

## Rohstoffe und Ressourcen

1	Kohlenwasserstoffe	213
	1.1 Erdöl und Erdgas	213
	1.2 Kohle	218
2	Mineralische Rohstoffe in Bayern	222
3	Geothermie	226
	3.1 Was ist Geothermie	226
	3.2 Anwendungsbereiche der Geothermie	228
	3.3 Oberflächennahe Geothermie in Bayern	229
	3.4 Tiefe Geothermie in Bayern	231
	3.5 Geothermieportal	235





## Rohstoffe und Ressourcen

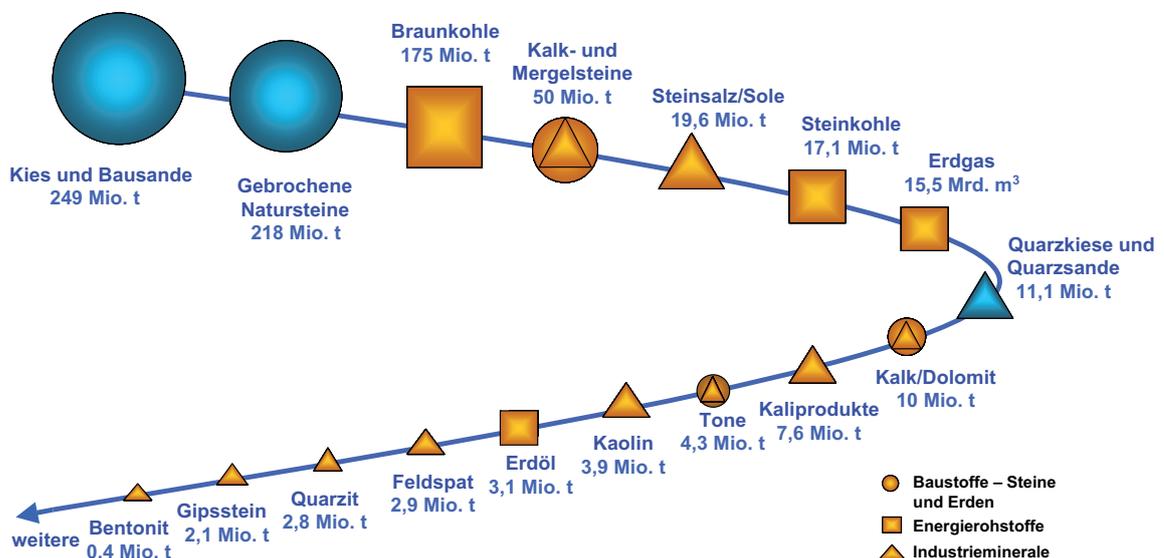
Wer weiß schon, dass jeder Mensch im Laufe seines Lebens ca. 525 Tonnen Kies und Sand verbraucht? Dieser Rohstoff findet sich als Bestandteil in vielen Produkten des täglichen Lebens – in Häusern, Straßen, Mikrochips, Glas, Keramik oder in Pharma- und Kosmetikartikeln.

„Rohstoffe sind einfach da“ – so denken immer noch viele von uns. Rohstoffe, das sind Energierohstoffe, die für unsere Grundbedürfnisse Transport, Heizen und Nahrungszubereitung entscheidend sind, das sind Steine und Erden, aus denen unsere Häuser und Straßen gebaut werden, und das sind metallische Rohstoffe, aus denen Fahrzeuge und Haushaltsgeräte erzeugt werden. Den Menschen wird jedoch mehr und mehr bewusst, dass kein geologischer Rohstoff unbegrenzt vorhanden ist. Ihre Bildung erfolgte über geologische Zeiträume, manchmal im Laufe von

Millionen von Jahren, während der Abbau und ihre Nutzung im großem Maße vor allem auf die Zeit seit der Industrialisierung, also auf wenige hundert Jahre, entfallen. Die stetig wachsende Weltwirtschaft und die Industrialisierung der Entwicklungs- und Schwellenländer tragen zu einem schnelleren Abbau der noch vorhandenen Rohstoffreserven bei.

Deutschland ist seit vielen Jahrhunderten ein wichtiges Bergbauland. Aufgrund der Erschöpfung von Lagerstätten, der Internationalisierung der Rohstoffgewinnung und des

F1 | Rohstoffgewinnung in Deutschland im Jahr 2008.



Welthandels, veränderter Strukturen auf den Weltmärkten sowie der Anwendung neuer Gewinnungstechnologien spielen heimische Lagerstätten heute nur noch bei Stein- und Braunkohle, Kali und Salz, Erdgas, im Steine- und Erdenbereich sowie bei Industriemineralen eine größere Rolle (➔ F1). Bei Erdöl und Metallerzen ist Deutschland hingegen fast vollständig importabhängig.

Auf den Weltmärkten für mineralische Rohstoffe zeichnet sich derzeit ein Strukturwandel ab: Die alte Faustregel, dass 20 % der Menschheit in Europa, den USA und Japan mehr als 80 % der Rohstoffförderung konsumieren, gilt heute nicht mehr. Mit der Integration Indiens, der Volksrepublik China sowie anderer bevölkerungsreicher Schwellenländer in die Weltwirtschaft ist heute über die Hälfte der Weltbevölkerung an der Nachfrage nach Rohstoffen beteiligt.

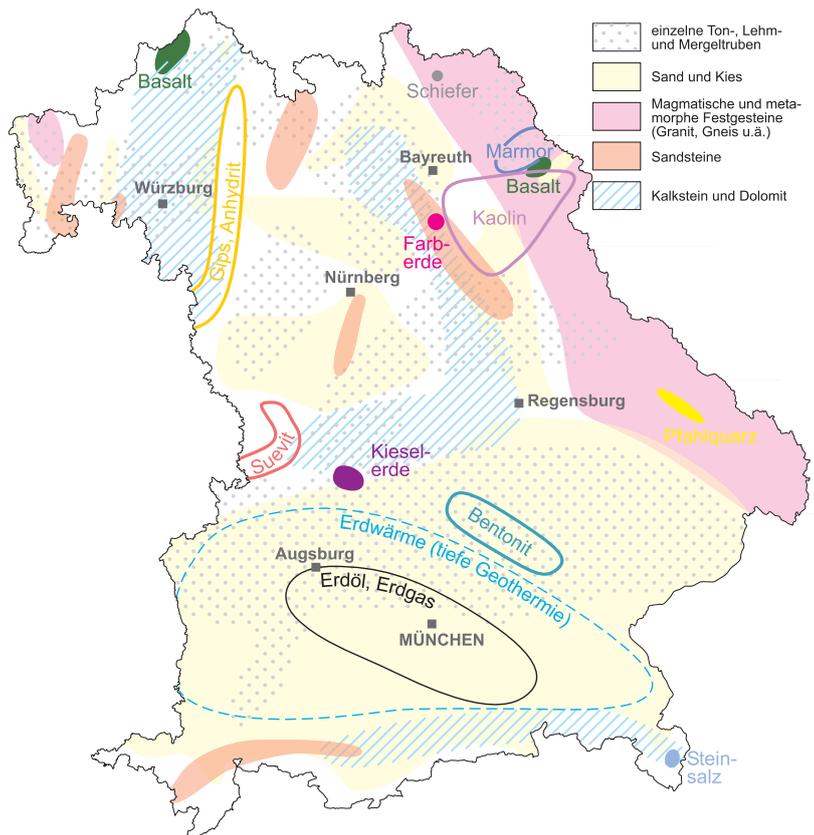
Rohstoffvorkommen sind die theoretischen Vorräte eines Rohstoffes, als Lagerstätte bezeichnet man dagegen nur die unter ökonomischen Gesichtspunkten abbaubaren Vorkommen. Natürlich werden die Verfahren zur Rohstoffgewinnung laufend verbessert und verfeinert. Es können aber nie alle geologischen Vorkommen als Lagerstätten der Rohstoffe genutzt und abgebaut werden.

Nicht nur wirtschaftliche Gesichtspunkte, sondern vor allem auch miteinander konkurrierende Nutzungen eines Gebietes können den Abbau einer Lagerstätte verhindern. Typische „Abbauhemmnisse“ sind z. B. bestehende Siedlungen und Verkehrswege, Natur-, Landschafts- oder Wasserschutzgebiete.

Die geographische Verteilung wichtiger Rohstoffvorkommen in Bayern ist in ➔ F2 dargestellt und dokumentiert die Vielfalt der Ressourcen in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund (► Modul D „Erdgeschichte“ Karten, Geologische Karte von Bayern).

Bergbauliche Tätigkeit und Erschließung von Rohstoffen sind untrennbar mit der Entwicklungsgeschichte des Menschen verknüpft, wie archäologische Funde dokumentieren. In Deutschland haben Bergbau und Prospektion eine lange Tradition. Die ersten Veröffentlichungen zur Erfindung und -verarbeit-

ung, zur Metallgewinnung und Bergbautechnik wurden vor mehr als vierhundert Jahren von Georg Agricola verfasst. Seine 12 Bücher zum Bergbau und Hüttenwesen (*De re metallica libri XII*) erschienen 1556 in lateinischer Sprache übersetzt und galten in den folgenden 200 Jahre als das geowissenschaftliche Standardwerk des Bergbaus.



**Rohstoffabbau und Nachhaltigkeit**

Die Nutzung von heimischen Rohstoffen trägt wesentlich zum Erhalt unserer Lebensqualität und zu deren Weiterentwicklung bei. Lagerstätten sind raum- und standortgebunden und nicht vermehrbar. Ihre Nutzung beansprucht eine bestimmte Fläche und Tiefe. Sie steht damit in Konkurrenz zu anderen standortgebundenen Gütern wie Wasser und Natur sowie zu anderen Nutzungen. Aus wirtschafts- und gesellschaftspolitischen Gründen sind im Rahmen der staatlichen Vorsorge und Planung frühzeitig Entscheidungen darüber notwendig, welche Nutzungen in einem bestimmten Gebiet oder während eines Zeitabschnittes Vorrang haben sollen.

F2 | In Bayern sind derzeit etwa 5000 Rohstoffgewinnungen in Betrieb. Zum größten Teil handelt es sich um Sand- und Kiesgruben, die überwiegend in Südbayern angesiedelt sind.

Das Raumordnungsgesetz des Bundes hat die nachhaltige Raumentwicklung als einheitliche und zentrale Leitvorstellung verankert. Mit dem Gesetz wird die Rohstoffsicherung als Grundsatz der Raumordnung definiert. Die Versorgung der Wirtschaft mit Rohstoffen muss aber auch dem Grundsatz der Nachhaltigkeit genügen, d. h. sie muss ökologisch, ökonomisch und sozial verträglich sein.

In Bayern gilt bei raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen das Bayerische Landesplanungsgesetz. Dieses regelt, dass in den Regionalplänen zur Aufsuchung und Gewinnung heimischer Rohstoffvorkommen Vorrang- und Vorbehaltsgebiete ausgewiesen werden.

Zwangsläufig tangiert die Rohstoffnutzung auch andere Schutzgüter, insbesondere Natur und Landschaft sowie das Grundwasser. Allerdings bietet die moderne Rohstoffgewinnung eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Rohstoffnutzung mit den Belangen dieser Schutzgüter verträglich zu verbinden. Oft befindet sich aber gerade dort, wo abbauwürdige Rohstofflagerstätten auftreten, auch ein ergiebiges Grundwasservorkommen. Wenn Rohstoffgewinnung und Trinkwasserschutz den gleichen Raum beanspruchen, kommt es immer wieder zu Interessenkollisionsen.

Konfliktfälle können inzwischen mit einer Arbeitshilfe bewältigt werden, die von den betroffenen Fachbehörden entwickelt wurde. Falls Rohstoffgewinnung und Sicherung der Wasserversorgung nicht vereinbar sind, so hat die Wasserversorgung grundsätzlich Vorrang.

Eine am Grundsatz der Nachhaltigkeit ausgerichtete Rohstoffpolitik nimmt alle Beteiligten in die Pflicht: Rohstoffbetriebe, Planungsstellen und Behörden sowie die Verbraucher von Rohstoffen. Wesentlicher Grundsatz zur Verbesserung der Rohstoffsicherung im Sinne von Nachhaltigkeit und Zukunftsvorsorge ist, mit den nicht erneuerbaren mineralischen Rohstoffen sparsam umzugehen. Wo immer technisch möglich und ökologisch sinnvoll sollen mineralische Rohstoffe durch Recyclingbaustoffe qualitativ ersetzt werden.

Nachhaltigkeit ist bei der Rohstoffgewinnung nicht im Sinne nachwachsender Rohstoffe zu erzielen, wie dies z. B. in der Forstwirtschaft möglich ist. Auch bei strikter Beachtung des Kreislaufwirtschaftssystems, nach dem natürliche Rohstoffe durch Recyclingstoffe soweit möglich ersetzt werden sollen, ist die Tatsache zu berücksichtigen, dass mineralische Rohstoffe im Gegensatz zu organischen Rohstoffen und erneuerbaren Energien nicht nachwachsen. Ihr Verbrauch ist größtenteils endgültig. Daher muss der Anteil von Recyclingbaustoffen, soweit technologisch, wirtschaftlich und ökologisch möglich, im Interesse einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft weiter ausgebaut werden. Nachhaltigkeit bedeutet neben dem sparsamen Umgang mit den vorhandenen Ressourcen daher auch, für Recyclingbaustoffe weitere Einsatzmöglichkeiten zu eröffnen.

Mit der beigefügten Liste „Lernort Rohstoffgewinnung“ (► [CD](#)) erhalten Lehrkräfte einen unverbindlichen Überblick über ortsnahe Rohstoffgewinnungsbetriebe, den gewonnenen Rohstoff und die jeweiligen Ansprechpartner. Diese Ansprechpartner helfen gerne bei der Durchführung von Betriebsbesichtigungen für Schulklassen, um diesen Rohstoff, die Gewinnungsstätte und Rekultivierungs- bzw. Renaturierungsmaßnahmen den Schülern näher zu bringen.

## Was besteht aus Erdöl?

Erdöl ist einer der wichtigsten Rohstoffe der Welt. In großen Raffinerien wird er zu zahllosen Chemikalien verarbeitet, aus denen die unterschiedlichsten Dinge hergestellt werden. In unserem Alltag benutzen wir laufend eine sich ständig erweiternde Palette an Produkten. Man braucht sich nur umzusehen: das Telefon, das Gehäuse des Fernsehers oder Computers, Haushaltsgeräte, Spielzeug – alles besteht aus Plastik bzw. Kunststoffen, die aus Erdöl hergestellt werden. Ohne Öl gäbe es auch keine Teppichböden, keine Gardinen am Fenster, keine Farbe an den Wänden und keine Plastiktüten. Aber Erdöl kann noch viel mehr. Es wird auch für Körperpflege und Kosmetik verwendet. Viele Seifen, Parfüms, Lippenstifte und Haarsprays sind Nebenprodukte der Erdölverarbeitung. Öl ist außerdem wichtig für den Straßenbau, zur Herstellung von Medikamenten und von Düngemitteln.

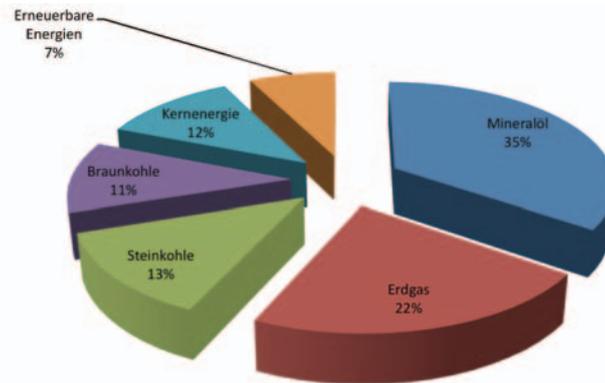
## 1 Kohlenwasserstoffe

### 1.1 Erdöl und Erdgas

Kohlenwasserstoffe sind die einfachsten organischen Verbindungen. Sie bestehen nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff und bauen die Gruppe der fossilen Brennstoffe (Erdöl, Erdgas und Kohle) auf. Kohlenwasserstoffe sind sogar im Weltall auf Kometen, in Planetenatmosphären und in interstellarer Materie zu finden (► Modul A „Planetensystem und Aufbau der Erde“). Hier treten sie meist in Form von Methan und Ethan auf. Auf der Erde findet man riesige Kohlenwasserstoffvorkommen in Form von Erdölfeldern, Erdgasspeichern und Kohleflözen. Die Kohlenwasserstoffvorkommen auf der Erde sind einst aus kleinsten Meerestieren oder Pflanzen, also aus organischem Material, entstanden. Erdgas, Erdöl und Kohle enthalten daher Energie, die die Sonne abgestrahlt hat und die von den Organismen gespeichert und in langen Zeiträumen durch biochemische (Umwandlung durch Lebewesen) bzw. geochemische Prozesse (Umwandlung durch Druck und Temperatur) in Kohlenwasserstoffe umgewandelt wurden. Dank dieser Umwandlungsprozesse, die bereits vor mehr als 100 Mio Jahren abliefen, herrscht heute auf der Erde ein nie dagewesener Wohlstand in Industrie- und Schwellenländern. Dieser Wohlstand beruht vor allem auf der Verfügbarkeit des Rohstoffes Erdöl, das in unserer Industriegesellschaft nicht nur Bedeutung als Stromerzeuger, Treibstofflieferant oder Heizmaterial hat, sondern auch zur Herstellung von unzähligen alltäglichen Gebrauchsgegenständen dient.

