

# Geochemie I (2V) WS 2006/2007

Prof. Dr. K. Mengel  
Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe  
[kurt.mengel@tu-clausthal.de](mailto:kurt.mengel@tu-clausthal.de)

## Vorwort

Die Geochemie beschäftigt sich mit der Verteilung von chemischen Elementen und deren Isotopen in den Baueinheiten des Erdkörpers. Diese LV Geochemie I richtet sich an Studierende des Bachelor-Studiengangs Geoenvironmental Engineering und erfordert gründliche Kenntnisse in allgemeiner und anorganischer Chemie sowie gründliche Kenntnisse in der Mineralogie, insbesondere im Bereich gesteinsbildender Minerale; außerdem sind grundlegende petrologische Kenntnisse erforderlich. Interessierten wird zur Vorbereitung die LV Einführung in die Geowissenschaften I (jeweils im WS) empfohlen.

## Inhalt

1	Konventionen und Einheiten .....	3
2	Ionenradien und Ionenladung .....	6
3	Mischkristalle .....	9
4	Spurenelemente: kompatibel vs. inkompatibel .....	12
5	Häufigkeit der chemischen Elemente im Kosmos .....	15
6	Chemisches Inventar des Erdkörpers .....	17
6.1	Erdkern .....	18
6.2	Erdmantel .....	18
6.3	Erdkruste .....	20
6.3.1	Ozeanische Kruste .....	20
6.3.2	Kontinentale Kruste .....	22
6.3.3	Granitoide .....	24
6.3.4	Sedimentite .....	25
6.4	Meerwasser .....	26
7	Methoden geochemischer Analytik, Aufschlussverfahren	
7.1	Röntgenfluoreszenz (XRF)	
7.2	Induktiv gekoppelte Plasma-Spektrometrie (ICP)	
7.3	Induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS)	
7.4	Atom-Absorption und Atom-Emission (AAS, AES)	
7.5	Weitere Methoden	
8	Rechenmethoden	

## Literatur

- Grundzüge der Geochemie: B. Mason und C. Moore  
Enke Verlag ISBN 3-432-94611-X
- Chemische Grundlagen der Geowissenschaften: R. C. O. Gill  
Enke Verlag ISBN 3-432-25511-X

## Datenbanken

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

## Wichtige Zeitschriften

- Geochimica et Cosmochimica Acta
- Chemical Geology
- Applied Geochemistry
- Earth and Planetary Science Letters

# 1 Konventionen und Einheiten

Geochemische Hauptkomponenten von Mineralen und Gesteinen werden als Oxide der Hauptelemente angegeben. Die Einheit ist Masse-% (auch Gew.-%).

Die chemischen Hauptkomponenten folgender Elemente als Oxide (keine Minerale!!) werden wie nachfolgend aufgeführt in Tabellen angeordnet.

Masse-% 质量百分比	z. B. Basalt 如 玄武岩
SiO <sub>2</sub>	49.94
TiO <sub>2</sub>	2.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.82
FeO	8.58
MnO	0.168
MgO	7.23
CaO	11.4
Na <sub>2</sub> O	2.26
K <sub>2</sub> O	0.52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.273
H <sub>2</sub> O	0.21
CO <sub>2</sub>	0.036
Summe 合计	99.947
Fe <sup>tot</sup> als Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.23

Die Nebenbestandteile und Spurenelemente werden nicht als Oxide sondern als Elemente angegeben.

Die Einheiten sind:

ppm: parts per million ( $10^{-6}$ )

ppb: parts per billion ( $10^{-9}$ )

ppt: parts per trillion ( $10^{-12}$ )

**Kasten 1: Masse-%, ppm, ppb, ppt**

100	Masse-%	entspricht	$10^6$ Teilen in $10^6$ Teilen
			$10^6$ ppm
10	Masse-%	„	$10^5$ ppm
1	Masse-%	„	$10^4$ ppm
0.1	Masse-%	„	1000 ppm
0.01	Masse-%	„	100 ppm
1	ppm	„	1000 ppb
0.01	ppm	„	10 ppb
0.001	ppm	„	1 ppb
0.001	ppb	„	1 ppt

## Beispiele:

5400	ppm	=	0.54	Masse-%
1630	ppb	=	1.630	ppm
0.028	ppm	=	28	ppb
2560	ppt	=	2.56	ppb

Die am häufigsten betrachteten Nebenbestandteile und Spurenelemente werden in folgender Reihenfolge angegeben (Tabellen):

Li	Alkaliien 碱金属元素
Rb	
Cs	
Sr	Erdalkalien 碱土金属元素
Ba	
Sc	3-d-Übergangselemente 3-d 过渡元素
Ti	
V	
Cr	
Co	
Ni	
Cu	
Zn	
Y	
Zr	
Nb	
Hf	
Ta	
La	Seltene Erden REE 稀土族元素
↓	
Lu	
Pb	Schwere Elemente 重元素
Th	
U	
F	Halogene 卤族元素
Cl	
Br	

## 2 Ionenradien und Ionenladung

Die Verteilung chemischer Elemente zwischen koexistierenden Phasen, z. B. zwischen einer natürlichen Flüssigkeit und einem natürlichen Festkörper (Mineral) erfolgt nach der Größe und der Ladung von Kationen und Anionen entsprechend dem Koordinationspolyeder in Kristallen. Grundsätzlich müssen Ladung und Radius gleich oder sehr ähnlich sein, damit der Einbau auf einem Gitterplatz erfolgen kann.

In den nachfolgenden Tabellen wird der gegenseitige Ersatz von chemischen Hauptkomponenten erläutert.

