



# deep earth oder wie langsamkeit entsteht ...

[renee.heilbronner@unibas.ch](mailto:renee.heilbronner@unibas.ch)

[www.unibas.ch/earth/micro](http://www.unibas.ch/earth/micro)

# deep earth

es geht um die Vorstellung, dass geologische Prozesse unglaublich langsam vor sich gehen ...

... im Wesentlichen geht es um Deformationsprozesse ...

# deep earth

... und um die Frage, wie sich Gesteine deformieren können ...

... warum dieser Prozess im Grossen Ganzen langsam geht - im Detail aber oft rasend schnell ...

# deep earth

zuletzt fragen wir, wie sich alle -  
unterschiedlich schnellen -  
Deformationsprozesse zu einer grossen  
'Langsamkeit' vereinen

# deep earth

es geht also darum zu zeigen, dass die Erde sehr beweglich ist und dass die Geschwindigkeiten zum Teil atemberaubend sind...

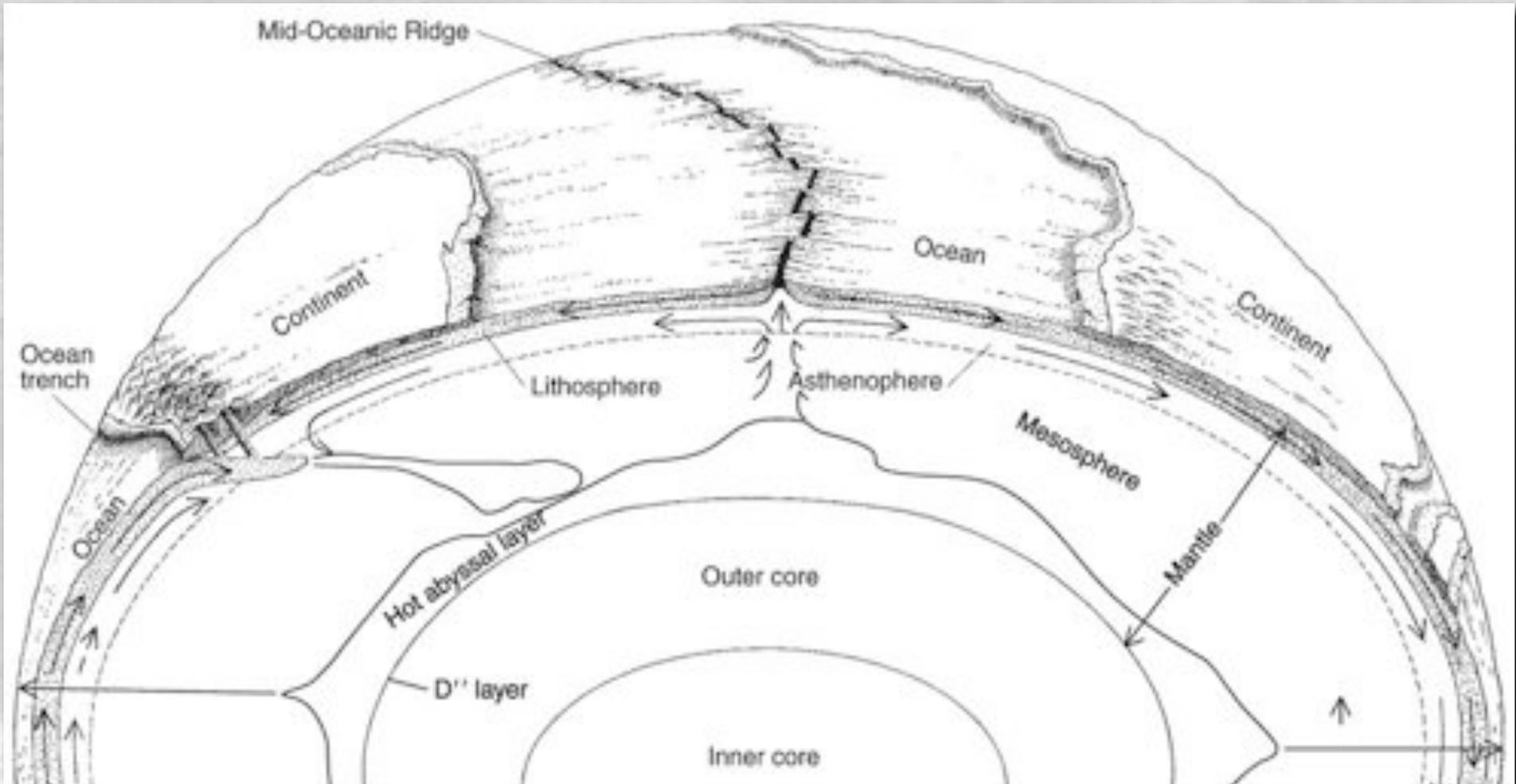
... dass schnell und langsam aber sehr relative Begriffe sind...

# deep earth

...auch darum, dass das, was uns Menschen langsam scheint, dem 13.7 Ga alten Kosmos nur wie ein kurzer Augenblick vorkommt...

... und dass deshalb dieser Vortrag in Wirklichkeit nur ganz kurz dauert

# was ist langsam - was ist schnell ?



# was ist langsam - was ist schnell ?

Geschwindigkeit = Meter / Sekunde

Auto:	100 km / h	$\sim 30 \text{ ms}^{-1}$
zu Fuss:	3.6 km / h	$1 \text{ ms}^{-1}$
tektonische Platten:	3 cm / Jahr	$\sim 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$

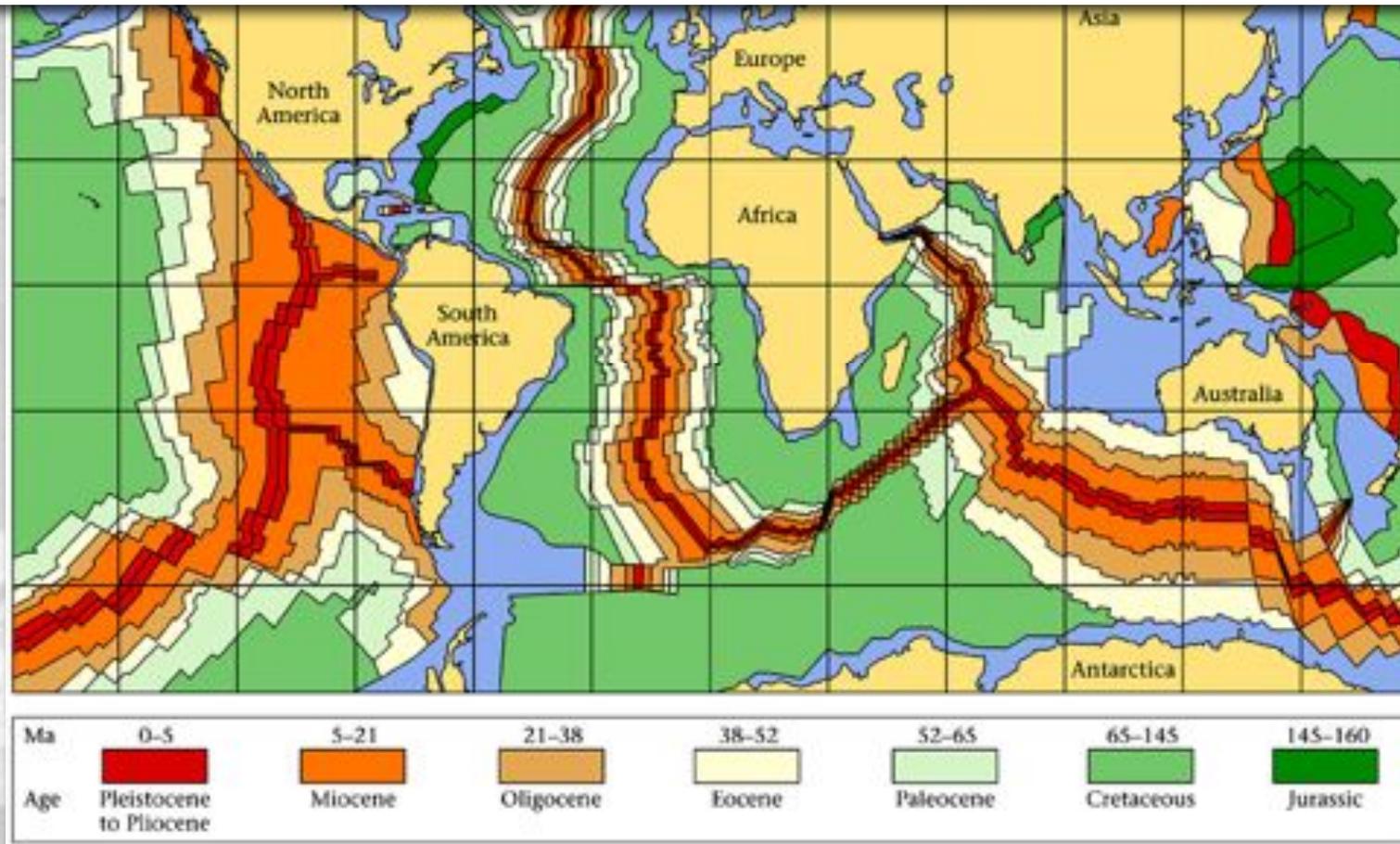
(1 Jahr = 31'536'000 s  $\approx 3 \cdot 10^7$  s)

# was ist langsam - was ist schnell ?

im Durchschnitt : **3000 km / 150 Ma**

$$= 3 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \text{m} / 150 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^7 \text{ s}$$

$$= 3 \cdot 10^6 / 4.5 \cdot 10^2 \cdot 10^{13} \quad \approx 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$$

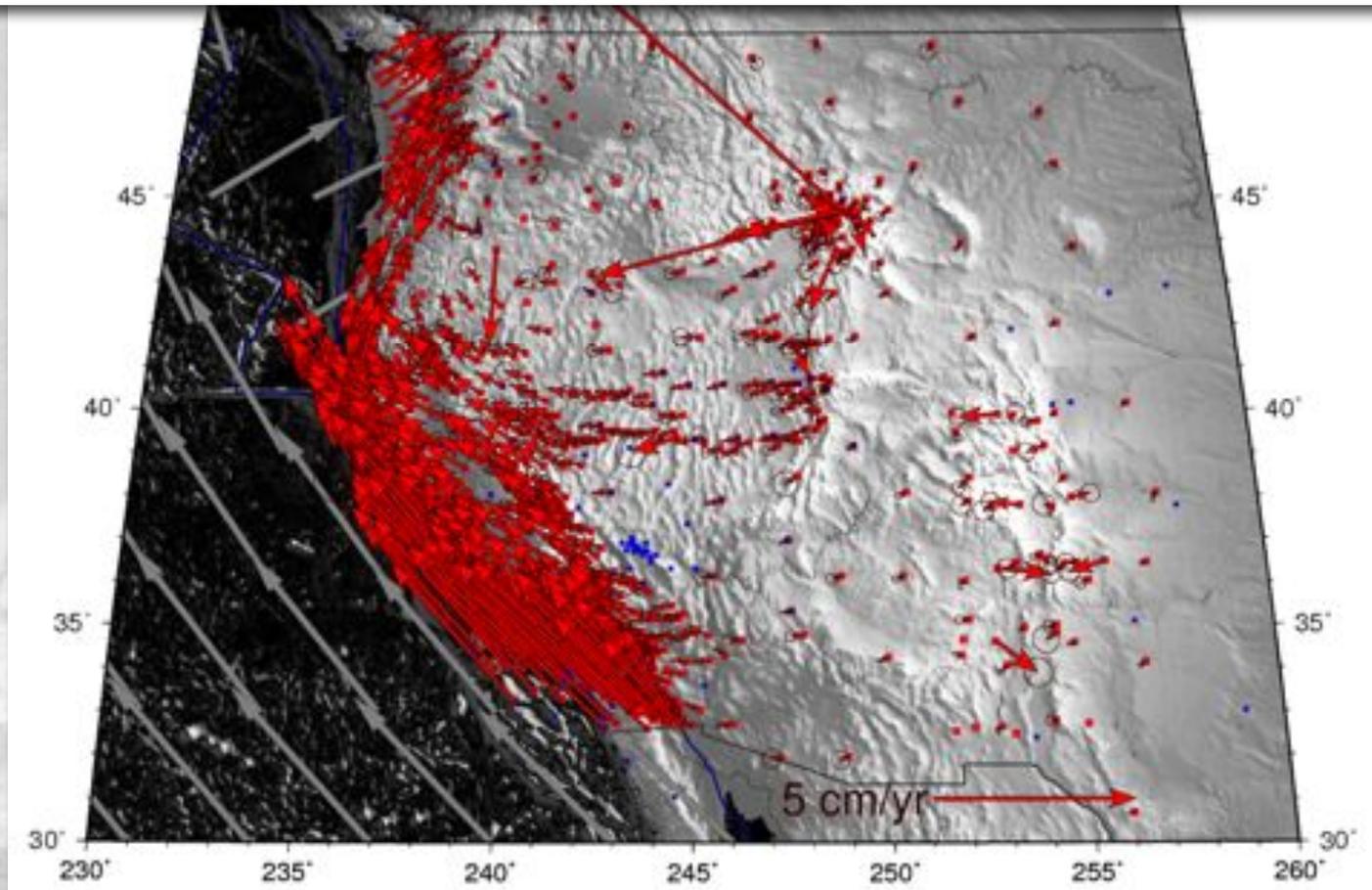


# was ist langsam - was ist schnell ?

Momentane Geschwindigkeiten:

**1 bis 10 cm / Jahr**

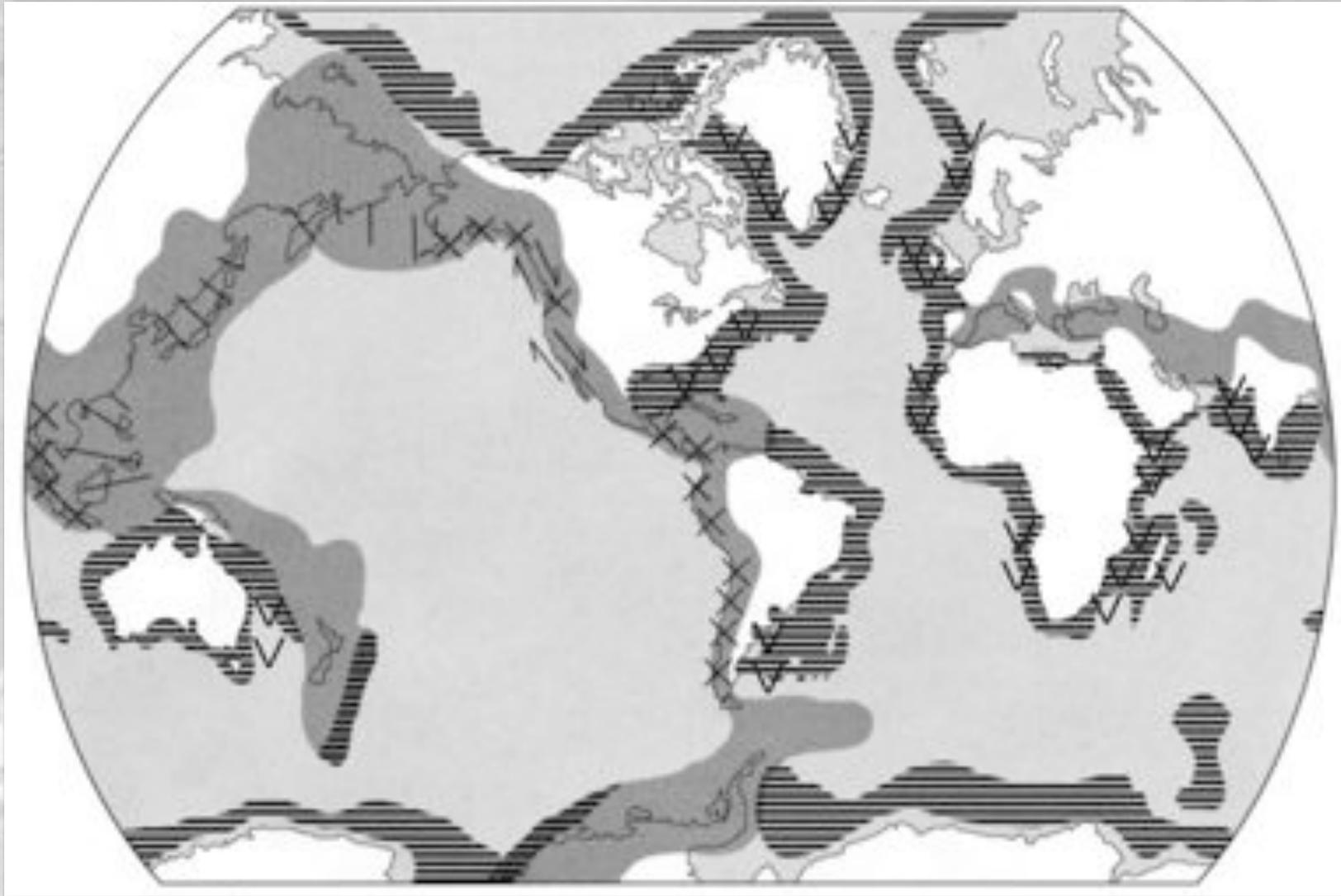
$= 10^{-2} - 10^{-1} \text{ m} / 31'536'000 \text{ s} \approx 10^{-9} - 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$