#### Erdöl und Erdgas in Deutschland

Erdöl und Erdgas leisten als Energieträger „vor unserer Haustür“ einen wertvollen Beitrag zur Sicherung der deutschen Energieversorgung (► F3, F5). Deutschland verfügt über viele Erdgas- und Erdöllagerstätten – zum überwiegenden Teil in Norddeutschland. Daneben gibt es Lagerstätten im Alpenvorland, im Oberrheintal und im Thüringer Becken. Aus diesen Lagerstätten wurden 2007 rund 3,4 Mio. t Erdöl und 17 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas gefördert. Die einheimische Gasproduktion



trug rund 17 % zum deutschen Bedarf bei, die Erdölproduktion rund 3 %. Fast 95 Prozent der Inlandsförderung kommen aus Schleswig-Holstein und Niedersachsen. Das meiste Erdöl in Deutschland kommt dabei nur aus einem einzigen Feld: dem Ölfeld Mittelplate in Schleswig-Holstein (► F4). Es ist Deutschlands einzige Offshore-Bohrinsel (offshore = die Ausbeutung von Erdöl- und Erdgasfeldern, die im Meer liegen).

Trotz der starken Förderung herrscht in Deutschland eine große Diskrepanz zwischen dem Bedarf und der Produktion von Erdöl. So fehlten 2006 ca. 170 Mio t an Erdöl, die nach Deutschland importiert werden mussten. Deutschland ist damit nach den USA, Japan, China und Südkorea der fünftgrößte Erdölimporteur der Welt (Datenquelle: ► Rohstoffsicherung in der Bundesrepublik Deutschland, Zustandsbericht 2008, ► CD).

F3 | Anteile der Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland 2008.

F4 | Deutsche offshore-Bohr- und Förderinsel „Mittelplate“.





F5 | Erdgas- und Erdölfelder in Deutschland.

Beim Erdgas können sogar 18 % des Bedarfs durch Inlandförderung gedeckt werden. In der Erdgasförderung ist Niedersachsen mit einem Anteil von 92 % mit Abstand das förderstärkste Bundesland mit Rotenburg/Taaken als dem förderstärksten Gasfeld der Bundesrepublik Deutschland. Hier wurden im Jahr 2005 2,5 Mrd. m<sup>3</sup> Rohgas gefördert. Dennoch müssen ca. 85 Mrd. m<sup>3</sup> an Erdgas jährlich nach Deutschland importiert werden. Zur Sicherstellung der Erdgasversorgung dienen überwiegend Untertage-Erdgasspeicher, die in Erdgas-Kavernen in Salzstöcken, aufgelassenen Bergwerken, ausgeförderten Erdgas- und Erdöl-Feldern oder Aquiferstrukturen gespeichert werden. Mit Druck wird dort Erdgas hineingepresst und später wieder entnommen. Deutschland stellt nach den USA, Russland und der Ukraine die viertgrößte Speichernation dar, wobei das Arbeitsgasvolumen der Untertage-Erdgasspeicher 19,1 Mio. m<sup>3</sup> beträgt. Die Erdgasspeicher stellen den Ausgleich zwischen tages- und jahres-

zeitlich schwankendem Verbrauch und dem Angebot her (heimische Förderung und Importe). Aufgrund günstiger geologischer Bedingungen verfügt die Bundesrepublik Deutschland über gute Bedingungen für die Einrichtung großer Speicher. Der tiefste Erdgasspeicher liegt in Bayern (Woltersberg, östlich von München) in 2.930 m Tiefe.

### Erdöl- und Erdgasvorkommen in Bayern

Die bayerischen Lagerstätten befinden sich vorzugsweise in Schichten der ungefalteten tertiären Vorlandmolasse der Alpen (➔ F6), in Tiefen bis etwa 4.500 m. Die gegenwärtige Situation der Erdöl- und Erdgasförderung Bayerns ist noch durch den Rückzug der deutschen Erdölgesellschaften aus dem Alpenvorland Anfang der 90er Jahre gekennzeichnet. Gegenwärtig sind nur noch drei Erdöllagerstätten (Aitingen, Hebertshausen und Darching-Holzkirchen) sowie eine Erdgaslagerstätte (Inzenham-West) in Förderung. Die übrigen Lagerstätten sind wirtschaftlich erschöpft.

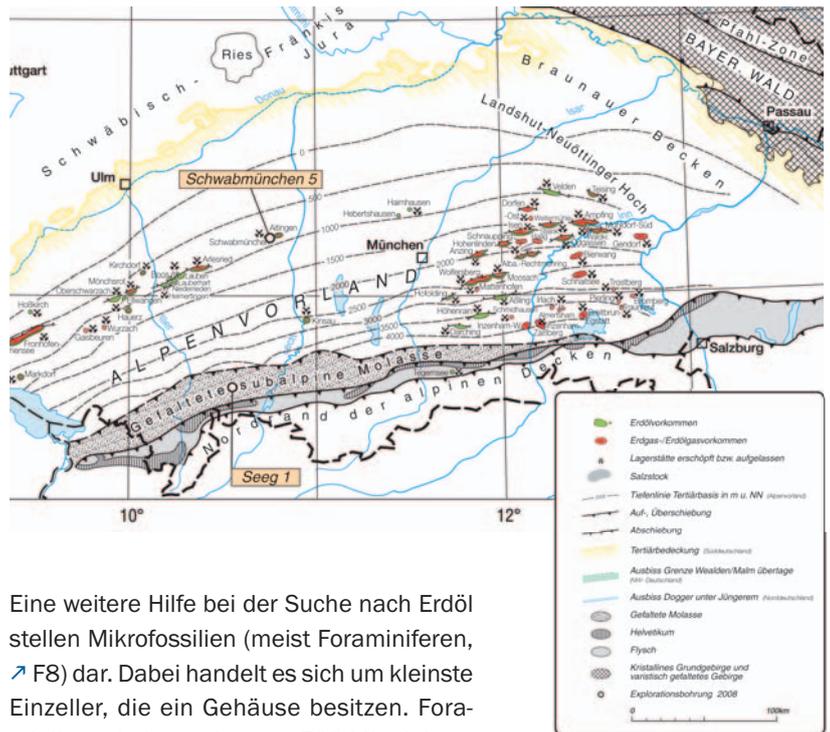
Der weitere Ausbau der gaswirtschaftlichen Verbindungen, vor allem nach Osten und Süden, macht Bayern zunehmend zu einem wichtigen Knotenpunkt des europäischen und transeuropäischen Erdgasverbundsystems. Zusätzlich verstärkt wird dies durch die hier bestehenden Möglichkeiten zum Ausbau der Erdgasspeicherung. Dazu bieten die ausgeförderten Erdöl- und Erdgaslagerstätten im bayerischen Voralpenland besonders gute geologische Voraussetzungen. Schon heute bestehen in Bayern Untertagespeicher mit einem Arbeitsgasvolumen von ca. 3,5 Mrd. m<sup>3</sup>, dies ist etwa ein Fünftel der Erdgasspeicherkapazität in Deutschland.

### Die Suche nach den Lagerstätten

Bei der Aufsuchung und Förderung von Erdöl und Erdgas im Inland wirken sich vielfach ungünstige geologische Verhältnisse, vor allem die große Tiefe der Lagerstätten, erschwerend aus. Die Speichergesteine, in denen das Erdöl vorwiegend auftritt, gehören der Jura- und Kreidezeit an. Sie sind 100 bis 200 Mio. Jahre alt und liegen meist in Tiefen (in der Fachsprache „Teufe“) von 1.000 bis 2.500 m. Die Erdgaslagerstätten liegen

hauptsächlich in den Gesteinsschichten des Zechsteins und des Rotliegenden, die etwa 250 bis 300 Mio. Jahre alt sind. Sie treten in Teufen bis 5.000 m unter der Erde auf!

Bei der Suche nach Erdöllagerstätten greift man zunächst auf geophysikalische Untersuchungsmethoden zurück. Dabei bedient man sich physikalischer Eigenschaften wie Magnetismus, Dichte, Schallgeschwindigkeit (Seismik, ↗ Exkurs „Reflexionsseismik“), elektrischer Widerstand oder der Radioaktivität. Die zur Suche nach Erdöl am häufigsten eingesetzte Methode ist die Reflexionsseismik. Eine Garantie für Erdölvorkommen sind seismische Messungen jedoch nicht. Letzte Sicherheit bringt nur eine Probebohrung. Die Kosten für eine Probebohrung können leicht 30 Mio. Euro betragen. Deswegen müssen weitere Methoden eingesetzt werden, um die Trefferquote von Probebohrungen zu erhöhen. Hierzu zählen Computersimulationen des Untergrunds, in die alle seismischen und geologischen Daten eingehen. So versuchen Fachleute, den Entstehungsprozess geologischer Formationen nachzuvollziehen: Wo genau kann sich unter den gegebenen Bedingungen Erdöl gebildet haben, wohin ist es gewandert und wo hat es sich gesammelt?

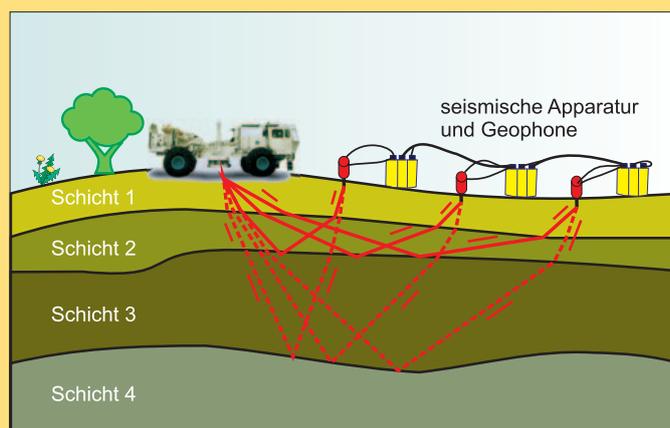


Eine weitere Hilfe bei der Suche nach Erdöl stellen Mikrofossilien (meist Foraminiferen, ↗ F8) dar. Dabei handelt es sich um kleinste Einzeller, die ein Gehäuse besitzen. Foraminiferen haben schon vor 500 Mio. Jahren existiert und mussten sich seither unterschiedlichen Umweltbedingungen anpassen, was zu unterschiedlichen Gehäusetypen mit verschiedener Größe und Zusammensetzung führte. Starben die Foraminiferen ab, sanken sie auf den Meeresgrund. Findet man sie heute mit Hilfe des Mikroskops in einer Gesteinsschicht, so helfen sie, die Gesteinsschichten zeitlich genau zu bestimmen. Dies

F6 | Erdöl- und Erdgasvorkommen, -lagerstätten und Untertage-Gasspeicher in Bayern.

### Reflexionsseismik

Bei den reflexionsseismischen Messungen werden Schwingungen mit Hilfe sog. Vibratoren am Erdboden eingesetzt, um Schallwellen zu erzeugen. Die Schallwellen breiten sich wellenartig im Untergrund aus und treffen dabei auf unterschiedliche Gesteinsschichten, welche die Wellen wieder zurück zur Erdoberfläche reflektieren. Spezielle Erdmikrophone an der Erdoberfläche (sog. Geophone) empfangen die vom Untergrund reflektierten Wellen. Diese benötigen in den verschiedenen Gesteins-



schichten eine unterschiedlich lange Zeit. Die Zeitdifferenz wird mit Hilfe von Computern ausgewertet und in sog. Seismogramme übersetzt. Mit einer Genauigkeit von 20 m können Spezialis-

ten so die Gesteinsstrukturen des Untergrunds berechnen und einen Profilschnitt des Untergrunds konstruieren. Auf diese Weise können Prognosen über mögliche Erdöllagerstätten abgegeben werden.

F7 | Prinzip der reflexionsseismischen Untersuchungen.

Exkurs



Foto: Frauke und Forstling

F8 | Verschiedene Ausbildungen von Foraminiferen der Bodenheimer-Formation aus Wallau, Bildbreite 6,3 mm.

ist vor allem während des Bohrvorgangs von großer Bedeutung, wenn zu entscheiden ist, ob bereits die gewünschte Schicht durchteuft wurde, in der das Vorkommen von Erdöl vorausgesagt wurde.

#### Wie entstanden Erdöl und Erdgas?

Die Entstehungsgeschichte des überwiegenden Teils des Erdöls in Europa beginnt vor 100 bis 200 Mio. Jahren, in der Zeitperiode des Jura bzw. der Kreide. Dies ist ein Zeitraum, in der der Superkontinent Pangaea auseinanderbricht und flache Meeresbecken entstehen, die vom offenen Ozean abgetrennt sind (► Modul D „Plattentektonik“). Dies sind ideale Voraussetzungen für die Entstehung von Erdöl und Erdgas (↗ F9).

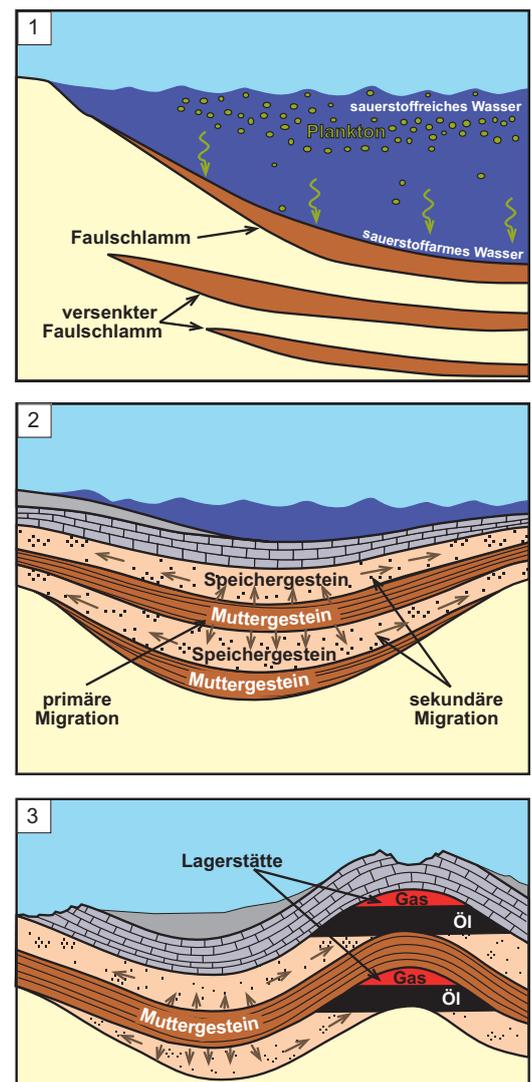
#### Vom Plankton zum Faulschlamm

Der Umwandlungsprozess vom organischen Material zum Erdöl und Erdgas beginnt am sauerstoffarmen Grund von warmen Meeren (bis ca. 1.000 m Tiefe) oder Seen, wo sich in großen Mengen abgestorbenes Plankton (im Meer lebende Kleinstlebewesen), aber auch Pflanzen, Tiere, Algen und andere Mikroorganismen ablagern (1). Das Plankton muss dabei in Meeressenen gelangen, die in Tiefen von mindestens 200 m vorkommen. Dort können richtige „Planktonfriedhöfe“ entstehen. Auf diese Weise bleibt der Verwesungsprozess (Oxidation) unterbunden. Stattdessen beginnt eine bakterielle Zersetzung des organischen Materials, die zur Bildung des sogenannten Faulschlamm (Sapropel) führt.

