

# MIKROTEKTONIKA

(DEFORMACE V MIKROMĚŘÍTKU)

Úvod a metody studia mikrostavby

Petr Špaček, ÚFZ

2023

0.25 mm

## Plán výuky

- 1. Blok:** základní pojmy; metody studia deformačních mikrostavieb
- 2. Blok:** deformační mechanismy 1. část
- 3. Blok:** deformační mechanismy 2. část; zadání domácích úkolů
- 4. Blok:** kinematické indikátory (mikroskopické a mezoskopické)
- 5. Blok:** deformační magnetická stavba hornin (vznik, měření, interpretace)
- 6. Blok:** seminář k domácím úkolům (mikroskopovna?)
- ? **7. Blok:** odběry orientovaných vzorků atd. - terén

**2023:**

24.2. | Špaček

10.3. | Špaček

24.3. | Špaček

? | Melichar

? | Chadima

21.4. | Špaček

? | Melichar

# Bloky 1, 2, 3, 6: Deformační mechanismy a mikrostavba

**1. Blok:** úvod; základní pojmy, stručný přehled metod studia deformačních mikrostaveb

**2. a 3. Blok:** přehled základních deformačních mechanismů a jejich význam pro rekonstrukci deformačních podmínek (1. část – nízkoteplotní mechanismy; 2. část – vysokoteplotní mechanismy); možná i ukázky deformačních struktur ve výbrusech

**Domácí úkoly** (ve skupinách):

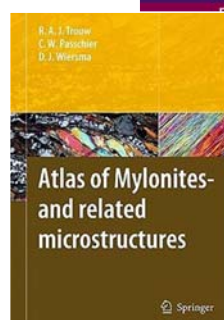
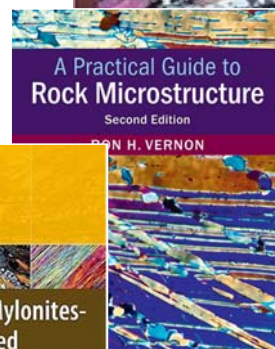
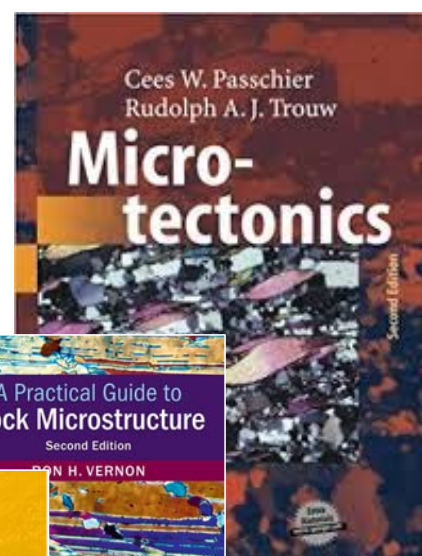
Popsat a interpretovat zadané fotografie deformačních mikrostruktur (protokol 1)

Popsat a interpretovat zapůjčený výbrus (protokol 2)

**6. Blok:** prezentace domácích úkolů, diskuse, hodnocení

## Studijní podklady

- Passchier C.W. and Trouw R.A.J., 2005: Microtectonics. Springer. 2. vyd.  
= základní učebnice, [elektronicky na uloz.to](https://www.uloz.to)
- Vernon R.H., 2004: A Practical Guide to Rock Microstructure. Cambridge University Press.
- Trouw R.A.J., Passchier C.W. and Wiersma D.J., 2010: Atlas of Mylonites and related microstructures. Springer.



# Tvar a krystalografická orientace zrn v hornině

V těchto přednáškách se budeme pohybovat převážně v rozměrech submikroskopických (atomární, např. defekty mřížky) až mikroskopických (měřítko výbrusu). Větší měřítko bude uvažováno jen pro lepší pochopení souvislostí.

Hornina je polykrystalický agregát – monominerální nebo polyminerální.

Minerální zrna jsou definována víceméně jednotným složením a víceméně jednotnou krystalografickou orientací.

Hranice zrn stejného složení je definována pouze rozdílnou orientací mřížky.

Dva úzce související pohledy strukturního geologa na horninu:

- **mikrostruktury** (tvar, velikost, geometrické uspořádání zrn)
- **krystalografická orientace zrn**

Oba pohledy jsou důležité – Deformace hornin je určena procesy, které se odehrávají v mikroměřítku uvnitř krystalové mřížky minerálních zrn i na hranicích zrn.

## Pojmy *Struktura* – *Textura* – *Stavba*

Pozor na nejednotné terminologické konvence mezi různými obory!

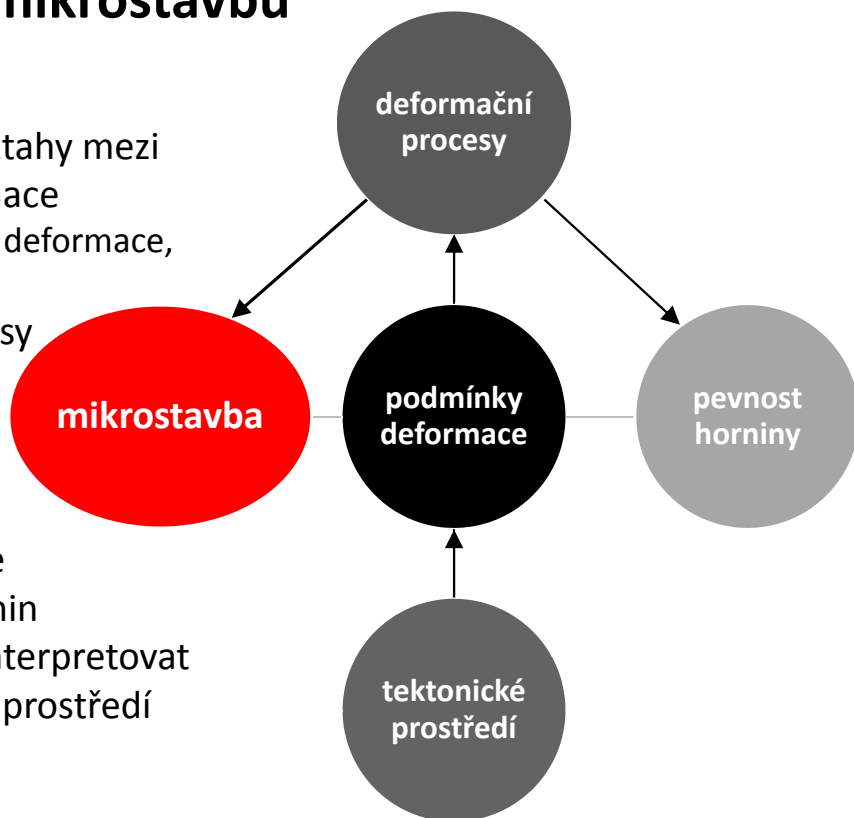
- v metamorfní a magmatické petrologii obvykle rozlišovány pojmy **textura** (velikost, tvar a uspořádání zrn různých minerálů) a **struktura** (uspořádání komponent horniny ve větším měřítku – foliace, lineace, páskování, vrásy apod.)
- v materiálovém inženýrství ale pojem **textura** ≈ krystalografická přednostní orientace
- různá pojetí pojmu **stavba** (*fabric*) ≈ často chápána jako obecný nadřazený pojem pro komplexní popis (viz výše) ale často také jako mřížková přednostní orientace

My budeme používat termíny **mikrostruktura** pro popis všech tvarů v hornině v malém měřítku a pod obecnějším pojmem **mikrostavba** (*microfabric*) budeme rozumět uspořádání všech geometrických prvků, tedy mikrostruktury i přednostní krystalografické orientace.

# Proč studovat mikrostavbu hornin?

- existují zákonité vztahy mezi podmínkami deformace (teplota, tlak, rychlost deformace, přítomnost vody), deformačními procesy a mikrostavbou

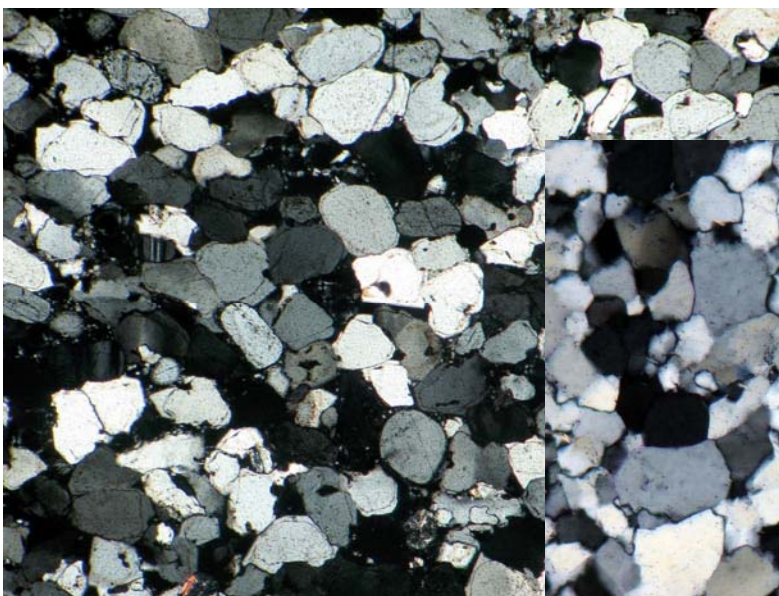
- z deformační mikrostavby můžeme odvodit pevnost hornin (reologii), můžeme interpretovat deformační historii a prostředí metamorfózy hornin



