



Mineralogija

Sveučilišni prijediplomski studij Znanosti o okolišu – 1. godina (253566)

doc. dr. sc. Petra Schneider

akad. god. 2024./25.

Sadržaj

Rast kristala

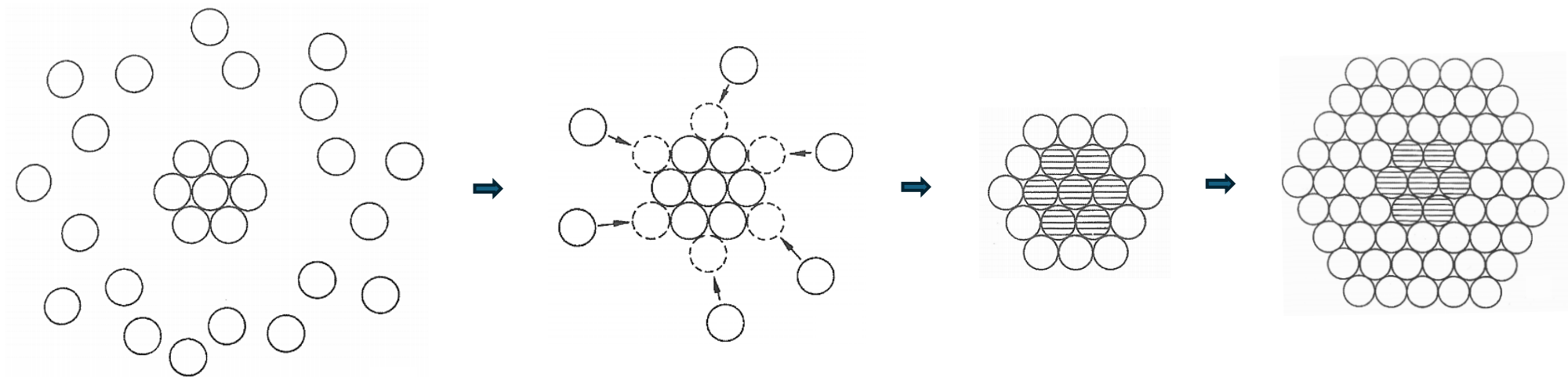
- Morfologija kristala
- Kristali mješanci
- Eksolucija
- Strukturni defekti
- Sraslaci
- Rekristalizacija



Rast kristala

- Iz otopina, taljevine (magne) i plinova
- Promjena uvjeta (p , T , koncentracija) = početak kristalizacije

1. **Nukleacija** = nastanak jezgre kristalizacije → združivanje nekoliko atoma (iona) na način da tvore početak trodimenzionalne periodičke mreže
2. **Rast jezgre u kristal** = jezgra privlači druge slobodne ione, koji zauzimaju svoja mjesta na njezinim plohamama

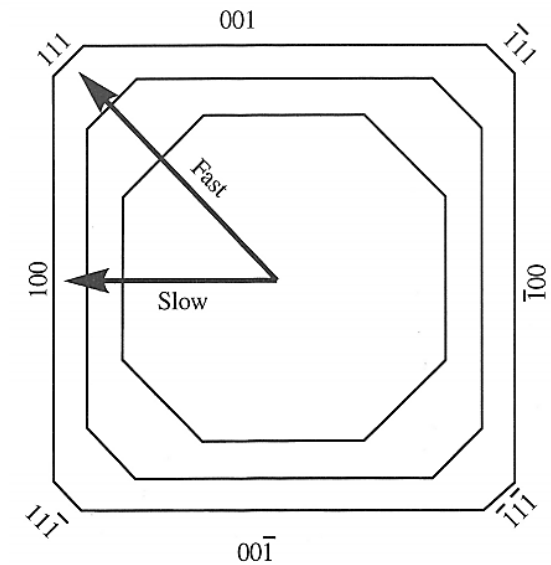
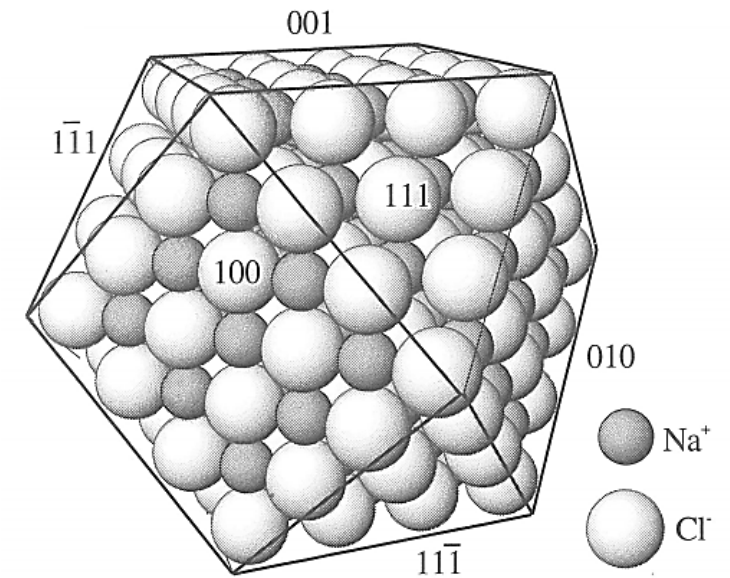
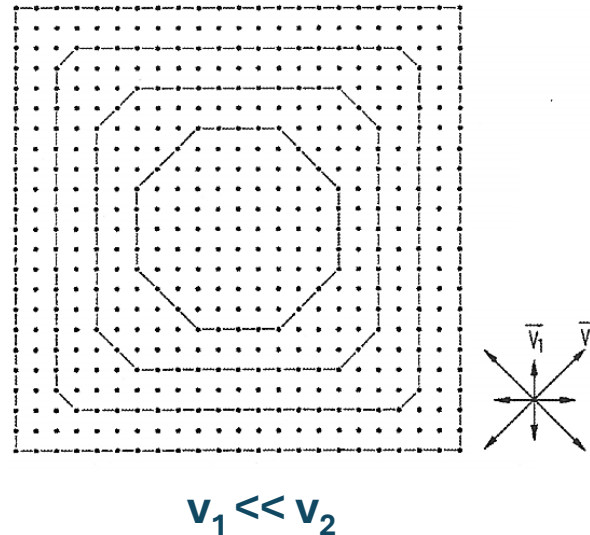
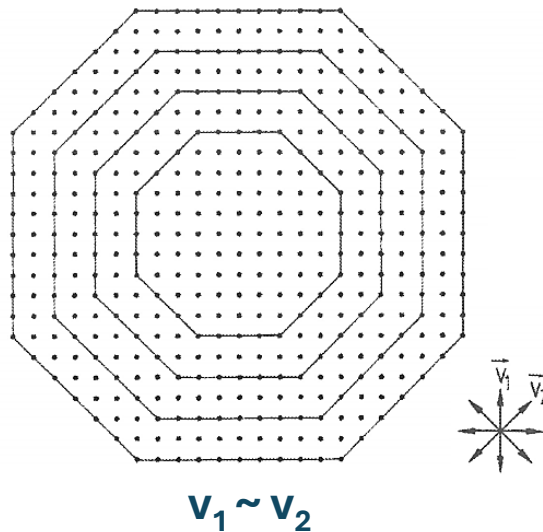


Rast kristala

? Zašto se kod minerala preferirano razvijaju neke plohe, a neke ne?

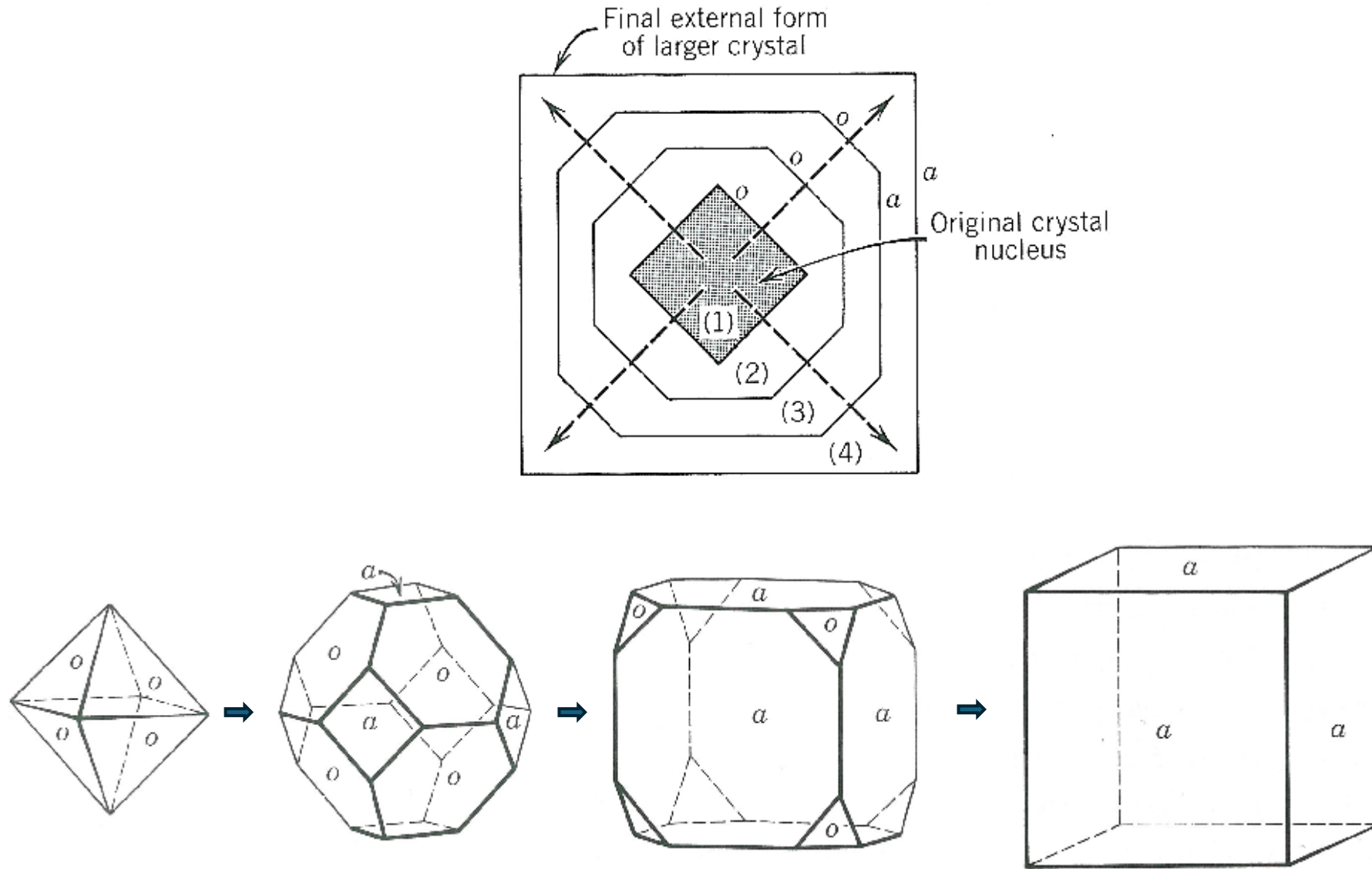
- Plohe većeg energijskog nivoa više privlače nove atome (ione) = brže rastu
- Brži rast plohe = iščezavanje plohe

Primjer: halit, NaCl



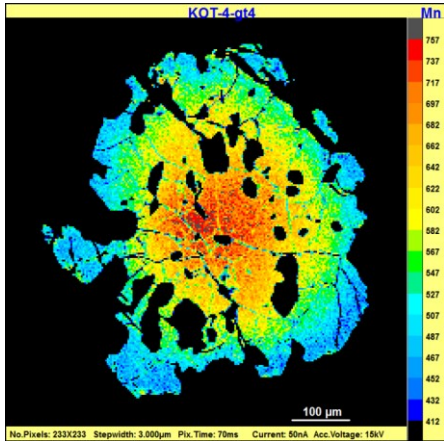
→ razvijaju se plohe „nižih” Millerovih indeksa i veće gustoće atoma

Rast kristala



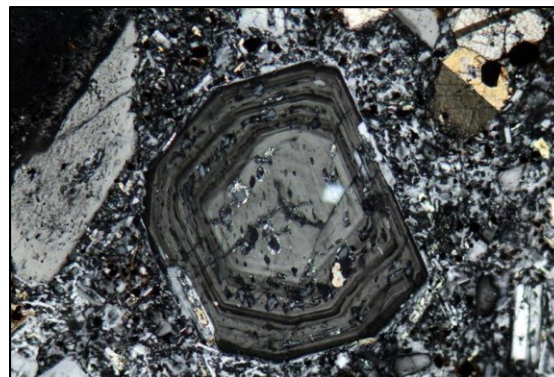
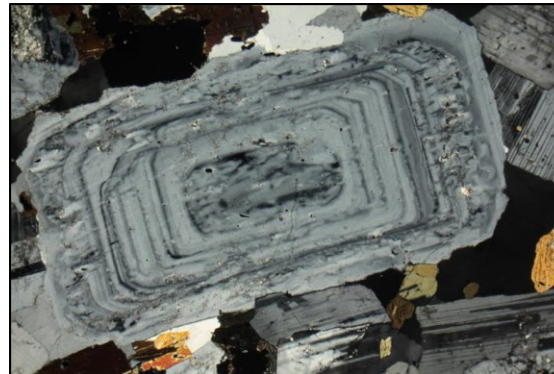
Rast kristala

