



MIKROTEKTONIKA

(DEFORMACE V MIKROMĚŘÍTKU)

Mechanismy deformace

1. část: svrchní kůra

Petr Špaček, ÚFZ

2023

0.25 mm

Mechanismy deformace v různých podmínkách

- deformace se často uskutečňuje kombinací více mechanismů; dominantní, tedy nejrychlejší, je ten energeticky nejméně náročný

RYCHLOST DEFORMAČNÍHO PROCESU = ŘÍDÍCÍ SÍLA × KINETIKA PROCESU

- faktory ovlivňující kinetiku deformačních procesů a tedy dominantní mechanismus deformace (a tedy mikrostavbu):

- **mineralogie, obsah a tlak vody, velikost a tvar zrn/pórovitost, LPO** (vnitřní faktory)

- **teplota, omezující tlak, rychlost deformace** (vnější faktory)

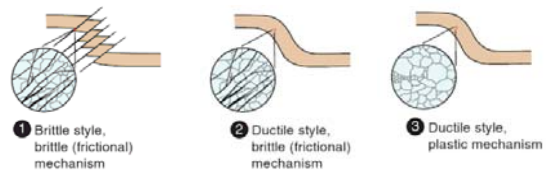
- za různých podmínek dominují různé deformační mechanismy; v různých minerálech mohou za stejných podmínek fungovat různé deformační mechanismy

- znalost mechanismů deformace je klíčová pro posouzení pevnosti materiálu v daných podmínkách a pro rekonstrukci těchto podmínek z mikrostavby

Pojmy: křehký, plastický, duktilní

- *křehká, duktilní a plastická* deformace – pozor na významy!

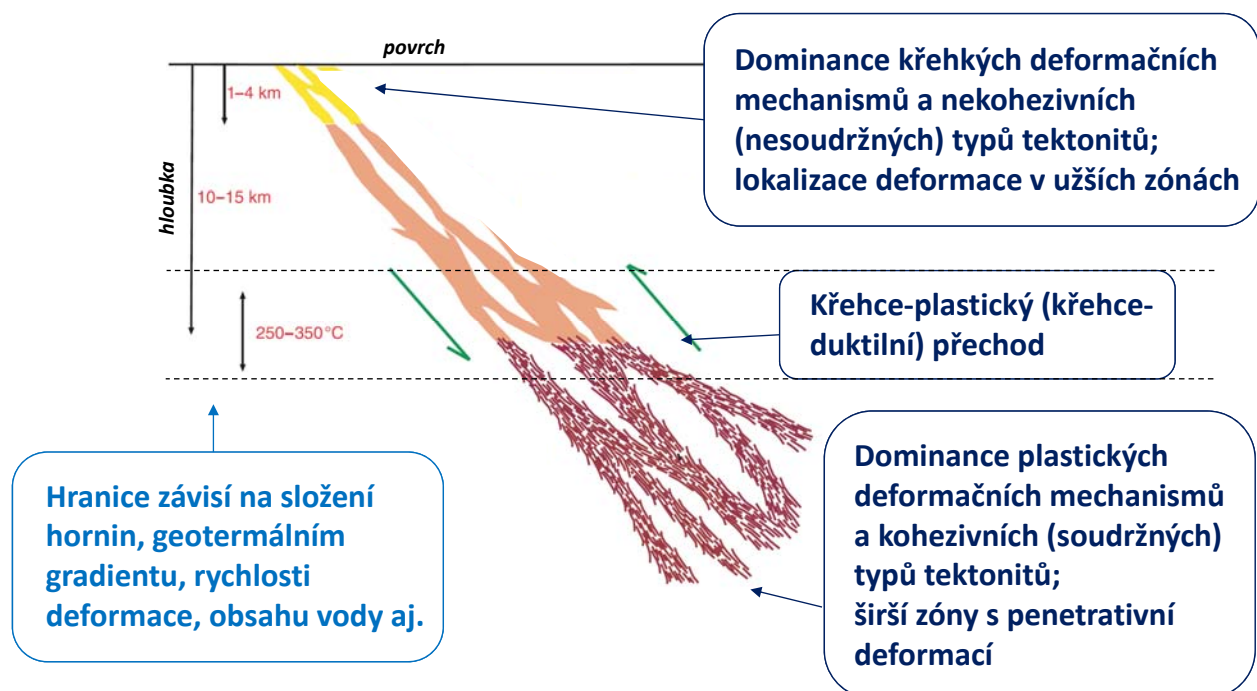
Makro- vs. mikroskopický pohled!



makroskopický strukturní styl (křehký→duktilní) vs. mikromechanismus deformace (křehký→plastický)

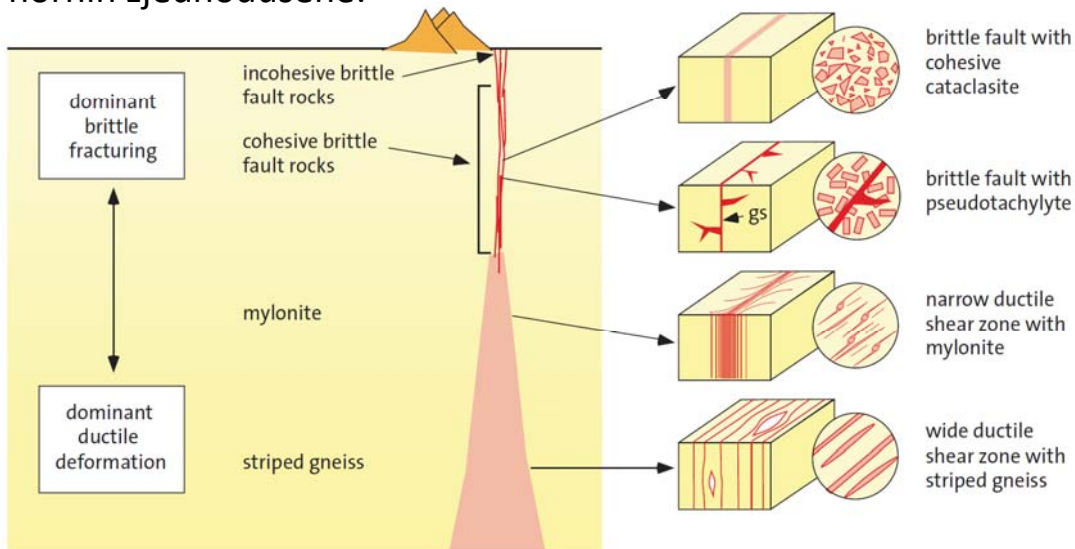
- **křehká** (*brittle*) deformace – deformace, jejímž hlavním mechanismem je křehké lámání a hlavním fyz. jevem určujícím pevnost je tření mezi částicemi (*frictional deformation*), z něž vyplývá závislost na tlaku
 - dělení na křehkou vs. **duktilní** (*ductile*) deformaci používáme hlavně při popisu v makro(mega-)skopickém měřítku – při duktilní deformaci zachovává hornina makroskopickou kontinuitu, nevznikají makroskopicky viditelné fraktury
 - dělení na křehkou vs. **plastickou** (*plastic*) deformaci používáme při popisu deformačních mechanismů v (sub-)mikroskopickém měřítku – pojem odkazuje na plasticitu krystalů, která nesouvisí s třením
- ... ale mnoho geologů si s tím nedělá starosti a poslední 2 termíny volně zaměňují...