## Příklady aplikace: Petrologie

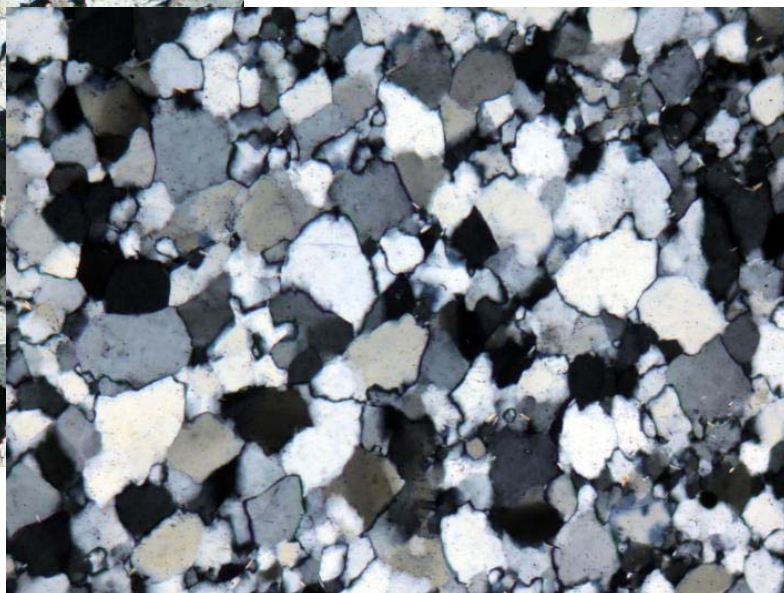
Rozlišení deformačních mikrostruktur od magmatických, sedimentárních apod.

Křemenný pískovec ↓



Liší se jen charakterem hranic zrn (mikrostrukturou)

Metamorfovaná hornina kvarcit ↓

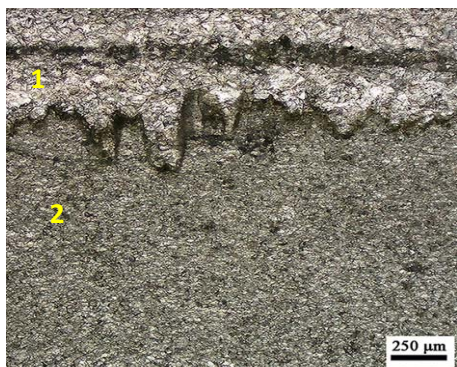




# Příklady aplikace: Petrologie

Rozlišení deformačních mikrostruktur od magmatických, sedimentárních apod.

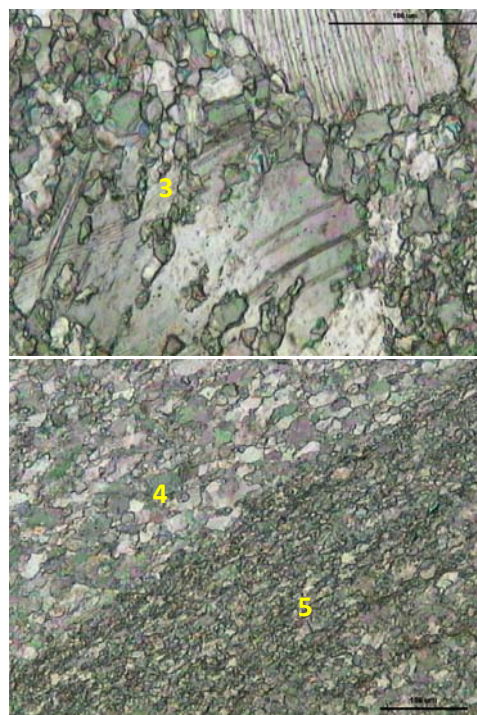
Příklad: Vápenec bez plastické deformace ↓ vs. Vápenec silně plasticky deformovaný za teplot >250°C ↓



1 – mikrit; 2 – sparit (cement v pórech, rekrystalizace v přítomnosti vody při diagenézi)

3 – vznik nových zrn vzhledu sparitu dynamickou rekrystalizací za vyšších teplot

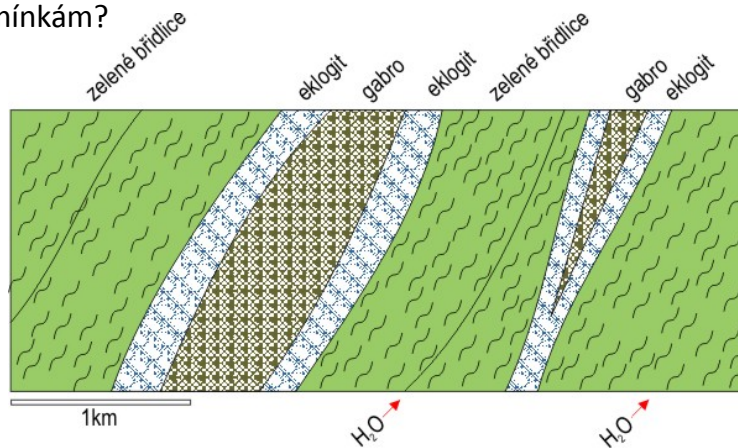
4 – deformační mikrostruktura; 5 – převážně reliktní sedimentární mikrostruktura



# Příklady aplikace: Metamorfní petrologie

Pochopení souvislostí mezi deformací, metamorfózou hornin a migrací fluid

Jak je možné, že vedle sebe existují minerální asociace, které odpovídají úplně jiným metamorfním podmínkám?



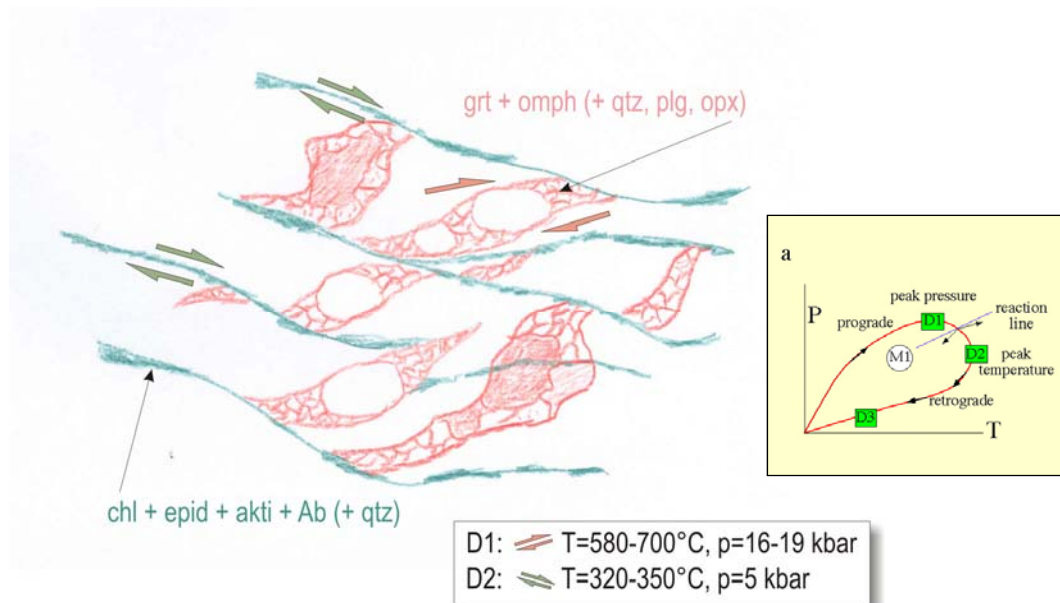
deformace → změna velikosti zrn (změna pórovitosti a prostupnosti pro fluida) + ohyb krystalových mřížek (zvýšení chemického potenciálu) + teplo (zvýšení teploty) → urychlení metamorfních reakcí

Jaký je vztah deformace a vzniku tavenin/migrace fluid? Jaká je role migrujících tavenin a fluid na mikrostrukturu/pevnost horniny?

