

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ein Annäherungsversuch an den Planeten Erde</b>	<b>1</b>
1.1	Ein neues Modell zur Entwicklungsgeschichte der Erde	2
1.1.1	Von der Kontinentaldrift zur Plattentektonik	2
1.1.2	Ein revolutionäres Modell, das teilweise ohne logische Erklärung funktioniert	3
1.2	Eine der großen aktuellen Herausforderungen der Geologie: Funktions- und Entwicklungsweisen der Kopplung an Schnittstellen	4
1.2.1	Interne Kopplungen	4
1.2.2	Schnittstelle Geosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre	4
1.3	Die Beiträge der Weltraumwissenschaften zu einer Neubetrachtung der Geschichte unseres Planeten	5
<b>I Die Entstehung des Planeten</b>		
<b>2</b>	<b>Geschichte des Universums</b>	<b>9</b>
2.1	Kosmologie: Das Studium des Universums	10
2.1.1	Das Universum: Kräfte, Interaktionen und Teilchen	10
2.1.2	Der Aufbau des Universums	14
2.2	Entstehung und Evolution des Universums	22
2.2.1	Die Ausdehnung des Universums	22
2.2.2	Die Nukleosynthese der leichten Elemente	23
2.2.3	Der Ursprung der kosmischen Hintergrundstrahlung	25
2.2.4	Die Form des Universums	25
2.2.5	Von der Big-Bang-Theorie zur Theorie der kosmologischen Inflation	28
2.2.6	Das Alter des Universums	29
2.2.7	Die Bildung von Galaxien und großer kosmischen Strukturen: Die Unentbehrlichkeit der Dunklen Materie	30
2.2.8	Die Evolution des Universums	30
2.2.9	Die Bildung von Sternen: Die Nukleosynthese der schweren Elemente	32
2.3	Der Ursprung unseres Sonnensystems	33
2.3.1	Die Entstehung des Sonnensystems	33
2.3.2	Im Sonnensystem noch immer vorhandenes ursprüngliches Material	35
2.4	Fazit	40
	Literatur	40
<b>3</b>	<b>Die junge Erde: Entstehung und Entwicklung des Planeten</b>	<b>41</b>
3.1	Das Sonnensystem: Die Sonne und acht Planeten	42
3.1.1	Die Sonne	42
3.1.2	Die Zusammensetzung der Planeten	45

XIII

3.2	Die Entstehung des Planeten Erde . . . . .	50
3.2.1	Akkretion und frühe Differenziation . . . . .	51
3.2.2	Radioaktivität und Wärmefluss . . . . .	52
3.2.3	Bildung des Erdkerns . . . . .	53
3.3	Die Entwicklung des Planeten Erde . . . . .	53
3.3.1	Bildung der ersten Gesteine: Ursprung und Wachstum der kontinentalen Kruste . . . . .	53
3.3.2	Der Ursprung der großen Reservoirs: Atmosphäre, Ozeane und organisches Reservoir . . . . .	62
3.4	Die Entstehung des Mondes . . . . .	65
3.4.1	Gesteinsproben vom Mond: Die Morphologie des Mondes . . . . .	65
3.4.2	Die Kruste des Mondes: Ursprüngliche Gesteine . . . . .	66
3.4.3	Eine komplexe Geschichte . . . . .	68
3.4.4	Hypothesen zur Entstehung des Mondes . . . . .	68
3.5	Fazit . . . . .	69
	Literatur . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Elemente und Atome: Die Kristallstruktur . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1	Kristallographie: Die innere Ordnung bestimmt die äußere Form . . . . .	72
4.1.1	Kristallmorphologie . . . . .	72
4.1.2	Kristallstruktur: Ordnung und Symmetrie . . . . .	74
4.2	Kristallstruktur . . . . .	81
4.2.1	Elemente und Atome, die Baustoffe der Materie: Das Atommodell nach Rutherford und Bohr . . . . .	82
4.2.2	Verknüpfung von Atomen in der Kristallstruktur . . . . .	83
