

4 Gesteine und Schichtenfolge

Die kurzgefasste Beschreibung der Schichtenfolge soll lediglich einen schematischen Überblick über die Geologie Baden-Württembergs vermitteln. Ausführlichere Angaben enthalten die Erläuterungen zu den im Kap. 2 erwähnten Geologischen Karten. Eine zusammenfassende Darstellung der Geologie von Baden-Württemberg veröffentlichten GEYER & GWINNER (1991, Neuauflage in Vorbereitung). Geologische Vorgänge und Ablagerungen des Quartärs, vor allem des Pleistozäns, wurden von SCHREINER (1992b) behandelt. Regionale Beschreibungen und Exkursionsvorschläge sind in der Reihe „Sammlung geologischer Führer“ enthalten, aus der die Bände „Kraichgau und südlicher Odenwald“ (SCHWEIZER & KRAATZ 1982), „Karlsruhe und Umgebung“ (TRUNKÓ 1984), „Nordwürttemberg“ (BACHMANN & BRUNNER 1998), „Die Schwäbische Alb und ihr Vorland“ (GEYER & GWINNER 1984), „Hegau und westlicher Bodensee“ (SCHREINER 1976) sowie „Die Hochrhein-Regionen zwischen Bodensee und Basel“ (GEYER, O. F., SCHÖBER, T. & GEYER, M. 2003) vorliegen. Die Geologie von Hohenlohe wird von HAGDORN & SIMON (1985) beschrieben. Führer durch den Nordschwarzwald und den Hotzenwald hat METZ (1977, 1980) gearbeitet.

In den Kartenlegenden genannte geologische Einheiten, die auf baden-württembergischem Gebiet fehlen oder flächenmäßig unbedeutend sind, werden in den folgenden Erläuterungen nicht berücksichtigt.

Die Bezeichnungen der geologischen Einheiten in der vorliegenden Beschreibung entsprechen denen des Symbolschlüssels Geologie Baden-Württemberg (LGRB 2005). In den Geologischen Übersichtskarten i. M. 1: 200 000, in den Erläuterungen zu den Geologischen Karten in anderen Maßstäben und im allgemeinen Sprachgebrauch der Baupraxis werden allerdings oft davon abweichende Namen verwendet. Diese sind jedoch meist in den stratigraphischen Übersichtsprofilen (Abb. 1 bis 6) angegeben.

Kristallines Grundgebirge

Der Schwarzwald und Odenwald wurden durch tektonische Vorgänge so stark herausgehoben, dass die ursprünglich dort abgelagerten Sedimentgesteine durch Erosionsvorgänge abgetragen sind und das überwiegend aus Gneis und Granit bestehende Grundgebirge zutage tritt. Diese meist sehr harten und verwitterungsresistenten Gesteine besitzen eine hohe Tragfähigkeit, sind jedoch infolge der tektonischen Beanspruchung oft stark geklüftet. An Steilhängen besteht Steinschlag- und Felssturzgefahr.

Perm (p)

Rotliegend (r)

Senken innerhalb des Grundgebirges sind mit grobkörnigem Abtragungsschutt der kristallinen Gesteine verfüllt. Das Ausstrichgebiet dieser Konglomerate und Sandsteine ist jedoch eng begrenzt. Auch die zu dieser Zeit entstandenen harten, spröden und klüftigen Vulkanite (Quarzporphyr von Dossenheim, Oberkirch, Baden-Baden, Münstertal etc.) besitzen keine weite Verbreitung.

Zechstein (z)

Die bis etwa 10 m mächtigen Ablagerungen des Zechsteinmeeres (Tonstein und Dolomitstein) reichen von Norden her in den Randbereich von Baden-Württemberg hinein, sie streichen vor allem in der Umgebung von Heidelberg aus. Die durch die Verkarstung des Dolomitsteins verursachten ingenieurgeologischen Probleme sind wegen des kleinen Ausstrichbereichs und der geringen Dolomitmächtigkeit unbedeutend (BECKSMANN 1958).

Trias (tr)

In diesem geologischen Zeitalter war das süddeutsche Gebiet Teil eines ausgedehnten Beckens, in dem zunächst kontinentale Sedimente (Buntsandstein) abgelagert wurden. Während der Sedimentation des Muschelkalks war das Becken von Meerwasser überflutet. Die Sedimente der Keuperzeit schließlich entstanden in terrestrischen, brackischen oder selten auch marinen Ablagerungsräumen.

Buntsandstein (su, sm, so)

Der im Nordschwarzwald und Odenwald ausstreichende Untere Buntsandstein (su) besteht aus rotbraunen, selten hellgrauen Sandsteinen. Im Mittleren Buntsandstein (sm) schalten sich Gerölllagen in die Sandsteinbänke ein. Darüber folgen der feinkörnige Plattensandstein sowie die Röttone des Oberen Buntsandsteins (so; s. Abb. 1).

Die massigen Felsbänke des Mittleren Buntsandsteins sind außergewöhnlich verwitterungsbeständig. Große, quaderförmige Felskörper des Geröllsandsteins bilden an den Hangflanken oft ausgedehnte „Blockmeere“.

Aus dem höheren Buntsandstein sind mehrere geringmächtige ehemalige Bodenhorizonte be-

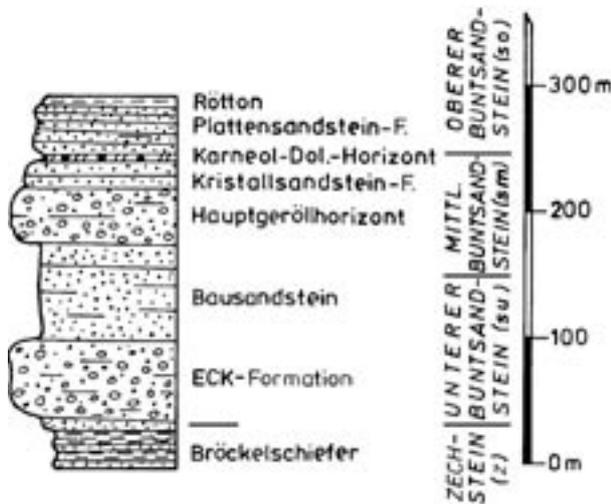


Abb. 1: Stratigraphische Übersicht des Buntsandsteins

kannt, die violettgraue oder dunkelbraune Färbung aufweisen. Sie besitzen eine erheblich geringere Festigkeit und Verwitterungsbeständigkeit als die Sandsteine. In verwittertem Zustand bestehen die fossilen Bodenbildungen aus schwach verkittetem Sand oder sandigem, oft weichem Schluff. Diese Gesteine und auch die Röttone neigen örtlich zu Rutschungen.

Muschelkalk (mu, mm, mo)

Der Muschelkalk besteht aus Ablagerungen eines Meeres, welches das seither kontinentale Germanische Becken überflutete.

Unterer Muschelkalk (mu)

Der etwa 30 bis 50 m mächtige Untere Muschelkalk besteht aus dünnbankigem, oft welligem, gelblichgrauem dolomitischen Mergelstein mit Dolomitsteinbänken sowie grauem Kalkstein. Er bildet gemeinsam mit dem Mittleren Muschelkalk den verhältnismäßig schwach geneigten Anstieg zur Schichtstufe des Oberen Muschelkalks. Im Gegensatz zu stratigraphisch höheren Kalksteinserien ist die Verkarstung des Unteren Muschelkalks (abgesehen vom Vorland des Odenwalds) meist gering.

Mittlerer Muschelkalk (mm)

Die löslichen Gesteine Steinsalz, Anhydrit und Gips verursachen im Ausstrichbereich des Mittleren Muschelkalks und auch im überlagernden Oberen Mu-

schelkalk häufig Baugrundprobleme. Die ursprüngliche Mächtigkeit des Mittleren Muschelkalks von etwa 70 m verringert sich bei vollständiger Auslaugung auf 20 bis 30 m; der unlösliche Rückstand besteht aus Schluff mit bröckeligem Tonstein sowie aus stückig zerfallenen Dolomitsteinbänken.

Die ingenieurgeologischen Folgen der Auslaugungsvorgänge werden im Kap. 6.4 beschrieben.

Oberer Muschelkalk (mo)

Der Obere Muschelkalk (Hauptmuschelkalk) bildet wegen seiner großen Mächtigkeit (etwa 60 bis 85 m) und seiner Verwitterungsbeständigkeit eine markante Schichtstufe. Er besteht aus grauen Kalksteinbänken, die durch dünne Tonstein- oder Mergelsteinlagen getrennt sind (Abb. 2). Im obersten, etwa 10 bis 20 m mächtigen Abschnitt der Schichtenfolge wird der Kalkstein von massigem, gelbgrauem Dolomitstein abgelöst (Trigonodusdolomit). Über den Karbonatgesteinen folgt eine meist nur geringmächtige Decke aus steinigem Verwitterungslehm.

Durch Anlösung oder Auflösung der Karbonatgesteine entstanden örtlich Karstformen, z. B. Trockentäler, Dolinen und Höhlen.

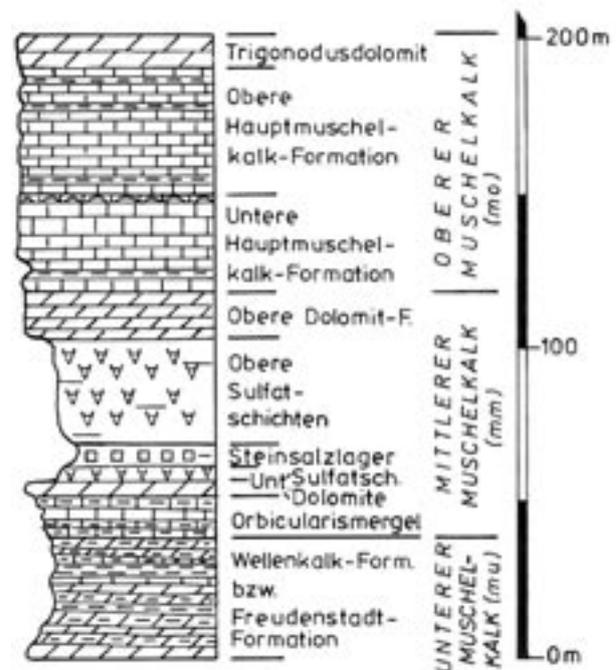


Abb. 2: Stratigraphische Übersicht des Muschelkalks

Keuper (ku, km, ko)

Die unterschiedlichen, meist festländischen Ablagerungsbedingungen zur Keuperzeit spiegeln sich in der wechselhaften Gesteinsausbildung der Keuperschichten wider (Abb. 3). In die relativ weichen, wenig verwitterungsbeständigen Ton- und Mergelsteine sind harte und kompakte Sandsteine eingeschaltet. Dies wirkt sich auch auf die Landschaftsformen aus: Hügeliges Gelände und mäßig steil geneigte Hänge kennzeichnen den Ausstrichbereich der tonigen Gesteine, mächtige Sandsteinlagen bilden dagegen oft Schichtstufen und Verebnungsflächen. Die nährstoffreichen Tonböden eignen sich für eine landwirtschaftliche Nutzung, auf den wenig fruchtbaren Sandböden (Schwäbisch-Fränkischer Wald, Stromberg, Schurwald, Schönbuch) kann jedoch meist nur Forstwirtschaft betrieben werden.