# Příklady aplikace: Tektonometamorfní vývoj

## Deformační fáze, jejich korelace s metamorfními fázemi

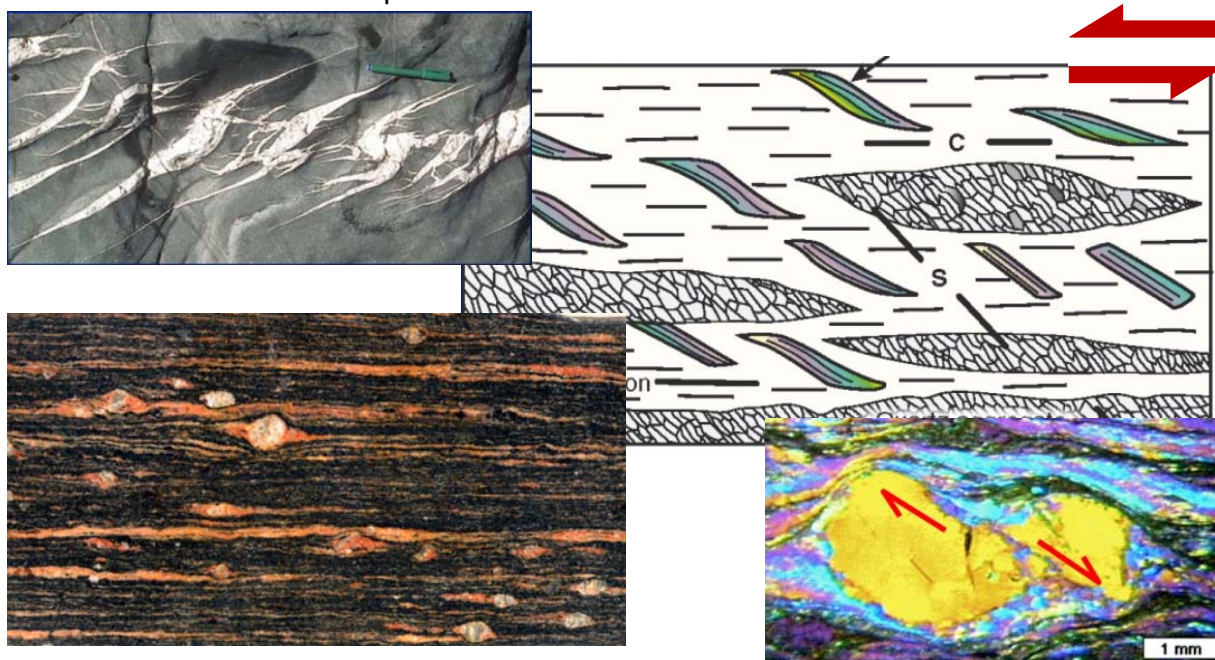
V jakém metamorfním prostředí došlo k deformaci? Jaká je časová posloupnost těchto fází? – tektonometamorfní model vývoje horniny/oblasti



# Příklady aplikace: Strukturní geologie

## Kinematika pohybů ve střížných zónách a na zlomech

Jaká byla velikost a smysl stříhu na zlomu / ve střížné zóně? V jakých horninách byla střížná zóna lokalizována a proč?

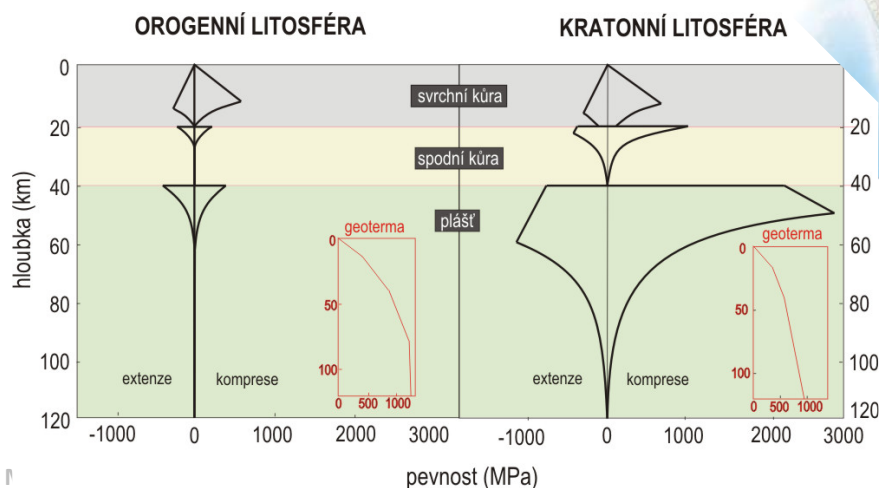
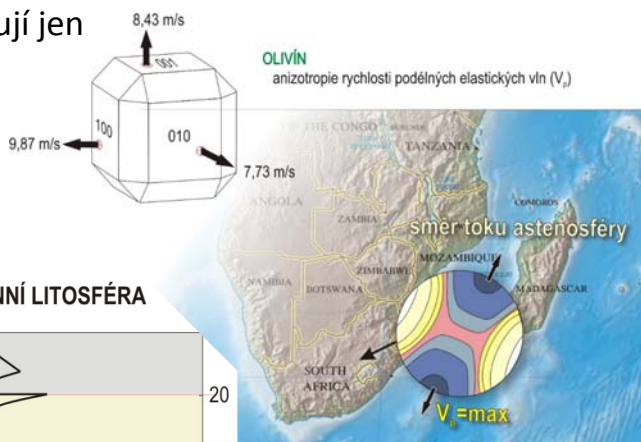




# Příklady aplikace: Stavba a dynamika Země

Pevnost litosféry a místa její přednostní deformace. Jak funguje desková tektonika? Proč se zemětřesení vyskytují jen v některých hloubkových úrovních?

Anizotropie fyzikálních vlastností deformovaných hornin a její souvislosti s deformací...



Mikrostavba může ovlivnit celkové fyzikální vlastnosti horniny

Deformační mechanismy určují pevnost horniny

13

## Hlavní laboratorní metody studia mikrostavby

Mikrostruktury (identifikace minerálních fází, hranic zrn, vnitřní stavby zrn)

- optická mikroskopie (měřítko výbrusu, desítky mikronů až centimetry; zvětšení <1000x)
- SEM – *scanning electron microscopy* (měřítko jednotlivých zrn, jednotky mikronů až první milimetry)
- TEM – *transmission electron microscopy* (submikronové struktury, mřížkové defekty apod.)

Orientace krystalové mřížky (vůči vzorku, vůči okolním krystalům)

- U-stolek, EBSD – *electron backscatter diffraction*, rentgenová nebo neutronová difrakce

Stavba obecně

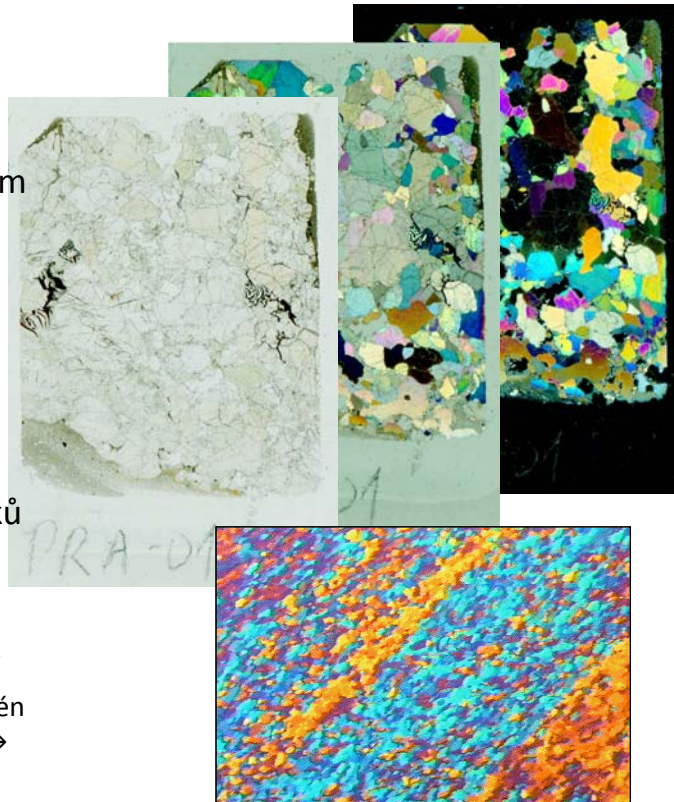
- anizotropie magnetické susceptibility

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Optická mikroskopie

### Polarizační mikroskop

- standardní výbrus: tloušťka  $\sim 30\mu\text{m}$
- tenké a ultratenké výbrusy ( $i \sim 1\mu\text{m}$ , studium jemnozrnných agregátů a minerálů s vysokým dvojlomem)
- tlusté výbrusy ( $>100\mu\text{m}$ , mikrotermometrie fluidních inkluzí, orientace planárních prvků na U-stolku)
- zkřížené/částečně zkřížené/paralelní polarizátory  $\rightarrow$
- sádrovcová destička – lepší rozlišení domén s různou krystalografickou orientací zrn  $\rightarrow$



# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Elektronová mikroskopie: SEM

(Scanning Electron Microscopy; rastrovací e.m.)