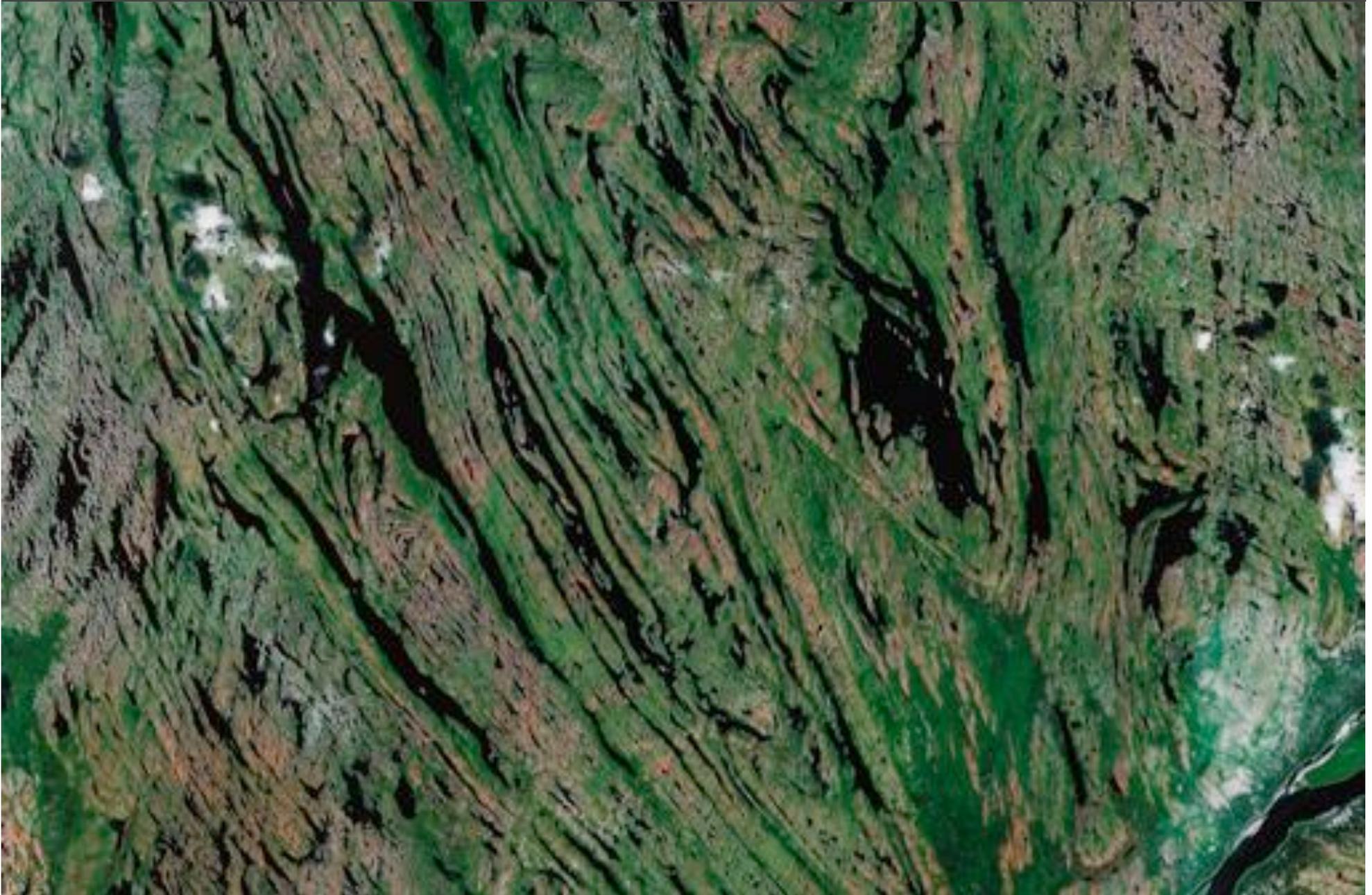
# was verformt sich

aktive Plattengrenzen

orogenic belts



was verformt sich



was verformt sich



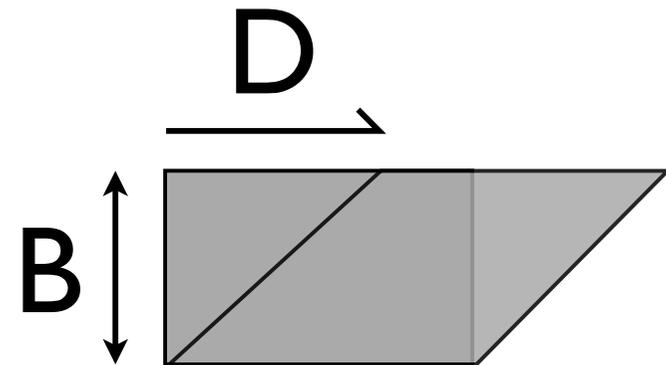
# was verformt sich



Scherverformung

$$\gamma = \frac{\text{Scherbetrag}}{\text{Breite}}$$

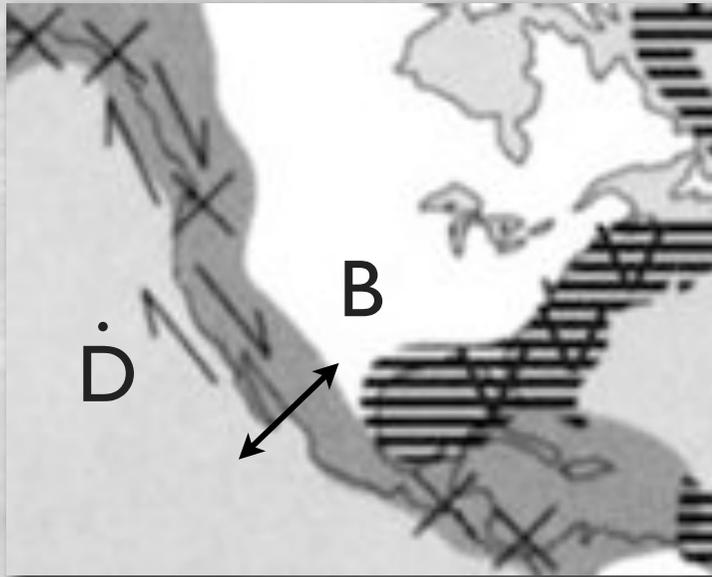
was heisst Verformung



$$\gamma = \frac{D}{B}$$

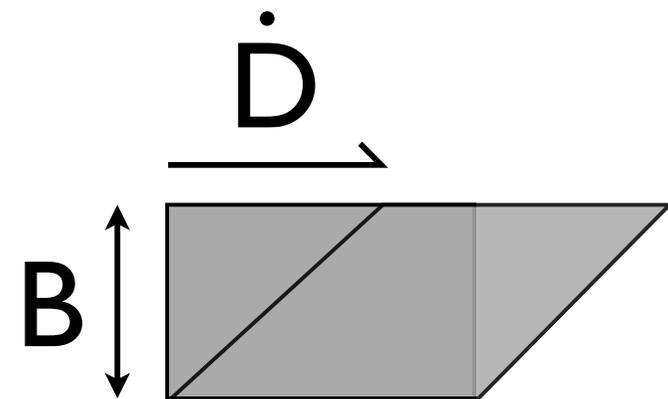
# was verformt sich

## Verformungsraten



Verformungsrate

$$\dot{\gamma} = \frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{Breite}}$$



$$\dot{\gamma} = \frac{D}{B}$$

# was verformt sich

Plattenbewegung pro Jahr  $D = 10 \text{ cm}$   
Verformter Bereich  $B = 100 \text{ km}$

Plattengeschwindigkeit:

$$\dot{D} = D / t = 10^{-1} \text{ m} / 3 \cdot 10^7 \text{ s} = 0.3 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

Verformungsrate:

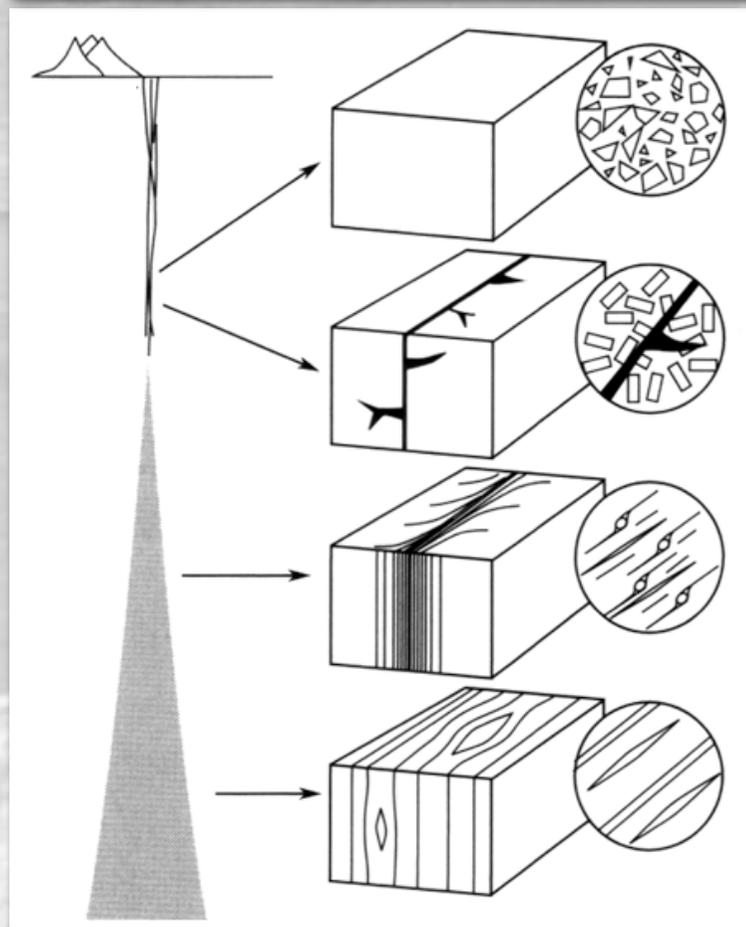
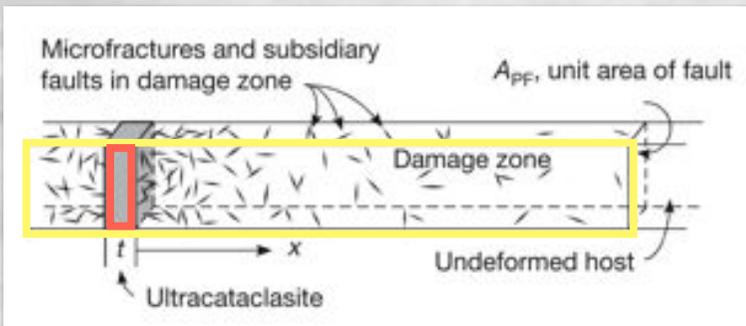
$$\dot{\gamma} = \dot{D} / B = 0.3 \cdot 10^{-8} / 10^5 \text{ m} = 0.3 \cdot 10^{-13} \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\gamma} \approx 10^{-14} \text{ s}^{-1}$$

was verformt sich



# was verformt sich



$$\dot{\gamma} \approx 10^{-14} \text{ s}^{-1}$$

100km  $\rightarrow$  100m  
(Faktor  $10^3$ )

$$\Rightarrow \dot{\gamma} = 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

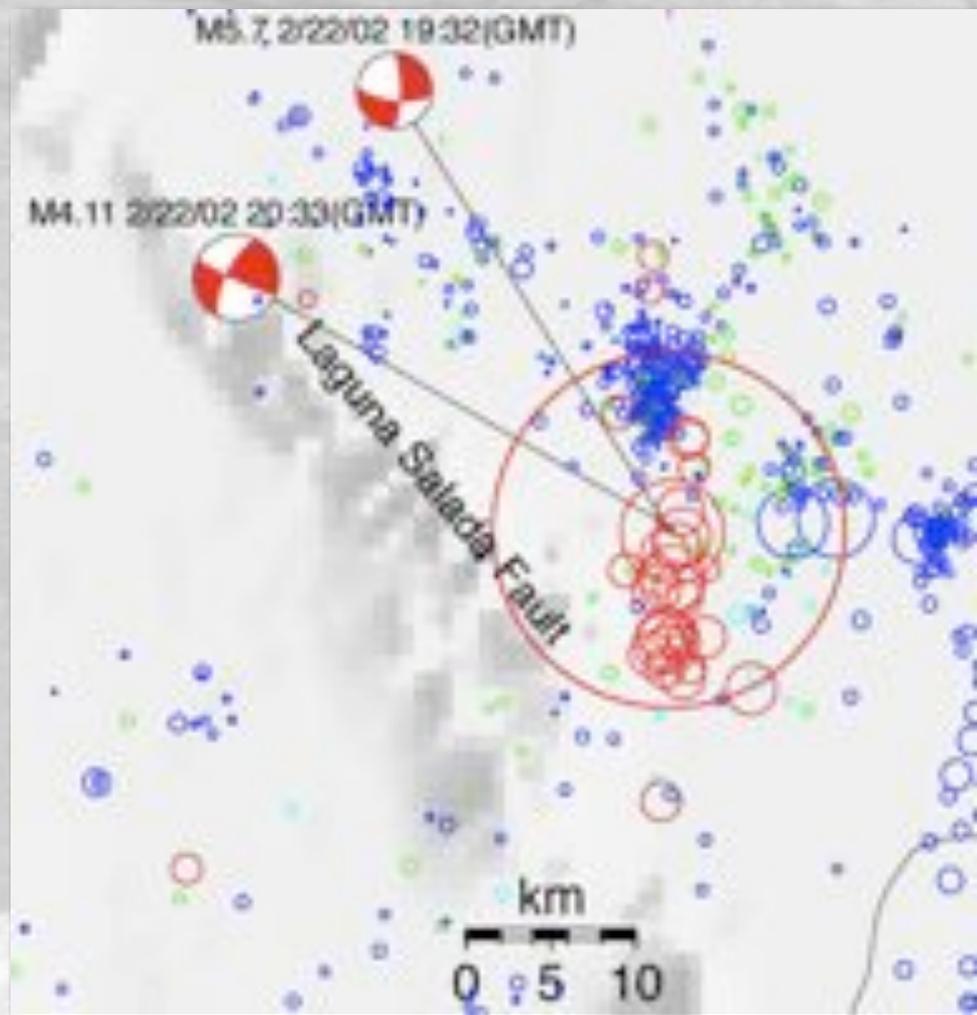
100km  $\rightarrow$  1mm  
(Faktor  $10^8$ )

$$\Rightarrow \dot{\gamma} = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

was verformt sich



# was verformt sich



auf ein Jahr gerechnet:

$$\dot{\gamma} \approx 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

in 30 Sekunden:

$$\dot{\gamma} \approx 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

(1 Jahr  $\approx 3 \cdot 10^7$  s)

