



Kirchheimer Quaderkalk



geologie



Kirchheimer Quaderkalk

Naturwerkstein-Potenziale im Oberen Muschelkalk

Bearbeiter:
M. Miehlbradt, E. Linhardt, C. Eicke

107 Seiten, 59 Abbildungen, 30 Tabellen, Augsburg 2019

Impressum

Kirchheimer Quaderkalk, Naturwerkstein-Potenziale im Oberen Muschelkalk

Herausgeber:

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

Konzept/Text:

LfU, Referat 105: Martin Miehlsbradt, Elmar Linhardt, Corinna Eicke, Maria Guse, Hermann Weinig, Gerhard Mandelsperger

Bearbeitung:

LfU, Referat 105: Martin Miehlsbradt, Elmar Linhardt, Corinna Eicke

Bildrechte:

LfU

Stand:

August 2019

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbem 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 Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation 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	Zielsetzung	5
2	Sachstand	6
2.1	Projektanlass und Projektinhalt	6
2.2	Bisheriger Kenntnisstand	6
2.3	Geologie des Erkundungsgebiets	12
3	Durchgeführte Arbeiten	15
3.1	Bohrungen	15
3.2	Probenahme	15
3.3	Durchgeführte Laboruntersuchungen	15
3.4	Bewertung des Quaderkalks nach seinen gesteinsphysikalischen und lagerstättenkundlichen Eigenschaften	18
3.5	Erstellung eines 3D-Modells des Oberen Hauptquaderkalks	20
4	Ergebnisse	22
4.1	Auswertung der Kernbohrungen	22
4.1.1	Teilerkundungsgebiet I – Der Bereich nordöstlich von Kirchheim	23
4.1.2	Teilerkundungsgebiet II - Der Bereich östlich von Kirchheim	32
4.1.3	Teilerkundungsgebiet III - Der Bereich westlich von Kirchheim	39
4.1.4	Teilerkundungsgebiet IV - Der Bereich nördlich von Kirchheim	47
4.2	Detailbetrachtung der gesteinsphysikalischen Parameter	58
4.2.1	Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck und unter Vakuum, Porosität und Rein- und Rohdichte	58
4.2.2	Hygrische Dilatation	61
4.2.3	Ultraschall	63
4.2.4	Einaxiale Druckfestigkeit	64
4.2.5	Frostbeständigkeit	66
5	Auswertung	72
5.1	Bewertung der Rohstoffpotenziale	72
5.1.1	Teilerkundungsgebiet I	72
5.1.2	Teilerkundungsgebiet II	75
5.1.3	Teilerkundungsgebiet III	77
5.1.4	Teilerkundungsgebiet IV	79
5.2	Modellierung des Oberen Hauptquaderkalks	82
5.3	Der Gelbflaserkalk und seine Verwendbarkeit	86
6	Zusammenfassung	91
7	Ausblick	92
	Glossar	93
	Erklärungen zur Statistik	94

Verzeichnis der Abbildungen	95
Verzeichnis der Tabellen	98
Literaturverzeichnis	100
Anhang	105

1 Zielsetzung

Der Rohstoff Naturwerkstein spielt für die Bauindustrie eine wichtige Rolle und erfreut sich sowohl global, als auch national, einer wachsenden Nachfrage. Insbesondere seine Langlebigkeit und gute Ökobilanz sind ein häufiger Kaufgrund. Jedoch werden große Mengen der in Deutschland verbauten Naturwerksteine aus anderen Ländern importiert. Durch lange Transportwege verschlechtert sich die eigentlich gute Klimabilanz in Abhängigkeit der zu überwindenden Kilometer teilweise drastisch. So werden für den Transport von einer Tonne Gesteinsmaterial aus China insgesamt 265 kg CO₂ emittiert. Bei der Verwendung heimischer Naturwerksteine würde sich diese Menge auf 1/60 reduzieren (DEUTSCHER NATURWERKSTEINVERBAND 2010). Bei einem Gesamtvolumen von zwei Millionen Tonnen importiertem Gesteinsmaterial pro Jahr (Rohmaterial und Fertigware aus verschiedenen Ländern, MONTANI 2018) besitzt die Verwendung heimischer Naturwerksteine, neben Stärkung der lokalen und regionalen Wirtschaft, somit auch noch einen großen Klimaschutzfaktor.

Insbesondere Bayern verfügt über eine Reihe interessanter Naturwerksteine, die als Bau- und Werksteine deutschlandweit, teils sogar international nachgefragt werden. Hierzu zählt auch der sogenannte Quaderkalk, dessen Hauptabbaugebiet in Bayern im Raum südlich von Würzburg liegt. Eine Vielzahl prominenter Bauwerke älterer und jüngerer Zeit wurden aus diesem einzigartigen heimischen Gestein geschaffen. Beispielfhaft seien hier die Pfarrkirchen von Röttingen und Aub aus dem 12./13. Jahrhundert, das Rathaus in Marktbreit, als einer der bedeutendsten Profanbauten aus dem ausgehenden 16. Jahrhundert, sowie das, aus den 1930er Jahren stammende, Berliner Olympiastadion und das Pergamon-Museum auf der Berliner Museumsinsel erwähnt. Auch heute noch erfreut sich Quaderkalk einer enormen Beliebtheit und wird als hochwertiger Naturwerkstein verwendet (z. B. Fifa World Football Museum in Zürich oder U-Bahnhof Brandenburger Tor in Berlin).

Um langfristig sicherzustellen, dass der stetig steigende Bedarf an dem Rohstoff Quaderkalk gedeckt werden kann, wurde die vorliegende Untersuchung durchgeführt. Daneben spielte auch die Prüfung der grundsätzlichen sowie der speziellen technischen Verwendbarkeit von Quaderkalk als Naturwerkstein eine wichtige Rolle.

Als Ergebnis dieser Untersuchung sollte eine lagerstättenkundliche Prognose der räumlichen Verteilung bzw. Fortsetzung der Quaderkalkfazies im Oberen Muschelkalk in der Peripherie des aktuellen Abbauschwerpunktes in Kirchheim erstellt werden. Dabei ging es auch um die Frage lithologischer Änderungen dieses Gesteins im Verband, deren Umfang und der damit einhergehenden Veränderungen in der Gesteinsqualität. Schlussendlich sollte daraus die Festlegung möglicher Erweiterungs- bzw. Erschließungspotenziale von Abbaustellen dieses Naturwerksteins erarbeitet werden.

2 Sachstand

2.1 Projektanlass und Projektinhalt

Wegen der hohen wirtschaftlichen Bedeutung des Naturwerksteins im Kirchheimer Raum wurden mit Mitteln und im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi) rohstoffgeologische Untersuchungen im Randbereich des Abbaugebiets um Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn durchgeführt. Dazu wurden 16 Bohrungen in diesem Gebiet niedergebracht.

Nachfolgend wurden die Bohrkerne durch das Referat „Wirtschaftsgeologie, Bodenschätze“ am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) dokumentiert, beprobt, analysiert und ausgewertet.

Die rund 400 Proben wurden zunächst hinsichtlich gesteinsphysikalischer Parameter untersucht. Ein Augenmerk wurde dabei auf die Wasseraufnahmefähigkeit unter atmosphärischem Druck sowie unter Vakuum und der sich daraus ergebenden Parameter Sättigung, Porosität sowie Roh- und Reindichte gelegt. Weiterhin durchgeführte Versuche dienten der Bestimmung der hygrischen Dilatation, der Ultraschallgeschwindigkeit, der Verwitterungsbeständigkeit (Frost- und Tau-Wechselversuch) sowie der einaxialen Druckfestigkeit.

Lagerstättenkundliche Parameter, wie Verhältnis von Nutzschild- zu Abraum-Mächtigkeiten, Art und Ausbildung, Homogenität sowie Tiefenlage des Nutzhorizontes, wurden anschließend für die jeweiligen Bohrprofile bzw. für die abgeleiteten potenziellen Abbaureale behandelt und gemeinsam mit den analytischen Ergebnissen zusammenfassend für die Endbeurteilung dargestellt. Auf Grundlage dieser Datenerhebung konnte ein dreidimensionales geologisches Modell für die zukünftige Exploration auf rohstoffhoffige Gebiete erstellt werden.

Sämtliche raumbezogenen, stratigraphisch-petrografischen sowie gesteinsphysikalischen Daten der Untersuchungen wurden nach erfolgter Bemusterung, Beprobung und Analytik in das Bodeninformationssystem (BIS) des LfU eingepflegt.

2.2 Bisheriger Kenntnisstand

Die Quaderkalkvorkommen in Tauber- und Mainfranken sind schon seit vielen Jahrhunderten bekannt und wurden seit alters her in großem Umfang abgebaut. Dies führte dazu, dass im 30x30 km großen Bereich zwischen Würzburg und Bad Mergentheim die größte Aufschlussdichte Europas vorzufinden ist (PETROVIC & AIGNER 2017). Seit etwa 150 Jahren ist dieser Werkstein auch Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen (u. a. SANDBERGER 1867, REIS 1909, SCHUSTER 1936, GEISLER 1938, DREXLER 1964, EMMERT 1964, HOFFMANN 1967, AUST 1969, AIGNER 1979, HATZOLD 1981, GLA 1984, HAGDORN & SIMON 1985, BRAUN 2003, PALERMO et al. 2010, PETROVIC 2016, PETROVIC & AIGNER 2017, PETROVIC et al. 2018).

Der Quaderkalk stellt eine Sonderfazies in der Abfolge des Oberen Muschelkalks dar (Abb. 1, nach HOFFMANN 1967). Dabei handelt es sich um einen Schillkalkstein, der aus durch Kalkschlamm verkitteten Zweischalern besteht. Er besitzt eine dickbankige Erscheinung und kann, bedingt durch seine natürliche Klüftung, mit wenig Aufwand in großen Quadern gewonnen werden.

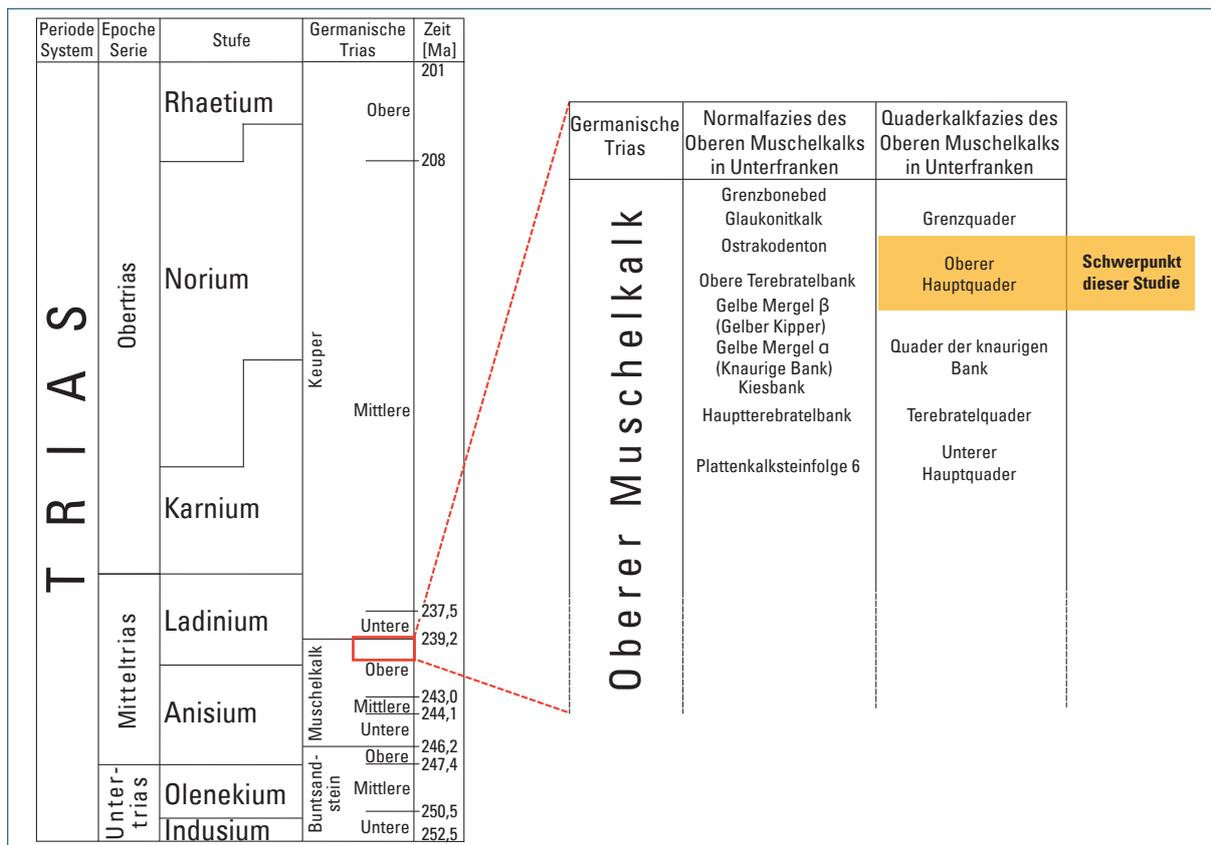


Abb. 1: Stratigraphische Abfolge der Germanischen Trias (DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION 2016) und des Oberen Muschelkalks in Unterfranken (verändert nach HOFFMANN 1967).

Da der Quaderkalk ausschließlich im Oberen Muschelkalk entwickelt ist, werden mittlerer und unterer Hauptmuschelkalk in dieser Studie nicht näher betrachtet. Die Normalfazies des Oberen Muschelkalk 3 (mo3) erreicht in Unterfranken Mächtigkeiten zwischen 28 und 35 m (HOFFMANN 1967). Jedoch setzt ab Mitte des mo3 die Entwicklung der Sonderfazies des Quaderkalks ein. Da Vergleiche von Profilen in Normalfazies und in Sonderausbildung eine Mächtigkeitszunahme im Bereich des Quaderkalks erkennen ließen, ging bereits HOFFMANN (1967) davon aus, dass nur ein geringer Teil der Quaderkalkfazies die Normalentwicklung ersetzt. Vielmehr handelt es sich wahrscheinlich um eingeschobene Lagen, die durch viele rasche Sedimentschübe im flachmarinen, küstennahen Bereich entstanden (GLA 1997, PALERMO et al. 2010). WAGNER (1913) bezeichnete diese, in das NW-SE-streichende Flachmeer hineinragende, Untiefe als „Gammesfelder Barre“. Charakterisiert war dieser Bereich durch eine geringe Wassertiefe zwischen 5 und 10 m, guten Lebensbedingungen und daraus resultierend einer hohen Produktion von biogenem Material. Durch Sturmereignisse und eine starke Strömung wurde das Schalenmaterial mehrfach aufgearbeitet und zu mächtigen Schill-Lagen akkumuliert. Die einsetzenden Meeresspiegelschwankungen führten zu einer Beschränkung oder zum Pausieren der Schill-Sedimentation während einer transgressiven Phase, wo hingegen bei einer regressiven Phase die Quaderkalkbildung zunahm (SIMON 1999). Im Gegensatz dazu steht die langsamere chemisch-organogene Bildung der normal-faziellen Kalksteinbänke in deutlich größeren Wassertiefen (HOFFMANN 1967). Dieser Umstand mag auch gleichzeitig die Mächtigkeitszunahme in der Quaderkalk-Fazies erklären. Durch eine mehrfache Verlagerung des Zentrums und der Ausdehnung des von der Gammesfelder Barre abgetrennten Flachmeeres stellt der Quaderkalk daher keinen einheitlichen Horizont dar (SIMON 1999).

Bevorzugt sind Quaderkalke in den folgenden stratigraphischen Bereichen zu finden (vergleiche Abb. 2, DREXLER 1964, HOFFMANN 1967):

- (1) Oberhalb des Ostracodontones: Grenzquader (Glaukonit-Quaderkalkstein)
- (2) Zwischen Ostracodonton und der Gelben Mergelunit (α bis γ): Oberer Hauptquaderhorizont
- (3) Unterhalb des Gelben Kippers: Quaderkalkstein der knaurigen Bank
- (4) Innerhalb der Hauptterebratelbank: Terebratelquader
- (5) Inmitten der Plattenkalksteinfohle 6: Unterer Hauptquaderhorizont.

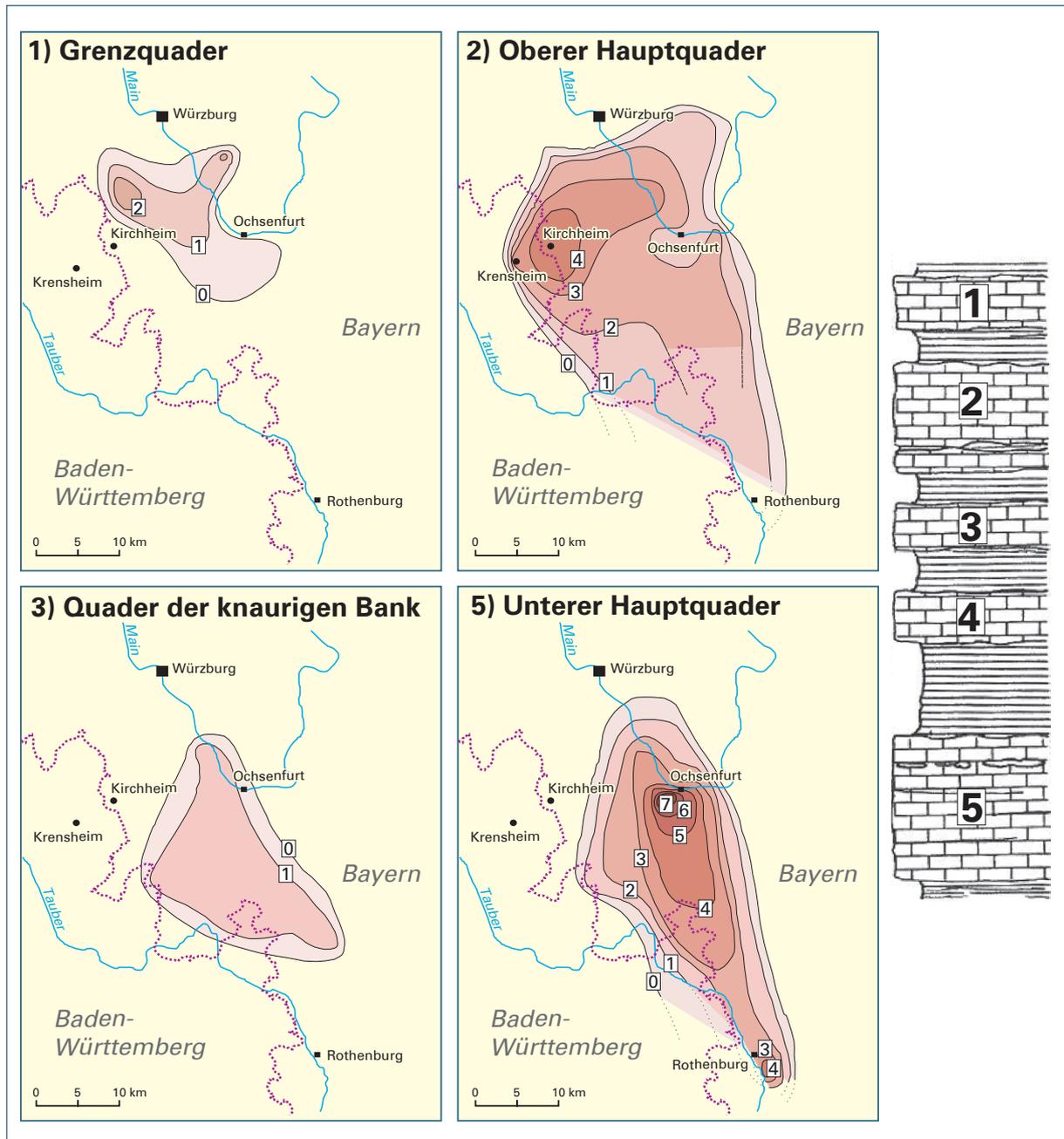


Abb. 2: Ausbreitung und Mächtigkeiten der unterschiedlichen Quaderkalkhorizonte (modifiziert nach GEYER 2002). (1) Grenzquader, (2) Oberer Hauptquader, (3) Quader der Knaurigen Bank, (4) Terebratelquader, bisher nur unzureichend auskartiert, (5) Unterer Hauptquader. Isopachenangaben sind in Meter (GRANER 1984) und das idealisierte Profil für den Raum Ochsenfurt stammt von AUST (1969).

Ablagerungsbedingt zeigen die Quaderkalle große Unterschiede im Erscheinungsbild. Historisch erwachsen sind daraus eine Vielzahl von Handelsnamen wie z. B. „Kuaker“, „Mooser“ oder „Sellenberger“ Quaderkalk aus dem Raum Kirchheim (Abb. 3 A bis D). Das Spektrum der „Varietäten“ ist groß. Es wird bedingt durch Unterschiede (u. a.) im Schillgehalt (von großmuschlig bis zum feinen, kaum mehr erkennbaren Bruch-Schill), in Farbe, Porosität, Porenfüllung (z. B. mit Limonit, wodurch eine gescheckte Optik entsteht) und weiteren Gefügemerkmalen (z. B. Schichtungen), die dazu führen können, dass einzelne Steinbrüche ihre eigenen und (mehr oder weniger) einzigartigen Varietäten besitzen (HATZOLD 1981). Je nach Oberflächenstruktur kommen sie mehr oder weniger deutlich zur Geltung.

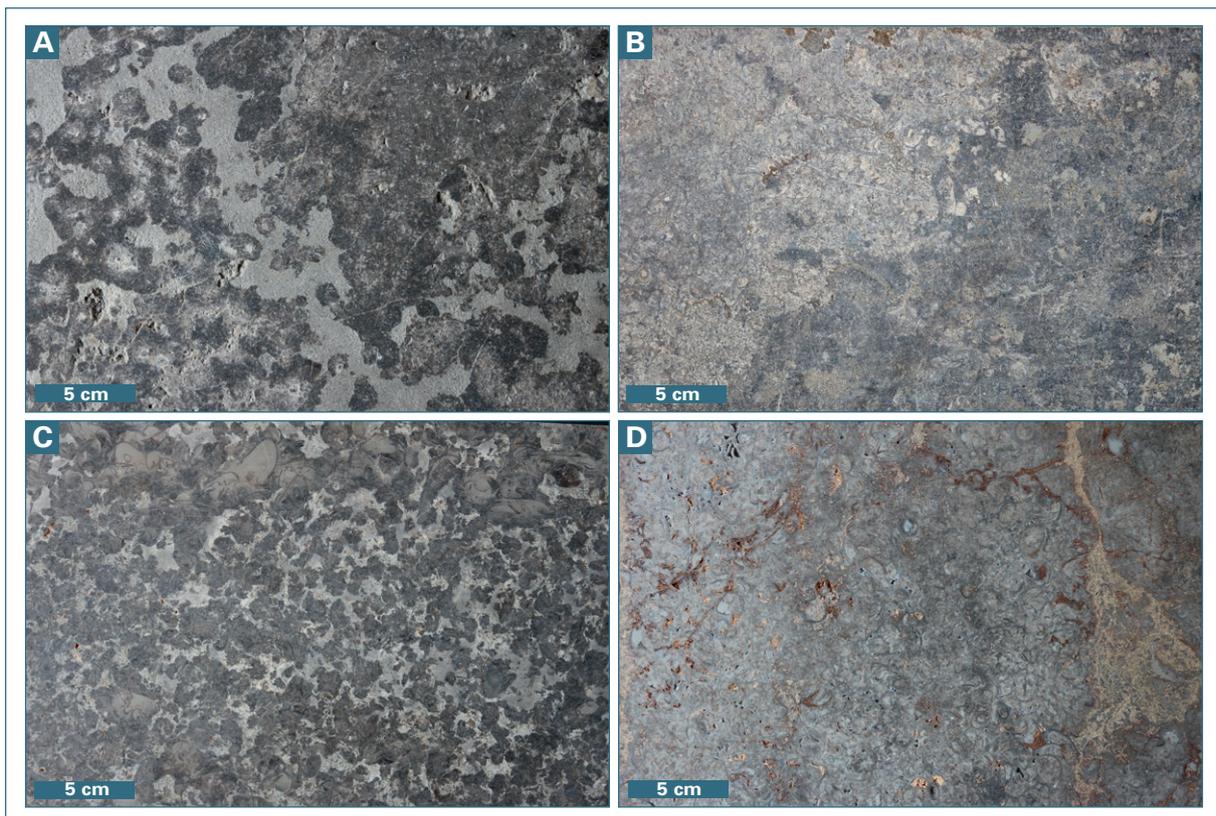


Abb. 3: Handelsübliche „Varietäten“ des Kirchheimer Quaderkalks (jeweils im Lager geschnitten). (A) Sellenberger, (B) Mooser; (C) Kuaker und (D) Kirchheimer Goldbank vom Kuaker.

In Anlehnung an die gesteinsmechanischen Eigenschaften und die petrografische Zusammensetzung des Oberen Hauptquaderhorizonts entwickelten die hiesigen „Steinbrecher“ eine eigene Klassifikation für den Quaderkalk, die das Auftreten, Farbe und Textur, aber auch gesteinsmechanische Eigenschaften widerspiegelt. Die Gruppen waren im Wesentlichen mit Trivialnamen (z. B. „Schale“) betitelt. Später wurden die Bezeichnungen als „Steinhauer Klassifikation“ bekannt (DEUTSCHE STEINBRUCHKARTEI 1938). Diese Systematik wurde von DREXLER (1964) und GLA (1984) aufgegriffen und in wissenschaftlicher Form modifiziert.

Basierend auf Eigenschaften wie dem Auftreten von Schichtfugen, Vertikalklüften, Porosität, dem Verhältnis von Schill und Bruch-Schill zu kalkiger Füllmasse oder der Farbe, wurde die Abfolge der Quaderkalle lose in sechs Klassen eingeteilt (Tab. 1, DREXLER 1964, GLA 1984).

Etwas Verwirrung herrscht bei der Definition der Goldbank vor. So beschrieb DREXLER (1964) diese Einheit als Schillkalk, der von tonigen, gelbbraunen Konkretionen durchsetzt ist. GLA (1984) hingegen definierte die Goldbank als eine Blaubank, die durch oxidative Umwandlung der kalkigen Matrix, stellenweise eine ockerfarbene Tönung angenommen hat. Allgemein ist jedoch festzustellen, dass der Quaderkalk, bedingt durch seine Entstehung als Tempestit mit einer sehr großen Spannweite an unterschiedlichen Gesteinsvarietäten aufwarten kann.

Tab. 1: Steinbrecher Klassifikation der Quaderkalke des Oberen Hauptquaderhorizontes (DREXLER 1964, GLA 1984).

Steinhauer-Bezeichnung	Petrografische Bezeichnung	Ausbildung / äußere Merkmale	Eigenschaften	Verwendung
Zugbank	Kalkstein/ Schillkalk	Blau, Grau, dicht	Mächtigkeit meist <1 m, i.d.R. ohne Werksteinqualität	GaLa-Bau, z. B. für Stützmauern, Wasserüberläufe oder als Störsteine verwendet
Oberbank	Schillkalk	Ähnlich Kernstein (s. u.)	Abhebende Schichtfugen, engständige Vertikal-Klüftung, deswegen trotz guter petrographischer Ausbildung i.d.R. ohne Werksteinqualität	Material sowohl für den Außen- als auch für den Innenausbau geeignet, jedoch aufgrund der meist geringen Blockgrößen nur für kleindimensionierte Verwendungszwecke geeignet z. B. Mauer oder Pflastersteine
Kernstein	Schillkalk	Blau, Grau, schwach rötlich, porös; wechsel-lagig aus Grob-schalenlagen und feinen, zerriebenen Schalenstücken aufgebaut	Fester, großquadriger, idealer Werkstein („kernig“)	Material sowohl für den Außen- als auch für den Innenausbau geeignet und je nach Blockgröße für alle Verwendungszwecke nutzbar z. B. Skulpturen, Treppenstufen, Fassadenplatten oder Bodenbeläge
Rotbank	Schillkalk	Rostrot, porös, Porenraum mit limonitischem Überzug	Entspricht Kernstein, mit rost- bis ockerfarbenen Zwischenfüllungen	Material sowohl für den Außen- als auch für den Innenausbau geeignet, Verwendungszwecke ähnlich Kernstein
Blaubank	Schillkalk	Blau, Grau, sehr dicht	Bruch-Schill untergeordnet, kalkige Füllmasse überwiegend; im Liegenden teilweise auch „schalig“ (Schicht- und Klufflächen vermehrt) ausgebildet: „Schale“	Material nur bedingt frostbeständig und eher für den Innenausbau geeignet z. B. für Bodenplatten, Treppenstufen, Fensterbänke
Goldbank	Schillkalk	Blau, Schill mit gelbem Sparit gefüllt, sehr dicht	Entspricht Blaubank, bei der die kalkige Matrix oxidativ von den Außenflächen her teilweise oder durchgehend umgewandelt ist	Material nur bedingt frostbeständig und eher für den Innenausbau geeignet, Verwendungszwecke ähnlich Blaubank

Nach GLA (1984) wird der Obere Hauptquaderhorizont im Kirchheimer Bereich bis maximal 6 m mächtig, bei einer mittleren Mächtigkeit von 4 Metern. Dabei kann es vorkommen, dass sich die „Gesteinsvarietäten“ gegenseitig vertreten, in wechselnder Reihenfolge auftreten, oder einzelne Einheiten z. T. komplett fehlen (Abb. 4 und Abb. 5). Grundsätzlich lässt sich diese Einteilung auch auf weitere Gebiete anwenden (z. B. das Gebiet beidseits des Maintales zwischen den Städten Marktbreit und Randersacker). Jedoch ist in diesen Bereichen eine derartige Bankfolge wesentlich seltener ausgebildet (GLA 1984).

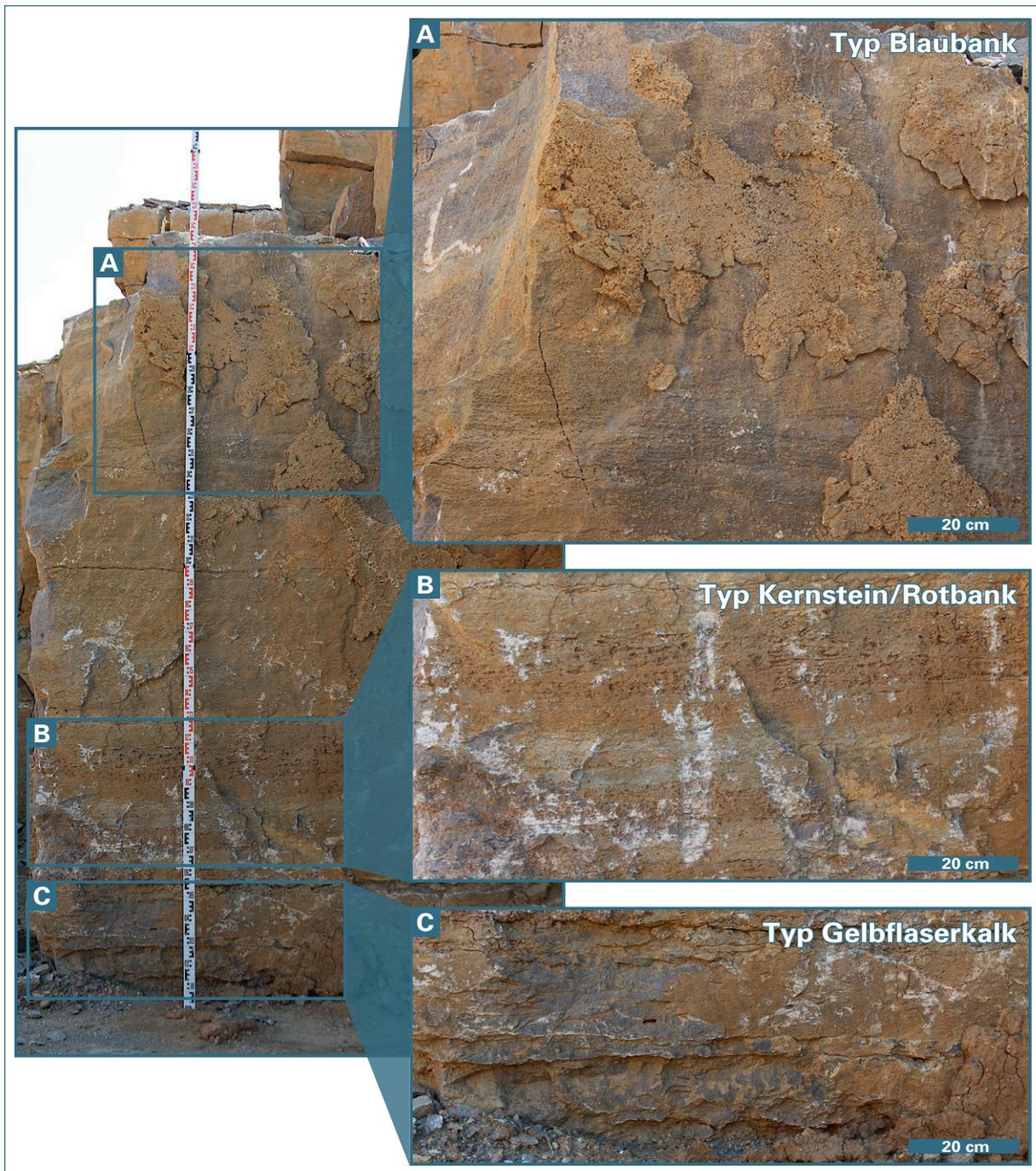


Abb. 4: Quaderkalk-Profil aus dem Sellenberger Abbaugelände. Typischerweise lassen sich die einzelnen Varietäten im Steinbruch nur erahnen und entfalten erst im geschnittenen Zustand ihre volle optische Wirkung. Die sich meist über dem OHQ befindende Zugbank im Ostracodonton ist an diesem Stoß bereits abgebaut. Der OHQ besitzt hier eine Mächtigkeit von ca. 3,5 m von dem 2,3 m dem Typ Blaubank (A) entsprechen, 0,8 m als poröser Kernstein/Rotbank (B) ausgebildet sind und die liegenden 0,5 m der Abfolge als Gelbfaserkalk (C) anstehen.