Zonski rast kristala – promjene u kemijskom sastavu jezgre i ruba

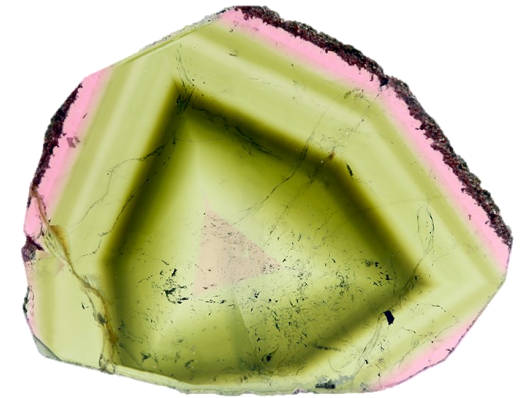


granati

plagioklasi, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

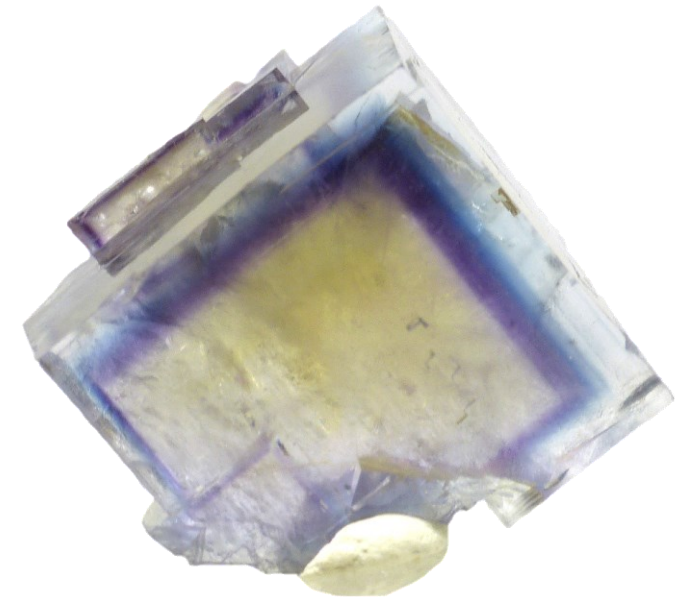


Izvor fotografija: <https://www.alexstrekeisen.it>



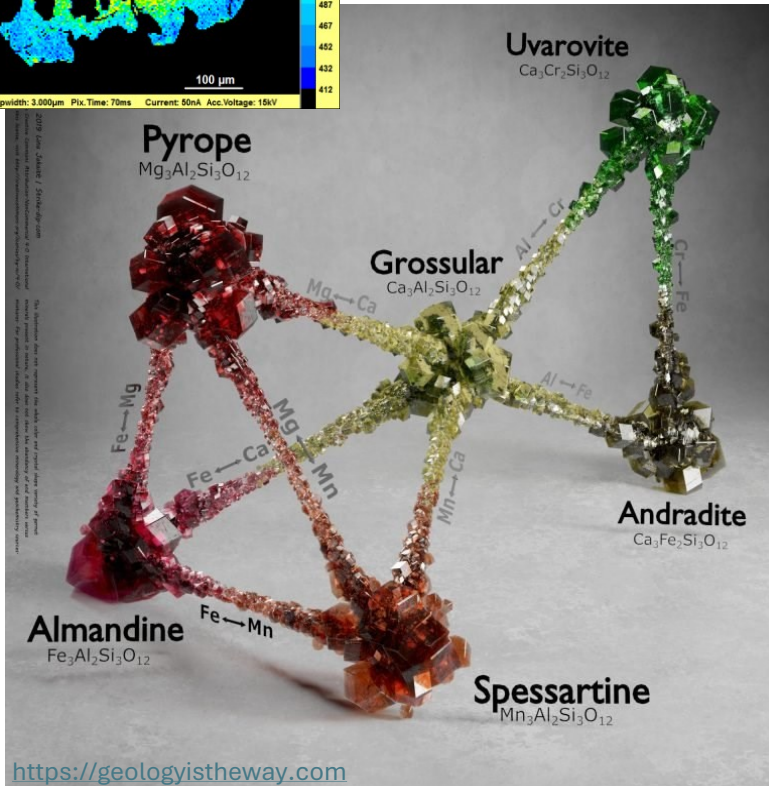
turmalin

<https://www.unearthedgemstones.com>



fluorit, CaF_2

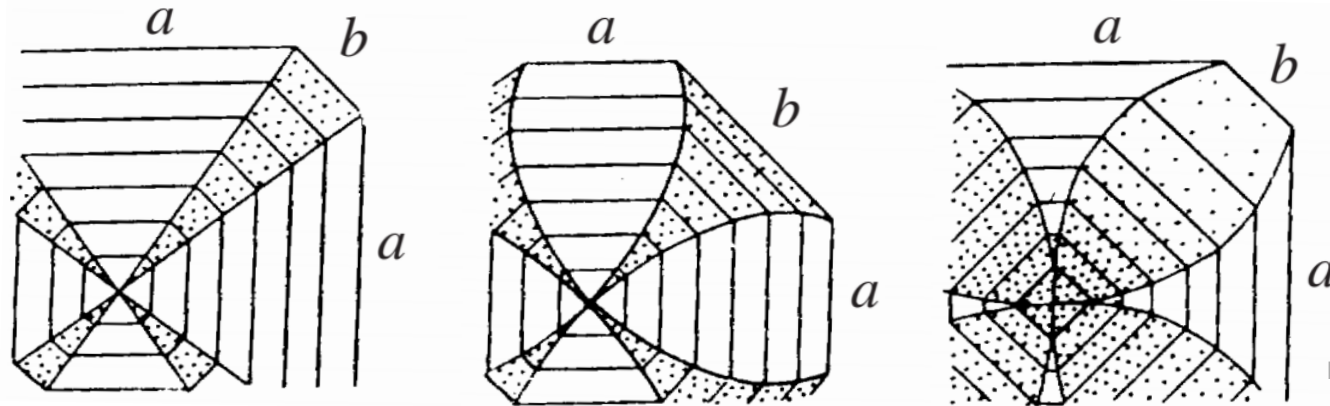
<https://www.spiriferminerals.com>



<https://geologyistheway.com>

Rast kristala

Sektorski rast kristala – promjene u kemijskom sastavu pojedinih dijelova kristala duž određenih kristalografskih smjerova



Preuzeto iz Wenk & Bulakh (2006).



hijastolit
(andezit, Al_2SiO_5)



trapiche smaragd
(beril, $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$)



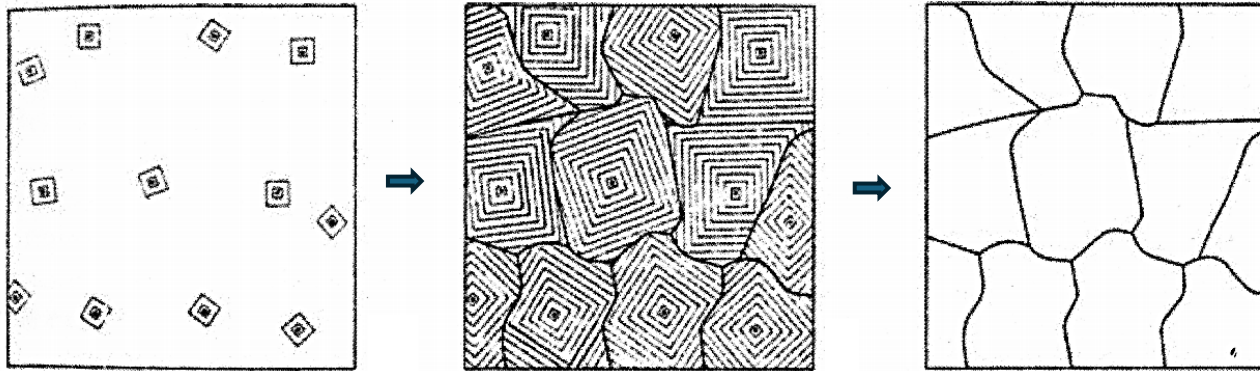
ametrin
(kvarc, SiO_2)



hour-glass zoning
(gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

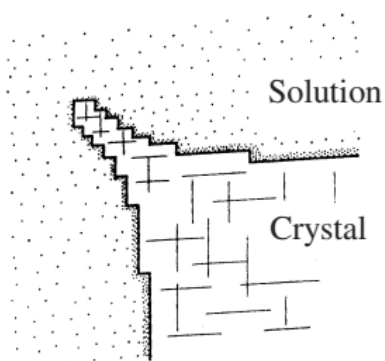
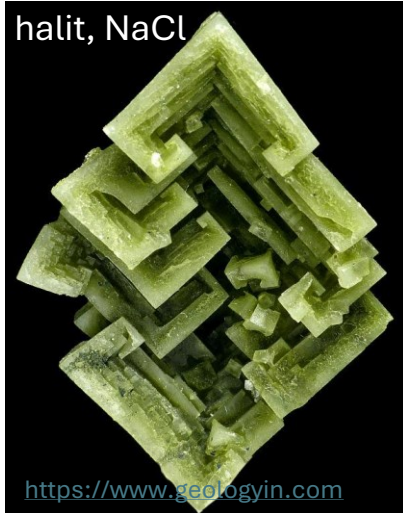
Rast kristala

Nastanak kristalnih agregata

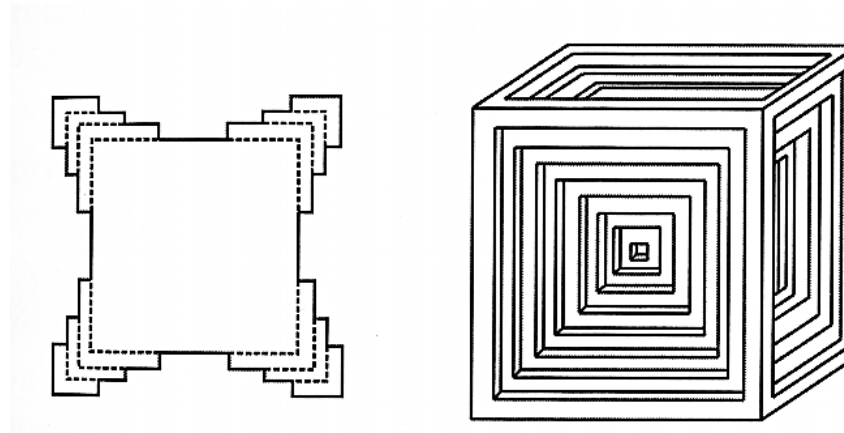


Preuzeto iz Nesse (2000).

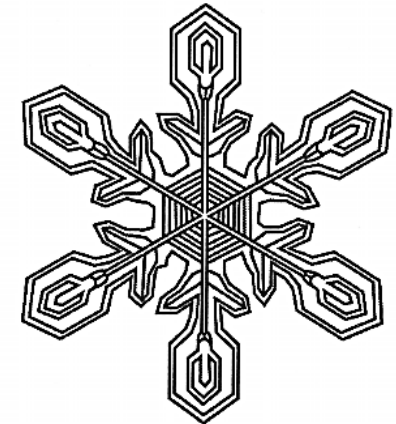
Nastanak skeletnih kristala - brzi rast uz neravnomjieran dotok tvari



Preuzeto iz Wenk & Bulakh (2006).



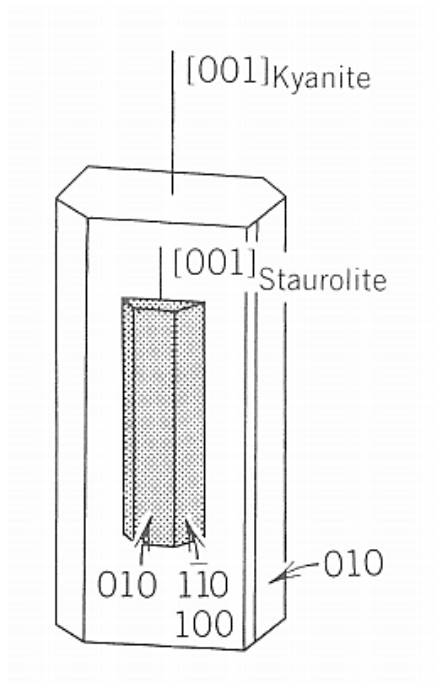
Preuzeto iz Slovenec (2000).