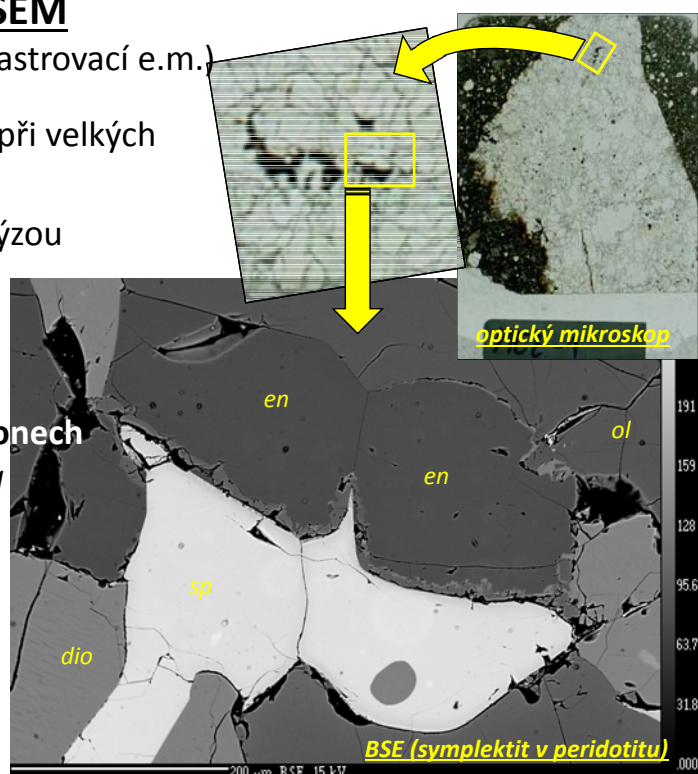
- morfologie strukturních prvků při velkých zvětšeních ( $>1000\times$ )
- možnost kombinace s rtg. analýzou chemismu (mikrosonda)

a) Pohled v „odražených“ elektronech  
*backscattered electron imaging*

**BSE obraz**  $\rightarrow$

(intenzita odpovídá střednímu atomovému číslu)

+ rtg a CL

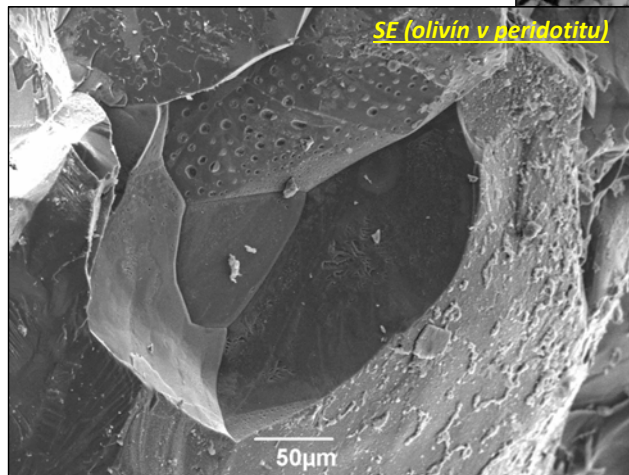
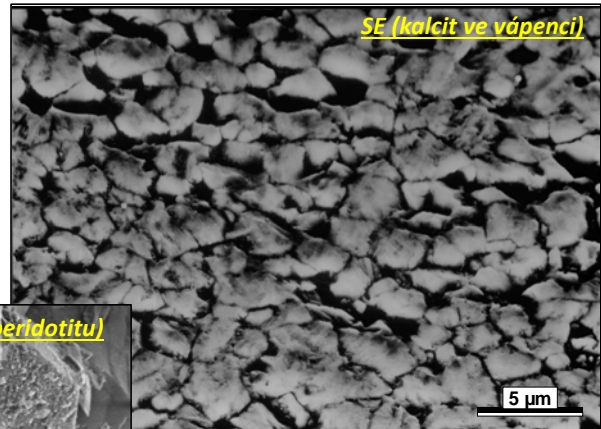




# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Elektronová mikroskopie: SEM

b) Pohled v sekundárních elektronech  
*secondary electron imaging*,  
**SE obraz** ↓→



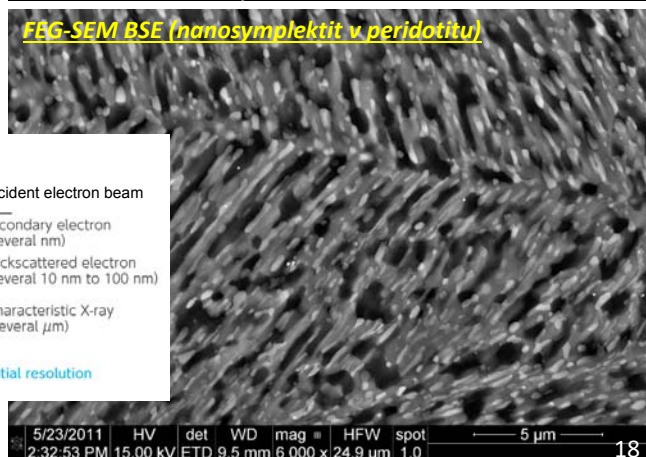
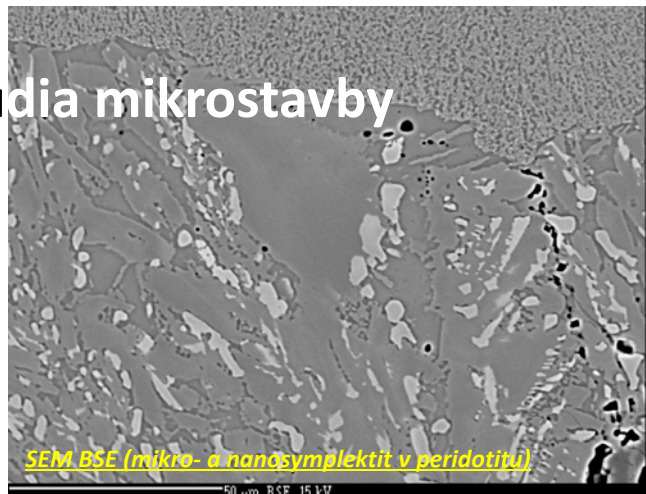
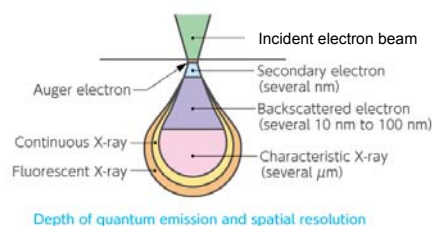
Intenzita = stínovaný reliéf

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Elektronová mikroskopie: SEM

Jak zvětšit rozlišení při pořizování  
obrazu a prvkové analýze?

- SEM s vláknovou katodou – rozlišení obrazu cca 0.5-1 µm
- FEG-SEM (*Field Emmision Gun SEM*) – stabilnější a menší svazek – i submikronové rozlišení obrazu (desítky nm)
- ztenčení vzorku na fólii
- EBSD – viz dále



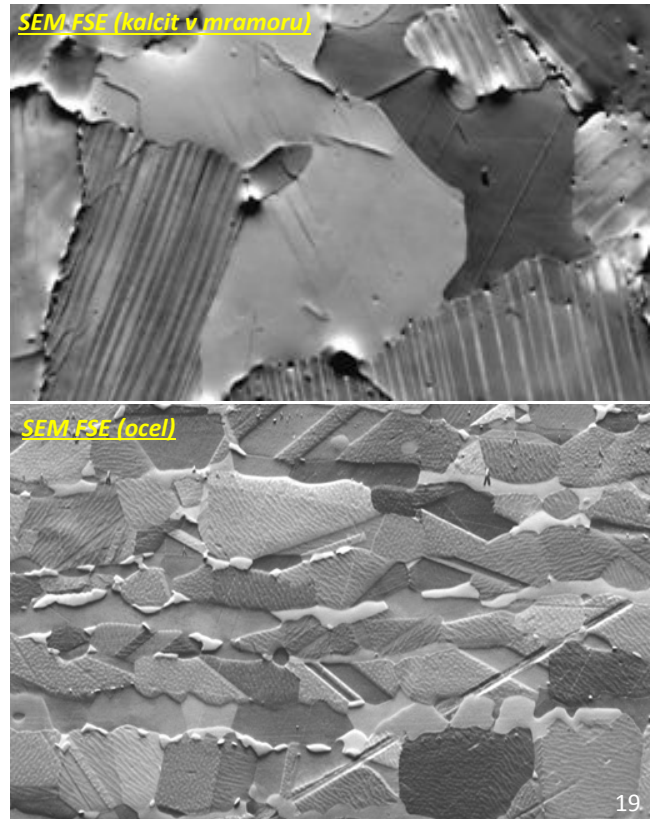
# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Elektronová mikroskopie: SEM

Jak rozlišit zrna stejného složení?

### a) orientation contrast imaging

Různá intenzita odrazu elektronů od různě orientovaných krystalových mřížek → zvýraznění kontrastu různě orientovaných domén např. použitím forescatter (FSE) detektoru (= BSE detektor v jiné geometrii).



# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Elektronová mikroskopie: EBS

Jak rozlišit zrna stejného složení?

