



MIKROTEKTONIKA

(DEFORMACE V MIKROMĚŘÍTKU)

Mechanismy deformace

2. část: hlubší kůra + plášť

Petr Špaček, ÚFZ
2023

0.25 mm

Hlubší kůra a plášť:

Hloubky ~8-10 km a vyšší

Vysoké teploty, střední a vysoké omezující tlaky

• hlavními fyzikálními procesy aktivními zejména v relativně **vysokoteplotních** podmínkách deformace jsou pohyby lineárních a bodových defektů v mřížce a difúze v pevném stavu. Ty jsou podstatou velmi účinných mechanismů deformace souhrnně nazývaných plasticita krystalů (*crystal plasticity*):

- **dislokační tok** (*dislocation creep*)
- **difúzní tok** (v pevném stavu; *(solid-state) diffusion creep*), případně se skluzem po hranicích zrn (*grain boundary sliding*)

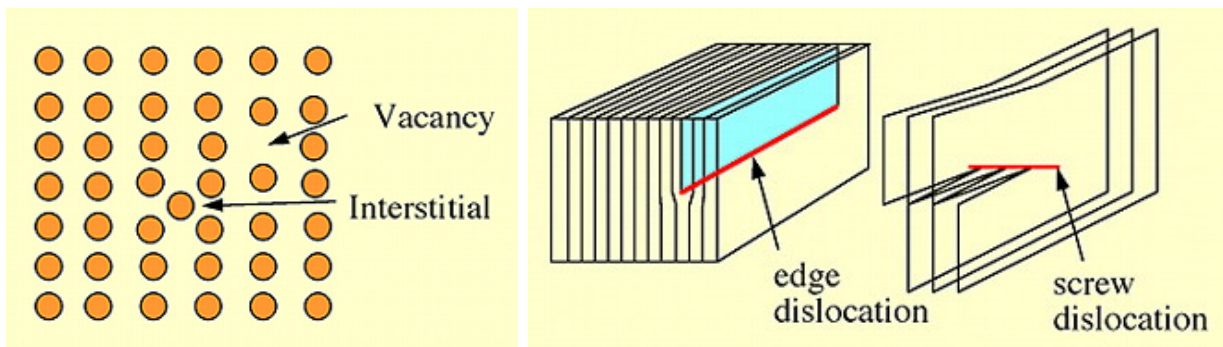
• teplota aktivace těchto mechanismů je různá u různých minerálů, např. dislokační tok v kalcitu při ~300°C vs. v olivínu při ~700°C (při běžných rychlostech deformace)

Mřížkové defekty

- bodové a lineární defekty mřížky, běžné ve všech reálných krystalech
- významně změkčují krystaly – usnadňují jejich plastickou deformaci; umožňují postupnou deformaci mřížky bez potřeby okamžitého přerušování všech meziatomových vazeb v rovině stříhu
- tvoří difúzní cesty v mřížce

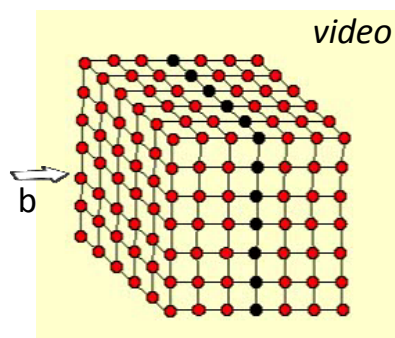
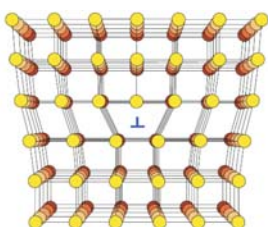
Bodové – vakance a intersticiály (*vacancies, interstitials*)

Lineární (čárové) – hranové a šroubové **dislokace** (*edge and screw dislocations*)

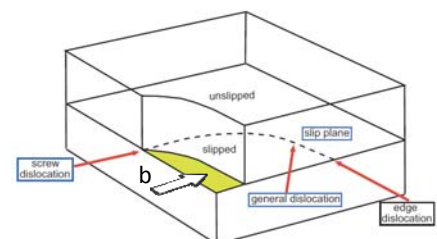
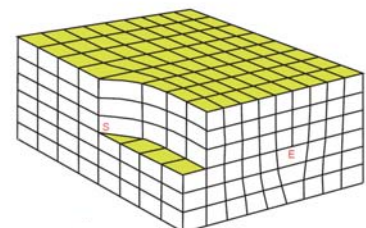


Dislokace, dislokační skluz

- Burgersův vektor (vektor translace spojené s dislokací; označení „b“) → rovina a směr skluzu = kluzný systém; např. (010)[001]
- základní pohyb dislokací v rovině = **dislokační skluz** (*dislocation glide*)
- většina minerálů má několik kluzných systémů s různou pevností (*critical resolved shear stress, CRSS*) za různých teplot
- aktivita kluzného systému závisí na CRSS (teplotě) a orientaci krystalu

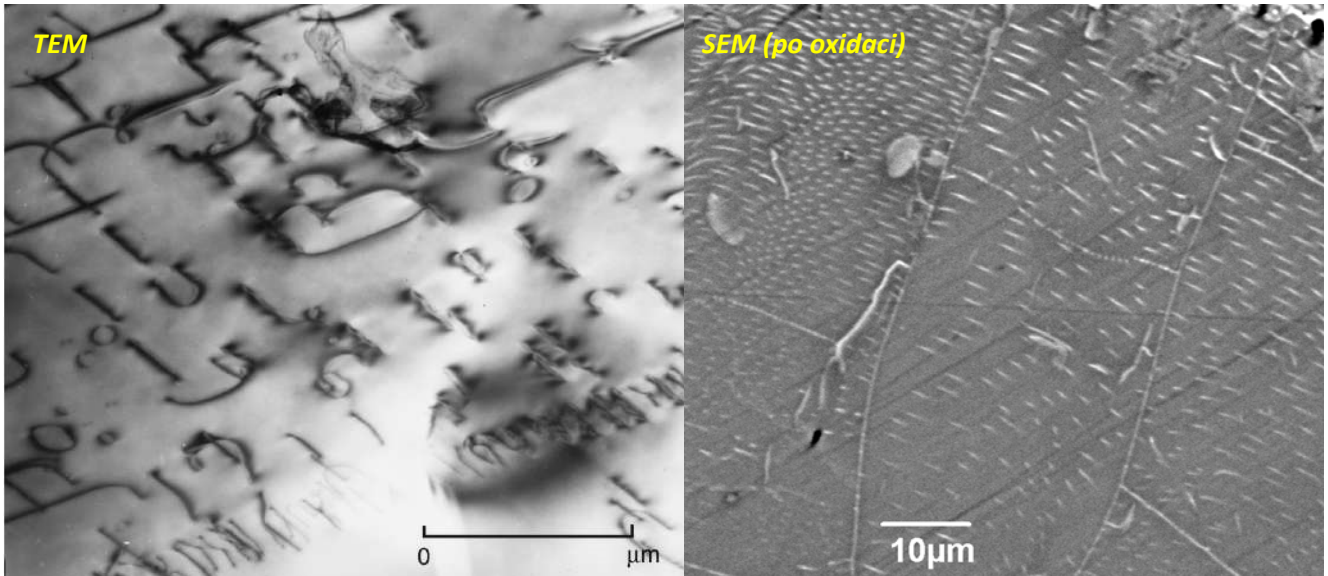


video



Dislokace

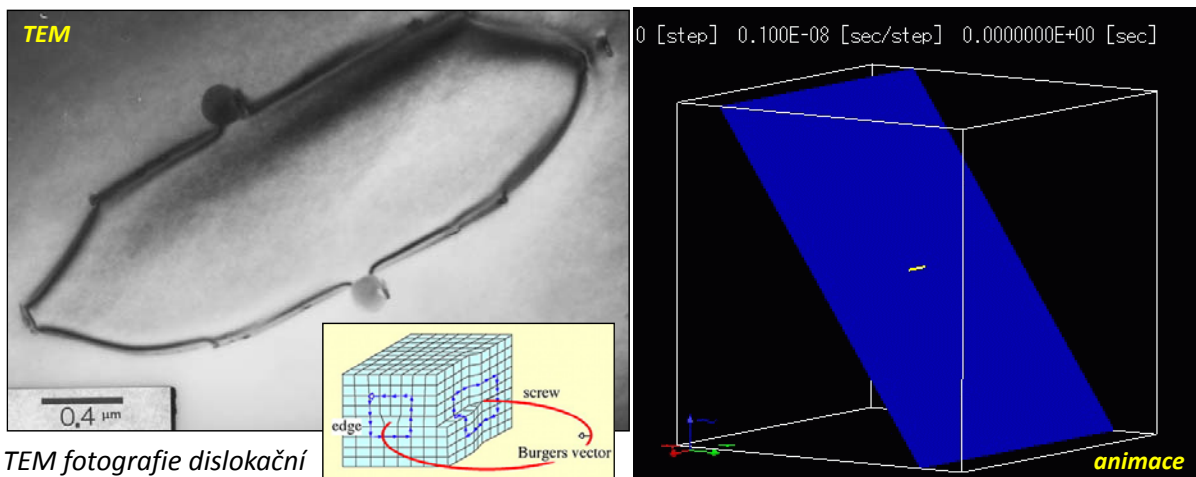
fotografie z TEM a SEM (olivín)