Der Abraum oberhalb des Oberen Hauptquaderkalks (OHQ) kann aus Lösslehm, Einheiten des Keupers und des Oberen Muschelkalks (Abb. 5) bestehen, die je nach Lokation teilweise oder auch komplett fehlen können.



Abb. 5: Steinbruch-Profil aus dem Sellenberger Abbauggebiet. Der Quaderkalk ist hier etwa 4,5 m mächtig und wird von 9 m Abraum bestehend aus Lösslehm (Quartär), unterem Vitriolschiefer (Unterer Keuper), Grenzglaukonitkalkstein und Ostracodenton mit Kalksteinbänken überlagert (beide Oberer Muschelkalk, die unterste Kalksteinbank im Ostracodenton wird als „Zugbank“ im Ostracodenton bezeichnet siehe Tab. 1).

Ein weiterer wissenschaftlicher Ansatz zur Klassifikation dieser Gesteine, der vor allem auf lithologischen, sedimentpetrografischen und biostratigraphischen Eigenschaften basiert, wurde von PALLERMO et al. (2010) und PETROVIC & AIGNER (2017) entwickelt und stellt im Vergleich zur „Steinhauer Klassifikation“ einen allumfassenderen Ansatz dar. Diese Einteilung umfasst 14 lithofazielle Einheiten, die in sechs Lithofazies-Gruppen eingeteilt wurden (PETROVIC & AIGNER 2017). Durch den wissenschaftlichen Charakter dieser Einteilung ist die Anwendbarkeit für den „Nichtgeologen“ jedoch schwer zu realisieren. Deshalb wird im Folgenden der pragmatischere Ansatz der „Steinhauer“ verwendet.

2.3 Geologie des Erkundungsgebiets

Das Erkundungsgebiet, im Regierungsbezirk Unterfranken gelegen, befindet sich im nordwestlichen Teil Bayerns. Geologisch gliedert sich diese Region von West nach Ost in vier Haupteinheiten: (1) der Spessart-Odenwald, (2) die Rhön, (3) die Mainfränkischen Platten und (4) das Fränkische Keuper-Lias-Land. Der überwiegende Anteil der Landesoberfläche Unterfrankens wird von triassischen Sedimentgesteinen bedeckt (RUTTE 1981, RUTTE & WILCZEWSKI 1983). Der allgemeine Schichtverlauf zeigt ein leichtes Einfallen nach Süd-Osten. Bedingt durch die unterschiedliche Verwitterungsanfälligkeit der oberflächennahen Gesteine bildete sich durch Erosion und Abtragung die markante Geländemorphologie des fränkischen Schichtstufenlands (LFU 2013; Abb. 6).

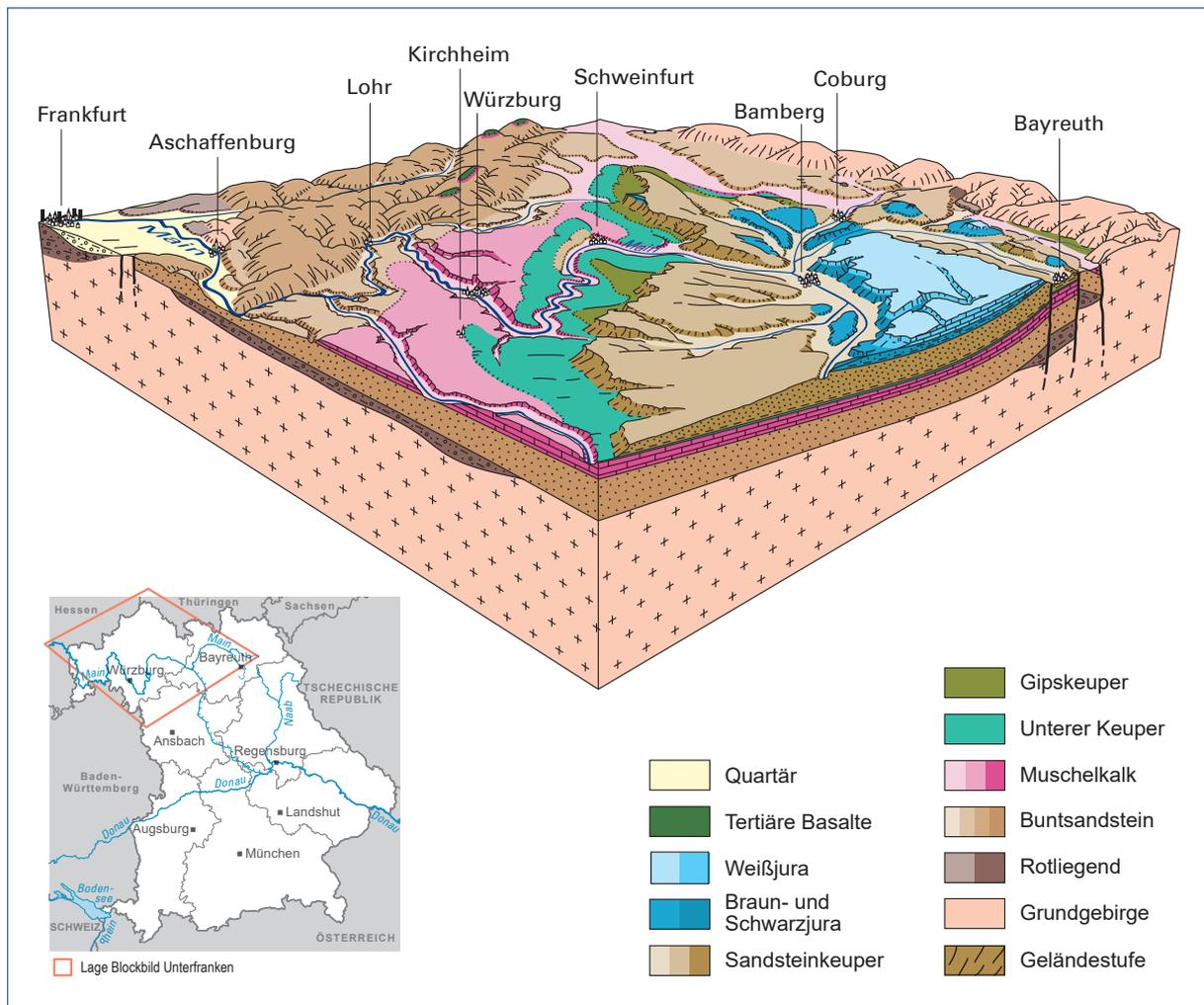


Abb. 6: Illustration des Fränkischen Schichtstufenlands als geologisches Blockbild (modifiziert nach GLA 1993).

Den flächenmäßig größten Anteil an Unterfranken besitzen die Mainfränkischen Platten. Die Region um Kirchheim befindet sich an der Grenze zwischen der westlichen und östlichen Fränkischen Platte. In diesem an der nordwestlichen Grenze zwischen Bayern und Baden-Württemberg gelegenen Gebiet, wird die Oberflächengeologie von quartären und triassischen Einheiten dominiert (LFU 2010; Abb. 7). Vor allem in Flusstälern ist der Obere Muschelkalk angeschnitten; dies führt dazu, dass hier der Quaderkalk austreicht. Besonders in diesen Bereichen können auch Karsterscheinungen beobachtet werden. Durch die fehlende, schützende Überdeckung ist das kalkige Gestein hier durch Oberflächenwässer angegriffen und zum Teil aufgelöst worden, sodass sich typische Karstformen bilden konnten.

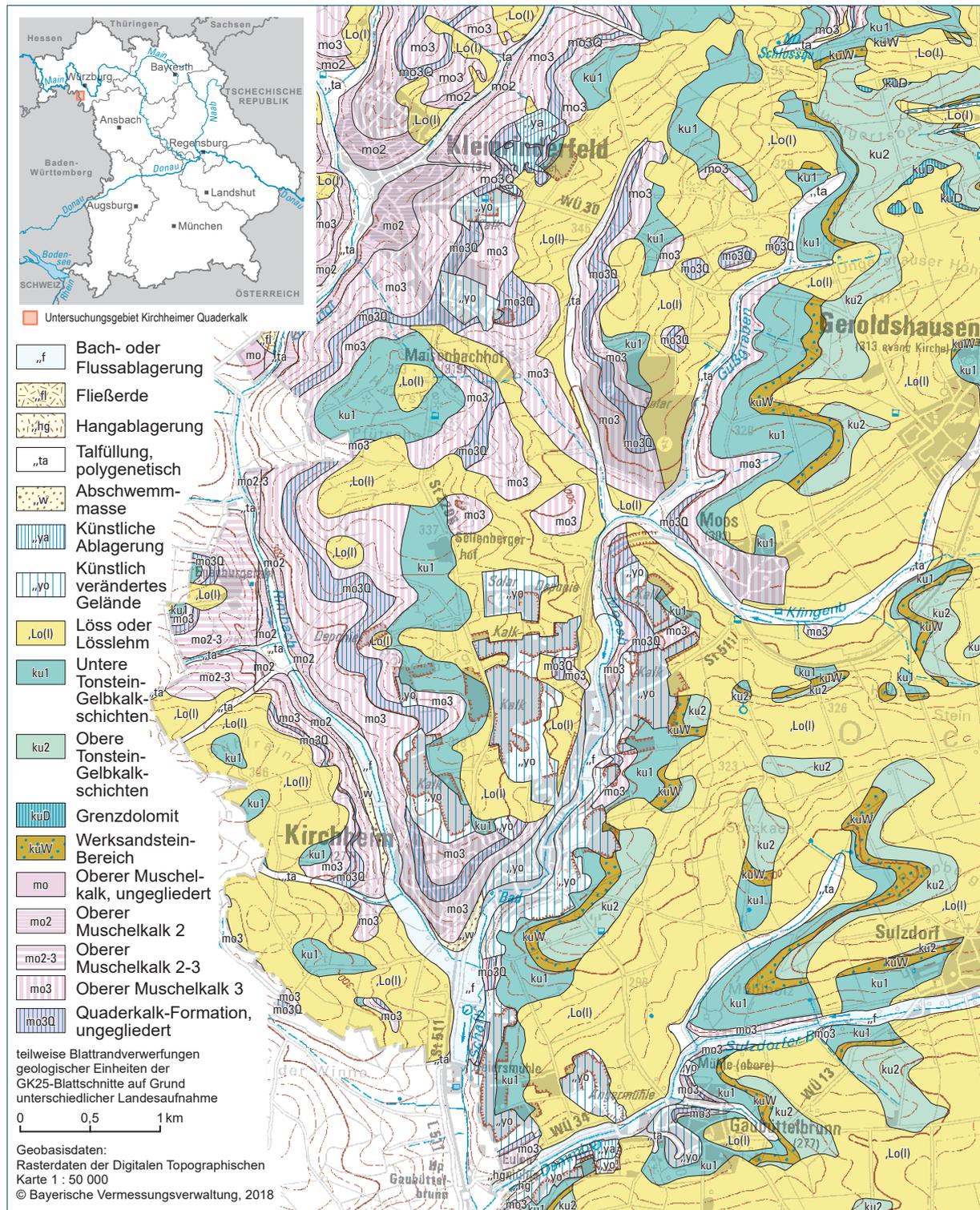


Abb. 7: Geologische Karte (auf Grundlage der dGK 25) des Erkundungsgebiets (GLA 1964, GLA 1996, LFU 2010).

3 Durchgeführte Arbeiten

3.1 Bohrungen

Zur Erkundung des Quaderkalkvorkommens im Raum Kirchheim wurden insgesamt 16 Bohrungen abgeteuft (Abb. 8). Dabei wurden verschiedene Quaderkalk-Einheiten durchteuft, wobei der Obere Hauptquaderhorizont (OHQ) mengenmäßig bei weitem überwiegt. Insgesamt wurden 406 m Kernstrecken erbohrt. Davon wurden auf rund 10 m Länge Hangschutt, Boden oder Verwitterungsdecken durchörtert sowie auf 127 m Länge der Untere Keuper. Der Oberer Muschelkalk wurde auf 269 m Länge erbohrt.

3.2 Probenahme

Eine regelmäßige Beprobung der Bohrkern-erfolge nicht, vielmehr wurden die werksteinhöflichen Bereiche einer näheren Betrachtung unterzogen und je nach Ausbildung und Mächtigkeit des angetroffenen OHQ nach der Steinbrecher-Klassifikation (DREXLER 1964, GLA 1984) eingeteilt und mit einer unterschiedlichen Probenanzahl (repräsentativ) belegt. Die Probekörper wurden jeweils sowohl bohrungsparallel als auch senkrecht zur Kernachse entnommen. Als Vorbereitung für die nachfolgenden gesteinsphysikalischen Untersuchungen, wurden mittels CNC-Gesteinssäge Prüfzylinder mit einer Länge von 50 ± 5 mm und 100 ± 5 mm hergestellt.

3.3 Durchgeführte Laboruntersuchungen

Die Bestimmung der gesteinsphysikalischen Parameter wurde LfU-intern im Bohrkern- und Rohstoff-Analytik-Zentrum am Standort St.-Lukas-Weg in Hof durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten nach DIN bzw. nach hausinternen Prüfvorschriften. Bestimmt wurde die Wasseraufnahmefähigkeit sowohl unter atmosphärischem Druck (DIN EN 13755:2008, „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck“) als auch unter Vakuum (Abb. 9 A; DIN EN 1936:2006, „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität“); sich hieraus ergebende Parameter sind der Sättigungsgrad, die Roh- und Reindichte sowie die Porosität.

In einem zweiten Verfahren wurde die hygrische Längenänderung der Prüfkörper bestimmt (Abb. 9 B). Die Vorgehensweise wird in der DIN 52450 („Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Prüfkörpern“) festgelegt. Die hierin beschriebenen Abläufe gelten jedoch für Mörtel und Betone, sodass eine Übertragung auf Natursteine nicht ohne Probleme möglich ist. Insbesondere trifft dies auf die Messzeiten zu. Aus diesem Grund wurde ein abgewandeltes Verfahren verwendet, das neben der DIN auch die Ergebnisse von KOCHER (2004) berücksichtigt. Da Kalksteine, neben Graniten und Marmoren, in die Gruppe mit der geringsten Feuchtedehnung fallen, müssen auch die Messzeiten entsprechend angepasst werden. Versuche zeigten, dass im Gegensatz zu den von KOCHER (2004) an Sandsteinen gemessenen Werten, erst nach ca. 5 Tagen (120 h) eine Stagnation der Längenänderung stattfindet. Um sicher zu stellen, dass die größte Längenänderung abgeschlossen ist, wird für die Auswertung der Messwert nach 168 h verwendet.

Um eine qualitative Aussage über die Heterogenität des Natursteins zu erreichen, wurde als zerstörungsfreie Prüfung die Ultraschallmessung nach DIN 12223 („Ultraschallprüfung“) und DIN 14579 („Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung“) durchgeführt (Abb. 9 D). Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung lassen sich strukturelle Eigenschaften des untersuchten Materials ableiten, z. B. offene Klüfte oder eine Dichteänderung im Gestein.

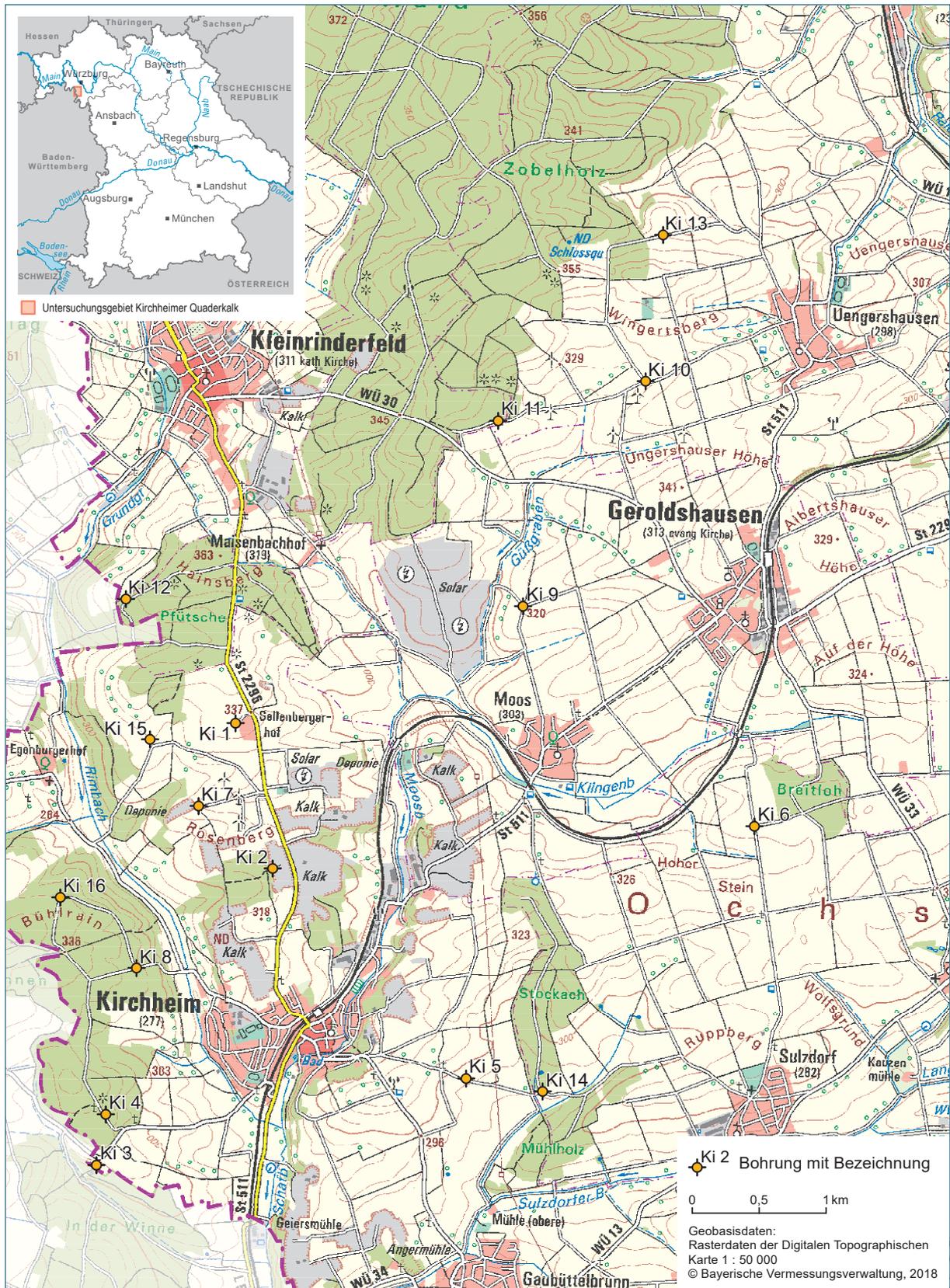


Abb. 8: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets mit eingezeichneten Bohrpunkten.



Abb. 9: Gesteinsphysikalische Versuchsdurchführung im Bohrkern- und Rohstoffanalytik-Zentrum in Hof. (A) Gesteinszylinder während der Wasseraufnahme unter Vakuum. (B) Versuchsanordnung zur Messung der hygrischen Dilatation mit Einspannvorrichtung, Messuhr und Prüfzylinder im Wasserbad. (C) Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit an der Universalprüfmaschine Z 400 der Fa. Zwick. (D) Messung der Kompressionswellengeschwindigkeit (Ultraschallprüfung). (E) Durchführung eines Frost-Tau-Wechsels in der Klimakammer.

Zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften des Muschelkalks wurde an Prüfkörpern die einaxiale Druckfestigkeit nach DIN EN 1926 („Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit“) ermittelt (Abb. 9 C).

Zusätzlich wurde die Frostbeständigkeit der Muschelkalke nach DIN EN 12371 („Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes“) und DIN 52008 („Prüfverfahren für Naturstein – Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit“) untersucht (Abb. 9 E).

Gesteine gelten als frostbeständig (LFU 2017), wenn sie:

- einen Sättigungswert von maximal 0,6 besitzen,
- ein Massenverlust von höchstens 0,5 % ohne deutlich sichtbare Schäden nach 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW) aufweisen,
- nicht mehr als 0,5 Gew.-% Wasser aufnehmen können (DIN 52008).

Die Anzahl der natürlich auftretenden FTW in Deutschland schwankt je nach geografischer Lage und Jahr. Für die Großstädte Berlin, Dresden und Leipzig sind es im Durchschnitt pro Jahr zwischen 60 und 75 FTW (GRIEGER & THIEL o.J.). Um ein möglichst repräsentatives Szenario zu simulieren, wurde die Anzahl der durchgeführten FTW auf 168 festgelegt (entspricht 2–3 Jahre). Nach einer erneuten Trocknung wurden die Prüfcylinder nach den FTW nochmals mit Ultraschall geprüft um mögliche strukturelle Veränderung festzustellen.

3.4 Bewertung des Quaderkalks nach seinen gesteinsphysikalischen und lagerstättenkundlichen Eigenschaften

Für die Einschätzung der Güte des OHQ wurde auf die „Steinbrecher Klassifikation“ (vergleiche Tab. 1) zurückgegriffen. Um eine bessere Visualisierung dieser Klassifikation zu erreichen, wurde ein optischer Leitfaden zur Erkennung der unterschiedlichen „Sorten“ erstellt (Abb. 10 A bis F). Nachfolgend wurden die 16 abgeteuften Bohrungen ausgewertet, rohstoffgeologisch angesprochen und stratigraphisch korreliert. Zur Veranschaulichung der Höffigkeit der jeweiligen Bohrung wurden die Gesamtmächtigkeit des OHQ, die nutzbare Mächtigkeit des OHQ und der abzutragende Abraum in tabellarischer Form erfasst und gegenübergestellt (vergleiche Kapitel 5).

Um einen Richtwert für die ökonomische Gewinnbarkeit des Quaderkalks zu generieren, wurde zusätzlich das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis berechnet. Aufgrund ihrer meist geringen Mächtigkeit (<0,5 m) und des z. T. hohen anfallenden Abraums, wurden die zusätzlichen Schillkalk- und Kalksteineinheiten für diese Berechnung nicht berücksichtigt. In der Praxis arbeiten Steinbrüche wirtschaftlich, die trotz eines relativen hohen Abraum-zu-Rohstoffverhältnisses aufgefahren wurden. Deshalb wurde in Anlehnung an Geländebeobachtungen der Grenzwert für eine positive Bewertung dieser Beziehung auf ≤ 5 festgelegt (z. B. 25 m Abraum und 5 m Nutzhorizont). Mehr noch als die Menge des Abraums, ist die gesteinsmechanische Ausbildung (möglichst wenig Trennflächengefüge) und die charakteristische Optik von größter Bedeutung für die hiesigen Gewinnungsbetriebe. Zusätzlich wurden die gesteinsphysikalischen Eigenschaften (vergleiche Kapitel 4.1) für jeden Bohrkern ausgewertet, um ein differenziertes Bild der technischen Nutzbarkeit abzubilden.

Um die genannten Parameter in die Bewertung einfließen zu lassen wurde ein Bewertungsschema entwickelt. Dadurch lassen sich die untersuchten Quaderkalke in drei unterschiedliche Güteklassen einteilen (Tab. 2).

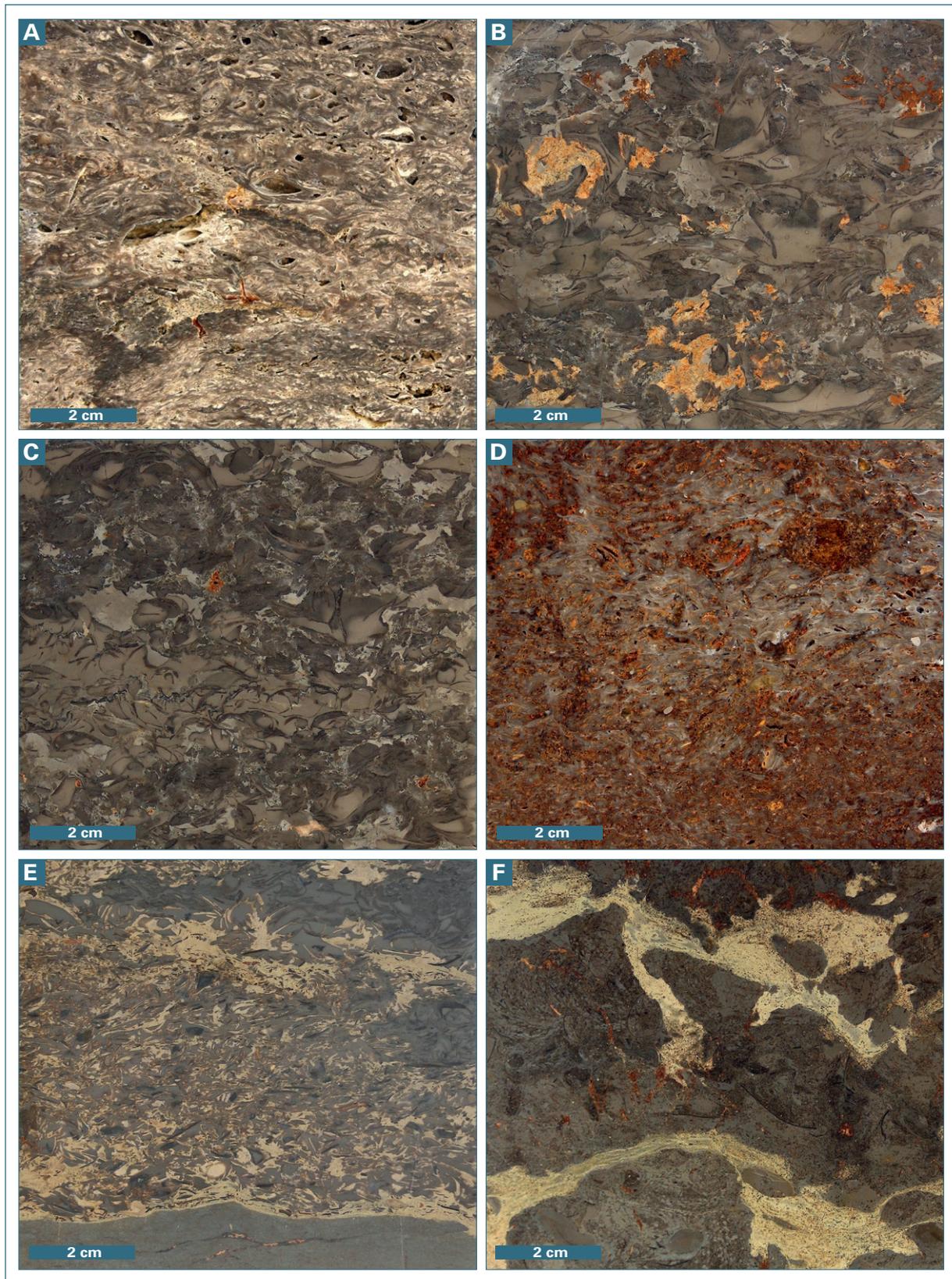


Abb. 10: Varietäten des Kirchheimer Quaderkalks und assoziierte Gesteine (jeweils gegen das Lager geschnitten). (A) Kernstein, (B) Goldbank, (C) Blaubank, (D) Rotbank, (E) Zugbank und (F) Gelbfaserkalk.

Tab. 2: Teufenunabhängige Bewertung der Rohstoffqualität der Quaderkalk.

Nutzbarkeitsstufe	Bewertung des Rohstoffs	Bewertungskriterien der Schillkalk-Gesteinspakete des Oberen Hauptquaderkalks
Werksteinqualität 	Gute bis sehr gute Eignung als Ausgangsmaterial für klein- wie auch großformatige Bauelemente in charakteristischer Quaderkalkoptik.	<ul style="list-style-type: none"> – Kaum bis keine Einschaltungen und Trennflächengefüge (vertikale Klüfte, Stylolithen, Stiche...) – Charakteristische Optik der jeweiligen Sorte (z. B. Blaubank, Goldbank und Kernstein) – Für den technischen Gebrauch geeignete gesteinsphysikalische Werte
GaLa-Bau-Qualität 	Mäßige Qualität des Rohstoffs bedingt Verwendbarkeit im GaLa-Bau, in gebrochener Form, oder für kleinformatige Bauelemente	<ul style="list-style-type: none"> – Zunehmender Einfluss von unerwünschten Einschaltungen und Trennflächengefüge (vertikale Klüfte, Stylolithen, Stiche...) – Charakteristische Optik verschwimmt – Verschlechterung der gesteinsphysikalischen Werte
Technisch nicht nutzbare Qualität 	nicht verwertbar	<ul style="list-style-type: none"> – Großer Einfluss von Einschaltungen und Trennflächengefügen bis hin zur Bildung von tonig-mergligen Zwischenlagen und daraus resultierende deutliche Entfestigung und Abnahme der technischen Eigenschaften (z. B. Einaxiale Druckfestigkeit oder Frostbeständigkeit)

Zusätzlich zur Gesteinsqualität der Quaderkalk hat auch die vertikale Lage der Gesteinspakete einen Einfluss auf ihre ökonomische Gewinnbarkeit. Um diesem Sachverhalt gerecht zu werden, wurden die Gesteine sowohl teufenunabhängig (unter der Prämisse der reinen Gesteinsqualität), als auch teufenabhängig bewertet (Gesteinsqualität und Teufenlage werden bewertet). Dadurch kann es dazu kommen, dass Gesteinspakete trotz einer Werkstein- oder GaLa-Bau-Qualität nicht wirtschaftlich gewinnbar sind (Abb. 9).

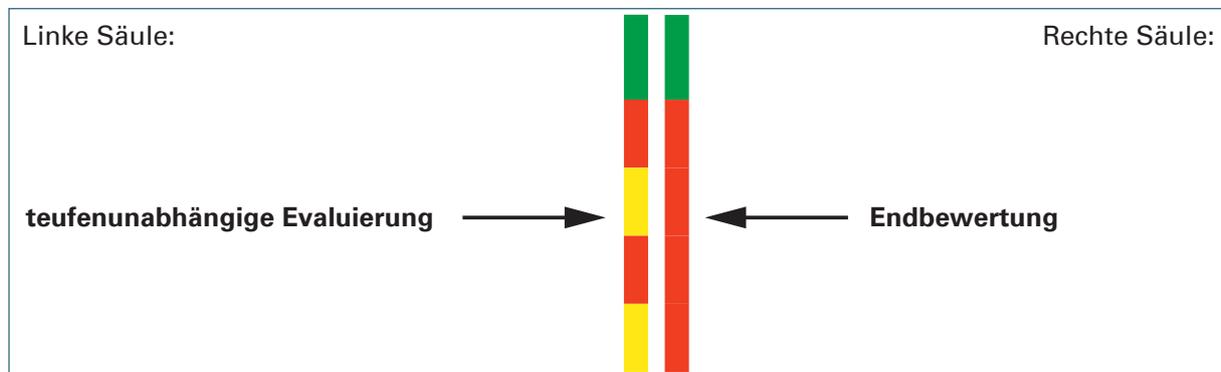


Abb. 11: Das zweistufige Evaluierungssystem bewertet sowohl die reine Gesteinsqualität (linke Säule), als auch das ökonomische Potenzial dieses Gesteinspakets (rechte Säule).

3.5 Erstellung eines 3D-Modells des Oberen Hauptquaderkalks

Ein weiteres Ziel dieser Studie ist die Erstellung eines Prognosemodells für den Oberen Hauptquaderkalk. Dazu wurden zur Erweiterung des Datenpools, zusätzlich zur Durchführung der Erkundungsbohrungen, zahlreiche Aufschlüsse und Steinbrüche eingemessen und fotodokumentiert (Tab. 29). In Kombination mit den Ergebnissen der Geologischen Landesaufnahme des LfU (GLA 1964; LfU 2010) konnte aus diesen Daten ein digitales, dreidimensionales Modell des Oberen Hauptquaderkalks erstellt werden (vergleiche Kapitel 5.2).

Für die digitale Bearbeitung kam die Software „ArcMap“ (ArcGIS) der Firma ESRI zum Einsatz. Nach Festlegung des Untersuchungsgebiets wurde das dimensionierte „Shapefile“ als Ausschneiderahmen für die vorliegenden geologischen Vektordaten von Bayern verwendet. Für den Bereich Baden-Württemberg im Westen des Bearbeitungsgebiets lagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung keine digitalen geologischen Daten vor. Deswegen wurde als westliche Begrenzung die Landesgrenze von Bayern für den „Vektor-Clip“ herangezogen. Nach dem Ausschneiden wurden die Flächen an Schneidegrenzen auf geometrische Unsauberkeiten kontrolliert. Für die Modellierung mussten nach geologischem Ermessen passende stratigraphische Bereiche erkannt, zusammengefasst und codiert werden (Tab. 3).

Tab. 3: Für die 3D-Modellierung via „ArcGis“ getroffene Vereinfachung der geologischen Abfolge.

Gruppe	Geologische Einheit	Bedeutung
1	„ta; „ f; „fl; „ w; „yo; „ya; „Lo(l); ku1; ku2; kuD; kuW; kmM; mo3 (Grenz-Bonebed bis Ostracodenton)	Abraum
2	mo3Q	Nutzhorizont
3	mo3 (Unterkante mo3Q bis Cycloidesbank); mo2;...	Liegend-Einheiten unter dem Nutzhorizont

Die eingeteilten Polygonflächen wurden mithilfe des Werkzeugs „Polygon in Linie“ in Linien-Features konvertiert. Diese wurden anschließend in Basis- und Top-Linien des OHQ eingeteilt und im nächsten Schritt mit dem Werkzeug „Feature-Stützpunkte in Punkte“ umgewandelt. Im nächsten Schritt wurden die Shape-Dateien der Basis- und Top-Punkte mit dem DGM interpoliert, um eine Z-Klasse zu generieren. Folgend wurde den Punkten automatisiert über den Befehl „Z-Informationen hinzufügen“ die jeweiligen Höhen über NN hinzugefügt. Im Anschluss wurde sowohl für die Basis, als auch für die Top-Datenpunkte eine Interpolation mit dem „Natürlicher Nachbar“-Verfahren durchgeführt. Diese Methode sucht nach der nächstgelegenen Teilmenge der Eingabepunkte zu einem Abfragepunkt und weist diesen Daten proportional zur Fläche eine Gewichtung zu (SIBSON 1981). Nach der Berechnung der Ober- und Unterkante des Oberen Hauptquaderkalks wurden die Werte des schon abgebauten bzw. überwiegend erosiv abgetragenen Quaderkalks mithilfe des „Map-Algebra-Werkzeugs“ und des „Con“- und „SetNull“-Befehls auf null gesetzt. Zusätzlich wurde nun die Mächtigkeit des Oberen Hauptquaderkalks und die Menge des Abraums über dem Oberen Hauptquaderkalk durch Subtraktionen im „Map-Algebra-Werkzeug“ berechnet und als Isolinienkarte ausgewertet.