F9 | Entstehung von Erdöl und Erdgas.

#### Vom Faulschlamm zum Muttergestein

Faulschlamm ist ein Gemisch aus toter organischer Materie, Bakterien und Gesteinspartikeln. In 1000 Jahren können sich ca. 30 cm Faulschlamm ablagern. Über dem Faulschlamm wiederum werden durch die fortschreitende Sedimentation dicke Sedimentschichten (Sand oder Ton) abgelagert. Die überlagernde Auflast führt zur Versenkung der Sedimentpakete und des Faulschlamm in immer tiefere Bereiche. Das Wasser wird herausgepresst und die Sedimentschichten werden zu Gestein verfestigt. Aus Faulschlamm entsteht Erdölmuttergestein, das mindestens 1 bis 2 Gewichtsprozent organisches Material enthalten muss (2). Meist bestehen die Gesteine mit hohem Organikgehalt aus Ton oder Mergel (Gemisch aus Ton und Kalk), welche feinkörnig und wenig porös, also relativ undurchlässig sind.



## Der Umwandlungsprozess

Wenn das Muttergestein in eine Tiefe von ca. 1.500 bis 3.000 m versenkt wird, übt das überlagernde Sediment einen Druck von ca. 400 bis 600 bar aus und es herrschen Temperaturen zwischen 80 und 150 °C. Das Gestein befindet sich in dem sogenannten Erdölfenster. Nun setzt ein chemischer Umwandlungsprozess vom toten organischen Material, dem sogenannten Kerogen, zum Erdöl ein. Die untereinander vernetzten Moleküle des Kerogens werden aufgebrochen und zu kleineren Molekülen, den Erdöl-Kohlenwasserstoffen, umgewandelt. Aus fester Substanz wird zähflüssiges Erdöl.

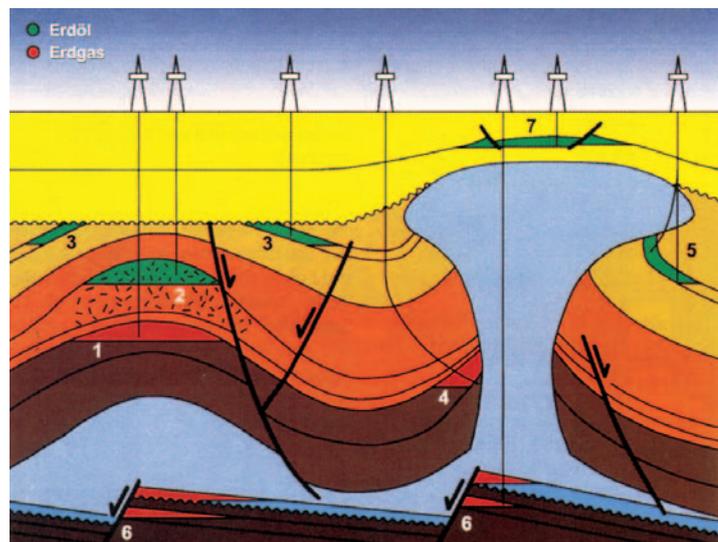
Wenn es die Umgebungsbedingungen zulassen und noch höhere Temperaturen herrschen (> 150 °C) bildet sich eine gasförmige Phase der Kohlenwasserstoffe, die Entstehung von Erdgas setzt ein. Dieses „Erdgasfenster“ liegt zwischen 120 und 180 °C. Aber nicht nur während der Bildung von Erdöl, sondern auch während des Inkohlungsprozesses (Bildung von Kohle) kann Erdgas bei solchen Temperaturen entstehen.

Ganz Norddeutschland und die südliche Nordsee werden in 3.000 bis 7.000 m Tiefe von denselben Kohleflözen des Karbons unterlagert, die im Ruhrgebiet abgebaut werden. Sie sind das Erdgasmuttergestein, von dem so gut wie alle Gaslagerstätten gespeist wurden, die man in Norddeutschland, Holland und der südlichen Nordsee kennt. Außer diesem klassischen Vorgang der Erdöl- und Erdgasentstehung gibt es für Erdgas noch eine weitere Entstehungsmöglichkeit: Manche anaerobe Bakterien, die das in die Sedimente eingebettete organische Material abbauen, erzeugen bei ihrem Stoffwechsel Methan, das sich unter günstigen Umständen, insbesondere bei schneller Ablagerung, in einer geologischen Falle ansammeln kann. Auf diese Weise entstandene biogene Gase werden in der bayerischen Molasse gefördert.

## Die Migration

Der zunehmende Überlagerungsdruck bewirkt, dass die gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffe in Form von Erdöl und Erdgas aus dem Muttergestein ausgepresst

werden (3). Die Migration verläuft dabei in mehreren Schritten. Zuerst wandern Erdöl und Erdgas wegen ihrer geringeren Dichte gegenüber von Wasser – welches sich in den Porenräumen des Gesteins befindet – aus dem Muttergestein in ein umgebendes Gestein (*primäre Migration*). Danach wandern Erdöl und Erdgas solange weiter, bis sie sich in durchlässigen Sand- und Kalksteinschichten mit einem hohen Porenraumanteil (5 – 30 %), dem so genannten Speichergestein, ansammeln können (*sekundäre Migration*).



Metamorphe Gesteine (z. B. Schiefer, Gneise und vulkanische Gesteine) sind keine geeigneten Speichergesteine, da deren Porenräume bei der Metamorphose geschlossen wurden (↗ F11, ↗ F12). Damit sich Erdöl oder Erdgas in großen Mengen im Gestein ansammeln kann, sind besondere Strukturen im Untergrund notwendig. Diese haben sich aufgrund von tektonischen Vorgängen in der Erdkruste gebildet (Falten, Störungen, Gesteinsauf- oder -abschiebungen). Diese Strukturen müssen zusätzlich nach oben von undurchlässigen Schichten (Salze, Anhydrite aber auch Tone) abgedichtet sein. Der Fachmann spricht von Erdölfallen. In solchen Erdölfallen sammeln sich immer mehr Erdöltröpfchen und bilden schließlich die Erdöllagerstätten (↗ F10).

## Der Durchbruch

Manchmal dringt das Erdöl ungehindert bis an die Erdoberfläche. An der Luft verdunstet

**F10 |** Strukturen der Norddeutschen Untergrundes als Erdöl- und Erdgasfallen:  
 1 Unter einer Aufwölbung (Antiklinale)  
 2 In einem Korallenriff  
 3 Unter übergreifenden Schichten (Diskordanz)  
 4 An einer Salzstockflanke  
 5 Unter einem Salzstocküberhang  
 6 An einer gegensinnigen Abschiebung  
 7 Scheitellagerstätte



**F11 a |**  
Einer der wichtigsten Förderhorizonte für Erdöl sind in Norddeutschland die Sandsteine aus dem Dogger (= Mitteljura, Ablagerung vor ca. 138 Mio. Jahren).

## Typische Speichergesteine in Deutschland



**F11 b |**  
Zerklüfteter Dolomit aus dem Zechstein (Bildung vor ca. 255 Mio. Jahren) ist aufgrund seiner hohen Kluftporosität ein sehr gutes Erdgasspeichergestein.



**F11 c |**  
Der Sandstein aus dem Rotliegend (Ablagerung von ca. 260 Mio. Jahren) ist aufgrund seiner hohen Matrixporosität ein sehr gutes Erdgasspeichergestein. (Bohrkern unterer Teil: schräggeschichteter Dünensand; oberer Teil: versteinertes Schlammstrom mit großen Poren).

## Speichergesteine

Die Speichergesteine sind Sedimentgesteine (meist Sandsteine und Karbonate) die, je nach Gesteinsart, aus mehr oder weniger winzigen, durch Gesteinszement miteinander verbackenen Körnern bestehen. Zwischen diesen Körnern befinden sich kleine Hohlräume, die den Porenraum der Gesteine bilden (→ Matrix-Porosität). Der Porenraum ist meist mit Wasser gefüllt. Da Öl und Gas leichter sind als Wasser, steigen sie in den Porenräumen auf. Für die Speicherung von Erdgas muss das Gestein mindestens 2 % und für die Speicherung von Erdöl mindestens 10 % Porenanteil haben. Für die Förderung spielt dagegen die Durchlässigkeit (→ Permeabilität) der Gesteine eine wesentliche Rolle: Je feiner die Körner der Gesteine, desto geringer ist in der Regel die Permeabilität des Gesteins

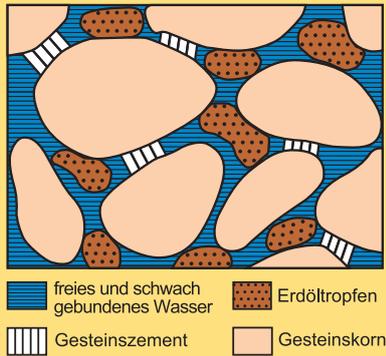
ten die leichtflüchtigen Bestandteile und es bilden sich zähe Asphaltseen. Auf diese Weise gelangen schätzungsweise genauso viele Kohlenwasserstoffe in die Umwelt wie durch menschliche Aktivitäten. In den Asphaltseen findet man oft sehr gut erhaltene Fossilien, wie in dem berühmten Pitch Lake auf der Karibikinsel Trinidad, der mit 1.500 m Durchmesser der größte Asphaltsee der Welt ist.

In Wietze bei Celle liegt die bedeutendste Durchbruchstelle Deutschlands: 1858 wurde dort eine der ersten erdölfündigen Bohrungen der Welt niedergebracht. Die industrielle Ausbeutung setzte Ende des 19. Jahrhunderts ein, mehr als 2.000 Bohrtürme ragten in den Himmel; es entstand der Beiname „Klein Texas“. Auf einem Teil des Ölfeldes steht heute das Deutsche Erdölmuseum Wietze.

### 1.2 Kohle

Kohle wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu einem der wichtigsten Rohstoffe überhaupt. Sie diente als Brennstoff für dampfgetriebene Maschinen, für die Eisenbahn, zur Verhüttung von Metallen und für Heizungen. Heute ist Kohle weltweit immer noch ein wichtiger Energieträger, insbesondere in den Schwellen- und Entwicklungsländern.

Den größten Anteil an Kohlevorkommen in Europa findet man in Sedimentgesteinen aus dem Zeitalter des Karbons (vor ca. 350 bis 290 Mio. Jahren; lat. *carbo* = Kohle), aus dem v. a. die Steinkohlevorkommen stammen – so auch das größte Kohlevorkommen in Deutschland im Ruhrgebiet, sowie die Vorkommen im Ibbenbürener Raum und im Saarland. Hier erreicht die Schicht des Karbons eine Mächtigkeit von bis zu 3000 m, wobei die Kohleflöze selbst nur ca. 2 % ausmachen und im Durchschnitt 1 m mächtig



F12 | Schemazeichnung des Gesteinsgefüges in einem typischen Speichergestein.

für Gase und Flüssigkeiten. Sind die Gesteine durch tektonische Prozesse, also durch Bewegung in der Tiefe, zerbrochen, entstehen Klüfte als zusätzliche Hohlräume und die Durchlässigkeit wird wieder höher, die Förderung ist produktiver.

sind. Es gibt aber auch jüngere Kohlevorkommen, die hauptsächlich aus dem Tertiär (vor ca. 65 bis 2,6 Mio. Jahren) stammen. Bei diesen jüngeren Kohlevorkommen handelt es sich allerdings zumeist um Braunkohle. Braunkohle hat im Vergleich zur Steinkohle einen relativ niedrigen Heizwert (1 g Steinkohle liefert 30 kJ, 1 g Braunkohle dagegen nur 20 kJ). Man braucht also zur Gewinnung von einer bestimmten Menge Energie deutlich mehr Braunkohle als Steinkohle, was mit

dem höheren Kohlenstoffanteil in der Steinkohle (► Exkurs „Inkohlung“) zusammenhängt. Um die Rentabilität der Energiegewinnung aus Braunkohle zu bewahren und um hohe Transportkosten zu vermeiden, baute man die Kraftwerke in unmittelbarer Nähe der Braunkohlelagerstätten.

Der Entstehungsprozess von Kohle wird Inkohlung genannt. Der Inkohlungsgrad bezeichnet den Grad der Umwandlung vom pflanzlichen Material in Kohle. Mit zunehmender Inkohlung steigt der Kohlenstoffanteil (C) und auch der Brennwert der Kohle (↗ F13). Der Inkohlungsgrad hängt ab vom Alter der Kohle und den äußeren Entstehungsbedingungen, wie z. B. dem Druck und der Temperatur.

**Wie entstand die Kohle im Ruhrgebiet?**

Ähnlich wie Erdöl entsteht Kohle aus marinem, organischem Material (↗ F14). Im Gegensatz zu Erdöl, das sich v. a. aus Plankton und Algen in Senken und Becken bildete, entstand die Kohle aus höheren Pflanzen auf dem Kontinent, vor allem in Mooren. Während des tropisch-feuchten Klimas des Karbonzeitalters herrschten ideale Voraussetzungen für das Gedeihen von riesigen Kohlesümpfen.

Zur Zeit des Karbons sah das Ruhrgebiet ganz anders aus als heute. Es befand sich in der Nähe eines flachen Meeres, im Bereich von riesigen Sumpfwäldern mit Schachtelhalmen, Farnen und Schuppenbäumen (► Modul D „Erdgeschichte“, Karbon). Diesen Ablagerungsraum nennt man → paralisch (paralische Kohlen) im Gegensatz zu der Kohlebildung in kleinen Seen (→ limnisch).

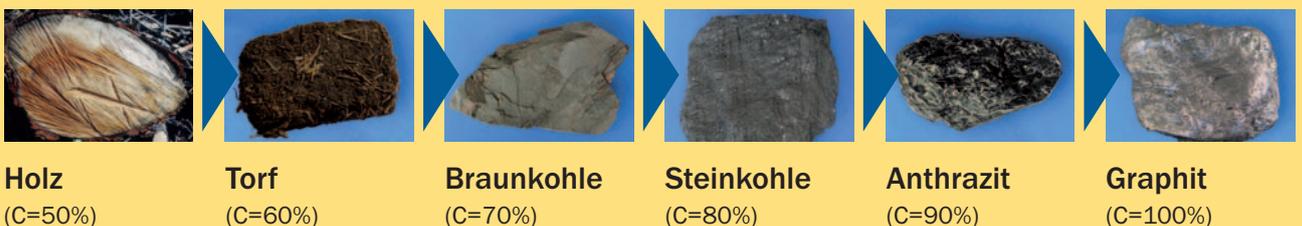
**Was ist eigentlich Kohle?**

Kohle ist ein fester Brennstoff, der aus höheren Pflanzen entstand und aus folgenden chemischen Elementen besteht:

- Kohlenstoff
- Sauerstoff
- Wasserstoff
- Stickstoff und
- Schwefel

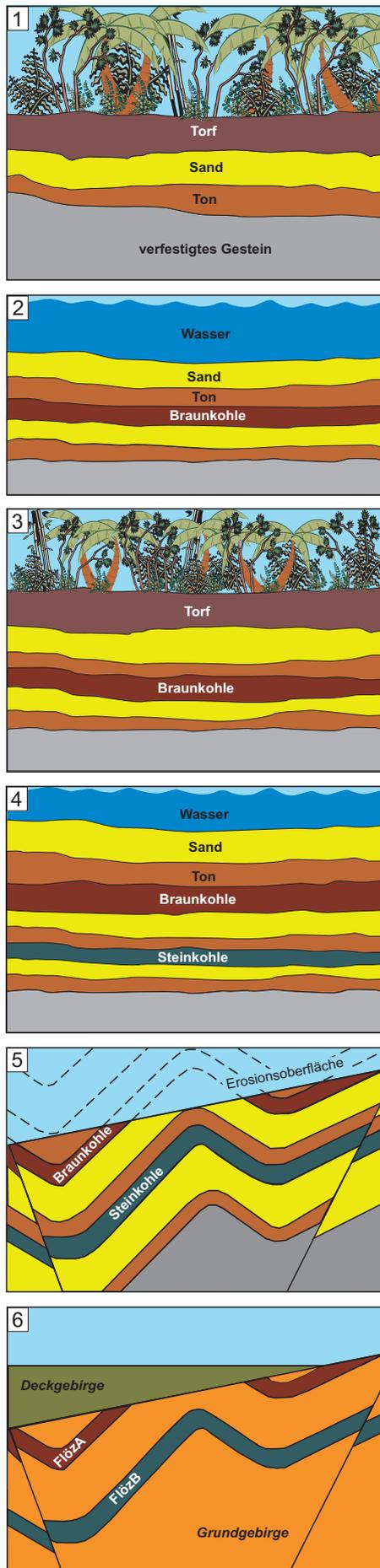
**Inkohlung**

F13 | Die Inkohlungsreihe: Zunahme des Anteils an organischer Substanz und Abnahme des Wassergehaltes am Volumen der Kohle.



