
Christian Robert · Romain Bousquet

Geowissenschaften

Die Dynamik des Systems Erde

Aus dem Französischen übersetzt von Matthias Geyer,
Florian Neukirchen, Lisa Nommensen, Claudius Pirkenseer,
Romain Bousquet und Sandra Wind

Inhaltsverzeichnis

1	Ein Annäherungsversuch an den Planeten Erde	1
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
I	Die Entstehung des Planeten	
2	Geschichte des Universums	9
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
3	Die junge Erde: Entstehung und Entwicklung des Planeten	41
3.1	Das Sonnensystem: Die Sonne und acht Planeten	42
3.1.1	Die Sonne	42
3.1.2	Die Zusammensetzung der Planeten	45

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 Reservoir: 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
4	Elemente und Atome: Die Kristallstruktur	71
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
5	Die Minerale, Baustoffe der Erde	105
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 ₄]-Tetraeder: Inselsilikate (Nesosilikate)	113
5.2.2	[SiO ₄]-Tetraeder in Paaren angeordnet: Gruppensilikate (Sorosilikate)	115
5.2.3	[SiO ₄]-Tetraeder in Ringen angeordnet: Ringsilikate (Cyclosilikate)	116

5.2.4	[SiO ₄]-Tetraeder in Ketten angeordnet: Kettensilikate (Inosilikate)	117
5.2.5	[SiO ₄]-Tetraeder in Schichten angeordnet: Schichtsilikate (Phyllosilikate)	122
5.2.6	[SiO ₄]-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
6	Bedingungen für die Stabilität von Mineralen	141
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 ₂	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
II	Die Kennzeichen der Kinematik der Erde	
7	Die Zeit in der Geologie	173
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
8	Gravitation: Das Aussehen der Erde	195
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
9	Seismologie und das Erdinnere	217
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
10	Deformation von Gesteinen	267
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
11	Die Erde in Bewegung: Globale Geodynamik	325
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
12	Hydrosphäre, Atmosphäre und Klima: Die fluiden Sphären der Erde	371
12.1	Hydrosphäre: Der Wasserkreislauf	372
12.1.1	Stoffflüsse	372
12.1.2	Reservoirie 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
III Gesteinskreislauf und Gebirgsbildungen	
13 Herkunft der Sedimente und Sedimentationsprozesse	427
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
14 Sedimentation und Sedimentbecken: Fazies und Kontrollmechanismen	463
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
15 Magmatische Gesteine und Ursprung der magmatischen Schmelzen	525
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
16 Metamorphose und Metamorphite:	
Schlüssel zur Entwicklung der Lithosphäre	605
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 Gefügemerkmale 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
17	Aufbau der Gebirgsketten	691
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

18 Europäische Varisziden – Paläokonvergenz und Verschwinden einer Gebirgskette	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
19 Die Alpen	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
IV Ressourcen der Erde	
20 Entstehung von Erzlagerstätten	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
21	Die fossilen Energierohstoffe	939
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
22	Die Entwicklungsgeschichte unseres Planeten – nur Weniges ist gesichert	985
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
Anhang	995
Anhang 1: Abkürzungen für Mineralien (nach IUGS, Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks, 2007)	995
Anhang 2: Internationale Maßeinheiten	996
Literatur	997
Sachverzeichnis1001