

6 Erkundung von Naturwerksteinvorkommen

– WOLFGANG WERNER, mit einem Beitrag
von FRIEDRICH GRÜNER –

6.1 Vorbemerkungen, Erkundungsbedarf und -ziele

Die Erkundung von Rohstofflagerstätten gehört zu den besonders vielfältigen und anspruchsvollen Tätigkeiten von Geowissenschaftlern und Geotechnikern. Mit zunehmender Wechselhaftigkeit und Komplexität der Lagerstättenkörper wachsen die Anforderungen an die Prospektoren (Abb. 6.1-1). Erfolgreich kann Lagerstätten erkundung nur sein, wenn die Prospektoren über eine Reihe von verschiedenen Kenntnissen verfügen, nämlich über die Geologie des Aufsuchungsgebiets, über die Techniken, mit der Lagerstätten erkundet, erschlossen und abgebaut werden können, und über die wirtschaftlichen und technischen Anforderungen seitens der Rohstoffverarbeiter und -nutzer.

Dieses Kapitel gibt Informationen zur Planung und Durchführung der Erkundung von heimischen Werksteinvorkommen. Zugleich ist es ein Plädoyer dafür, dass moderne Methoden auch bei der Werksteinerkundung verstärkt angewendet und die vielen vorhandenen Informationen aus dem Bereich der Geowissenschaften genutzt werden, einerlei ob alte Steinbrüche wieder reaktiviert oder ob neue angelegt werden sollen.

In früheren Jahrhunderten standen an technischen Geräten lediglich Hacke, Keilhaue, Spaten und Hammer zur Verfügung, um eine Lagerstätte auffinden und erschließen zu können. Erfolgreich waren die Arbeiten der Alten trotzdem häufig. Sie verfügten über hervorragende Ortskenntnisse und Naturbeobachtung¹ sowie über viel Erfahrung bei der Steinprüfung im Feld. Auch Zeit wurde in die Aufsuchung in größerem Umfang investiert als heute. Wir können uns effektiverer Techniken bei Erkundung und Gewinnung bedienen, doch praktische Erfahrung und gute geologische Kenntnisse bleiben der Schlüssel zum Erfolg. Nach wie vor ist Lagerstätten erkundung aufwändig, oft teuer und meist auch langwierig.

Ein großer Vorteil gegenüber der Situation früherer Prospektoren ist die Verfügbarkeit guter topographischer und geologischer Karten. Außerdem haben uns die Vorfahren viele Gesteinsaufschlüsse hinterlassen (Kap. 3.1), die Informationen über den Untergrund

liefern. Die Staatlichen Geologischen Dienste² bieten außerdem Daten über den Untergrund an, die aus vielen, obgleich sehr unterschiedlich aussagekräftigen Aufschlüssen aus Voll- und Kernbohrungen herrühren. Bisweilen liegen auch rohstoffgeologische Kartenwerke vor, in denen wirtschaftlich interessante Gesteinsvorkommen dargestellt sind (Kap. 6.4).

Die Stilllegung von Werksteinbrüchen hatte nicht nur wirtschaftliche oder betriebliche Gründe. Oft war die Lagerstätte erschöpft, hatte sich deutlich verschlechtert oder war mit früheren Methoden nicht mehr wirtschaftlich gewinnbar. Wie heute, waren auch damals unüberbrückbare Landnutzungskonkurrenzen nicht selten (Abb. 6.1-2 und -4). KRAUTH & MEYER (1896: 165) stellten schon vor mehr als Hundert Jahren fest: *„Es ist nicht schwer, einen Steinbruch anzulegen. Es ist aber sehr schwer, einen solchen anzulegen, der auf die Dauer befriedigt und sich rentiert. Das erste Erfordernis ist das Vorhandensein eines durchweg guten Materials in genügender Mächtigkeit. Das zweite Erfordernis ist eine günstige Lage.“* War früher die Nähe zum Ort bzw. zum Verkehrsweg Hauptkriterium für eine „günstige Lage“, so sind es heute vor allem Gebiete mit wenigen Nutzungskonkurrenzen und langfristig nutzbaren Lagerstätten. Die nachfolgende Auflistung erläutert, warum sorgfältige und fachgerechte Erkundungsarbeiten zum Nachweis und zur Bewertung von heimischen Werksteinlagerstätten auch in alten Abbaubereichen unerlässlich sind.

(A) Lagerstättenverhältnisse: Jede Lagerstätte ist irgendwann erschöpft oder wird aus verschiedenen Gründen schwerer gewinnbar. In den Kapiteln 4 und 5 sind viele Beispiele für die Veränderlichkeit von Naturwerksteinlagerstätten beschrieben. Sie zeigen, dass laterale oder vertikale Gesteinswechsel, Tektonik oder Verwitterungsvorgänge schon auf kurzer Distanz, oft innerhalb einiger Zehnermeter, zu deutlichen Verschlechterungen der Lagerstättenverhältnisse führen können. Besonders wechselhaft sind in Südwestdeutschland z.B. Travertine, Süßwasserkalksteine, Sandsteinlager in den Stubensandsteinschichten sowie werksteintaugliche Abschnitte in Oberjura-Massenkalken (Abb. 6.1-1). Ein gut belegtes Beispiel über die Komplexität von häufig genutzten Sandsteinlagerstätten bietet Kap. 4.25.4.3 bei der Beschreibung des Dettenhauser Sandsteins.

In der Graphik von Abb. 6.1-1 ist dargestellt, wie die verschiedenen Lagerstättentypen in Bezug auf ihre Komplexität bzw. Wechselhaftigkeit und den damit verbundenen Erkundungsaufwand einzuordnen sind. Sie zeigt, dass bei den heimischen Werksteinlagerstätten der Erkundungsaufwand von den relativ einförmigen und ausgedehnten Granitplutonen über die schichtförmigen Sedimentgesteinskörper hin zu den kleinräumigen und in der Materialqualität stark wechselhaften Kalktuff-, Schillkalk- und Travertinvorkommen ansteigt. Die Darstellung verdeutlicht aber auch, dass Werksteinlagerstätten in Bezug auf Komplexität und Erkundungsaufwand etwa im Mittelfeld der in

¹ Wo eingehende Untersuchungen in historischen Bergbauereien unternommen wurden, musste man feststellen, wie akribisch die früheren Prospektoren und Bergleute gesucht haben und wie erfolgreich sie beim Auffinden von Rohstoffvorkommen waren (z. B. WERNER 2013 und weitere dort angegebene Literatur).

² Die aktuellen Adressen der Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesländer sind unter <http://www.info-geo.de> zu finden.

Erkundungsaufwand / Lagerstättenkomplexität	hoch	Metallagerstätten	unregelmäßig, disseminiert usw.	z. B. Zinn, Wolfram, Blei, Zink, Silber, Gold, Seltene Erden
			gangförmig	z. B. Silber, Kupfer, Blei, Zink, Antimon, Kobalt
			stratiform	z. B. Eisen, Mangan, Zink, Blei, Kupfer
	niedrig	Industriemineralien für Gewerbe, Chemie usw.	tiefliegend, gangförmig	Fluorit
				Baryt
				Quarz
		Industriemineralien für den Bau	tiefliegend, stratiform	Kalisalz
				Steinsalz
				Anhydritstein, Gipsstein
	niedrig	Naturwerksteine		unregelmäßig ↑ schichtig ↑ massig
		Industriemineralien für den Bau	oberflächennah	Zeolithreicher Phonolith
				Gipsstein
				Quarzsand
		Massenrohstoffe für den Bau	fest	Jura im Oberrheingraben
				Oberjura der Schwäbisch-Fränkischen Alb
				Muschelkalk
				Porphyre
				Gneise
				Granite
				Kies und Sand in Oberschwaben
				Grobkeramische Rohstoffe
				Kies und Sand im Oberrheingraben
			locker	

* Gegenstand von bisherigen LGRB-Erkundungsprojekten

Böttinger Marmor
Riedöschinger Travertin
Werksteintauglicher Tephrit-Pyroklastit (Kaiserstühler Tuffstein) *
Werksteintauglicher Suevit *
Cannstatter Travertin
Kalktuff, Randengrobkalk, Pfaffenweiler Kalksandstein *
Süßwasserkalksteine (Gauinger Travertin* usw.), Plattenkalke
Werksteintaugliche Oberjura-Massen- und Dickbankkalke ("Marmore")
Stubensandstein *
Lettenkeupersandstein, Rhätsandstein, Molassesandstein, Kiesel sandstein, Angulatensandstein, Arienkalk
Eisensandstein *
Schilfsandstein
Muschelkalk* (Quaderkalk, Trochitenkalk), Hauptrogenstein *
Posidonienschiefer
Buntsandstein, feinkörnig: Plattensandstein
Buntsandstein, grob- bis mittelkörnig *
Ganggranit und -porphyr, werksteintauglicher Anatexit
Quarzporphyr (massig, stockförmig)
Granit (massig)

(C) Planungsversäumnisse, mangelnde Voraussicht: Während bei Betrieben, die Massenrohstoffe wie Kies und Sand, gebrochene Natursteine für den Verkehrswegebau oder Zementrohstoffe gewinnen, Planungen auf Regions-, Gemeinde- und Betriebsebene, Grundstückserwerb sowie Genehmigungsverfahren fast ständige Begleiter der Betriebsführung sind, werden Naturwerksteinbrüche wegen der stark schwankenden Nachfrage

meist bis zur Genehmigungs- bzw. Eigentums-grenze betrieben (Abb. 6.1-3), ohne dass vorausschauend Erweiterungsmöglichkeiten oder gar Alternativen geprüft wurden. Vorstellungen, in welche Richtung die günstigsten Lagerstättenverhältnisse zu erwarten sind, gibt es mangels Erkundung auch bei bestehenden Betrieben in der Regel nicht. Wegen preislich oft günstigeren Werksteinen aus anderen Ländern (Kap. 1.3.5.3) kann die Nachfrage nach optisch ähnlichen Gesteinen auch noch eine Weile befriedigt werden,

Abb. 6.1-1: Veränderungen in der Komplexität von Rohstoffvorkommen und des Erkundungsaufwands in Abhängigkeit vom Lagerstättentyp. Naturwerksteine liegen hinsichtlich der geologischen Komplexität im Vergleich zu anderen heimischen Lagerstättentypen etwa im Mittelfeld. Die rechte Spalte zeigt, dass die Erkundung von Werksteinvorkommen von den massigen, fast homogenen Plutoniten über die zahlreichen Sandsteinvorkommen bis zu den kleinräumigen, stark wechselhaften Vorkommen von Thermalsintern bzw. Travertinen komplexer und damit aufwändiger wird. In Kap. 6.4 ist die Erkundung von unterschiedlich komplexen Werksteinlagerstätten in Baden-Württemberg anhand von Beispielen näher ausgeführt.

Südwestdeutschland auftretenden Rohstofflagerstätten liegen.

(B) Mangel an Kenntnissen: Die für humide Klimabereiche typische rasch fortschreitende Verwitterung führt dazu, dass die Aufschlüsse von Werksteinlagerstätten oft schon wenige Jahre nach Einstellung des Abbaus von lehmigen und aufgelockerten Deck-schichten überschüttet sind (Abb. 6.1-2); bald erobert auch die Vegetation das Brachland zurück. Aus die-



Abb. 6.1-2: Schon wenige Jahre nach Einstellung der Werksteingewinnung beginnen aufgrund herrschender Klimabedingungen in unseren Breiten die Steinbrüche zu verbrechen, insbesondere wenn tonige Schichten über dem Werksteinlager aufgeschlossen wurden. Etwa ein Jahrzehnt nach Einstellung des Abbaus ist das ehemalige Steinbruchgelände vollständig überwachsen. Eine spätere Beurteilung der einst genutzten Lagerstätte ist dann kaum mehr möglich. Zum Zeitpunkt der Aufnahme seit zwei Jahren aufgelassener Steinbruch im Rhätsandstein bei Tübingen.



Abb. 6.1-3: Aufgrund unsicherer wirtschaftlicher Aussichten und stark schwankender Nachfrage nach heimischem Werksteinmaterial betreiben viele Firmen einen Abbau bis an die Genehmigungsgrenzen, ohne neue Lagerstättenteile zu erschließen. Steinbruch im Mainsandstein, Region Heilbronn-Franken.



Abb. 6.1-4: Besonders in der Nähe von Ortschaften können unüberbrückbare Nutzungskonkurrenzen auftreten. Der dargestellte, zeitweise betriebene Sandsteinbruch wird im Norden von einer fast zugewachsenen Erdaushubdeponie einer Gemeinde begrenzt; das darunter befindliche Werksteinlager kann künftig nicht mehr genutzt werden. Die „Einkesselung“ durch andere Nutzungen erlaubt auch nicht die Anlage eines Abflussgrabens für das Regen- und Hangwasser. Steinbruch im Stubensandstein bei Tübingen.

ohne dass die bisherige Kundschaft den Lieferanten wechselt. Daher besteht aus rein wirtschaftlichen Überlegungen oft nicht die unmittelbare Erfordernis, sich um Naturwerksteinvorräte im Umfeld der Steinbrüche zu kümmern.