Rast kristala

- **Epitaksijalni rast** = pravilno sraštanje kristala različitog kemijskog sastava ili polimorfnih (ili politipnih) modifikacija

→ vezano s bliskošću građe njihovih kristalnih struktura



epitaksijalni rast
staurolita ($\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{OH})_2^*$, 2/m)
na kjanitu (Al_2SiO_5 , $\bar{1}$)

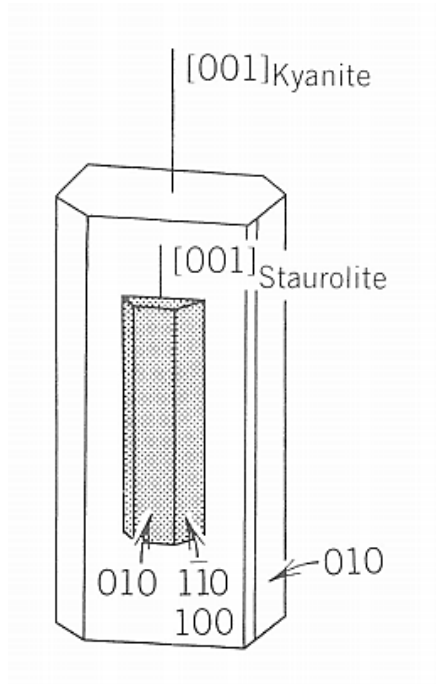
* $4 \text{Al}_2\text{O}[\text{SiO}_4] \cdot \text{AlFe}_2\text{O}_4\text{H}$



Rast kristala

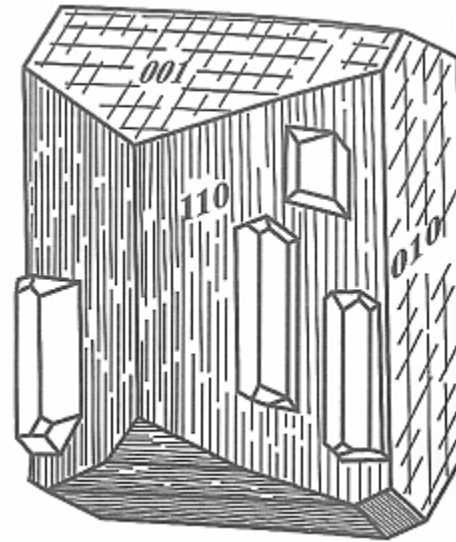
- **Epitaksijalni rast** = pravilno sraščanje kristala različitog kemijskog sastava ili polimorfnih (ili politipnih) modifikacija

→ vezano s bliskošću građe njihovih kristalnih struktura

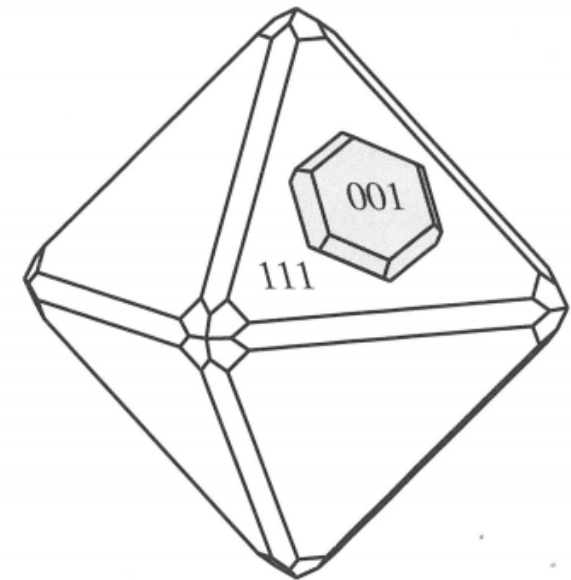


epitaksijalni rast
staurolita ($\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{OH})_2^*$, $2/m$)
na kjanitu (Al_2SiO_5 , $\bar{1}$)

* $4 \text{Al}_2\text{O}[\text{SiO}_4] \cdot \text{AlFe}_2\text{O}_4\text{H}$



epitaksijalni rast
albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\bar{1}$)
na K-feldspatu (KAlSi_3O_8 , $\bar{1}$ ili $2/m$)



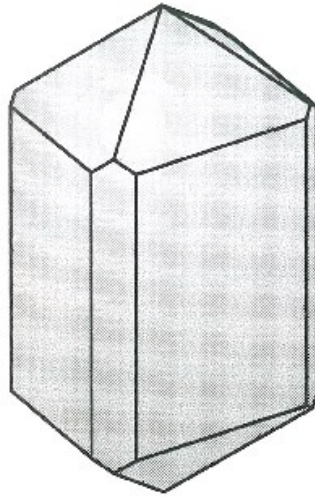
epitaksijalni rast
hematita (Fe_2O_3 , $\bar{3} 2/m$) **na**
magnetitu (Fe_3O_4 , $4/m \bar{3} 2/m$)

Morfologija kristala

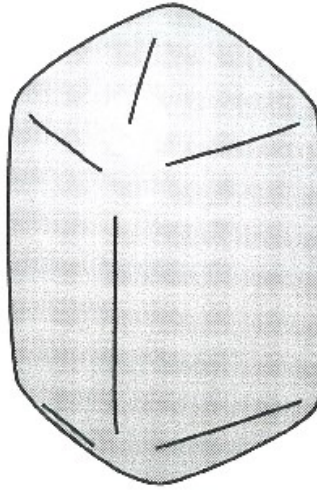
? O čemu ovisi vanjski izgled realnih kristala?

→ o kristalnoj strukturi

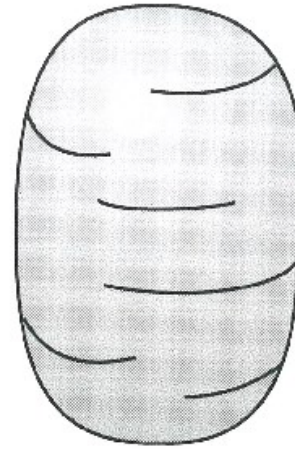
→ o **uvjetima kristalizacije**



**idiomorfno
euhedralno**
(dobro razvijene
kristalne plohe)



**hipidiomorfno
subhedralno**



**alotriomorfno
anhedralno**
(bez kristalnih ploha)

Morfologija kristala

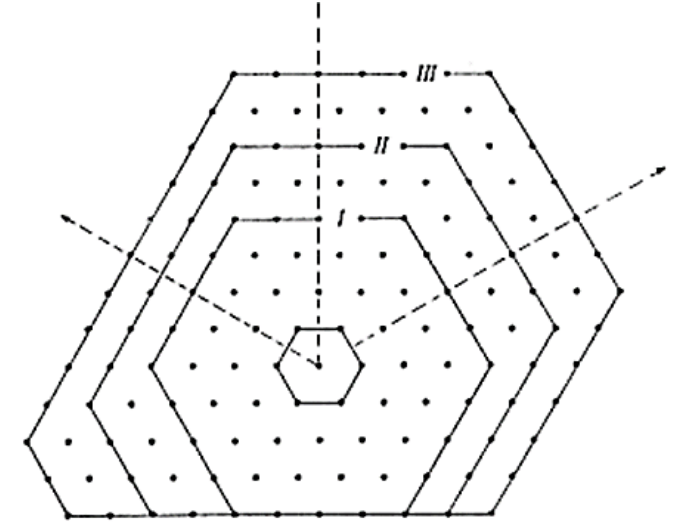
? O čemu ovisi vanjski izgled realnih kristala?

→ o kristalnoj strukturi

→ **o uvjetima kristalizacije**

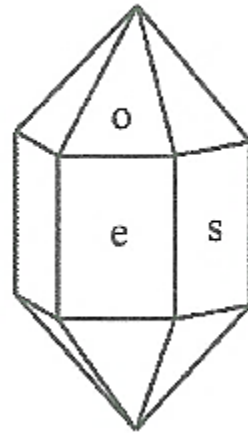
! 1. kristalografski zakon (zakon o stalnosti kutova):

U različitim uzorcima istog minerala, kutovi između odgovarajućih ploha su isti pri konstantnoj temperaturi i tlaku.

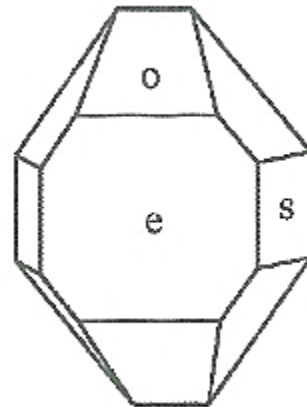


Preuzeto iz Borchardt Ott (1995).

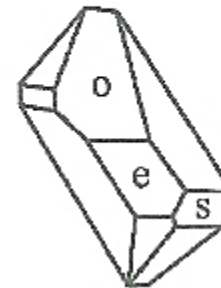
nepromijenjeni uvjeti za
vrijeme kristalizacije;
ravnomjeran dotok tvari



**IDEALNI
KRISTAL**



RAZVUČENI KRISTALI
simetrijski identične plohe
nisu geometrijski jednake



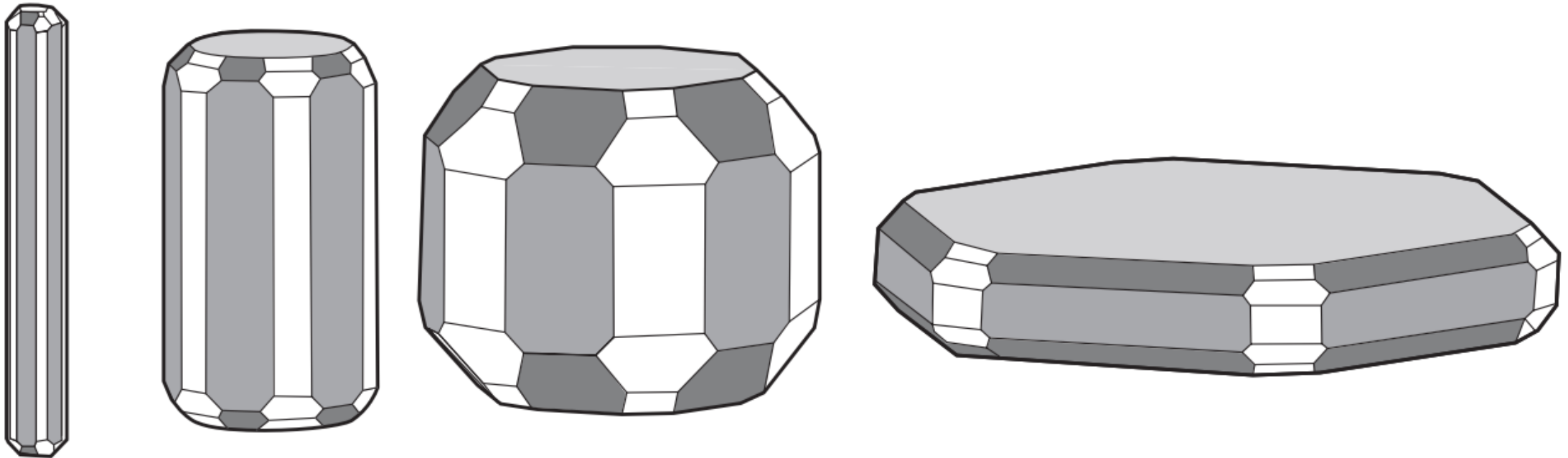
Preuzeto iz Slovenec (2011)

Morfologija kristala

? O čemu ovisi vanjski izgled realnih kristala?

→ o kristalnoj strukturi

→ o **uvjetima kristalizacije**



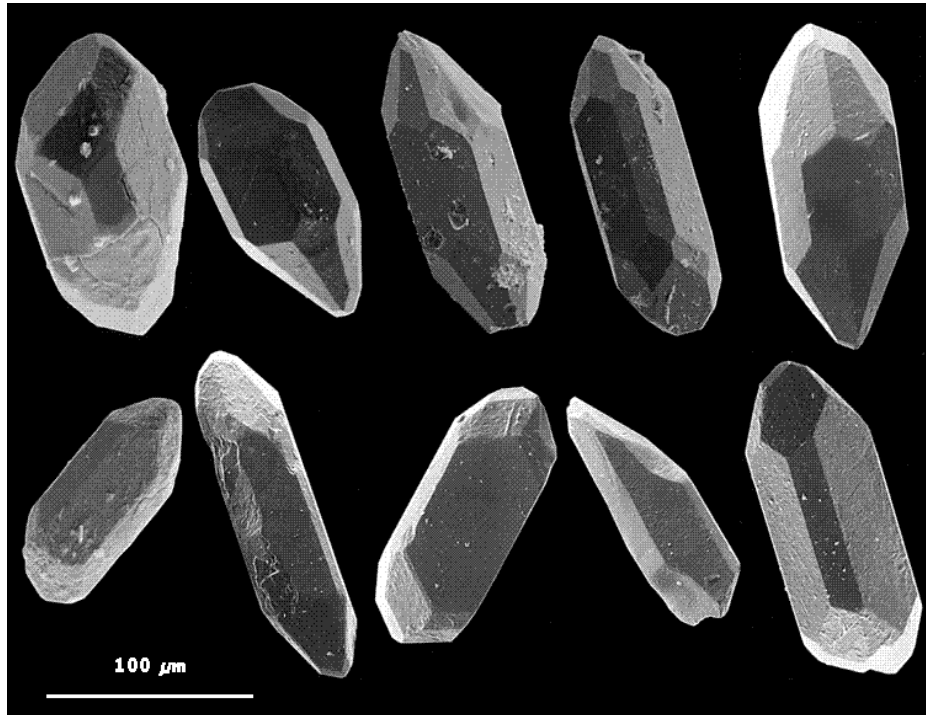
Morfologija kristala

? O čemu ovisi vanjski izgled realnih kristala?