4 Ergebnisse

4.1 Auswertung der Kernbohrungen

Die Erkundungsbohrungen wurden nach ihrer geografischen Lage und geologischen Situation in vier Teilerkundungsgebiete unterteilt (Abb. 12), um eine bessere Bewertbarkeit des Rohstoffpotenzials zu erreichen.

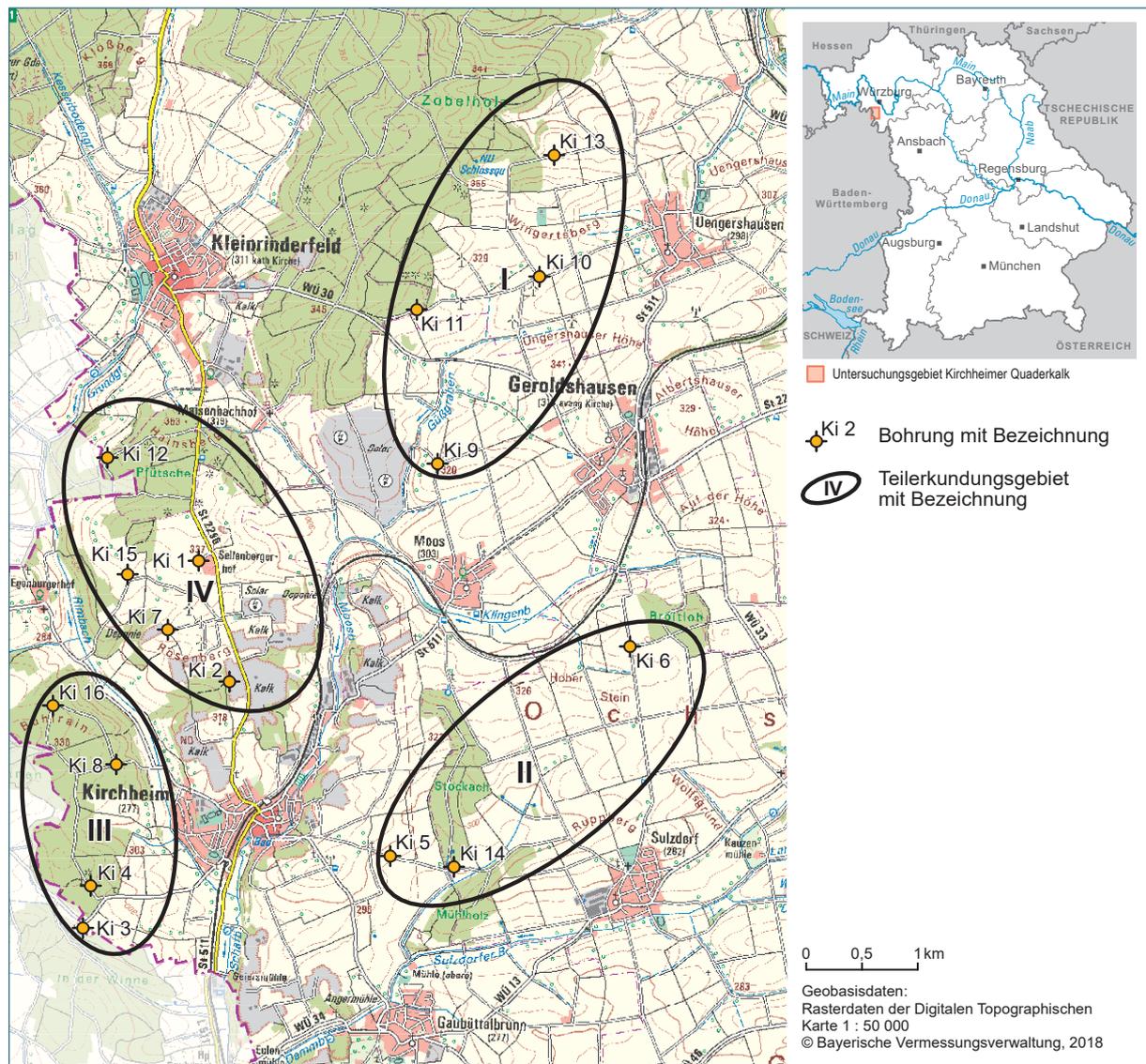


Abb. 12: Einteilung des Erkundungsgebiets in vier Teilerkundungsgebiete.

Anschließend wurden die Teilerkundungsgebiete im Uhrzeigersinn rohstoffgeologisch charakterisiert. Für eine übersichtliche Zusammenstellung der Ergebnisse wurden die einzelnen Bohrungen pro Teilerkundungsgebiet graphisch visualisiert. Zusätzlich wurden alle Kernbereiche, die ein Rohstoffpotenzial besitzen, stratigraphisch miteinander korreliert.

4.1.1 Teilerkundungsgebiet I – Der Bereich nordöstlich von Kirchheim

Das Teilerkundungsgebiet I liegt nordöstlich von Kirchheim und Moos und wird überwiegend als Ackerland bewirtschaftet. Morphologisch sind z. T. deutliche Höhenanstiege bemerkbar (~20 m zwischen den Bohransatzpunkten). Dabei kommt es vereinzelt zu Quaderkalkausstrichen, wobei jedoch quartäre und triassische (ku1 und ku2) Einheiten überwiegen. Insgesamt sind drei Schillkalk-Horizonte über alle Kernbohrungen verfolgbar. Dabei handelt es sich um (1) den Grenzquader, (2) die Zugbank und (3) den Oberen Hauptquaderkalk. Zusätzlich konnten noch einzelne Einschübe des Quaderkalks der knaurigen Bank (Ki 9) und des Unteren Hauptquaderkalks (Ki 11) erbohrt werden. Die Mächtigkeit der Überdeckung des OHQ nimmt mit größer werdendem Abstand zum Zobelholzer Forst nach Osten stetig zu und erreicht bei der Kernbohrung Ki 10 sein erbohrtes Maximum mit 27,2 m. Gleichzeitig nimmt die Mächtigkeit des OHQ ab und beträgt bei Ki 10 nur noch 3,1 m (Abb. 14). Allgemein ist in diesem Teilerkundungsgebiet der Einfluss des Gelben Kippers auf den OHQ sehr stark und dementsprechend häufig tritt Gelbflaserkalk auf.

Ki 9

Die Erkundungsbohrung Ki 9 wurde auf der Adelmanshöhe mit einer Endteufe von 20 m niedergebracht. Dabei wurden vier Schillkalk führende Horizonte erbohrt: (1) der Grenzquader, (2) die Zugbank im Ostracodenton, (3) der Obere Hauptquaderkalk und (4) der Quaderkalk der knaurigen Bank. Der Grenzglaukonit-Kalkstein setzt ab einer Teufe von 7 m ein, ist jedoch erst ab 8,35 m bis zum Abschluss der Einheit bei 9,4 m Schillkalk führend. Der Gesteinsverbund ist z. T. stark zerrüttet und weist zahlreiche Einschaltungen von Gelbkalken auf. Im darunter folgenden Ostracodenton ist eine 0,35 m mächtige Zugbank ausgebildet. Ab einer Teufe von 13,7 m folgt der Obere Hauptquaderkalk mit einer Mächtigkeit von 4,2 m (Abb. 13 A und B). Dieser lässt sich in folgende Einheiten unterteilen:

- (1) Rotbank (0,28 m),
- (2) gelbgefaserter Schillkalkstein mit Stylolithen und gelben Einschaltungen (1,0 m),
- (3) Gelbflaserkalk mit unterschiedlicher Verteilung und Ausprägung der gelben Einschaltungen, zahlreichen Stylolithen und mergligen Fugen (2,9 m).

Das Rohstoff-zu-Abraumverhältnis beträgt 10,6 (1,3 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1 und 2). Etwa 0,5 m unter dem OHQ folgt der Quaderkalk der knaurigen Bank (0,6 m mächtig).

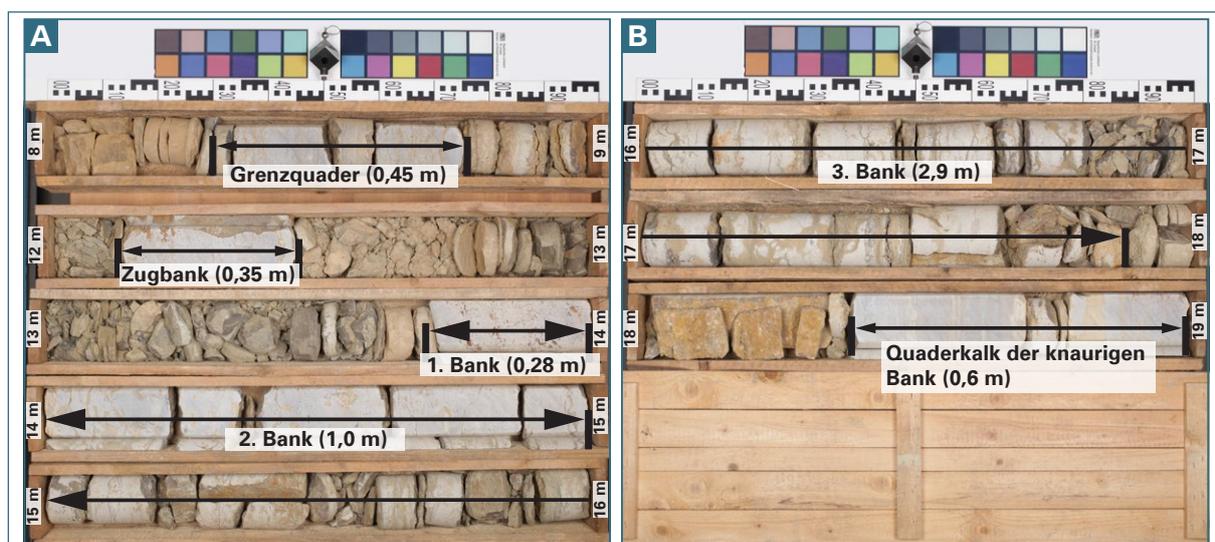


Abb. 13: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 9 (R: 4347007, H: 5507519).

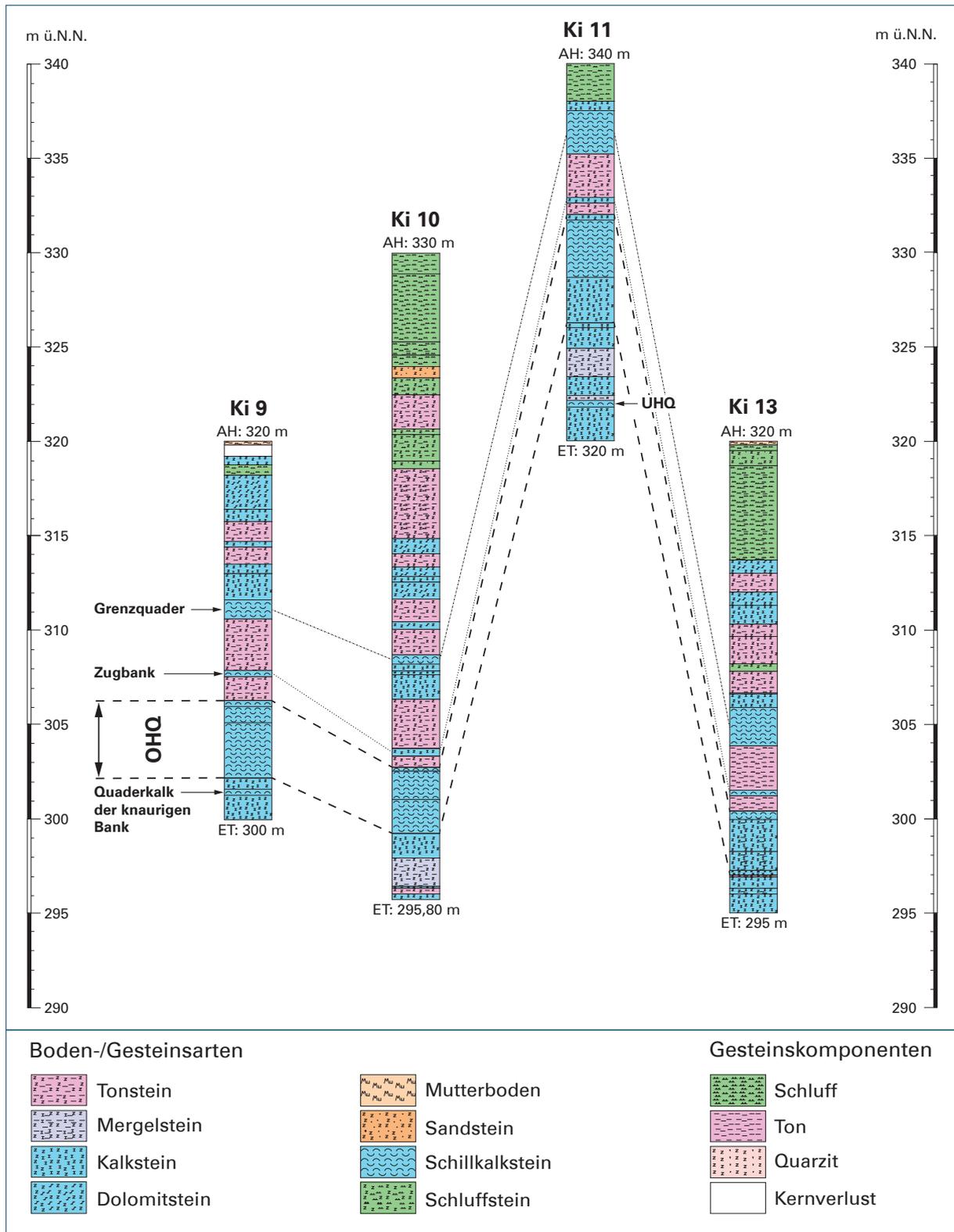


Abb. 14: Bohrprofilardarstellung im Bereich nordöstlich von Kirchheim, Teilerkundungsgebiet I.

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 28 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 4).

Tab. 4: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 9 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	1,24 (n=14)	0,42 (n=4)	1,12 (n=2)	-	0,93 (n=2)	1,39 (n=6)	1,22 (n=4)	0,91 (n=10)
	Min.	0,62	0,19	1,04	-	0,67	0,94	0,62	0,23
	Max.	2,06	0,69	1,19	-	1,18	2,06	1,65	2,09
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	1,41 (n=14)	0,43 (n=4)	1,25 (n=2)	-	0,98 (n=2)	1,71 (n=6)	1,26 (n=4)	0,92 (n=10)
	Min.	0,64	0,19	1,04	-	0,70	1,08	0,64	0,26
	Max.	2,76	0,71	1,46	-	1,25	2,76	1,68	2,10
Sättigungswert	Ø	0,89 (n=14)	0,89 (n=4)	0,91 (n=2)	-	0,95 (n=2)	0,83 (n=6)	0,97 (n=4)	0,98 (n=10)
	Min.	0,75	0,94	0,81	-	0,94	0,75	0,93	0,89
	Max.	1,00	1,00	1,00	-	0,95	0,87	0,99	1,00
Porosität (Vol.-%)	Ø	3,61 (n=14)	1,16 (n=4)	3,21 (n=2)	-	2,55 (n=2)	4,28 (n=6)	3,33 (n=4)	2,41 (n=10)
	Min.	1,72	0,52	2,65	-	1,87	2,79	1,72	0,72
	Max.	6,71	1,91	3,77	-	3,23	6,71	4,41	5,32
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,58 (n=14)	2,69 (n=4)	2,59 (n=2)	-	2,62 (n=2)	2,52 (n=6)	2,63 (n=4)	2,65 (n=10)
	Min.	2,43	2,67	2,57	-	2,58	2,43	2,61	2,53
	Max.	2,67	2,72	2,60	-	2,65	2,60	2,67	2,72
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,67 (n=14)	2,73 (n=4)	2,67 (n=2)	-	2,68 (n=2)	2,63 (n=6)	2,73 (n=4)	2,72 (n=10)
	Min.	2,57	2,71	2,67	-	2,66	2,57	2,72	2,67
	Max.	2,73	2,74	2,67	-	2,70	2,70	2,73	2,76
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	11 (n=3)	22 (n=1)	-	-	-	11 (n=1)	11 (n=2)	183 (n=2)
	Min.	0	-	-	-	-	-	0	54
	Max.	22	-	-	-	-	-	22	312
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5611 (n=78)	5789 (n=24)	5804 (n=12)	-	5668 (n=12)	5457 (n=36)	5753 (n=18)	5637 (n=60)
	Min.	4350	4479	5396	-	5141	4350	5153	4090
	Max.	6322	6547	6248	-	6322	6199	6276	6532
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	29 (n=5)	102 (n=1)	-	-	38 (n=1)	26 (n=3)	29 (n=1)	111 (n=4)
	Min.	11	-	-	-	-	11	-	17
	Max.	48	-	-	-	-	48	-	202
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	5,20 (n=10)	0,00 (n=1)	0,01 (n=1)	-	0,03 (n=2)	0,03 (n=2)	10,38 (n=5)	0,03 (n=3)
	Min.	0,01	-	-	-	0,02	0,02	0,01	0,00
	Max.	33,02	-	-	-	0,03	0,03	33,02	0,09
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4745 (n=36)	5184 (n=12)	5054 (n=6)	-	4846 (n=12)	4693 (n=12)	4336 (n=6)	4240 (n=30)
	Min.	3353	5056	4856	-	4471	4174	3353	3353
	Max.	5291	5356	5291	-	5247	5189	5067	5281

Ki 10

Zwischen der Ungershauser Höhe im Süden und dem Wingertsberg im Norden wurde die Erkundungsbohrung Ki 10 niedergebracht. Diese erreichte eine Endteufe von 34,2 m und erbohrte drei Schillkalk führende Horizonte: (1) den Grenzquader, (2) die Zugbank im Ostracodenton und (3) den Oberen Hauptquaderkalk. Die erste dieser Einheiten, der Grenzquader, weist eine Mächtigkeit von 0,5 m auf und setzt ab einer Teufe von 21,25 m an der Keuper-Muschelkalkgrenze ein. Er besteht aus einem dichten, z. T. spröde reagierenden und Glaukonit führenden Schillkalkstein. Etwa 4,5 m weiter im Liegenden wurde die Zugbank im Ostracodenton durchteuft (0,4 m mächtig, dichter und spröde reagierender Schillkalkstein). Ab einer Teufe von 27,4 m folgt der Obere Hauptquaderkalk (3,1 m mächtig, Abb. 15) und lässt sich in folgende Einheiten unterteilen:

- (1) dichter Schillkalkstein, z. T. stark zerbohrt, mit Übergängen zur Rotbank und mit gelblich-grauen Einschaltungen durchzogen in den entfestigten Bereichen (1,5 m),
- (2) Gelbflaserkalk, sehr stark entfestigt und von grau-gelbem Tonmergel durchzogen (1,6 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 54,4 (0,5 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1).

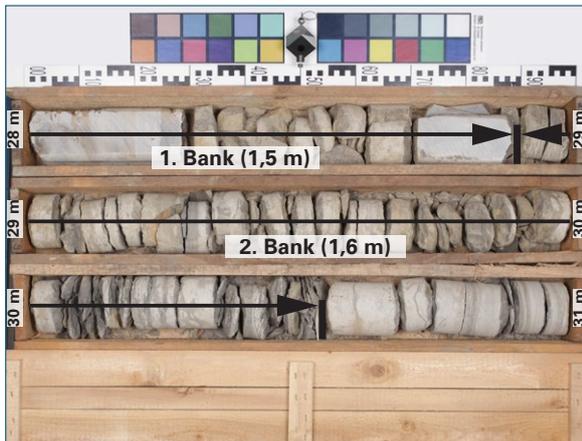


Abb. 15: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 10 (R: 4347921, H: 5509234).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden zwei Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 5).

Tab. 5: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 10 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	-	-	-	-	-	0,61 (n=2)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	0,54	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	0,67	-	-
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	-	-	-	-	-	0,73 (n=2)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	0,64	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	0,82	-	-
Sättigungswert	Ø	-	-	-	-	-	0,83 (n=2)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	0,82	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	0,83	-	-
Porosität (Vol.-%)	Ø	-	-	-	-	-	1,95 (n=2)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	1,72	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	2,18	-	-
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	-	-	-	-	-	2,66 (n=2)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	2,64	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	2,67	-	-
Reindichte (g/cm ³)	Ø	-	-	-	-	-	2,71 (n=2)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	2,70	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	2,72	-	-
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	-	-	-	-	-	22 (n=1)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	-	-	-	-	-	6000 (n=12)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	5818	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	6443	-	-
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	-	-	-	-	-	62 (n=2)	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	9	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	114	-	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	-

Ki 11

Östlich des Abtsrains ist die Erkundungsbohrung Ki 11 (Endteufe: 20 m) lokalisiert. Es wurden vier Schillkalk führende Einheiten erbohrt: (1) der Grenzquader, (2) die Zugbank im Ostracodenton, (3) der Obere Hauptquaderkalk und (4) der Untere Hauptquaderkalk. Unter einer Überdeckung von 2,5 m steht die erste dieser Einheiten mit einer Mächtigkeit von 2,3 m an, der Grenzquader. Dieser Schillkalkstein fällt durch einen z. T. entfestigten Gesteinsverband, zahlreiche kleine gelbliche Einschaltungen und den enthaltenen, charakteristischen Glaukonit auf. Weiter im Liegenden ist 2,3 m darunter die Zugbank im Ostracodenton mit einer Mächtigkeit von 0,3 m erbohrt worden. Charakteristisch für diesen Schill führenden Kalkstein ist seine hohe Härte und Sprödigkeit. Nach dem Ostracodenton folgt ab einer Teufe von 8,00 m der Obere Hauptquaderkalk (Abb. 16 A und B). Dieser weist eine Mächtigkeit von 6,05 m auf und lässt sich in folgende Einheiten unterteilen:

- (1) Oberbank (0,25 m),
- (2) Kernstein (0,3 m),
- (3) Gelbflaserkalk, z. T. stark entfestigt (0,65 m),
- (4) Schillkalkstein, z. T. mit Übergängen zur Rotbank, gelben Einschaltungen, Stylolithen und einem vertikalen Trennflächengefüge zwischen 9,2 und 10,0 m (2,2 m),
- (5) Gelbflaserkalk, mit wechselnder Anzahl und Ausprägung von gelben Einschaltungen, Stylolithen und tonig-mergligen Fugen bei 12,35 m; 12,95 m; 13,05 m; 13,42 m; 13,70 m; 13,92 m (2,65 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 3,3 (2,5 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 2 und 4). Im Liegenden des OHQ ist inmitten der Plattenkalksteinfole 6 eine weitere Schillkalkeinheit ausgebildet, der Untere Hauptquaderkalk (Abb. 16 B; 0,4 m mächtig).

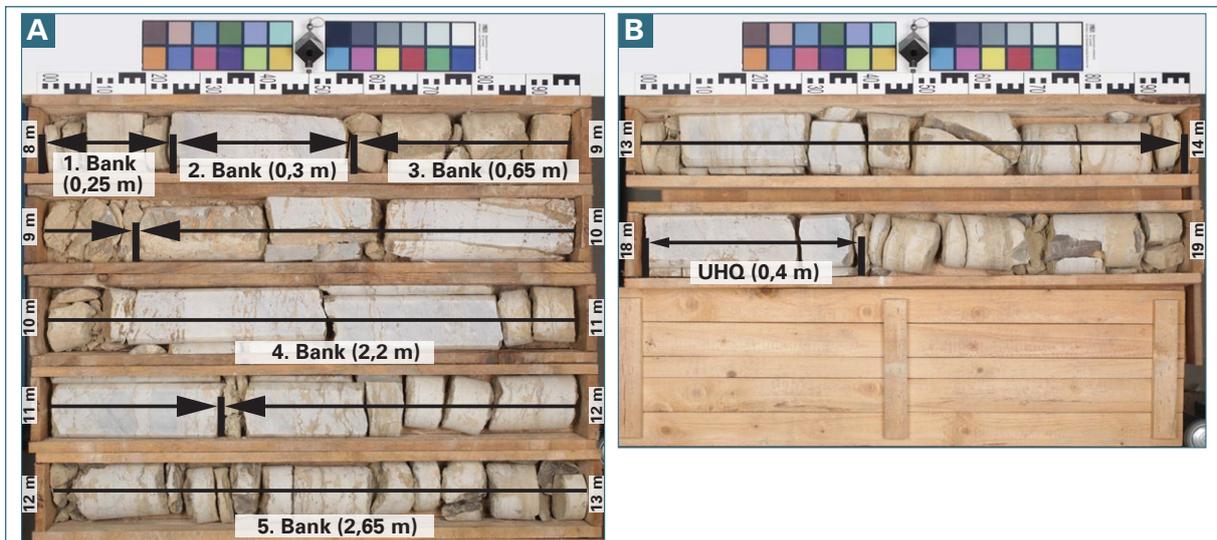


Abb. 16: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 11 (R: 4346811, H: 5508908).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 22 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 6).

Tab. 6: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 11 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	1,15 (n=18)	-	-	-	0,61 (n=1)	1,18 (n=7)	1,17 (n=10)	0,34 (n=4)
	Min.	0,26	-	-	-	-	0,64	0,26	0,25
	Max.	2,92	-	-	-	-	1,50	2,92	0,43
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	1,27 (n=18)	-	-	-	0,62 (n=1)	1,48 (n=7)	1,19 (n=10)	0,35 (n=4)
	Min.	0,26	-	-	-	-	0,64	0,26	0,26
	Max.	2,97	-	-	-	-	2,43	2,97	0,44
Sättigungswert	Ø	0,94 (n=18)	-	-	-	0,99 (n=1)	0,85 (n=7)	0,99 (n=10)	0,98 (n=4)
	Min.	0,56	-	-	-	-	0,56	0,96	0,96
	Max.	1,00	-	-	-	-	1,00	1,00	1,00
Porosität (Vol.-%)	Ø	3,28 (n=18)	-	-	-	1,66 (n=1)	3,74 (n=7)	3,11 (n=10)	0,93 (n=4)
	Min.	0,72	-	-	-	-	1,73	0,72	0,71
	Max.	7,53	-	-	-	-	6,01	7,53	1,18
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,61 (n=18)	-	-	-	2,68 (n=1)	2,55 (n=7)	2,64 (n=10)	2,69 (n=4)
	Min.	2,47	-	-	-	-	2,47	2,52	2,67
	Max.	2,71	-	-	-	-	2,70	2,71	2,70
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,69 (n=18)	-	-	-	2,72 (n=1)	2,65 (n=7)	2,72 (n=10)	2,71 (n=4)
	Min.	2,57	-	-	-	-	2,57	2,71	2,7
	Max.	2,75	-	-	-	-	2,75	2,74	2,73
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	251 (n=3)	-	-	-	-	32 (n=2)	688 (n=1)	49 (n=1)
	Min.	11	-	-	-	-	11	-	-
	Max.	689	-	-	-	-	54	-	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5627 (n=90)	-	-	-	6168 (n=6)	5577 (n=42)	5599 (n=42)	6157 (n=24)
	Min.	3949	-	-	-	6049	4734	3949	5836
	Max.	6443	-	-	-	6369	6164	6443	6379
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	70 (n=4)	-	-	-	-	75 (n=3)	54 (n=1)	54 (n=2)
	Min.	36	-	-	-	-	36	-	83
	Max.	120	-	-	-	-	120	-	117
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	4,43 (n=8)	-	-	-	0,00 (n=1)	0,03 (n=3)	8,84 (n=4)	0,00 (n=2)
	Min.	0,00	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00
	Max.	35,00	-	-	-	-	0,06	35,00	0,00
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4861 (n=42)	-	-	-	4866 (n=6)	4886 (n=18)	4642 (n=18)	5150 (n=12)
	Min.	2871	-	-	-	4432	4491	2871	4970
	Max.	5671	-	-	-	5473	5301	5671	5411

Ki 13

Die Erkundungsbohrung Ki 13 wurde nördlich des Wingertsbergs mit einer Endteufe von 25 m niedergebracht. Dabei wurden drei Schillkalk führende Horizonte erbohrt: (1) der Grenzquader, (2) die Zugbank im Ostracodenton und (3) der Obere Hauptquaderkalk. Die Oberste dieser Einheiten, der Grenzquader, setzt zwischen einer Teufe von 14,00 und 16,15 m ein und besteht aus einem graugrünen, Glaukonit führendem Schillkalkstein, der z. T. entfestigt ist und eine hohe Sprödigkeit aufweist. Etwa 2,3 m darunter folgt die Zugbank im Ostracodenton. Dieser 0,3 m mächtige Horizont repräsentiert einen grauen, sehr harten und spröden Schillkalkstein. Ab einer Teufe von 19,60 m setzt der Obere Hauptquaderkalk ein (Abb. 17). Er besitzt eine Mächtigkeit von 3,4 m und lässt sich in folgende Einheiten unterteilen:

- (1) Oberbank, z. T. entfestigt (0,4 m),
- (2) Gelbflaserkalk mit Stylolithen und tonig-mergligen Fugen bei 20,65 m, 21,05 m, 21,25 m und bei 21,45 m (1,75 m),
- (3) Gelbflaserkalk, ähnlich Einheit (2) jedoch sehr stark entfestigt (1,00 m),
- (4) Gelbflaserkalk (0,25 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 49 (0,4 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1).

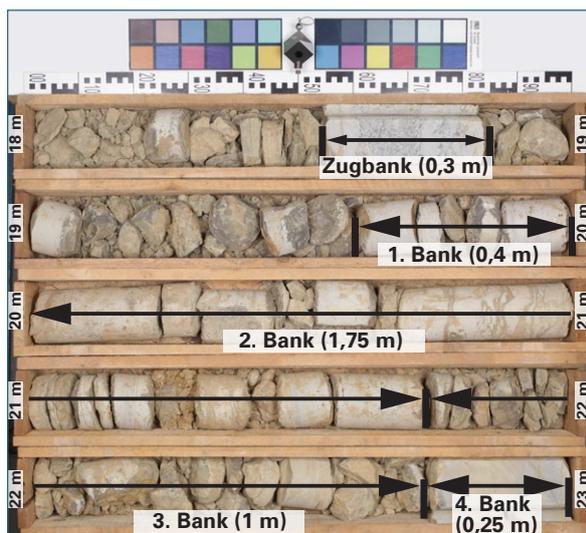


Abb. 17: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 13 (R: 4348052, H: 5510310).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden drei Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 7).

Tab. 7: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 13 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	-	0,73 (n=3)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	0,56	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	0,82	-	-	-	-	-	-
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	-	0,73 (n=3)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	0,56	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	0,82	-	-	-	-	-	-
Sättigungswert	Ø	-	1,00 (n=3)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	1,00	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	1,00	-	-	-	-	-	-
Porosität (Vol.-%)	Ø	-	1,97 (n=3)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	1,52	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	2,20	-	-	-	-	-	-
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	-	2,69 (n=3)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	2,68	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	2,70	-	-	-	-	-	-
Reindichte (g/cm ³)	Ø	-	2,75 (n=3)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	2,74	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	2,76	-	-	-	-	-	-
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	-	175 (n=1)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	-	5643 (n=18)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	5056	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	6340	-	-	-	-	-	-
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	-	213 (n=1)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	-	0,02 (n=2)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	0,02	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	0,03	-	-	-	-	-	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	-	4595 (n=12)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	4186	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	5239	-	-	-	-	-	-

4.1.2 Teilerkundungsgebiet II - Der Bereich östlich von Kirchheim

Das Teilerkundungsgebiet II beinhaltet den Stockacher und Breitloher Forst sowie zahlreiche bewirtschaftete Ackerflächen, die einen Höhenanstieg um über 30 m nach Osten beschreiben. Die Oberflächengeologie wird dominiert von quartären (Lo und Lol) und triassischen Einheiten (ku1, kuW und ku2). Über die drei abgeteufte Bohrungen zeigt sowohl der Grenzquader als auch der Obere Hauptquaderkalk eine lateral verfolgbare Ausdehnung (Abb. 19). Konträr zur Geländemorphologie fällt der OHQ nach Osten ein, wobei seine Mächtigkeit kontinuierlich abnimmt (von 8,05 nach 1,8 m).

Ki 5

Die Erkundungsbohrung Ki 5 ist westlich des Stockacher Forsts lokalisiert. Die Überdeckung des Quaderkalks zeichnet sich an diesem Bohrpunkt durch einen hohen Verbruch aus und deutet auf eine etwa mit 70° einfallende Störung hin. Der erste Schillkalk führende Horizont wurde in 11,15 m Teufe erbohrt, dies ist der sogenannte Grenzquader (0,55 m mächtig). Jedoch ist dieser aufgrund der Störungszone stark zerüttet und im Liegenden von Schluff und Schillkalk-Bruchstücken ersetzt. Direkt darunter folgt der Obere Hauptquaderkalk mit einer Mächtigkeit von 8,05 m (Abb. 18 A und B). Es lassen sich folgende Einheiten aushalten:

- (1) Oberbank, überwiegend als Rotbank ausgebildet, sehr stark porös und z. T. entfestigt (2,3 m),
- (2) Rotbank (1,0 m),
- (3) Blaubank, z. T. mit erhöhter Porosität und Übergängen zur Rotbank (1,65 m),
- (4) Blaubank mit vereinzelt lagigen Einschaltungen und Styrolithen (0,7 m),
- (5) Gelbflaserkalk, zum Liegenden ist eine Abnahme des Schillkalk-Gehalts und eine Erhöhung der Porosität zu beobachten (2,1 m),
- (6) Blaubank mit vereinzelt lagigen, tonig-mergligen Einschaltungen (0,3 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 1,45 (8,05 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1–6). Neben den typischen Absonderungen des Quaderkalks konnten auch vertikale Stiche bei 14,6 m und 17 m beobachtet werden. Die Entfestigung des ersten Schichtpakets wird auch von den ermittelten technischen Kennwerten durch eine verringerte einaxiale Druckfestigkeit bestätigt (Tab. 8).

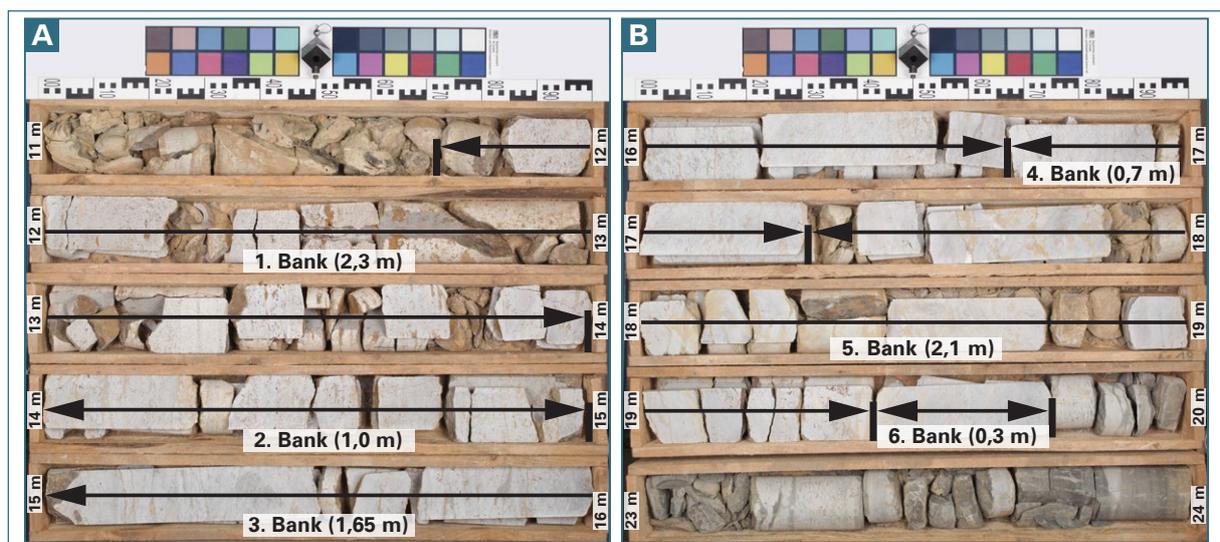


Abb. 18: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 5 (R: 4346598, H: 5503966).

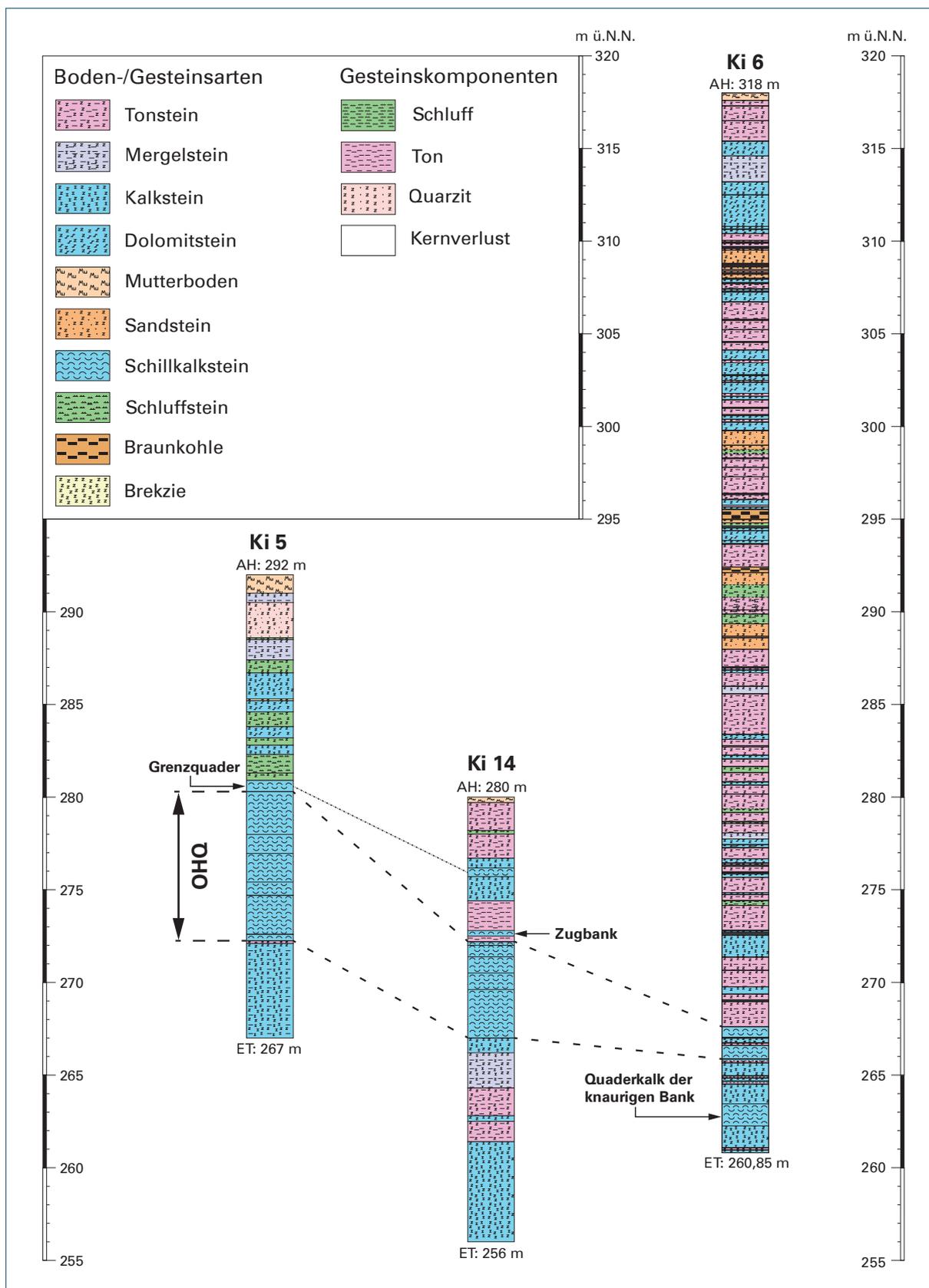


Abb. 19: Bohrprofilardarstellung im Bereich östlich von Kirchheim, Teilerkundungsgebiet II.

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 39 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 8).

Tab. 8: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 5 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	1,09 (n=35)	-	0,42 (n=5)	0,19 (n=1)	1,38 (n=8)	1,75 (n=9)	0,75 (n=12)	0,43 (n=4)
	Min.	0,19	-	0,35	-	0,65	0,83	0,32	0,17
	Max.	2,81	-	0,58	-	2,81	2,47	1,23	0,94
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	1,24 (n=35)	-	0,42 (n=5)	0,19 (n=1)	1,66 (n=8)	2,09 (n=9)	0,77 (n=12)	0,43 (n=4)
	Min.	0,19	-	0,35	-	0,70	0,89	0,32	0,17
	Max.	3,48	-	0,60	-	3,48	2,94	1,23	0,94
Sättigungswert	Ø	0,92 (n=35)	-	0,98 (n=5)	1,00 (n=1)	0,85 (n=8)	0,85 (n=9)	0,98 (n=12)	1,00 (n=4)
	Min.	0,77	-	0,97	-	0,77	0,80	0,88	1,00
	Max.	1,00	-	1,00	-	0,93	0,93	1,00	1,00
Porosität (Vol.-%)	Ø	3,19 (n=35)	-	1,14 (n=5)	0,51 (n=1)	4,25 (n=8)	5,22 (n=9)	2,04 (n=12)	1,14 (n=4)
	Min.	0,51	-	0,96	-	1,88	2,32	0,88	0,47
	Max.	8,58	-	1,60	-	8,58	7,25	3,26	2,48
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,62 (n=35)	-	2,70 (n=5)	2,72 (n=1)	2,59 (n=8)	2,51 (n=9)	2,67 (n=12)	2,71 (n=4)
	Min.	2,44	-	2,68	-	2,46	2,44	2,63	2,67
	Max.	2,72	-	2,72	-	2,67	2,61	2,71	2,73
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,70 (n=35)	-	2,73 (n=5)	2,73 (n=1)	2,70 (n=8)	2,65 (n=9)	2,73 (n=12)	2,74 (n=4)
	Min.	2,59	-	2,71	-	2,68	2,59	2,71	2,74
	Max.	2,75	-	2,75	-	2,72	2,72	2,75	2,75
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	53 (n=7)	-	27 (n=2)	-	-	16 (n=2)	95 (n=3)	59 (n=2)
	Min.	0	-	0	-	-	0	49	54
	Max.	150	-	54	-	-	32	150	65
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5236 (n=204)	-	5870 (n=30)	6138 (n=6)	4680 (n=48)	4634 (n=54)	5762 (n=66)	6309 (n=12)
	Min.	1628	-	5140	5987	1628	2823	4813	6139
	Max.	6950	-	6345	6280	5882	6950	6685	6511
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	87 (n=13)	-	44 (n=2)	139 (n=2)	57 (n=4)	50 (n=1)	122 (n=4)	117 (n=2)
	Min.	28	-	41	117	28	-	88	104
	Max.	167	-	47	161	94	-	167	130
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	1,71 (n=16)	-	0,03 (n=2)	0,04 (n=1)	0,05 (n=3)	5,69 (n=4)	0,74 (n=6)	0,01 (n=2)
	Min.	0,03	-	0,03	-	0,04	0,07	0,04	0,01
	Max.	22,00	-	0,03	-	0,05	22,00	4,00	0,02
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4385 (n=84)	-	4768 (n=18)	-	4027 (n=24)	4167 (n=18)	4598 (n=24)	5094 (n=12)
	Min.	2135	-	4211	-	3199	2135	3790	4698
	Max.	5216	-	5100	-	4545	5172	5100	5264

Ki 6

In der Nähe des Breitloher Forsts wurde die Erkundungsbohrung Ki 6 mit einer Endteufe von 57,15 m niedergebracht. Dabei wurden zwei Schillkalk-Horizonte durchteuft. Der Obere Hauptquaderkalk wurde in einer Tiefe von 50,3 m (1,8 m mächtig, Abb. 20 A und B) erbohrt; es lassen sich folgende Einheiten aushalten:

- (1) Blaubank-ähnlicher Schillkalkstein mit unregelmäßiger Einschaltung von einigen Styrolithen, ab 50,9 m sind nur noch knollige und faserige Schillkalk-Bruchstück die von scherbenartig ausgebildeten Tonsteinen umgeben sind zu beobachten (1,1 m),
- (2) Blaubank-ähnlicher Schillkalkstein, z. T. mit erhöhter Porosität und einigen Styrolithen, im Liegenden z. T. entfestigt und bei 51,85 m mit einer etwa 0,1 m mächtigen Mergelschicht (0,7 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 51,4 (1,0 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1 und 2). Neben dem OHQ wurde noch ein weiterer Schillkalkstein-Einschub nachgewiesen, der Quaderkalk der knaurigen Bank (1,3 m). Petrografisch handelt es sich dabei um einen der Blaubank ähnlichen Schillkalkstein, mit zahlreichen Styrolithen, der mehrfach von Kalkmergel durchsetzt ist.

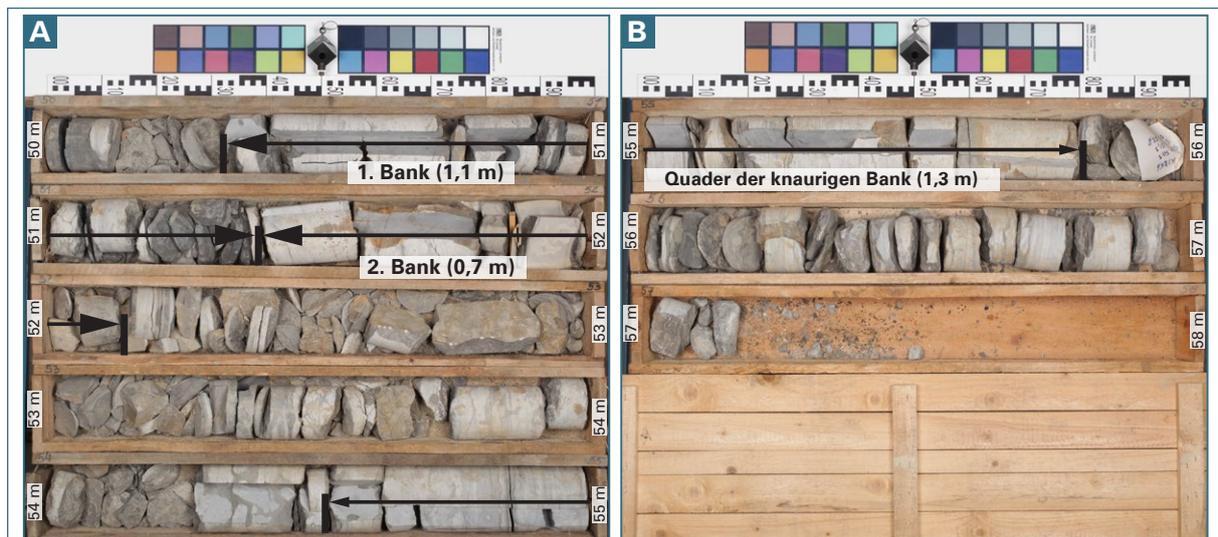


Abb. 20: Rohstoffhöffige Bereiche der Kernbohrung Ki 6 (R: 4348752, H: 5505851).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden sieben Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 9).

Tab. 9: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 6 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	0,35 (n=4)	-	0,29 (n=1)	0,36 (n=3)	-	-	-	0,18 (n=3)
	Min.	0,12	-	-	0,12	-	-	-	0,16
	Max.	0,65	-	-	0,65	-	-	-	0,21
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	0,35 (n=4)	-	0,29 (n=1)	0,37 (n=3)	-	-	-	0,18 (n=3)
	Min.	0,13	-	-	0,13	-	-	-	0,16
	Max.	0,65	-	-	0,65	-	-	-	0,22
Sättigungswert	Ø	0,99 (n=4)	-	0,99 (n=1)	0,98 (n=3)	-	-	-	0,98 (n=3)
	Min.	0,95	-	-	0,95	-	-	-	0,95
	Max.	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,00
Porosität (Vol.-%)	Ø	0,95 (n=4)	-	0,79 (n=1)	1,00 (n=3)	-	-	-	0,48 (n=3)
	Min.	0,36	-	-	0,36	-	-	-	0,43
	Max.	1,77	-	-	1,77	-	-	-	0,59
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,72 (n=4)	-	2,71 (n=1)	2,73 (n=3)	-	-	-	2,72 (n=3)
	Min.	2,71	-	-	2,72	-	-	-	2,72
	Max.	2,73	-	-	2,73	-	-	-	2,72
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,75 (n=4)	-	2,73 (n=1)	2,75 (n=3)	-	-	-	2,73 (n=3)
	Min.	2,73	-	-	2,74	-	-	-	2,73
	Max.	2,78	-	-	2,78	-	-	-	2,74
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	129 (n=3)	-	140 (n=1)	118 (n=1)	-	-	-	54 (n=1)
	Min.	118	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	140	-	-	-	-	-	-	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5987 (n=24)	-	6144 (n=6)	5935 (n=18)	-	-	-	6395 (n=18)
	Min.	5257	-	6019	5257	-	-	-	6179
	Max.	6511	-	6259	6511	-	-	-	6619
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	93 (n=2)	-	82 (n=1)	104 (n=1)	-	-	-	-
	Min.	82	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	104	-	-	-	-	-	-	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	0,07 (n=2)	-	-	0,07 (n=2)	-	-	-	0,00 (n=2)
	Min.	0,04	-	-	0,04	-	-	-	0,00
	Max.	0,09	-	-	0,09	-	-	-	0,00
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	3873 (n=12)	-	-	3873 (n=12)	-	-	-	5222 (n=12)
	Min.	2561	-	-	2561	-	-	-	4946
	Max.	4871	-	-	4871	-	-	-	5369

Ki 14

Am Stockacher Forst wurde die Erkundungsbohrung Ki 14 mit einer Endteufe von 24 m niedergebracht. Es wurden drei Schillkalk führende Einheiten durchteuft. Unter einer Überdeckung von 3,55 m wurde der Grenzquader (0,65 m) erbohrt, gefolgt von der Zugbank (0,3 m) im Ostracodenton (in einer Teufe von 7,2 m). Der Obere Hauptquaderkalk folgt 0,8 m tiefer und besitzt eine Mächtigkeit von 5,1 m (Abb. 21 A und B). Er lässt sich in folgende Einheiten untergliedern:

- (1) Oberbank, z. T. gelbgeflasert (0,2 m),
- (2) Kernstein im Übergang zur Rotbank (0,6 m),
- (3) Schillkalkstein, relativ dicht mit gelben tonig-mergligen Einschaltungen in lagiger und fleckiger Ausbildung (1,05 m),
- (4) Kernstein, z. T. mit gelben tonig-mergligen Einschaltungen, im Liegenden dichter werdend (0,8 m),
- (5) Gelbflaserkalk (2,45 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 2,89 (2,7 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1–4). Innerhalb der gelbgeflaserten Einheiten im OHQ konnten einige Stylolithen beobachtet werden, so z. B. bei 8,90 m Teufe.

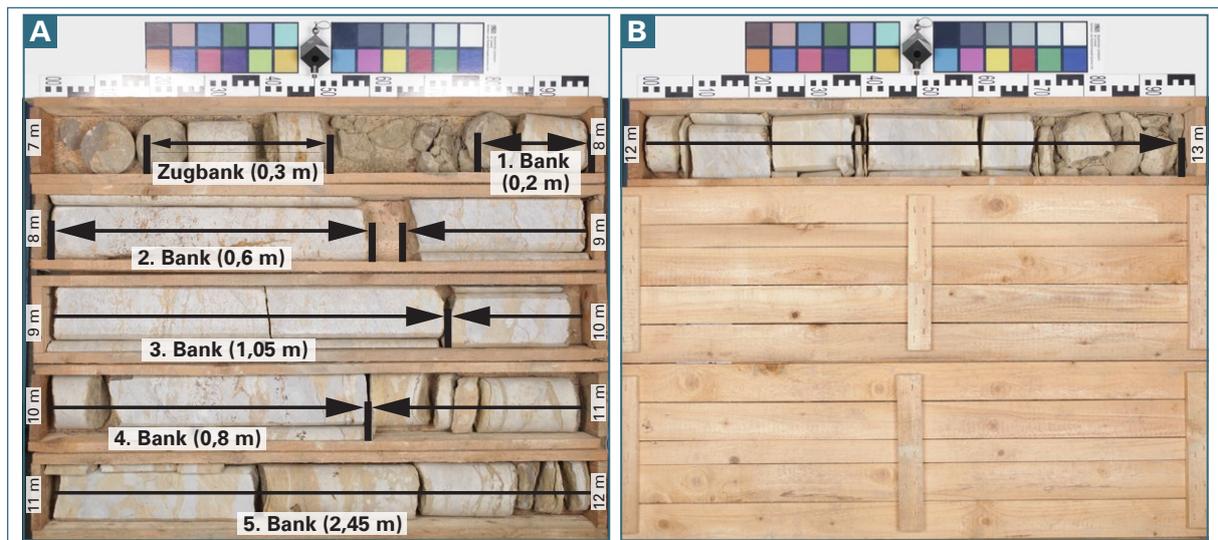


Abb. 21: Rohstoffhöffige Bereiche der Kernbohrung Ki 14 (R: 4347159, H: 5503865).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 23 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 10).

Tab. 10: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 14 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	0,90 (n=23)	-	-	-	0,69 (n=2)	1,91 (n=4)	0,69 (n=17)	-
	Min.	0,26	-	-	-	0,66	1,10	0,26	-
	Max.	2,71	-	-	-	0,71	2,71	1,47	-
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	0,97 (n=23)	-	-	-	0,72 (n=2)	2,32 (n=4)	0,69 (n=17)	-
	Min.	0,26	-	-	-	0,68	1,51	0,26	-
	Max.	3,48	-	-	-	0,75	3,48	1,47	-
Sättigungswert	Ø	0,96 (n=23)	-	-	-	0,97 (n=2)	0,82 (n=4)	1,00 (n=17)	-
	Min.	0,73	-	-	-	0,95	0,73	0,99	-
	Max.	1,00	-	-	-	0,98	0,94	1,00	-
Porosität (Vol.-%)	Ø	2,53 (n=23)	-	-	-	1,92 (n=2)	5,83 (n=4)	1,83 (n=17)	-
	Min.	0,69	-	-	-	1,83	3,91	0,69	-
	Max.	8,51	-	-	-	2,01	8,51	3,87	-
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,65 (n=23)	-	-	-	2,67 (n=2)	2,53 (n=4)	2,68 (n=17)	-
	Min.	2,44	-	-	-	2,66	2,44	2,62	-
	Max.	2,72	-	-	-	2,68	2,58	2,72	-
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,72 (n=23)	-	-	-	2,73 (n=2)	2,69 (n=4)	2,73 (n=17)	-
	Min.	2,67	-	-	-	2,72	2,67	2,71	-
	Max.	2,76	-	-	-	2,73	2,71	2,76	-
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	143 (n=4)	-	-	-	-	44 (n=2)	243 (n=2)	-
	Min.	10	-	-	-	-	10	97	-
	Max.	389	-	-	-	-	77	389	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5781 (n=138)	-	-	-	5261 (n=12)	5346 (n=24)	5945 (n=102)	-
	Min.	4192	-	-	-	4667	4192	4944	-
	Max.	6510	-	-	-	5443	6024	6510	-
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	108 (n=8)	-	-	-	70 (n=1)	54 (n=1)	123 (n=6)	-
	Min.	54	-	-	-	-	-	97	-
	Max.	155	-	-	-	-	-	155	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	2,15 (n=12)	-	-	-	0,02 (n=1)	0,09 (n=3)	3,19 (n=8)	-
	Min.	0,02	-	-	-	-	0,03	0,04	-
	Max.	25,00	-	-	-	-	0,17	25,00	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4314 (n=66)	-	-	-	4445 (n=12)	4722 (n=12)	4145 (n=42)	-
	Min.	2072	-	-	-	3976	4302	2072	-
	Max.	5402	-	-	-	4800	5155	5402	-

4.1.3 Teilerkundungsgebiet III - Der Bereich westlich von Kirchheim

Das Teilerkundungsgebiet III liegt westlich von Kirchheim in der Peripherie der lokalen Erhebungen des Bühlrain (337 m) und des Poppberg (320 m). Die Oberflächengeologie wird dominiert von quaritären (Lo(I)) und triassischen (ku1, mo3 und mo3q) Ablagerungen. Der Quaderkalk streicht nur an der östlichen Flanke des Bühlrain in einem schmalen Streifen aus. Die Mächtigkeit des Quaderkalks variiert nur geringfügig (zwischen 5,5 und 6,1 m) in den Bohrungen Ki 4, Ki 8 und Ki 16 (Abb. 23). Die Bohrung Ki 3 wurde im unteren Teil des Ausstrichs des Oberen Hauptquaderkalks niedergebracht und zeigt, dass besonders oberflächennahe Vorkommen stark von Verkarstung betroffen sein können.

Ki 3

In einer sanften Senke etwas südlich des Poppberg wurde die Erkundungsbohrung Ki 3 mit einer Endteufe von 13,7 m niedergebracht. Der Obere Hauptquaderkalk ist an dieser Stelle nur unvollständig vorhanden und setzt erst nach 7,3 m Fließerde ein. Die dann folgenden 1,2 m des OHQ lassen aufgrund der geringen Güte des Bohrkleins keine genauere Beschreibung zu. Jedoch deuten sie darauf hin, dass es sich dabei nur um den unteren Teil der Abfolge handelt und der obere Teil durch Verkarstungserscheinungen weggelöst wurde. Diese Art der Beeinflussung des OHQ tritt häufiger auf und kann vielerorts in unterschiedlicher Form beobachtet werden (Abb. 22 A und B).

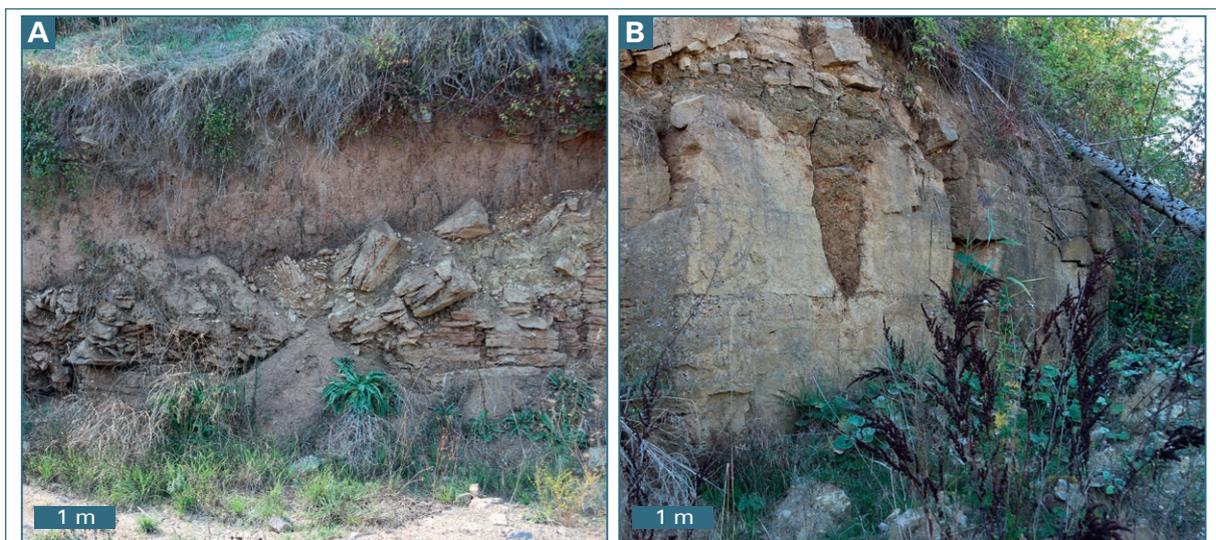


Abb. 22: Beispiele für Verkarstungserscheinungen im Untersuchungsgebiet: (A) Verkarstung im Quaderkalk der ein Nachbrechen oder Nachrutschen des überlagernden Materials verursachte, (B) mit braunem Verwitterungslehm gefüllte Karstschlotte.

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Aufgrund der verwitterten Natur des erbohrten Quaderkalks wurde hier auf eine gesteinsphysikalische Untersuchung verzichtet.

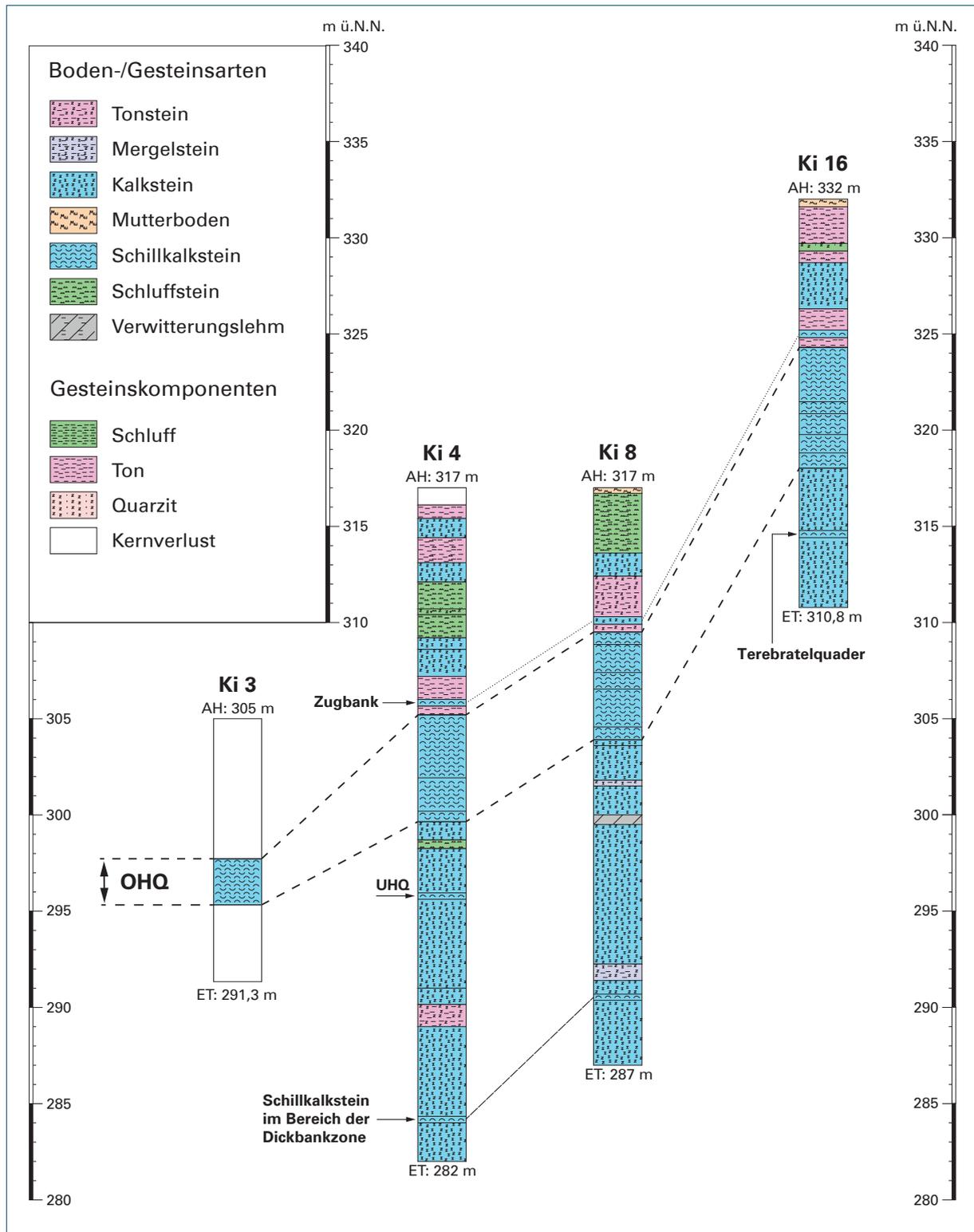


Abb. 23: Bohrprofilardarstellung im Bereich östlich von Kirchheim, Teilerkundungsgebiet II.

Ki 4

Die Erkundungsbohrung Ki 4 wurde am Popsberg mit einer Endteufe von 35 m niedergebracht. Es wurden vier Schillkalk-Horizonte erbohrt. Unter einer Überdeckung von 11 m wird die erste dieser Einheiten angetroffen, die Zugbank im Ostracodenton (0,35 m). Ab 11,8 m folgt der Obere Hauptquaderkalk mit einer Mächtigkeit von 5,6 m, der sich in folgende Einheiten unterteilen lässt (Abb. 24 A und B):

- (1) Kernstein ähnlicher Schillkalk, z. T. mit feinen Lagen aus tonig-mergligem Material (3,1 m),
- (2) Gelbflaserkalk, z. T. mit Übergängen zur Blaubank und mit Stylolithen (1,8 m),
- (3) Kernstein-ähnlicher Schillkalk (0,7 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 3,1 (3,8 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1 und 3). Unter dem OHQ stehen noch zwei weitere Schillkalk führende Horizonte an: (1) zwischen 21,05 und 21,25 m in Form des Unteren Hauptquaderkalks innerhalb der Plattenkalkfolge 6 und (2) ein Schillkalkeinschub innerhalb der Dickbankzone zwischen 32,65 und 33,00 m.

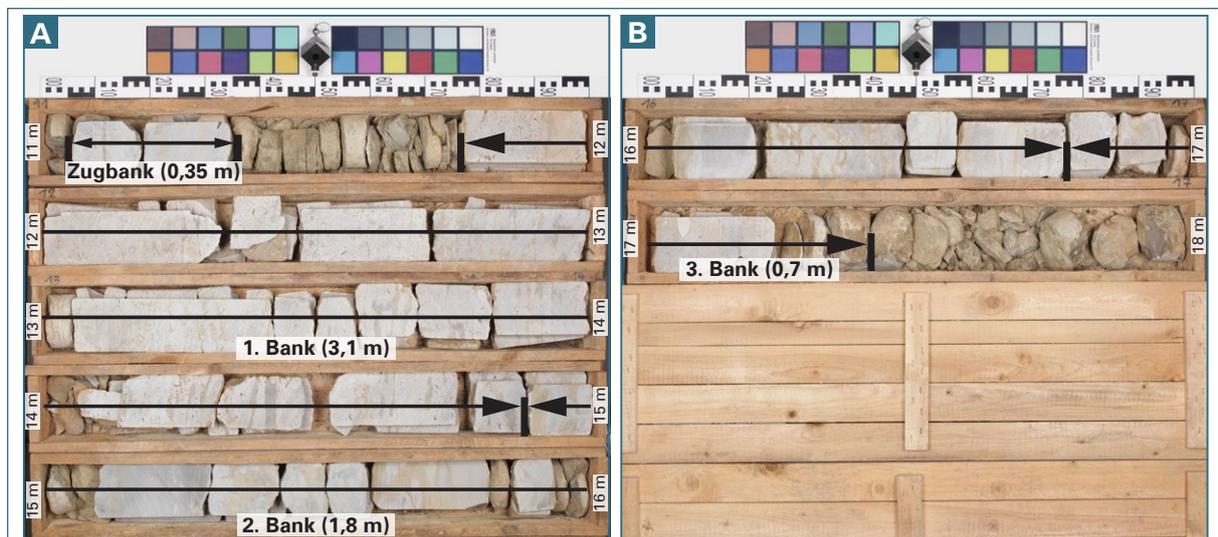


Abb. 24: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 4 (R: 4343899, H: 5503693).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 36 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 11).