Exkurs





F14 | Stadien der Kohleentstehung im Ruhrgebiet.

Als die Pflanzen und Bäume abstarben, fielen sie um und versanken im Sumpf (1). Da die abgestorbenen Pflanzen durch den Sumpf luftdicht abgeschlossen waren, verfaulten sie nicht und bildeten mit der Zeit eine torfartige Schicht (Torf = ein organisches Sediment).

Von Zeit zu Zeit wurden die Wälder vom Meer überflutet, weil sich das Land aufgrund tektonischer Prozesse senkte und der Meeresspiegel hob. Das überflutende Wasser brachte Sedimentfracht wie Sand, Schlamm und Geröll mit, welche die Pflanzenreste zudeckte (2).

Als sich das Land wieder hob und das Meer zurückwich, entstanden neue Sumpfwälder auf den angeschwemmten Sedimenten (3). Dieser Vorgang wiederholte sich immer und immer wieder, was zu zahlreichen übereinander liegenden Schichten führte. Der auflagernde Druck der Sedimente bewirkte, dass die Torfschichten allmählich in immer tiefere Bereiche versenkt wurden. Der dort herrschende Druck presste den Torf so zusammen, dass zunächst Braunkohle entstand. Mit zunehmendem Druck und steigenden Temperaturen, die im Untergrund herrschen, wurde allmählich Steinkohle aus Braunkohle (4). Damit sich eine 2 m dicke Kohleschicht (→ Flöz) bilden kann, muss eine 20 m dicke Schicht aus abgestorbenem Pflanzenmaterial entstehen. Im Ruhrgebiet liegen ca. 100 solcher Kohleflöze übereinander, die sich in einem Zeitrahmen von 40 Mio. Jahren bildeten.

Vereinzelt gelangten die Kohleflöze in so große Tiefen, dass es zu einer „Nachinkohlung“ kam, wobei die Steinkohle so weit zusammengepresst wurde, dass fast reiner Kohlenstoff (Anthrazit) entstand und es zur Bildung von Erdgas kam.

Die Kohleflöze lagen ursprünglich in großen Tiefen horizontal übereinander. Doch durch tektonische Vorgänge, während der Variskischen Gebirgsbildung, wurden die Gesteinsspakete mit den Kohleflözen zusammengedrückt und deformiert, so dass sie gefaltet und schließlich zerbrochen und gegeneinander verschoben wurden. Anschließend wurden überlagernde Gesteinsschichten abgetragen (5) und die kohleführenden Schichten freigelegt (in der Fachsprache: „aufgeschlossen“).

Vor ca. 150 Mio Jahren, in der Kreidezeit, bedeckte ein Meer die freigelegten Schichten und es wurden weitere Sedimente auf dem verfalteten Karbongestein abgelagert (6), die das Deckgebirge aufbauen. Nur den Südrand des heutigen Ruhrgebiets konnte das Meer nicht erreichen, und so blieben die Kohleschichten bis heute auf der Erdoberfläche aufgeschlossen.

### Kohle und Umwelt

Der Einsatz von Kohle als fossiler Brennstoff ist wegen seiner umweltschädlichen Eigenschaften umstritten. Bei der Energiegewinnung durch Kohle wird sehr viel klimawirksames Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre abgegeben. Insbesondere Braunkohlekraftwerke mit ihrem vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad haben einen hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Deswegen ist es wichtig, die CO<sub>2</sub>-Freisetzung durch einen besseren Wirkungsgrad der Kraftwerke zu reduzieren. Auch das Schwefeldioxid ist umweltschädlich, das vor allem bei der Verbrennung von Braunkohle entsteht und für den Sauren Regen mitverantwortlich ist. Bei modernen Stein- und Braunkohlekraftwerken werden daher die Abgase in Rauchgasentschwefelungsanlagen von Schwefeldioxid und von Staub gereinigt.

Der Braunkohleabbau ist mit einem immensen Flächenverbrauch verbunden. Um Lagerstätten möglichst vollständig auszuschöpfen, werden bisweilen ganze Dörfer umgesiedelt, was zu Konfliktpotenzial mit der Bevölkerung führt. Unter Umständen werden dabei auch ökologisch wertvolle Gebiete zerstört.

### Kohleabbau in Bayern – eine Chance für Freizeit und Erholung

Der Kohlebergbau in Bayern, dessen Schwerpunkte in Oberfranken (Steinkohle), Oberbayern (Braunkohle) und der Oberpfalz (Braunkohle) lagen, ist seit Jahrzehnten eingestellt. Wirtschaftlich gewinnbare Kohlevorräte sind nicht mehr vorhanden. Heute zeugen Veränderungen in der Landschaft vom ehemaligen Kohlezeitalter. Besonders beim Braunkohletagebau entstanden Wunden im Landschaftsbild. Beim Abbau wurden riesige Bagger eingesetzt, die sich durch das Landschaftsbild frästen. Ganze Ortschaften wurden dabei umgesiedelt und zerstört, wie auch um die ehemalige Lagerstätte Rauberweiher im Raum Wackersdorf. Diese Lagerstätte befindet sich im Naabtal, wo sich in den Seitenarmen der Urnaab Feinsande, Tone und Braunkohleflöze des Braunkohlentertiärs abgelagert hatten. Über nahezu ein Jahrhundert prägte der Braunkohlebergbau die Landschaft, bis er 1982 eingestellt wurde.

Die zurückgelassene kahle Landschaft hatte nach der Stilllegung einen Prozess erfahren, der zu einer grundlegenden Veränderung des Landschaftscharakters führte. Wie schon der Name vermuten lässt, handelte es sich bei der Lagerstätte Rauberweiher ehemals um Fischereigewässer, die durch den Braunkohletagebau zu riesigen Gruben umgewandelt wurden. Nach der Stilllegung sind diese Gruben mit Grundwasser vollgelaufen und es entwickelte sich eine sumpfige Naturlandschaft. Anfang der 90er Jahre ging man dazu über, solche Gebiete zu renaturieren. Auf diese Weise entstand aus der Lagerstätte Rauberweiher eine malerische Landschaft mit großen Seen und Wäldern, die ideale Voraussetzungen für Freizeit- und Naherholungsnutzung bietet (➔ F15).



VORHER



NACHHER

**F15** | Das Oberpfälzer Seenland östlich von Schwandorf ist ein Beispiel für die gelungene Renaturierung einer Landschaft, die durch den Braunkohletagebau geprägt wurde. Das Bild oben wurde bei Sulzbach-Rosenberg im Jahr 2009 aufgenommen und vermittelt einen Eindruck des Zustandes vor der Renaturierung. Die Aufnahme unten zeigt, wie aus den Braunkohlegruben um Rauberweiher bei Wackersdorf eine Seenlandschaft geschaffen wurde, die heute als Freizeit- und Naherholungsgebiet dient.

## 2 Mineralische Rohstoffe in Bayern

Steine und Erden sind Bodenschätze, die im Tagebau oder Bergbau gewonnen werden und nicht zu den Brennstoffen oder Erzen zählen. Die Industrie der Steine und Erden befasst sich vor allem mit der Gewinnung von Lockergesteinen. Typische Steine-und-Erden-Rohstoffe sind in Bayern die mengenmäßig bedeutenden und weit verbreiteten Rohstoffe (Massenrohstoffe) Sand und Kies, Natursteine, Lehm und Ton, Zementrohstoffe und Kalk, aber auch die weniger verbreiteten Naturwerksteine und Gips. Zu den speziellen Industriemineralen zählen in Bayern mineralische Rohstoffe, wie z. B. Bentonit, Kaolin, Feldspat und Feldspatsande, Quarz und Quarzsand, Kiesel Erde oder Speckstein und die im Bergbau gewonnenen Rohstoffe Salz sowie Graphit.

Mit einer Jahresförderung von ca. 150 Mio. t oberflächennaher mineralischer Rohstoffe (↗ Tabelle F1) erbringt Bayern ca. 20 % der gesamten Förderung von Deutschland. Der Grund dafür ist die flächenhafte Verbreitung der Steine-und-Erden-Rohstoffe in Bayern, wobei die Fläche des Freistaats ohnehin bedeutend ist (19,8 % der Bundesrepublik).

Bayern verfügt über die meisten Gewinnungs- und Verarbeitungsbetriebe auf dem Sektor der Steine-und-Erden-Rohstoffe sowie der Industriemineralen. Dabei spielen neben der Verfügbarkeit der Rohstoffe auch kostengünstige Transportwege eine wesentliche wirtschaftliche Rolle. Im Folgenden sind die wichtigsten Steine und Erden Rohstoffe und ihre Hauptverwendungszwecke aufgeführt.

Mineralischer Rohstoff	Jahresfördermenge (Mio. t)	Jahresabbaufäche (ha)*
Sand und Kies	83,6	631
Naturstein	35,0	60
Lehm und Ton	10,0	80
Zementrohstoff	8,64	9
Quarz und Quarzsand	5,63	37
Kalk	3,1	3,5
Spezialton	1,14	13
Gips und Anhydrit	1,03	10
Pegmatitsand	0,635	4
Bentonit	0,51	22
Kaolin	0,40 **	2
Juramarmor und Solnhofener Platten	0,28	11
Granit	0,11	2
Feldspat und Feldspatkonzentrat	0,10	0,2
Kiesel Erde	0,05	2
Muschelkalk und Sandstein	0,046	0,8
Marmor und Kalkstein	0,032	0,3
Trass	0,019	2
Speckstein, Talk und Grünstein	0,009	0,1
Farberde	0,004	0,1
<b>GESAMT</b>	<b>150,335</b>	<b>890,0</b>

Tabelle F1 | Gewinnung und Jahresabbaufäche oberflächennaher mineralischer Rohstoffe in Bayern 1999 (Quelle: Bayerischer Industrieverband Steine und Erden e.V.).

\* Jahresabbaufäche: Fläche, die jährlich für den Abbau benötigt wird

\*\* hierin nicht enthalten: Quarzsand- und Feldspatanteile bei der Kaolin-gewinnung

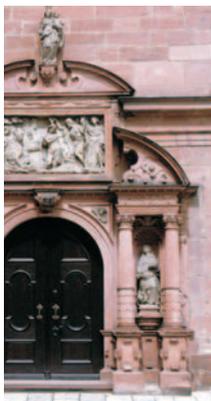


### Sand und Kies

Bei einer jährlichen Gesamtproduktion von rund 84 Mio. t (↗ Tabelle F1) ist die bayerische Sand- und Kiesindustrie der mengenmäßig bedeutendste Zweig der bayerischen Rohstoffgewinnung. 95% der Sand- und Kiesproduktion gehen in den Hoch-, Tief-, Straßen-, Wasser- und Gleisbau, der Rest wird zur Herstellung von Beton, Mörtel, Kalksandstein, Ziegel und als Zusatzmittel für Zement verwendet. Sonstige Verwendungsbereiche: die Glasindustrie, die keramische Industrie, die Eisen schaffende und Gießereiindustrie, die chemische Industrie, die Elektronikindustrie, für Verkehrswege, in der Wasserwirtschaft als Wasserfilter oder im Luftschutzbau ebenfalls als Filter.

### Natursteine

Die Natursteinindustrie fördert ca. 35 Mio. t pro Jahr. Bayern hat aufgrund seiner geologischen Vielfalt eine breite Palette an Natursteinen wie Granite, Gneise, vulkanische Gesteine wie Diabase und Basalte, Kalk- und Dolomitsteine, Sandsteine oder spezielle und einmalige Gesteine wie der sogenannte Riestrass (Suevit). Natursteine werden aus Steinbrüchen gewonnen, wobei das Festgestein gesprengt und anschließend gebrochen wird. Endprodukte der Aufbereitung sind Schotter, Splitt, Brechsand, Gleisbettungsschotter und Bruchsteine in Blockgröße (Schroppen) und Festgesteine, die insbesondere als Asphalt- und Betonzuschlagstoffe im Straßen-, Tief- und Wasserbau direkt eingesetzt werden, wobei das Einsatzgebiet sehr breit angelegt ist.



### Naturwerksteine

Für die Eignung als Naturwerksteine müssen die aus dem Festgestein gelösten Rohblöcke so beschaffen sein, dass sie zu Werkstücken verarbeitet werden können, z. B. für die Bauwerksverkleidung, zu Bodenplatten, aber auch für Steinmetz- und Bildhauerarbeiten. Naturwerksteine werden in der Regel nicht gesprengt, sondern aus dem Gesteinsverband mechanisch gelöst oder herausgesägt. Die jährliche Förderung in Bayern liegt bei ca. 0,4 Mio. t (↗ Tabelle F1). Etwa 80 % des Bedarfs an Rohblöcken der bayerischen Naturwerksteinindustrie werden jedoch importiert, z. B. aus Italien, Skandinavien, Spanien, Portugal, Russland, Südafrika, Indien oder China. Für die Naturwerksteine existieren Handelsnamen, die von der korrekten petrographischen, lithologischen oder lithostratigraphischen Nomenklatur teilweise stark abweichen. Das Deutsche Natursteinarchiv in Wunsiedel hat alle national und international gehandelten Natursteine dokumentiert (▶ [www.deutsches-natursteinarchiv.de](http://www.deutsches-natursteinarchiv.de)). Dieses Archiv ist insbesondere auch für die Denkmalpflege zur Erhaltung und Wiederherstellung historischer Bausubstanz von Bedeutung.

### Lehm und Ton

Die Rohstoffe Lehm und Ton sind von besonderer Bedeutung für die Ziegelindustrie (in Bayern mit einer Produktion von ca. 10 Mio. t pro Jahr, ↗ Tabelle F1). Im Schnitt wurden in Bayern um die Jahrtausendwende jährlich knapp 2 Mrd. Mauerziegel und rund 350 Mio. Dachziegel produziert. Von den mehr als 300 Produktionsstandorten in Deutschland sind ca. 30 % in Bayern angesiedelt. Vom Gesamtumsatz in Deutschland von ca. 1,79 Mrd. Euro (Jahr 2000) hat Bayern einen Anteil von ca. 0,51 Mrd. Euro.



### Gips und Anhydrit

Mit einer Jahresförderung von durchschnittlich ca. 1 Mio. t an Gips und Anhydrit bildet Bayern einen Schwerpunkt der deutschen Gipsgewinnung und -industrie. Die Hauptmasse von Gips und Anhydrit wird in Bayern aus den Standorten in Unter- und Mittelfranken gewonnen, in denen Vorräte aus dem Mittleren Keuper abgebaut werden (▶ Modul I „Außerschulische Lernorte“, Exkursionen Nr. 11 und 15). Daraus werden Baugipse, Gipsplatten oder Zementzuschlagstoffe gefertigt. Ein geringerer Teil wird zu Estrichen und anderen Spezialgipsen verarbeitet.

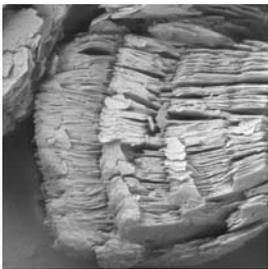
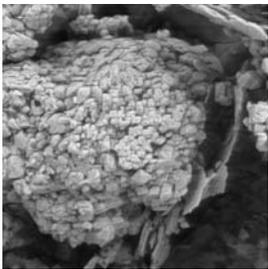
### Zementrohstoffe und Kalk

Die Gewinnung von rund 9 Mio. t Zementrohstoffen pro Jahr konzentriert sich auf wenige Stellen in Bayern. Abgebaut werden vor allem der Untere Muschelkalk und Karbonatgesteine des Malm. Kalk ist ein weit verbreiteter Grundstoff, der in vielen Industriezweigen, insbesondere im Baugewerbe, in der Baustoffindustrie, in der Eisen- und Stahlindustrie, in der Papierindustrie, in der chemischen Industrie, im Umweltschutz sowie in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt wird.