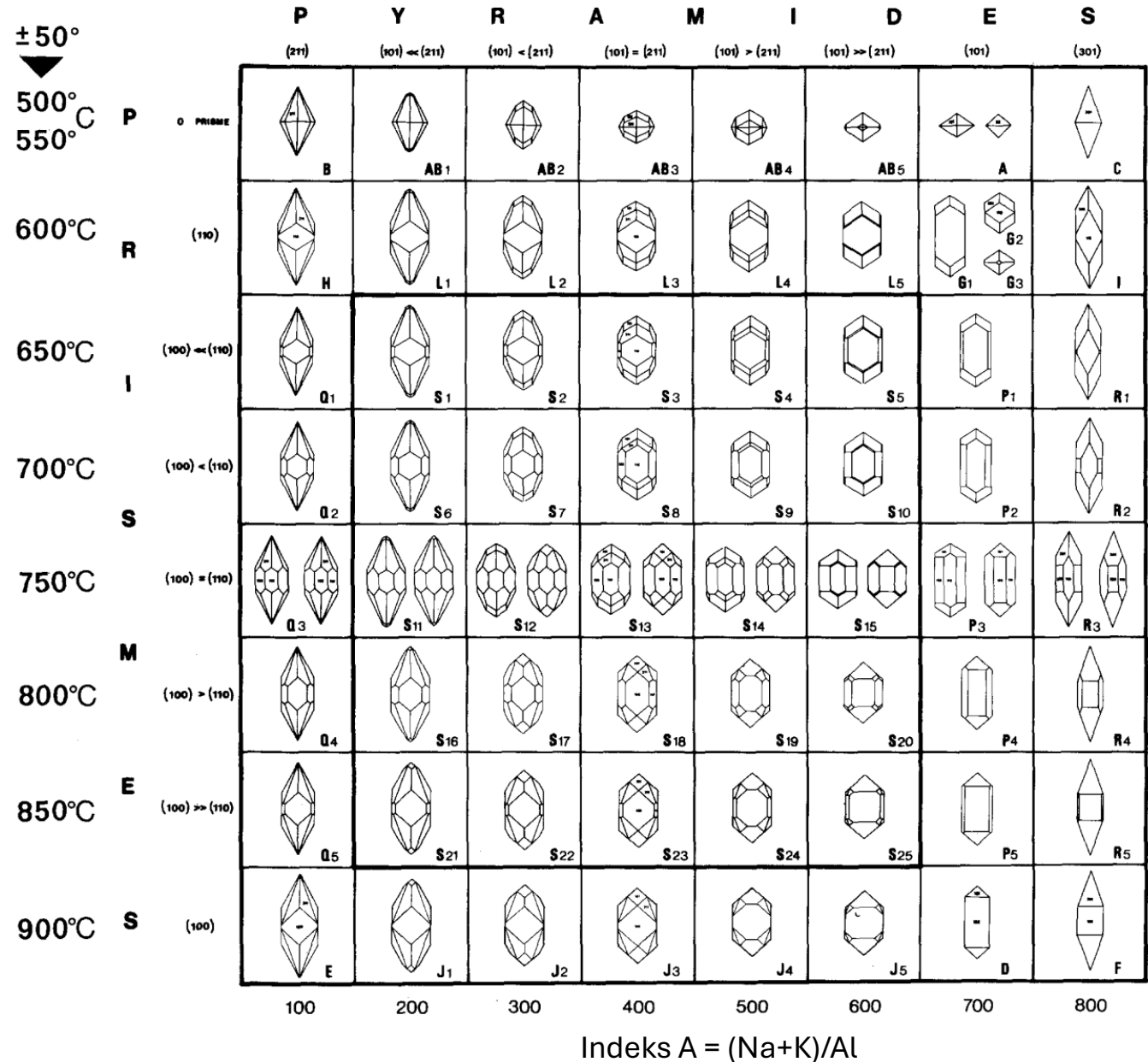
→ o kristalnoj strukturi

→ o uvjetima kristalizacije

cirkon ZrSiO_4



Izvor fotografije: <http://www.microscopy-uk.org.uk>



Preuzeto iz Pupin (1980): Zircon and Granite Petrology.

Kristali mješanci

! Minerali u obliku čistih supstanci iznimno su rijetke pojave.

→ pokazuju varijacije u sastavu

Minerali mješanci (čvrste otopine) = mineralna struktura kod kojih je jedan ili više položaja u strukturi statistički zaposjednut atomima dva ili više različitih kemijskih elemenata (ili grupa)

Primjer: minerali skupine **olivina** $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ = kristali mješanci između dva krajnja člana:

forsterit (Fo) - Mg_2SiO_4

fayalit (Fa) - Fe_2SiO_4

– konkretan sastav npr. $(\text{Mg}_{0,85}\text{Fe}_{0,15})_2\text{SiO}_4$, tj. $\text{Fo}_{85}\text{Fa}_{15}$



olivini
2/m 2/m 2/m

Kristali mješanci

Čimbenici koji određuju opseg zamjena u strukturi:

1) Radius iona (atoma)

→ veliki raspon zamjena moguć ako razlika u veličini iona (atoma) nije veća od 15%
(15–30 % ograničene zamjene, > 30% rijetke zamjene)

2) Naboj iona – struktura mora ostati električni neutralna

- **jednostavna zamjena** – jednaki naboji

npr.: $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ kod olivina $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

- **složena** ili **vezana zamjena** – različiti naboji → potrebna **dodatna zamjena** na drugim položajima u strukturi kako bi se očuvala električka neutralnost ili prisutnost **vakancija** u strukturi

npr.: **plagioklasi**

= minerali mješanci između albita (Ab) $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ i anortita (An) $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

$\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} \quad + \quad \text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+}$

* poželjno je da su kemijska svojstva elemenata koji se zamjenjuju slična

Eksolucija

! Pri višim temperaturama zamjene su općenito veće.
→ moguća i zamjena atoma čiji se radijusi razlikuju za više od 15%

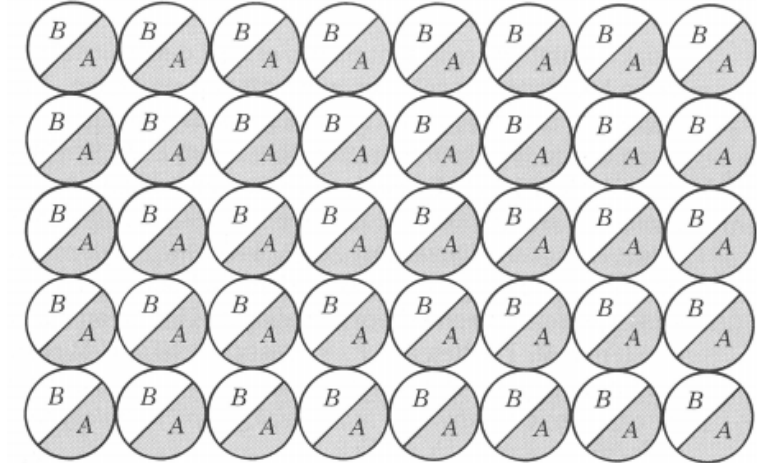
Primjer:

Kristali mješanci nastali i stabilni na visokim temperaturama ne moraju više biti stabilni na nižim temperaturama → **eksolucija** = izdvajanje dvije faze (dva minerala), jedna s manjim, a druga s većim atomima

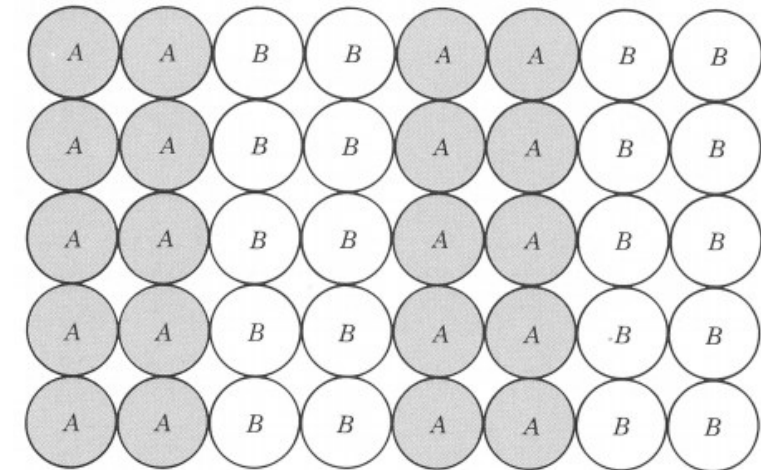
Kako?

→ ioni migriraju unutar strukture → odvajanje dvije ili više faza kako bi se smanjila ukupna energija sustava (povećava se stabilnost)
→ ovisno o **temperaturi i vremenu** (dugotrajno sporo hlađenje!)

! Kemijski sastav sustava ostaje nepromijenjen.



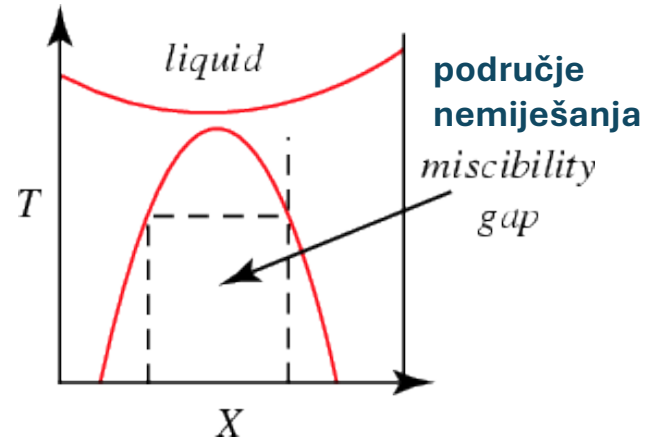
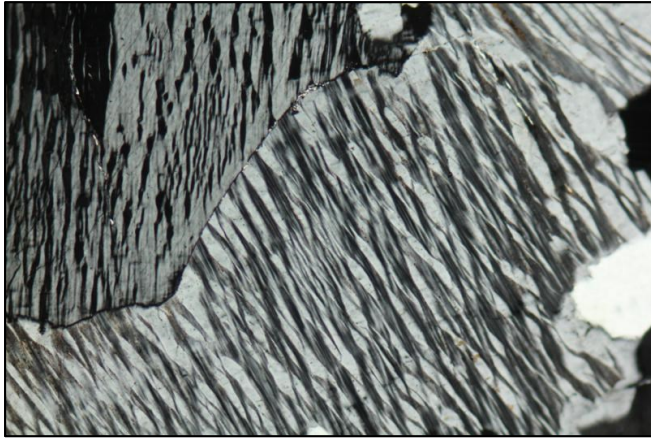
visoka T



niska T → eksolucije

Eksolucija

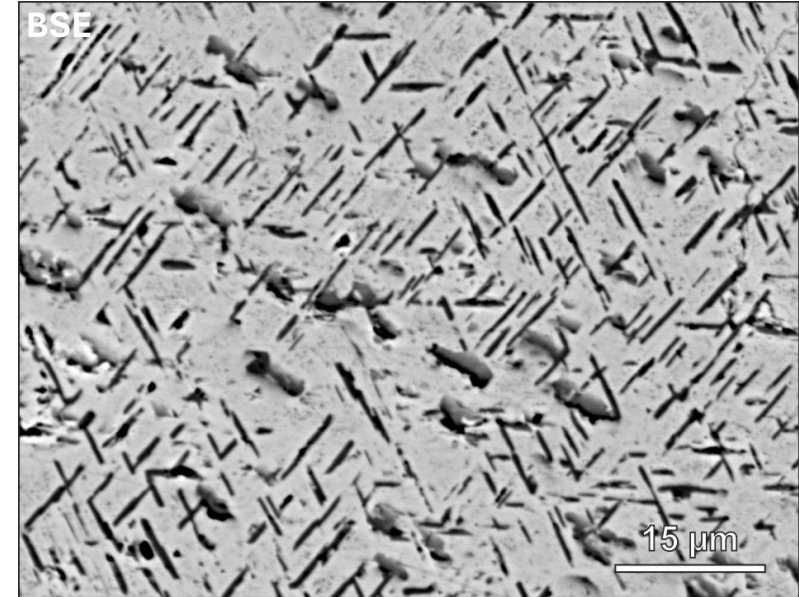
Primjer 1: feldspati: albit $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ i K-feldspat KAlSi_3O_8



(anti)peritne lamele kod
alkalijskih feldspata



Primjer 2: Fe-Ti-oksidi



Preuzeto iz Balen et al. (2020), <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.71.4.5>

eksolucije ilmenita (FeTiO_3) u hematitu (Fe_2O_3)

$\bar{3} 2/m$

Strukturni defekti

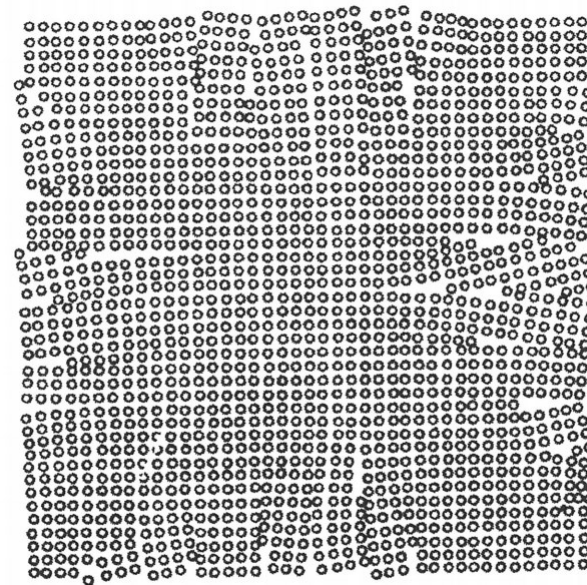
! Realni kristali nisu savršeni.
→ prisutni različiti defekti

Po veličini:

- makroskopski
- mikroskopski
- submikroskopski

Prema geometriji:

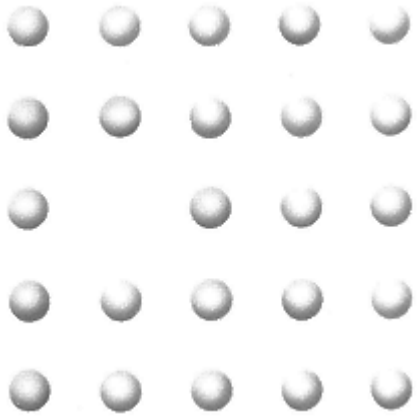
- točkasti
- linijski
- plošni (planarni)
- trodimenzionalni defekti



Preuzeto iz Borchardt-Ott (2011).

Strukturni defekti

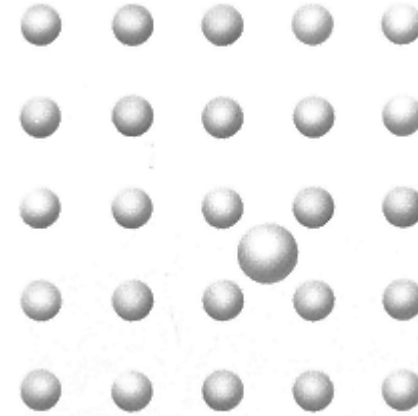
Točkasti defekti



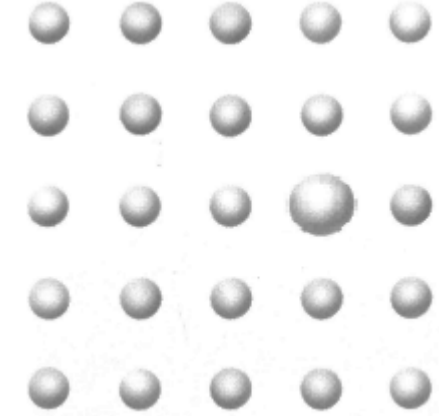
Schottky defekt
prazna mjesta u strukturi
(**vakancije**)



Frenkel defekt
pomak atoma iz normalnog
položaja u položaj koji
uobičajeno nije zauzet
(**intersticijski položaj**)



intersticijski defekt
strani atomi koji popunjavaju
položaj koji uobičajeno nije
popunjen

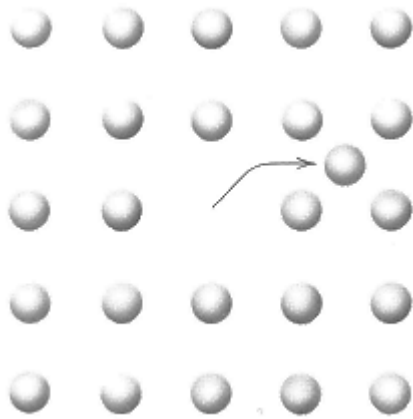


supstitucijski defekt
strani atomi koji zamjenjuje
uobičajeno prisutan atom u
strukturi

defekti onečišćenja
od par ppb do čak 50 %

Strukturni defekti

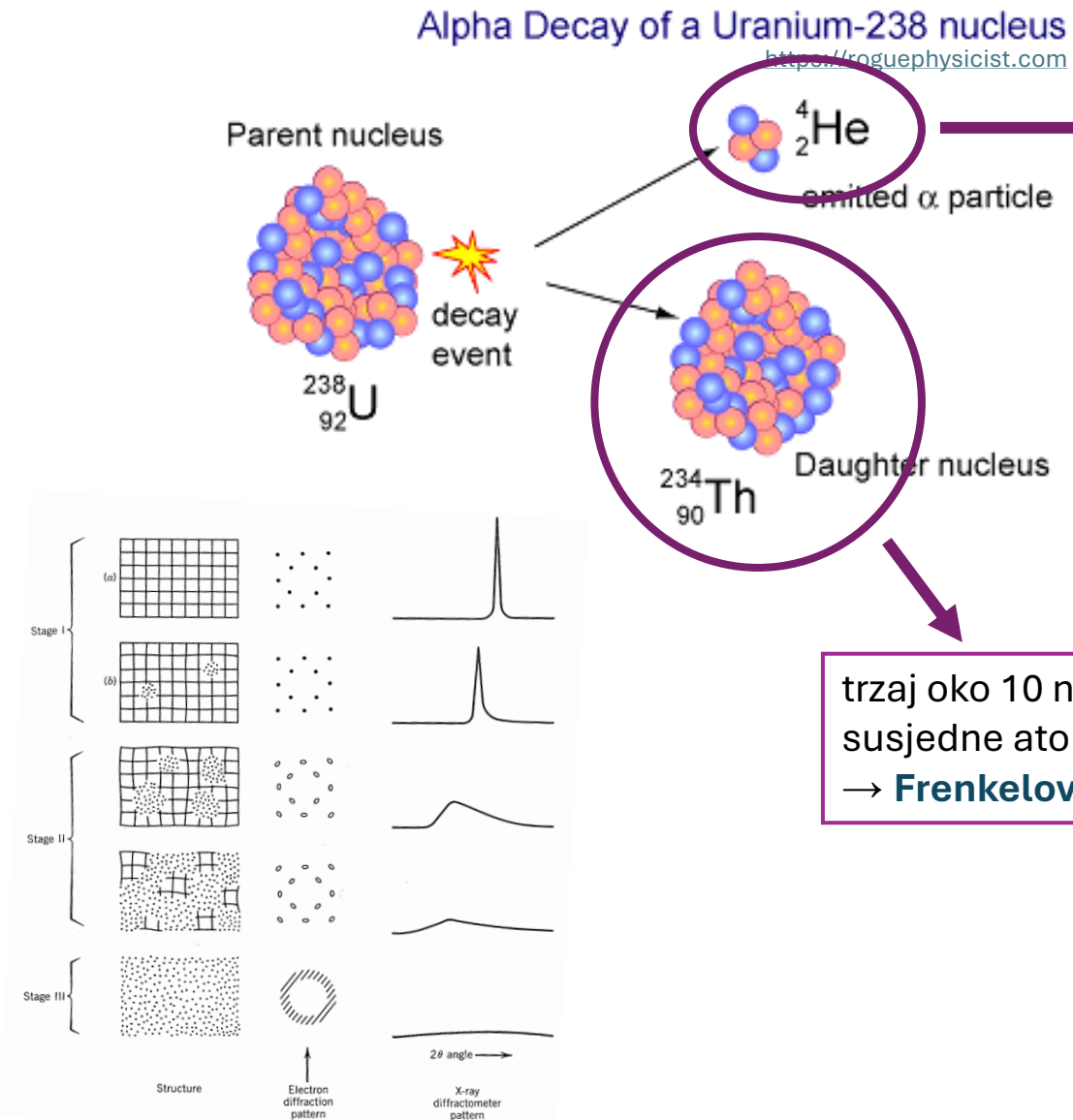
Točkasti defekti



Preuzeto iz Klein (2002).

Frenkel defekt

pomak atoma iz normalnog položaja u položaj koji uobičajeno nije zauzet (**intersticijski položaj**)



Preuzeto iz Nesse (2000).

izlijeće na udaljenost do 10 000 nm → izgura nekoliko stotina atoma s njihovih mjesta → **Frenkelovi defekti**

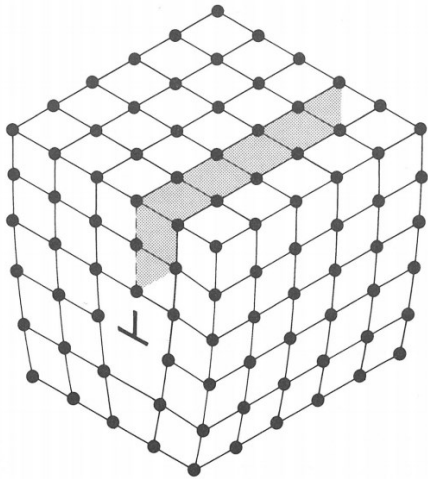
→ **metamiktne minerali**

trzaj oko 10 nm unazad → izgura susjedne atome s njihovih mjesta → **Frenkelovi defekti**

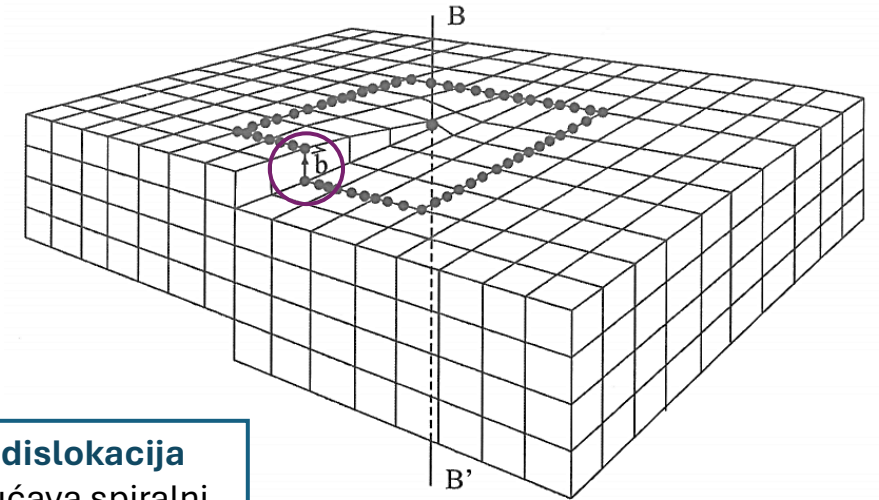
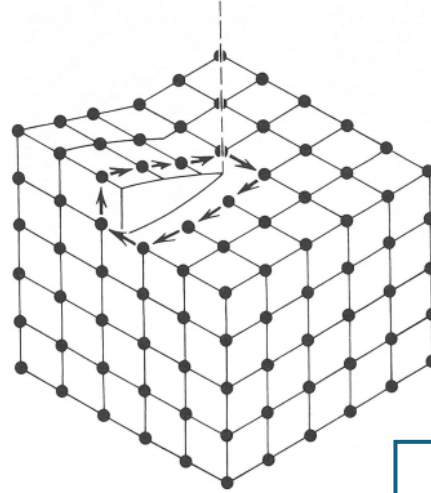
Strukturni defekti

Linijski defekti

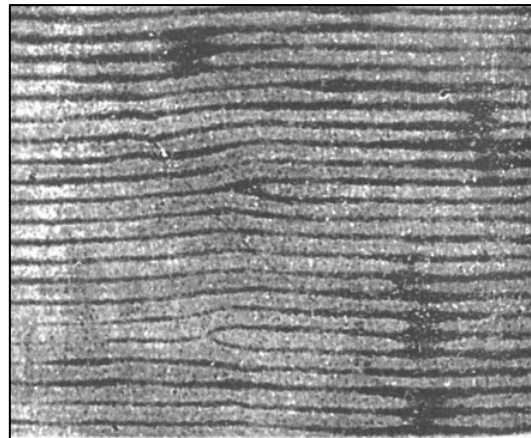
- mogu biti posljedica deformacija (usmjerenih pritisaka)



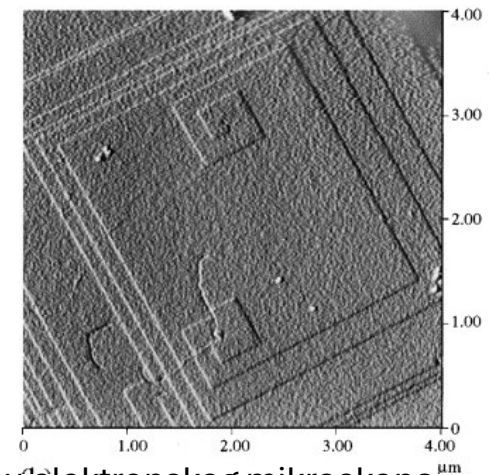
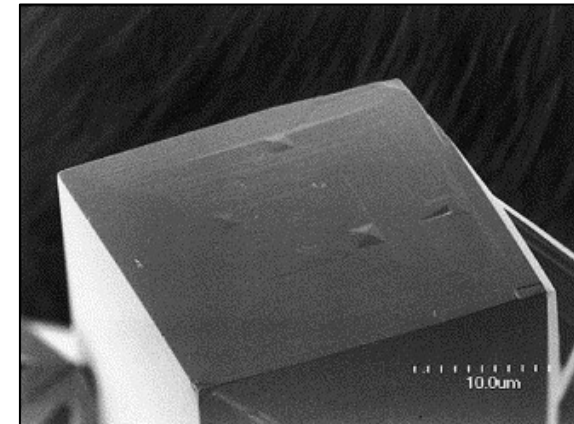
rubna (bridna) dislokacija
neke mrežne ravnine nisu
beskonačne – prekinute su
→ omogućava smicanje



vijčana dislokacija
→ omogućava spiralni
rast kristala



rubna dislokacija, snimak
pomoću elektronskog mikroskopa
Preuzeto iz Slovenec (2011)