4.2.3	Koordinationszahl und Pauling'sche Regeln: Die Stabilität von Kristallstrukturen . . . . .	84
4.2.4	Die Größe eines Ions und der Ionenradius . . . . .	85
4.3	Die Beschreibung der Kristallstruktur . . . . .	86
4.3.1	Der geometrische Aufbau der Kristallstruktur . . . . .	86
4.3.2	Beschreibung der Silikatstruktur auf Basis der Si–O-Bindung . . . . .	88
4.4	Die Struktur als Grundlage der physikalischen Eigenschaften von Mineralen . . . . .	91
4.4.1	Punktdefekte in einem Kristall . . . . .	91
4.4.2	Zweidimensionale Fehler: Zwillingsbildung . . . . .	94
4.4.3	Linienfehler: Versetzungen . . . . .	94
4.5	Kristallstrukturen und Druck . . . . .	95
4.5.1	Die Transformationen des Olivins . . . . .	100
4.5.2	Andere Phasen . . . . .	102
4.6	Fazit . . . . .	104
	Literatur . . . . .	104
<b>5</b>	<b>Die Minerale, Baustoffe der Erde . . . . .</b>	<b>105</b>
5.1	Die chemische Zusammensetzung der Minerale . . . . .	106
5.1.1	Die chemische Zusammensetzung der Erde . . . . .	106
5.1.2	Struktur und chemische Zusammensetzung von Mineralen . . . . .	108
5.1.3	Entmischung . . . . .	112
5.2	Silikate . . . . .	113
5.2.1	Isolierte [SiO <sub>4</sub> ]-Tetraeder: Inselsilikate (Nesosilikate) . . . . .	113
5.2.2	[SiO <sub>4</sub> ]-Tetraeder in Paaren angeordnet: Gruppensilikate (Sorosilikate) . . . . .	115
5.2.3	[SiO <sub>4</sub> ]-Tetraeder in Ringen angeordnet: Ringsilikate (Cyclosilikate) . . . . .	116

5.2.4	[SiO <sub>4</sub> ]-Tetraeder in Ketten angeordnet: Kettensilikate (Inosilikate)	117
5.2.5	[SiO <sub>4</sub> ]-Tetraeder in Schichten angeordnet: Schichtsilikate (Phyllosilikate)	122
5.2.6	[SiO <sub>4</sub> ]-Tetraeder in einem Gerüst angeordnet: Gerüstsilikate (Tektosilikate)	128
5.3	Nichtsilikate	134
5.3.1	Elemente	134
5.3.2	Sulfide	134
5.3.3	Oxide und Hydroxide	134
5.3.4	Halogenide	136
5.3.5	Karbonate	136
5.3.6	Sulfate	138
5.3.7	Phosphate	138
5.4	Fazit	139
	Literatur	139
<b>6</b>	<b>Bedingungen für die Stabilität von Mineralen</b>	<b>141</b>
6.1	Das Phasendiagramm	142
6.1.1	Ein Beispiel: Das Phasendiagramm des Wassers	142
6.1.2	Stabilität, Aktivierungsenergie und Gleichgewicht	142
6.1.3	Systembegriff und Bestandteile von Systemen	143
6.2	Einführung in die Thermodynamik	144
6.2.1	Die Hauptsätze der Thermodynamik	144
6.2.2	Die Energie eines chemischen Systems	145
6.2.3	Die Gibbs'sche Phasenregel	149
6.3	Minerale als Festkörper: Stabilität von Mineralphasen	150
6.3.1	Polymorphie: Einstoffsysteme	150
6.3.2	Zweistoffsysteme	152
6.3.3	Dreistoffsysteme und Subsolidusdiagramme	159
6.4	Anwesenheit einer Fluidphase: Wasser und/oder CO <sub>2</sub>	164
6.4.1	Abläufe bei der Aufschmelzung und bei der Kristallisation	164
6.4.2	Entwässerungs- und Dekarbonatisierungsreaktionen	166
6.4.3	Mischreaktionen	168
6.5	Fazit	168
	Literatur	170
<b>II</b>	<b>Die Kennzeichen der Kinematik der Erde</b>	
<b>7</b>	<b>Die Zeit in der Geologie</b>	<b>173</b>
7.1	Relative Altersbestimmung geologischer Ereignisse: Chronostratigraphie	174
7.1.1	Aktualismus	174
7.1.2	Formulierung der ersten stratigraphischen Prinzipien	174
7.1.3	Biostratigraphie	174
7.1.4	Biochronologie	177
7.1.5	Hochauflösende Stratigraphie	178
7.1.6	Stratigraphische und geochronologische Tabellen	178