**F16** | Kieselerte als Ausgangsprodukt insbesondere für Füllstoffe und Poliermittel.



**F17** | Korpuskulare Kieselsäure (oben, 18.000-fache Vergrößerung) und plättchenförmiger Kaolinit (unten, 15.000-fache Vergrößerung) als Bestandteile der Neuburger Kieselerte (↗ F16), Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (► Modul H „Geologische Arbeitsmethoden“).

## Industrieminerale

Unter dem Begriff Industriemineralien werden solche Rohstoffe zusammengefasst, die bei speziellen Produktionsverfahren eingesetzt werden. Dazu zählen beispielsweise Kaolin, Feldspat und feldspatführende Sande (Pegmatitsande), Bentonit, Speckstein, Kieselerte, Quarz und hochwertige Quarzsande sowie Salz und Graphit als Ausgangs- und Prozessstoffe für die Glas-, Keramik-, Papier-, Chemie- und Elektroindustrie. Aufgrund seiner besonderen geologischen Situation verfügt Bayern über einige spezielle mineralische Rohstoffe:

So gibt es besonders reiche Vorkommen an Kaolin (↗ Exkurs „Nutzung der Industriemineralien in Bayern“), Bentonit und Kieselerte. Die gesamte Produktion von Bentonit in Deutschland kommt aus den Gebieten um Landshut-Mainburg und Augsburg, wo die Lagerstätten an mächtige Lagen aus verwitterter umgelagerter vulkanischer Asche gebunden sind. Hier werden heute jährlich ca. 400.000 t Bentonit abgebaut, seit 1962 insgesamt ca. 22 Mio. t. Bentonit besteht zu 60 – 80 % aus einem quellfähigen Ton (Montmorillonit) und ist vor allem in der Bau- und Bohrtechnik ein wichtiges Material. Anwendungsbeispiele: Abdichtung von Bauwerken und Deichbau, Bohrspülung, Katzenstreu.

Das einzige Graphitbergwerk Deutschlands wurde bis vor einigen Jahren in Kropfmühl bei Hauzenberg in Niederbayern betrieben. Der Graphit findet sich als Linsen und Schuppen in den Gneisen des Grundgebirges. Durch Aufbereitung kann hieraus ein sehr reiner Rohstoff (99,9 % Graphit) gewonnen werden, aus dem High-Tech-Produkte für die Raumfahrt bis hin zu ganz alltäglich gewordenen Produkten, wie Kohlebürsten in der Elektromotorenindustrie, hergestellt werden. Das wohl bekannteste Produkt – der Bleistift – trägt dagegen nur noch zu 6 % zum Umsatz bei. Die Graphit Kropfmühl AG betreibt ein Besucherbergwerk und einen Lehrpfad zum ehemaligen einzigen Graphitbergwerk Deutschlands (► Modul I „Außerschulische Lernorte“, ↗ Übersichtskarte Lehrpfade).

Ein weiterer mineralischer Rohstoff ist Kieselerte, die bei Neuburg an der Donau in

Oberbayern, abgebaut wird (auch Neuburger Kieselerte genannt). Sie ist ein natürlich entstandenes Gemisch aus amorpher und kryptokristalliner Kieselsäure und lamellärem Kaolinit und wird als funktioneller Füllstoff für Schläuche und Bodenbeläge, in Dachbahnen, Dichtungen im Baubereich, als Schleifmittel für Poliermittel und Haushaltsreiniger und in der Farbe- und Lackindustrie in Tauchlackierungen, Parkettboden- und Holzbeschichtungen verwendet. Weiteren Nutzen findet sie in Klebstoffen und als Lebensmittelergänzungsmittel. Die Kieselerte entstand in einer flachen Meeresbucht während der Oberkreide vor etwa 95 Mio. Jahren. Hier lagerten sich Ton, Feinsand und Kieselchwämme ab, die von der Brandung aufgearbeitet wurden. Im verkarsteten Untergrund des oberen Juras entstanden Senken und Einbrüche, in denen sich die kreidezeitlichen Ablagerungen ansammelten.

## Sonstige mineralische Rohstoffe

Hierzu zählen auch die im Untertagebergbau oder durch Bohrungen gewonnenen Bodenschätze wie insbesondere Salz. Die Salzproduktion aus der Saline Bad Reichenhall, die die gewonnene Sole aus dem Salzbergwerk Berchtesgaden und den Solebohrungen in Bad Reichenhall verarbeitet, liegt bei ca. 240.000 t im Jahr. Hinzu kommt die Soleförderung von Solebohrungen zu balneologischen und medizinischen Zwecken durch mehrere bayerische Bäder. Diese Soleförderung entspricht im Jahr umgerechnet ca. 8.000 t Salz.

## Metallische Rohstoffe

Bergbau auf Metall-Erze wird derzeit in Bayern nicht mehr betrieben, da die entsprechenden Vorkommen, die Erzlagerstätten, heute nicht mehr wirtschaftlich abgebaut werden können (z. B. Kupferbergwerk Wilhelmine ► Modul I „Außerschulische Lernorte“, Exkursion Nr. 14). Viele ehemalige Abbau- und Verarbeitungsstätten können aber als Museen, Schaubergwerke oder Geotope besucht werden. Einen Überblick hierzu gibt die Broschüre „Von Bergwerken, Hütten und Hämmer“ des Bayerischen Wirtschaftsministeriums, die ein Bestandteil dieser Handreichung ist.

Ein interessantes Beispiel für die Abhängigkeit des Bergbaus von der Weltwirtschaft bietet das Gold: Das Edelmetall wurde in Bayern historisch an verschiedenen Orten im nordostbayerischen Grundgebirgsgebiet ge-

wonnen sowie an den alpinen Flüssen gewonnen. Jahrzehntlang waren aber die Goldpreise viel zu niedrig bzw. die Lagerstätten zu arm, um an eine wirtschaftliche Gewinnung zu denken.

## Nutzung der Industriemineralien in Bayern

### Porzellanindustrie

Der Grund für die Entwicklung der Porzellanherstellung in Oberfranken und der Oberpfalz liegt in den reichen Vorkommen von Kaolin, das heute noch v. a. im Raum Hirschau und Tirschenreuth gewonnen wird. Dies macht zwei Drittel der deutschen Kaolingewinnung aus. Die Porzellanindustrie prägte die nördliche Oberpfalz und Teile Oberfrankens mit den „Porzellanstädten“ Selb und Weiden als Zentren dieses Wirtschaftszweiges. Durch den Strukturwandel, insbesondere nach der EU-Erweiterung hat sich die Porzellanindustrie zum großen Teil nach Böhmen in die Tschechische Republik verlagert. Heute gehen etwa 60 % der Kaolinproduktion im Raum Hirschau in die Papiererzeugung (► Modul I „Außerschulische Lernorte“, ► Übersichtskarte Lehrpfade).

### Was ist eigentlich Porzellan?

Die Hauptbestandteile der Porzellanmasse sind Kaolin (der Name stammt von der chinesischen Porzellanstadt Ching-te-chen auf dem Kao-ling Berg), Feldspat und Quarz. Die prozentuale Zusammensetzung der Porzellanmasse, das sogenannte Arkanum, ist das streng gehütete Geheimnis einer jeden Manufaktur, die Verhältnisse liegen jedoch bei etwa 50 % Kaolin, 25 % Feldspat, 25 % Quarz. Die Porzellanmasse

wird mit Wasser zubereitet und dann entweder auf der Töpferscheibe bearbeitet oder in Formen gegossen. Nach der Trocknung werden die Formen zwei Bränden ausgesetzt, zunächst dem „Vor- oder Verglühbrand“, der dem Scherben Wasser entzieht und ihm die nötige Festigkeit für die Weiterbehandlung gibt. Nach dem Tauchen in einen dünnflüssigen Glasurbrei erfolgt der „Garbrand“ bis 1.460 °C. Die Glasur schmilzt hierbei und verbindet sich unlöslich mit dem Untergrund. Das Brennen dauert manchmal Tage, danach muss das Brenngut langsam abkühlen. Für Verzierung und Bemalung wird entweder unter der Glasur gemalt, meist blau, weil es hohe Temperaturen aushält, oder auf der Glasur. Diese erfordert einen weiteren Brand von 900 bis 1.200 °C. Als Farben werden Metalloxide von Eisen, Mangan, Kobalt, Nickel, Chrom verwendet.

### Technische Verwendung

Schalterteile in der Elektroindustrie, Flaschenverschlüsse, Sicherungspatronen, Teile in der Hochfrequenz und in der chemischen Technik, sowie für Waschbecken und Toilettenschüsseln.

### Glasindustrie

Einer der prägenden traditionellen Wirtschaftszweige Ostbayerns ist die Glasherstellung mit den beiden Zentren



F18 | Historischer Kiesofen im Europäischen IndustrieMuseum für Porzellan in Selb.

Zwiesel-Frauenau im Bereich Kristallglas und dem Raum Weiden-Neustadt a. d. Waldnaab mit dem Schwerpunkt Bleikristall. Der Grund für die Entwicklung der Glasherstellung in Ostbayern lag in den reichen Rohstoffvorkommen. Wichtig als Rohstoff waren dabei neben dem Quarz als Rohprodukt auch die holzreichen Wälder zur Lieferung der Energie für die Verarbeitung und für die Pottasche (Anreicherung von Kaliumcarbonat aus Holzasche mittels Lösung der Salze durch Auswaschen mit Wasser und anschließendem Eindampfen in Töpfen, den Pötten). Die Zusammensetzung von wichtigen Glassorten ist in der ► Tabelle F2 zu sehen.

Neben dem Gebrauchsglas und dem Wirtschaftsglas ist die Herstellung und Veredelung von technischem Glas und Flachglas in Ostbayern von Bedeutung. Dazu gehört die spezielle Glasfertigung für die Industrie, wie elektrochrome Gläser für die Automobilindustrie, Solarkollektoren und hochtechnische Gläser, z. B. für den Pharmabereich.

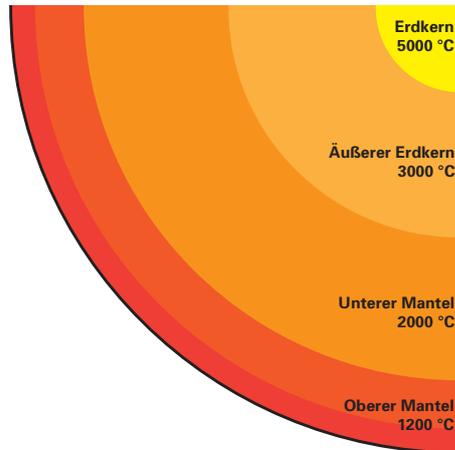
Glasart	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO
Quarzart	100 %	-	-	-	-	-	-	-
Flachglas	72 %	1,5 %	13,5 %	-	3,5 %	8,5 %	-	-
Bleikristallglas	60 %	8 %	2,5 %	12 %	-	-	-	17,5 %
Laborglas	80 %	3 %	4 %	0,5 %	-	-	12,5 %	-

Tabelle F2 | Zusammensetzung von wichtigen Glassorten.



### 3 Geothermie

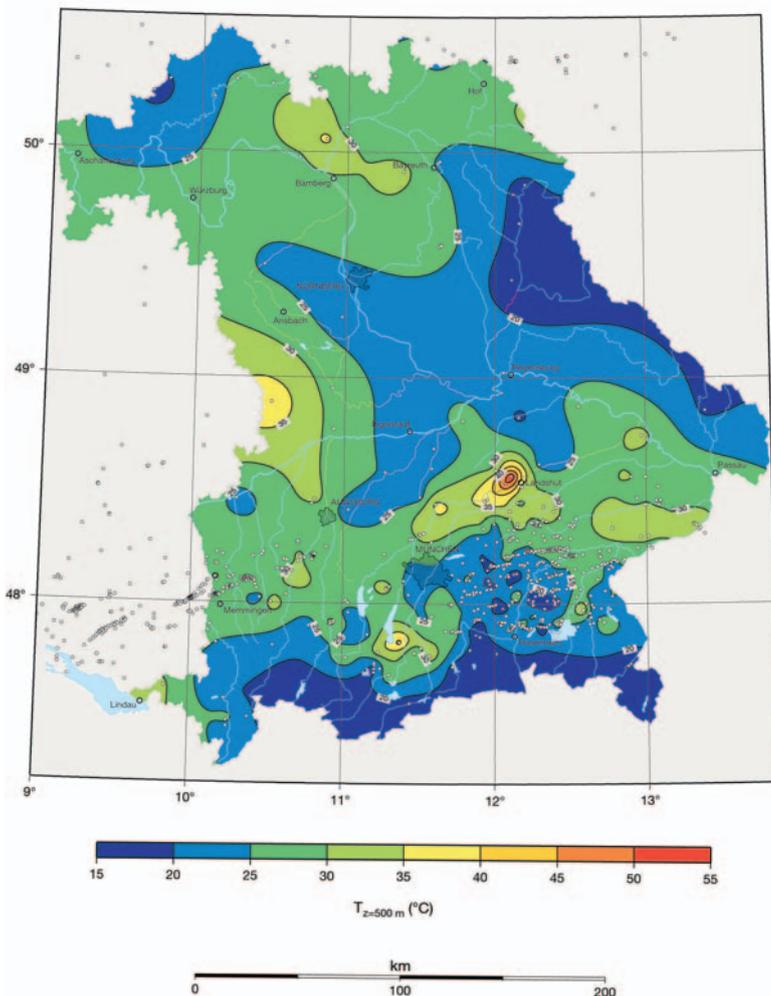
F19 | Die Temperaturverteilung im Erdinneren.



#### 3.1 Was ist Geothermie?

Geothermische Energie – auch als Erdwärme bezeichnet – ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde. Unter Geothermie versteht

F20 | Die Temperaturverteilung in Bayern in einer Tiefe von 500 m unter Gelände.



man die technische Ausnutzung dieser natürlichen Erdwärme zur Energiegewinnung. Je tiefer man in das Erdinnere vordringt, umso wärmer ist es. Im Gegensatz zu Gebieten mit aktivem Vulkanismus, wie z. B. in Island, Neuseeland oder Italien, muss in Deutschland jedoch vergleichsweise tief gebohrt werden, um auf hohe Temperaturen zu stoßen.

Auch in weiten Teilen Bayerns nimmt – zumindest in dem Bereich der obersten kontinentalen Kruste, der durch Tiefbohrungen erschlossen werden kann – die Temperatur nur mit durchschnittlich  $3\text{ °C}/100\text{ m}$  Tiefe zu. Diese Temperaturzunahme mit der Tiefe wird als geothermischer Gradient oder geothermische Tiefenstufe bezeichnet. Der geothermische Gradient ist jedoch regional sehr unterschiedlich. Abweichungen vom Mittelwert  $3\text{ °C}/100\text{ m}$  werden als Wärmeanomalien bezeichnet.

In Bayern variiert die Temperatur in 500 m Tiefe unter Gelände von relativ kühlen  $15\text{ °C}$  bis zu Werten von über  $50\text{ °C}$ . In den Alpen und den Kristallin-Gebieten wie dem Spessart und der Böhmisches Masse sind die Temperaturen am niedrigsten. Etwas höhere geothermische Gradienten finden sich im Gebiet der Sedimentbecken, die höchsten im Voralpenraum.

Einen Hinweis auf die hohen Temperaturen im Erdinneren liefern vulkanische Aktivitäten und als Geysire und heiße Quellen austretende Thermalwässer. Schon im Altertum nutzte der Mensch die Erdwärme zum Heizen, zum Kochen und in Thermalbädern. Berühmte Bäderorte wie Aachen, Karlsbad und Baden-Baden wurden bereits von den Römern gegründet. Auch in Bayern legten die Römer den Grundstein für die fünf bayerischen Staatsbäder Bad Kissingen, Bad Brückenau, Bad Steben, Bad Reichenhall und Bad Gögging.