Gitterplatz 晶格位置	Koordination 配位数	IR (Å) 离子半径	Ladung 离子价	Austausch mit 可被..替换		Beispiel 例子
Si	[4]		4+	Al		
Al	[4]	0.39	3+	Si		
Al	[6]	0.535	3+	Fe Cr		
Fe	[6]	0.55	3+	Al Cr	3+ 3+	
Fe	[6]	0.61	2+	Mg Mn	2+ 2+	
Mn	[6]	0.255	2+	Mg Fe	2+ 2+	
Ca	[6]	1.00	2+	Na	1+	
Na	[8]	1.18	1+	K	1+	
K	[12]	1.64	1+	Na	1+	

Beispiele für den Einbau von Spurenelementen auf Kristallgitterplätze von Hauptelementen in Mineralen sind:

Hauptelemente 主要元素				Spurenelemente und Nebenbestandteile 微量元素及其他成分			
	Ladung 离子价	Koord. 配位数	IR (Å) 离子半径		Ladung 离子价	IR (Å) 离子半径	Beispiel 例子
Al	3+	[6]	0.535	Cr	3+	0.615	K(Al,Cr) <sub>3</sub> [AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ]OH
Fe	2+	[6]	0.61	Co	2+	0.65	(Fe,Co,Zn)O · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
				Zn	2+	0.740	
Mg	2+	[6]	0.720	Ni	2+	0.69	(Mg,Ni) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
				Co	2+	0.65	
Ca	2+	[8]	1.12	Sr	2+	1.26	(Ca, Sr, Ba)Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
				Ba	2+	1.42	
				La	3+	1.16	
				↓ Lu	3+	0.977	
K	1+	[12]	1.64	Rb	1+	1.72	(K,Rb,Cs)Al <sub>3</sub> (AlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )OH
				Cs	1+	1.99	
				(Ba)	2+	1.61	

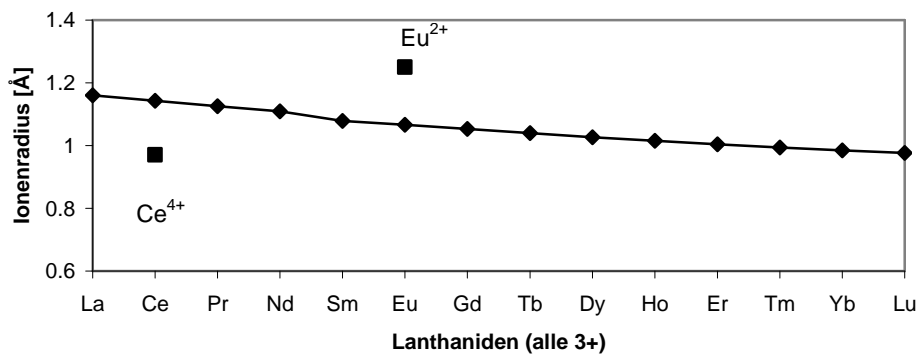
### Periodensystem der Elemente 元素周期表

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**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							

*	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
**	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

**Kasten 2:** Ionenradius und Ladung der Seltenen Erden (REE) 稀土元素的离子半径和价

In der Natur liegen die REE immer als dreiwertige Kationen vor, Ausnahmen sind  $\text{Ce}^{4+}$  und  $\text{Eu}^{2+}$ . Die Ionenradien der dreiwertigen REE nehmen von La bis Lu ab. Die Differenz im Ionenradius zwischen La und Lu beträgt fast 20 %.



Wegen der sehr großen Ähnlichkeit benachbarter REE z. B. La und Ce oder Yb und Lu sind diese in ihrem geochemischen Verhalten sehr ähnlich. Jedoch kann das  $\text{Ce}^{4+}$  sehr deutlich unterschiedlich im Vergleich mit  $\text{La}^{3+}$  und  $\text{Pr}^{3+}$  reagieren. Dies ist der Fall bei stark oxidierenden Bedingungen. Bei reduzierenden Bedingungen wird das Verhalten von  $\text{Eu}^{2+}$  entkoppelt von den benachbarten REE  $\text{Sm}^{3+}$  und  $\text{Gd}^{3+}$ .

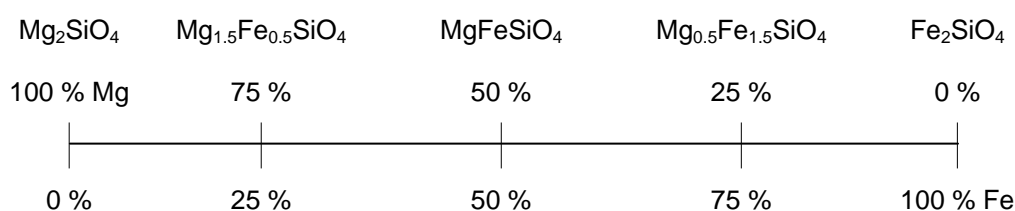
### 3 Mischkristalle 混合晶

Die überwiegende Mehrzahl der gesteinsbildenden Silikate besteht aus Mischkristallen. Diese sind aus zwei oder mehreren Endgliedern aufgebaut.

1. Beispiel: Olivin  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  例一: 橄榄石

Endglied	Forsterit	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$
Endglied	Fayalit	$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$

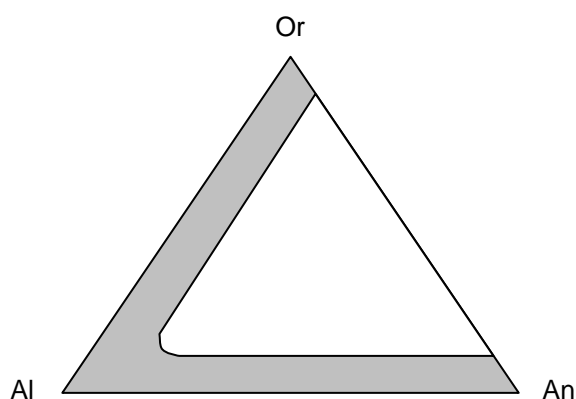
Die Mischung beider Endglieder ist lückenlos.