(D) Nutzungskonkurrenzen, Grundstück-verfügbarkeit: Die überwiegende Zahl der heute bestehenden Abbaustandorte in Baden-Württemberg ging aus alten Steinbrüchen hervor. Werksteinbrüche wurden früher möglichst nahe am Verbraucher, somit in der Nähe von Ortschaften angelegt. Nicht selten hat die Bebauung das alte Steinbruchgebiet schon vollständig umschlossen, so dass Erweiterungen heute kaum mehr möglich sind (Abb. 4.23-42). Nicht selten werden an Steinbrüche angrenzende Areale so genutzt, dass eine Erweiterung von Steinbrüchen schwierig ist (Abb. 6.1-4). Die geringe Transportentfernung zum Verbraucher war jahrhundertlang wichtiger als langfristige Erweiterungsmöglichkeiten auf einer wertvollen Lagerstätte. Die unmittelbare Nähe zum Verbraucher ist wegen der heutigen Transportmöglichkeiten und dem Wert des Transportgutes nicht mehr von Bedeutung, sondern wegen der starken Nutzungskonkurrenzen im Umfeld der Ortschaften meist sogar von Nachteil. Auch eine vorausschauende Grundstückspolitik wurde im Umfeld der Naturwerksteinbrüche nur ausnahmsweise betrieben, in den meisten Fällen wurde wegen der unsicheren Zukunft des Betriebs darauf verzichtet.

Durch eine dem jeweiligen Lagerstättentyp angepasste, sorgfältige Erkundung kann verhindert werden, dass große Investitionen und langwierige Genehmigungsverfahren für einen ungünstigen Standort getätigt werden. Kap. 2.3 liefert allgemeine Informationen darüber, wie Werksteinlagerstätten entstanden sind, Kap. 3.2 behandelt die Aspekte, die bei der Anlage eines Werksteinbruches berücksichtigt werden müssen.

Erkundungsziele: Bei der Planung der Gewinnung von Naturwerksteinen sind geologische und gesteinsphysikalische Untersuchungen vorzunehmen, die sicher stellen, dass im betrachteten Gebiet ausreichend Blöcke in „brauchbarer Größe, in ausreichender Menge und in gewünschter Qualität gewonnen werden können“ (DNV 2000a: 130). Die gewinnbare Rohblockgröße, die im Bereich über 2m³ liegen sollte, gehört zu den wichtigen Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Nutzung. Daher reicht die Prüfung von Bohrproben zur Beurteilung eines Werksteinvorkommens nicht aus.

Nur ein guter Aufschluss kann die notwendige Sicherheit geben. Bieten alte Steinbrüche Aufschlüsse bis auf die ehemals genutzte tiefste Sohle, so erübrigt sich meist ein Probeabbau. Unter den in unseren Breiten herrschenden Klima- und Erosionsverhältnissen ist dies allerdings selten der Fall, wie zuvor ausgeführt wurde.

Das in Bohrungen und Aufschlüssen gewonnene Gestein muss hinsichtlich Witterungsbeständigkeit und statischer Belastbarkeit untersucht werden (Kap. 6.3). Die Zahl der Proben und die Art der petrographischen und gesteinsphysikalischen Untersuchungen richten sich nach dem vorgesehenen Verwendungsbereich (vgl. LORENZ & GWOSDZ 2003a: 29 ff.).

Ziel der Erkundung eines Naturwerksteinvorkommens ist die Ermittlung nachfolgend genannter Parameter³; die Auflistung stellt für viele Fälle zugleich die sinnvolle Reihenfolge der Untersuchungen bzw. Datenrecherchen dar:

- (1) Ausdehnung des geologischen Körpers mit Werksteineigenschaften im oberflächennahen Bereich (geologische Kartierung).
- (2) Nutzbare Mächtigkeit bzw. Volumen der Lagerstätte (geologische Vorräte); Ermittlung der Mächtigkeit des Werksteinlagers bzw. des Volumens des nach Zusammensetzung und Trennflächenabstand geeigneten Gesteins.
- (3) Abraummächtigkeit, Abraummenge, Abraumbeschaffenheit (Standicherheit, Verwertbarkeit).
- (4) Lagerungsverhältnisse (flach, einfallend, steil, wechselnd usw.) und Tektonik (Störungszonen).
- (5) Abbauerschwernisse oder Lagerstättenminderung durch Verwitterung, Zerklüftung, Verkarstung, Verlehmung, Vergrusung und sonstige Entfestigung des Korngefüges oder durch andere Überprägungserscheinungen.
- (6) Gesteinszusammensetzung, Art der Kornbindung.
- (7) Physikalisch-technische Eigenschaften sowie Verhalten gegenüber chemisch-physikalischen Einflüssen (Technik, moderne Architektur) bzw. Umwelteinflüssen (Renovierung).
- (8) Variationsbreite der Gesteinsqualitäten (wichtig auch für die richtige Probenahme und Durchführung mineralogischer und technischer Untersuchungen).
- (9) Dichte und Raumlage natürlicher Trennflächen wie Klüfte („Abgänge“ in der Steinmetzsprache), Schichtflächen („Lager“) und von Absonderungsflächen durch Mineralregelungen im Granit, Porphyr und Metamorphit.
- (10) Abschätzung des Anteils gewinnbarer Rohblöcke und deren Verwendungsmöglichkeiten.
- (11) Durch wirtschaftlich durchführbaren Abbau erreichbares Gesteinsvolumen (bergmännische bzw. bergbauliche Vorräte).
- (12) Geotechnische Verhältnisse, vor allem Standicherheit der Abbauwände und Bermen.
- (13) Hydrogeologische Verhältnisse, besonders Zuflussmengen und Abflussmöglichkeiten, Wasser-

haltung, Prüfung der möglichen Beeinflussung des Grundwassers durch den Abbau.

- (14) Eigentumsverhältnisse, Zugänglichkeit, Verkehrsanbindung, Lagermöglichkeiten für Abraum und Rohblöcke verschiedener Güteklassen.
- (15) Nutzungskonkurrenzen, Schutzgebiete und regionalplanerische Situation.

Je nach Umfang und Detaillierungsgrad der genannten Erkundungsarbeiten können entweder Abschätzungen in Bezug auf die Erschließungsmöglichkeiten, die Gewinnbarkeit und auf den wahrscheinlichen Wertinhalt der Werksteinlagerstätte gemacht werden oder sogar schon Vorratsberechnungen und Machbarkeitsstudien durchgeführt werden. Von großer Bedeutung ist ein schrittweises Vorgehen, wobei Reihenfolge und Aufwand in den einzelnen Abschnitten vom Kenntnisstand und dem Lagerstättentyp⁴ abhängig ist. Petrographische und gesteintechnische Analysen sollten z.B. erst vorgenommen werden, wenn ausreichende Lagerstättenmächtigkeiten und Blockgrößen nachgewiesen sind.

6.2 Empfohlene Erkundungsmethoden

Kartierarbeiten, Probenahme im Gelände

Besonders viele Informationen lassen sich durch geologische Kartierarbeiten gewinnen. Zur Kartierung gehört auch die Entnahme und Begutachtung von Gesteinsproben im Gelände. In Tab. 6.2-1 sind einfache Beurteilungskriterien an Gesteinsproben und daraus ableitbarer Qualitätseigenschaften zusammengestellt, die schon im Gelände angewendet werden können. Kartierarbeiten, die vorrangig der Abgrenzung von geologischen Körpern dienen, sind durch petrographische, sedimentologische und strukturgeologische Analysen an Aufschlüssen zu ergänzen. Andere Parameter, wie die o.g. Punkte 6 und 7, können mit einfachen Untersuchungen im Gesteinslabor ermittelt werden. Dazu gehören die makroskopische Beurteilung von Gesteinsanschnitten, die Auflichtmikroskopie, die Durchlichtmikroskopie an Gesteinsdünnschliffen sowie die Bestimmung der Mineralzusammensetzung und des Bindemittels mittels Röntgendiffraktometrie und Röntgenfluoreszenz-Analyse (Kap. 1.2, Abb. 1.2-3). Weil gesteintechnische Analysen relativ teuer sind, sollten diese erst gegen Ende der Untersuchungen und vor allem an Proben durchgeführt werden, die repräsentativ für die Lagerstätte sind. In der Regel ist dies erst nach Abschluss eines Kernbohrprogramms oder von Probeabbauarbeiten der Fall (s. u.).

Gesteinsproben aus dem Anstehenden können in alten Steinbrüchen sowie in Aufschlüssen an Straßen- und

³ Allgemeine Ausführungen zu Erkundungsverfahren sind zu finden bei BENDER (1986) und LORENZ & GWOSDZ (2003a und 2003b), bohrtechnische Aufschlussverfahren werden bei BUJA (2011) behandelt.

⁴ Die verschiedenen Lagerstättentypen in Bezug auf Geometrie sowie die Lagerungs- und Verbandsverhältnisse sind in Kap. 2 zusammengestellt; Abb. 6.1-1 erläutert die zunehmende Komplexität in Abhängigkeit vom Lagerstättentyp.

Wegaufschnitten entnommen werden (Abb. 6.2-1 und -2). Oft geben auch Lesesteinproben wertvolle erste Hinweise. Aufschlussreich ist die Begutachtung alter, lange der Witterung ausgesetzter Gesteinsrohblöcke und des Haldenmaterials. Im seit Jahrhunderten dicht besiedelten Südwesten bieten vor allem alte, steinsichtige Bauwerke wertvolle Hinweise auf Einsatzmöglichkeit, Qualität und Witterungsbeständigkeit der örtlichen Werksteinvorkommen, oft auch auf die gewinnbaren Rohblockgrößen.

Aussagen über die Entstehung der Lagerstätte und die nachfolgenden Vorgänge, welche Qualität und Größe der Lagerstätte beeinflussten, sind wichtig für die Inter-

pretation der Analysen. Nur anhand der Gelände- und Bohrbefunde können später erhaltene Laborwerte in Bezug auf ihre Bedeutung für die Gesamtlagerstätte richtig interpretiert werden.

Aufschlussbefunde sind grundlegend für die Planung von Erkundungsprogrammen. Am schnellsten sind durch Kartierung und Steinbruchaufnahme Daten über die grundsätzlichen Lagerungsverhältnisse, die Mächtigkeit von über- und zwischenlagernden Ab-raumschichten und die tektonischen Verhältnisse zu gewinnen (Abb. 1.2-1, 6.2-1 und -2). Beispielsweise lässt sich in Sandsteinkörpern anhand von Sediment-gefügen wie Schrägschichtung, Korngrößenzu- oder

Tab. 6.2-1: Mit einfachen Mitteln zu prüfende Gesteinsmerkmale und ihre Deutung hinsichtlich der Qualität eines Naturwerksteins (nach: KRÜGER 1957: 136, modifiziert). Für manche Werksteinsorten, die erst nach der Gewinnung langsam aushärten, wie Süßwasserkalk, Kalktuff, Eisensandstein und Kalksandstein, treffen die Kriterien 3, 7 und 9 nur eingeschränkt zu.

Merkmal	Bewertung: hochwertig	Bewertung: minderwertig
1) Klang beim Anschlagen	hell	dumpf, scheppernd
2) Gefüge	kompakt, massig	aufspaltend, flaserig, schiefrig usw.
3) Härte	nicht ritzbar, schwer zerschlagbar	leicht ritzbar und zerbrechlich
4) Frischer Anbruch	glatt, muschelrig, gleichmäßig	unregelmäßig, stichig
5) Farbe	kräftig, klar	matt, ausdruckslos und „schmutzig“
6) Struktur, Textur	gleichmäßig	stark wechselnd
7) Wasseraufnahme	gering	hoch bis sehr hoch
8) Verwitterungskrusten	papierdünn bis fehlend	stark, Schwarten oder Schalen
9) Abrieb	gering bis fehlend	absandend, kreidig
10) Kornbindung	innig	lose
11) Minerale	glänzend	stumpf, getrübt
12) Kantenfestigkeit	fest	Kanten und Ecken leicht brechend



Abb. 6.2-1: Die geologische Aufnahme von oberflächennahen Aufschlüssen liefert die meisten und wichtigsten Informationen bei der Erkundung auf Naturwerksteinlagerstätten. Das Foto zeigt ein stark zerklüftetes Sandsteinlager (unten) und überlagernde dünnplattige, nicht nutzbare Sedimentgesteine innerhalb einer tektonischen Störungszone. Mit dem Gefügekompas können alle Strukturelemente eingemessen werden. Bohrungen hätten entweder ein kompaktes Werksteinlager (links von der Bildmitte) oder kleinstückige Sandsteine (beidseitig daneben) angetroffen. Der störungsbedingte rasche Wechsel wäre kaum erkannt worden.

-abnahme und Tongehalt abschätzen, ob das Zielgebiet voraussichtlich innerhalb, am Rand oder außerhalb eines Sandsteinstranges liegt (vgl. Kap. 4.23 und 4.25). Bei ausreichenden Erkenntnissen über die Entstehung und Geometrie des Vorkommens können die erforderlichen Mess- oder Bohrpunkt-abstände zielsicher festgelegt werden.

Erkundungsbohrungen

Zu den wichtigsten Erkundungsverfahren nach der Kartierung und der Aufnahme von Steinbrüchen gehören Aufschlussbohrungen (Abb. 1.2-2, 6.2-2 bis -5). Kurze Kernbohrungen an der Aufschlusswand können gute Proben für erste petrographische und gesteinsphysikalische Analysen liefern (Abb. 6.2-2). Die räumliche Orientierung der Kerne und der wichtigen Gefügeelemente des Gesteins (besonders die Schichtung!) sind unbedingt am Bohrkern zu vermerken, weil gesteinsphysikalische Ergebnisse sonst nicht richtig interpretiert werden können.