#### Woher kommt die Erdwärme?

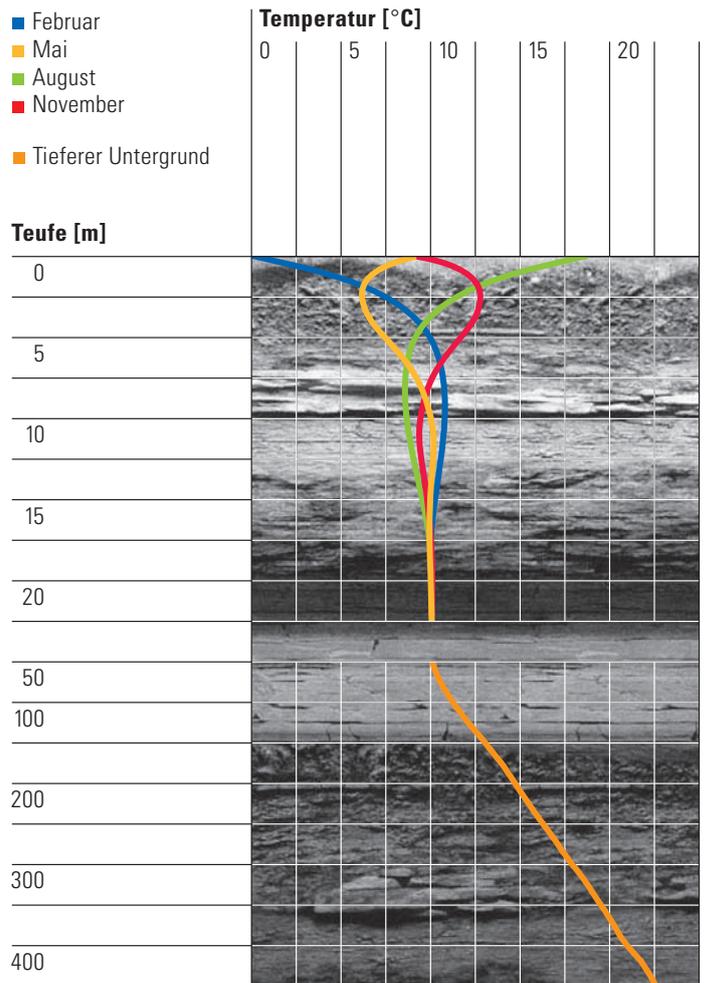
Der Hauptanteil der von der Erde an der Erdoberfläche bereitgestellten Wärme wird in der Erdkruste beim Zerfall natürlicher radioaktiver Elemente wie Uran, Thorium und Kalium<sup>40</sup> gebildet. Ein kleinerer Anteil resultiert

noch aus der Gravitationsenergie bei der Entstehung der Erde vor rund 4,5 Mrd. Jahren und aus einer eventuell davor noch vorhandenen Ursprungswärme. Im Erdkern herrschen nach heutigem Kenntnisstand ca. 5.000 – 6.000 °C.

Im oberflächennahen Bereich bis ca. 20 m Tiefe wird der Wärmehaushalt maßgeblich durch die Sonneneinstrahlung (Wärmestrom bis zu 1.000 W/m<sup>2</sup>), durch Niederschlags- und Sickerwasser sowie bewegtes Grundwasser gesteuert. Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen (↗ F20) überlagern deshalb den aufwärts gerichteten Wärmestrom aus dem Erdinneren bis in Tiefen von 10 – 20 m. Das heißt, dieser oberflächennahe Bereich wärmt sich im Sommer auf und kühlt im Winter aus. Die Erdwärme im oberflächennahen Untergrund ist daher zum überwiegenden Teil gespeicherte Sonnenenergie und nur untergeordnet Energie aus dem Erdinneren.

Durch das Temperaturgefälle zwischen Erdinnerem und Erdoberfläche wird Erdwärme stetig aus der Tiefe nachgeliefert und letztlich in Form von Wärmestrahlung an das All abgegeben. Dieser geothermische Wärmefluss beträgt in Bayern rund 60 – 80 mW/m<sup>2</sup>. Demgegenüber liegt die Einstrahlung der Sonne auf die Erdoberfläche bei dem rund 20.000-fachen des terrestrischen Wärmestroms, der, bezogen auf die Fläche von der Größe eines Fußballfeldes, dem Energieverbrauch von drei bis fünf 100 W-Glühlampen entspricht. Durch die im Untergrund gespeicherte Wärmeenergie stehen für eine geothermische Nutzung jedoch weitaus größere Wärmemengen zur Verfügung, als durch den terrestrischen Wärmefluss bereitgestellt werden. Diese Wärmemengen werden bei der Gewinnung von Erdwärme wie eine Lagerstätte abgebaut; Erdwärme fällt daher auch unter das Bergrecht.

Nach menschlichen Maßstäben ist die in der Erde gespeicherte Wärme dennoch unerschöpflich. Allein unter der Fläche der Bundesrepublik steckt in einer Tiefe von 3.000 bis 7.000 m so viel Energie, dass wir uns damit für die nächsten 100.000 Jahre komplett mit Strom und Wärme versorgen könnten. Daher wird die Erdwärme zu den erneuerbaren Energien gerechnet.



**Vorteile der Geothermie**

Erdwärme ist im Gegensatz zu den meisten anderen erneuerbaren Energien wie Wasser, Wind und Sonne eine Grundlastenergie, die krisensicher und unabhängig von Witterung und Tageszeit immer und praktisch überall zur Verfügung steht. Erdwärme muss nicht gespeichert werden, da die Erde selbst als Wärmespeicher dient. Auch angesichts des Gebotes zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gewinnt die Nutzung erneuerbarer und umweltfreundlicher Energiequellen wie der Erdwärme zunehmend an Bedeutung.

Trotz dieser erheblichen Vorteile und einer beträchtlichen Anzahl an potenziellen Standorten weltweit ist ihr Anteil an der gesamten Energieversorgung bislang sehr gering. Bei weiterer Verknappung und Verteuerung der fossilen Brennstoffe werden alternative Energiequellen wie die Erdwärme jedoch zunehmend konkurrenzfähig.

F21 | Der jahreszeitliche Temperaturgang im Untergrund.

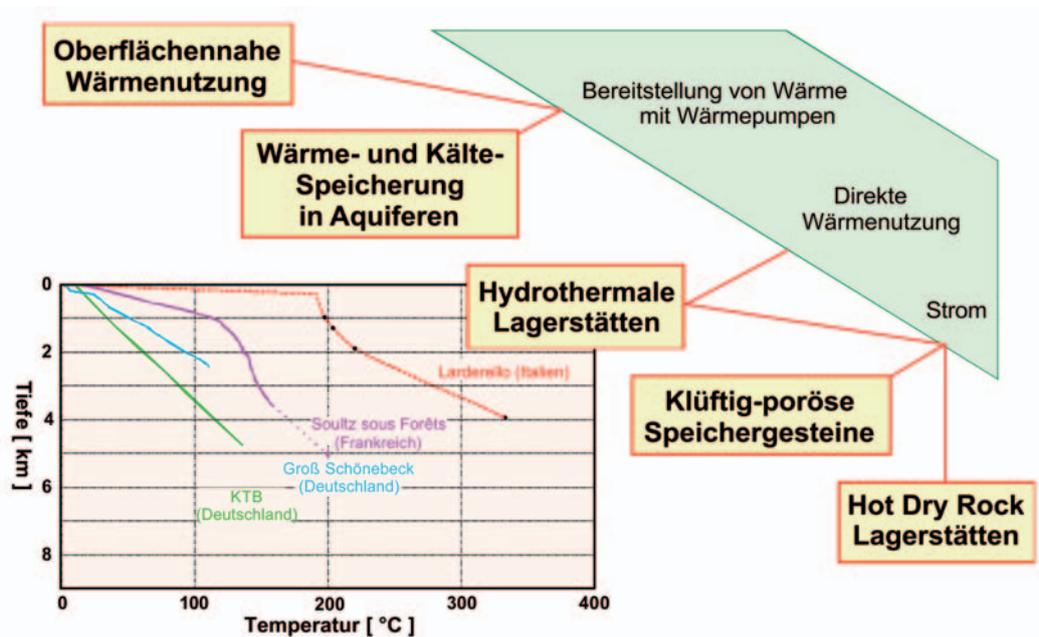
### 3.2 Anwendungsbereiche der Geothermie

Häufig denkt man bei der Nutzung von Erdwärme nur an die Wärmeversorgung von einzelnen Gebäuden oder an eine Nah- bzw. Fernwärmeversorgung von öffentlichen Gebäuden und größeren Siedlungen oder von Gewerbe- bzw. Industriegebieten. Weithin bekannt ist auch die balneologische Nutzung von Thermalwässern. Weniger bekannt ist jedoch, dass die Geothermie auch zur Kühlung von Gebäuden oder Gebäudekomplexen und Industrieanlagen, zur Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund und zur Eisfreihaltung von Straßen, Brücken, Bahnsteigen oder Start- und Landebahnen eingesetzt werden kann.

Zunehmendes Interesse findet die geothermische Stromerzeugung, da diese heimische Energiequelle in der Lage wäre, kontinuierlich Strom zu liefern. Eine Nutzung in Kraft-Wärme-Kopplung, bei der nach der Stromer-

zeugung die Restwärme zu Heizzwecken genutzt wird, ist aus ökologischer und ökonomischer Sicht besonders vorteilhaft. Voraussetzung für die geothermische Stromerzeugung sind allerdings ausreichend hohe Temperaturen ( $> 100\text{ °C}$ ) und Ergiebigkeiten ( $> 50\text{ l/s}$ ) des Thermalwasserleiters.

Im Bereich der oberflächennahen Geothermie mit einem Temperaturniveau von ca.  $7\text{ °C}$  bis maximal  $25\text{ °C}$  ist in der Regel der Einsatz einer Wärmepumpe erforderlich, um ein für die Wärmeversorgung ausreichendes Temperaturniveau zu erreichen. Im Bereich der tiefen Geothermie kann bei ausreichend hohen Temperaturen die Wärmeenergie direkt über Wärmetauscher an den Heiznetz-Kreislauf abgegeben werden. Nachgeschaltete Wärmepumpen und weitere Nutzungen wie z. B. die Heizung von Gewächshäusern können das nutzbare Temperaturintervall deutlich erweitern und die Wirtschaftlichkeit verbessern („Kaskadennutzung“).



F22 | Geothermische Gradienten für verschiedene Standorte in Europa und die Nutzungsmöglichkeiten der unterschiedlichen Lagerstättentypen in Abhängigkeit von Tiefe und Temperatur.

#### Arten der geothermischen Energiegewinnung

Bei der geothermischen Energiegewinnung ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen

- der oberflächennahen Geothermie (Synonym Erdwärmenutzung) – Nutzung des oberflächennahen Bereiches von ca. 1,0 – 400 m Tiefe und Temperaturen  $< 25\text{ °C}$  und

- der tiefen Geothermie (Synonym Tiefengeothermie) – Nutzung insbesondere der positiven Anomalien des Wärmeflusses ab einer Tiefe von rund 400 – 1.000 m, wobei derzeit die technische Grenze bei einer Tiefe von etwa 7.000 m liegt.

Um die Wärme aus dem Untergrund gewinnen zu können, braucht man ein Transportmittel wie Wasser, Sole oder Dampf. Daher

können die Nutzungsarten auch danach unterschieden werden, ob das Transportmittel bereits im Untergrund vorhanden ist oder erst künstlich eingebracht werden muss.

Nach dieser Definition gehören zur Tiefengeothermie folgende Systeme:

- **Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie** (Wärmeinhalt): Nutzung warmer oder heißer Tiefenwässer zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen, für Landwirtschaft und Industrie oder für balneologische Zwecke. Ab ca. 100 °C ist eine Verstromung möglich (z. B. Groß Schönebeck oder Unterhaching bei München).
- **Hydrothermale Systeme mit hoher Enthalpie**: Nutzung von Heißdampf- oder Zweiphasensystemen zur Stromerzeugung (z. B. Larderello in Italien; in Deutschland in Ermangelung von Gebieten mit aktivem Vulkanismus nicht möglich).
- **Petrothermale Systeme**: Nutzung der im Gestein gespeicherten Energie, z. B.
  - Hot-Dry-Rock-Systeme (HDR, „Heißes trockenes Gestein“), auch Deep Heat Mining (DHM, „Tiefer Wärmebergbau“) oder allgemein Enhanced Geothermal Systems (EGS, „Angeregte Geothermalsysteme“) genannt. Es handelt sich hierbei um eine Energiegewinnung aus dem Gestein selbst, die weitgehend unabhängig von wasserführenden Strukturen ist. HDR-Systeme werden primär zur Stromerzeugung eingesetzt (z. B. Soultz-sous-Forêts in Frankreich).
  - Tiefe Erdwärmesonden: Energienutzung aus einer beliebigen Gesteinsabfolge mit geschlossenem Kreislauf des Wärmeträgermediums in der Sonde; nur zur Wärmeversorgung einsetzbar.

### 3.3 Oberflächennahe Geothermie in Bayern

Die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche in Bayern beträgt ca. 7 bis 12 °C; das Temperaturniveau im oberflächennahen Bereich ist daher relativ niedrig. Dennoch bietet sich für dieses Temperaturniveau ein breites Anwendungsspektrum in kleinen und mittleren dezentralen Anlagen zur Bereitstellung von Wärmeenergie und Klimakälte für

- Einfamilienhäuser bis hin zu Wohnsiedlungen,
- Büro- und Verwaltungsgebäude,
- öffentliche Gebäude, wie Schulen, Krankenhäuser, Museen, Schwimmbäder, Sport- und Freizeitanlagen und
- Gewerbebetriebe und Industriebauten.

Eine Anlage für die Erdwärmenutzung besteht typischerweise aus den Komponenten:

- Wärmequellenanlage (z. B. Erdwärmesonde),
- Wärmeübergabe- oder Wärmewandlungsanlage (z. B. Wärmepumpe, Kältemaschine) und
- Wärmenutzungsanlage (z. B. Heizkörper, Kühldecke).

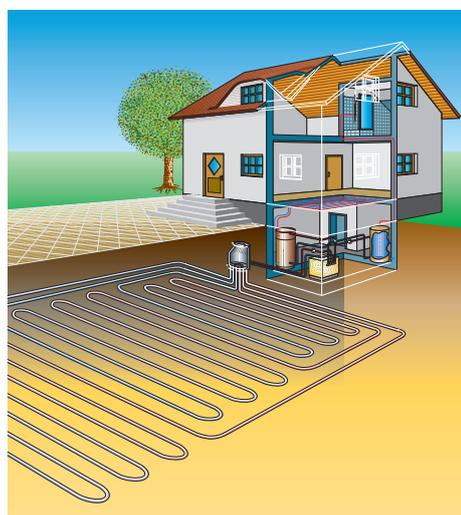
#### Wärmequellenanlage

Zur Erschließung der Erdwärme in Boden, Festgestein und Grundwasser steht ein breites Spektrum von Techniken zur Verfügung. Die wichtigsten Typen der Wärmequellenanlage sind

- der Erdwärmekollektor (↗ F23),
- die Erdwärmesonde (↗ F24),
- die Grundwasser-Brunnenanlage (↗ F25),
- erdberührte Betonbauteile und
- der thermische Untergrundspeicher.

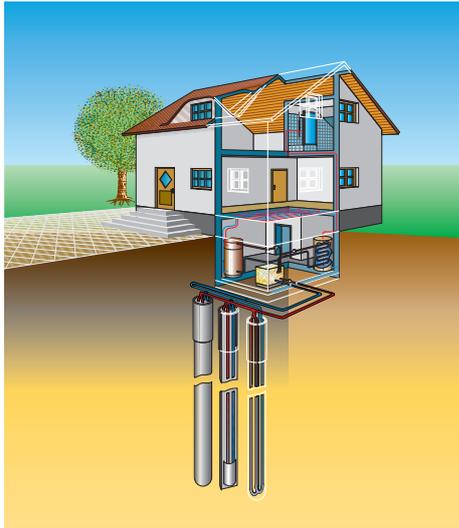
Sonderfälle im Übergangsbereich der oberflächennahen zur tiefen Geothermie sind

- die tiefe Erdwärmesonde (über 400 m Tiefe, z. B. in aufgegebenen Bohrungen) und
- die Erdwärmegewinnung aus Gruben- oder Tunnelwässern.