Dislokace

Vznik dislokací

- model vzniku dislokace jako série dislokačních smyček na nehomogenitách krystalu („Frank-Read source“)



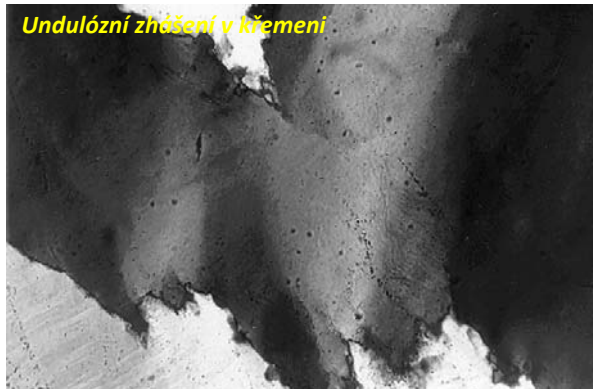
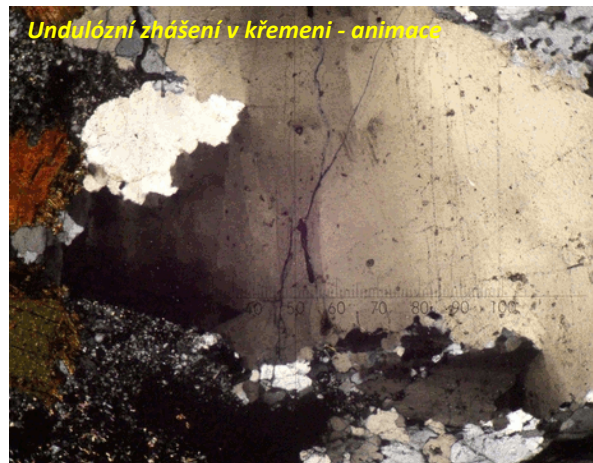
TEM fotografie dislokační smyčky v olivínu mezi dvěma inkluzemi

Animace Frank-Readova zdroje z Wikipedie

Dislokační skluz

Charakteristické mikrostruktury

- undulózní (= nerovnoměrné) zhášení ve zkřížených polarizátorech (*undulose extinction*)
- deformační lamely (= d. pásy, místa koncentrace dislokací; *deformation bands, d. lamellae*)
- velká hustota dislokací



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

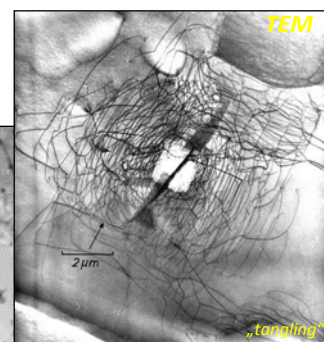
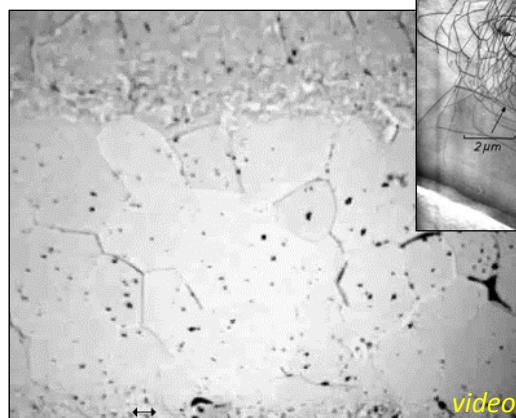
[Video-undulose](#)

7

Dislokace

Deformační zpevnění jako důsledek interakce dislokací

- postupný dislokační skluz probíhající současně na několika kluzných systémech zvyšuje dislokační hustotu, vede k proplétání dislokací (*tangling*), které brání jejich volnému pohybu v kluzné rovině
- dochází k deformačnímu zpevnění (*strain hardening*) a další aplikované napětí může vést až ke křehké deformaci



- takové chování je typické při relativně nízkoteplotní deformaci. V metalurgii se tomu říká „tváření za studena“ (*cold working*) a využívá se ho ke zvýšení tvrdosti kovových výrobků.

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

8

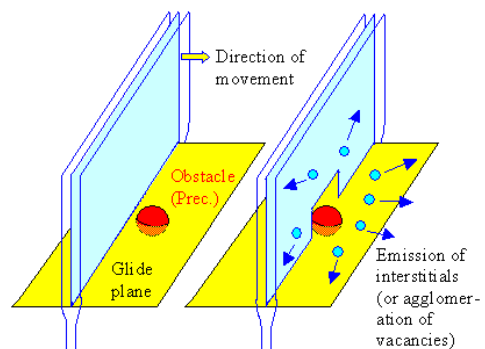
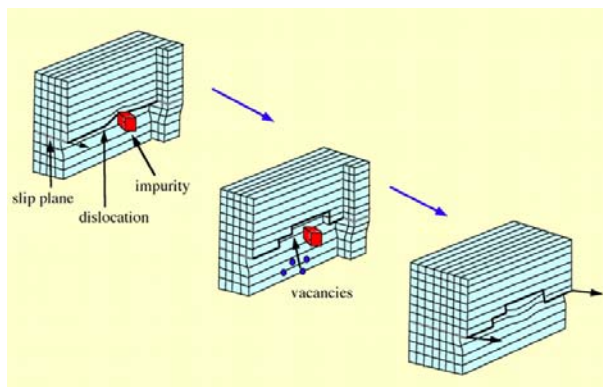
Dislokační tok

Jak uvolnit dislokace: šplh dislokací, zotavení a rekrytalizace

- Za nízkých teplot tedy dislokační skluz mění strukturu krystalu způsobem, který brání v dalším pokračování skluzu.
- Za vyšších teplot se aktivují mechanismy, které umožňují volnější pohyb dislokací a snižují jejich hustotu:
 - **Šplh dislokací**
 - **Zotavení** (je umožněno především šplhem)
 - **Dynamická rekrytalizace** (může přímo souviset se zotavením)
- Efektivní součinností skluzu a těchto mechanismů umožňuje pohyb dislokací velké deformace bez deformačního zpevnění – **dislokační tok** (V metalurgii období „tváření za tepla“, *hot working*)
- Zotavení a rekrytalizace mají charakteristické mikrostrukturní projevy a můžeme je tak poměrně snadno identifikovat ve výbrusech hornin

Šplh dislokací

- **šplh dislokací** (*dislocation climb*) – pohyb dislokací napříč kluznými rovinami
- Je umožněn difúzním pohybem bodových defektů
- Rychlost šplhu (rychlost difúze bodových defektů) je silně přímo úměrná teplotě

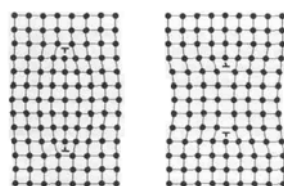


Obdobně to funguje při vzájemném vyhýbání se dislokací...

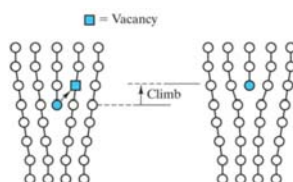
Zotavení

- **zotavení** (*recovery*) – soubor samovolně fungujících mechanismů snižování hustoty dislokací uvnitř krystalu (→ redukce volné energie dislokací)

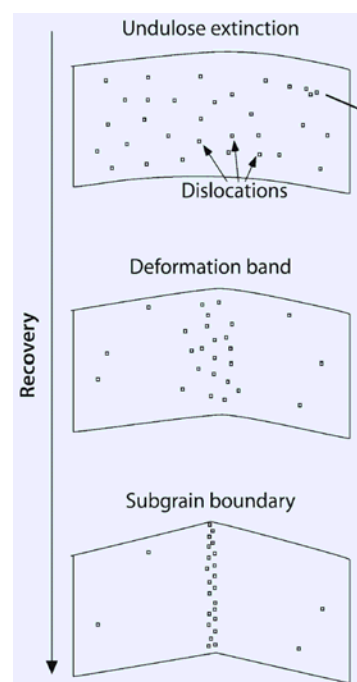
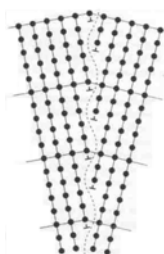
- anihilace dislokací s opačným znaménkem



- šplh dislokací



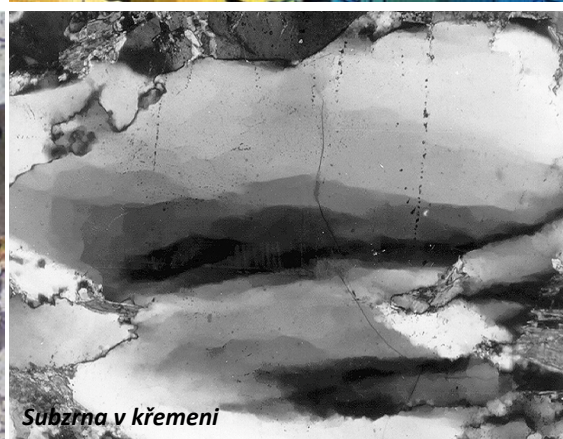
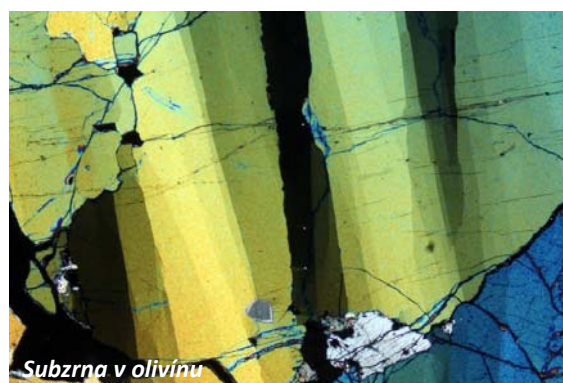
- organizace dislokací do nízkoenergetických uspořádání - dislokačních stěn → **subzrna**



Zotavení

Příklady subzrn („polygonizace“)

- **subzrna** – domény se vzájemnou misorientací několika stupňů ($<10^\circ$)
- hranice subzrn mají mnohem nižší energii než hranice zrn → jiné fyzikální vlastnosti



Dynamická rekrytalizace

- vznik nových zrn, který vede k minimalizaci energie spojené s existencí mnoha defektů a/nebo s velkou hustotou hranic zrn (malou velikostí zrn)

Staré deformované zrno s vysokou dislokační hustotou
→ nové zrno s nízkou dislokační hustotou.