Flachbohrungen mit pressluftgetriebenen Geräten (Abb. 6.2-3) sind fast überall möglich, jedoch ist ihre Aussagekraft gering. Ermittelt werden können mit ihnen i. d. R. nur die Mindestmächtigkeit und die Festigkeit der untersuchten Gesteinsschicht. Verlässliche Daten liefern Kernbohrungen. Tiefere Kernbohrungen sind kostengünstiger als oft vermutet, wenn sie unter Nutzung der Kartierdaten hinreichend gut vorbereitet wurden. In schwierigem Gelände sind Raupenbohrgeräte zu empfehlen. Bohr-LKW benötigen festen Untergrund, ermöglichen dafür aber Kernbohrungen bis in mehrere Hundert Meter Tiefe. Aus Kostengründen werden Kernbohrungen oft nur so tief abgeteuft, wie es unbedingt erforderlich erscheint, obwohl die Kerngewinnung selbst meist nicht zu den teureren Posten der Angebote gehört. Die Bohrpreise schwankten in den letzten Jahren je nach Tiefe der Bohrungen und Größe des Bohrprogramms zwischen 150 und 250 € je Meter.

Es wird empfohlen, mindestens eine Bohrung innerhalb des Erkundungsgebiets deutlich unterhalb des vermuteten Nutzhorizontes auszuführen („Richtbohrung“). Nicht selten wurden so noch unbekannte weitere Lagerstättenabschnitte entdeckt; außerdem können wichtige Informationen zu Grundwasserverhältnissen und zu den geotechnischen Eigenschaften des Liegenden gewonnen werden. An durchgehend gekernten Bohrungen lassen sich die sichersten Aussagen über den Aufbau des Vorkommens machen. Bohrkern, möglichst mit ca. 10 cm Durchmesser, ermöglichen die Durchführung fast aller wichtigen Gesteinsuntersuchungen (Abb. 6.2-5 bis -7).

Organisatorische Hinweise: Für Rotarykernbohrungen unerlässlich sind gute Anfahrtsmöglichkeiten und die Verfügbarkeit von Wasser als Spülmittel. Für die Durchführung von Aufschlussbohrungen muss von der zuständigen Aufsichtsbehörde eine Erlaubnis vorliegen. Für Bohrungen flacher als 100 m sind die Landratsämter, für tiefere auch die Landesbergdirektion am LGRB zuständig. Selbstverständlich muss das Einverständnis des Grundstückseigentümers vorliegen. Es ist sinnvoll, auch die Gemeindeverwaltung zu informieren und Versorgungsunternehmen für Wasser, Strom, Telekommunikation usw. zu kontaktieren, um die genaue Lage von Leitungen zu ermitteln. Sicherheitshalber sollte der Bohrtrupp trotzdem mit einem Leitungssuchgerät ausgestattet sein.

Geophysikalische Geländemethoden

Die Anwendung von geophysikalischen Geländemethoden richtet sich nach dem zu untersuchenden Gesteinskörper (Gesteinstyp und Komplexitätsgrad, Abb. 6.1-1) und den bereits vorhandenen Aufschlüssen.

◀ *Abb. 6.2-2: Alte Steinbrüche bieten Einblicke in das Gefügeinventar (Schichtung, Bankmächtigkeiten, Dichte und Verlauf von Klüften) und ermöglichen die Entnahme von Gesteinsproben für Laboruntersuchungen, z. B. mittels transportabler Kernbohrmaschinen: (A) Probenahme senkrecht zur Schichtung und (B) parallel zur Schichtung. (C) Steinbruchwand nach der Entnahme von Kernproben.*



Abb. 6.2-3: Pressluftangetriebene Meißelbohrung; flache Vollbohrungen sind geeignet für die Ermittlung der Mindestmächtigkeit einer Schicht und für eine erste Einschätzung der Verbandsfestigkeit des Gesteins.

Meist wendet man geophysikalische Feldmessungen im **Rahmen der Vorerkundung** oder zur Verdichtung von Informationen zwischen Bohrungen an, insbesondere dann, wenn in einem größeren Gebiet kaum Gesteinsaufschlüsse existieren. Wichtig für die Interpretation der Messergebnisse ist, dass Bohrungen oder Steinbrüche vorhanden sind, an denen die Messdaten in Bezug auf den Schichtaufbau geeicht werden können. Als wichtigste Verfahren für die Werksteinerkundung sind anzuführen:

- **Geoelektrische Sondierungen**, zur Klärung der Verbreitung und Anzahl von mächtigeren tonigen Einschaltungen, von wasserführenden Störungen und der Mächtigkeit über- und unterlagernder toniger Schichten (besonders in der Erkundung von Sandsteinlagerstätten im Keuper). Stromdurchflossene Leitungen wie Erdkabel und Hochspannungsleitungen stören die Messungen.
- **Schweremessungen** (Gravimetrie) mit Feldwaagen können als orientierende Erkundungsmethode eingesetzt werden, wenn es um Gesteinskörper geht, die im Vergleich zur Umgebung schwerer sind; die wäre z.B. im Cannstatter Travertin (umgeben von Lockersedimenten) oder zur Einengung der Grenze von Tuffschloten zu Kalksteinen bei Riedöschingen oder Böttingen der Fall.
- **Bohrlochgeophysik**, z.B. (1) Messungen der Gammastrahlung (sog. Gamma-Log) in Vollbohrungen



(B)



Abb. 6.2-4: Kernbohranlagen auf Raupenfahrzeugen ermöglichen auch in schwierigem Gelände die rasche Gewinnung von Bohrkernen bis ca. 100m Tiefe: (A) Kernbohrung oberhalb eines alten, verbrochenen Steinbruchs. (B) Raupenbohrgerät bei der Erkundung in aufschlusslosem Waldgelände.

zur Unterscheidung von tonigen und tonarmen Partien oder (2) mittels optischer Bohrloch-Scanner zur Ermittlung von Dichte und Raumlage von Trennflächen (besonders bei massigen Körpern wie Graniten oder Massenkalkkörpern).

Bei der Werkstoffprüfung im Labor oder am Bauwerk (Kap. 6.3) werden weitere geophysikalische Methoden angewendet, z.B. Ultraschallmessungen oder Infrarotspektroskopie (Erkennen von Ablöseflächen oder Toneinschlüssen, Bestimmung der Gesteinszusammensetzung zur Provenienzanalyse usw.). Aktuelle Informationen über den Stand der Mess- und Auswertetechniken können bei Geophysikbüros, bei den Materialprüfanstalten oder den Staatlichen Geologischen Diensten eingeholt werden.



Abb. 6.2-5: In Kernkisten gelagerte Gesteinsbohrkerne werden nach der Entnahme aus dem Kernrohr direkt an der Bohrstelle mit Bezeichnung der Bohrung, Tiefe und Bohrrichtung beschriftet. In dieser Form sind sie gut und sicher zu transportieren, auszuwerten und zu lagern. Die im Bild gezeigten 1 m langen Kerne sind 10 cm dick und ermöglichen die Durchführung fast aller erforderlichen petrographischen, geochemischen und gesteinsphysikalischen Untersuchungen.



Abb. 6.2-6: Bohrkernabschnitte ($D = 10\text{ cm}$) für die gesteinsphysikalische Analyse mit Angabe der Bohrungskurzbezeichnung, der Bohrtiefe und der Bohrrichtung; davor Kalottenabschnitte für die geochemische Analytik und die Anfertigung eines Gesteinsdünnschliffs. Alle Daten zusammen erlauben eine gute Beurteilung der Gesteinseigenschaften.

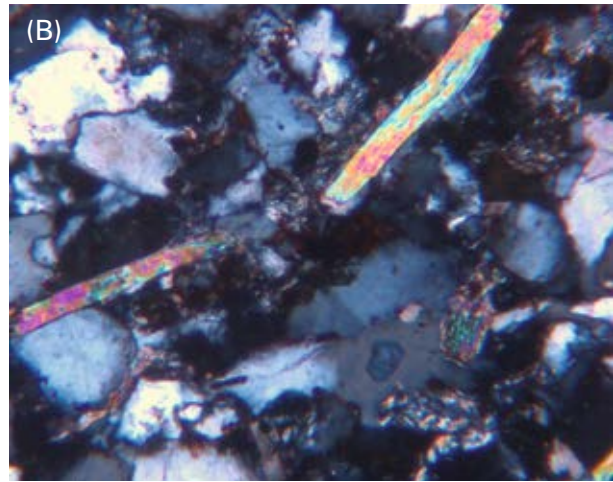
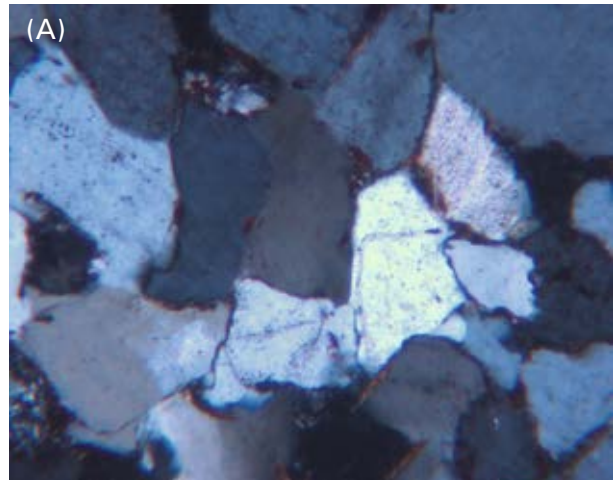


Abb. 6.2-7: Gesteinsdünnschliffe (ca. $30\text{ }\mu\text{m}$ dünn) im polarisierten Licht ermöglichen die Bestimmung der am Gesteinsaufbau beteiligten Minerale und ihrer Bindungsformen: (A) Dünnschliff einer Probe von mittelkörnigem Neckartäler Hartsandstein; die Quarzkörner (grau) sind dicht gepackt und oft buchtig miteinander verzahnt; auf den Korngrenzen befinden sich rötlichbraune Überzüge aus Hämatit. Alle Merkmale sprechen für hohe Verbandsfestigkeit. (B) Plattensandstein aus Freudenstadt; feinkörnige Tone, zersetzte Feldspäte, Nester von Limonit und Hämatit sowie große Glimmer (mehrfarbig) behindern die Verzahnung der Quarzkörner. Das Schliffbild bietet Erklärungsmöglichkeiten für die am Bauwerk beobachtete geringe Festigkeit und mangelnde Witterungsbeständigkeit des Feinsandsteins.

Probeabbauarbeiten

Die Ermittlung des nutzbaren Inhalts einer Naturwerksteinlagerstätte ist in der Praxis schwierig, da der Aufschlussgrad zu Beginn eines Erkundungsprojektes überwiegend schlecht ist und Bohrungen oder geophysikalische Untersuchungen keine Aussage über die Kluft- und Lagerabstände und somit über die Rohblockhöflichkeit erlauben. Daher wird für die Wiederinbetriebnahme oder die Neuanlage von Steinbrüchen in Südwestdeutschland als ein wichtiger Schritt der Probeabbau zur Ermittlung von Schichtaufbau, Lagerungsverhältnissen, Blockgrößen und nutzbarem Gesteinsanteil empfohlen.

Probeabbauarbeiten können bei guter Vorbereitung, einer Tiefe von einigen Metern und bei günstigen



Abb. 6.2-8: Probeabbau mit der Schwertsäge. Der durch Kartierung und Kernbohrungen vorbereitete, 4m tiefe Einschnitt im Stubensandstein erlaubt die verlässliche Beurteilung hinsichtlich der Eignung des Gesteins und der gewinnbaren Blockgrößen. Die dabei gewonnenen Blöcke dienen der Untersuchung im Labor und in der Steinmetzwerkstatt.

Geländeverhältnissen innerhalb von wenigen Wochen besonders aussagekräftige Informationen liefern (Abb. 6.2-8 bis -11). Wie andere Aufschlussarbeiten sind diese genehmigungspflichtig. Die Vorarbeiten benötigen aufgrund der erforderlichen Recherchen, Gespräche und zur Erstellung von Planunterlagen für die Genehmigungsbehörde inkl. der naturschutzfachlichen Prüfungen meist mehrere Monate. Probeabbau kann aufgrund der geringen Größe mit dem vorhan-

denen Aushub rasch rekultiviert werden. Empfehlenswert ist, frühzeitig an die Anlage von Geotopen zu denken. Das Interesse der Öffentlichkeit an der heimischen Geologie ist überwiegend stark ausgeprägt.

Abb. 6.2-8 zeigt einen Probeabbau im Stubensandstein des Schönbuchgebiets bei Waldenbuch. Die vorausgegangenen Baggerschürfe und Flachbohrungen (Abb. 6.2-3) gaben erste Hinweise auf feste Quarzsandsteine. Bis 50m tiefe Kernbohrungen lieferten grundlegende Daten zum Schichtaufbau und zeigten, dass auch die besonders festen Sandsteine in einem Teil des Erkundungsgebiets zahlreiche Trennflächen enthalten. Die Ursache für die vielen verbrauchten Trennflächen konnte mittels Kernbohrung nicht geklärt werden. Der Probeabbau mittels Schrämsäge erbrachte, dass es durch gravitative Gleitung auf dem tonigen Unterlager besonders in Talnähe zu umfangreichen Trennflächenbildungen gekommen ist (Abb. 6.2-8); Verwitterungslösungen griffen in der Folge tief ins Gestein ein. Die konsequente Verlegung des Erkundungsgebiets in tiefere Bereiche erbrachte dann die erhofften Gesteinsqualitäten (Kap. 4.25.4.3).



Abb. 6.2-9: Nach Entfernen der tonigen Abraumschichten mittels Hydraulikbagger wird das Sandsteinlager sichtbar. Nun können auch die Trennflächen wie Klüfte und Lagerfugen sowie die Rohblockgrößen ermittelt werden. Probeabbau im Eisensandstein.