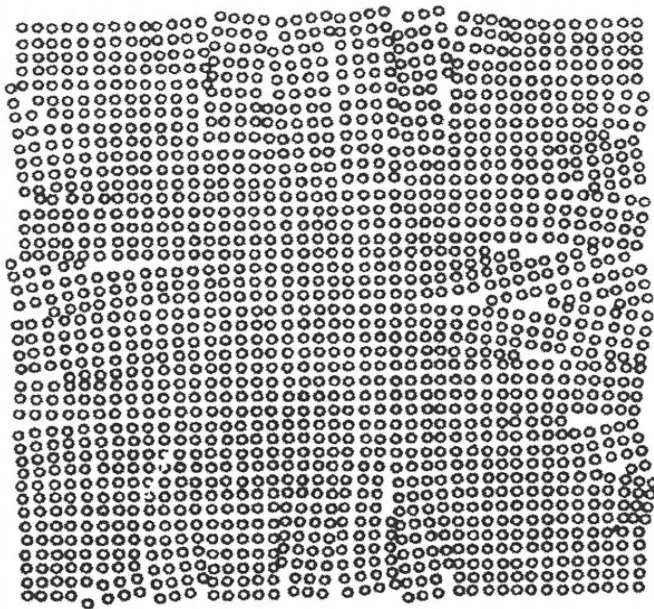


vijčana dislokacija, snimak pomoću elektronskog mikroskopa

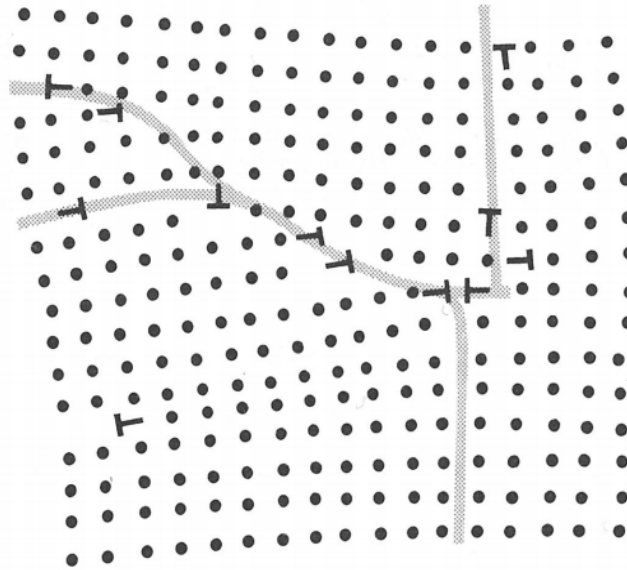
Preuzeto iz Dumrul et al. (2002), [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(02\)00354-2](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(02)00354-2)

Strukturni defekti

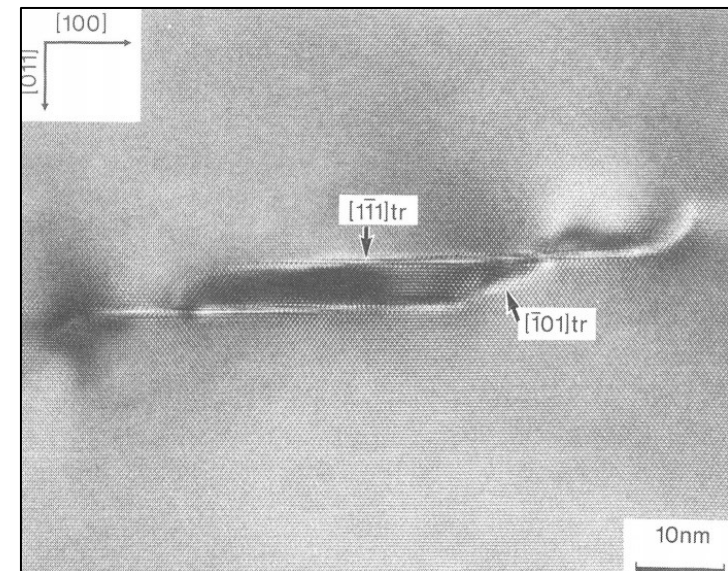
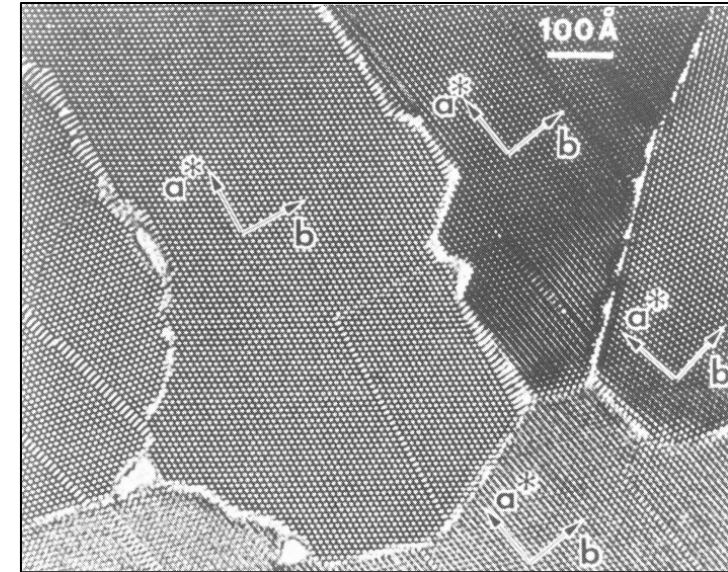
Linijski defekti



Preuzeto iz Borchardt-Ott (2011).



Preuzeto iz Klein (2002).



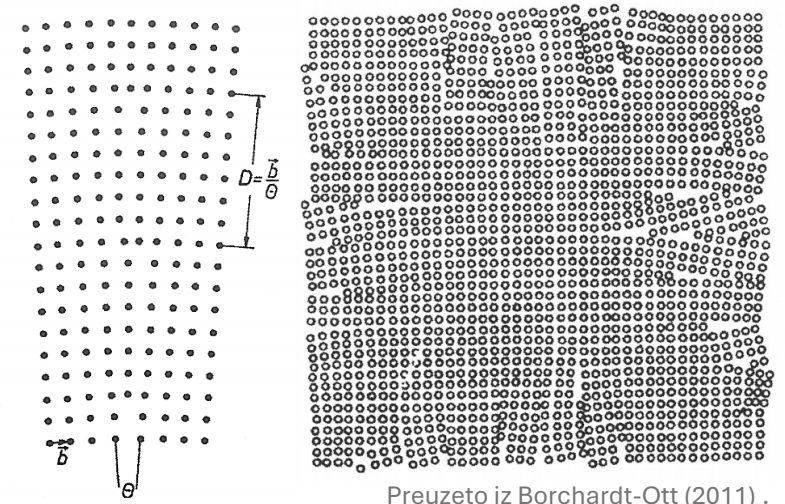
Preuzeto iz Klein (2002).

Strukturni defekti

Plošni defekti

Mozaična građa (*small angle grain boundaries*)

→ kristal je građen od blokova s “idealnom građom” koji su međusobno malo zakrenuti



Preuzeto iz Borchardt-Ott (2011) .

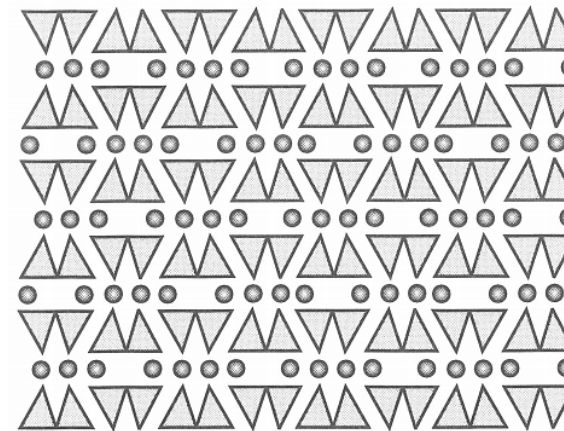
Greške u redoslijedu slaganja slojeva

- npr. u hcp (ABABAB redoslijed): ABABCABABABA
- najčešće kod metala (ccp i hcp) i uslojenih struktura (npr. grafit) kod kojih postoji politipizam

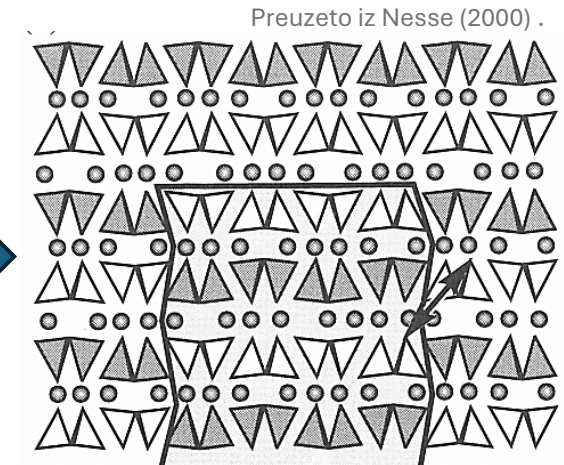
Granice antifaza

= domene kristala koje imaju istu kristalografsku orijentaciju, ali postoji translacijski pomak

→ najčešće kod minerala s lančastim strukturama (pr. pirokseni)



ekvivalentni lanci na visokoj T



distorzirani i skraćeni lanci na niskoj T

Preuzeto iz Nesse (2000) .

Sraslaci (površine sraštavanja)

Sraslaci

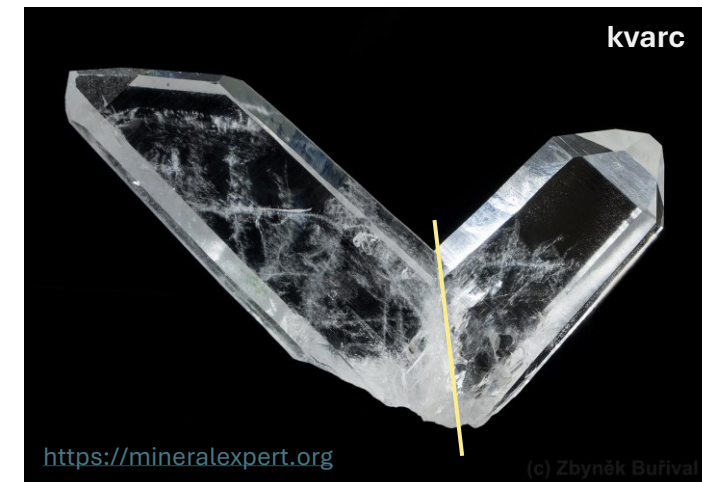
Sraslaci = dva ili više individua iste mineralne vrste koji su pravilno simetrijski srasli

a) Zrcalno orijentirani

Sraslačka ravnina = paralelna s postojećom ili mogućom plohom na kristalu, ali ne smije biti paralelna s postojećom ravninom simetrije*

b) Zakrenuti oko **sraslačke osi** za neki kut = nikad nije paralelna s postojećom parnom osi simetrije*

- površina sraštanja
 - ravnina sraštanja – Millerov indeks
- sraslački šav



* dovodi do ponavljanja svakog pojedinca u samog sebe

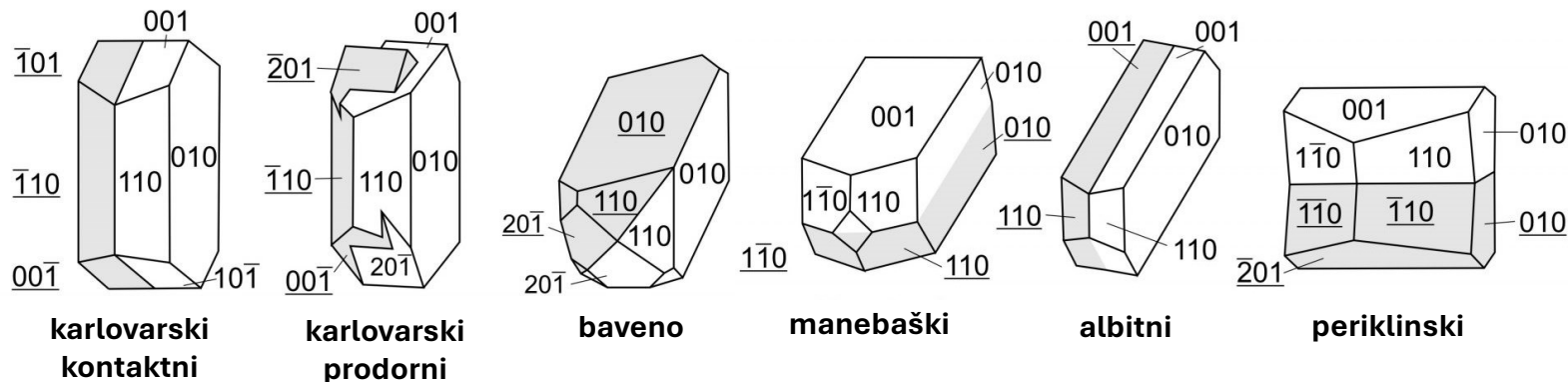
Sraslaci

Sraslački zakoni = definiraju element simetrije koji povezuje srasle individue i njihovu orijentaciju

Naziv prema:

- **mineralu** kod kojeg se često javlja (npr. spinelski)
ili
- po **lokalitetu** na kojem su takvi sraslaci opaženi (npr. karlovarski)

1. Okomični (normalni) sraslački zakon = s.o. okomita je na neku plohu na kristalu
2. Bridni sraslački zakon = s.o. paralelna je s nekim bridom
3. Kompleksni sraslački zakon = s.o. okomita na brid i paralelna s nekom plohom

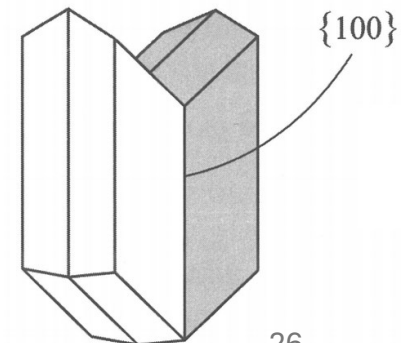


različiti sraslaci kod plagioklasa $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Preuzeto iz Klein & Philpotts (2013).