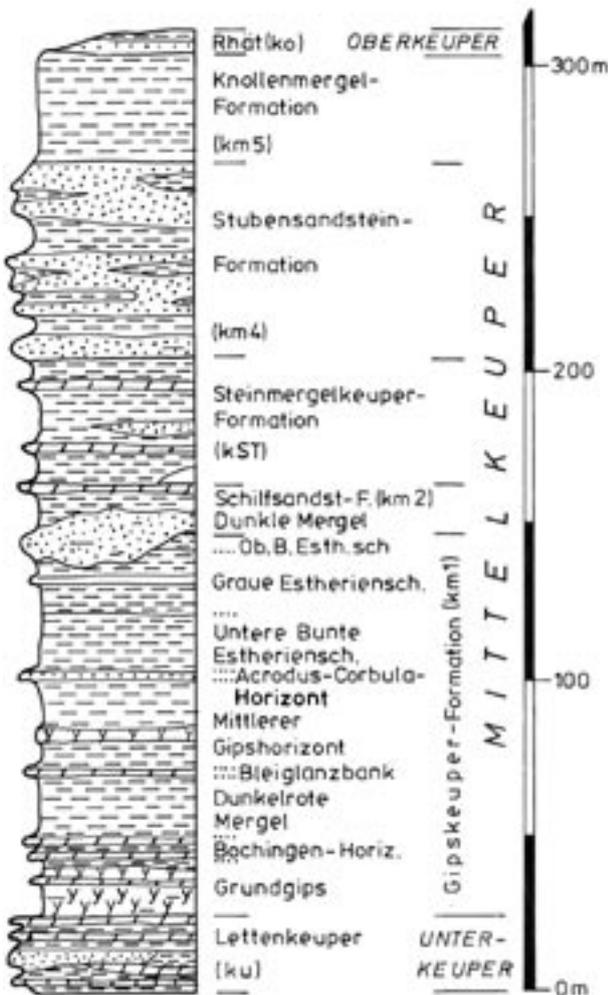


Abb. 3: Stratigraphische Übersicht des Keupers

Unterkeuper (ku)

Die Gesteinsausbildung des Unteren Keupers (Lettenkeupers) ist ähnlich wechselhaft wie die der gesamten Keuperschichten. Tonsteinlagen und Dolomitsteinbänke, dazu im tieferen Abschnitt ein bis 10 m mächtiger Sandsteinkomplex sind kennzeichnend. Trotz der geringen Mächtigkeit von etwa 15 bis 30 m ist der Untere Keuper auf der Schichtstufe des verwitterungsbeständigen Hauptmuschelkalks großflächig verbreitet.

Mittelkeuper (km)

Gipskeuper-Formation (km1)

Der etwa 70 bis 150 m mächtige Gipskeuper besteht überwiegend aus rotbraunen oder olivgrauen Tonsteinen und Schlufftonsteinen; ingenieurgeologisch besonders bemerkenswert ist die Anhydrit- oder Gipsführung (Grundgips, Mittlerer Gipshorizont). Die bautechnischen Schwierigkeiten, die aus Rutschungen im Bereich der Tonsteine und aus der Auflösung der Sulfatgesteine resultieren, werden in den Kapiteln 6.3 und 6.4 beschrieben. Auch im Untertagebau bereiten Quellvorgänge im Anhydrit bautechnische Probleme (Kap. 6.8).

Schilfsandstein-Formation (km2)

In den sandigen Tonstein des Schilfsandsteins sind bis zu 40 m mächtige Sandsteinstränge eingeschaltet, die seitlich auf kurze Distanz auskeilen können. Die Sandsteine wurden früher wegen ihrer leichten Bearbeitbarkeit (toniges Bindemittel) und ihrer lebhaften, braunroten oder gelbgrünen Farbtöne in vielen Steinbrüchen als Werksteine gewonnen.

Bunte Mergel-Formation (km3)

Diese 25 bis 60 m mächtige Schichtenfolge besteht aus dem rotbraunen Tonstein der Unteren Bunten Mergel („Rote Wand“), dem bis 20 m mächtigen, nach Westen auskeilenden Kieselsandstein sowie dem rotvioletten und grüngrauen Tonstein der Oberen Bunten Mergel.

Stubensandstein-Formation (km4)

Die Mächtigkeit des Stubensandsteins beträgt in der Baar etwa 20 m, nach Nordosten steigt sie rasch bis 100 m an. Gelbliche, oft grobkörnige und mürbe Sandsteine wechseln mit rotbraunen Tonsteinlagen ab. Die ausgedehnten Waldgebiete des Stubensandsteins am Keuperstufenrand werden von vielen tiefen



Bachrissen („Klingen“) durchzogen, die für diese Schichtenfolge typisch sind.

Knollenmergel-Formation (km5)

Der dunkelrote, 10 bis 40 m mächtige, ungeschichtete Tonstein des Knollenmergels ist in unverwittertem Zustand hart und standfest. Nahe der Erdoberfläche verwittert der Tonstein rasch, wobei durchfeuchteter Ton und Schluff entstehen, die in besonders starkem Maß zu Rutschungen neigen. Knollenmergelhänge besitzen daher charakteristische, buckelige Oberflächen mit feuchten Senken, die auf Bodenbewegungen hinweisen (s. Kap. 6.3).

Oberkeuper (ko)

Der dunkelgraue Tonstein und der gelbliche, feinkörnige Sandstein des Oberkeupers (Rhät) erreichen meist nur Gesamtmächtigkeiten bis 5 m. Örtlich, z. B. bei Tübingen-Pfrondorf, erhöht sich die Sandsteinmächtigkeit auf 10 m.

Jura (j)

Der Jura wird nach den kennzeichnenden Gesteinsfarben in Unterjura (früher: Schwarzer Jura, Lias), Mitteljura (früher: Brauner Jura, Dogger) und Oberjura (früher: Weißer Jura, Malm) unterteilt. Die wechselhafte Gesteinsausbildung und der Fossilreichtum erlauben eine detaillierte Gliederung des Juras (Abb. 4, 5).

Unterjura (Schwarzer Jura, Lias) (ju)

Psilonotenton-Formation, Angulaten-sandstein-Formation und Arietenkalk-Formation (früher Schwarzer Jura alpha) (he1, he2, si1)

Der Unterjura beginnt mit einer dunkelgrauen, durchschnittlich etwa 0,5 m mächtigen Kalksteinbank, der Ppsilonotenbank. Über 5 bis 10 m mächtigem, dunkelgrauem Tonstein (Psilonotenton) folgt sandiger Tonstein mit Sandsteinbänken, der dem 6 bis 16 m mächtigen Angulaten-sandstein angehört. Den höchsten Bereich der Schichtenfolge bildet der Arietenkalk, eine 5 bis 18 m mächtige Wechselfolge von Kalksteinbänken und dünnen Tonsteinlagen, die örtlich oben mit geringmächtigem bituminösem Tonstein (Ölschiefer) abschließt. Die Gesamtmächtigkeit der drei Schichten verringert sich von 50 m bei Plochingen auf 16 m bei Balingen.

Obtususton-Formation (früher Schwarzer Jura beta) (si2)

Die Mächtigkeit des dunkelgrauen Tonsteins schwankt zwischen 7 und 42 m, wobei das Maximum bei Mössingen liegt. Kennzeichnend für den eintönigen, zu Rutschungen neigenden Obtususton sind zahlreiche Schwefelkies- und Toneisensteinknollen.

Numismalismergel-Formation und Amaltheenton-Formation (früher Schwarzer Jura gamma und delta) (pb1, pb2)

Die aus grauem Mergel- und Kalkmergelstein bestehenden Numismalismergel (Schwarzer Jura gamma) besitzen bei Nürtingen eine Mächtigkeit von 13 m. In nordöstlicher und südwestlicher Richtung nehmen die Mächtigkeiten deutlich ab, bei Göppingen und Balingen werden jeweils nur noch 8 m erreicht. Ähnlich verhalten sich die Mächtigkeiten des überlagernden Amaltheentons (Schwarzer Jura delta). Das Mächtigkeitsmaximum des dunkelgrauen, pyritführenden Tonsteins liegt mit 27 m bei Boll; nahe Göppingen werden nur noch 9 m und bei Spaichingen etwa 16 m Amaltheenton angetroffen.

Posidonienschiefer-Formation und Jurensismergel-Formation (früher Schwarzer Jura epsilon und zeta) (tc1, tc2)

Der dunkelgraue, bituminöse und pyritführende Tonstein des Posidonienschiefers ist besonders wegen den zahlreichen gut erhaltenen Versteinerungen bekannt. Der 5 bis 14 m mächtige verwitterungsbeständige Posidonienschiefer bildet im Albvorland kleine Verebnungsflächen. Die Ursachen der in diesem Gestein festgestellten Baugrundhebungen werden im Kap. 6.8 beschrieben.

Der graue Mergelstein und die knolligen Kalksteinlagen der Jurensismergel erreichen bei Boll eine Mächtigkeit von 0,6 m, bei Balingen, Tübingen und Reutlingen von 3 bis 4 m sowie zwischen Kirchheim u. T. und Heubach von 7 bis 10 m.

Mitteljura (Brauner Jura, Dogger) (jm)

Opalinuston-Formation (früher Brauner Jura alpha) (al2M)

Wellige Geländeoberflächen mit feuchten Mulden und tiefen Bachrissen kennzeichnen den Ausstrichbereich des etwa 100 bis 130 m mächtigen Opali-

nustons. Dieser bildet meist verhältnismäßig flach geneigte Hänge am Fuß der Schwäbischen Alb. Hangneigung und Gesteinsausbildung begünstigten das Abrutschen großer Gesteinsschollen und oberflächennahe Gleitvorgänge in der durchfeuchteten tonigen Verwitterungsdecke, wodurch die oben erwähnte kuppige Geländeform entstand.

Eisensandstein-Formation bzw. Eichberg-Formation (früher Brauner Jura beta) (al2E bzw. al2)

In den dunklen, sandigen Tonstein sind feinkörnige Sandsteinbänke sowie einzelne Kalksteinlagen eingeschaltet. Hangneigung und Standsicherheit nehmen in der Eisensandstein-Formation (Ostalb) und in der Eichberg-Formation (Mittlere und Westalb) gegenüber dem Opalinuston infolge der höheren Festigkeit und Verwitterungsbeständigkeit der darin

enthaltenen Sandsteinlagen zu. Die geringste Mächtigkeit wurde mit etwa 40 m bei Balingen, die größte mit 75 m bei Nürtingen festgestellt.

Oberer Mitteljura (früher: Brauner Jura gamma bis zeta) (jmo)

Die dunkelgrauen, oft sandigen Tonsteine enthalten Sandstein-, Kalkstein- und Eisenoolithbänke, die eine Gliederung der insgesamt etwa 40 bis 140 m mächtigen Schichtenfolge ermöglichen (Abb. 4). Die Gesamtmächtigkeit des Oberen Mitteljuras beträgt bei Schwäbisch Gmünd etwa 35 m, in der Westalb dagegen über 100 m. Die mächtigen Tonsteine innerhalb der Wedelsandstein-Formation der Westalb neigen bei Durchfeuchtung zu Rutschungen.