Deformace v různých úrovních kůry (zlomy a střižné zóny)



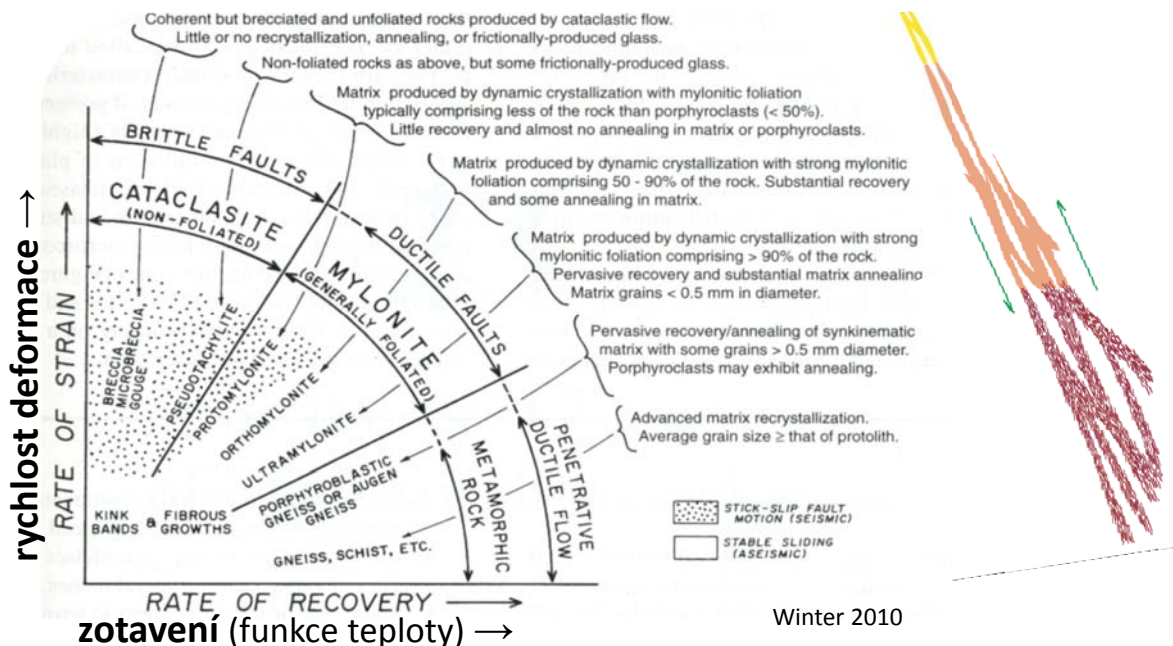
Deformace v různých úrovních kůry (zlomy a střižné zóny)

Procesy a typy deformovaných hornin zjednodušeně:



Snahy o zavedení systému deformovaných hornin

Příklad: Deformační procesy a deformované horniny jako funkce rychlosti deformace a zotavení



Zatím se tím netrapte, k tomuto schématu se ještě vrátíme...

Náš přehled bude založen na mechanismech deformace a odpovídajících mikrostavbách...

Začneme od těch, které převládají
v nízkoteplotních/nízkotlakých podmínkách mělké kůry...

a půjdeme k těm vysokoteplotnějším v hlubší kůře...

*Protože variace tlaku a teploty vedou k nejvýraznějším
variacím deformačních mechanismů.*

Základní mechanismy deformace a odpovídající tektonity

Deformační mechanismy	→	Odpovídající horniny
Víceméně volný pohyb částic (granulární tok) (velmi malý tlak)	→	Deformované nezpevněné sedimenty (velmi malé hloubky)
Drcení; Frikční tavení (rychlá deformace za nižší teploty)	→	Kataklazity; Pseudotachylity (zlomy v malých hloubkách <10-15km)
Tlakové rozpouštění a krystalizace z roztoku (kalcit a křemen v přítomnosti vody); Dvojčatění (kalcit a živec za nižších teplot a malých deformací)	→	Slabě a středně silně deformované horniny (většinou v malých hloubkách <10-15km)
Plastická deformace krystalů (Dislokační tok, Difúzní tok, Skluz na hranicích zrn) (všechny běžné minerály za vyšších teplot)	→	Mylonity, metamorfity (střížné zóny a orogény v hloubkách >10-15km)

1. Mělká úroveň:

Hloubky prvních metrů až 15 km

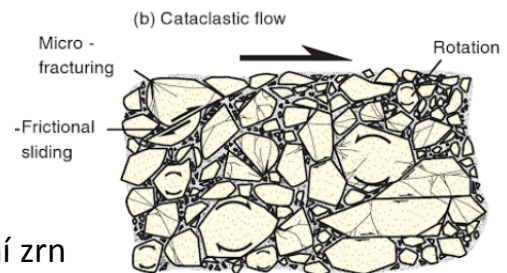
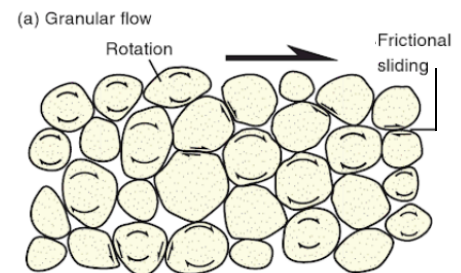
Nižší teploty, nízké a střední omezující tlaky

- fyzikální procesy aktivní zejména v relativně nízkoteplotních podmínkách deformace jsou zejména:
 - křehké lámání ((micro)fracturing), skluz + pasivní rotace (kataklaze)
 - tlakové rozpouštění a krystalizace z roztoku (solution transfer)
 - dvojčatění (twinning) a zalamování (kinking)
- tyto mechanismy mohou fungovat i za vysokých teplot (viz vliv podmínek deformace výše), obvykle to pak ale nejsou dominantní mechanismy

Granulární a kataklastický tok

Deformace je kontrolována třením a křehkou pevností částic. Z toho vyplývá závislost pevnosti na efektivním tlaku¹

- **granulární tok** (*granular flow, particulate flow*)
 - klouzání a rotace zrn
 - možné pouze za nízkých efektivních tlaků (probíhají objemové změny)
 - nesoudržné horniny (nezpevněné sedimenty, dislokační jíly)
- **kataklaze/kataklastický tok** (*cataclastic flow*)
 - progresivní křehké lámání, tedy zmenšování zrn
 - ostrohranná zrna, široké spektrum velikostí zrn
 - **kataklazity**: brekcie (kohezivní/nekohezivní), deformační pásy², dislokační jíly
 - typické pro zlomy a procesní zóny zlomů až po křehce-plastický přechod (i vyšší efektivní tlaky)

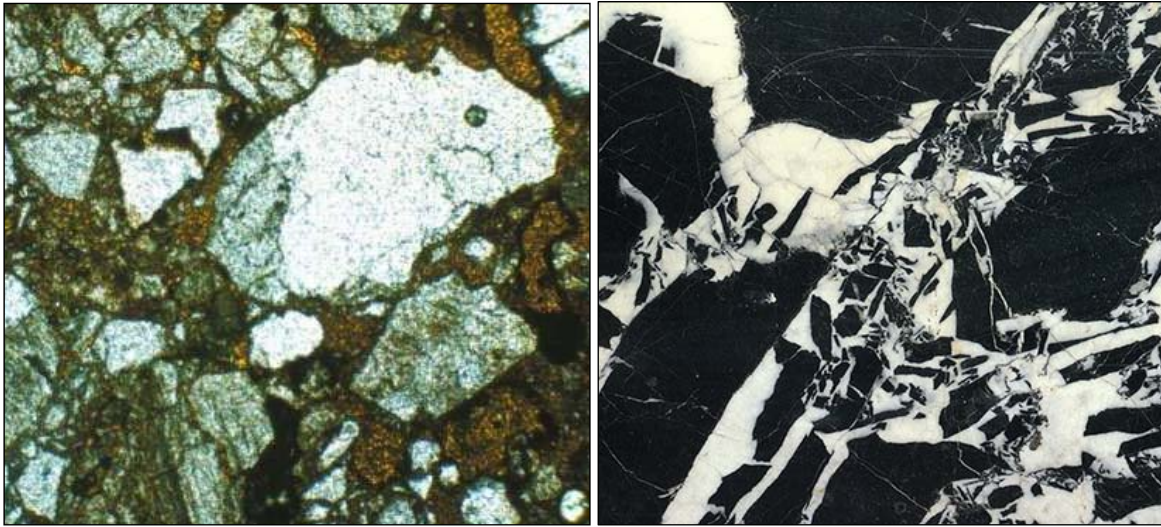


¹) všesměrný omezující tlak + tlak fluid

²) Stejný termín se používá pro spec. mikrostruktury v krystalech!