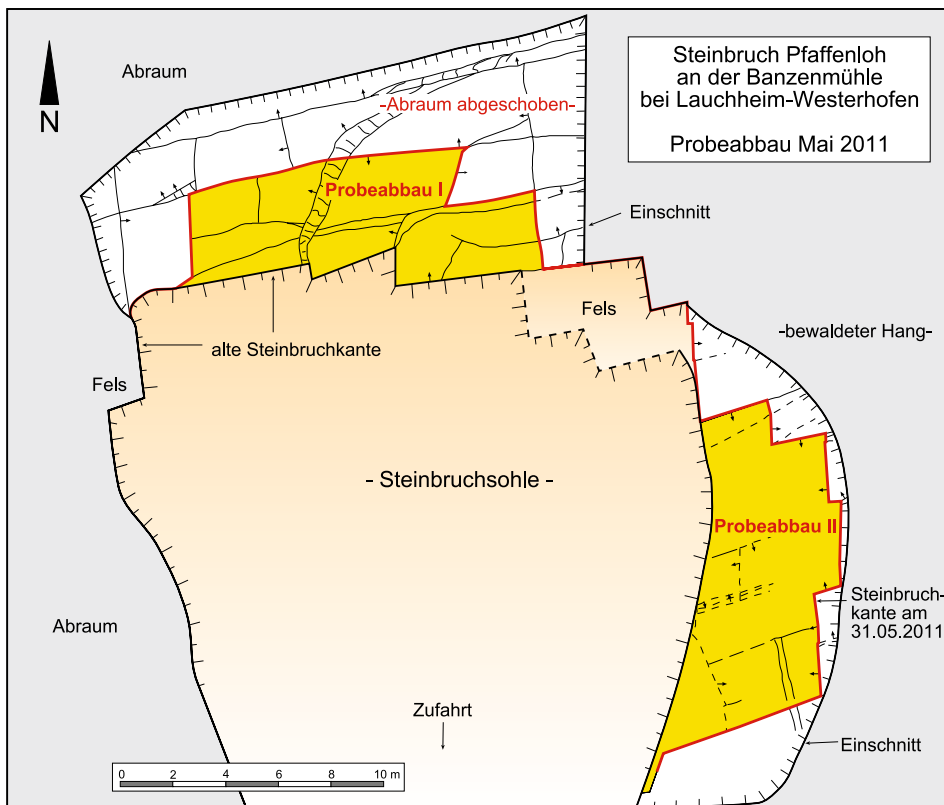


Abb. 6.2-10: Beispiel für einen Probeabbau in einem flach liegenden Sandsteinlager; Darstellung der Eingriffsabschnitte, der angetroffenen Gefüge und Blockgrößen. Probeabbau im Eisensandstein (vgl. Abb. 6.2-9).

In den Zeichnungen von Abb. 6.2-10 und -11 sind zwei Probeabbauareale dargestellt. Größe und Form der Eingriffe sind zu erkennen. Im flachliegenden Sandsteinlager erfolgte der Abbau mit einem Reißbagger (Abb. 3.2-7 und 6.2-10) zur Bestimmung des Trennflächenmusters und der Rohblockgrößen; mit dem Eingriff in nördliche Richtung wurde das Sandsteinlager unter geringer Überlagerung, mit dem Probeabbau nach Osten das Lager unter rasch zunehmender Überdeckung geprüft. Abb. 6.2-11 zeigt, wie im deutlich komplizierter aufgebauten vulkanischen Gestein der Abbau mittels Schrämsäge auf einem schmalen Streifen in einem stumpfen Winkel zu den tektonischen Zerrüttungszonen durchgeführt wurde. Als die Ergebnisse hinsichtlich Gesteinsfestigkeit und Blockgrößen günstig waren, wurde umgehend der Hauptabbau auf vier, jeweils 2 m tiefen Sohlen durchgeführt. Probeabbauareale ermöglichen natürlich auch die Bereitstellung von großen Blöcken für probeweise Steinmetzarbeiten und für gesteinsphysikalische Untersuchungen.

Rohblockhöflichkeit: Die Ermittlung der Rohblockhöflichkeit ist nur in ausreichend großen Aufschlüssen sinnvoll, da hier die für statistische Auswertungen erforderliche Anzahl an Messungen gewonnen werden kann. Ohne eine genetische Zuordnung der gemessenen Trennflächen (Klüftung, Sedimentationsgefüge, Begleitgefüge zu tektonischen Störungen, gravitative Erscheinungen an Hängen usw.) ist dieser statistische Wert aber ohne Aussagekraft. Abb. 6.2-1 zeigt beispielsweise einen engstängig geklüfteten Bereich in einem Schilfsandsteinbruch in der unmittelbaren

Nähe einer tektonischen Störung (Abschiebung); die Einbeziehung dieser Messwerte würde die Rohblockhöflichkeit der eigentlichen Lagerstätte verfälschen. Zugleich gibt die Konstruktion des weiteren Verlaufs der Störung wertvolle Hinweise für die Planung und Interpretation eines Bohrprogramms.

Mit der Ermittlung der Rohblockhöflichkeit in Abhängigkeit von Lagerstättentyp, Tektonik und Abbaufahren befasst sich ausführlich SINGEWALD (1992). Liegen ausreichend Daten aus Aufschlüssen vor – z.B. wenn über den Weiterbetrieb oder die Wiederaufnahme eines größeren Steinbruchareals entschieden werden soll – so bietet sich eine Berechnungsformel an, die den technisch nutzbaren Inhalt einer Werksteinlagerstätte zu

ermitteln hilft. Unter Verwendung der Formel von SINGEWALD (1992: 238) ist der bergmännische Vorrat BV (in m³) = Abbaufäche F x nutzbarer Mächtigkeit M x Rohblockhöflichkeit η – Korrekturfaktor f/100 – Abbau- und Verarbeitungsverluste Av, also

$$[BV = F \times M \times (\eta - f/100) - Av] .$$

Die Gleichung macht deutlich, dass für die Ermittlung des gewinnbaren = bergmännischen Vorrats (1) ein aus der Erfahrung der Steinbrucharbeiter herrührender Korrekturfaktor f (der z.B. Einschlüsse im Gestein berücksichtigt) und (2) die Abbau- und Verarbeitungsverluste Av eine Rolle spielen. Die Abbauart und die Techniken der Verarbeitung müssen durch langjährige Erfahrung des Betriebs bekannt sein.

Bearbeitung von Gesteinsproben: Nach der Gewinnung von Proben aus alten Steinbrüchen, Bohrungen oder Versuchsabbauen stehen zahlreiche petrographische und gesteinsphysikalische Untersuchungsmethoden zur Verfügung, um die bautechnische Eignung des Gesteins zu ermitteln. Es ist darauf zu achten, dass die Probenahme repräsentativ und gut dokumentiert erfolgt (Kap. 6.3).

Wichtige Verfahren der Probenuntersuchung sind:

- Bohrkernuntersuchung mit Anschnitten und Anschliffen (Auflichtmikroskopie)
- Durchlichtmikroskopie an Gesteinsdünnschliffen (Abb. 6.2-7)
- Mineralbestimmung mittels Röntgenbeugung (RDA)

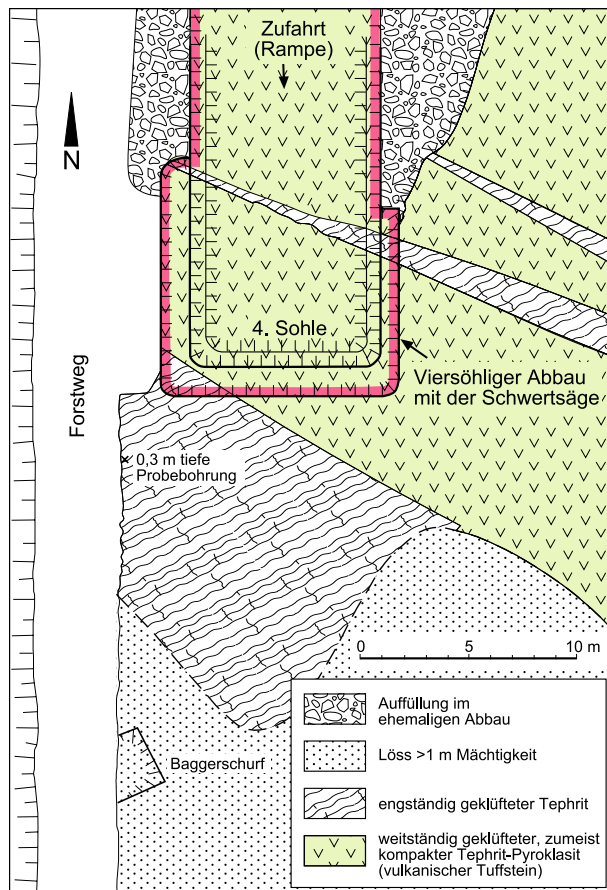


Abb. 6.2-11: Beispiel für einen Probeabbau in einem kompliziert gebauten Gesteinskörper vulkanischen Ursprungs. Der Probeabbau konnte nach Prüfung der gewonnenen Blöcke umgehend zu einem Hauptabbau erweitert werden. Abbau im Kaiserstühler Tephrit-Pyroklastit.

6.3 Empfehlungen zur Durchführung von physikalisch-technischen Gesteinsprüfungen

– FRIEDRICH GRÜNER –

Naturwerkstein wird im Hoch-, Tief-, Wasser- sowie im Garten- und Landschaftsbau eingesetzt. Darüber hinaus findet er häufige Verwendung als Denkmalgestein und in der Ornamentik (Kap. 1.3.1 und 3.3 sowie LEPPER 2007). Dieser vielfältige Einsatz erfordert für die unterschiedlichen Verwendungsbereiche eine Fülle von physikalisch-technischen Qualitätsanforderungen, die durch eine Reihe von Normen geregelt werden. Die große Zahl der Regelwerke und die unterschiedlichen Anforderungen verlangen dem Naturwerksteinlieferanten ein hohes Maß an Wissen und an ständiger Schulung ab, um auf dem Laufenden zu bleiben. Für **eine erste Einschätzung**, ob ein abbaubarer Naturwerkstein grundlegende und geforderte Qualitätsansprüche erfüllt, werden in diesem Kapitel eine ausgewählte Reihe von physikalisch-technischen Prüfungen angeführt.

Wichtige Merkmale zur Planung von Prüfungen an Naturwerksteinen sind einerseits die natürliche Entstehungsgeschichte und andererseits die vorgesehene handwerkliche oder maschinelle Verarbeitung zu Werkstücken. Dabei bleiben der Stoffbestand und das Gefüge während der Verarbeitung weitgehend unverändert – dies unterscheidet den Naturwerkstein von den anderen mineralischen Baurohstoffen. Die Einhaltung von physikalisch-technischen Kennwerten ist entscheidend für seine Verwendung im Bauwesen. Im Garten- und Landschaftsbau stehen oftmals ästhetische und gestalterische Aspekte im Vordergrund, die häufig auch im Gegensatz zu bestehenden Qualitätsanforderungen stehen. Einen Sonderfall stellt der Einsatz in der Denkmalpflege dar, wo zusätzlich zu den allgemeinen Qualitätsanforderungen und der Verwitterungsresistenz auch Aspekte der historischen und regionalen Authentizität beim Steinaustausch eine herausragende Rolle spielen. Deshalb ist für die Renovierung oder Instandsetzung von Baudenkmalen die Verfügbarkeit von originalem Ersatzgestein von zentraler Bedeutung. Dabei spiegelt die regionale Geologie sich in den verwendeten Gesteinen von historischen Bauten wider.

Für eine erste Erfassung des Eigenschaftsprofils ist zunächst eine grundsätzliche Analyse, ob es sich um ein Sedimentgestein (z.B. Sandstein, Kalkstein), einen Metamorphit (z.B. Glimmerschiefer, Gneis) oder Magmatit (z.B. Granit, Basalt) handelt, erforderlich. Ein wichtiger Aspekt ist die natürliche Anisotropie vieler Gesteine, die für die petrographische Prüfung und für viele physikalisch-technische Prüfungen zu berücksichtigen ist (vgl. Kap. 6.2). Ein typisches Beispiel sind Sandsteine, die eine unterschiedliche Druckfestigkeit aufweisen, je nachdem ob sie senkrecht oder parallel zur Schichtung („Lager“) geprüft werden. Auch weitere, wichtige Eigenschaften wie die kapillare Wasseraufnahme, thermische und hygrische Längenänderung führen in Abhängigkeit von

- Bestimmung der chemischen Zusammensetzung (RFA) – ermöglicht in Kombination mit der RDA auch halbquantitative Bestimmungen der Mineralanteile
- Ermittlung der kapillaren Wasseraufnahmefähigkeit (unter Atmosphärendruck und bei Vakuum)
- Bestimmung des s-Wertes als Maß für die Frostbeständigkeit (als ideal gilt $s < 0,6$, $s < 0,75$ „unkritisch“, $s = 0,75–0,9$ Überprüfung erforderlich)
- Ermittlung der hygrischen Längenänderung bei Steigerung der Luftfeuchte
- Ultraschalllaufzeitmessungen, dynamischer E-Modul
- Ermittlung der Druckfestigkeiten (Abb. 6.3-2)
- Verhalten bei Frost-/Tauwechselbeanspruchung.

Eine Übersicht über sinnvolle gesteinsphysikalische Untersuchungsmethoden gibt der nachfolgende Beitrag von FRIEDRICH GRÜNER; allgemeine Informationen liefern LORENZ & GWOSDZ (2003a und 2003b).

Tab. 6.3-1: Variationsbreite der Biegefestigkeiten und deren Anisotropie bei verschiedenen Gesteinstypen (aus: LORENZ & GWOSDZ 2003a).