- Principiálně 2 typy rekrytalizace:
 - Rekrytalizace **rotací subzrn** (*subgrain rotation, SGR*)
 - rekrytalizace **migrací hranic zrn** (*grain boundary migration, GBM*)

V režimu GBM ještě vyčleňován typ se specifickou mikrostruktúrou:

- **grain boundary bulging** („vyboulování“ hranic zrn)

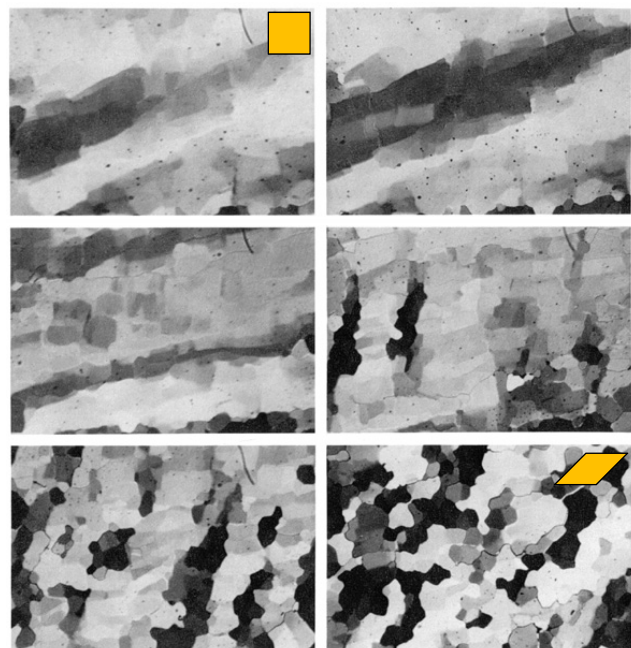
Dynamická rekrytalizace

Rotace subzrn

- rotační rekrytalizace (SGR) – rotace subzrn přidáváním dalších dislokací do hranic subzrn, přímé pokračování vzniku dislokačních stěn při zotavení

→ nové hranice zrn

- různé konvence pro definici hranice zrn, obvykle min. misorientace mřížky 5-10°
- charakteristický znak rotační rekrytalizace: postupné zvětšování misorientace původní zrno → subzrno → nové rekrytalované zrno



Experimentálně deformovaný NaNO₃. Skupiny malých zrn s krystalografickou orientací blízkou původním větším zrnům, přechody do subzrn. ($\max \gamma=1$).

Dynamická rekrystalizace

Migrace hranic zrn

- migrační rekrystalizace (GBM) - migrace hranic zrn na značné vzdálenosti difúzí částic mezi sousedními zrny (pohyb atomů na velmi krátké vzdálenosti)
- konzumace zrn s vysokou dislokační hustotou jinými zrny (zvětšení vnitřní volné energie spojené s hranicí zrn na úkor snížení vnitřní volné energie dislokací)



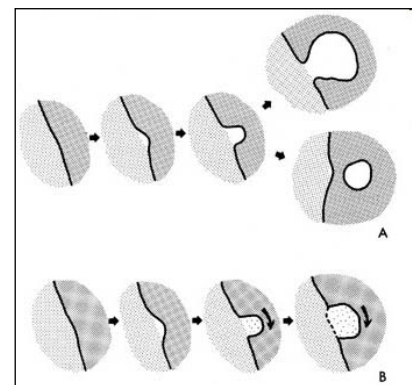
Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+IV, Špaček)

15

Dynamická rekrystalizace

Grain boundary bulging

- vyklenutí hranic zrn s malou vlnovou délkou
- typický pro nižší teploty/vyšší napětí



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

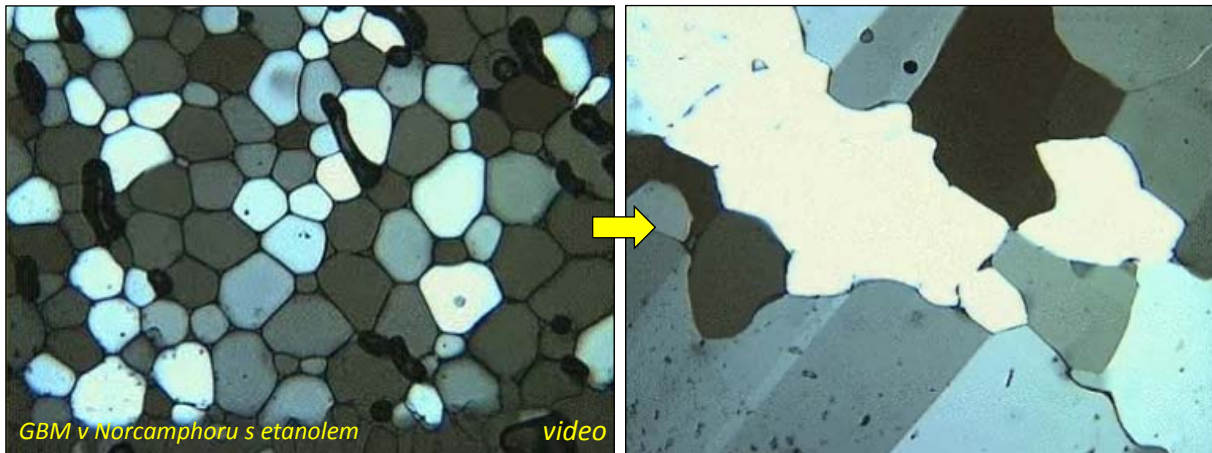
[Video-dynamic OCP](#)

16

Dynamická rekrytalizace

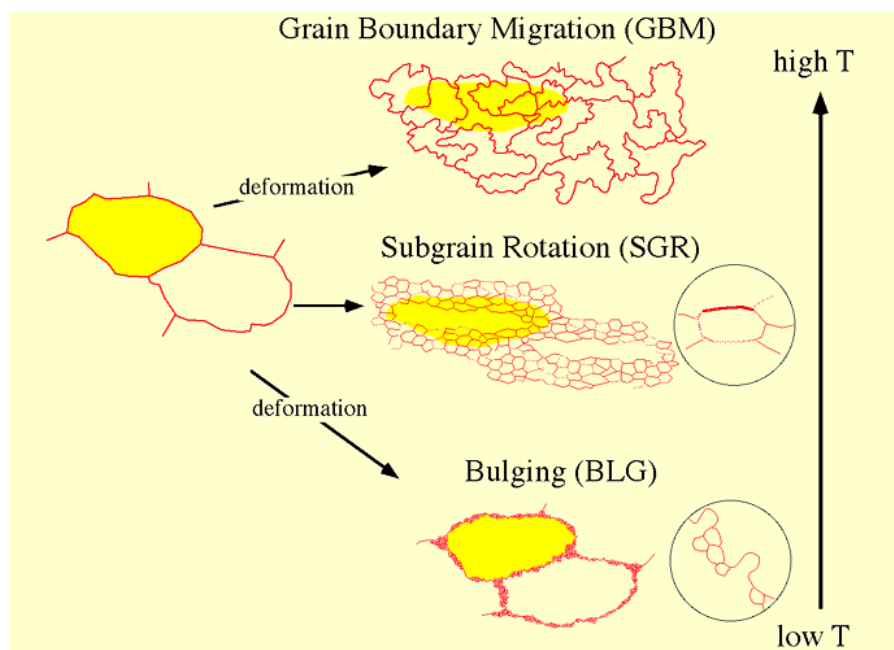
Vysokoteplotní migrace hranic zrn

- při vyšších teplotách výrazná migrace hranic zrn na velké vzdálenosti
- nerovné až složitě lalokovité (*lobate*) hranice zrn