### b) *Electron Back Scatter Diffraction*, EBSD

- difrakce elektronů v prvních nanometrech tloušťky vzorku
- zjištění krystalografické orientace, rozlišení zrn a identifikace minerálních fází podle difrakčních vzorů
- velká rozlišovací schopnost metody až v desítkách nanometrů (technický postup měření viz dále)



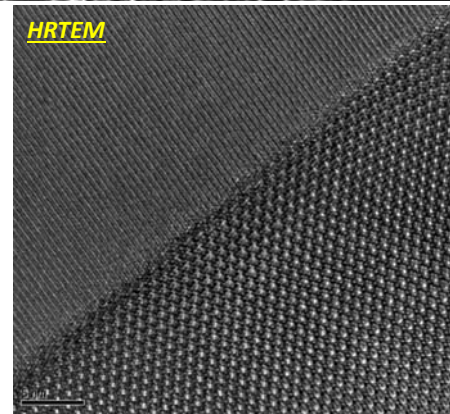
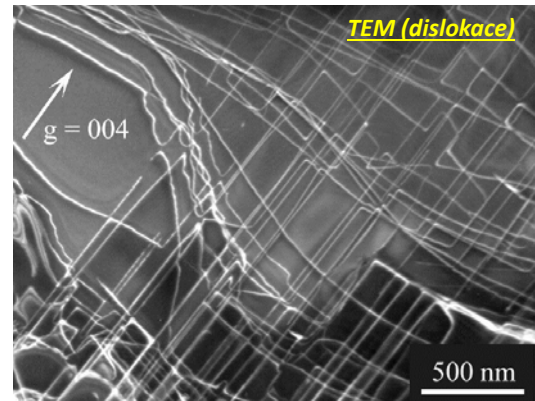


# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Elektronová mikroskopie: TEM

(Transmission Electron Microscopy, transmisní e.m., STEM = Scanning TEM)

- Pro studium submikronových struktur – např. dislokací (zjišťování kluzných systémů, dislokační hustoty atd.) a opravdu malých detailů na hranicích zrn
- (iontově) ztenčené ultratenké fólie (Focused Ion Beam Milling, FIB)
- HRTEM (High Resolution TEM)  
Měřítka jednotlivých atomů, rozlišení až 50 pm

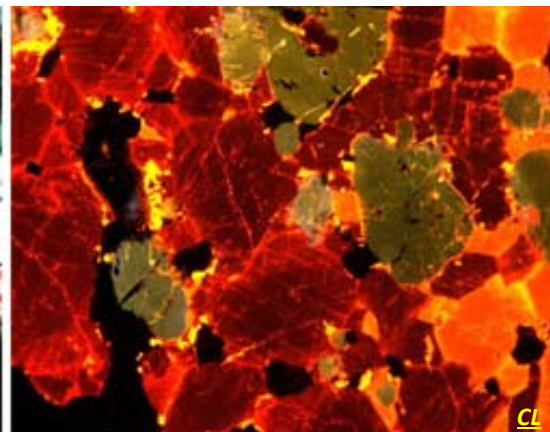
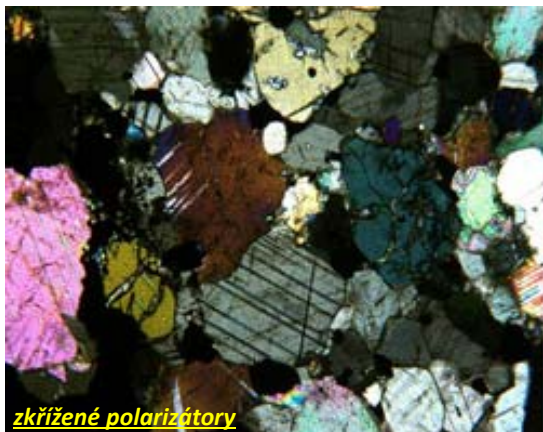


# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Katodoluminiscenční mikroskopie (Cathodoluminescence, CL)

- Katodoluminiscence - luminiscence vyvolaná excitací elektronovým svazkem
- CL vzniká pouze v některých minerálech, různé příčiny - většinou mřížkové defekty (související s příměsí stopových prvků)
- studium zonace chemického složení kalcitu, dolomitu, živců; studium žil, přírůstkových zón

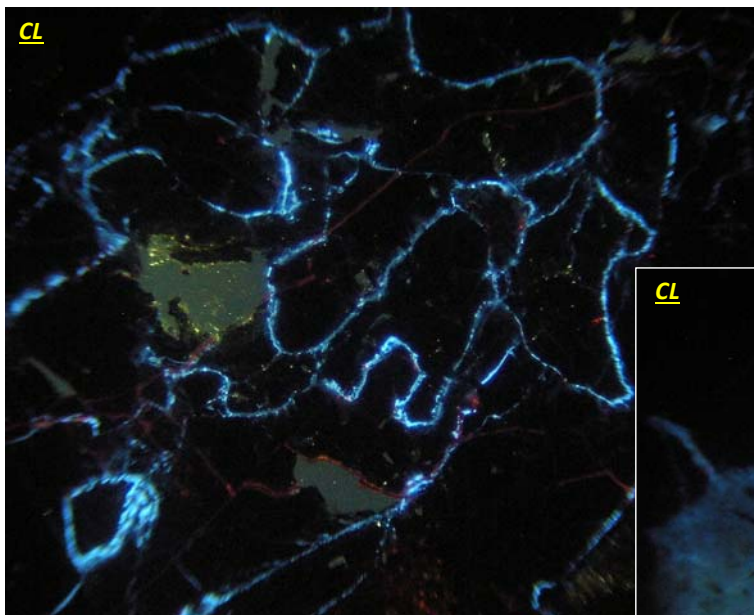
↓ Dolomit+kalcit+pyroxen v optickém mikroskopu





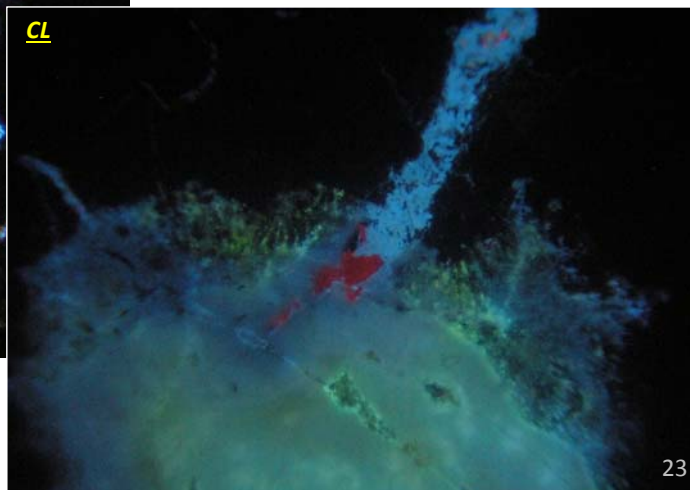
# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Katodoluminiscenční mikroskopie (*Cathodoluminescence, CL*)



← hranice zrn v peridotitu dekorované mikrokrystalickým živcem z taveniny

↓ různé generace živce + magmatický karbonát na styku žilky a mikrosymplektitu



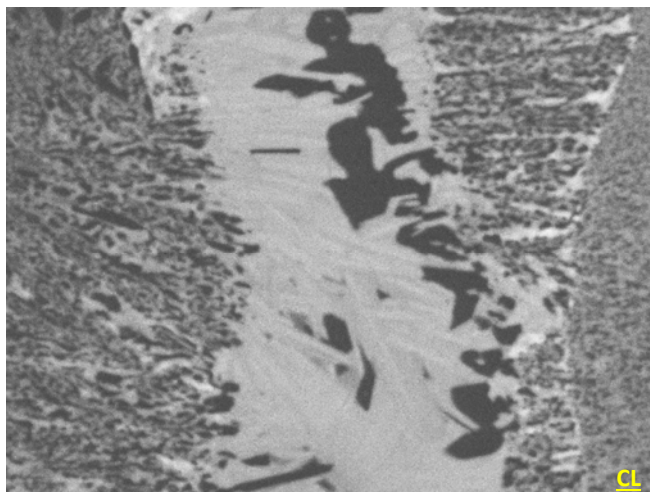
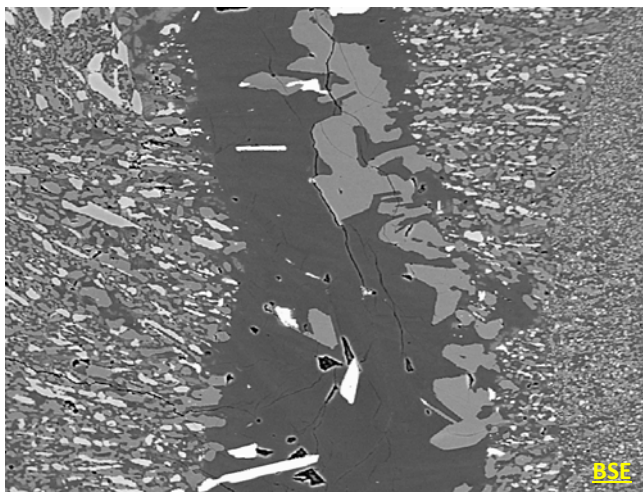
Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+VI, Špaček)

23

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Katodoluminiscenční mikroskopie (*Cathodoluminescence, CL*)

↓ živcem bohatá žilka ( $|\leftrightarrow|$  200  $\mu$ m) v mikrosymplektitu + aureola (SEM)



Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+VI, Špaček)

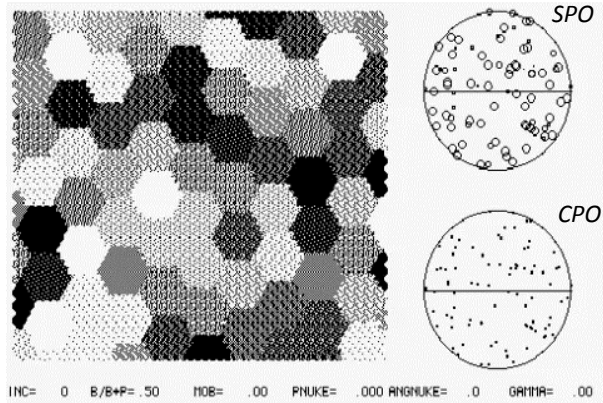
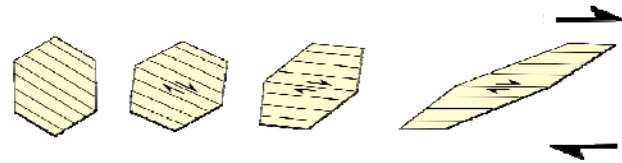
24