7.2	Numerische Zeitmessung: Geochronometrie	180
7.2.1	Grundlagen	180
7.2.2	Datierung von Gesteinen und Mineralen	183
7.3	Der Beitrag der Geochronologie zur Kenntnis der Erdgeschichte	188
7.3.1	Alter der Erde und Entstehung der Atmosphäre	188
7.3.2	Thermische Geschichte von Kristallingesteinen	191

7.3.3	Die Zeit des Präkambriums . . . . .	192
7.4	Fazit . . . . .	192
	Literatur . . . . .	193
<b>8</b>	<b>Gravitation: Das Aussehen der Erde . . . . .</b>	<b>195</b>
8.1	Reliefs und Form der Erde . . . . .	196
8.1.1	Kontinente und Ozeane . . . . .	196
8.1.2	Die Schwerkraft und die Form der Erde . . . . .	199
8.2	Das Geoid: Ausdruck regional unterschiedlicher Gravitation . . . . .	203
8.2.1	Heterogene Massenverteilung im Erdinneren . . . . .	203
8.2.2	Schwereanomalien . . . . .	205
8.3	Vertikalbewegungen der Lithosphäre: Gravitation und Isostasie . . . . .	209
8.3.1	Isostasie . . . . .	209
8.3.2	Isostatische Modelle . . . . .	209
8.3.3	Schwereanomalien in unterschiedlichem geologischen Rahmen . . . . .	213
8.3.4	Isostatischer Ausgleich und Vertikalbewegungen der Lithosphäre: Postglaziale Hebung . . . . .	215
8.4	Fazit . . . . .	216
	Literatur . . . . .	216
<b>9</b>	<b>Seismologie und das Erdinnere . . . . .</b>	<b>217</b>
9.1	Gesteine: Elastizitätslehre . . . . .	218
9.1.1	Elastisches und plastisches Verhalten . . . . .	218
9.1.2	Elastische Eigenschaften von Gesteinen: Von der Spannung ( <i>stress</i> ) zur Deformation ( <i>strain</i> ) . . . . .	219
9.1.3	Die Erde: Eine komplexe Realität . . . . .	223
9.2	Seismische Wellen . . . . .	224
9.2.1	Messung von Bodenbewegungen . . . . .	224
9.2.2	Bezeichnungen und Arten seismischer Wellen . . . . .	225
9.3	Erdbeben . . . . .	235
9.3.1	Lokalisierung von Erdbeben . . . . .	235
9.3.2	Charakterisierung der Stärke eines Erdbebens . . . . .	236
9.3.3	Herdmechanismen und Ruptur . . . . .	240
9.3.4	Globale Seismizität . . . . .	245
9.3.5	Erdbebengefährdung, Erdbebenrisiko und Erdbebenvorhersage . . . . .	245
9.4	Der Beitrag der Seismologie zur Kenntnis des Erdinneren . . . . .	248
9.4.1	Verlauf seismischer Strahlen in der Erde . . . . .	248
9.4.2	Verhalten an Grenzflächen: Refraktions- und Reflexionsseismik . . . . .	249
9.4.3	Modellierung physikalischer Parameter: Die seismischen Geschwindigkeitsmodelle der Erde . . . . .	254
9.4.4	Schalenbau der Erde: Kruste, Mantel und Kern . . . . .	258
9.4.5	Die Zusammensetzung der Erde . . . . .	261
9.4.6	Der dreidimensionale Aufbau der Erde . . . . .	262
9.5	Fazit . . . . .	264
	Literatur . . . . .	265
<b>10</b>	<b>Deformation von Gesteinen . . . . .</b>	<b>267</b>
10.1	Spannung und Verformung: Analyse und Darstellung . . . . .	268
10.1.1	Spannung . . . . .	268
10.1.2	Verformung . . . . .	276

10.2	Mechanisches Verhalten von Gesteinen . . . . .	288
10.2.1	Verformungsmechanismen und Mikrostrukturen . . . . .	289
10.2.2	Verhalten von Krustengesteinen: Der Spröd-duktil-Übergang . . . . .	292
10.3	Bruchhafte Verformung: Brüche und Verwerfungen . . . . .	294
10.3.1	Brüche und Klüfte . . . . .	294
10.3.2	Verwerfungen . . . . .	299
10.3.3	Bruchhafte Verformung: Bildungsmechanismen . . . . .	299
10.4	Duktile Verformung . . . . .	301