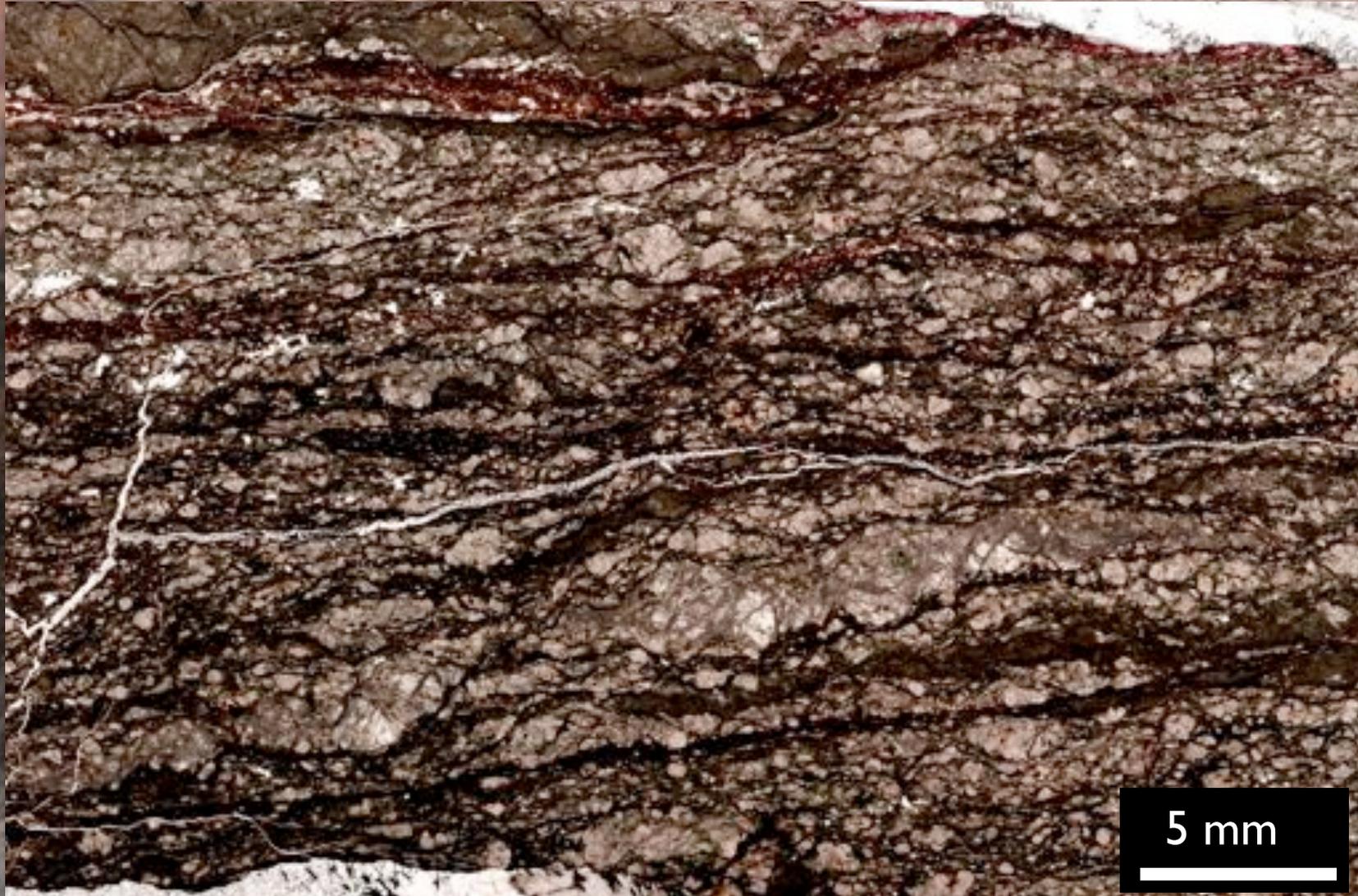
vom grossen ins kleine



vom grossen ins kleine



vom grossen ins kleine



vom grossen ins kleine



vom grossen ins kleine



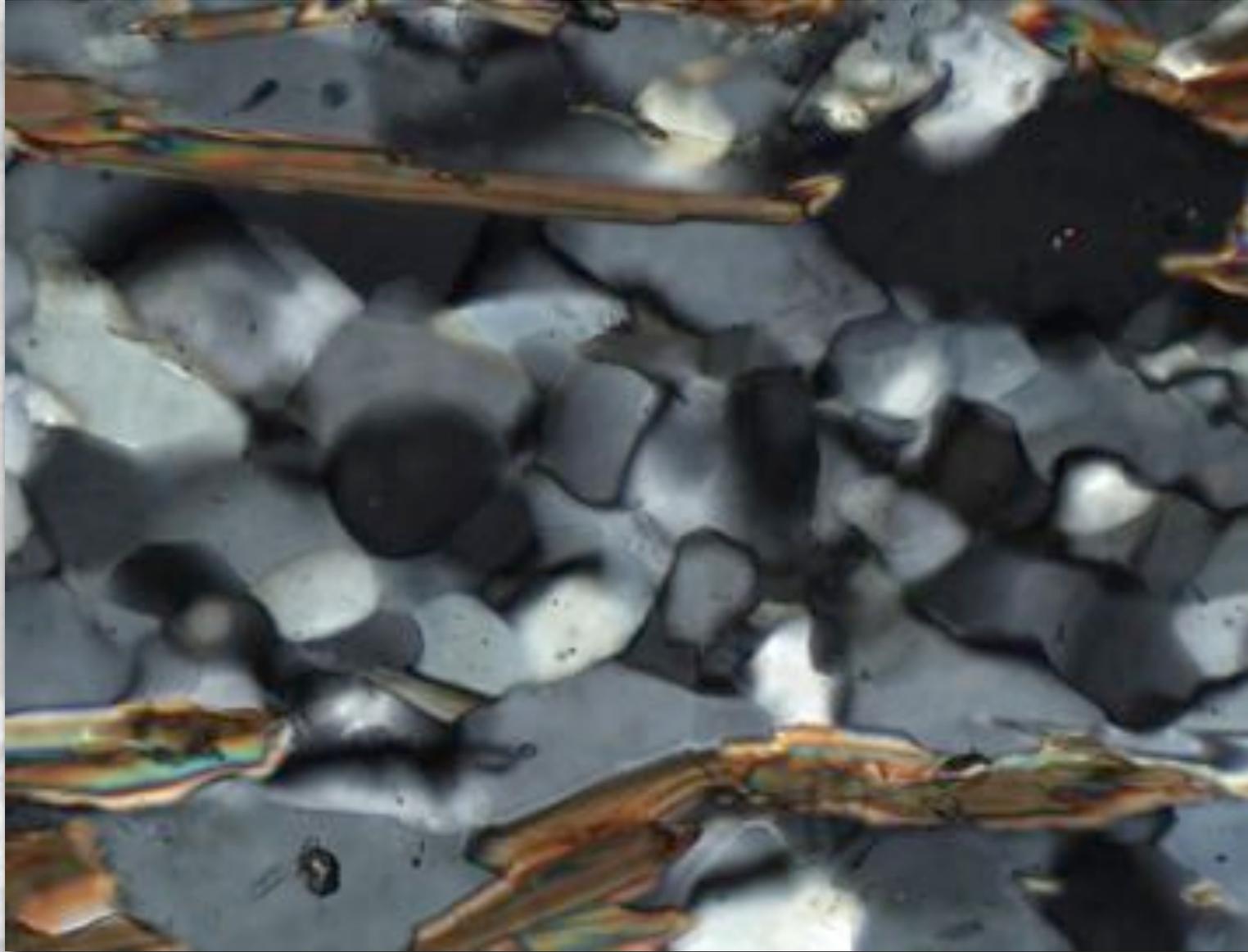
vom grossen ins kleine

1 mm



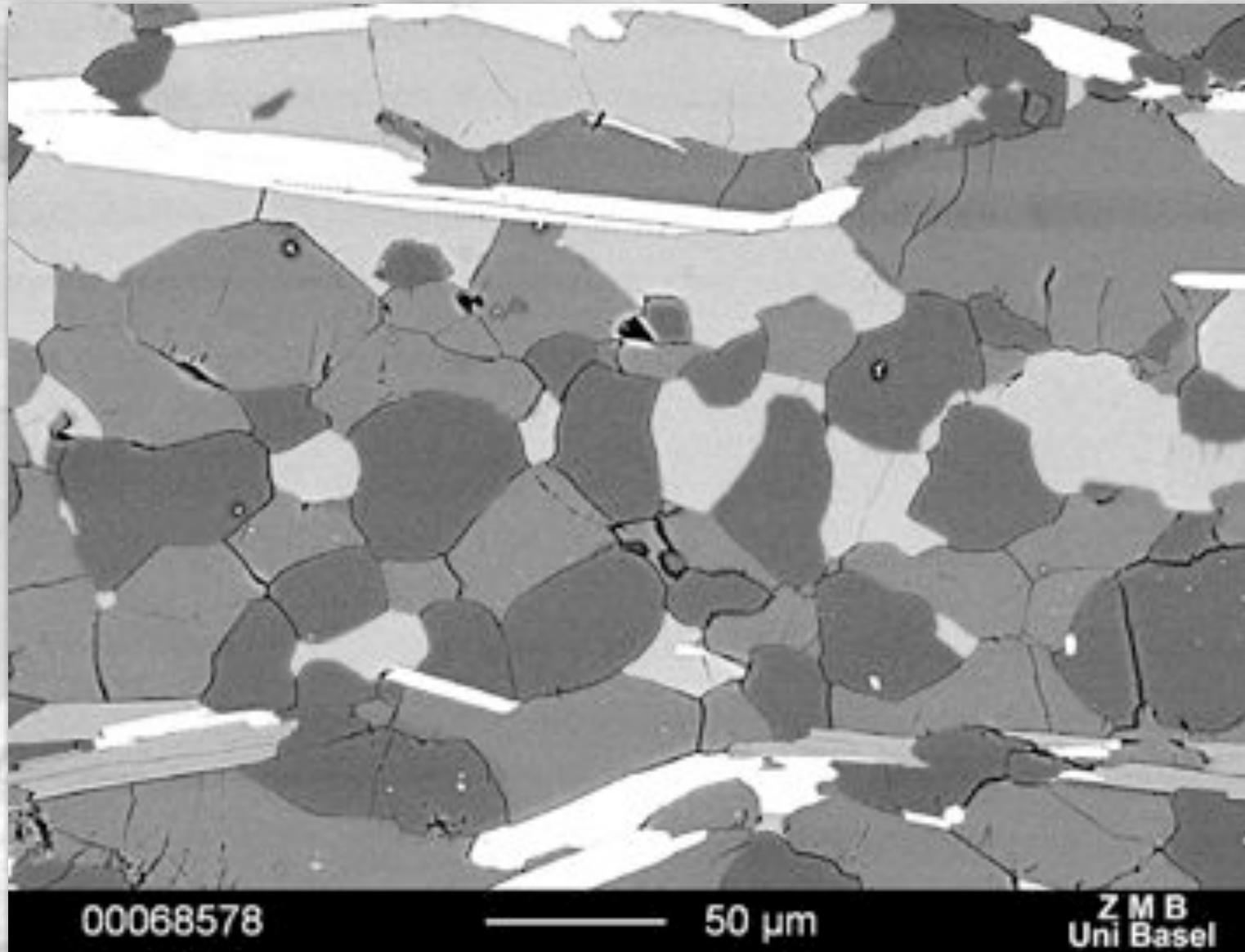
vom grossen ins kleine

50  $\mu\text{m}$

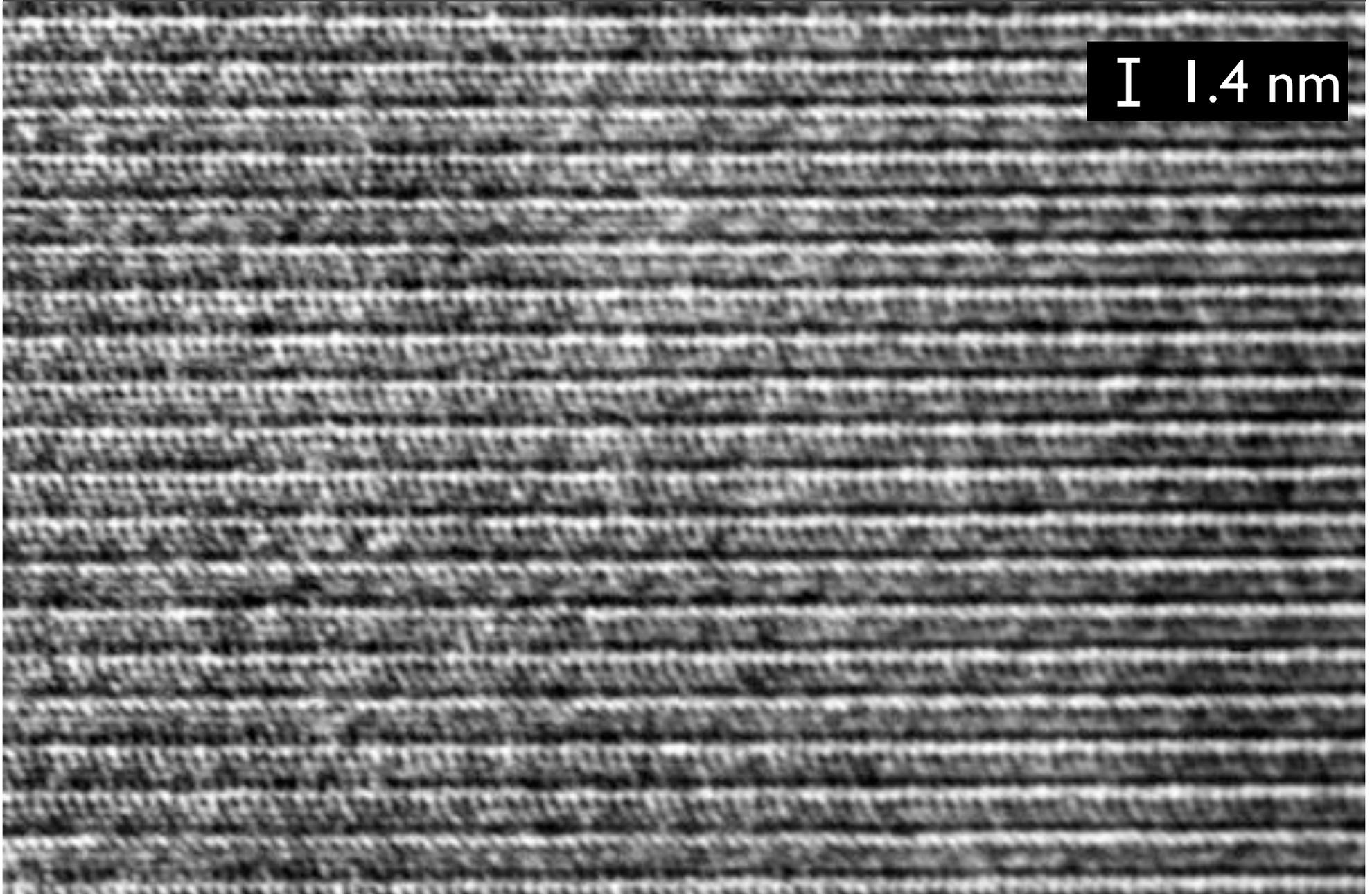


vom grossen ins kleine

50  $\mu\text{m}$

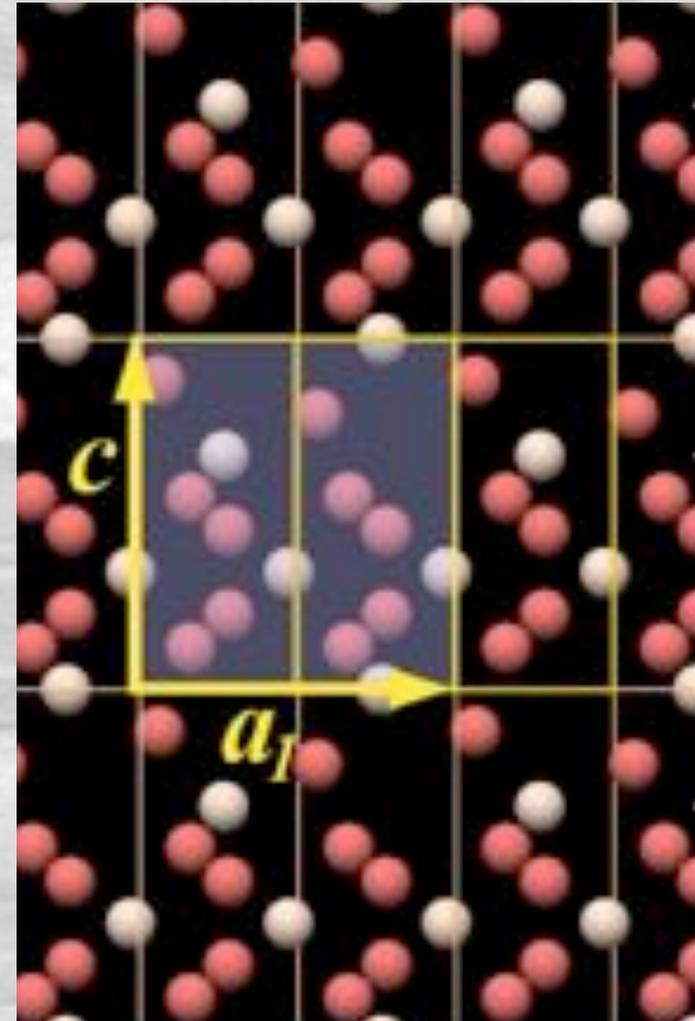
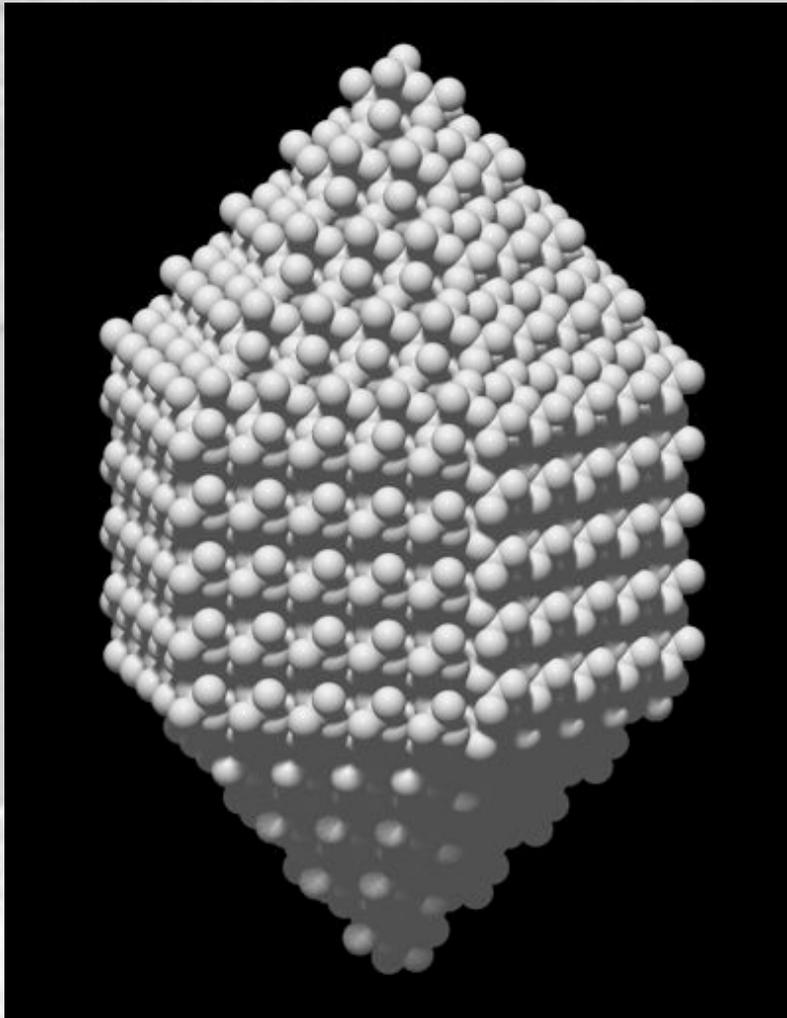


vom grossen ins kleine



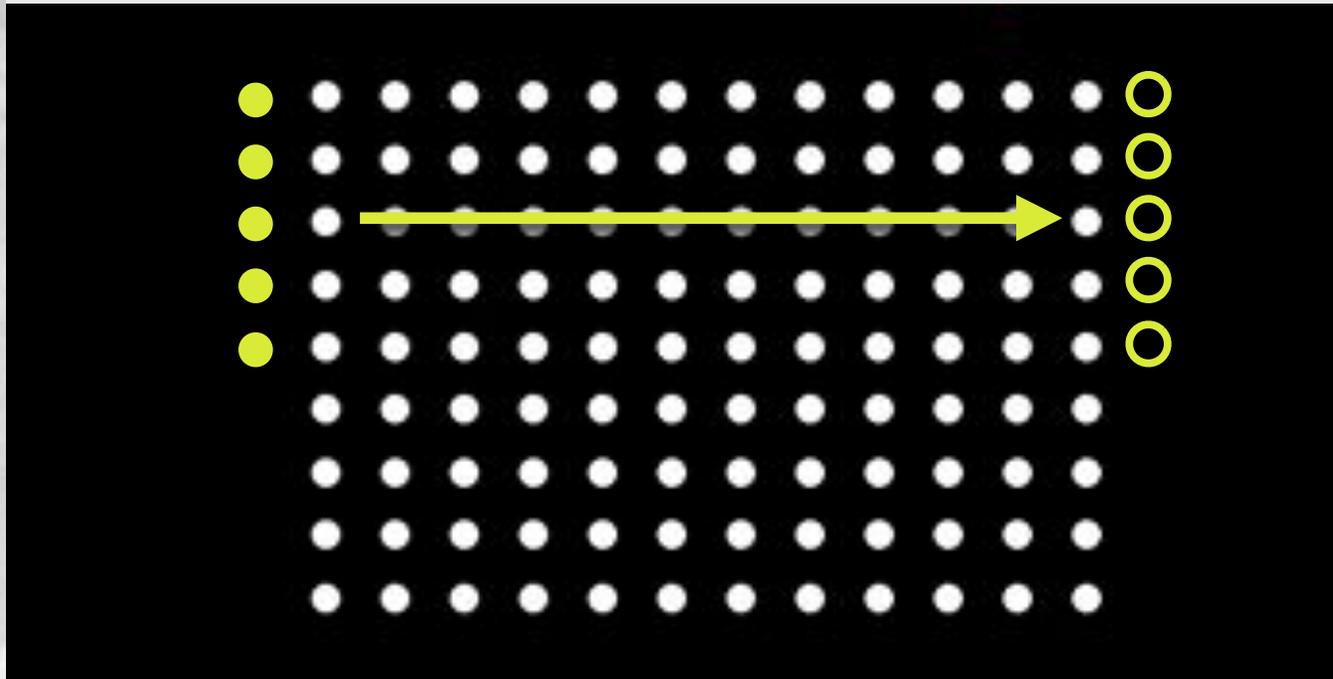
# versetzungen

Kristalle  $\neq$  Kontinuumsmechanik



# versetzungen

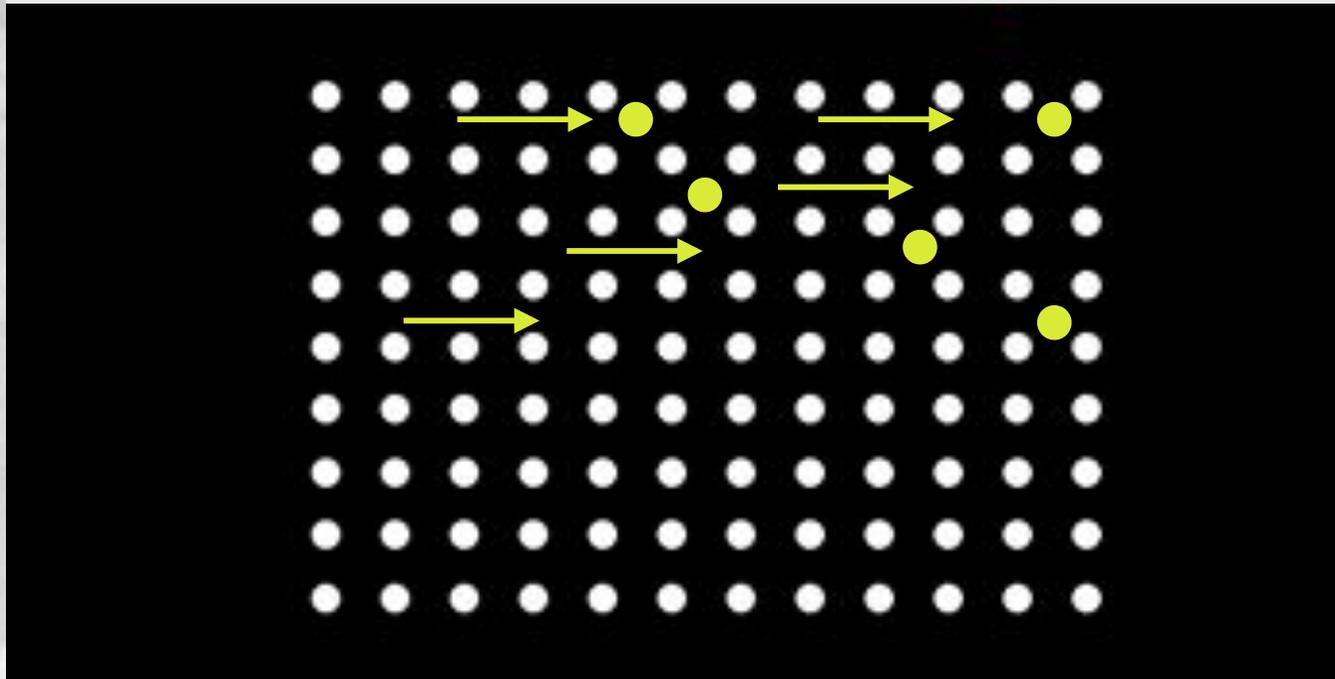
wie verformt man Kristalle ?