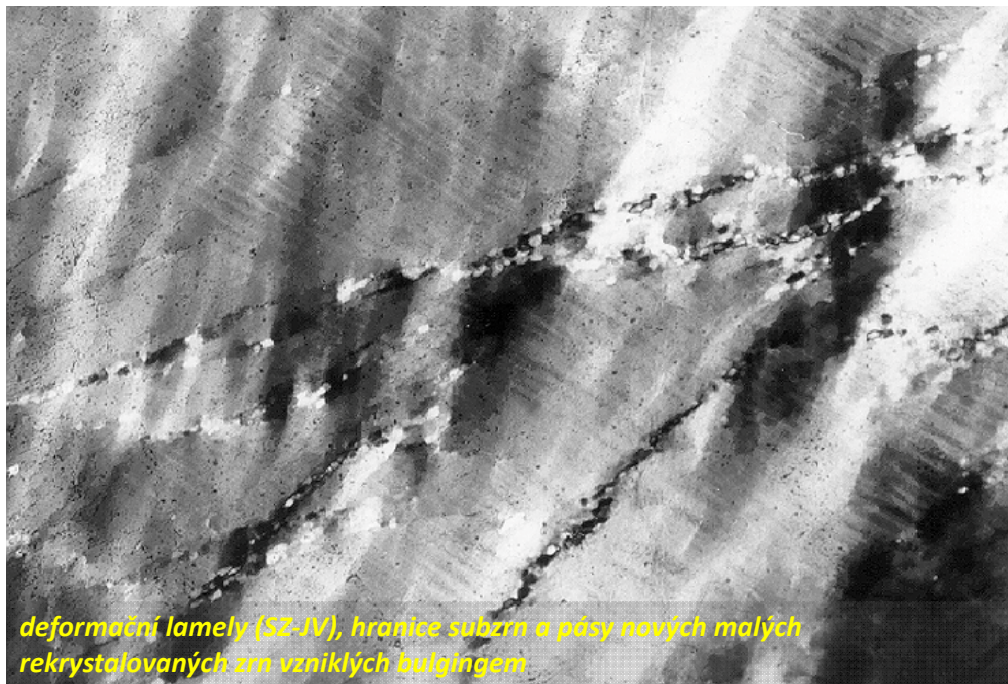
Dynamická rekrytalizace

Teplotní závislost režimu rekrytalizace v křemenu



Dynamická rekrytalizace v křemenu

Bulging

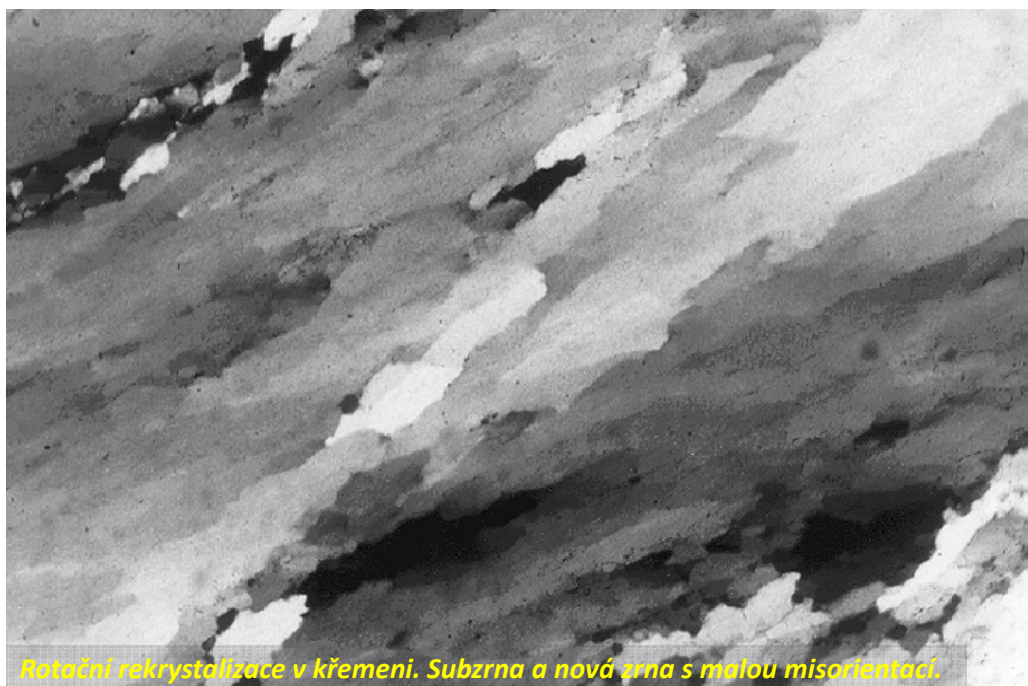


Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+IV, Špaček)

19

Dynamická rekrytalizace v křemenu

Rotace subzrn



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

20

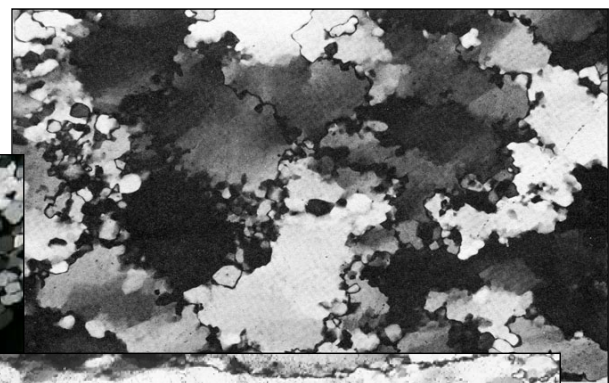
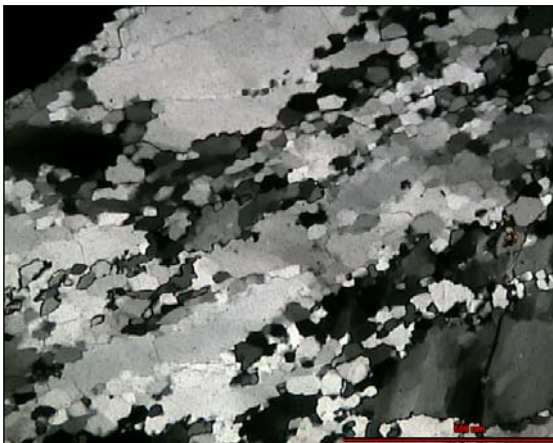
Dynamická rekrytalizace v křemenu

Vysokoteplotní rekrytalizace migrací hranic zrn



Dynamická rekrytalizace v křemenu

Běžná kombinace rotační a migrační rekrytalizace

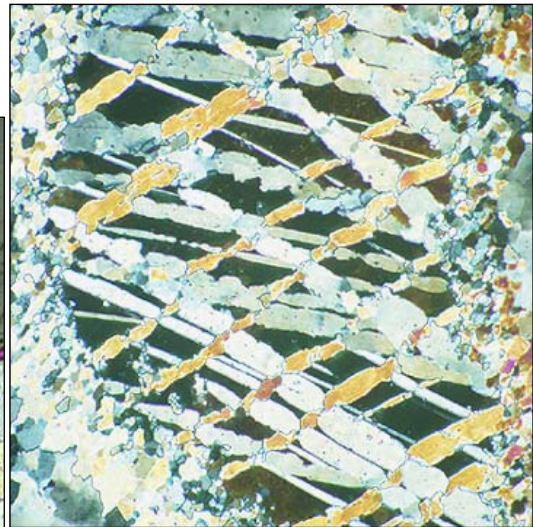
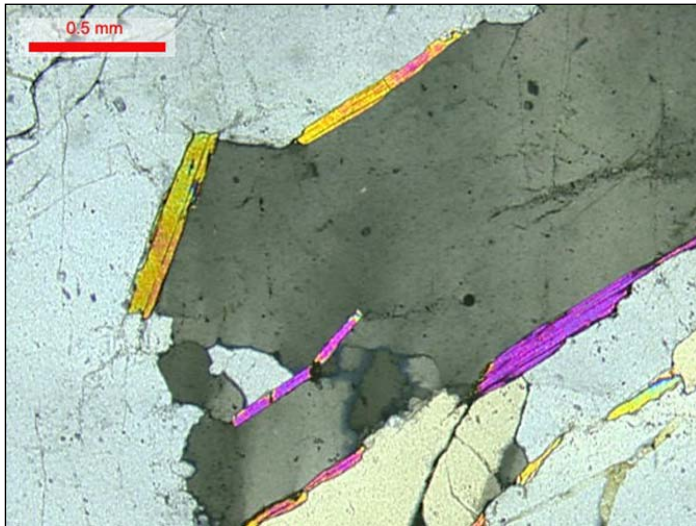


[Video-křemen](#)

Dynamická rekrytalizace

Další příklady

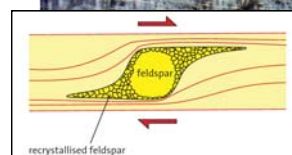
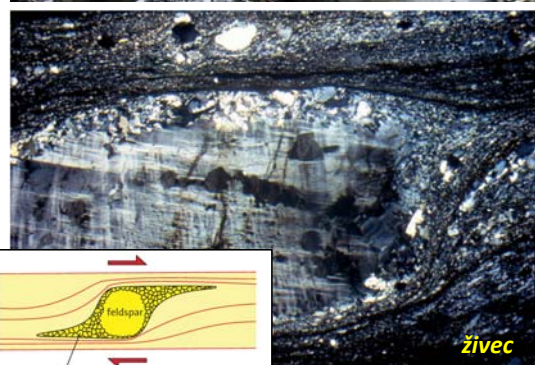
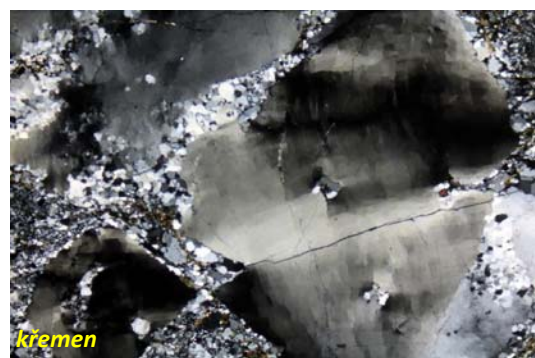
přítomnost jiné minerální fáze lokálně blokuje migraci hranic zrn (*pinning*)



migrační rekrytalizace dvojčatných lamel v kalcitu

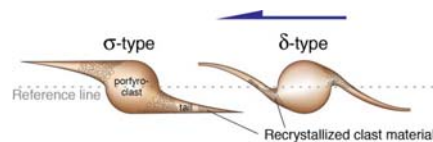
Dynamická rekrytalizace a vznik porfyroklastů