2. Beispiel: Feldspäte 例二: 长石

Endglied	Kalifeldspat (Orthoklas)	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$
Endglied	Natriumfeldspat (Albit)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Endglied	Calciumfeldspat (Anorthit)	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

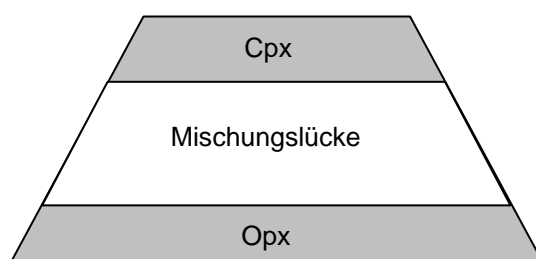
Die Endglieder Kaliumfeldspat und Natriumfeldspat sind lückenlos mischbar. Die Mischkristallreihe heißt Alkalifeldspäte. Die Endglieder Natriumfeldspat und Calciumfeldspat sind lückenlos mischbar. Die Mischkristallreihe heißt Plagioklase. Die Mischkristallendglieder Kaliumfeldspat und Calciumfeldspat sind praktisch nicht mischbar ( $\text{K}^+$ ;  $\text{Ca}^{2+}$ ). Man beschreibt die Feldspatmischkristalle in einem Dreieck, wobei das unterlegte Feld die möglichen Mischungen darstellt. Der Rest des Dreiecks stellt die Mischungslücke dar.



3. Beispiel: Pyroxene  $(\text{Ca,Fe,Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ 

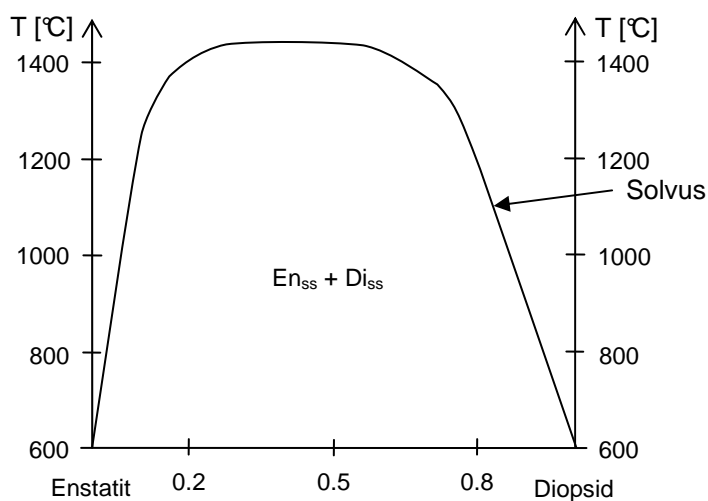
Endglied	Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
Endglied	Hedenbergit	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$
Endglied	Enstatit	$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$
Endglied	Ferrosilit	$\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$

Diopsid und Hedenbergit sind lückenlos mischbar, ebenso Enstatit und Ferrosilit. Jedoch sind beide Mischkristalle (Diopsid-Hedenbergit und Enstatit-Ferrosilit) nur begrenzt untereinander mischbar. Die gegenseitige Mischbarkeit der beiden Reihen wird konventionell in einem Trapez dargestellt.

**Kasten 3:** Mischungslücken und Solvus 混溶空隙区与完全混溶界

Die Mischungsverhältnisse von Endgliedern kann u. a. von Temperatur und Druck abhängen. Oft steigt mit zunehmender Temperatur die Mischbarkeit von Endgliedern. In einem T-X-Diagramm beschreibt der Solvus die Temperaturkurve, oberhalb welcher eine vollständige Mischbarkeit vorhanden ist. Die Fläche unterhalb des Solvus beschreibt die Mischungslücke.

Beispiel: Diopsid  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  und Enstatit  $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$

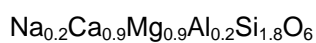


Innerhalb der Mischungslücke koexistieren also zwei Minerale: Enstatit mit geringen Gehalten von Diopsid im Gitter ( $\text{En}_{\text{ss}}$ ) und Diopsid mit geringen Gehalten von Enstatit im Gitter ( $\text{Di}_{\text{ss}}$ ); ss steht für solid solution. Die Anteile von Di in En und von En in Di sind temperaturabhängig.

Außerdem kann noch ein Ersatz von 1 Si durch 1 Al + 1 Na erfolgen:

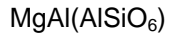
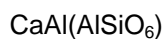
Endglied      Jadeit       $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$

Diopsid  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  und Jadeit  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$  sind gut mischbar. Einen Mischkristall aus 80 % Diopsid und 20 % Jadeit kann man schreiben als:



Desweiteren kann es einen Ersatz von 1 Si + 1 Mg (zusammen 6 positive Ladungen) durch 2 Al (zusammen 6 positive Ladungen) geben.

Endglieder sind dann z. B.:



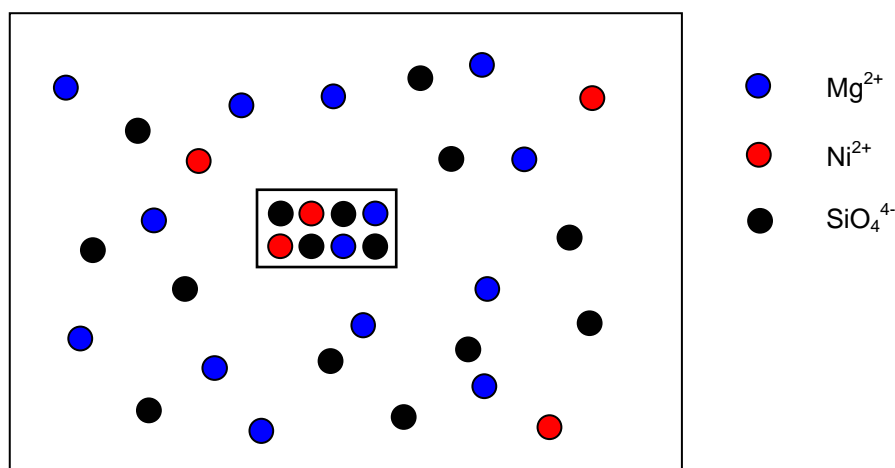
## 4 Spurenelemente: kompatibel vs. inkompatibel