3 Möglichkeiten: volume diffusion  
grain boundary diffusion  
dislocation glide

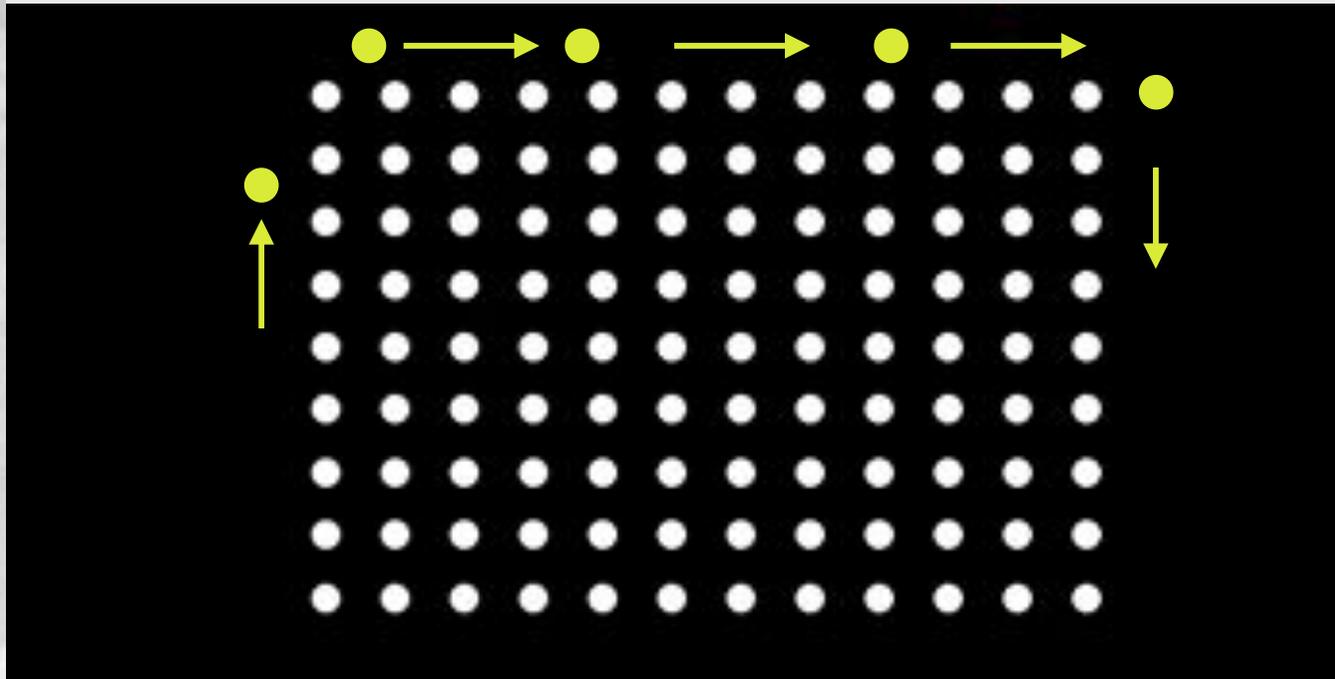
# versetzungen

volume diffusion



# versetzungen

grain boundary diffusion

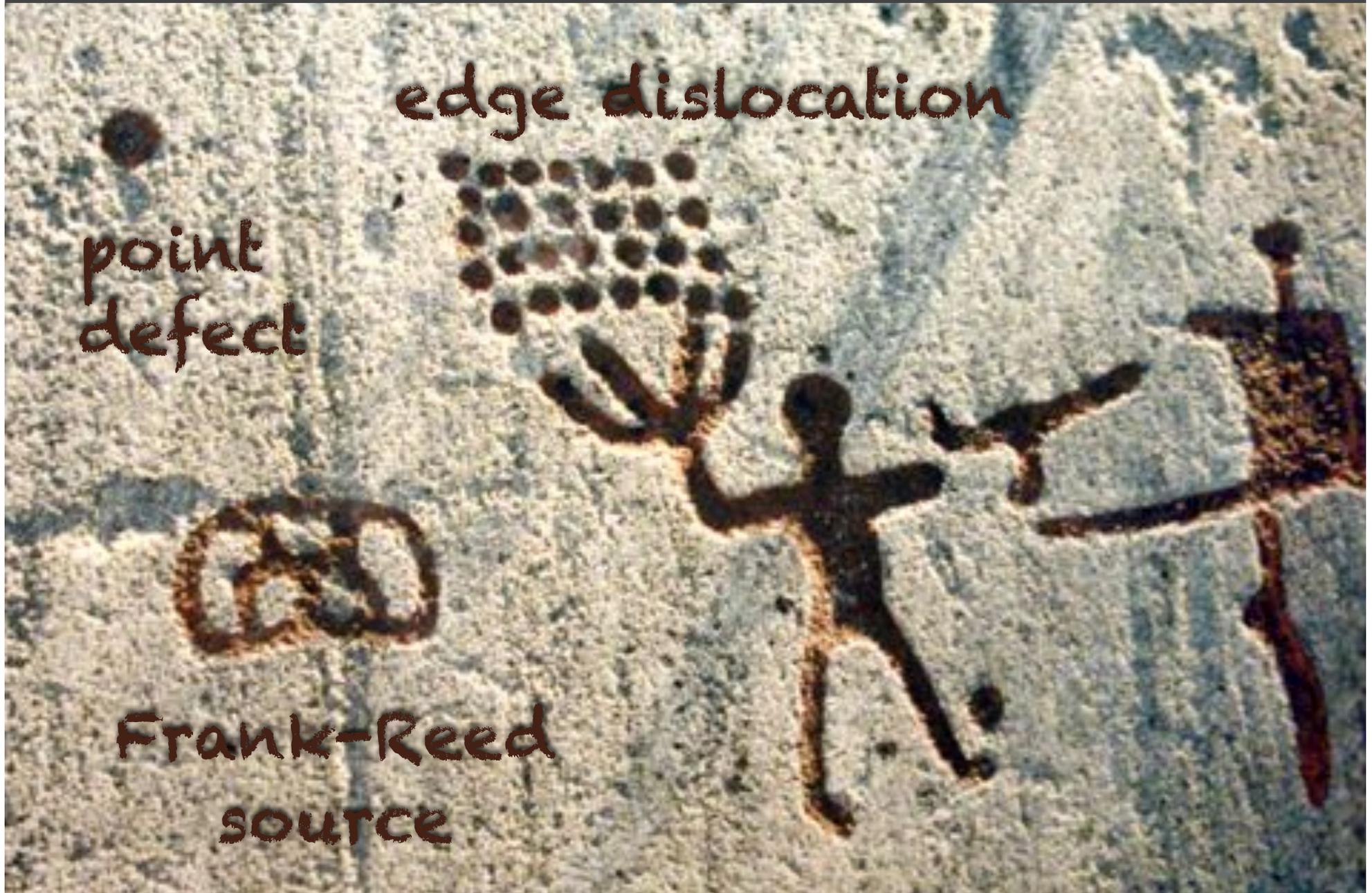


# versetzungen

dislocation glide

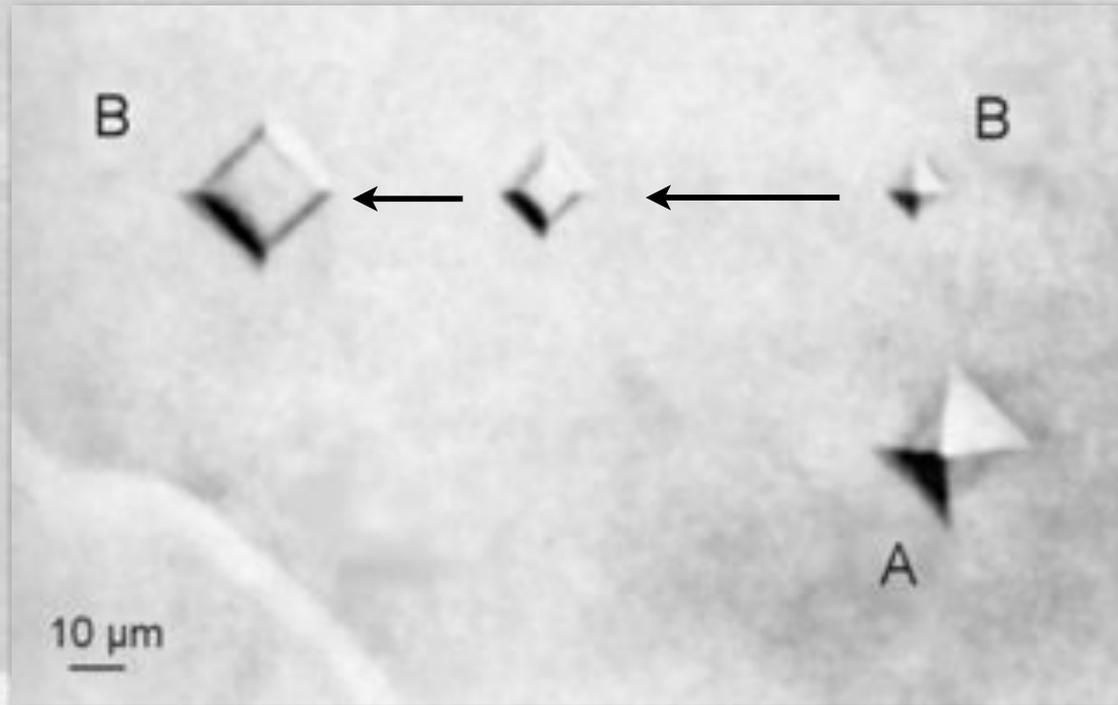


# versetzungen

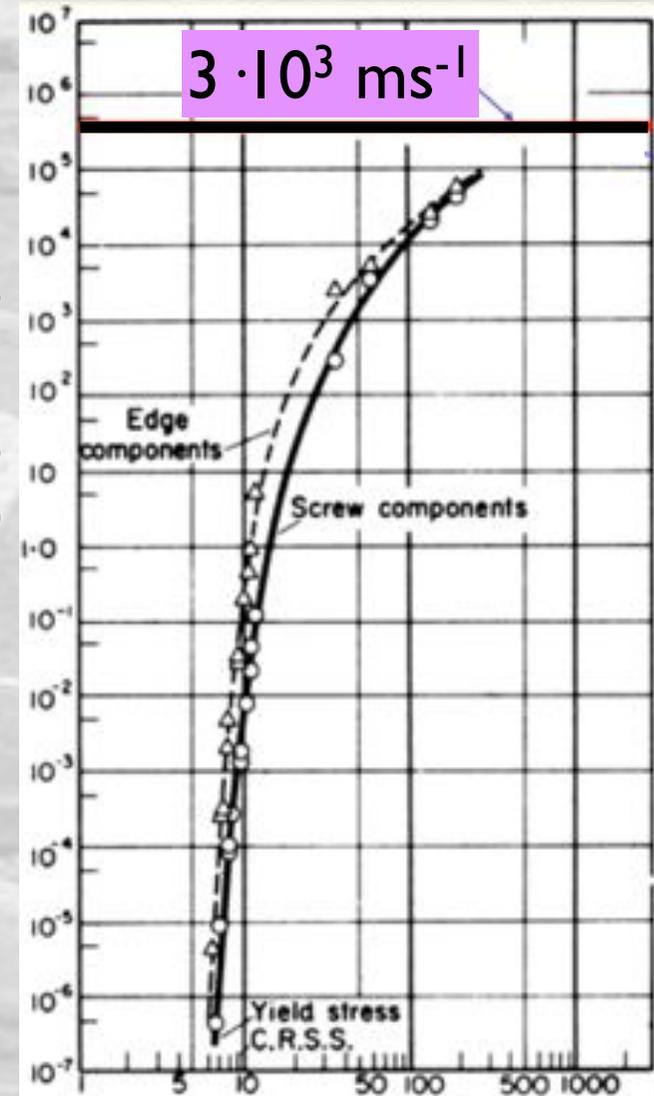


# versetzungen

shear wave velocity

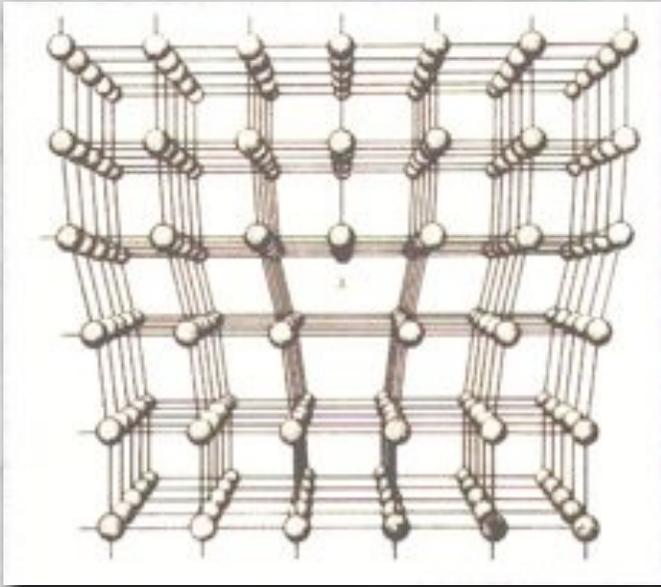


velocity (cms<sup>-1</sup>)



Ätzgrube = Dislokation

# versetzungen



$$v \approx 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

für  $B =$  Gitterabstand  
 $10 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ m}$

$$\gamma \sim 10^{+12} \text{ s}^{-1}$$



(Erdbeben)

für  $B =$  damage zone  
100 m in 30 Sekunden

$$\gamma \sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

# aus schnell wird langsam

'dislocations are imperfections whose motion causes deformation'



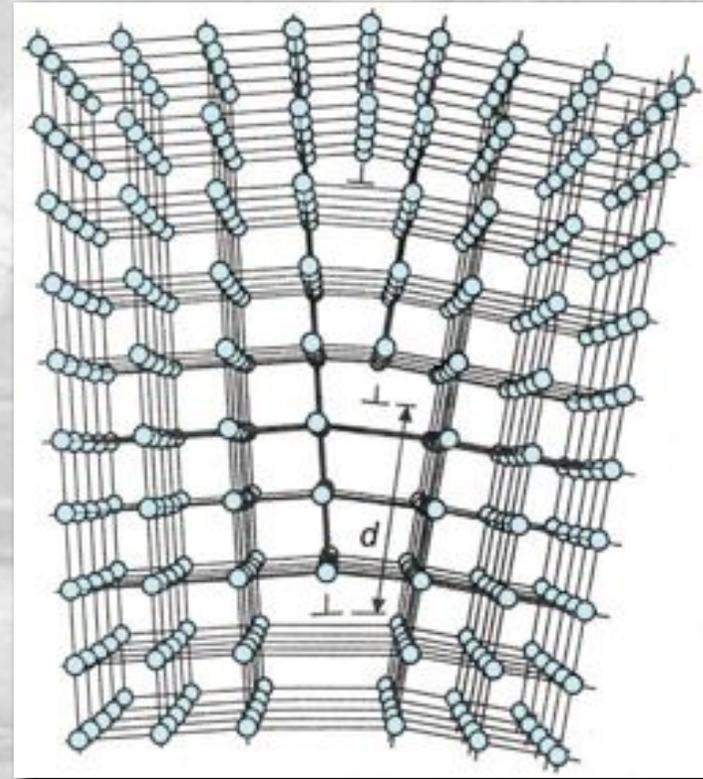
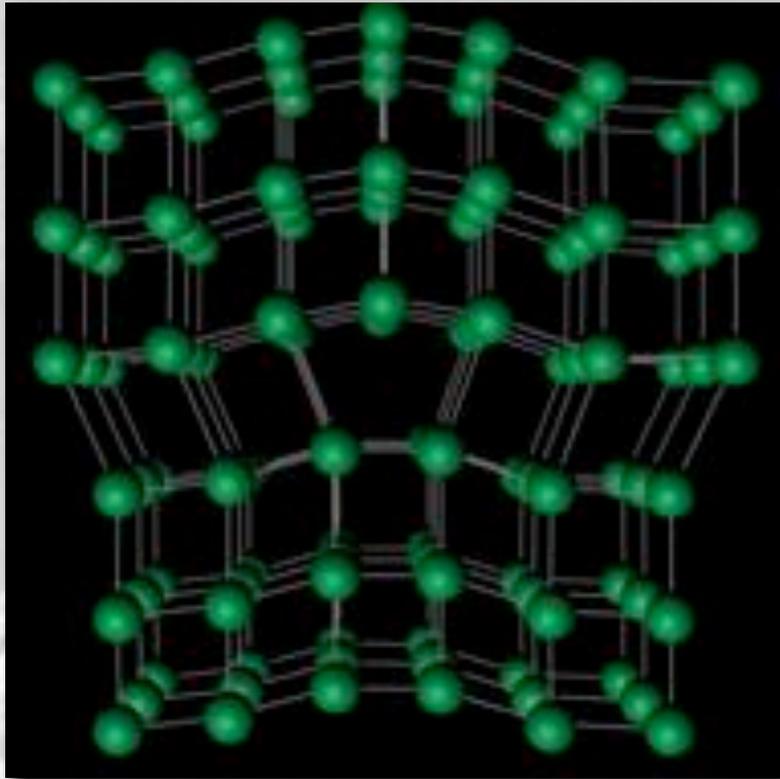
# aus schnell wird langsam

## Probleme im Kristall:

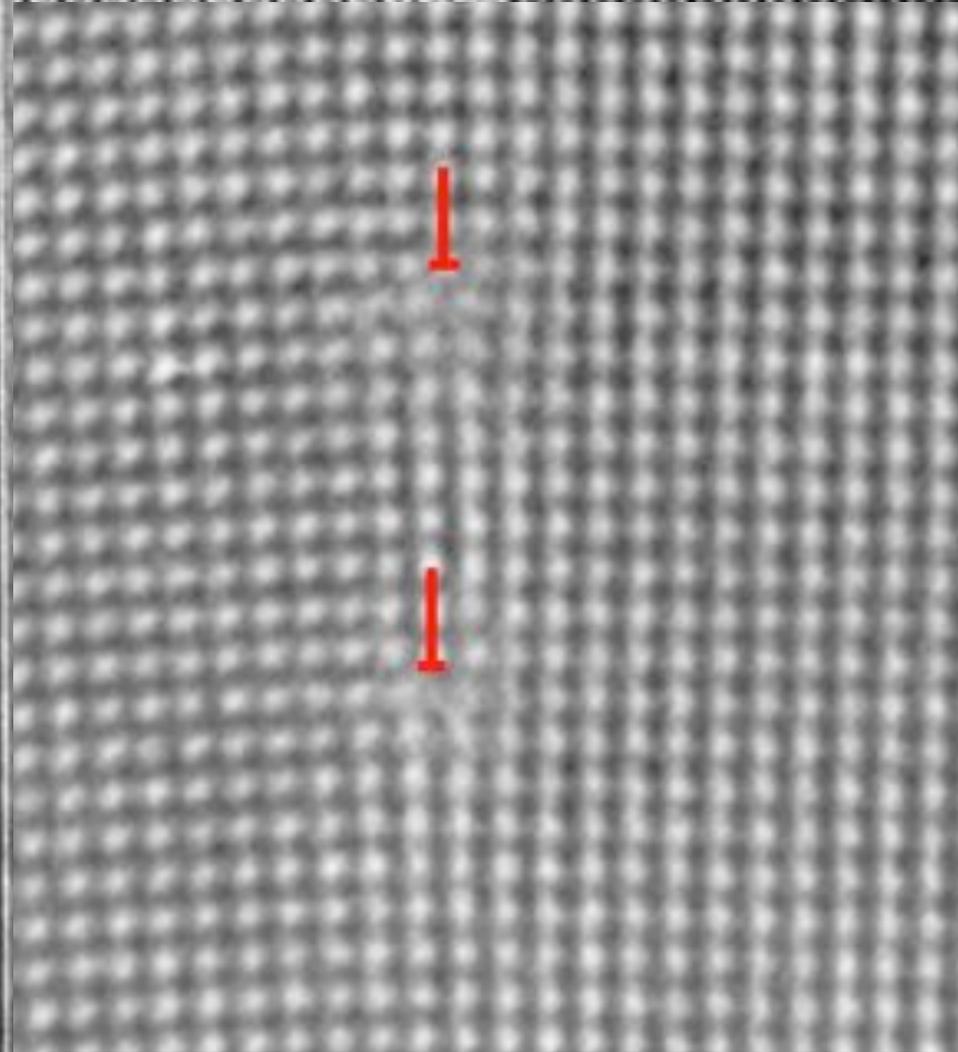
- Erzeugung von Dislokationen
- Dislokationen behindern sich
- geschwindigkeitbestimmend werden Diffusionsprozesse

# aus schnell wird langsam

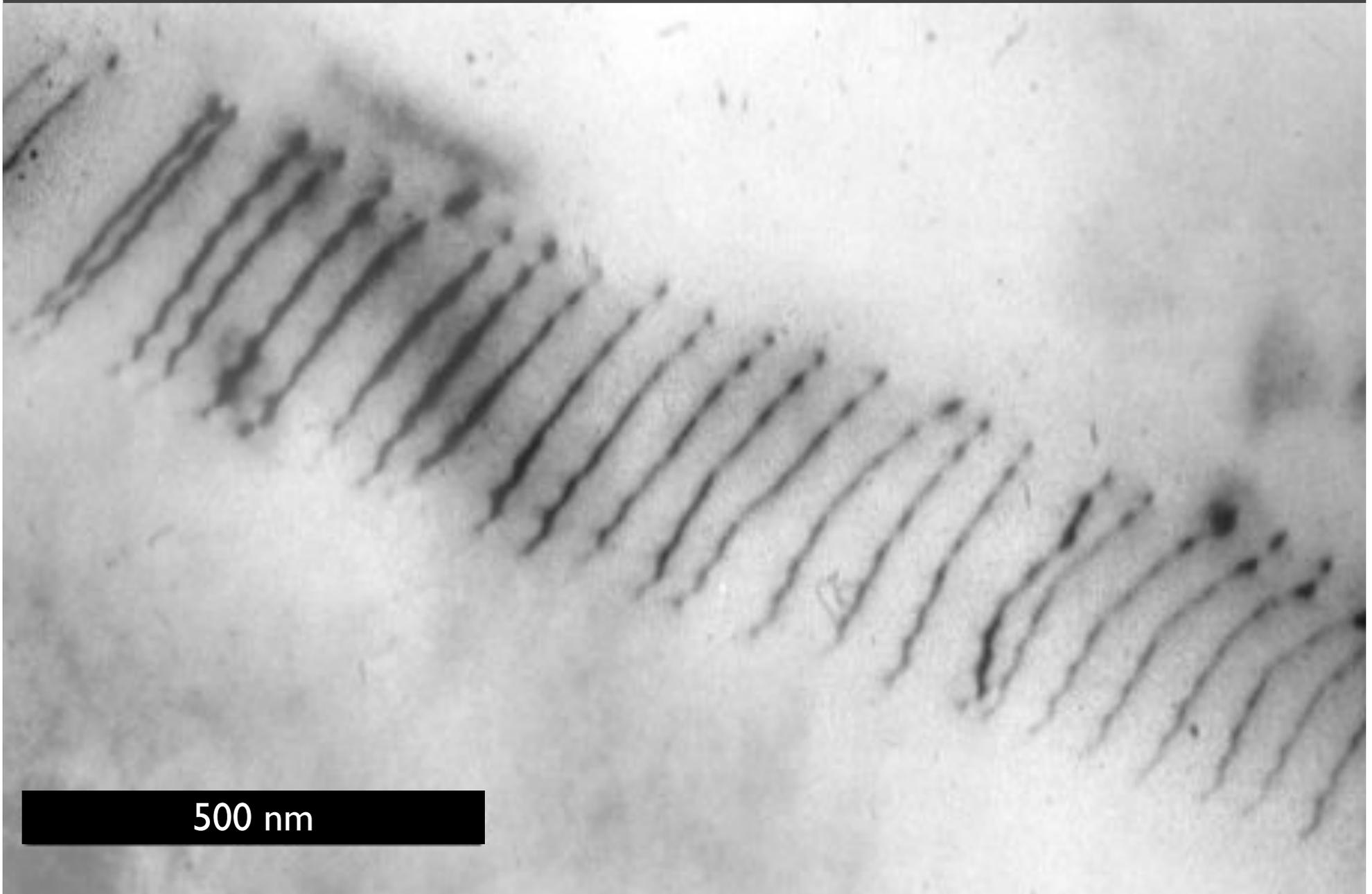
nochmals Stufenversetzungen  
(edge dislocations)