- Při nižších teplotách a/nebo vyšším diferenciálním napětí dochází k přednostní rekrytalizaci na malá zrna na okrajích větších zrn → porfyroklasty s pláštěm rekrytalovaných zrn (*mantled porphyroclasts, core-and-mantle structures*)
- Agregát menších rekrytalovaných zrn se deformuje snáze než porfyroklast (*grain-size sensitive deformation*) → pokračující střižná deformace horniny vede k roztažení rekrytalovaných domén do foliace („křídla“ lemovaných porfyroklastů, *wings*)
- Podobná struktura, ale jiný mechanismus než krystalizace z roztoku v tlakových stínech!

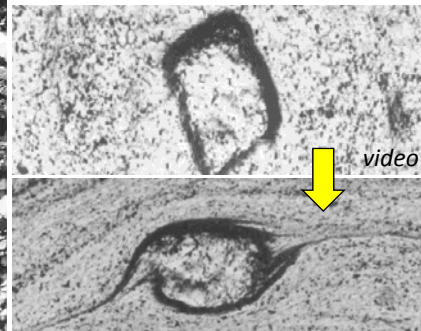


Porfyroklasty a asymetrické lemy

- asymetrické struktury okolo porfyroklastů jsou dobrým indikátorem kinematiky stříhu (viz R. Melichar)



Porfyroklast K-živce s pláštěm rekrytalovaných zrn v matrix křemene



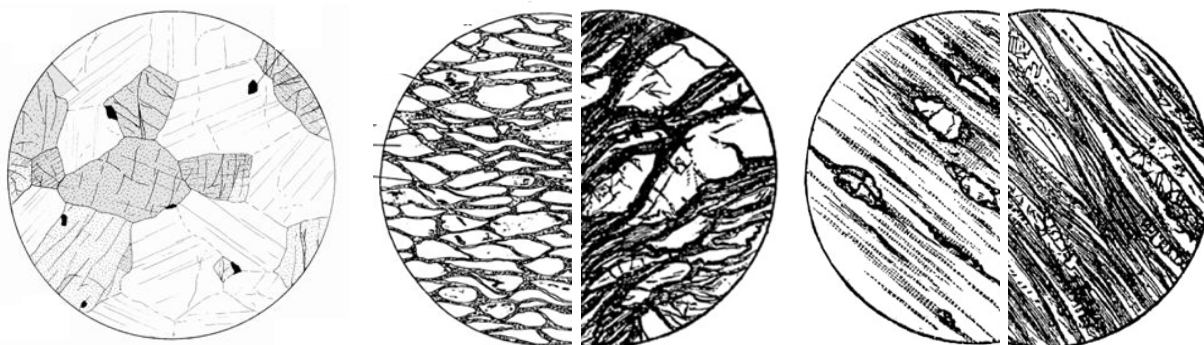
↑ Laboratorní deformace agregátu s porfyroklastem (kafr v oktachlorpropanu)

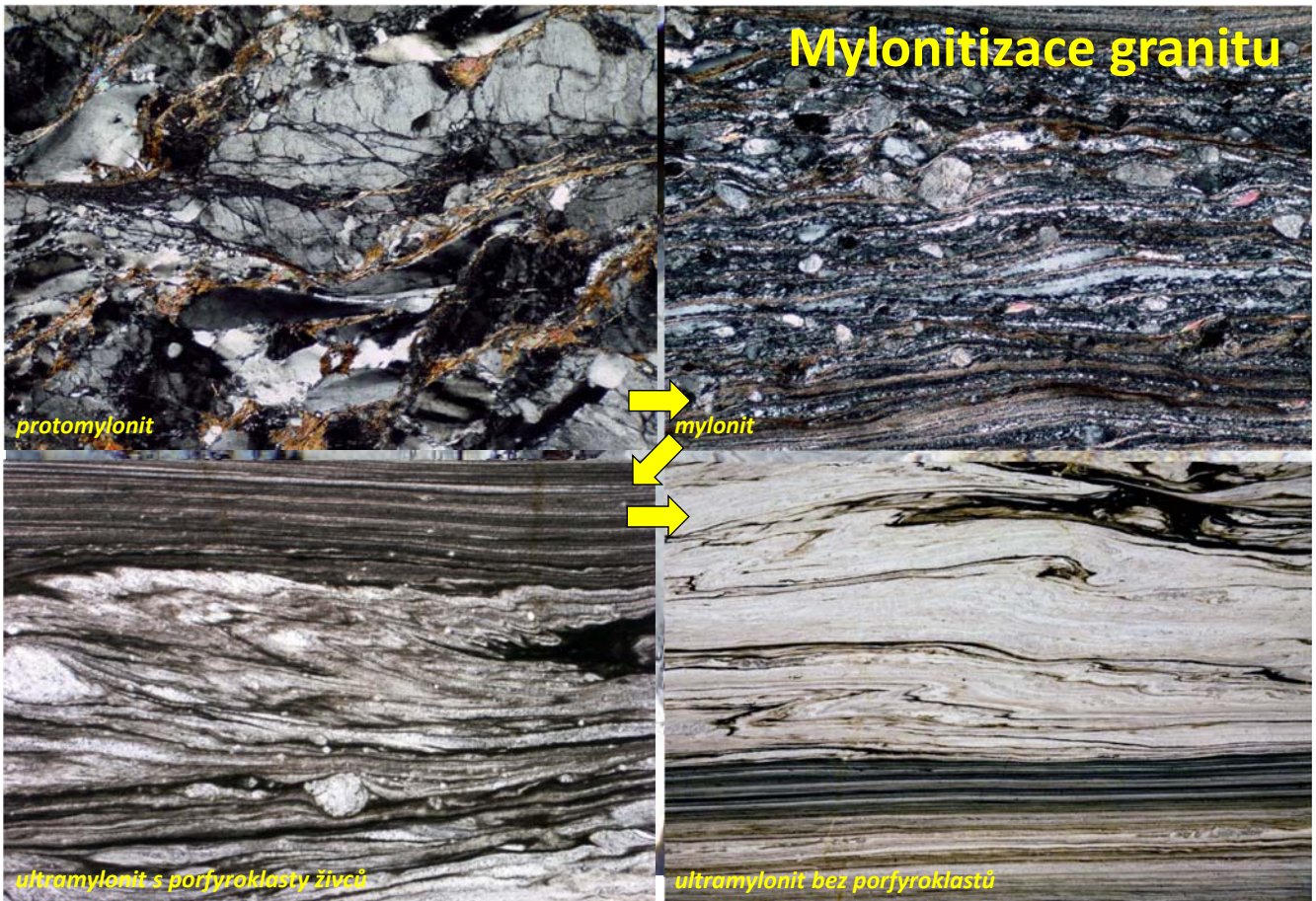
Vznik mylonitu (mylonitizace)

- Postupnou rekrytalizací a přibýváním podílu malých rekrytalovaných zrn vzniká mylonit a hornina získává páskovaný vzhled – jednotlivé pásy v malém měřítku reprezentují původní zrna (skupiny zrn)

Mylonit – hornina vzniklá výraznou duktilní střížnou deformací s podstatnou rolí dynamické rekrytalizace, spojenou s redukcí velikosti zrn oproti protolitu.

pův. hornina → protomylonit → mylonit a ultramylonit





Mylonitizace granitu

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

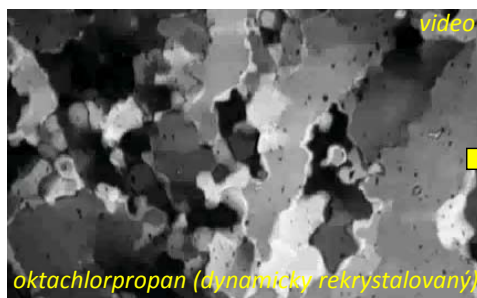
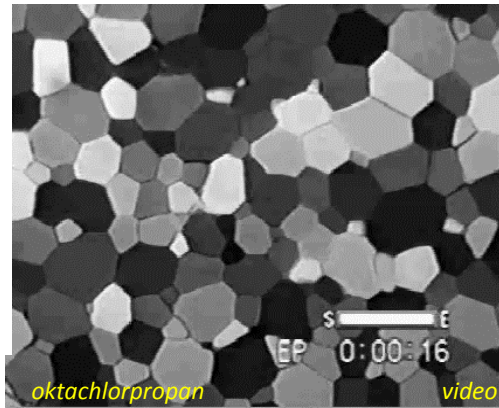
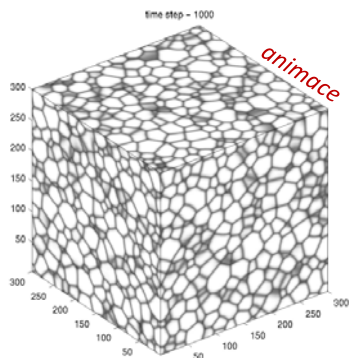
27