Das Verhalten von Spurenelementen beim Einbau in kristalline Körper (Minerale) richtet sich nach der Größe und Koordination des Gitterplatzes des betreffenden Ions. Wenn die Zusammensetzung einer Flüssigkeit so beschaffen ist, daß sie im Gleichgewicht mit einem Mineral steht (d. h. die Flüssigkeit ist an diesem Mineral gesättigt), so können Spurenelemente aus der Lösung in den Festkörper (Mineral) aufgenommen werden. Das Verhältnis von Konzentration eines Spurenelements in der Flüssigkeit ( $C_l$ ) und der Konzentration dieses Spurenelements im Festkörper ( $C_s$ ) heißt Verteilungskoeffizient  $D$ .

$$D = C_s/C_l$$

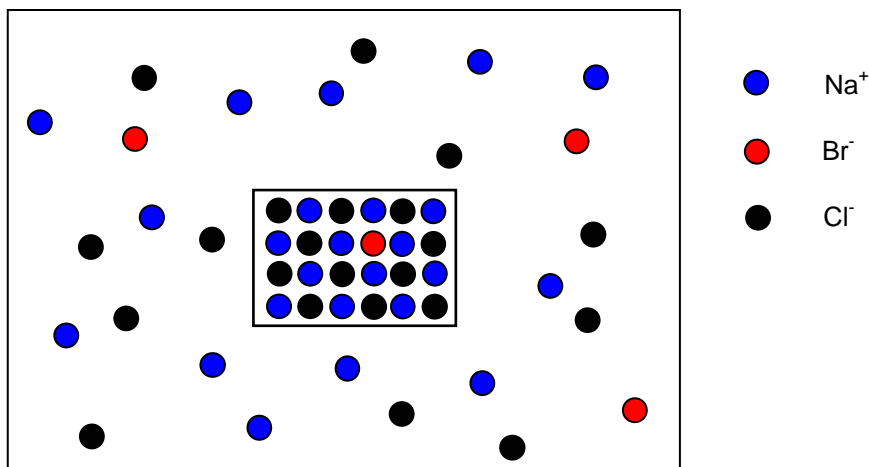
Ist  $D \geq 1$ , handelt es sich um ein kompatibles Verhalten des Spurenelements, bei  $D < 1$  ist das Verhalten inkompatibel.

Beispiel 1: Silikatische Schmelze mit  $Mg^{2+}$ ,  $SiO_4^{4-}$  (Hauptkomponenten) und  $Ni^{2+}$  (Spurenelement) in Lösung und koexistierendem Kristall  $Mg_2SiO_4$  [ $C_s(Ni) > C_l(Ni)$ ].



Für Ni ist  $D > 1$ ; es wird ein höherer Gehalt von Ni im Festkörper als in der Schmelze beobachtet. Das heißt, daß bei fortschreitender Kristallisation die Ni-Konzentration in der Schmelze immer niedriger wird.

Beispiel 2: In einem stark eingedunsteten Meerwasser mit den Hauptkomponenten  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  kristallisiert das Mineral Halit ( $\text{NaCl}$ ).  $\text{Br}^-$  ist als Spurenelement in der Meerwasser-Lösung vorhanden.



Obwohl  $\text{Br}^-$  einfach positiv geladen ist wie  $\text{Cl}^-$ , wird eine geringere Br-Konzentration in Halit erreicht als im Meerwasser:

$$C_s(\text{Br}) > C_l(\text{Br}); D < 1$$

Das heißt, daß mit fortschreitender Kristallisation von  $\text{NaCl}$  aus Meerwasser-Lösungen die Br-Konzentration in der Lösung immer größer wird.

Das Verhalten von Spurenelementen bei der Kristallisation aus einer Flüssigkeit kann man in erster Näherung beschreiben mit

$$C_l = C_0 \cdot f^{D-1}$$

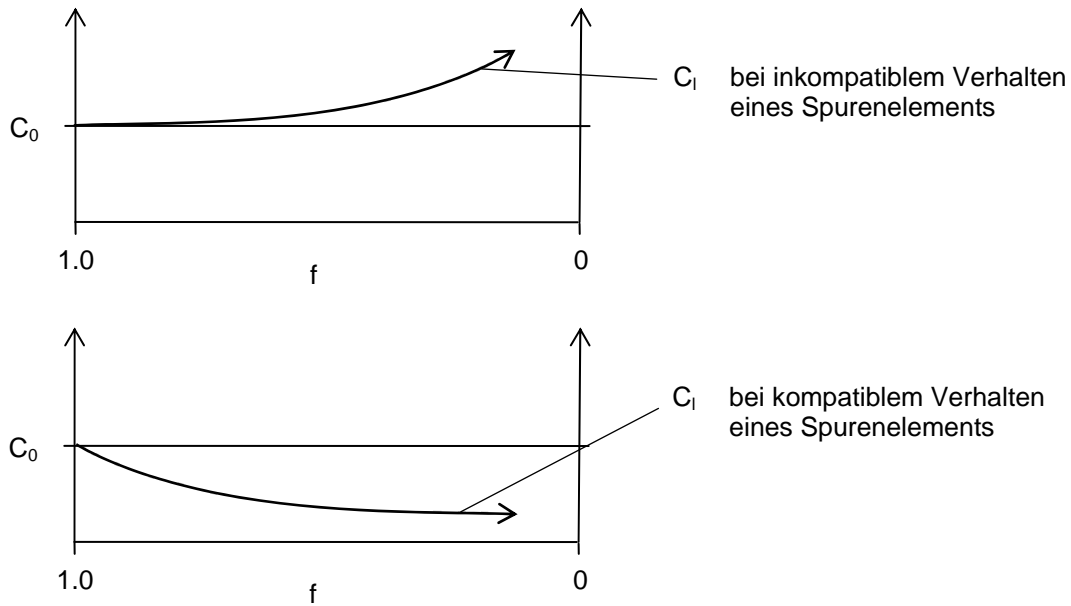
Dabei ist:

- $C_l$  die Konzentration eines Spurenelements in der Restflüssigkeit
- $C_0$  die Konzentration des Spurenelements in der Flüssigkeit vor Beginn der Kristallisation
- $D$  der Verteilungskoeffizient
- $f$  der Anteil Flüssigkeit, der nach der Kristallisation noch verbleibt.