aus schnell wird langsam

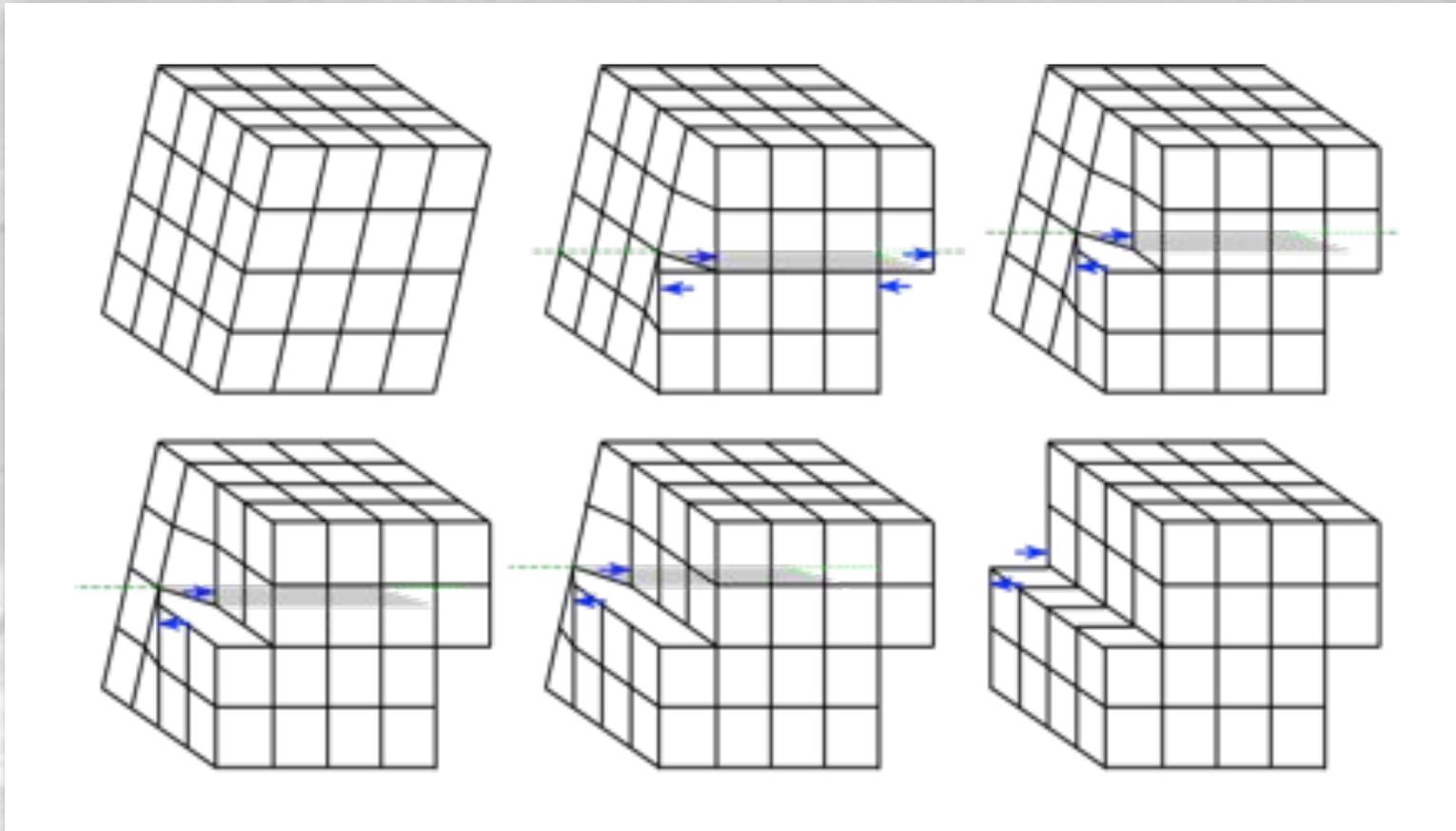


aus schnell wird langsam



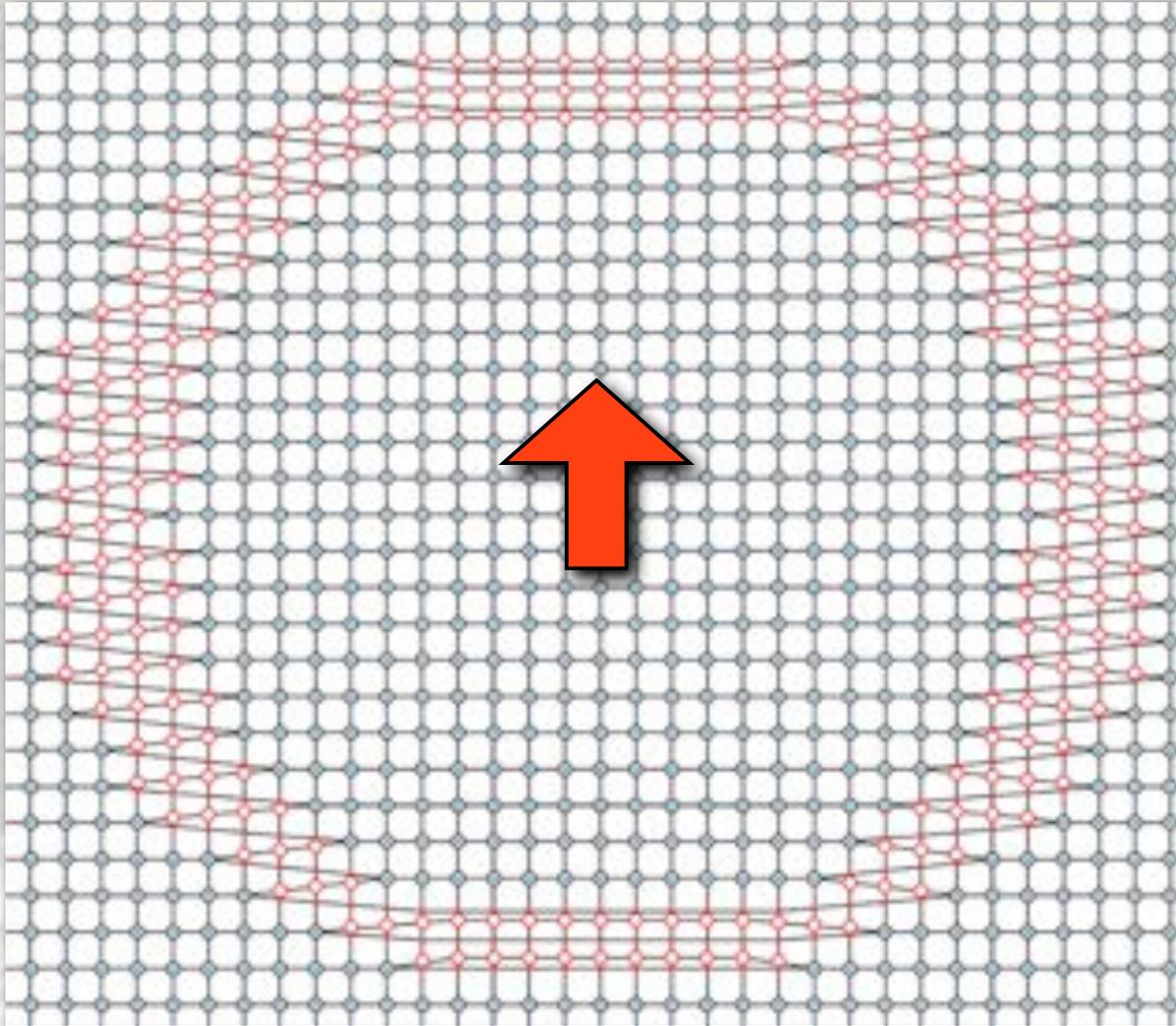
# aus schnell wird langsam

## Schraubenversetzungen (screw dislocations)



aus schnell wird langsam

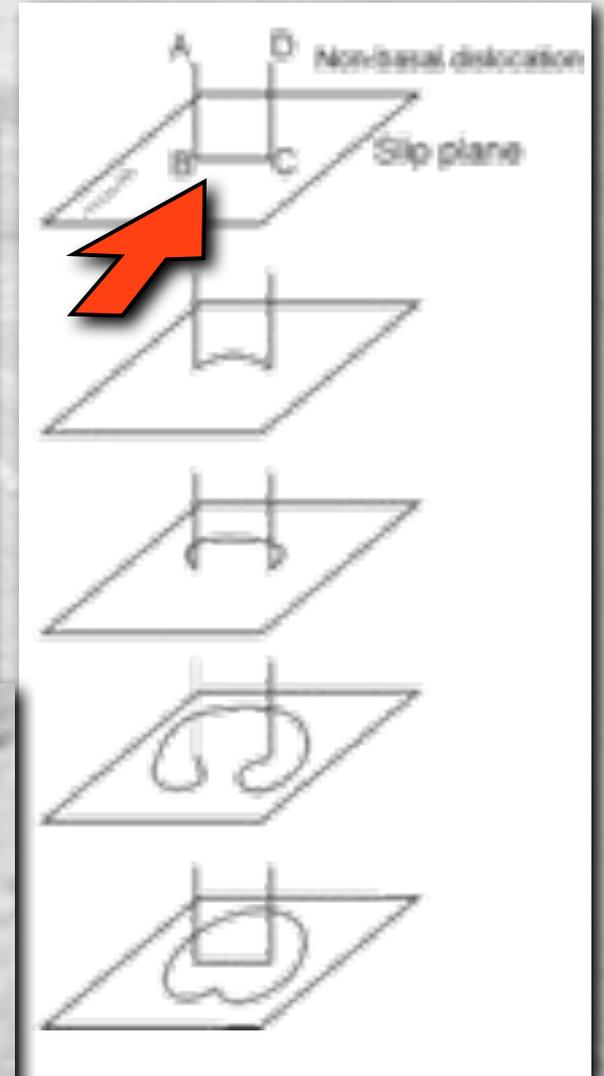
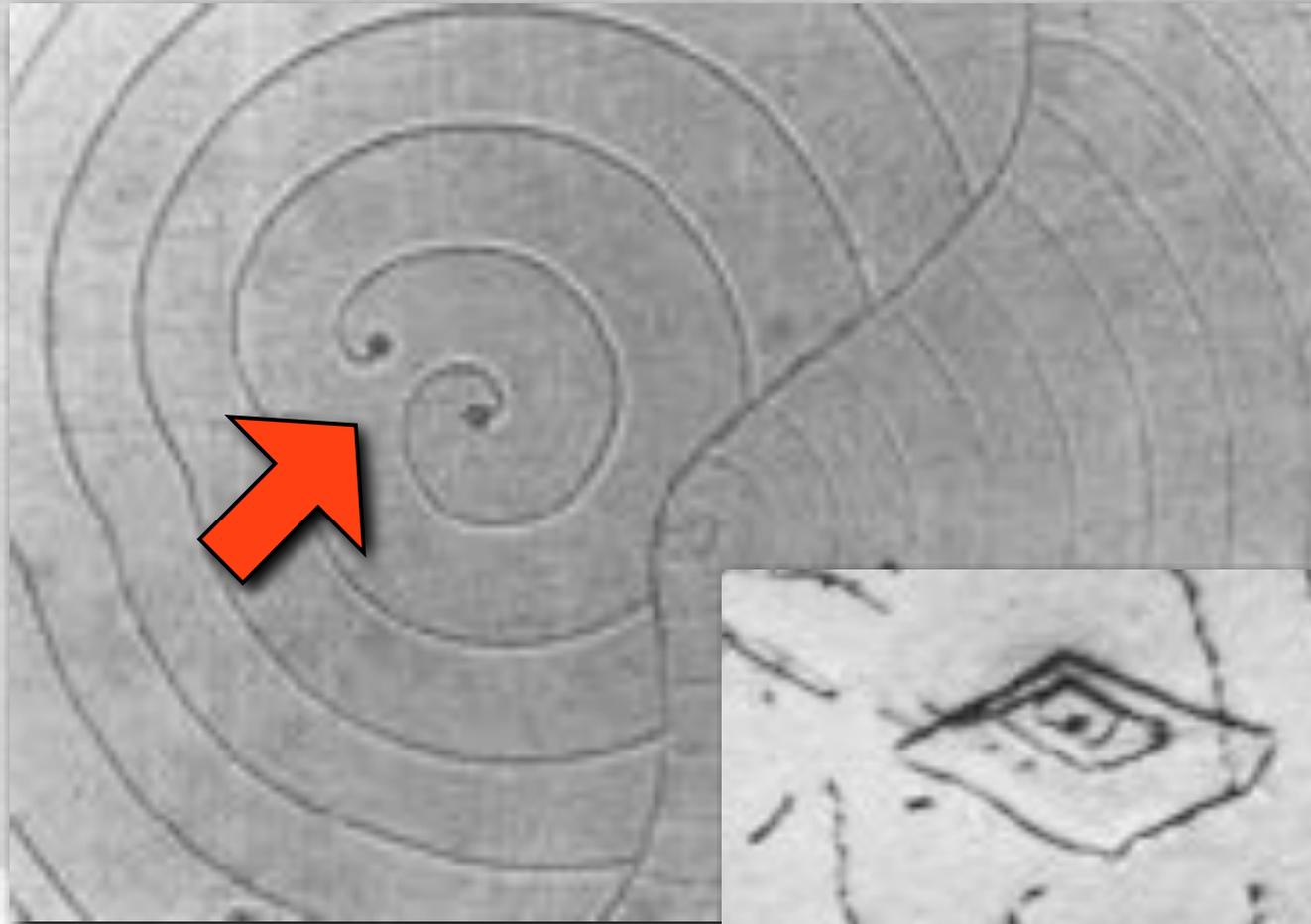
versetzter Bereich