10.4.1	Falten und Faltung . . . . .	302
10.4.2	Schieferung, Foliationen und Lineationen: Homogene duktile Verformung . . . . .	306
10.4.3	Scherzonen: Heterogene duktile Verformung . . . . .	312
10.5	Fazit . . . . .	320
	Literatur . . . . .	323
<b>11</b>	<b>Die Erde in Bewegung: Globale Geodynamik . . . . .</b>	<b>325</b>
11.1	Plattengrenzen . . . . .	326
11.1.1	Divergente Plattengrenzen . . . . .	329
11.1.2	Konvergente Plattengrenzen oder aktive Kontinentalränder . . . . .	333
11.1.3	Krustale Akkretion . . . . .	343
11.1.4	Transformstörungen . . . . .	345
11.1.5	Tripelpunkte . . . . .	345
11.2	Plattenbewegungen . . . . .	351
11.2.1	Bewegungen auf einer Kugel . . . . .	351
11.2.2	Globale plattenkinematische Modelle . . . . .	354
11.3	Mechanismen der Plattentektonik . . . . .	357
11.3.1	Bewegungen in der Tiefe: Mantelkonvektion . . . . .	357
11.3.2	Kräfte und Widerstände innerhalb einer Platte . . . . .	363
11.3.3	Der Motor der Plattentektonik . . . . .	365
11.3.4	Existenz der Lithosphärenplatten . . . . .	367
11.4	Fazit . . . . .	368
	Literatur . . . . .	368
<b>12</b>	<b>Hydrosphäre, Atmosphäre und Klima: Die fluiden Sphären der Erde . . . . .</b>	<b>371</b>
12.1	Hydrosphäre: Der Wasserkreislauf . . . . .	372
12.1.1	Stoffflüsse . . . . .	372
12.1.2	Reservoirs der Hydrosphäre . . . . .	373
12.2	Das System Ozean-Atmosphäre und die ozeanischen Oberflächenströmungen . . . . .	376
12.2.1	Schichtstruktur der Atmosphäre und Ozeane . . . . .	376
12.2.2	Winde der unteren Atmosphäre . . . . .	379
12.2.3	Oberflächenströmungen der Meere: Meereswirbel und Grenzströmungen . . . . .	380
12.2.4	Auswirkungen des Windes: Ekman-Transport und Ekman-Spirale . . . . .	382
12.2.5	Dynamische Topographie und geostrophische Winde . . . . .	383
12.2.6	Upwelling und Downwelling . . . . .	384
12.3	Globale ozeanische Tiefenzirkulation . . . . .	384
12.3.1	Tiefenzirkulation und Wassermassen . . . . .	385
12.3.2	Atlantischer Ozean . . . . .	387
12.3.3	Globales ozeanisches Förderband (global oceanic conveyor belt) . . . . .	388
12.4	Zusammensetzung und Veränderung der Atmosphäre . . . . .	391
12.4.1	Natürliche und anthropogene Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre . . . . .	392

12.4.2 Ozonschicht . . . . .	393
12.5 Energie im System Hydrosphäre-Atmosphäre . . . . .	394
12.5.1 Energiebilanz der Erde . . . . .	394
12.5.2 Energetische Kopplungen und Dynamik des Wasserkreislaufes . . . . .	397
12.5.3 Treibhauseffekt . . . . .	399
12.6 Klimaentwicklung in der Erdgeschichte . . . . .	400
12.6.1 Das konstante Klima und die milden Temperaturen des Archaikums . . . . .	401
12.6.2 Klimaveränderungen im Laufe des Phanerozoikums . . . . .	407
12.6.3 Klimawandel der letzten 100 000 Jahre . . . . .	417
12.6.4 Das aktuelle Klima unserer Erde: Probleme und Perspektiven . . . . .	418
12.7 Fazit . . . . .	423
Literatur . . . . .	424
<b>III Gesteinskreislauf und Gebirgsbildungen</b>	
<b>13 Herkunft der Sedimente und Sedimentationsprozesse . . . . .</b>	<b>427</b>
13.1 Ursprung der Sedimente . . . . .	428
13.1.1 Einige Elemente zur Klassifikation der Sedimentgesteine . . . . .	428
13.1.2 Vom Relief zum Sediment: Wechselbeziehungen zwischen Wasser und Gestein . . . . .	430