Kataklastický a granulární tok: zlomy

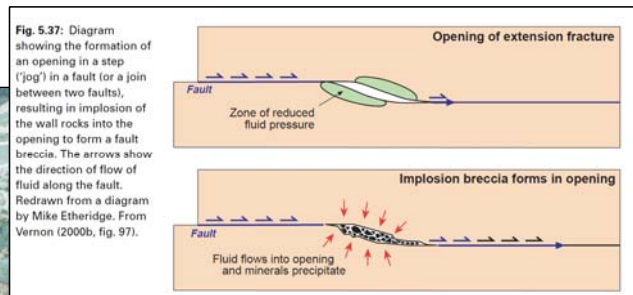
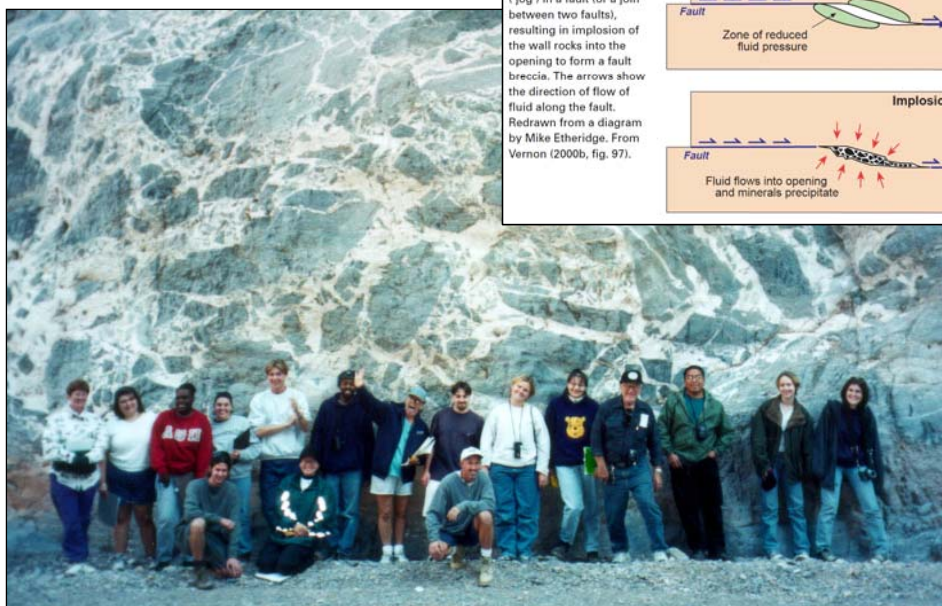
Brekcie



- ostrohranné úlomky různých velikostí, často spojené jemnozrnnou mezerní hmotou, maltovitá struktura (*mortar structure*)
- mezi deformačními fázemi může mezi úlomky probíhat krystalizace z roztoků → úlomky kalcitových/křemenných žil nebo finální cementace

Kataklastický a granulární tok: zlomy

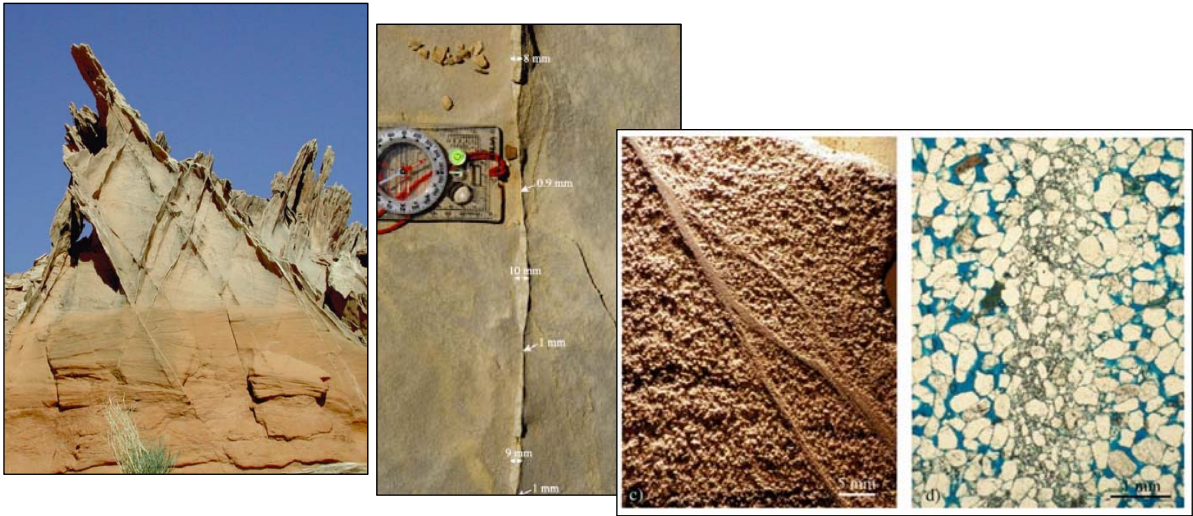
Brekcie



- obdobné struktury vznikají i v makroměřítku a mohou vznikat i netektonicky (říčení stěn jeskyní + cementace, impaktové brekcie)

Kataklastický a granulární tok: zlomy

Deformační pásy (*Deformation bands, Shear bands*)

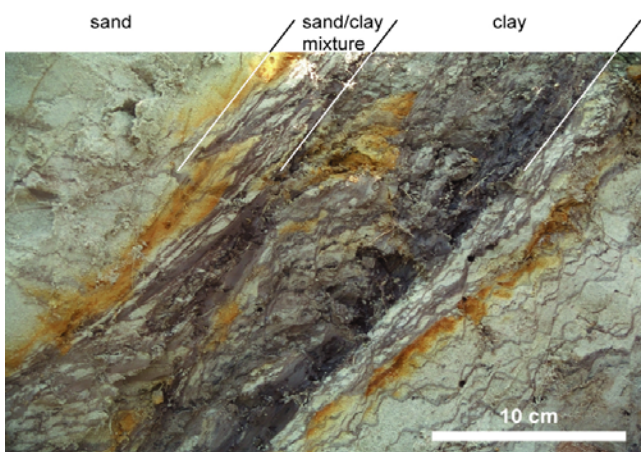


- šířka mm rozměrů, makroskopicky často skryté – zvýrazněné až erozí
- obvykle s kataklazí, někdy dodatečná cementace – snížení pórovitosti a propustnosti (potenciálně relevantní pro hydrogeologii a naftovou geologii, podobně jako větší zlomy)

Kataklastický a granulární tok: zlomy

Dislokační jííl (*Fault gouge [gawdz]*)

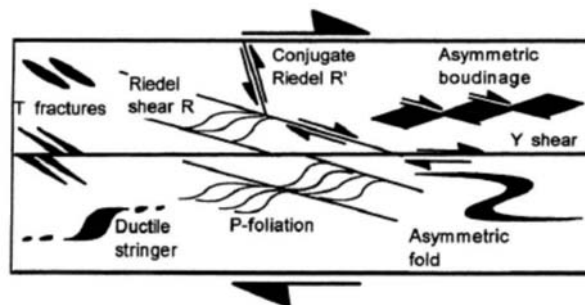
- obvyklá výplň jádra zlomu v mělkých úrovních
- vznik kombinací kataklaze a chemických reakcí v přítomnosti vody, dále deformován granulárním tokem



Kataklastický a granulární tok: zlomy

Ohlazy a rýhování na ploše zlomu atd.

(*slickensides/slickenlines, striation*)

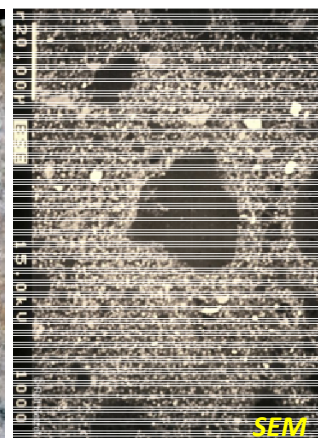
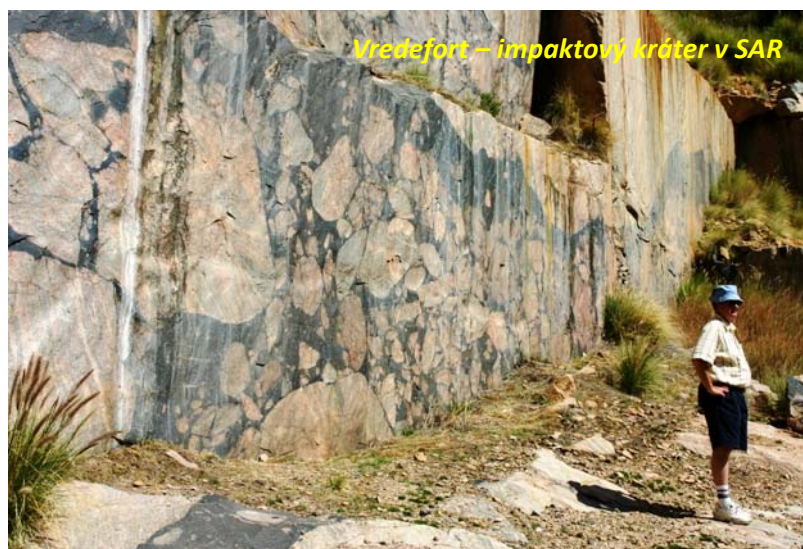


... a mnoho dalších mikro- i makrostruktur spojených se zlomy – viz blok R. Melichara

Frikční tavení pseudotachylit

- extrémní drcení a tavení při velmi rychlé deformaci na zlomech během zemětřesení (šíření ruptury 2-3km/s); při impaktu meteoritů; pravděpodobně i na odlučné ploše velkých sesuvů