dislocation loop

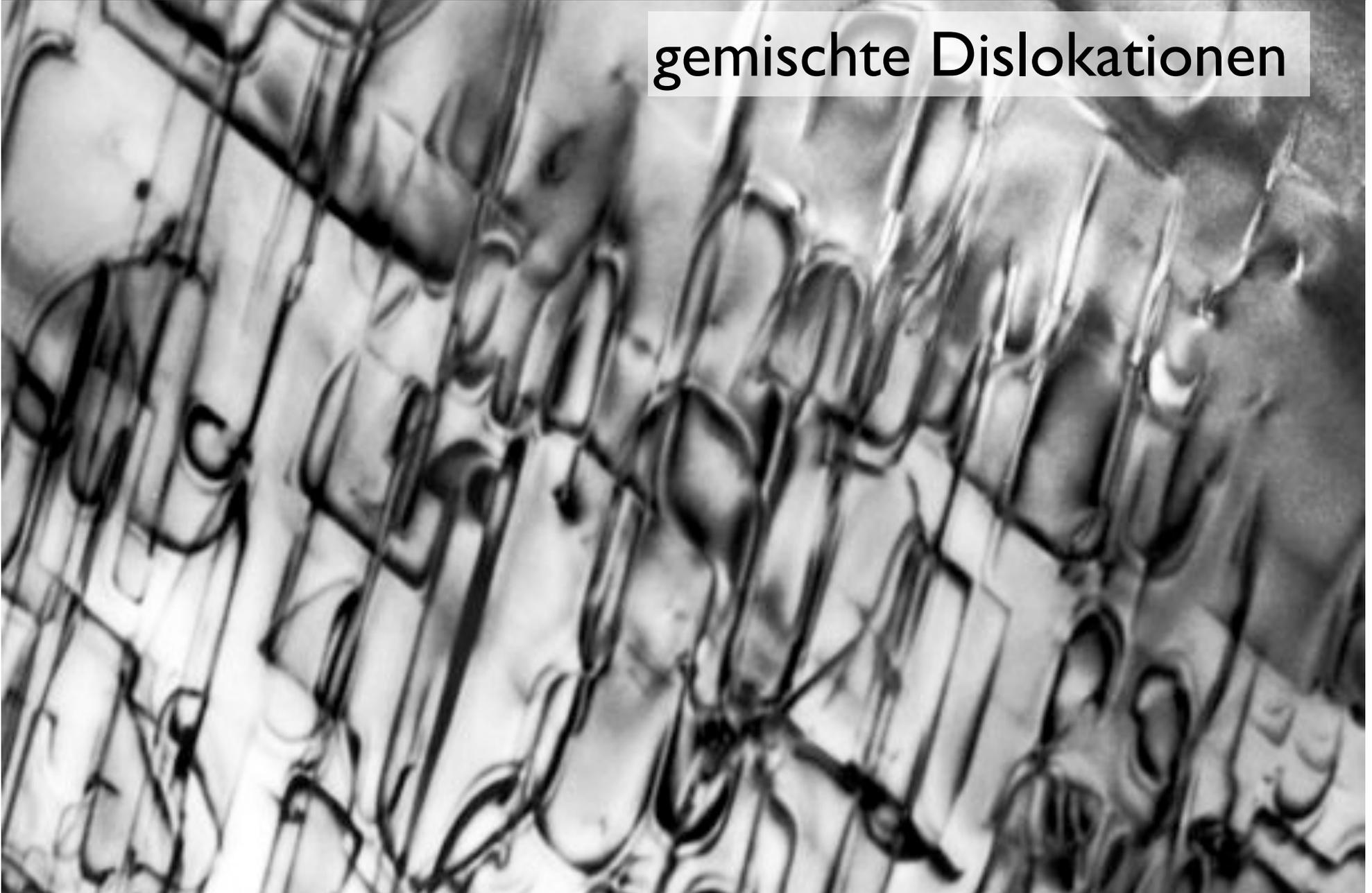
# aus schnell wird langsam

## Frank-Reed sources

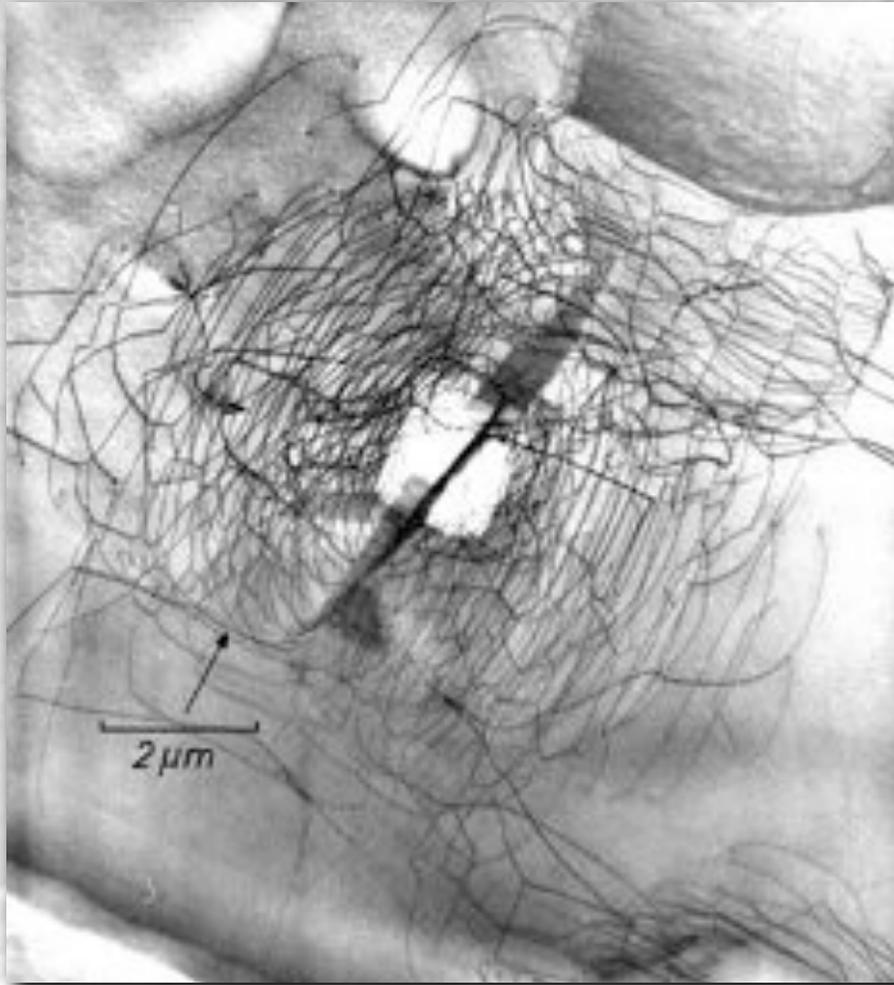


aus schnell wird langsam

gemischte Dislokationen



aus schnell wird langsam

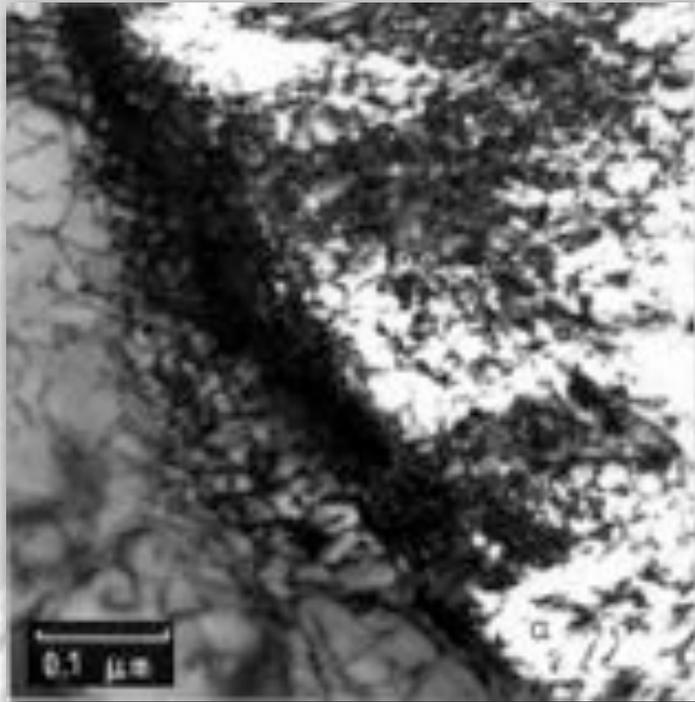


dislocation tangles

aus glissil wird sessil

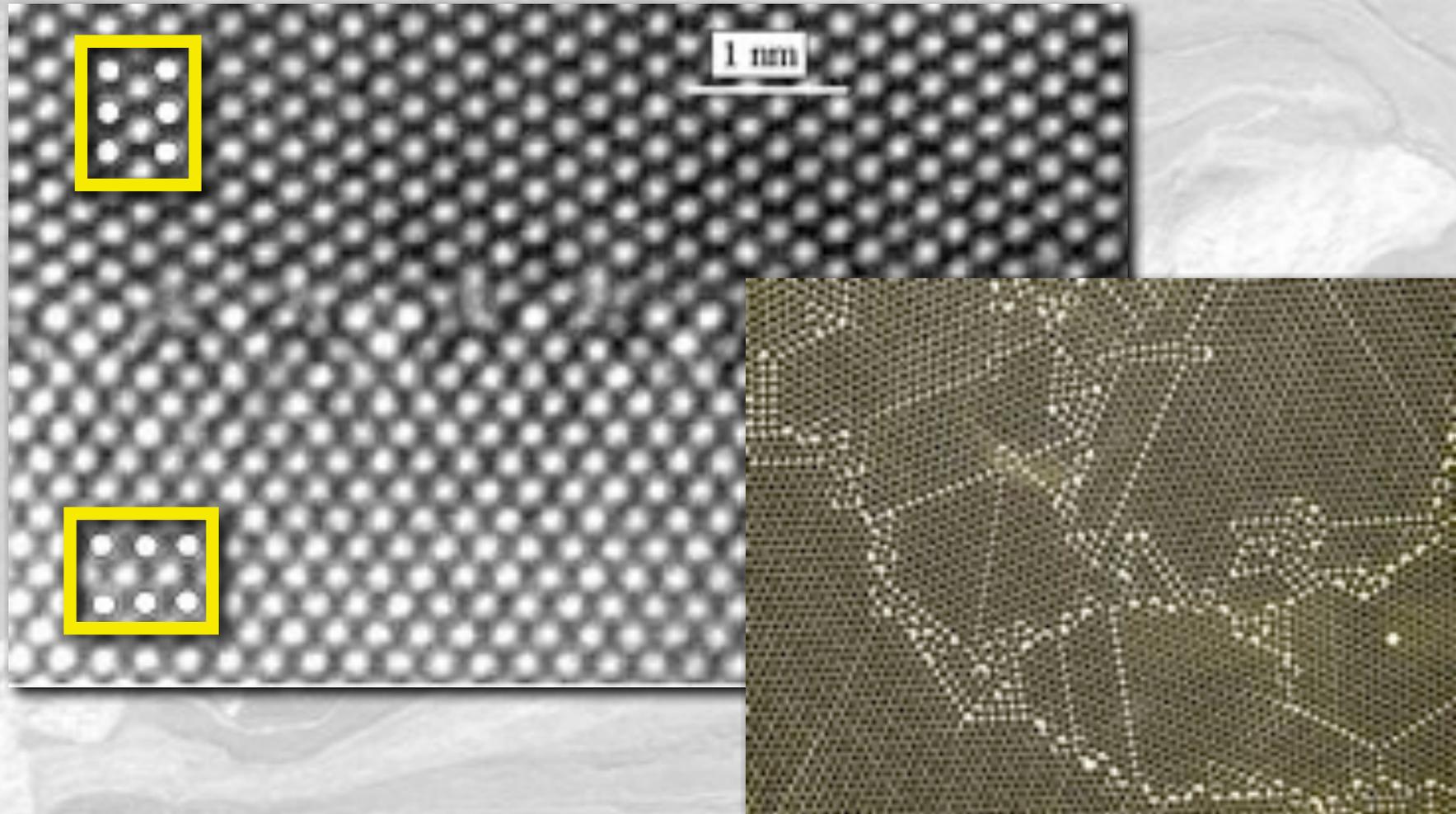
# aus schnell wird langsam

geschwindigkeitbestimmend werden  
Diffusionsprozesse



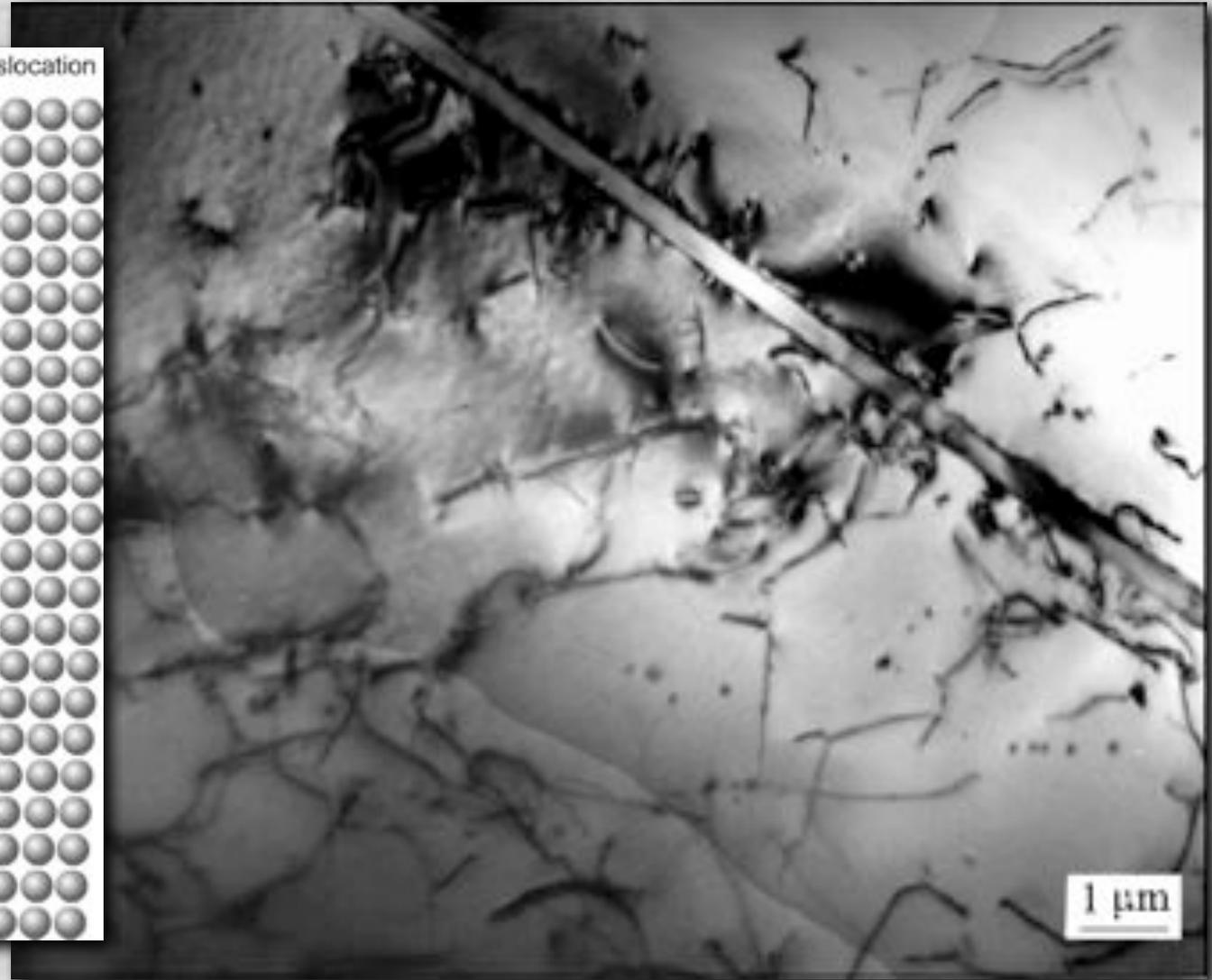
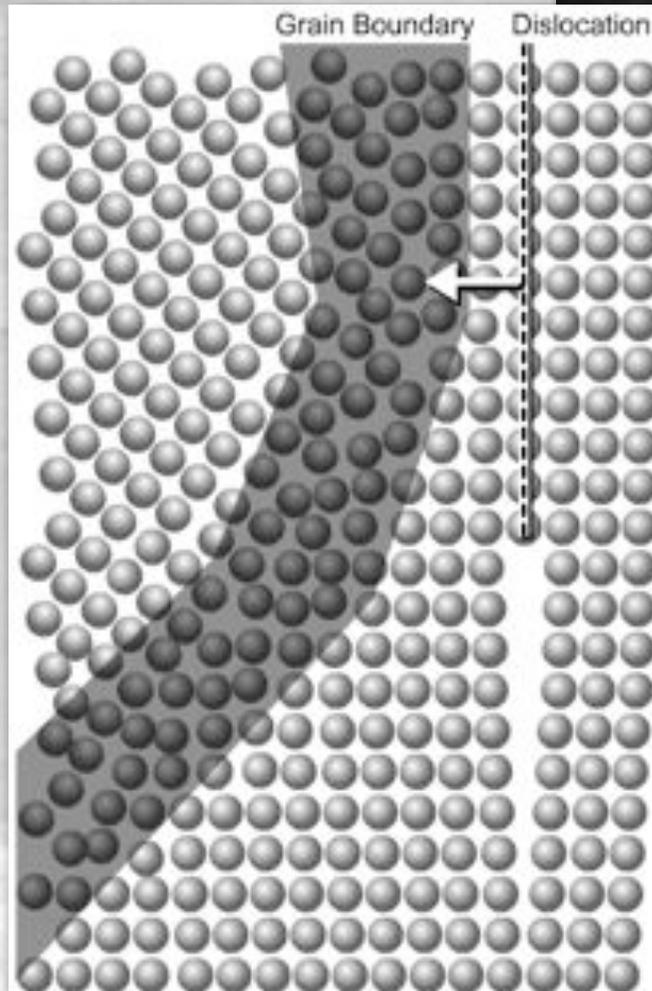
# aus schnell wird langsam

## Probleme mit den Nachbarn



# aus schnell wird langsam

## Probleme mit den Nachbarn



aus schnell wird langsam

Probleme mit den Nachbarn



# aus schnell wird langsam

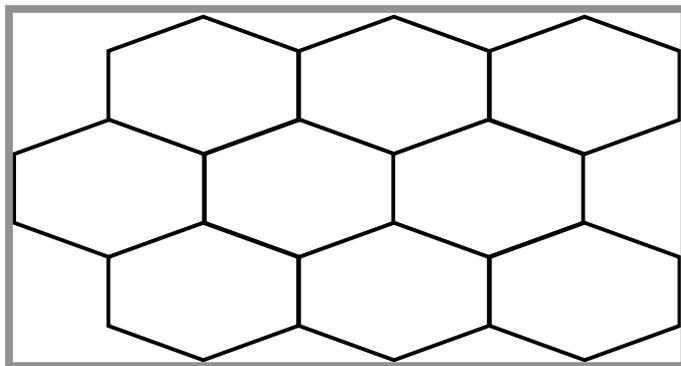
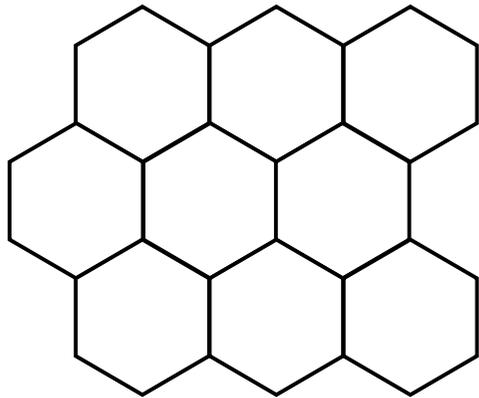
Konkurrenz durch andere  
Verformungsprozesse

Diffusion

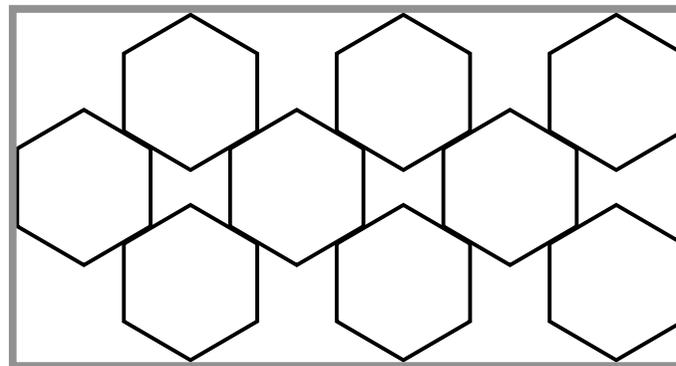
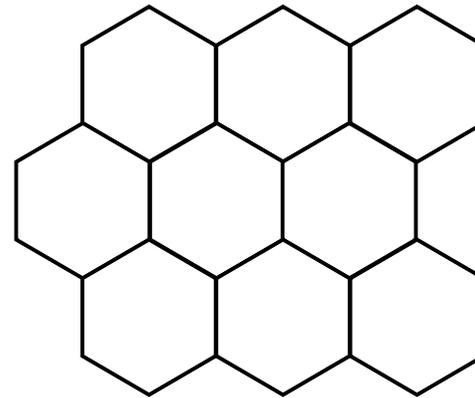
deformation mechanisms

# aus schnell wird langsam

dislocation creep

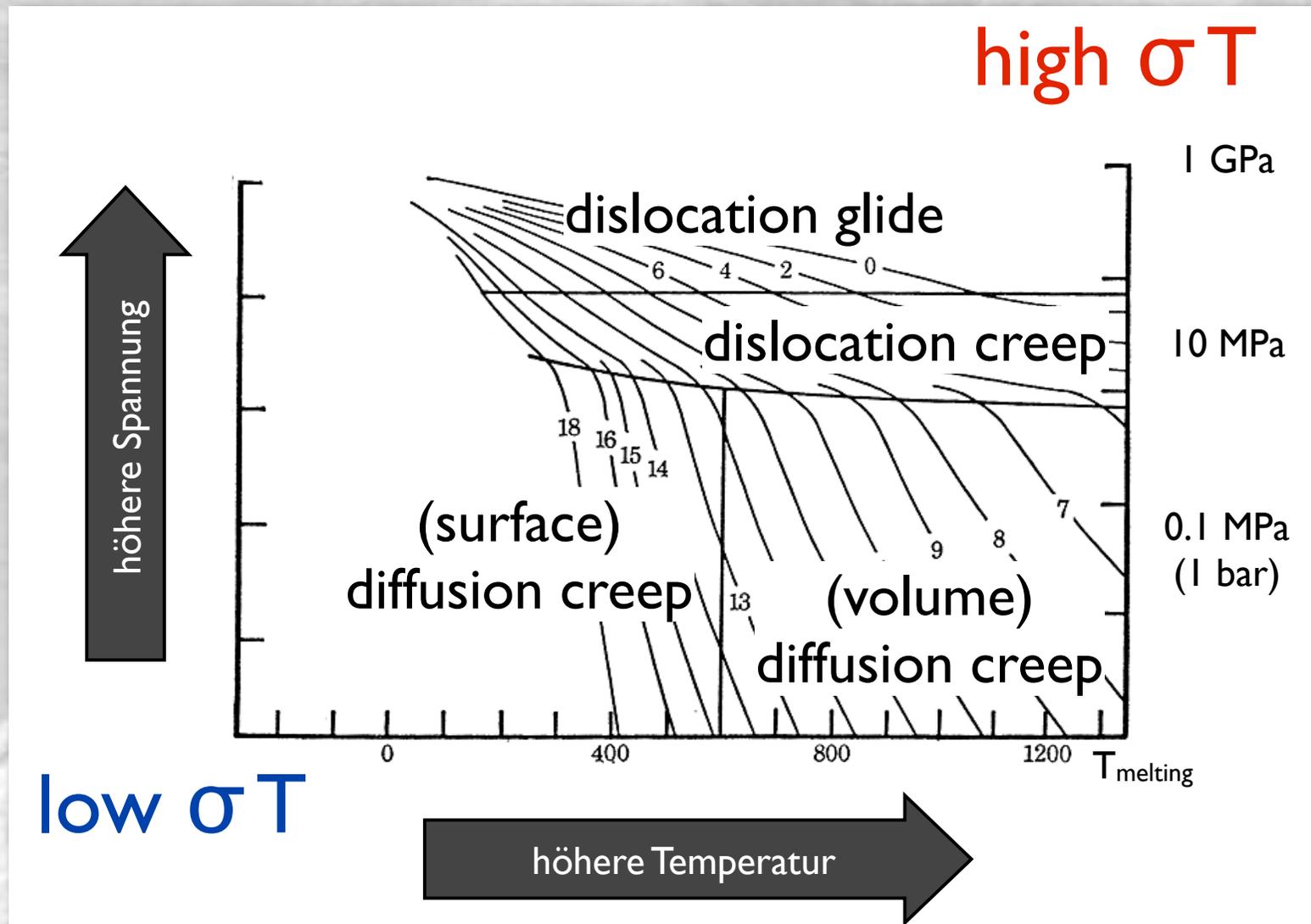


diffusion creep



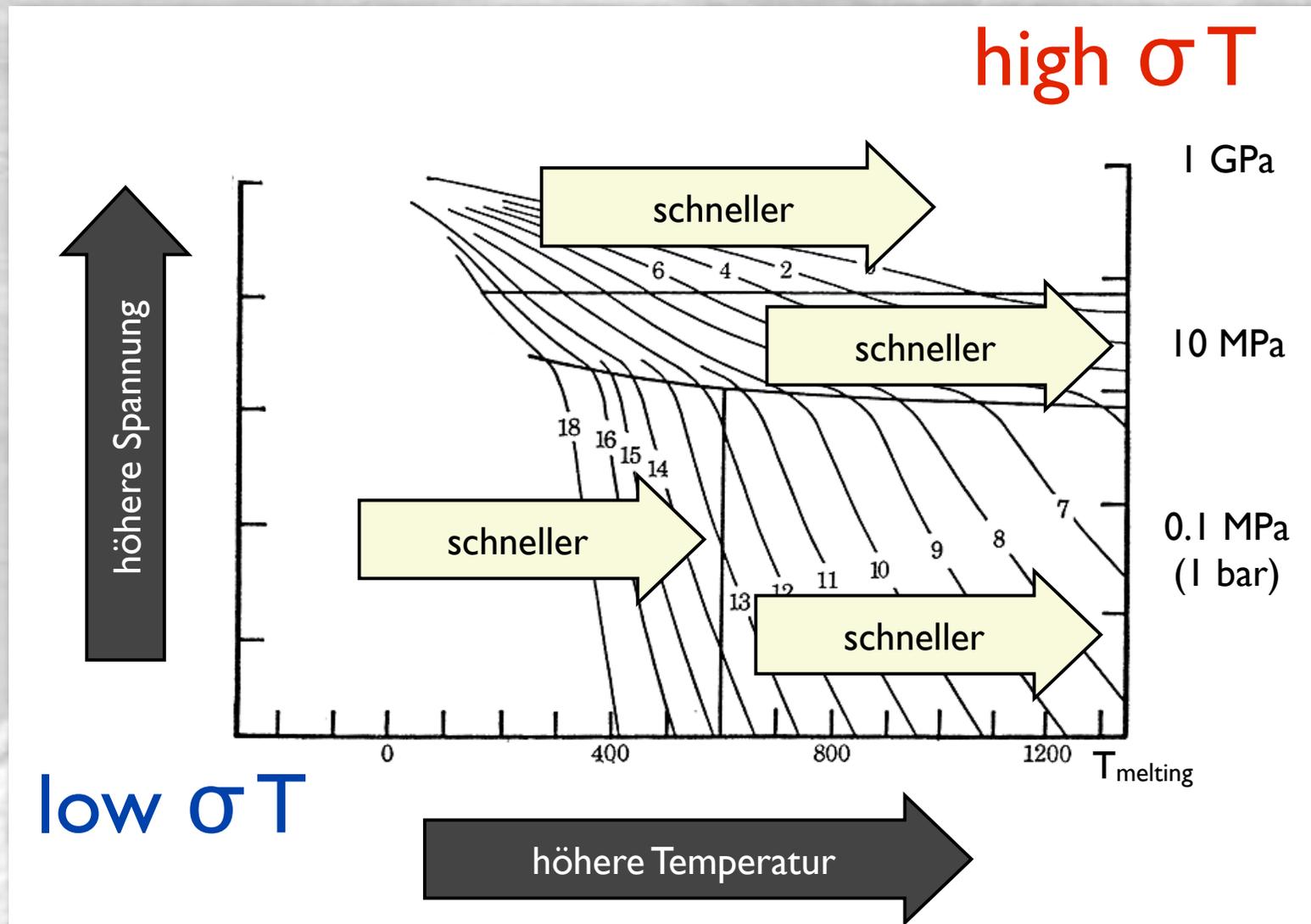
# aus schnell wird langsam

## deformation mechanism map



# aus schnell wird langsam

## deformation mechanism map



# aus schnell wird langsam

komplizierte Materialien  
verhalten sich kompliziert:

Einkristalle

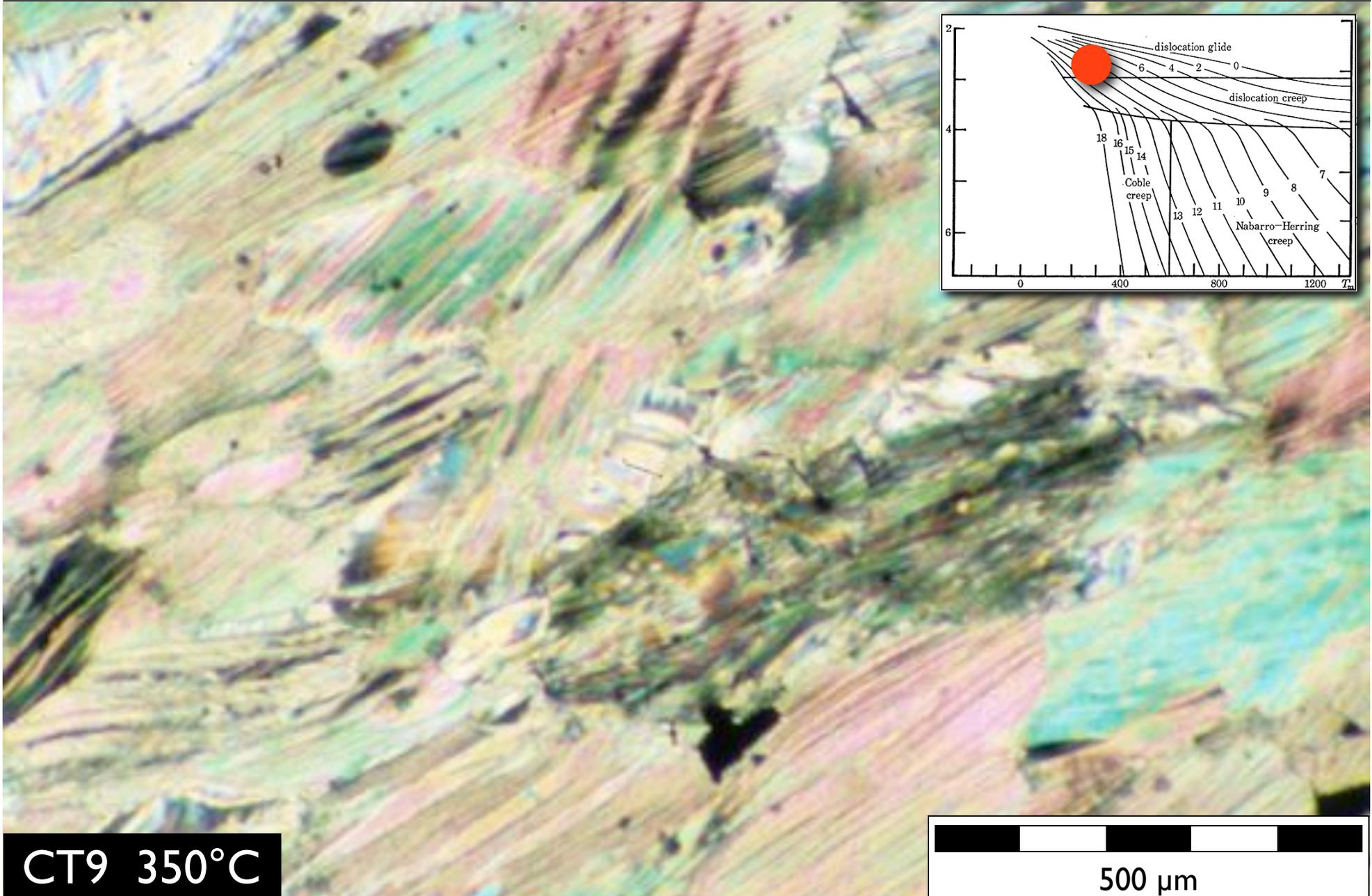
Quarz - Kalzit - ...

Polykristalle

Quartzit - Marmor ...