13.1.3 Produktion und Kontrolle der Sedimentzufuhr . . . . .	436
13.2 Mechanismen biologischer Ausfällung . . . . .	437
13.2.1 Salzwasser und Süßwasser: Fließverhalten und chemische Zusammensetzung . . . . .	437
13.2.2 Karbonatsystem der Ozeane . . . . .	437
13.2.3 Kieselige Sedimente . . . . .	447
13.3 Ablagerungen durch chemische Vorgänge . . . . .	448
13.3.1 Anorganische Ausfällung von Evaporiten . . . . .	448
13.3.2 Sedimentäre Eisenablagerungen . . . . .	452
13.3.3 Sedimentäre Phosphatablagerungen . . . . .	455
13.4 Diagenese . . . . .	456
13.4.1 Allgemeine Mechanismen . . . . .	456
13.4.2 Frühdiagenese in geringer Tiefe . . . . .	457
13.4.3 Spätdiagenese durch Überlagerung und Versenkung . . . . .	458
13.4.4 Spätdiagenese durch Exhumierung . . . . .	461
13.5 Fazit . . . . .	461
Literatur . . . . .	461
<b>14 Sedimentation und Sedimentbecken: Fazies und Kontrollmechanismen . . . . .</b>	<b>463</b>
14.1 Steuerung der Sedimentationsprozesse durch Meeresspiegelschwankungen . . . . .	464
14.1.1 Akkommodationsraum . . . . .	464
14.1.2 Stapelung von Parasequenzen durch Sedimentzufuhr . . . . .	464
14.1.3 Ablagerungssequenzen und Leithorizonte in Sedimentkörpern . . . . .	467
14.1.4 Der Begriff des Systembündels . . . . .	467
14.1.5 Ablagerungsfolgen und Faziesmodelle . . . . .	471
14.1.6 Parasequenzen und Sedimentationszyklen . . . . .	473
14.2 Ablagerungsmilieu und Fazies steuern Ablagerungsprozesse . . . . .	479
14.2.1 Marine Flachwasserablagerungsräume . . . . .	479
14.2.2 Marine Tiefwasserablagerungsräume . . . . .	483

14.3	Tektonische Kontrolle der Bildung von Sedimentbecken . . . . .	486
14.3.1	Allgemeine Mechanismen bei der Bildung von Sedimentbecken . .	488
14.3.2	Becken im Bereich divergenter Plattengrenzen: Dehnungszonen in der Lithosphäre . . . . .	488
14.3.3	Becken im Bereich konvergenter Plattengrenzen: Flexuren in der Lithosphäre . . . . .	506
14.3.4	Becken im Bereich von Blattverschiebungen . . . . .	517
14.4	Fazit . . . . .	522
	Literatur . . . . .	522
<b>15</b>	<b>Magmatische Gesteine und Ursprung der magmatischen Schmelzen . . . . .</b>	<b>525</b>
15.1	Die Vielfalt der magmatischen Gesteine:	
	Haupt- und Nebengemengeteile . . . . .	526
15.1.1	Große mineralogische und chemische Variationsbreite: Aspekte der Klassifikation der magmatischen Gesteine . . . . .	526
15.1.2	Nomenklatur und Klassifikation der Magmatite . . . . .	528
15.1.3	IUGS-Klassifikation . . . . .	530
15.1.4	Der Begriff der magmatischen Serie . . . . .	536
15.2	Quellen der Magmen: Spurenelemente und Isotope . . . . .	541
15.2.1	Das Problem der Magmaquelle . . . . .	541
15.2.2	Fest-flüssig-Beziehungen als grundlegende magmatische Prozesse	543
15.2.3	Schmelze, Kristallisation und Fraktionierung der Seltenen Erden .	546
15.2.4	Isotope als Tracer magmatischer Prozesse . . . . .	549
15.3	Von der chemischen zur tektonischen Klassifikation . . . . .	556
15.3.1	Vulkanite . . . . .	556
15.3.2	Plutonite . . . . .	556
15.4	Ursprung und Entwicklung der Magmen . . . . .	561
15.4.1	Experimenteller Ansatz zur Erklärung des Verhaltens von Magma	561
15.4.2	Die Bildung der Magmen . . . . .	572