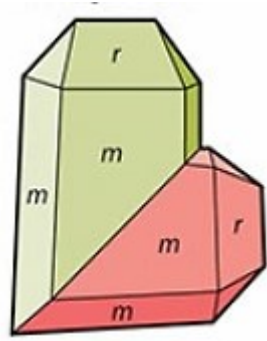


sraslac gipsa $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$
po zakonu lastinog repa



Sraslaci

Dodirni (kontaktni) sraslaci

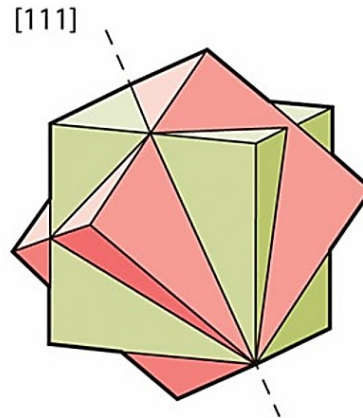


Quartz

japanski sraslac
po $\{11\bar{2}1\}$

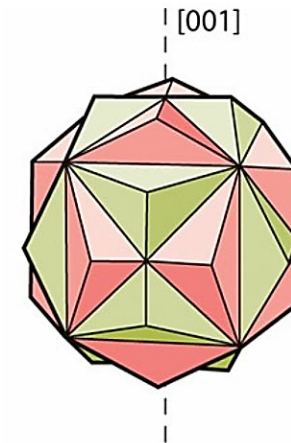


Prodorni sraslaci



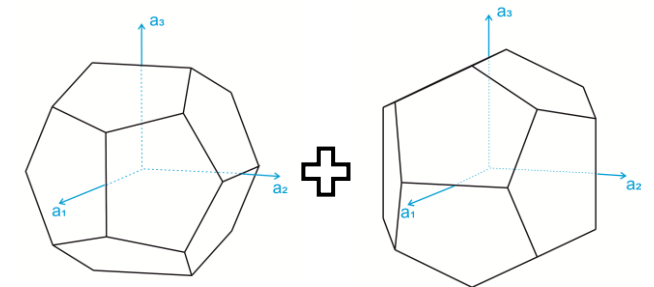
Fluorite

$2 \times \{100\}$
 90° oko $[111]$

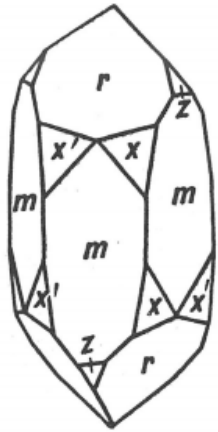


Pyrite "Iron Cross"

$2 \times \{120\}$
 90° oko $[001]$

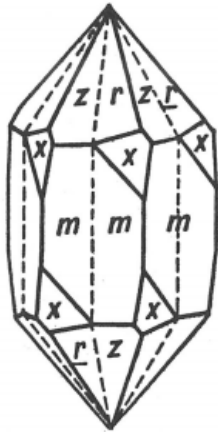


Sraslaci



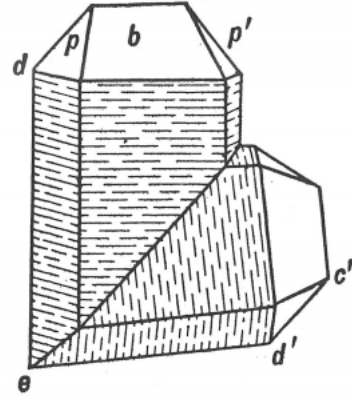
$\{11\bar{2}0\}$

brazilski
L+R



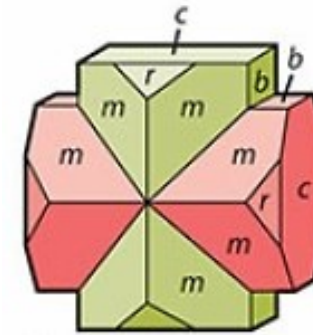
$[0001]$

dauphinejski
rotacija za 60°
oko osi c

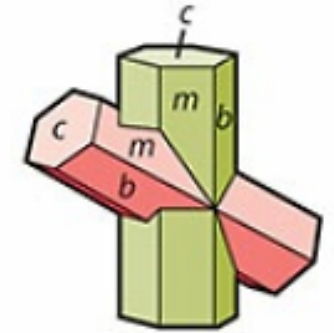


$\{11\bar{2}2\}$

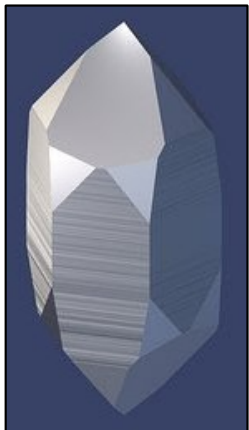
japanski



sraslac po $\{031\}$



sraslac po $\{231\}$



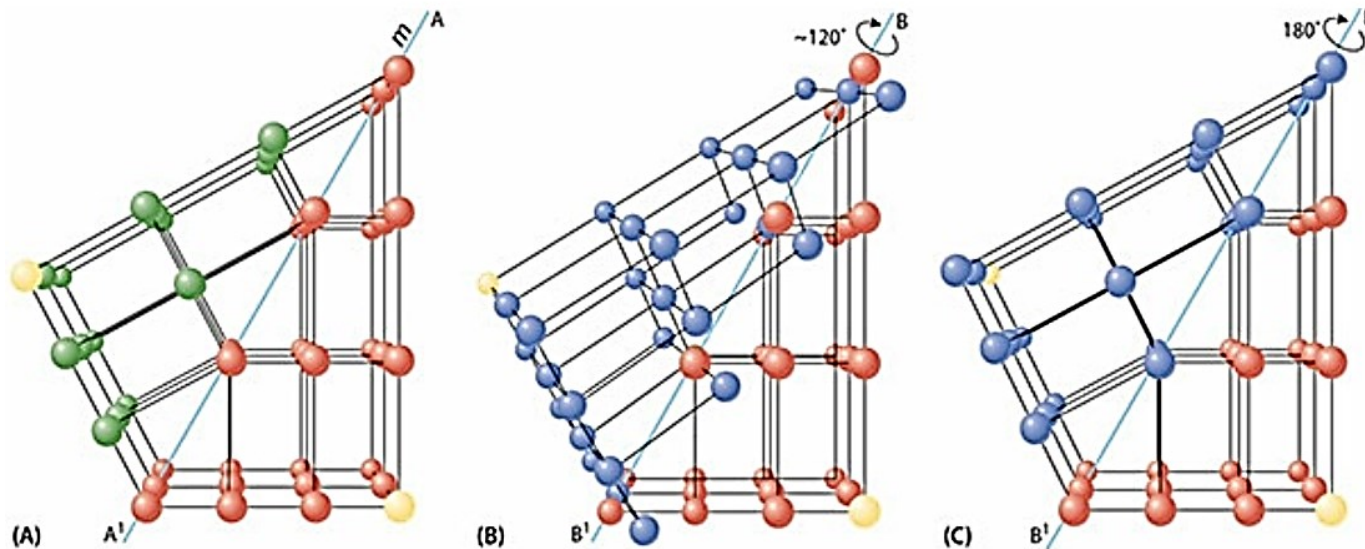
različiti sraslaci kod kvarca, SiO_2



križni sraslaci kod stauroilita, $\text{Fe}^{2+}_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{23}(\text{OH})$

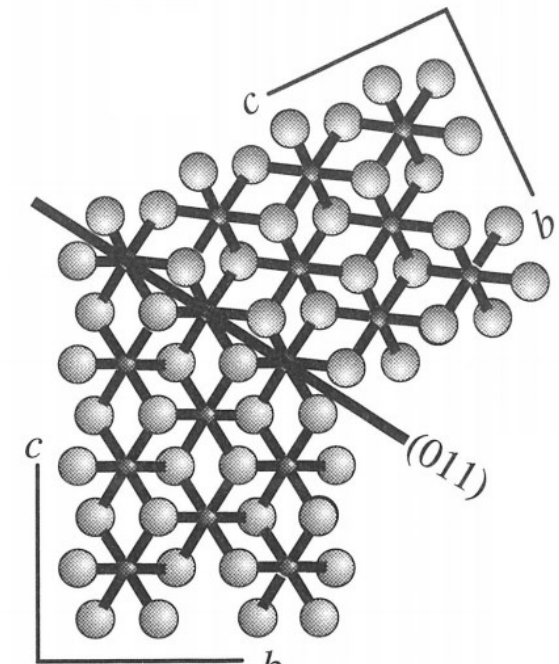
Sraslaci

- na granici dva individua prestaju mrežne ravnine, tj. prestaje rešetka jednog individua i počinje rešetka drugog → **plošni defekt**
- ! Vjerojatnost nastanka sraslaca je to veća što je veća podudarnost rešetke drugog individua s produženom rešetkom prvog.



Preuzeto iz Klein & Philpotts (2013).

primjeri sraštanja refleksijom i rotacijom



Preuzeto iz Nesse (2000).

**sraštanje refleksijom na (011)
u rutilu, TiO_2**

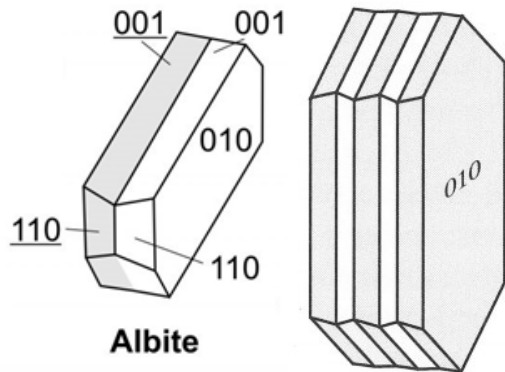
Sraslaci

Jednostruki sraslaci (sraslaci dvojci)

vs.

Višestruki sraslaci = sraslaci kod kojih je tri ili više individua sraslo po istom zakonu

- **polisintetski** – paralelne površine srastanja, svaka druga lamela ima istu orijentaciju
→ lamelarni = tanki individui
- **ciklički** – neparalelne površine srastanja

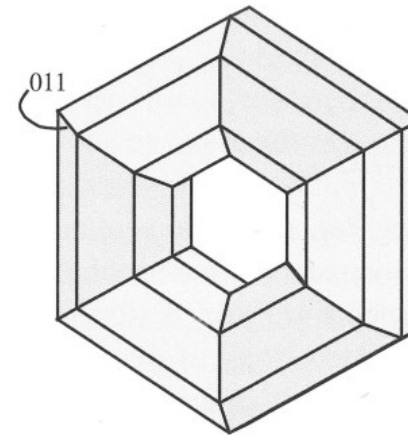


Albite



Preuzeto iz Klein & Philpotts (2013).

polisintetski sraslaci kod plagioklasa po albitnom zakonu



Preuzeto iz Nesse (2000).

ciklički sraslaci rutila, refleksija na {011}

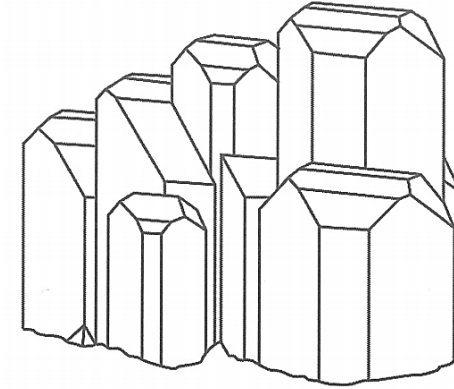


<https://www.minerals.net>

Sraslaci

Paralelni rast = odgovarajući geometrijski (simetrijski) elementi pojedinih kristalnih poedinaca su paralelni

! paralelni rast $\neq$ polisintetski sraslaci



Preuzeto iz Slovenec (2011) .