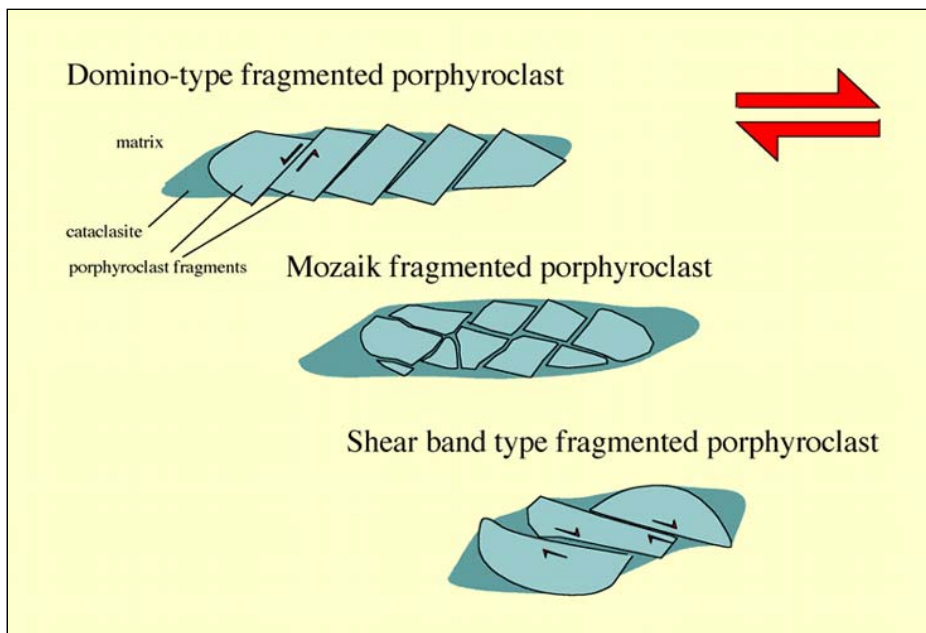
- pseudotachylit – vzhled bazaltového skla (tachylit = mafické vulkanické sklo), tvoří žíly různého tvaru



Kataklaze v mylonitech a metamorfitech

Fragmentace porfyroklastů, bookshelf struktury

- **porfyroklast** = větší zrno pevnějšího minerálu v silněji deformované matrix.
Může být deformováno křehce, třeba za vzniku takovýchto struktur:



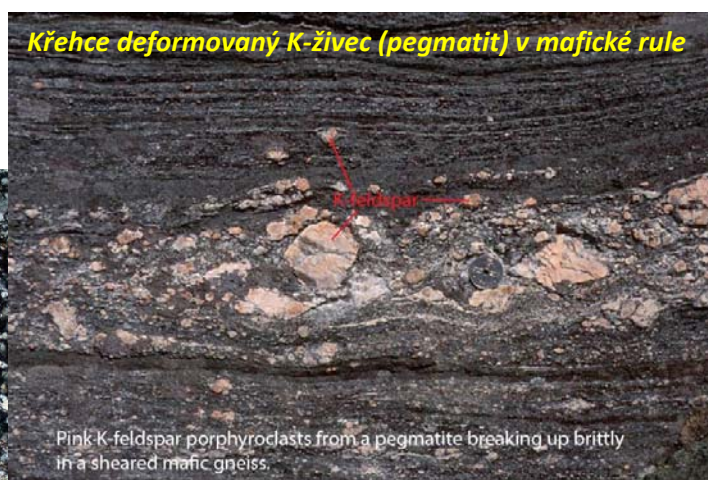
Kataklaze v mylonitech a metamorfitech

Fragmentace porfyroklastů, bookshelf struktury

- Křehké chování pevnějších minerálů (s vyšší teplotou aktivace plastických mechanismů) v plastičtější matrix



porfyroklast živce v mylonitické ruce



Křehce deformovaný K-živce (pegmatit) v mafické ruce

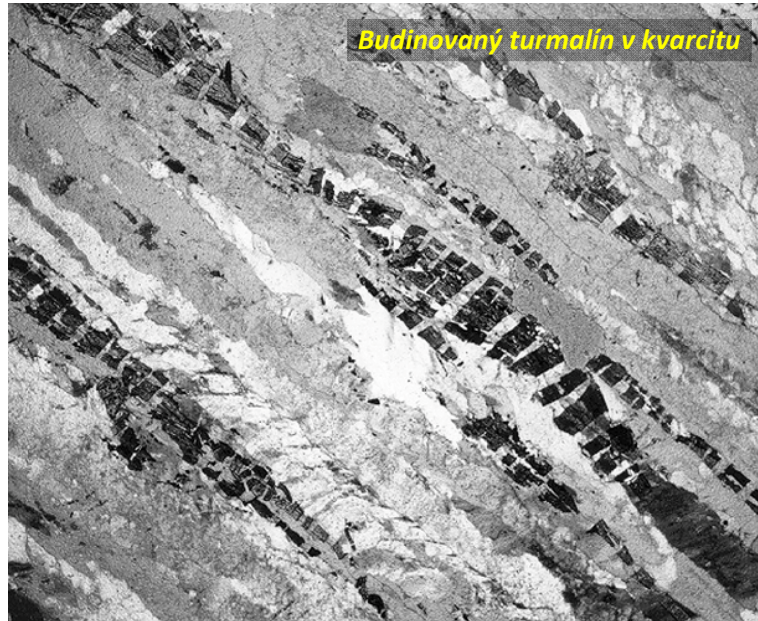
Pink K feldspar porphyroclasts from a pegmatite breaking up brittlely in a sheared mafic gneiss.

- obdoba lokálního kataklastického toku

Kataklaze v mylonitech a metamorfitech

Budiny

- Křehké chování tvrdších minerálů (s vyšší teplotou aktivace plastických mechanismů) v plastičtější matrix



Tlakové rozpouštění a krystalizace z roztoku

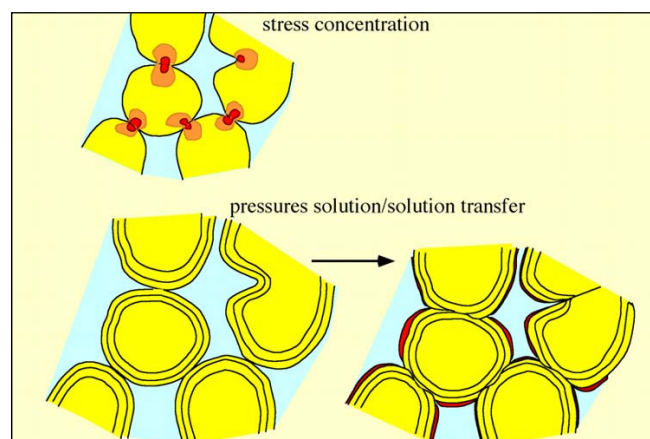
(*Pressure solution; Solution transfer*)

- tlakové rozpouštění:
nehomogenní napěťové pole
→ nerovnoměrné rozložení
krystalových poruch
→ gradient chemického potenciálu
→ lokální přednostní rozpouštění

- krystalizace z roztoku v místech dilatace (poblíž míst rozpouštění nebo kdekoli jinde, v závislosti na cirkulaci fluid)

→ mechanismus přenosu materiálu v roztoku (*solution-precipitation mechanism, solution transfer*), který může být velmi efektivním mechanismem deformace horniny (lokalizovaný i penetrativní – *solution creep*)

- týká se hlavně kalcitu a křemene



Tlakové rozpouštění

Alveolinový vápenec. Pronikání jedné schránky foraminifery (původně sférického tvaru) do druhé tlakovým rozpouštěním. Rozpouštění je lokální, tak jak jsou lokální oblasti vysokého napětí. V podstatě jde o specifický případ stylolity.