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Souvislost tvarové a krystalografické přednostní orientace

(shape preferred orientation, SPO; crystallographic=lattice preferred orientation CPO = LPO)

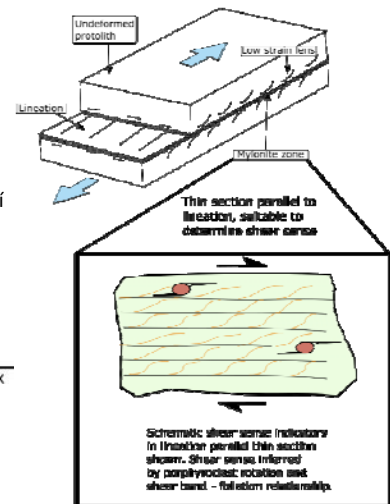
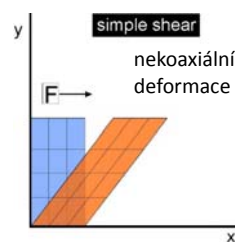
- SPO i CPO často ukazují základní geometrii deformace (směr a smysl pohybu)
- SPO definuje foliaci (plošné uspořádání) a lineaci (lineární uspořádání); ukazuje makroskopické indikace pro stanovení vhodných řezů pro výbrusy
- Foliaci a lineaci využíváme jako referenční souřadný systém pro popis orientace prvků



Animace idealizovaného konceptu vzniku SPO a CPO (takhle to ve skutečnosti nefunguje!)

## 3D geometrické prvky ve 2D řezu

- **orientace výbrusu:** Řez kolmý k foliaci a paralelní s lineací je vhodný pro studium smyslu stříhu (je kolmý k ose rotace při nekoaxiální deformaci); řez paralelní s foliací může být vhodný pro nalezení lineace



- ! **velikost zrna:** přítomnost různě velikých zrn ve výbrusu neznamena nutnou přítomnost různě velikých zrn v 3D (pro výpočet skutečné velikosti zrn je nutná korekce)

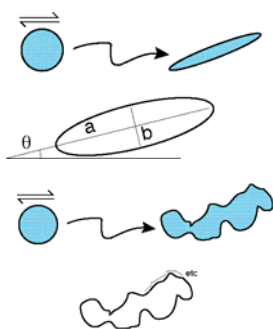
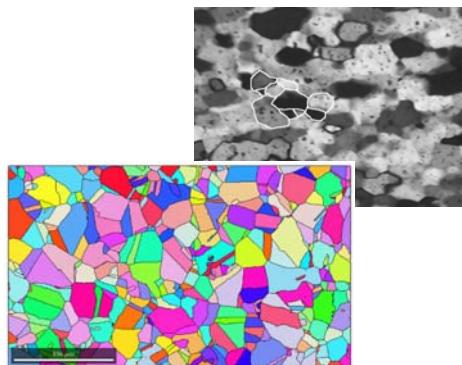
- ! **tvar zrna:** protáhlý tvar zrn ve výbrusu neznamena nutně lineaci (nutno mít alespoň 2 kolmé řezy)

- ! **úhly mezi strukturními prvky:** pozorovaný úhel nemusí být skutečným úhlem (záleží na úhlu těchto prvků k rovině řezu)

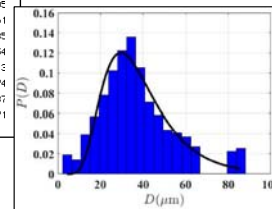
# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Tvarová přednostní orientace: kvantitativní studium

- 1) Definování hranic zrn (nejlépe vektorově) manuálně (levné, přesná topologie) nebo mapováním SEM-EBSD technikou (i plně automatizovaně, přesná krystalografická orientace)
- 2) Kvantitativní analýza geometrie zrn nebo hranic zrn



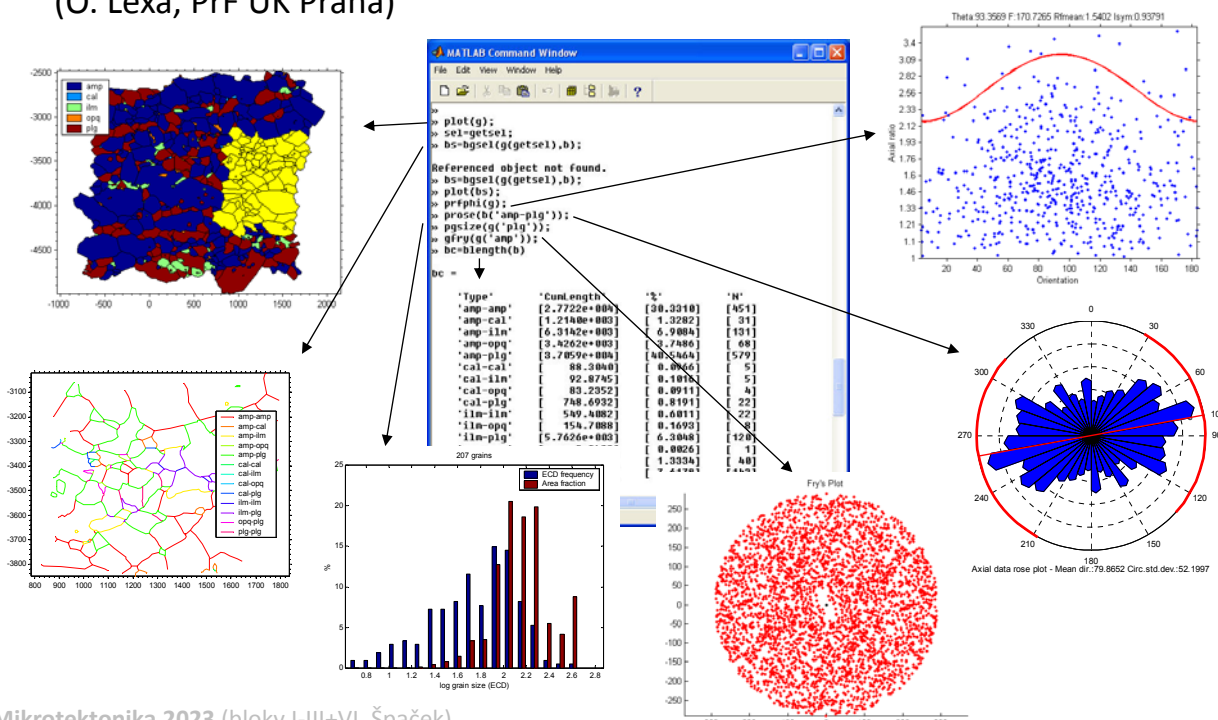
Area	X	Y	Length	Mojc
1.	867.00000000	120.06228638	227.90310669	126.71067
2.	365.00000000	167.21369934	221.83013916	88.769554
3.	510.00000000	143.59803772	212.30979919	88.225395
4.	99.00000000	121.41413879	208.66667175	50.8700561
5.	1637.00000000	173.05680847	192.70310564	171.4382
6.	1079.00000000	226.07598877	189.96662903	128.2254
7.	2242.00000000	133.52453613	169.77565002	214.5512
8.	483.00000000	217.06211853	167.85920715	91.497474
9.	305.00000000	169.70492554	169.06230164	79.254837
10.	111.00000000	187.55856323	171.73873901	46.284271



# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Tvarová přednostní orientace: kvantitativní studium

Ukázky z PolyLX: freeware pro mikrostrukturní analýzu v prostředí MatLab (O. Lexa, PŘF UK Praha)





# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Krystalografická přednostní orientace

Metody měření:

- **Optické** (hledání orientace optických os → orientace každého měřeného zrna)
- **Difrakce rtg. záření nebo neutronů** (vyjádření statistiky orientace krystalových rovin všech zrn pomocí rentgenové či neutronové difrakce → přednostní orientace v agregátu zrn)
- **Difrakce elektronů** (hledání orientace krystalových rovin pomocí difrakce odražených elektronů v SEM nebo TEM → orientace každého měřeného zrna)

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Krystalografická přednostní orientace: U-stolek

Trojosý „univerzální stolek“ na optickém polarizačním mikroskopu

Hledání orientace optických os jejich nastavením do osy mikroskopu a odečtem úhlů os stolku.

Nevýhody:

Zjišťujeme pouze orientace optických os, což je neúplné určení orientace.

Úplné určení je možné pouze u opticky dvojosých minerálů – olivín, pyroxen...)

Časová náročnost (nebezpečí chyb pod vlivem únavy).

Omezená přesnost a velikost měřených zrn.