Die Ornatenton-Formation (dunkelgrauer Tonstein mit eingelagerten Eisenoolithbänken) ist im Nordosten etwa 10 m, bei Hechingen bis 35 m und südlich Spai-

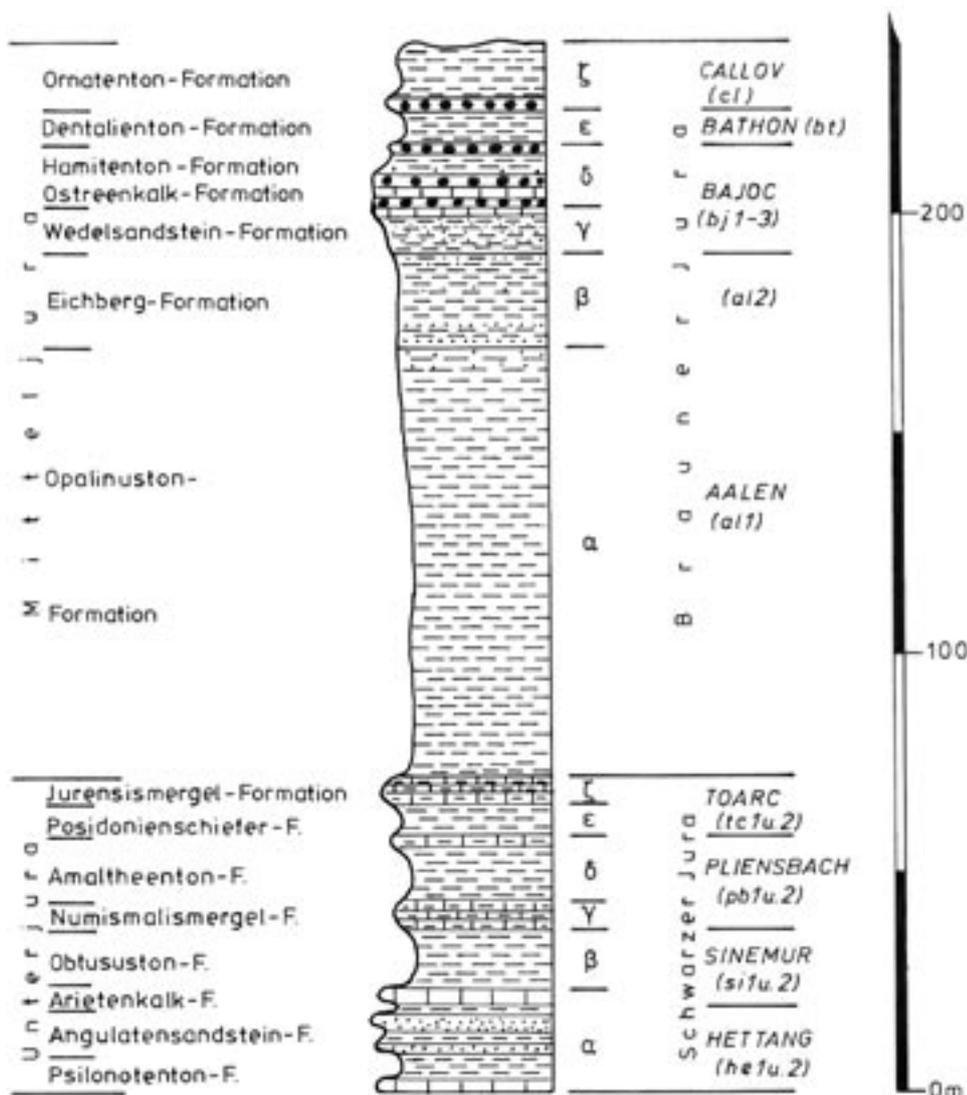


Abb. 4: Stratigraphische Übersicht des Unter- und Mitteljuras

chingen etwa 6 m mächtig. Am Albtrauf wird der Ornamenton oft durch Wasserzutritte aus dem überlagernden Oberjura durchfeuchtet und entfestigt. In dieser geologischen Einheit ereignen sich deshalb zahlreiche Rutschungen, bei denen auch mächtige Schollen der überlagernden Oberjuragesteine abgleiten.

Oberjura (Weißer Jura, Malm) (jo)

Im Oberjura (Abb. 5) ändern sich die Gesteinsfarben; die dunkelgrauen und bräunlichen, meist tonig-schluffigen Ablagerungen des Mitteljuras werden von hellgrauen, kalkigen und mergeligen Meeresedimenten abgelöst.

Impressamergel-Formation (früher Weisser Jura alpha) (ox1)

Die Impressamergel erreichen Mächtigkeiten von 80 m (Schwäbisch Gmünd), 115 m (Mittlere Alb) und 55 m (Geisingen). Die Mergelsteinfolge enthält einzelne Kalksteinbänke, die nach oben zahlreicher werden.

Wohlgeschichtete Kalk-Formation (früher Weißer Jura beta) (ox2)

Die „Wohlgeschichteten Kalke“, eine Wechselfolge von Kalksteinbänken und dünnen Mergelsteinlagen, besitzen in der Westalb ihre größte Mächtigkeit (über 80 m). Sie bilden dort die markante, meist bewaldete Schichtstufe des Albtraufs und auch einen Teil der Albhochfläche. Nach Nordosten nimmt die Mächtigkeit der „Wohlgeschichteten Kalke“ deutlich ab, bei Schwäbisch Gmünd beträgt sie nur noch etwa 22 m.

Lacunosamergel-Formation (früher Weißer Jura gamma) (ki1)

Die Lacunosamergel bestehen aus grauem Mergelstein, in den einzelne Kalksteinbänke eingeschaltet sind. Ihre Mächtigkeiten betragen in der Mittleren Alb wie in der Westalb zwischen 35 und 80 m.

Untere und Obere Felsenkalk-Formation, Liegende Bankkalk-Formation und Zementmergel-Formation (früher Weisser Jura delta, epsilon, zeta 1 und zeta 2) (kim 2 bis kim 5)

Die Schichtenfolge besteht aus gebankten Kalksteinserien (Untere Felsenkalke, Obere Felsenkalke, Liegende Bankkalke) sowie Mergelsteinlagen (Zementmergel).

Massenkalk-Formation (gesamter Oberjura) (joM)

Im Verband mit den oben beschriebenen gebankten Kalksteinen des Oberjuras treten auch massige Kalksteine auf, die in der Westalb örtlich bereits in den Impressamergeln einsetzen und auf der gesamten Schwäbischen Alb im höheren Oberjura dominieren, weshalb sie weite Teile der Albhochfläche bilden. Am Aufbau dieser Massenkalken waren kalkabscheidende Mikroorganismen und Kieselschwämme beteiligt, die am Meeresboden teils flache, teils kuppelförmige Riffe bildeten. Im höchsten Abschnitt der Oberjuras treten örtlich auch Korallen als Riffbildner auf, so z. B. im Blautal und bei Bad Urach. Die vermehrte Kalkausfällung in den Riffen hatte zur Folge, dass der Massenkalk örtlich eine doppelt so hohe Mächtigkeit erreicht als der zeitgleich abgelagerte Bankkalk. Gleichzeitig keilen die Mergelsteinbänke im Massenkalk aus oder werden zu dünnen Mergelsteinfasern reduziert. Die massige Ausbildung führte bei tektonischer Beanspruchung zu einer besonders intensiven, meist senkrechten Klüftung des Gesteins. Die hohe

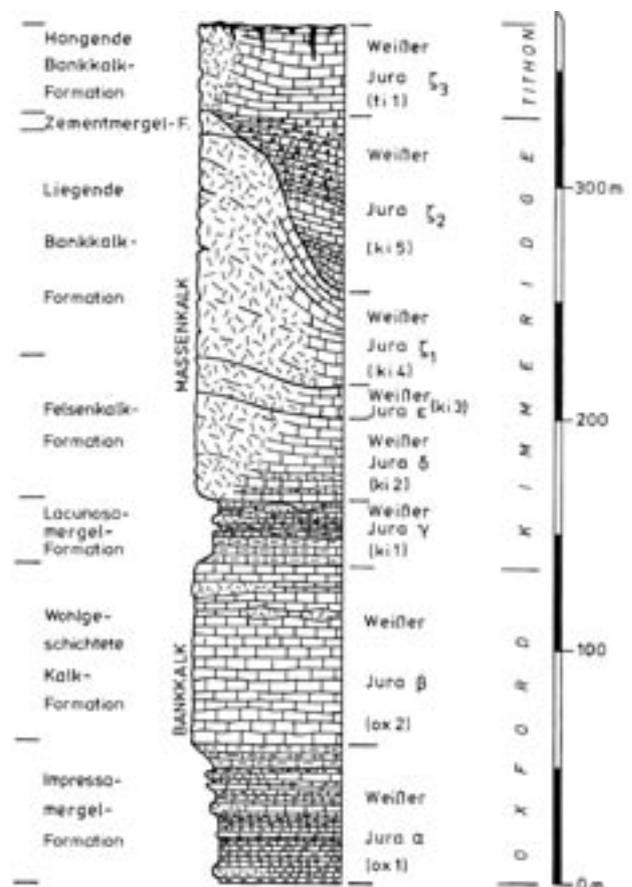


Abb. 5: Stratigraphische Übersicht des Oberjuras



Kluftdichte begünstigt die Wasserdurchlässigkeit des Massenkalks, deshalb fanden in diesem Bereich örtlich Gesteinsumwandlungen durch Zu- oder Abfuhr von Magnesium und Calcium statt (Bildung von Dolomitstein oder „zuckerkörnigem“ grobkristallinem Kalk). Die Zerklüftung erleichtert die Verkarstung des Gesteins (s. Kap. 6.4).

Hangende Bankkalk-Formation (früher Weißer Jura zeta 3) (ti1)

Da der höhere Abschnitt der Hangenden Bankkalke (gebankte Kalksteine mit Mergelsteinzwischenlagen) auf der Schwäbischen Alb abgetragen ist, kann die ursprüngliche Mächtigkeit der Hangenden Bankkalke nicht ermittelt werden. Auf der Westalb blieben noch maximal 80 m dieser Kalksteinserie erhalten.

Tertiär (t)

Bohnerz-Formation (tBO)

In der Kreidezeit und im Alttertiär herrschte ein überwiegend subtropisch-wechselfeuchtes Klima. Unter diesen klimatischen Bedingungen setzte eine „lateritische“ Verwitterung ein, bei der Kalk und Dolomit sowie ein Teil des geringen Quarzgehalts der Oberjuragesteine gelöst wurden (älteste Verkarstungsphase). Als unlöslicher Rückstand verblieb ein Gemisch aus Tonmineralen (Kaolinit), Eisenoxiden und -hydroxiden sowie dem nicht gelösten Quarz. Dieses Verwitterungsprodukt wird wegen der darin enthaltenen Eisenerzknöllchen als „Bohnerzlehm“ bezeichnet. Lehmdecken sind auf der Ostalb sowie westlich Thayngen und bei Liptingen verbreitet. Häufiger verfüllt der Bohnerzlehm bis über 20 m tiefe Karstspalten und Dolinen. Gründungen auf verkarsteten Kalksteinen erfordern wegen der unterschiedlichen Tragfähigkeit des harten Kalksteins im Vergleich mit setzungsfähigem Bohnerzlehm oder mit geologisch jüngerem Kalkverwitterungslehm oft Sondermaßnahmen (s. Kap. 6.4).

