

# Gemäß ihrer Häufigkeit werden Elemente unterteilt in *Haupt-* und *Spurenelemente*

## Haupt- und Spurenelemente in der Erdkruste

Hauptelemente (>0.1%):

O,  
Si,  
Al,  
Mg,  
Fe,  
Ca,  
Na,  
K

Diese 8 Elemente bauen zu mehr als 98% der Erdkruste auf

Spurenelemente (<0.1%)\*:

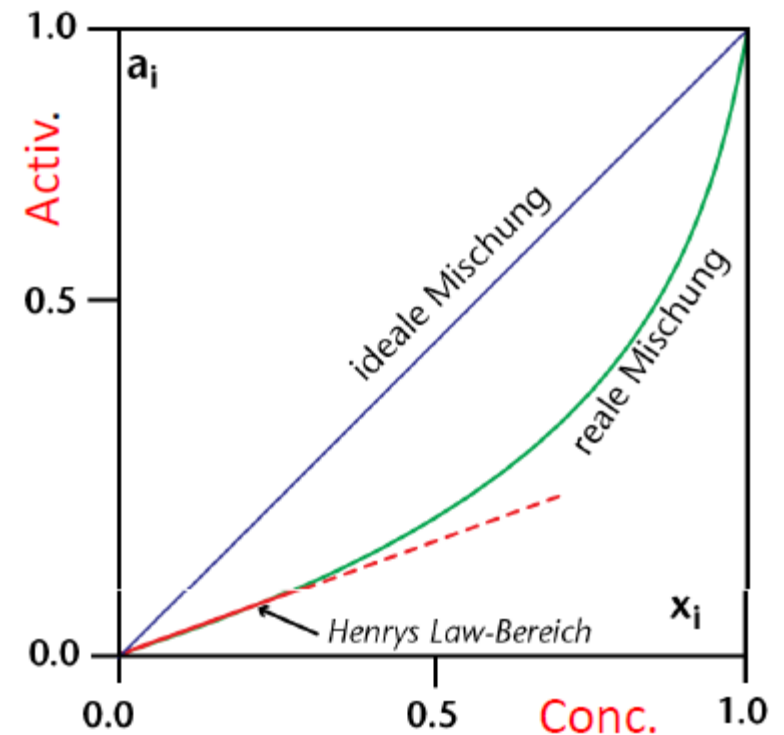
Rb,  
Sr,  
Zn,  
Zr  
etc.

\* in ppm bzw.  $\mu\text{g/g}$  (0.1% = 1000 ppm)

Ausnahmen, Beispiel Kalium (K)  
*Hauptelement* in Granit  
aber *Spurenelement* in Peridotit

# Spurenelemente

1. Große Variationen in den Konzentrationen
2. Große Anzahl von Spurenelementen
3. Stark unterschiedliches Verhalten in geochemischen Prozessen
4. Relative einfaches Verhalten (*Henri*



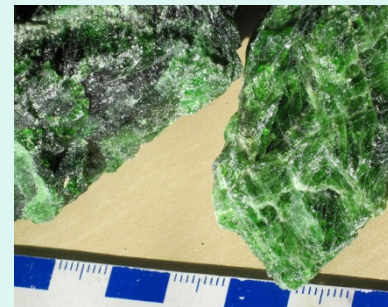
# Spurenelemente

- Bilden normalerweise keine stöchiometrischen Phasenbestandteile
- Treten in Defekten der Kristallgitter auf oder substituieren bestimmte Hauptelemente
- Spurenelemente beeinflussen normalerweise nicht die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Kristalls, allerdings z.T. farbgebend,

Beispiel: Cr in Diopsid oder Spinell:

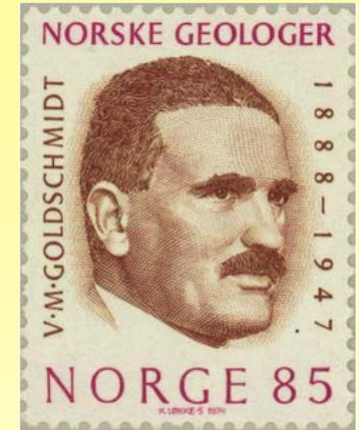
Aber:

Monazit –  $(\text{SEE})[\text{PO}_4]$



# V.M. Goldschmidt's geochemische Gliederung der Elemente

- Basiert darauf, wie sich Elemente zwischen verschiedenen Schmelz- oder Gasphasen verteilen
- Ein bestimmtes Element kann mehreren Gruppen angehören



*Atmophile* (gas-loving): H, Edelgase, O, (C, N)

*Lithophile* (silicate-loving): (H), Li, Be, B, (C), O, F, Na, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, (Ga), (Ge), Br, Rb, Sr, I, Cs, Ba, (Ti) Sc, Ti, V, Cr, Mn, (Fe), Y, Zr, Nb, REE, Hf, Ta, W, Th, U

*Siderophile* (iron-loving): Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Mo, Re, Au, (W), C, P, Ge, Sn, (As), (Pb)

*Chalcophile* (sulfide-loving): Cu, Zn, Ga, Ag, Cd, In, Hg, Tl, (Ge), (As), S, (Sn), Sb, Se, Pb, Bi, Te, (Cr, Fe, Mo)

# Analogie zum Hochofen-Prozess

*Siderophile Elemente* haben die Neigung, sich mit Fe zu legieren. Sie gehen in die Metallschmelze und formen den Bodenkörper („Ofensau“) beim Hochofen-Prozess

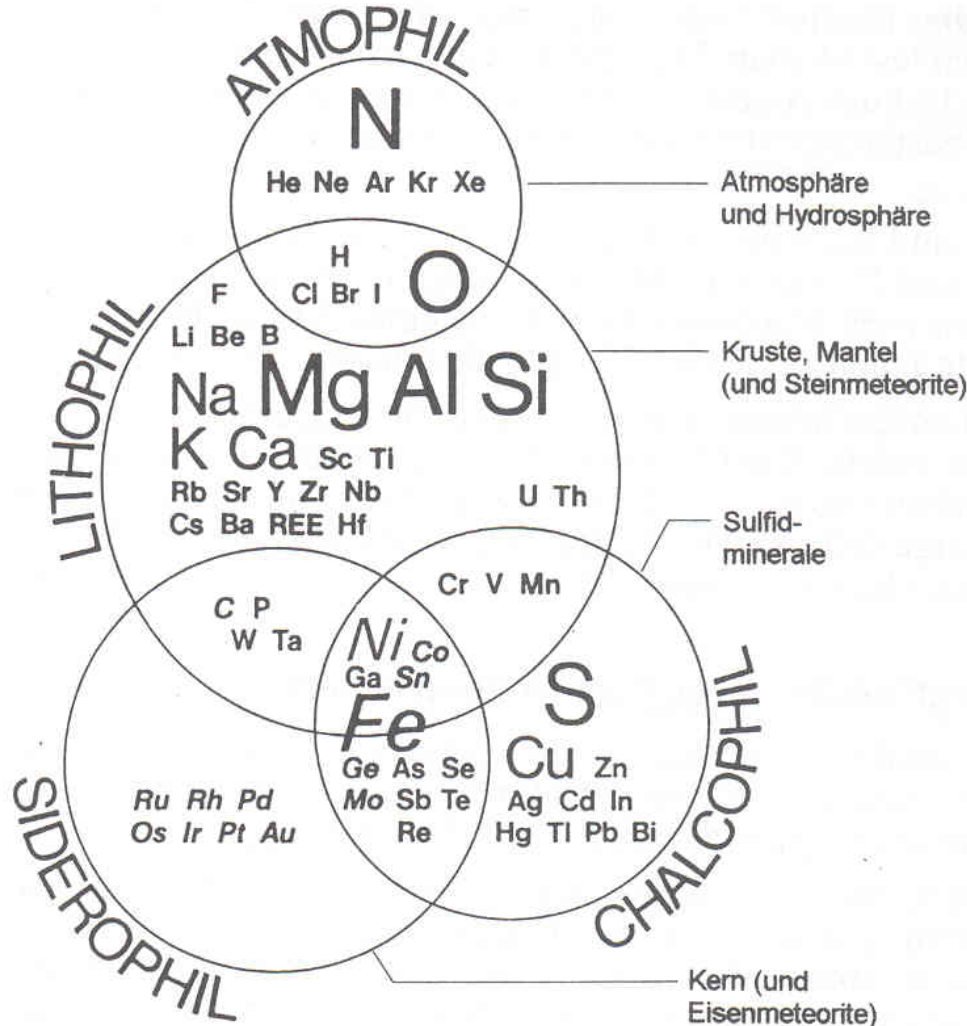
*Chalkophile Elemente* zeigen die Tendenz, Sulfide zu bilden; sie reichern sich im **Kupferstein** des Hochofen-Prozesses an

*Lithophile Elemente* neigen dazu, sich mit  $O_2$  unter Bildung von Silikaten, Oxiden, Karbonaten zu verbinden. Sie gehen beim Hochofenprozess in die leichte Silikatschmelze, die beim Abkühlen im Hochofen zur **Schlacke** erstarrt

*Atmosphäophile Elemente* leichtflüchtig; reichern sich in den **Gichtgasen** an



# Goldschmidt Klassifikation der Elemente

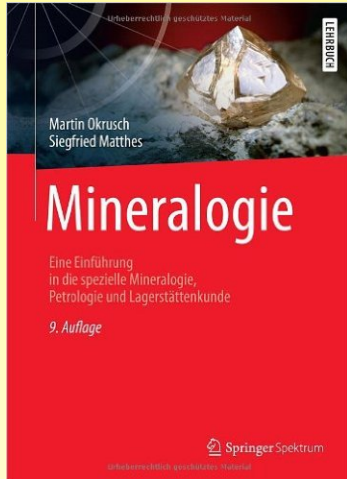


Alkalimetalle	Erdalkalimetalle		Übergangsmetalle										B-Gruppe	C-Gruppe	N-Gruppe	Chalkogene	Halogene	Edelegase					
H	Li	Be	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	He		
Na	Mg	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	(Tc)	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
Fr	Ra	Ac*	La	Ce	Pr	Nd	(Pm)	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
			Ac	Th	Pa	U	Aktinide																

Beispiel Eisen:  
 nur wenn S und O  
 aufgebraucht sind  
 hat Fe siderophilen  
 Charakter



# Elektronegativität und geochemischer Charakter



## Quellennachweis

Der geochemische Charakter ist eine Funktion der kristallchemischen Eigenschaften

- Bindungsart
- Reaktionsenthalpie

$E < 1,6$ Lithophil				$1,6 < E < 2,0$ Chalkophil				$2,0 < E < 2,4$ Siderophil	
Cs <sup>+</sup>	0,7			Pb <sup>2+</sup>	1,6			← As <sup>3+</sup>	2,0
Rb <sup>+</sup>	0,8			← Fe <sup>2+</sup>	1,65	→			
K <sup>+</sup>	0,8			← Co <sup>2+</sup>	1,7	→			
Ba <sup>2+</sup>	0,85			← Ni <sup>2+</sup>	1,7	→			
Na <sup>+</sup>	0,9			← Zn <sup>2+</sup>	1,7				
Sr <sup>2+</sup>	1,0	U <sup>4+</sup>	1,7				p <sup>5+</sup>	2,1	
Ca <sup>2+</sup>	1,0	W <sup>4+</sup>	1,7						
Li <sup>+</sup>	1,0	Si <sup>4+</sup>	1,8					Ru <sup>4+</sup> 2,2	
REE	1,05–1,2			← Ge <sup>4+</sup>	1,8	→		Rh <sup>3+</sup> 2,2	
Mg <sup>2+</sup>	1,2			← Fe <sup>3+</sup>	1,8	→		Pd <sup>2+</sup> 2,2	
Sc <sup>3+</sup>	1,3			← Cu <sup>+</sup>	1,8	→		Os <sup>4+</sup> 2,2	
Th <sup>4+</sup>	1,3			Ag <sup>+</sup>	1,9			Ir <sup>4+</sup> 2,2	
V <sup>3+</sup>	1,35			← Sn <sup>4+</sup>	1,9	→		Pt <sup>2+</sup> 2,2	
Zr <sup>4+</sup>	1,4			Hg <sup>3+</sup>	1,9			Au <sup>+</sup> 2,4	
Mn <sup>2+</sup>	1,4 →			Sb <sup>3+</sup>	1,9 →				
Be <sup>2+</sup>	1,5			Bi <sup>3+</sup>	1,9				
Al <sup>3+</sup>	1,5			Re <sup>3+</sup>	1,9 →				
Ti <sup>4+</sup>	1,5			← Cu <sup>2+</sup>	2,0	→			
Cr <sup>3+</sup>	1,6 →								

*Lithophile Elemente dunkel schattiert*



# Gibbsche Energie ( $\Delta G$ ) einiger Oxide

Geochemistry

William M. White

WILEY-BLACKWELL

Quellennachweis

Oxide	$-\Delta G_f^\circ$ (kJ/mole/oxygen)	Oxide	$-\Delta G_f^\circ$ (kJ/mole/oxygen)
CaO	604.0	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	304.2
ThO <sub>2</sub>	584.6	SnO <sub>2</sub>	260.0
MgO	569.4	FeO	245.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	527.3	WO <sub>3</sub>	247.3
ZrO <sub>2</sub>	521.6	CdO	221.9
CeO <sub>2</sub>	512.6	NiO	211.6
TiO <sub>2</sub>	444.7	MoO <sub>3</sub>	215.4
SiO <sub>2</sub>	428.1	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	207.9
Na <sub>2</sub> O	398.3	PbO	189.3
Ta <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	374.0	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	180.1
MnO	362.8	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	168.8
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	353.1	CuO	127.6
ZnO	318.4	Ag <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.9

# Goldschmidt Klassifikation der Elemente

FeNi-rich core

SiMg-rich mantle

SiAl-rich crust

**V.M.Goldschmidt scheme:**

**Atmophile** (gas loving)

H, N, noble gases....

**Lithophile** (silicate loving)

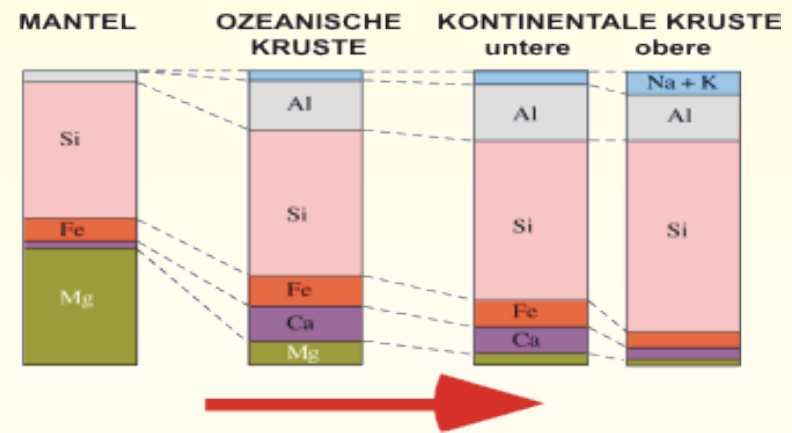
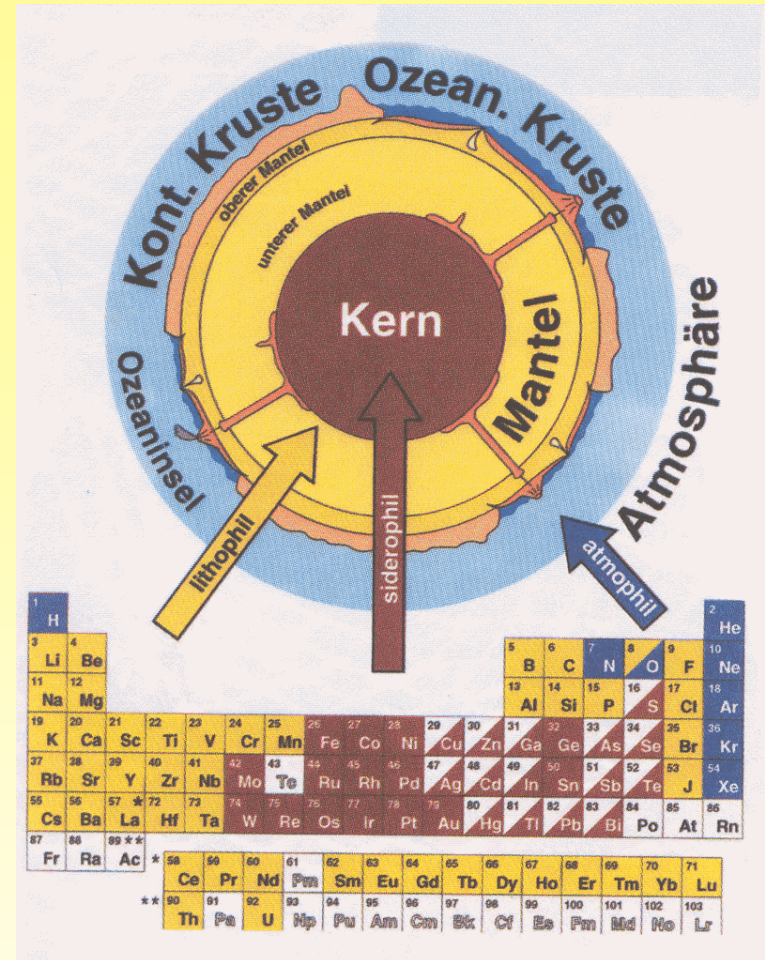
Si, Al, Mg, Na, K, Ca, Ti...

**Chalcophile** (sulfur loving)

Cu, Se, Cd....

**Siderophile** (iron loving)

Fe, Ni, Co, Pt, Au, W, PGE....












# Elementeinteilung nach Verhalten in BSE

**The Geochemical Periodic Table**

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rd
Fr	Ra	Ac															

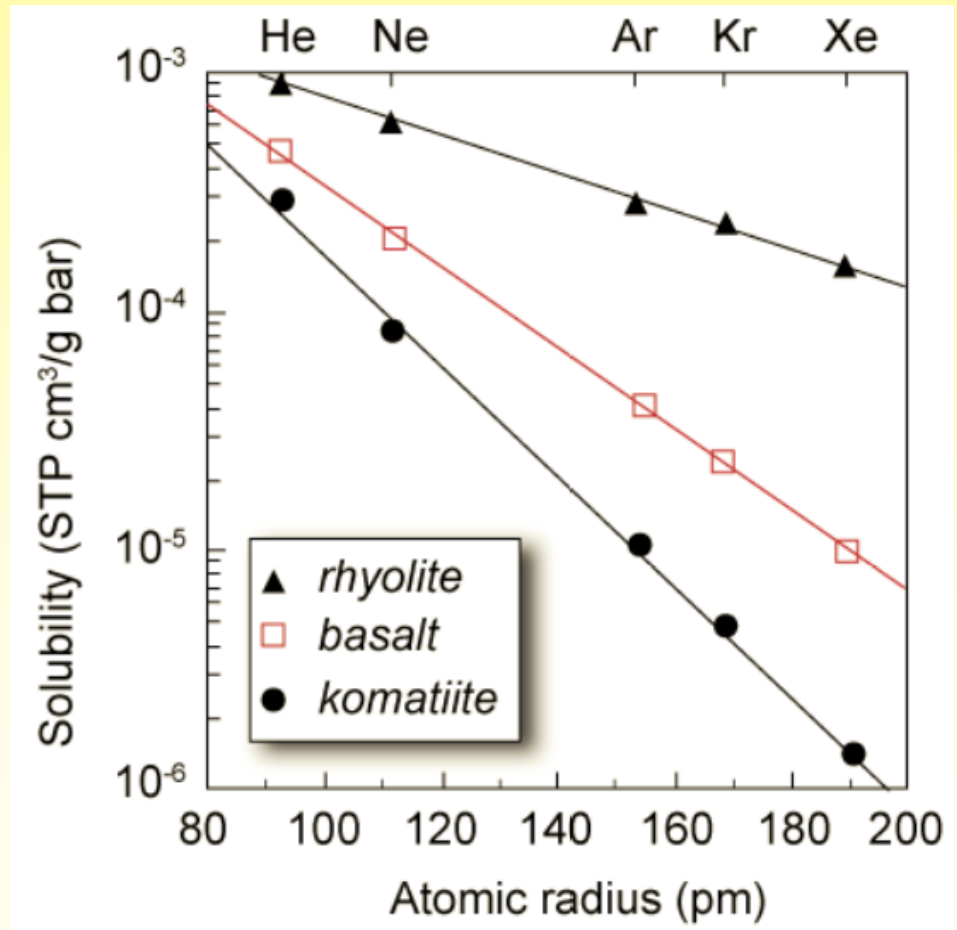
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U											

 He	<i>Volatiles</i>	 Sc	<i>First Series Transition Metals</i>	 Rb	<i>Alkali/Alkaline Earth Trace Elements</i>
 S	<i>Semi-Volatiles</i>	 Zr	<i>High Field Strength Elements</i>	 La	<i>Rare Earths &amp; Related Elements</i>
 Mg	<i>Major Elements</i>	 Pt	<i>Noble Metals</i>	 Pa	<i>U/Th Decay Series Elements</i>

# Volatile Elemente

## Löslichkeit von Edelgasen in Schmelzen

Löslichkeit abhängig vom Atomradius und der Schmelzzusammensetzung



# Semivolatile Elemente

**The Geochemical Periodic Table**

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rd
Fr	Ra	Ac															
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			Ac	Th	Pa	U											



Volatiles



Semi-Volatiles



Major Elements



First Series  
Transition Metals



High Field  
Strength Elements



Noble Metals



Alkali/Alkaline  
Earth Trace Elements



Rare Earths &  
Related Elements



U/Th Decay  
Series Elements

# Semivolatile Elemente

Entmischung (Liquid immiscibility)

Kohlenstoff als  $\text{CO}_2$   
Schwefel als  $\text{SO}_2$  oder  $\text{H}_2\text{S}$

Liquide Entmischung  
von Sulfidschmelzen

Liquide Entmischung  
von  $\text{CO}_2$   
→ Karbonatite



# Seltenerdelemente (SEE)

**The Geochemical Periodic Table**

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rd
Fr	Ra	Ac															

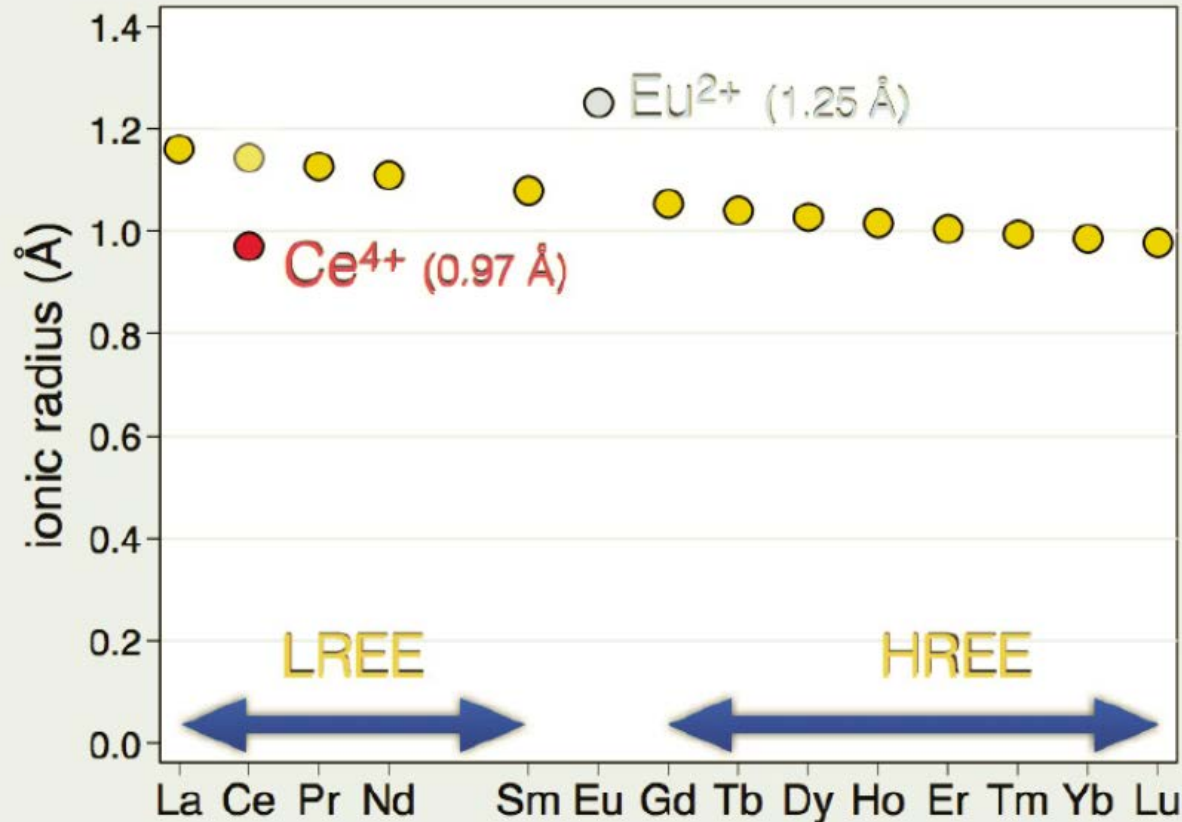
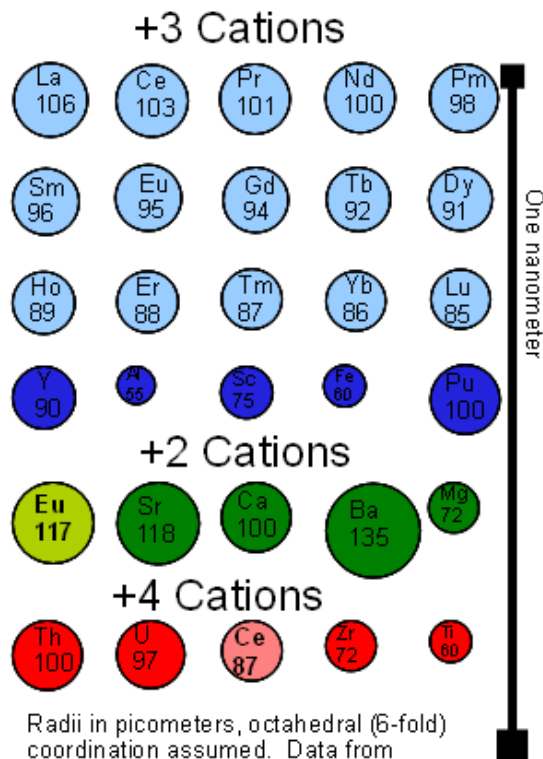
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U											

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>He</td><td><i>Volatiles</i></td></tr> <tr><td>S</td><td><i>Semi-Volatiles</i></td></tr> <tr><td>Mg</td><td><i>Major Elements</i></td></tr> </table>	He	<i>Volatiles</i>	S	<i>Semi-Volatiles</i>	Mg	<i>Major Elements</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>Sc</td><td><i>First Series Transition Metals</i></td></tr> <tr><td>Zr</td><td><i>High Field Strength Elements</i></td></tr> <tr><td>Pt</td><td><i>Noble Metals</i></td></tr> </table>	Sc	<i>First Series Transition Metals</i>	Zr	<i>High Field Strength Elements</i>	Pt	<i>Noble Metals</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>Rb</td><td><i>Alkali/Alkaline Earth Trace Elements</i></td></tr> <tr><td>La</td><td><i>Rare Earths &amp; Related Elements</i></td></tr> <tr><td>Pa</td><td><i>U/Th Decay Series Elements</i></td></tr> </table>	Rb	<i>Alkali/Alkaline Earth Trace Elements</i>	La	<i>Rare Earths &amp; Related Elements</i>	Pa	<i>U/Th Decay Series Elements</i>
He	<i>Volatiles</i>																			
S	<i>Semi-Volatiles</i>																			
Mg	<i>Major Elements</i>																			
Sc	<i>First Series Transition Metals</i>																			
Zr	<i>High Field Strength Elements</i>																			
Pt	<i>Noble Metals</i>																			
Rb	<i>Alkali/Alkaline Earth Trace Elements</i>																			
La	<i>Rare Earths &amp; Related Elements</i>																			
Pa	<i>U/Th Decay Series Elements</i>																			

# Ionenradien der Seltenerdelemente (SEE)

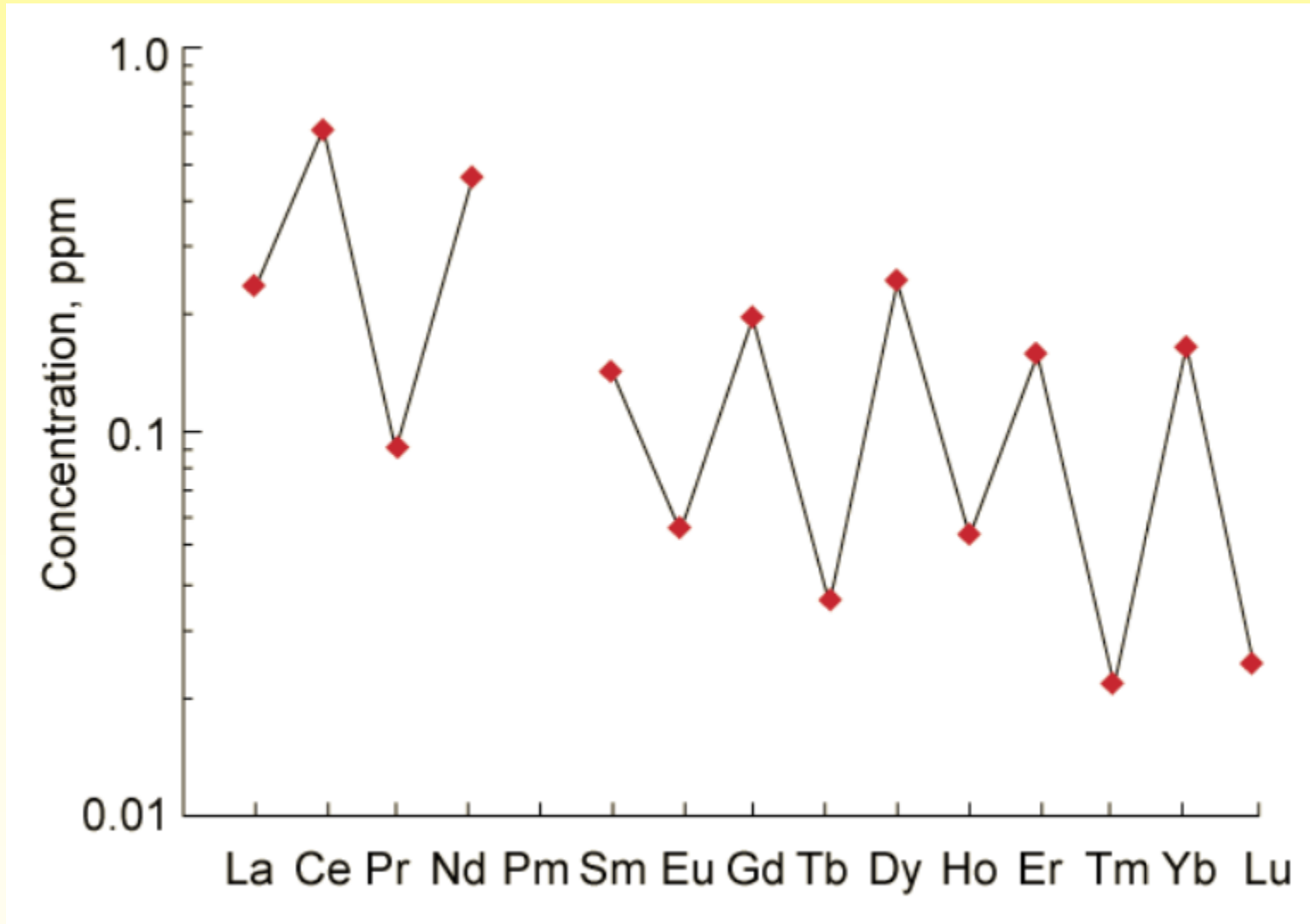
## Lanthanidenkontraktion



Radii in picometers, octahedral (6-fold) coordination assumed. Data from Shannon & Prewitt(1969), as mirrored on sites linked in text. Scale is ten million to one; 1 cm=1Å  
<http://lblemminglounge.blogspot.com/>

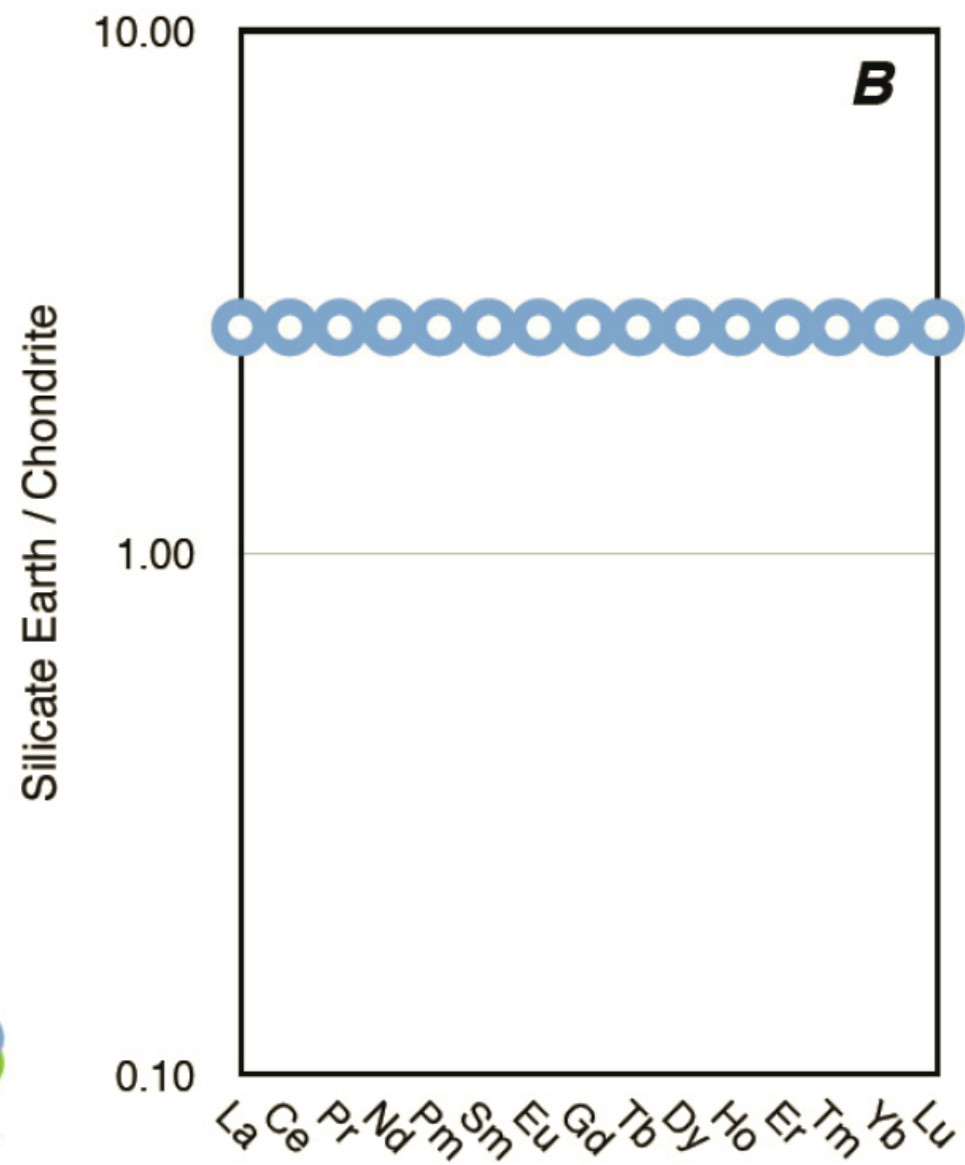
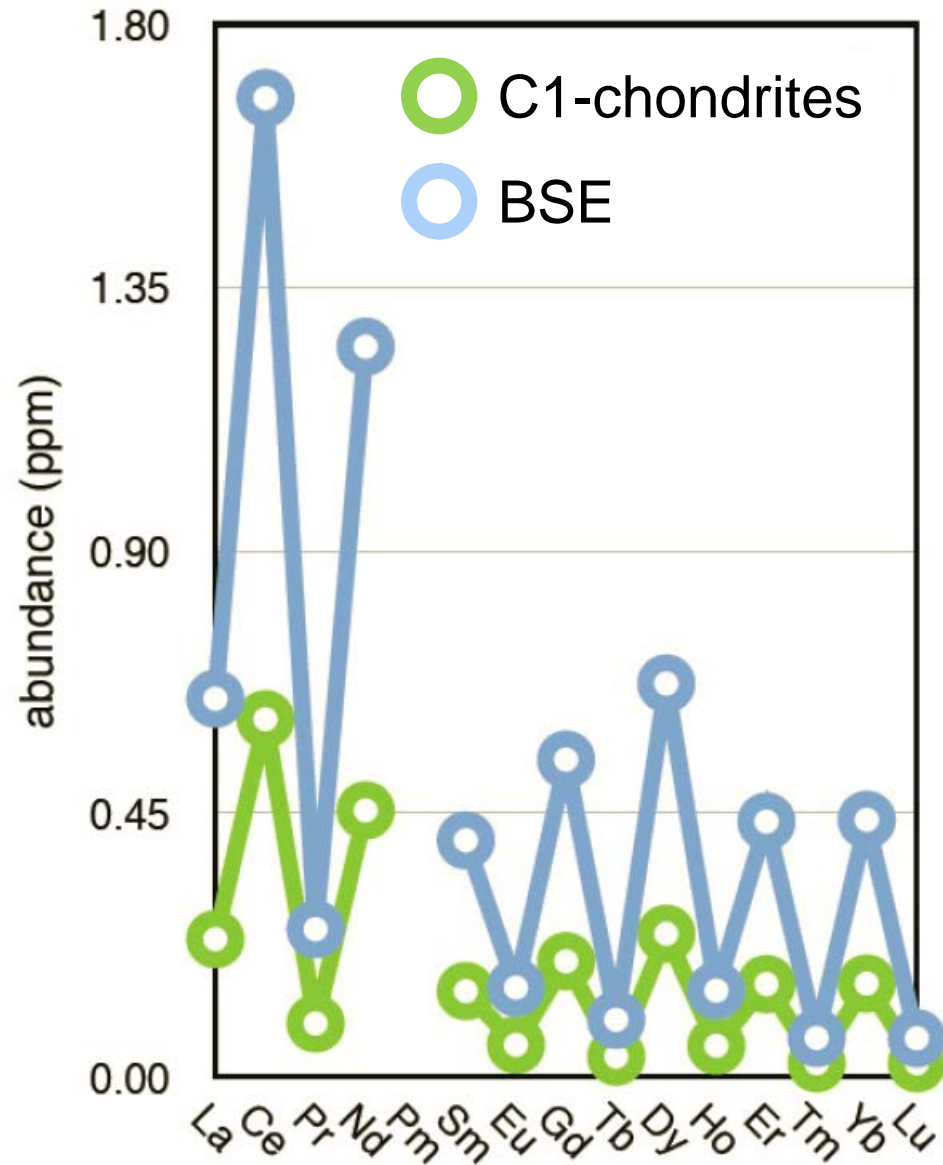
# Konzentrationen der Seltenerdelemente (SEE)

## Oddo-Harkins Effekt



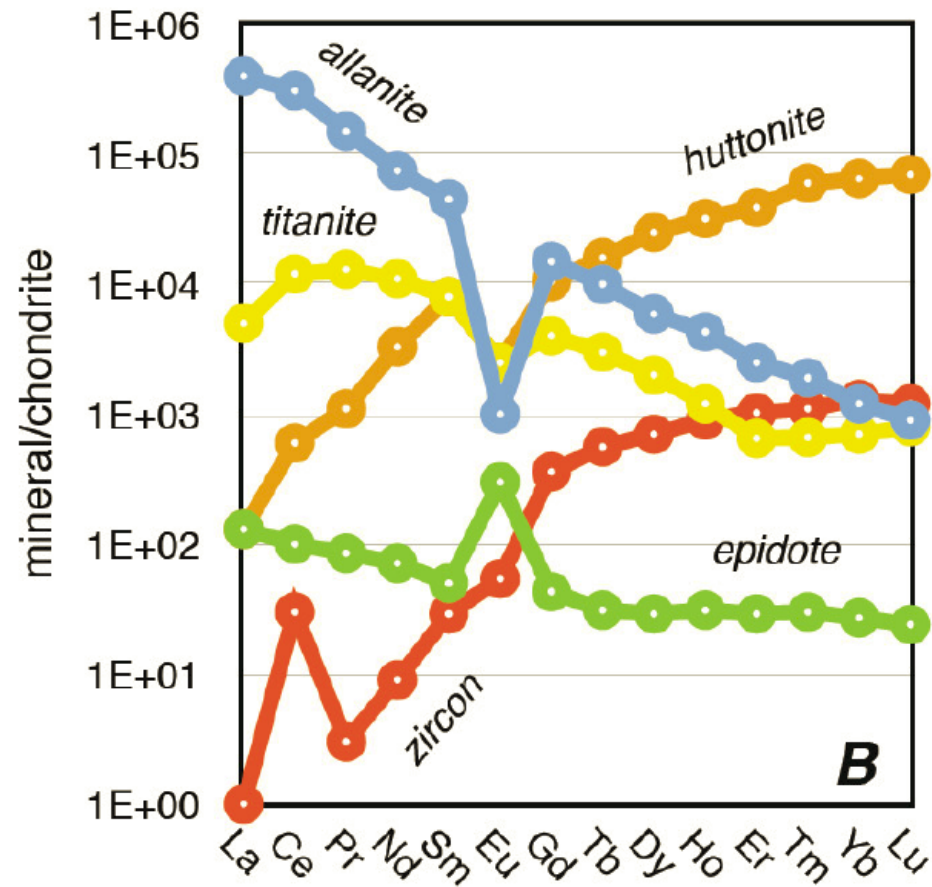
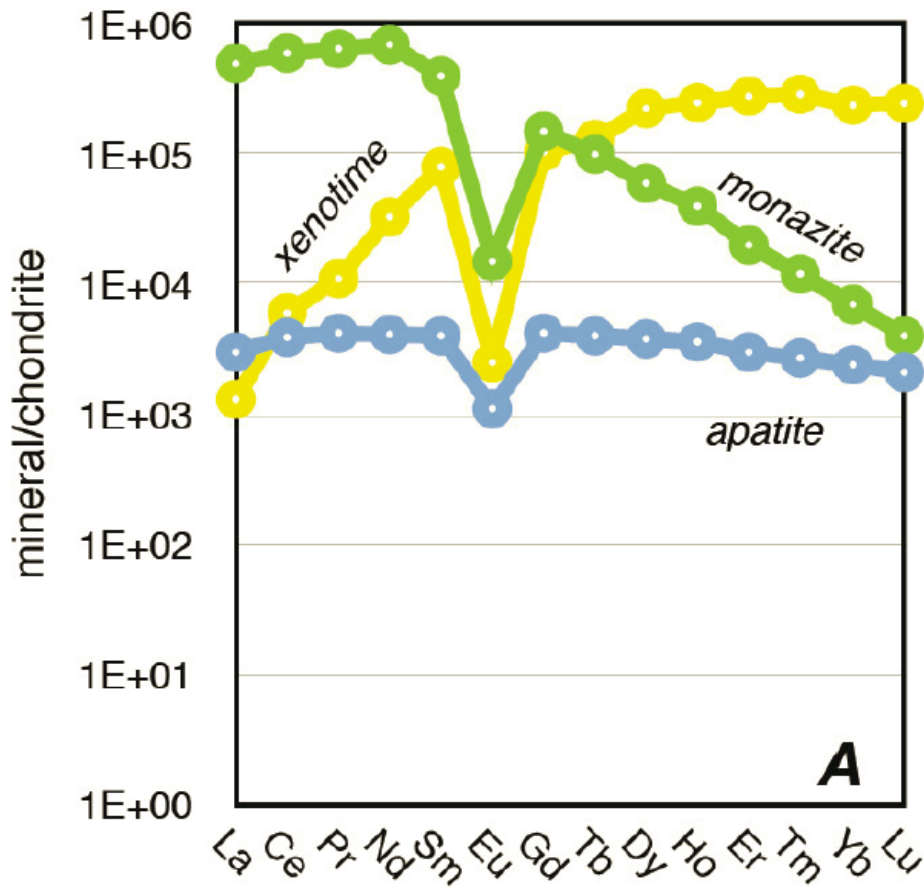
# Seltenerdelemente (SEE)

## Chondritnormierung



# SEE-Gehalte

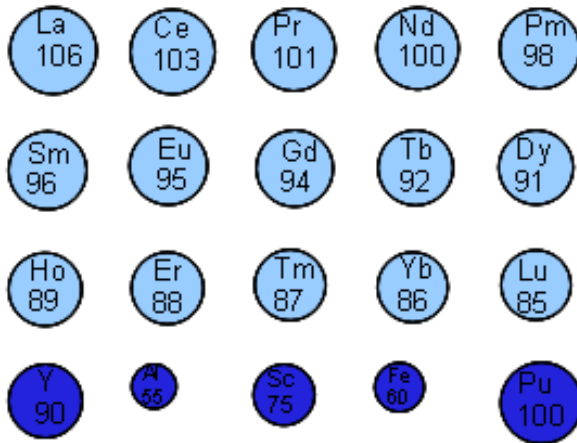
## akzessorische Minerale



Quelle: F. Bea (1996, 2015)

# Selten-Erd Elemente

## +3 Cations



## +2 Cations

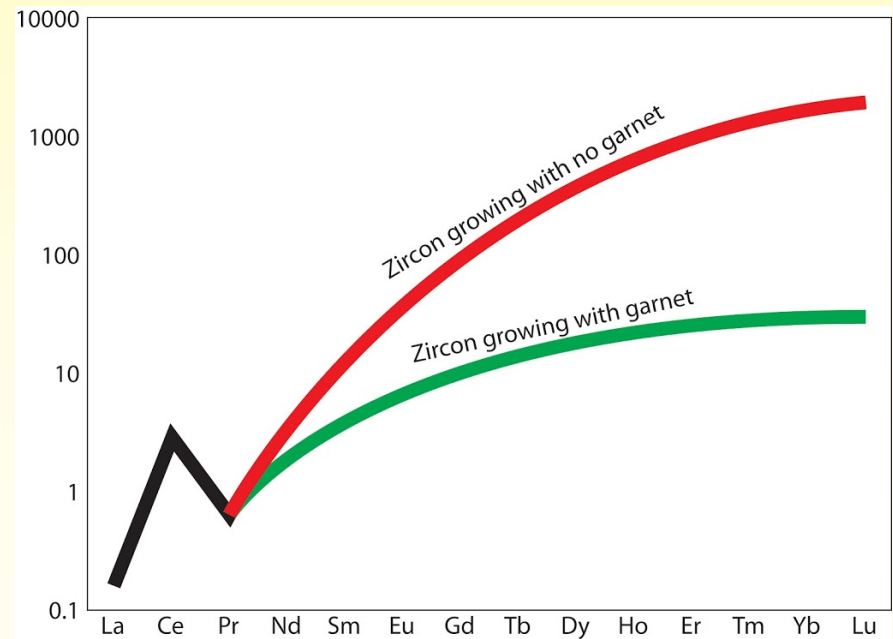
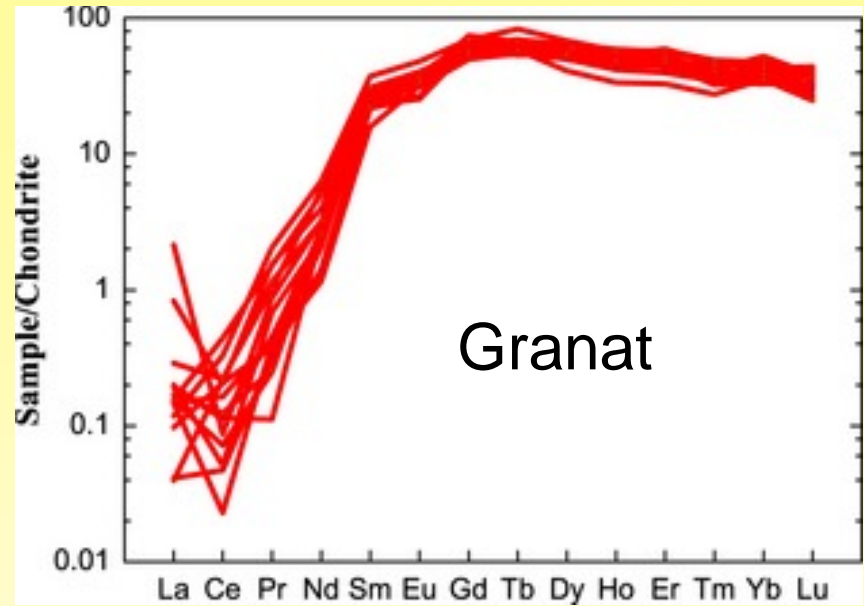


## +4 Cations



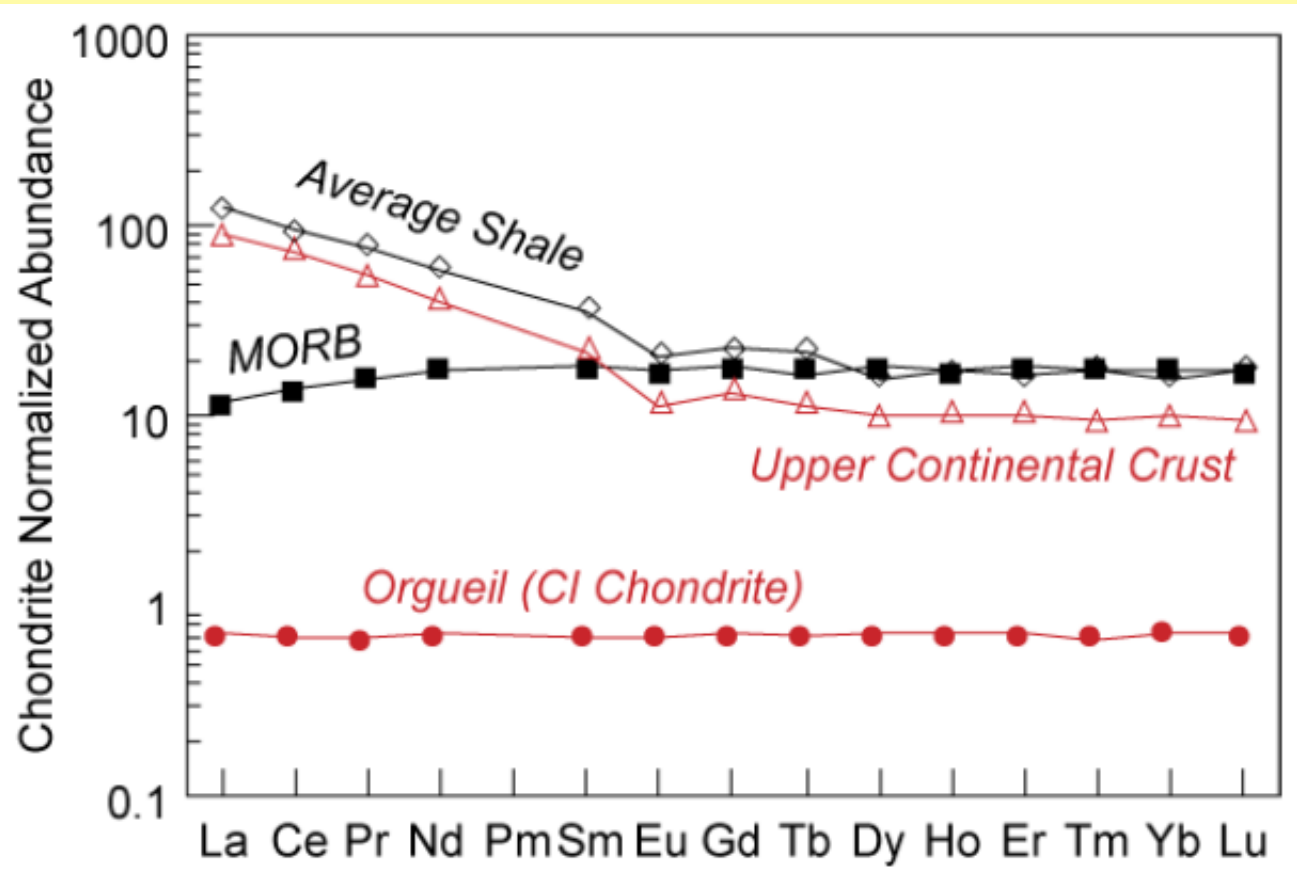
Radii in picometers, octahedral (6-fold) coordination assumed. Data from Shannon & Prewitt(1969), as mirrored on sites linked in text. Scale is ten million to one; 1 cm=1Å

<http://labeledminglounge.blogspot.com/>



# Selten-Erd Elemente

## Kruste und Mantel



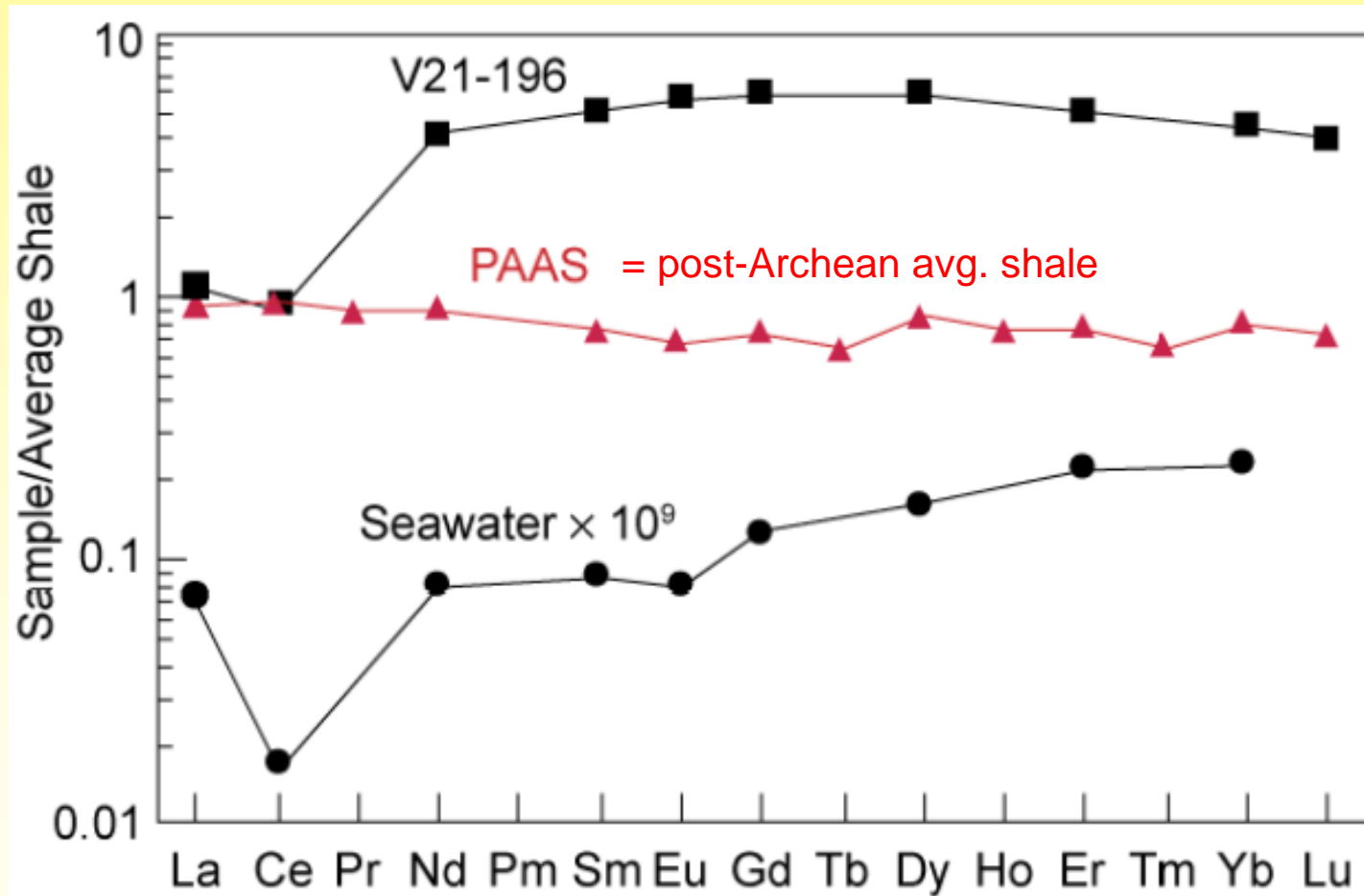
### Normierungswerte für SEE

	Ordinary Chondrites	Orgueil (CI Chondrite)
La	0.329	0.245
Ce	0.865	0.638
Pr	0.130	0.0964
Nd	0.630	0.474
Sm	0.203	0.154
Eu	0.077	0.058
Gd	0.276	0.204
Tb	0.055	0.0375
Dy	0.343	0.254
Ho	0.077	0.0567
Er	0.225	0.166
Tm	0.035	0.0256
Yb	0.220	0.165
Lu	0.034	0.0254

"Ordinary chondrites" is modified from Nakamura (1974), Orgueil are the values tabulated by Palme and Jones (2005), Leedy, an ordinary chondrite, is from Masuda (1973), and Average Shale is from Piper (1974).

# Selten-Erd Elemente










## Meerwasser und Tiefseesedimente



# Alkali- und Erdalkalielelemente

**The Geochemical Periodic Table**

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rd	
Fr	Ra	Ac																
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U													

 He	<i>Volatiles</i>	 Sc	<i>First Series Transition Metals</i>	 Rb	<i>Alkali/Alkaline Earth Trace Elements</i>
 S	<i>Semi-Volatiles</i>	 Zr	<i>High Field Strength Elements</i>	 La	<i>Rare Earths &amp; Related Elements</i>
 Mg	<i>Major Elements</i>	 Pt	<i>Noble Metals</i>	 Pa	<i>U/Th Decay Series Elements</i>










# HFSE

**The Geochemical Periodic Table**

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rd
Fr	Ra	Ac															

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U											

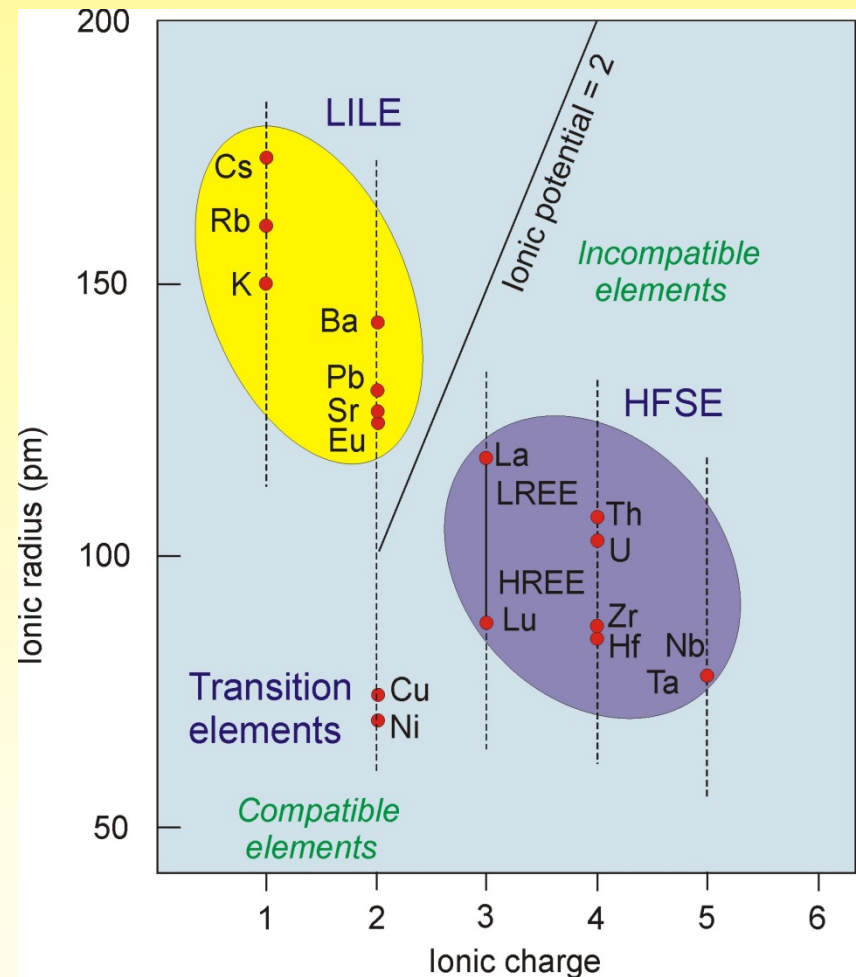
 He	<i>Volatiles</i>	 Sc	<i>First Series Transition Metals</i>	 Rb	<i>Alkali/Alkaline Earth Trace Elements</i>
 S	<i>Semi-Volatiles</i>	 Zr	<i>High Field Strength Elements</i>	 La	<i>Rare Earths &amp; Related Elements</i>
 Mg	<i>Major Elements</i>	 Pt	<i>Noble Metals</i>	 Pa	<i>U/Th Decay Series Elements</i>

# Ionenpotential

**Ionenpotential = Ladung/Radius (Å)**

- Maß für die Dichte der elektrischen Ladung an der Oberfläche eines Ions (und damit Maß für die Kraft, ein Anion zu polarisieren)
- Beispiele:
  - $K^+ = 1/1.46 \text{ Å} = 0.68$
  - $Rb^+ = 1/1.57 \text{ Å} = 0.64$
  - $Sr^{2+} = 2/1.21 \text{ Å} = 1.65$
  - $Nb^{5+} = 5/0.7 \text{ Å} = 7.14$

Das Ionenpotential eines Kations gibt einen wichtigen Hinweis auf sein Verhalten in magmatischen und wässrigen Systemen



LILE: large ion lithophile elements: Großionige lithophile Elemente  
HFSE: high field strength elements: Elemente mit hoher Feldstärke

**mobile Elemente - immobile Elemente**

# Kompatibel vs. Inkompatibel

Elemente, deren Ladung und/oder Ionenradius sich deutlich von dem ersetzten Ion im Kristallgitter unterscheiden, reichern sich bei partieller Aufschmelzung in der Schmelzphase an. Diese Elemente heißen **inkompatibel**

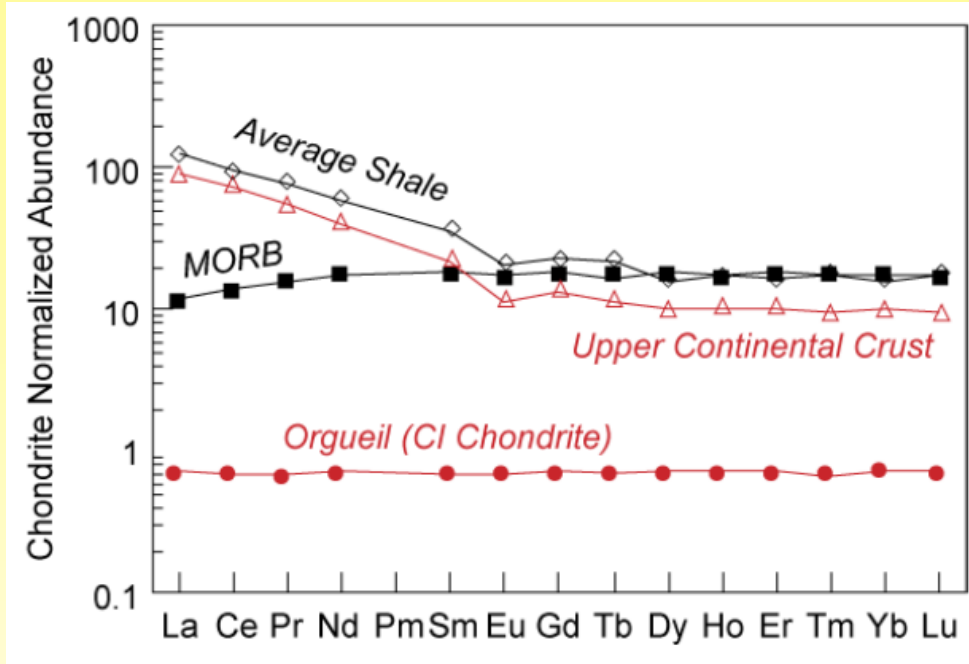
Beispiele: K, Rb, Ba, Cs, LSEE, HFSE

Elemente, die sich aufgrund der Ähnlichkeit ihrer Ladung und ihres Ionenradius zu dem ersetzten Ion im Kristallgitter leicht einbauen lassen, bleiben während der partiellen Aufschmelzung in den festen Mineralphasen. Diese Elemente heißen **kompatibel**

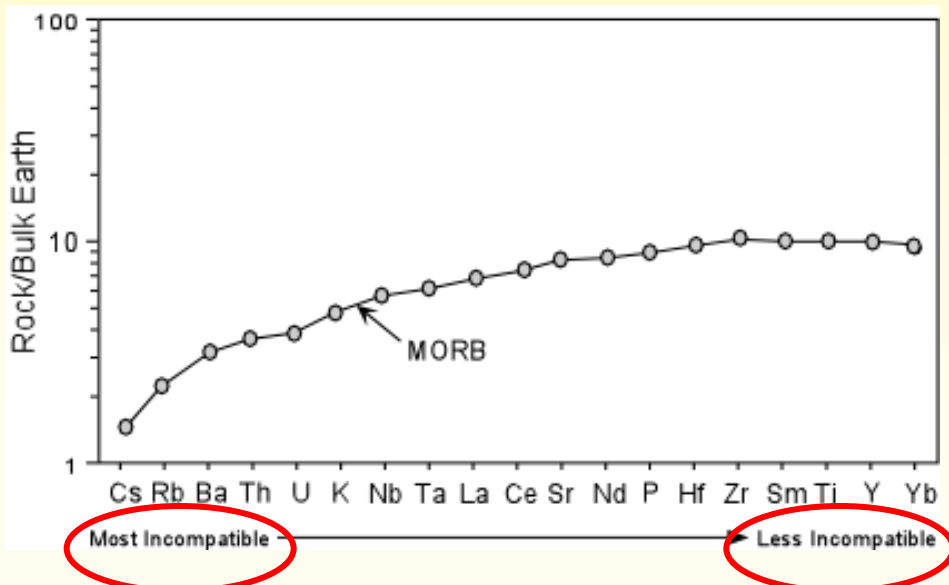
Beispiele: Ni, Cr, Co

# Normierte Diagramme

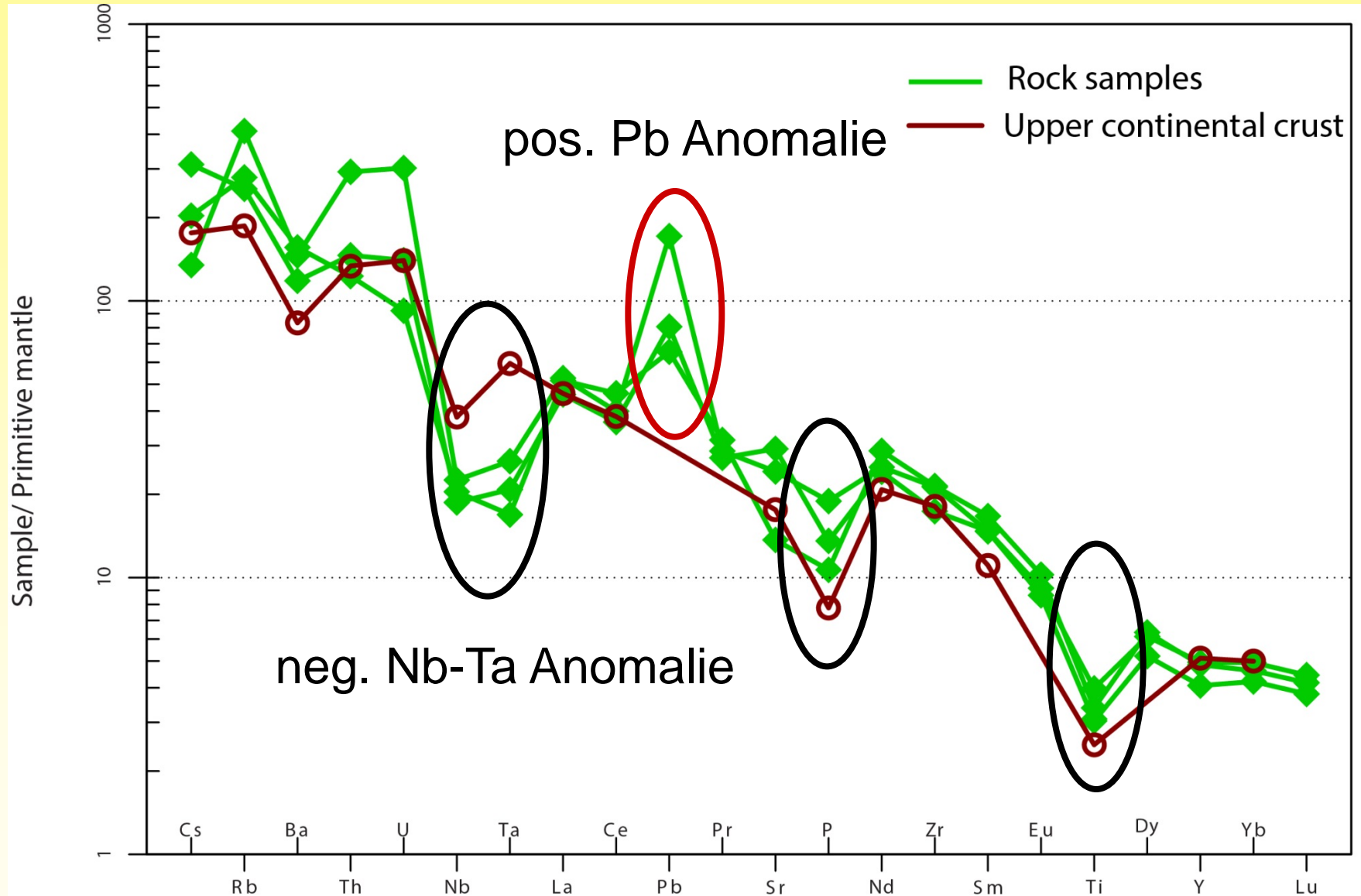
Selten-Erd-Diagramm



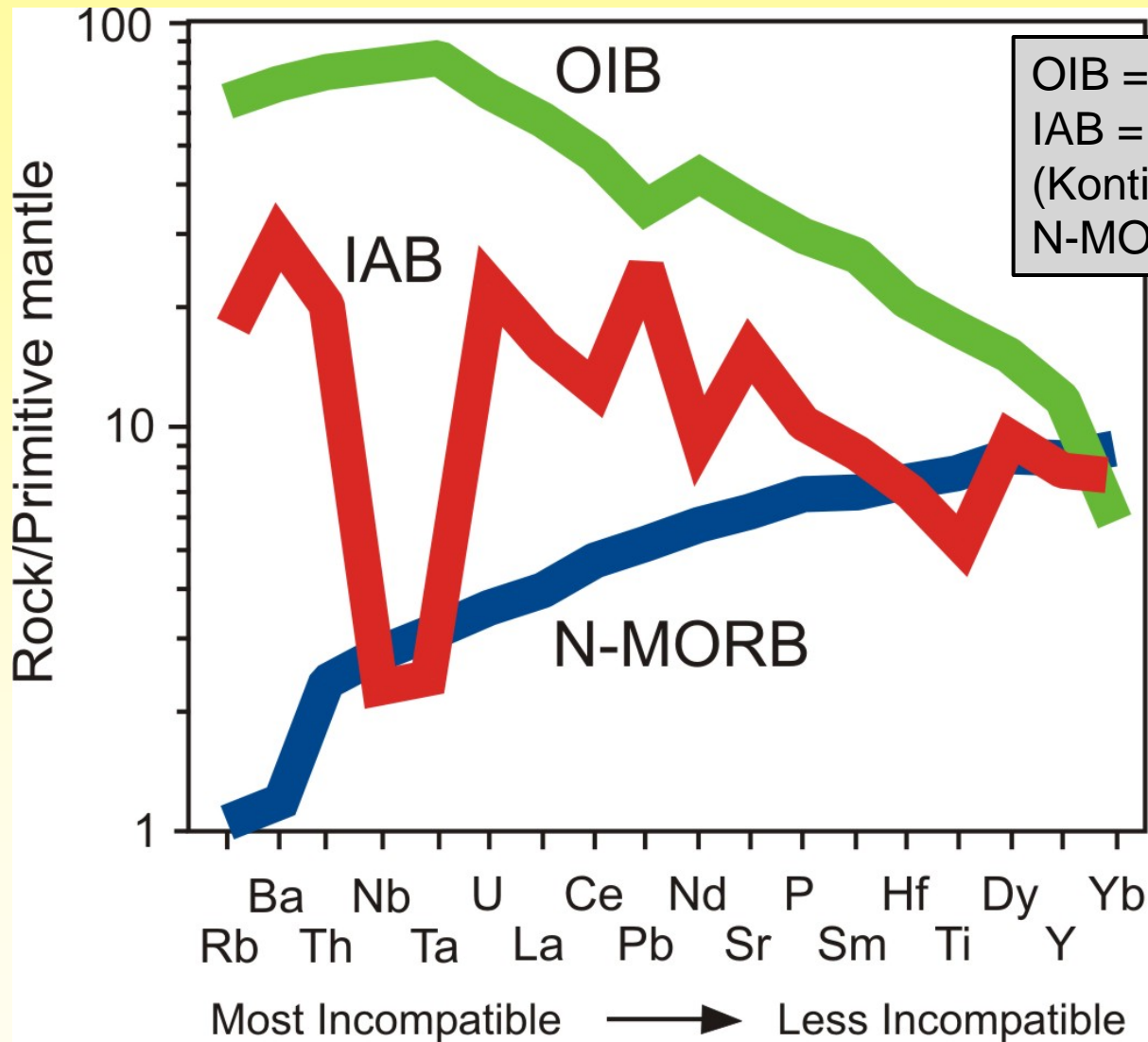
Spider-Diagramm bzw. Multi-Element Diagramm



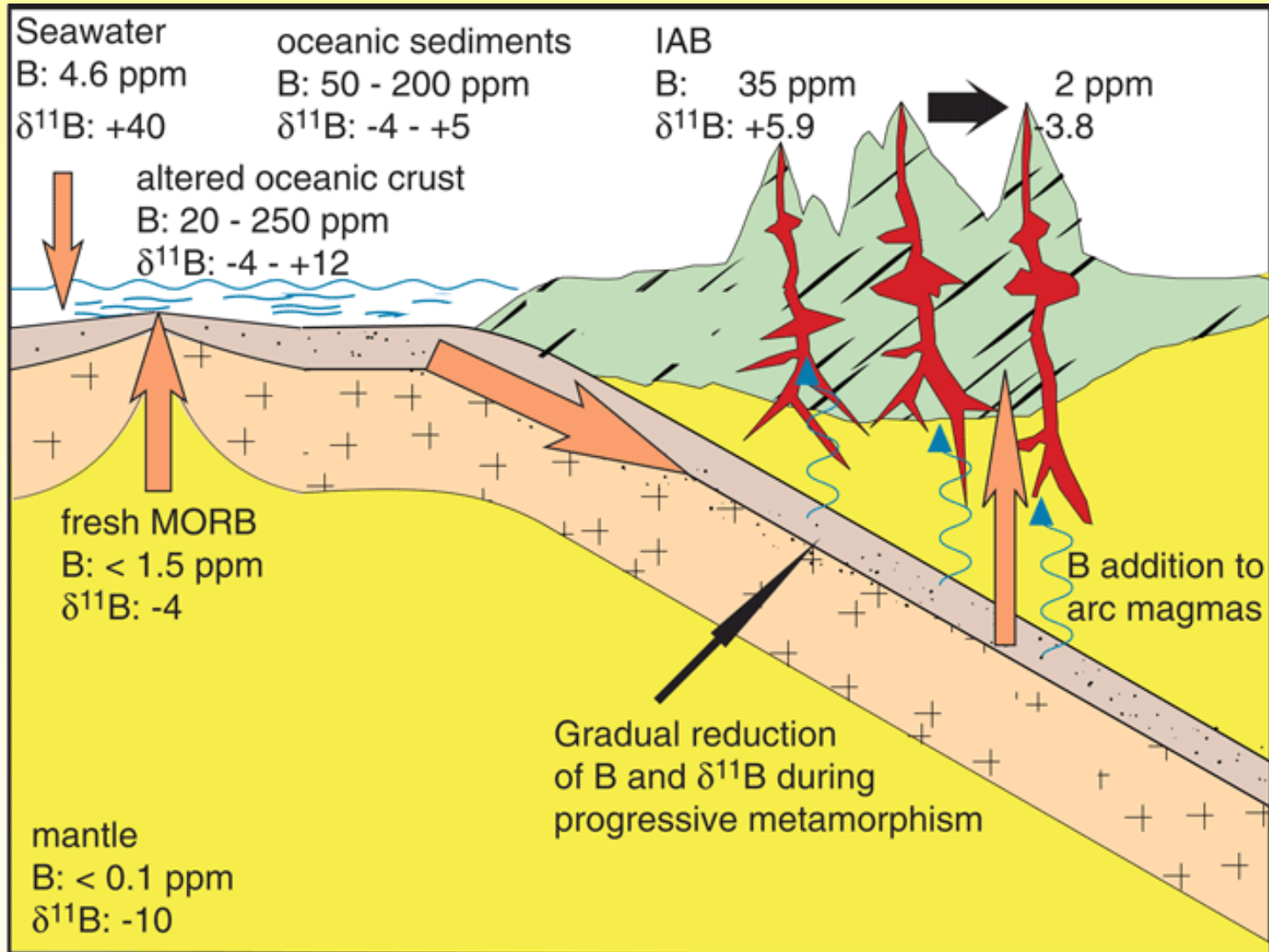
# Spiderdiagramm – kontinentale Kruste



# Spiderdiagramm – Basalte



# Weitere wichtige Elemente: Bor



# Edelmetalle, PGE

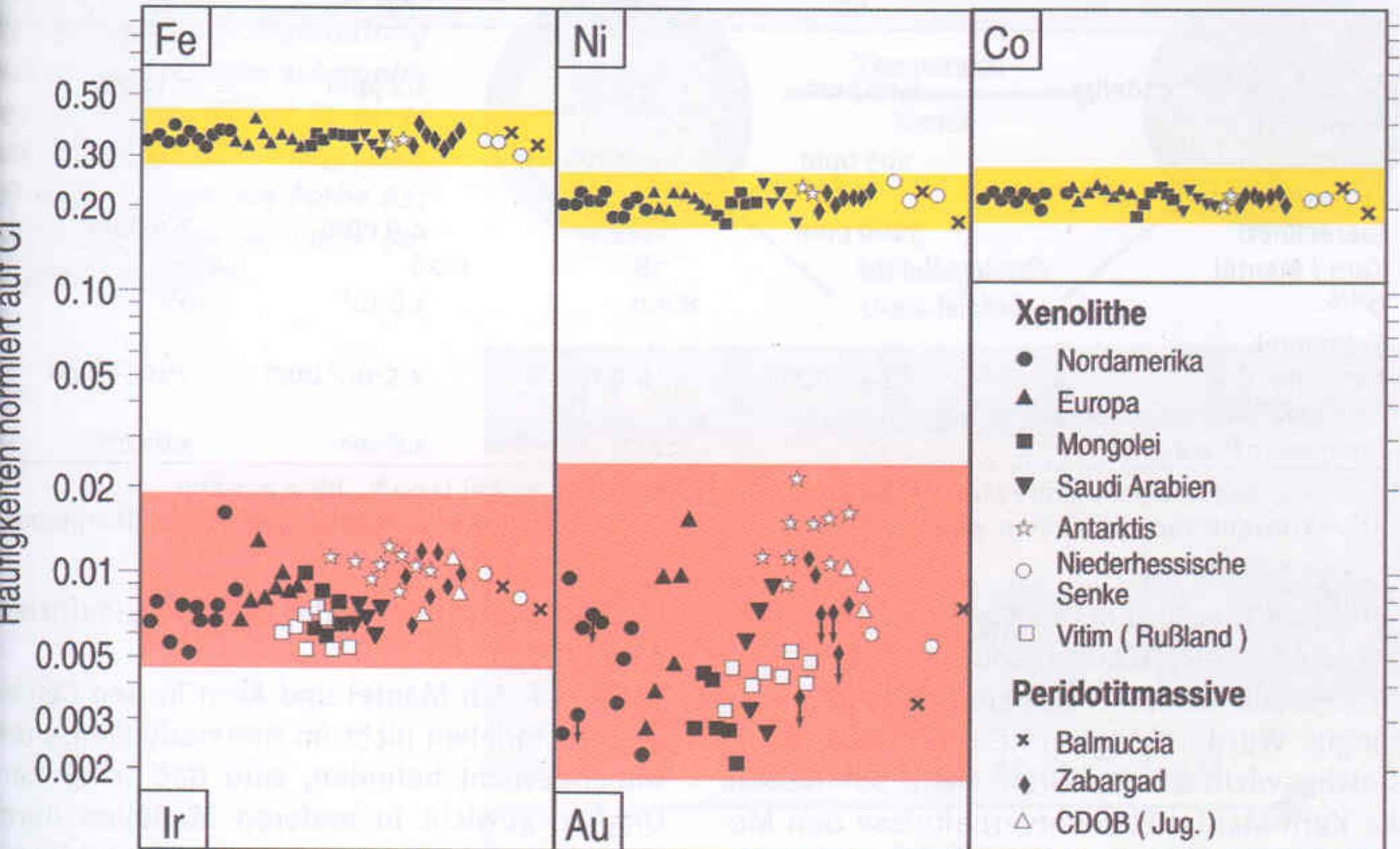
**The Geochemical Periodic Table**

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			Ac	Th	Pa	U											

<b>He</b>	<i>Volatiles</i>	<b>Sc</b>	<i>First Series Transition Metals</i>	<b>Rb</b>	<i>Alkali/Alkaline Earth Trace Elements</i>
<b>S</b>	<i>Semi-Volatiles</i>	<b>Zr</b>	<i>High Field Strength Elements</i>	<b>La</b>	<i>Rare Earths &amp; Related Elements</i>
<b>Mg</b>	<i>Major Elements</i>	<b>Pt</b>	<i>Noble Metals</i>	<b>Pa</b>	<i>U/Th Decay Series Elements</i>

# Weitere Elemente: Siderophile Elemente

Siderophile Elemente in Gesteinen des oberen Erdmantels



# Elementkonzentrationen im Erdmantel - Hinweise zur Akkretionsgeschichte der Erde

	Co	Ni
<b>Gesamterde</b> (chondritisches Modell)	1107 ppm	2.40%
<b>Erdmantel</b> (gemessen)	105 ppm	0.20%
<b>Erdkern</b> (berechnet)	3200 ppm	7.50%
<b>Kern/Mantel</b>	31	38
<b>D<sup>M/S</sup></b>	710	8200
<b>Erdmantel</b> (berechnet)	4.5 ppm	9.0 x 10 <sup>-4</sup> %
<b>Überanreicherung im Erdmantel</b> (gemessen/berechnet)	23	222

D<sup>M/S</sup> = experimentell bestimmte Metall/Silikat Verteilungskoeffizienten bei 1400 °C.

$$V = 4/3 \times \pi \times r^3$$

R = 6370 km (Erdradius)

R = 3470 km (Kernradius)

	Vol%	Masse%
Erdmantel	82.0	67.2
Erdkern	16.2	32.4

$$\rightarrow (1107 \text{ ppm} \times 1) - (105 \text{ ppm} \times 0.672) = 1036 \text{ ppm}$$

$$1036 \text{ ppm} / 0.324 = 3200 \text{ ppm}$$

$$\rightarrow 3200 \text{ ppm} / 105 \text{ ppm} = 30.5$$

$$\rightarrow 3200 \text{ ppm} / 710 = 4.5 \text{ ppm}$$

$$\rightarrow 105 \text{ ppm} / 4.5 \text{ ppm} = 23$$

late veneer hypothesis

# Radiogene Isotopensysteme

Goldschmidt-Klassifikation im Periodensystem der Elemente

	1																	18	
1	1 H	2												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
2	3 Li	4 Be												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	(43) Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57-71 Lan	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Act	(104) Rf	(105) Db	(106) Sg	(107) Bh	(108) Hs	(109) Mt	(110) Ds	(111) Rg	(112) Cn	(113) Uut	(114) Uuq	(115) Uup	(116) Uuh	(117) Uus	(118) Uuo	
Lanthanoide	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	(61) Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
Actinoide	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93) Np	(94) Pu	(95) Am	(96) Cm	(97) Bk	(98) Cf	(99) Es	(100) Fm	(101) Md	(102) No	(103) Lr				

Legende:

Atmosphäphil	Chalcophil	Lithophil	Siderophil	sehr selten
--------------	------------	-----------	------------	-------------

# Spurenelemente

Verteilung von Spurenelementen zwischen koexistierenden Phasen

Verteilungskoeffizient (Partition or distribution coefficient):

$$D_i^{\alpha-\beta} = \frac{C_i^\alpha}{C_i^\beta}$$

Solid-liquid partition coefficient:

$$D_i^{s/l} = \frac{C_i^s}{C_i^l}$$

$$D_{(i)} = x^1 Kd_{(i)}^1 + x^2 Kd_{(i)}^2 + x^3 Kd_{(i)}^3 + \dots \quad (x^1 - \text{proportion of mineral 1})$$

# Spurenelemente

## Thermodynamische Zusammenhänge

$$D_i^{\alpha-\beta} = \frac{\lambda_i^\beta}{\lambda_i^\alpha} \exp\left(\frac{-\Delta G_i^{\alpha-\beta}}{RT}\right)$$

$$D_i^{\alpha-\beta} = \frac{h_i^\beta}{h_i^\alpha} \exp\left(\frac{\mu_i^{\circ\beta} - \mu_i^{\circ\alpha}}{RT}\right)$$

Druckabhängigkeit des Verteilungskoeffizienten:

$$\left(\frac{\partial \ln D_i}{\partial P}\right)_T = \frac{-\Delta V}{RT}$$

$\alpha, \beta$ : Phasen

$\mu$ : chemisches Potential von Element  $i$  in Phasen  $\alpha$  &  $\beta$

$\lambda$  = Aktivitäten

$h$  = Henry Konstante

$R$  = Gaskonstante

$T$  = Temperatur

# Spurenelemente

kompatibles & inkompatibles Verhalten

$$D_i^{s/l} \geq 1$$

Kompatibles Element

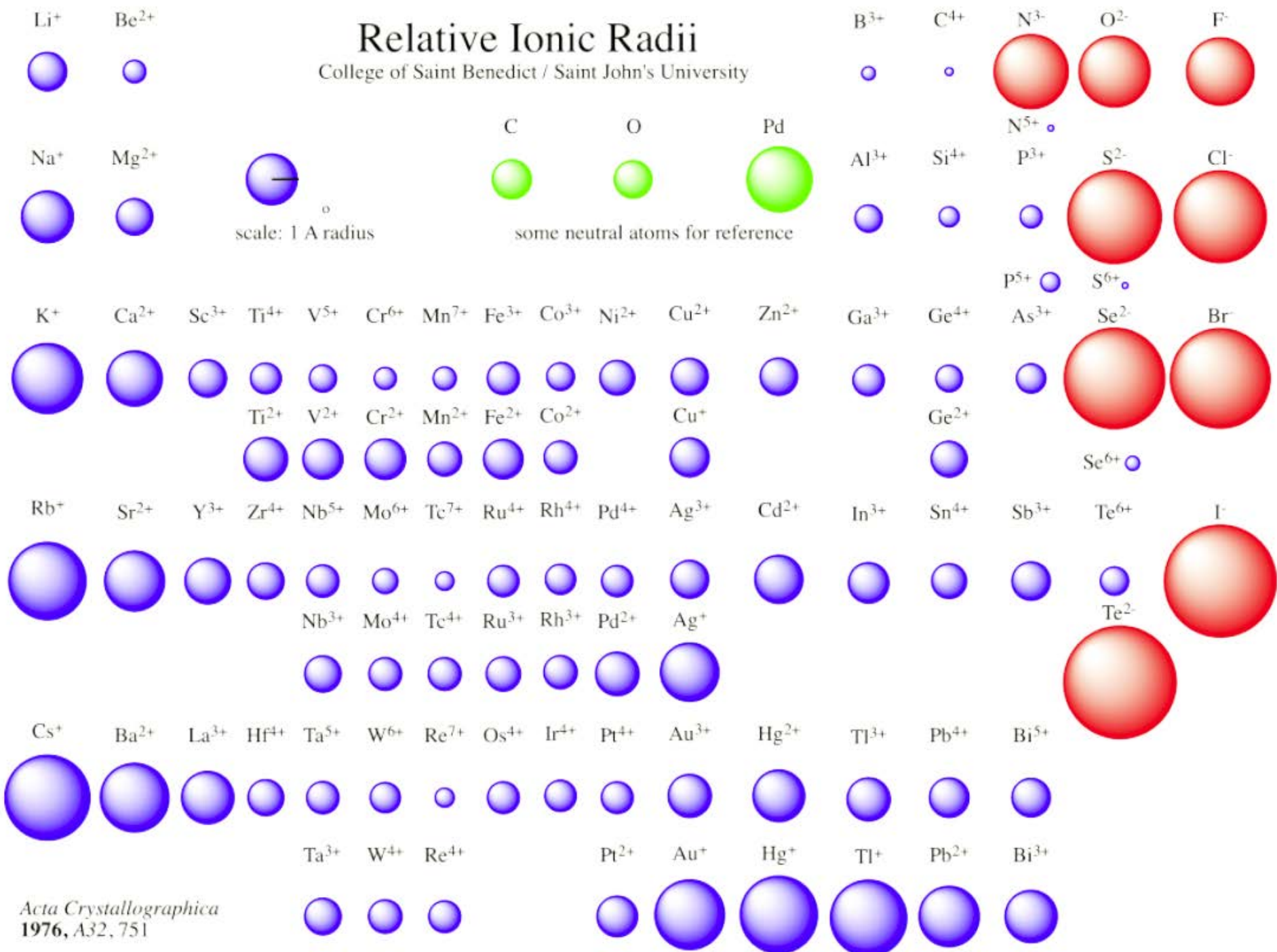
$$D_i^{s/l} \ll 1$$

Inkompatibles Element

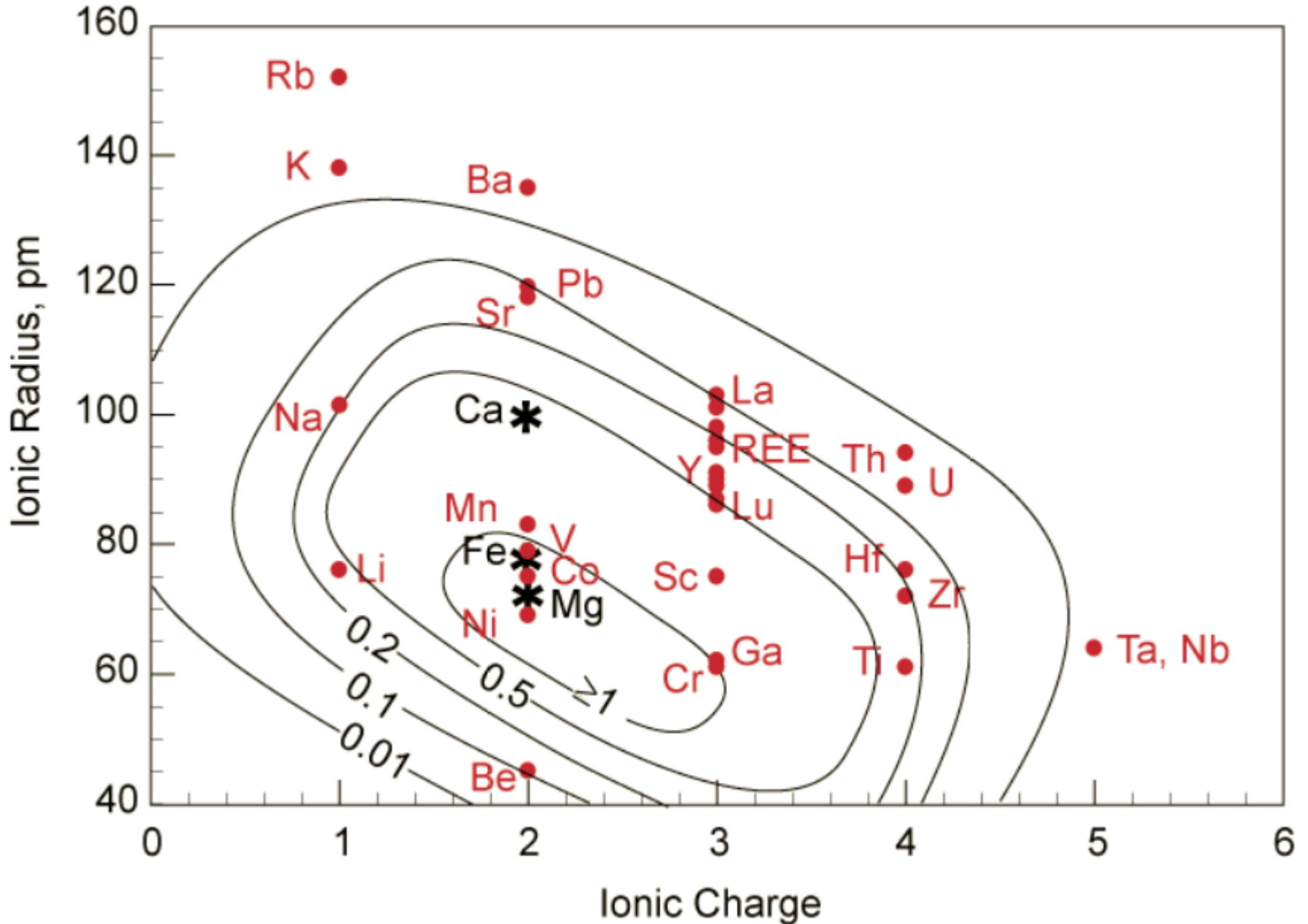
Begriffe beziehen sich gewöhnlich auf die Verteilung zwischen Phasen, die in mafischen/ultramafischen Gesteinen gesteinsbildend sind, und silikatischen Schmelzen

# Relative Ionic Radii

College of Saint Benedict / Saint John's University



# Ionenpotential und Verteilungskoeffizienten



# Goldschmidtsche Regel(n)

ein vollständiger Austausch (Substitution) ist zwischen Atomen möglich, die gleiche Ladung besitzen und deren Radien sich um nicht mehr als 10-15 % unterscheiden.

So lassen sich lückenlose Mischkristallreihen erklären, z.B. zwischen

Fayalit ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) und Forsterit ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ )

Gitterplätze in gesteinsbildenden Mineralen sind meistens mit zweiwertigen Kationen (Mg, Fe, Ca) besetzt.

# Goldschmidtsche Regel(n)

Je größer die Differenz in der Ladung zwischen dem “normalen” Ion im Kristall und dem ersetzenden Ion, desto schwieriger wird die Substitution

Was passiert bei ungleicher Ladung?

Goldschmidt: “...*ions whose charges differ by one unit substitute readily for one another provided electrical neutrality of the crystal is maintained.*”

→ gekoppelte Substitution:

z.B. die zwischen den Plagioklas-Feldspäten

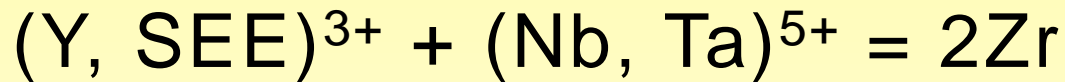
Albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) und Anorthit ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )

Substitutionen sind allgegenwärtig

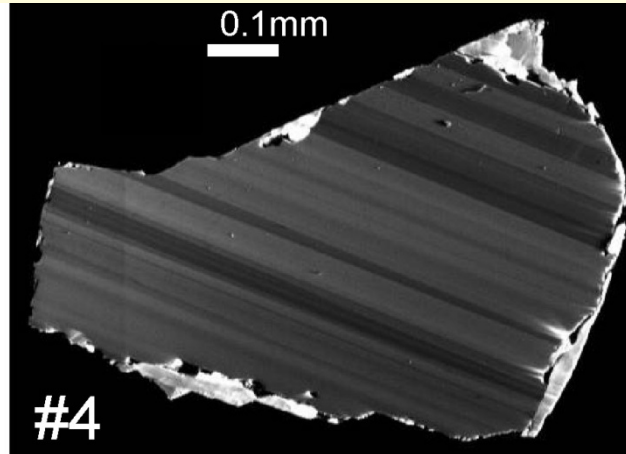
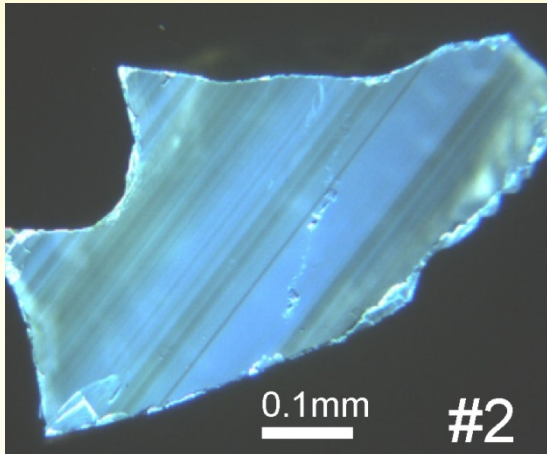
Minerale zeigen *chemische Variation* oder sind *zoniert*

Beispiel Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ )

SEE (La-Lu) substituieren Zr:



verschiedenen Farben durch Einbau unterschiedlicher Mengen an SEE



# Modifikation der Goldschmidt Regel(n)

Substitutionen sind limitiert bei gleicher Ionengröße (und Ladung), wenn die Ionen unterschiedliche Elektronegativitäten haben oder unterschiedliche Bindungen eingehen.

Beispiel,  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cu}^+$  haben den gleichen Radius und Ladung aber substituieren sich nicht gegenseitig.

# Spurenelement-Substitutionen

diadocher Ersatz eines häufigeren Elements durch ein selteneres von gleicher Wertigkeit und ähnlichem Ionenradius (ähnliches Ionenpotential)

$\text{Rb}^+$  (1.57 Å;  $Z/r = 0.637$ )  $\rightarrow$   $\text{K}^+$  (1.46 Å,  $Z/r = 0.68$ ) in Kfsp

$\text{Sr}^{2+} \rightarrow \text{Ca}^{2+}$

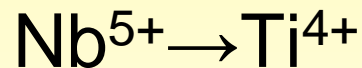
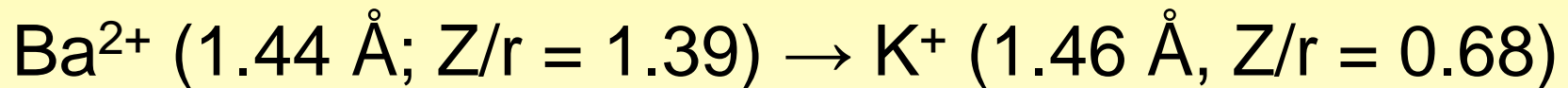
$\text{Ga}^{3+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$

$\text{Zr}^{4+}$  (0.80 Å);  $\text{Hf}^{4+}$  (0.79 Å)

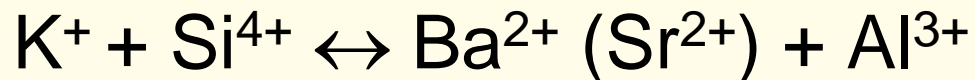
Hf bildet keine eigenen Minerale; tritt getarnt auf in Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ )

# Spurenelement-Substitutionen

diadocher Ersatz eines häufigeren Elements durch ein selteneres von *anderer Wertigkeit*, aber mit ähnlichem Ionenradius,

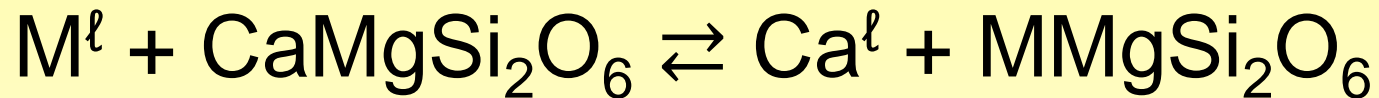


Voraussetzung: gekoppelte Substitution wegen Ladungsausgleich:



# Quantitative Betrachtungen

- Substitutionsreaktion:



- Gibbs Freie Energie für diese Reaktion:

$$\Delta G_r = \Delta G_{\text{exchange}}^{M-\text{Ca}} - \Delta G_{\text{melting}}^{\text{Di}}$$

- Der Verteilungskoeffizient für Element M hängt ab von den zwei Komponenten der Freien Energie:

$$D_M^{\text{Di}/\square} = \exp\left(\frac{\Delta G_{\text{melting}}^{\text{Di}} - \Delta G_{\text{ex}}^{M-\text{Ca}}}{RT}\right)$$

# “Crystal-strain Theorie” und Verteilungskoeffizienten

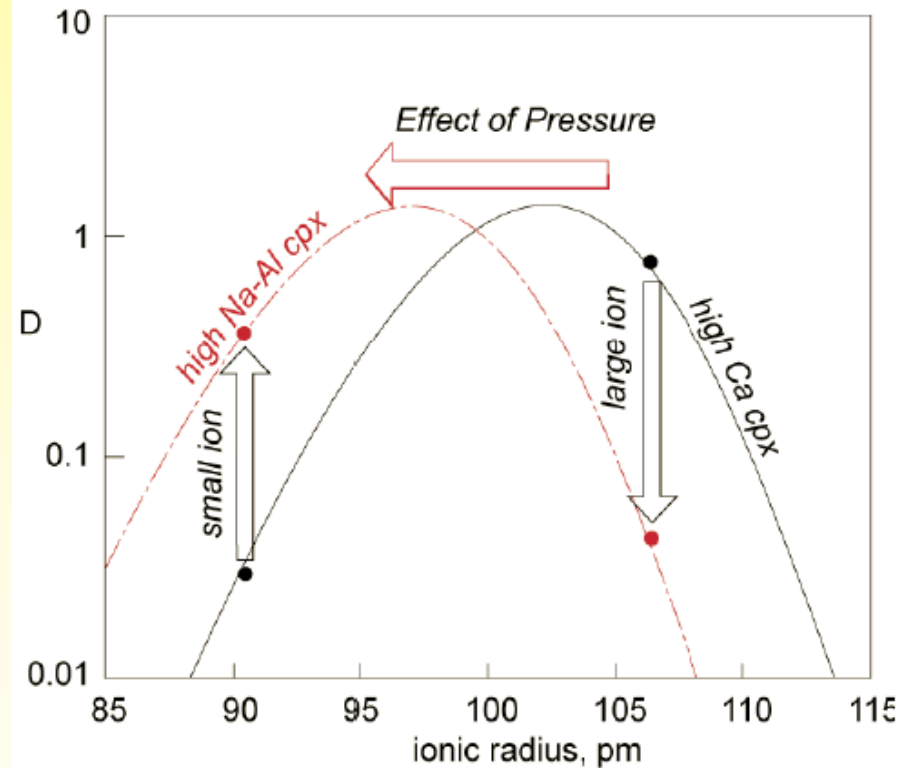
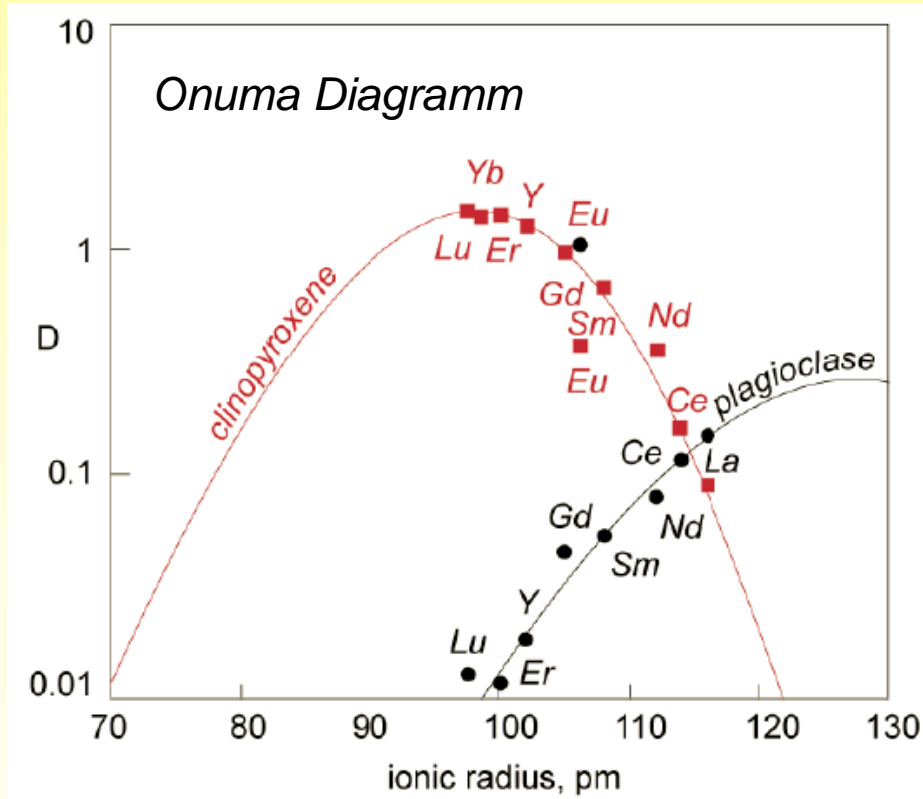
$$D_i^{s/l} = D^o \exp \left( \frac{-4\pi EN_A \left[ \frac{r_0}{2} (r_M - r_0)^2 + \frac{1}{3} (r_M - r_0)^3 \right]}{RT} \right)$$

E = Elastizitätsmodul

N = Avogadrozahl

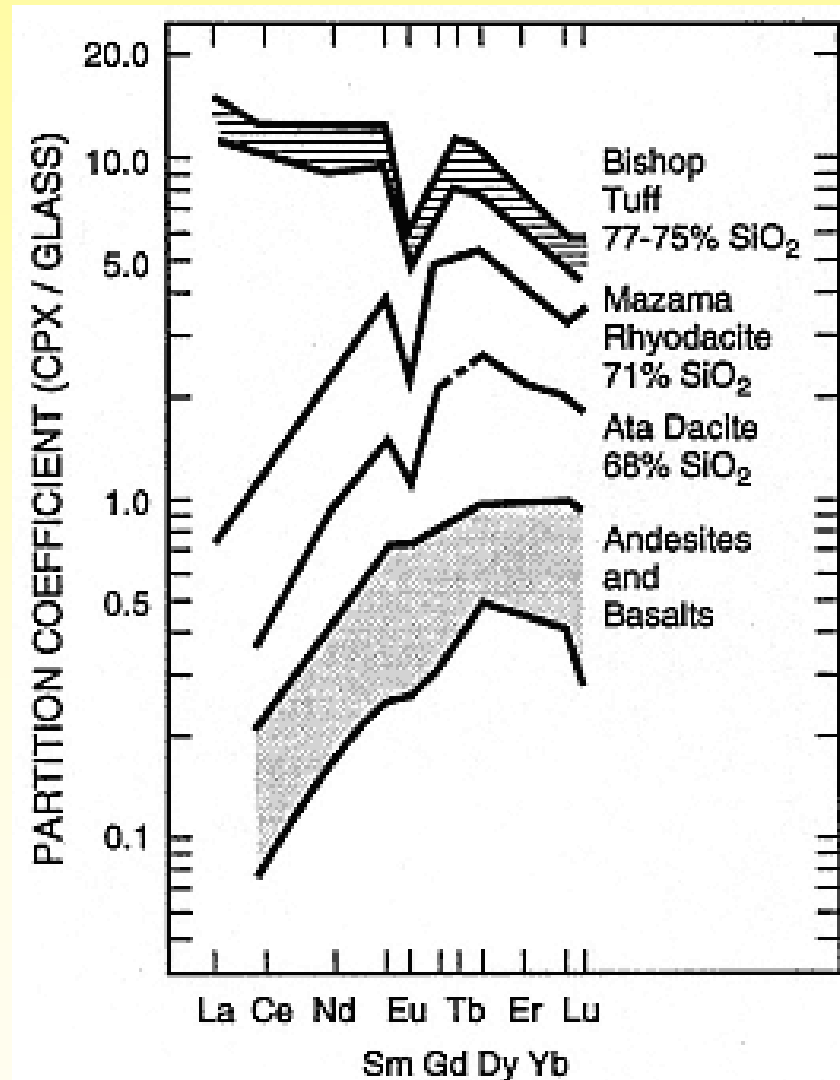
$r_0$  = idealer Ionenradius

$r_M$  = tatsächlicher Ionenradius

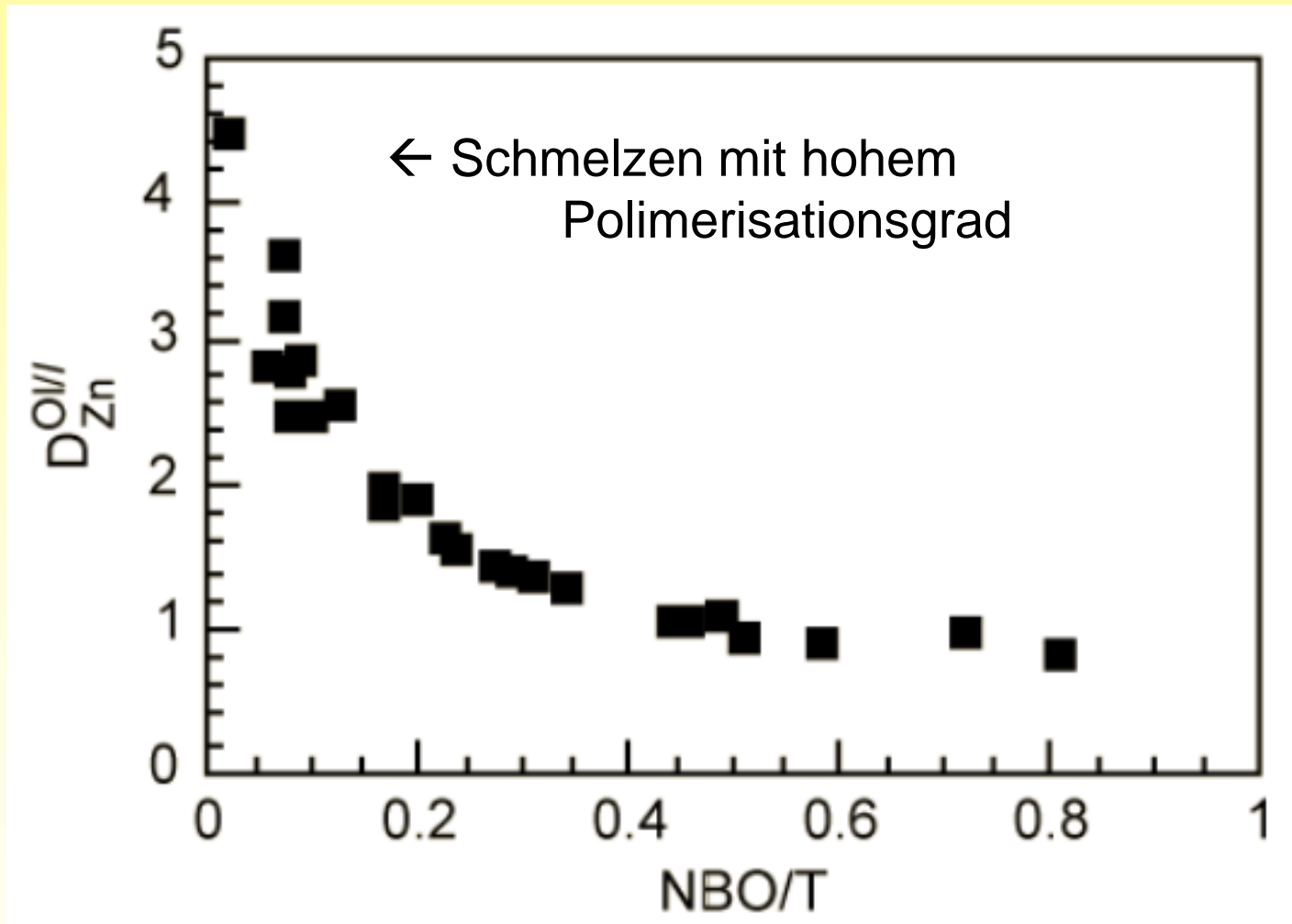


Druckanstieg  $\rightarrow$  Jadeitgehalt  
( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ) im Cpx nimmt zu

# SEE-Verteilung zwischen Cpx und Glas in verschiedenen Schmelzzusammensetzungen

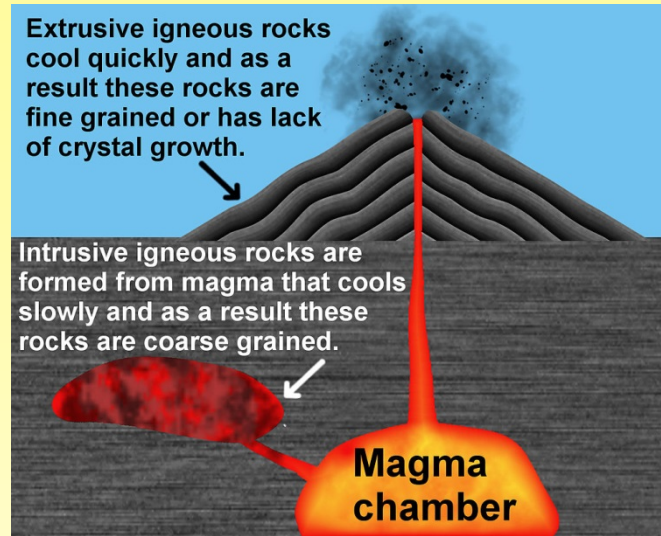
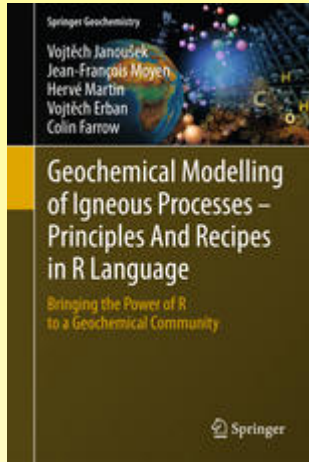


# Abhängigkeit des Verteilungskoeffizienten von der Zusammensetzung

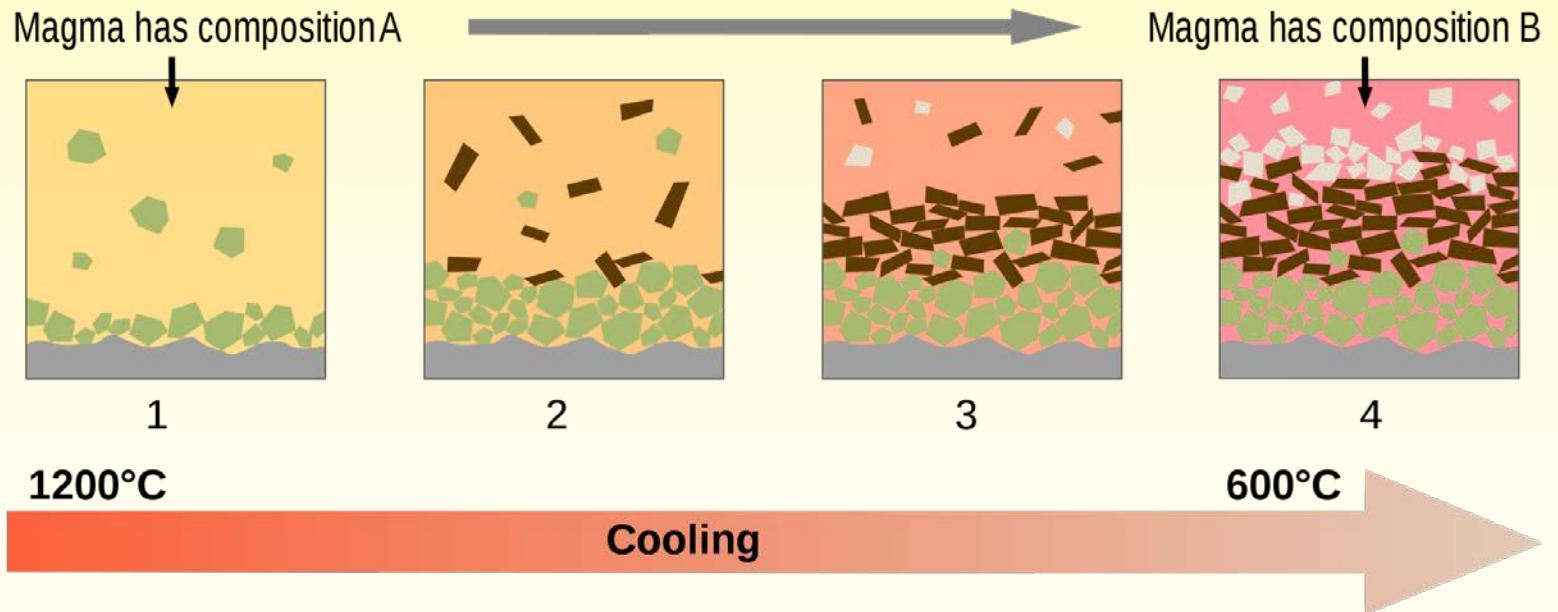


NBO/T = non-bridging oxygens per tetrahedral cation

# Spurenelemente in magmatischen Prozessen

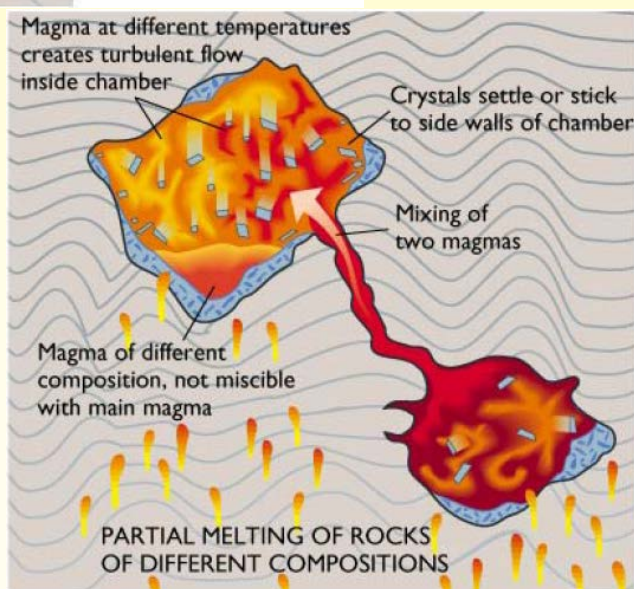
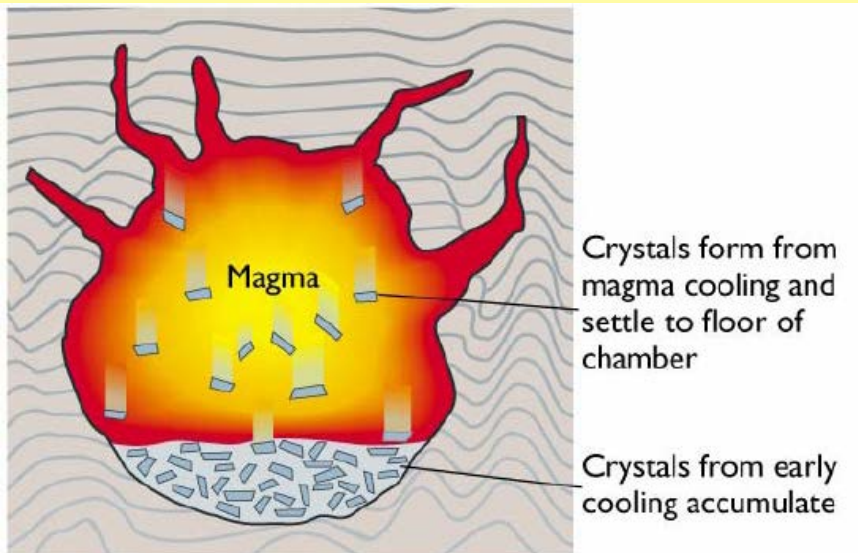


[www.earthref.org](http://www.earthref.org)

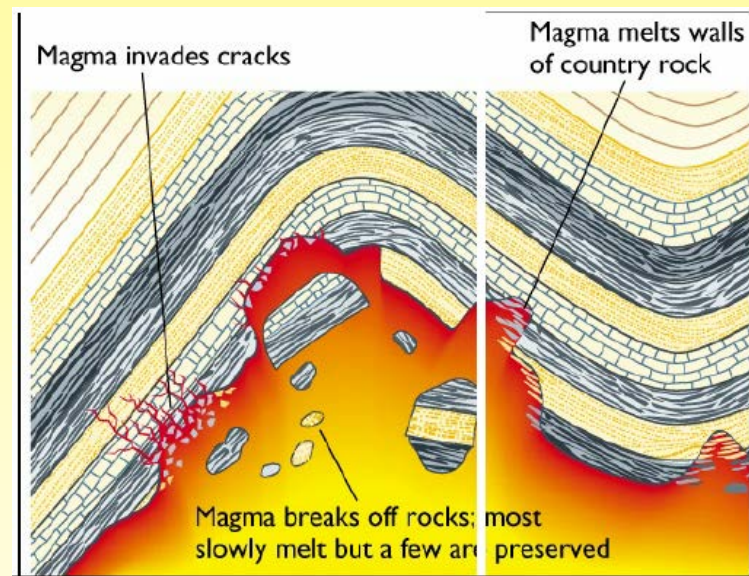


# Magmatische Prozesse

## Aufschmelzung und Kristallisation



## Assimilation, Kontamination



## Magmenmischung

# Schmelzbildung

## VERTEILUNG VON SPURENELEMENTEN BEI PARTIELLER AUFSCHELMELZUNG

Magma-Zusammensetzung

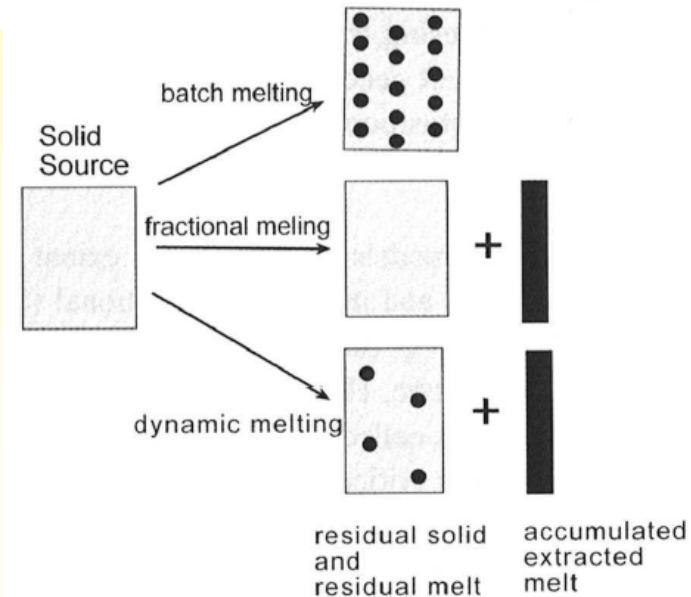
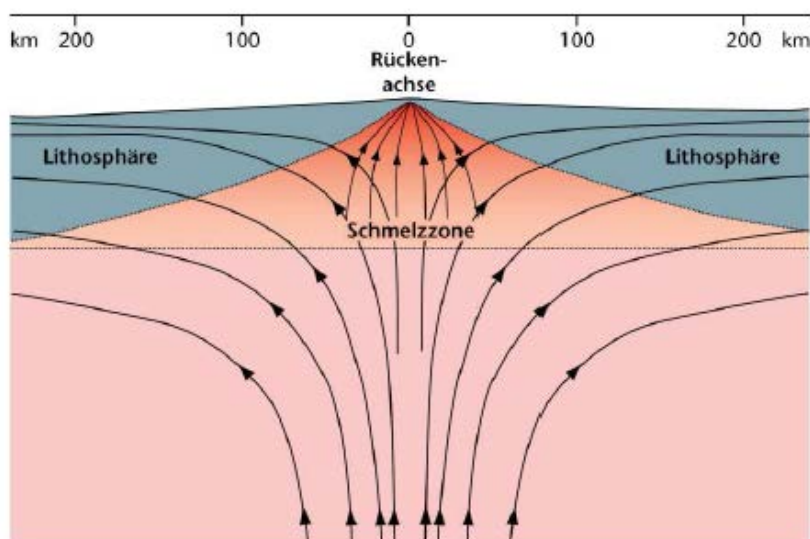


Mathematisches Modell  
des Aufschmelzprozesses

Rückschlüsse auf die Magmaquelle

# Modelle der Schmelzbildung

- Gleichgewichtsschmelzen = **Batch (equilibrium) melting**: Eine bestimmte Menge an Schmelze equilibriert mit dem Residualgestein
- Fraktionierte Aufschmelzung = **Fractional melting**: Die Schmelze wird sofort nach ihrer Bildung extrahiert
- Kontinuierliche Aufschmelzung = **Continuous melting**: Die Schmelze wird kontinuierlich extrahiert, aber ein Teil der Schmelze bleibt im System um die Porenräume zu füllen



# Modelle der Schmelzbildung

Was für ein Schmelzbildungsprozess hat hier stattgefunden?



# Modelle der Schmelzbildung

- Modal

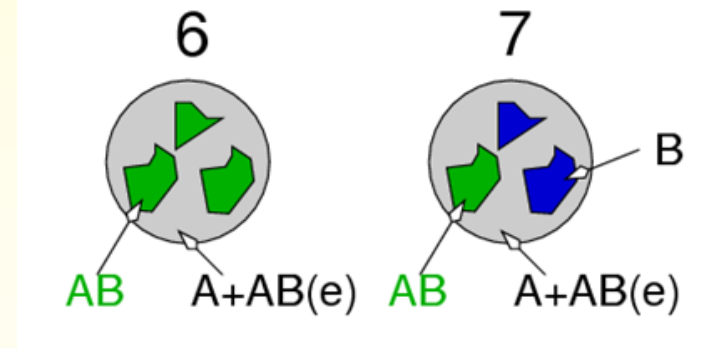
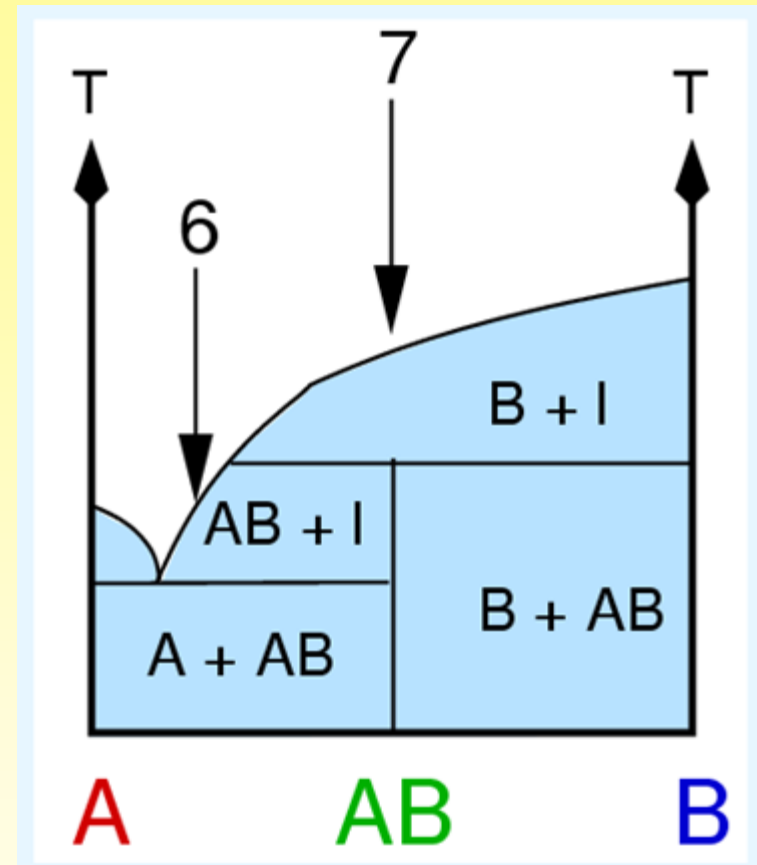
*Ausgangsgestein und Schmelze  
haben gleiche modale  
Zusammensetzung*

- Nicht modal

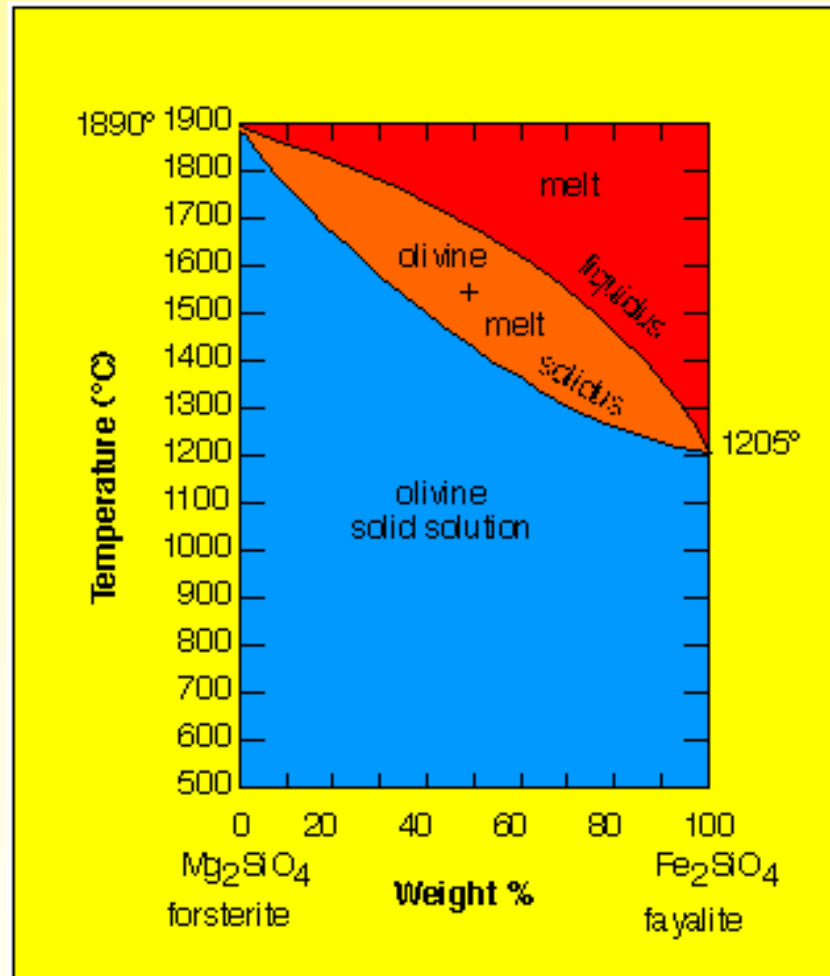
*Ausgangsgestein und Schmelze  
haben unterschiedliche modale  
Zusammensetzung*

- Inkongruent

*die feste Phase reagiert mit der  
Schmelze. Bildung neuer  
Mineralphasen*

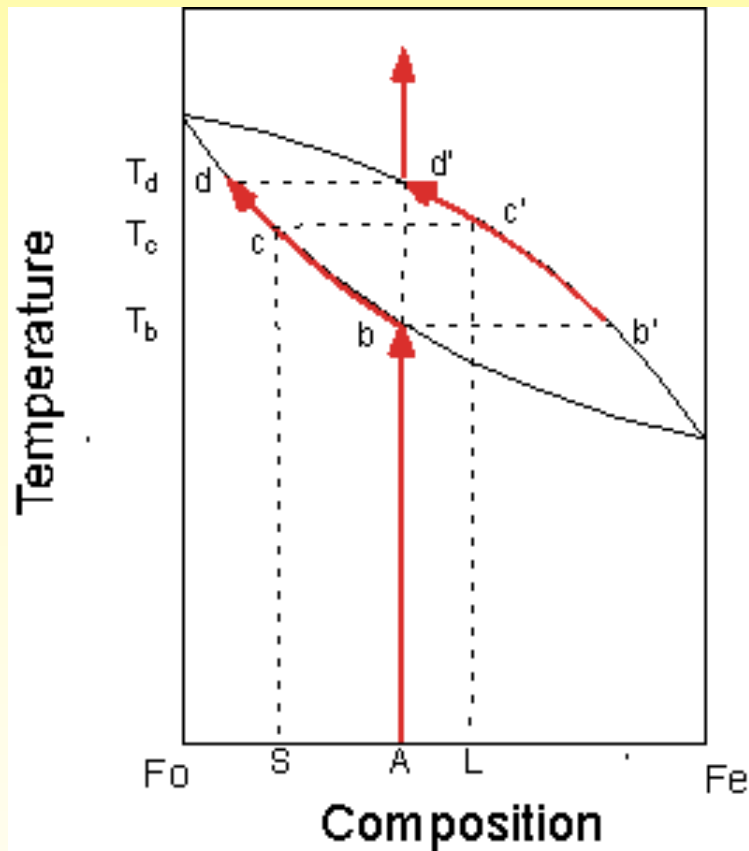


# Schmelzbildung

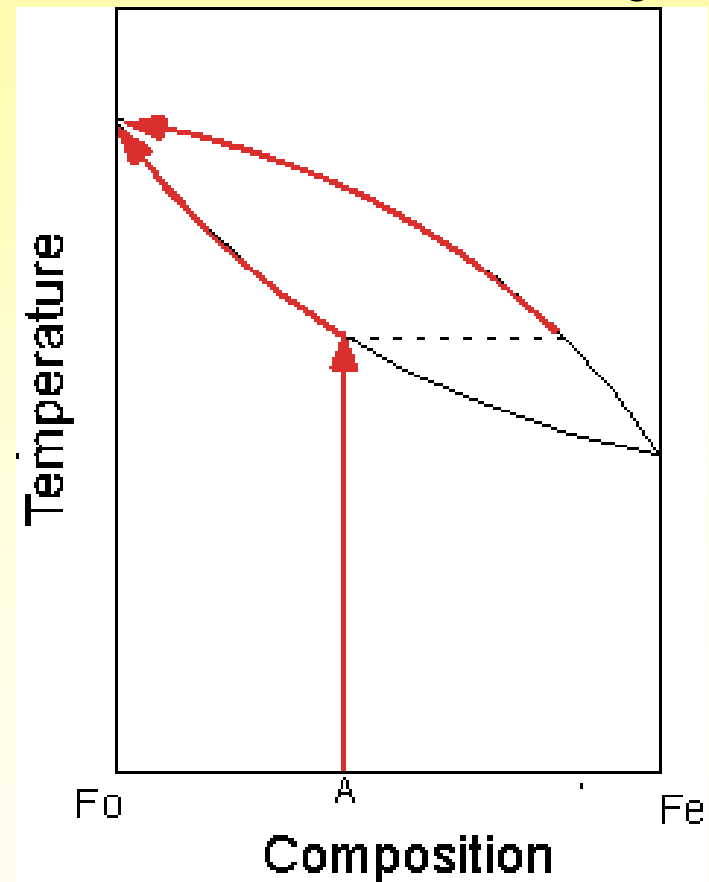


# Schmelzbildung

Gleichgewichts-Schmelzbildung



Fraktionierte Aufschmelzung



# Spurenelemente in magmatischen Prozessen

Verteilungskoeffizient:

$$Kd = \frac{C_i^{\min}}{C_i^{\text{Schmelze}}}$$

Gesamtverteilungskoeffizient D

$$D_i = x_1 Kd_i^{\min 1} + x_2 Kd_i^{\min 2} + x_3 Kd_i^{\min 3}$$

Massenbilanz: 
$$C_i^o = C_i^s (1 - F) + C_i^l F$$

i = Element

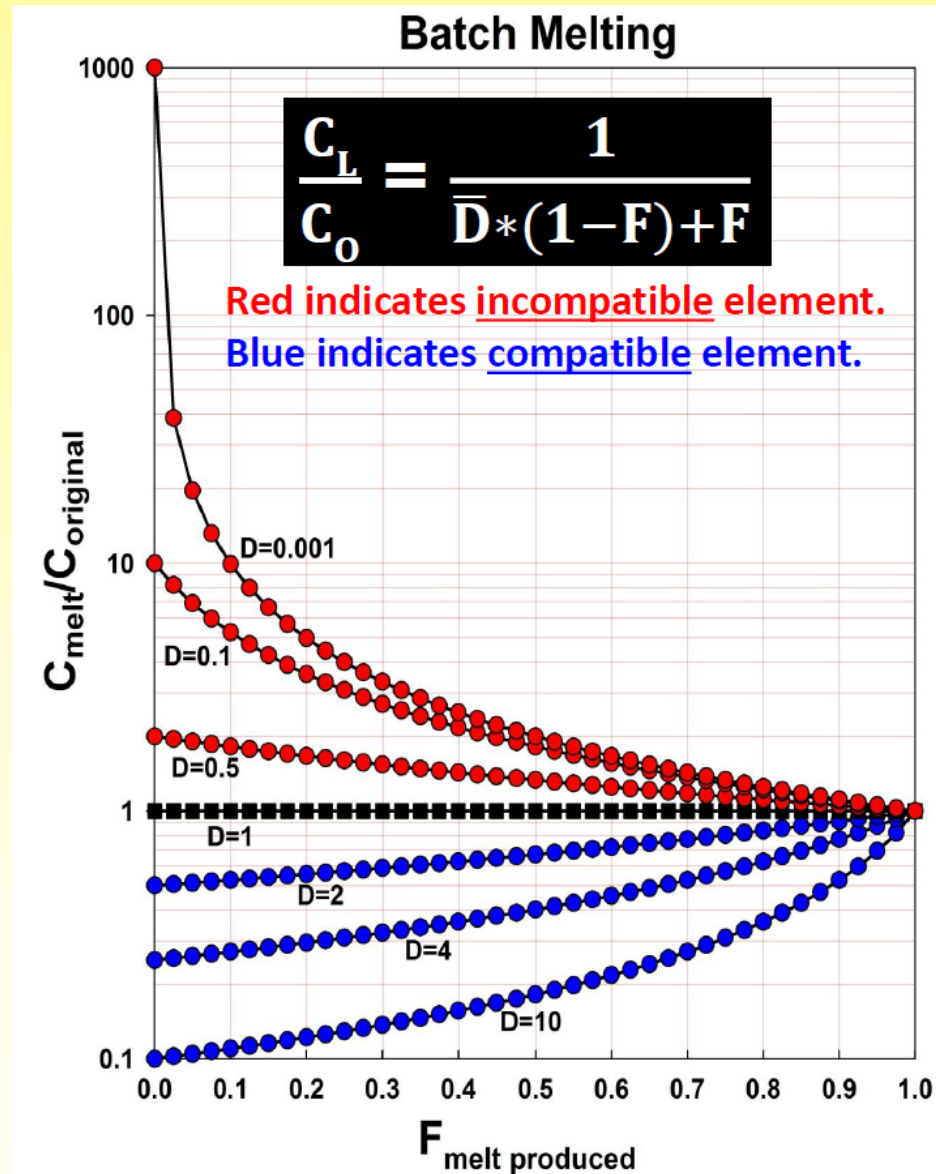
$C^o$  = Ursprüngliche Konzentration in den festen Phasen

$C^l$  = Konzentration in der Schmelze

$C^s$  = Konzentration in den residualen festen Phasen nach der Aufschmelzung

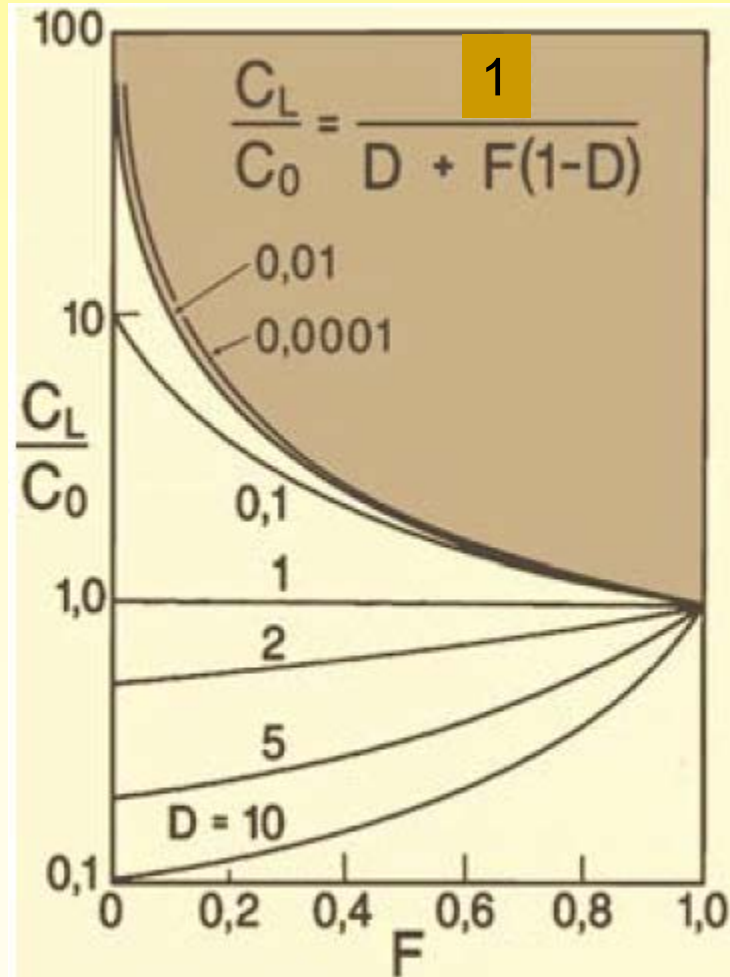
F = Aufschmelzgrad

# “Batch melting modeling”

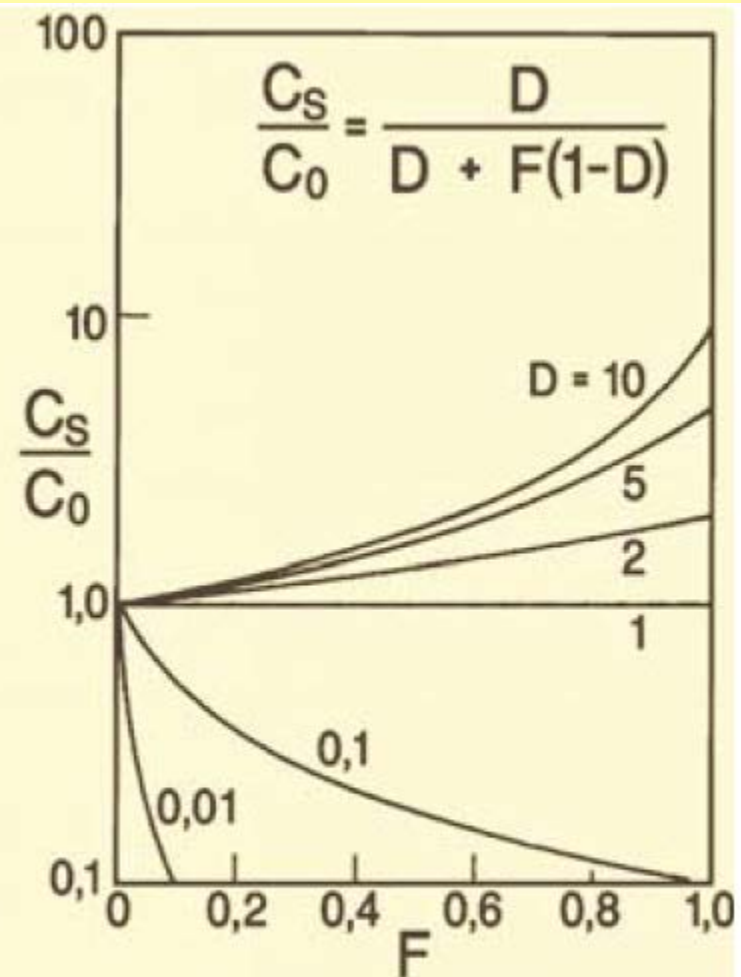


# Gleichgewichtsschmelzbildung

## Batch melting bzw. equilibrium melting



a Gleichgewichts-Schmelzen:  
Schmelzen



b Gleichgewichts-Schmelzen:  
Residuum

# Aufgabe: “Batch melting modeling”

**Batch Melting** is the melting process whereby the liquid remains **in equilibrium** with the residue until the liquid is removed.

$$C_L/C_0 = 1/[D_S + F(1 - D_S)] \quad \text{bzw.} \quad \frac{C_L}{C_0} = \frac{1}{\bar{D}*(1-F)+F}$$

$$C_S/C_0 = D_S/[D_S + F(1 - D_S)]$$

$C_0$  = concentration of the element in the **starting material** (in the case of mantle melting, the concentration in the **original mantle**).

$C_S$  = concentration of the element in the **solid** (i.e. residuals)

$C_L$  = concentration of the element in the **liquid** (i.e. melt)

$D_S$  = **bulk partition coefficient** for the residual mantle

$F$  = weight fraction of **melt** produced [= melt/(melt + rock)]

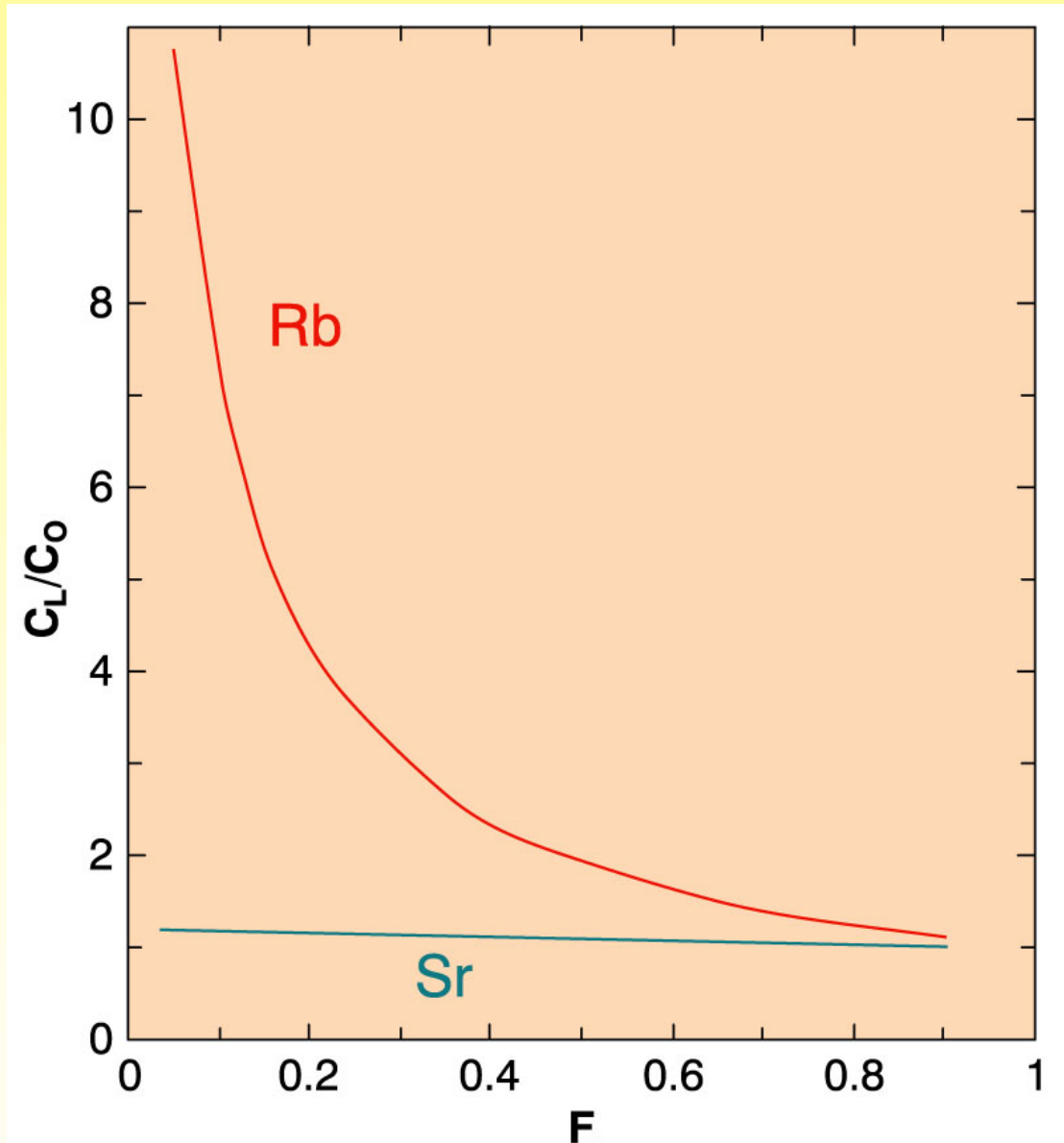
# Geochemische Diagramme

Batch melting and the Rb/Sr ratio

F	$C_L/C_0 = 1/(D(1-F)+F)$		Rb/Sr
	$D_{Rb}$ <b>0.045</b>	$D_{Sr}$ <b>0.848</b>	
<b>0.05</b>	9.35	1.14	8.19
<b>0.1</b>	6.49	1.13	5.73
<b>0.15</b>	4.98	1.12	4.43
<b>0.2</b>	4.03	1.12	3.61
<b>0.3</b>	2.92	1.10	2.66
<b>0.4</b>	2.29	1.08	2.11
<b>0.5</b>	1.89	1.07	1.76
<b>0.6</b>	1.60	1.05	1.52
<b>0.7</b>	1.39	1.04	1.34
<b>0.8</b>	1.23	1.03	1.20
<b>0.9</b>	1.10	1.01	1.09

Veränderung der Rb und Sr Konzentrationen in der Schmelze mit steigendem Aufschmelzungsgrad. Basaltisches Ausgangsgestein (Plagioklas, Augit, Olivin).

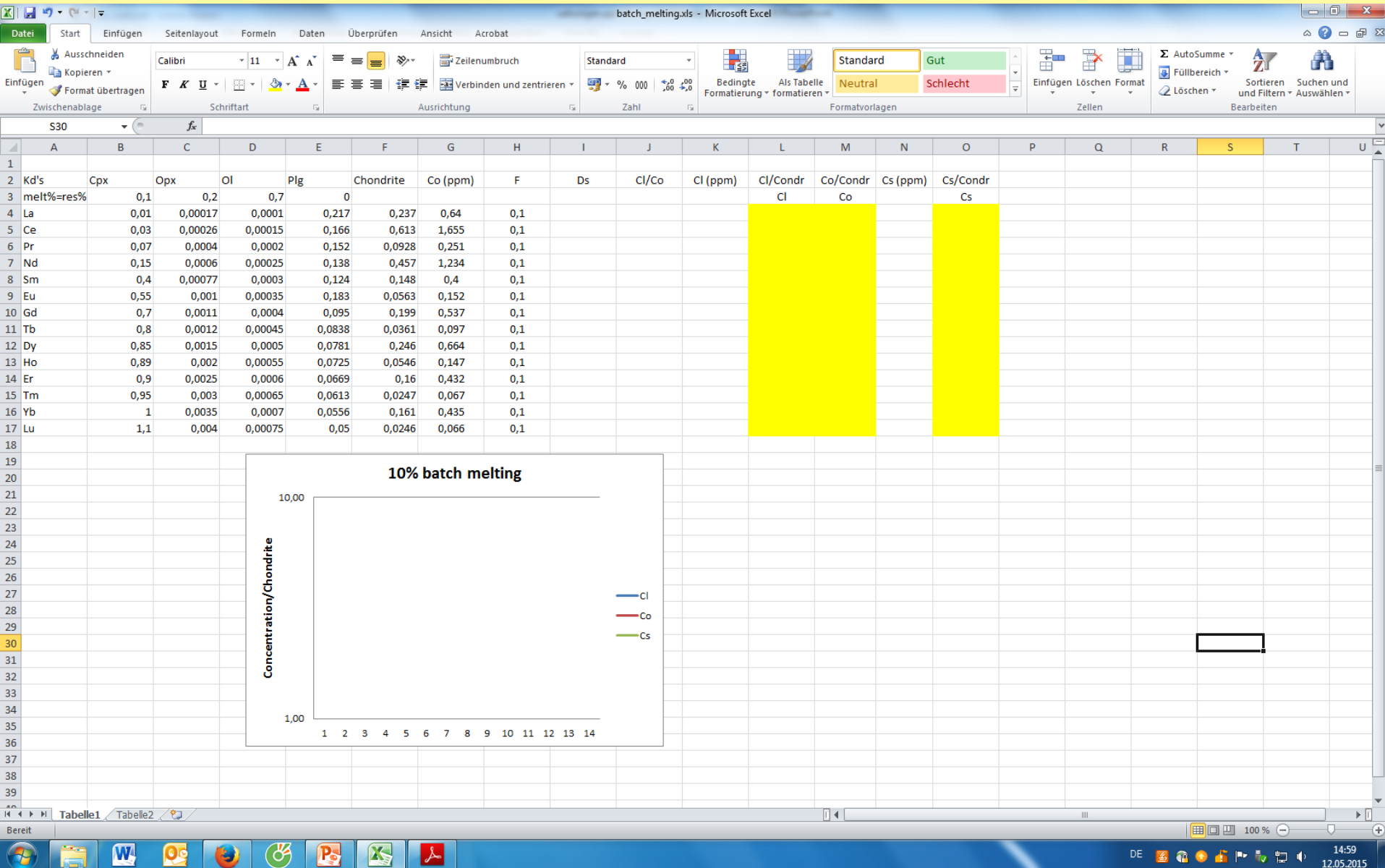
*Winter (2001) Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*



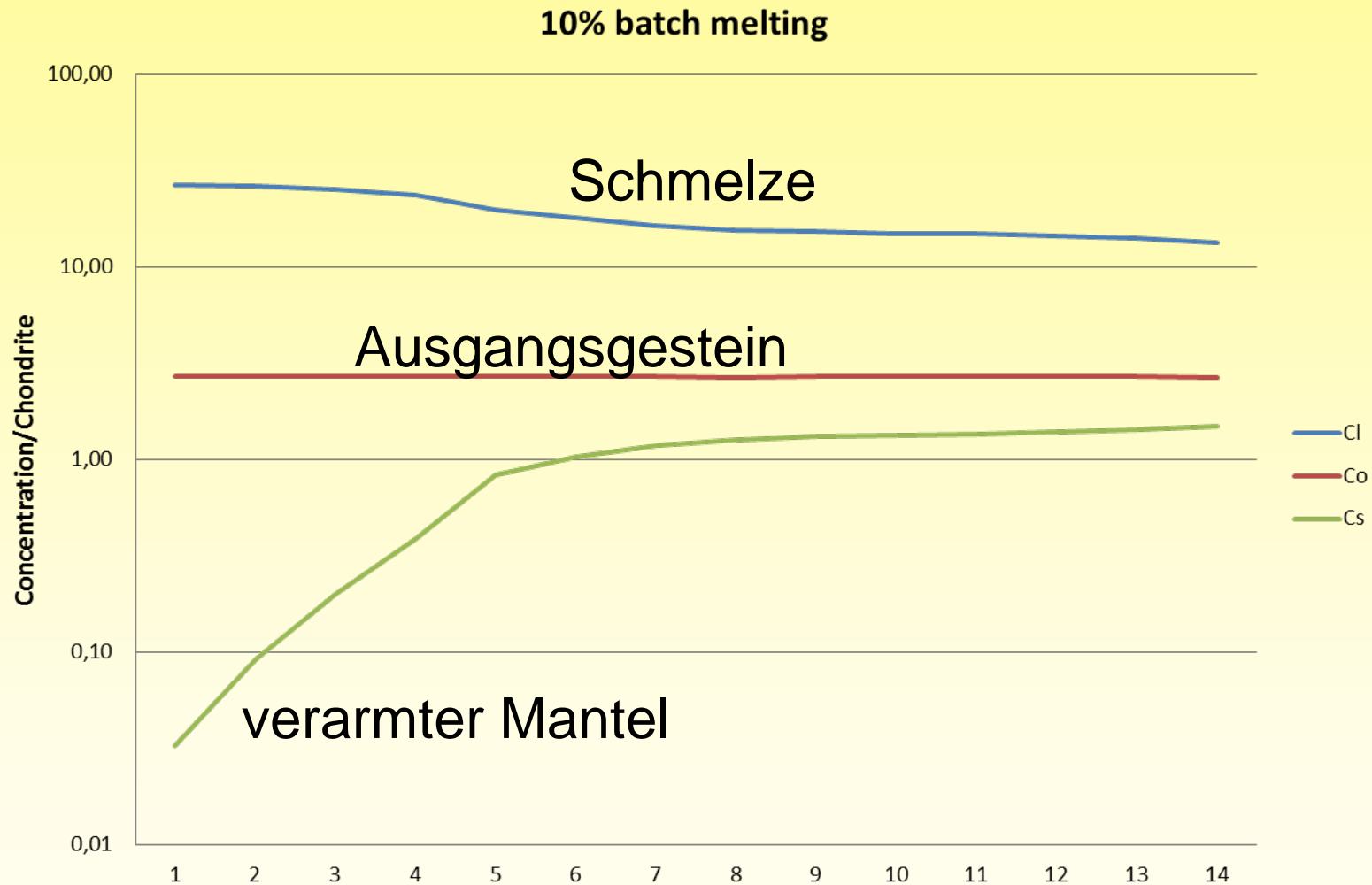
# Datensatz “Batch melting modeling”

<b>D-values</b>	<b>Cpx</b>	<b>Opx</b>	<b>OI</b>	<b>Plag</b>	<b>Chondrite</b>	<b>Co</b>
<b>Residue Proportion</b>	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>70%</b>		<b>ppm</b>	<b>ppm</b>
<b>La</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00017</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.217</b>	<b>0.237</b>	<b>0.640</b>
<b>Ce</b>	<b>0.03</b>	<b>0.00026</b>	<b>0.00015</b>	<b>0.166</b>	<b>0.613</b>	<b>1.655</b>
<b>Pr</b>	<b>0.07</b>	<b>0.0004</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.152</b>	<b>0.0928</b>	<b>0.251</b>
<b>Nd</b>	<b>0.15</b>	<b>0.0006</b>	<b>0.00025</b>	<b>0.138</b>	<b>0.457</b>	<b>1.234</b>
<b>Pm</b>						
<b>Sm</b>	<b>0.4</b>	<b>0.00077</b>	<b>0.0003</b>	<b>0.124</b>	<b>0.148</b>	<b>0.400</b>
<b>Eu</b>	<b>0.55</b>	<b>0.001</b>	<b>0.00035</b>	<b>0.183</b>	<b>0.0563</b>	<b>0.152</b>
<b>Gd</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.0004</b>	<b>0.095</b>	<b>0.199</b>	<b>0.537</b>
<b>Tb</b>	<b>0.8</b>	<b>0.0012</b>	<b>0.00045</b>	<b>0.0838</b>	<b>0.0361</b>	<b>0.097</b>
<b>Dy</b>	<b>0.85</b>	<b>0.0015</b>	<b>0.0005</b>	<b>0.0781</b>	<b>0.246</b>	<b>0.664</b>
<b>Ho</b>	<b>0.89</b>	<b>0.002</b>	<b>0.00055</b>	<b>0.0725</b>	<b>0.0546</b>	<b>0.147</b>
<b>Er</b>	<b>0.9</b>	<b>0.0025</b>	<b>0.0006</b>	<b>0.0669</b>	<b>0.16</b>	<b>0.432</b>
<b>Tm</b>	<b>0.95</b>	<b>0.003</b>	<b>0.00065</b>	<b>0.0613</b>	<b>0.0247</b>	<b>0.067</b>
<b>Yb</b>	<b>1</b>	<b>0.0035</b>	<b>0.0007</b>	<b>0.0556</b>	<b>0.161</b>	<b>0.435</b>
<b>Lu</b>	<b>1.1</b>	<b>0.004</b>	<b>0.00075</b>	<b>0.05</b>	<b>0.0246</b>	<b>0.066</b>

# Berechnen Sie $C_l$ , $C_o$ , $C_s$



# Übung: Schmelzbildung im Erdmantel



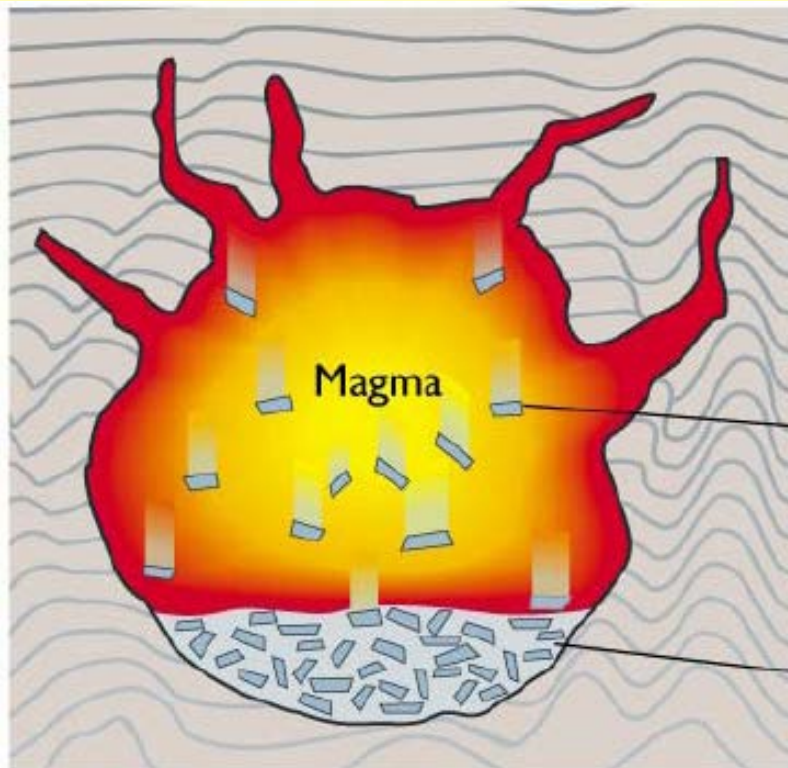
LSSE ----- SSEE



# Kristallisationsm

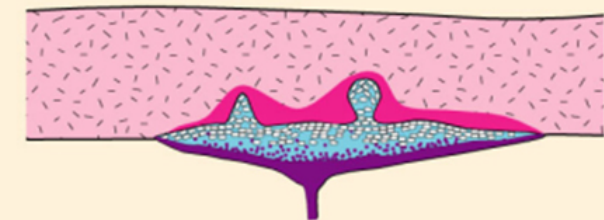
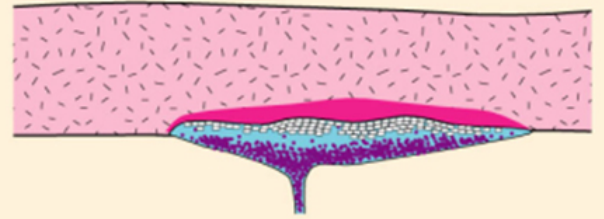
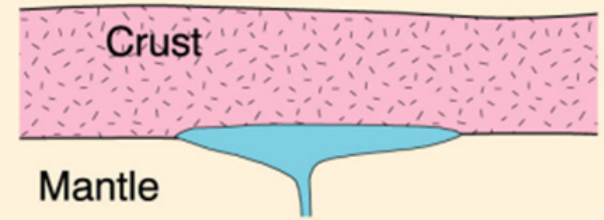
## Fraktionierte Kristallisation bzw. R

Trennung zwischen Kristallen und S  
durch gravitatives Absinken oder Flo



Crystals form  
magma cooling  
settle to floor  
chamber

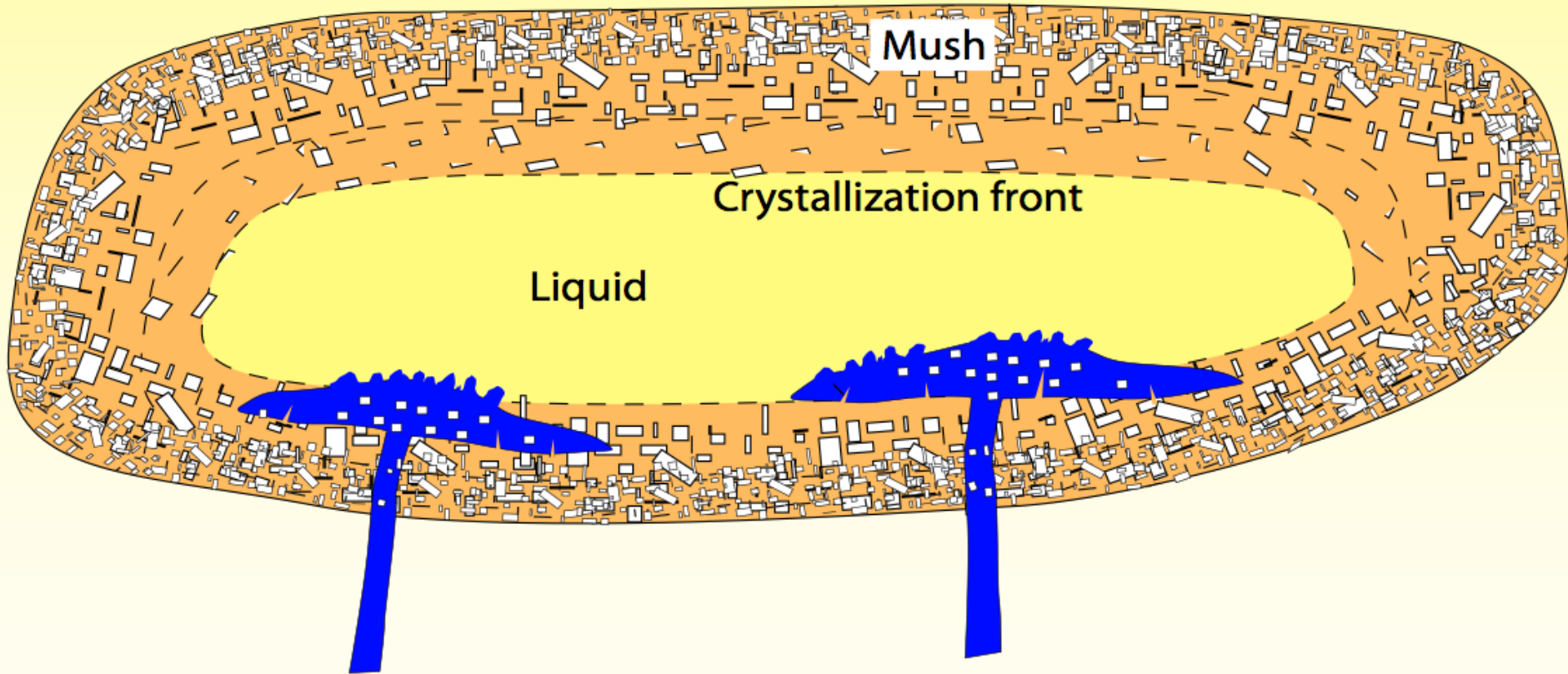
Crystals from  
cooling accu



# Kristallisationsmodelle

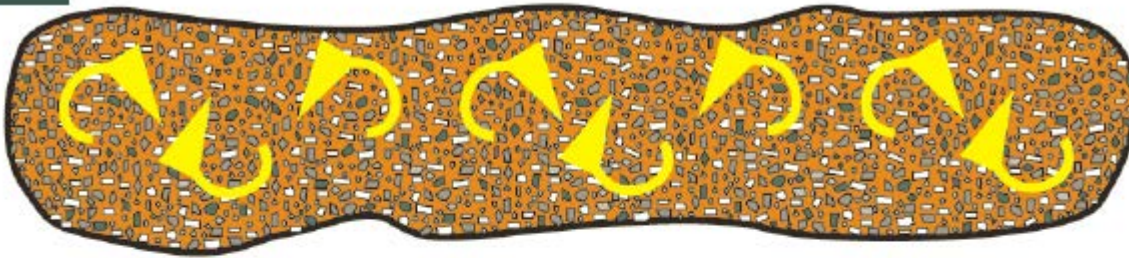
Kristallisation vom Rand zur Mitte (Kristallisationsfront)

Intrusion of mafic bodies into a crystallizing magma chamber or pluton in which a crystallization front was developed



# Kristallisationsmodelle

A



(<45 vol% Kristalle  
Kristallbrei, Suspension

B



(45-60 vol% Kristalle  
Trennung von Kristallen  
und Schmelze

C

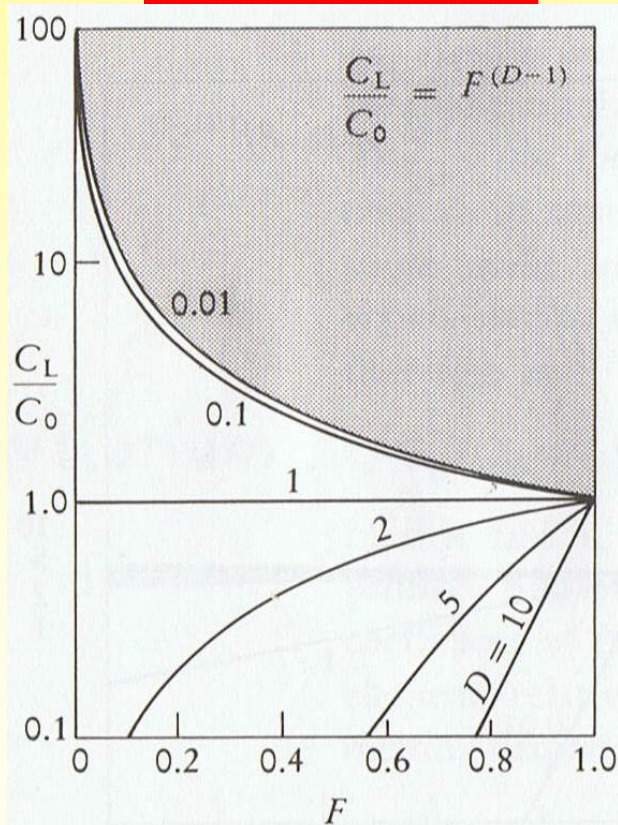


(> 60 vol% Kristalle  
hohe Viskosität  
geringe Permeabilität

# Fraktionierte Kristallisation

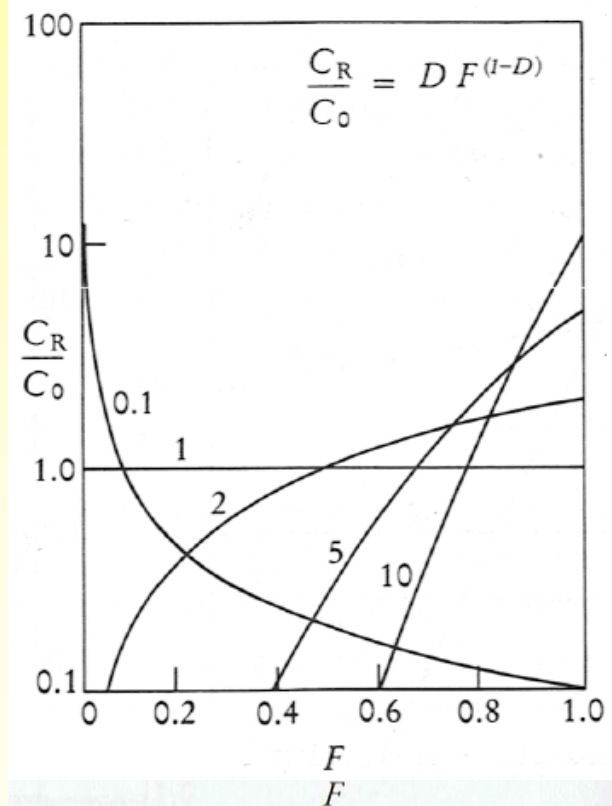
## Fractional crystallization bzw. Rayleigh fractionation

$$\frac{C_L}{C_0} = F^{(D-1)}$$



(a) Rayleigh fractionation — liquids

$$\frac{C_R}{C_0} = DF^{(1-D)}$$



(c) Rayleigh fractionation — residue, instantaneous solid

# Modelle der Schmelzbildung

- Schmelzbildung von Gesteinen ist oft komplexer als durch die bisherigen Gleichungen beschrieben
  - Verläuft typischerweise inkongruent
  - Minerale  $\rightarrow$  Minerale + Schmelze  $\rightarrow$  Schmelze
  - z.B.  $A \text{ ol} + B \text{ cpx} \rightarrow C \text{ opx} + D \text{ liquid}$

## **Inkongruentes Schmelzen**

### **(non-modal melting)**

- komplexer aber realistischer
- setzt Kenntnisse über Schmelzbildungsreaktionen voraus

feste Phase reagiert mit der Schmelze. Die resultierende Schmelze hat danach einen anderen Chemismus als die feste Ausgangsphase

# Modelle der Schmelzbildung

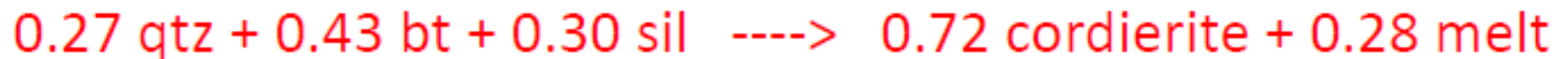
## Inkongruentes Schmelzen

### Beispiele:

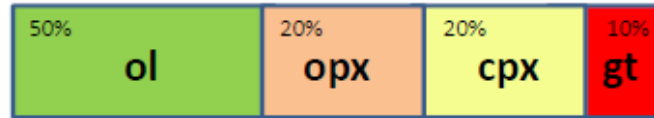
Incongruent melting of a **spinel peridotite** at 10 kbar (1 MPa; Kinzler & Grove, 1992):



Incongruent melting of a **biotite - sillimanite - gneiss** (Zeck, 1970): :

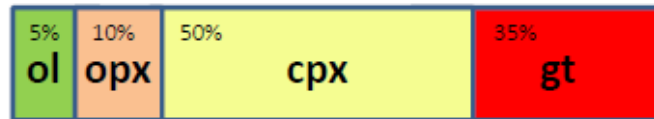


# Modelle der Schmelzbildung



$\chi^{ol}$        $\chi^{opx}$        $\chi^{cpx}$        $\chi^{gt}$

**Modal composition of the solid**  
(here: Lherzolite, "Pyrolite")



$p^{ol}$        $p^{opx}$        $p^{cpx}$        $p^{gt}$

**"Modal composition" of the melt**  
(i.e. eutectic composition,  
here: basaltic melt)

$$C_L/C_0 = 1/[D_S + F(1 - P)]$$

$D_S$  = Verteilungskoeffizient zu Beginn der Aufschmelzung

$P$  = Verteilungskoeffizient der Minerale in der Schmelze

# Komplexe Magmakammer



TÜBİTAK

AFC-Mc  
combined

İstanbul

Received:

## Wallrock (assimilant)

Elemental  
concentration  
in wallrock

$$C_a$$

Isotope ratio in  
the wallrock

$$\epsilon_a$$

Bulk solid/liquid partition  
coefficient of an element  
between crystallizing  
phases and magma

$$D$$

The difference between  
stable isotopic ratios  
of crystals and magma

$$\Delta$$

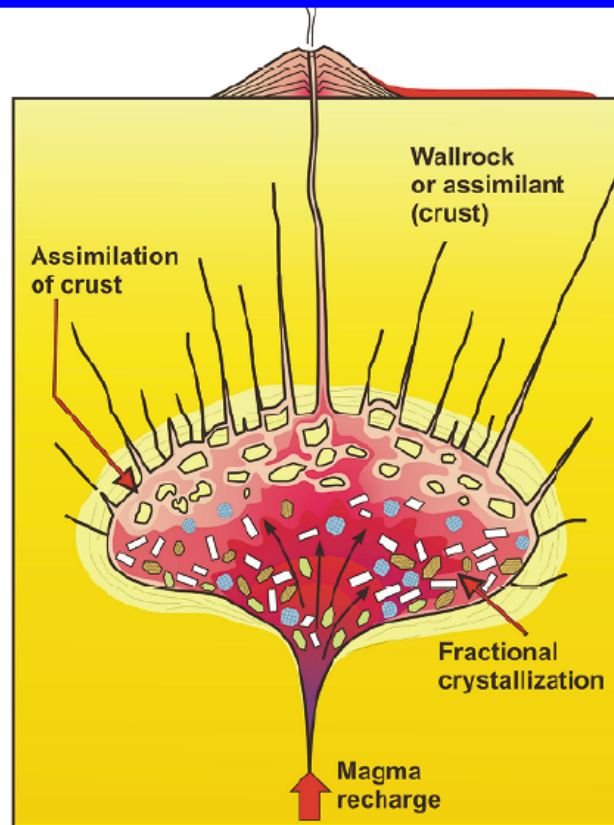
$$\Delta = \delta_{crystals} - \delta_{magma}$$

$$\approx 1000 \ln \alpha$$

Where  $\alpha$  is the  
fractionation  
factor.

Initial stable isotope  
ratio in the wallrock  
(assimilant)

$$\delta_a$$



## Magma

Mass of magma

$$M_m$$

Initial mass of magma

$$M_m^0$$

The fraction of magma  
remaining

$$F = \frac{M_m}{M_m^0}$$

Elemental concentration  
in magma

$$C_m$$

Initial elemental  
concentration in magma

$$C_m^0$$

Elemental concentration  
in crystallizing phases

$$DC_m$$

Isotope ratio in magma

$$\epsilon_m$$

Initial isotope ratio  
in magma

$$\epsilon_m^0$$

Stable isotopic  
ratio in magma

$$\delta_m$$

Initial stable isotope  
ratio in magma

$$\delta_m^0$$

Mass assimilation rate  
(mass/unit time):

$$\dot{M}_a$$

Fractional  
crystallization rate:

$$\dot{M}_c$$

Ratio of mass  
assimilation  
rate to fractional  
crystallization rate:

$$r = \frac{\dot{M}_a}{\dot{M}_c}$$

$$z = \frac{r + D - 1}{r - 1}$$

## Minerals



Olivine



Plagioclase



Pyroxene



Amphibole

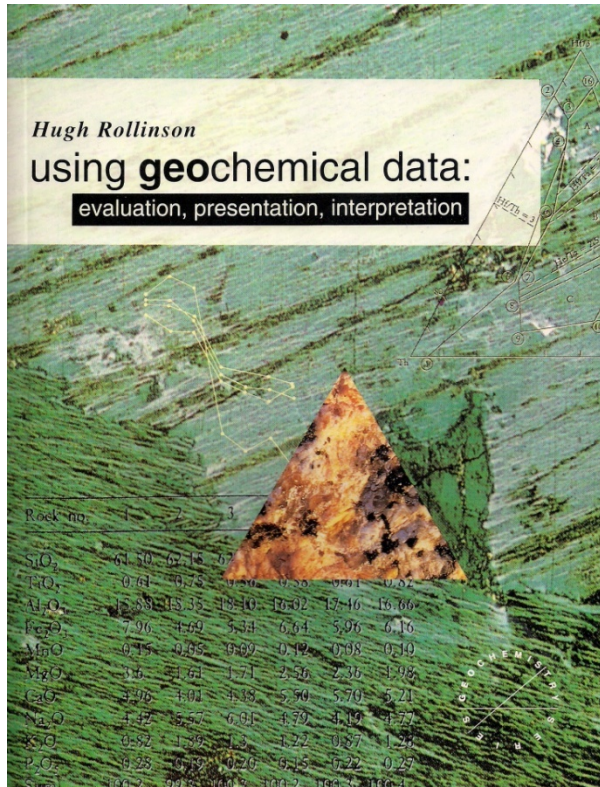
Earth Sci  
04-319  
K  
/yer-1110-3

Assimilation  
by using

Turkey

07.03.2013

# TECTONIC PROVINCE DISCRIMINATION DIAGRAMS



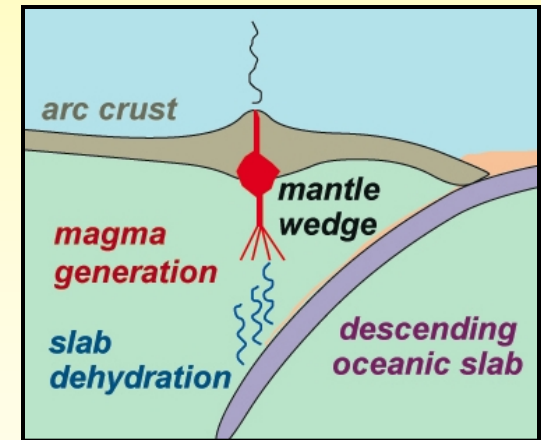
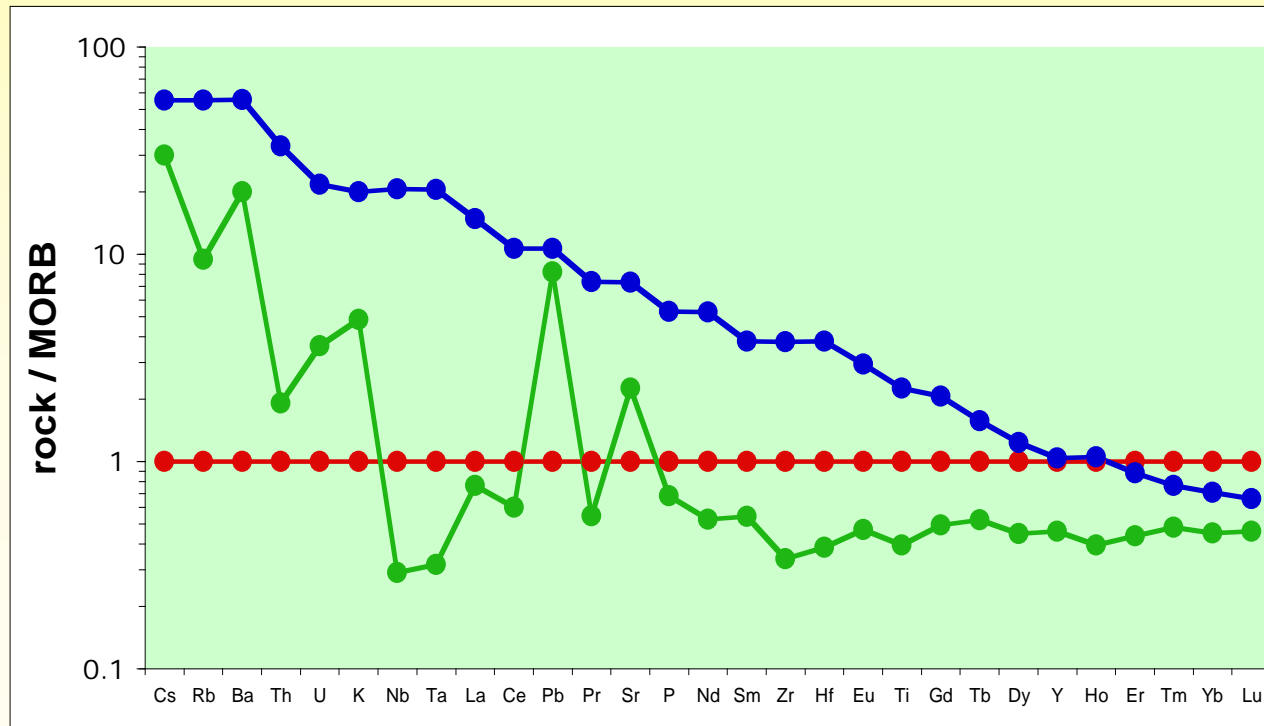
Rollinson (1993)