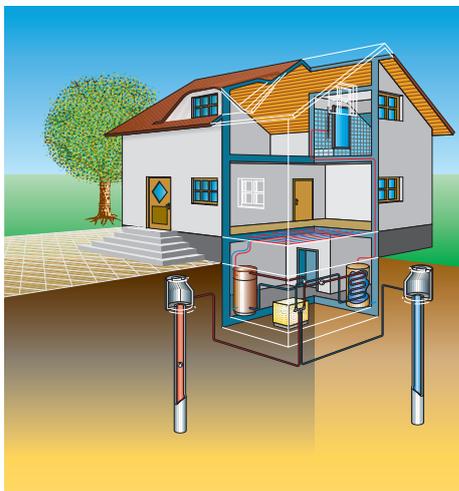


**F23** | Der Erdwärmekollektor ist ein Wärmetauscher, üblicherweise aus HDPE-Kunststoff, der als Rohrregister flächig in einer Tiefe von rund 1,2 – 1,4 m verlegt wird. Im Kollektor zirkuliert ein Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch (Sole), das die Wärme aus dem Erdreich aufnimmt und an die Wärmepumpe weiterleitet. Am Markt etablieren sich zunehmend auch Sonderbauformen.

**F24** | Die Erdwärmesonde ist eine meist vertikale Bohrung in Tiefen von bis zu 150 m, in die ein oder zwei U-Rohre oder seltener auch ein Koaxial-Rohr, üblicherweise aus HDPE-Kunststoff, als Wärmetauscher mit einem dauerhaft abdichtenden Spezialzement eingebracht sind. Den Wärmetransport übernimmt wie beim Erdwärmekollektor in den Rohren zirkulierende Sole.



**F25** | Die Grundwasser-Brunnenanlage nutzt direkt die im Grundwasser gespeicherte Wärmeenergie, indem ein oberflächennahes Grundwasserstockwerk über einen Förder- und einen Schluckbrunnen erschlossen wird.



### Wärmeübergabe- oder Wärmewandlungsanlage

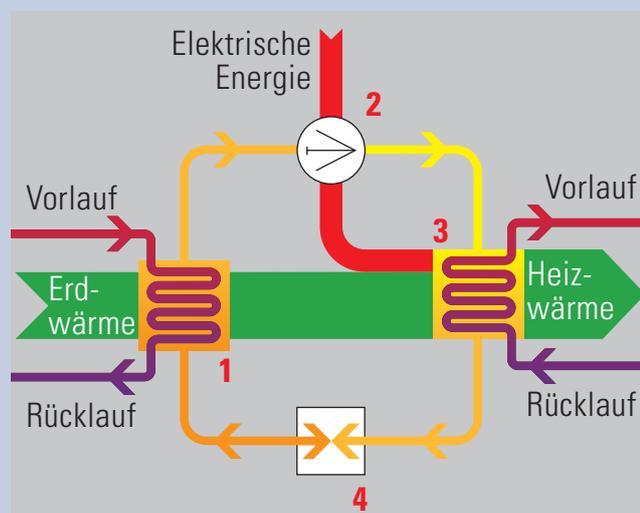
Während das Temperaturniveau im Bereich der oberflächennahen Geothermie für die Raumkühlung ohne zusätzliche Kältemaschine meist gut geeignet ist, ist für Heizzwecke in der Regel eine Wärmepumpe erforderlich.

Die Wärmepumpe ermöglicht es, thermische Energie durch den Einsatz von Hilfsenergie von einem niedrigen Temperaturniveau von beispielsweise 7 °C auf ein zum Heizen und zur Warmwasserbereitung nutzbares Niveau von 50 – 65 °C anzuheben.

Das Pumpen der thermischen Energie geschieht in einem geschlossenen Kreisprozess durch ständiges Ändern des Aggregatzustands eines Arbeitsmediums (Kältemittel). Es wird verdampft, verdichtet, verflüssigt und wieder entspannt (Carnot-Prozess). Hier speichert das Kältemittel beim Verdampfen auf dem niedrigen Temperaturniveau der Erdwärme (z. B. 7 °C) sehr viel thermische Energie in Form sogenannter Latentwärme und gibt diese beim Kondensieren auf einem hohen Temperaturniveau (z. B. 60 °C) an einen Wärmeverbraucher wieder ab. Um den kalten Arbeitsmitteldampf auf das hohe Temperaturniveau zu „pumpen“, muss er ledig-

### Der geschlossene Kreisprozess in einer Kompressionswärmepumpe

1. Im Verdampfer nimmt das kalte flüssige Arbeitsmittel Energie aus der Wärmequelle Erdreich auf und verdampft.
2. Der Kompressor verdichtet das dampfförmige Arbeitsmittel unter Verbrauch elektrischer Hilfsenergie und erhitzt es dadurch zu sogenanntem Heißgas.
3. Das Heißgas gibt im Kondensator seine thermische Energie an das Heizsystem ab und kondensiert zu warmem flüssigem Arbeitsmittel.
4. Das warme flüssige Arbeitsmittel wird am Expansionsventil entspannt, wobei seine Temperatur abrupt abnimmt. Im Verdampfer beginnt der Kreislauf von neuem.



**F26** | Funktionsprinzip einer Kompressionswärmepumpe.

lich in einem Kompressor verdichtet werden, wobei er sich – wie auch von der Luftpumpe her bekannt – stark erhitzt.

Für den Betrieb des Kompressors muss jedoch Hilfsenergie, meist in Form elektrischen Stroms, aufgewendet werden. Sorgfältig ausgelegte Wärmepumpen-Heizanlagen beziehen jedoch die abgegebene Heizwärme bis zu 80 % aus der Umwelt und nur zu 20 % aus der Hilfsenergie Strom.

Die Energieeffizienz einer Wärmepumpen-Heizungsanlage wird über die Jahresarbeitszahl gemessen. Die Jahresarbeitszahl gibt das Verhältnis zwischen der jährlich an das Gebäude abgegebenen Wärmeenergie und der dafür aufgewandten elektrischen Energie für Wärmepumpe inklusive Umwälzpumpen und Steuerung wieder.

Die konsequente Weiterentwicklung der Gebäudetechnik in Verbindung mit der Erdwärmenutzung ermöglicht heute bereits das ganzjährige vollständige Heizen, Kühlen und Klimatisieren. Die im Sommer aus der Raumkühlung und -klimatisierung im Überschuss vorhandene Abwärme wird beispielsweise über Erdwärmesonden in das umgebende Erdreich oder über Brunnenanlagen in einen Grundwasserkörper abgeleitet und dort gespeichert. Im Winter wird sie zum Heizen wiederverwendet. Moderne Wärmepumpenanlagen arbeiten hierzu im Sommer lediglich im Umkehrbetrieb als Kältemaschine, wie sie uns vom Kühlschranks her bekannt ist, oder werden ganz abgestellt. Diese energetisch besonders günstige Methode, auch als „freies Kühlen“ bezeichnet, erfolgt dann direkt durch die mittels Pumpen umgewälzte kühle Sole aus den Erdwärmesonden oder das kühle Grundwasser.

### 3.4 Tiefe Geothermie in Bayern

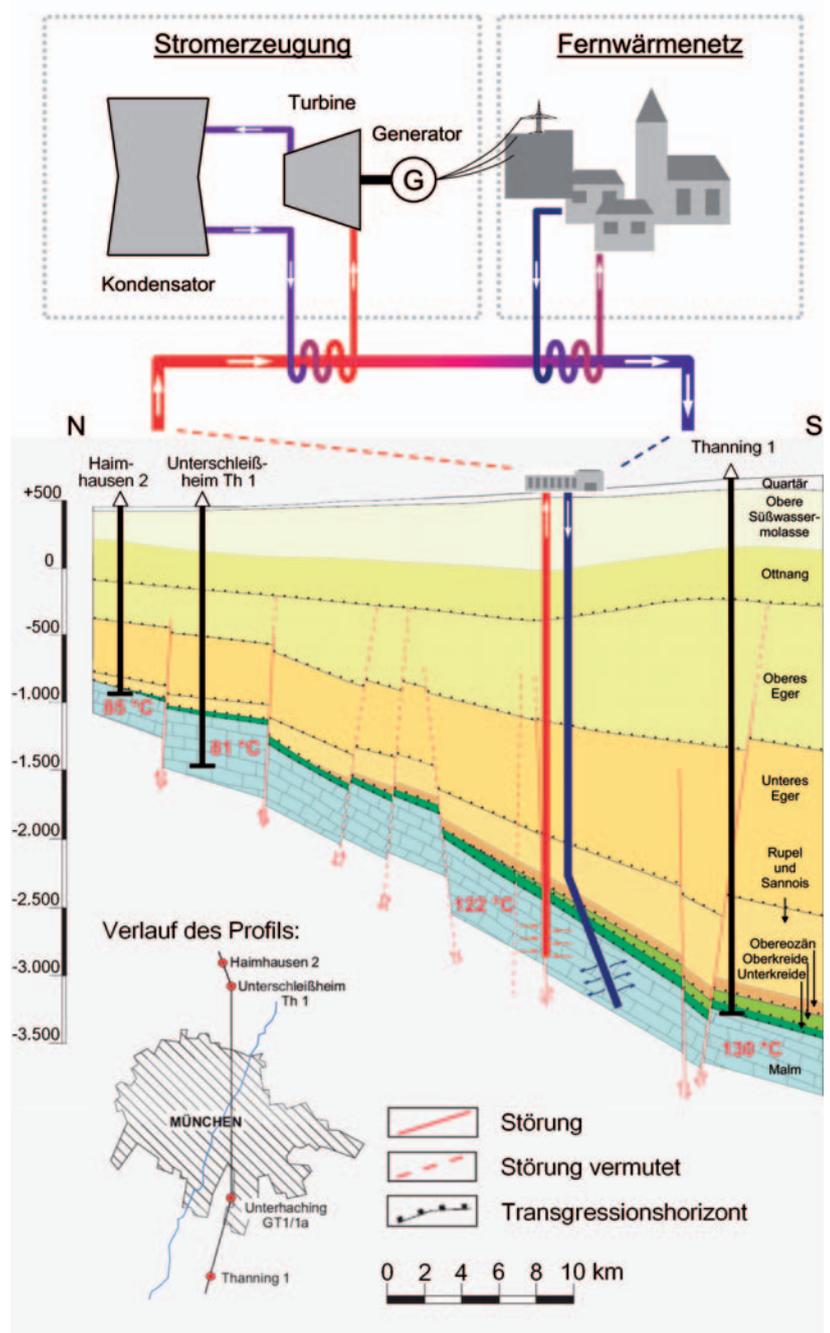
Die Nutzung der im tieferen Untergrund von Bayern gespeicherten Erdwärme ist grundsätzlich über zwei Arten möglich:

- Hydrothermale Energiegewinnung (Nutzung von Heißwasser-Aquiferen)
- Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR).

### Hydrothermale Geothermie

Die hydrothermale Geothermie nutzt Heißwasser-Vorkommen im tieferen Untergrund (mit Temperaturen von ca. 40 °C bis über 100 °C). Diese werden üblicherweise mit zwei Bohrungen („Dublette“) erschlossen, über die das heiße Wasser gefördert und im Hinblick auf eine nachhaltige Nutzung wieder in den Aquifer (Grundwasserleiter) reinjiziert wird. Die Wärmeenergie kann bei ausreichend hohen Temperaturen in einer geothermischen Heizzentrale direkt über Wärmetauscher an den Heiznetz-Kreislauf übertragen

F27 | Nord-Süd-Profilschnitt durch das bayerische Molassebecken im Großraum München. Die Thermalwassernutzung erfolgt in den wassererfüllten Karbonatgesteinen des Malm-Karsts, die nach Süden in Richtung der Alpen in immer größere Tiefen abtauchen. Aufgrund der Tiefenlage herrschen bereits südlich von München Temperaturen, die neben der Fernwärmenutzung auch die Stromerzeugung ermöglichen.



werden; andernfalls müssen Wärmepumpen zwischengeschaltet werden. Bei ausreichend hohen Temperaturen ( $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und Ergiebigkeiten ( $> 50\text{ l/s}$ ) ist auch eine geothermische Stromerzeugung möglich, wobei eine Nutzung in Kraft-Wärme-Kopplung aus ökologischer und ökonomischer Sicht von Vorteil ist. Ein Sonderfall der hydrothermalen Geothermie ist die balneologische Nutzung von warmen oder heißen Tiefenwässern in Thermalbädern.

### Hot-Dry-Rock-Verfahren

Beim Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR) wird in heißen, trockenen Tiefengesteinen durch die Erzeugung künstlicher Risse oder durch das Aufweiten natürlicher Rissflächen im Gebirge (*hydraulic fracturing*) eine hydraulische Verbindung zwischen mindestens zwei Bohrungen hergestellt. Die Risse dienen als Wärmetauscherflächen, so dass kühles Wasser in einer Bohrung verpresst und in der anderen Bohrung als Heißwasser mit Temperaturen von bis zu  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  wieder gefördert werden kann. Das Heißwasser kann Dampfdrücke erzeugen, die zum Betrieb konventioneller Wärmekraftwerksturbinen ausreichen.

Eine Schwierigkeit dieser Form der Energienutzung besteht hauptsächlich darin, geeignete Gesteinskomplexe zu finden. Sie müssen neben der hohen Temperatur eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen und zudem ein geschlossenes Zirkulationssystem gewährleisten, damit das eingepresste Wasser nicht verloren geht. Ferner muss das Gestein unanfällig gegen Lösungs- und Ausfällungsprozesse sein, damit ein kontrollierter Wasserkreislauf dauerhaft aufrecht erhalten werden kann. Diesbezüglich günstige Eigenschaften können insbesondere tiefe Granitgesteinskomplexe bieten.

Das HDR-Verfahren befindet sich derzeit noch im Versuchs- und Entwicklungsstadium (z. B. Soultz-sous-Forêts im französischen Teil des Oberrheingrabens und Basel in der Schweiz). Es ist daher davon auszugehen, dass in absehbarer Zeit in Bayern im tieferen Untergrund nur die hydrothermale Geothermie zum Einsatz kommen wird.

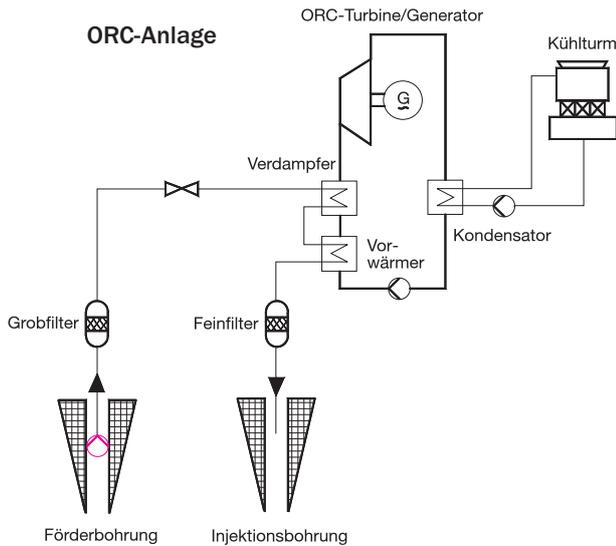
### Hydrothermale Wärme- und Stromerzeugung

Für die Wärmeengewinnung wird dem geförderten Thermalwasser in der Regel über einen übertägigen Wärmetauscher die Energie entzogen, um eine hydraulische und stoffliche Unabhängigkeit von Thermalwasserkreislauf und Fernwärmenetz zu gewährleisten. Bei ausreichend hohen Thermalwassertemperaturen kann die Wärme direkt in das Fernwärmenetz eingespeist werden. Ist die Thermalwassertemperatur niedriger als die erforderliche Vorlauftemperatur des Fernwärmenetzes, kann eine Wärmepumpe eingesetzt werden oder gegebenenfalls auch mit einem Brenner zugeheizt werden.