Tertiär-Sedimente des Oberrheingrabens (tOR)

Durch den Einbruch des Oberrheingrabens zu Beginn des Tertiärs entstand im Südteil des Grabens eine schmale tektonische Senke, die überwiegend mit Brackwasser gefüllt war. Hier bildeten sich im Oligozän zwei jeweils über 100 m mächtige Schichtenfolgen aus Ton- und Mergelsteinen mit eingelagerten Sandsteinschichten: im Unteroligozän die Streifige

Mergel-Formation und im Oberoligozän die Graue Mergel-Formation, welche Lagen der sandigen „Elsässer Molasse“ enthalten. Solche Schichtenfolgen neigen in Hanglage bei Wasserzufuhr aus den Sandsteinen in hohem Maße zu Rutschungen.

Molasse (tMO)

Südöstlich der Schwäbischen Alb ist der Oberjura von Gesteinen des Tertiärs überdeckt. Die Tonmergelsteine, mürben Sandsteine sowie Kalksteinbänke lagerten sich in der nördlichen Vorsenke der Alpen, dem Molassebecken, ab. Die Bezeichnung „Molasse“ wurde in der Westschweiz im Hinblick auf die geringe Widerstandsfähigkeit der mürben Sandsteinlagen geprägt (frz. „molesse“ = weicher, mürber Zustand).

Am Nordrand des zeitweise mit Süßwasser, zeitweise mit Meerwasser gefüllten Molassebeckens war die Wassertiefe weit geringer als im Zentrum des Beckens. Die gleichzeitig, jedoch in unterschiedlicher Wassertiefe, also in verschiedenartigen Sedimentationsräumen abgelagerten Gesteine differieren oft deutlich (Abb. 6).

Untere Süßwassermolasse (tUS)

Das Hauptverbreitungsgebiet der Unteren Süßwassermolasse liegt zwischen Meßkirch und dem Überlinger See. Über knolligen Süßwasserkalkbänken folgen im Norden wenige Meter, im Süden bis 800 m mächtige graugrüne, gelbrote oder violettrote, sandige Tonmergelsteine mit gelblichgrauen oder grünlichgrauen, feinkörnigen Sandsteinlagen und -linsen. Die mürben, feldspatreichen Sandsteine sind oft rinnenförmig in den Tonmergelstein eingetieft.

Am Nordrand des Molassebeckens, im Bereich der Lutherischen Berge und des Hochsträß, bilden die knolligen Süßwasserkalke der Ehinger und Ulmer Schichten gemeinsam mit geringmächtigem überlagerndem Sand eine etwa 20 m mächtige Schichtenfolge. Im Hegau entstanden bei Engen und Blumenfeld mehrere geröllführende Schuttfächer. Die flächenmäßig unbedeutenden Talfüllungen und Schwemmkegel aus gelbbraunem, kalkigem Schluff und Oberjura-Geröllen werden als Ältere Juranagelfluh bezeichnet.

Obere Meeresmolasse (tOM)

Nach der Ablagerung der Unteren Süßwassermolasse verbreiterte und vertiefte sich der Molassetrog, worauf Meerwasser in das Molassebecken einströmte. Der Nordrand des Molassemeers ist örtlich noch



als Geländestufe (Kliff) erkennbar. Dieses Kliff verläuft auf der heutigen Albhochfläche etwa entlang der Linie Tuttlingen – Harthausen a. d. Scheer – Temmenhausen–Altheim (Alb) – Heldenfingen – Herbrechtingen – Dischingen. Die unmittelbar südöstlich davon abgelagerten küstennahen Flachmeer-Sedimente bestehen aus geringmächtigem Konglomerat, grobkörnigem Sand oder Sandstein sowie Schalenrümmerkalk („Erminger Turrillenplatte“ auf dem Hochsträß, „Randen-Grobkalk“ bei Blumenfeld und Mauenheim).

Nach Südosten steigt die Mächtigkeit der Oberen Meeresmolasse bis auf etwa 250 m an (Ochsenhausen). Über den grobsandigen Basisschichten, die bei Überlingen als „Heidenlöcher-Sandstein“ bezeichnet werden, folgen graue, kalkhaltige, schluffig-feinsandige „Sandmergel“ und darüber der mit Muschelschalen durchsetzte Mittel- bis Grobsand der „Baltringer Schichten“ (alle glaukonitführend) sowie die feinsandigen „Deckschichten“.

Brackwassermolasse (tBM)

Ein von Nordosten kommender Fluss schnitt nach dem Trockenfallen des Molassemeers entlang der Linie Ulm – Zwiefalten – Meßkirch – Stockach – Singen ein 10 bis 15 km breites Tal in die zuvor abgelagerte Meeresmolasse ein. In der etwa 50 m tiefen Erosionsrinne, der „erweiterten Graupensandrinne“, wurden grobkörniger „Graupensand“ und feinkörniger Glimmersand (Grimmelfinger Schichten) sowie Tonmergelstein und glimmerreicher „Samtsand“ der Kirchberger Schichten abgelagert. Der obere, etwa 30 m hohe Abschnitt der Graupensandrinne wurde mit Sedimenten der Oberen Süßwassermolasse verfüllt.

Obere Süßwassermolasse (tOS)

Die in ausgedehnten Süßwasserseen oder von Flüssen auf einer Schwemmlandebene abgelagerten Sedimente der Oberen Süßwassermolasse erreichen ihre größten Mächtigkeiten im Süden nahe dem Zentrum des Molassebeckens am Schiener Berg (400 m) und östlich Isny (500 m). Entsprechend den Ablagerungsbedingungen ändern sich auch die Gesteine in vertikaler und horizontaler Richtung rasch. Ockergelber, graugrüner oder rötlichbrauner, z. T. feinsandiger Tonmergelstein wechselt mit grauem, glimmerführendem, schluffigem Fein- bis Mittelsand („Pfohsand“) ab. Einzelne Lagen oder knollen- bis zapfenförmige Partien des Sandes sind durch kalkiges Bindemittel verkittet. Am nördlichen Beckenrand sind nur inselartige, wenige Zehnermeter mächtige Vorkommen vor allem am Teutschbuch, Landgericht

und Hochsträß erhalten. In der Nähe von Gauingen bei Zwiefalten schaltet sich Süßwasserkalk in die Schichtenfolge ein.

Im Südteil des Molassebeckens schütteten die aus den Alpen kommenden Flüsse ausgedehnte Schuttfächer in das vorgelagerte Senkungsgebiet. Diese Schuttfächer enthalten bis etwa 25 m mächtige Konglomeratlagen, die am Pfänder und östlich Isny oft durch Kalk zu betonartiger Nagelfluh verkittet sind. Auch am Nordwestrand des Molassebeckens entstanden im Mündungsbereich einiger von der Albhochfläche kommender Flüsse Schuttfächer. Solche Schuttkegel der bis 40 m mächtigen „Jüngeren Juranagelfluh“ sind westlich und nördlich von Engen aufgeschlossen. Kleinere Schuttfächer entstanden bei Fridingen, Winterlingen und Nusplingen. Die rotbraune bis gelbbraune, tonig-schluffige Grundmasse enthält einzelne, wenige Meter mächtige Gerölllagen. Zwischen dem Donautal und Engen schneidet die Bundesautobahn A 81 in die Juranagelfluh ein (HAHN & SCHREINER 1976). Die bis 30 m hohen Einschnittsböschungen mussten durch Entwässerungs- und andere Sicherungsmaßnahmen stabilisiert werden (s. Kap. 6.3). Die in den Tonmergelsteinen der Oberen Süßwassermolasse enthaltenen quellfähigen Tonminerale können bei Wasserzutritt in Untertagebauten Sohlhebungen verursachen (s. Kap. 6.7).

Jüngere Magmatite (JM)

Vulkanische Gesteine prägen die Landschaften des Kaiserstuhls und Hegaus und bilden im Odenwald und Kraichgau eindrucksvolle Landmarken (Katzenbuckel, Steinsberg), sie spielen jedoch flächenmäßig nur eine untergeordnete Rolle.

Alb-Magmatite (tMA)

Im Bereich der Mittleren Alb und des nordwestlich anschließenden Albvorlands durchbrachen über 350 Vulkanschlote die jurassischen Gesteine. Die Röhren können Durchmesser von mehreren hundert Metern erreichen. Sie sind meist mit basaltischem Tuff sowie Trümmern der durchschlagenen Gesteine verfüllt, selten enthalten sie basaltisches Gestein. Trotz ihrer geringen Ausstrichfläche prägen manche Vulkanschlote das Landschaftsbild. Die vulkanischen Tuffe sind widerstandsfähiger als die Tonsteine des Albvorlands, deshalb bilden sie dort oft kegelförmige Berge (Limburg, Aichelberg). Auf der Albhochfläche ist das Gelände im Bereich der im Vergleich zum Kalkstein relativ weichen vulkanischen Tuffe muldenartig eingetieft (Randecker Maar, Schopflocher

