reflexivnímu zavření oka před jasným světlem (0.25 s). (Př.: většina laserových ukazovátek)
- Třída 3** lasery normálně poškozující oko pokud je paprsek pohlíženo přímo nebo zrcadlovým odrazem. Rozptylný (difuzní) odraz je obvykle bezpečný. (Př.: laserová dioda uvnitř CD vypalovačky)
- Třída 4:** lasery jsou škodlivé pro oči a kůži, včetně difuzně odraženého záření. Lasery této třídy představují také požární nebezpečí. (Př.: laserové svářečky, laserová děla)

Podtřídy 1M a 2M jsou ve své třídě bezpečné pouze pokud není laser exponovanou osobou používán spolu s optickým přístrojem (binokuláry, dalekohled, mikroskop, lupa, apod.). Třída 3 se dělí na méně nebezpečnou třídu 3R, kde lasery mohou pouze příležitostně poškodit oko a nepoškozují kůži, a nebezpečnější třídu 3B.

Přístroje zakoupené v USA používají zhruba podobné třídy I, II, III, IV.



# CAUTION

LASER RADIATION IN USE  
DO NOT STARE INTO BEAM



SEMICONDUCTOR LASER 633 nm  
MAXIMUM OUTPUT 1 mW  
CONTINUOUS OUTPUT  
CLASS 2 LASER PRODUCT



**Big Scary Laser**  
Do not look into beam  
with remaining eye

## Class 2 and Class 3a Laser Signs



## Class 3b Laser Signs



## Class 4 Laser Signs



Požadavky k zajištění bezpečnosti při práci s laserem stanoví Vyhláška č. 124 a 125 Českého úřadu bezpečnost práce Sb. z roku 1982, část. 25, str. 497 a Směrnice o hygienických zásadách pro práci s lasery Ministerstvem zdravotnictví ČSR, sv. 53/1982. Vyhláška a Směrnice se vztahují na lasery, jejichž vlnová délka leží v intervalu od 200 nm do 13000 nm. Vyhláškou jsou upraveny povinnosti konstruktérů laserů, výrobců a provozovatelů.