Tab. 11: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 4 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	1,03 (n=30)	0,36 (n=1)	-	0,44 (n=5)	1,12 (n=13)	1,84 (n=2)	1,06 (n=10)	0,17 (n=5)
	Min.	0,06	-	-	0,06	0,75	1,44	0,51	0,10
	Max.	3,24	-	-	1,05	2,02	2,23	3,24	0,22
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	1,13 (n=30)	0,36 (n=1)	-	0,45 (n=5)	1,29 (n=13)	2,20 (n=2)	1,06 (n=10)	0,17 (n=5)
	Min.	0,07	-	-	0,07	0,75	1,64	0,51	0,10
	Max.	3,25	-	-	1,08	2,52	2,76	3,25	0,20
Sättigungswert	Ø	0,94 (n=30)	1,00 (n=1)	-	0,96 (n=5)	0,89 (n=13)	0,85 (n=2)	1,00 (n=10)	1,00 (n=5)
	Min.	0,64	-	-	0,88	0,64	0,81	0,98	1,00
	Max.	1,00	-	-	1,00	1,00	0,88	1,00	1,00
Porosität (Vol.-%)	Ø	2,94 (n=30)	0,97 (n=1)	-	1,21 (n=5)	3,34 (n=13)	5,52 (n=2)	2,78 (n=10)	0,46 (n=5)
	Min.	0,19	-	-	0,19	1,98	4,18	1,37	0,28
	Max.	8,26	-	-	2,84	6,3	6,85	8,26	0,55
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,64 (n=30)	2,72 (n=1)	-	2,70 (n=5)	2,61 (n=13)	2,52 (n=2)	2,66 (n=10)	2,73 (n=5)
	Min.	2,48	-	-	2,61	2,5	2,48	2,54	2,70
	Max.	2,76	-	-	2,76	2,66	2,55	2,68	2,74
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,72 (n=30)	2,75 (n=1)	-	2,73 (n=5)	2,70 (n=13)	2,66 (n=2)	2,74 (n=10)	2,74 (n=5)
	Min.	2,66	-	-	2,69	2,66	2,66	2,72	2,72
	Max.	2,8	-	-	2,8	2,74	2,66	2,77	2,76
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	209 (n=8)	-	-	11 (n=1)	29 (n=2)	11 (n=1)	587 (n=2)	11 (n=2)
	Min.	0	-	-	-	0	-	75	0
	Max.	1099	-	-	-	58	-	1099	22
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5528 (n=180)	5855 (n=6)	-	6199 (n=30)	5353 (n=78)	5318 (n=12)	5462 (n=60)	6111 (n=30)
	Min.	2059	5714	-	5455	4132	4929	2059	5654
	Max.	6583	6150	-	6583	6345	5689	6284	6511
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	98 (n=14)	-	-	137 (n=2)	71 (n=4)	116 (n=1)	100 (n=7)	120 (n=3)
	Min.	23	-	-	99	48	-	23	33
	Max.	203	-	-	176	111	-	203	230
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	0,05 (n=16)	0,03 (n=1)	-	0,01 (n=3)	0,06 (n=8)	0,08 (n=1)	0,03 (n=4)	0,01 (n=2)
	Min.	0,00	-	-	0,00	0,04	-	0,01	0,00
	Max.	0,12	-	-	0,01	0,12	-	0,06	0,02
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4619 (n=96)	4773 (n=6)	-	5236 (n=18)	4416 (n=48)	4410 (n=6)	4800 (n=24)	5175 (n=12)
	Min.	3166	4529	-	4946	3166	4255	3532	5055
	Max.	5449	5022	-	5449	5318	4520	5283	5306

Ki 8

Südlich des Bühlrains ist die Erkundungsbohrung Ki 8 lokalisiert (Endteufe 30,0 m). Es wurden drei Schillkalk führende Horizonte erbohrt: (1) die Zugbank im Ostracodenton (0,4 m), (2) der Obere Hauptquaderkalk (5,6 m) und (3) ein weiterer Schillkalkeinschub im Bereich der Dickbankzone (0,45 m). Der OHQ gliedert sich in folgende Einheiten (Abb. 25 A und B):

- (1) Schillkalkstein, mit zahlreichen gelblich-orangen, tonig-mergligen Einschaltungen (0,65 m),
- (2) Blaubank ähnlicher Schillkalkstein, z. T. mit feinen gelben tonig-mergligen Einschaltungen und zahlreichen Stylolithen (1,4 m),
- (3) Schillkalkstein, mit zahlreichen orange-gelblichen, tonig-mergligen Einschaltungen (0,85 m),
- (4) Gelbfaserkalk, mit einem 0,1 m mächtigen Schillkalkeinschub zwischen 11,5 und 11,6 m (2,0 m),
- (5) Rotbank-ähnlicher Schillkalkstein, mit erhöhter Porosität, der im Liegenden vermehrt feine gelbe Lagen ausgebildet hat (0,6 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 2,28 (3,5 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1–3 und 5). Der 13,4 m unter dem OHQ folgende Schillkalk-Schub im Bereich der Dickbankzone, ist als Rotbank, die zum Liegenden dichter wird, ausgebildet.

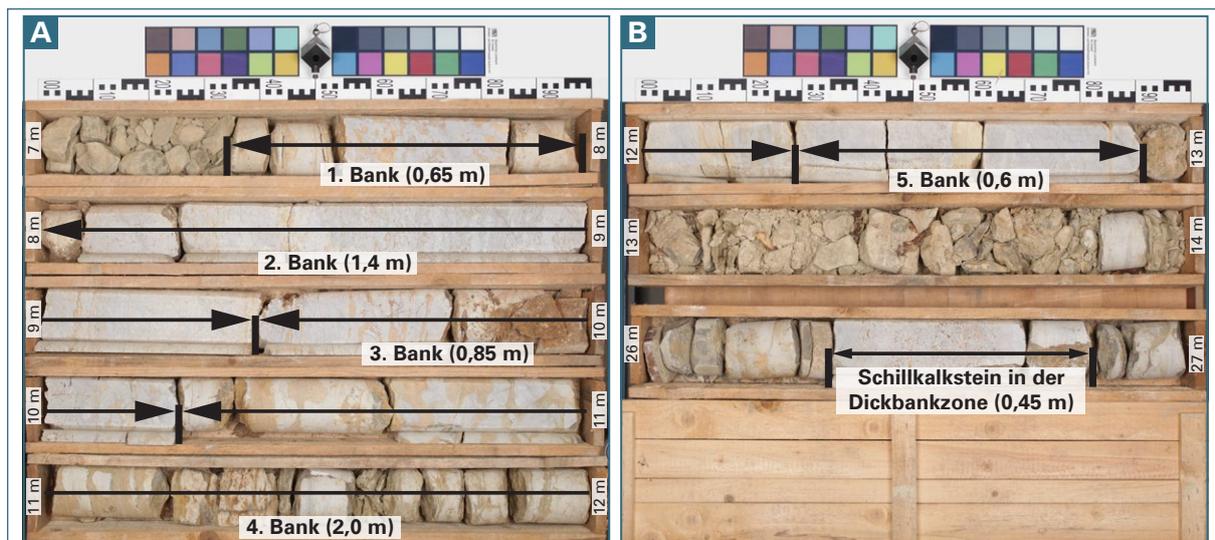


Abb. 25: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 8 (R: 4344042, H: 5504759).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 33 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 12).

Tab. 12: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 8 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	0,88 (n=31)	-	0,41 (n=10)	-	1,28 (n=2)	1,06 (n=3)	1,10 (n=16)	1,59 (n=2)
	Min.	0,16	-	0,16	-	1,16	0,83	0,32	1,55
	Max.	3,02	-	0,70	-	1,39	1,29	3,02	1,62
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	0,90 (n=31)	-	0,41 (n=10)	-	1,39 (n=2)	1,11 (n=3)	1,10 (n=16)	2,47 (n=2)
	Min.	0,17	-	0,17	-	1,21	0,86	0,32	2,44
	Max.	3,03	-	0,70	-	1,57	1,37	3,03	2,49
Sättigungswert	Ø	0,99 (n=31)	-	1,00 (n=10)	-	0,92 (n=2)	0,96 (n=3)	1,00 (n=16)	0,64 (n=2)
	Min.	0,89	-	0,98	-	0,89	0,95	0,99	0,63
	Max.	1,00	-	1,00	-	0,95	0,97	1,00	0,65
Porosität (Vol.-%)	Ø	2,34 (n=31)	-	1,10 (n=10)	-	3,61 (n=2)	2,90 (n=3)	2,86 (n=16)	6,17 (n=2)
	Min.	0,45	-	0,45	-	3,17	2,26	0,85	6,11
	Max.	7,55	-	1,85	-	4,05	3,56	7,55	6,23
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,65 (n=31)	-	2,69 (n=10)	-	2,59 (n=2)	2,61 (n=3)	2,64 (n=16)	2,50 (n=2)
	Min.	2,48	-	2,66	-	2,57	2,59	2,48	2,49
	Max.	2,72	-	2,72	-	2,61	2,63	2,70	2,50
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,71 (n=31)	-	2,72 (n=10)	-	2,69 (n=2)	2,69 (n=3)	2,72 (n=16)	2,66 (n=2)
	Min.	2,67	-	2,71	-	2,68	2,67	2,67	2,66
	Max.	2,74	-	2,74	-	2,69	2,70	2,74	2,66
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	197 (n=9)	-	136 (n=3)	-	-	21 (n=1)	268 (n=5)	-
	Min.	21	-	75	-	-	-	32	-
	Max.	956	-	203	-	-	-	956	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5778 (n=198)	-	5982 (n=62)	-	5652 (n=12)	5611 (n=18)	5755 (n=94)	5277 (n=12)
	Min.	3819	-	5040	-	5432	5181	3819	4782
	Max.	6759	-	6759	-	6024	6087	6667	5665
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	100 (n=10)	-	124 (n=5)	-	-	84 (n=1)	74 (n=4)	50 (n=2)
	Min.	23	-	51	-	-	-	23	38
	Max.	201	-	201	-	-	-	150	62
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	0,55 (n=17)	-	0,03 (n=5)	-	0,04 (n=2)	0,03 (n=1)	1,01 (n=9)	-
	Min.	0,00	-	0,00	-	0,03	-	0,03	-
	Max.	4,93	-	0,07	-	0,04	-	4,93	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4852 (n=102)	-	4590 (n=30)	-	4798 (n=12)	4632 (n=6)	4610 (n=54)	-
	Min.	1726	-	2659	-	4651	4291	1726	-
	Max.	5506	-	5506	-	5000	4852	5355	-

Ki 16

Nördlich des Bühlrains wurde die Erkundungsbohrung Ki 16 mit einer Endteufe von 21,2 m niedergebracht. Es wurden drei Schillkalk führende Horizonte durchteuft. Die Hangenste dieser Einheiten ist die Zugbank (0,4 m) im Ostracodenton. Unter diesem folgt der Obere Hauptquaderkalk mit einer Mächtigkeit von 6,1 m, der sich in folgende Einheiten unterteilen lässt (Abb. 26 A und B):

- (1) Rotbank, z. T. mit vereinzelt gelben Einschaltungen und zahlreichen rostfarbenen Poren (2,7 m),
- (2) Schillkalkstein, z. T. mit erhöhter Porosität und zahlreichen gelben Einschaltungen (0,6 m),
- (3) Rotbank, stellenweise mit geringer Festigkeit (1,1 m),
- (4) Gelbflaserkalk (0,9 m),
- (5) Schillkalkstein, z. T. mit entfestigten, gelblich-grauen Zwischenlagen (0,8 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 1,75 (4,4 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1–3). Ab einer Teufe von 17,25 m wurde der Terebratelquader, ein dichter Schillkalkstein, ähnlich der Blaubank, erbohrt (0,25 m).

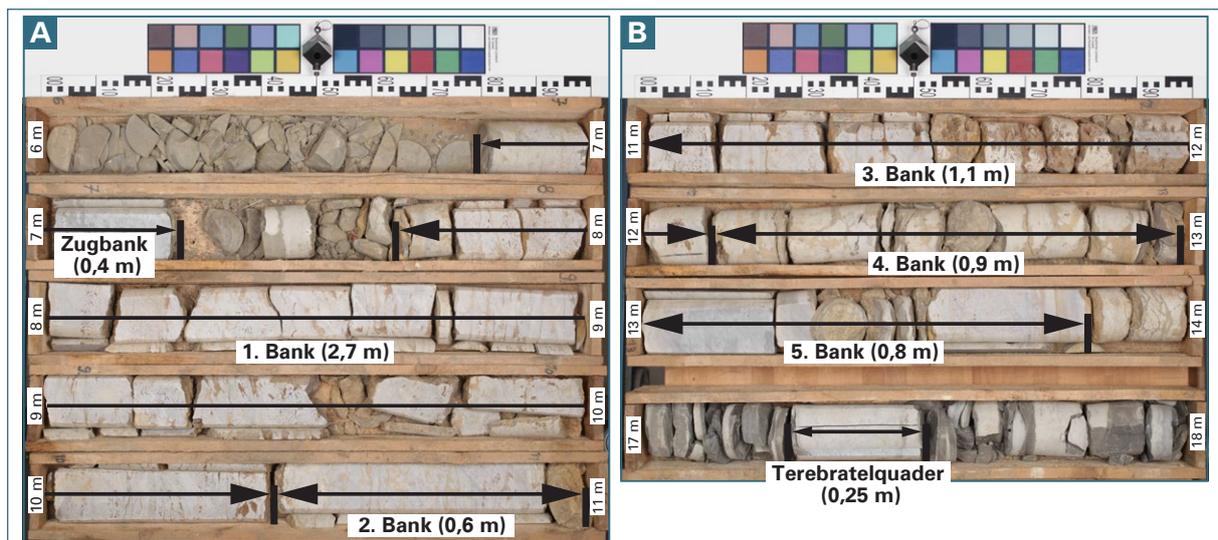


Abb. 26: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 16 (R: 4343560, H: 5505324).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 27 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 13).

Tab. 13: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 16 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	1,32 (n=23)	0,39 (n=23)	-	-	0,86 (n=2)	1,46 (n=15)	1,10 (n=6)	-
	Min.	0,69	0,21	-	-	0,85	0,69	0,85	-
	Max.	2,72	0,71	-	-	0,87	2,72	1,45	-
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	1,61 (n=23)	0,40 (n=23)	-	-	0,98 (n=2)	1,86 (n=15)	1,19 (n=6)	-
	Min.	0,81	0,21	-	-	0,95	0,81	0,86	-
	Max.	3,38	0,71	-	-	1,01	3,38	1,81	-
Sättigungswert	Ø	0,84 (n=23)	1,00 (n=4)	-	-	0,88 (n=2)	0,79 (n=15)	0,94 (n=6)	-
	Min.	0,66	0,98	-	-	0,86	0,66	0,80	-
	Max.	1,00	1,00	-	-	0,89	0,90	1,00	-
Porosität (Vol.-%)	Ø	4,12 (n=23)	1,06 (n=23)	-	-	2,58 (n=2)	4,72 (n=15)	3,14 (n=6)	-
	Min.	2,14	0,56	-	-	2,52	2,14	2,30	-
	Max.	8,23	1,89	-	-	2,64	8,23	4,64	-
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,58 (n=23)	2,73 (n=23)	-	-	2,63 (n=2)	2,56 (n=15)	2,64 (n=6)	-
	Min.	2,43	2,72	-	-	2,62	2,43	2,56	-
	Max.	2,66	2,73	-	-	2,63	2,62	2,66	-
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,69 (n=23)	2,76 (n=23)	-	-	2,70 (n=2)	2,68 (n=15)	2,72 (n=6)	-
	Min.	2,63	2,74	-	-	2,69	2,63	2,68	-
	Max.	2,74	2,73	-	-	2,70	2,72	2,74	-
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	117 (n=1)	117 (n=1)	-	-	-	-	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4746 (n=138)	6119 (n=24)	-	-	5096 (n=12)	4464 (n=90)	5334 (n=36)	-
	Min.	1605	5430	-	-	4180	1605	2944	-
	Max.	6264	6599	-	-	6264	5891	6174	-
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	86 (n=8)	208 (n=2)	-	-	65 (n=3)	78 (n=2)	112 (n=3)	-
	Min.	34	206	-	-	34	59	96	-
	Max.	139	210	-	-	82	97	139	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	0,05 (n=11)	0,06 (n=2)	-	-	0,02 (n=1)	0,07 (n=7)	0,03 (n=3)	-
	Min.	0,02	0,03	-	-	-	0,04	0,02	-
	Max.	0,10	0,10	-	-	-	0,10	0,03	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	3972 (n=72)	4494 (n=12)	-	-	4517 (n=6)	3650 (n=42)	4540 (n=24)	-
	Min.	1451	3191	-	-	3603	1451	3511	-
	Max.	5188	5000	-	-	5188	4808	5010	-

4.1.4 Teilerkundungsgebiet IV - Der Bereich nördlich von Kirchheim

Das Teilerkundungsgebiet IV grenzt nördlich an das Abbaugelände des Kuacker und Sellenberger Quaderkalks an. In diesem Bereich ist eine morphologisch reich gestaltete Höhenlage zwischen den beiden Flusstälern des Rim- und Moosbaches ausgebildet, an dem der Obere Hauptquaderkalk z. T. ausstreicht (vergleiche dazu die geologische Karte Abb. 6). Die Oberflächengeologie wird dominiert von quartären (Lol) und triassischen (ku1, mo3 und mo3Q) Ablagerungen. Neben zahlreichen aktiven und auflässigen Steinbrüchen ist das Erkundungsgebiet durch den Forst „Soldners Viertel“ und zahlreiche bewirtschaftete Ackerflächen zu charakterisieren. In den fünf abgeteufte Bohrungen innerhalb dieses Gebiets sind vier Schillkalk-Horizonte erbohrt worden: (1) die Zugbank, (2) der Obere Hauptquaderkalk, (3) der Quaderkalk der knarigen Bank und (4) der Terebratelquader. Wobei nur (2) und (3) eine über mehrere Bohrkerne verfolgbare, laterale Ausdehnung zeigen (Abb. 28). Die erbohrte Mächtigkeit der Überdeckung bleibt in etwa gleich, wenngleich es starke Schwankungen gibt (je nach Bohransatzpunkt). Jedoch verringert sich die Mächtigkeit des OHQ in Richtung Kleinrinderfeld (Ki 2: 5,7 m vs. Ki 12: 4,6 m).

Ki 7

Die Kernbohrung Ki 7 wurde am Rosenberg niedergebracht. Unter 3,8 m Abraum wurde die Zugbank (0,3 m) und unter 4,4 m Abraum der OHQ angetroffen. Dieser besitzt eine Mächtigkeit von 4,40 m (Abb. 27). Seine Einheiten sind wie folgt zu charakterisieren:

- (1) Oberbank, überwiegend hohe Porosität und als Rotbank ausgebildet (0,55 m),
- (2) Schillkalkstein, relativ dicht mit tonig-mergligen Einschaltungen (0,25 m),
- (3) Rotbank ähnlicher Schillkalkstein mit feinen rostfarbenen Einschaltungen und Styloolithen (0,75 m),
- (4) Blaubank (0,1 m),
- (5) Rotbank ähnlicher Schillkalkstein mit rostfarbenen Einschaltungen und Styloolithen (1,0 m),
- (6) Gelbflaserkalk mit deutlichem Kernverlust (1,75 m).

Mit zunehmender Tiefe nehmen Gestalt und Häufigkeit der tonig-mergligen Einschaltung zu, so dass ab 7,1 m die Gesteinsqualität drastisch abnimmt. Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 1,63 (2,7 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1–5). In Analogie zu Kernbohrung Ki 1, wurde auch an diesem Punkt der Terebratelquader erbohrt; er besitzt hier eine Mächtigkeit von 0,3 m (nicht abgebildet).

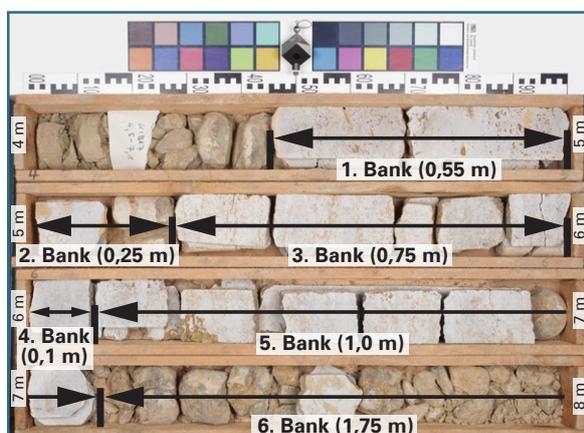


Abb. 27: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 7 (R: 4344589, H: 5506008).

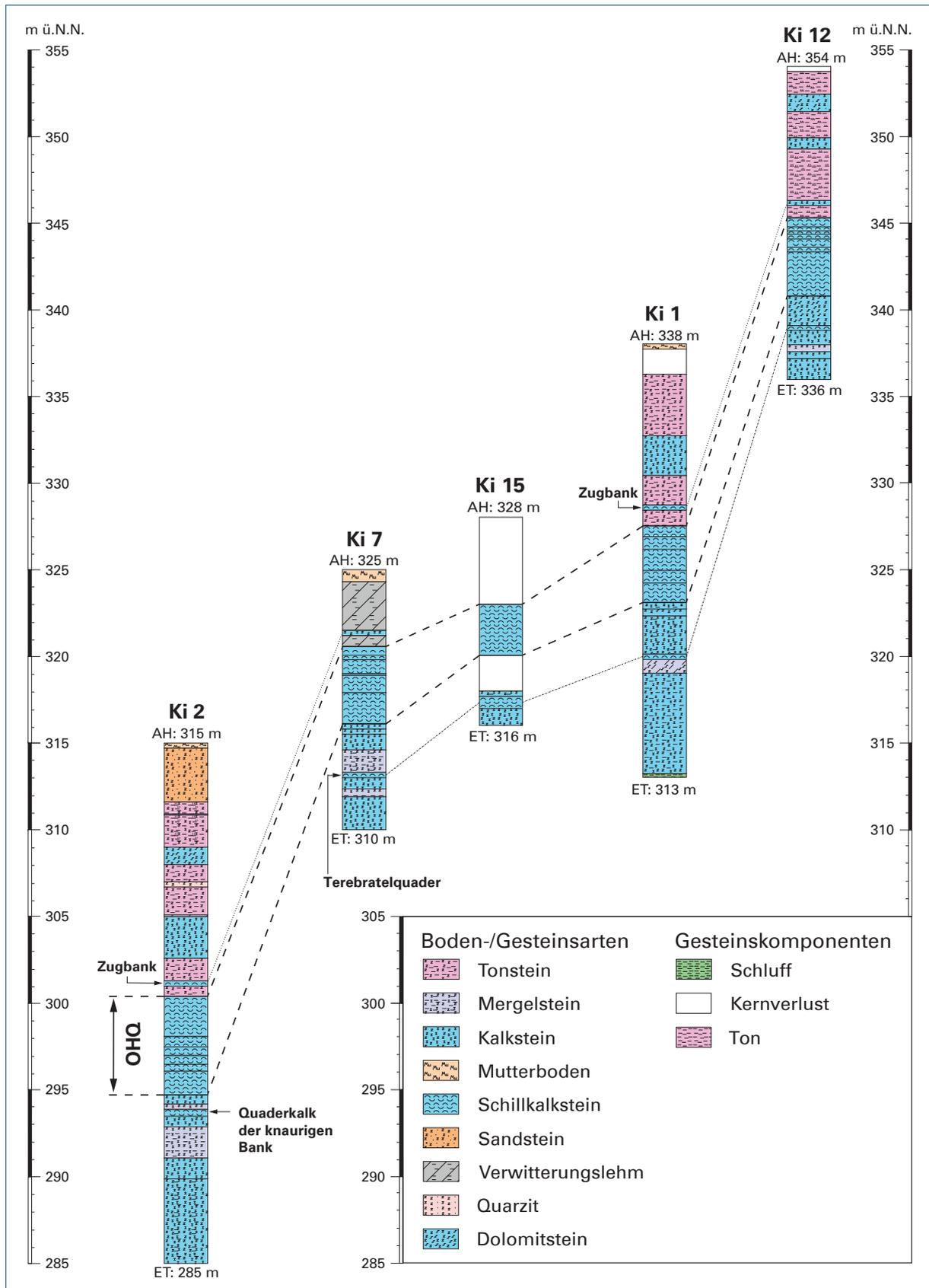


Abb. 28: Bohrprofilardarstellung des Teilerkundungsgebiets IV.

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 18 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 14).

Tab. 14: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 7 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	0,71 (n=18)	-	0,56 (n=3)	0,28 (n=1)	-	1,50 (n=5)	0,37 (n=9)	-
	Min.	0,26	-	0,42	-	-	0,87	0,26	-
	Max.	2,10	-	0,73	-	-	2,10	0,46	-
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	0,83 (n=18)	-	0,57 (n=3)	0,28 (n=1)	-	1,91 (n=5)	0,38 (n=9)	-
	Min.	0,27	-	0,43	-	-	1,00	0,27	-
	Max.	2,97	-	0,75	-	-	2,97	0,47	-
Sättigungswert	Ø	0,93 (n=18)	-	0,98 (n=3)	1,00 (n=1)	-	0,80 (n=5)	0,98 (n=9)	-
	Min.	0,71	-	0,97	-	-	0,71	0,93	-
	Max.	1,00	-	0,98	-	-	0,89	1,00	-
Porosität (Vol.-%)	Ø	2,12 (n=18)	-	1,52 (n=3)	0,75 (n=1)	-	4,78 (n=5)	1,00 (n=9)	-
	Min.	0,72	-	1,17	-	-	2,59	0,72	-
	Max.	7,30	-	1,98	-	-	7,30	1,25	-
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,64 (n=18)	-	2,67 (n=3)	2,69 (n=1)	-	2,51 (n=5)	2,69 (n=9)	-
	Min.	2,45	-	2,65	-	-	2,45	2,68	-
	Max.	2,7	-	2,68	-	-	2,57	2,70	-
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,69 (n=18)	-	2,71 (n=3)	2,71 (n=1)	-	2,64 (n=5)	2,72 (n=9)	-
	Min.	2,61	-	2,70	-	-	2,61	2,71	-
	Max.	2,73	-	2,72	-	-	2,66	2,73	-
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	52 (n=6)	-	86 (n=1)	-	-	11 (n=1)	78 (n=4)	-
	Min.	11	-	-	-	-	-	43	-
	Max.	97	-	-	-	-	-	97	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5809 (n=108)	-	6233 (n=18)	5287 (n=6)	-	5258 (n=30)	6033 (n=54)	-
	Min.	3915	-	5794	5027	-	3915	5154	-
	Max.	6619	-	6518	5590	-	5974	6619	-
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	81 (n=8)	-	144 (n=1)	-	-	31 (n=2)	89 (n=5)	-
	Min.	28	-	-	-	-	28	49	-
	Max.	170	-	-	-	-	35	170	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	0,06 (n=9)	-	0,03 (n=2)	0,03 (n=1)	-	0,10 (n=3)	0,05 (n=4)	-
	Min.	0,03	-	0,03	-	-	0,06	0,04	-
	Max.	0,17	-	0,03	-	-	0,17	0,07	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4362 (n=60)	-	4956 (n=12)	3501 (n=6)	-	4433 (n=18)	4226 (n=24)	-
	Min.	3213	-	3543	3213	-	3614	3262	-
	Max.	5326	-	5326	4234	-	5056	5114	-

Ki 1

Am Sellenberger Hof wurde die Erkundungsbohrung Ki 1 niedergebracht. Unter einer Überdeckung von 10,5 m wurde der Obere Hauptquaderkalk erbohrt. Über diesem ist eine etwa 0,3 m mächtige Zugbank aus Schillkalk ausgebildet. Der OHQ weist eine Mächtigkeit von 4,3 m auf und ist überwiegend als Blaubank und Kernstein vertreten. Er gliedert sich in fünf unterschiedlich mächtige Einheiten (Abb. 29 A und B):

- (1) Oberbank, bestehend aus überwiegend kernigem Schillkalkstein (0,6 m),
- (2) Kernstein (0,7 m),
- (3) Blaubank (1,2 m),
- (4) Kernstein ähnlicher Schillkalk mit gelben tonig-mergligen Einschaltungen, die fleckige und lagige Ausbildungen zeigen (0,7 m),
- (5) Gelbflaserkalk (1,1 m).

Mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Anzahl der auftretenden Stylolithen (besonders in der Blaubank und der gelbgefaserten Einheit im Liegenden des OHQ). Zusätzlich tritt bei 11,8 m im Bohrkern ein schräg verlaufender Riss (Stich) über die komplette Breite auf (Abb. 29 C). Darunter folgt ein Horizont mit stark verringertem Schillgehalt, in dem, mit zunehmender Tiefe, der Grad und die Anzahl der gelben Einschaltungen steigt. Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 3,83 (3,2 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1–4). Unter dem OHQ steht eine weitere Schillkalk-Bank an, der Terebratelquader (0,2 m mächtig; Abb. 29 B).

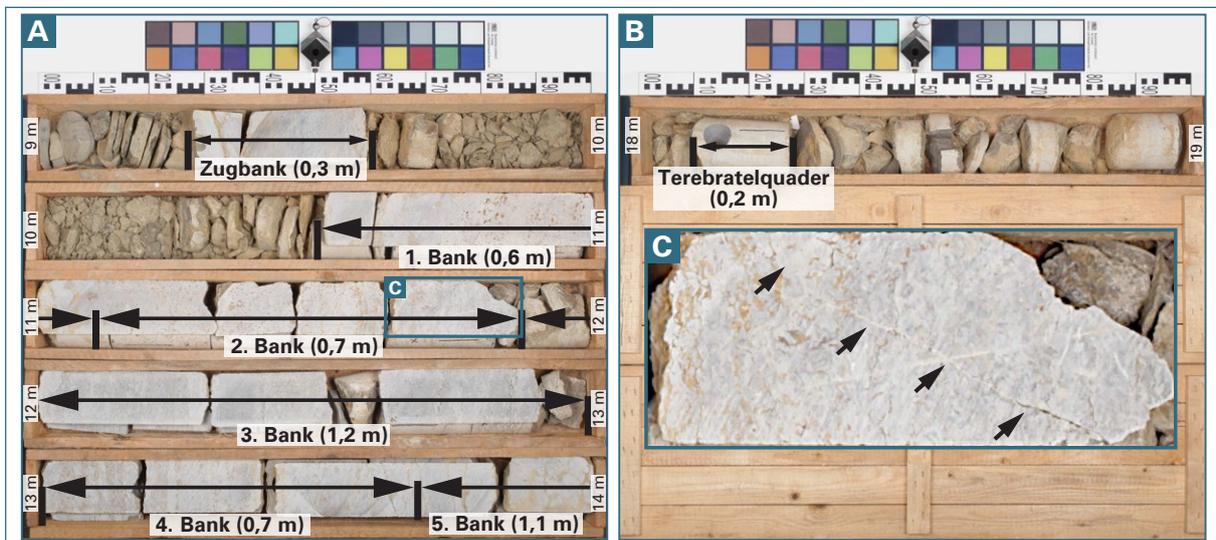


Abb. 29: Rohstoffhöffige Bereiche der Kernbohrung Ki 1 (R: 4344871, H: 5506605).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 26 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 15).

Tab. 15: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 1 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	0,79 (n=23)	0,25 (n=2)	0,71 (n=2)	0,34 (n=7)	0,36 (n=1)	2,38 (n=4)	0,49 (n=9)	0,06 (n=1)
	Min.	0,11	0,18	0,65	0,11	-	1,98	0,25	-
	Max.	2,78	0,31	0,76	0,50	-	2,78	1,02	-
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	0,84 (n=23)	0,25 (n=2)	0,71 (n=2)	0,34 (n=7)	0,37 (n=1)	2,68 (n=4)	0,50 (n=9)	0,07 (n=1)
	Min.	0,11	0,18	0,66	0,11	-	2,04	0,25	-
	Max.	3,42	0,31	0,76	0,50	-	3,42	1,02	-
Sättigungswert	Ø	0,97 (n=23)	1,00 (n=2)	1,00 (n=2)	0,98 (n=7)	0,99 (n=1)	0,90 (n=4)	1,00 (n=9)	0,93 (n=1)
	Min.	0,81	1,00	0,99	0,92	-	0,81	0,98	-
	Max.	1,00	1,00	1,00	1,00	-	0,97	1,00	-
Porosität (Vol.-%)	Ø	2,12 (n=23)	0,66 (n=2)	1,89 (n=2)	0,78 (n=7)	0,98 (n=1)	6,43 (n=4)	1,32 (n=9)	0,18 (n=1)
	Min.	0,31	0,49	1,77	0,18	-	5,07	0,66	-
	Max.	8,28	0,82	2,01	1,32	-	8,28	2,60	-
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,63 (n=23)	2,73 (n=2)	2,66 (n=2)	2,68 (n=7)	2,68 (n=1)	2,40 (n=4)	2,69 (n=9)	2,74 (n=1)
	Min.	2,32	2,73	2,65	2,65	-	2,32	2,64	-
	Max.	2,72	2,73	2,67	2,74	-	2,48	2,72	-
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,69 (n=23)	2,76 (n=2)	2,72 (n=2)	2,71 (n=7)	2,71 (n=1)	2,56 (n=4)	2,73 (n=9)	2,75 (n=1)
	Min.	2,49	2,75	2,71	2,68	-	2,49	2,71	-
	Max.	2,75	2,76	2,72	2,75	-	2,63	2,75	-
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	81 (n=7)	-	76 (n=1)	50 (n=4)	-	-	114 (n=3)	-
	Min.	0	-	-	0	-	-	54	-
	Max.	203	-	-	86	-	-	203	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5594 (n=138)	6222 (n=12)	5844 (n=12)	5274 (n=42)	5209 (n=6)	5177 (n=24)	6016 (n=54)	6426 (n=6)
	Min.	4377	5847	5497	4567	4615	4377	4985	6305
	Max.	6703	6383	6221	6420	6161	5644	6703	6511
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	81 (n=13)	119 (n=1)	122 (n=2)	67 (n=5)	-	52 (n=2)	92 (n=4)	117 (n=1)
	Min.	34	-	67	49	-	34	54	-
	Max.	178	-	178	97	-	70	141	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	0,31 (n=9)	0,04 (n=1)	-	0,03 (n=2)	0,04 (n=1)	0,10 (n=2)	0,62 (n=4)	-
	Min.	0,00	-	-	0,03	-	0,07	0,00	-
	Max.	2,41	-	-	0,03	-	0,14	2,41	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4528 (n=54)	4879 (n=6)	-	3713 (n=18)	-	4527 (n=12)	5140 (n=24)	-
	Min.	3129	4510	-	3129	-	3857	4138	-
	Max.	5482	4891	-	4412	-	4842	5482	-

Ki 2

Die Erkundungsbohrung Ki 2 ist östlich des Forsts „Soldners Viertel“ am Rande des Sellenberger-Abbaugebiets gelegen und erfasst den anstehenden Quaderkalk unter einem Abraum von 14,60 m. Über dem OHQ steht eine 0,3 m mächtige Zugbank an. Der OHQ selbst weist eine Mächtigkeit von 5,7 m auf. Es sind die typischen Sorten Blau- und Goldbank sowie der Kernstein (hier häufig als Rotbank) ausgebildet (Abb. 30 A und B). Im basalen Bereich treten zunehmend gelbe tonig-merglige Einschaltungen auf (Gelbflaserkalk). Insgesamt beträgt die Mächtigkeit der technisch verwertbaren Gesteine des OHQ 4,1 m, verteilt auf folgende Einheiten:

- (1) Oberbank, z. T. als Rotbank ausgebildet (1,1 m),
- (2) Kernstein (1,2 m),
- (3) Blaubank mit Übergang zur Goldbank im Liegenden (0,6 m),
- (4) Blaubank, z. T. von gelben tonigen Einschaltungen durchzogen (0,5 m),
- (5) Blaubank, z. T. porös und mit Übergang zum Kernstein (0,45 m),
- (6) Blaubank, deutlich porös und mit Übergang zur Rotbank (0,25 m),
- (7) Gelbflaserkalk (1,6 m).

Es treten einige Trennflächengefüge in Form von Stylolithen, Stichen, einer vertikalen Kluft und einer Mergelfuge zwischen der ersten und zweiten Bank außerhalb der typischen Absonderung des Quaderkalks auf (Abb. 30 A und B). Das Abraum-zu-Rohstoff-Verhältnis beträgt 3,56 (4,1 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1–6). Im Liegenden des OHQ ist eine weiteres Äquivalent der Quaderkalkfazies ausgebildet: der Quaderkalk der knaurigen Bank (0,3 m).

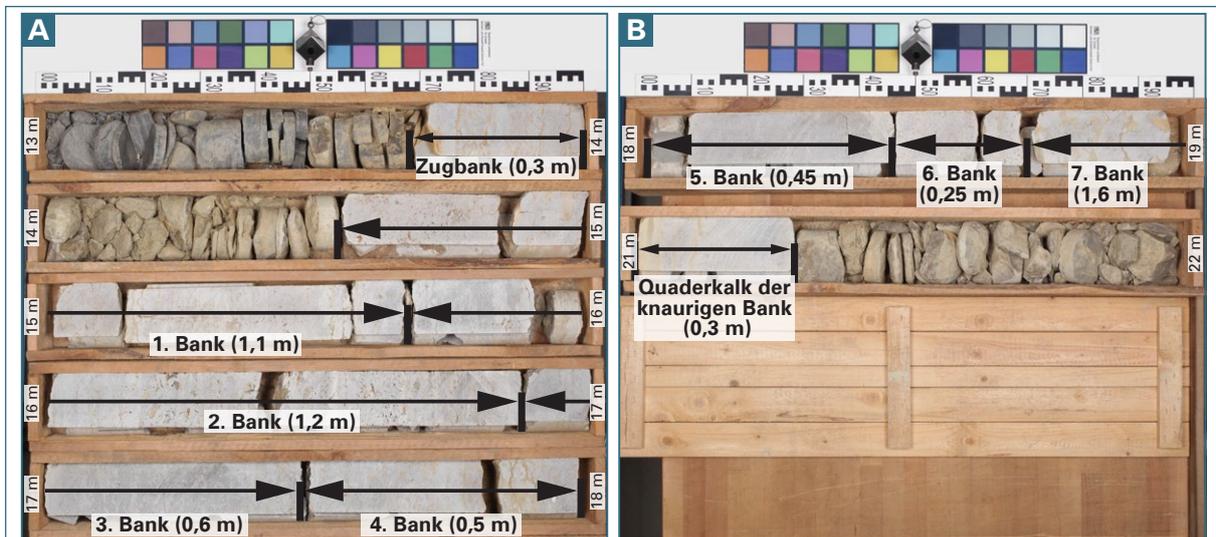


Abb. 30: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 2 (R: 4345128, H: 5505541).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden 39 Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 16).

Tab. 16: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 2 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	0,98 (n=33)	0,69 (n=3)	0,30 (n=2)	0,31 (n=11)	1,71 (n=10)	1,25 (n=2)	1,11 (n=8)	0,27 (n=3)
	Min.	0,21	0,39	0,27	0,21	0,48	0,78	0,50	0,10
	Max.	2,78	0,94	0,32	0,58	2,78	1,71	2,13	0,60
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	1,31 (n=33)	0,70 (n=3)	0,31 (n=2)	0,32 (n=11)	2,68 (n=10)	1,62 (n=2)	1,13 (n=8)	0,28 (n=3)
	Min.	0,22	0,41	0,28	0,22	0,54	0,93	0,51	0,10
	Max.	4,26	0,96	0,33	0,59	4,26	2,31	2,14	0,62
Sättigungswert	Ø	0,88 (n=33)	0,97 (n=3)	0,97 (n=2)	0,97 (n=11)	0,69 (n=10)	0,79 (n=2)	0,98 (n=8)	0,96 (n=3)
	Min.	0,58	0,96	0,96	0,90	0,58	0,74	0,95	0,95
	Max.	1,00	0,98	0,97	1,00	0,98	0,84	1,00	0,98
Porosität (Vol.-%)	Ø	3,29 (n=33)	1,89 (n=3)	0,83 (n=2)	0,85 (n=11)	6,56 (n=10)	4,10 (n=2)	2,97 (n=8)	0,75 (n=3)
	Min.	0,59	1,10	0,76	0,59	1,43	2,46	1,37	0,27
	Max.	10,18	2,57	0,89	1,58	10,18	5,74	5,52	1,65
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,61 (n=33)	2,68 (n=3)	2,70 (n=2)	2,68 (n=11)	2,50 (n=10)	2,56 (n=2)	2,65 (n=8)	2,70 (n=3)
	Min.	2,38	2,66	2,69	2,65	2,38	2,48	2,58	2,66
	Max.	2,70	2,70	2,70	2,69	2,67	2,64	2,69	2,72
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,70 (n=33)	2,73 (n=3)	2,72 (n=2)	2,71 (n=11)	2,67 (n=10)	2,67 (n=2)	2,73 (n=8)	2,72 (n=3)
	Min.	2,63	2,72	2,71	2,69	2,65	2,63	2,71	2,70
	Max.	2,74	2,75	2,72	2,71	2,70	2,70	2,74	2,73
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	206 (n=13)	118 (n=1)	64 (n=2)	108 (n=5)	42 (n=3)	-	927 (n=2)	32 (n=1)
	Min.	16	-	64	16	33	-	118	-
	Max.	1736	-	64	215	51	-	1736	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5201 (n=198)	5576 (n=18)	5783 (n=12)	5308 (n=66)	4714 (n=60)	5258 (n=12)	5504 (n=48)	6053 (n=18)
	Min.	3423	4718	5251	4504	3423	4715	4214	5337
	Max.	6434	6490	6331	6040	6161	5809	6434	6460
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	70 (n=17)	75 (n=1)	76 (n=2)	88 (n=7)	48 (n=6)	66 (n=1)	76 (n=1)	110 (n=1)
	Min.	15	-	76	52	15	-	-	-
	Max.	121	-	76	121	90	-	-	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	1,67 (n=14)	0,20 (n=2)	-	0,02 (n=4)	0,11 (n=4)	0,04 (n=1)	4,57 (n=5)	0,01 (n=2)
	Min.	0,02	0,07	-	0,02	0,05	-	0,02	0,01
	Max.	20,01	0,32	-	0,03	0,17	-	20,01	0,02
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	4131 (n=84)	4556 (n=12)	-	4010 (n=24)	3908 (n=24)	4438 (n=6)	4883 (n=30)	5220 (n=12)
	Min.	3203	3451	-	3262	3203	4213	4062	4934
	Max.	5157	5287	-	4639	4967	4758	5157	5412

Ki 12

Die Erkundungsbohrung Ki 12 wurde am Hainsberg nahe Kleinrinderfeld abgeteuft. Unter 7,7 m Abraum wurde die 0,3 m mächtige Zugbank erbohrt. Der OHQ folgt 0,6 m weiter im Liegenden und besitzt eine Mächtigkeit von 4,6 m. Jedoch sind zahlreiche und z. T. mehrere Dezimeter mächtige Mergelfugen eingeschaltet. Dadurch sind nur vereinzelte, kleindimensionale Bänke des OHQ ausgebildet (Abb. 31):

- (1) Blaubank mit erhöhter Porosität und Übergängen zu Rotbank (0,5 m),
- (2) Blaubank mit einzelnen Partien Kernstein und Mergelfugen bei 9,50 m, 9,90 m und 10,10 m (1,15 m),
- (3) Kernstein mit Übergängen zu Blaubank (0,25 m),
- (4) Gelbfaserkalk, z. T. stark entfestigt (2,7 m).

Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis beträgt 7,48 (1,2 m technisch nutzbares Gestein in Einheit 1–3). Im Liegenden des OHQ konnte, ähnlich wie in der Erkundungsbohrung Ki 1 und Ki 7, der Terebratelquader durchteuft werden (0,3 m mächtig, nicht abgebildet).

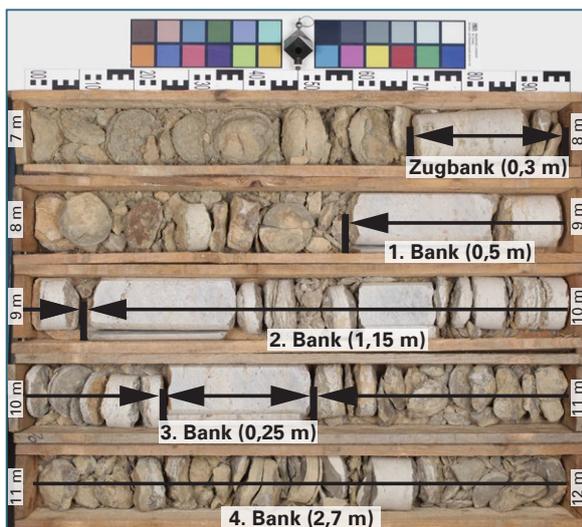


Abb. 31: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 12 (R: 4344226, H: 5507661).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden sieben Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 17).

Tab. 17: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 12 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	0,47 (n=8)	-	0,57 (n=3)	0,10 (n=2)	-	0,61 (n=3)	-	-
	Min.	0,04	-	0,38	0,04	-	0,55	-	-
	Max.	0,72	-	0,72	0,15	-	0,67	-	-
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	0,50 (n=8)	-	0,58 (n=3)	0,10 (n=2)	-	0,69 (n=3)	-	-
	Min.	0,04	-	0,38	0,04	-	0,59	-	-
	Max.	0,77	-	0,72	0,15	-	0,77	-	-
Sättigungswert	Ø	0,95 (n=8)	-	0,99 (n=3)	0,99 (n=2)	-	0,90 (n=3)	-	-
	Min.	0,80	-	0,98	0,97	-	0,80	-	-
	Max.	1,00	-	1,00	1,00	-	0,96	-	-
Porosität (Vol.-%)	Ø	1,33 (n=8)	-	1,55 (n=3)	0,26 (n=2)	-	1,83 (n=3)	-	-
	Min.	0,10	-	1,01	0,10	-	1,59	-	-
	Max.	2,03	-	1,94	0,42	-	2,03	-	-
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	2,69 (n=8)	-	2,69 (n=3)	2,75 (n=2)	-	2,66 (n=3)	-	-
	Min.	2,63	-	2,68	2,74	-	2,63	-	-
	Max.	2,75	-	2,71	2,75	-	2,69	-	-
Reindichte (g/cm ³)	Ø	2,73 (n=8)	-	2,74 (n=3)	2,75 (n=2)	-	2,71 (n=3)	-	-
	Min.	2,68	-	2,73	2,75	-	2,68	-	-
	Max.	2,75	-	2,74	2,75	-	2,73	-	-
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	65 (n=1)	-	65 (n=1)	-	-	-	-	-
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	6053 (n=42)	-	5898 (n=18)	6550 (n=12)	-	5789 (n=12)	-	-
	Min.	4751	-	4751	6259	-	4933	-	-
	Max.	6902	-	6148	6902	-	6331	-	-
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	103 (n=3)	-	125 (n=1)	117 (n=1)	-	65 (n=1)	-	-
	Min.	65	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	125	-	-	-	-	-	-	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	6,25 (n=4)	-	0,00 (n=2)	-	-	12,50 (n=2)	-	-
	Min.	0,00	-	0,00	-	-	0,00	-	-
	Max.	25,00	-	0,00	-	-	25,00	-	-
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	5237 (n=18)	-	5141 (n=6)	5487 (n=6)	-	5082 (n=6)	-	-
	Min.	4916	-	5032	5412	-	4916	-	-
	Max.	5542	-	5284	5542	-	5239	-	-

Ki 12

Westlich des Sellenberger Hofes wurde die Erkundungsbohrung Ki 15 niedergebracht. An dieser Stelle wurde ein Kluftbereich bzw. Karsthohlraum angefahren (ähnlich Ki 3), der bis in den Bereich des OHQ hineinreicht. Die Deutung des Bohrkleins suggeriert, dass der OHQ in einer Tiefe zwischen 5 und 8 m zu erwarten ist (nicht abgebildet), jedoch ist keine Aussage zu seiner Gesteinsqualität und Ausbildung möglich. Im Liegenden des OHQ wurde erneut der Terebratelquader durchörtert (Abb. 32; 0,65 m mächtig).



Abb. 32: Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 15 (R: 4344243, H: 5506482).

Gesteinsphysikalische Charakteristika

Zur Ermittlung der technischen Kennwerte der beprobten Schillkalksteine wurden sechs Gesteinszylinder hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Tab. 18).

Tab. 18: Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 15 (OHQ-Gesamt* ohne Zugbank und ohne weitere Schillkalkeinschübe).

Parameter		Einheit							
		OHQ-Gesamt*	Zugbank	Goldbank	Blaubank	Kernstein	Rotbank	Gelbfaserkalk	Schillkalkeinschübe
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (Gew.-%)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	0,78 (n=6)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	0,12
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	1,37
Wasseraufnahme unter Vakuum (Gew.-%)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	0,90 (n=6)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	0,12
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	1,98
Sättigungswert	Ø	-	-	-	-	-	-	-	0,93 (n=6)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	0,69
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	1,00
Porosität (Vol.-%)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	2,37 (n=6)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	0,32
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	5,1
Rohdichte (g/cm ³)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	2,67 (n=6)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	2,57
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	2,76
Reindichte (g/cm ³)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	2,73 (n=6)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	2,71
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	2,77
Hygrische Dilatation (µm/m)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	21 (n=1)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	-
Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	5441 (n=36)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	4373
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	6361
Druckfestigkeit (MPa)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	143 (n=2)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	135
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	152
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Gewichtsverlust (%)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	0,03 (n=2)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	0,01
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	0,05
Frostbeständigkeit (nach 168 FTW) Ultraschallgeschwindigkeit (m/s)	Ø	-	-	-	-	-	-	-	4486 (n=12)
	Min.	-	-	-	-	-	-	-	4158
	Max.	-	-	-	-	-	-	-	5177

4.2 Detailbetrachtung der gesteinsphysikalischen Parameter

Aufgrund der z. T. extremen Heterogenität der unterschiedlichen Quaderkalkvarietäten ist eine eindeutige Aussage über gesteinsmechanische Eigenschaften meist nur durch eine Prüfung am Einzelobjekt zu gewährleisten. Um steinverarbeitenden Betrieben dennoch einen Überblick über die natürlich auftretenden Schwankungen dieser Werte zu geben, wurden 315 Prüfkörper aus den Bohrkernen gefertigt und mit den in Kapitel 3.3 beschriebenen Laboruntersuchungen analysiert. Aufgrund der zu erwartenden starken Streuung der Messwerte wurden Boxplots (siehe Erklärungen zur Statistik, Seite 94) zur Visualisierung der Ergebnisse erstellt und diskutiert.

4.2.1 Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck und unter Vakuum, Porosität und Rein- und Rohdichte

In Anlehnung an die petrografischen Eigenschaften zeigen auch die gesteinsphysikalischen Messwerte deutliche Unterschiede (Tab. 19, Abb. 33 A und B und Abb. 34 A bis C), zum Vergleich sind zahlreiche bekannte Werksteine aufgelistet, die die Notwendigkeit einer Unterteilung des Natursteins „Quaderkalk“ noch einmal unterstreichen. So existieren sowohl sehr dichte Varietäten (Blau- und Goldbank), die zu einer geringen Wasseraufnahme neigen, als auch porösere Schillkalksteine, die eine geringe Dichte besitzen und relativ viel Wasser aufnehmen können (Kernstein, Rotbank).

Tab. 19: Gesteinsmechanische Eigenschaften der analysierten Quaderkalk-Varietäten (mit Mittelwert (\bar{x}) und Spannweiten). Zur besseren Vergleichbarkeit der Werte dieser Studie, wurden die gesteinsmechanischen Parameter ausgewählter Naturwerksteine im unteren Bereich aus GRIMM et al. (1990)¹ abgebildet.

Gestein	Wasseraufnahme Atmosphäre [Gew.-%]	Wasseraufnahme Vakuum [Gew.-%]	Porosität [Vol.-%]	Reindichte [g/cm ³]	Rohdichte [g/cm ³]
OHQ-Gesamt (n=274)	\bar{x} 0,96; 0,04–3,24	\bar{x} 1,11; 0,04–4,26	\bar{x} 2,84; 0,10–10,18	\bar{x} 2,70; 2,49–2,80	\bar{x} 2,63; 2,32–2,76
Goldbank (n=29)	\bar{x} 0,51; 0,16–1,19	\bar{x} 0,52; 0,17–1,46	\bar{x} 1,39; 0,45–3,77	\bar{x} 2,72; 2,67–2,75	\bar{x} 2,68; 2,57–2,72
Blaubank (n=34)	\bar{x} 0,34; 0,04–1,37	\bar{x} 0,35; 0,04–1,38	\bar{x} 0,93; 0,10–3,65	\bar{x} 2,72; 2,68–2,80	\bar{x} 2,70; 2,61–2,76
Kernstein (n=50)	\bar{x} 1,32; 0,36–2,81	\bar{x} 1,69; 0,37–4,26	\bar{x} 4,27; 0,98–10,18	\bar{x} 2,69; 2,61–2,74	\bar{x} 2,57; 2,38–2,68
Rotbank (n=56)	\bar{x} 1,45; 0,54–2,78	\bar{x} 1,78; 0,59–3,48	\bar{x} 4,48; 1,59–8,51	\bar{x} 2,66; 2,49–2,75	\bar{x} 2,54; 2,32–2,7
Gelbfaserkalk (n=105)	\bar{x} 0,86; 0,06–3,24	\bar{x} 0,88; 0,07–3,25	\bar{x} 2,3; 0,18–8,26	\bar{x} 2,73; 2,67–2,77	\bar{x} 2,66; 2,48–2,74
Zugbank (n=17)	\bar{x} 0,49; 0,18–0,94	\bar{x} 0,50; 0,18–0,96	\bar{x} 1,34; 0,49–2,57	\bar{x} 2,74; 2,71–2,79	\bar{x} 2,71; 2,66–2,73
Schillkalkeinschübe (n=26)	\bar{x} 0,52; 0,1–2,09	\bar{x} 0,53; 0,1–2,1	\bar{x} 1,39; 0,28–5,32	\bar{x} 2,73; 2,67–2,76	\bar{x} 2,69; 2,53–2,74
Solnhofer Plattenkalk ¹	1,47	1,85	4,77	2,71	2,58
Treuchtlinger Kalkstein ¹ ("Marmor")	1,1	1,29	3,38	2,71	2,62
Flossenbürger Granit ¹	0,21	0,27	0,71	2,65	2,64

Obwohl der Gelbfaserkalk per se ein eher dichter Kalkstein ist, liegen seine gesteinsphysikalischen Messwerte, bedingt durch die gelben Einschaltungen, zwischen diesen beiden Gruppen. Unabhängig von ihrer meist eher geringmächtigen Ausbildung, zeigen die unter und über dem OHQ erbohrten weiteren Schillkalkeinschübe meist vergleichbare Eigenschaften zur Blaubank.

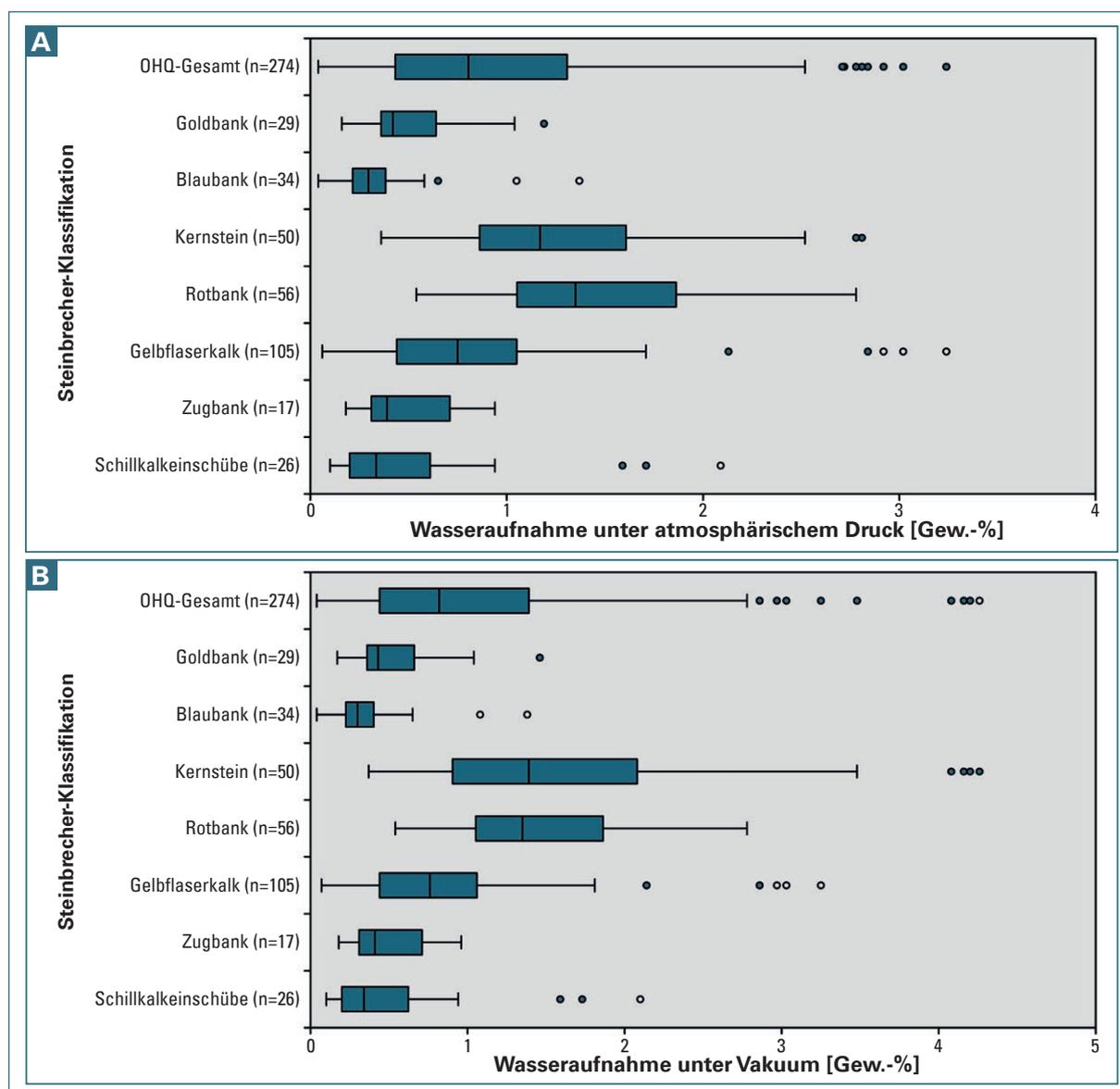


Abb. 33: Boxplot der Wasseraufnahme in Gew.-%, gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation. A: unter atmosphärischem Druck, B: unter Vakuum

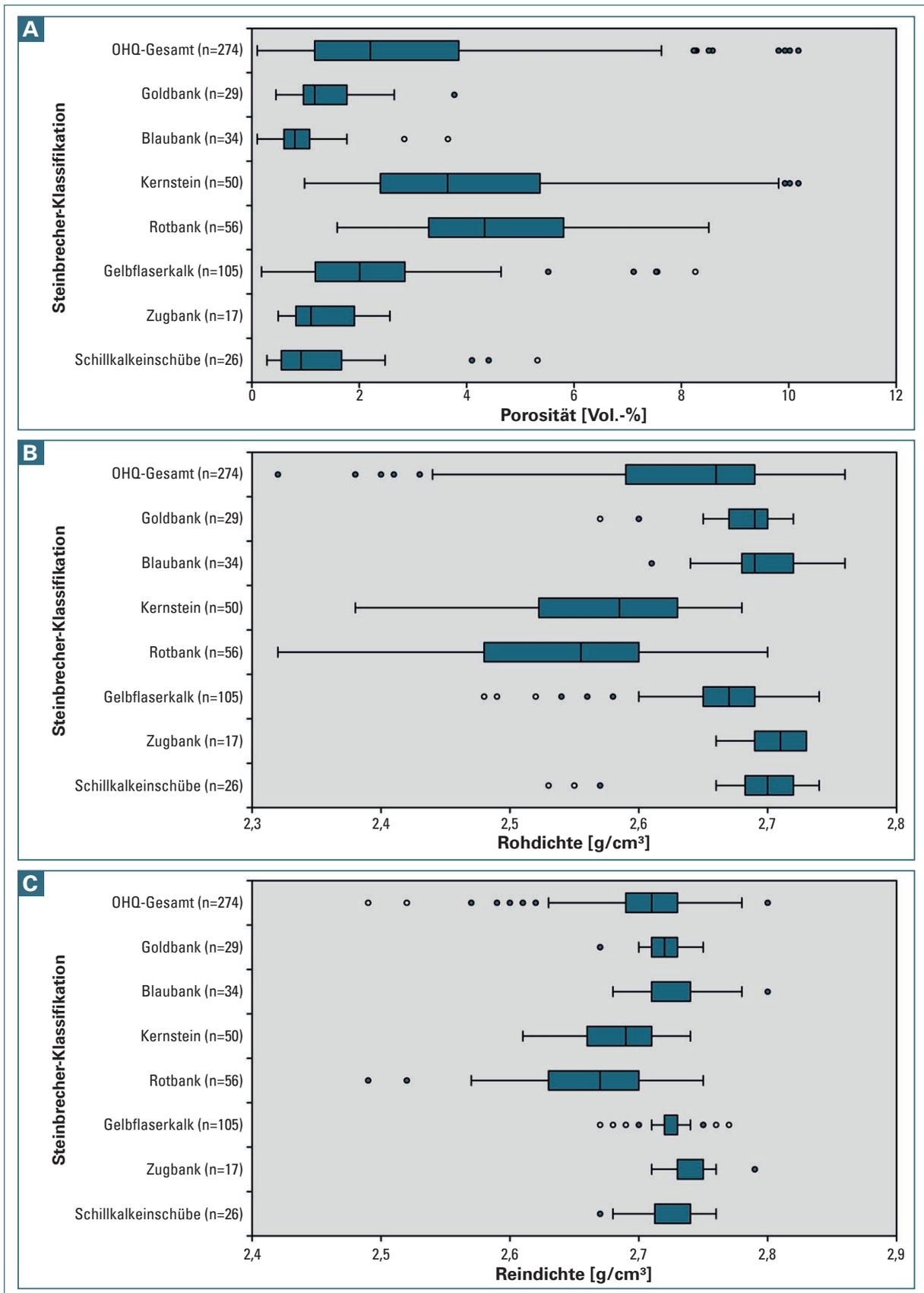


Abb. 34: Boxplots untersuchter gesteinsphysikalischer Basiseigenschaften, gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation. A: der Porosität (Vol.-%), B: der Rohdichte (g/cm^3), C: der Reindichte (g/cm^3)

4.2.2 Hygrische Dilatation

Die wasserbedingte Längenänderung von Naturwerksteinen ist ein wichtiges Kriterium für den jeweiligen Verwendungszweck und kann je nach Gesteinszusammensetzung einige Millimeter pro Meter erreichen. Durch eine meist sehr heterogene Verteilung der quellfähigen Komponenten kann es im bautechnischen Einsatz zu Spannungen und in der Folge zu Rissbildungen kommen. Im Wesentlichen wird die hygrische Dilatation durch die Präsenz von quellfähigen Tonmineralen verursacht (GRIMM et al. 2018).

Tonmineralfreie Gesteine zeigen ebenfalls eine (deutlich kleinere) hygrische Dilatation. Die damit assoziierten materialphysikalischen Wechselwirkungen lassen sich im Wesentlichen in zwei sich überlagernde Prozesse zusammenfassen, die nach der Befeuchtung des Gesteinsmaterials eintreten: (1) Bedingt durch Kapillarkräfte dringt Wasser in die Gesteinsprobe ein, bis sich ein Gleichgewicht mit der Schwerkraft oder dem Porendruck der eingeschlossenen Luft einstellt. Die ausgeübte Saugspannung, die durch den Kapillardruck bedingt wird, verursacht eine Kompression und infolge eine Schrumpfung der Probe. (2) Im Zuge der Benetzung der Mineraloberfläche wird die Grenzflächenspannung erniedrigt. Daraus resultiert eine Ausdehnung der Mineralkörner, die durch eine Dehnung der Probe angezeigt wird. Welches der beiden Phänomene überwiegt, hängt materialspezifisch von der Zementation der Gesteinsprobe ab. Bei gut zementierten Proben mit einer hohen Druckfestigkeit und einer geringen Kompressibilität überwiegt eine Sättigungsdehnung (HALISCH et al. 2017, MÖLLER et al. 2017, BUNTEBARTH & WELLER 2017, WELLER et al. 2016, WELLER et al. 2015, WELLER & SLATER 2015).

Die ermittelten Werte der hygrischen Dilatation streuen z. T. stark (Tab. 20 und Abb. 35). In Abhängigkeit der Gesteinszusammensetzung ist eine gute Korrelation mit den von HALISCH et al. (2017), MÖLLER et al. (2017), BUNTEBARTH & WELLER (2017), WELLER et al. (2016), WELLER et al. (2015), WELLER & SLATER (2015) ausgehaltenen physikalischen Prozessen festzustellen. Die stärker zementierten, dichten und z. T. sehr druckfesten Proben der Zugbank (\varnothing 108 $\mu\text{m}/\text{m}$), Goldbank (\varnothing 81 $\mu\text{m}/\text{m}$), Blaubank (\varnothing 70 $\mu\text{m}/\text{m}$) und der weiteren Schillkalkeschübe (\varnothing 79 $\mu\text{m}/\text{m}$) zeigen einen deutlichen Trend zu einer höheren hygrischen Längenänderung (Tab. 20).

Stark poröse, schwächer zementierte und weniger druckfeste Kernsteine (\varnothing 37 $\mu\text{m}/\text{m}$) sowie die Rotbank (\varnothing 24 $\mu\text{m}/\text{m}$) weisen hingegen eine deutlich niedrigere hygrische Dilatation auf (Tab. 20). Eine Ausnahme bilden die Gelbflaserkalken (\varnothing 271 $\mu\text{m}/\text{m}$). Durch ihre z. T. sehr unterschiedliche Petrografie (Kalk- vs. Schillkalkgehalt und vor allem gelbe Einschaltungen in unterschiedlichen texturierten Assoziationen), ist die Spannweite der ermittelten Ergebnisse sehr groß (zwischen 0 und 1736 $\mu\text{m}/\text{m}$) und bedarf einer differenzierten Betrachtung (siehe Kapitel 5.3). Wahrscheinlich werden die sehr hohen Werte (Extremwerte, vergleichbar mit der hygrischen Längenänderung von tonig-kieselig gebundenen Sandsteinen, vergleiche Tab. 20) der hygrischen Dilatation innerhalb der Messreihe der Gelbflaserkalken durch quellfähige Tonminerale der gelben Einschaltungen bedingt.