Anpassung an äussere Verhältnisse

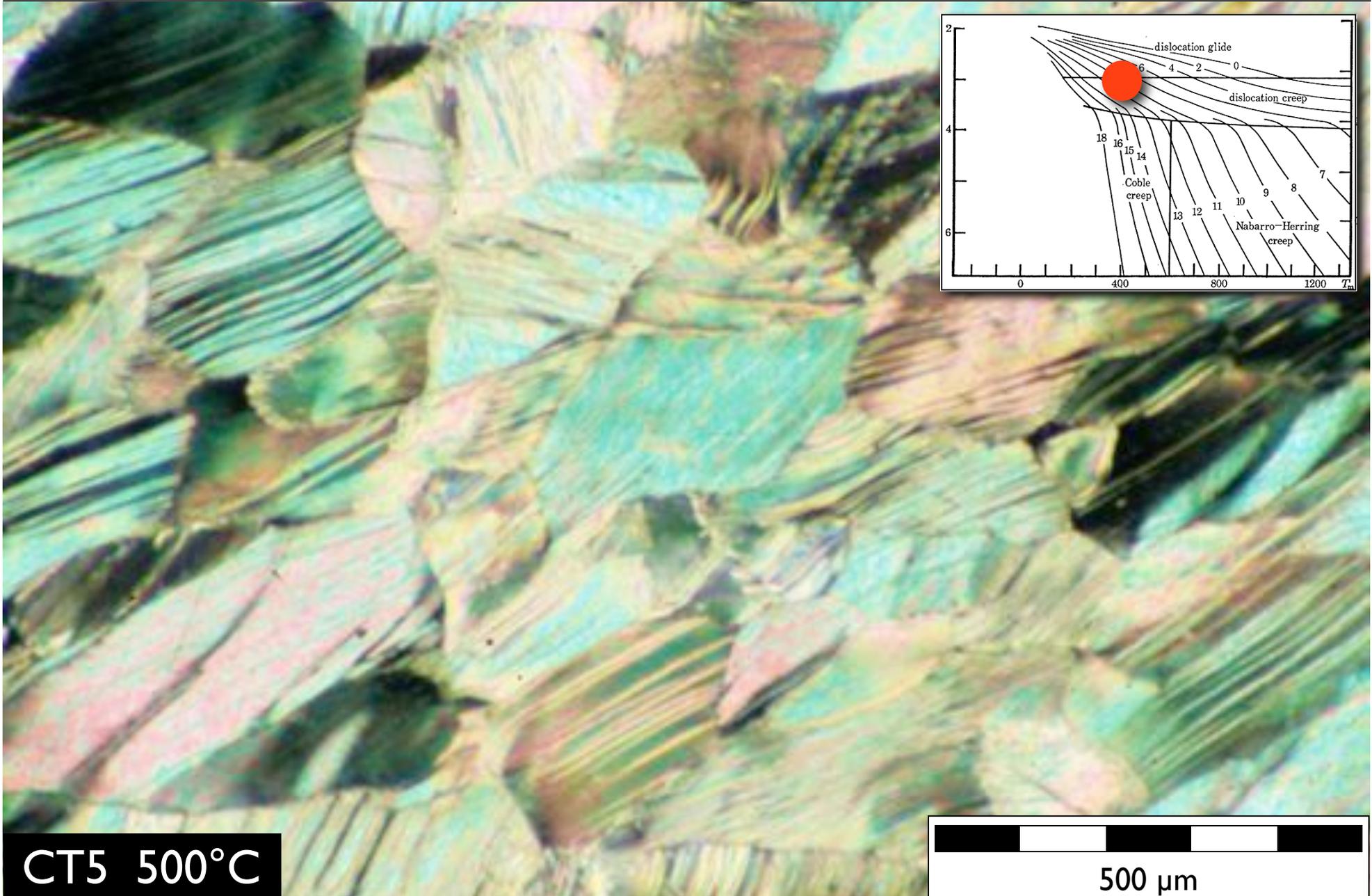
# aus schnell wird langsam



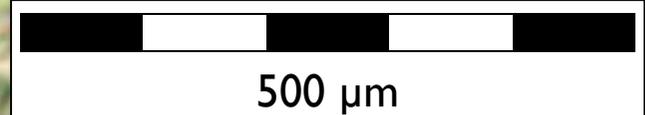
CT9 350°C

500 μm

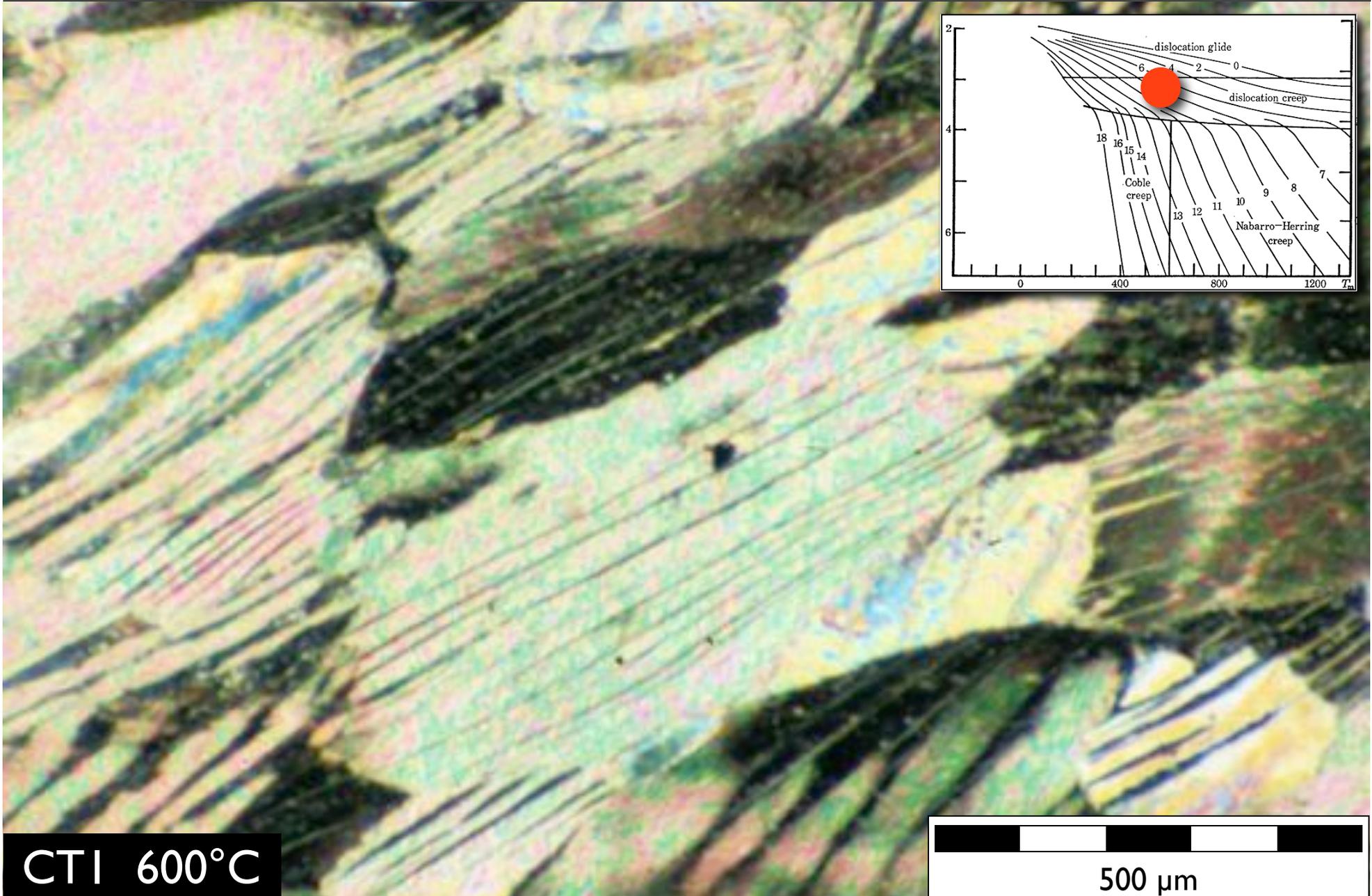
# aus schnell wird langsam



CT5 500°C



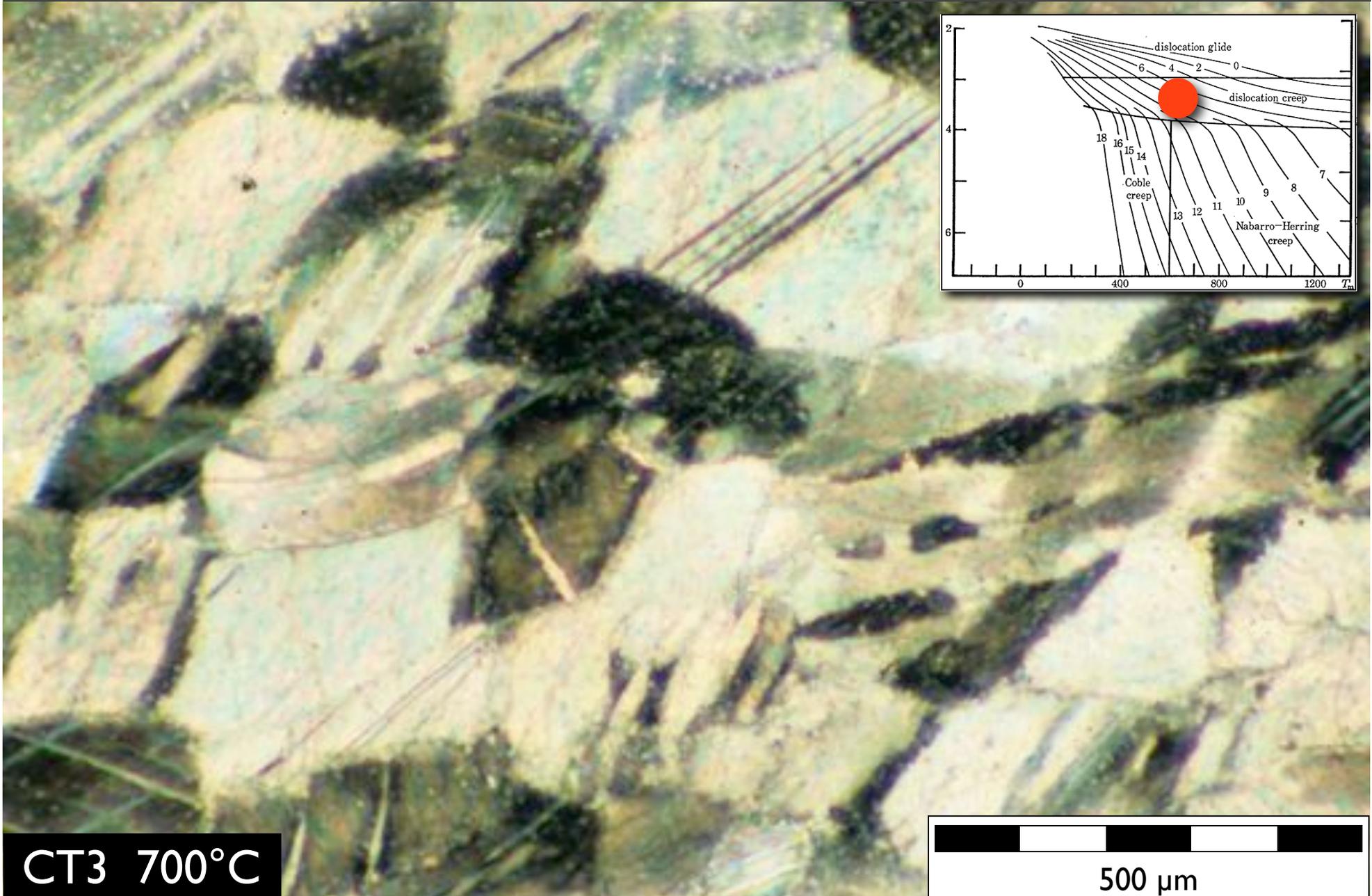
# aus schnell wird langsam



CTI 600°C

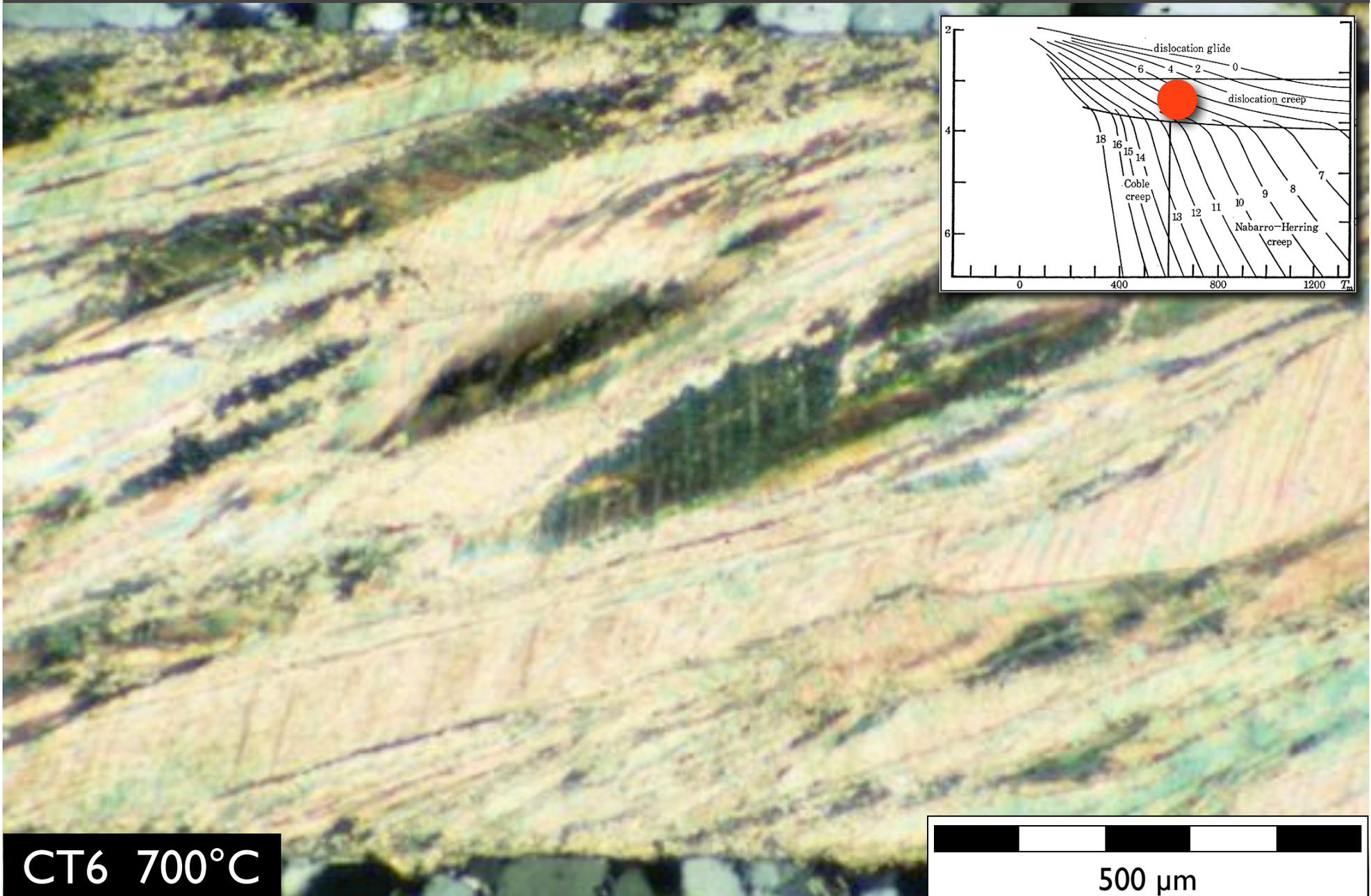
500  $\mu\text{m}$

# aus schnell wird langsam

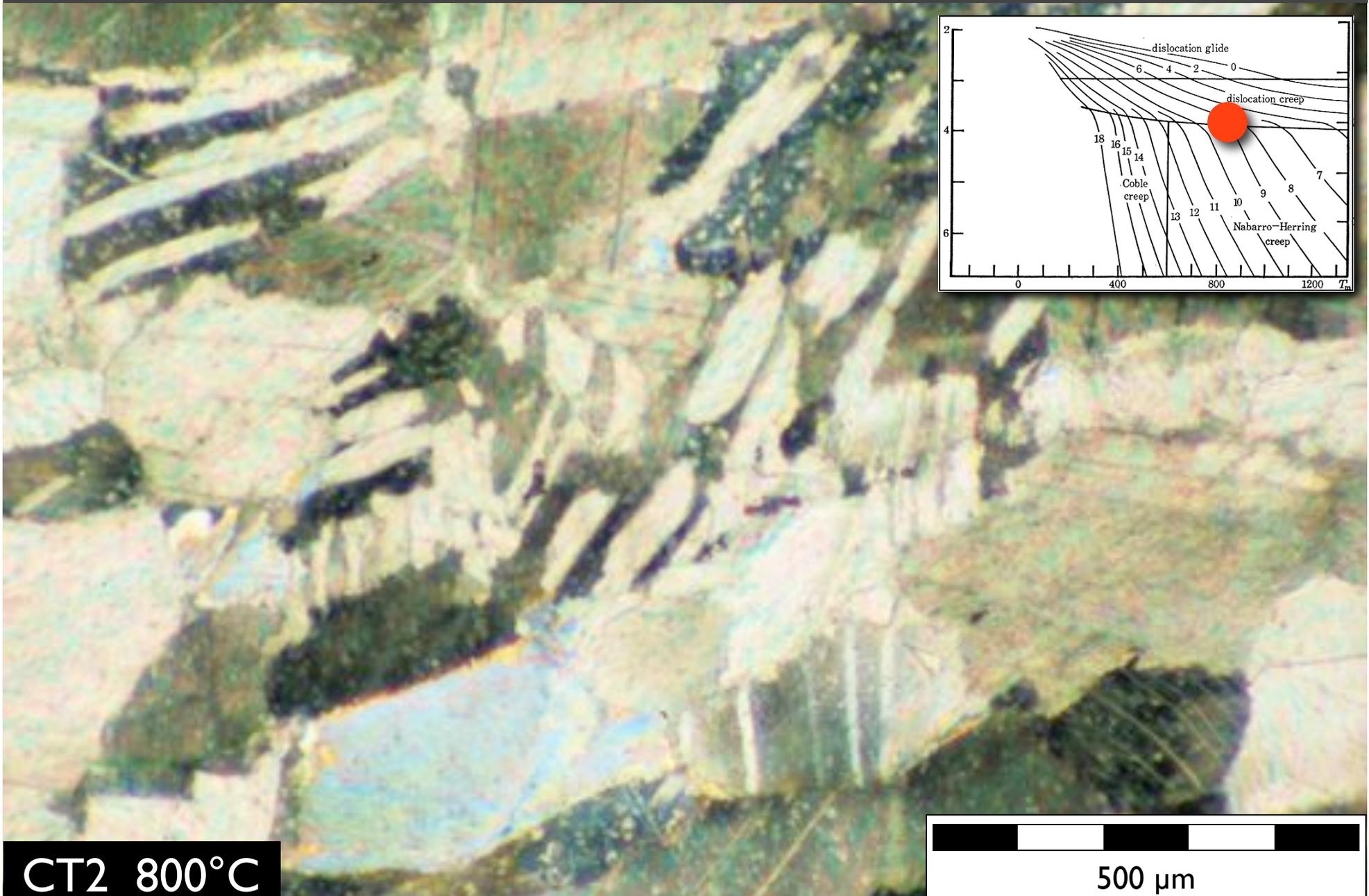


CT3 700°C

# aus schnell wird langsam



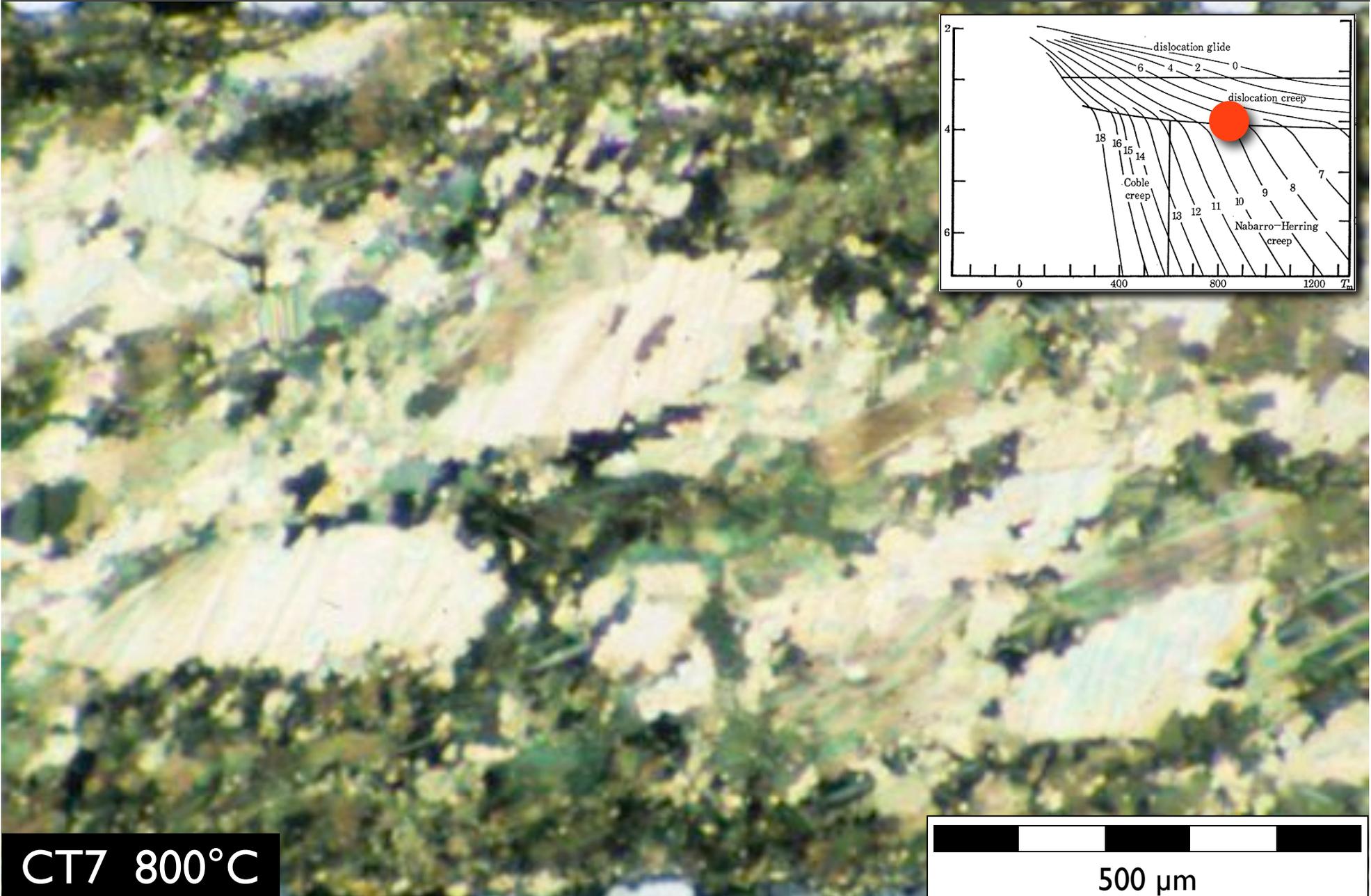
# aus schnell wird langsam



CT2 800°C

500 μm

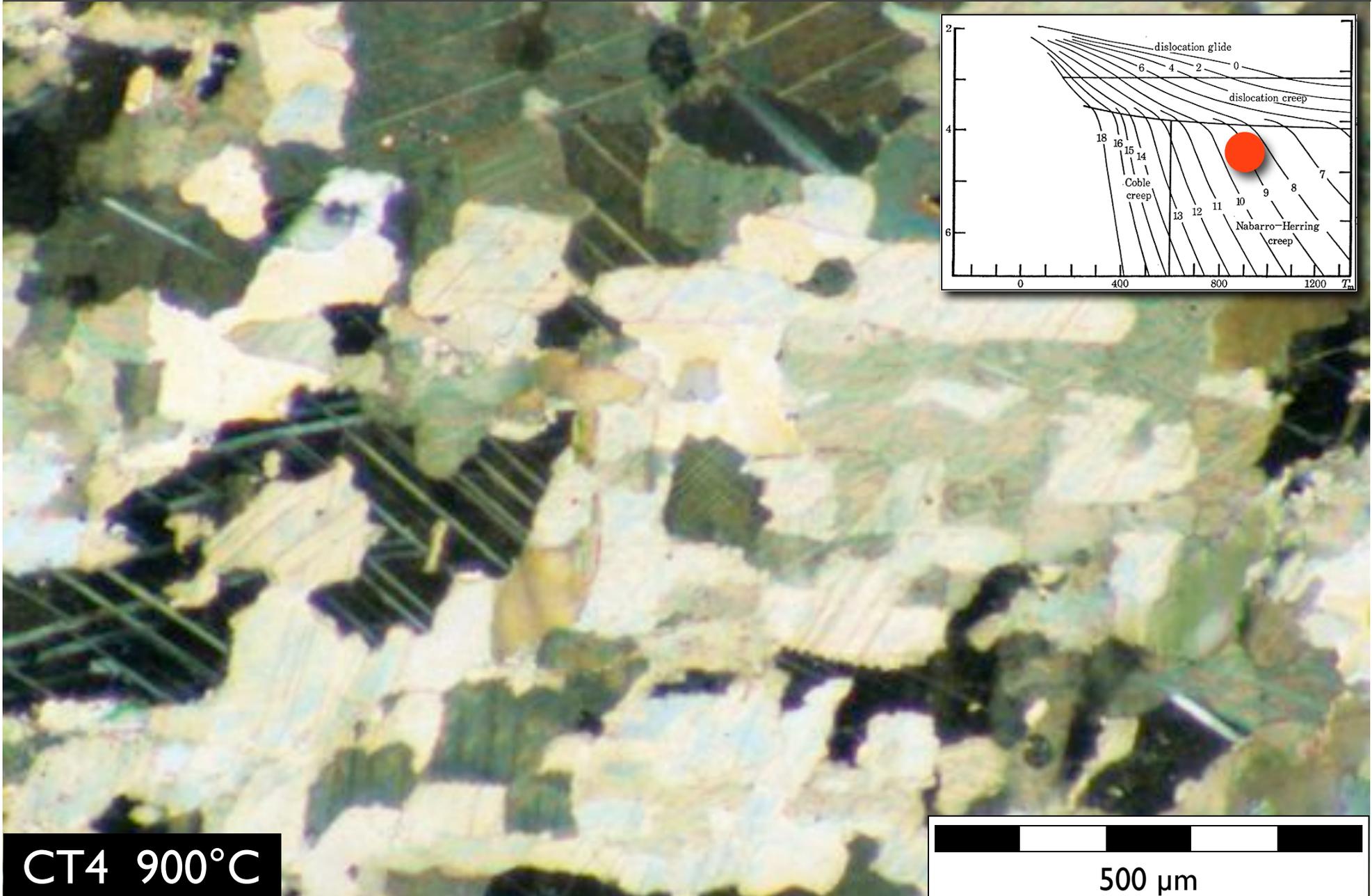
# aus schnell wird langsam



CT7 800°C

500  $\mu\text{m}$

# aus schnell wird langsam



CT4 900°C

500 μm

# aus schnell wird langsam

komplizierte Materialien  
verhalten sich kompliziert:

polyphase Polykristalle  
Granit - Bündnerschiefer ...

Anpassung an äussere Verhältnisse

aus schnell wird langsam

duktile Deformation



aus schnell wird langsam

spröde Deformation



# von klein wieder nach gross

aus vielen kleinen Einzelschritten  
wird ein Gesamtverhalten

Gesamtverhalten...

... Maximum

... Durchschnitt

... Minimum ?

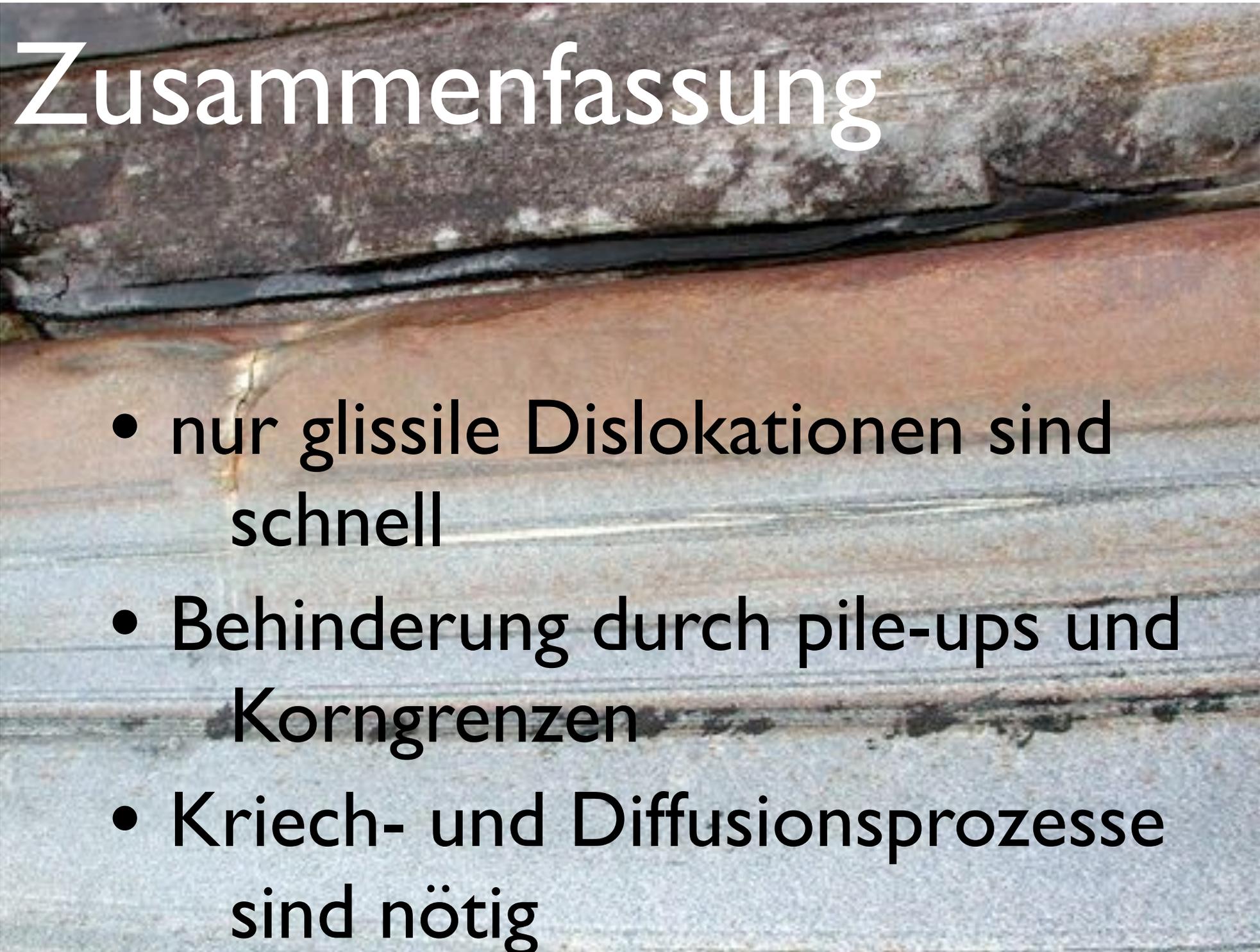
von klein wieder nach gross



von klein wieder nach gross

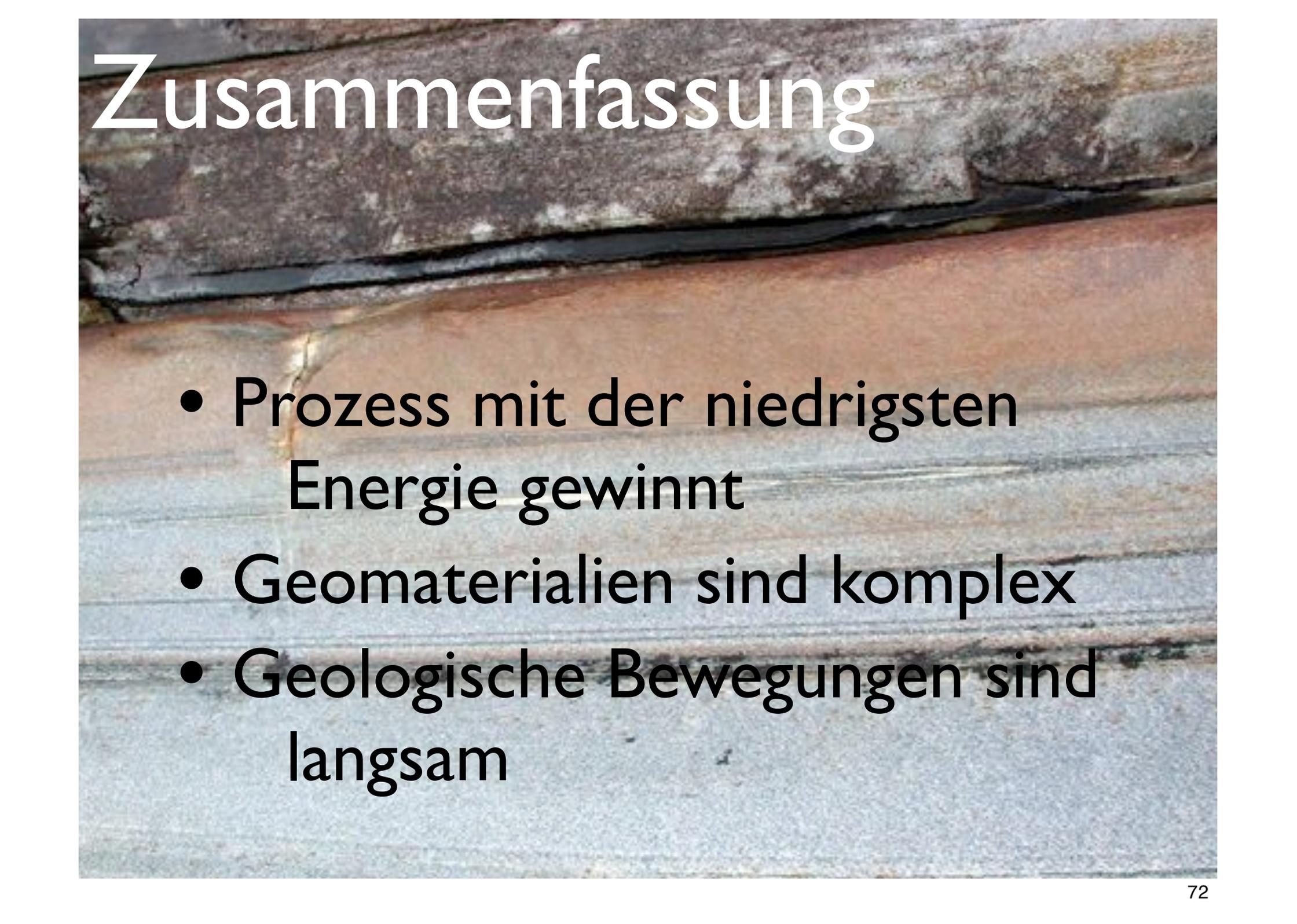


# Zusammenfassung

A microscopic image of a material, likely a metal, showing dislocations and grain boundaries. The image is divided into three horizontal bands of different colors: a dark grey band at the top, a reddish-brown band in the middle, and a light grey band at the bottom. The dark grey band shows a prominent dark line, likely a dislocation. The reddish-brown band shows a network of fine lines, likely grain boundaries. The light grey band shows a more uniform texture with some small dark spots.

- nur glissile Dislokationen sind schnell
- Behinderung durch pile-ups und Korngrenzen
- Kriech- und Diffusionsprozesse sind nötig

# Zusammenfassung



- Prozess mit der niedrigsten Energie gewinnt
- Geomaterialien sind komplex
- Geologische Bewegungen sind langsam

deep earth  
danke für's zuhören...