Tlakové rozpouštění

Stylolity

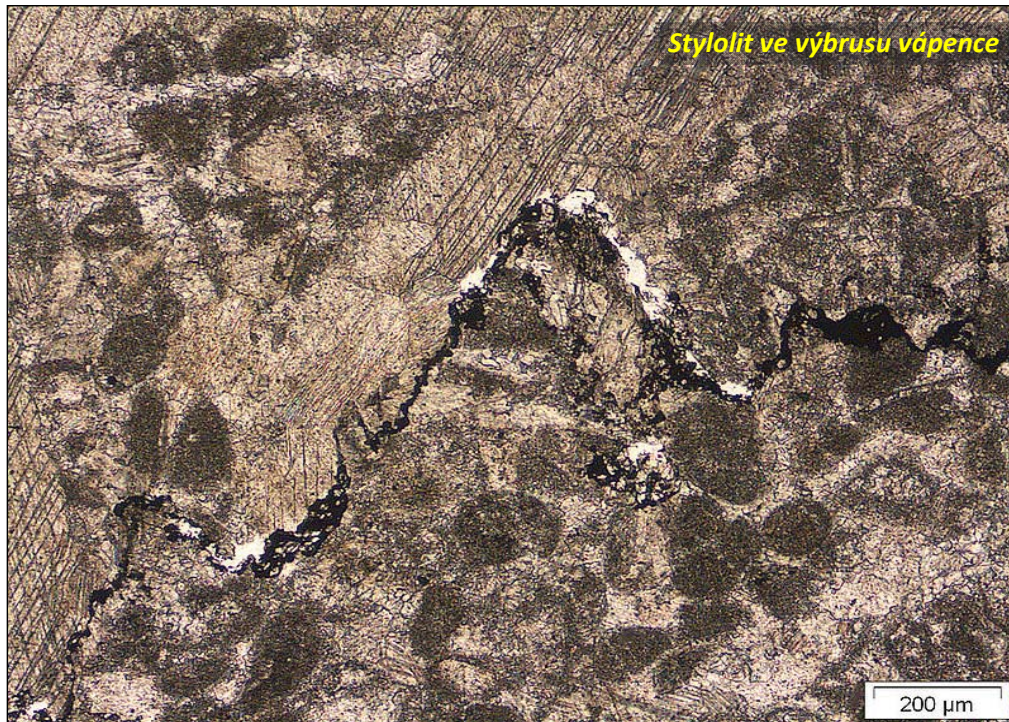
- **stylolity = tlakové švy** – plochy přednostního tlakového rozpouštění (zrychlený transport fluid po ploše)

Mohou být izolované, ale i penetrativní. Mohou sloužit jako kinematické indikátory, indikátory objemových změn.



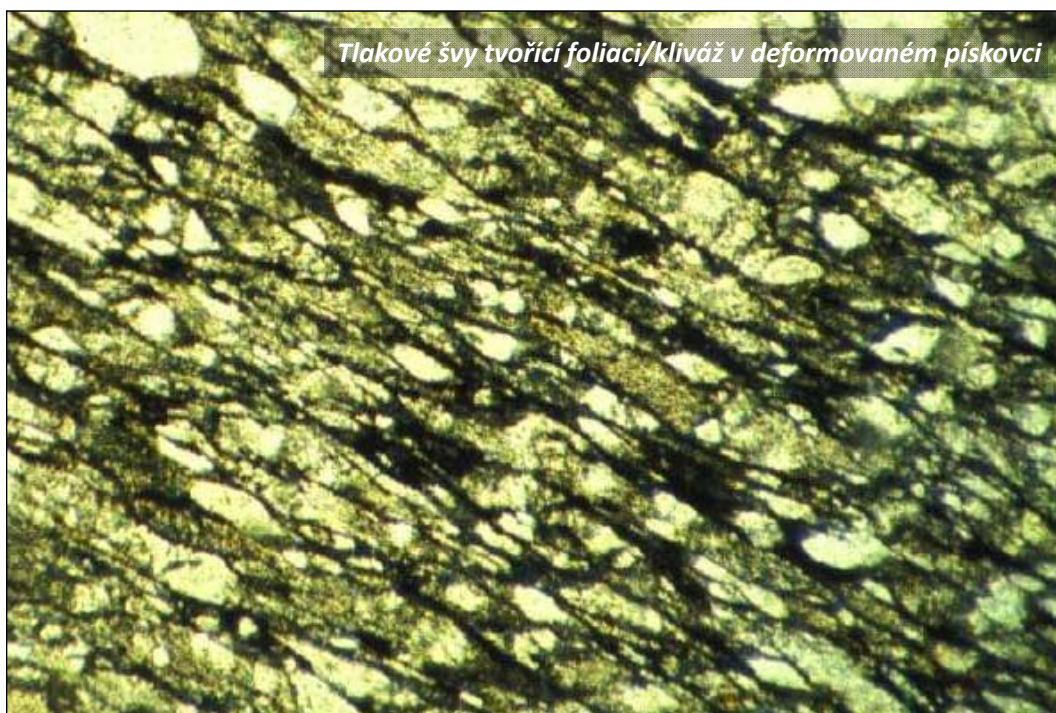
Tlakové rozpouštění

Stylolity



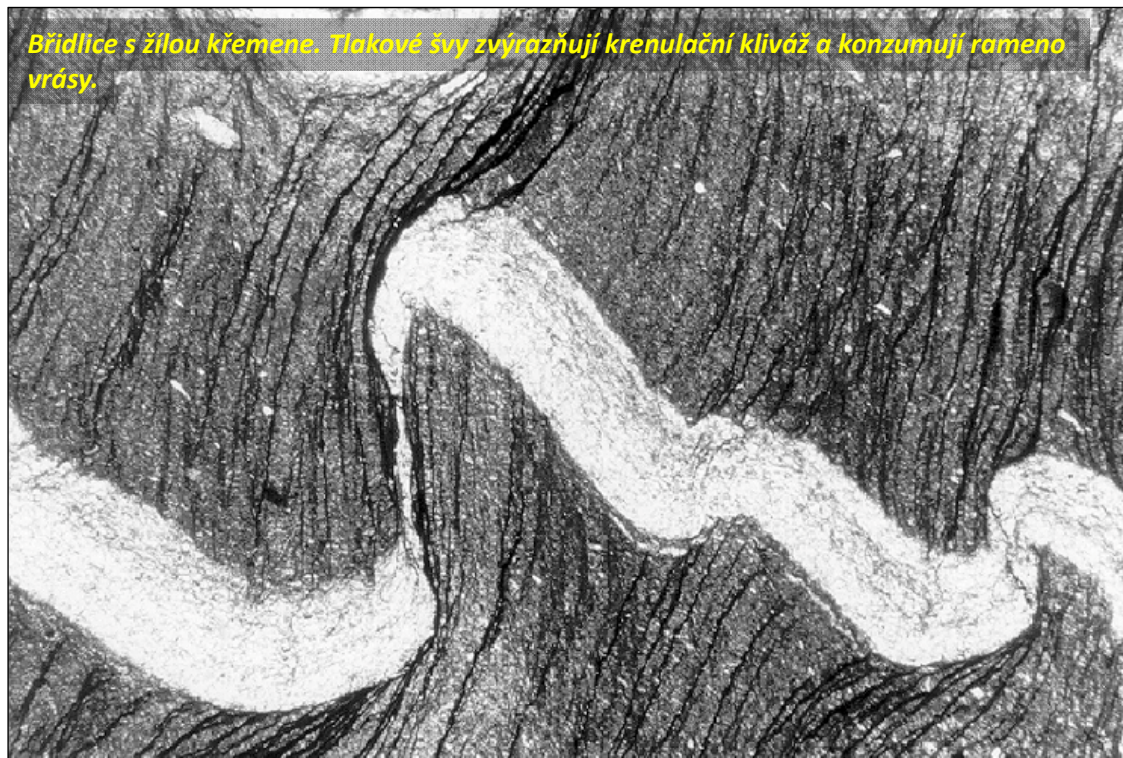
Tlakové rozpouštění

Stylolity a vznik foliace



Tlakové rozpouštění

Stylolity

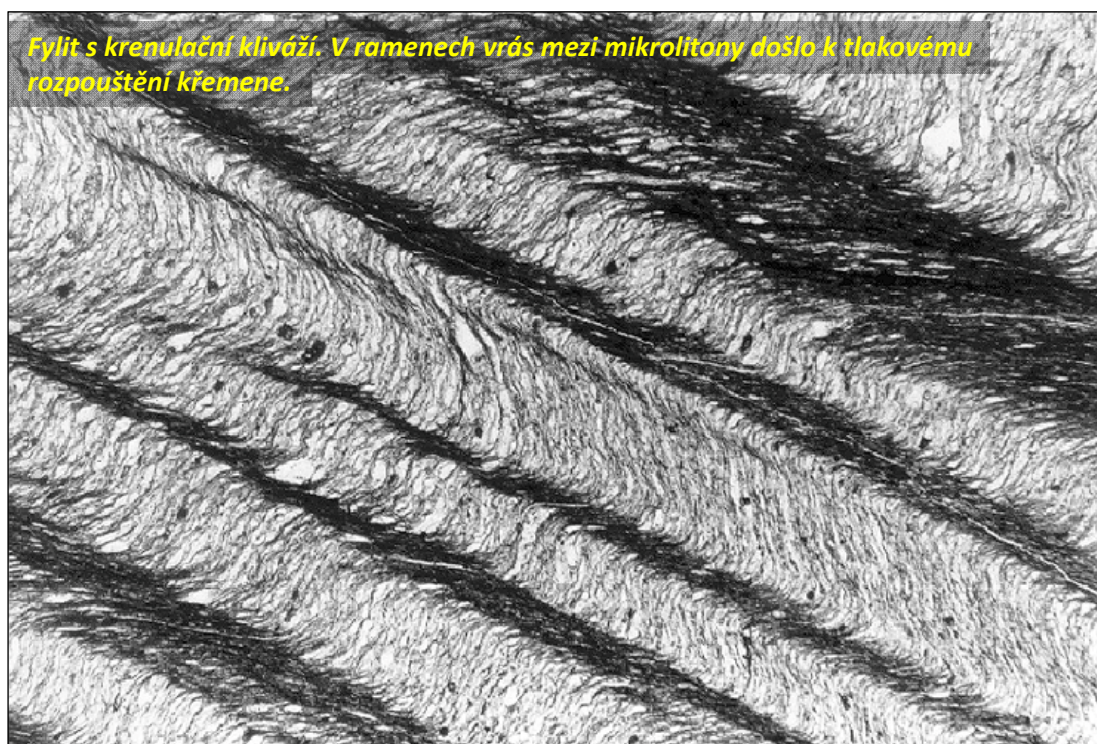


Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+VI, Špaček)