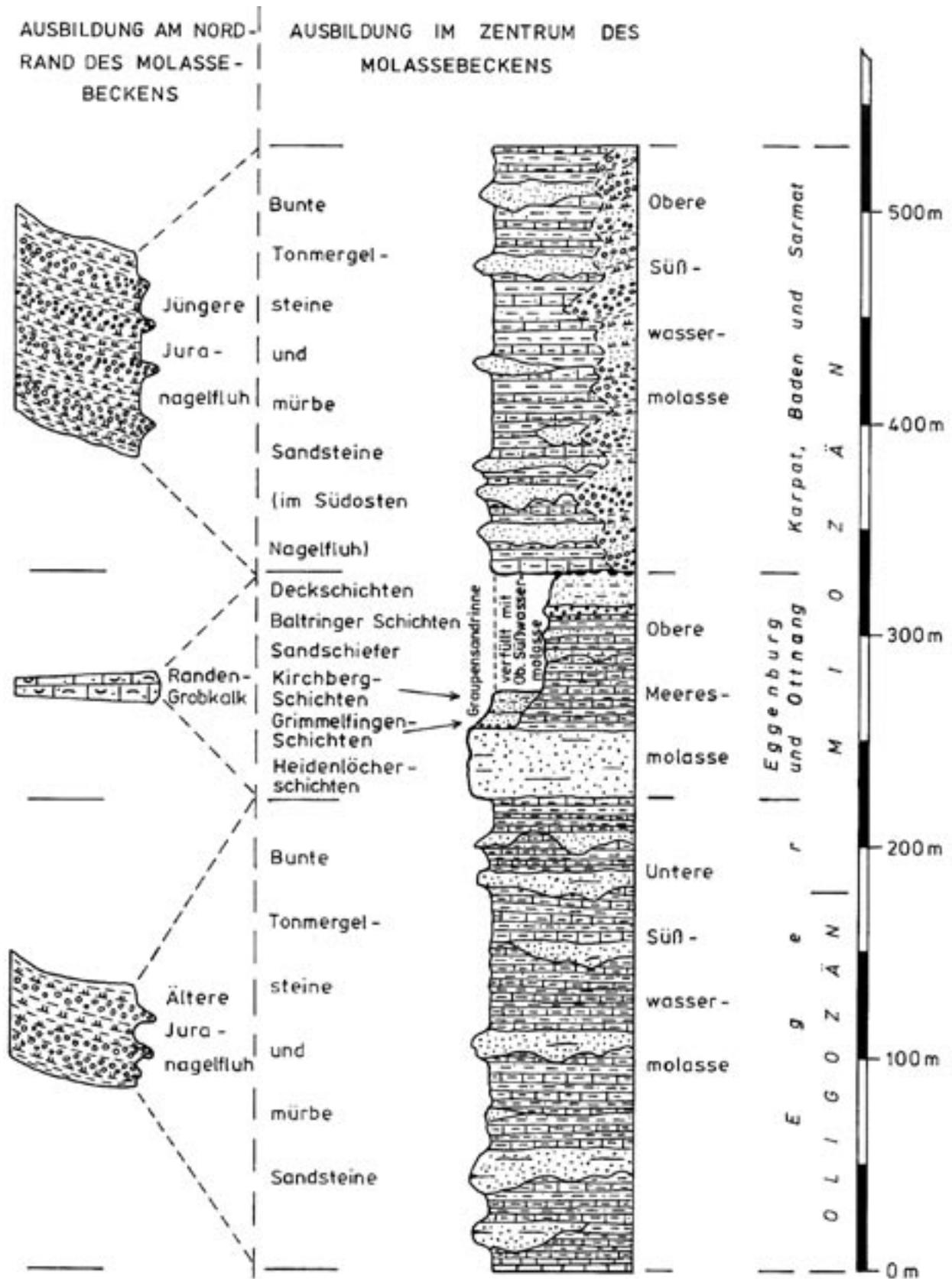


Abb. 6: Stratigraphische Übersicht des Tertiärs im Molassebecken

Hochmoor). Auf der wasserarmen verkarsteten Albhochfläche wurden früher im Ausstrichbereich der wenig wasserdurchlässigen Vulkanite Becken zum Sammeln von Niederschlagswasser (Hülen, Hülben) angelegt. Am Alaufstieg beeinflussten die Tuffe auch die Trassenführung der Bundesautobahn. Die A 8 wurde bei ihrer ursprünglichen Trassenführung in einer großen Schleife am Fuß des aus standfestem vulkanischem Tuff bestehenden Aichelbergs geführt, um den zu Rutschungen neigenden Opalinuston zu umgehen. Am Albrauf bilden die Tuffe tiefe, vertikale Hangnischen, in denen die Straßenkehren der Albsteigen von Bad Urach nach Böhringen und von Bad Urach nach Wittlingen angelegt wurden.

Bunte Trümmernmassen (XT)

Beim Einschlag eines kosmischen Körpers zur Zeit der Ablagerung der Oberen Süßwassermolasse wurde der Krater des Nördlinger Rieses ausgesprengt. Die dabei ausgeworfenen Gesteinsmassen bedecken auf baden-württembergischem Gebiet vor allem beiderseits der Egau südöstlich Neresheim große Flächen. Kleinstückig zertrümmerte Kalksteine des Oberjuras sind mit entfestigten Jura- und Keupertonsteinen zur „Bunten Brekzie“ vermengt. Die lokale Rutschneigung dieses Lockergesteins wird durch die tonig-schluffigen Komponenten und die Inhomogenität der Auswurfmassen verursacht.

Quartär (q)

Die geologisch jungen unverfestigten Lockergesteine sind bei bindiger Ausbildung in ingenieurgeologischer Hinsicht oft besonders problematisch und werden daher ausführlich beschrieben.

Pleistozäne Schichtenfolge (qpG)

Zu Beginn des Quartärs änderte sich das im Tertiär vorherrschende warme und ausgeglichene Klima. Mindestens fünf Kälteperioden (Günz-, Haslach-, Mindel-, Riß- und Würm-Kaltzeit) wechselten mit Warmzeiten (Interglazialen, Zwischeneiszeiten) ab. Während der Kaltzeiten, in den hochglazialen Phasen (Eiszeiten), drangen Gletscher aus den Alpen weit nach Oberschwaben vor und überfuhren zeitweise zwischen Sigmaringen und Riedlingen die Donau. Diese Eismassen führten im Alpenvorland zu intensiven Umgestaltungen des Landschaftsbilds (Ausräumung tiefer Seebecken, Ablagerung von Moränensedimenten). Auch im eisfreien Gebiet waren für das Pleistozän charakteristische geologische Prozesse wirksam, welche die Landoberfläche

durch Ablagerung von Schmelzwasserschottern, Löss und Fließerden sowie durch Frostschuttbildung veränderten.

Moränensedimente (qpm)

Das Gletschereis räumte nicht nur in den Alpen breite Trogtäler aus, sondern schürfte auch im Vorland Schollen des Untergrunds ab. Beim Nachlassen der Transportkraft im Alpenvorland wurden die alpinen Geschiebe mit aufgearbeiteten und zerriebenen Gesteinen vermengt und unter der Gletschersohle als **Moränensediment** (Geschiebemergel, Grundmoräne) wieder abgelagert. Infolge der Vorbelastung durch das Eis besitzt der Geschiebemergel eine hohe Lagerungsdichte. Der kalkhaltige Geschiebemergel enthält neben dem meist überwiegender Schluff auch Ton, Sand, Kies, Steine und Felsblöcke (Findlinge). Örtlich entstand durch Aufarbeitung von Molassetonsteinen oder Beckenton ein stark toniges Moränensediment. Sandig-kiesige Partien innerhalb der Grundmoräne bildeten sich bei der Ausschwemmung toniger und schluffiger Anteile durch eiszeitliches Schmelzwasser. Vor allem die kalkigen Geschiebe der jüngsten Eiszeit besitzen oft auffällige Schrammen, die während des Transports im Gletschereis durch Kontakt mit anderen Steinen entstanden („gekritzte Geschiebe“, Abb. 7). Mit Hilfe dieser „Leitgeschiebe“ können Moränensedimente gut von anderen Lockergesteinen unterschieden werden.

Würmeiszeitliche Moränenlandschaften besitzen meist stark kuppige und wellige Geländeoberflächen. Besonders typisch sind längliche, in Fließrichtung des Eises gestreckte, bis 20 m hohe Hügel. Diese „Drumlins“ (Abb. 8) treten oft in Scharen auf. Moränenlandschaften der Rißeiszeit besitzen dagegen ein im Vergleich mit der Jungmoränenlandschaft flacheres Relief, da hier die ursprünglichen Höhenunterschiede durch das Abgleiten des im Sommer aufgetauten Bodens („Bodenfließen“) ausgeglichen wurden.

Die intensiven Verwitterungseinflüsse bewirkten eine besonders tiefgreifende Umwandlung des meist grauen Riß-Geschiebemergels in braunen, kalkfreien, stärker bindigen **Geschiebelehm**. Nach WEIDENBACH (1937) betragen die Lehmmächtigkeiten über der Riß-Grundmoräne und den Riß-Schottern durchschnittlich 2 bis 4 m. In den nur nacheiszeitlich über einen kürzeren Zeitraum der Verwitterung ausgesetzten Ablagerungen der Würmeiszeit reichen die Verwitterungsbildungen dagegen meist weniger als 1 m unter die Geländeoberfläche.

Am Ende der Gletscherzungen wurde während der letzten großen Vergletscherung besonders viel



Abb. 7: Moränensediment an der Einschnittsböschung der Bundesautobahn A 96 bei Neuravensburg mit „gekritzten“ Geschieben. Durchmesser des größten Geschiebes 10 cm



Abb. 8: Drumlin bei Hiltensweiler, südwestlich Wangen im Allgäu. Fließrichtung des Gletschereises nach rechts

Gesteinsmaterial als **Würm-Endmoräne** abgelagert, weil das fortwährend abschmelzende Eis ständig weitere Schuttmassen akkumulierte. Die Endmoränen sind bogenförmige, flache, örtlich aber bis 50 m hohe Wälle aus Schluff, Sand und Kies mit groben Geschieben und Blockwerk. In der Nähe der ehemaligen Gletschertore haben Gletscherschmelzwässer die meisten Feinteile ausgeschwemmt. Südlich der äußeren Endmoräne sind weitere Endmoränen vorhanden. Sie wurden nach dem zwischenzeitlichen Zurückschmelzen des Eises in einer Phase abgelagert, in der das Gletscherende längere Zeit stationär war oder sogar wieder geringfügig vorstieß.

Schotter des Außenwallwürms (WAg)

Die Gletscherschmelzwässer durchbrachen am nördlichen Rand der vom Eis ausgeschürften Zungenbecken die Endmoränen. Die Schmelzwasserströme flossen, sobald die Eismassen die Wasserscheide zwischen Bodensee und Donau überschritten hatten, nach Norden ab. Sie führten vom Gletschereis herantransportierte Schuttmassen mit sich und lagerten Teile davon auf dem Weg zur Donau als mächtige Schotterkörper ab. Während der älteren Eiszeiten (Günz, Haslach, Mindel) war das Eisvorland wenig zertalt, die Schmelzwasserströme verlegten deshalb häufig ihre Flussbetten. Es entstanden die großflächigen Schotterfluren des **Deckenschotters**. Die Schmelzwasserflüsse der jüngeren Eiszeiten folgten den nach der Mindeleiszeit gebildeten breiten Abflussrinnen, wo sie in der Rißeiszeit die **Hochterrassenschotter** und in der Würmeiszeit die **Niederterrassenschotter** hinterließen. Der Deckenschotter ist tiefgründig, gelegentlich sogar bis zur tertiären Unterlage verwittert und entkalkt. Im Hochterrassenschotter greift die Verwitterung bis 4 m hinab. Der gelöste Kalk fällt oft im tieferen, unverwitterten Schmelzwasserschotter wieder aus und verkittet diesen zu betonartigem, schwer löslichem Konglomerat (Nagelfluh). Der Niederterrassenschotter trägt eine im allgemeinen weniger als 1 m mächtige Verwitterungsdecke aus kiesigem Lehm. Hier reichte der geologisch kurze Zeitraum seit der Ablagerung der Niederterrassenschotter zur Bildung größerer kalkig verkitteter Bereiche nicht aus.

Der hohlraumreiche glazifluviatile sandige Kies enthält oft erhebliche Grundwassermengen, die vielfach als Trinkwasser genutzt werden. Die Wasserführung kann die Entstehung von Rutschungen begünstigen, wenn unter dem Schotter Tonstein des Tertiärs, Moränensedimente oder Beckensedimente folgen.

In solchen Fällen bilden sich an der Obergrenze der bindigen Gesteine stark durchfeuchtete und aufgeweichte Schichten mit geringer Scherfestigkeit (s. Abschn. 6.3).

Beckensediment (qps)

In den tiefen, vom Eis ausgeräumten Zungenbecken, die im Südteil noch mit Eis verfüllt waren, staute sich vor der Gletscherstirn das Schmelzwasser, es entstanden Eisrandstauseen. Von Schmelzwasserflüssen mitgeführter grobkörniger Kies wurde in der Nähe des Eisrands abgelagert, im Wasser suspendierte Trübstoffe setzten sich in eisferneren Seebereichen als grauer, toniger Schluff mit unterschiedlich hohem Feinsandgehalt als Beckensediment (**Beckenton**, **Bänderton**) ab. Die typische Bänderung entstand durch die Ablagerung von dunkleren, tonig-schluffigen Lagen und helleren, feinsandigen Schichten (Abb. 9) in jahreszeitlichem Wechsel. Die auch regional unterschiedlichen Ablagerungsbedingungen kommen in dem breiten Kornverteilungsspektrum (Abb. 10) zum Ausdruck. Beckensedimente sind meist von geringmächtigen Moränen, Schmelzwasserschottern oder Torf überdeckt und daher nur selten aufgeschlossen.