	0	10	20	30	N/mm ²
Granit, Tonalit					
Diorit, Gabbro					
dichter Basalt					
vulkanische Tuffe					
Sandstein					
Tonschiefer					
Kalkstein					
Marmor					
kristall. Schiefer					
Orthogneis					
Paragneis					

 Biegefestigkeit parallel zur Schichtung/Bankung etc.
 Biegefestigkeit senkrecht zur Schichtung/Bankung etc.

der Anisotropie zu unterschiedlichen Ergebnissen. Einen Eindruck vom Einfluss der Anisotropie auf die Biegezugfestigkeit gibt Tab. 6.3-1 wieder.

Eine **sorgfältige Probenahme** für die gesteinsphysikalischen Untersuchungen sollte deshalb mindestens folgende Gesichtspunkte berücksichtigen:

- Die Probenahme muss sachgemäß und sorgfältig erfolgen, der Zweck bzw. die durchzuführenden Prüfungen bestimmen die Anzahl und Art und Weise der Probenahme.
- Die Anzahl der Proben ist darüber hinaus abhängig von der Homogenität des in der Lagerstätte aufgeschlossenen Natursteines; viele Prüfnormen verlangen mindestens fünf gleichartige bzw. vergleichbare Proben.
- Die zu entnehmenden Proben müssen einen repräsentativen Querschnitt des abzubauenden Natursteines erfassen und wiedergeben; die ausschließliche Prüfung von „Filetstücken“ führt zu einer Verzerrung der Ergebnisse und später zu häufigen Reklamationen.
- Ist eine Anisotropie des Natursteines (z. B. Schichtung) vorhanden, so müssen die Prüfungen entlang den verschiedenen Anisotropierichtungen durchgeführt werden (Abb. 6.3-1). Dazu ist es erforderlich, dass die Gefügerichtung und Orientierung auf die entnommenen Proben übertragen werden, damit diese später berücksichtigt werden können.
- Die Probengröße ist abhängig vom Größtkorn des Gesteines, für magmatische Gesteine mit größeren Einsprenglingen oder insgesamt sehr grobkörnig kristallisierten Mineralen sind größere Probenstücke bzw. Bohrkerndurchmesser erforderlich als für feinkörnige Gesteine (z. B. Sandsteine, Basalt oder dichter Kalkstein).

Für eine erste Abklärung von Materialeigenschaften werden dem Natursteinbetrieb Prüfungen nach der

heute eingeführten DIN EN-Normenserie, wovon die wichtigsten Normen in der Tab. 6.3-2 zusammengefasst aufgeführt sind, empfohlen.

Besonders wichtig sind **bei Sandsteinen** neben der Bestimmung der Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und des dynamischen E-Moduls als mechanische Festigkeitsparameter vor allem die Parameter Dichte,



Abb. 6.3-1: Für gesteintechnische Untersuchungen an einem zweiseitig angesägten Rohblock wurden Bohrkern senkrecht und parallel zur Schichtung (im Foto nicht erkennbar) entnommen. Für das untersuchte und durch einen Probeabbau erschlossene Sandsteinlager lagen bislang keine Daten vor; das Gestein soll für hochwertige Renovierungsarbeiten am Ulmer Münster eingesetzt werden. Daher ist eine hohe Zahl von Gesteinsproben sinnvoll.

zugängliche Gesamtporosität, kapillares Wasseraufnahmevermögen und Verhalten gegenüber Frost-Tau-Wechsel sowie Verwitterungsbeständigkeit: Zusätzlich könnten, besonders bei tonig gebundenen Sandsteinen, die hygri-sche Längenänderung und der Salzkristallisationstest mit Natriumsulfat geprüft werden. Eine petrographische Untersuchung sollte in jedem Fall durchgeführt werden, um die Gefügeeigenschaften, den Mineralbestand und unter Umständen vorhandene Verwitterungserscheinungen (z. B. Feldspatverwitterung), störende Einschlüsse, Rissbildungen und Trennflächen im Gestein usw. zu erkennen.

Bei **Karbonatgesteinen** (Kalksteine, Dolomitsteine, Travertin) ist neben der Bestimmung der Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und des dynamischen E-Moduls (Abb. 6.3-2) als mechanische Festigkeits-

parameter vor allem die Dichte, die zugängliche Gesamtporosität, der Sättigungswert, das Verhalten gegenüber Frost-Tau-Wechsel sowie die Verwitterungsbeständigkeit von großer Bedeutung. Je nach dem vorgesehenen Verwendungszweck sind auch die Ausbruchslast am Ankerdorn oder das Verschleißverhalten zu prüfen. Weitere Untersuchungen, die in speziellen Produktnormen oder Technischen Lieferbedingungen gefordert werden, können zusätzlich erforderlich werden.

Bei **Metamorphiten und Magmatiten** hingegen sind neben der Gesamtporosität in der Regel die gesteinsmechanischen Parameter der Biegezugfestigkeit, die Dichte, die Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit und die petrographische Prüfung für eine erste Einschätzung der Materialqualität ausreichend.

Tab. 6.3-2: Qualitätsanforderungen und Prüfnormen für Naturwerkstein.

Norm	Titel / Stichwort	Hinweise
DIN EN 12407	Prüfverfahren für Naturstein: Petrographische Prüfung	Grundlage für die Analyse der mineralogischen Zusammensetzung und die Homogenität (Klüfte, Fossileinschlüsse, Intraklasten wie z.B. Tongallen, Erzpartikel, kohlige Einschlüsse), empfohlen für alle Gesteinsarten
DIN EN 12440	Naturstein-Kriterien für die Bezeichnung	Bestimmung, Identifikation und Einordnung von Naturstein
DIN EN 1925, 1936, 13755	Dichte, Porosität und Wasseraufnahme	Eine Parametergruppe, die in gegenseitiger Abhängigkeit voneinander steht, besonders bei porösen Werksteinen wie Sandstein und Kalkstein
DIN EN 1926	Bestimmung der Druckfestigkeit	Grundlegender mechanischer Parameter, zu beachten ist die häufige Anisotropie von Naturstein (z. B. Sandstein), für alle Gesteinsarten empfohlen
DIN EN 12372	Bestimmung der Biegefestigkeit unter Mittellinienlast	Grundlegender mechanischer Parameter, zu beachten ist die häufige Anisotropie von Naturstein (z. B. Sandstein), für alle Gesteinsarten empfohlen
DIN EN 14146	Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls	Beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung fester Körper, Maß für die Verformbarkeit „Steifigkeit“ eines Materials
DIN EN 12371	Frost-Tau-Wechsel Beanspruchung	Wichtiges Prüfverfahren für die Beurteilung der Verwitterungsresistenz von Naturstein, empfohlen besonders bei porösen Natursteinen wie Sandstein, Kalkstein und vorgesehener Verwendung im Außenbereich
DIN EN 12370	Bestimmung des Widerstandes gegen die Kristallisation von Salzen	Zeitraffendes Prüfverfahren für die Beurteilung eines Natursteines gegenüber dem Einfluss von Salzen und der Salzverwitterung, besonders bei porösen Natursteinen wie Sandstein und Kalkstein
DIN EN 14581	Bestimmung des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten	Die thermische Ausdehnung ist eine wichtige Stoffeigenschaften, die bei Materialkombinationen beachtet werden muss
DIN EN 13364	Ausbruchslast am Ankerdorn	Von zentraler Bedeutung für die Verwendung von Platten aus Naturstein als hinterlüftete Fassadenbekleidungen
DIN EN 14157	Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß	Bedeutsam für die Eignung des Natursteins als Bodenbelag und für Treppen
DIN 52008	Prüfverfahren für Naturstein: Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit	Ergänzende Deutsche Norm für die Beurteilung der Eignung von Naturstein unter den klimatischen und zusätzlichen Beanspruchungsbedingungen von Mitteleuropa, besonders für poröse Natursteine (Sandstein und Kalkstein) zu empfehlen

Tab. 6.3-3: Wichtige Produktnormen für Naturwerkstein (Auswahl).

Norm	Titel	Hinweise
DIN EN 1467	Naturstein-Rohblöcke: Anforderungen	Enthält Anforderungen an geometrische Maße, Volumen, petrographische Bezeichnung, visuelles Aussehen und erste Natursteinprüfungen (Dichte, Porosität, Biegefestigkeit)
DIN EN 1341	Platten aus Naturstein für Außenbereiche	Enthält detaillierte Angaben zu Anforderungen und Prüfverfahren
DIN EN 1342	Pflastersteine aus Naturstein für Außenbereiche	Enthält detaillierte Angaben zu Anforderungen und Prüfverfahren
DIN EN 1343	Bordsteine aus Naturstein für Außenbereiche	Enthält detaillierte Angaben zu Anforderungen und Prüfverfahren
DIN EN 771-6	Festlegungen für Mauersteine-Natursteine	Festlegungen für Mauersteine: Natursteine Das Dokument enthält Angaben zu den erforderlichen Prüfnormen, legt die Eigenschaften und Anforderungen für die Verwendung im Mauerwerk als Mauerstein mit einer Breite > 80mm fest.
DIN EN 12057	Natursteinprodukte: Fliesen	Enthält detaillierte Angaben zu Anforderungen und Prüfverfahren
DIN EN 12058	Natursteinprodukte: Bodenplatten und Stufenbeläge	Enthält detaillierte Angaben zu Anforderungen und Prüfverfahren
DIN EN 1469	Natursteinprodukte: Bekleidungsplatten	Enthält detaillierte Angaben zu Anforderungen und Prüfverfahren
DIN 18332	VOB: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Naturwerksteinarbeiten	In der Regel Grundlage für die Vergabe von Bauleistungen öffentlicher Auftraggeber in Deutschland



Magmatische Gesteine und Metamorphite enthalten bisweilen sulfidische Erzminerale (häufig Pyrit), die später bei Verwendung in Plattenbelägen unter Bewitterung zu rostigen Farbveränderungen führen können. Auch können im Mineralbestand einzelne Minerale Anzeichen von Verwitterung oder Alteration aufweisen (z.B. serizitisierte Feldspäte, Veränderung an Biotiten, usw.). Auch für die petrographische Analyse ist eine repräsentative Probenahme im Steinbruch von Nöten, damit mögliche Problembereiche frühzeitig erkannt werden.

Die petrographische Prüfung nach DIN EN 12407, eine mineralogische Detailanalyse mit makroskopischer und mikroskopischer Ansprache (Abb. 6.2-7), führt zu einer genauen Charakterisierung der stofflichen Zusammensetzung und des Gefüges von Naturstein. Aus dem strukturellen Aufbau (sichtbare Porosität, Schichtung, Trennflächen, Kornzemente) und der Mineralzusammensetzung können auch erste Rückschlüsse auf das mögliche Verwitterungsverhalten eines Natursteines gezogen werden. Neben einer ausreichenden Festigkeit für den (baulichen) Verwendungszweck sind unter dem Gesichtspunkt des Verwitterungsverhaltens poröser Gesteine die Bestimmung der Porenraumeigenschaften, d.h. Porenvolumen und Porenradienverteilung,

Abb. 6.3-2: Laboreinrichtung (Triaxialpresse) zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Gesteinskernen.

Tab. 6.3-4: Tabelle der benötigten Prüfverfahren für die Erstprüfung nach ausgewählten europäischen Produktnormen (aus: BRÄNDLEIN & DEPPISCH 2007); FTW = Frost-Tau-Wechsel, BF = Biegezugfestigkeit, DF = Druckfestigkeit.

Produkte aus Naturstein	Produktnormen					
	Rohplatten	Fassade	Fliesen	Platten	Mauerwerk	
	EN 1467	EN 1468	EN 1469	EN 12057	EN 12058	EN 12059
Erforderliche Prüfungen (Prüfnormen)						
Bezeichnung (EN 12440)						
Rohdichte, offene Por. (EN 1936)						
Biegefestigkeit (EN 12372/13161)						
Ausbruchslast (EN 13364)						
Frostbeständigkeit (EN 12371)			(12FTW+BF)	(48FTW+BF)	(48FTW+BF)	(48FTW+DF)
Wasseraufnahme (EN 13755)						
Abrieb (EN 14157)						
Rutsicherheit (EN 14231)				(>1 mm)	(> 1mm)	
Druckfestigkeit (EN 1926)						

sowie die spezifische innere Oberfläche des Gesteins von zentralem Interesse, da diese meistens eng mit den Eigenschaften des Korngefüges korreliert. Den größten Schwankungsbereich von Sedimentgesteinen weisen Sandsteine von 5–20 Vol.-% auf, aber auch besonders poröse Gesteine wie Kalktuffe können höhere Porositäten bis ca. 30 Vol.-% aufweisen (Kap. 4.12.3). Dabei wird das Materialverhalten überwiegend von der Porenradienverteilung, d.h. der Größe der Zugangsöffnung der Poren im Bereich bis 100 µm beeinflusst. Dieser Bereich ist besonders für die hygrischen Eigenschaften (Feuchteabsorption, kapillare Wasseraufnahme, Wassersättigung und das Trocknungsverhalten) eines Gesteins entscheidend. Die Porenraumeigenschaften bestimmen die Art und Höhe des Feuchtetransports im Gestein und sind deshalb charakteristisch für das Verwitterungsverhalten, welches darüber hinaus noch vom Mineralchemismus (z.B. karbonatisch, silikatisch, tonig) mitbestimmt wird. Diese Eigenschaften zusammen sind an Lösungsprozessen, bei Verwitterungsreaktionen an Mineralen und dem Auftreten von Salzausblühungen wesentlich mitbeteiligt. Für die Beurteilung des tatsächlichen Verwitterungsverhaltens eines Gesteins ist die Kenntnis von den Umgebungsbedingungen (Exposition bezüglich Beregnung, Sonneneinstrahlung, Windlast, Immissionen, usw.) an einem Bauwerk von zusätzlicher Bedeutung (MIRWALD 2007).

Für die Verwendung und den Einsatz von Naturwerksteinprodukten im Bauwesen liegen heute eine Vielzahl von Prüfverfahren und Produktnormen als harmonisierte europäische Normen vor, die für unterschiedliche Einsatzzwecke entwickelt worden sind. In Tab. 6.3-3 wird eine Auswahl von Produktnormen für Naturwerkstein vorgestellt, die ständig erweitert und aktualisiert werden.

Darüber hinaus sind weitere Prüfnormen und Produktnormen verfügbar. Die Beachtung und Einhaltung dieser Normen ist für die CE-Kennzeichnung, die für das in Verkehr bringen von Natursteinprodukten innerhalb der EU maßgebend ist, verpflichtend. Die CE-Kennzeichnung

ist als erstes für Produkte nach DIN EN 1341 bereits im Jahr 2003 eingeführt worden, weitere Produktnormen folgten. Für Produkte aus Naturwerkstein wurde mit Einführung der CE-Kennzeichnung eine Erstprüfung von technischen Eigenschaften und eine werkseigene Produktionskontrolle gefordert (Tab. 6.3-4). Für bestimmte Anwendungsfälle, wie zum Beispiel im Verkehrswegebau, können durch die Bauordnungen der Länder zusätzliche Prüfungen und Eignungsnachweise erforderlich werden (z.B. TL Pflaster = Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen).

Die zur Zeit gültigen Produktnormen für Naturstein fordern aktuelle gesteintechnische Prüfungen und zusätzliche Angaben zum Aussehen der jeweiligen Werksteine, wie Farbe, Aderung, Textur, Einschlüsse, Oberflächenbeschaffenheit usw. Zu den normgemäßen Aufgaben des Naturwerksteinproduzenten bzw. Lieferanten gehört die Herausgabe einer Musterprobe in angemessener Größe, damit der Käufer einen realistischen Eindruck von den Produkteigenschaften erhält. Insbesondere werden an das Aussehen von Natursteinplatten strenge Maßstäbe durch die Anwendung der DIN EN 12407 „Prüfung von Naturstein – Petrographische Prüfung“ angelegt. So sind Anzeichen von Verwitterung und Umwandlungen (z.B. Umwandlung von Sulfiden, Diffusion von Eisenhydroxiden), Verwitterungen von Feldspäten (z.B. Serizitisierung), Umwandlungen von Biotit (Chloritisierung) in der petrographischen Gesteinsbeschreibung anzugeben, wenn sie spezifische bzw. typische Gesteinsmerkmale sind (GRUNENBERG 2008).

Im weiten Anwendungsfeld von Naturwerkstein in der Denkmalpflege ist die Auswechslung geschädigter Steine die klassische Methode der Instandsetzung. Insbesondere die Vorgaben zur Verkehrssicherheit und die praktische Zugänglichkeit der Bauteile bedingen den Austausch oder Teilaustausch geschädigter Werkstücke in Abständen von teilweise mehreren Jahrzehnten anstelle von steinkonservierenden

Tab. 6.3-5: Kriterien zur Prüfung der Verträglichkeit von Ersatz- und Originalgestein (aus: SNETHLAGE 2008).

Struktur: grob-, mittel- oder feinkörnig, Textur beachten
Mineralbestand: Vergleich der Art des Bindemittels (z.B. karbonatische oder tonige Bindung)
Porositätsklassen: hoch (> 20 Vol.-%), mittel (20–10 Vol.-%), niedrig (< 10 Vol.-%)
Porenradienverteilungsklasse: Porenradienmaximum im Bereich der Grobporen $> 50 \mu\text{m}$, Porenradienmaximum im Bereich der Mittelporen $50\text{--}1 \mu\text{m}$, Porenradienmaximum im Bereich der Feinporen $< 1 \mu\text{m}$
w-Wert-Klassen: gering saugend ($w < 0,5 \text{ kg/m}^2\text{/h}$), mittel saugend ($w = 0,5\text{--}3,0 \text{ kg/m}^2\text{/h}$), stark saugend ($w > 3,0 \text{ kg/m}^2\text{/h}$). Bei stark beanspruchten Bauteilen wie Gesimse, Kreuzblumen, Balustraden, die original aus stark saugenden Werksteinen bestehen, kann der Ersatz mit geringer saugendem Material sinnvoll sein
s-Wert: Der Sättigungswert sollte $< 0,70$ sein
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl: μ (wet- und dry cup-Verfahren) ± 10 (Abweichung vom Originalgestein)
Druckfestigkeit und E-Modul: 80–120 % des Originalgesteins

Maßnahmen. Dabei sollte, wie zu Eingang erwähnt, vorzugsweise originales Steinmaterial verwendet werden, außer es weist eine besondere, materialbedingte Verwitterungsanfälligkeit auf. In vielen Fällen, in denen das Originalgestein nicht mehr verfügbar ist, ist man jedoch gezwungen auf Natursteine mit ähnlicher Farbe und Struktur auszuweichen. Für größere Projekte sollte aber mit Hilfe des Geologischen Dienstes oder von einschlägig erfahrenen Geobüros geprüft werden, ob nicht durch die Reaktivierung alter Steinbrüche das geforderte Originalmaterial verfügbar gemacht werden kann. Im vorliegenden Buch sind dazu zahlreiche Beispiele genannt.

Die Auswahl sollte neben optischen Kriterien besonders auch die Gesteinseigenschaften (Porosität, chemisch-mineralogische Zusammensetzung usw.) in Betracht ziehen, da allzu große Unterschiede in den angrenzenden Flächen zu erheblichen Folgeschäden führen können (SNETHLAGE 2008). Für die Untersuchung und Beurteilung zur Verträglichkeit von Ersatz mit Originalgestein eignen sich die Kriterien in Tab. 6.3-5. Um eine gute Kompatibilität der Materialeigenschaften beim Steinaustausch zu gewährleisten, sollten die Eigenschaften des Ersatzmaterials für alle in dieser Tabelle angeführten Kriterien jeweils in derselben Klasse bzw. Größenordnung liegen.

Für eine ausführliche Darstellung der neuesten Entwicklung rund um den Rohstoff Naturstein wird auf den Band 158, Heft 3 und 4 der Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften hingewiesen, die sich mit dem Rohstoff Naturstein – Natural Building Stone Resources – in 2 Teilen ausführlich und umfassend beschäftigen.

6.4 Empfehlungen zur Erkundung von Werksteinvorkommen in Baden-Württemberg

Die fachlichen Erkundungsziele – von der Ausdehnung und nutzbaren Mächtigkeit einer Lagerstätte bis zu den Nutzungskonkurrenzen – wurden schon in Abschnitt 6.1 erörtert. Zusammenfassend kann man

sagen, dass durch Aufsuchung eine Werksteinlagerstätte erkannt werden soll, die hohe gesteintechnische Qualität und langlebige Vorräte aufweist und mit heutiger Abbautechnik wirtschaftlich gewinnbar ist. Dabei sind ökologische Belastung und, im Sinne der Nachhaltigkeit (WM 2004), Flächeninanspruchnahme sowie Energieaufwand möglichst gering zu halten; die in Angriff genommene Lagerstätte soll möglichst vollständig genutzt werden. Grundsätzlich umfasst die Erkundung von Naturwerksteinlagerstätten folgende wesentliche Arbeitsschritte, nachdem benötigter Gesteinstyp, Haupteinsatzzwecke (Baudenkmalpflege, Aus- und Neubau, Innenarchitektur, Garten- und Landschaftsbau oder kombinierter Werkstein- und Massenrohstoffabbau), erforderliche technische Eigenschaften und Mengenbedarf festgelegt bzw. abgeschätzt wurden:

- (1) Auswertung topographischer und geologischer Karten sowie geophysikalischer Bilddaten (Laser-Scan/DGM); Nutzung rohstoffgeologischer Karten und Erläuterungen (KMR 50, siehe nachfolgende Aufstellung).
- (2) Zusammenstellung und Auswertung von Archivunterlagen, z.B. des LGRB und der Standortgemeinden (frühere Bohrungen, Steinbruchkataster, Ortsakten usw.).
- (3) Geländeaufnahmen mit Probenahme in alten Steinbrüchen.
- (4) Prüfung auf Nutzungskonkurrenzen, Schutzgebiete, Eigentumsverhältnisse und Zugänglichkeit.
- (5) Detailkartierung, unterstützt von Schürfen und Flachbohrungen.
- (6) Durchführung von Kernbohrungen, petrographische und gesteinsphysikalische Untersuchungen am Kernmaterial, ggf. Ergänzung des Bohrprogramms durch geophysikalische Feldmessungen.
- (7) Technische Planung und Genehmigungsverfahren zum Probeabbau unter Beteiligung einschlägig erfahrener Geobüros.
- (8) Durchführung und Bewertung des Probeabbaus vor allem zur Ermittlung wichtiger Lagerstättenparameter wie Rohblockgrößen, Lagerstätten- und Deckschichtenmächtigkeit, nicht verwertbarer Anteil und geotechnischer Parameter.
- (9) Auswertung aller Daten und Entscheidung für oder gegen den Hauptabbau.

Hinweise auf nützliche Karten und Schriften: Mehrere Spezialpublikationen über Naturwerksteinvorkommen in Baden-Württemberg sind bereits verfügbar, die bei der Erkundung hilfreich sein können, wie nachfolgende Aufstellung zeigt. Weitere Karten und Erläuterungshefte aus der Reihe der Karte der mineralischen Rohstoffe von Baden-Württemberg 1 : 50 000 (KMR 50) sind in Bearbeitung. Aktuelle Informationen über den Stand der Landesaufnahme sind verfügbar unter: <http://www.lgrb.uni-freiburg.de>, Fachbereich Rohstoffgeologie > Produkte.

Verfügbare rohstoffgeologische Kartenwerke mit zugehörigen Erläuterungen, auf denen Naturwerksteinvorkommen behandelt werden, sind (nach aufsteigender Nummer der Blätter im Maßstab 1 : 50 000):

KMR 50, Blätter L 6516 Mannheim, L 6518 Heidelberg-Nord und L 6716 Speyer mit Anteilen von L 6316 Worms und L 6318 Erbach (KLEINSCHNITZ 2012); naturwerksteinführende Einheiten: Buntsandstein (Neckartäler Hartsandstein, Roter Mainsandstein).

KMR 50, Blatt L 6718 Heidelberg-Süd (KLEINSCHNITZ 2009); naturwerksteinführende Einheiten: Buntsandstein (Neckartäler Hartsandstein), Schilfsandstein (Weiler Sandstein), Rhätsandstein.

KMR 50, Blatt L 6924 Schwäbisch Hall (BOCK & KÖBLER 2003); naturwerksteinführende Einheiten: Lettenkeuper-Sandstein, Schilfsandstein (Gebiet Murrhardt – Gaildorf – Crailsheim).

KMR 50, Blatt L 6926 Crailsheim (BOCK 2005); naturwerksteinführende Einheiten: Muschelkalk, Lettenkeuper-Sandstein, Schilfsandstein (Gebiet Murrhardt – Gaildorf – Crailsheim).

KMR 50, Blätter L 7114 Rastatt und L 7116 Karlsruhe-Süd (KIMMIG & KESTEN 2010); naturwerksteinführende Einheiten: Buntsandstein (Tigersandstein, Nordschwarzwälder Buntsandstein).

KMR 50, Blatt L 7118 Pforzheim (KNAAK 2004); naturwerksteinführende Einheiten: Buntsandstein (Nordschwarzwälder Buntsandstein), Schilfsandstein (Maulbronner Sandstein).

KMR 50, Blätter L 7120 Stuttgart-Nord und L 7122 Backnang (HOFFMANN & KIMMIG 2008); naturwerksteinführende Einheiten: Schilfsandstein (Stuttgarter Schilfsandstein, Schilfsandstein von Winnenden, Gebiet Murrhardt – Gaildorf – Crailsheim), Stubensandstein (Welzheimer Wald – Gschwend), Cannstatter Travertin.

KMR 50, Blätter L 7126/L 7128 Aalen/Nördlingen und L 7326/L 7328 Heidenheim a. d. Brenz/Höchstädt a. d. Donau (WITTENBRINK, in Vorb.); naturwerksteinführende Einheiten: Stubensandstein, Eisensandstein.

KMR 50, Blätter L 7312 Rheinau und L 7314 Baden-Baden mit Westteil des Blattes L 7316 Bad Wildbad (ANDERS & KIMMIG 2011); naturwerk-

steinführende Einheiten: Schwarzwälder Granite (Bühlertal-Granit, Forbach-Granit, Oberkirch-Granit), Buntsandstein (Tigersandstein, Nordschwarzwälder Buntsandstein).

KMR 50, Blätter L 7512/L 7514 Offenburg/Oberkirch (Westteil) und L 7712 Lahr im Schwarzwald (POSER & KLEINSCHNITZ 2011); naturwerksteinführende Einheiten: Schwarzwälder Granite (Seebach-Granit), Buntsandstein (Lahrer Sandstein, Emmendinger Buntsandstein).

KMR 50, Blätter L 7516 Freudenstadt und L 7518 Rotenburg am Neckar (KESTEN & WERNER 2006); naturwerksteinführende Einheiten: Buntsandstein (Loßburger und Freudenstädter Buntsandstein, s. Abb. 6.4-2), Kalktuffe.

KMR 50, Blatt L 7718 Balingen (KIMMIG et al. 1999); naturwerksteinführende Einheiten: Schilfsandstein (Wendelsheimer, Renfrizhauser und Trichtinger Schilfsandstein).

KMR 50, Blätter L 7910/L 7912 Breisach am Rhein/Freiburg i.Br.-Nord (WITTENBRINK & WERNER 2010); naturwerksteinführende Einheiten: Buntsandstein (Emmendinger Sandstein), Kaiserstühler Vulkanite).

KMR 50, L 7922 Bad Saulgau (WERNER & KIMMIG 2004); naturwerksteinführende Einheiten: Gauringer, Sonderbucher und Riedlinger Travertin.

KMR 50, Blätter L 7924/L 7926 Biberach an der Riß/Babenhausen (SZENKLER & WERNER 2000); naturwerksteinführende Einheiten: Obere Meeresmolasse (Muschelsandstein).

KMR 50, Blätter L 8124/L 8126 Bad Waldsee/Memmingen (HEINZ et al. 2002); naturwerksteinführende Einheiten: Kalktuffe.

Eine weitere Grundlage sind die geologischen Karten von Baden-Württemberg, besonders im Maßstab 1 : 25 000 und 1 : 50 000, und die im Literaturverzeichnis dieses Buches gelisteten Publikationen. Das Bohrarchiv des LGRB hält Lage- und Schichtdaten aus mehreren Hunderttausend Bohrungen bereit.

Erkundungsbeispiele aus Baden-Württemberg

Die in dieser Monographie behandelten Werksteinvorkommen variieren aufgrund ihrer verschiedenartigen geologischen Entstehung stark in Bezug auf Gesteinszusammensetzung und -eigenschaften sowie in Geometrie und Mächtigkeit. Zu ihrer Erkundung und Beurteilung sind daher verschiedene Methoden bzw. Methodenkombinationen anzuwenden. Vier praktische Beispiele sollen die vorausgegangenen allgemeinen Ausführungen zur Erkundung von Werksteinvorkommen erläutern. Besprochen wird die empfohlene Vorgehensweise anhand unterschiedlich komplexer Lagerstättentypen (Abb. 6.1-1), welche in Baden-Württemberg häufig auftreten und langfristig Bedeutung für Industrie, Handwerk und Denkmalpflege haben dürften: (A) Schwarzwälder Granit;

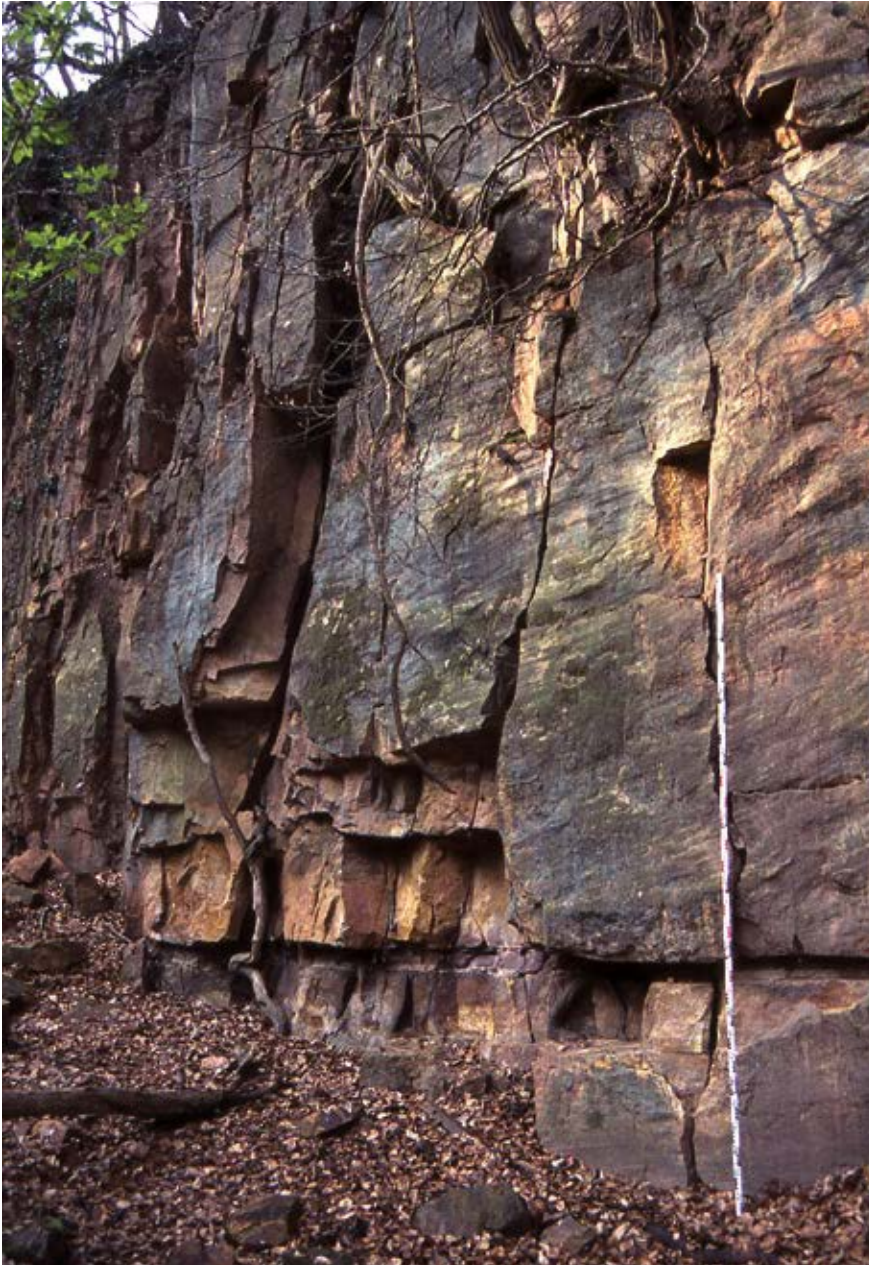


Abb. 6.4-1: Steinbruchaufnahmen liefern die wesentlichsten Erkenntnisse in Bezug auf Gesteinsbeschaffenheit und tektonische Situation eines Gebiets. Das Foto zeigt einen engständig geklüfteten und tektonisch gestörten Plattensandstein des Odenwalds in einem alten Steinbruch nahe der Oberrheingraben-Randverwerfung bei Leimen (RG 6618-310). Horizontale Störungsharnische gehen auf Blattverschiebungstektonik zurück. Dieser Buntsandstein wurde lediglich für Wegebaumaterial und für den einfachen Mauerbau verwendet.

(B) Buntsandstein; (C) Schilfsandstein und (D) Stubensandstein.

(A) Erkundungsbeispiel Schwarzwälder Granit

Bei den Schwarzwälder Granitplutonen handelt es sich um sehr große Gesteinskörper, deren zu erkundende Variabilität auf folgende Prozesse zurückgeht: (1) Unterschiedliche Kristallgröße und Verwachsung der Minerale Feldspat, Quarz, Biotit, Muskovit usw. bedingt durch unterschiedlich rasche Kristallisation aus dem Magma und durch Nebengesteinseinflüsse; (2) postgranitischer Magmatismus (Ganggesteine) und Hydrothermalaktivität; (3) postgranitische Tekto-

nik, welche zu Störungszonen und unterschiedlich dichtem Kluftmuster führte; (4) junge Verwitterung (Vergrusung) und Talbildung. Aufgrund der relativ guten Aufschlussverhältnisse im steilen Gelände von Schwarzwald und Odenwald und den gleichmäßigen Bildungsbedingungen kann die Erkundung überwiegend mit kartiertechnischen Methoden durchgeführt werden.

Seitens der Werksteinindustrie nachgefragt sind Granite mit großer Einheitlichkeit, geringem Alterationsgrad der Minerale (frische Feldspäte und Glimmer), fester Verwachsung der Minerale und weitständigem Kluftmuster. Günstig sind Geländeareale, in denen aufgrund moderater Hangneigung Gesteinsabbau mit breiten Bermen und ohne oder mit nur geringen geotechnischen Risiken möglich ist. Stark zertalte Gebiete (Täler folgen tektonischen Vorzeichnungen), nebengesteinsreiche Randbereiche der Granitplutone und Nahbereiche zur permotriadischen Landoberfläche (erdgeschichtliche Verwitterung) sollten daher gemieden werden.

Granite mit langfristig guter Haltbarkeit zeichnen sich durch einheitliche, klare Kristallfärbungen aus und weisen keine oder kaum Kluftflächen mit braunen oder rötlichen Bestegen (Limonit, Hämatit) oder Anzeichen beginnender Auflösung des Kornverbands („Vergrusung“) auf. Das Augenmerk richtet sich daher bei der Geländeaufnahme auf nicht zersetzte Biotite und Feldspäte. Der Forbach-Granit z. B. ist in

weiten Gebieten entlang des Murgtals groß- bis riesenkörnig entwickelt und zeigt viele angewitterte Biotite und Feldspäte; er verhält sich zwar beim Anschlagen zäh, weist aber bereits Partien mit Vergrusung entlang von Klüften auf. Das Kluftmuster ist meist engständig und belegt intensive tektonische Beanspruchung (Abb. 4.24-14). Im Gebiet von Raumünzach hingegen ist er frisch und weitständig geklüftet; die Rohblöcke erreichen dort Größen von 20m³ und mehr.

Während klein- bis mittelkörnige Granite mit hohem Quarzanteil, wie z. B. der Seebach-Granit, auch für den Verkehrswegebau verwendet werden können, eignen sich grobkörnige und porphyrische Granite nur

eingeschränkt für den Verkehrswegebau, wohl aber gut für attraktive Werk- und Mauersteine. Als effektivste Methode zur Ermittlung rohstoffwirtschaftlich geeigneter Bereiche hat sich im Rahmen der Kartierung zur KMR 50 folgende herausgestellt:

- Auswertung geologischer Karten, vor allem zur Ermittlung bereits erkannter Störungs- und Ruschelzonen, Grenzen des Plutons und Lage alter Land- und Verwitterungsoberflächen.
- Auswertung topographischer Karten und des digitalen Höhenmodells zur Ermittlung gering zertalter und nicht übersteilter Bereiche.
- Kartierung entlang von Straßenaufschlüssen, in Steinbrüchen und Seitenentnahmen zur Ermittlung der Gesteinsfestigkeit, dem Erhaltungsgrad der Feldspäte und Glimmer und der Kluftmuster und Kluftabstände (Blockgrößen); erfahrungsgemäß sind alle länger betriebenen, größeren Steinbrüche in Bereichen mit gutem Erhaltungsgrad und günstigen Blockgrößen angelegt worden.
- Kartierung von vergrusten Abschnitten (oft mit alten Sand- und Grusgruben) und engständig geklüfteten Bereichen als Ausschlussgebiete.
- Bohrungen oder geophysikalische Methoden sind zur Graniterkundung zumindest im Schwarzwald kaum erforderlich.

(B) Erkundungsbeispiel Buntsandstein

Es handelt sich überwiegend um flachliegende, mächtige Vorkommen von Quarzsandsteinen, die in vertikaler Richtung mehr Wechsel aufweisen als in lateraler. Wichtigstes Erkundungsverfahren ist die geologische Kartierung (Abb. 6.4-1 und -2), möglichst während der vegetationsarmen Monate. Aufgrund der langen und intensiven Nutzung des Buntsandsteins als Baumaterial gibt es zumeist viele Steinbrüche und Seitenentnahmen, welche die Suche nach den besten Abschnitten erleichtern. Die geologischen Karten im Maßstab 1 : 25 000 liefern ausreichend genaue Informationen über den Verlauf der verschiedenen lithostratigraphischen Abschnitte. Welche Schichtglieder besonders gute Eignung als Werksteinmaterial bieten, ist in Kap. 4.5 ausgeführt. Besonders entlang des Oberrheingraben ist durch strukturgeologische Kartierung dem durch Störungs- und Klufttektonik häufigen Wechsel der Blockgrößen und der Gesteinsfestigkeit Rechnung zu tragen (Abb. 6.4-1).

Als Beispiel für die mittels geologischer Kartierung mögliche Eingrenzung höffiger Werksandstein-Pakete im Buntsandstein können die Aufnahmen zur KMR 50 in den Lahr-Emmendinger Vorbergen angeführt werden (WITTENBRINK & WERNER 2010, POSER & KLEINSCHNITZ 2011). Die Kennzeichen des von der früheren und heutigen Werksteinindustrie genutzten oberen Abschnitts des Vogesen-Sandsteins sind (1) harte, kieselig gebundene dickbankige Sandsteine, die überwiegend steile Hänge bilden, sowie (2) weitständig geklüftete Sandsteine.

Die nicht geeigneten über- und unterlagernden Schichten lassen sich relativ leicht abgrenzen: Das Hangende der Werksandsteinpakete bilden stark quarzgeröllführende Sandsteine des Oberen Geröllsandsteins. Wegen

der tonigen Zwischenmittel und der geringeren Verfestigung bilden sie flachere Hänge (Säulenprofile im Kap. 4.5). Im Liegenden treten ebenfalls weniger feste Sandsteine des Badischen Bausandsteins auf, welche stärker geklüftet sind und geringere Bankstärken aufweisen. Sie sind dünnbankig bis plattig, häufig stark absandend und enthalten deutlich mehr Siltsteinlagen. Die geringere Kornbindung wird im Aufwitterungsbereich durch wabenartige Strukturen deutlich.

Auch im Verbreitungsgebiet des Buntsandsteins liefert die rohstoffgeologische Kartierung die wichtigsten Anhaltspunkte für die Eingrenzung des engeren Suchraums. Für den nächsten Schritt sind Kernbohrungen, gesteintechnische Untersuchungen an den durchörterten Schichten und schließlich ein Probeabbau zu empfehlen, sofern nicht gut erhaltene alte Brüche ausreichende Informationen zu Rohblockgrößen und Rohblockhöffigkeit erlauben. Der Probeabbau liefert entscheidende Daten: Erreichbare Lagerstättenmächtigkeit, Abbaumächtigkeit, verwertbarer Anteil der Förderung, Bankstärken und Rohblockgrößen, Materialeignung, Informationen zum Grundwasser und zur Standsicherheit der Abbauwände (Kap. 4.5.3.8, Tenenbach).

(C) Erkundungsbeispiel Schilfsandstein

Entscheidend für die Werksteintauglichkeit des Schilfsandsteins sind der Tongehalt der Sandsteinbänke, die Bankstärken und die nutzbare Gesamtmächtigkeit der Schilfsandstein-Schichten (Kap. 4.23). Auch hier liefert die Kartierung grundlegende Erkenntnisse, insbesondere wenn dabei Sedimentgefüge ausgewertet werden, die es erlauben, die einstige Strömungsrichtung der Schilfsandstein-zeitlichen Flüsse zu rekonstruieren. Der Tongehalt und die Dicke der Einzelschichten (blättrig, plattig, dünn- oder dickbankig) zeigen an, ob der jeweilige Aufschluss im Randbereich oder im Zentralbereich eines Sandsteinstranges liegt. Gesucht ist der möglichst kompakte, zentrale Bereich eines solchen Stranges (Abb. 4.23-4 und -7).

Wegen der tonigen Schichten, die den Schilfsandstein i. d. R. überlagern, sind jedoch generell weniger Aufschlüsse vorhanden als in den beiden zuvor genannten Beispielen. Daher sind Kernbohrungen kombiniert mit geoelektrischen Kartierverfahren zur Bestimmung der Mächtigkeitsvariationen von tonigen und von sandigen Schichten die besten Erkundungsmethoden zum Nachweis von wirtschaftlich interessanten Schilfsandsteinkörpern.

Vor Festlegung der Bohrpunkte sind strukturgeologische Analysen mittels Luftbildern und digitalem Geländemodell (DGM) sinnvoll, um zu verhindern, dass die Bohrungen in engständig geklüfteten oder tektonisch stark gestörten Bereichen angesetzt werden. Eintalungen und Einmuldungen an Geländekanten und auf den Hochflächen gehen fast immer auf solche Zerrüttungszonen zurück. Ist so ein vermutlich kompakter Sandsteinkörper eingegrenzt worden, sollte mit verdichtenden Kernbohrungen und schließlich mittels Probeabbau sowie mit den genannten petrographischen und gesteintechnischen Untersuchungen fortgefahren werden.



Abb. 6.4-2: In den ausgedehnten Wäldern des Nordschwarzwalds sind nicht selten Klippen, Weganschnitte oder kleine Steinbrüche zu finden, die einen guten Einblick in Gesteinsbeschaffenheit, Bankmächtigkeiten und Blockgrößen erlauben. Der dickbankige, fein- bis mittelkörnige Quarzsandstein der Bausandstein-Formation (Unterer Buntsandstein) bei Baiersbronn könnte leicht gewinnbares Material für Steinmetz- und Bildhauerarbeiten liefern. Das durch Kartierung abgrenzbare Vorkommen von ca. 11 ha Größe und bis 45 m Mächtigkeit könnte – wie andere Vorkommen im Nordschwarzwald – eine interessante Sandsteinlagerstätte enthalten (RG 7416-112; KMR 50 Freudenstadt: KESTEN & WERNER 2006).

(D) Erkundungsbeispiel Stubensandstein

Für die heutigen Einsatzzwecke in der Baudenkmalpflege und der modernen Architektur (meist Fassadenplatten) werden aus den Schichten des Stubensandsteins **witterungsbeständige, kieselig gebundene Quarzsandsteine gesucht**, die möglichst in Blöcken von mehreren Kubikmeter Größe gebrochen werden können. Tonig-karbonatisch oder rein karbonatisch gebundene Stubensandsteinvarietäten (Fleins), die früher zu Pflaster oder Schotter verarbeitet wurden, sind heute kaum mehr nachgefragt, vor allem weil sie schneller verwittern und überwiegend kleinstückig brechen. Schon SCHMIDT (1937) stellte bei seiner Kartierung im Raum Tübingen–Metzingen fest, dass die haltbarsten Stubensandsteinbänke grobes Korn und kieselige Bindung aufweisen. Meist handelt es sich um schwach mittelsandige Grobsandsteine, oft mit Feinkiesanteil. Die Erkundungsarbeiten des LGRB bestätigen dies.

In Kap. 4.25 wurde beschrieben und mit Beispielen erläutert, dass es sich beim Stubensandstein nicht um eine diskrete Schicht handelt, sondern um eine ganze Folge von unterschiedlich zusammengesetzten, in Geometrie und Mächtigkeit rasch wechselnden, übereinander gestapelten und lang gezogenen Sandsteinkörpern. Die Ausgangssedimente wurden in Flussrinnen und Überflutungsebenen abgelagert. Die mit Sand(stein) ausgefüllten Paläorinnen weisen meist eine Breite von 1–10 km und eine Mächtigkeit von je 2–10 m auf (ETZOLD & SCHWEIZER in: DSK 2005). Die Sandsteinkörper wechsellagern und verzahnen sich mit Silt-, Ton- und Mergelschichten.

Im Gegensatz zum Schilfsandstein variieren die Stubensandsteinpakete deutlich im Korngrößenspektrum, den Schichtmächtigkeiten und in Matrix und Kornbindung. Die Korngrößen reichen von siltig bis konglomeratisch, das Bindemittel der Quarzkörner kann karbonatisch, tonig-silikatisch, kaolinitisch, kieselig oder kleinräumig wechselnd kieselig und karbonatisch sein. Daher können im oberflächennahen Bereich feste Blöcke neben sandig aufgewitterten Partien auftreten. Bei der Kartierung in Gebieten mit vielen alten Gruben und Steinbrüchen fällt i. d. R. auf, dass diese Wechsel auf recht kurzer Distanz (lateral einige Hundert Meter,

vertikal einige Meter) erfolgen. Diese Verhältnisse in Bezug auf die Lagerstättengeometrie machen es nötig, detailliert zu kartieren und engmaschig zu erkunden.

Die amtliche geologische Karte GK 25 differenziert die einzelnen Sandsteinschüttungen meist nicht, erlaubt aber eine Abschätzung, ob die vielen in Waldgebieten noch auffindbaren Gruben und Steinbrüche eher dem oberen, mittleren oder tieferen Teil der i. d. R. söhlig liegenden Abfolge zuzuordnen sind. Die Bemusterung aller alten Steinbrüche und der sonstigen Aufschlüsse (Weg- und Bachanschnitte) und der oft ausgedehnten Halden ermöglicht meist innerhalb kurzer Zeit die Eingrenzung eines Bereichs mit kieselig gebundenen Sandsteinen.

Die geologische Karte gibt auch Hinweise zur Lage von Störungszonen. Auffallend geradlinig verlaufende Eintalungen weisen meist auf tektonische Zerrüt-

tungszonen hin, vor allem wenn zahlreiche Talzüge die gleichen Richtungen aufweisen. Bereits an der Orientierung und den Abständen der Klüfte lässt sich ablesen, ob sie als tektonische Begleitgefüge (der Störung folgend oder zugehörig) zu sehen sind. Im Schulterbereich von steilen Hanglagen machen sich oft Extensionsklüfte bemerkbar, die nicht auf tektonische Ursachen sondern auf Schichtgleiten zurückzuführen sind.

Eine hohe Dichte von früheren Gewinnungsstellen im Stubensandstein kann nicht als Maß für die heutige Eignung der Gesteine herangezogen werden; zum einen wurden die meisten Gewinnungsstellen nahe der Orte und an größeren Verkehrswegen angelegt und zum anderen wurden gerade die besonders massigen und harten Sandsteinlager oft gemieden, weil ihr Abbau aufwändig war und die Nachfrage eher handlichen Mauerquadern und lockerem Maurersand („Stubensand“) galt. Entscheidend bei der Aufschlussaufnahme sind die Ermittlung des Sandsteintyps und des vorherrschenden Bindemittels im frischen Handstück sowie der Mindestlagermächtigkeiten. Durch die Bestimmung von Schüttungsrichtungen im Sandstein können Informationen über den weiteren Verlauf der ehemaligen Flussrinne erhalten werden.

Im Vergleich zum Buntsandstein und zum Schilfsandstein ist der Stubensandstein anfällig auf Verwitterungslösungen und variable Grundwasserverhältnisse (GW-Schwankungsbereich), weil besonders die groben, kieselig und kaolinitisch gebundenen Varietäten hohe Porositäten aufweisen und die kieselig fest gebundenen Grobsandsteine spröde und daher stärker bruchhaft auf Bewegungen reagieren (Tektonik, Hanggleitung; Abb. 6.2-8) als z. B. tonig gebundene Sandsteine; zudem verwittern Kaolinit und andere Tonminerale, Feldspäte und eingesprengte Karbonate unter diesen Bedingungen leicht.

Die Aufzählung der bedenkenswerten Parameter gibt eine Vorstellung davon, dass die rohstoffgeologische Erkundung auf annähernd homogene und kompakte Sandsteinlager in den Stubensandstein-Schichten (Löwenstein-Formation) nur durch viele Aufschlüsse, d. h. meist zahlreiche Bohrungen, ggf. kombiniert mit Schürfen und Probeabbauen, zu verlässlichen Aussagen führen kann.

Die Erkundung auf Stubensandstein im Gebiet Waldenbuch–Neuenhaus–Schlaitdorf–Dettenhausen mittels Kartierung, Steinbruchbeprobungen, Bohrungen und Probeabbauarbeiten ist in Kap. 4.25.4.3 ausführlich dargestellt und mit zahlreichen Abbildungen illustriert. In diesem Gebiet wurde im Rahmen der Prospektion auf Stubensandstein für das Ulmer Münster folgende Vorgehensweise gewählt und durchgeführt:

- Ermittlung aller ehemaligen Abbaustellen in den Stubensandstein-Schichten anhand von topographischen Karten verschiedener Jahrgänge und Abgleich mit dem Digitalen Geländemodell DGM, in dem alle nicht aufgefüllten Gruben gut zu erkennen sind.
- Begehung aller identifizierten früheren Abbaustellen, Dokumentation in Bezug auf Aufschlussverhältnisse, anstehende Mächtigkeiten, Gesteinstyp usw.

- Entnahme von Proben zur Grobpräparation.
- Begutachtung von steinsichtigen Bauwerken der weiteren Umgebung und Vergleich mit den Steinbruchproben.
- Planung eines Erkundungsbohrprogramms im möglichen Erweiterungsbereich der besten Steinbrüche unter Berücksichtigung von Zufahrtsmöglichkeiten, Eigentumsverhältnissen und Nutzungskonkurrenzen.
- Nach Genehmigungsverfahren und Ausschreibung, Durchführung von Kernbohrungen bis unter die früheren Steinbruchsohlen sowie von Richtbohrungen zur Untersuchung der gesamten Stubensandstein-Schichten.
- Petrographische und gesteintechnische Untersuchung (Kornbindungen, Matrixzemente, quellfähige Tonminerale, Witterungsbeständigkeit, Wasseraufnahme, Frostbeständigkeit usw.) von Bohrkernproben aus den erkannten Werksteinlagern.
- Probeabbau an gut zugänglicher Stelle im höffigen Gesteinshorizont und in einem Gebiet, in dem ein längerfristiger Hauptabbau genehmigungsfähig wäre; geologische Aufnahme des Probeabbaus, Beprobung der gewonnenen Blöcke.
- Im Fall des Probeabbaus im Gewinn Oberer Neu- bronn (Abb. 6.2-8): Neuausrichtung des Explorationsgebiets, Vergrößerung der Entfernung von der Hangschulter, Suche nach einem Areal mit (gering mächtiger) toniger Überdeckung; Modell: Abnahme der Extensionsrisse, Abnahme des Verwitterungseinflusses mit wachsender Entfernung vom Tal und der Zunahme der tonigen Deckschichtenmächtigkeit.
- Weiteres, engmaschiges Bohrprogramm, petrographische und gesteintechnische Untersuchung von Bohrkernen wie zuvor (vgl. Kap. 4.25.4.3: Modell wurde bestätigt!).
- Geoelektrische Detailkartierung zur Ermittlung der besten Lage eines weiteren Probeabbaus im aufschlusslosen Waldgelände.
- Durchführung des zweiten Probeabbaus; Entscheidung für Hauptabbau oder weiteres Suchgebiet.

Als **Fazit** ist in Bezug auf die Erkundung dieses speziellen, für unser Land seit über Tausend Jahren wichtigen Lagerstättentyps, den Naturwerksteinen, festzuhalten, dass Nachweis, Erschließung und Nutzung wirtschaftlich gewinnbarer Gesteinskörper auch bei heutigen Erfordernissen hinsichtlich Zeit- und Mitteleinsatz und unter Berücksichtigung der zahlreichen Nutzungskonkurrenzen sowie der naturschutzfachlichen Aspekte durchaus realisierbar sind. Im Gegensatz zu früher stehen viele Erkenntnisse über den Untergrund des Landes und effektive technische Verfahren zur Aufsuchung und Aufschließung zur Verfügung. Geduld, gute Planung und das berühmte „Quäntchen Glück“ gehören aber dazu. Letztlich gibt nur der Abbau letzte Gewissheit in Bezug auf die Verwertbarkeit des gesuchten Werksteins.