25

Tlakové rozpouštění

Role při vzniku krenulační kliváže?

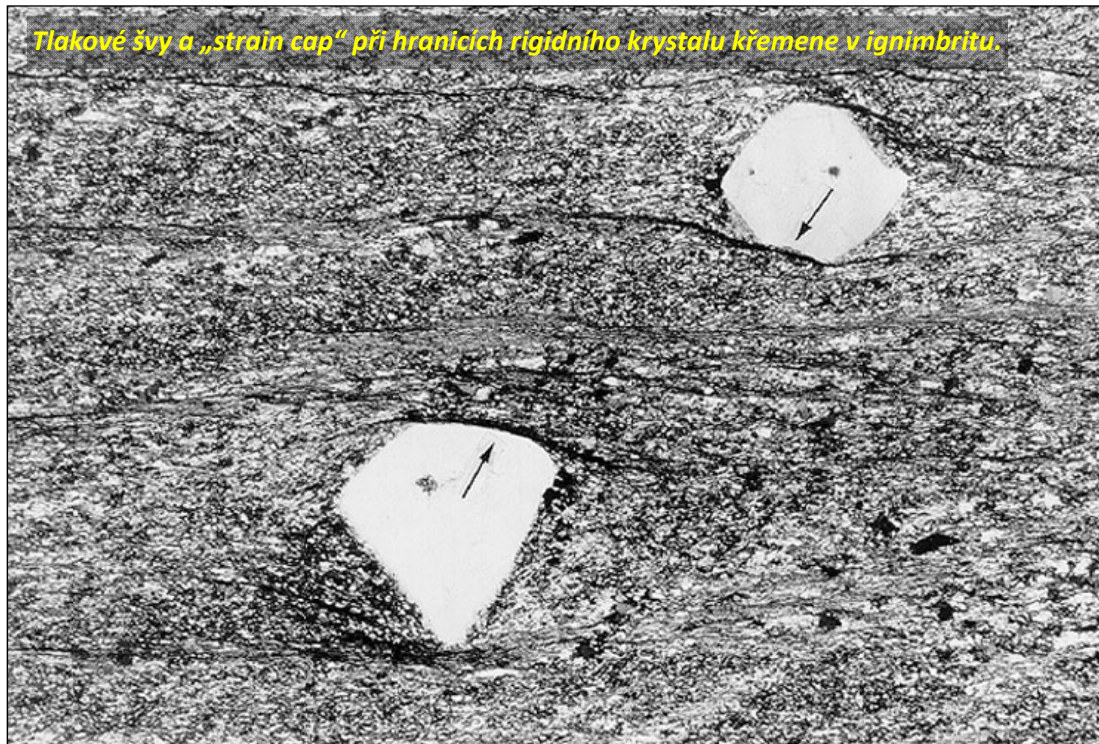


Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+VI, Špaček)

26

Tlakové rozpouštění

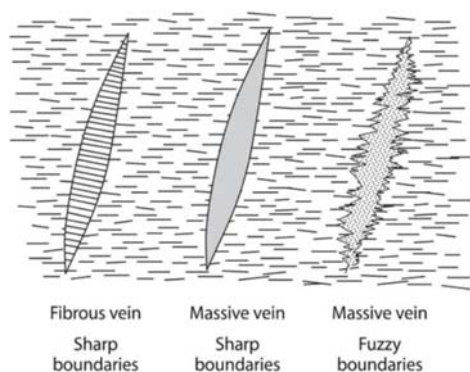
Strain caps



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

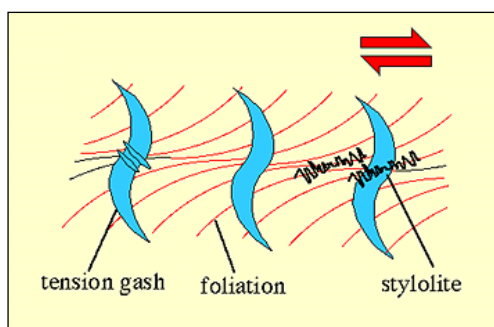
27

Krystalizace z roztoku v dilatačních doménách žíly



- **masivní vs. vláknité žíly**

Ostré vs. neostré hranice
Přímý vztah orientace k orientaci napětí (dilatace ve směru nejmenšího napětí)



- **kulisovitě tenzní žíly (*tension gashes*)**

Systémy lokálních žil se stupňovitým (en-echelon) uspořádáním ve střížné zóně.

- 1) vznik žíly v orientaci dané napětím,
- 2) rotace ve střížné zóně,
- 3) růst žíly v pův. směru – zdánlivý ohyb

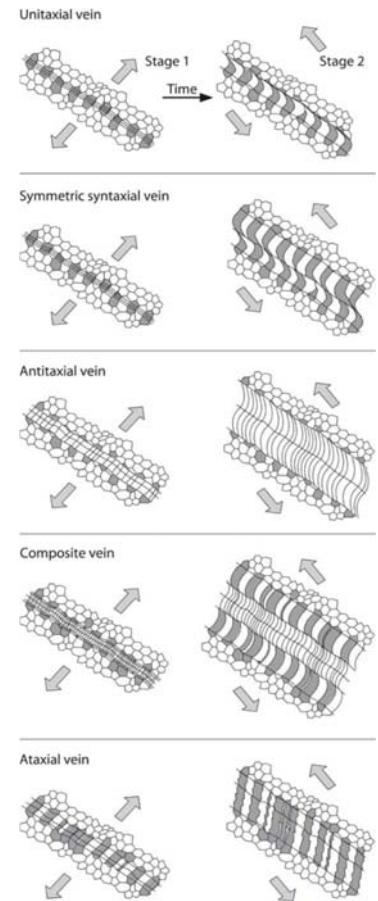
Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+VI, Špaček)

[Video1-syn/antitaxial](#)

28

Krystalizace z roztoku v dilatačních doménách: vláknité žíly (*fibrous veins*)

- různé typy vláknitých žil jejichž vnitřní uspořádání krystalů může dobře dokumentovat historii dilatace