Statické zotavení a rekrytalizace

- i po odeznění vnějšího napětí na horninu vážou dislokace a hranice zrn vnitřní volnou energii, která je samovolně redukována, pokud fungují mechanismy, které to umožňují – obdobně jako u dynamického zotavení a rekrytalizace (tedy závislost na teplotě)
- **statické zotavení** (zcela obdobné dynamickému) a **statická rekrytalizace** – růst zrn a napřimování hranic zrn → odstraňování zrn s vysokou dislokační hustotou a redukce hranic zrn (V metalurgii tyto procesy probíhají při zahřátí kovu na vysokou teplotu nad 30% teploty tání – „žihání“, *annealing*.)
- struktura spěje ke stavu s velkými zrny bez vnitřní deformace, jejichž hranice jsou rovné a setkávají se ve 120° trojných bodech – **polygonální struktura**
Tohoto ideálního stavu nemusí být vždy dosaženo.

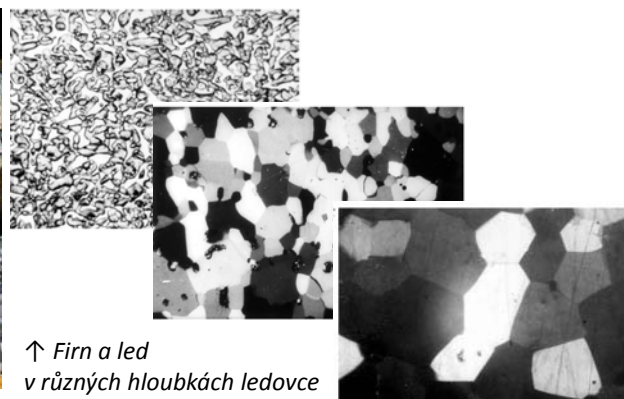
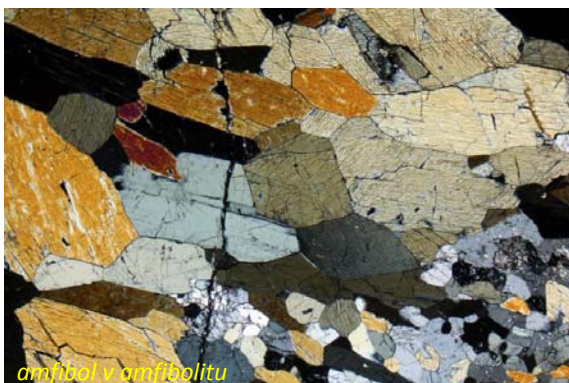
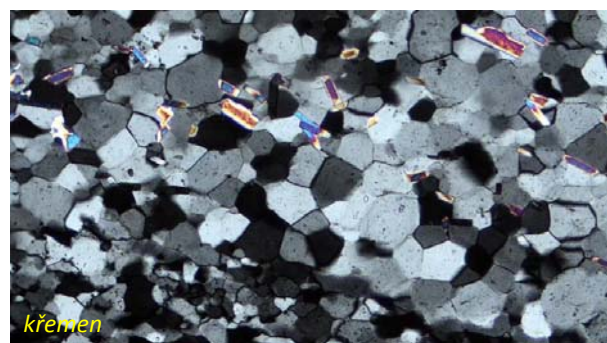
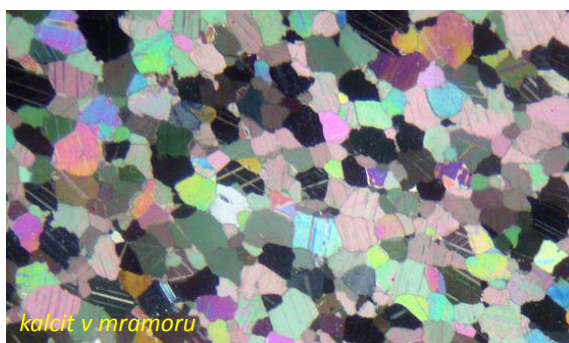
Statická rekrytalizace

Příklady #1: mat./fyz. model a laboratorní experiment



Statická rekrytalizace

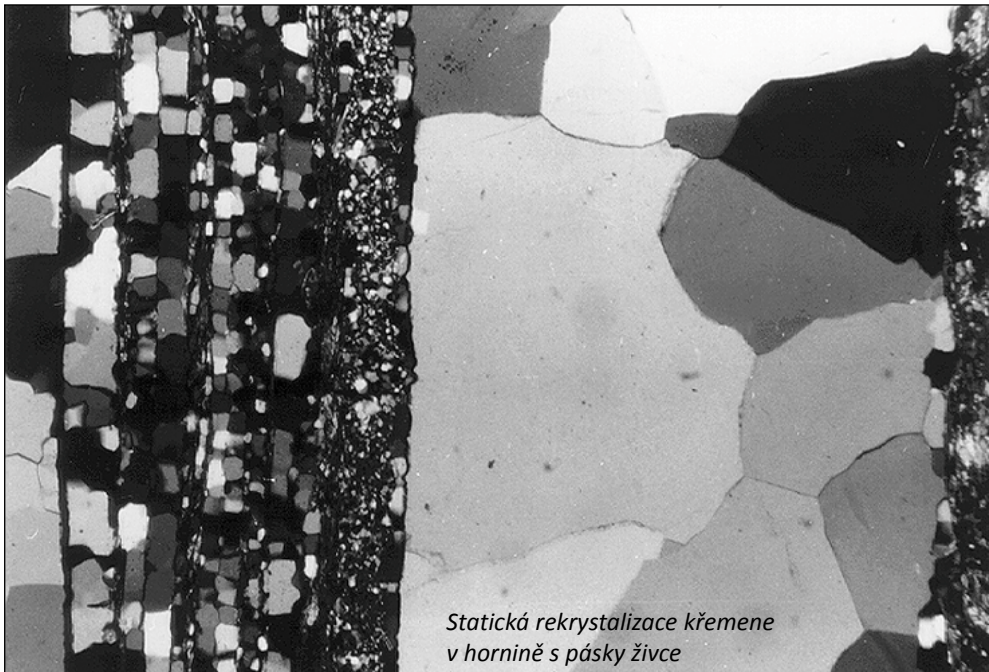
Příklady #2: horniny



Statická rekrytalizace

Omezení růstu jinými fázemi

- přítomnost jiné minerální fáze může blokovat migraci hranic zrn (*pinning*)



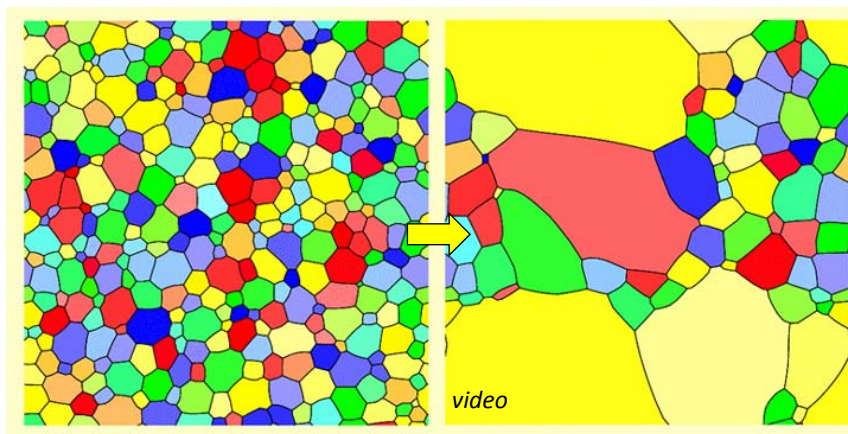
Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+IV, Špaček)

31

Statická rekrytalizace

Abnormální růst zrn

- energie hranice zrna je závislá na jeho orientaci vzhledem k mřížce krystalu – v různých minerálech různým způsobem
- z tohoto důvodu někdy může dojít při statické rekrytalizaci k nestejnomyšernému růstu, *abnormal (exaggerated) grain growth*.



v horninách to ale není úplně běžné...