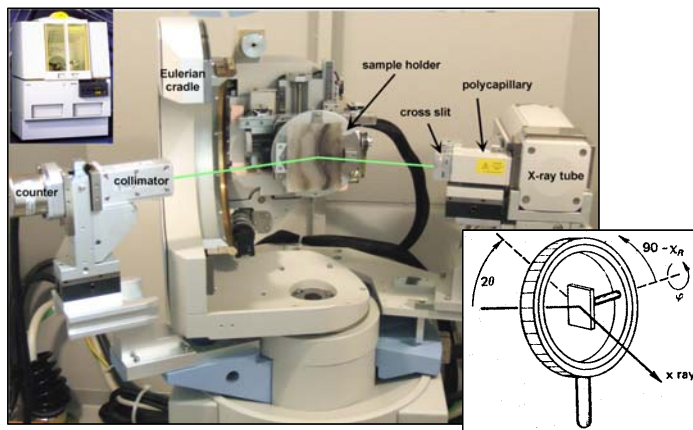
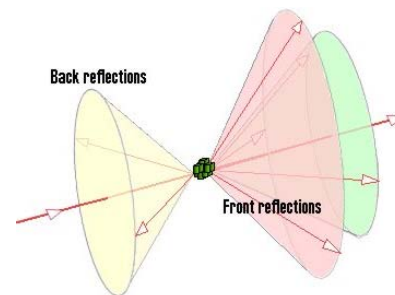
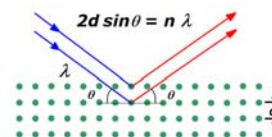
*Metoda je už delší dobu na ústupu.*

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Krystalografická přednostní orientace: rentgenová a neutronová difrakce

Rentgen nebo zdroj neutronů (jaderný reaktor)  
+ texturní goniometr

Měření intenzity difragovaného záření při konstantním úhlu  $2\theta$  (pro každou studovanou mřížkovou rovinu) a současném otáčení vzorku podle 2 kolmých os.



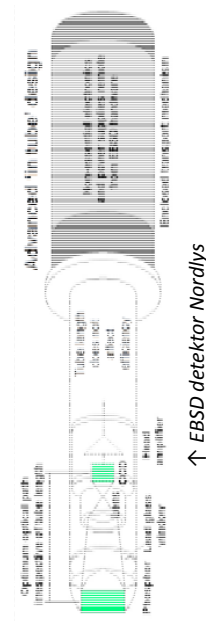
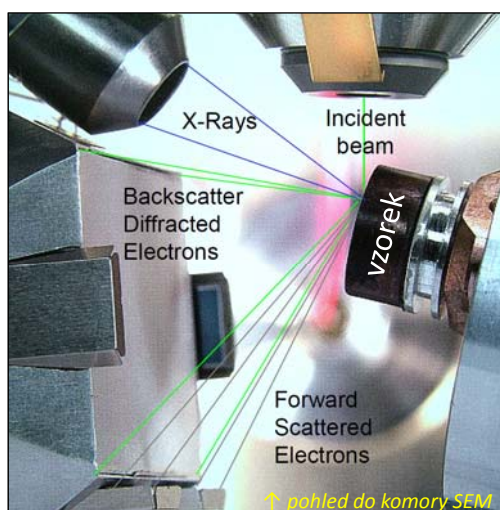
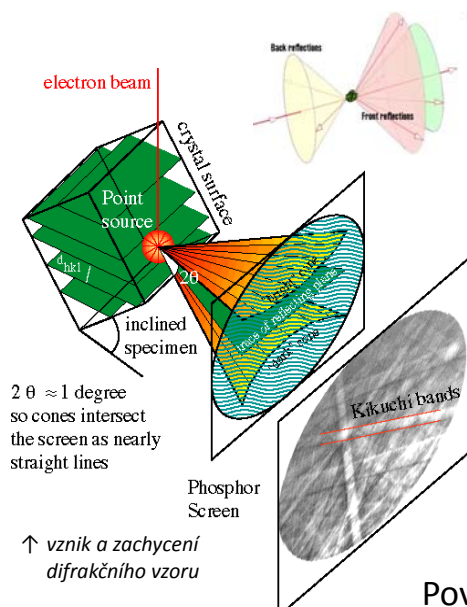
Nevýhoda: nelze studovat krystalografickou orientaci jednotlivých zrn

Výhoda: měření reprezentativního objemu, kompletní popis orientace

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Krystalografická přednostní orientace: EBSD (Electron Backscatter Diffraction)

Difrakce elektronů v TEM nebo SEM → 3D difrakční vzor; konverze části tohoto elektronového difrakčního vzoru na viditelné světlo na fosforovém stínítku; snímání optickou CCD kamerou

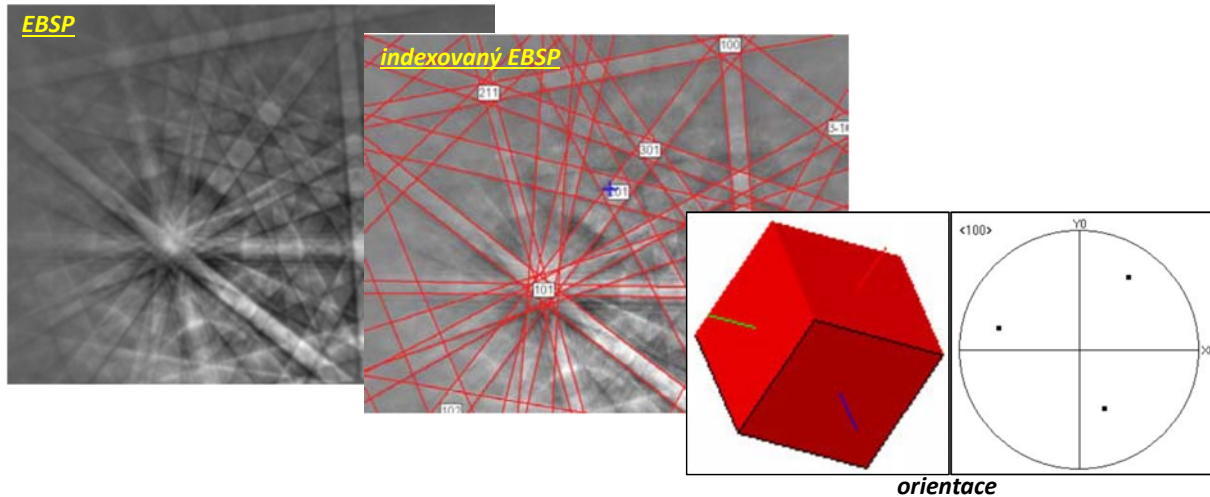


Povrch vzorku musí být dokonale chemicky vyleštěn

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Krystalografická přednostní orientace: EBSD

→ počítačová analýza obrazu; srovnání s databází vybraných fází → určení orientace (a mřížkových parametrů, tedy určení minerální fáze)

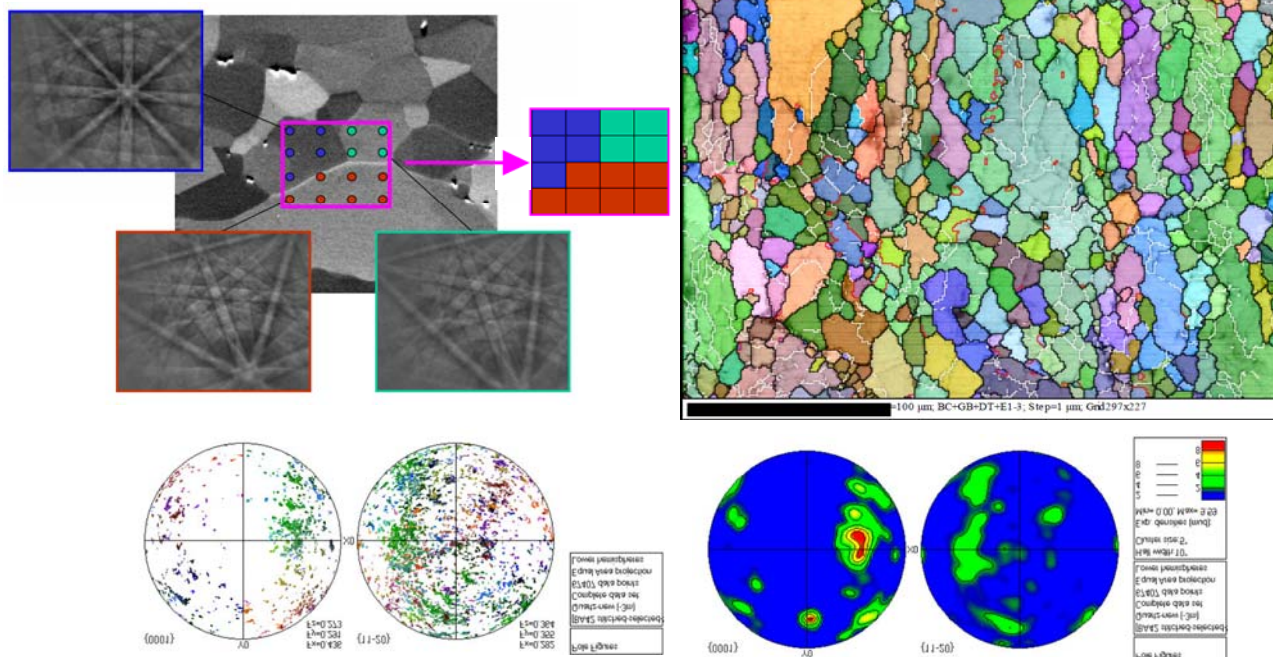


Měření vždy v jasně definovaném bodě – vazba na konkrétní zrn.