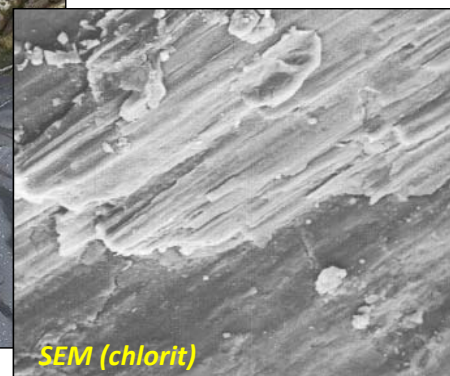
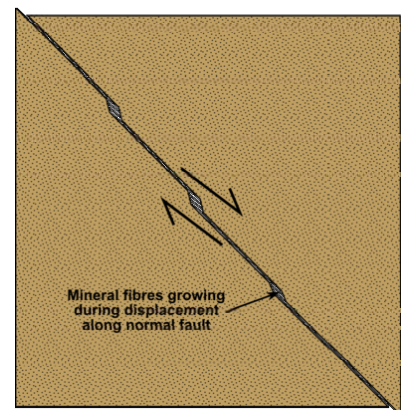
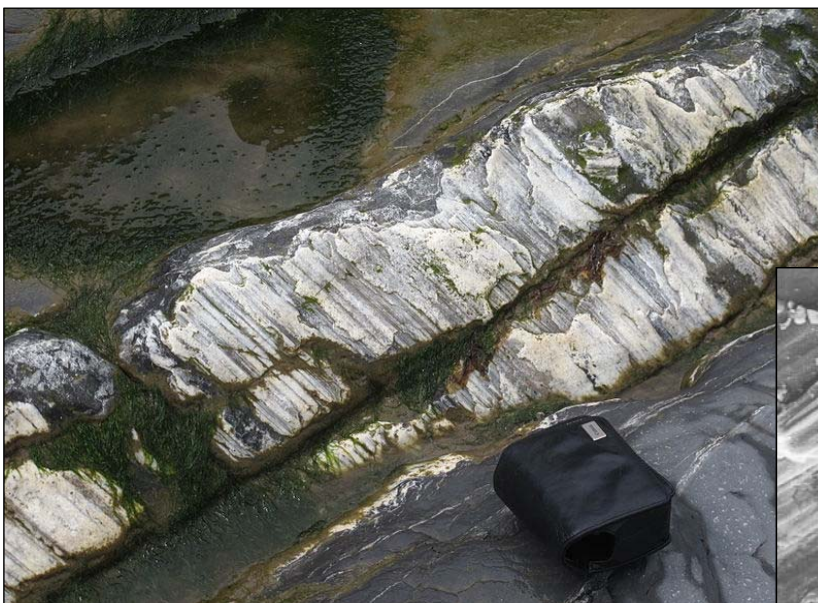


Krystalizace z roztoku v dilatačních doménách

Vláknité žíly na zlomu (*slickenfibres*)

= střižné žíly

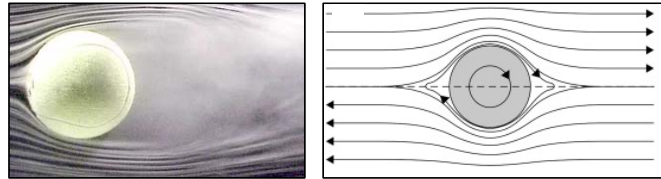
- dobrý kinematický indikátor na ploše zlomu



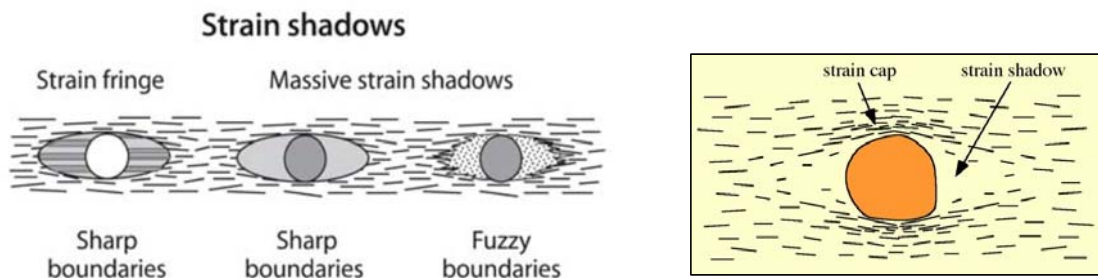
Krystalizace z roztoku v dilatačních doménách

Tlakové stíny (*strain shadows, strain fringes*)

- nehomogenní deformace matrix okolo rigidní částice - porfyroklastu nebo porfyroblastu → nehomogenní distribuce napětí



- krystalizace minerálů z roztoků v doménách přilehlých k zrně ve směru foliace → **tlakový stín**



Krystalizace z roztoku v dilatačních doménách

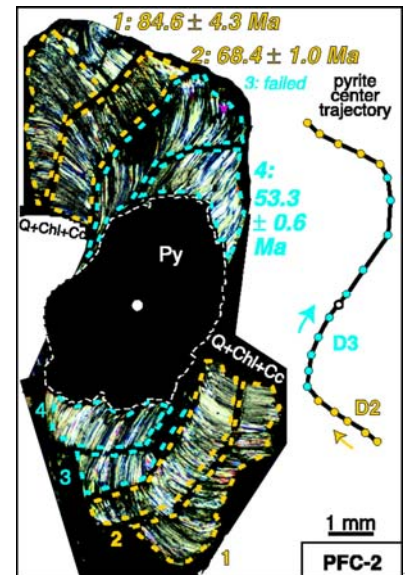
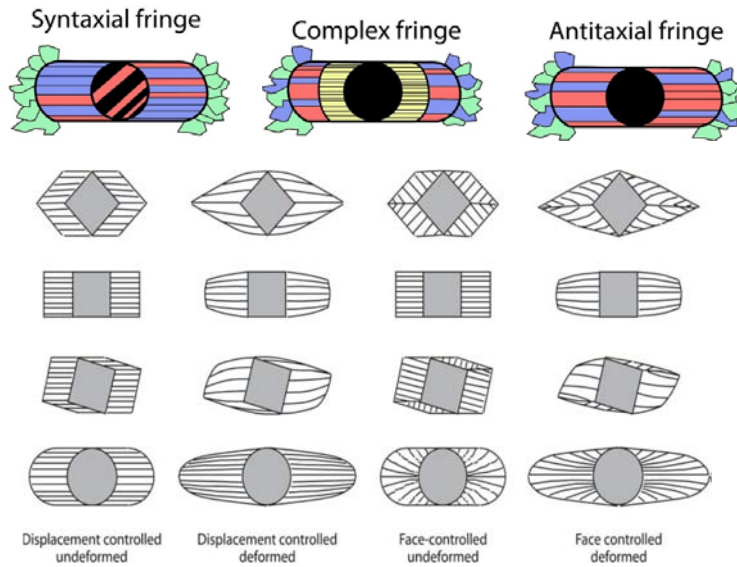
Tlakové stíny (*strain shadows, strain fringes*)



Krystalizace z roztoku v dilatačních doménách

Vláknité tlakové stíny (*strain fringes, fibrous strain shadows*)

- různé typy vláknitých tlakových stínů jejichž vnitřní uspořádání může velmi dobře dokumentovat historii lokální dilatace v hornině a rotace porfyroblastu/porfyroklastu



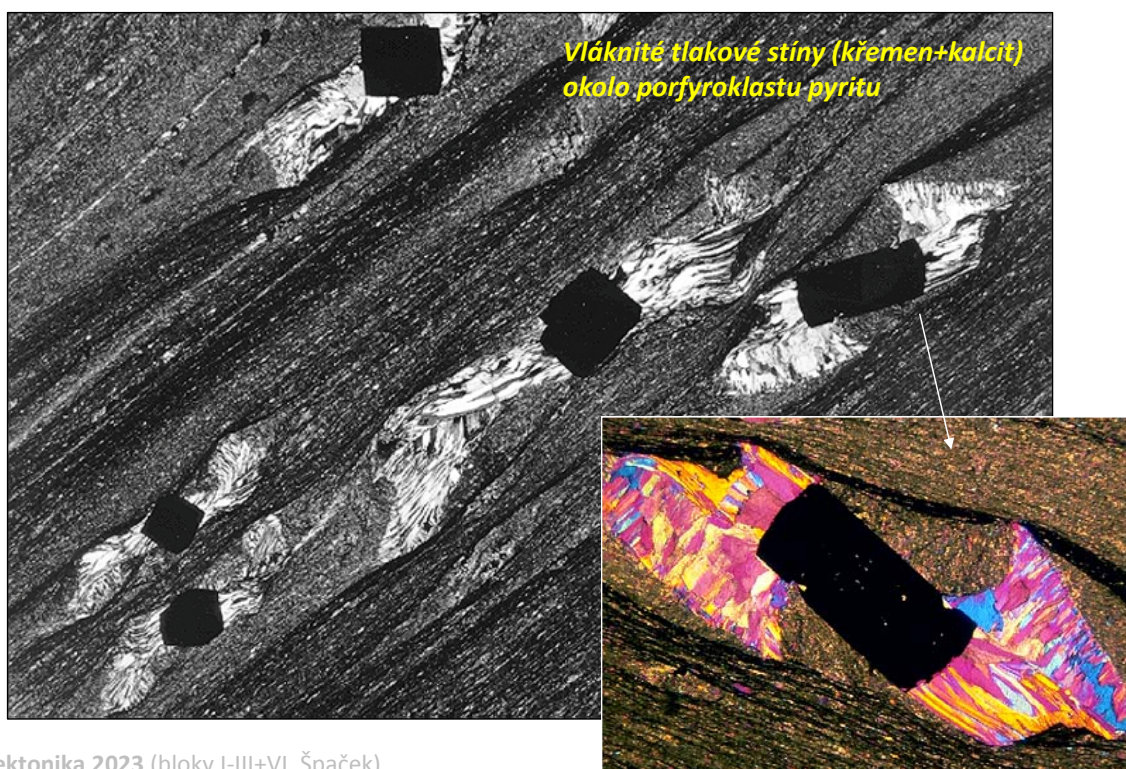
Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+VI, Špaček)