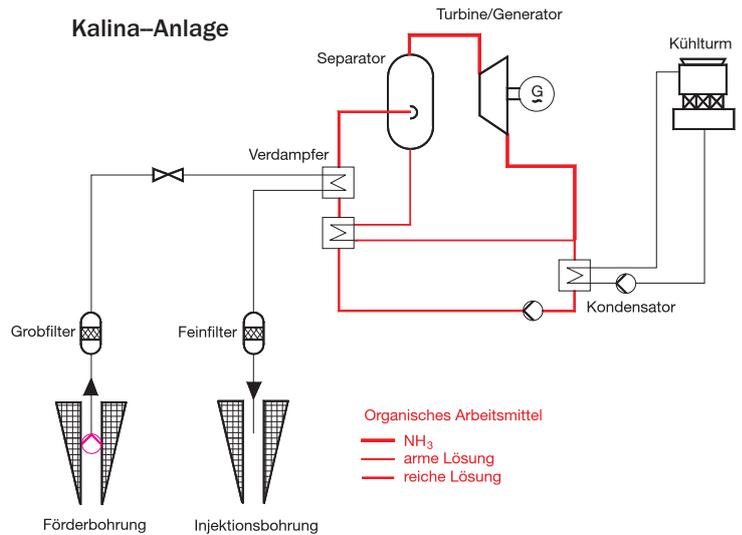
Bei der hydrothermalen Stromgewinnung sind in Bayern aufgrund der vergleichsweise niedrigen Temperaturen zwischen  $100$  bis  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  die erzeugbaren Dampfdrücke zu gering, um die Turbinen eines konventionellen Dampfkraftwerks anzutreiben. Deshalb wird hier auf sogenannte binäre Verfahren zurückgegriffen, in denen das Thermalwasser über einen Wärmetauscher ein spezielles Arbeitsmedium in einem Sekundärkreislauf erhitzt. Die eingesetzten Arbeitsmedien sieden bei normalem Luftdruck bereits weit unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Auf diese Weise können sogar mit Wassertemperaturen unterhalb des Siedepunktes noch Gasdrücke erzeugt werden, die für den Betrieb entsprechend konstruierter Turbinen ausreichen. Für die hydrothermale Stromgewinnung stehen zwei Systeme zur Verfügung:

Beim organischen Rankine-Prozess (Organic Rankine Cycle, ORC, [↗ F27](#)) kommen als Arbeitsmittel in der Regel Kohlenwasserstoffe zur Anwendung (n-Pentan, Isobutan); gelegentlich werden auch Fluorkohlenstoffverbindungen verwendet. Das Arbeitsmittel wird durch das Thermalwasser vorgewärmt und verdampft, anschließend in einer Turbine entspannt, kondensiert und durch eine Pumpe wiederum auf Verdampfendruck gebracht.

Beim Kalina-Prozess (benannt nach dem Erfinder, [↗ F28](#)) wird ein Zwei-Stoff-Gemisch, meist Ammoniak und Wasser, als Arbeitsmittel verwendet. Dieses Gemisch wird in einem Wärmetauscher vom Thermalwasser vorgewärmt und verdampft. Es entsteht ein ammo-



F28 | Schema einer ORC-Anlage zur hydrothermalen Stromgewinnung.



F29 | Schema einer Kalina-Anlage zur hydrothermalen Stromgewinnung.

niakreicher Dampf und eine ammoniakarme Flüssigkeit, die voneinander getrennt werden. Der Dampf wird in einer Turbine entspannt; im Anschluss daran werden Dampf und entspannte Flüssigkeit wieder zusammengeführt und gemeinsam zum Kondensator geleitet. Hier wird das Stoffgemisch verflüssigt und anschließend wieder auf Verdampferdruck gebracht. Zur Verbesserung der energetischen Effizienz werden in diesem Prozess meist auch Vorwärmer (Rekuperatoren) eingesetzt. Ein bedeutender Vorteil gegenüber ORC-Anlagen ist der höhere thermodynamische Wirkungsgrad, insbesondere bei niedrigen Vorlauftemperaturen (< 140 °C). Im Gegensatz zu den ORC-Anlagen, für die bereits umfangreiche Erfahrungen vorliegen, stehen die Kalina-Anlagen jedoch noch am Anfang der Entwicklung.

Bei der hydrothermalen Stromerzeugung erfolgt in der Regel eine Auskühlung des Thermalwassers auf ca. 70 °C. Sofern ein entsprechendes Nah- oder Fernwärmenetz zur Verfügung steht, kann der Stromerzeugung eine geothermische Heizzentrale nachgeschaltet werden oder die Restwärme unmittelbar in wärmeverbrauchende Industrie- und Gewerbeprozesse eingespeist werden. Diese Art der Kraft-Wärme-Kopplung ist aus ökologischer und ökonomischer Sicht besonders vorteilhaft.

### Nutzung hydrothermaler Energie in Bayern

Für die geothermische Nutzung von warmen und heißen Tiefenwässern mit einem wirtschaftlich interessanten Temperaturniveau über 40 °C sind die geologischen Verhältnisse in Bayern im bundesweiten Vergleich als günstig einzuschätzen. Das größte Potenzial für eine hydrothermale Energiegewinnung liegt hierbei sicherlich im Malmkarst des süddeutschen Molassebeckens zwischen der Donau im Norden und den Alpen im Süden.

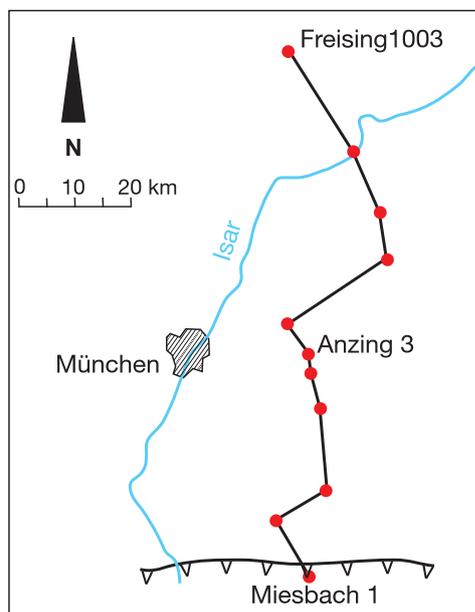
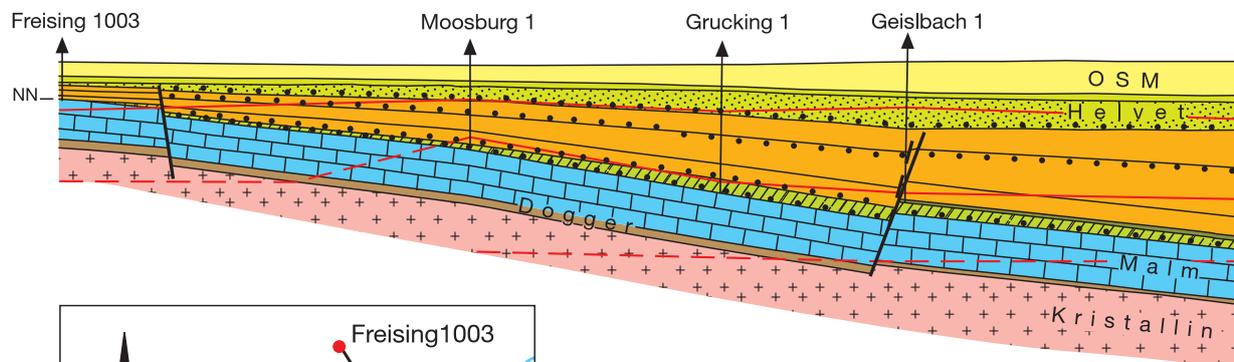
Der Malmkarst ist eine bis zu mehrere hundert Meter mächtige Kalksteinschicht, die im Erdzeitalter des oberen Jura (Malm, 157 – 142 Mio. Jahre vor heute) in einem flachen Schelfmeer abgelagert wurde. Am Ende des Malm zog sich das Meer aus dem Alpenvorland nach Süden und Südwesten in Richtung der Tethys, dem Vorläufer des heutigen Mittelmeers, zurück. Die Malmkarbonate fielen trocken und waren im Erdzeitalter der Kreide (142 – 65 Mio. Jahre vor heute), abgesehen von lokalen Überflutungen durch das wiederholt vorstoßende und sich wieder zurückziehende Kreidemeer, als Landoberfläche intensiven Verkarstungsprozessen ausgesetzt. Im Erdzeitalter des Tertiär (65 – ca. 2,6 Mio. Jahre vor heute) bildete sich im Vorland der aufsteigenden Alpen ein absinkendes Becken, das den Abtragungsschutt der Alpen, die sogenannte Molasse, aufnahm.

Der Malmkarst streicht heute nördlich der Donau als die sogenannte Schwäbisch-Fränkische Alb über Tage aus. Nach Süden hin fällt er unter den Ablagerungsgesteinen der Molasse bis zu Tiefen von über 5.000 m am Alpenrand ab. Aufgrund der Verkarstung und Klüftung stellt der Malmkarst einen hervorragenden Grundwasserleiter dar. Je nach Tiefenlage kann das Grundwasser im Malmkarst Temperaturen bis über 140 °C erreichen. Erdwärme in Form hydrothormaler Energie wird in Bayern bereits an verschiedenen Standorten energetisch oder zu balneologischen Zwecken genutzt. Gegenwärtig überwiegt in Bayern noch die balneologische Nut-

zung. Überwiegend energetisch genutzt werden warme oder heiße Tiefenwässer bislang (Stand 12.2008) nur in:

- Straubing
- Erding
- Simbach-Braunau
- Unterschleißheim
- München-Riem
- Pullach
- Unterhaching.

Weitere Projekte, auch zur geothermischen Stromerzeugung, wie z. B. in Unterhaching, sind begonnen oder in Planung.



- |   |  |
|---|--|
|  | Obere Süßwassermolasse                           |
|  | Obere Meeresmolasse und Obere Brackwassermolasse |
|  | Untere Meeresmolasse                             |
|  | Eozän  |

F30 | Nord-Süd-Profileschnitt durch das bayerische Molassebecken zwischen Freising und Miesbach mit den einzelnen Tiefbohrungen und Temperaturangaben im Untergrund.

### 3.5 Geothermieportal

Die Broschüre „Oberflächennahe Geothermie – Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund“ der bayerischen Staatsministerien für Umwelt und für Wirtschaft gibt einen Überblick zu den Grundlagen und technischen Varianten der Erdwärmennutzung, zur Genehmigung eines Vorhabens sowie weitere praktische Informationen.

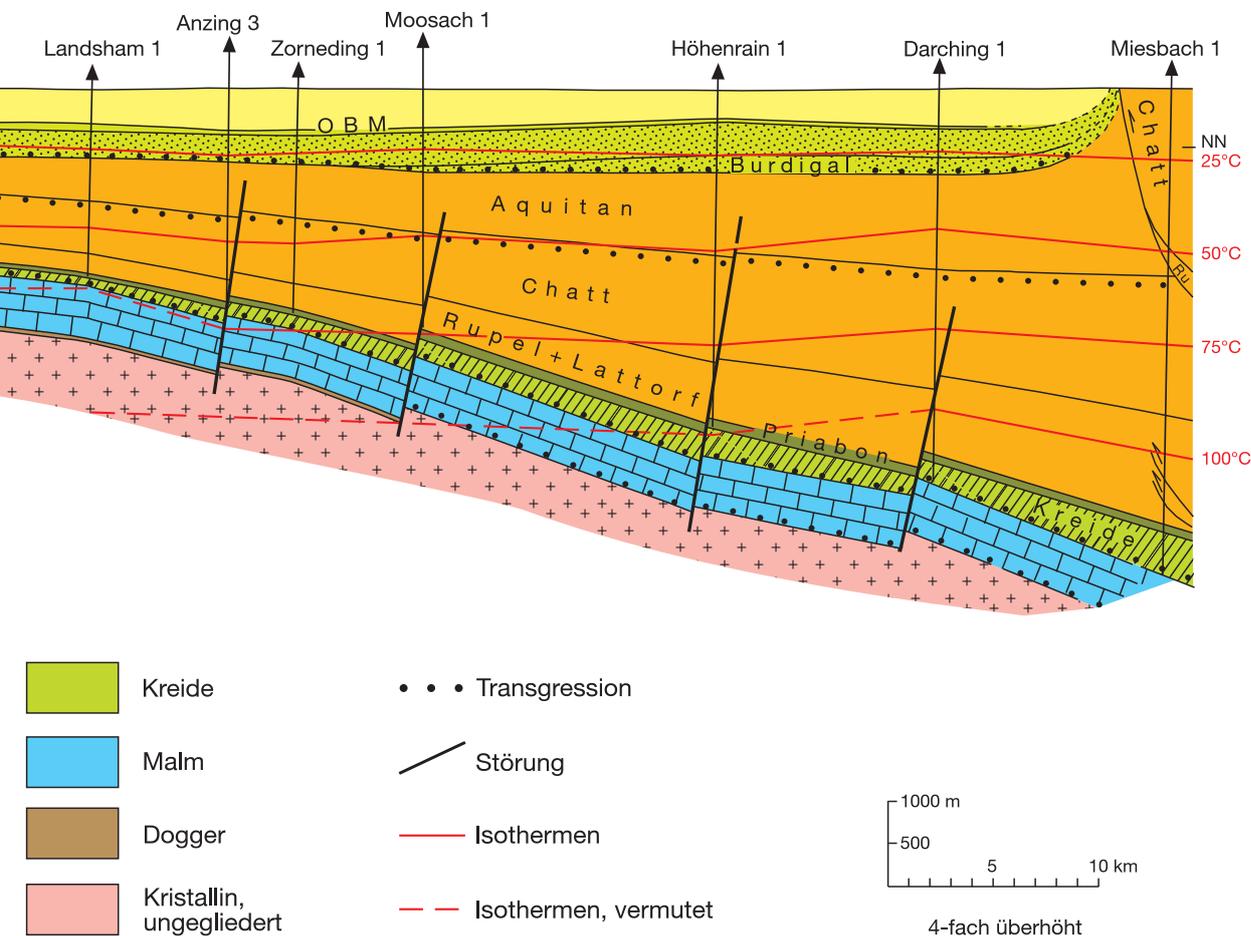
Die DVD-ROM „Oberflächennahe Geothermie – Übersichtskarte Bayern 1 : 200.000“ des bayerischen Umweltministeriums bietet eine Orientierungshilfe zur Eignung eines Standorts hinsichtlich der unterschiedlichen Techniken zur Erschließung der Erdwärmequelle und bezüglich der Restriktionsflächen.

Der „Bayerische Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung“ des bayerischen Wirtschaftsministeriums ermöglicht eine Einschätzung, wo in Bayern günstige Verhältnisse für eine hydrothermale Energiegewinnung vorliegen und mit welchen Bohrtiefen und Temperaturen zu rechnen ist. Er gibt darüber hinaus eine Einführung in die Verfahren der hydrothermalen Energiegewinnung, in deren wirtschaftliche Aspekte und die Risiken.

Seit 2008 gibt es eine Wanderausstellung „Geothermie“, die Möglichkeiten und Vorteile der oberflächennahen Geothermie darstellt und auch an Schulen gezeigt werden kann.

Alle diese Informationen sind einzusehen bzw. herunterzuladen im Geothermieportal des bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit unter

► [www.geothermie.bayern.de](http://www.geothermie.bayern.de).



## Weiterführende Literatur, Links und Karten (Auswahl):

Bayerisches Geologisches Landesamt 2001. Bodenschätze in Bayern, Steine und Erden, Erze, Industriemineralien, Salze und Brennstoffe. Karten im Maßstab 1:500000 und Beschreibungen – CD ROM, München.

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie 2004. Bayerischer Geothermieatlas, 104 S., München.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie 2003. Oberflächennahe Geothermie. Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund, 16 S., München.

Bergbaumuseum Theuern 2000. Gold, Zinn, Fluorit. Beiträge zur bayerisch-böhmischen Montangeschichte, Aufsatzband, 196 S.

Büttner, G., Pamer, R. & Wagner, B. 2003. Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern, GLA-Fachberichte, 20, 88 S.

Dingethal, F.J., Jürging, P., Kaule, G., Weinzierl, W. 1998. Kiesgrube und Landschaft, Handbuch über den Abbau von Sand und Kies, über Gestaltung, Rekultivierung und Renaturierung. 338 S., Auer, ISBN 978-3-40303-146-8.

Geozentrum Hannover 2005. geo.standpunkt „Rohstoffe“, 33 S., Hannover.

Helm, W. (Hrsg.) 2007. Granit, 264 S., ISBN 978-3-00023-087-5.

Pohl, W. 2004. Mineralische und Energie-Rohstoffe, 527 S., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, ISBN 978-3-51065-212-9.

Bayerisches Landesamt für Umwelt

▶ [www.lfu.bayern.de/geologie](http://www.lfu.bayern.de/geologie)

Geothermie-Portal

▶ [www.geothermie.bayern.de](http://www.geothermie.bayern.de)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

▶ [www.bgr.bund.de](http://www.bgr.bund.de)

### Herausgeber

Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Gesundheit (StMUG)

Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB)