



Erkundung und Untersuchung von Regensburger Grünsandstein



geologie



Erkundung und Untersuchung von Regensburger Grünsandstein

Bearbeiter:
Dr. K. Poschlod, V. Sutterer, S. Wamsler, E. Woznik

74 Seiten, 49 Abbildungen, 12 Tabellen, Augsburg 2017

Impressum

Erkundung und Untersuchung von Regensburger Grünsandstein

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
Fax.: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Redaktion:

LfU, Referat 105, Dr. K. Poschlod, Dr. G. Büttner, V. Sutterer

Bildnachweis:

Alle Bilder LfU
außer: Klaus Poschlod, Türkenfeld: Titelbild, Abb. 1, 26, 30, 31, 32
verändert nach NIEBUHR et al. 2009: Abb. 8

Druck:

Pauli Offsetdruck e.K.,
Am Saaleschloßchen 6, 95145 Oberkotzau

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier

Auflage: 500 Exemplare

Stand:

November 2017

Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird die Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Druckschrift wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
2	Restaurierung „Steinerne Brücke“	6
2.1	Reserven	6
3	Lage des Untersuchungsgebietes	8
4	Durchgeführte Maßnahmen	9
4.1	Erkundungsbohrungen	9
4.2	Laboruntersuchungen	10
4.3	Untersuchung an ausgebauten Grünsandsteinblöcken vom Bauhof Nord in Regensburg	12
5	Gesteinsbeschreibung	14
5.1	Bohrkerne	17
5.1.1	Ihrlerstein – Bohrungen GBo 1c - e	17
5.1.2	Haugenried – Bohrung GBo 2	20
5.1.3	Neudorf – Bohrung GBo 3	21
5.1.4	Kapfelberg – Bohrung GBo 5	21
5.1.5	Käfersdorf – Bohrung GBo 6	23
5.1.6	Arzweg – Bohrung GBo 7	23
5.1.7	Eilsbrunn – Bohrung GBo 8	24
5.1.8	Ganglhof – Bohrung GBo 9	25
5.1.9	Sonstige Bohrkerne	26
6	Untersuchungsergebnisse	29
7	Auswertung und Vorschläge für mögliche Neuanlagen	38
7.1	Haugenried	39
7.2	Kapfelberg	40
7.3	Arzweg	42
7.4	Ihrlerstein	43
7.5	Eilsbrunn	46
7.6	Sonstige	47
8	Alternativen zur Neuanlage eines Steinbruchs	50
9	Zusammenfassung	51
	Dank	51
	Verzeichnis der Abbildungen	52
	Verzeichnis der Tabellen	55
	Literatur	56
	Anhang – Bohrprofile	58

1 Einführung

Werksteine aus Regensburger Grünsandstein fanden an zahlreichen bekannten Bauwerken Bayerns Verwendung, so z. B. an der Münchener Residenz, der Alten und Neuen Pinakothek in München oder beim Bau der Steinernen Brücke in Regensburg.

Regensburger Grünsandstein ist einer der inhomogensten Sandsteine Deutschlands, was durch die einstigen Ablagerungsbedingungen im Kreidemeer begründet ist. Die Schwankungen im Zustand und Materialverhalten (Anreicherung von Muschelschalen, stark wechselnder Glaukonitgehalt) des Sandsteins erschweren die Auffindung eines geeigneten Werksteins in ausreichender Mächtigkeit und Qualität zusätzlich.

Charakteristisch für den Regensburger Grünsandstein ist seine graugrünliche bis gelbgrünliche Färbung, welche von unterschiedlichen Mengenanteilen an Glaukonit herrührt. Das Gestein ist fein- bis mittelkörnig, z. T. als grobkörniger Quarzsand ausgeprägt und wird hauptsächlich durch Karbonat, seltener durch Tonmergel verkittet (STREIT 1984).

Ziel der Erkundung von Regensburger Grünsandstein im Auftrag und mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie war die Aufsuche geeigneten Materials in möglichst verwitterungsbeständiger Ausbildung. Dieses soll als Werkstein, beispielsweise für Fassadenverkleidungen oder als Austauschmaterial, für Restaurierungsarbeiten an den historisch bedeutsamen Bauwerken eingesetzt werden können. Dazu hat das Bayerische Geologische Landesamt 1994 und 1995 im Großraum Regensburg insgesamt 13 Bohrungen zur rohstoffgeologischen Erkundung von Grünsandstein abgeteuft. Weitere 4 Bohrungen wurden im Dezember 2008 und Januar 2009 in Absprache mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) von der Fa. TRACO nördlich des aufgelassenen Steinbruchs Ihrlenstein niedergebracht (POSCHLOD 2008 & 2009). Zwischenzeitlich wurden weitere Untersuchungen abgeschlossen, die ebenfalls in diesen Bericht einfließen.



Abb. 1:
Steinerne Brücke in Regensburg.

2 Restaurierung „Steinerne Brücke“

Regensburger Grünsandstein wurde schon seit der Römerzeit als Werkstein eingesetzt und findet sich somit in vielen bekannten Bauwerken. Mit das älteste erhaltene Bauwerk ist die Steinerne Brücke in Regensburg, welche zwischen 1135 und 1146 erbaut wurde.

Mit der Baufälligkeit der Steinernen Brücke kam ferner das Interesse eines erneuten Grünsandsteinabbaus. Jedoch wird in den früheren Steinbrüchen, wie beim Steinbruch Ihrlerstein, seit Jahren kein Steinmaterial mehr gebrochen. Die Rohstoffversorgung für die Sanierung genannter Bauwerke war somit nicht mehr sichergestellt.

So hat sich im Jahr 2008 die Stadt Regensburg über das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) an das LfU mit der Bitte um Unterstützung bei der Aufsuche geeigneten Werksteinmaterials gewandt.

Schon in den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde von der Stadt Regensburg mit Voruntersuchungen zum Zustand des verbauten Materials begonnen. Im Verlauf des Projektes „Be-
hutsame Instandsetzung der Steinernen Brücke Regensburg“ wurden bereits 1994 (GBo 1a, 1b, 2, 3, 4, 5) und 1995 (GBo 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) dreizehn Grünsandstein-Bohrungen durchgeführt, teilweise beprobt und eingehend auf ihre Eignung hin untersucht. Im Dezember 2008 und Januar 2009 wurden vier (GBo 1c-f) weitere Bohrungen aus ehemaligen Brüchen bei Ihrlerstein abgeteuft.

Im Zuge der geplanten Restaurierung der als Bau- und Kulturdenkmal bedeutenden Steinernen Brücke wurde überschlägig berechnet, dass ca. 600–700 Kubikmeter Regensburger Grünsandstein als Austauschmaterial benötigt werden.

Die Anforderungen an das Werksteinmaterial zur Sanierung der Steinernen Brücke sind neben der o. g. Gesamtkubatur folgende wesentlichen Parameter:

- Rohblockgröße > 0,5 m³
- Riss- und Stichfreiheit
- Farbliche Eignung (Glaukonit-Anteil) wie auch strukturelle Eignung (z. B. Fossilarmut)
- Einhaltung gesteinsphysikalischer Werte (z. B. Wasseraufnahme, Frostbeständigkeit)

2.1 Reserven

Auf dem Bauhof der Stadt Regensburg lagerten in den Jahren 2009/2010 ca. 580 Grünsandsteinblöcke aus demontierten Bauwerken (u. a. Eisenbahnbrücke Schwabelweis) mit einer geschätzten Gesamtkubatur von ca. 130 m³. Unterschiede z. B. in Farbe und Struktur deuten auf eine unterschiedliche Herkunft hin. Die Blockgröße liegt meist bei ca. 0,1–0,2 m³, ist selten größer und erreicht maximal 0,6 m³.

Einige dieser Blöcke eignen sich wegen Stichen, Verwitterungserscheinungen oder geringer Blockgröße nicht oder kaum als Austauschmaterial bzw. dürften die geforderten gesteinsphysikalischen Grenzwerte teilweise nicht erfüllen.

Die meisten Gesteinsblöcke wurden im Jahr 2010 durch geophysikalische Messungen der LGA Nürnberg geprüft und in drei Kategorien A, B und C eingeteilt. A entspricht einer Druckfestigkeit von ≥ 35 MPa, B einer Druckfestigkeit von 25–35 MPa und C einer Druckfestigkeit von < 25 MPa. Die Kategorie A ist für tragende Teile bestimmt, die Kategorien B und C für nichttragende Teile.

Diese Voreinschätzung wurde anschließend durch ein Steinmanagement-Team der LGA Nürnberg (Hr. Stolarski), des BfB Karlsruhe (Prof. Dr. Egermann), des BLfD München (Dr. Bittner), der Steinwerkstatt Regensburg (Hr. Endemann), der Stadt Regensburg (Hr. Walter) und des LfU Augsburg (Dr. Poschlod) Stein für Stein, durch Anschlagen und visueller Beurteilung auf Risse und Stiche, überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass rund 50 % des Gesteinsvolumens nach Aufsägen der einzelnen Blöcke für den Einbau in die Steinerne Brücke verwendbar ist.

Ob das am Bauhof Nord lagernde Material für die komplette Restaurierung der Steinernen Brücke reicht (geplanter Abschluss 2018), ist bis dato (Februar 2017) nicht geklärt.



Abb. 2:
Unterer Teil eines Bogens der
Steinernen Brücke. Die auszu-
tauschenden Blöcke sind mit
roten Kreuzen markiert.



Abb. 3:
Lagernde Blöcke von Regens-
burger Grünsandstein am Bau-
hof Regensburg.

3 Lage des Untersuchungsgebietes

Das Hauptverbreitungsgebiet des Regensburger Grünsandsteins ist auf nördlich, westlich, nord- und südwestlich von Regensburg gelegenen Bereiche, verteilt auf 8 TK-25-Blätter (6837, 6838, 6937, 6938, 7037, 7038, 7137, 7138), beschränkt (BAUBERGER & CRAMER 1961; BAUBERGER, CRAMER & TILLMANN 1969; RUTTE 1962). Von Norden nach Süden nimmt die Mächtigkeit zu. Zahlreiche ehemalige Gewinnungsstellen liegen in Ufernähe der Donau im Bereich zwischen Regensburg und Kelheim. Letzte Abbautätigkeiten auf Regensburger Grünsandstein fanden bis vor wenigen Jahrzehnten im Steinbruch westlich von Ihrlersstein statt.

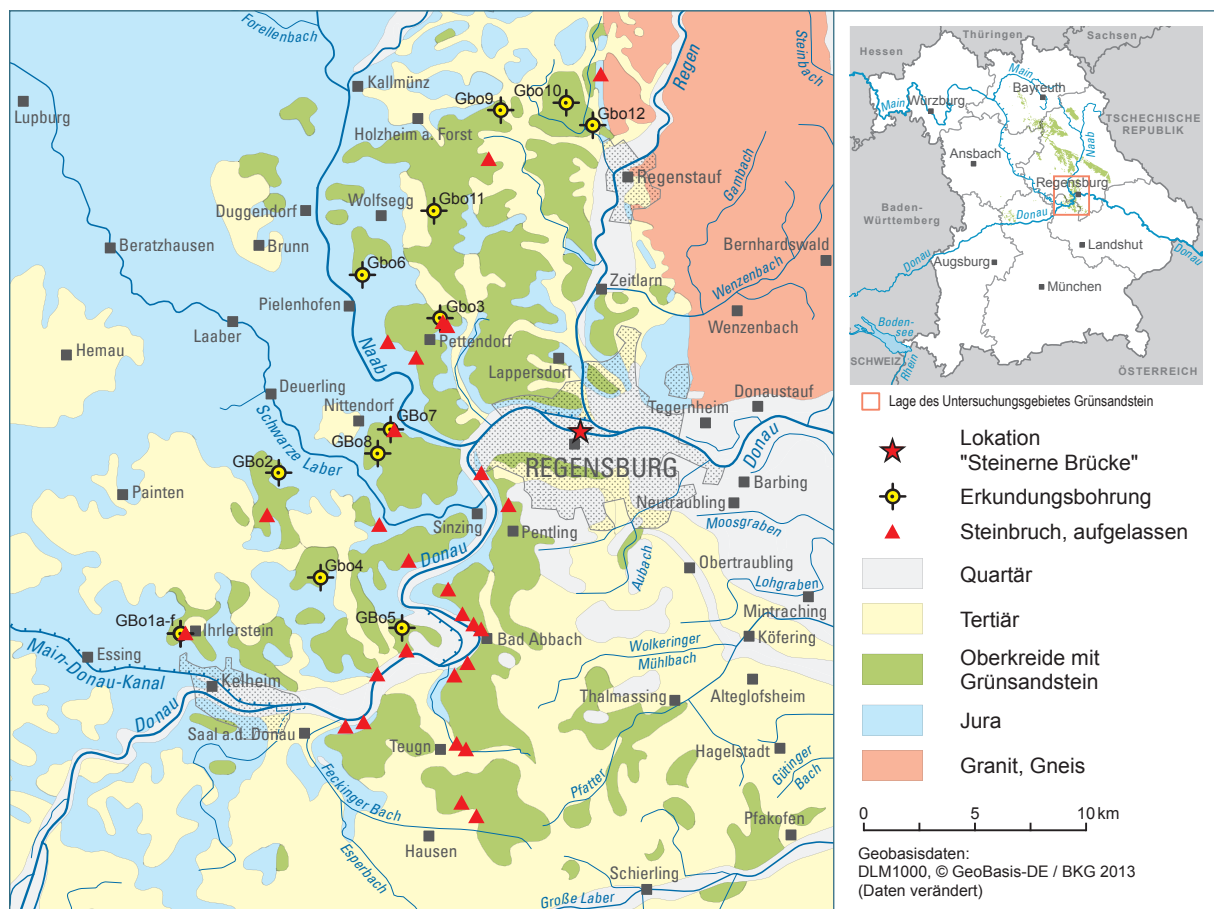


Abb. 4: Verbreitungsgebiet des Regensburger Grünsandsteins. Lage der 1994/1995 durch das Bayerische Geologische Landesamt (GLA) und der in den Jahren 2008/2009 durch die Fa. TRACO extern beauftragten abgeteufte Erkundungsbohrungen. Lage ehemaliger Gewinnungsstellen (Kartengrundlage Geologische Übersichtskarte, Blatt CC 7134 Regensburg).

4 Durchgeführte Maßnahmen

Vorbereitungen für die Erkundung und Untersuchung von geeigneten Grünsandsteinvorkommen waren umfangreiche Recherchen im Datenbestand des LfU (Abteilung Geologischer Dienst), auf alten Rohstoffgewinnungskarten sowie allgemeine Literaturrecherchen. Durch die GIS-basierte Darstellung von Bohrpunkten und Aufschlüssen, konnten diese bereits von konkurrierenden Nutzungen abgegrenzt werden.

Im Rahmen der anschließenden Geländetätigkeit erfolgte die Dokumentation, Datenerfassung und Beprobung von Grünsandstein. Befahren wurden ehemalige Sandsteingewinnungsstellen (inkl. des bis vor wenigen Jahren betriebenen Steinbruchs Ihrlerstein). Außerdem wurden Proben aus dem Hangenden des Kalksteinbruches Saal (direkt aus dem Bruch bzw. von bei der Fa. Kelheimer Naturstein GmbH Essing gelagertem Saaler Blockmaterial) sowie aus vorhandenem Gesteinsmaterial des Bauhofes Nord in Regensburg entnommen.

Zudem wurden geologische Aufschlüsse, Acker- und Waldflächen im Umfeld der niedergebrachten Bohrungen dokumentiert und hinsichtlich Vorkommen und Eignung untersucht.

4.1 Erkundungsbohrungen

Beprobte wurden 7 der 13 Bohrungen, die bereits 1994 und 1995 durch die Fa. Waschek Bohrtechnik GmbH & Co. KG aus Günzburg, niedergebracht wurden (GBo 2, 3, 5, 6, 7, 8 und 9). Die Prüfung der Bohrungen (GBo 1a, 1b, 4, 10, 11 und 12) ergab, dass entweder Grünsandstein nur sehr untergeordnet auftrat oder sie für die Herstellung von Prüfkörpern ungeeignetes Material, enthielten. In den Jahren 2008/2009 wurden nochmals vier Bohrungen (GBo 1c-f) bei Ihrlerstein, im Auftrag der Fa. TRACO in Absprache mit dem LfU abgeteuft und teilweise beprobt und untersucht.

Tab. 1: Übersicht der niedergebrachten Bohrungen im Erkundungsgebiet. RGS = Regensburger Grünsandstein.

Bohrung	Ort	BIS-ID	Rechtswert	Hochwert	Ansatzpunkt [m ü. NN]	Endteufe [m]	Mächtigkeit RGS – alle Varietäten [m]
GBo 1a	Ihrlerstein	7037BG015173	4489266	5422462	482	16	4,4
GBo 1b	Ihrlerstein	7037BG015174	4489276	5422468	482	16	3,8
GBo 1c	Ihrlerstein	7037BG015044	4489353	5422605	490	20,8	13,9
GBo 1d	Ihrlerstein	7037BG015045	4489462	5422714	490	22,4	15,4
GBo 1e	Ihrlerstein	7037BG015046	4489409	5422695	490	21	14,7
GBo 1f	Ihrlerstein	7037BG015049	4489536	5422750	490	14	5
GBo 2	Haugenried	6937BG000001	4493695	5429701	502	35,3	14,6
GBo 3	Neudorf	6938BG015129	4500944	5436661	437	23,5	7,2
GBo 4	Mahdholz	7037BG015025	4495576	5424988	492	27	8,2
GBo 5	Kapfelberg	7037BG015026	4499242	5422728	411	37	16,7
GBo 6	Käfersdorf	6937BG000002	4497452	5438600	476	19,3	7
GBo 7	Arzweg	6937BG000003	4498722	5431650	455	25,5	13,9
GBo 8	Eilsbrunn	6937BG000004	4498147	5430562	471	35,8	13,5
GBo 9	Ganglhof	6838BG000362	4503679	5446019	387	26,3	7,9
GBo 10	Ponholzer Forst	6838BG000363	4506629	5446345	365	15	4,5
GBo 11	Schwaighauser Forst	6838BG000364	4500671	5441493	431	33	7,2
GBo 12	Hagenau	6838BG000365	4507816	5445336	352	48,8	2,1

Die gesamte Bohrstrecke der Erkundungsbohrungen (Tab. 1) beträgt 436,7 m. Die Teufe je Bohrung bewegt sich zwischen 14–49 m. Die Bohrkern wurden in Kisten gelagert und nach Aufnahme und Fotodokumentation in das Kernlager des LfU verbracht.

4.2 Laboruntersuchungen

Das gesamte Probenmaterial wurde zu Prüfkörpern (über 860 Stück) unterschiedlicher Größe formatiert, an denen folgende gesteinsphysikalische und -chemische Parameter ermittelt wurden (vgl. Abb. 5 bis Abb. 7):

- Feuchteaufnahme (bei 45 %, 75 % und 100 % relativer Feuchte)
- Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck und unter Vakuum
- Kapillare Wasseraufnahme (w- und B-Wert)
- Hygrische Dilatation (24 h-Wert und Max-Wert)
- Sättigungsgrad
- Porosität
- Roh- und Reindichte
- Ultraschallgeschwindigkeit (inkl. Dynam. E-Modul)
- Einaxiale Druckfestigkeit (inkl. Stat. E-Modul)
- Biaxiale Biegezugfestigkeit (inkl. Stat. E-Modul)
- Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit
- Modalbestand (Polarisationsmikroskopie)
- Mineralbestimmung (XRD = Röntgendiffraktometrie)
- Bestimmung der chemischen Zusammensetzung (RFA = Röntgenfluoreszenzanalytik)

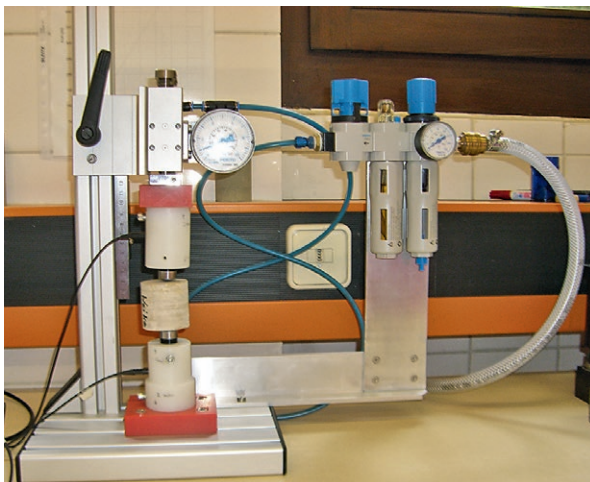


Abb. 5: Ultraschallmessung.



Abb. 6: Prüfzylinder nach Bruch.

Die Kapillare Wasseraufnahme gibt die Fähigkeit poröser Stoffe zur freiwilligen Aufnahme von Wasser an und wird mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten (= w-Wert) beschrieben. Je geringer der w-Wert bzw. die Wasseraufnahme, desto geeigneter ist der Stein als Naturwerkstein. Die Messungen können nach DIN EN 12925 oder mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen ausgeführt werden.

Ultraschallmessungen erlauben eine zerstörungsfreie Prüfung an Natursteinen und werden zur qualitativen Bestimmung der Heterogenität verwendet. Es können strukturelle Eigenschaften des

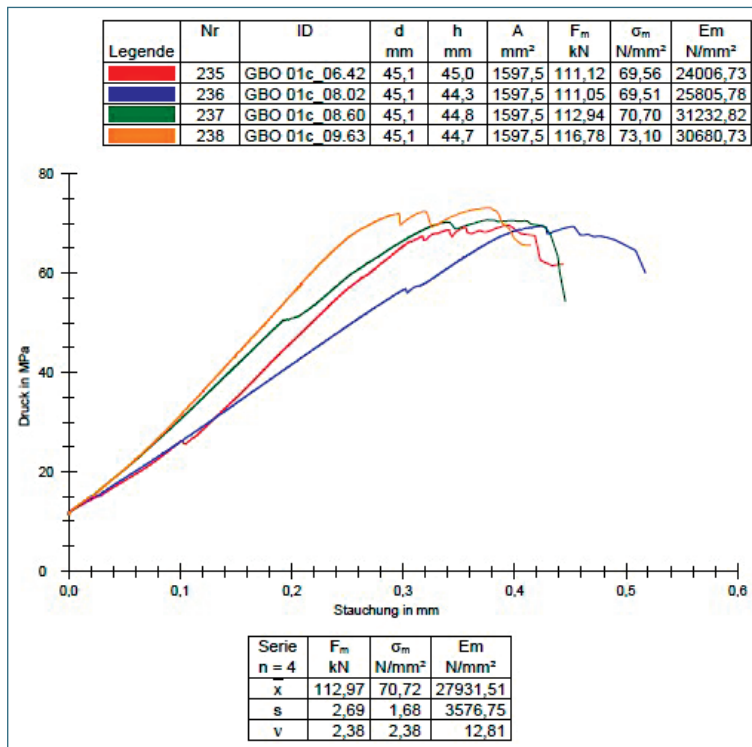


Abb. 7:
Messergebnisse der Druckfestigkeit
des Regensburger Grünsandsteins der
Bohrung GBo 1c Ihrlerstein, Typ B2.

Gesteins gemessen und erkannt werden, so z. B. offene Klüfte, offenes Porenvolumen oder Dichteänderungen im Gestein. Es ist zu beachten, dass die Messungen an trockenen Prüfkörpern durchgeführt werden, da Wassereinlagerungen zu höheren Ultraschallgeschwindigkeiten und somit zu einer falschen Einstufung des Gesteins führen können.

Um die Festigkeitseigenschaften der Sandsteinproben festzustellen und zu klassifizieren, wurde an Prüfkörpern (Durchmesser von $45,5 \pm 1$ mm) aus den gewonnenen Bohrkernen die Einaxiale Druckfestigkeit bestimmt. Die Probenaufbereitung und Versuchsdurchführung erfolgte nach DIN EN 1926 „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Druckfestigkeit“.

Die Messung der Biaxialen Biegefestigkeit an Gesteinsscheiben, mit einem Durchmesser von ca. 45 mm und einer Dicke von ca. 4,5 mm, erfolgte an einer Universalprüfmaschine der Fa. Zwick (Z 400).

Der Frostwiderstand wird durch mehrere Zyklen von Befrosten an Luft und Auftauen in Wasser geprüft. Die Wechsel sind bis zum Versagen der Proben oder bis zur vorgegebenen Zyklenzahl (max. 240) zu wiederholen. Es sind zwei Probensätze zu prüfen, eine nach n Frost-Tau-Wechsel (FTW) und eine ohne Frost-Tau-Wechsel. Die Messung der Prüfkörper erfolgte nach DIN EN 12371 „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes“.

Frostbeständig sind Gesteine:

- die Sättigungswerte (Verhältnis Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck zu Wasseraufnahme unter Vakuum) bis maximal 0,60 aufweisen
- mit einer Abnahme des Dynamischen E-Moduls bis maximal 30 %
- mit einer Abnahme des scheinbaren Volumens von maximal 1 %
- die eine Abnahme der Masse von höchstens 0,5 % (ohne deutlich sichtbare Schäden, FTW = 28) zeigen
- bei denen der Abfall der Biegezugfestigkeit maximal 20 % (FTW = 48) beträgt.

Die Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) wird dabei zur quantitativen Bestimmung der Element-Gesamtgehalte von Feststoffen eingesetzt. Die Proben werden in Form von Schmelztabletten analysiert, um eine homogene Elementverteilung zu gewährleisten. Die Ergebnisse der RFA Messungen finden sich in Tab. 8. Angegeben sind die durchschnittlichen Werte der Hauptelementoxide (Angaben in Gewichtsprozent) der einzelnen Bohrungen bzw. Fundpunkte: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅ und der Glühverlust.

Mit der Röntgenbeugungs-Analyse (XRD) werden in der Regel die vorhandenen Mineralphasen bestimmt. Es können zudem Aussagen über die Art der Bindung, die Kristallstruktur und die Qualität von Kristallen gemacht werden.

4.3 Untersuchung an ausgebauten Grünsandsteinblöcken vom Bauhof Nord in Regensburg

Im Bauhof Nord der Stadt Regensburg lagern Sandsteinblöcke, die beim Abbruch von Bauwerken (z. B. ehemalige Eisenbahnbrücke Schwabelweis) in Regensburg und Umgebung anfielen. Ob die Blöcke noch als Baumaterial geeignet sind und in der Steinernen Brücke verbaut werden können, wurde durch Messungen der Gesteinsqualität ermittelt.

Die Qualität des Steinmaterials wurde im Rahmen einer Begutachtung im Jahr 2010 durch die Landesgewerbeanstalt Nürnberg (LGA) und das Büro für Baukonstruktion (BfB) Karlsruhe in folgenden Kategorien und Verwendungszwecke eingestuft.

Kategorie	Schallgeschwindigkeit nach Impact-Echo-Verfahren [m/s]	abgeleitete Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Eignung
A	>3000	>35	Bogensteine
B	2000 bis 3000	25 bis 35	Stirnmauer/ Sichtmauerwerk
C	<2000	<25	Füllmauerwerk

Tab. 2: Kategorisierung der Sandsteine durch LGA Nürnberg und BfB Karlsruhe.

Die Kategorisierung in „A“, „B“ und „C“ erfolgte mittels des sogenannten Impact-Echo-Verfahrens. Dabei wurde jeweils die Geschwindigkeit parallel zur Schichtung gemessen. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurden Einaxiale Druckfestigkeiten (senkrecht zur Schichtung) und damit die Gesteinseignung abgeleitet.

Die eingelagerten Blöcke wurden kategorisiert und für die Sanierungsmaßnahme als verwendbare Bausteine bereitgestellt. Da dieses Verfahren samt Kategorisierung von einer für die Restaurierung der Brücke beauftragten Steinmetzfirma angezweifelt wurde, beauftragte die Stadt Regensburg das Bayerische Landesamt für Umwelt an 12 ausgewählten Blöcken die Qualitätsbeurteilung nachzuprüfen.

Schon 2008 wurden 3 Blöcke von Seiten des LfU untersucht (siehe Kapitel 6).

Die 12 anvisierten Blöcke wurden daher vom LfU am 18.12.2012, gemeinsam mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege am Bauhof Regensburg für eine erneute Untersuchung ausgewählt. Es wurden Ultraschallmessungen und Messungen der Einaxialen Druckfestigkeit durchgeführt und ausgewertet und anschließend wurden die Blöcke neu kategorisiert (POSCHLOD & KÜGLER 2013).

Die Ansprache der Bohrkerne ergab, dass es sich bei drei Blöcken (89, 184, 185) gar nicht um Regensburger Grünsandstein im eigentlichen Sinne, sondern um weiße feinkörnige, karbonatfreie Sandsteine entweder der Schutzfels-Schichten (Kreide) oder der Schichten des Coburger Bausand-

steins (Keuper) handelt. Inwiefern diese Gesteinsart als Baustein für die Brücke geeignet wäre, müsste noch gesondert geprüft werden.

Die Messung der Einaxialen Druckfestigkeit erfolgte an 89 Gesteinszylindern an einer Universalprüfmaschine der Fa. Zwick. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach DIN EN 1926, wobei einige Proben aufgrund von Heterogenitäten, Störungen und geometrischen Fehlern nicht für die DIN-gerechte Druckfestigkeitsprüfung geeignet waren. Die genauen Ergebnisse der Untersuchung sind in Kapitel 6 nachzulesen.

Die Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten an den Gesteinsblöcken durch das LfU erfolgte mit einem PC-gestützten Ultraschall-Messsystem der Fa. Geotron. Die Messungen wurden an unterschiedlichen Messpunkten wiederholt und sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung bestimmt, welche im Ergebnis die gleiche Größenordnung anzeigen und somit zur Einteilung in die gleiche Kategorie führte.

Probe Nr.	Kategorisierung		
	LfU Druckfestigkeit	Ultraschall	LGA Impact-Echo-Einstufung
84	nicht bewertet	B	B
89	A	B	C
97	B	B	B
178	B	A	C
184	B	B	C
185	A	B	B
220	A	A	C
238	A	A	A
239	C	A	A
240	C	A	A
243	A	A	A
253	A	A	A

Tab. 3:
Gegenüberstellung der Kategorisierungen.

Die Gegenüberstellung zeigt keinen eindeutigen Trend. Der methodische Ansatz, alleine durch das Impact-Echo-Verfahren bzw. Ultraschallmessungen die Druckfestigkeit von Gesteinsblöcken zerstörungsfrei zu bestimmen, kann durch die LfU-Untersuchung nicht bestätigt werden. Die hier durchgeführten Ultraschallmessungen geben ein Bild über mögliche Inhomogenitäten, die Bestimmung von Festigkeitswerten liefern sie hingegen nicht, bestenfalls Anhaltswerte.

Erst nach der Bearbeitung der Blöcke (Aufbereitung in Teilstücke der benötigten Größe) kann die Eignung zuverlässig erkannt werden. Mögliche Störungen, Einschlüsse, Klüfte, etc. können Merkmal für eine Qualitätseinbuße sein, müssen es aber nicht. Diese Erkenntnisse sind für ein Naturprodukt wie den Sandstein erfahrungsgemäß nicht ungewöhnlich.

Aufgrund der dargestellten Unsicherheiten bezüglich der alleinigen Beurteilung mittels Schallgeschwindigkeiten ist es sinnvoll, alle Sandsteinblöcke auf Einaxiale Druckfestigkeit zu untersuchen. Hiermit könnten gezielter minderwertige Blöcke als solche eindeutig bestimmt werden. Darüber hinaus könnte verhindert werden, dass nach Schallmessungen zu schlecht eingestuftes Material für nicht höherwertige Zwecke verwendet wird, obgleich es vorwiegend ausreichende Druckfestigkeitswerte einer besseren Kategorie besitzt.

5 Gesteinsbeschreibung

Die stratigraphische, kreidezeitliche Einheit „Regensburger Grünsandstein“ erweist sich als abwechslungsreiche Folge unterschiedlicher Sedimentgesteine, die sich in mehrfacher Hinsicht mehr oder weniger deutlich voneinander unterscheiden. In der Literatur hat sich die Einteilung in zwei Einheiten, den Oberen Regensburger Grünsandstein (Bad Abbach-Subformation) und den Unteren Regensburger Grünsandstein (Saal-Subformation), durchgesetzt (Abb. 8).

Das Hangende des Regensburger Grünsandsteins bildet der Eibrunner Mergel, eine tonig-schluffige meist als Lockersediment ausgebildete Einheit. Das Liegende bilden entweder die sogenannten Schutzfelschichten oder Jurakalke des Malm, auf die die kreidezeitlichen Sedimente transgredierten (Abb. 9).

Kennzeichnende Merkmale sind neben einem stark schwankenden Sand- bzw. Karbonatanteil sowie unterschiedlichem sedimentärem Gefüge vor allem Korngröße, Farbe, Härte und Fossilanteil. Hervorzuheben ist insbesondere die in Abhängigkeit vom Glaukonitanteil (ENDLICHER 1984, KOHLER 1980) unterschiedliche Grünfärbung, die bei bisher verbauten Werksteinen meist sehr ausgeprägt ist und demnach als erwünschte Eigenschaft bei der Materialwahl bislang eine wesentliche Rolle gespielt hat.

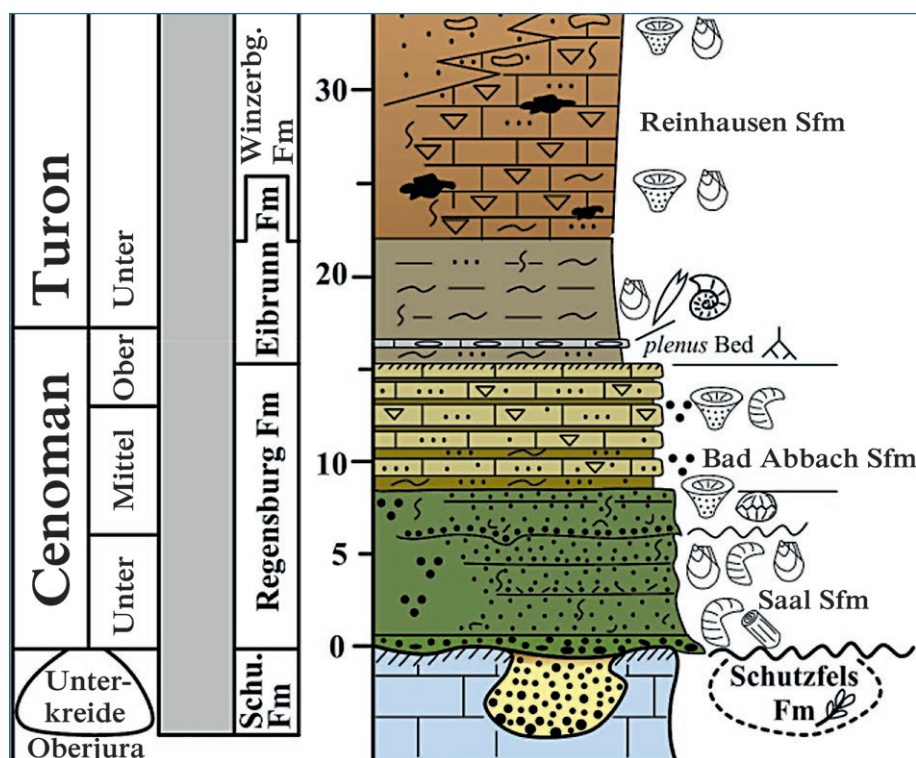


Abb. 8: Standardprofil der Danubischen Kreide-Gruppe in der Umgebung von Regensburg.

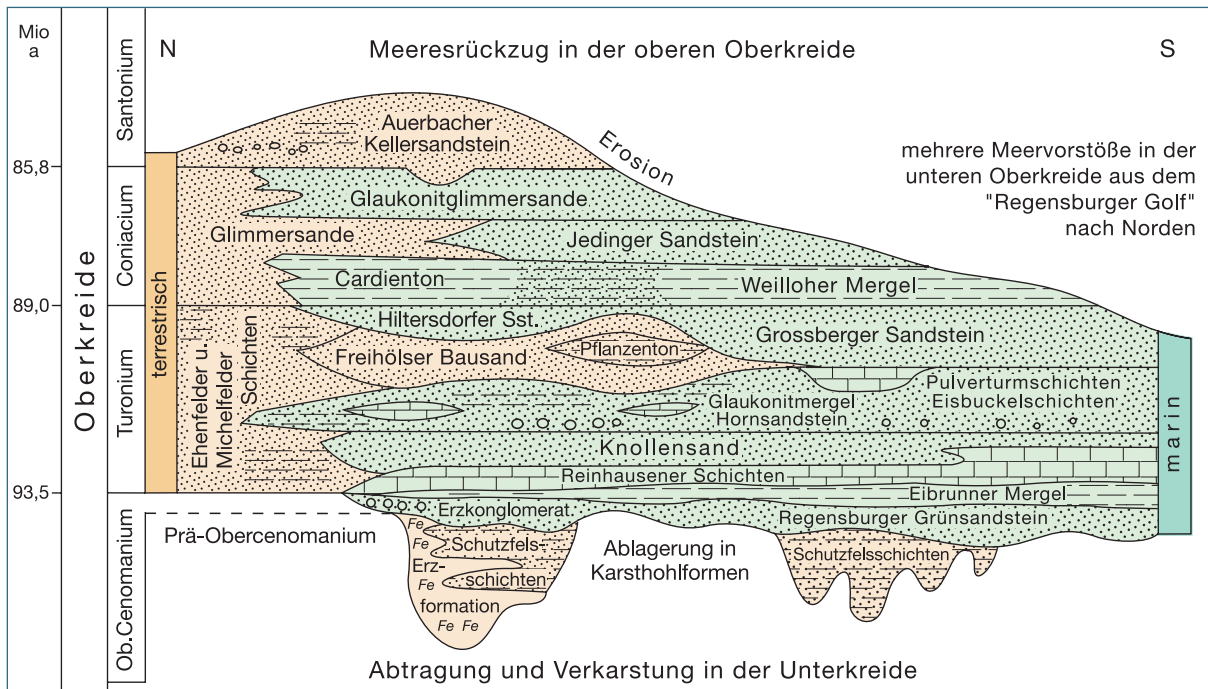
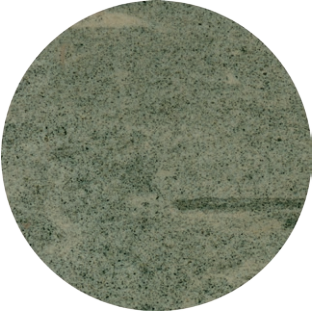



Abb. 9: Stratigraphische Einteilung der Oberkreide. Regensburger Grünsandstein findet sich als Ablagerung des oberen Cenomans.

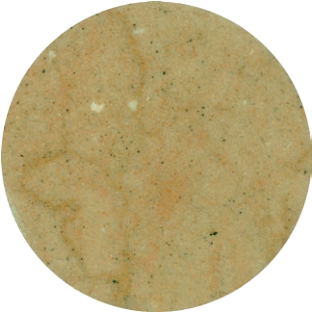
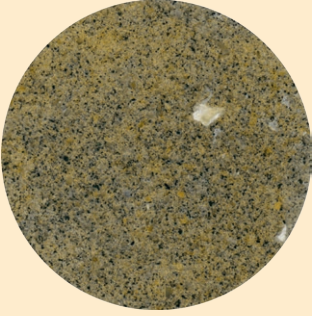

Die folgende tabellarische Einteilung in unterschiedliche Gesteinstypen bezieht sich auf die gesamte stratigraphische Einheit „Regensburger Grünsandstein“ und gibt ausschließlich den makroskopischen Befund im Überblick wieder.

Tab. 4: Oberer Grünsandstein: Bad Abbach-Subformation.

Beispiel Ansicht	Typ	Beschreibung
	A	Kalk-Schluffstein, sehr feinkörnig bis dicht, beige bis blassockerfarben, teilweise hellolive Partien; z. T. grünliche Restpartien neben stärker oxidierten, rostfarbenen Bereichen; Fossilien makroskopisch nicht erkennbar; Glaukonitgehalt gegenüber anderen Varietäten deutlich geringer, z. T. fast fehlend; in grünlichen Bereichen noch gewisse Schichtung schwach erkennbar, sonst fehlend und massig.
	B1	Kalk-Sandstein, feinkörnig; blassbeige bis schwach grünlich, z.T kleine, oft zusammenhängende, gefiederte, dendritische, schwarze, vermutlich Mn-haltige Nester; Fossilien makroskopisch vereinzelt erkennbar; Glaukonitgehalt gegenüber Typ A erhöht; keine Schichtung erkennbar, farblich unterschiedliche Partien unscharf-diffus zueinander abgegrenzt.

Beispiel Ansicht	Typ	Beschreibung
	B2	Feinsandstein, kalkig-mergelig; grüngrau-olivgrün bis beige-grau; schlieriges Gefüge aufgrund meist langgestreckter, heller, länglicher, vorwiegend schichtparallel orientierter und glaukonitfreier Mergeleinlagerungen im mm- bis unteren cm-Bereich; diese ungleichmäßig verteilt, teilweise gehäuft auftretend; Mergeleinlagerungen partienweise und regional abhängig fast völlig fehlend (GBo 06, 09, Obere Bank Stbr. Ihrlerstein) Fossilien makroskopisch vereinzelt erkennbar; Glaukonitgehalt gegenüber Typ B1 deutlich erhöht; Schichtung diffus erkennbar, selten parallel; farblich unterschiedliche Partien diffus zueinander abgegrenzt. Mit B3 im Kleinbereich teilweise wechsellagernd.
	B3	Feinsandstein, kalkig-mergelig; knolliges Gefüge: helle rundliche, buchtige, konkav-konvexe, meist scharf abgegrenzte, hellgraue, fast glaukonitfreie Knollen (Größe bis mehrere cm) in feinkörniger, grundsätzlich deutlich glaukonitreicherer, grüngrau-olivgrüner Matrix, Glaukonitgehalt kann stark variieren; Knollen teilweise gehäuft auftretend; Fossilien makroskopisch vereinzelt erkennbar; Glaukonitgehalt insgesamt ähnlich Typ B2; Schichtung kaum erkennbar, oft nur durch B2-ähnliche Partien angedeutet. Mit B2 im Kleinbereich teilweise wechsellagernd.

Tab. 5: Unterer Grünsandstein: Saal-Subformation.

Beispiel Ansicht	Typ	Beschreibung
	B4	Kalkstein mit geringem Sandanteil; hell-graubraun, Gefüge flaserig-wellig; kennzeichnend sind eisenoxidische dünne Lagen, die helle, abgeflachte Knollen und Lagen umflasern; dicht; Glaukonite deutlich als dunkle Punkte erkennbar, diffus und meist gleichmäßig verteilt, zum Unteren Grünsandstein hin zunehmend bis ca. 5 % (z. B. GBo 2); Fossilien makroskopisch vereinzelt erkennbar, Größe max. 2 mm; Schichtung durch Flaserung erkennbar; Abstände der flaserigen Lagen im Mittel ca. 10 bis 30 mm
	C1	Mittelsandstein, vorwiegend dolomitisch gebunden; teilweise stark porös, hellgrau bis beige-grau, z. T. grünlich; hart bis sehr hart; mittelkörnig; Gefüge massig, horizontale Schichtung nicht erkennbar, aufgrund der Trennflächen nur zu vermuten; Dunkelgrüne Glaukonitkörner diffus verteilt; Glaukonitgehalt im Vergleich zu C2 insgesamt meist deutlich geringer; Fossilien makroskopisch nicht erkennbar; oft deutliche Durchdringung von C1 und C2 im cm-Bereich
	C2	Mittelsandstein, vorwiegend calcitisch gebunden, teilweise vermutlich dolomitisch; graugrün bis glaukonitgrün; mittelhart bis hart; mittel- bis grobkörnig; Gefüge massig, horizontale Schichtung nicht erkennbar; Glaukonitgehalt insgesamt hoch; Glaukonitkörner 1/2 bis 1 mm Fossilien z. T. zahlreich: v.a. weiße, dünnschalige, 2 - 3 cm lange, schwach gebogene Schalenreste

5.1 Bohrkerne

Im Folgenden werden zunächst die höffigen Erkundungsbohrungen näher beschrieben und die Regensburger Grünsandsteine in oben genannte Typen eingeteilt. Die Bohrungen mit wenig verwertbarem Material werden in Kapitel 5.1.9 dargestellt.

5.1.1 Ihrlerstein – Bohrungen GBo 1c - e

Die Bohrung **GBo 1c** wurde wie die 2 folgenden Bohrungen erst 2008 und 2009 in der Nähe von Ihrlerstein niedergebracht. Die Bohrung setzt auf 490 m (Höhe NN) an. Die Endteufe beträgt 20,80 m. Nach 0,3 m Überdeckung von sedimentärem Lockergestein findet sich 5,2 m anfänglich brauner quartärer Schluff. Ab Bohrmeter 5,5 m beginnt der Regensburger Grünsandstein mit einem hellgrauen Sandstein, wechselt in eine grüne Variation, gefolgt von grauem und wieder grünem Regensburger Grünsandstein. Darunter findet sich 0,9 m weißlich hellgrauer Kalkstein des Weißjura (Malm Zeta). Bohrmeter 5,5 m bis ca. 10,5 m gehören zum Oberen Regensburger Grünsandstein und beinhalten 1,8 m von Gesteins-Typ B2. Der Übergang zum Unteren Regensburger Grünsandstein beginnt mit Typ B4 bei Bohrmeter 9,8 m und ist 1,3 m mächtig. Typ C1 hat eine Mächtigkeit von 3,9 m und Typ C2 von 4,4 m. Daraus ergibt sich eine Gesamtmächtigkeit an brauchbarem Material von **ca. 11,5 m**.

Die Erkundungsbohrung **GBo 1d** Ihrlerstein hat eine Ansatzhöhe von 490 m NN und eine Endteufe von 22,40 m. Nach 0,2 m sedimentärem Lockergestein beginnt der Bohrkern mit einer 4,3 m mächtigen quartären Schlufflage. Gefolgt von 2,5 m braunem Kalkstein aus dem Tertiär. Ab Bohrmeter 7 m beginnt der Obere Regensburger Grünsandstein mit einem grauen Feinsandstein des Typs B2 (0,5 m mächtig), darauf folgen 0,6 m grüner Grobsandstein bis Bohrmeter 12 m. Der Übergang zu Typ B4 und somit zum Unteren Regensburger Grünsandstein beginnt bei 13,1 m (0,8 m mächtig) und weist einen grauen und grünen Sandstein auf. Von 14,8 m bis 16,6 m findet sich Typ C1 des Regensburger Grünsandsteins. Typ C2 tritt in einzelnen Lagen auf und hat eine Mächtigkeit von 2,5 m. Daraus ergibt sich eine Gesamtmächtigkeit an verwendbarem Regensburger Grünsandstein von **5,7 m**. Von 22 m bis Endteufe folgt ein hellgrauer Kalkstein aus dem Weißjura.

Die Bohrung **GBo 1e** bei Ihrlerstein hat eine 0,2 m mächtige Überdeckung von sedimentärem Lockergestein. Darauf folgen 5,8 m brauner bis hellbrauner Schluff aus dem Quartär. Ab Bohrmeter 6 m beginnt der Obere Regensburger Grünsandstein, welcher als ockerfarbener bis graugrüner Feinsandstein ausgeprägt ist. Ab Bohrmeter 13,2 m beginnt der Untere Regensburger Grünsandstein mit einem graugrünen Feinsandstein bis 20,4 m, wo er von 0,2 m grünem Grobsandstein abgelöst wird. Von 20,6 m bis Endteufe von 21 m findet sich weißgrauer Kalkstein aus dem Weißjura. Von Typ B2 sind 2,2 m im Oberen Regensburger Grünsandstein vorhanden. Typ B4 ist 1,2 m mächtig, Typ C1 3 m und Typ C2 1,8 m. Zusammen ergibt das **8,2 m** an verwertbarem Regensburger Grünsandstein.

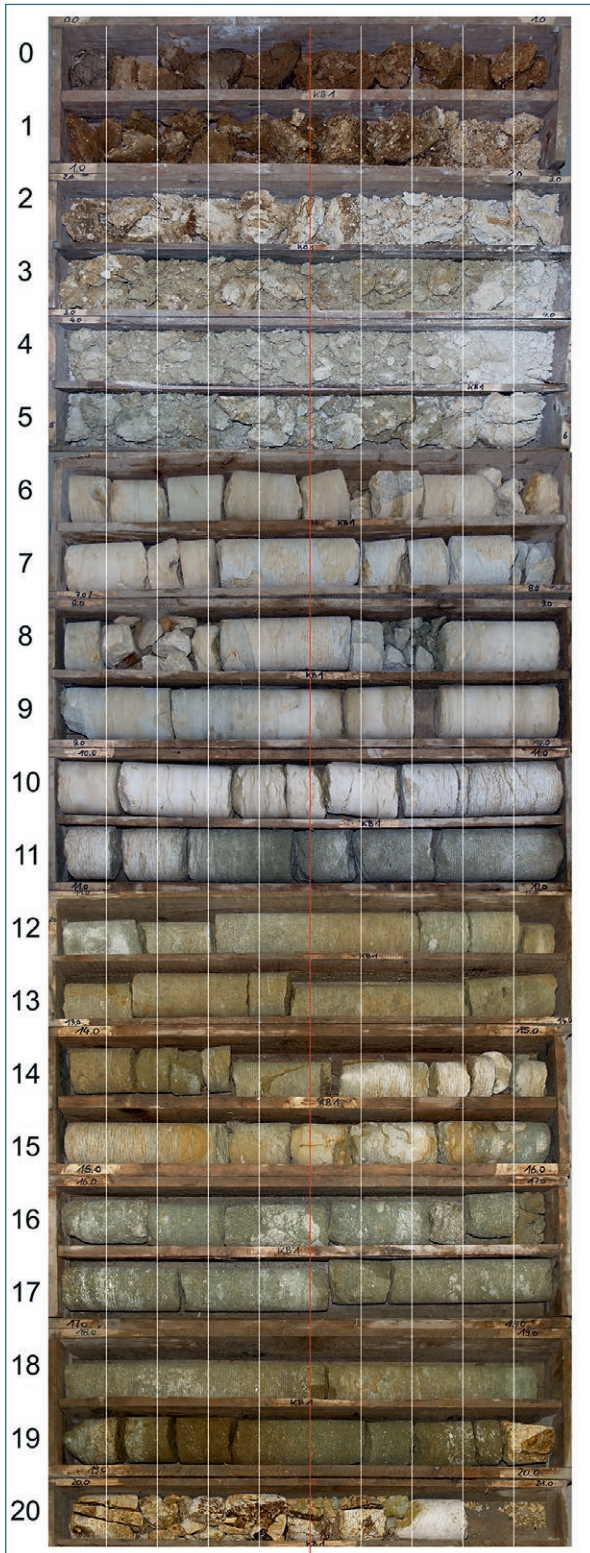


Abb. 10: Bohrung GBo 1c Ihrlerstein von 2008.

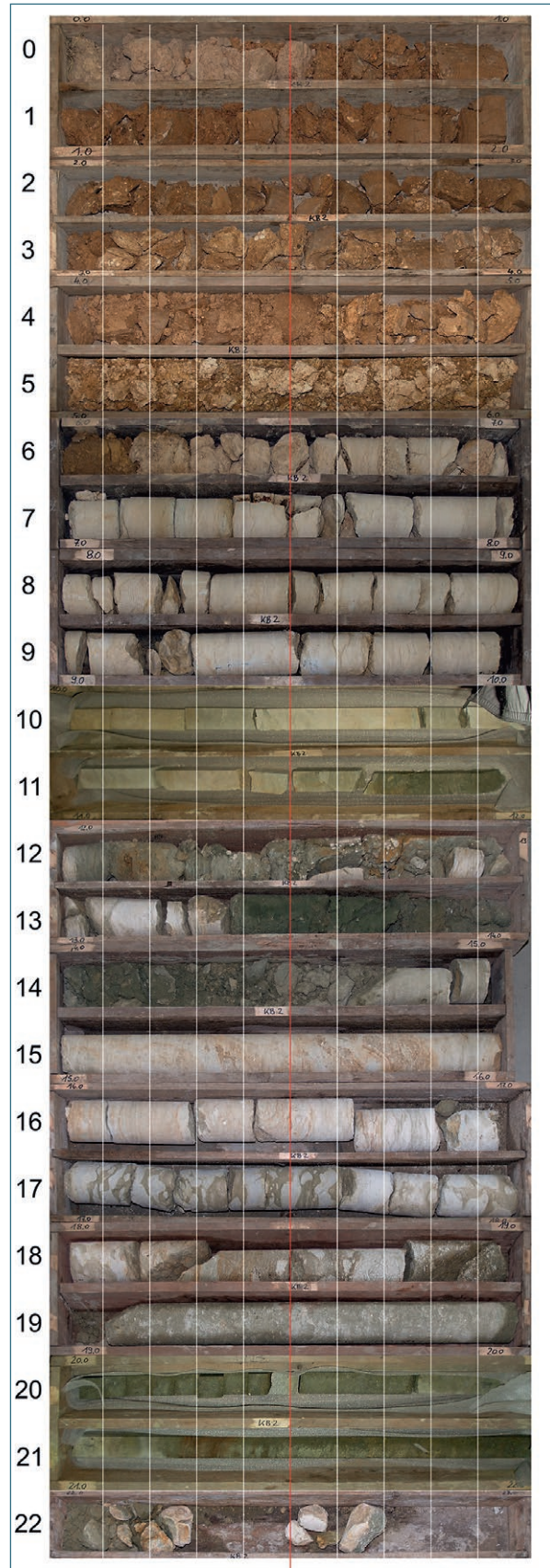


Abb. 11: Bohrung GBo 1d Ihrlerstein von 2009.

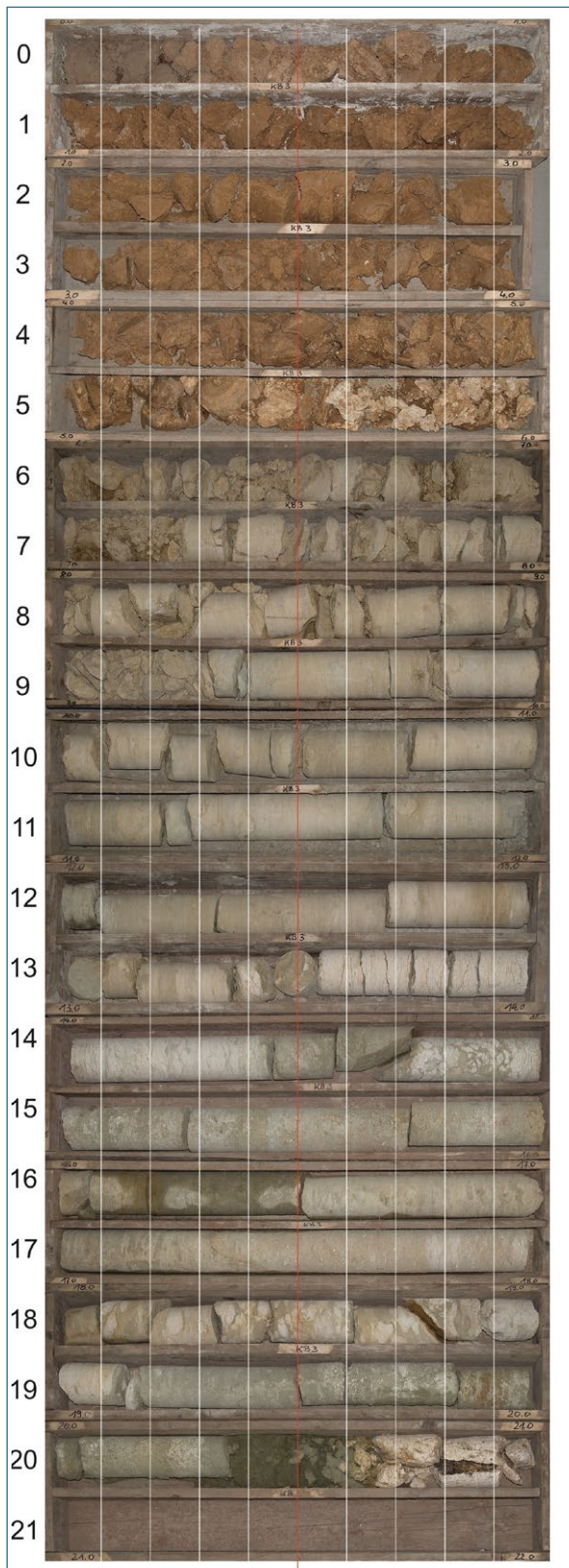


Abb. 12: Bohrung GBo 1e Ihrlerstein von 2009.

5.1.2 Haugenried – Bohrung GBo 2

Die Bohrung **GBo 2** bei Haugenried hat eine Ansatzhöhe von 502 m NN. Die ersten 0,6 m werden durch quartären Schluff überdeckt. Darauf folgt Schluff der Eibrunn-Formation. Im Anschluss finden sich 9,2 m von karbonatisch beigelich-grauem Feinsandstein der Bad-Abbach-Subformation (Oberer Regensburger Grünsandstein) und 4,9 m karbonatisch graugrüner Mittelsandstein der Saal-Subformation (Unterer Regensburger Grünsandstein). Von Bohrmeter 15,8 m bis Endteufe von 35,3 m ist ein gelblich grauer Kalkstein aus dem Weißjura vorhanden.



Abb. 13: Bohrung GBo 2 Haugenried von 1994.

Im Oberen Regensburger Grünsandstein finden sich 2,4 m des Typs B2 und 0,9 m des Typs B4. Im Unteren Regensburger Grünsandstein sind 2,5 m des Typs C1 und 2,3 m des Typs C2 vorhanden. Damit liegt der Gesamtanteil an verwertbarem Regensburger Grünsandstein bei **ca. 8,0 m**.

5.1.3 Neudorf – Bohrung GBo 3

Bohrung **GBo 3**, welche nahe Neudorf abgeteuft wurde, hat eine Ansatzhöhe von 437 m NN und eine Endteufe von 23,50 m. Die oberen 0,5 m bestehen aus braungrauem Schluff aus dem Pleistozän. Gefolgt von gelbgrauem Ton und hellgrauem Tonstein aus der Eibrunn-Formation bis Bohrmeter 3,6 m. Darunter beginnt der Obere Regensburger Grünsandstein (Bad-Abbach-Subformation), welcher als rostbrauner Feinsandstein, grünlichgrauer Schluffstein und gelblichgrauer karbonatischer Feinsandstein vorliegt. Ab Bohrmeter 12,2 m finden sich der Untere Regensburger Grünsandstein (Saal-Subformation) mit einem grünlichgrauen karbonatischen Mittel- und Grobsandstein. Die letzten 6,2 m Bohrmeter bestehen aus einem hellgrauen Kalkstein der Torleite-Formation (Weißjura-Gruppe).

Der Obere Regensburger Grünsandstein beinhaltet 3,0 m vom Typ B2 und 1,4 m vom Typ C1, also insgesamt **4,4 m** verwertbares Material.

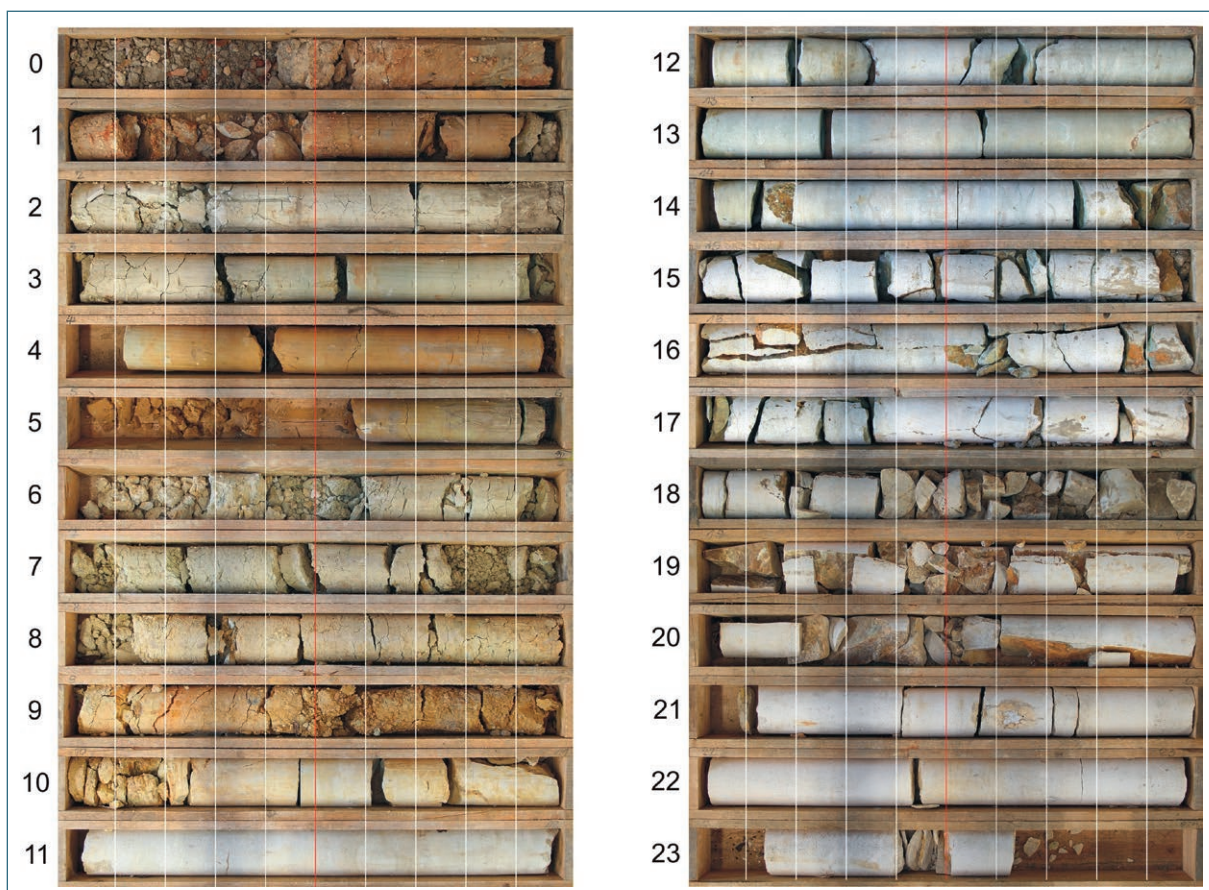


Abb. 14: Bohrkern GBo 3 Neudorf von 1994.

5.1.4 Kapfelberg – Bohrung GBo 5

Die Grünsandstein-Erkundungsbohrung **GBo 5** bei Kapfelberg wurde bei 414 m NN angesetzt und hat eine Endteufe von 37 m. Die oberen 0,5 m bestehen aus graubraunem Schluff aus dem Quar-

tär. Darunter folgt die Reinhausen-Subformation mit einem aschgrauen, gelbraunen Feinsandstein und einem hell gelblichgrauen karbonatischem Feinsandstein bis Bohrmeter 12,9 m. Es schließt sich die Eibrunn-Formation mit einem mittelgrauen Schluffstein, einem weißgrauen karbonatischen Schluffstein und einem gelbraunen Tonstein an. Diese geht bei Bohrmeter 18,2 m in die Bad-Ab-bach-Subformation über. Sie besteht aus einem hell gelblichgrauen karbonatischen Feinsandstein und einem grünlichgrauen karbonatischen Mittelsandstein. Bei Bohrmeter 28,4 m beginnt die Saal-Subformation, welche aus einem grünlich karbonatischem Mittelsandstein besteht. Von Teufe 34,9 m bis 37,0 m findet sich ein gelblichgrauer Kalkstein aus dem Weißjura.

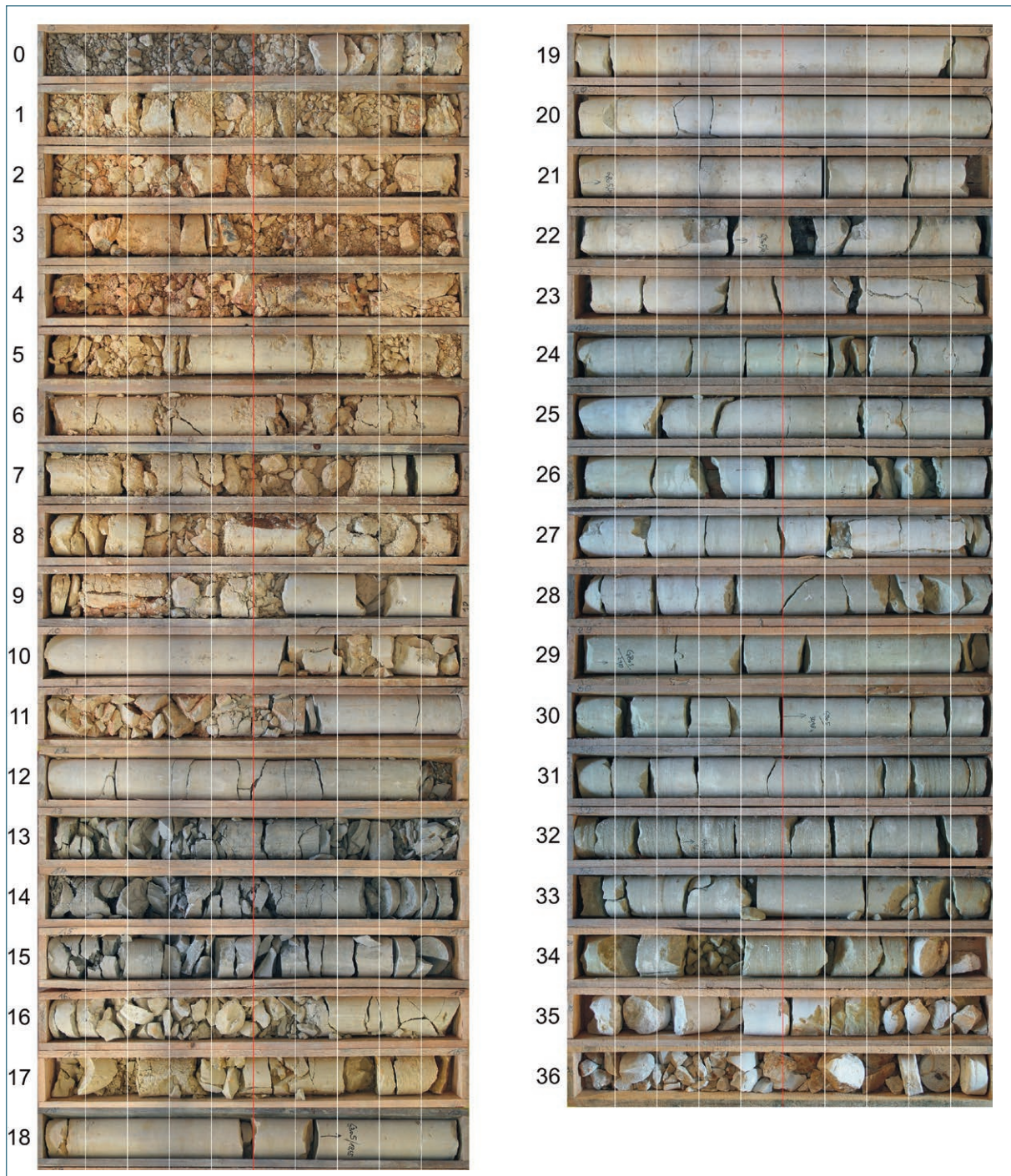


Abb. 15: Bohrkern GBo 5 N Kapfelberg von 1994.

Der Obere Regensburger Grünsandstein beinhaltet Gesteine des Typs B2 und B4, mit jeweils 1,2 m und 0,9 m Mächtigkeit. Der Untere Regensburger Grünsandstein hat nur Typ C2 mit 6,5 m Mächtigkeit. Insgesamt liegen also **ca. 8,6 m** verwendbares Material vor.

5.1.5 Käfersdorf – Bohrung GBo 6

Die oberen 4,6 m der Erkundungsbohrung **GBo 6** bei Käfersdorf beinhalten schwarzbraunen bis gelb-braunen, schwach feinsandigen Schluff, mit kleinen Bröckchen aus typischen Amberger Tripeln der Reinhausen Subformation. Darunter findet sich aschgrauer, karbonatfreier Schluffstein bis Tonstein bis Bohrmeter 4,6 m, gefolgt von einer gelbbraunen stark karbonatischen Tonsteinlage bis 10,8 m. Dort beginnt der graugrüne glaukonitreiche Kalksandstein des Typs B2, der bis 16,2 m reicht. Nach 0,3 m Kernverlust beginnt der Kalksandstein vom Typ C1. Von 19,1 m bis Endteufe bei 19,3 m treten Weißjura-Karbonate mit einer karbonatisch und glaukonitreichen Matrix (Transgressionskonglomerat der Regensburg-Formation) in Erscheinung. Die Gesamtmächtigkeit an verwertbarem Material des Regensburger Grünsandsteins beträgt **7,0 m**. Die Ansatzhöhe der Bohrung GBo 6 lag bei 476 m NN.



Abb. 16: Bohrkern GBo 6 Käfersdorf von 1995.

5.1.6 Arzweg – Bohrung GBo 7

Die Bohrung **GBo 7** bei Arzweg hat die ersten 5,8 m eine schluffige Ausprägung. Diese Schicht gehört zur Reinhausen-Subformation. Schluff tritt in braun, graubraun, grau und hellbraun auf, ist feinsandig und karbonatfrei. Bis Bohrmeter 9,9 m sind die Eibrunner Schichten als karbonatischer Tonstein ausgebildet. Ab Bohrmeter 9,9 m zeigt sich ein braun bis graugrüner kalkreicher Sandstein. Bis Teufe 19,0 m handelt es sich um den Oberen Regensburger Grünsandstein, danach folgt der etwas gröber werdende Untere Regensburger Grünsandstein bis 23,8 m. Abschließend finden sich

1,7 m an beige grauem Kalkstein (aus dem Weißjura). An verwendbarem Sandstein sind Typ B2 mit 4,7 m, Typ B4 mit 1,6 m, Typ C1 mit 1,4 m und Typ C2 mit 1,6 m Mächtigkeit vorhanden. Das ergibt eine Gesamtmächtigkeit an verwertbarem Material von **9,3 m**. Die Ansatzhöhe der Bohrung GBo 6 lag bei 476 m NN.

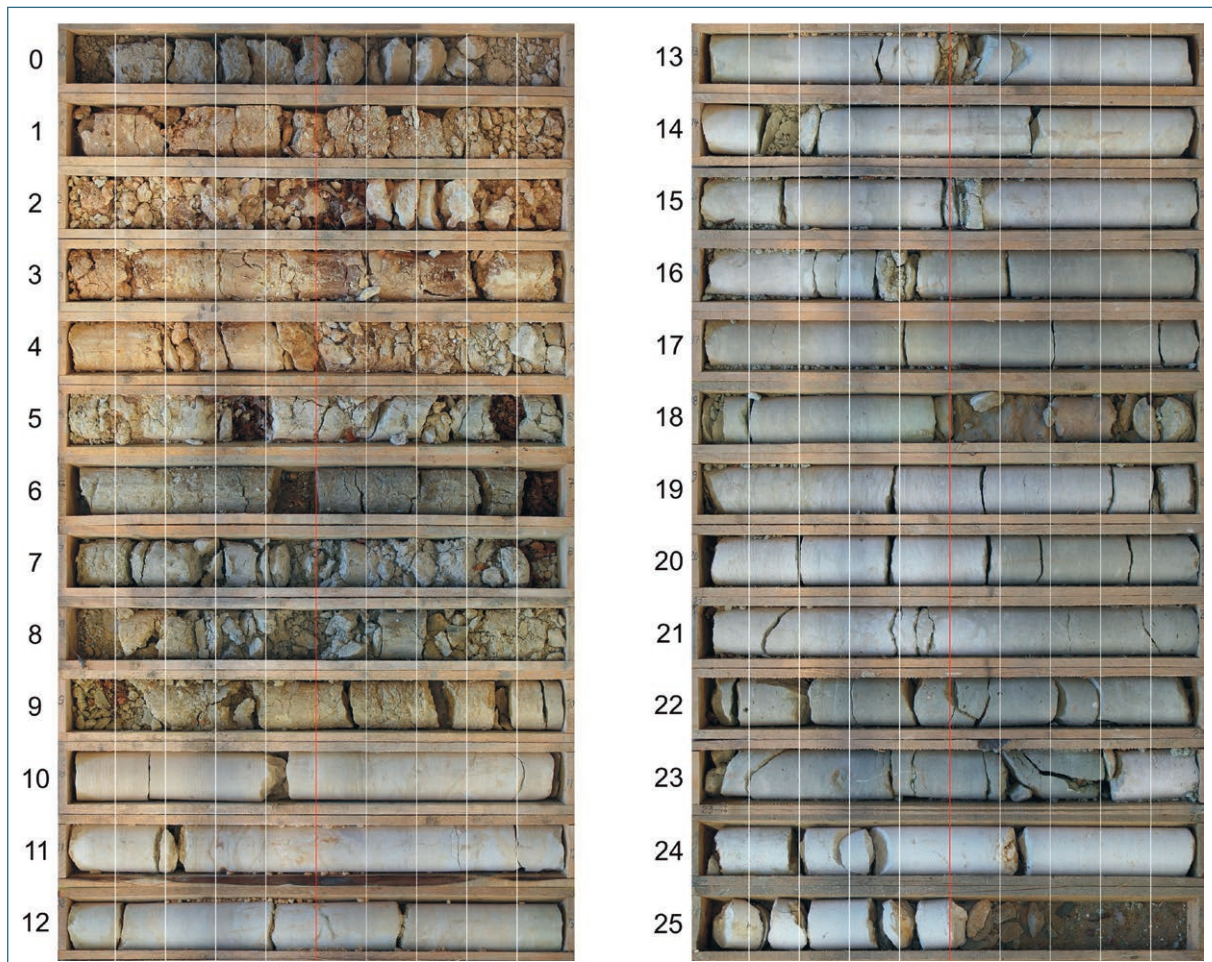


Abb. 17: Bohrkern GBo 7 Arzweg von 1995.

5.1.7 Eilsbrunn – Bohrung GBo 8

Die Ansatzhöhe der Bohrung **GBo 8** bei Eilsbrunn liegt bei 471 m NN und die Endteufe beträgt 35,8 m. Der obere Bereich des Bohrkerns bis 0,4 m beinhaltet braunen schwach kiesigen Ton bzw. Boden. Darauf folgen 6,6 m beiger und graubrauner Kalkfeinsand bis Kalkschluffstein und anschließend 2 m Kernverlust. Die Reinhausen-Subformation reicht bis Bohrmeter 17,5 m und zeigt ab Bohrmeter 9 m einen ockerfarbenen Schluffstein, darunter einen gelblichen Kalkfeinsand bis Kalkschluffstein. Von Bohrmeter 17,5 m bis 21,2 m zeigt sich die Eibrunn-Formation als stark karbonatischer Tonstein. Der Obere Regensburger Grünsandstein setzt bei 21,2 m an und endet bei Bohrmeter 29,8 m. Darunter geht der Obere Regensburger Grünsandstein in den Unteren Regensburger Grünsandstein über, bis zu einer Teufe von 34,6 m. Er tritt als karbonatreicher Feinsandstein auf. Von 34,6 m bis 35,8 m findet sich ein weißgrauer Schluff der Schutzfels-Formation. Der Gesteinstyp B2 findet sich im Oberen Regensburger Grünsandstein mit einer Mächtigkeit von 3,2 m. Die Typen B4, C1 und C2 werden im Unteren Regensburger Grünsandstein angetroffen und haben Mächtig-

keiten von jeweils 1 m, 3,2 m und 0,6 m. Daraus ergibt sich ein Gesamtgesteinsanteil von verwertbarem Material von **8 m**.

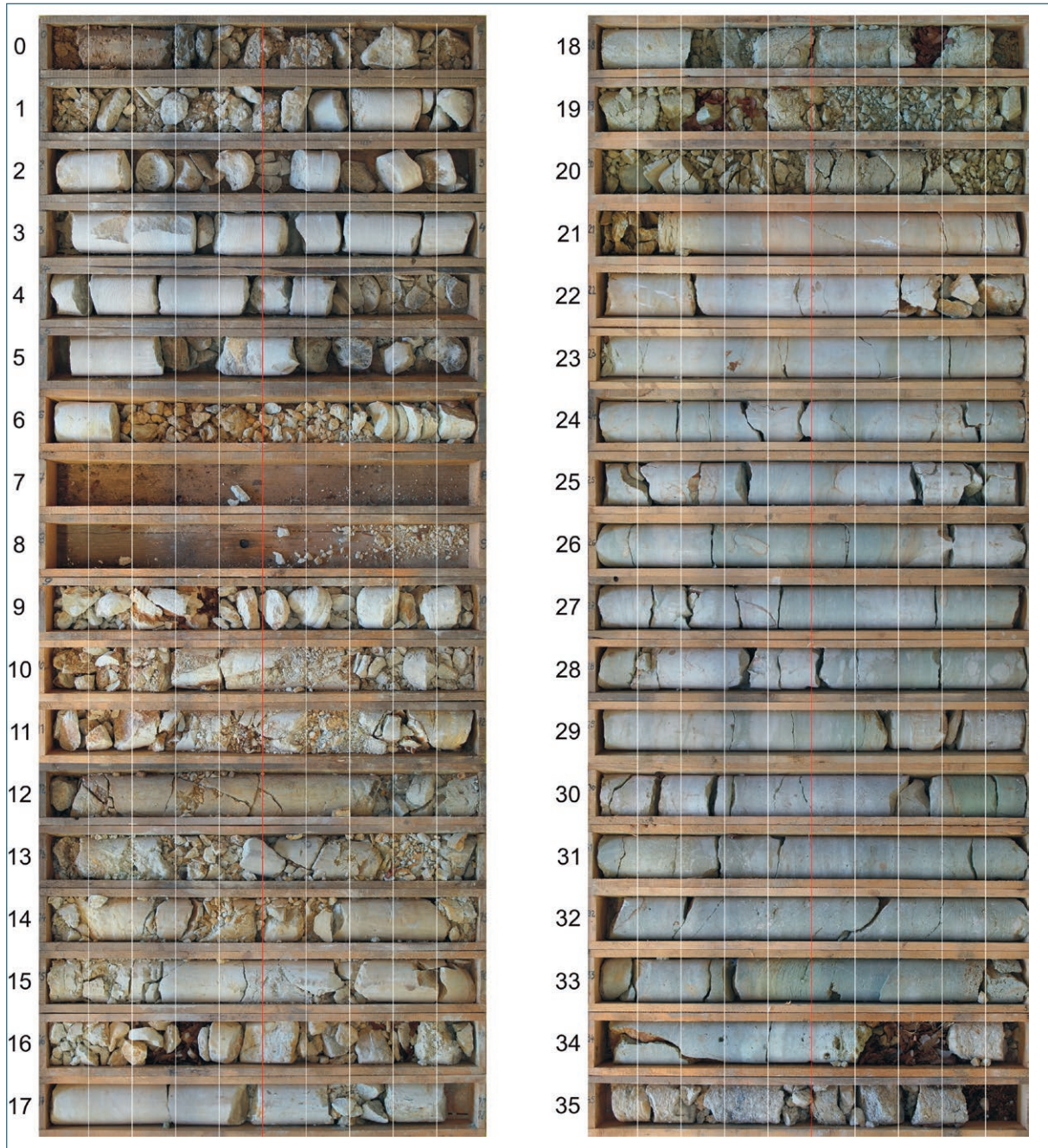


Abb. 18: Bohrkern GBo 8 Eilsbrunn von 1995.

5.1.8 Ganglhof – Bohrung GBo 9

In dem Bohrkern **GBo 9** von Ganglhof sind die ersten 0,3 m feinsandiger Schluff, bis 4,3 m findet sich brauner und graubrauner Schluff und Schluffstein der Reinhausen-Subformation. Bis Bohrmetern 8,7 m findet sich graugrüner, stark karbonatischer Tonstein der Eibrunn-Formation. Danach beginnt der Obere Regensburger Grünsandstein, ausgeprägt als karbonatreicher, grüngrauer Sand-

stein mit wechselndem Glaukonitgehalt. Ab 14,8 m geht der Obere Regensburger Grünsandstein in den Unteren Regensburger Grünsandstein über. Ab Bohrmeter 17,6 m bis Endteufe von 26,3 m ist ein feinkörniger, leicht absandender Dolomitstein erkennbar.

Der Gesteinstyp B2 mit 2,5 m findet sich im Oberen Regensburger Grünsandstein und der Typ B4 mit 1,9 m Mächtigkeit im Unteren Regensburger Grünsandstein. Die Typen C1 und C2 sind nicht vertreten. Der Gesamtanteil an verwendbarem Material liegt bei **4,3 m** Mächtigkeit. Ansatzhöhe der Bohrung beträgt 387 m NN.

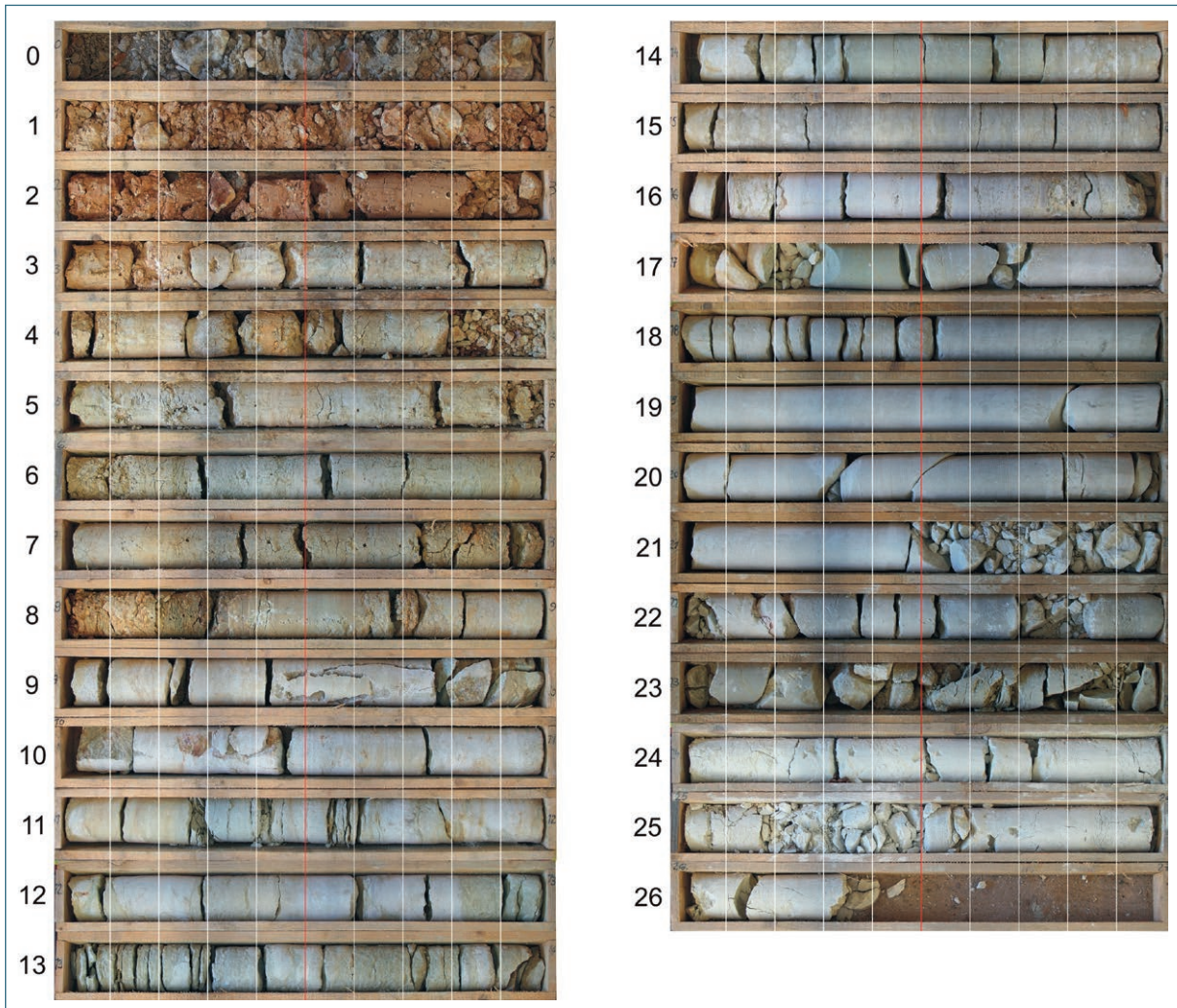


Abb. 19: Bohrkern GBo 9 Ganglhof von 1995.

5.1.9 Sonstige Bohrkern

Die Bohrungen GBo 1a, GBo 1b, GBo 1f, GBo 4, GBo 10, GBo 11 und GBo 12 sind auf Grund von zu geringer Mächtigkeit des Regensburger Grünsandsteins oder einem zu geringen Anteil an verwertbarem Material nicht näher beprobt und untersucht worden. Der Vollständigkeit wegen werden die Bohrkern im Folgenden grob beschrieben.

Die Bohrungen **GBo 1a** und **GBo 1b** sind zwei von insgesamt 6 Erkundungsbohrungen in der Nähe von Ihrlerstein, wo vor einiger Zeit bereits Grünsandstein abgebaut wurde. Die Bohrungen setzen beide auf 482 m (Höhe NN) an. Die Endteufe beträgt jeweils 16 m. Von oben nach unten, mit unterschiedlichen Mächtigkeiten, bestehen die Bohrkern aus einer dünnen graubraunen Humusschicht, anschließend dunkelbraunem Schluff aus dem Quartär, dem graugrünen Regensburger Grünsandstein und abschließend weißem Kalkstein aus dem Weißjura sowie tonigen Einschaltungen der Schutzfelsschichten.

An beiden Bohrungen wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, da Grünsandstein (Saal-Subformation) nur sehr untergeordnet oder aber in für die Herstellung von Prüfkörpern ungeeignetem Material vorliegt, da die Bohrungen in der Nähe einer Störung liegen (RUTTE 1962).

Die Bohrung **GBo 1f** enthält fast ausschließlich mürbes, unbrauchbares Material und wurde daher nicht weiter beprobt. Zu erwähnen ist, dass die Grenze Grünsandstein/Malm-Kalk bei der Bohrung GBo 1f im Vergleich zu den anderen 3 Bohrungen bei Ihrlerstein um ca. 10 m höher liegt. Dies lässt vermuten, dass im Grundstück mit der Flurnummer 110 eine NW – SE streichende Störung verläuft, die in der Geologischen Karte (GK 25 Nr. 7037 Kelheim) nicht verzeichnet ist, jedoch die Verlängerung der bei Palmberg kartierten Störung sein könnte.

Die Erkundungsbohrung **GBo 4** bei Mahdholz enthält insgesamt 8,2 m Regensburger Grünsandstein. Allerdings ist dieser sehr mürbe und zerfällt leicht. Daher ist er als Werkstein ungeeignet und wurde nicht weiter beprobt.

Bei Bohrung **GBo 10** aus dem Ponholzer Forst bestehen die ersten 0,4 m aus feinsandigem und kiesigem Boden, gefolgt von beigebraunem karbonatfreiem Ton aus dem Pleistozän (Lößlehm). Von Bohrmeter 2,4 m bis 4,4 m findet sich ein hellgrauer, karbonatfreier Tonstein bis Schluffstein, der bis Bohrmeter 5,9 m in einen stark karbonatischen grünlichen Tonstein übergeht, was gleichzeitig den Übergang von der Reinhausen-Subformation zur Eibrunn-Formation kennzeichnet. Bis 9,1 m besteht das Material aus olivgelbem, stark karbonatischem Schluffstein bis Feinsandstein, welcher bis Bohrmeter 9,8 m in einen glaukonitreichen Mittelsandstein übergeht. Danach setzt die Regensburg-Formation an, die als graugrüner mittelkörniger Kalksandstein ausgeprägt ist und bei Bohrmeter 13,8 m in fossilführenden Kalkstein aus dem Weißjura übergeht. Bei 15,00 m befindet sich die Endteufe des Bohrkerns. Als verwertbares Material liegt nur 1,5 m des Typs B2 aus dem Oberen Regensburger Grünsandstein vor.

Die Bohrung **GBo 11** im Schwaighauser Forst beginnt mit 0,3 m Bodenschicht. Darauf folgt bis Bohrmeter 11,0 m ein schwach sandiger, karbonatfreier Schluffstein, der zusammen mit einem Meter tonig, karbonatischem Schluff zu der Reinhausen-Subformation gehört. Von Bohrmeter 12,0 m bis 18,4 m findet sich ein stark karbonatischer, mittelgrauer Tonstein der Eibrunn-Formation. Darunter beginnt die Regensburg-Formation mit einem Wechsel von feinsandigem Kalkstein zu einem stark karbonatischen und glaukonitreichen Schluffstein. Gefolgt von einem graugrünen bis dunkelgrünen mittel- bis grob-sandigen Kalkstein. Im Anschluss zeigt sich, bis Bohrmeter 33,00 m ein massig ausgebildetes Karbonat des Weißjura.

Als verwertbares Material kommen 0,45 m des Typs C1 und 6,75 m des Typs C2 aus dem Unteren Regensburger Grünsandstein in Betracht, der allerdings stark verkarstet ist.

Die Bohrung **GBo 12** bei Hagenau zeigt eine 0,6 m mächtige schwarzgraue, feinsandige Bodenschicht. Darunter folgt 1,5 m Quartär als lockerer Mittelsand mit quarzitischen Bruchstücken. Von Bohrmeter 2 m bis 16,5 m zeigen die Ablagerungen der Winzerberg-Formation (Knollensand-Sub-

formation) eine Mischung aus feinkiesigem Sandstein, gefolgt von feinsandigem Kalkstein und gehen über in einen schluffigen bis mittelsandigen Feinsandstein. Bis 18,0 m folgt ein Kernverlust der wahrscheinlich die Grenze zwischen der Knollensand- und der Reinhausen-Subformation darstellt. Die anschließende Winzenberg-Formation (Reinhausen-Subformation) besteht hauptsächlich aus feinsandigem bis schluffigem Kalksandstein und einer 1,3 m Schicht aus Tonstein. Beide Schichtglieder sind karbonatisch bis stark karbonatisch ausgeprägt. Darunter folgt ein karbonatischer, mittelgrauer Tonstein der Eibrunn-Subformation bis Bohrmeter 43,4 m. Hier gehen die Eibrunner Schichten in die Regensburg-Formation über, die als Feinsandstein, grobschluffig und glaukonitführend sowie als Mittelsandstein ausgebildet ist. Im Regensburger Grünsandstein ist ein Kernverlust von 1,3 m zu beobachten, wonach der Regensburger Grünsandstein in einen stark karbonatischen Grobsandstein (Transgressionskonglomerat) übergeht. Von Bohrmeter 47,3 m bis Endteufe von 49,00 m tritt der typische Kalkstein des Weißjura auf.

Die Gesamtmächtigkeit an verwertbarem Material des Regensburger Grünsandsteins beträgt ungefähr **3,7 m** (dazwischen ist ein Kernverlust von 1,3 m zu beobachten).

6 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden die vorliegenden Ergebnisse präsentiert und diskutiert, getrennt nach Vorkommen und Gesteinsvarietät.

Im Rahmen des DBU-Projektes 10826 „Substanzschonende Beseitigung von Umweltschäden an dem national wertvollen Kulturgut ‚Steinerne Brücke‘ in Kooperation mit mittelständischen Unternehmen“ (Abschlussbericht von SWACZYNA, 2005) wurden exemplarisch am Bogen IX durch das Ingenieurbüro Dr. Ettl/Dr. Schuh Proben genommen und analysiert. Tab. 7 stellt diesen Ergebnissen die am LfU bis dato ermittelten gesteinsphysikalischen Kenndaten (nur Typen B2, B4, C1, C2, mit 3 Ausnahmen auch Typ B3) gegenüber. Die in der Farbe Grün markierten Werte übertreffen die Anforderungen für die künftigen Einbaubereiche in der Brücke. In der Farbe Rot markiert sind diejenigen Messwerte, welche die Bandbreite der Kennwerte in negativer Hinsicht über- bzw. unterschreiten.

Die vom Labor Dr. Ettl/Dr. Schuh angegebenen Reindichte-Werte des Bogens IX zeigen eine überraschend geringe Bandbreite, was möglicherweise auf einen Übertragungsfehler zurückzuführen sein dürfte (mündl. Mitteilung Labor Dr. Ettl/Dr. Schuh). Im Labor des LfU ermittelte, oberhalb und unterhalb liegende Werte sind deshalb hier ausnahmsweise nicht rot markiert.

Tab. 7 beinhaltet Ergebnisse von 10 Bohrungen, 3 Aufschlüssen und 4 Einzelfundpunkten im Umfeld der Bohrungen sowie von 8 Aufschlüssen und Probenahmen außerhalb der Bohrungsgebiete.

Die Mindestanforderungen an den gesuchten Grünsandstein zur Restauration der Steinernen Brücke in Regensburg wurden anhand des untersuchten Bogens IX, wie folgt, festgelegt:

Tab. 6: Gesteinsphysikalische Eigenschaften des Bogens IX der Steinernen Brücke Regensburg

	Porosität	Rohdichte	Reindichte	w-Wert	E_{dyn}	Biax. Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	E_{Stat}	US
	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[kg/(m ² √h)]	* berechnet [GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[m/s]
Steinerne Brücke (Bogen IX)	10 – 30	1,89 – 2,42	2,69 – 2,71	0,11 – 5,0 [16,8]	15 – 60	3,5 – 10,7	23 – 55	(15 – 60)	2820 – 5040

Nach Möglichkeit sollten alle Messwerte innerhalb der Schwankungsbreite liegen. Dies ist für die Bohrungen Ihrlerstein (GBo 1c-e) für den Typ B4 gegeben und wird sogar bei der Porosität, Rohdichte, der Biaxialen Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit noch übertroffen. Bei GBo 1c erfüllt bzw. übersteigt der Typ B2 sämtliche Sollwerte.

Nicht alle Sollwerte erfüllend, aber dennoch geeignet ist der Typ C2 der Bohrungen GBo 2 Hau-gnried, GBo 7 Arzweg und GBo 8 Eilsbrunn.

Bei den Aufschlüssen außerhalb des Bohrungsgebietes stechen die Obere und Untere Ihrlersteiner Bank (siehe Tab. 7, Aufschlüsse und Probenahmen außerhalb der Bohrungsgebiete) deutlich hervor. Für die Untere Bank zeigt der Typ C2 sehr gute Werte an, für die Obere Bank ist es der Typ B2.

Der Typ C2 bei Buchenberg, der Typ B2 bei Ringberg und der Typ C2 vom Bauhof Regensburg sind ebenfalls geeignet. Nur bei der Biaxialen Biegezugfestigkeit liegen die Werte außerhalb des Sollbereichs.

Tab. 7: Vergleich der **Schwankungsbreite** der gesteinsphysikalischen Messwerte der untersuchten Proben der Grünsandsteinvarietäten Typ B2, B3, B4, C1 und C2 (Typ B3 ist hier nur von Proben des Bauhofs Regensburg, des Steinbruchs Saal und vom Einzelfundpunkt Eilsbrunn angegeben); w-Wert aus Kapillarer Wasseraufnahme; E_{dyn} = Dynamischer E-Modul aus Ultraschallmessung; US= Ultraschallgeschwindigkeit; n.b. = nicht bestimmt.

Steinerne Brücke (Bogen IX)	Typ	Porosität [Vol.-%]	Rohdichte [g/cm ³]	Reindichte [g/cm ³]	w-Wert [kg/(m ² ·h)]	E _{dyn} * berechnet [GPa]	Biax. Biegezugfestigkeit [MPa]	Druckfestigkeit [MPa]	E _{Stat} [GPa]	US [m/s]	
		10 – 30	1,89 – 2,42	2,69 – 2,71	0,11 – 5,0 [16,8]	15 – 60	3,5 – 10,7	23 – 55	(15 – 60)	2820 – 5040	
Bohrungen											
GBo 1c Ihrerstein N	B2	5 – 15	2,22 – 2,54	2,55	0,12 – 1,40	22	5,4 – 11,6	70 – 73	31	4252	
	B4	4 – 7	2,40 – 2,58	2,38 – 2,57	0,09 – 0,48	13 – 23	12,3 – 20,1	45 – 109	30 – 43	3133 – 4081	
	C1	12 – 31	1,86 – 2,30	1,95 – 2,46	0,36 – 5,77	3 – 28	3,5 – 9,9	13 – 59	12 – 35	1710 – 3664	
	C2	18 – 30	1,87 – 2,20	1,92 – 2,46	1,37 – 5,81	9 – 16	4,4 – 8,4	13 – 27	10 – 40	1939 – 4440	
GBo 1d Ihrerstein N	B2	12 – 26	1,94 – 2,31	n.b.	n.b.	5 – 11*	n.b.	63	n.b.	n.b.	
	B4	9 – 14	2,22 – 2,41	2,36	0,28	38	n.b.	51 – 60	26	4332	
	C1	10 – 22	2,11 – 2,33	2,02 – 2,33	0,40 – 0,74	14 – 30	5,1 – 9,3	33 – 58	20 – 36	2919 – 3699	
	C2	12 – 25	2,01 – 2,35	1,96 – 2,33	0,36 – 5,27	3 – 28	1,4 – 6,2	14 – 21	11 – 17	2028 – 3702	
GBo 1e Ihrerstein N	B2	6 – 17	2,20 – 2,52	2,18 – 2,51	0,27 – 0,30	7 – 46	8,8 – 32,9	39 – 151	12 – 45	2617 – 4699	
	B4	4 – 7	2,38 – 2,54	2,37 – 2,49	n.b.	35 – 43	14,4 – 22,9	43 – 98	27 – 44	3927 – 4595	
	C1	4 – 32	1,84 – 2,44	1,80 – 2,37	0,38 – 1,50	9 – 41	4,3 – 13,4	12 – 76	10 – 38	2322 – 4349	
	C2	13 – 22	2,08 – 2,31	2,01	1,87	8	2,5 – 3,6	16 – 17	5 – 28	2310	
GBo 2 Haugenried	B2	11 – 12	2,20 – 2,21	2,48 – 2,52	0,63	21 – 23	9,6 – 16,0	64 – 74	29 – 35	3071 – 3392	
	B4	7 – 8	2,41 – 2,42	2,60 – 2,61	0,32	32	n.b.	n.b.	n.b.	3724	
	C1	6 – 11	2,34 – 2,47	2,62 – 2,75	0,48	24 – 38	7,1 – 13,2	37 – 106	21 – 37	3373 – 4135	
	C2	17 – 27	2,00 – 2,26	2,74 – 2,75	7,91	7 – 18	1,2 – 2,0	13 – 25	18	1883 – 2691	
GBo 3 Neudorf-Pettendorf	B2	9 – 12	2,28 – 2,41	2,59 – 2,67	0,14	21 – 28	n.b.	61 – 76	21 – 36	3266 – 3419	
	B4	Nicht vorhanden									
	C1	Aufgrund starker Klüftigkeit keine Probenahme möglich									
	C2	Nicht vorhanden									

Typ	Porosität [Vol.-%]	Rohdichte [g/cm ³]	Reindichte [g/cm ³]	w-Wert [kg/(m ² ·h)]	E _{dyn} * berechnet [GPa]	Biax. Biege- zugfestigkeit [MPa]	Druckfestigkeit [MPa]	E _{Stat} [GPa]	US [m/s]
Steinerne Brücke (Bogen IX)	10 – 30	1,89 – 2,42	2,69 – 2,71	0,11 – 5,0 [16,8]	15 – 60	3,5 – 10,7	23 – 55	(15 – 60)	2820 – 5040
B2	16 – 17	2,10 – 2,11	2,51 – 2,52	n.b.	10	n.b.	40	n.b.	2309
B4	Nicht vorhanden								
GBo 5 Kapfelberg	C1	Nicht vorhanden							
C2	18 – 26	2,00 – 2,21	2,69 – 2,73	1,03 – 7,46	8 – 17	1,2 – 2,1	17 – 29	9 – 21	1916 – 2766
B2	8 – 15	2,29 – 2,47	2,64 – 2,76	0,28 – 0,87	7 – 29	4,4 – 24,7	34 – 77	9 – 35	2278 – 3680
B4	Nicht vorhanden								
GBo 6 Käfersdorf	C1	2,51 – 2,62	2,68 – 2,71	0,11 – 0,15	17 – 52	5,3 – 19,4	61 – 121	22 – 50	3877 – 4904
C2	Nicht vorhanden								
B2	6 – 21	2,05 – 2,47	2,57 – 2,71	0,39 – 0,51	12 – 44	2,8 – 29,4	16 – 195	3 – 47	2617 – 4573
B4	1 – 4	2,57 – 2,66	2,65 – 2,70	0,01 – 0,08	45 – 65	15,0 – 23,5	84 – 160	20 – 47	4665 – 5490
Arzweg	C1	2,41 – 2,49	2,70 – 2,75	0,26 – 0,73	12 – 36	8,8 – 14,9	70 – 99	31 – 43	2528 – 3986
C2	11 – 27	2,04 – 2,36	2,65 – 2,78	1,83	10 – 21	5,8 – 6,9	22 – 37	20 – 23	2403 – 3158
B2	10 – 20	2,08 – 2,36	2,56 – 2,61	0,34 – 1,29	17 – 34	5,6 – 13,7	58 – 88	19 – 39	3001 – 4100
B4	3 – 11	2,14 – 2,62	2,68 – 2,82	0,73	14 – 47	5,1 – 11,9	89 – 119	34 – 37	2915 – 4854
Elisbrunn	C1	2,33 – 2,63	2,69 – 2,75	0,15 – 0,28	31 – 61	4,2 – 21,9	49 – 124	32 – 51	3635 – 5114
C2	16 – 25	2,09 – 2,31	2,76 – 2,79	2,75	31	4,3 – 7,1	27	20	4082
B2	19 – 22	2,13 – 2,21	2,66 – 2,74	2,38 – 2,55	8 – 13	2,0 – 4,8	22 – 29	8 – 13	2053 – 3288
B4	6 – 11	2,38 – 2,49	2,64 – 2,69	0,49 – 0,91	25 – 33	8,9 – 14,9	42 – 70	25 – 33	3457 – 4142
C1	Nicht vorhanden								
C2	Nicht vorhanden								
GBo 9 Ganglhof									

Typ	Porosität [Vol.-%]	Rohdichte [g/cm ³]	Reindichte [g/cm ³]	w-Wert [kg/(m ² ·h)]	E _{dyn} * berechnet [GPa]	Biax. Biege- zugfestigkeit [MPa]	Druckfestigkeit [MPa]	E _{stat} [GPa]	US [m/s]
Steinerne Brücke (Bogen IX)	10 – 30	1,89 – 2,42	2,69 – 2,71	0,11 – 5,0 [16,8]	15 – 60	3,5 – 10,7	23 – 55	(15 – 60)	2820 – 5040
Aufschlüsse im Umfeld der Bohrungen									
GBo 3 Pettendorf	B2 4 – 13	2,27 – 2,57	2,56 – 2,66	0,12 – 1,45	33 – 55	14,4 – 30,4	121 – 168	32 – 46	4316 – 5103
GBo 7 Arzweg	C1 4 – 10	2,41 – 2,55	2,61 – 2,67	n.b.	26 – 44	12,2 – 25,0	57 – 119	25 – 47	3691 – 4721
GBo 7 Arzweg	C2 5 – 25	1,97 – 2,52	2,61 – 2,68	0,23 – 1,46	18 – 28	3,6 – 11,8	25 – 33	20 – 35	3691 – 4721
Einzelfundpunkte im Umfeld der Bohrungen									
EF GBo 2 Haugenried	C1 4 – 7	2,39 – 2,44	2,53 – 2,55	0,18	32 – 36	10,0 – 14,2	68 – 73	29 – 42	3951 – 4154
EF GBo 5 Gundelshausen	B2 C2 11 – 12	2,40 – 2,45 2,36 – 2,37	2,58 – 2,61 2,66 – 2,67	n.b. n.b.	75* 23*	17,9 – 28,9 3,5 – 7,3	101 n.b.	31 9 – 21	4780 1538
EF GBo 6 Käfersdorf	B2 4 – 5	2,55 – 2,56	2,67 – 2,68	0,11	57*	9,2 – 20,1	71	21	4687
EF GBo 8 Eilsbrunn	(B3) 2 – 3	2,61 – 2,63	2,68 – 2,69	0,07	99*	10,0 – 18,2	65 – 150	22 – 60	5190
Aufschlüsse und Probenahmen außerhalb der Bohrungsgebiete									
Buchenberg	B2 C2 16 – 24	2,41 – 2,42 2,03 – 2,19	2,65 – 2,66 2,59 – 2,66	n.b. 0,85	56* 28	22,8 3,4 – 14,8	n.b. 27 – 44	n.b. n.b.	4808 3975
Dantscher Mühle	C2 23 – 24	2,07 – 2,09	2,70 – 2,71	6,13	8*	0,8 – 0,9	n.b.	n.b.	1771
Ihrerstein, obere Bank	B2 3 – 14	2,26 – 2,53	2,61 – 2,63	0,08	33*	6,9 – 18,0	60	23	3688
Ihrerstein, untere Bank	C2 8 – 28	1,96 – 2,43	2,63 – 2,73	0,92	21	4,2 – 10,1	23 – 25	7 – 23	3337
Kapfelberg Nord	C2 16 – 22	2,11 – 2,31	2,70 – 2,75	0,54 – 6,65	17*	0,3 – 9,5	6 – 12	n.b.	2389 – 3827
Ringberg	B2 15 – 16	2,24 – 2,28	2,64 – 2,67	0,79	16 – 18	5,1 – 11,9	36	19	2955 – 3139
Saal a.D.	B2 (B3) 10 – 20	2,12 – 2,42 2,11 – 2,37	2,62 – 2,68 2,58 – 2,63	0,49 0,21	23 – 25 52*	5,9 – 17,7 7,4 – 19,1	34 – 57 38 – 68	22 – 31 25 – 36	3232 – 3618 4892 – 5180
	C2 7 – 28	1,92 – 2,43	2,61 – 2,68	1,96 – 6,65	10 – 25	2,5 – 7,0	23 – 33	14 – 27	2342 – 3556
Bauhof Regensburg	B2 (B3) 11 – 13	2,28 – 2,32 2,18 – 2,21	2,54 – 2,58 2,48 – 2,51	0,91 1,18	32 – 38 51*	13,2 – 22,5 7,7 – 9,0	80 – 130 106	29 – 45 39	3929 – 4178 n.b.
	C2 11 – 17	2,22 – 2,33	2,61 – 2,67	0,25	21 – 28	11,4 – 15,5	36 – 46	24 – 32	3374 – 3853

Tab. 8: Durchschnittswerte der RFA Ergebnisse

	SiO ₂ Gew %	TiO ₂ Gew %	Al ₂ O ₃ Gew %	Fe ₂ O _{3_T} Gew %	Fe ₂ O ₃ Gew %	FeO Gew %	MnO Gew %	MgO Gew %	CaO Gew %	Na ₂ O Gew %	K ₂ O Gew %	P ₂ O ₅ Gew %	GV_1050 Gew %	Summe Gew %
GBo 2 Haugmried	43,60	0,06	1,27	1,59	1,40	0,17	0,02	4,42	23,99	0,07	0,59	0,05	24,19	99,87
GBo 3 Neudorf	43,37	0,10	2,39	2,75	2,50	0,22	0,02	0,94	27,10	0,07	1,19	0,11	22,67	100,68
GBo 5 Kapfelberg	48,81	0,11	2,13	1,99	1,78	0,19	0,02	2,52	22,34	0,07	0,80	0,06	21,10	99,96
GBo 6 Käfersdorf	35,52	0,11	2,28	2,37	2,19	0,16	0,02	6,24	25,16	0,05	0,96	0,14	26,89	99,77
GBo 7 Arzweg	32,91	0,09	1,84	1,89	1,66	0,20	0,02	2,95	31,19	0,08	0,74	0,05	28,32	100,08
GBo 8 Eilsbrunn	42,32	0,09	2,05	1,91	1,70	0,20	0,02	7,64	19,95	0,06	0,83	0,07	24,81	99,77
GBo 9 Ganglhof	43,77	0,06	1,44	1,75	1,60	0,16	0,02	5,18	22,76	0,05	0,68	0,05	24,13	99,93
Buchenberg	19,08	0,05	0,88	0,94	0,79	0,14	0,04	0,69	43,93	0,08	0,40	0,07	34,83	100,98
Ihrlerstein Obere Bank	23,20	0,10	1,30	1,76	1,63	0,12	0,03	0,97	39,30	0,07	0,62	0,05	32,32	99,74
Ihrlerstein Untere Bank	40,33	0,08	1,21	2,21	2,05	0,14	0,018	1,97	28,42	0,05	0,73	0,06	24,91	100,02
Gundelshausen	32,55	0,06	1,08	1,70	1,49	0,19	0,02	0,69	34,81	0,07	0,57	0,06	28,73	100,34
Saal a. d. Donau	45,12	0,10	1,58	2,06	1,94	0,16	0,02	0,71	26,84	0,07	0,82	0,07	22,43	99,87
Dantscher Mühle	62,36	0,09	1,62	2,67	2,38	0,26	0,01	4,58	12,13	0,04	1,05	0,05	15,01	99,64
Ringberg	23,15	0,10	1,39	1,87	1,87	< NWG	0,05	0,74	39,34	0,08	0,68	0,11	32,04	99,62
Pettendorf	26,75	0,06	1,36	1,63	1,25	0,34	0,03	0,74	38,28	0,07	0,58	0,05	31,05	100,57
Kapfelberg	49,54	0,07	1,17	1,99	1,70	0,27	0,01	5,54	19,04	0,05	0,78	0,07	21,42	99,68
Bauhof Regensburg	47,80	0,06	1,19	1,46	1,38	0,14	0,04	0,59	26,26	0,07	0,56	0,06	21,74	99,87
Arzweg	12,28	0,03	0,51	0,95	0,84	0,10	0,03	1,24	47,25	0,07	0,28	0,03	38,12	100,77
Arzweg	12,28	0,03	0,51	0,95	0,84	0,10	0,03	1,24	47,25	0,07	0,28	0,03	38,12	100,77

Tab. 8 zeigt die durchschnittlichen RFA-Messwerte der Hauptelementoxide und den Glühverlust (GV) der Bohrungen GBo 2 bis GBo 9 sowie der Aufschlüsse innerhalb und außerhalb des Bohrgebietes. Mittels XRD (siehe Tab. 9 und Tab. 10) wurden zusätzlich die vorhandenen Mineralphasen bestimmt. Die für dieses Gestein typisch hohe Inhomogenität zeigt sich in der großen Schwankungsbreite der Gehalte der einzelnen Minerale: Quarzgehalte schwanken zwischen 12 bis 62 Gew.-%, mit einem Mittelwert von 37 Gew.-%. Calcit hat eine Bandbreite von 9 bis 79 Gew.-% und einen Mittelwert von 48 Gew.-%. Durchschnittswerte für Dolomit, Ankerit und Illit liegen jeweils bei ungefähr 16, 7 und 5 Gew.-%.

Tab. 9: Ergebnisse der XRD Messungen, Einteilung nach festgelegten Gesteinsvarietäten.

	Typ	Quarz Gew %	Calcit Gew %	Dolomit Gew %	Ankerit Gew %	Illit Gew %	Glaukonit Gew %	Mikroclin Gew %	Kaolinit Gew %	Summe Gew %
GBo 1c Ihrlerstein	B2	29	48			11	11	1		100
	B4	11	89							100
	C1	45	47			2	5	1		100
	C2	38	51	3		3	3		2	100
GBo 1d Ihrlerstein	C1	44	50			4	2			100
	C2	57	34			5	4			100
GBo 1e Ihrlerstein	B2	31	45			13	11			100
	B4	8	92							100
	C1	38	52			3	4	3		100
	C2	52	34			8	6			100
GBo 2 Haugenried	B4	22	54	13	8	3				100
	C1	46	4	35	12	3				100
	C2	54	7	27	7	5				100
GBo 3 Neudorf	B2	46	54							100
GBo 5 Kapfelberg	C2	42	27	22	4	5				100
GBo 6 Käfersdorf	B2	31	29	23	9	8				100
	C1	39	23	33		5				100
GBo 7 Arzweg	B2	39	48	5		8				100
	B4	16	70	14						100
	C2	45	3	32	20					100
GBo 8 Eilsbrunn	B2	52	31	7		10				100
	B4	11	6	73	10					100
	C1	30		51	17	2				100
GBo 9 Ganglhof	B2	51	12	25	6	6				100
	B4	22	64	10	4					100

Bei den Ihrlersteiner Bohrungen GBo 1c-e treten die höchsten Glaukonitgehalte mit 11 Gew.-% bei Typ B2 auf. Sonst liegen die Glaukonitwerte bei den Typen B4, C1 und C2 mit 2 bis 6 Gew.-%

deutlich niedriger. Typ B4 weist mit 89 bis 92 Gew.-% die höchsten Quarzgehalte auf. Quarzgehalt bei den Typen C1 und C2 liegt zwischen 31 bis 57 Gew.-% und die Calcitgehalte zwischen 34 bis 53 Gew.-%.

Tab. 10: Ergebnisse der XRD Messungen von Aufschlüssen, die keinem genannten Gesteinstyp zugewiesen sind.

Name	Kürzel	Quarz Gew %	Calcit Gew %	Dolomit Gew %	Ankerit Gew %	Illit Gew %	Summe Gew %
Arzweg Probe 2	ARZ	11	84	3	2		100
Arzweg Probe 1	ARZ	13	87				100
Bauhof Regensburg Probe 2	BHR	45	50			5	100
Bauhof Regensburg Probe 3	BHR	76	24				100
Bauhof Regensburg Probe 1	BHR	25	75				100
Buchenberg Probe 2	BUC	16	81			3	100
Buchenberg Probe 1	BUC	23	77				100
Dantscher Mühle	DAN	62	9	14	10	5	100
Gundelshausen Probe 2	GUN	21	76			3	100
Gundelshausen Probe 1	GUN	43	52			5	100
Ihrlerstein Obere Bank Probe 2	IHO	30	70				100
Ihrlerstein Obere Bank Probe 1	IHO	17	79			4	100
Ihrlerstein Untere Bank	IHU	40	46	4	6	4	100
Kapfelberg Probe g	KBA	50	38	12			100
Kapfelberg Probe f	KBA	52		31	13	4	100
Pettendorf Probe 2	PET	27	73				100
Pettendorf Probe 1	PET	26	69			5	100
Ringberg	RIN	22	74			4	100
Saal a.d. Donau Probe 4	SAL	59	34			7	100
Saal a.d. Donau Probe 2 g	SAL	32	63			5	100
Saal a.d. Donau Probe 3	SAL	28	67			5	100
Saal a.d. Donau Probe 1	SAL	26	69			5	100
Saal a.d. Donau Probe 2 h	SAL	81	19				100

Da im Bereich des Steinbruchs Ihrlerstein die Chance am realistischsten ist, einen neuen Steinbruch wieder aufzufahren, werden in Tab. 11 speziell die Ergebnisse der 3 Bohrungen im Umfeld der beiden Schichtpakete des Ihrlersteiner Bruchs mit den Regensburger „Brückenwerten“ verglichen und kommentiert.

Tab. 11: Vergleich der **Mittelwerte** der gesteinsphysikalischen Messungen der untersuchten Bohrkern-Proben und der Proben aus dem ehemaligen Steinbruch Ihrlenstein bezüglich der Grünsandsteinvarietäten Typ B2, B4, C1 und C2. Die knolligen Varietäten der Typen C1 und C2 sind nicht berücksichtigt. (w-Wert aus Kapillarer Wasseraufnahme; E_{dyn} = Dynamischer E-Modul aus Ultraschallmessung; n.b. = nicht bestimmt).

Lokalität	Typ	Porosität [Vol.-%]	Rohdichte [g/cm ³]	w-Wert [kg/(m ² ·h)]	E_{dyn} * berechnet [GPa]	Biax. Biegezug- festigkeit [MPa]	Druck- festig- keit [MPa]	E_{Stat} [GPa]	US [m/s]	Sättigung
Steinerne Brücke (Bogen IX)	vorwiegend C2	10 – 30	1,89 – 2,42	0,11 – 5,0 [-16,8]	15 – 60	3,5 – 10,7	23 – 55	(15 – 60)	2820 – 5040	<0,6
GBo 1c Ihrlenstein N	B2	11	2,36	0,76	22	8,2	71	31	4252	0,96
	B4	5	2,50	0,28	20	15,4	73	34	3495	0,93
	C1	17	2,19	2,06	17	6,3	31	22	3152	0,59
	C2	25	2,03	3,65	13	5,8	21	15	2571	0,59
GBo 1d Ihrlenstein N	B2	20	2,12	n.b.	8*	n.b.	63	n.b.	n.b.	0,75
	B4	11	2,32	0,28	38	n.b.	56	26	4332	0,65
	C1	14	2,24	0,52	22	7,7	42	27	3319	0,69
GBo 1e Ihrlenstein N	C2	21	2,11	3,00	14	3,2	16	8	2762	0,55
	B2	11	2,36	0,28	30	19,5	70	25	3744	0,92
	B4	5	2,48	n.b.	40	16,8	69	35	4339	n.b.
	C1	17	2,18	1,00	22	9,2	46	24	3404	0,60
Steinbruch Ihrlenstein, Obere Bank	C2	18	2,18	1,87	8	2,9	16	11	2310	0,92
	C1	9	2,40	0,08	33*	14,2	60	23	3688	n.b.
Steinbruch Ihrlenstein, Untere Bank	C2	16	2,25	0,92	21	7,1	24	7	3337	n.b.

Die Ergebnisse in Tab. 11 zeigen, dass die Durchschnittswerte aller Sandsteine des Typs C1 aus den Bohrungen GBo 1c bis 1e sämtliche Sollwerte erfüllen. Die vom äußeren „Erscheinungsbild“ (Farbe, Körnung und Struktur) weniger geeigneten Typen B2 und B4 sind von den Durchschnittswerten bis auf eine Ausnahme ebenfalls alle geeignet.

Bezüglich der Porosität, der Rohdichte und der Kapillaren Wasseraufnahme (w-Wert) entspricht der erbohrte Sandstein des Typs C2 den Kriterien ebenso. Das erforderliche Spektrum hinsichtlich der Biaxialen Biegezugfestigkeit erfüllt die dem Alt-Bruch am nächsten liegende Bohrung GBo 1c, die Werte des Bohrgutes der anderen Bohrungen liegt darunter bzw. knapp darunter. Bezüglich des Dynamischen E-Moduls und der Druckfestigkeit von Typ C2 ist zu erwähnen, dass alle Durchschnittswerte unterhalb bzw. knapp unterhalb der Sollwerte liegen. Der Tab. 7 mit der Schwankungsbreite der Messwerte kann man allerdings entnehmen, dass es, bis auf die Druckfestigkeitswerte der Bohrung GBo 1e, auch Sandsteine des Typs C2 gibt, die die Sollwerte durchaus erfüllen.

Die Bohrkern der Bohrung GBo 1d standen nicht vollständig zur Verfügung. An den fehlenden Proben wurden durch ein Labor in Wismar Untersuchungen zur Druckfestigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse liegen dem LfU vor, die Messungen sind aber teilweise nicht repräsentativ, da die Bohrkern des Typs C1 nicht senkrecht, sondern parallel zur Schichtung durchgeführt wurden. Der Durchschnittswert des Fremd-Labors für diesen Gesteinstypus lag mit 31 MPa innerhalb der Sollwerte, aber unterhalb des im LfU-Labor ermittelten Wertes (42 MPa). Der Durchschnittswert für den Typus C2 lag mit 37 MPa deutlich über den im LfU-Labor gemessenen Werten, die in dieser Boh-

rung zwischen 14 und 21 MPa schwankten. Die höheren Messwerte des Labors in Wismar basieren wohl darauf, dass für diese Untersuchung die optimalen Kernstrecken für den Typ C2 entnommen wurden.

Bezüglich der Frostbeständigkeit weisen die Proben von den Ihrlersteiner Bohrungen GBo 1c-e, für die Typen C1 und C2 gute Sättigungswerte auf, was auf eine Langlebigkeit, mit vielen Frost-Tau-Wechseln, hindeutet. Die Typen B2 und B4 liegen über der festgesetzten Sättigungsgrenze von 0,6 und sind daher weniger geeignet. Bei den Bohrungen GBo 2 bis 9 sind die Tendenzen zur Frostbeständigkeit am ehesten bei C1 und/oder C2 zu beobachten.

7 Auswertung und Vorschläge für mögliche Neuanlagen

Im Folgenden werden, neben einer Neuanlage eines Steinbruches, Vorschläge für Rohstoffpotentialflächen von abbauwürdigem Grünsandstein im Untersuchungsgebiet gemacht. Abbauwürdig sind diejenigen Sandsteine, die eine wirtschaftliche Abbaumenge des gewünschten Typs erwarten lassen und wo keine Überschneidungen mit konkurrierenden Flächennutzungen vorliegen.

Im Rahmen eines DBU-Projektes, das sich mit der Erfassung historischer Naturwerkstein-Brüchen in Bayern befasst, wurden auch Grünsandsteinbrüche bearbeitet. Zwei davon (Ihrlerstein und Kapfelberg SW) wurden explizit im DBU-Bericht abgehandelt (POSCHLOD et al. 2017). Ein weiterer Bruch (Pettendorf) wurde zusätzlich beprobt, aber nicht in das Gesamtwerk integriert. Von allen drei Brüchen liegen Musterplatten vor, die in Abb. 22, 25, 28 und 29 dargestellt sind.

Für die **Neuanlage eines Steinbruches** liegen bei den Standorten Ihrlerstein, Haugenried und Kapfelberg bei Gundelshausen besonders günstige Verhältnisse zwischen Gesteinsmächtigkeit, Qualität und Infrastruktur vor. Außerdem ist zu vermuten, dass unter bestimmten Voraussetzungen (Blockgröße u. a.) nahe der Orte Arzweg und Eilsbrunn abbauwürdige Sandsteinvorkommen liegen.

Der in Tab. 12 aufgeführte MQ-Index stellt ein Maß (M) zur Bewertung des geeigneten Materials (Qualität Q) an Regensburger Grünsandstein dar. Dabei wird die Mächtigkeit mit dem Anteil an verwertbarem Material multipliziert. Typ C wird auf Grund seiner guten farblichen und physikalischen Eignung doppelt gewertet:

$$MQ = 2 \cdot (\text{Mächtigkeit Typ C} \cdot \text{Prozent-Anteil brauchbaren Materials Typ C}) + 1 \cdot (\text{Mächtigkeit Typ B} \cdot \text{Prozent-Anteil brauchbaren Materials Typ B})$$

$$\text{Beispiel Haugenried: } MQ = 2 \cdot (4,7 \cdot 0,65) + 1 \cdot (3,3 \cdot 0,75) = 8,6$$

Demnach hat der Regensburger Grünsandstein in Haugenried mit einem MQ-Index von 8,6 das beste Verhältnis an Mächtigkeit und Anteil an verwertbarem Material. Gefolgt von Kapfelberg mit einem MQ-Index von 8,3. Arzweg und Ihrlerstein weisen mit jeweils 8,0 und 7,6 einen guten MQ-Index auf. Wegen geringer Mächtigkeit des Typs C hat Eilsbrunn nur einen MQ-Index von 7,3.

Tab. 12: Vorschläge für mögliche neue Steinbruchstandorte mit Mächtigkeiten der verwertbaren Gesteinstypen und den Anteilen brauchbaren Materials anhand der zuvor geteufte Erkundungsbohrungen, sortiert nach MQ-Index.

Standort	Mächtigkeit Gesteinstypen		Anteil brauchbaren Materials		Index MQ []	Konkurrierende Nutzungen im Umfeld der Potentialflächen
	C1 + C2 [m]	B2 + B4 [m]	C1 + C2 [%]	B2 + B4 [%]		
Haugenried	4,7	3,3	65	75	8,6	-
Kapfelberg	6,5	2,1	55	55	8,3	2 WSG, Bannwald
Arzweg	3,0	6,3	65	65	8,0	LSG, Bannwald
Ihrlerstein	5,9	3,3	53	42	7,6	Bebauung
Eilsbrunn	3,8	4,2	60	65	7,3	FFH

7.1 Haugenried

Nach dem MQ-Index (ein Maß für die Rentabilität) zeigt der Abbaubereich nordöstlich der Bohrung Haugenried (Abb. 20) mit 8,6 die besten Werte (Tab. 12). Alle Gesteinsvarietäten sind vorhanden; die Typen B2, B4, C1 und C2 sind am besten geeignet und übertreffen sogar die definierten Kennwerte des Bogens IX. Nur bei Typ C2 sind einige Kennwerte (w-Wert, Dyn. E-Modul, Biax. Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und US) außerhalb der Bandbreite.

Die Bohrung setzt in der Eibrunn-Formation an, welche bis Bohrmeter 1,80 m reicht. Darunter befindet sich der Regensburger Grünsandstein, bis Bohrmeter 15,50 m. Es sind keine konkurrierenden Nutzungsgebiete in unmittelbarer Nähe vorhanden.

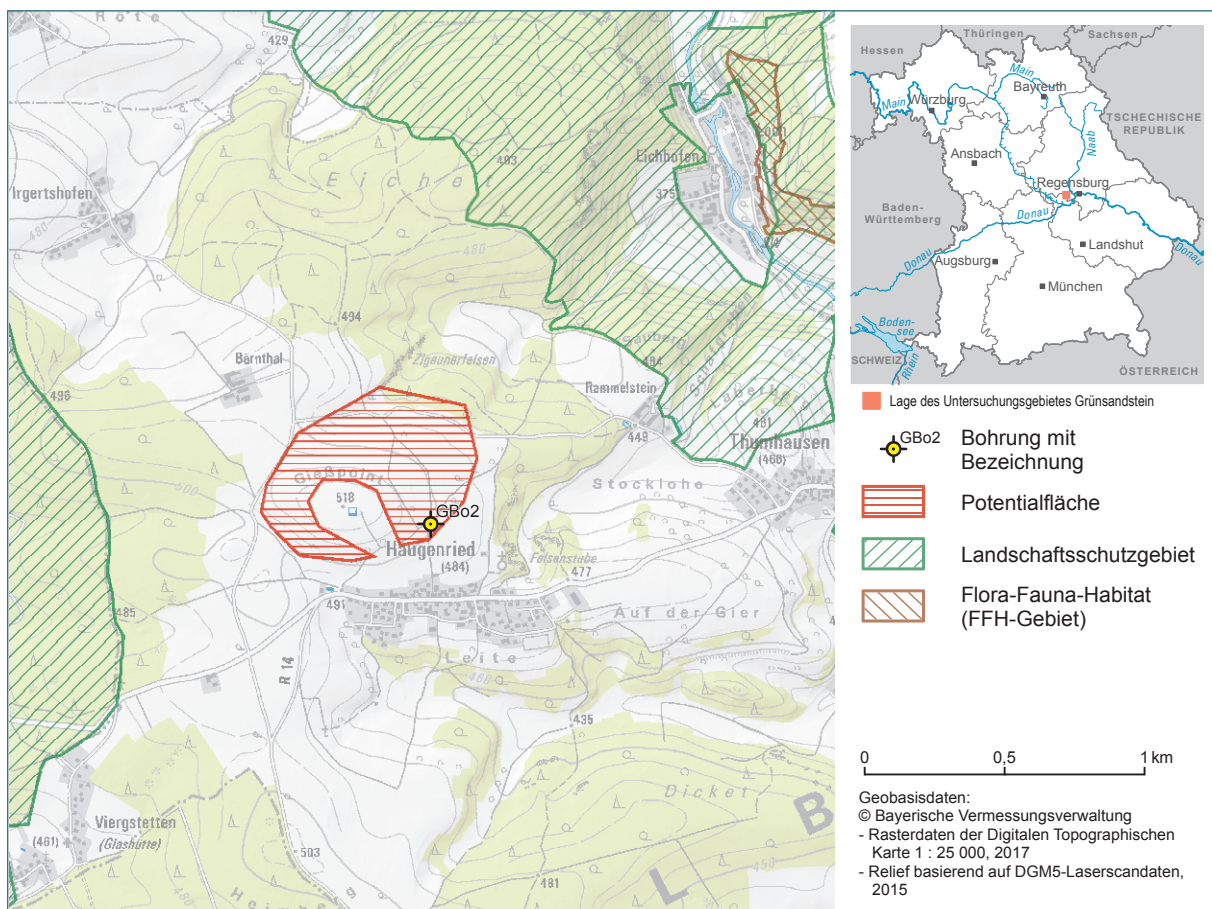


Abb. 20: Rohstoffpotentialfläche Haugenried; Abbauwürdige Fläche ca. 28,6 Hektar.

7.2 Kapfelberg

Der Standort Kapfelberg verfügt den Untersuchungen zufolge über die größte Mächtigkeit (6,5 m) brauchbaren Materials des Typs C2. Das potentielle Abbaugelände liegt allerdings nahe eines Wasserschutzgebiets (Abb. 21). Eine Absprache mit den zuständigen Wasserwirtschaftsbehörden (WWA Regensburg) wäre für diesen Standort somit nötig. Des Weiteren befindet sich in unmittelbarer Nähe ein Landschaftsschutzgebiet (Bannwald) sowie eine Schadensfläche aus einem ehemaligen Braunkohleabbau. Ungefähr 320 Meter von der Bohrung entfernt stehen zwei Gehöfte, hier sollte ein Sicherheitsabstand von 300 Metern eingehalten werden, andernfalls kann der Abbau nicht durch Sprengen erfolgen.

Angesetzt ist die Bohrung in der Reinhausen-Subformation, welche bis Bohrmeter 12,90 m reicht. Gefolgt von der Eibrunn-Formation bis Bohrmeter 18,15 m. Darunter befindet sich der Regensburger Grünsandstein. Es sind demnach 18 Meter Abraum vorhanden.

Die Messwerte für die Kapillare Wasseraufnahme (w-Wert), die Dynamische und Statische E-Moduln, der Biaxialen Biegezugfestigkeit, der Druckfestigkeit sowie des Ultraschalls von Typ C2 sind teilweise nicht innerhalb der Bandbreite der Kennwerte für Bogen IX. Bei Einzelfundpunkten im Umfeld der Bohrung (Gundelshausen) wurden allerdings Regensburger Grünsandstein des Typs B2 und C2 angetroffen, die durchaus den Anforderungen entsprechen.

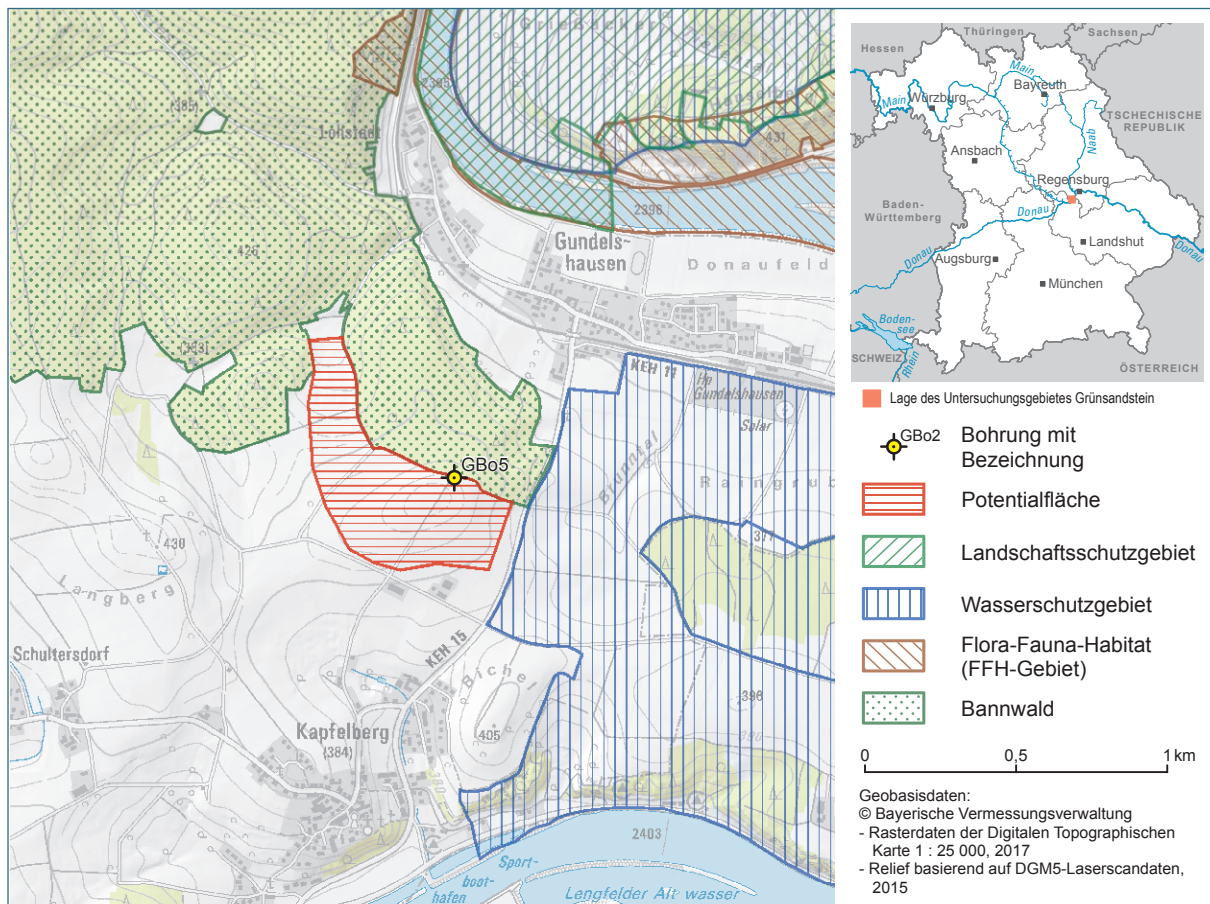


Abb. 21: Rohstoffpotentialfläche Kapfelberg; Abbauwürdige Fläche ca. 24,3 Hektar.

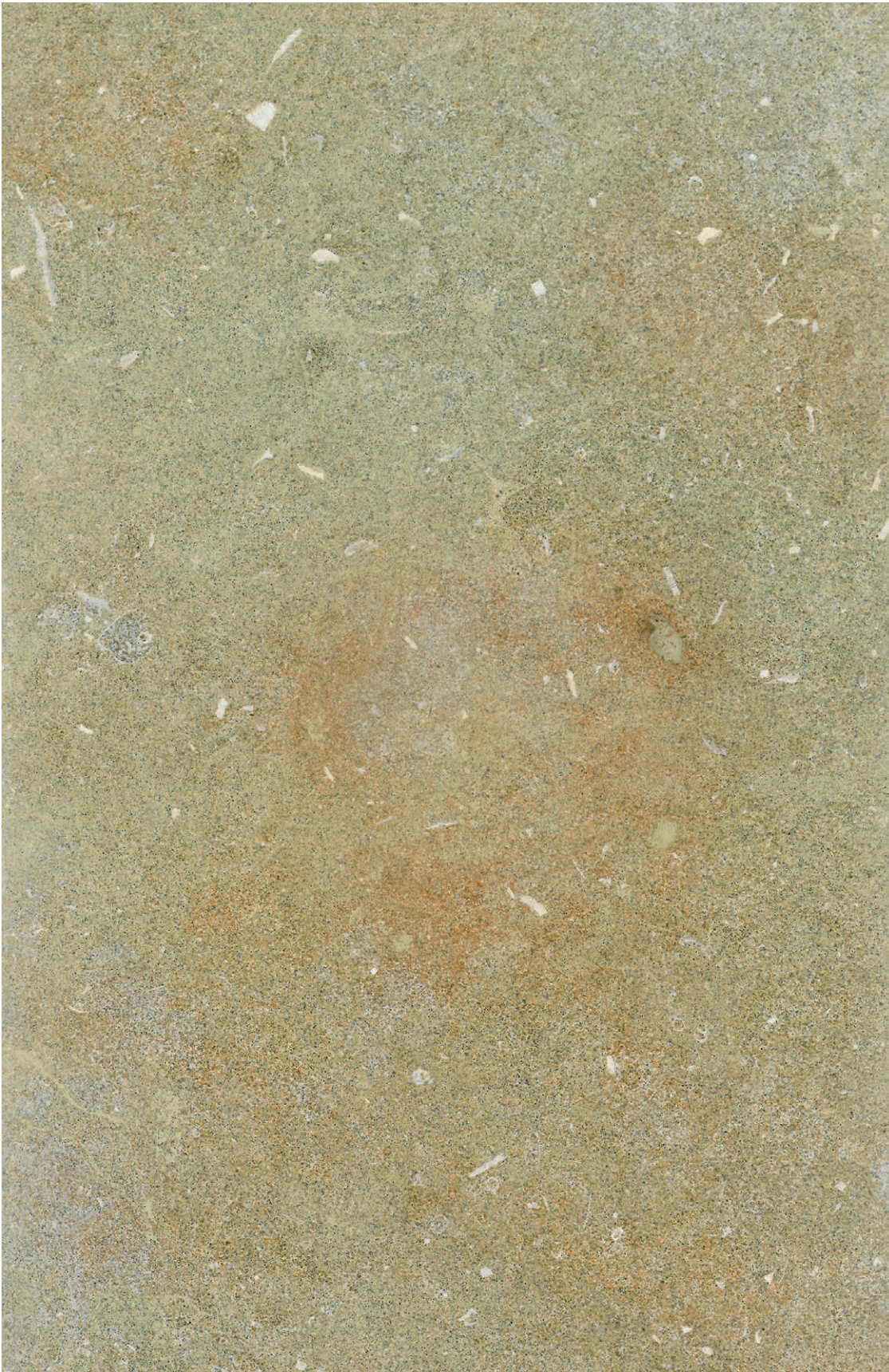


Abb. 22: Musterplatte aus Regensburger Grünsandstein von einem aufgelassenen Steinbruch 1,2 km südwestlich Kapfelberg (DBU Projekt P438).

7.3 Arzweg

Der Standort Arzweg verfügt über die größten Mächtigkeiten der Typen B2 (4,70 m) und B4 (1,55 m). Die Bohrung setzt in der Reinhausen-Subformation an, welche bis Bohrmeter 5,80 m reicht. Darunter, befinden sich bis Bohrmeter 9,90 m Gesteine der Eibrunn-Formation. Der Regensburger Grünsandstein reicht von Bohrmeter 9,90 m bis 23,80 m und ist somit 13,9 m mächtig. Es sind alle bestimmten Grünsandsteinvarietäten vertreten. Brauchbar sind jedoch nur die Typen B2, B4, C1 und C2. Die Typen C1 (1,40 m) und C2 (1,60 m) sind allerdings nur in geringer Mächtigkeit vorhanden.

Nördlich angrenzend an die Rohstoffpotentialfläche befindet sich ein Landschaftsschutzgebiet (Abb. 23).

Die besten Übereinstimmungen mit Bogen IX hat der Typ B4 der Bohrung GBo 7 mit einer Mächtigkeit von 1,55 m. Allerdings ist Typ B4 aufgrund seiner hellen und kaum grünlichen Färbung eher weniger geeignet. Die Typen C1 und C2 (Mächtigkeit = 3 m) sind bedingt geeignet, da sowohl der Dynamische E-Modul, als auch die Druckfestigkeit und die Ultraschallgeschwindigkeiten nur leicht unterhalb der Sollwerte liegen.

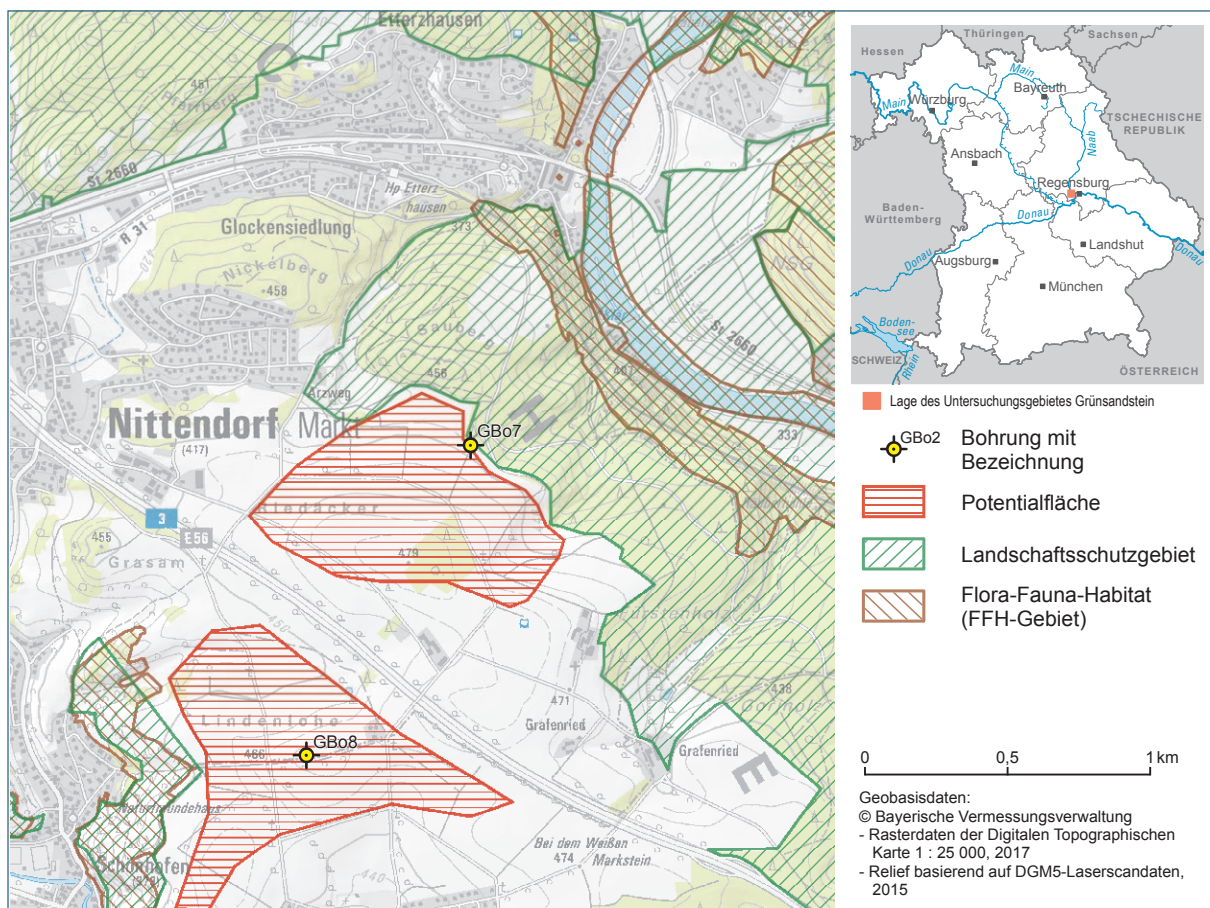


Abb. 23: Rohstoffpotentialfläche Arzweg (nur nördliche Fläche); Abbauwürdige Fläche ca. 47,3 Hektar.

7.4 Ihrlerstein

Eine ursprünglich angedachte Erweiterung des Steinbruchs Ihrlerstein nach Westen wurde verworfen, da die Bohrungen GBo 1a und 1b als nicht abbauwürdig eingestuft worden sind. Eine abbauwürdige Fläche wurde nördlich des aufgelassenen Steinbruchs vermutet.

Deshalb wurden im Dezember 2008 und Januar 2009 vier weitere Erkundungsbohrungen durch die Firma Conrad aus Merxleben im Auftrag der Fa. TRACO, Bad Langensalza, nördlich des aufgelassenen Steinbruchs Ihrlerstein niedergebracht.

Wie bei den Bohrungen aus den Jahren 1994/1995, wurden die Ihrlersteiner Bohrkerne hinsichtlich der Mächtigkeit einzelner Gesteinstypen und dem Anteil brauchbaren Materials charakterisiert. Bei der Auswertung für den MQ-Index, welcher für Ihrlerstein bei 7,6 liegt, wurde der Durchschnittswert der Bohrungen GBo 1c – e errechnet (siehe Tab. 12).

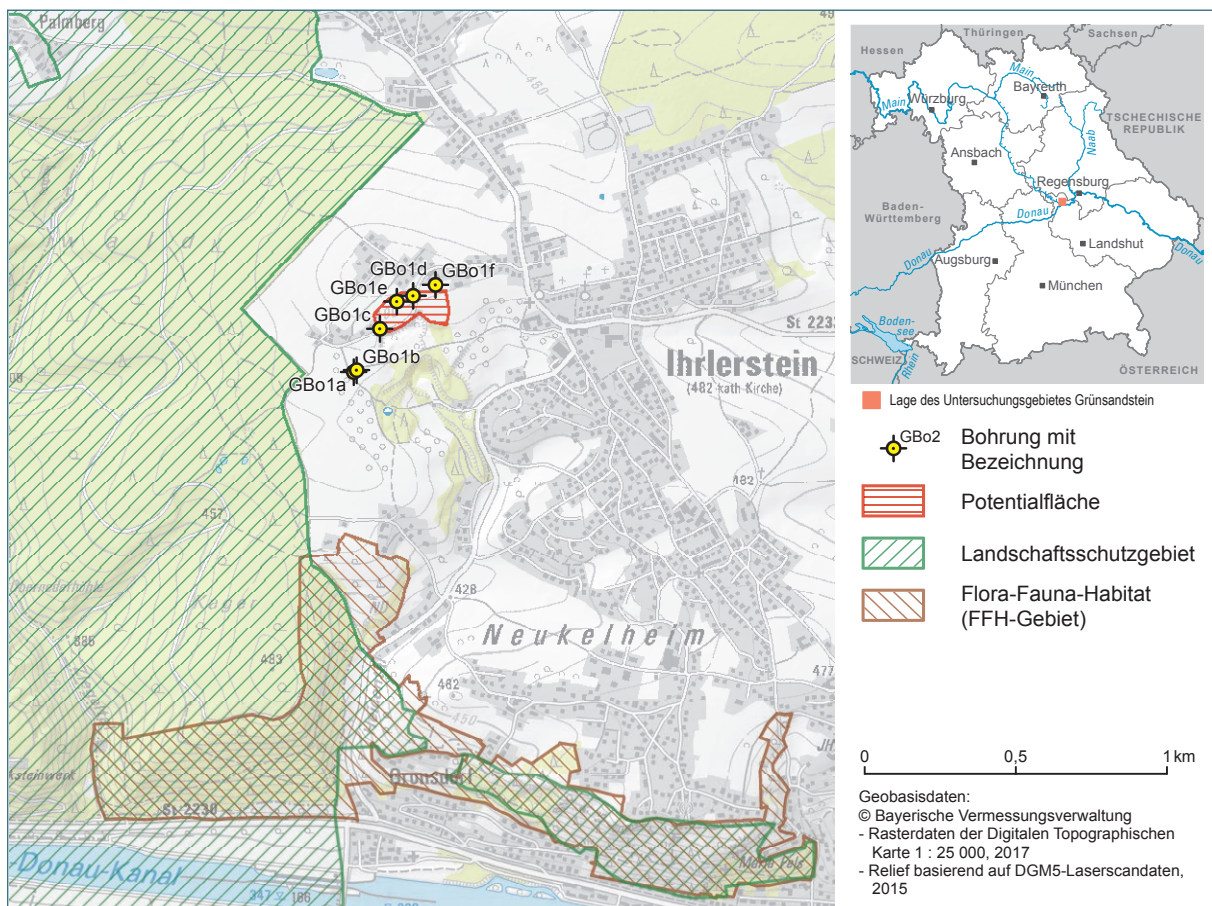


Abb. 24: Rohstoffpotentialfläche Ihrlerstein; Abbauwürdige Fläche ca. 2,24 Hektar.

In den Bohrungen GBo 1c, 1d und 1e wurde verwertbarer Regensburger Grünsandstein angetroffen, der wie das Material der ersten Grünsandstein-Bohrkampagne (GBo1a, 1b, GBo 2 bis GBo 12) eingehend untersucht wurde. Die Bohrung GBo 1f enthält fast ausschließlich mürbes, unbrauchbares Material und wurde daher nicht beprobt.

Die Bohrmeter 10 bis 12 m (Typ C1) und 20 bis 22 m (Typ C2) der Bohrung GBo 1d standen uns nicht für die Untersuchung zur Verfügung. Sie wurden von der die Bohrungen beauftragenden Firma an die Baustoffprüfstelle Wismar GmbH zur Bestimmung der Einaxialen Druckfestigkeit geschickt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das erbohrte Material der Bohrungen GBo 1c, d und e in fast allen Bereichen den Sollwerten der Steinernen Brücke entspricht. Festzuhalten ist allerdings, dass die Sollwerte für den Regensburger Grünsandstein im Verhältnis zu anderen Naturwerksteinen relativ niedrig angesetzt sind. D.h. um eine möglichst lange „Standzeit“ der aus denkmalpflegerischer Sicht gewünschten Regensburger Grünsandsteine zu gewährleisten, müssen im neu geplanten Steinbruch die Naturwerkstein-Blöcke selektiv abgebaut werden.



Abb. 25: Musterplatte aus Regensburger Grünsandstein von Ihrlenstein (DBU Projekt P406).

Zusätzlich erwähnen muss man, dass im Bereich der Bohrungen GBo 1c bis 1e knollige Varietäten der Typen C1 und C2 auftreten, die allerdings bei den Untersuchungsergebnissen und Berechnungen als nicht brauchbar gewertet wurden. Die verwertbaren Schichten der Typen C1 und C2 weisen etwa die gleiche Mächtigkeit auf.

Die Untersuchungsergebnisse der Bohrungen GBo 1c bis e legen damit die Wiederaufnahme der Abbautätigkeit des ehemaligen Steinbruchs bzw. die Neuanlage eines Steinbruchs nördlich des ehem. Abbaus Ihrlersstein auf den Flurnummern 108 und 110 (Gemarkung Ihrlersstein) nahe. Sinnvoll wäre ein Auffahren des neuen Bruches vom alten Steinbruch aus (NE-Ecke der Flurnr. 334/29). Dabei müsste der Lärchenweg nach Norden verlegt werden und der vorgeschriebene Abstand zur Trafostation (und ggf. der dort verlegten Leitungen) eingehalten werden.

Auf den Grundstücken der Flurnummern 108 und 110 stehen insgesamt ca. 1,2 ha als Abbaufäche zur Verfügung. Dies entspricht ca. 10.000 cbm verwendbaren Materials (bei insgesamt ca. 3 m Mächtigkeit der Oberen (Typ C1) und Unteren Bank (Typ C2) und dem beim Grünsandstein üblichen Ausbeuteverlust von 70 %).

Allerdings ist anzumerken, dass sich in Angrenzung an die Bohrungen eine Siedlung befindet und der Abbau daher nicht durch explosives Sprengen durchgeführt werden kann. Stattdessen könnte das Heraustrennen von Natursteinblöcken über Sprengen ohne Detonation mit Hilfe von Quellsprengzement erfolgen. Die Vorteile durch den Quellsprengzement sind das schonende Spalten des Materials ohne Erschütterungen und somit ohne Explosionslärm und Staub.



Abb. 26: Steinbruch Ihrlersstein.

7.5 Eilsbrunn

Nicht weit von der Bohrung bei Arzweg entfernt ist der mögliche Standort Eilsbrunn (Abb. 27). Die Messungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit Bogen IX bei allen Gesteinsvarietäten. Allein bei Typ B4 ist der Dynamische E-Modul minimalst unter dem Sollwert. Die Gesamtmächtigkeit (alle Varietäten) an brauchbarem Material beträgt 8 m.

Bei einer Aufwältigung der Brüche Arzweg und Eilsbrunn müsste, mit der sich anbietenden nordgerichteten Abbaurichtung, eine Zufahrt zu einem Bauernhof möglicherweise verlegt werden.

Das Potentialgebiet wird im Südwesten durch ein FFH-Gebiet (das gleiche Gebiet ist auch als Landschaftsschutzgebiet gekennzeichnet) und im Nordosten durch die Autobahn BAB 3/E56 begrenzt.

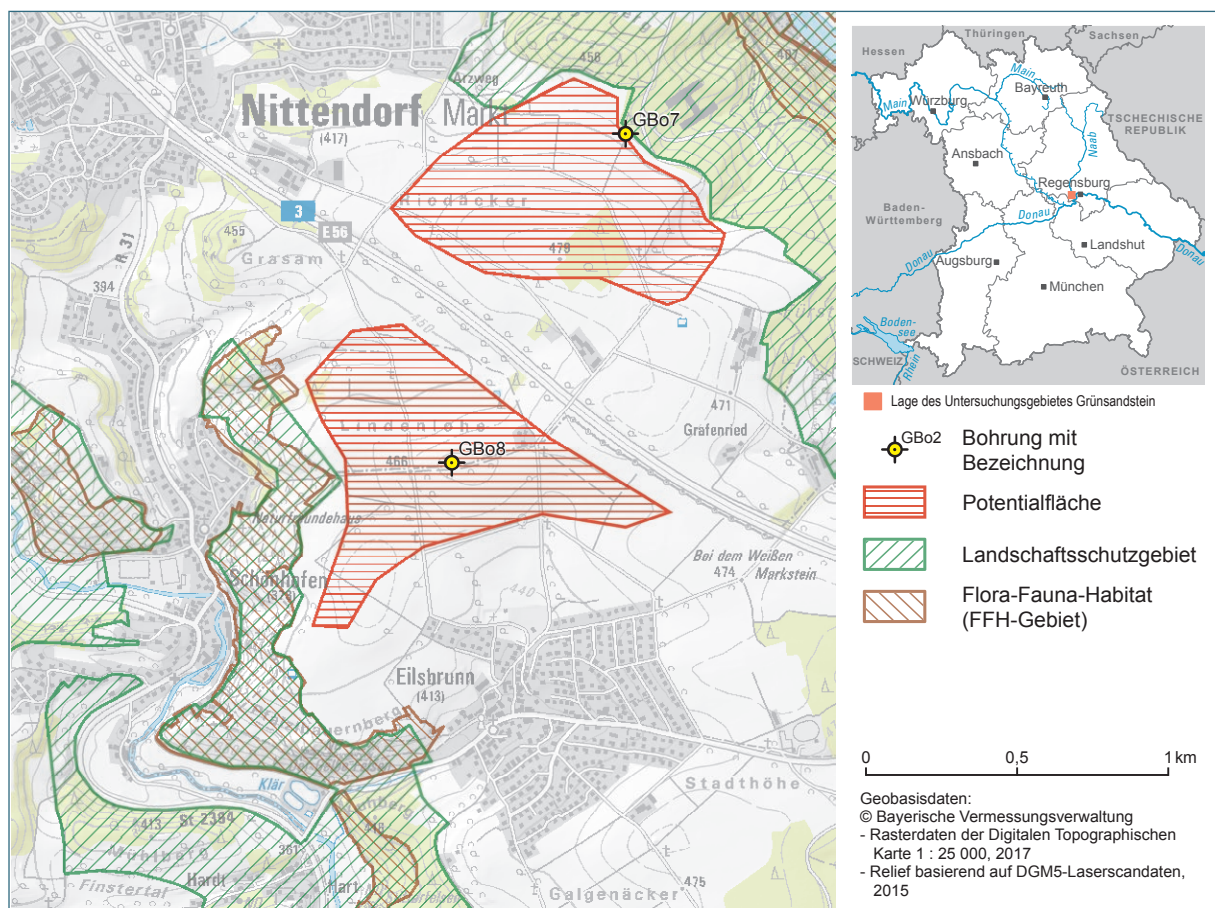


Abb. 27: Rohstoffpotentialfläche Eilsbrunn (nur südliche Fläche); Abbauwürdige Fläche ca. 51 Hektar.

7.6 Sonstige

Bei der Bohrung **GBo 3 Neudorf bei Pettendorf** ist der Typ B2 als Werkstein geeignet, er hat allerdings nur eine Mächtigkeit von 2,95 m. Im Aufschluss nordöstlich Pettendorf nahe der Bohrung GBo 3 konnte Regensburger Grünsandstein vom Typ B2 beprobt werden, welcher ebenso gute Ergebnisse lieferte. Auf Grund der geringen Mächtigkeit ist ein Abbau nicht rentabel durchführbar. 2016 wurde im Rahmen des DBU-Projektes („Erfassung historischer Naturwerksteinbrüche für die Denkmalpflege“) Gesteinsmaterial des Typs C1 entnommen, welches in der Bohrung nur zerklüftet vorhanden war. Das Gestein trat einerseits mit eisenoxidischen Zementationen (vgl. Bohrung GBo 3, 13,00 -14,10 m und Musterplatte Pettendorf 2) sowie Querschnitten von Wurmsspuren auf (Abb. 28 und 29). ENDLICHER (1984) bezeichnet diese Art von Grünsandsteinen im Steinbruch Pettendorf als „Pfalzler“ (sehr schwach glaukonitischer Sandkalkstein, klassifiziert nach FÜCHTBAUER & MÜLLER 1970). Mit dem Ausdruck „Pfalzler“ meint er also nicht die Steine mit den vereinzelt vorkommenden Wurmsspuren, wie oft behauptet wird (telef. Mitt. G. Endlicher 31.08.2017). Grünsandsteine mit Wurmsspuren (vgl. auch Abb. 30 und Abb. 31) wurden im Rahmen des DBU-Projekts (POSCHLOD et al. 2017) nur im Steinbruch Pettendorf gefunden. Nach Auskunft von Herrn W. Hoffmann, Gesellschafter der Fa. Kelheimer Naturstein GmbH & Co.KG, die den Steinbruch in Ihrlerstein bis ca. 1990 betrieben hat, kamen sehr selten in verbraunten Bereichen im dortigen Bruch auch Wurmsspuren vor. Weiterführende Literatur zu diesen kretazischen Wurmsspuren ist in WILMSEN & NIEBUHR (2014) zu finden.



Abb. 28: Musterplatte aus Regensburger Grünsandstein von Pettendorf (DBU Projekt P329-2).

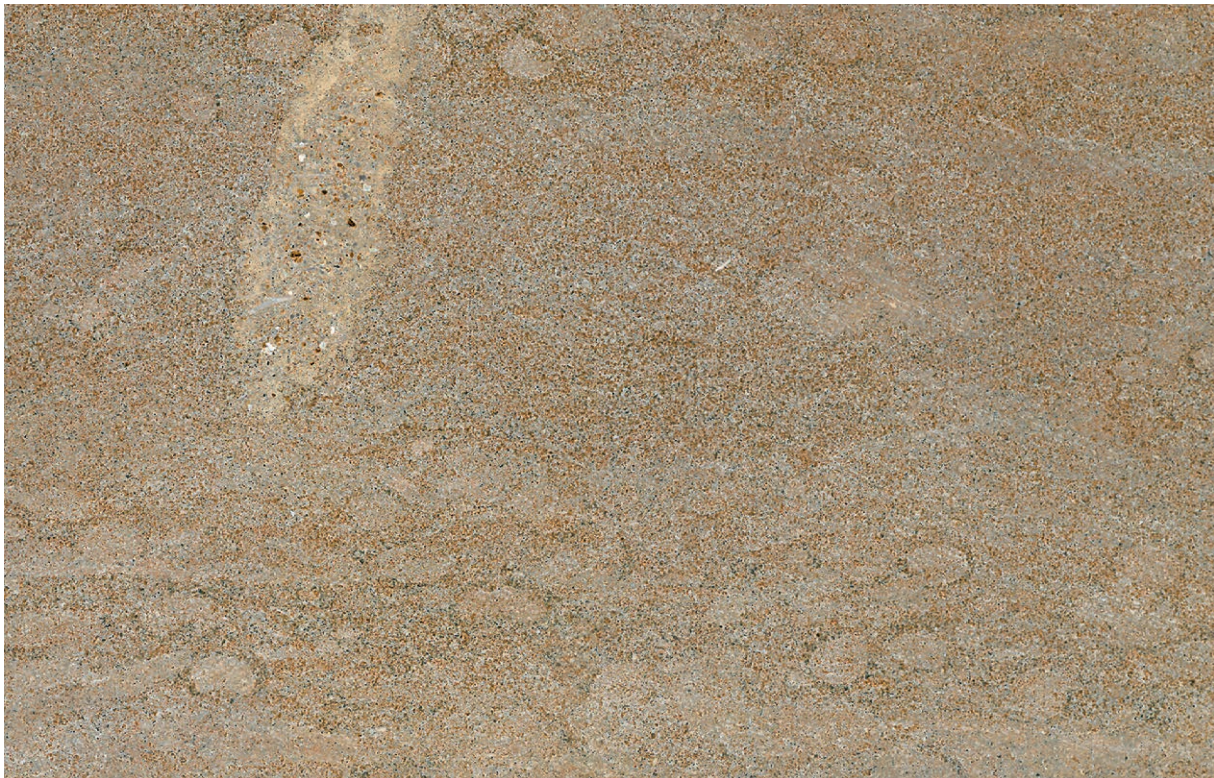


Abb. 29: Musterplatte aus Regensburger Grünsandstein von Pettendorf mit schwach erkennbaren Wurm Spuren im unteren Teil (DBU Projekt P329).



Abb. 30: Treppenstufe zur Kelheimer Befreiungshalle aus Grünsandstein mit Wurm Spuren im Längs- und Querschnitt.



Abb. 31: Mauerstein mit Wurmspuren, Stadtturm in Straubing.

Innerhalb der Bandbreite der Kennwerte für Bogen IX der Steinernen Brücke befindet sich der Typ C1 der Bohrung **GBo 6 bei Käfersdorf**. Die Mächtigkeit ist mit 1,6 m allerdings zu gering und nicht lohnenswert für einen Abbau. Bei einem Einzelfundpunkt im Umfeld der Bohrung wurde allerdings Regensburger Grünsandstein des Typs B2 angetroffen, welcher innerhalb der Bandbreite liegt und teilweise sogar bessere Werte als Bogen IX aufweist.

Ähnlich verhält es sich bei dem Typ B4 der Bohrung **GBo 9 bei Ganglhof**, welcher teilweise sehr gute Messwerte aufweist, aber mit einer Mächtigkeit von 1,9 m nicht abbauwürdig und, wie bereits erwähnt, farblich nicht zu favorisieren ist. Die Typen C1 und C2 sind nicht vorhanden.

Für eine aussagekräftigere Bewertung der vorgeschlagenen Abbau-Standorte und zur Absicherung der bisherigen Untersuchungsergebnisse sollten mindestens weitere 1 bis 2 Kernbohrungen im Bereich der künftigen Steinbruchareale niedergebracht werden.

8 Alternativen zur Neuanlage eines Steinbruchs

Die Grünsandstein-Blöcke des **Bauhofs Nord in Regensburg** umfassen eine nicht ausreichende Menge brauchbaren Materials. Die Sichtung ergab zudem, dass sich neben vielen Blöcken mit hervorragender Grünsandstein-Qualität einzelne Sandsteine befinden, die nicht als Regensburger Grünsandstein anzusprechen sind. Die Verwendbarkeit der geprüften Grünsandsteinblöcke ist allerdings grundsätzlich für den Einsatzzweck als Bogen- oder Mauerwerksstein geeignet.

Gelegentlich stehen Grünsandsteine zur Verfügung, die beim Abbau im **Kalksteinbruch bei Saal an der Donau** als „Abraum“ anfallen. Neben der Mächtigkeit der unterschiedlichen Grünsandsteinbänke variieren zudem die Ausbildung und Qualität sehr stark. Beispielsweise treten hier u. a. Grünsandstein-Blöcke mit Anhäufungen von Kieselknollen auf, wobei diese im Vergleich zur umgebenden Grünsandsteinmatrix aufgrund der unterschiedlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften vollkommen anders verwittern. Material aus diesem inhomogenen Vorkommen ist daher – wie bei den Restaurierungsarbeiten für die Münchener Residenz bereits geschehen – zur Sicherstellung seiner Eignung blockweise gesteinsphysikalischen Untersuchungen zu unterziehen.

Es ist außerdem darauf zu achten, dass dieser „Saaler“ Gesteinstyp (ähnlich Typ B4) komplett anders patiniert wie z. B. Material aus Ihrlenstein (wie es deutlich an der Fassade der Allerheiligen-Hofkirche an der Residenz zu sehen ist).



Abb. 32:
Fassade der Allerheiligen-Hofkirche in München nach dem Austausch einiger Mauersteine mit Saaler-Grünsandstein.

9 Zusammenfassung

Ziel des Projektes war die Suche nach Vorkommen mit ausreichenden Mächtigkeiten an Regensburger Grünsandstein in möglichst optimaler Werksteinqualität d.h. in einer Qualität, wie sie im Außenverbau bis dato verwendet wurde.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die stratigraphische Einheit „Regensburger Grünsandstein“ mehrere Gesteinsvarietäten aufweist. Im Rahmen der Untersuchungen wurden daher nicht ein Sandsteintyp, sondern eigentlich 7 verschiedene Gesteine untersucht, deren gesteinsphysikalische Eigenschaften sich voneinander oft deutlich unterscheiden.

Von den 7 Typen weist der Typ C1 die von den gesteinsphysikalischen Ergebnissen (Druckfestigkeit, Porosität und Kapillare Wasseraufnahme) her besten Eigenschaften auf, er enthält gegenüber Typ C2 jedoch oft weniger grünliche als eher graue Partien.

Wegen der ausgeprägten Grünfärbung wäre Typ C2 zu favorisieren, er erfüllt die gesteinsphysikalischen Anforderungen allerdings wegen seiner teilweise mürben Konsistenz in einigen Fällen nicht und kommt daher als Austauschmaterial vielfach nicht in Frage. Die zuweilen enge Verzahnung mit Typ C1 würde zudem eine selektive und damit kostenintensive Gewinnung erfordern. Die Verwendung von C1-, C2- und C1-C2-Übergangsmaterial, wie es z. B. bei der neuen Pinakothek zum Einsatz kam, erscheint daher als praktikabelste Lösung.

Mit Abstrichen sind auch die Typen B2 und B4 verwendbar. Typ B4 dürfte allerdings aufgrund seiner hellen und kaum grünlichen Färbung weniger geeignet sein. So hebt sich ein dem Typ B4 ähnliches und bei der Allerheiligenhof-Kirche in München verwendetes Austauschmaterial farblich deutlich von den im Restbestand verbliebenen, grünlichen C2-Bausteinen ab.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Typen C1 und C2 aufgrund ihrer gesteinsphysikalischen Eigenschaften und der passenden Farbgebung zu favorisieren sind. Die besten Übereinstimmungen mit den definierten Kennwerten des Bogens IX der Steinernen Brücke weisen die Gesteine bei Ihrlerstein auf. Die Untersuchungen belegen, dass der Regensburger Grünsandstein hinsichtlich geophysikalischer Parameter und Mächtigkeit in Haugenried, Kapfelberg, Arzweg und Eilsbrunn ebenso geeignet ist. Einige Steinblöcke vom Bauhof Regensburg können zur Restaurierung hinzugezogen werden, müssen allerdings selektiv ausgewählt werden, da nicht jeder beprobte Werkstein für jeden Teil der Brücke verwendet werden kann.

Dank

Für die Hilfe vor allem bei Laborarbeiten bedanken wir uns bei Herrn Robert Gilg, Frau Maria Glauche, Herrn Markus Kügler und Frau Renate Pfeiffer. Herr Gerhard Mandelsperger und Herr Armin Zwerger unterstützten uns bei Foto- und Grafikarbeiten. Dafür sei Ihnen an dieser Stelle herzlich gedankt.

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Steinerne Brücke in Regensburg.	5
Abb. 2:	Unterer Teil eines Bogens der Steinernen Brücke. Die auszutauschenden Blöcke sind mit roten Kreuzen markiert.	7
Abb. 3:	Lagernde Blöcke von Regensburger Grünsandstein am Bauhof Regensburg.	7
Abb. 4:	Verbreitungsgebiet des Regensburger Grünsandsteins. Lage der 1994/1995 durch das Bayerische Geologische Landesamt (GLA) und der in den Jahren 2008/2009 durch die Fa. TRACO extern beauftragten abgeteufte Erkundungsbohrungen. Lage ehemaliger Gewinnungsstellen (Kartengrundlage Geologische Übersichtskarte, Blatt CC 7134 Regensburg).	8
Abb. 5:	Ultraschallmessung.	10
Abb. 6:	Prüfzylinder nach Bruch.	10
Abb. 7:	Messergebnisse der Druckfestigkeit des Regensburger Grünsandsteins der Bohrung GBo 1c Ihrlerstein, Typ B2.	11
Abb. 8:	Standardprofil der Danubischen Kreide-Gruppe in der Umgebung von Regensburg.	14
Abb. 9:	Stratigraphische Einteilung der Oberkreide. Regensburger Grünsandstein findet sich als Ablagerung des oberen Cenomans.	15
Abb. 10:	Bohrung GBo 1c Ihrlerstein von 2008.	18
Abb. 11:	Bohrung GBo 1d Ihrlerstein von 2009.	18
Abb. 12:	Bohrung GBo 1e Ihrlerstein von 2009.	19
Abb. 13:	Bohrung GBo 2 Haugenried von 1994.	20
Abb. 14:	Bohrkern GBo 3 Neudorf von 1994.	21
Abb. 15:	Bohrkern GBo 5 N Kapfelberg von 1994.	22
Abb. 16:	Bohrkern GBo 6 Käfersdorf von 1995.	23
Abb. 17:	Bohrkern GBo 7 Arzweg von 1995.	24
Abb. 18:	Bohrkern GBo 8 Eilsbrunn von 1995.	25
Abb. 19:	Bohrkern GBo 9 Ganglhof von 1995.	26
Abb. 20:	Rohstoffpotentialfläche Haugenried; Abbauwürdige Fläche ca. 28,6 Hektar.	39
Abb. 21:	Rohstoffpotentialfläche Kapfelberg; Abbauwürdige Fläche ca. 24,3 Hektar.	40

Abb. 22: Musterplatte aus Regensburger Grünsandstein von einem aufgelassenen Steinbruch 1,2 km südwestlich Kapfelberg (DBU Projekt P438).	41
Abb. 23: Rohstoffpotentialfläche Arzweg (nur nördliche Fläche); Abbauwürdige Fläche ca. 47,3 Hektar.	42
Abb. 24: Rohstoffpotentialfläche Ihrlerstein; Abbauwürdige Fläche ca. 2,24 Hektar.	43
Abb. 25: Musterplatte aus Regensburger Grünsandstein von Ihrlerstein (DBU Projekt P406).	44
Abb. 26: Steinbruch Ihrlerstein.	45
Abb. 27: Rohstoffpotentialfläche Eilsbrunn (nur südliche Fläche); Abbauwürdige Fläche ca. 51 Hektar.	46
Abb. 28: Musterplatte aus Regensburger Grünsandstein von Pettendorf (DBU Projekt P329-2).	47
Abb. 29: Musterplatte aus Regensburger Grünsandstein von Pettendorf mit schwach erkennbaren Wurmsspuren im unteren Teil (DBU Projekt P329).	48
Abb. 30: Treppenstufe zur Kelheimer Befreiungshalle aus Grünsandstein mit Wurmsspuren im Längs- und Querschnitt.	48
Abb. 31: Mauerstein mit Wurmsspuren, Stadtturm in Straubing.	49
Abb. 32: Fassade der Allerheiligen-Hofkirche in München nach dem Austausch einiger Mauersteine mit Saaler-Grünsandstein.	50
Abb. 33: Bohrprofil GBo 1a	58
Abb. 34: Bohrprofil GBo 1b	59
Abb. 35: Bohrprofil GBo 1c. Durchgeführt durch Fa. TRACO als B 1.	60
Abb. 36: Bohrprofil GBo 1d. Durchgeführt durch Fa. TRACO als B 2.	61
Abb. 37: Bohrprofil GBo 1e. Durchgeführt durch Fa. TRACO als B 3.	62
Abb. 38: Bohrprofil GBo 1f. Durchgeführt durch Fa. TRACO als B 4.	63
Abb. 39: Bohrprofil GBo 2	64
Abb. 40: Bohrprofil GBo 3	65
Abb. 41: Bohrprofil GBo 4	66
Abb. 42: Bohrprofil GBo 5	67
Abb. 43: Bohrprofil GBo 6	68

Abb. 44: Bohrprofil GBo 7	69
Abb. 45: Bohrprofil GBo 8	70
Abb. 46: Bohrprofil GBo 9	71
Abb. 47: Bohrprofil GBo 10	72
Abb. 48: Bohrprofil GBo 11	73
Abb. 49: Bohrprofil GBo 12	74

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Übersicht der niedergebrachten Bohrungen im Erkundungsgebiet. RGS = Regensburger Grünsandstein.	9
Tab. 2:	Kategorisierung der Sandsteine durch LGA Nürnberg und BfB Karlsruhe.	12
Tab. 3:	Gegenüberstellung der Kategorisierungen.	13
Tab. 4:	Oberer Grünsandstein: Bad Abbach-Subformation.	15
Tab. 5:	Unterer Grünsandstein: Saal-Subformation.	16
Tab. 6:	Gesteinsphysikalische Eigenschaften des Bogens IX der Steinernen Brücke Regensburg	29
Tab. 7:	Vergleich der Schwankungsbreite der gesteinsphysikalischen Messwerte der untersuchten Proben der Grünsandsteinvarietäten Typ B2, B3, B4, C1 und C2 (Typ B3 ist hier nur von Proben des Bauhofs Regensburg, des Steinbruchs Saal und vom Einzelfundpunkt Eilsbrunn angegeben); w-Wert aus Kapillarer Wasseraufnahme; E_{dyn} = Dynamischer E-Modul aus Ultraschallmessung; US= Ultraschallgeschwindigkeit; n.b. = nicht bestimmt.	30
Tab. 8:	Durchschnittswerte der RFA Ergebnisse	33
Tab. 9:	Ergebnisse der XRD Messungen, Einteilung nach festgelegten Gesteinsvarietäten.	34
Tab. 10:	Ergebnisse der XRD Messungen von Aufschlüssen, die keinem genannten Gesteinstyp zugewiesen sind.	35
Tab. 11:	Vergleich der Mittelwerte der gesteinsphysikalischen Messungen der untersuchten Bohrkern-Proben und der Proben aus dem ehemaligen Steinbruch Ihrlerstein bezüglich der Grünsandsteinvarietäten Typ B2, B4, C1 und C2. Die knolligen Varietäten der Typen C1 und C2 sind nicht berücksichtigt. (w-Wert aus Kapillarer Wasseraufnahme; E_{dyn} = Dynamischer E-Modul aus Ultraschallmessung; n.b. = nicht bestimmt).	36
Tab. 12:	Vorschläge für mögliche neue Steinbruchstandorte mit Mächtigkeiten der verwertbaren Gesteinstypen und den Anteilen brauchbaren Materials anhand der zuvor geteufte Erkundungsbohrungen, sortiert nach MQ-Index.	38

Literatur

- BAUBERGER, W. & CRAMER, P. (1961): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1: 25 000, Blatt Nr. 6838 Regensstauf. – 220 S.; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- BAUBERGER, W., CRAMER, P. & TILLMANN, H. (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1: 25 000, Blatt Nr. 6938 Regensburg. – 414 S.; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- DIN EN 1925 (1999): Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung. – 6 S.; Berlin (Beuth).
- DIN EN 1926 (2007): Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit. – 17 S.; Berlin (Beuth).
- DIN EN 12371 (2010): Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes. – 14 S.; Berlin (Beuth).
- DOPPLER, G., FIEBIG, M., FREUDENBERGER, W., GLASER, S., MEYER, R., PÜRNER, T., ROHRMÜLLER, J., SCHWERD, K. (2004): GeoBavaria – 600 Millionen Jahre Bayern. – 100 S.; München (GLA).
- ENDLICHER, G. (1984): Petrographisch-Mineralogische Untersuchungen der Bausteine und Verwitterungskrusten des Regensburger Domes. Acta Albertina Ratisbonensia, 42: 53-80; Regensburg.
- FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G. (1970): Sedimentpetrologie, Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine,.- 726 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- KOHLER, E.E. (1980): Die Glaukonit- und Grünsandablagerungen in Nordwest- und Süddeutschland – Bemerkungen zu ihrer Entstehung und Bedeutung. Acta Albertina Ratisbonensia, 39: 59-80; Regensburg.
- NIEBUHR, B., PÜRNER, T. & WILMSEN, M. (2009): Lithostratigraphie der außeralpinen Kreide Bayerns. – In: Niebuhr, B. (2009) (Hrsg.): Litho- und Biostratigraphie der außeralpinen Kreide von Bayern. DGG, 65: 7-58, Stuttgart.
- POSCHLOD, K. (2008): Erkundung und Untersuchung von Regensburger Grünsandstein - Vorläufiger Bericht.- 11 S.; unveröffentl. Bericht, Augsburg (LfU).
- POSCHLOD, K. (2009): Erkundung und Untersuchung von Regensburger Grünsandstein – Kurzbericht zu den im Dez. 2008 und Jan. 2009 abgeteuften Bohrungen in der Umgebung des ehemaligen Steinbruchs Ihrlerstein.- 5 S.; unveröffentl. Bericht, Augsburg (LfU).
- POSCHLOD, K. & KÜGLER, M. (2013): NWS-Laborbericht 201303. 8 S.; unveröffentl. Bericht, Augsburg/Hof (LfU).
- POSCHLOD, K. & PFEIFFER, R. sowie BITTNER, S., KRUG, R., LEHRBERGER, G., SUTTERER, V. (2017): Erfassung historischer Naturwerksteinvorkommen als Grundlage für deren umweltverträgliche Reaktivierung zwecks Restaurierung national bedeutender Kulturgüter in Bayern. – 488 S.; DBU Bericht AZ. 31549/01-45, Augsburg (LfU).

- RUTTE, E. (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1: 25 000, Blatt Nr. 7037 Kelheim. – 243 S.; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- STREIT, R. (1984): Sandsteine der Oberkreide. *Geologica Bavarica* 86: 269-277; München.
- SWACZYNA, A. (2005): Die Steinerner Brücke in Regensburg – Abschlussbericht. – 38 S.; Regensburg.
- WILMSEN, M. & NIEBUHR, B. (2014): The rosetted trace fossil *Dactyloidites ottoi* (Geinitz, 1849) from the Cenomanian (Upper Cretaceous) of Saxony and Bavaria (Germany): ichnotaxonomic remarks and palaeoenvironmental implications. *Paläontol. Z.* 88:123–138; Heidelberg.

Anhang – Bohrprofile

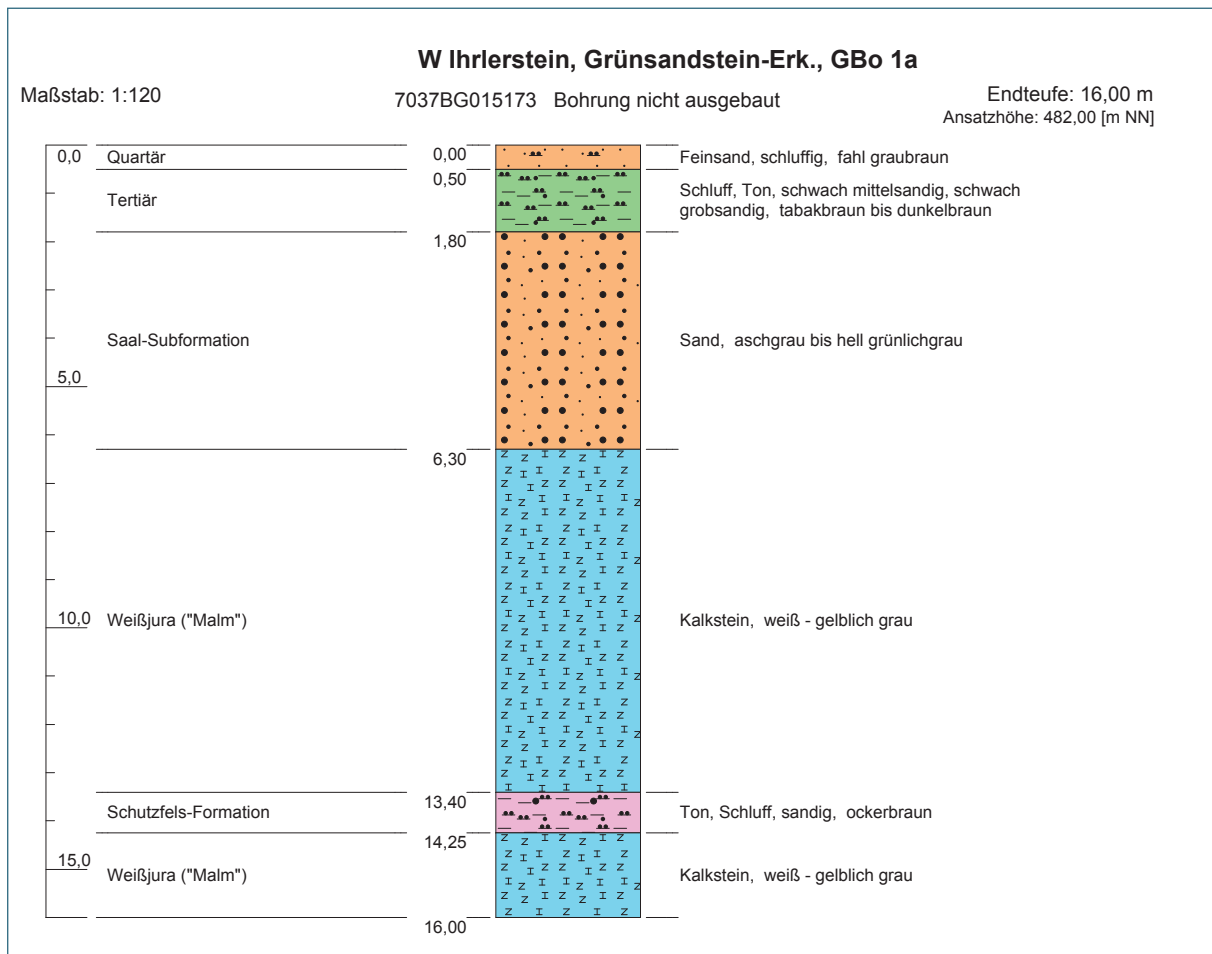


Abb. 33: Bohrprofil GBo 1a

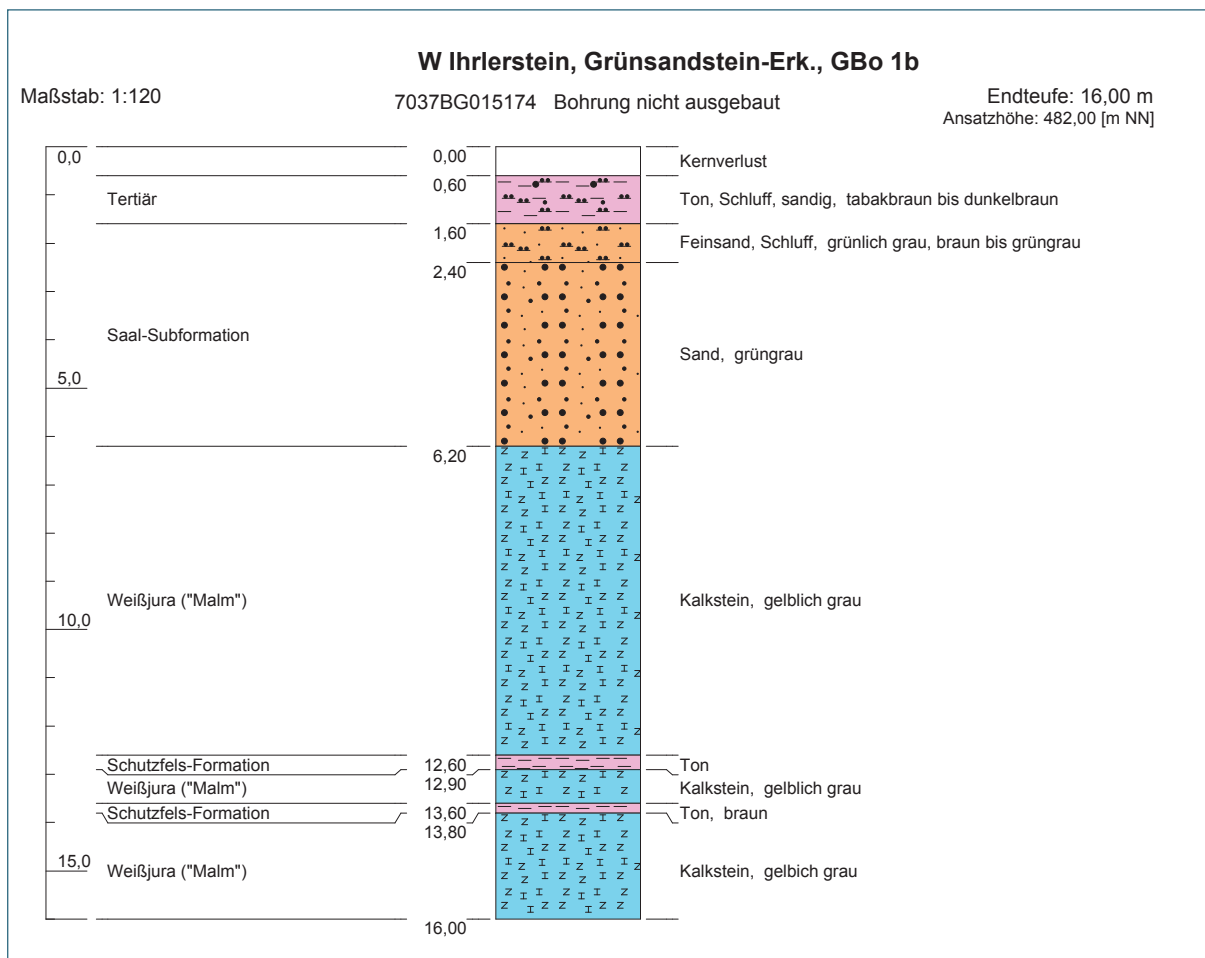


Abb. 34: Bohrprofil GBo 1b

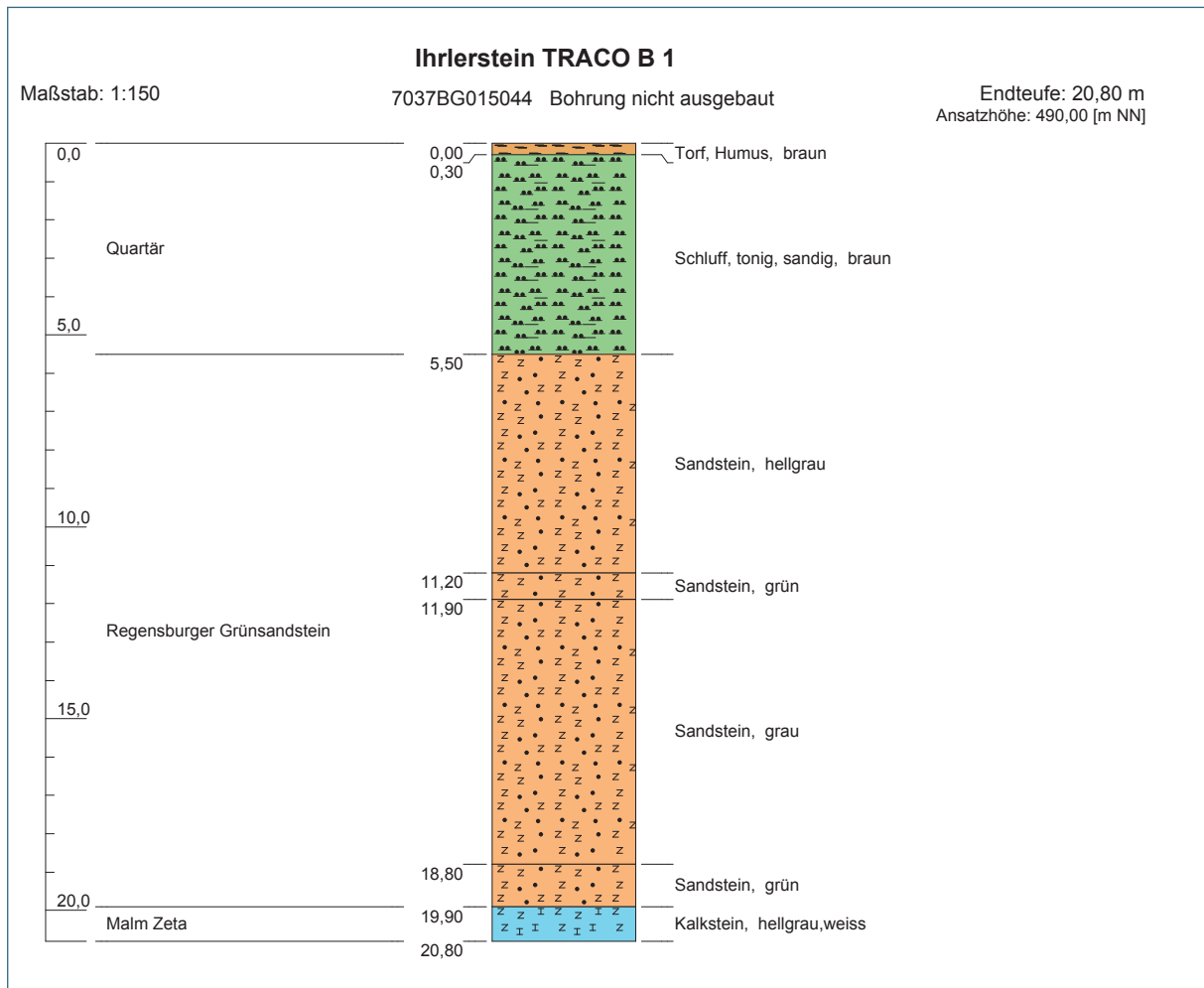


Abb. 35: Bohrprofil GBo 1c. Durchgeführt durch Fa. TRACO als B 1.

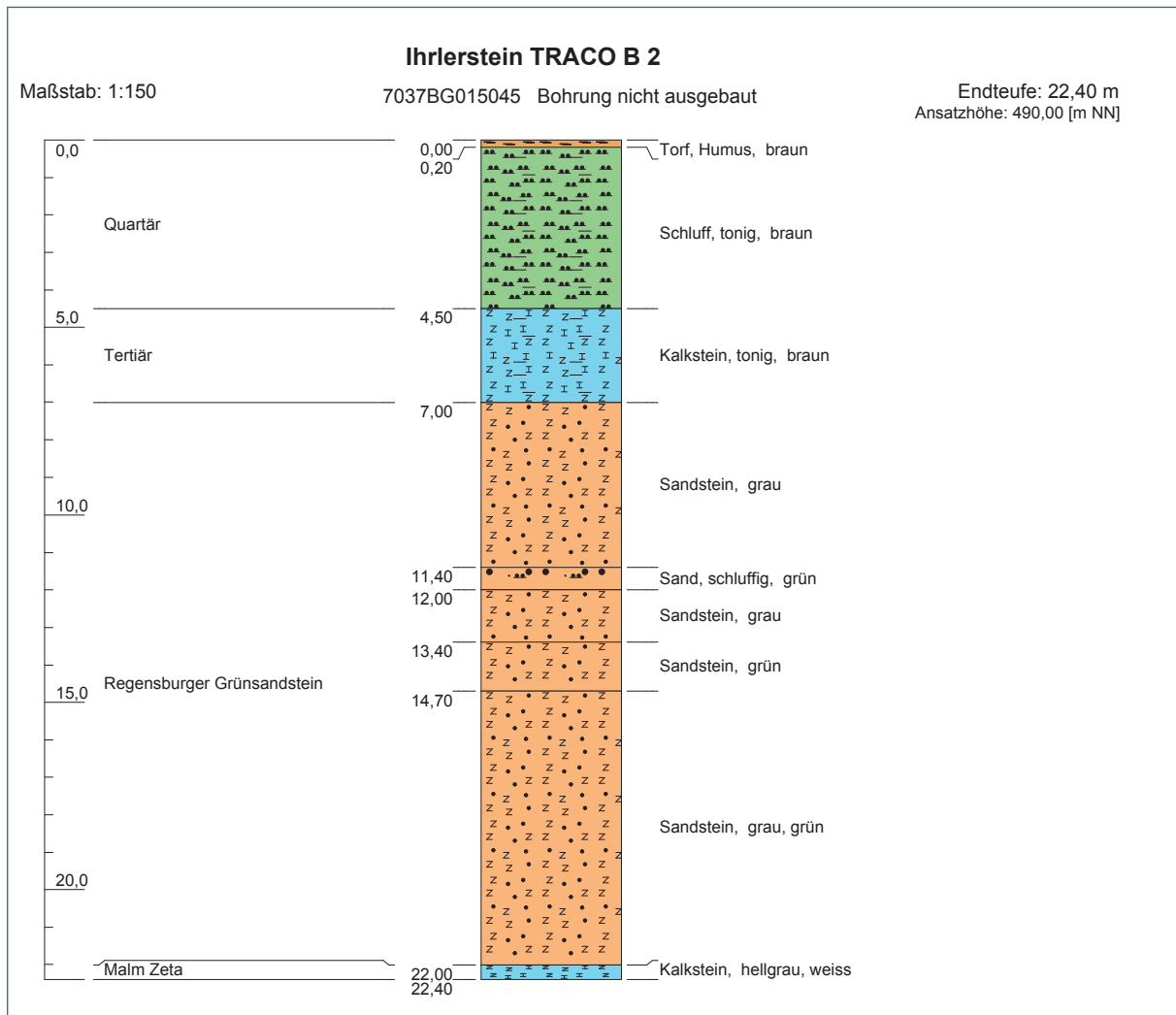


Abb. 36: Bohrprofil GBo 1d. Durchgeführt durch Fa. TRACO als B 2.

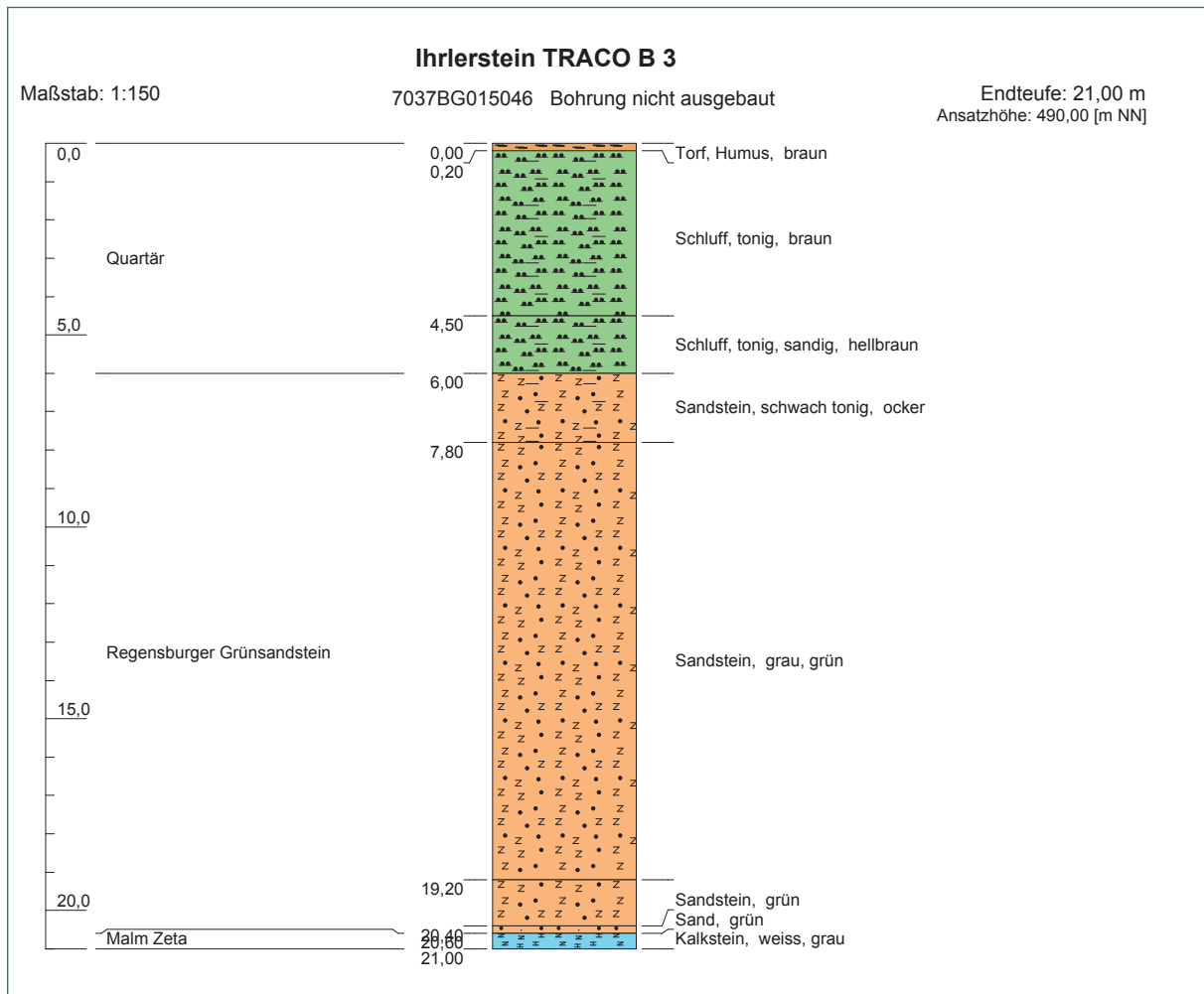


Abb. 37: Bohrprofil GBo 1e. Durchgeführt durch Fa. TRACO als B 3.

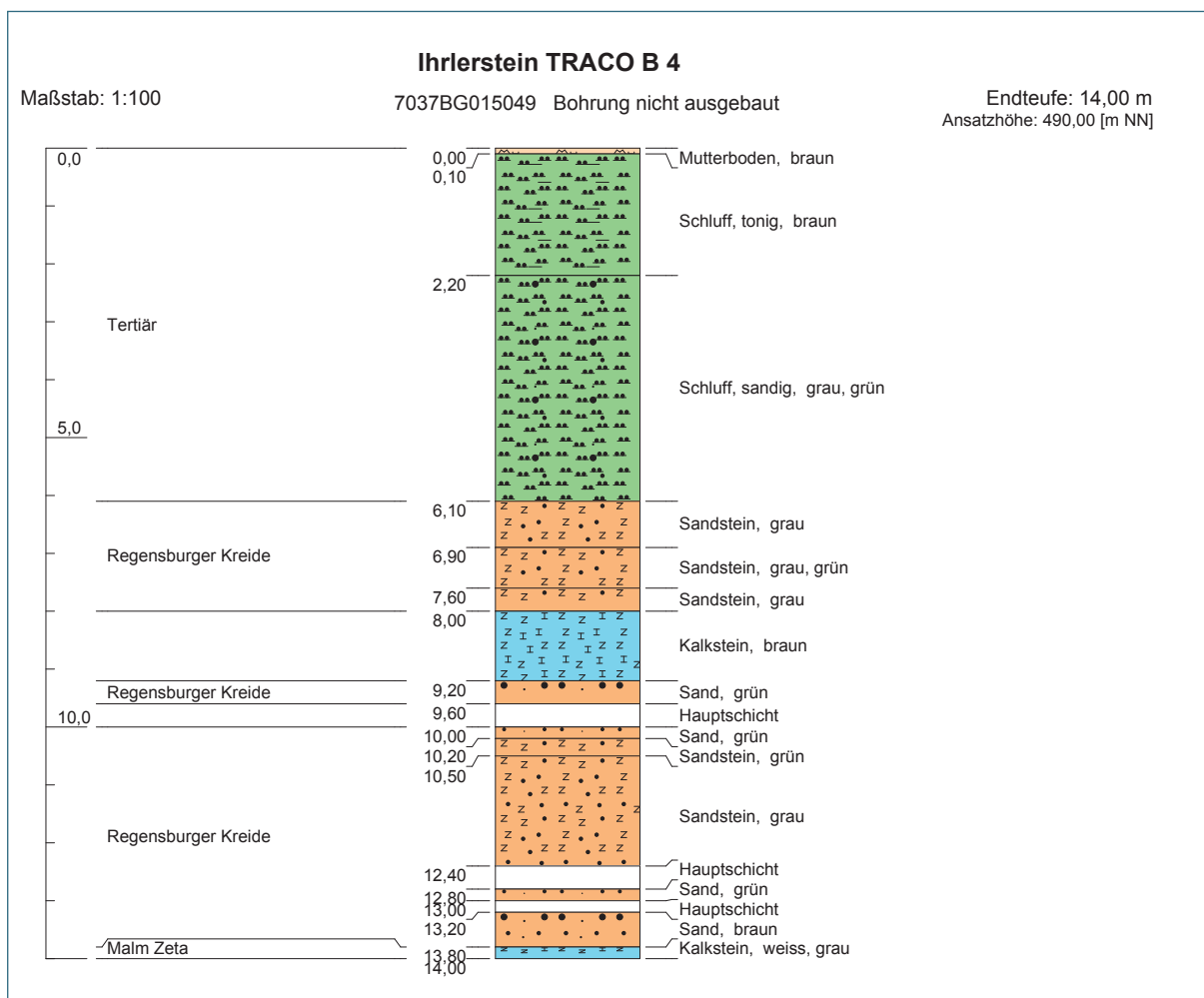


Abb. 38: Bohrprofil GBo 1f. Durchgeführt durch Fa. TRACO als B 4.

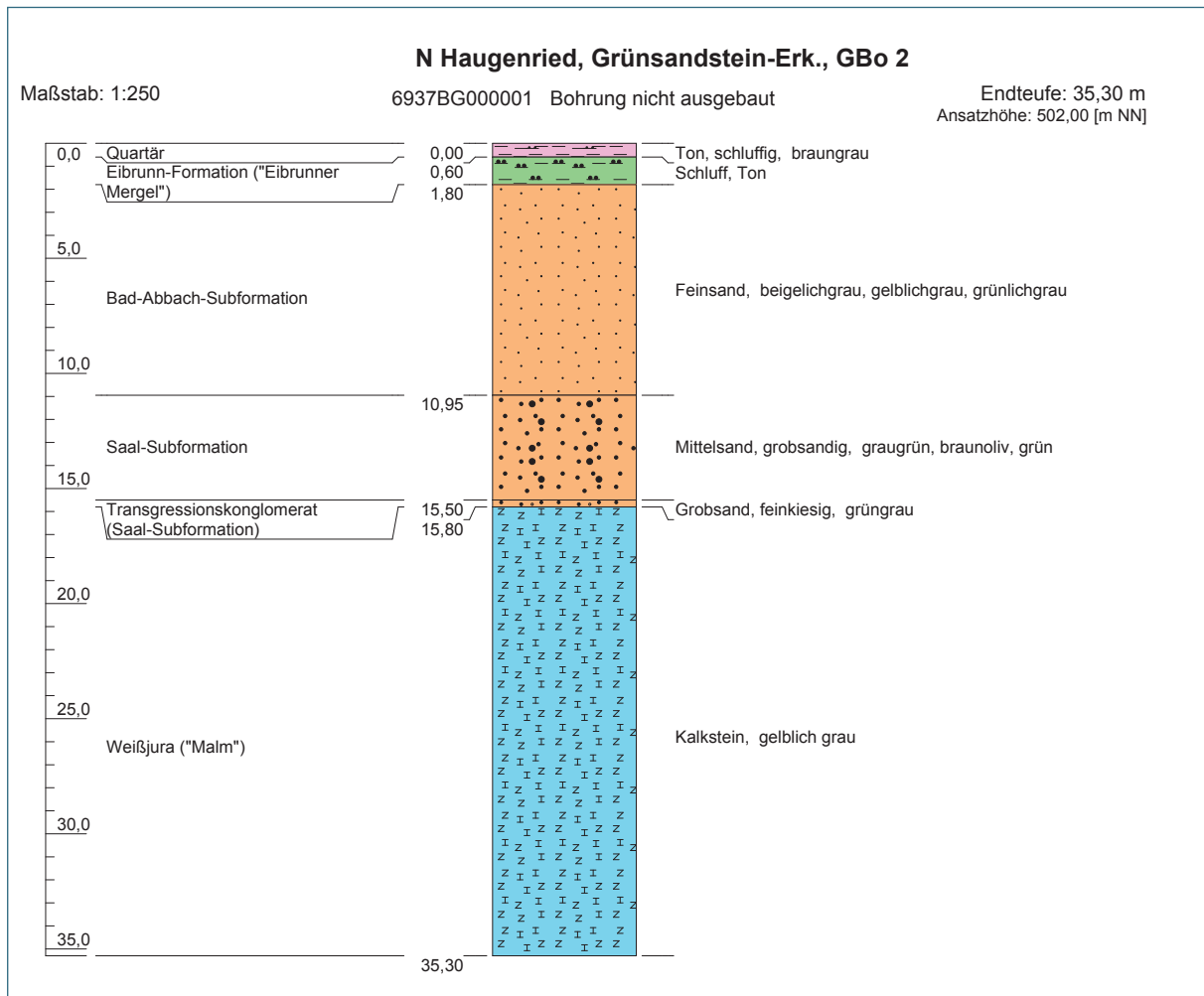


Abb. 39: Bohrprofil GBo 2

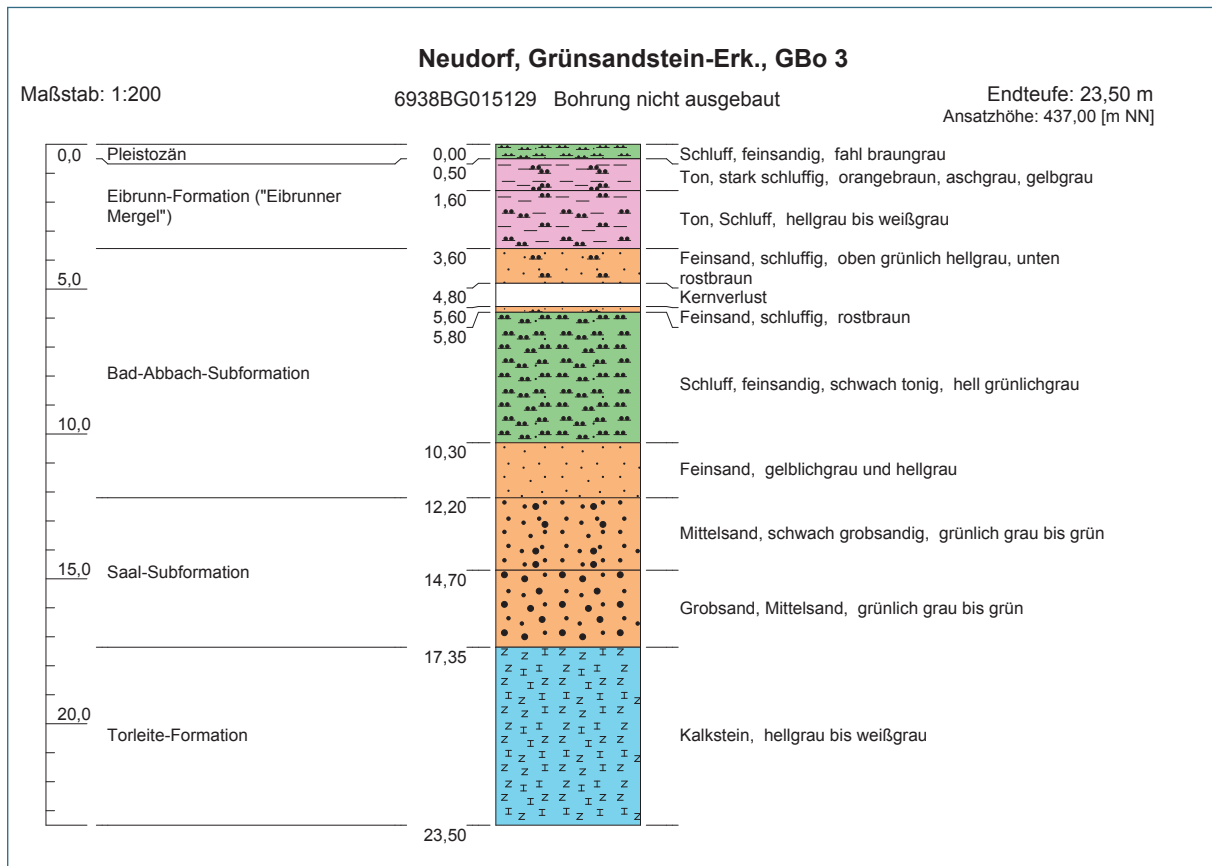


Abb. 40: Bohrprofil GBo 3

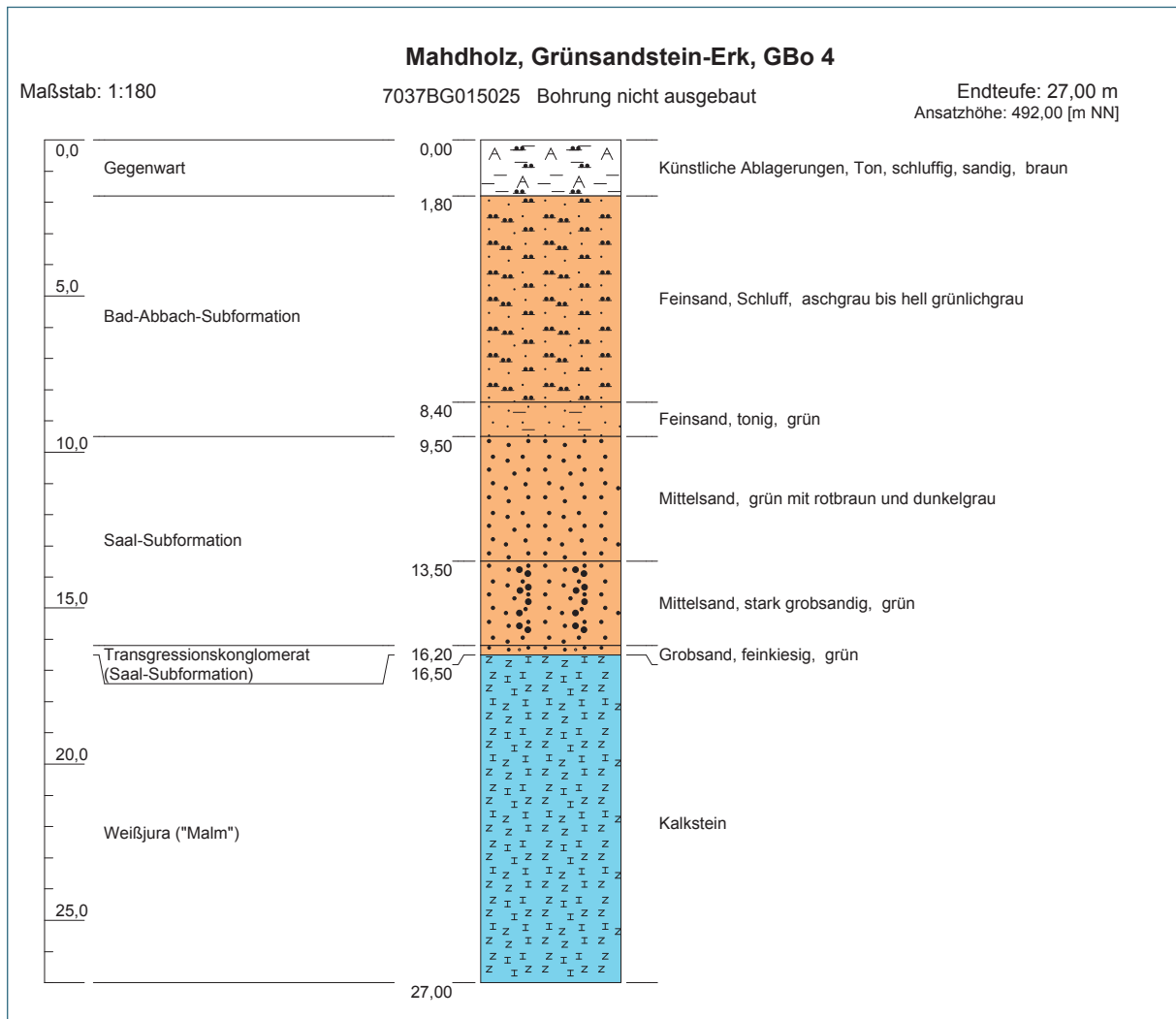


Abb. 41: Bohrprofil GBo 4

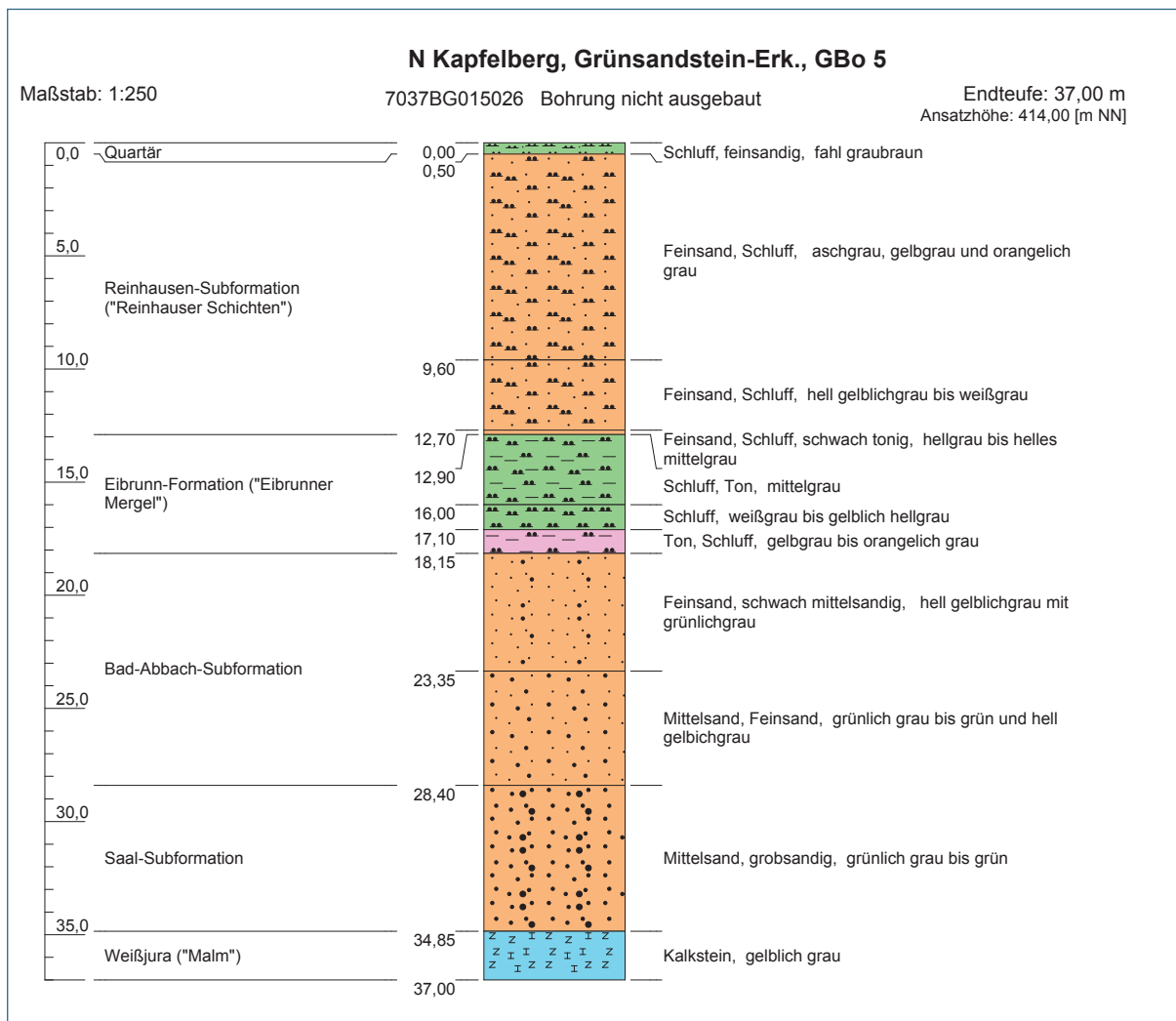


Abb. 42: Bohrprofil GBo 5

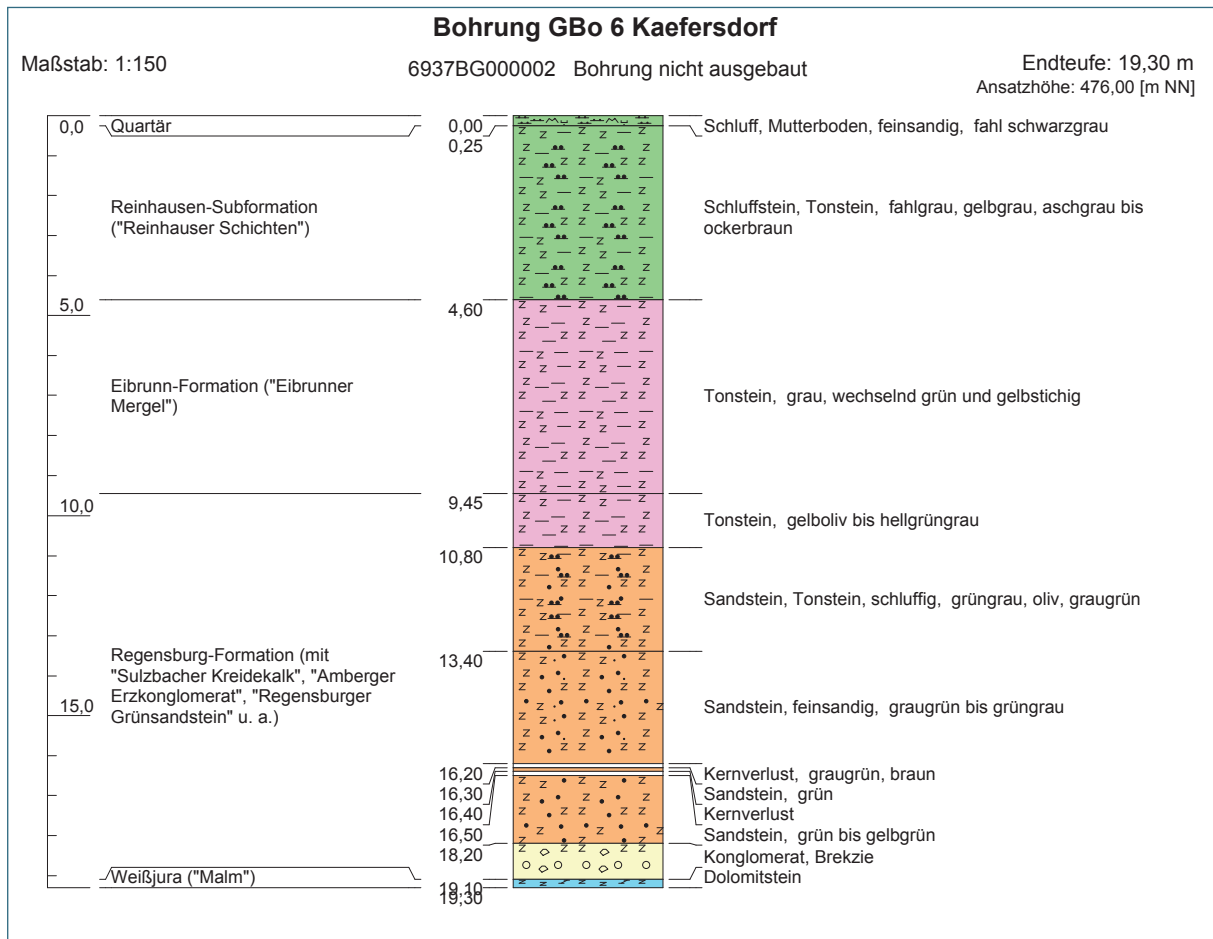


Abb. 43: Bohrprofil GBo 6

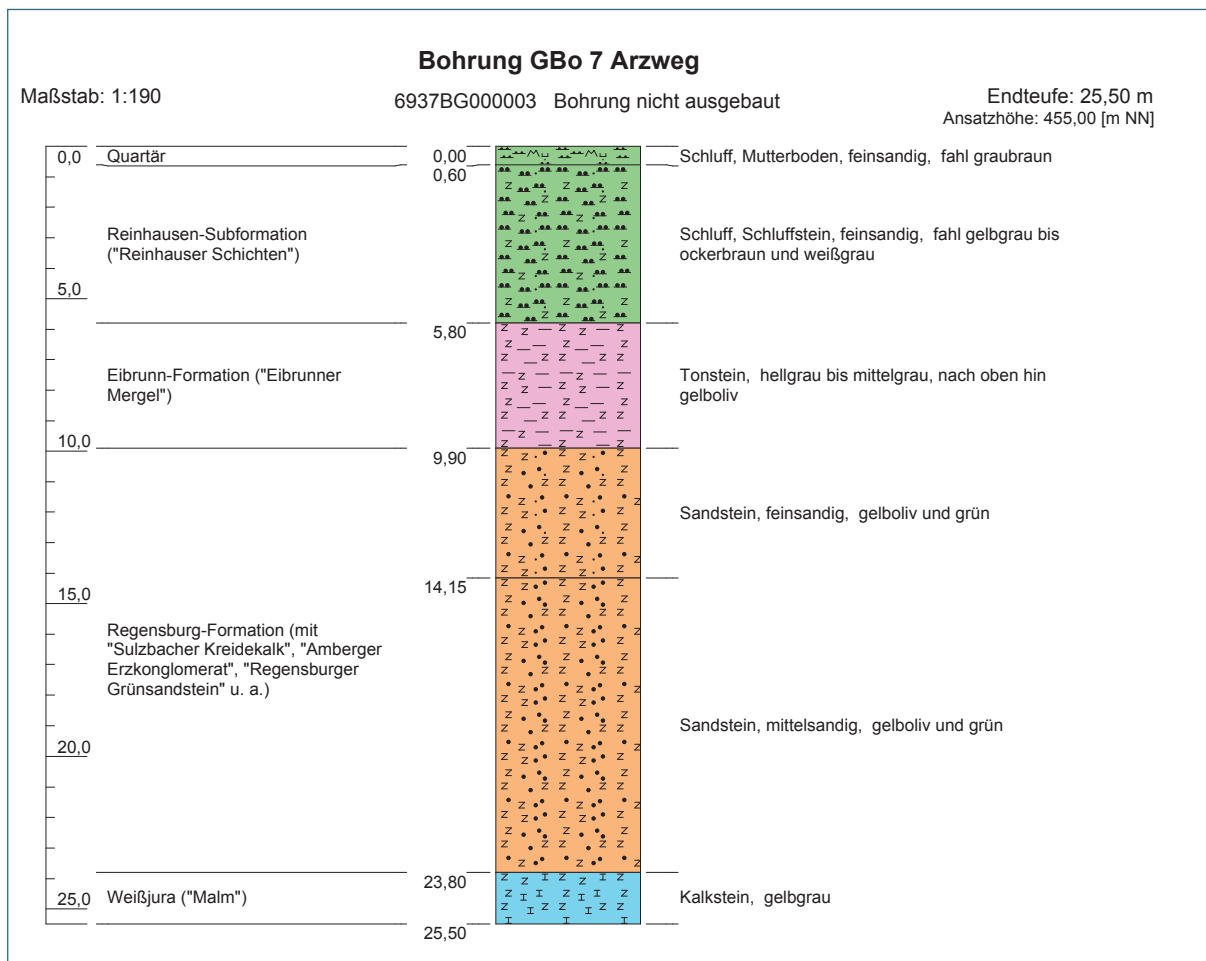


Abb. 44: Bohrprofil GBo 7

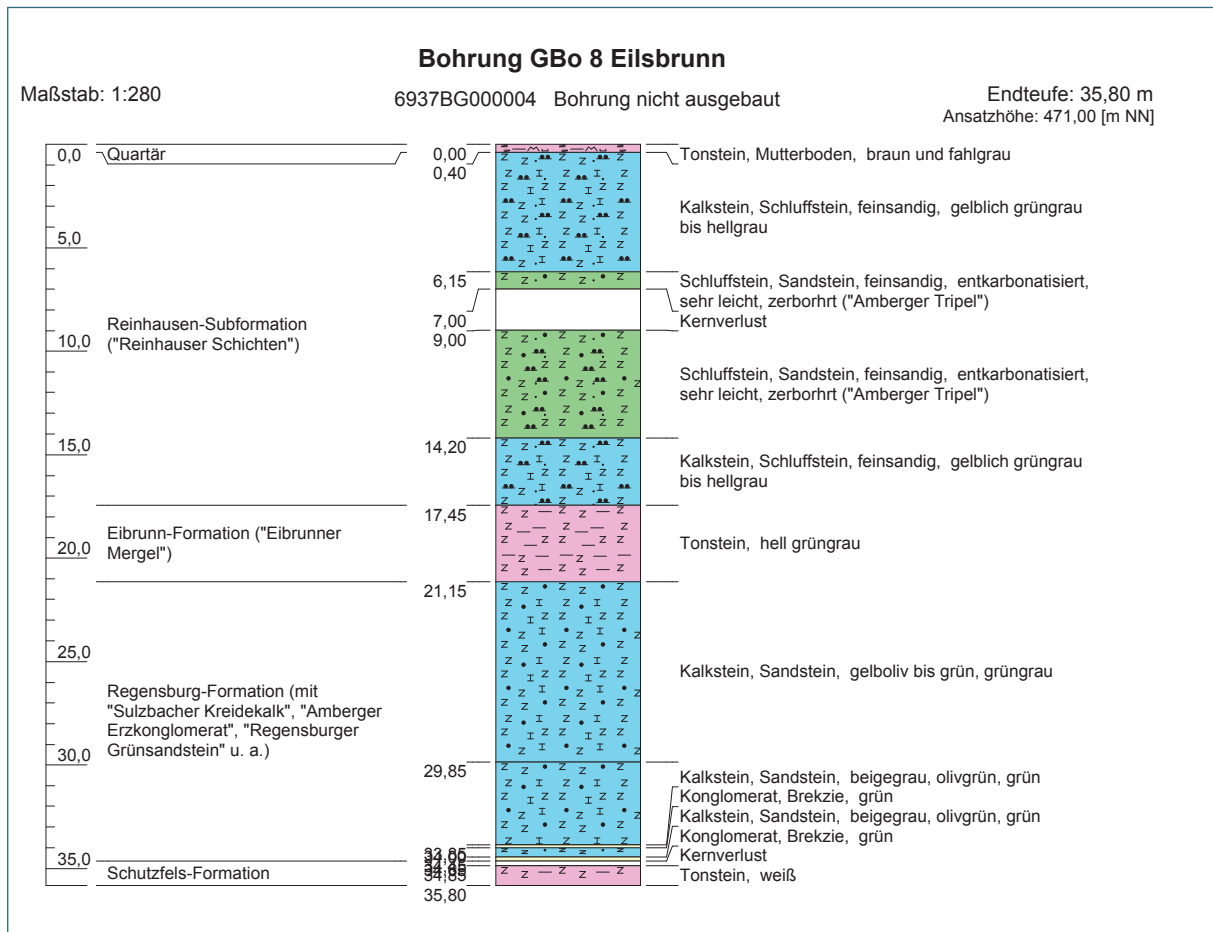


Abb. 45: Bohrprofil GBo 8

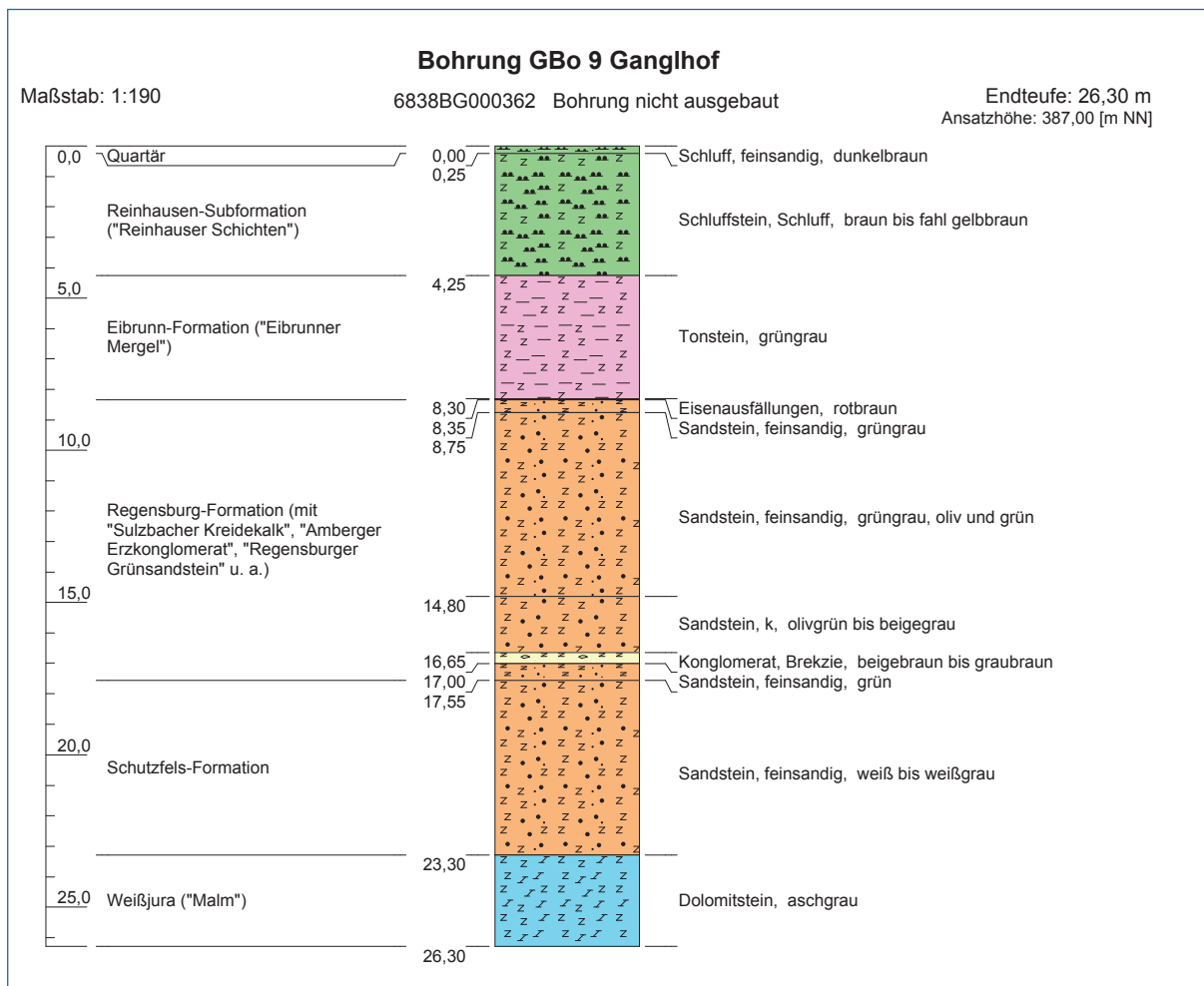


Abb. 46: Bohrprofil GBo 9

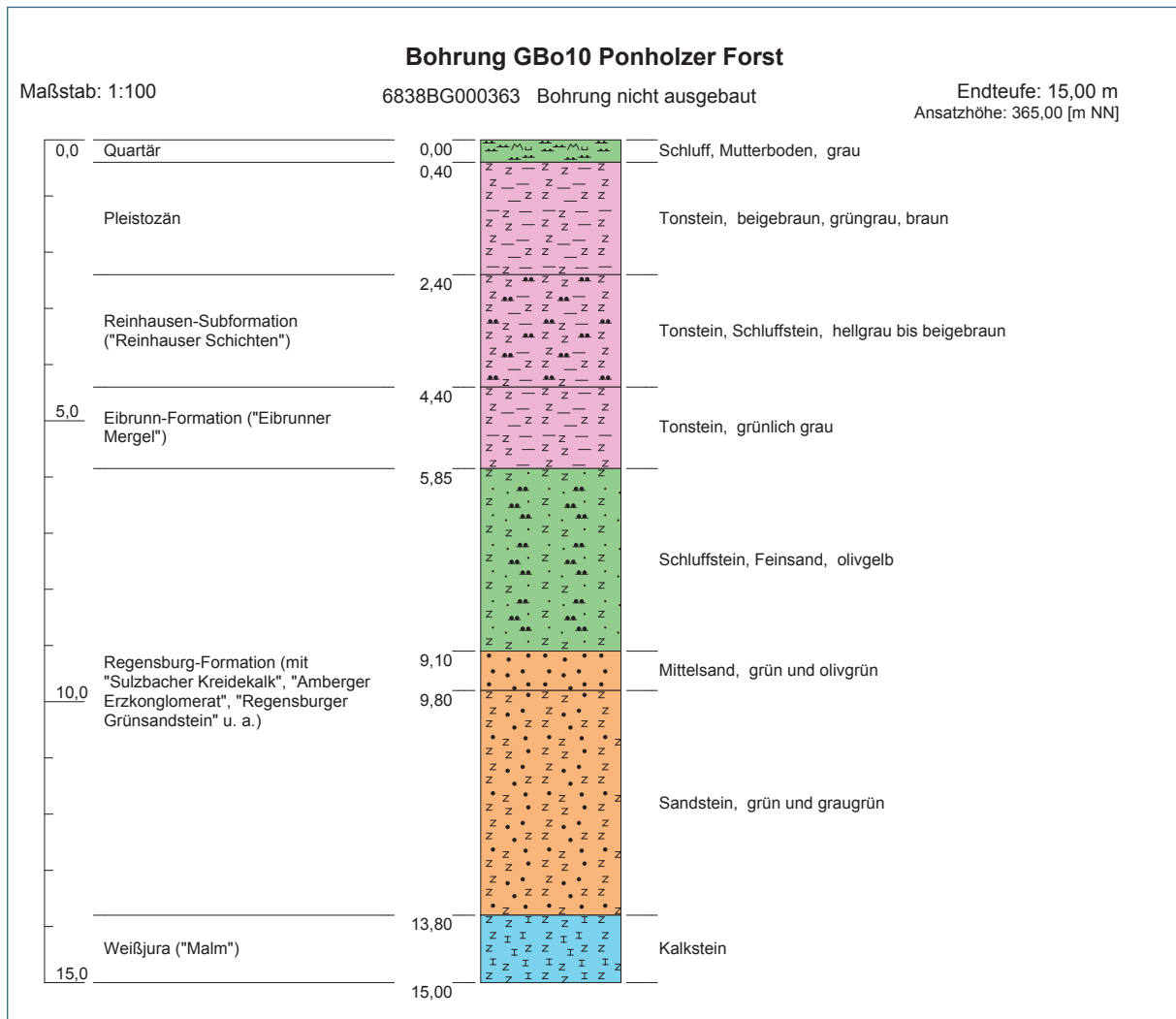


Abb. 47: Bohrprofil GBo 10

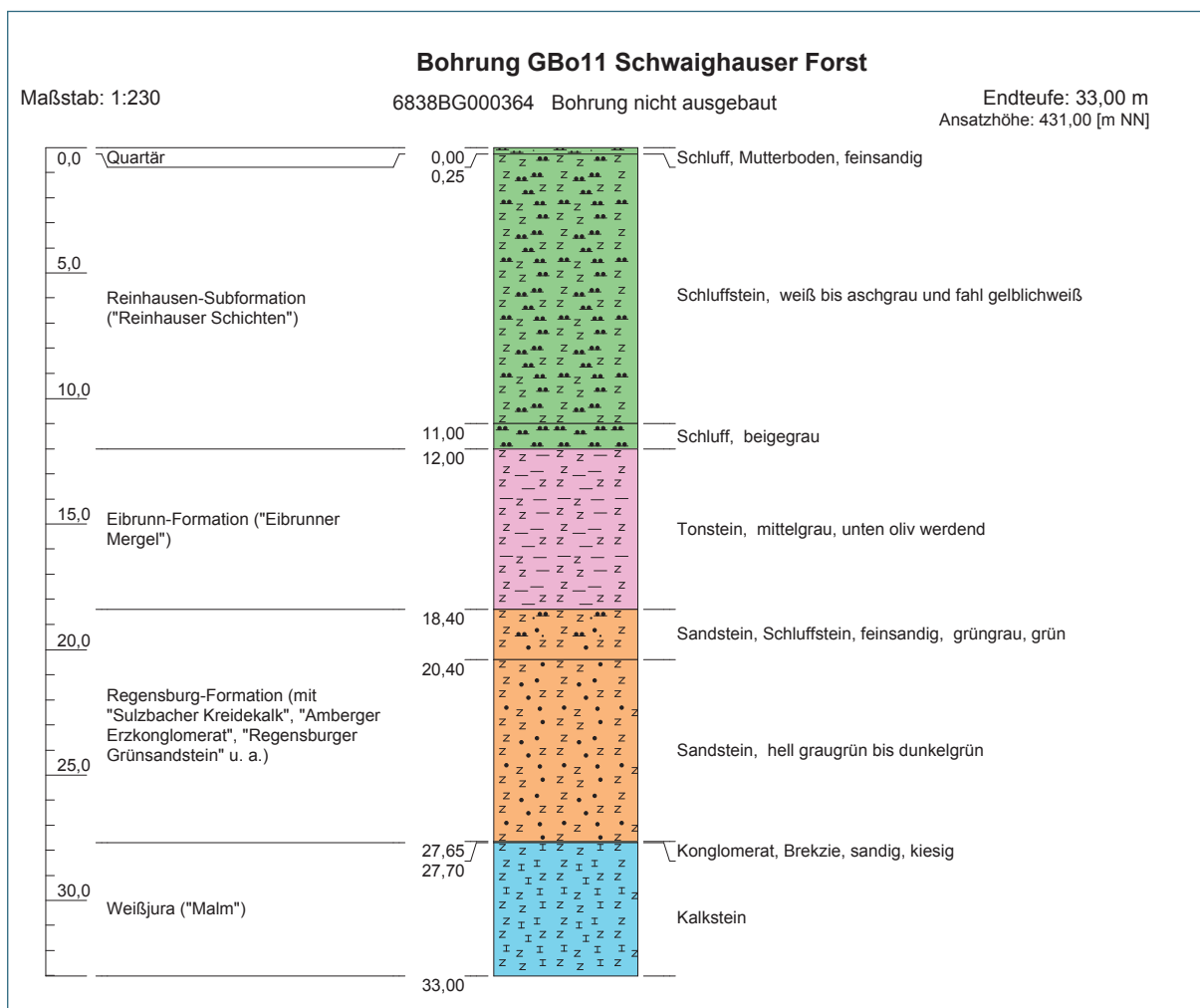


Abb. 48: Bohrprofil GBo 11

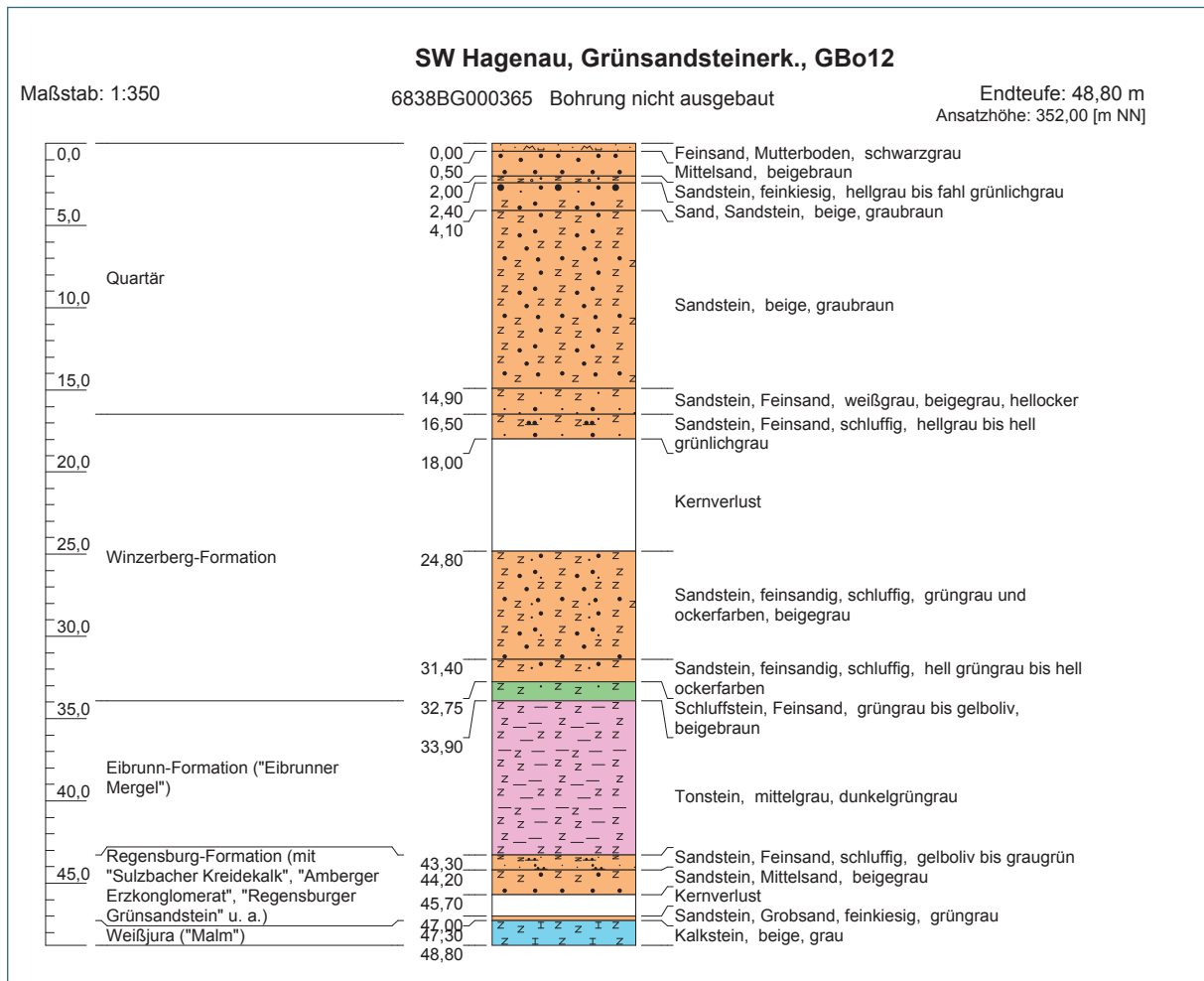


Abb. 49: Bohrprofil GBo 12