33

Krystalizace z roztoku v dilatačních doménách

Vláknité tlakové stíny

[Video1-syn/face-control](#)



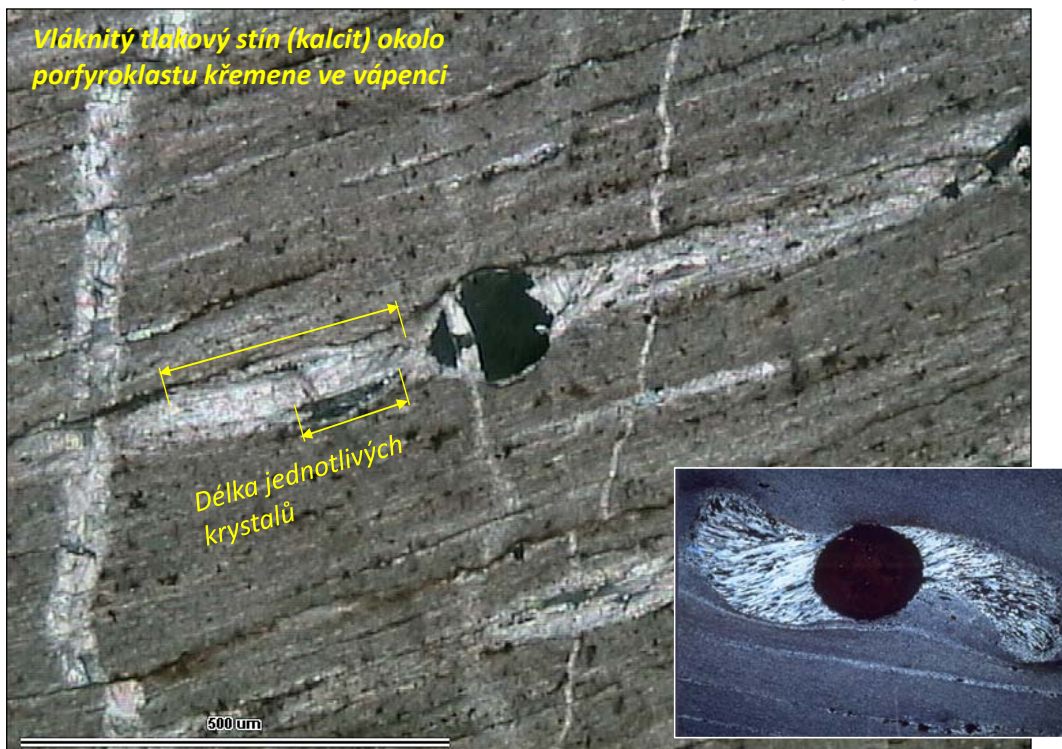
Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+VI, Špaček)

34

Krystalizace z roztoku v dilatačních doménách

Vláknité tlakové stíny

[Video1-syn/displ-control](#)



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

35

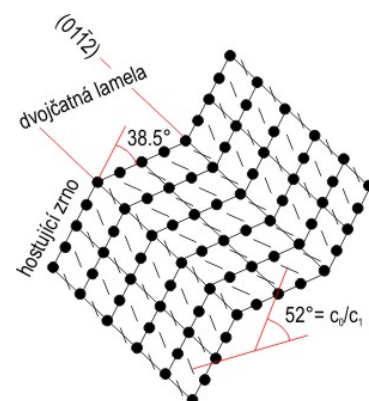
Mechanické dvojčatění

(deformační dvojčatění, *deformation twinning*)

- vznik dvojčatných domén (lamel) jednoduchým stříhem paralelním se specifickými dvojčatnými rovinami
- okamžitá změna orientace krystalové mřížky do jiné a jediné možné, přesně dané stabilní pozice
- velikost deformace je omezena úplným zdvojitím, tedy poměrně malá, navíc za vyšších omezujících tlaků musí paralelně probíhat jiný mechanismus, který zabrání vzniku pórů na hranicích zrn
- schopnost dvojčatění předurčena krystalovou strukturou. Běžné u plagioklasu a kalcitu (ale i mikroklin, biotit, kyanit, diopsid)

příklad: KALCIT

- rovina dvojčatného kluzu $e=\{01\bar{1}2\}$
- maximální velikost deformace celého krystalu dvojčatěním: $\gamma = 70\%$

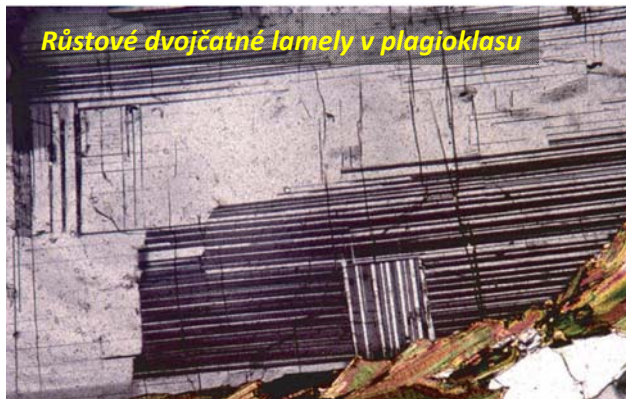
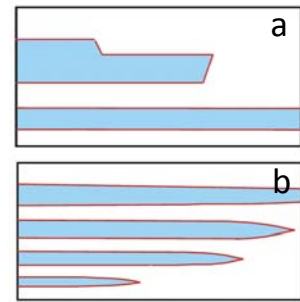


Mikrotektonika 2023 (bloky I-III+VI, Špaček)

36

Mechanické dvojčatění

- dvojčatné lamely vznikají i při růstu krystalů (růstové lamely)
- dvojčatné lamely vznikají i při statické deformaci v důsledku pnutí mezi jednotlivými krystaly v agregátu při chladnutí (anizotropie teplotní kontrakce)
- rozlišení růstových (a) a deformačních (b) lamel (může být obtížné) ↑
- deformační dvojčatné lamely: čokovité zakončení, časté zakřivení



Růstové dvojčatné lamely v plagioklasu

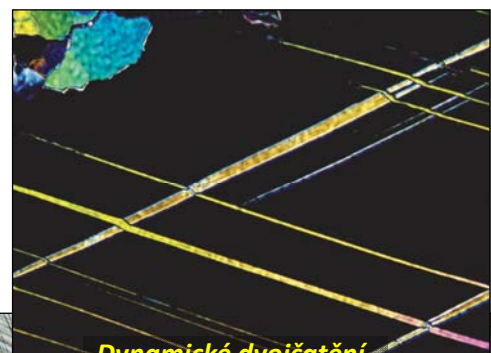


Deformační dvojčatné lamely v plagioklasu

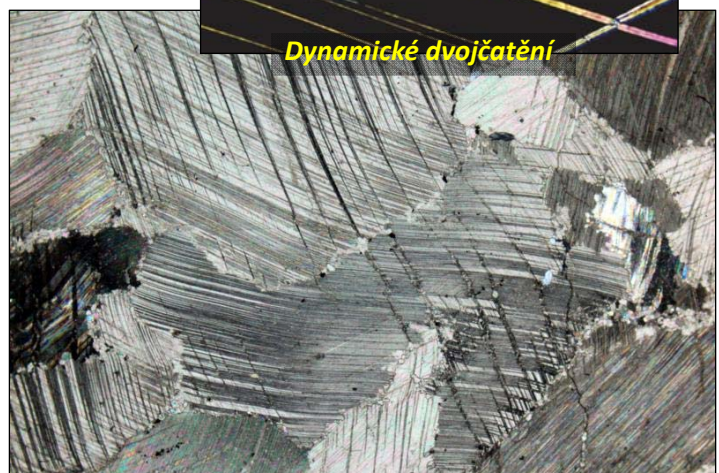
Mechanické dvojčatění (příklady kalcitu v mramoru)



Statické dvojčatění



Dynamické dvojčatění



Mechanické dvojčatění

příklady experimentální deformace

Dynamické mechanické dvojčatění karnalitu $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a bischoffitu $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$:



úplné zdvojčatění



částečné zdvojčatění a nástup dynamické rekrytalizace

Zalamování (*kinking*)

- proces podobný dvojčatění, ale bez vazby na krystalové roviny – bez omezení velikosti střížné deformace
- typický pro fylosilikáty ve všech měřítkách
- vznik pásů zalomení (*kink bands*)