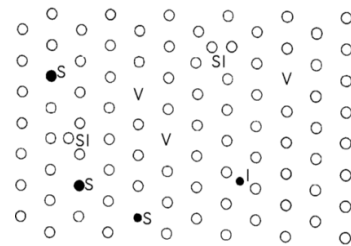
Mikrotektonik

32

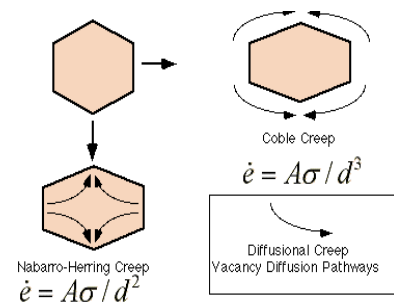
Bodové defekty a difúzní tok

- bodové defekty mřížky: vakance, intersticiály, substituenty
- vysoká teplota umožňuje difúzní pohyb vakancí (viz výše) a pokud je blízká teplotě tání, tato difúze může představovat dominantní mechanismus deformace => **difúzní tok**
- Pohyb částic se odehrává uvnitř krystalu (Nabarro-Herring creep) nebo podél hranic zrn (Coble creep) – rychlost deformace je tak závislá na velikosti zrn (*grain size sensitive*)
- V jemnozrnných agregátech může kombinací difúzních mechanismů a skluzu po hranicích zrn výrazně poklesnout pevnost a materiál získá vlastnosti Newtonovské tekutiny – **superplasticita** (→ velké deformace bez podstatné změny mikrostruktury)

Point Defects

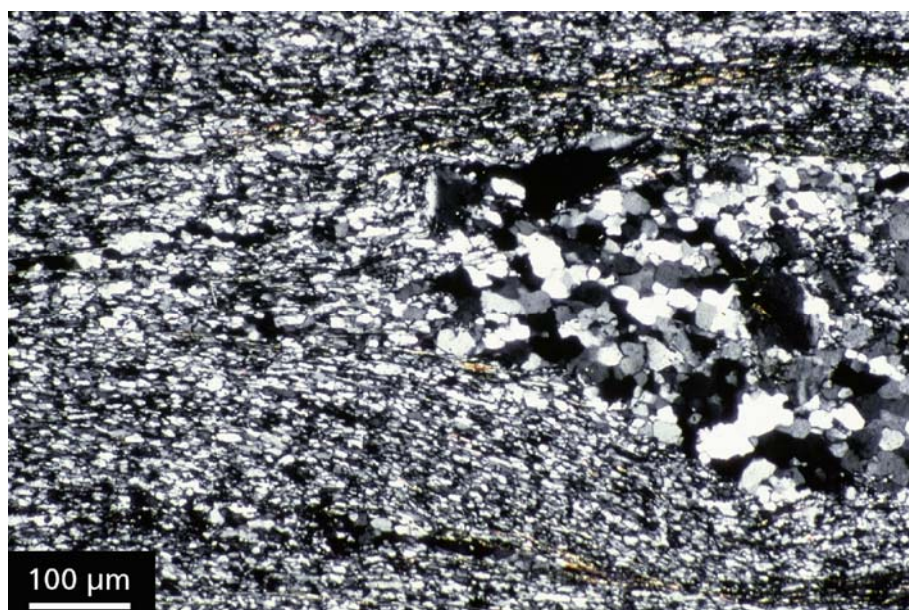


S = substitutional impurities
 V = vacancies
 I = interstitial impurities
 SI = self-interstitials

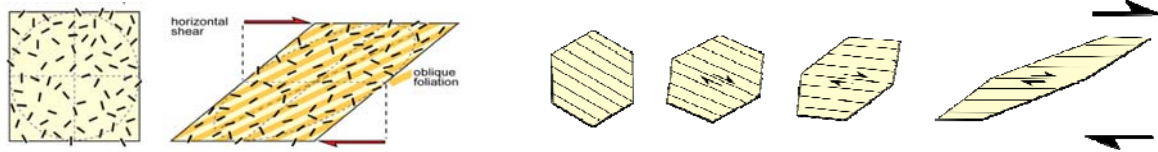


Difúzní tok

- identifikace podle mikrostruktury je problematická. Superplasticky deformovaný agregát křemene by vypadal zhruba takhle:



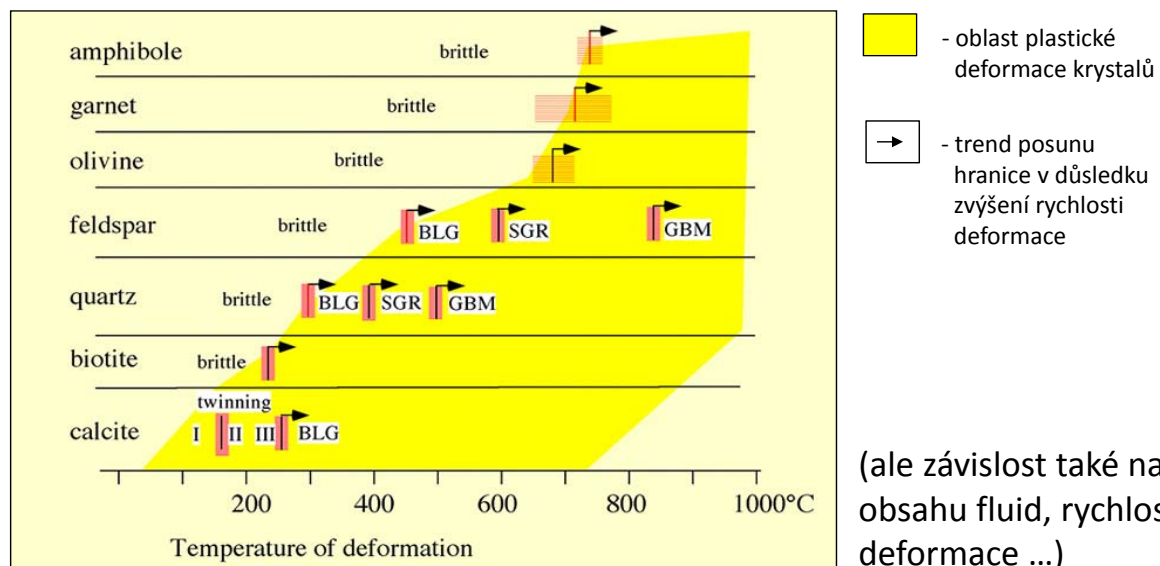
Vznik tvarové a mřížkové přednostní orientace Při různých mechanismech deformace



	TVAROVÁ	MŘÍŽKOVÁ
- pasivní rotace anizometrických zrn	+	+/-
- křehká deformace	-/+	-
- dislokační kluz	+	+
- dvojčatění	+	+
- difúzní tok	+	-
- SGR rekrytalizace	-/+	-
- GBM rekrytalizace	-	-
- superplastický tok	-	-

Plastická deformace vs. mineralogie a teplota Mikrostruktura jako termometr

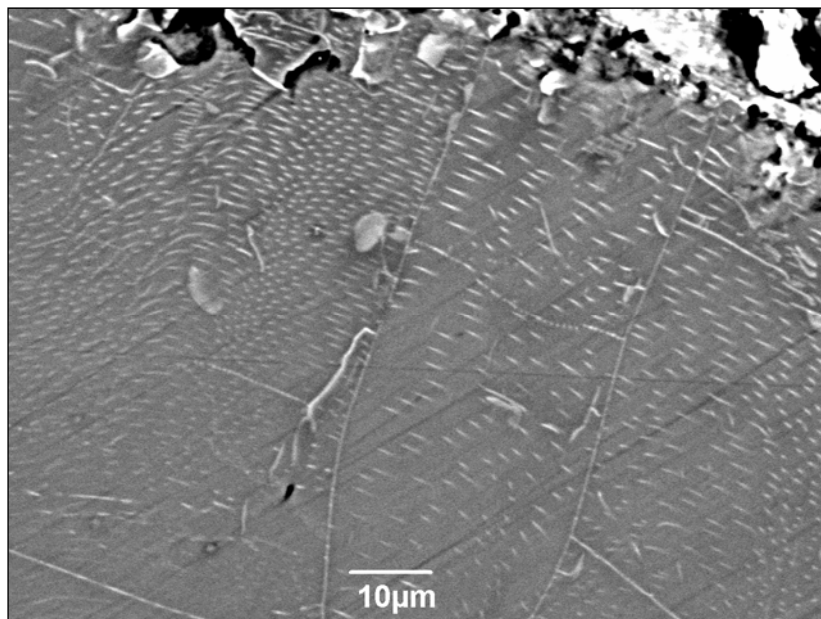
- teplotní závislost nástupu plastické deformace (příp. různých mechanismů rekrytalizace) v různých minerálech může být využita pro odhad teploty deformace.