<https://www.mindat.org>

hedenbergit, $\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$



<http://awminerals.com>

kvarc, SiO_2

Sraslaci

Podjela prema postanku:

- **sraslaci rasta** = istovremeno sa stvaranjem prvih zametaka kristala
- **transformacijski sraslaci** = prilikom prijelaza jedne polimorfne modifikacije u drugu
 - distorzijski polimorfni prijelaz (pr. leucit)
- **deformacijski sraslaci** = pod utjecajem tlaka
 - uvijek polisintetski (lećasti kod Pl)*
 - distorzija rešetke, ravnina klizanja = sraslačka ravnina
 - tlačni sraslaci, sraslaci klizanja

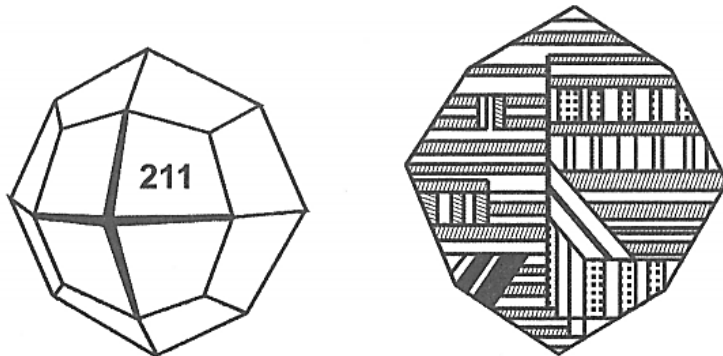
* polisintetski sraslaci rasta (primarni) kod Pl su paralelni

Sraslaci

Podjela prema postanku:

- **sraslaci rasta** = istovremeno sa stvaranjem prvih zametaka kristala
- **transformacijski sraslaci** = prilikom prijelaza jedne polimorfne modifikacije u drugu
→ distorzijski polimorfni prijelaz (pr. leucit)
- **deformacijski sraslaci** = pod utjecajem tlaka
→ uvijek polisintetski (lećasti kod Pl)*
→ distorzija rešetke, ravnina klizanja = sraslačka ravnina
→ tlačni sraslaci, sraslaci klizanja

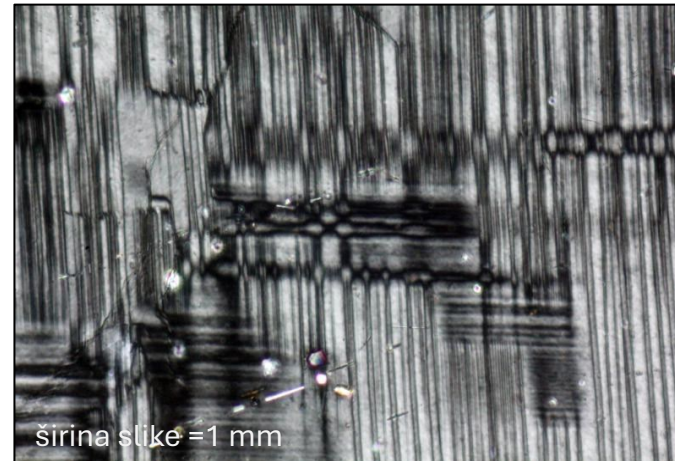
* polisintetski sraslaci rasta (primarni) kod Pl su paralelni



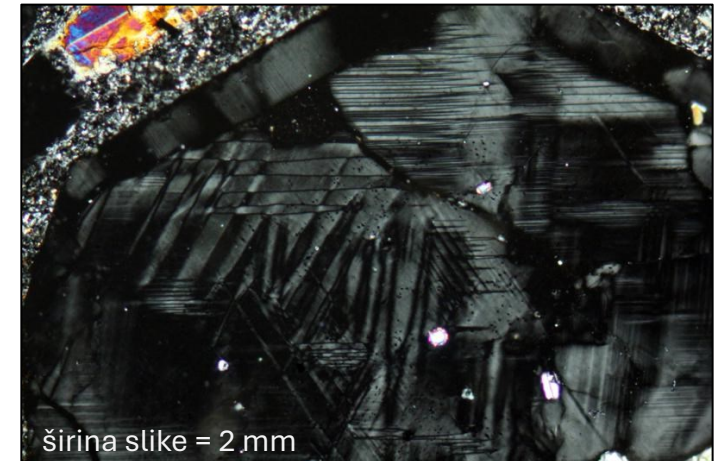
leucit, $K(AlSi_2O_6)$

kubični iznad 605 °C, tetragonski ispod 605 °C

Preuzeto iz Slovenec (2011).



širina slike = 1 mm



širina slike = 2 mm

deformacijski sraslaci u leucitu

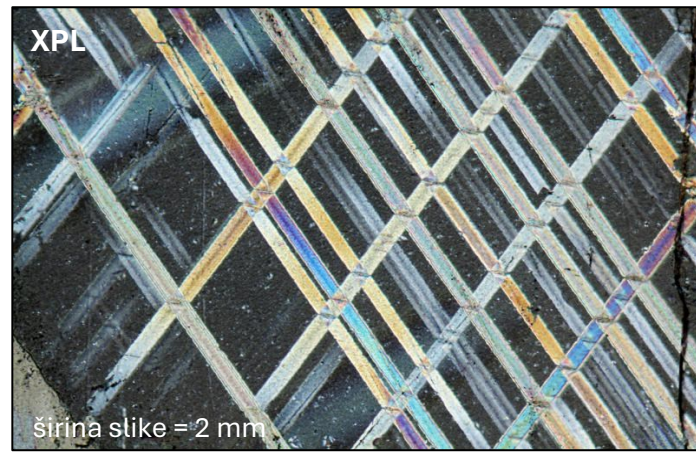
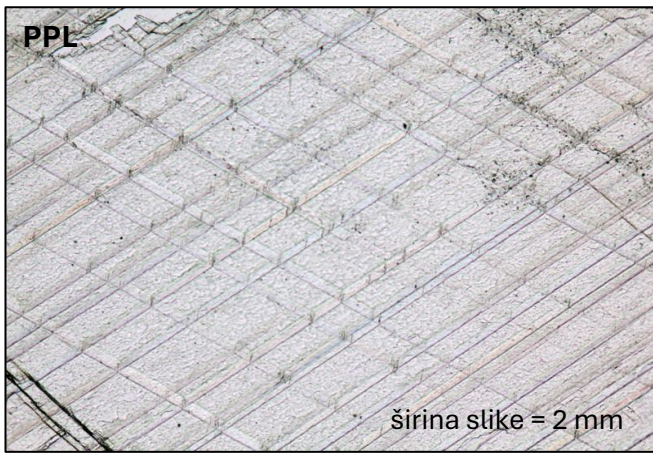
Fotografije dobivene pomoću petrografskog polarizacijskog mikroskopa;
PPL = bez uključenog analizatora; XPL = s uključenim analizatorom

Sraslaci

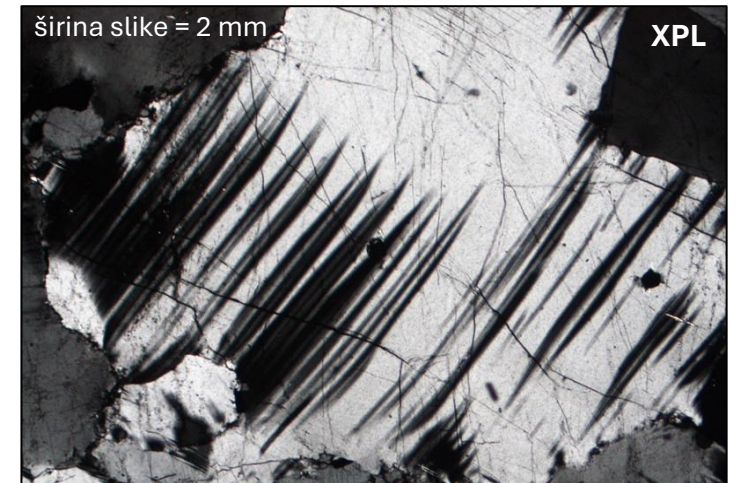
Podjela prema postanku:

- **sraslaci rasta** = istovremeno sa stvaranjem prvih zametaka kristala
- **transformacijski sraslaci** = prilikom prijelaza jedne polimorfne modifikacije u drugu
→ distorzijski polimorfni prijelaz (pr. leucit)
- **deformacijski sraslaci** = pod utjecajem tlaka
→ uvijek polisintetski (lećasti kod Pl)*
→ distorzija rešetke, ravnina klizanja = sraslačka ravnina
→ tlačni sraslaci, sraslaci klizanja

* polisintetski sraslaci rasta (primarni) kod Pl su paralelni



deformacijski sraslaci u kalcitu, CaCO_3

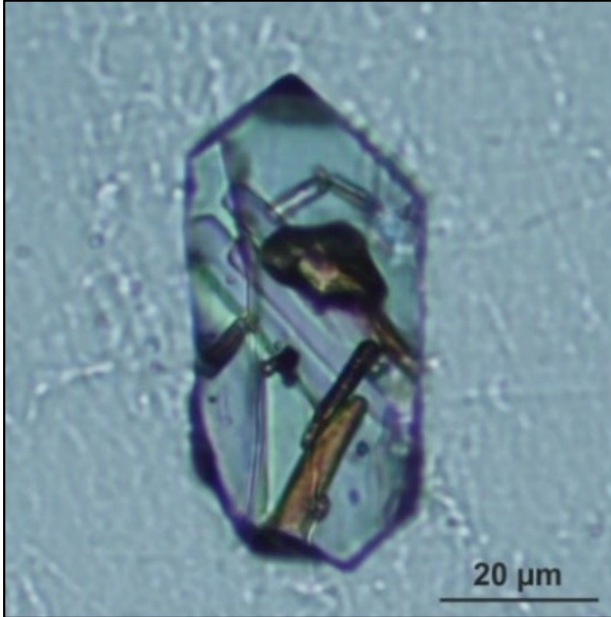


deformacijski sraslaci u plagioklasu

Fotografije dobivene pomoću petrografskog polarizacijskog mikroskopa;
PPL = bez uključenog analizatora; XPL = s uključenim analizatorom

Strukturni defekti

Trodimenzionalni defekti



Mineralni uklopci i uklopci taljevine (crvene strelice) u kristalima cirkona.

Preuzeto iz Schneider & Balen (2024), <https://doi.org/10.5194/ejm-36-209-2024>

uklopci (inkluzije) = izolirani dijelovi u kristalu u plinovitom, tekućem ili čvrstom stanju

- fluidni uklopci
- uklopci taljevine
- čvrsti (mineralni) uklopci



pukotine u granatu

pukotine

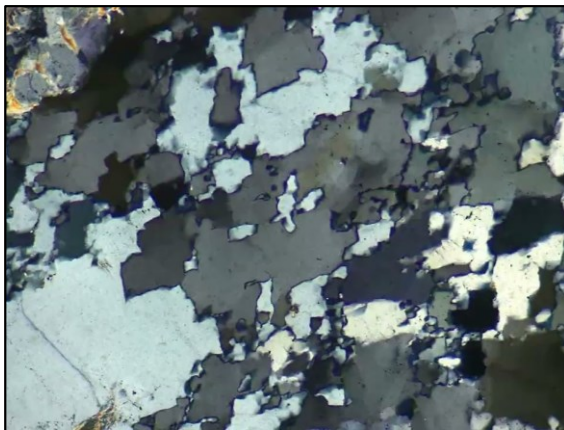
Rekristalizacija

- **Rekristalizacija** = proces promjene veličine i oblika već stvorenih mineralnih (kristalnih) zrna uz proces uklanjanja defekata u kristalnoj strukturi
→ promjena u smjeru smanjivanja ukupne površine (ukupne površinske energije)

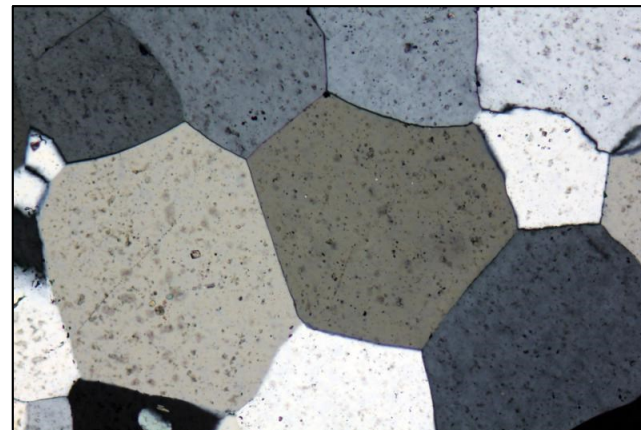
Kako?

- stvaranje glatkih graničnih područja
- povećanje veličine zrna

Ključni faktor: dovoljno **visoka temperatura** koja će omogućiti polaganu difuziju atoma i slaganje na mjesto

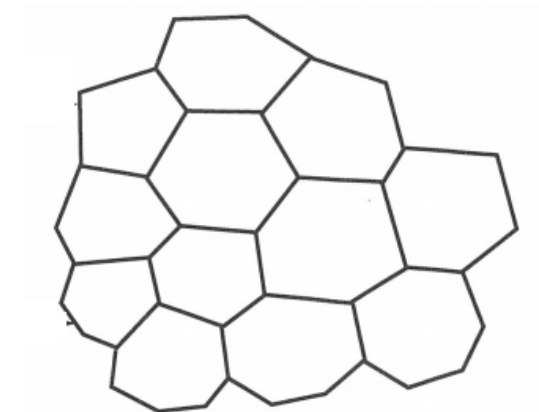
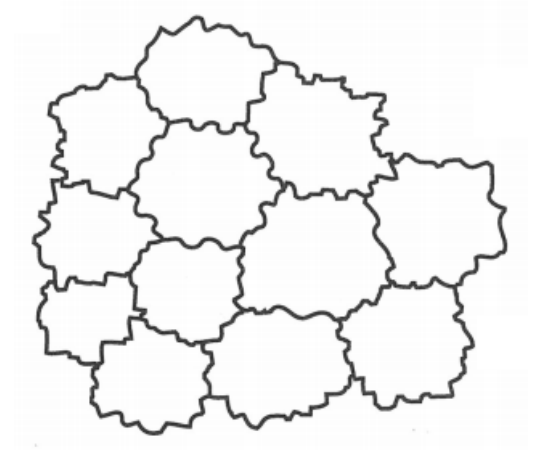


<https://geologyistheway.com>



<https://www.alexstrekeisen.it>

rekristalizacija kvarca



rekristalizirano

Preuzeto iz Nesse (2000).

Metasomatizam

METASOMATIZAM = proces zamjene jednog minerala mineralom drukčijeg kemijskog sastava

Kako?

- istovremena disolucija i kristalizacija (zamjena)
- reakcija čvrstog tijela s taljevinom/plinom/vodenom otopinom

! Mineral/agregat cijelo vrijeme ostaje u čvrstom stanju.

! Volumen obično ostaje nepromijenjen.

Primjer: pseudomorfija

metamorfni procesi