Löss und Lösslehm (lo und lol)

Der **Löss** besteht aus gelbbraunem, schwach sandigem Schluff mit hohem Kalkgehalt und einem Porenvolumen bis 40 %. Er wurde aus den weiten, vegetationslosen Schotterfluren ausgeblasen, die sich während der Eiszeiten in breiten Tälern (vor allem in der Rheinebene) bildeten. Bei abnehmender Windgeschwindigkeit, z. B. hinter Hügeln oder Bergrücken, lagerte sich der ausgeblasene Staub als Löss ab. Die im Windschatten liegenden, nach Osten exponierten Leehänge sind daher besonders stark mit Löss bedeckt, wogegen die nach Westen geneigten Luvhänge meist lössfrei blieben. Die unterhalb der Schneegrenze vorhandene Pflanzendecke der eiszeitlichen Tundra begünstigte die Akkumulation des Lösses. Zusammenhängende Lössdecken sind daher vor allem auf den fruchtbaren Verebnungsflächen unterhalb 500 m NN erhalten, die in der Nacheiszeit nur wenig abgetragen wurden.

Wie die vorgenannten Ablagerungen unterlag auch der Löss eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Verwitterungseinflüssen. Lehmhorizonte zwischen unterschiedlich alten Lössen sind Bodenbildungen der Warmzeiten. In der Nacheiszeit, dem Holozän, lösten einsickernde kohlendioxidhaltige Niederschlagswässer den Kalkgehalt im obersten, meist etwa 0,5 bis



Abb. 9: Beckensediment in einer Tongrube bei Tannau, östlich Tetttnang

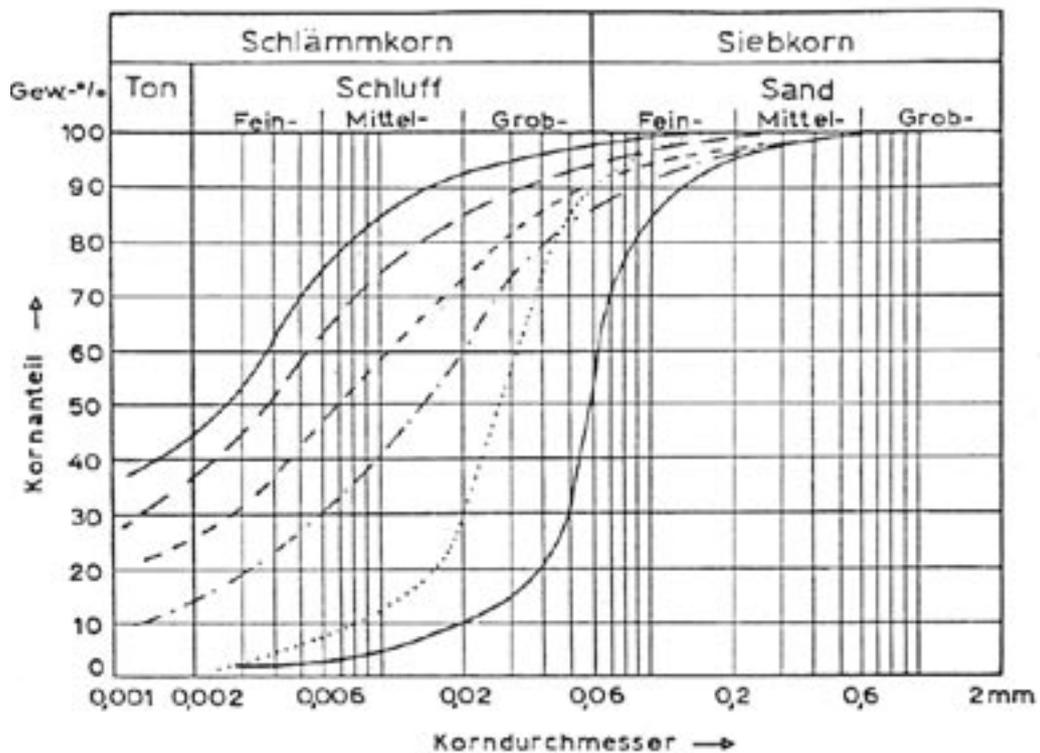


Abb. 10: Kornverteilung einiger Beckensedimentproben aus Baden-Württemberg

2,0 m mächtigen Profilabschnitt, wodurch der Löss in den braun gefärbten, stärker tonigen **Lösslehm** umgewandelt wurde. Eine geringfügige Zunahme des Tongehalts, die auf der Verwitterung der im Löss enthaltenen Feldspäte und der Umwandlung in Tonminerale beruht, kann beim Vergleich der Kornverteilungen repräsentativer Löss- und Lösslehmproben nachgewiesen werden (Abb. 11). Zusammenstellungen von Bodenkennziffern dieser Lockergesteine (sowie des Auenlehms und Schlicks) wurden von KNOBLICH (1968) und WAGENPLAST (1977) publiziert. GROSCOPF et al. (1977) ermittelten Steifziffern des Lösses und Lösslehms durch Rückrechnung aus Setzungsmessungen.

Pleistozän–Holozän

Residualton (ret)

Seit der Kreidezeit ist der Bereich der Schwäbischen Alb Festland. Die Kalksteine des Oberjuras wurden

in diesem Zeitraum nahe der Erdoberfläche durch Niederschlagswasser teilweise aufgelöst, wobei die unlöslichen Anteile, vor allem Tonminerale, Eisenhydroxid und Quarz (Feuersteinknollen), als „Kalkverwitterungslehm“ zurückblieben. Außerdem sind darin Abschwemmungen des Holozäns enthalten.

Hangschutt (qu)

In den Kaltzeiten wirkte die Frostverwitterung intensiv auf die felsigen Steilhänge im Grundgebirge, Mittleren Buntsandstein, Oberen Muschelkalk und Oberjura ein. Durch abwechselndes Gefrieren und Auftauen von Kluft- und Kapillarwasser wurde Gesteinsschutt von den Felswänden abgesprengt, der sich an den Hangfüßen ansammelte. Die Frostsprengung ist auch in der Nacheiszeit in abgeschwächter Form wirksam. Tonstein- und Mergelsteinlagen wurden im Verwitterungsbereich vollständig entfestigt. Durch diesen Vorgang entstand Verwitterungslehm, der in den Gesteinsschutt eingeschwemmt wurde.

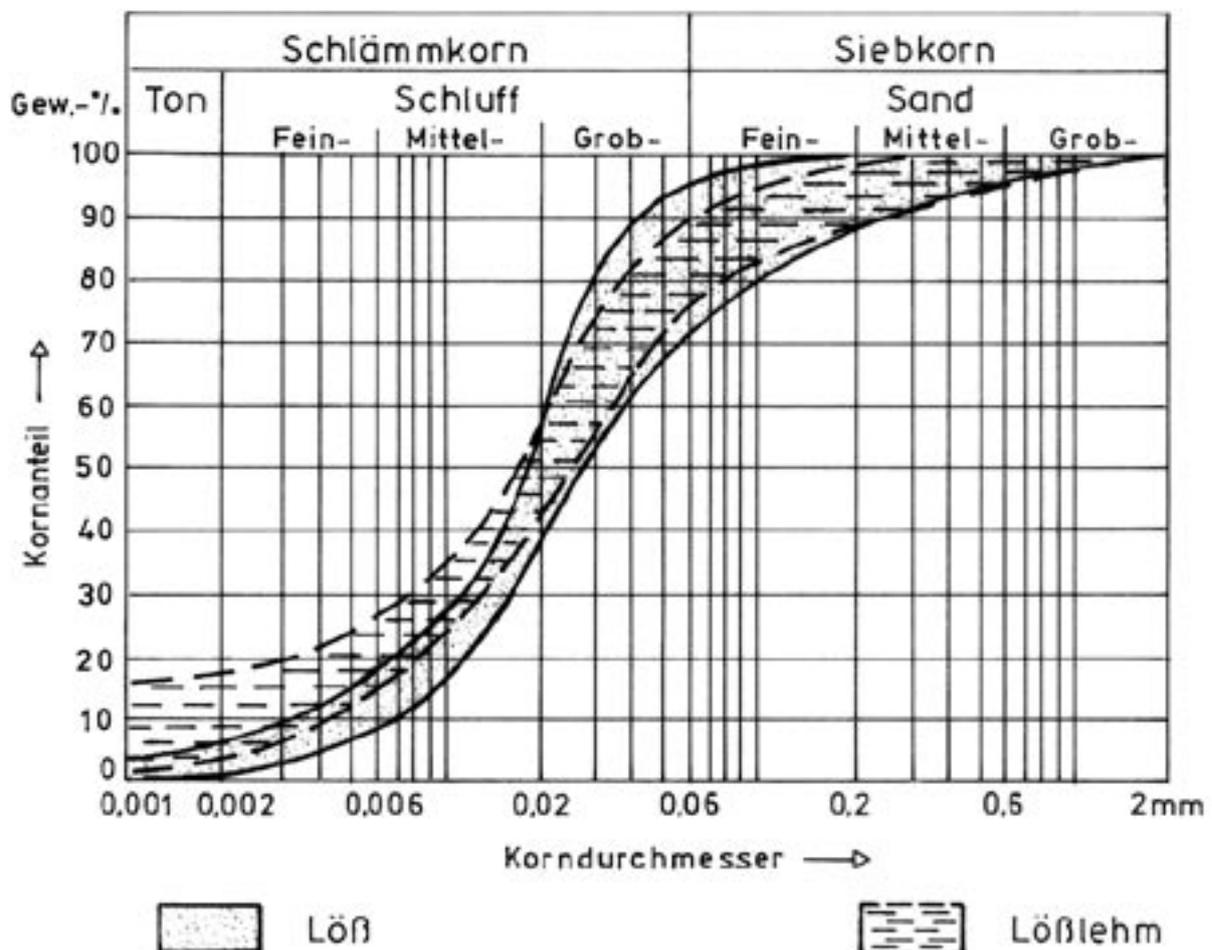


Abb. 11: Kornverteilung einiger Löss- und Lösslehmproben aus Baden-Württemberg

Am Albtrauf und im Albvorland lagern besonders ausgedehnte, maximal 20 m mächtige Massen aus Oberjura-Kalksteinschutt mit unterschiedlich hohem bindigem Anteil, die von WEIPPERT (1960) und SCHREINER (1992b) beschrieben wurden. Durch Kalkabscheidung aus Hangwässern sind einzelne Hangschuttpartien betonartig verkittet. Sie werden als „Nägelesfels“ bezeichnet.

Im Ausstrichbereich der weniger widerstandsfähigen Ton- und Mergelsteine sowie auch der rißeiszeitlichen Moränen ist die Hangneigung geringer. Hier entstanden tonig-schluffige Verwitterungsdecken, die in der letzten Eiszeit tiefgründig gefroren waren. Während des Sommers taute die oberste, bis etwa 2 m mächtige Bodenzone auf. Der stark durchnässte, breiige Oberboden glitt auf dem Dauerfrostboden zu Tal (Bodenfließen, Solifluktion) und lagerte sich bei abnehmender Hangneigung als „Fließerde“ ab, wobei Mächtigkeiten von mehreren Metern, im Extremfall nach SCHREINER (1992b) über 20 m akkumuliert wurden. Die nacheiszeitlich meist entwässerten und konsolidierten Fließerden enthalten in der bindigen Grundmasse oft Sandstein- und Kalksteinbröckchen. Wenn die grobkörnigen Komponenten überwiegen, wird weit transportiertes Material als Wanderschutt bezeichnet. Fließerden und Hangschutt können nicht immer scharf gegeneinander abgegrenzt werden.

Holozän (Nacheiszeit)

Junger Süßwasserkalk (qk)

Die aus kalkhaltigen Gesteinen des Oberjuras und des Muschelkalks entspringenden Quellen schütten stark kalkhaltiges Wasser. Die Menge des gelösten Kalks steigt mit zunehmendem Kohlendioxidgehalt des Wassers an. Wird dagegen dem Quellwasser Kohlendioxid entzogen, so fällt ein Teil des gelösten Kalks in der Umgebung der Quellen wieder aus. Die Verminderung des Kohlendioxidgehalts kann durch Druckentlastung, Erwärmung, starke Durchbewegung und (in geringerem Maß) durch assimilierende Pflanzen erfolgen. Oft findet die Kalkausfällung unmittelbar am Quellaustritt statt, wobei sich an steilen Talhängen Quellkalkriegel ins Haupttal vorbauen, über die der aus den Quellen gespeiste Bach in Kaskaden herabstürzt (Wasserfälle bei Unterdrackenstein, Bad Urach, Güterstein und im Glatttal). Ingenieurgeologisch bedeutsamer sind terrassenförmige Kalkabscheidungen im Bereich der Talsohlen, die sich oft über mehrere Kilometer erstrecken (Karte der Süßwasserkalkvorkommen der Schwäbischen Alb bei STIRN 1964). Der auch als Sinterkalk, Kalktuff oder Quellkalk bezeichnete Süßwasserkalk besteht teils aus mürbem oder hartem, hohlraumreichem Kalkstein, teils aus Kalkschluff,

lockerem Kalksand, Kalkgrus oder z. T. organischem Kalkschluff. Er besitzt deshalb sehr unterschiedliche ingenieurgeologische Eigenschaften. In diesem Zusammenhang ist der Basistorf zu erwähnen, der oft den Süßwasserkalk unterlagert (HAHN & SCHÄDEL 1973). Kleine Quellkalkpolster sind auch von Stubensandstein- und Moränequellen bekannt.

Der **Stuttgart-Travertin** (qkS), ein von kohlenstoffreichen Mineralquellen abgesetzter Kalk, entstand in Stuttgart, Bad Cannstatt und Untertürkheim in Warmzeiten des Quartärs. Dieser Quellkalk entspricht in seiner Entstehungsgeschichte und den ingenieurgeologischen Eigenschaften dem Süßwasserkalk.

Hochmoor (hh), Niedermoore (hn)

Abflusslose Mulden mit organischen Sedimenten bildeten sich in Oberschwaben vor allem in den vom Gletschereis ausgeräumten Zungenbecken. Kleinere Senken entstanden beim Abschmelzen von Toteisblöcken, durch Auslaugung und in Flussaltarmen. Moore bildeten sich ferner bei geringem Flurabstand des Grundwassers in den breiten Talauen von Riß und Donau. Hohe Grundwasserstände führten auch im Bereich flacher Talwasserscheiden zwischen den Einzugsgebieten des Rheins und der Donau zur Ausbildung von Torflagen. Beispiele hierfür sind die Senken zwischen Prim und Faulenbach, Eyach und Schmeie, Starzel und Vehla sowie Kocher und Brenz, wobei jeweils der mit geringem Gefälle zur Donau entwässernde Talabschnitt vermoort ist.

In Mooren lagern unter dem Torf oft feinsandiger Ton und Schluff mit organischem Material (**Schlick**), örtlich auch ein **mineralisches Seesediment** (Seekreide, Wiesenkalk). Darüber folgt **Niedermoortorf**, der aus zersetzten faserigen Pflanzenresten mit geringen eingeschwemmten Ton- und Schluffanteilen besteht und in Oberschwaben Mächtigkeiten bis 10 m (GÖTLICH 1960) erreichen kann. Ähnliche Mächtigkeiten von Schlick und Torf ermittelte SCHAAF (1925) im „Kupfermoor“ nördlich Schwäbisch Hall. **Anmoore** besitzen dagegen nur eine Mächtigkeit von wenigen Dezimetern.

Im Zentrum ausgedehnter Moore wuchsen Torfmoose oft über das Niveau des umgebenden Niedermoors empor, wobei der bis etwa 2 m mächtige **Hochmoortorf** entstand. Er ist nahezu frei von mineralischem Ton und Schluff.

Bach- und Flussablagerungen (qbt)

Während der letzten Eiszeit und in der Nacheiszeit lagerten Wasserläufe in den Tälern Lockergesteine

mit unterschiedlicher Korngröße und Mächtigkeit ab. Die Talablagerungen von Bächen mit starkem Gefälle beginnen an der Basis meist mit eiszeitlichem **Älterem Flussschotter** (Talschutt) aus teils kantigen, teils abgerundeten Gesteinsbrocken in sandiger und lehmiger Grundmasse. Auch die an der Einmündung kleiner Täler in das Haupttal sedimentierten **Schutfächer** bestehen zumeist aus unsortiertem, schlecht gerundetem Lockergestein.

Über dem Talschutt folgt in der Regel sandiger, gut gerundeter **Flussschotter** mit mehreren Metern

Mächtigkeit. Er ist meist von braunem, feinsandigem **Auenlehm** (Kornverteilung s. Abb. 12) bedeckt, der von schlammführenden Flusshochwässern abgelagert wurde.

In stehenden Gewässern wie Flussaltarmen, künstlichen Wassergräben oder Kiesgruben lagerten sich oft Schlack (Kornverteilung in Abb. 12), Torf und Süßwasserkalk ab. Die stark setzungsfähigen Sedimente wurden oben beschrieben.

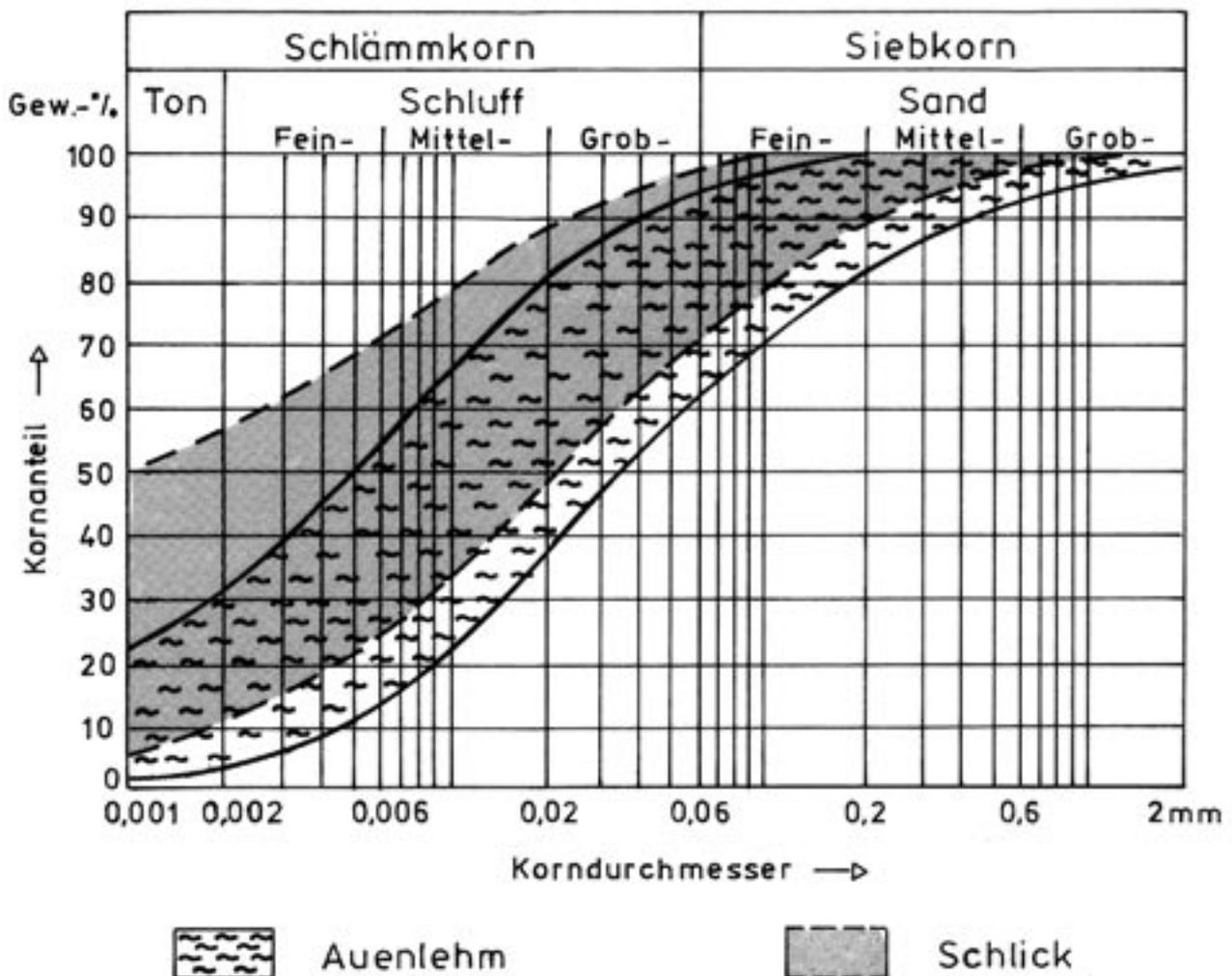


Abb. 12: Kornverteilung einiger Schlack- und Auenlehmproben aus Baden-Württemberg

5 Grundwasser

5.1 Grundwasser in Festgesteinen

Bei ingenieurgeologischen Beurteilungen müssen die Einflüsse des Wassers auf Baugrund und Bauwerk berücksichtigt werden. Niederschlagswasser, das nicht oberflächlich abfließt oder verdunstet, sickert in den Untergrund ein und bildet dort das Grundwasser. Im Grundwasserbereich sind die Hohlräume der Fest- und Lockergesteine vollständig wassererfüllt (wassergesättigte Zone).

Die Fließwege und Speicherräume des Grundwassers im Gestein sind von der Gesteinsart und ihrem Hohlraumvolumen (Porosität und Klüftigkeit) abhängig. Wasserlösliche Gesteine wie Gips, Kalk- und Dolomitstein enthalten oft außergewöhnlich große, durch Verkarstung (s. Kap. 6.4) entstandene Hohlräume. In solchen **Karstgrundwasserleitern** können in Gerinnen große Wassermengen mit hoher Geschwindigkeit abfließen. Die Wasserführung von verkarsteten Gesteinen muss daher vor allem bei Untertagebauwerken eingehend erkundet werden.

In den meisten Festgesteinen, z. B. Gneis, Granit, Sandstein, aber auch in gering verkarstetem Gips-, Kalk- und Dolomitstein, fließt Grundwasser im wesentlichen auf Klüften, die durch tektonische Beanspruchung dieser harten und spröden Gesteine entstanden oder sich nahe der Erdoberfläche durch Auflockerung und Hangzerreißen bildeten (**Kluftgrundwasserleiter**). In Sedimentgesteinen können auch offene Schichtfugen im Verwitterungsbereich Wasser führen. Die Wasserwegsamkeit variiert in Abhängigkeit von der Kluftdichte und Kluftweite erheblich. Lockergesteine sind **Porengrundwasserleiter** (s. unten). Die zahlreichen kommunizierenden Hohlräume dieser Gesteine bewirken meist eine gute Wasserwegsamkeit.

Im Gegensatz zu den erwähnten harten und spröden Gesteinen sind wasserführende Klüfte in Tonsteinen unter mächtiger Überdeckung seltener, weil tonreiche Gesteine bei tektonischer Beanspruchung bis zu einem gewissen Grad plastisch verformbar sind. Ferner quellen viele Tonminerale bei Wasserzutritt (s. Kap. 6.7), wodurch Fugen im Gestein abgedichtet werden. Tonsteine sind daher nahezu wasserundurchlässig (**Grundwassergeringleiter**) und bilden eine Grundwassersohlschicht, wenn sie unter grundwasserführenden Gesteinen liegen. Wechselfolgen unterschiedlich wasserdurchlässiger Gesteine prägen die Schichtstufenlandschaft Baden-Württembergs; in diesen Folgen sind oft mehrere übereinander liegende Grundwasserstockwerke

mit unterschiedlichen Grundwasserdruckhöhen vorhanden.

5.2 Grundwasser in Lockergesteinen

Die Porosität der Lockergesteine hängt von der Korngröße, der Sortierung und der Kornform, in manchen Fällen (z. B. beim Löss) auch von der Verfüllung der Poren mit Bindemittel ab. Grobe Körnung, einheitliche Korngröße und kantige Kornform vergrößern das Porenvolumen. Allerdings wird nur ein Teil dieses Volumens, der nutzbare Hohlraumanteil, vom Grundwasser durchströmt; Adhäsions- und Kapillarwasser (Haftwasser) ist an den Kornoberflächen fixiert. Hohlraumreiche grobkörnige Quartärablagerungen wie eiszeitliche Schotter, nacheiszeitliche Talkiese, Schwemmkegel und Hangschuttmassen enthalten oft bedeutende Grundwasservorkommen, die vielerorts zur Gewinnung von Trinkwasser genutzt werden. Bindige Lockergesteine (Moräne, Beckensediment, Seeton, Verwitterungslehm, Lösslehm, Auenlehm) sind dagegen nur wenig wasserdurchlässig. In manchen Lehmen werden Tonpartikel durch einsickernde Niederschlagswässer in tiefere Bereiche eingeschwemmt, die dadurch nahezu wasserundurchlässig werden. Bei langanhaltenden Regenfällen staut sich das Wasser auf den verdichteten Horizonten und füllt die Bodenporen und Trockenrisse des überlagernden Lehms, im Extremfall bis zur Erdoberfläche („überlaufende Böden“). In Trockenperioden wird dieses **Stauwasser** durch Versickerung, Verdunstung und wasserverbrauchende Pflanzen teilweise oder vollständig aufgezehrt.

5.3 Grundwasserschutz

Bei Baumaßnahmen muss sichergestellt werden, dass vermeidbare Beeinträchtigungen der Grundwasserbeschaffenheit und des Grundwasserdargebots unterbleiben. Für die Entnahme und das Ableiten von Grundwasser, z. B. bei Wasserhaltungen in Baugruben, ist eine Erlaubnis der Wasserrechtsbehörde erforderlich.

Besonders geschützt sind Grundwasservorkommen, die der öffentlichen Trinkwasserversorgung dienen oder als staatlich anerkannte Heilquellen genutzt werden. Im Einzugsgebiet der Wasserfassungen werden Schutzzonen mit unterschiedlichen Auflagen,

Verboten und Nutzungsbeschränkungen festgesetzt. Die Nutzungseinschränkungen vermindern sich im allgemeinen mit zunehmender Entfernung von den Wassergewinnungsstellen, also vom Fassungsbereich (Zone I) über die Engere Schutzzone (Zone II) zur Weiteren Schutzzone (Zone III). Bei Bauvorhaben in Wasserschutzgebieten müssen die in Rechtsverordnungen festgelegten Schutzbestimmungen eingehalten werden. Die allgemeinen Nutzungsbeschränkungen sind in den DVGW-Richtlinien (1995, Neufassung in Vorbereitung) festgelegt. Hier wird neben anderen Einschränkungen für die Schutzzone I und II ein Bauverbot verfügt; in der Schutzzone III kann eine Bebauung unter bestimmten Voraussetzungen (Vermeidung einer Verunreinigung des Untergrunds durch Abwässer und andere grundwassergefährdende Stoffe) erfolgen.

5.4 Bauen im Grundwasser

Zahlreiche Schadensfälle zeigen, dass Grundwasser die Baugrundeigenschaften in der Regel nachteilig beeinflusst. Bindige Lockergesteine mit hohem Wassergehalt sind bei Belastung stark setzungsfähig (s. Kap. 6.2), tonige Locker- und Festgesteine in Hangbereichen oder an steilen Böschungen neigen bei Wasserzufuhr zu Rutschungen (s. Kap. 6.3), in löslichen Gesteinen bilden sich Karsthohlräume (s. Kap. 6.4), manche Minerale quellen bei Wasserzutritt (s. Kap. 6.7 und 6.8).

Neben diesen allgemeinen, durch Grundwasser bedingten Baugrundgefahren müssen die lokalen Auswirkungen von Grundwasserzutritten in Baugruben beachtet werden. Erhebliche Wassermengen sind vor allem in Baugruben zu erwarten, die das Talgrundwasser anschneiden. Der Strömungsdruck des Grundwassers führt zum Nachbrechen der Wände von Baugruben, Kanalgräben und Schürfgruben. Oft sind Fließanderscheinungen oder das Ausspülen von Feinteilen aus dem benachbarten Untergrund festzustellen, in Einzelfällen bei langdauernder Wasserförderung auch eine Beschleunigung der Gipslösung. Besonders schwerwiegende Folgen können Grundwasserhaltungen mit ausgedehnten Absenkungstrichtern haben, wenn benachbarte Gebäude auf wasserhaltigen bindigen Ablagerungen gegründet sind, die sich bei Entwässerung stark setzen. Bei solchen Wasserhaltungsmaßnahmen sind vor Baubeginn Beweissicherungsverfahren und während der Bauzeit Setzungsmessungen an den Nachbargebäuden durchzuführen.

Nach dem Ende der Wasserhaltung muss die Auftriebssicherheit von Bauwerken, die in das Grundwasser reichen, gewährleistet sein.

Schichtwasserzuflüsse aus klüftigen Felsbänken sind (abgesehen von verkarsteten Gesteinen) meist weit weniger ergiebig als Grundwasserzutritte aus sandigen und kiesigen Talablagerungen. Noch geringer ist die Wasserzufuhr bei Sickerwasser aus Staunäsehohizonten. Die notwendigen Dräneinrichtungen müssen in Abhängigkeit von den anfallenden Wassermengen dimensioniert werden. Die Abschätzung der Wassermengen kann nach SMOLT CZYK (1990) erfolgen. Hierzu ist der Durchlässigkeitsbeiwert k des Gesteins im Labor (DIN 18 130), aus Feldversuchen (PRINZ 1997) oder aus Tabellen (z. B. MATTHESS & UBELL 2003) zu ermitteln.

Mineral- und Heilwasservorkommen, z. B. das Stuttgarter Mineralwasser, sind durch abgegrenzte quantitative Heilquellenschutzonen besonders geschützt. Belange des Heil- und Mineralquellenschutzes sind bei Baugrunduntersuchungen zu berücksichtigen. Bei Eingriffen in den Untergrund hat der Schutz des Mineral- und Heilwassers absoluten Vorrang.

5.5 Betonangreifendes Grundwasser

Grundwasser kann niedrige pH-Werte besitzen oder gelöste Substanzen enthalten, die Baustoffe (vor allem Beton) angreifen. In der DIN 4030 sind Methoden zur Untersuchung von Wasserproben auf Betonaggressivität zusammengestellt. Hierzu gehören die Ermittlung des pH-Wertes und der Härte sowie der Gehalte an kalklösender Kohlensäure, Sulfat, Chlorid, Magnesium, Ammonium und organischen Stoffen. Einige dieser Inhaltsstoffe können Indikatoren für anthropogene Verunreinigungen sein (Düngung, Salzstreuung, Abwässer, Sickerwässer aus Deponien). Meist sind jedoch die grundwasserdurchströmten Gesteine für die Betonaggressivität verantwortlich. Grundwasser, das kalkhaltige Locker- und Festgesteine (Löss, Sand und Kies der Niederterrasse, Kalksteine) durchflossen hat, greift Beton im allgemeinen nicht an.

Weiche Wässer sind an Calciumkarbonat untersättigt, sie lösen deshalb Kalkverbindungen aus Beton und Mörtel. Ihre Aggressivität wird oft durch niedrige pH-Werte (< 7) verstärkt, wobei die saure Reaktion meist durch Huminsäuren verursacht wird. Solche Wässer stammen vor allem aus dem Grundgebirge



und kieselig gebundenen Sandsteinschichten (Mittlerer Buntsandstein), da diese nur wenig Kalk oder Kalkfeldspäte enthalten. Moorwässer, vor allem aus Hochmoorgebieten, sind stets kalkarm und sauer, sie wirken daher besonders betonaggressiv.

Sulfidische Wässer sind an ihrem fauligen Geruch (Schwefelwasserstoff) zu erkennen. Der Schwefelgehalt stammt entweder aus zersetzter organischer Substanz (Wasser aus Schlickablagerungen) oder aus pyritführenden Gesteinen des Unter- und Mitteljuras (vor allem des Obtusustons, Posidonienschiefers und Opalinustons). Durch Oxidation der Sulfide können bei geringer Fließgeschwindigkeit Wässer mit hohen Sulfatgehalten entstehen.

Sulfatwässer bilden sich (abgesehen von den oben genannten Sedimenten) in gipsführenden Horizonten. Sie kommen daher im Mittleren Muschelkalk und Gipskeuper, vereinzelt auch in den Bunten Mergeln, dem Schilfsandstein, dem Unterkeuper und dem obersten Buntsandstein vor. Sulfate reagieren mit dem Kalkgehalt und den Tonanteilen des Betons

unter Bildung des Minerals Ettringit, eines wasserhaltigen Calcium-Aluminium-Sulfats. Dieser chemische Vorgang ist mit einer Volumenvergrößerung verbunden, die zum Zerfall des betroffenen Betons führt.

Kohlensäurehaltige Wässer enthalten freie, kalklösende Kohlensäure (gelöstes Kohlendioxid). Sie entspringen den bereits genannten kalkarmen Gesteinen. Extrem kohlensäurereich und kalkaggressiv sind viele Mineralwässer („Säuerlinge“), wie z. B. die Wässer von Stuttgart-Bad Cannstatt.

Bei Bauvorhaben in geologischen Horizonten, die betonaggressives Grundwasser enthalten können, müssen Wasserproben nach den Vorgaben der DIN 4030 entnommen und untersucht werden.

Bei der Beurteilung der Aggressivität eines Grundwassers sind außer den Inhaltsstoffen die Fließgeschwindigkeit des Wassers (Durchlässigkeit des Bodens) sowie die Dauer des Einwirkens des Grundwassers (z. B. bei starken Wasserspiegelschwankungen) zu berücksichtigen.