Hustota dislokací vs. napětí

Hustota dislokací jako piezometr

- vyšší diferenciální napětí → vyšší hustota dislokací



Příklad kvantifikace:

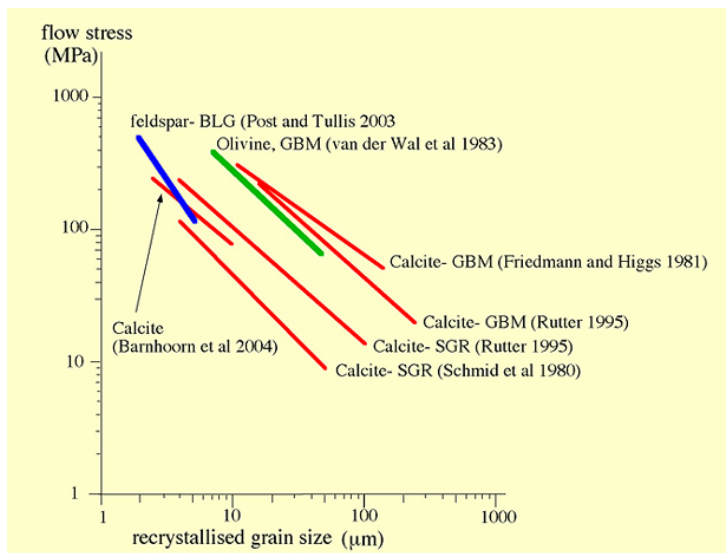
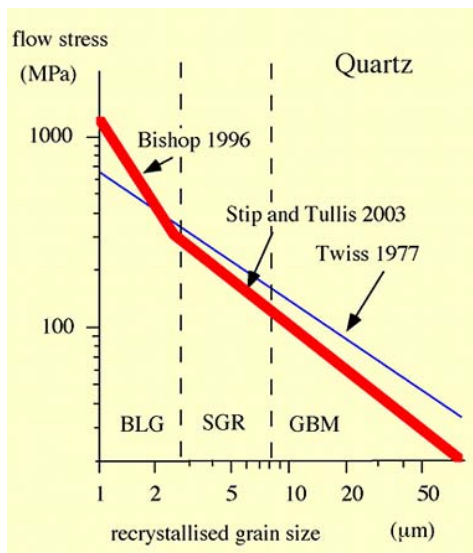
ρ – disl. hustota
 α, m – konstanty
 b – Burgersův vektor
 σ – napětí
 μ – střiž. modul

$$\rho = \alpha b^{-2} \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^m$$

Rekrytalizace vs. napětí

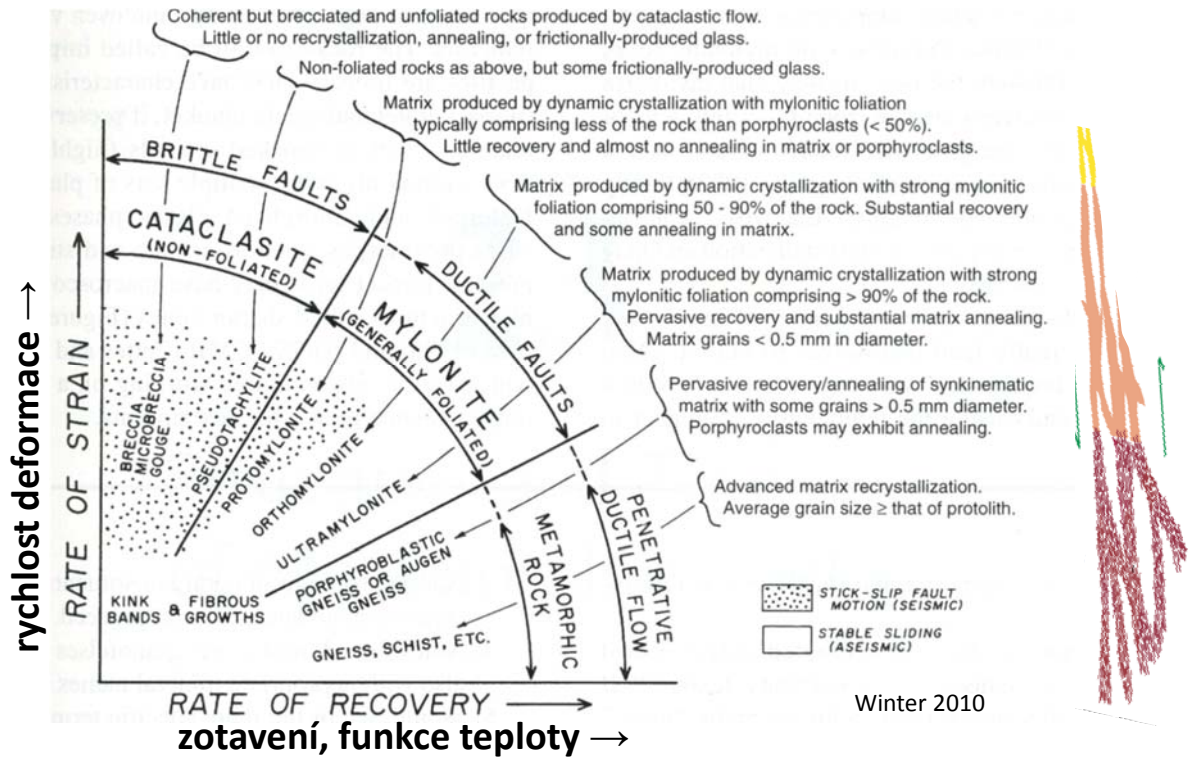
Velikost rekrytalovaných zrn jako piezometr

- diferenciální napětí → dislokační hustota → velikost dynamicky rekrytalovaných zrn



Deformace v různých podmínkách

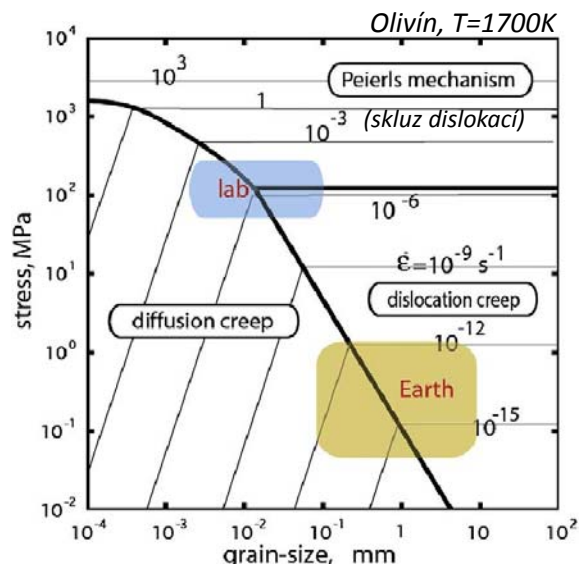
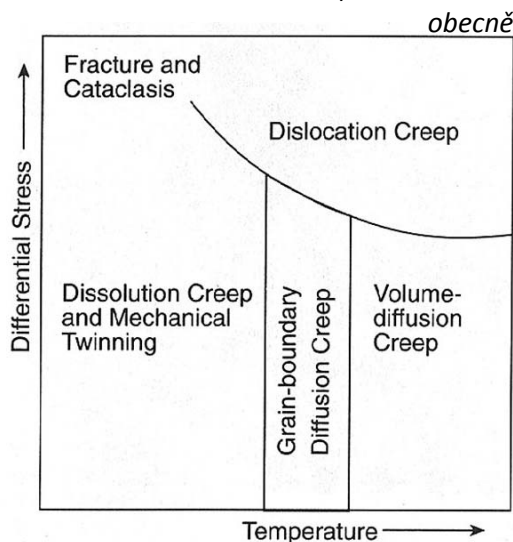
Variace mechanismů a související petrografie podle toho, jestli při deformaci teplota umožnila dostatečně účinné zotavení, tak jak bylo vyžadováno rychlostí deformace.



Proč vlastně záleží na mechanismu deformace?

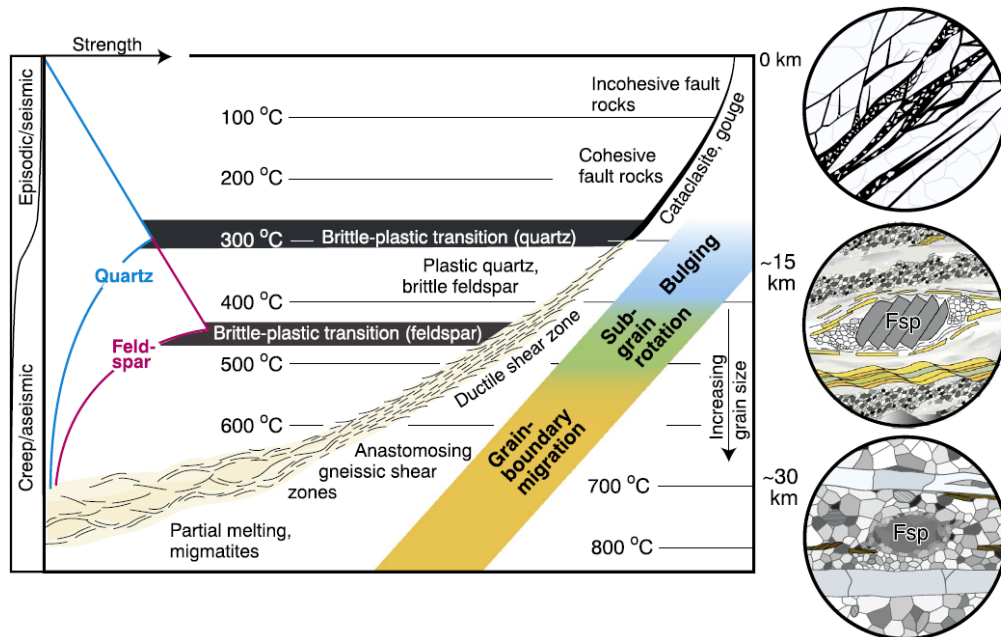
- mechanismus deformace → pevnost (max. diferenciální napětí při dané rychlosti deformace; obor **reologie** – pevnost duktilně deformovaných materiálů v různých podmínkách)

Mapy deformačních mechanismů: různé mechanismy a tedy různá reologie v různých podmínkách (vztahy teplota – napětí - rychlost deformace – velikost zrna – deformační mechanismus)



Proč vlastně záleží na mechanismu deformace?

- různá pevnost hornin v různých úrovních litosféry → Co všechno litosféra vydrží? Kde se bude přednostně deformovat? Kde vznikají zemětřesení?...



Dále s R. Melicharem: kinematické indikátory