$C_l$  und  $C_0$  sind Konzentrationsangaben (z. B. ppm),  $D$  und  $f$  sind dimensionslos, wobei  $f$  als Fraktion von 1 dargestellt wird (z. B. 80 % Restflüssigkeit entspricht  $f = 0.8$ ).

**Kasten 4:** Spurenelementanreicherung und -Verarmung in einer Flüssigkeit im Gleichgewicht mit einem Festkörper

Bei fortschreitender Kristallisation werden inkompatible Elemente in der Flüssigkeit angereichert, kompatible Elemente verarmen in der Schmelze.



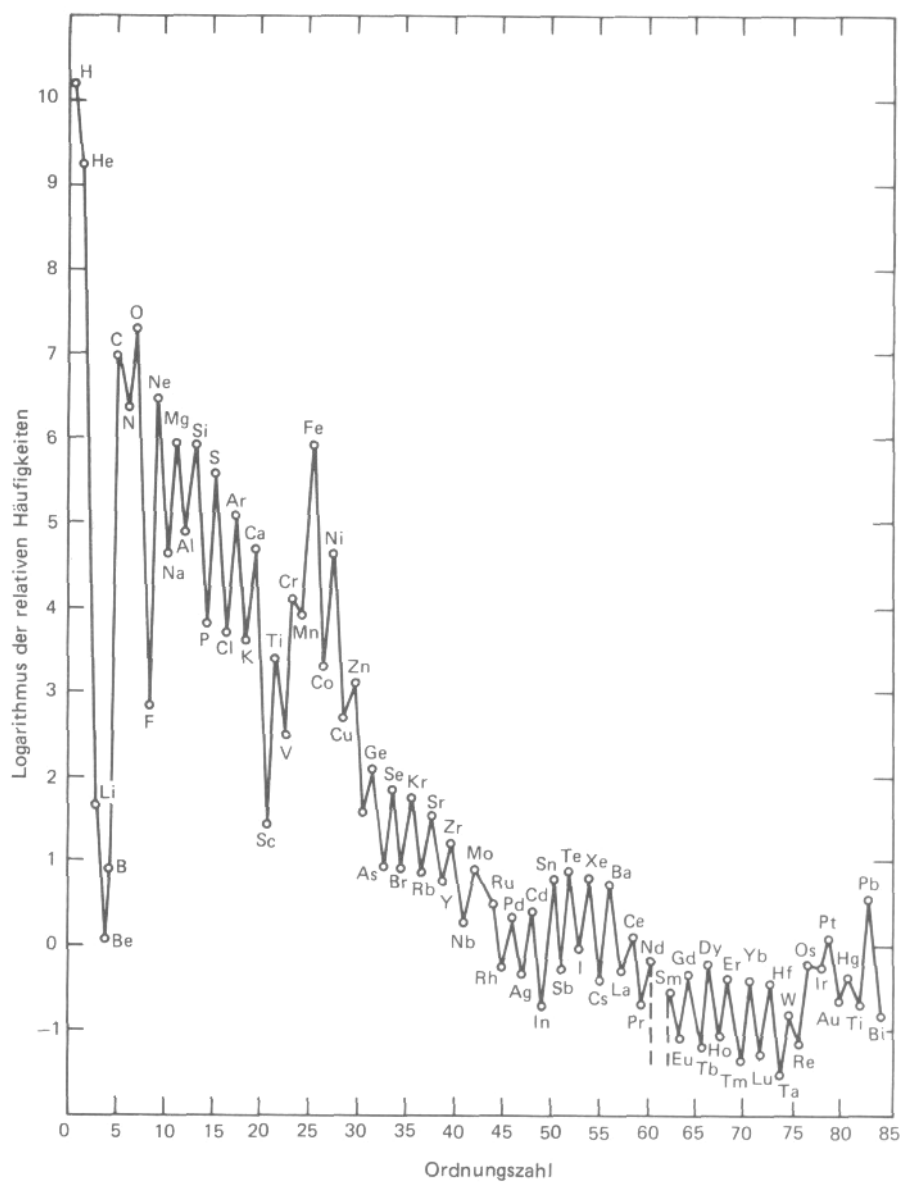
## 5 Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem/Normierung

Für unser Sonnensystem nimmt man die sogenannte kosmische Verteilung der Elemente als Grundlage. Die Angaben sind nicht in Masse-%, sondern relativ zu  $10^6$  Atomen Si.

Kosmische Elementhäufigkeiten in Atomen pro  $10^6$  Atome Si (aus Mason & Moore 1985: 20, Tab. 2.6):

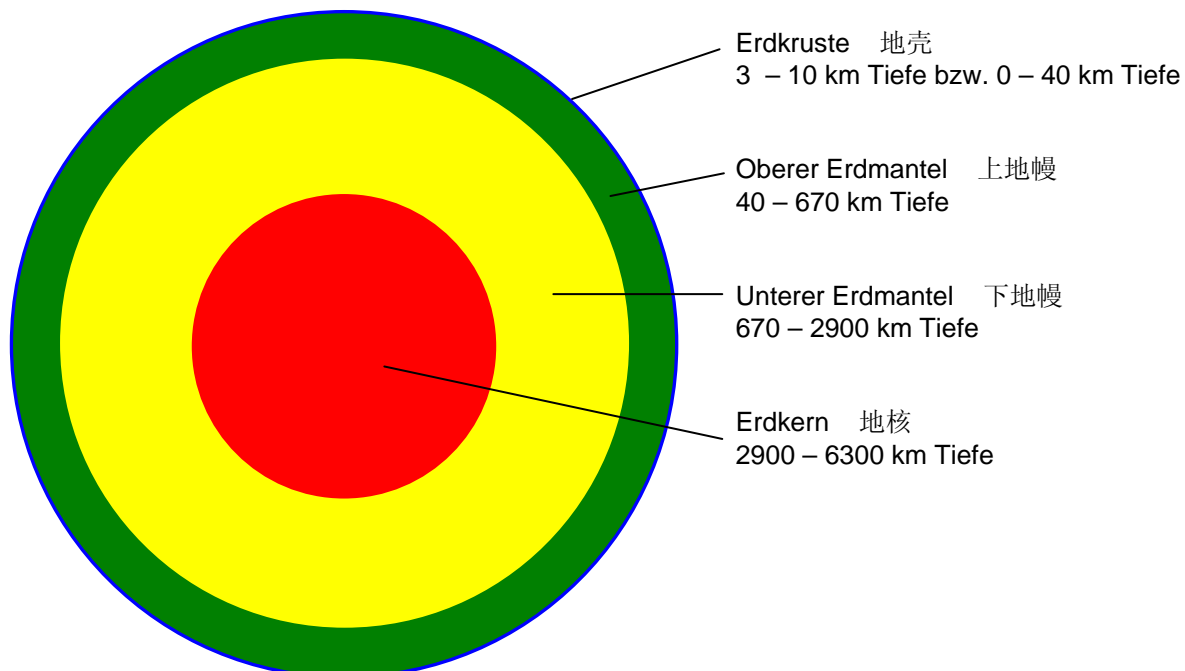
Element 元素			Element 元素			Element 元素		
1	H	$2.66 \cdot 10^{10}$	29	Cu	540	58	Ce	1.2
2	He	$1.8 \cdot 10^9$	30	Zn	1260	59	Pr	0.18
3	Li	60	31	Ga	38	60	Nd	0.79
4	Be	1.2	32	Ge	117	62	Sm	0.24
5	B	9	33	As	6.2	63	Eu	0.094
6	C	$1.11 \cdot 10^7$	34	Se	67	64	Gd	0.42
7	N	$2.31 \cdot 10^6$	35	Br	9.2	65	Tb	0.076
8	O	$1.84 \cdot 10^7$	36	Kr	41.3	66	Dy	0.37
9	F	780	37	Rb	6.1	67	Ho	0.092
10	Ne	$2.6 \cdot 10^6$	38	Sr	22.9	68	Er	0.23
11	Na	$6.0 \cdot 10^4$	39	Y	4.8	69	Tm	0.035
12	Mg	$1.06 \cdot 10^6$	40	Zr	12	70	Yb	0.2
13	Al	$8.5 \cdot 10^4$	41	Nb	0.9	71	Lu	0.035
14	Si	$1.00 \cdot 10^6$	42	Mo	4.0	72	Hf	0.17
15	P	6500	44	Ru	1.9	73	Ta	0.020
16	S	$5.0 \cdot 10^5$	45	Rb	0.40	74	W	0.30
17	Cl	4740	46	Pd	1.3	75	Re	0.051
18	Ar	$1.06 \cdot 10^5$	47	Ag	0.46	76	Os	0.69
19	K	3500	48	Cd	1.55	77	Ir	0.72
20	Ca	$6.25 \cdot 10^4$	49	In	0.19	78	Pt	1.41
21	Sc	31	50	Sn	3.7	79	Au	0.21
22	Ti	2400	51	Sb	0.31	80	Hg	0.21
23	V	254	52	Te	6.5	81	Tl	0.19
24	Cr	$1.27 \cdot 10^4$	53	I	1.27	82	Pb	2.6
25	Mn	9300	54	Xe	5.84	83	Bi	0.14
26	Fe	$9.0 \cdot 10^5$	55	Cs	0.39	90	Th	0.045
27	Co	2200	56	Ba	4.8	92	U	0.027
28	Ni	$4.78 \cdot 10^4$	57	La	0.37			

Logarithmische Darstellung der Häufigkeit der Elemente im Kosmos (aus Mason & Moore 1985: 21):



## 6 Chemisches Inventar des Erdkörpers

Schalenaufbau der Erde 地球的层状构造



	Masse [g] 质量	Dichte 比重	Masse-% 质量百分比
Erde 地球	$6 \cdot 10^{27}$	5.5	100
Kern 地核	$2 \cdot 10^{27}$	11	32.4
Mantel 地幔	$4 \cdot 10^{27}$	4.5	67.2
Erdkruste 地壳	$1.4 \cdot 10^{24}$	2.8	0.4
Meerwasser 海水	$5 \cdot 10^{21}$	1.03	0.024



## Chemische Hauptkomponenten:

Gew.-%	Gesamter Mantel 全地幔	Oberer Mantel 上地幔
SiO <sub>2</sub>	49.9	44.54
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.072
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.64	1.82
FeO	8	8.13
MnO	0.13	0.13
MgO	35.1	42.4
CaO	2.89	1.75
Na <sub>2</sub> O	0.34	0.17
K <sub>2</sub> O	0.02	0.006

## Spurenelemente:

ppm	Gesamter Mantel 全地幔	Oberer Mantel 上地幔
Li	0.83	2
Sc	13	8.2
V	128	50
Cr	3000	2770
Co	100	110
Ni	2000	2220
Cu	28	13
Zn	50	56
Rb	0.55	0.5
Sr	17.8	22
Y	3.4	2.9
Zr	8.3	18
Nb	0.56	1.3
Cs	0.018	0.006
Ba	5.1	5.1
La	0.551	0.92
Ce	1.436	1.93
Pr	0.206	
Nd	1.067	1.44
Sm	0.347	0.4
Eu	0.131	0.16
Gd	0.459	
Tb	0.087	0.12
Dy	0.572	
Ho	0.128	
Er	0.374	
Tm	0.054	
Yb	0.372	0.38
Lu	0.057	0.065
Hf	0.27	0.3
Ta	0.04	0.1
Pb	0.12	0.2
Th	0.064	0.07
U	0.018	0.025

## 6.3 Erdkruste

Die kontinentale Kruste und die ozeanische Kruste sind sehr unterschiedlich zusammengesetzt.

### 6.3.1 Ozeanische Kruste

Die ozeanische Erdkruste wird an den ozeanischen Rücken stetig neu gebildet.

Gesteine: Basalte, Gabbros

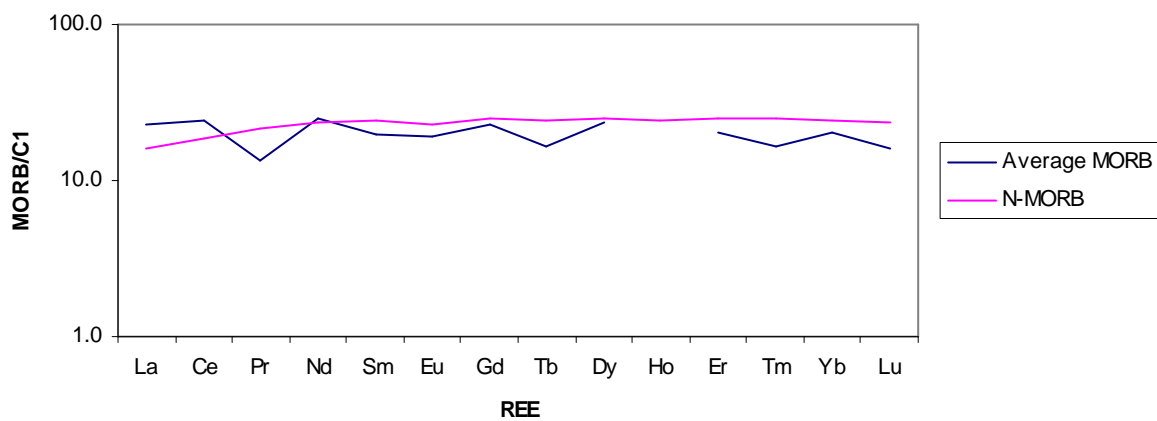
Minerale: Plagioklas, Clinopyroxen, Orthopyroxen, Olivin, (Quarz), Ilmenit

Chemische Zusammensetzung der ozeanischen Kruste:

Gew.-%	Average MORB	N-MORB
SiO <sub>2</sub>	49.14	50.45
TiO <sub>2</sub>	1.17	1.615
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.64	15.255
FeO	9.14	10.426
MnO	0.16	0.17
MgO	8.22	7.576
CaO	11.84	11.303
Na <sub>2</sub> O	2.4	2.679
K <sub>2</sub> O	0.2	0.106

## Spurenelemente in der ozeanischen Kruste:

ppm	Average MORB	N-MORB
Li	8.8	
Sc	40	41.37
V	252	
Cr	317	
Co	45	47.07
Ni	144	149.5
Cu	81	74.4
Zn	78	
Rb	4.9	1.262
Sr	134	113.2
Y	29	35.82
Zr	85	104.24
Nb	11.2	3.507
Cs	0.08	0.01408
Ba	48	13.87
La	5.5	3.895
Ce	15.6	12.001
Pr	1.3	2.074
Nd	11.8	11.179
Sm	3.05	3.752
Eu	1.11	1.335
Gd	4.6	5.077
Tb	0.61	0.885
Dy	5.95	6.304
Ho		1.342
Er	3.38	4.143
Tm	0.41	0.621
Yb	3.29	3.9
Lu	0.4	0.589
Hf	2	2.974
Ta	3	0.192
Pb	0.89	0.489
Th	0.75	0.1871
U	0.12	0.0711



### 6.3.2 Kontinentale Kruste

Die kontinentale Kruste ist über 4 Ga Erdgeschichte gewachsen und hat sich intern differenziert. Die kontinentale Gesamtkruste hat die Zusammensetzung von basaltischem Andesit.

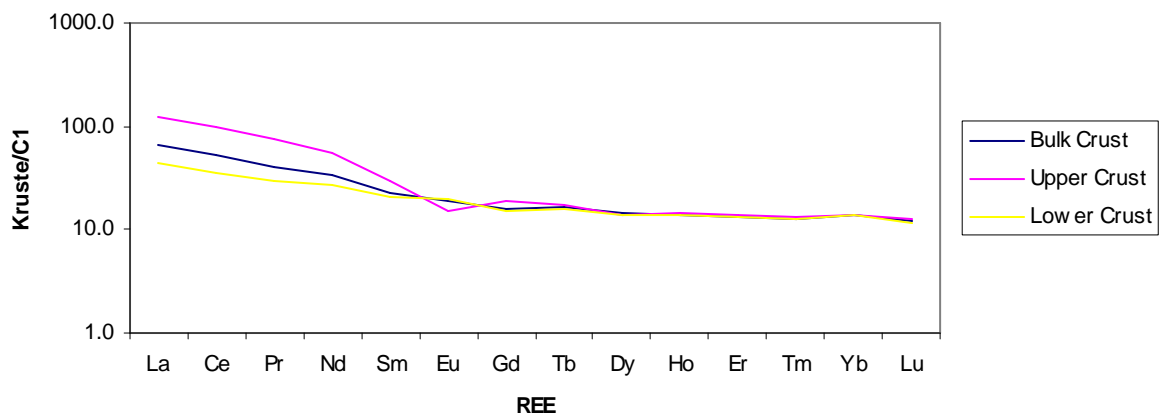
Gesteine:	Obere kontinentale Kruste:	Granite, Tonalite, Gabbro, Grauwacken, Tonschiefer und deren Metamorphite
	Untere kontinentale Kruste:	Gneise, Granulite, Amphibolite, Eklogit, Gabbro
Minerale:	Obere kontinentale Kruste:	Quarz, Plagioklas, Alkalifeldspat, Muscovit, Biotit
	Untere kontinentale Kruste:	Plagioklas, Pyroxene, Amphibole, Alkalifeldspat, Biotit, Muscovit, Granat