MORB	Figure	Within-plate basalts	Figure
Ti-Zr	5.2(a,b)	<i>Ocean-island tholeiites</i>	
Ti-Zr-Sr	5.3	Ti-V	5.10
Zr/Y-Zr	5.5	FeO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20
Ti-V	5.10	MnO-TiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.22
Cr-Y	5.12	K <sub>2</sub> O-H <sub>2</sub> O	5.23
Cr-Ce/Sr	5.12	<i>Ocean-island alkali basalts</i>	
TiO <sub>2</sub> -Y/Nb	5.15	MnO-TiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.22
FeO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20	<i>Continental tholeiites</i>	
MnO-TiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.23	Ti-V	5.10
Discr. function (Ti-Zr-Y-Sr)	5.4	La-Y-Nb	5.11
Discr. function (majors)	5.19	TiO <sub>2</sub> -Y/Nb	5.15
<i>N-type MORB</i>		FeO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20
Zr-Nb-Y	5.8	K <sub>2</sub> O-TiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.21
Th-Hf-Ta	5.9	<i>Continental alkali basalts</i>	
La-Y-Nb	5.11	La-Y-Nb	5.11
<i>E-type MORB</i>		<i>Volcanic-arc basalts</i>	
Zr-Nb-Y	5.8		
Th-Hf-Ta	5.9	Ti-Zr	5.2(b)
La-Y-Nb	5.11	Zr/Y-Zr	5.5(a)
FeO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20	Cr-Y	5.12(a)
<i>Transitional MORB</i>		Cr-Ce/Sr	5.12(b)
K <sub>2</sub> O/Yb-Ta/Yb	5.13	FeO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20
<i>Back-arc basin tholeiites</i>		K <sub>2</sub> O-H <sub>2</sub> O	5.23
		<i>Island-arc tholeiites</i>	
Ti-V	5.10	Ti-Zr-Y	5.1
La-Y-Nb	5.11	Ti-Zr	5.2
K <sub>2</sub> O-H <sub>2</sub> O	5.23	Ti-Zr-Sr	5.3
<i>Within-plate basalts</i>		Discr. function (Ti-Zr-Y-Sr)	5.4
		Th-Hf-Ta	5.9
Ti-Zr-Y	5.1	Ti-V	5.10
Ti-Zr	5.2(b)	La-Y-Nb	5.11
Discr. function	5.4	K <sub>2</sub> O/Yb-Ta/Yb	5.13
Zr/Y-Zr	5.5(a)	Discr. function (majors)	5.19
Zr/Y-Ti/Y	5.6	MnO-TiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.22
Cr-Y	5.12(a)	<i>Continental-arc</i>	
Cr-Ce/Sr	5.12	Zr/Y-Zr	5.5(b)
Discr. function (majors)	5.19	<i>Oceanic-arc</i>	
<i>Alkali</i>		Zr/Y-Zr	5.5(b)
Zr/Y-Nb/Y	5.7	<i>Calc-alkaline basalts</i>	
Zr-Nb-Y	5.8	Ti-Zr-Y	5.1
Th-Hf-Ta	5.9	Ti-Zr	5.2(a)
Ti-V	5.10	Ti-Zr-Sr	5.3
K <sub>2</sub> O/Yb-Ta/Yb	5.13	Discr. function	5.4
TiO <sub>2</sub> -Y/Nb	5.15	Th-Hf-Ta	5.9
<i>Tholeiitic</i>		La-Y-Nb	5.11
Ti/Y-Nb/Y	5.7	K <sub>2</sub> O/Yb-Ta/Yb	5.13
Zr-Nb-Y	5.8	Discr. function (majors)	5.19
K <sub>2</sub> O/Yb-Ta/Yb	5.13	MnO-TiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.22
<i>Transitional</i>		<i>Shoshonitic basalts</i>	
Ti/Y-Nb/Y	5.7	K <sub>2</sub> O/Yb-Ta/Yb	5.13
K <sub>2</sub> O/Yb-Ta/Yb	5.13	Discr. function (majors)	5.19

# Elementverteilungsmuster

**Ozeaninselbasalte:** verglichen mit **MORB** Quelle angereichert an inkompatiblen Elementen

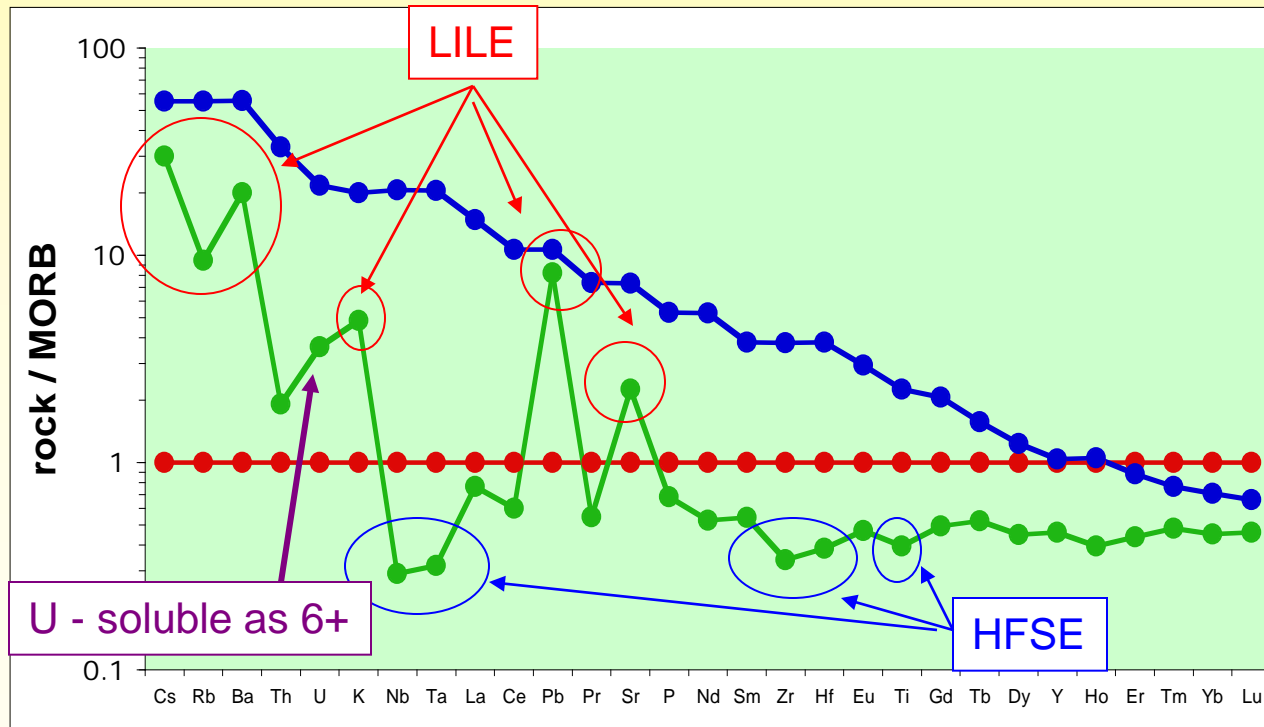
**Laven aus Subduktionszonen:** Zufuhr fluid-löslicher Elemente in den Mantelkeil während der Slab-Entwässerung (LIL, Pb, Sr)



# Elementverteilungsmuster

**Ozeaninselbasalte:** verglichen mit **MORB** Quelle angereichert an inkompatiblen Elementen

**Laven aus Subduktionszonen:** Zufuhr fluid-löslicher Elemente in den Mantelkeil während der Slab-Entwässerung (LIL, Pb, Sr)



# Geochemische Diagramme

## Diagrammtypen:

- Bivariate Verteilungen (X-Y)
- Dreiecksdarstellungen
- Normierte Darstellungen (Spider-Diagramme)

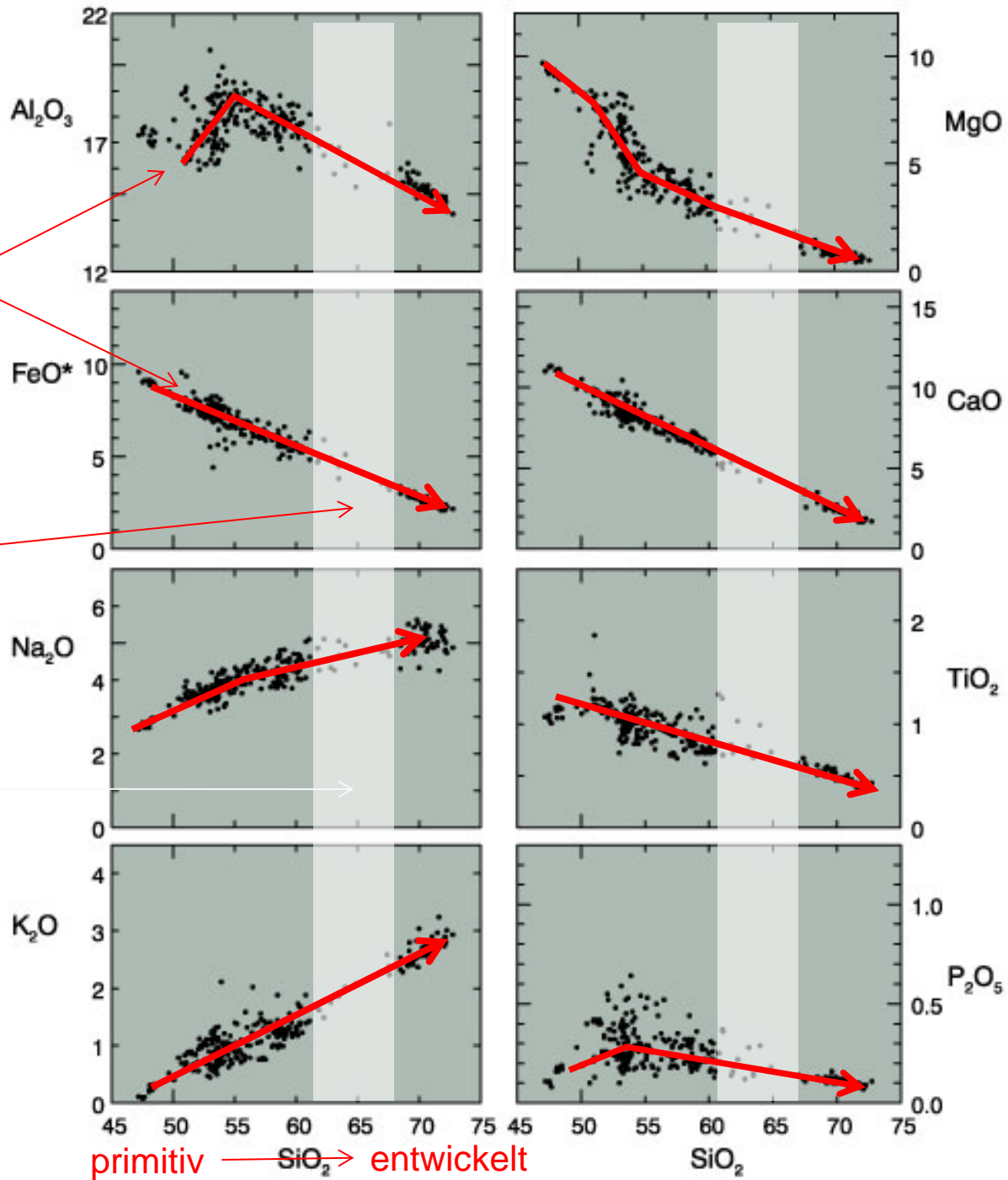
**Ziel:** Darstellung der Haupt- und Spurenelementvariationen, die Hinweise auf magmatische Prozesse geben können

- Fraktionierte Kristallisation
- Magmenmischung
- Nebengesteinsassimilation/kontamination
- Partielles Aufschmelzen

# Harker Variationsdiagramme

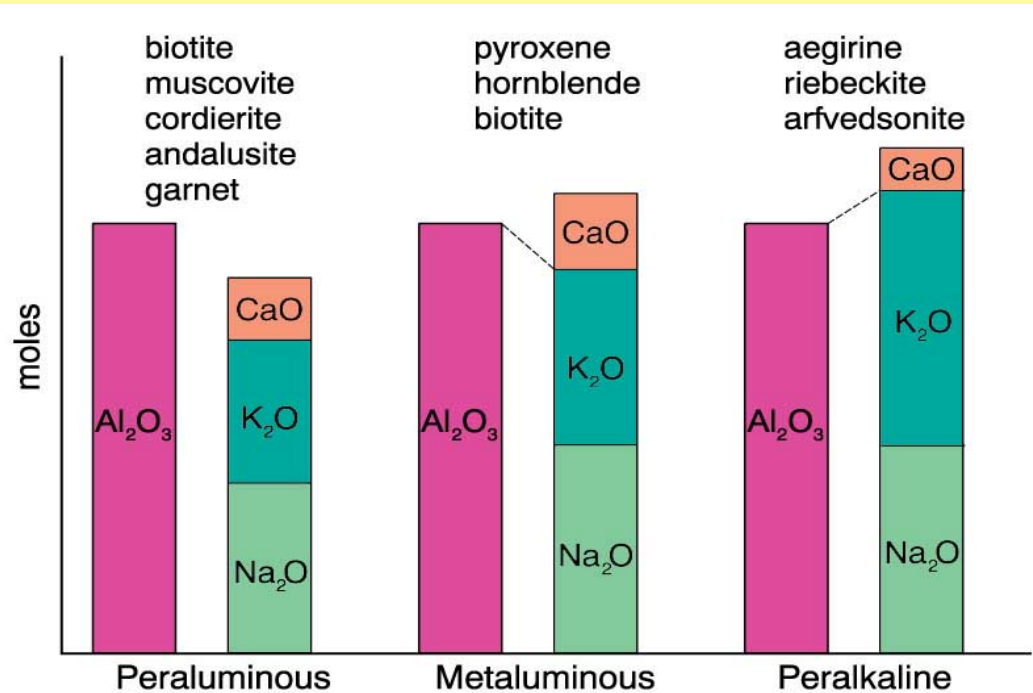
Liquid lines of descent  
("Flüssigkeitsabstammungslinie")

"Daly" gap

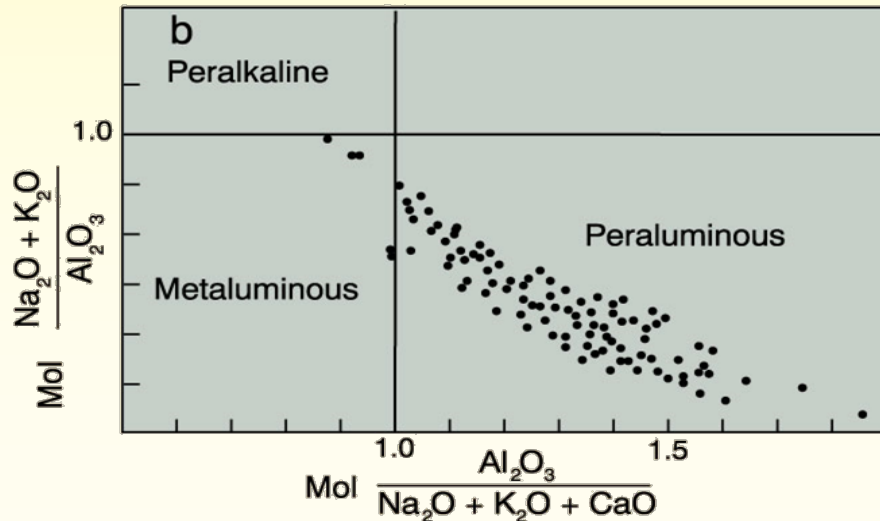
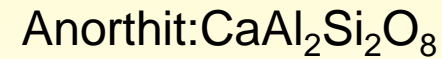
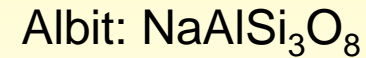
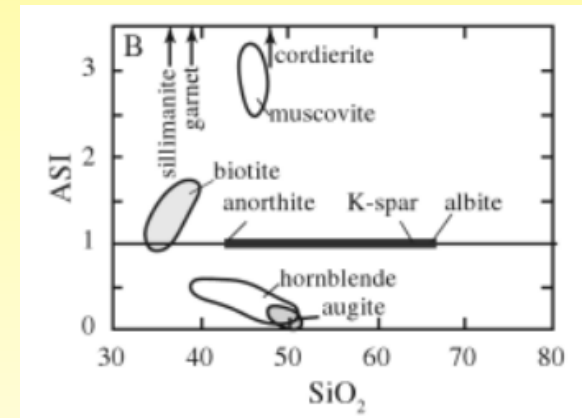


Winter (2001) Harker variation diagram for 310 analyzed volcanic rocks from Crater Lake (Mt. Mazama), Oregon Cascades.

# Aluminium-Sättigungsindex, ASI



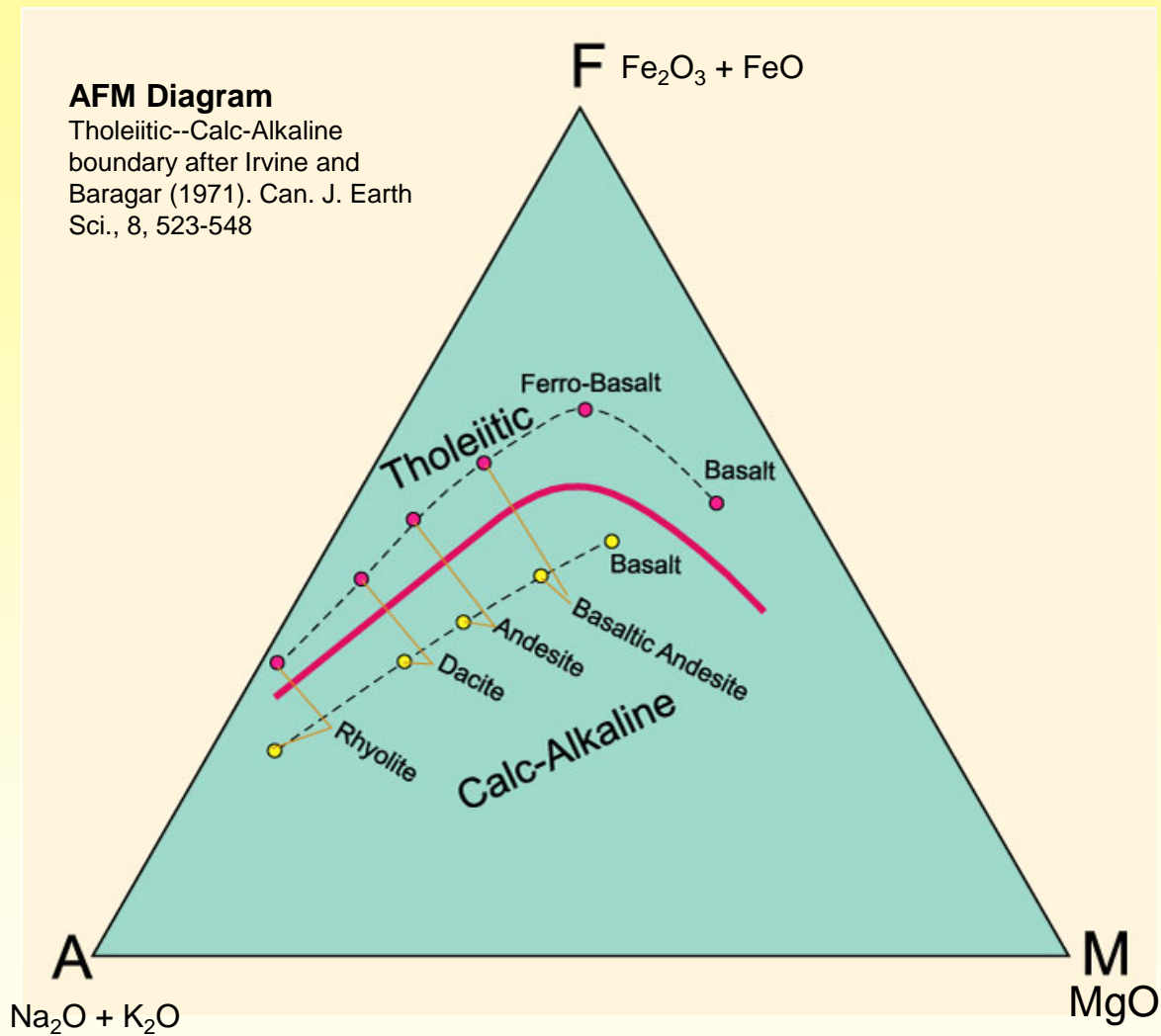
Winter (2001) Alumina saturation classes based on the *molar* proportions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) ("A/CNK") after Shand (1927). Common non-quartzofeldspathic minerals for each type are included. After Clarke (1992). Granitoid Rocks. Chapman Hall.



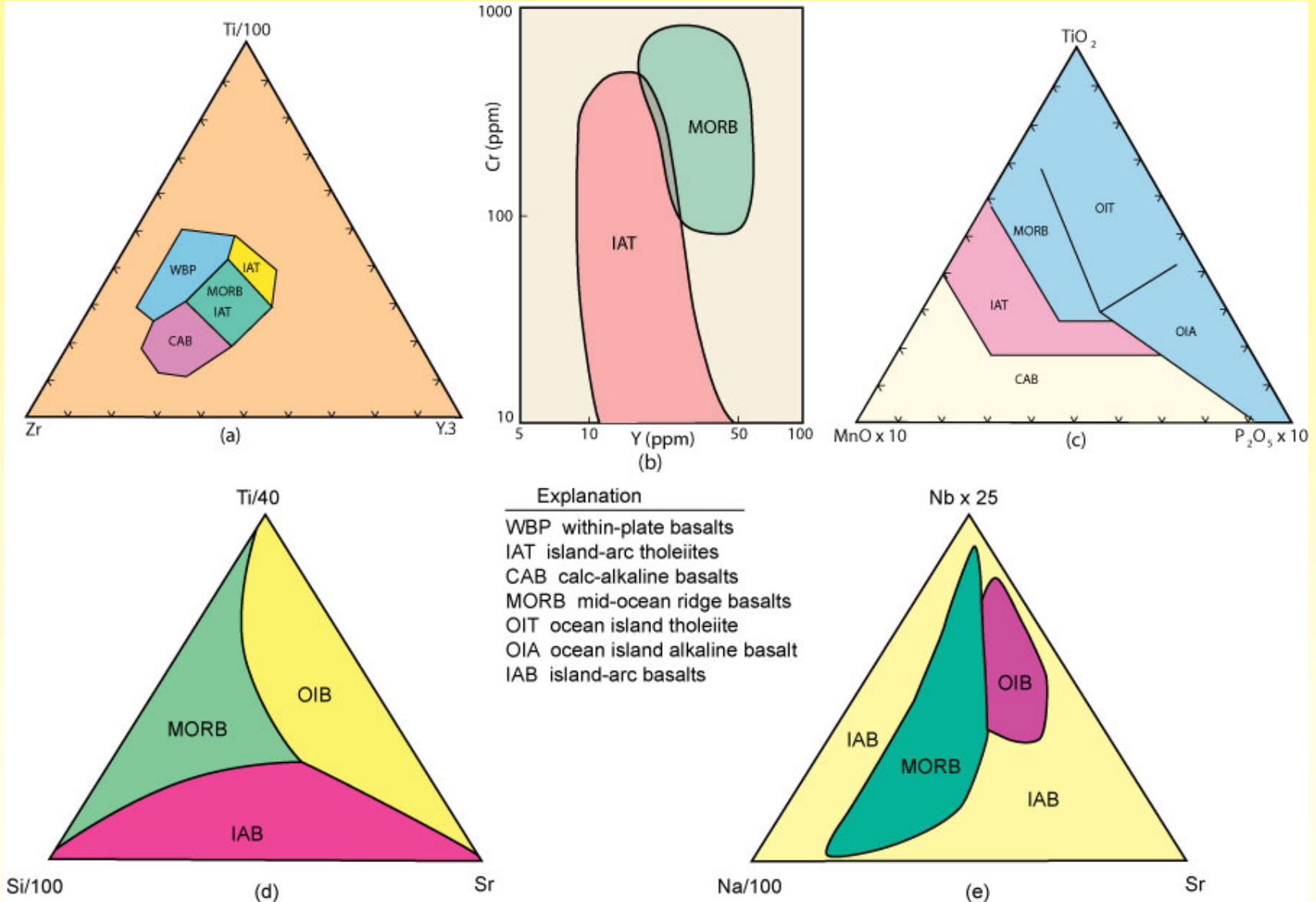
Winter (2001) Alumina saturation indices (Shand, 1927) with analyses of the peraluminous granitic rocks from the Achala Batholith, Argentina (Lira and Kirschbaum, 1990). In S. M. Kay and C. W. Rapela (eds.), Plutonism from Antarctica to Alaska. Geol. Soc. Amer. Special Paper, 241. pp. 67-76.



# Diskriminierungsdiagramme



# Tektonische Diskriminierungsdiagramme



**Figure 9.8** Examples of discrimination diagrams used to infer tectonic setting of ancient (meta)volcanics. **(a)** after Pearce and Cann (1973), **(b)** after Pearce (1982), Coish et al. (1986). Reprinted by permission of the American Journal of Science, **(c)** after Mullen (1983) Copyright © with permission from Elsevier Science, (d) and (e) after Vermeesch (2005) © AGU with permission.