15.5	Magmatismus und Geodynamik . . . . .	577
15.5.1	Magmatismus, Plattentektonik und geothermischer Gradient . . .	578
15.5.2	Vorherrschaft der Basalte (ozeanischer Bereich) . . . . .	578
15.5.3	Magmatismus in Konvergenzzonen: Kalkalkaline Serien . . . . .	587
15.5.4	Alkaline und hyperalkaline Serien: Intraplatten-Magmatismus der Plateaubasalt-Provinzen und der kontinentalen Riftzonen . . .	593
15.5.5	Bildung der Komatiite und das Problem des Magmatismus im Archaikum . . . . .	598
15.6	Fazit . . . . .	600
	Literatur . . . . .	601
<b>16</b>	<b>Metamorphose und Metamorphite:</b>	
	<b>Schlüssel zur Entwicklung der Lithosphäre . . . . .</b>	<b>605</b>
16.1	Das Konzept der Metamorphose . . . . .	606
16.1.1	Metamorphe Umwandlungen . . . . .	606
16.1.2	Begrenzungen der Metamorphose . . . . .	606
16.1.3	Verschiedene Arten der Metamorphose . . . . .	608
16.1.4	Kontrollierende Faktoren der Metamorphose . . . . .	609
16.2	Metamorphose und Metamorphite . . . . .	618
16.2.1	Geländedaten zur Metamorphose . . . . .	618
16.2.2	Gefügekennzeichen und Nomenklatur der Metamorphite . . . . .	621
16.3	Prinzip metamorpher Reaktionen . . . . .	625
16.3.1	Arten metamorpher Reaktionen . . . . .	625
16.3.2	Thermodynamik der metamorphen Reaktionen . . . . .	627

16.4	Chemisches Gleichgewicht und Metamorphose . . . . .	631
16.4.1	Anwendung der Phasenregel auf metamorphe Paragenesen . . . . .	631
16.4.2	Grafische Analyse der metamorphen Paragenesen: Chemografische Darstellungen . . . . .	634
16.4.3	Metamorphosegrad, metamorphe Fazies und petrogenetische Abfolgen . . . . .	638
16.4.4	Gleichgewichtsdarstellungen heterogener Phasen . . . . .	645
16.5	Geothermometrie und Geobarometrie . . . . .	647
16.5.1	Thermodynamische Grundlagen . . . . .	647
16.5.2	Austauschreaktionen und Geothermometrie am Beispiel des Geothermometers Biotit-Granat . . . . .	649
16.5.3	Transferreaktionen und Geobarometrie am Beispiel des GASP Geobarometers . . . . .	651
16.6	Metamorphose der wichtigen Gesteinsserien . . . . .	652
16.6.1	Metamorphose pelitischer Sedimente . . . . .	652
16.6.2	Metamorphose mafischer Gesteine . . . . .	657
16.7	Regionalmetamorphose und geodynamische Prozesse . . . . .	662
16.7.1	Metamorphose und Dehnung der Lithosphäre in Divergenzzonen	662
16.7.2	Metamorphose und Subduktion in Konvergenzzonen . . . . .	666
16.7.3	Metamorphose, Obduktion und Kollision in Konvergenzzonen . .	672
16.7.4	Postorogene Dehnungsphase und Metamorphose: Metamorphe Kernkomplexe . . . . .	684
16.8	Fazit . . . . .	686
	Literatur . . . . .	687
<b>17</b>	<b>Aufbau der Gebirgsketten . . . . .</b>	<b>691</b>
17.1	Zirkumpazifische Gebirge: Subduktion, Kollision von Inselbögen und Collage . . . . .	692
17.1.1	Kordilleren des Anden-Typs: Ozeanische Subduktion ohne Kollision . . . . .	692
17.1.2	Subduktionen, Bogenkollisionen und Faltenketten im Südwestpazifik . . . . .	706
17.2	Himalaja: Rasche Kollision und Ausbildung eines Hochlandes . . . . .	708
17.2.1	Himalaja: Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	708
17.2.2	Hauptstrukturen des Orogensystems Himalaja-Tibet . . . . .	710
17.2.3	Hauptdeformationsphasen . . . . .	715