# Laboratorní metody studia mikrostavby

## Krystalografická přednostní orientace: EBSD

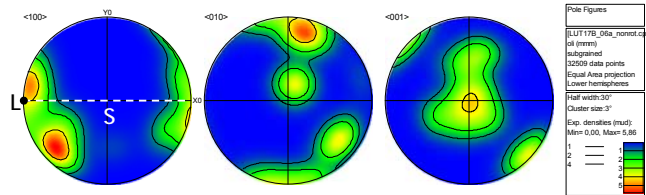
Možnost plně automatického mapování



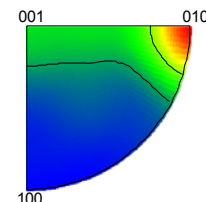


## Grafická reprezentace orientace

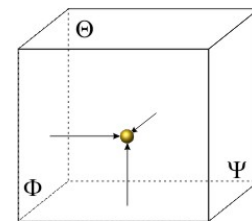
- **pólový obrazec (Pole Figure)** → hustoty pólů studovaných krystalových rovin zobrazené v koordinátách vzorku



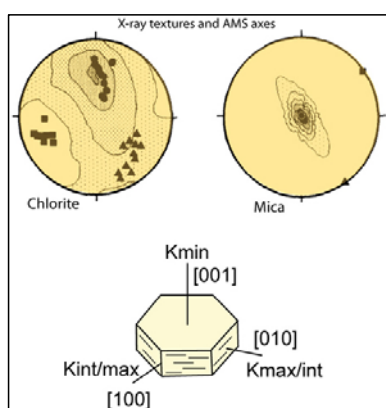
- **inverzní pólový obrazec (inverse PF)** → hustoty jednoho zvoleného směru vzorku v různých krystalových směrech



- **distribuční funkce orientací (Orientation Distribution Function, ODF)** → kompletní popis orientace, 2D-graficky nevyjádřitelné

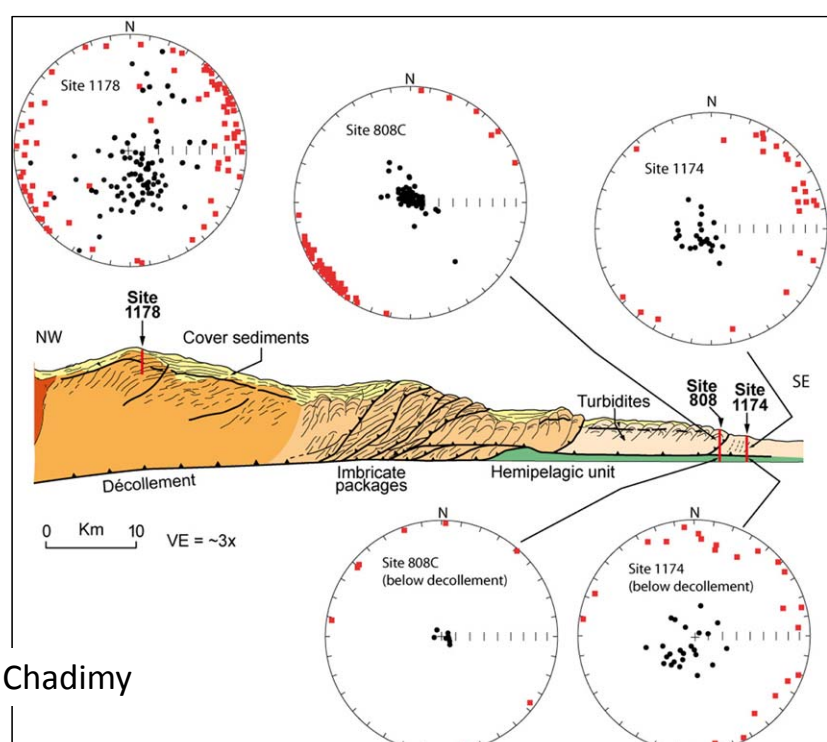


## Laboratorní metody studia mikrostavby Anizotropie magnetické susceptibility



Měření anizotropie horniny → odvození vnitřní stavby → interpretace deformace (geometrie, velikost)

- Viz speciální blok M. Chadimy



# Experimentální studium vzniku mikrostavby

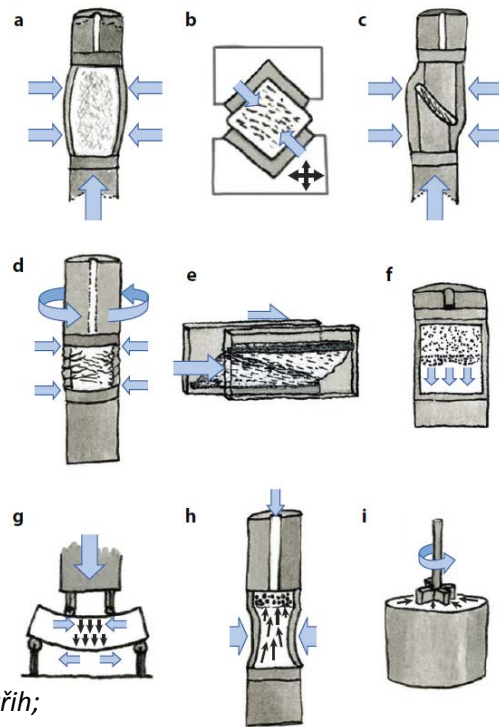
## Vysokoteplotní deformace hornin

- studium vzniku mikrostavby hornin v teplotních a tlakových podmínkách simulujících přirozené podmínky (nutné vyšší rychlosti deformace - rozdíl 5-10 řádů oproti přirozené rychlosti)
- kombinace s poznatky z materiálového inženýrství (základy pro mikrotektoniku pocházejí především z metalurgie, keramiky)

→ odvození zákonitostí pro aplikaci na reálné horniny

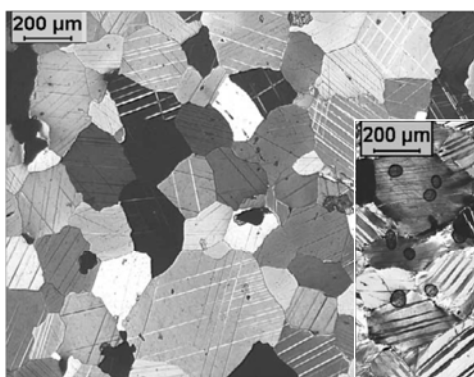
Různé typy deformačních experimentů →

- (a) trojosá komprese; (b) uniformní čistý stříh;
- (c) jednoduchý stříh; (d) torze; (e) „see-through“ stříh;
- (f)-(i) různé testy migrace a segregace taveniny



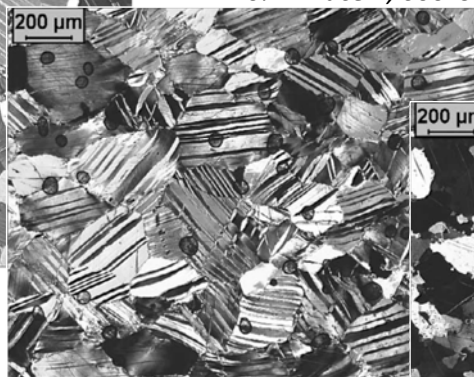
# Experimentální studium vzniku mikrostavby

## Vysokoteplotní deformace hornin

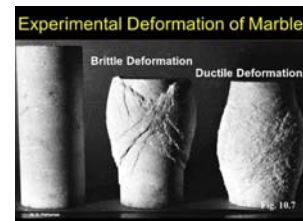
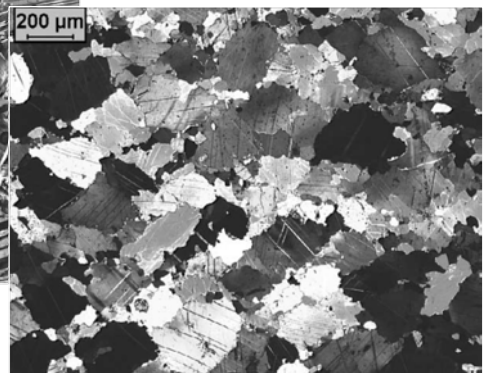


Před deformací

~20% zkrácení, 600°C



~20% zkrácení, 1000°C



↑ Příklady mikrostruktur laboratorně plasticky deformovaného Carrarského mramoru v jednoduchém stříhu (uniaxiální kompresi) za různých teplot (De Bresser et al. 2005).

# Experimentální studium vzniku mikrostavby

## Deformace horninových analogů

Sledování deformace a vzniku mikrostavby ve snadno nízkoteplotně deformovatelných krystalických látkách v reálném čase.

Látky s nízkou teplotou tání typu oktachlorpropan, norcamphor, bischofit, karnalit, led.

Výhoda podobnosti mechanismů deformace při podobném poměru experimentální teploty a teploty tání materiálu.

*Různé geometrie deformačních experimentů* →

(a) jednoduchý a čistý stříh v lineárním uspořádání; (b) čistý stříh v torzním uspořádání