Chemische Zusammensetzung der Kontinentalen Kruste:

Gew.-%	Gesamtkruste 全地壳	Obere Kruste 上地壳	Untere Kruste 下地壳
SiO <sub>2</sub>	57.3	66	54.4
TiO <sub>2</sub>	0.9	0.5	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.9	15.2	16.1
FeO	9.1	4.5	10.6
MnO			
MgO	5.3	2.2	6.3
CaO	7.4	4.2	8.5
Na <sub>2</sub> O	3.1	3.9	2.8
K <sub>2</sub> O	1.1	3.4	0.34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			

## Spurenelemente in der kontinentalen Kruste:

ppm	Gesamtkruste 全地壳	Obere Kruste 上地壳	Untere Kruste 下地壳
Li	13	20	11
Sc	30	11	36
V	230	60	285
Cr	185	35	235
Co	29	10	35
Ni	105	20	135
Cu	75	25	90
Zn	80	71	83
Rb	32	112	5.3
Sr	260	350	230
Y	20	22	19
Zr	100	190	70
Nb	11	25	6
Cs	1	3.7	0.1
Ba	250	550	150
La	16	30	11
Ce	33	64	23
Pr	3.9	7.1	2.8
Nd	16	26	12.7
Sm	3.5	4.5	3.17
Eu	1.1	0.88	1.17
Gd	3.3	3.8	3.13
Tb	0.6	0.64	0.59
Dy	3.7	3.5	3.6
Ho	0.78	0.8	0.77
Er	2.2	2.3	2.2
Tm	0.32	0.33	0.32
Yb	2.2	2.2	2.2
Lu	0.3	0.32	0.29
Hf	3	5.8	2.1
Ta	1	2.2	0.6
Pb	8	20	4
Th	3.5	10.7	1.06
U	0.91	2.8	0.28



### 6.3.3 Granitoide

Granitoide Gesteine sind die häufigsten Gesteine der oberen Erdkruste. Es dominieren Tonalite und Granite (Granodiorite).

Gesteine: Tonalite, Granodiorite, Granite

Minerale: Plagioklas, Quarz, Alkalifeldspat, Muscovit, Biotit, Pyroxene, Amphibole

Chemische Hauptkomponenten von Granitoiden:

Gew.-%	Tonalite	Granite 花岗岩
SiO <sub>2</sub>	61.9	70.27
TiO <sub>2</sub>	0.77	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.3	14.1
FeO	5.68	3.37
MnO	0.09	0.06
MgO	2.6	1.42
CaO	4.9	2.03
Na <sub>2</sub> O	3.9	2.41
K <sub>2</sub> O	1.9	3.96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	0.15

Spurenelemente in Granitoiden:

ppm	Tonalite	Granite 花岗岩
Li	19	
Sc	11	12
V	103	56
Cr	38	
Co	16	
Ni	19	13
Cu	19	11
Zn	61	62
Rb	64	217
Sr	439	120
Y	22	32
Zr	173	165
Nb	8.8	12
Cs	3.2	
Ba	608	468
La	23	
Ce	53	64
Pr	8.5	
Nd	25	
Sm	4.9	
Eu	1.4	
Gd	4.2	
Tb	0.75	
Dy	3.5	
Ho	0.9	
Er	1.9	
Tm		
Yb	2.4	
Lu	0.37	
Hf	4.6	
Ta	1.1	
Pb	14.2	27
Th	6.4	18
U	1.7	4

### 6.3.4 Sedimentgesteine

Gesteine: Grauwacken, Tonschiefer, Sandstein

Minerale: Quarz, Alkalifeldspat, Plagioklas, Schichtsilikate (Chlorit, Illit etc.)

Chemische Zusammensetzung von Sedimentgesteinen

Gew.-%	Tonschiefer 泥质板岩	Grauwacke 杂砂岩
SiO <sub>2</sub>	62.8	69.1
TiO <sub>2</sub>	1	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.9	13.5
FeO	6.5	5.32
MnO	0.11	0.1
MgO	2.22	2.3
CaO	1.3	2.6
Na <sub>2</sub> O	1.2	3
K <sub>2</sub> O	3.7	2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.13

Spurenelemente in der kontinentalen Kruste:

ppm	Tonschiefer 泥质板岩	Grauwacke 杂砂岩
Li	75	
Sc	16	16
V	150	98
Cr	110	88.0
Co	23	15
Ni	55	24
Cu	50	24
Zn	85	76
Rb	160	72
Sr	200	201
Y	27	26
Zr	210	302
Nb	19	8.4
Cs	15	2.2
Ba	650	426
La	38	34
Ce	80	58
Pr	8.9	6.1
Nd	32	25
Sm	5.6	4.6
Eu	1.1	1.2
Gd	4.7	4
Tb	0.77	0.63
Dy	4.4	3.4
Ho	1	0.78
Er	2.9	2.2
Tm	0.4	
Yb	2.8	2.1
Lu	0.43	0.37
Hf	5	3.5
Ta		
Pb	20	14.2
Th	14.6	9
U	3.1	2

## 6.4 Meerwasser

Chemische Zusammensetzung des Meerwassers

Kationen 阳离子	ppm	Anionen 阴离子	ppm
Na	11000	Cl <sup>-</sup>	19000
Mg	1300	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	
K	390	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
Ca	410	Br <sup>-</sup>	37
Sr	8	F <sup>-</sup>	1.3
Rb	0.12	I <sup>-</sup>	0.06
Ba	0.02		
Li	0.170		
Mo	0.01		
U	0.003		
Ti	0.001		
Fe	0.003		
Al	0.001		
Pb	0.00003		