17.2.4	Kollision und Verkürzung . . . . .	720
17.2.5	Metamorphe Überprägung des Himalaja (Mesozoikum-Paläogen)	721
17.2.6	Modelle zur geodynamischen Entwicklung . . . . .	724
17.2.7	Zusammenfassung und offene Fragen zur tektonischen Entwicklung von Tibet . . . . .	733
17.3	Vom Geländebefund zum Modell: Deformation in Subduktionszonen und Reliefbildung . . . . .	735
17.3.1	Allgemeine Aspekte der Deformation in Subduktionszonen . . . .	735
17.3.2	Fundamentale Bedeutung des Akkretionskeils für die Bildung von Gebirgsketten . . . . .	735
17.3.3	Präkollisionale Stadien . . . . .	738
17.3.4	Störung und Blockierung der Subduktion . . . . .	739
17.3.5	Gravitativer Kollaps von Vorland-Faltenketten . . . . .	739
17.4	Fazit . . . . .	746
	Literatur . . . . .	752



<b>18 Europäische Varisziden – Paläokonvergenz und Verschwinden einer Gebirgskette</b> . . . . .	755
18.1 Variszische Gebirgskette: Einführung . . . . .	756
18.1.1 Struktureller Aufbau und Besonderheiten der Varisziden . . . . .	756
18.1.2 Verteilung der Kontinentalplatten im Paläozoikum . . . . .	756
18.2 Versuch einer geodynamischen Rekonstruktion der Varisziden . . . . .	758
18.2.1 Nicht gesicherte geodynamische Daten . . . . .	759
18.2.2 Westliche Varisziden: Geodynamische Modelle in der Diskussion . . . . .	762
18.3 Fazit . . . . .	770
Literatur . . . . .	770
<b>19 Die Alpen</b> . . . . .	771
19.1 Tektonische und paläogeographische Haupteinheiten der Alpen . . . . .	772
19.1.1 Allgemeine Merkmale der Alpen . . . . .	772
19.1.2 Kontinentale Bereiche . . . . .	780
19.1.3 Ozeane . . . . .	786
19.1.4 Heutige Plattenbewegungen und der Beitrag der Geophysik . . . . .	789
19.2 Metamorphose und Geodynamik im Verlauf der alpinen Orogenese . . . . .	793
19.2.1 MP-HT-Metamorphose im Perm: Kontinentale Dehnungsbewegung . . . . .	795
19.2.2 HP-HT-Metamorphose in den Ostalpen: Eo-alpine Subduktion . . . . .	795
19.2.3 HP-LT-Metamorphose: Alpine Subduktion . . . . .	800
19.2.4 Metamorphose des Barrow-Typs: Von der Subduktion zur Kollision . . . . .	805
19.2.5 Versuch einer Übersicht der metamorphen und geodynamischen Entwicklungsgeschichte der Alpenkette . . . . .	811
19.3 Sind die magmatischen Ereignisse der alpinen Orogenese etwas Besonderes? . . . . .	817
19.3.1 Spuren des Vulkanismus in den Externbereichen . . . . .	817
19.3.2 Periadriatischer Magmatismus . . . . .	818
19.3.3 Der geodynamische Bezug zwischen Magmatismus und Metamorphose in den Alpen . . . . .	820
19.4 Heutige Situation in den Alpen . . . . .	820
19.4.1 Grundzüge der Entwicklung der europäischen Kruste vom Proterozoikum bis heute . . . . .	820
19.4.2 Neotektonik in den West- und Zentralalpen . . . . .	824
19.5 Fazit . . . . .	827
Literatur . . . . .	837
<b>IV Ressourcen der Erde</b>	
<b>20 Entstehung von Erzlagerstätten</b> . . . . .	843
20.1 Die ausgebeuteten mineralischen Stoffe . . . . .	844
20.1.1 Eine große Palette an Materialien für einen gegebenen techni- schen und ökonomischen Kontext . . . . .	844
20.1.2 Der Begriff „Lagerstätten“ ist durch anormale Konzentrationen definiert . . . . .	844
20.1.3 Eine Klassifikation der Erzlagerstätten . . . . .	844
20.2 Bildung und Entwicklung von Magmen und Erzlagerstätten . . . . .	848
20.2.1 Magmabildung und Anreicherung inkompatibler Elemente . . . . .	849
20.2.2 Magmaentwicklung und Anreicherung . . . . .	850
20.2.3 Nichtmischbarkeit von Magmen bei der Lagerstättenbildung . . . . .	858

20.3	Der Erdmantel und Lagerstättenbildung	862
20.3.1	Die stark siderophilen Elemente und Edelmetalle	866
20.3.2	Metasomatische Anreicherung des Erdmantels und die Geschichte der Diamanten	866
20.4	Granitmagmen und Fluide: Magmatisch-hydrothermale Lagerstätten	874
20.4.1	Entstehung und Eigenschaften der Fluide von sauren Magmen	874
20.4.2	Granitpegmatite und ihre Erzlagerstätten: Späte Fluide und Metasomatose	879
20.4.3	Magmatische hydrothermale Fluide und porphyrische Lagerstätten	880
20.4.4	Porphyrische und epithermale Goldlagerstätten	883
20.4.5	Skarne: Kontaktmetamorphose und Metasomatose	887
20.4.6	Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätten (IOCG)	891
20.5	Hydrothermale Lagerstätten	894
20.5.1	Massive Sulfide	894
20.5.2	Erzbildung und metamorphe Fluide: Orogenes Gold und goldhaltige Konglomerate	906
20.5.3	Hydrothermale Mineralisierungen im sedimentären Milieu: Diagenetische Lagerstätten	913
20.5.4	Zusammenfassung: Hydrothermale Erzlagerstätten	922
20.6	Erzlagerstätten: Geodynamische Umgebung und zeitliche Entwicklung	923
20.6.1	Tektonische Umgebung der Lagerstätten	924
20.6.2	Entwicklung der Kontinente und Lagerstätten	929
20.7	Fazit	933
	Literatur	934
<b>21</b>	<b>Die fossilen Energierohstoffe</b>	<b>939</b>
21.1	Organische Substanz und fossile Energierohstoffe	940
21.1.1	Ein chemisches Kontinuum	940
21.1.2	Drei mögliche Ursprünge organischer Substanzen	941
21.1.3	Unter welchen Bedingungen entstehen Muttergesteine?	942
21.2	Flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe: Erdöl und Erdgas	946
21.2.1	Entstehung von Erdöl: Reifung der Kerogene	947
21.2.2	Migration der Kohlenwasserstoffe	950
21.2.3	Das Einfangen der Kohlenwasserstoffe	952
21.2.4	Das Konzept der Ölsysteme	953
21.2.5	Wichtige Ölregionen	955
21.3	Kohlen	962
21.3.1	Kohlen: Bestandteile und Klassifikation	962
21.3.2	Kohlenbildung	963
21.3.3	Aktuelle Beschaffenheit eines Kohlenbeckens und der erdgeschichtliche Kontext	970
21.3.4	Weltweite Kohlenvorkommen	974
21.4	Unkonventionelle Kohlenwasserstoffe	978
21.4.1	Gasschiefer	978
21.4.2	Schweröl, Teersande, Ölschiefer	981
21.5	Fazit	981
	Literatur	982
<b>22</b>	<b>Die Entwicklungsgeschichte unseres Planeten – nur Weniges ist gesichert</b>	<b>985</b>
22.1	Debatten und Kontroversen – ist die Hotspot-Theorie notwendig?	986
22.1.1	Vom Hotspot bis zur Hypothese des Mantelplumes	986
22.1.2	Offene Fragen zu Hawaii und Island	987

22.1.3 Schmelzanomalien – eine heikle Interpretation . . . . .	987
22.1.4 Welche Gemeinsamkeiten gibt es? . . . . .	989
22.2 Ist eine Gesamtdarstellung der Erdgeschichte möglich? . . . . .	990
Literatur . . . . .	993
<b>Anhang</b> . . . . .	995
Anhang 1: Abkürzungen für Mineralien (nach IUGS, Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks, 2007) . . . . .	995
Anhang 2: Internationale Maßeinheiten . . . . .	996
<b>Literatur</b> . . . . .	997
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	1001