Tab. 20: Übersicht der hygrischen Dilatation der unterschiedlichen Quaderkalken nach GLA (1984) und Drexler (1964). Zur besseren Vergleichbarkeit der Werte dieser Studie, wurden die wasserbedingten Längenänderungen ausgewählter Naturwerksteine im unteren Bereich hinzugefügt, aus: POSCHLOD (1990)¹; DREUSE et al. (2015)²; KATZSCHMANN et al. (2006)³

Gestein	Hygrische Dilatation [µm/m]	Geologische Kurzbeschreibung
OHQ-Gesamt (n=65)	ø 136; 0–1736	Heterogene Abfolge unterschiedlicher Schillkalk-/Kalksteine (mo3)
Goldbank (n=12)	ø 81; 0–203	Dichter Schillkalkstein mit kalkiger Matrix, z. T. oxidativ umgewandelt (mo3)
Blaubank (n=13)	ø 70; 0–215	Dichter Schillkalkstein mit kalkiger Matrix (mo3)
Kernstein (n=5)	ø 37; 0–58	Graubrauner, poröser Schillkalkstein, z. T. schwach zementiert (mo3)
Rotbank (n=11)	ø 24; 0–77	Rötlicher, poröser Schillkalkstein, z. T. schwach zementiert (mo3)
Gelbflaserkalk (n=24)	ø 271; 0–1736	Dichter Schillkalk-/Kalkstein mit diffusen gelben tonig-mergeligen Einschaltungen (mo3)
Zugbank (n=4)	ø 108; 22–175	Dichter Schillkalk-/Kalkstein, z. T. mit feinen gelben Einschaltungen (mo3)
Schillkalkeinschübe (n=7)	ø 79; 0–312	Heterogene Abfolge unterschiedlicher Schillkalk-/Kalksteine (mo3)
Carrara Marmor ¹	100	Feinkörniger, weißer bis grauweißer Marmor mit granoblastischer Struktur (Unterlias)
Laaser Marmor ¹	38	Mittelkörniger, weißer Marmor mit granoblastischer Struktur (Devon)
Langensalzaer Travertin ²	<10	Fein- bis grobporiger, heller Travertin mit lagigem Gefüge (Quartär–Holozän)
Oberdorlaer Muschelkalk ³	10	Grauer, sehr poröser Kalkstein mit eingeregelter Zweischalerschill (Muschelkalk, Jena-Formation)
Tambacher Sandstein ³	1180–2390	Überwiegend tonig-eisenhaltig gebundener, rotbrauner, Fein- bis Mittelsandstein (Oberrotliegend)
Henneberg Granit ³	30–60	Fein- bis mittelkörniger Muscovit-, Biotit- und Zweiglimmergranit oberkarbonischen Alters

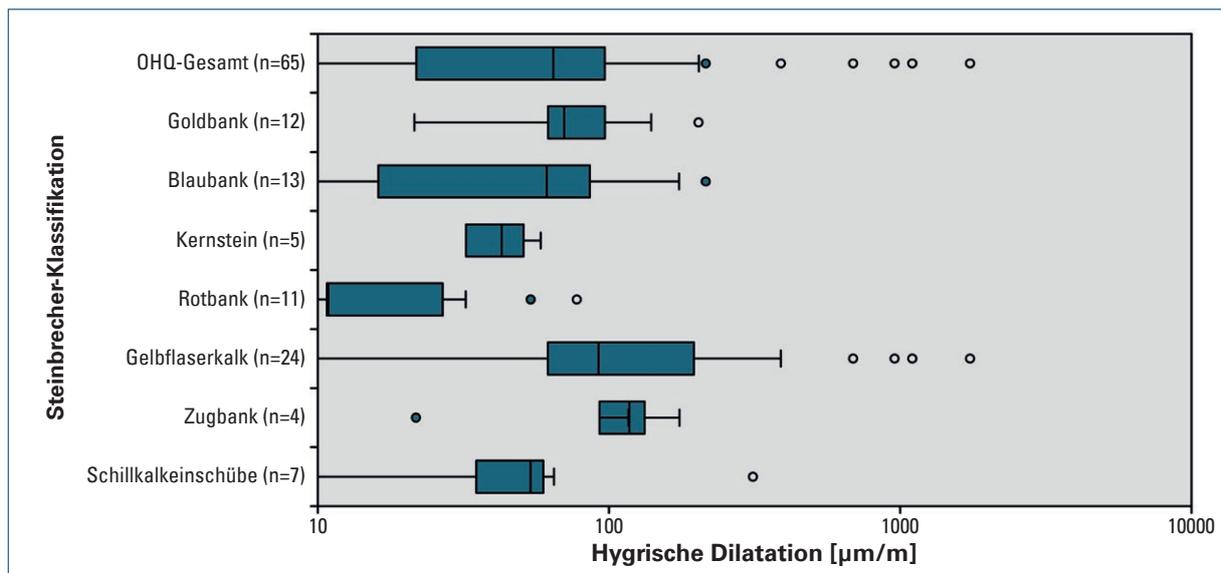


Abb. 35: Boxplot der wasserbedingten Längenänderung (µm/m), gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation. Die X-Achse ist logarithmisch skaliert.

4.2.3 Ultraschall

Die Ergebnisse der Ultraschallanalytik von Karbonatgesteinen (2,06–6,47 km/s, MOSCH 2008) streuen in der Regel sehr stark im Vergleich mit z. B. plutonischen Gesteinen (4,19–6,05 km/s, MOSCH 2008). Auch die Resultate dieser Studie bestätigen diesen Trend (Tab. 21 und Abb. 36).

Tab. 21: Gemessene Kompressionswellengeschwindigkeit V_p der unterschiedlichen Quaderkalk (mit Mittelwert ($\bar{\sigma}$) und Spannweiten).

Gestein	Kompressionswellengeschwindigkeit V_p [m/s]
OHQ-Gesamt (n=1608)	$\bar{\sigma}$ 5509; 1605–6950
Goldbank (n=176)	$\bar{\sigma}$ 5928; 4751–6759
Blaubank (n=222)	$\bar{\sigma}$ 5709; 4373–6902
Kernstein (n=246)	$\bar{\sigma}$ 5095; 1628–6369
Rotbank (n=384)	$\bar{\sigma}$ 5107; 1605–6950
Gelbflaserkalk (n=580)	$\bar{\sigma}$ 5746; 2059–6703
Zugbank (n=102)	$\bar{\sigma}$ 5858; 4479–6599
Schillkalkschübe (n=144)	$\bar{\sigma}$ 5930; 4090–6532

Die Messergebnisse zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen der Rohdichte, der Porosität und der gemessenen Ultraschallgeschwindigkeit besteht. Besonders die sehr dichten und gering porösen Gesteine der Gold-, Zug-, und Blaubank sowie der Schillkalkschübe wiesen die höchsten Ultraschallgeschwindigkeiten auf (Tab. 21). Hingegen zeigten der poröse Kernstein und die Rotbank eine deutlich niedrigere Kompressionswellengeschwindigkeit (Tab. 21). Aufgrund großer Schwankungen der Porosität innerhalb dieser beiden Messreihen erscheint es plausibel, dass trotz einer relativ hohen durchschnittlichen Ultraschallgeschwindigkeit ein umfangreicher Wertebereich gemessen wurde (zahlreiche Ausreißer und Extremwerte, Abb. 36).

Die meist dichten Kalk-/Schillkalksteine aus der Gruppe der Gelbflaserkalk zeigen vergleichbare Ausbreitungsgeschwindigkeiten wie Zug-, Gold- und Blaubank. Jedoch ist auch diese Messreihe gekennzeichnet von zahlreichen Ausreißern und Extremwerten. Diese könnten durch die leicht erhöhte Porosität ($\bar{\sigma}$ 2,3 Vol.-%) verursacht sein, aber auch auf eine Tonmineralführung hindeuten (gelbe, tonig-mergliche Einschaltungen). Bedingt durch deutlich geringere mineralspezifisch elastische Eigenschaften (Calcit: $V_p = 6,54$ km/s; Tonminerale: $V_p = 1,1$ – $2,8$ km/s, GEBRANDE 1982), können Tonminerale die Kompressionswellengeschwindigkeit deutlich beeinflussen (HAN et al. 1986). Durch ihre erheblich höhere Kompressibilität kommt es bei der Fortpflanzung von Kompressionswellen im Gesteinsverbund zu einer puffernden Wirkung, die die gemessene Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Tonmineralmenge deutlich erniedrigen kann (SCHÖN 1996).

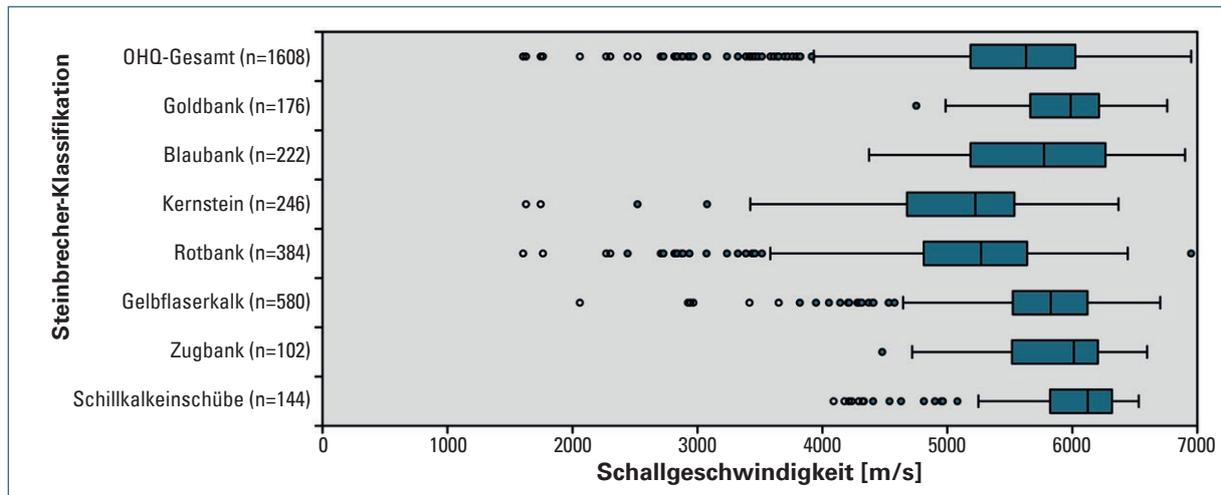


Abb. 36: Boxplot der Schallgeschwindigkeiten (m/s), gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation.

4.2.4 Einaxiale Druckfestigkeit

Zwischen den Basiseigenschaften der Rohdichte, der Porosität und der einaxialen Druckfestigkeit besteht ein deutlicher Zusammenhang (MOSCH 2008). Diese Korrelation der Parameter spiegelt sich auch in den ermittelten Daten dieser Studie wider. Die dichten, gut zementierten und geringer porösen Gesteine der Gold-, Blau- und Zugbank wiesen durchschnittlich hohe bis sehr hohe Druckfestigkeiten auf (Abb. 37, Abb. 38 und Tab. 22).

Tab. 22: Gemessene einaxiale Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Quaderkalk (mit Mittelwert ($\bar{\sigma}$) und Spannweiten).

Gestein	Druckfestigkeit [MPa]
OHQ-Gesamt (n=109)	$\bar{\sigma}$ 85; 9–203
Goldbank (n=15)	$\bar{\sigma}$ 107; 41–201
Blaubank (n=18)	$\bar{\sigma}$ 96; 49–176
Kernstein (n=25)	$\bar{\sigma}$ 62; 9–120
Rotbank (n=14)	$\bar{\sigma}$ 52; 11–97
Gelbfaserkalk (n=37)	$\bar{\sigma}$ 99; 23–203
Zugbank (n=6)	$\bar{\sigma}$ 154; 76–213
Schillkalkeinschübe (n=17)	$\bar{\sigma}$ 100; 17–230

Die Werte der untersuchten Schillkalkeinschübe streuen z. T. extrem stark und besitzen trotz einer sehr hohen durchschnittlichen Druckfestigkeit ein Datenspektrum ähnlich der Gesamtheit des Oberen Hauptquaderkalks (Abb. 38 und Tab. 22). Diese Problematik ist bedingt durch die Zusammenfassung der unterschiedlichen Schillkalkeinschübe (Grenzquader; Quaderkalk der knaurigen Bank, Terebratelquader und UHQ), der petrografischen Heterogenität dieser zumeist geringmächtigen Horizonte und auch der geringen Probenanzahl.

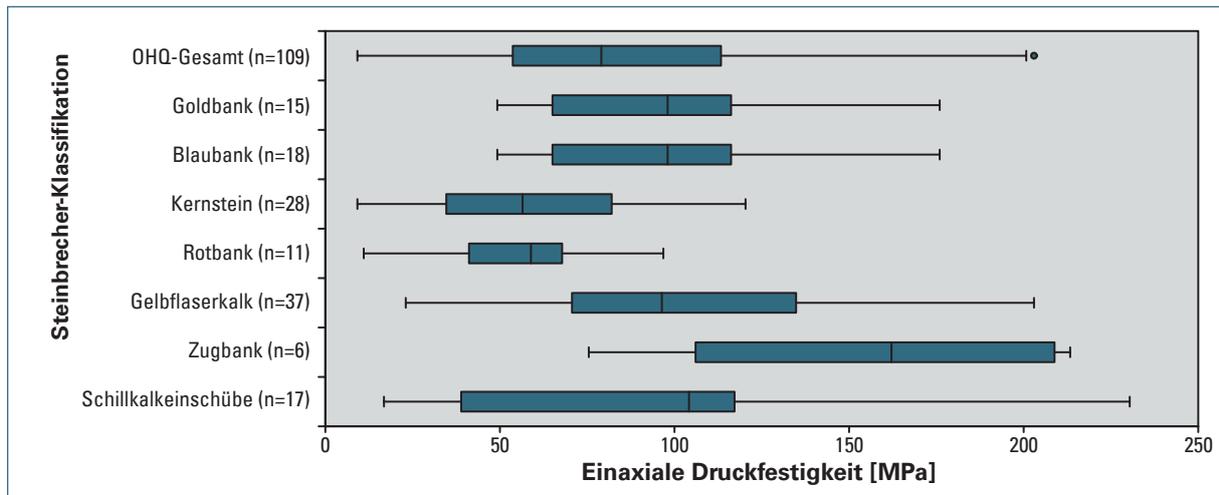


Abb. 38: Boxplot der einaxialen Druckfestigkeit (MPa) gegliedert, nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation.

4.2.5 Frostbeständigkeit

Zur Ermittlung der Frostbeständigkeit wurde der Sättigungswert berechnet und ein Frost- und Tauwechsel-Versuch mit 168 Zyklen durchgeführt. Im Anschluss wurden verschiedene Messungen zur Bestimmung des Gewichtsverlustes und der Schallgeschwindigkeit durchgeführt. Zusätzlich wurden die frostbeanspruchten Prüfkörper auf mögliche Gefügeveränderungen untersucht.

4.2.5.1 Sättigungswert

Der Sättigungswert ist ein Indikator für die Frostbeständigkeit von Natursteinen. Ein allgemeingültiger Grenzwert, ab wann ein Gestein als frostbeständig gilt, liegt allerdings nicht vor. Vielmehr darf der Sättigungswert als ein Hinweis auf eine mögliche Frostbeständigkeit bzw. -nichtbeständigkeit gedeutet werden. In der Literatur sind zahlreiche Grenzwerte definiert, die jedoch in der Praxis nicht immer Bestand haben z. B. $S < 0,75$ verwitterungs- und frostbeständig; $S > 0,90$ nicht verwitterungs- und frostbeständig (GÖTZE & GÖBBELS 2017). Es existieren auch Gesteine, die trotz eines hohen Sättigungswertes als frostbeständig gelten (POSCHLOD & KATZSCHMANN 1994).

Tab. 23: Durchschnittliche Sättigungswerte der untersuchten Quaderkalk.

Gestein	Sättigungswert S
OHQ-Gesamt (n=274)	0,93
Goldbank (n=29)	0,98
Blaubank (n=34)	0,98
Kernstein (n=50)	0,84
Rotbank (n=56)	0,83
Gelbflaserkalk (n=105)	0,99
Zugbank (n=17)	0,99
Schillkalkschübe (n=26)	0,99

Alle untersuchten Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation wiesen einen durchschnittlichen Sättigungswert von $>0,75$ auf (Tab. 23). Dabei zeigten die porösen Quaderkalk (Kernstein, Rotbank) einen deutlich niedrigeren Sättigungswert als die dichteren Gesteine (Zug-, Gold-, und Blaubank, Schillkalkeschübe und Gelbfäserkalk). Auf Grundlage der hohen Sättigungswerte ist eine finale Bewertung der Frostbeständigkeit allein nicht möglich, weitere Untersuchungen werden zusätzlich benötigt (Frost-Tau-Wechsel und Ultraschallanalytik).

4.2.5.2 Gewichtsverlust und Gefügeveränderung nach Frost-Tau-Wechseln

Die nach DIN 52008 geforderte Mindestanzahl von 25 Frost-Tau-Zyklen erscheint wesentlich zu klein, verglichen mit einer natürlich ablaufenden Anzahl von Frost-Tau-Wechseln von 60–75 pro Jahr in Deutschland (GRIEGER & THIEL o.J.). Zur besseren Bewertung der Frostbeständigkeit wurde der Masseverlust deswegen nach 168 Frost-Tau-Zyklen ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der überwiegende Teil der untersuchten Quaderkalk nur einen sehr geringen Masseverlust nach 168 Frost-Tau-Zyklen aufweist (Tab. 24). Sowohl die dichten, gut zementierten Gesteine der Zug-, Gold-, und Blaubank, der Schillkalkeschübe sowie des porösen Kernsteins sind vom Standpunkt des Masseverlustes als frostsicher zu betrachten.

Tab. 24: Ermittelte Masseverluste nach 168 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen (mit Mittelwert (\bar{x}) und Spannweiten).

Gestein	Masseverlust [%]
OHQ-Gesamt (n=133)	\bar{x} 1,53; 0,00–35,0
Goldbank (n=12)	\bar{x} 0,02; 0,00–0,07
Blaubank (n=14)	\bar{x} 0,03; 0,00–0,09
Kernstein (n=25)	\bar{x} 0,06; 0,00–0,17
Rotbank (n=28)	\bar{x} 1,75; 0,00–25,0
Gelbfäserkalk (n=54)	\bar{x} 2,82; 0,00–35,0
Zugbank (n=9)	\bar{x} 0,07; 0,00–0,32
Schillkalkeschübe (n=11)	\bar{x} 0,01; 0,00–0,09

Hingegen zeigt die Messreihe der Rotbank einen erhöhten durchschnittlichen Masseverlust von 1,75 %. Jedoch wird dieser Wert drastisch beeinflusst von lediglich 2 Probenkörper die jeweils an einem eisenhaltigen Styrolithen eine massive Ablösung zeigten (Abb. 40 C und D). Die weiteren untersuchten Prüfkörper des Typs „Rotbank“, die frei von Styrolithen waren, zeigten einen deutlich geringeren und unkritischeren Masseverlust. Demnach ist die Rotbank in Abhängigkeit der Gesteinsqualität „nur“ als bedingt frostbeständig einzustufen.

Die Messreihe der Gelbfäserkalk zeigt eine andere Tendenz. Der ermittelte durchschnittliche Masseverlust liegt mit 2,82 % deutlich im kritischen Bereich (vergleiche Tab. 24). Hierbei ist jedoch eine sehr starke Streuung der Werte auffällig. Besonders die Prüfkörper, die eine größere Menge an gelben tonig-mergligen Einschaltungen aufweisen, besitzen meist auch einen sehr hohen Masseverlust.

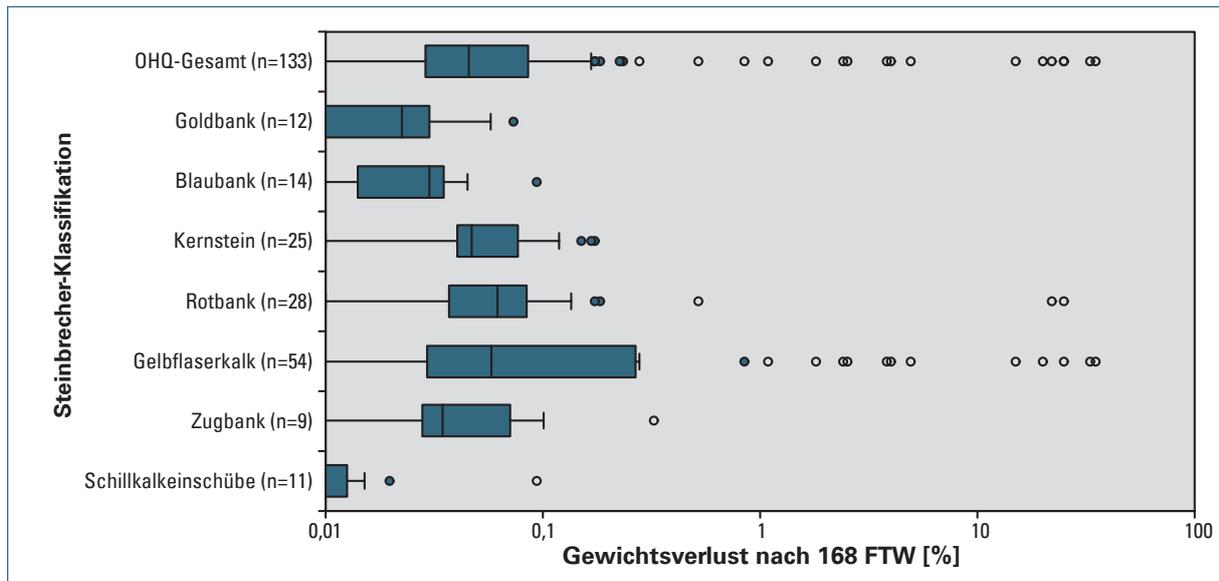


Abb. 39: Boxplot der Gewichtsverluste nach 168 FTW (%), gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation. Die X-Achse ist logarithmisch skaliert.

Einhergehend mit dem ermittelten Masseverlust konnten auch schadhafte Gefügeveränderungen beobachtet werden. Hier zeigt sich der deutliche Trend, dass vor allem Prüfkörper mit bereits bestehenden Schwächungen des Gesteinsverbundes dazu neigen, in der Folge der Frosteinwirkung verstärkt geschädigt zu werden. Allen voran ist hier die Blau- und Goldbank sowie die Rotbank und der Gelbfaserkalk zu nennen (Abb. 40 A bis F). Da der Gelbfaserkalk aufgrund seiner Zusammensetzung die grundsätzliche Frage der Verwendbarkeit aufwirft, wird diese Thematik in Kapitel 5.3 dezidiert betrachtet.

Die Quaderkalken der Blau- und Goldbank besitzen trotz ihrer dichten und massigen Erscheinung eine erhöhte Affinität zur Ausbildung von grau bis grauschwarzen Stylolithen in unterschiedlichen Größen, die sich deutlich vom Restgestein abheben (Abb. 40 A und B). An diesen ungleichmäßig geformten Schwächezonen, bestehend aus tonigem Füllmaterial und Eisenverbindungen (GRIMM et al. 1990), kann es infolge der Frosteinwirkung zu einer Abplatzung oder sogar zu einer Rissbildung kommen (Abb. 40 A). Auch in der Praxis konnte dieses Phänomen schon häufiger beobachtet werden, wie z. B. am Gefallenendenkmal Eberhardshöhe in Tübingen. Zusätzlich neigt die Blaubank zu einer intensiven Ausbleichung über einen geringen Expositionszeitraum von wenigen Jahren (RIETH 1964).

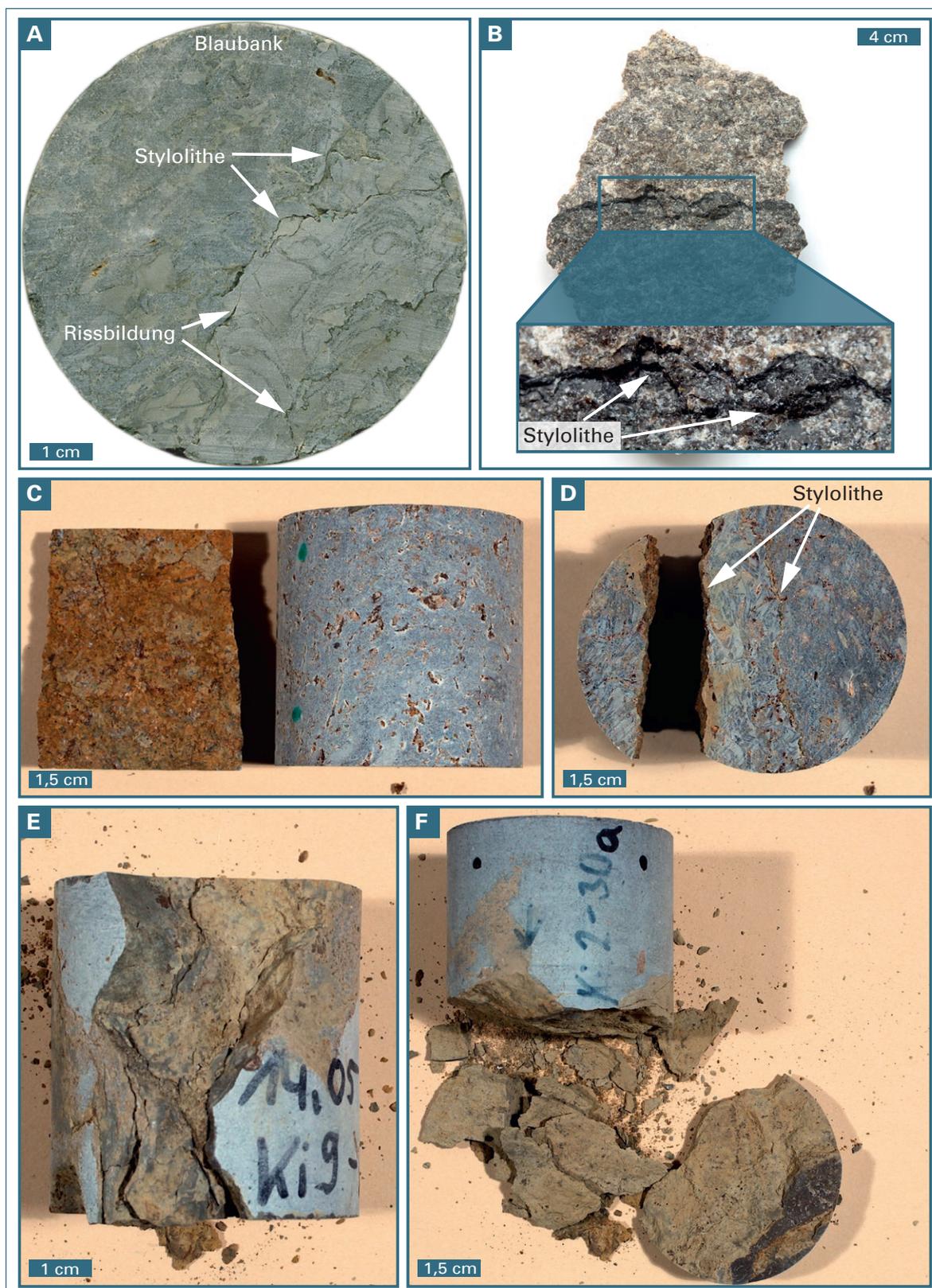


Abb. 40: Ausprägung und Verlauf verschiedener schadhafter Gefüge-Assoziationen innerhalb der untersuchten Prüfkörper. (A) Die Deckfläche eines Blaubank-Prüfkörpers mit Rissbildung entlang oder in der unmittelbaren Peripherie von zahlreichen kleinen Styrolithen (nach 168 FTW). (B) Nicht Frost-Tau-Wechsel beanspruchtes Handstück mit deutlich sichtbarem Styrolith. (C, D) Rotbank mit Riss an einem Styrolith. (E, F) Beschädigungen an Prüfkörpern aus der Messreihe der Gelbfaserkalkle.

4.2.5.3 Ultraschall

Zur besseren Beschreibung des Verwitterungsverhaltens der untersuchten Quaderkalk wurden die Prüfkörper im Anschluss an die 168 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen noch einmal mit der Ultraschallanalytik untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Schillkalk-/Kalksteine eine deutliche Abnahme der Kompressionswellengeschwindigkeit aufweisen (vergleiche Abb. 41 mit Abb. 36). Jedoch reagieren die Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation unterschiedlich auf die Beanspruchung der Frost-Tau-Wechsel-Zyklen.

Tab. 25: Ergebnisse der Ultraschallanalytik nach 168 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen (mit Mittelwert (\bar{x}) und Spannweiten).

Gestein	Kompressionswellengeschwindigkeit V_p nach 168 FTW [m/s]	Abnahme der Kompressionswellengeschwindigkeit V_p [%]
OHQ-Gesamt (n=729)	\bar{x} 4474; 1451–5671	15,0-24,9
Goldbank (n=72)	\bar{x} 4780; 2659–5505	21,1
Blaubank (n=102)	\bar{x} 4345; 2561–5542	24,9
Kernstein (n=143)	\bar{x} 4332; 3166–5473	16,8
Rotbank (n=162)	\bar{x} 4319; 1451–5301	15,0
Gelbfaserkalk (n=250)	\bar{x} 4602; 1726–5671	21,4
Zugbank (n=54)	\bar{x} 4659; 3191–5356	21,4
Schillkalkeschübe (n=78)	\bar{x} 4806; 3353–5412	18,3

Die kleinsten Abnahmen der Kompressionswellengeschwindigkeit V_p zeigen die porösen Gesteinsgruppen der Steinbrecher-Klassifikation (Tab. 25). Hingegen sind die dichteren Quaderkalkvarietäten der Blau-, Gold- und Zugbank sowie der Gelbfaserkalk und der Schillkalkeschübe von wesentlich höheren Abnahmen der Ultraschallgeschwindigkeit und damit einhergehend von einer intensiveren Schwächung des Gesteinsverbundes betroffen.

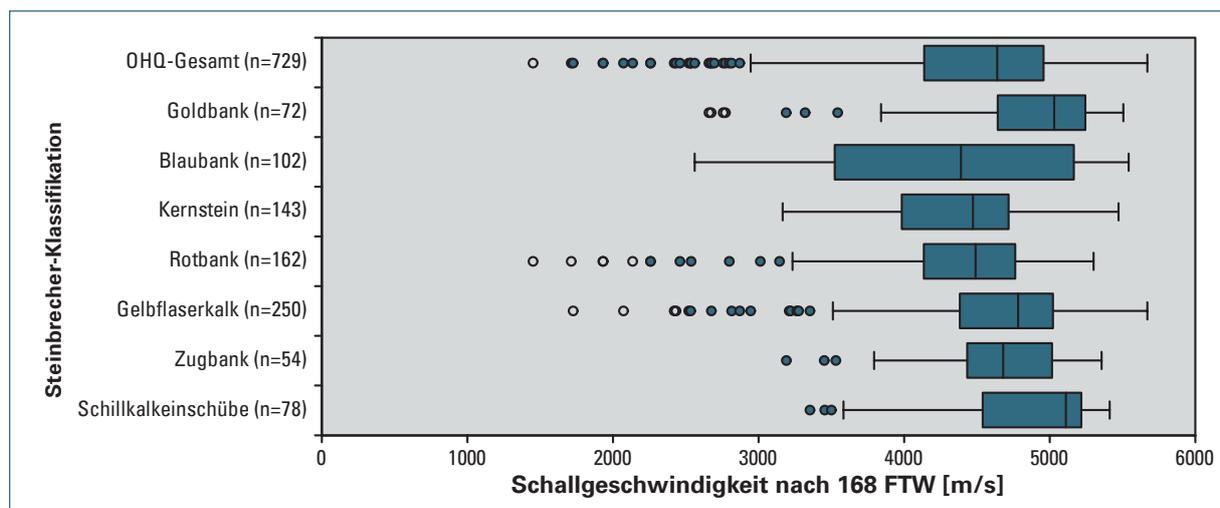


Abb. 41: Boxplot der gemessenen Schallgeschwindigkeiten nach 168 FTW (m/s), gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation.

4.2.5.4 Zusammenfassung der Frostbeständigkeit

Die ermittelten Werte zeigen deutlich, dass die Frostbeständigkeit in Abhängigkeit der Steinbrecher-Klassifikation innerhalb der Quaderkalke stark variiert.

Gestein	Frostbeständigkeit
Kernstein	frostbeständig
Rotbank	bedingt frostbeständig bis frostbeständig
Blaubank	bedingt frostbeständig
Goldbank	bedingt frostbeständig
Zugbank	bedingt frostbeständig bis frostbeständig
Schillkalkeinschübe	bedingt frostbeständig bis frostbeständig
Gelbflaserkalk	nicht frostbeständig bis bedingt frostbeständig

Tab. 26: Ermittelte Frostbeständigkeit der untersuchten Schillkalk-/Kalksteine.

Als frostbeständig können demnach vor allem die porösen Gesteine des Kernsteins und eingeschränkt auch der Rotbank angesehen werden. Einer hohen Wasseraufnahme (über der DIN-Vorgabe von 0,5 %) stehen ein relativ geringer Sättigungswert, ein geringer Masseverlust (mit Ausnahme von zwei Extremwerten innerhalb der Messreihe „Rotbank“), sowie wenig Gefügeveränderungen (weder nach optischer Bemusterung, noch nach der Ultraschall-Analytik) nach 168 Frost-Tau-Wechseln gegenüber. Ein besonderes Augenmerk sollte unter dieser Prämisse den möglichen Schwächungen des Gesteinsverbundes gewidmet werden (vor allem bei der Rotbank). Rohblöcke, die für den späteren Außeneinsatz bestimmt sind, sollten einer genauen petrografischen Prüfung unterzogen werden, um mögliche Verwitterungsassoziierte Schäden zu vermeiden.

Hingegen zeigen die Schillkalke- bzw. Kalksteine der Gold- und Blaubank nur eine mäßige Frostbeständigkeit und können somit nur bedingt für den Außeneinsatz empfohlen werden. Aufgrund ihrer petrografischen Zusammensetzung neigen diese beiden Quaderkalke häufig dazu, infolge der Frosteinwirkung Abplatzungen oder sogar Risse auszubilden. Auch die weiteren ermittelten Eigenschaften, wie eine geringe Wasseraufnahme oder ein geringer Masseverlust nach 168 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen, wiegen diese nachteiligen Materialeigenschaften nicht auf. Um diese Gesteine dennoch im Außeneinsatz beständig nutzen zu können, ist eine sehr detaillierte petrografische Untersuchung der Rohblöcke unabdingbar.

Aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit (aber großen petrografischen Heterogenität), sind die Gesteine der Zugbank und der Schillkalkeinschübe unter der Prämisse der Frostbeständigkeit kaum einheitlich zu bewerten und sollten im Falle einer Gewinnung dezidiert betrachtet werden. Die innerhalb dieser Studie ermittelten Werte suggerieren eine mäßige bis gute Frostbeständigkeit, die wegen der relativ geringen Probenanzahl und der oben beschriebenen Problematik allerdings nicht vollumfänglich repräsentativ erscheint. Dies trifft vor allem auf die Schillkalkeinschübe zu. Aufgrund ihrer konträren stratigraphischen Lage und unterschiedlichen Gesteinszusammensetzung, sind auch die ermittelten Werte für die Frostbeständigkeit z. T. unterschiedlich.

Bedingt durch ihre gelben tonig-mergligen Einschaltungen sind die Gelbflaserkalksteine als mäßig bis nicht frostbeständig anzusehen. Die Beständigkeit nach 168 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen war maßgeblich von der Menge und der Verteilung dieser Einschaltungen bedingt. Insgesamt zeigen die ermittelten Werte, dass der Gelbflaserkalk den höchsten Masseverlust und die gravierendsten frostbedingten Gefügeveränderungen (Abplatzungen, Risse bis zur vollständigen Desintegration bzw. Destruktion des Prüfkörpers) aufweist. Aufgrund der vielfältigen Verteilungsmuster der gelben-tonig-mergligen Einschaltungen wird der Gelbflaserkalk in Kapitel 5.3 detaillierter betrachtet und eine mögliche Verwendbarkeit diskutiert.

5 Auswertung

Als Fazit der Quaderkalk-Erkundung lässt sich zusammenfassend feststellen, dass neun der 16 abgeteuften Bohrungen als fündig zu bewerten sind (Tab. 27, Abraum-zu-Rohstoffverhältnis ≤ 5 sowie Vorliegen einer ausreichenden gesteinsmechanischen und petrografischen Qualität). Im Folgenden sind die Teilerkundungsgebiete nach den jeweils auftretenden rohstoffgeologischen Potenzialen bewertet (Tab. 2). Zusätzlich wurden Vorschläge für Potenzialgebiete erarbeitet, auf Basis der Ergebnisse dieser Studie sowie der geologischen Landesaufnahme Bayerns.

Tab. 27: Bewertung der nutzbaren Gesteinsmächtigkeiten des OHQ in den Bohrkernen Ki 1 bis Ki 16. Das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis ergibt sich aus der Division der Abraummächtigkeit (m) durch die nutzbare Mächtigkeit (m) des OHQ (Werkstein- und GaLa-Bau-Qualität).

Bohrung	Abraum (m)	Mächtigkeit des OHQ (m)	Nutzbare Mächtigkeiten des OHQ in Werkssteinqualität (m)	Nutzbare Mächtigkeiten des OHQ in GaLa-Bau-Qualität (m)	Abraum-zu-Rohstoffverhältnis
Ki 1	10,5	4,3	3,2	0,0	3,8
Ki 2	14,6	5,7	4,1	0,0	3,6
Ki 3	7,3	1,2	0,0	0,0	-
Ki 4	11,8	5,6	3,8	0,0	3,1
Ki 5	11,7	8,1	5,6	2,4	1,5
Ki 6	51,4	1,8	0,0	1,0	51,4
Ki 7	4,4	4,4	2,7	0,0	1,6
Ki 8	8,0	5,5	1,4	2,1	2,3
Ki 9	13,7	4,2	0,3	1,0	10,6
Ki 10	27,2	3,1	0,0	0,5	54,4
Ki 11	8,3	6,1	2,5	0,0	3,3
Ki 12	8,6	4,6	0,0	1,2	7,5
Ki 13	19,6	3,4	0,4	0,0	49,0
Ki 14	7,8	5,1	2,7	0,0	2,9
Ki 15	5,0	3,0	0,0	0,0	-
Ki 16	7,7	6,1	3,8	0,6	1,8

5.1 Bewertung der Rohstoffpotenziale

5.1.1 Teilerkundungsgebiet I

Die vier abgeteuften Bohrungen im Teilerkundungsgebiet I beschreiben eine nach Osten einfallende Morphologie der Quaderkalkoberfläche. In Analogie dazu nimmt auch die Überdeckung in östlicher Richtung zu (Abb. 42 und Abb. 43). Die Abraum-zu-Rohstoffverhältnisse sind mit Ausnahme von Ki 11 schlecht und liegen weit über dem derzeit ökonomisch rentablen Grenzwert von 5.

Petrografisch sind die Schillkalk dieses Gebiets stark durchwachsen von zahlreichen gelben Einschaltungen, die häufig zur Entfestigung des Gesteinsverbunds und damit zu einer drastischen Verschlechterung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften führen. Dadurch sind die meisten dieser Gesteine nicht geeignet für die Verwendung als Naturwerkstein.

Einzig die Ergebnisse für die Schillkalk führenden Horizonte des Oberen Hauptquaderkalks der Erkundungsbohrung Ki 11 fallen positiv aus. Sowohl Abraum-zu-Rohstoffverhältnis, als auch die petrografische und gesteinsphysikalische Beschaffenheit sind moderat bis gut und würden einen Abbau rechtfertigen.

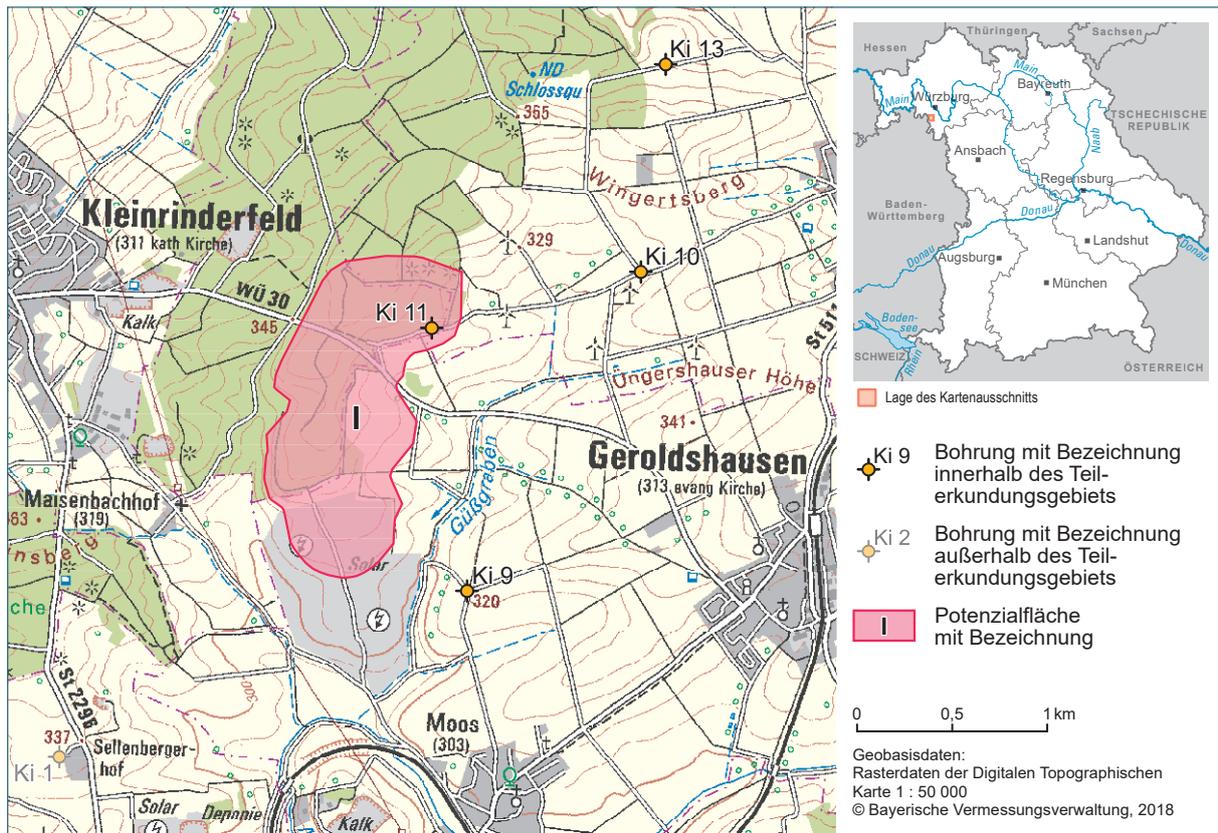


Abb. 42: Rohstoffpotenziale im Teilerkundungsbereich I.

Zusätzlich zum Oberen Hauptquaderkalk existieren in diesem Teilerkundungsbereich sowohl die Zugbank im Ostracodenton (ca. 0,3 m mächtig und meist als GaLa-Stein geeignet), als auch der Grenzquader. Die schwankende petrografische Beschaffenheit und Mächtigkeit (wenige Dezimeter bis 2,3 m!) des Grenzquaders lässt eine eindeutige Verwendungsempfehlung nicht zu. Jedoch zeigen die gesteinsphysikalischen Untersuchungen dieser Studie, dass dieses Gestein vergleichbare Eigenschaften wie der Obere Hauptquader besitzen kann. In Abbaustellen, in denen dieser Horizont mit einer ausreichenden Mächtigkeit und Festigkeit auftritt, sollte eine Nutzung erwogen werden.

Lokalgeologisch in der Peripherie des Abtsrains gelegen, stellt Ki 11 einen Randpunkt eines gut erreichbaren Quaderkalkvorkommens mit großer Flächenausdehnung und variabler Überdeckung dar (vergleiche Abb. 16, Abb. 42 und Abb. 43). Innerhalb dieser Fläche steigt der Quaderkalk sukzessive im Höhengiveau von Süd nach Nord an. Laut geologischer Karte (GLA 1964, LFU 2010) taucht der Horizont des Oberen Hauptquaderkalks etwas nördlich der Bohrung Ki 11 ab und markiert damit die Begrenzung des hier ausgehaltenen Potenzials. Ob und wie der weitere Verlauf des Oberen Hauptquaderkalks sich im Anschluss an diese Fläche verhält, ist unbekannt.

Daraus ergibt sich eine Potenzialfläche mit einer Ausdehnung von 83 (ohne Solarpark) bzw. 111 ha (mit Solarpark). Überdeckung und Mächtigkeit des Nutzhorizontes dürften überwiegend dem in der Nähe gelegenen Steinbruch der Steinnutzung Kleinrinderfeld GmbH ähneln. Dem relativ großen Potenzial dieses Vorkommens stehen allerdings auch konkurrierende Nutzungen gegenüber (z. B. FFH-Gebiet und im südlichen Teil der Betrieb der Solaranlagen, RIS BY-Abfrage, 01/2019).

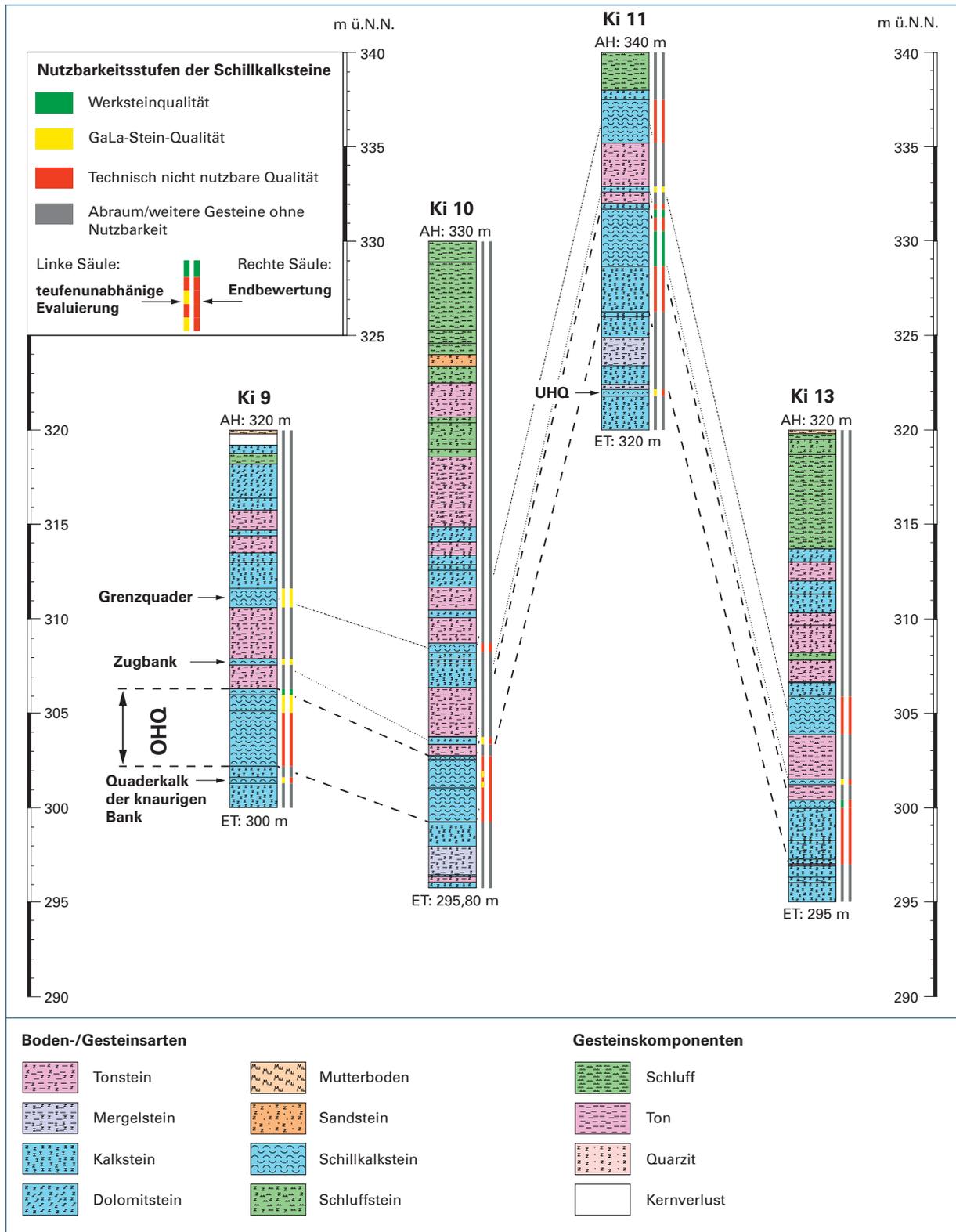


Abb. 43: Rohstoffgeologische Bewertung der vier Erkundungsbohrungen im Teilerkundungsgebiet I.

5.1.2 Teilerkundungsgebiet II

Zwei der drei abgeteufte Bohrungen im Teilerkundungsbereich II erwiesen sich als fündig. Dabei handelt es sich um die Bohrung Ki 5 und Ki 14 (Abb. 44). Die dritte Bohrung (Ki 6, nicht abgebildet) zeigte, dass der Horizont des Oberen Hauptquaders in Analogie zum nördlich gelegenen Teilerkundungsgebiet I generell nach Osten einfällt.

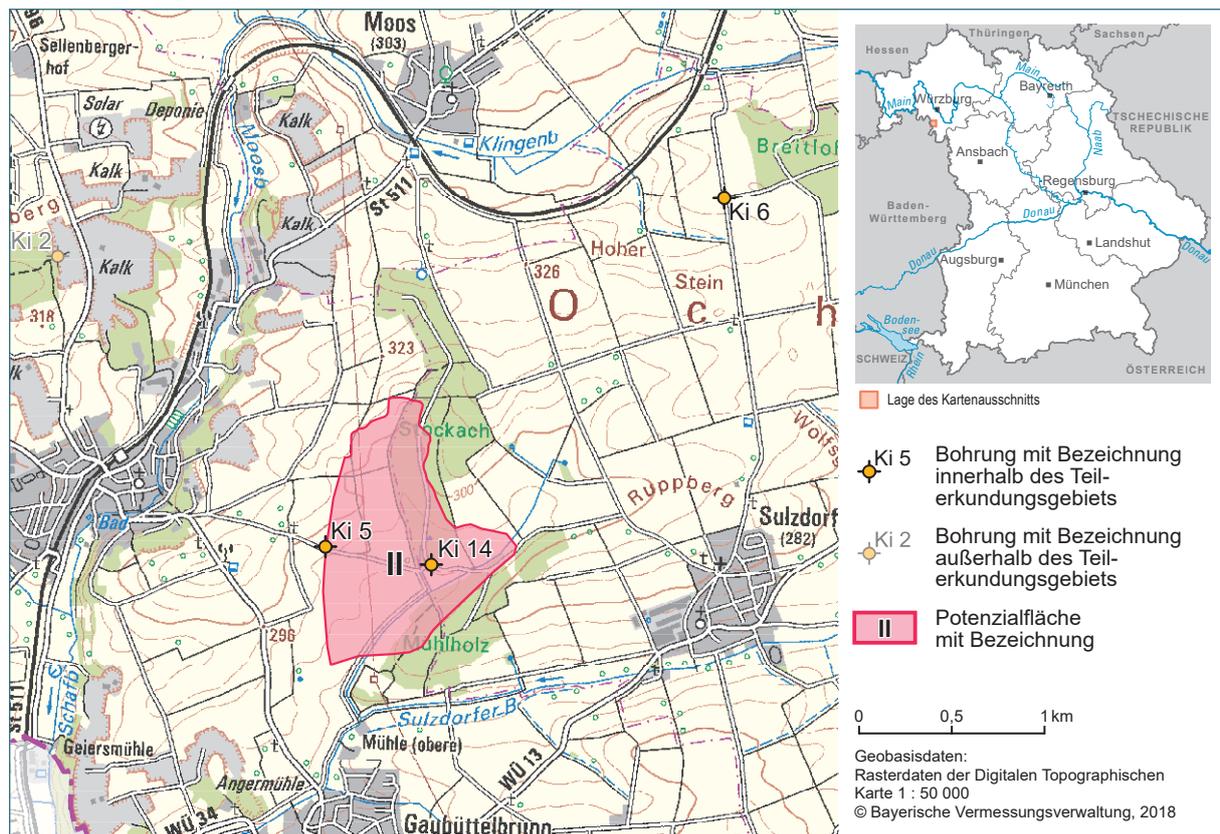


Abb. 44: Ermittelte Rohstoffpotenziale im Teilerkundungsbereich II.

Sowohl die petrografische Beschaffenheit (viel poriges Material!) als auch das Abraum-zu-Rohstoffverhältnis der Bohrungen Ki 5 und Ki 14 lassen eine positive Bewertung zu (Abb. 45). Im besonderen Maße überzeugen die Schillkalk des Oberen Hauptquaderkalks der Ki 5. Durch eine absolute Mächtigkeit von 8,05 m, und ein moderates Abraum-zu-Rohstoffverhältnis von 1,54, erzielt diese Bohrung die beste Bewertung der gesamten Studie.

Die in östlicher Fortsetzung gelegene Ki 14 weist immer noch ein gutes Verhältnis von Rohstoffqualität (2,7 m Werksteinqualität) und Abraummächtigkeit (7,8 m Abraum) auf, allerdings wird die abnehmende Qualität des Quaderkalks deutlich, bei gleichzeitiger Mächtigkeitsabnahme.

Auch in diesem Erkundungsbereich konnten weitere Schillkalk-Horizonte (Grenzquader: Ki 5, Ki 14, Quaderkalk der knaurigen Bank: Ki 6) erbohrt werden. Jedoch ist sowohl die petrografische Ausbildung als auch die anstehende Mächtigkeit so schlecht, dass eine ökonomische Nutzung zweifelhaft erscheint. Einzig die Zugbank im Ostracodenton kommt für eine Nutzung (z. B. im GaLa-Bau) infrage.

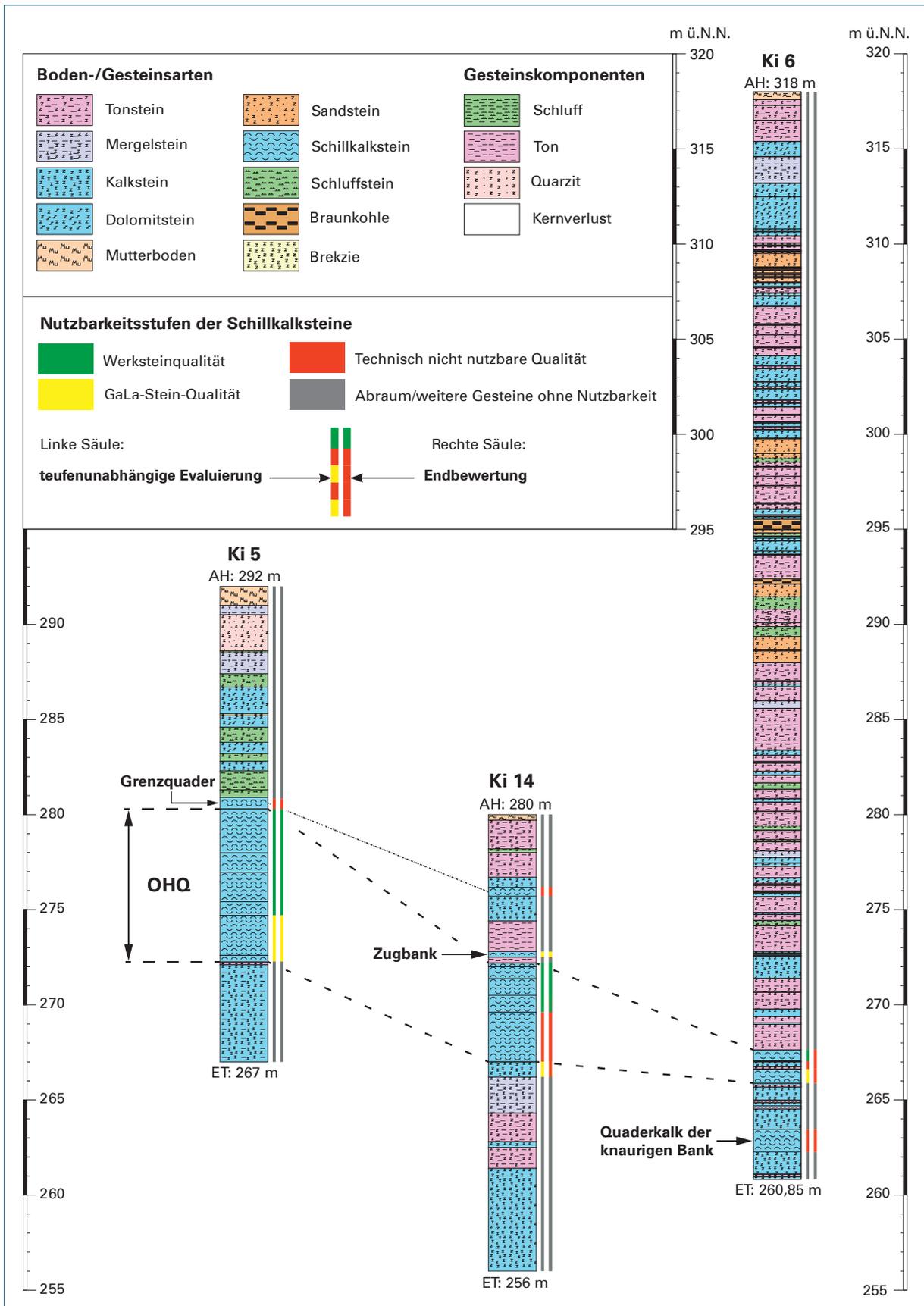


Abb. 45: Rohstoffgeologische Bewertung der drei Erkundungsbohrungen im Teilerkundungsgebiet II.

In Kombination mit der geologischen Situation (LFU 2010) vor Ort ergibt sich aus den Ergebnissen der Erkundungsbohrungen eine Potenzialfläche für einen möglichen Quaderkalkabbau von 84 ha (Abb. 44). Dieses Potenzial grenzt unmittelbar an ein bestehendes Vorranggebiet in westlicher Fortsetzung an. Die zu erwartende Gesteinsmächtigkeit des Oberen Hauptquaderkalks nimmt wahrscheinlich von West nach Ost ab. In Süd-Ost-Richtung ist zudem ein deutlicher Anstieg des Abraums anzunehmen.

Teile der ausgehaltenen Potenzialfläche sind als Biotop eingestuft, ein Abbau müsste dementsprechend mit den zuständigen Naturschutzbehörden abgestimmt werden (RIS BY-Abfrage, 01/2019). Ansonsten ist der überwiegende Teil der Potenzialflächen landwirtschaftlich genutzt und über eine z. T. asphaltierte Straße von Gaubüttelbrunn aus gut erreichbar.

5.1.3 Teilerkundungsgebiet III

Von den vier im Teilerkundungsgebiet III abgeteufften Bohrungen (Abb. 46) sind drei als fündig einzustufen (Ki 4, Ki 8 und Ki 16). Erkundungsbohrung Ki 3 erbohrte eine Verkarstung und in Folge dieser nur einen kleinen, veränderten Teil des Oberen Hauptquaderkalks.

Der Verlauf des Oberen Hauptquaderkalks kann in diesem Gebiet als ein nach Nord-Nord-West ansteigender Horizont beschrieben werden (von Ki 3 mit der OHQ-Oberkante bei 298 m NN zu Ki 16 mit 325 m NN).

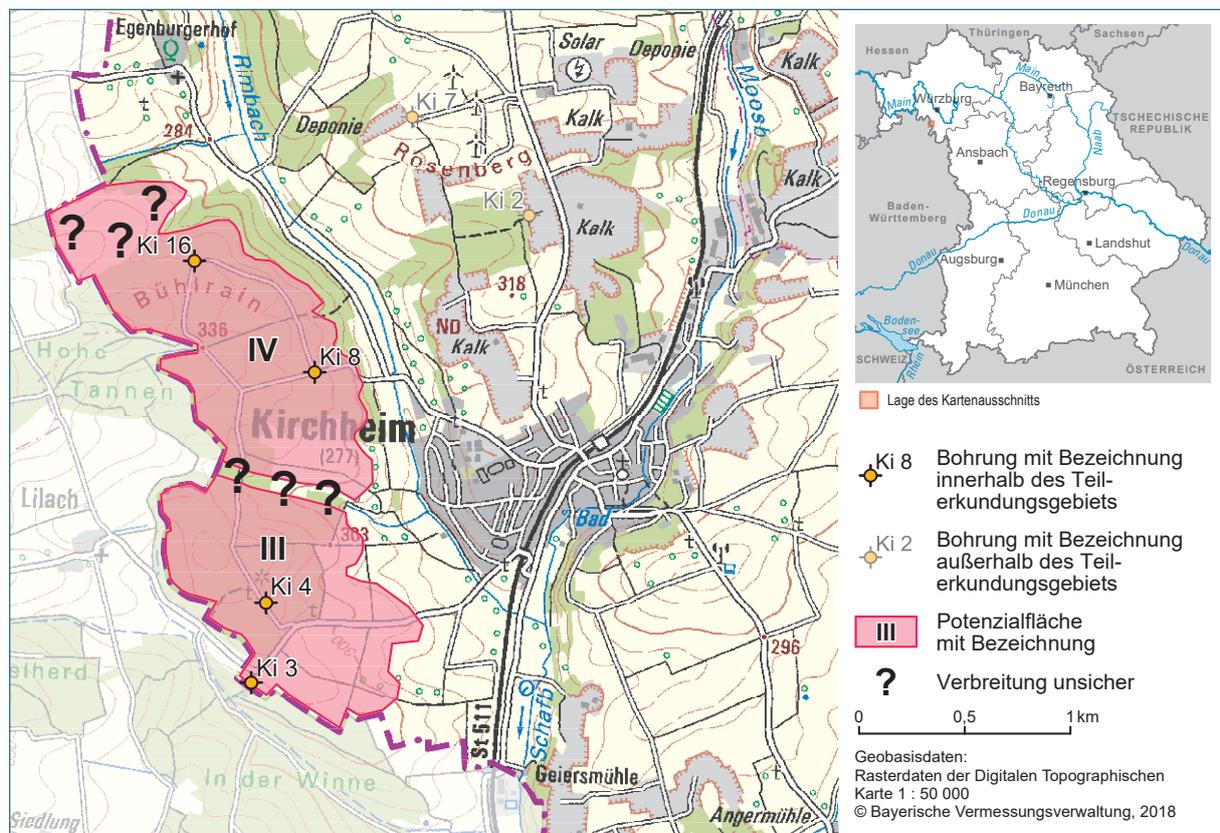


Abb. 46: Ermittelte Rohstoffpotenziale im Teilerkundungsbereich III.

Die petrografische und gesteinsphysikalische Qualität des OHQ ist gut und auch die Abraum-zu-Rohstoffverhältnisse liegen mit Werten zwischen 1,75 und 2,96 im Bereich der ökonomischen Gewinnbarkeit. Die besten Ergebnisse erreichen dabei die Bohrungen Ki 4 und Ki 16 (Abb. 47 und Tab. 27).

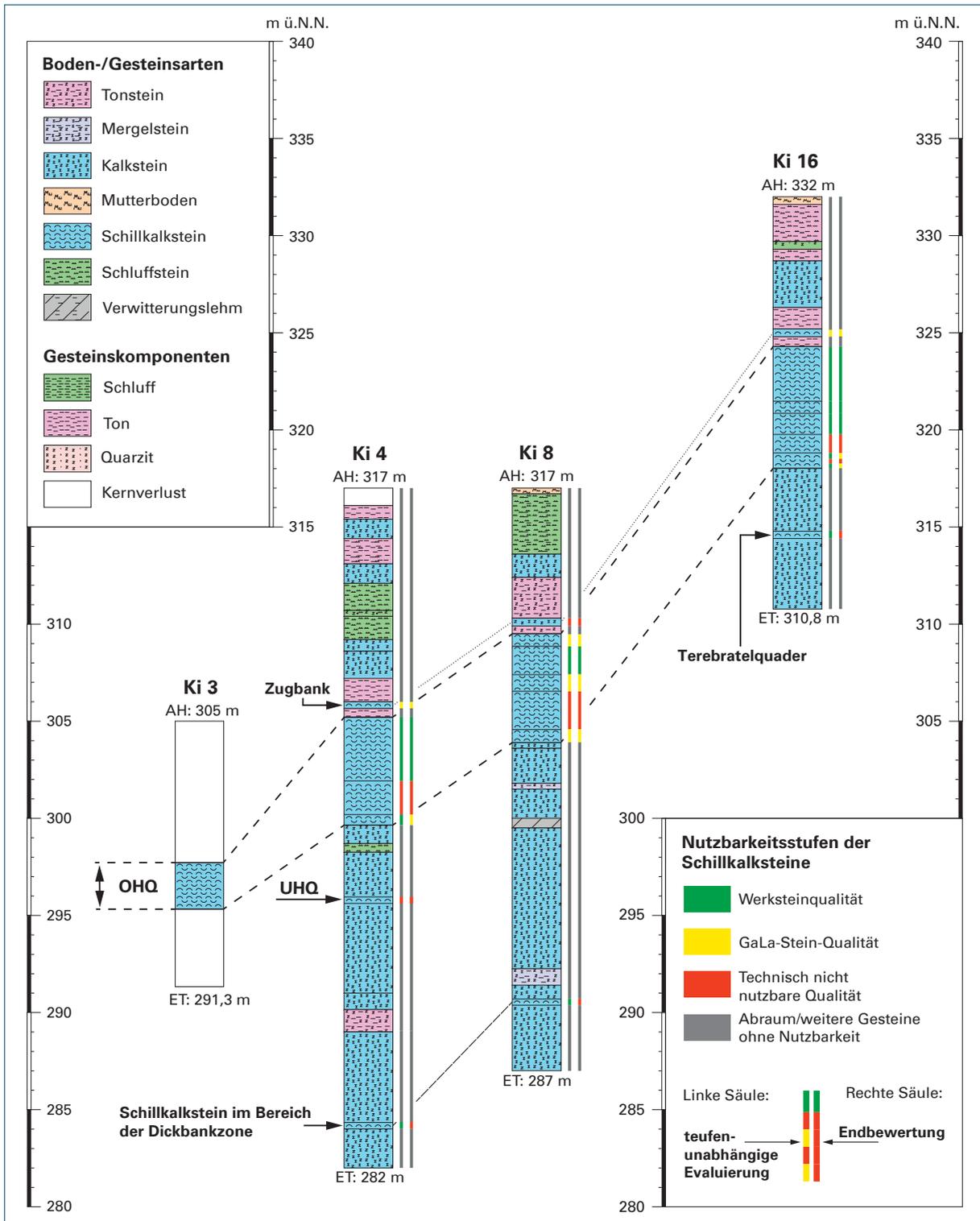


Abb. 47: Rohstoffgeologische Bewertung der vier Erkundungsbohrungen im Teilerkundungsgebiet III.

Zusätzlich zum OHQ wurden noch weitere Schillkalk führende Horizonte erbohrt. Wenngleich diese Einheiten (Schillkalksteine im Bereich der Dickbankzone, UHQ und Terebratelquader) vergleichbare petrografische und gesteinsphysikalische Eigenschaften wie der OHQ aufweisen, bedingt in den meisten Fällen ihre Teufenlage und geringe Mächtigkeit den Verlust einer ökonomischen Gewinnbarkeit. Einzig die Zugbank im Ostracodenton bietet sich für eine weitere Verwendung an.

Aus den Ergebnissen der Erkundungsbohrungen und der geologischen Landesaufnahme (LFU 2010) ergibt sich eine dreigeteilte Potenzialfläche mit einer Gesamtfläche von 200 ha (vergleiche Abb. 46, südliche Fläche: 88 ha; nördliche Fläche ohne den Ölberg: 94 ha; Fläche um den Ölberg: 18 ha). Die ausgehaltenen Gebiete sind jedoch geteilt durch einen schmalen Streifen einer quartären Talfüllung, im ehemaligen Einzugsgebiet eines Gewässers gelegen, der den Quaderkalk teilweise ausgedünnt oder ganz ausgeräumt haben könnte. Eine weitere Unsicherheit besteht im Bereich des Ölberges im nördlichsten Teil des Potenzialgebiets, wo Hinweise auf Quaderkalk in Form eines Ausstriches (auf der dGK 25) fehlen.

Die Mächtigkeit des OHQ dürfte hier in Analogie zu den Bohrkernen relativ konstant sein; der Abraum sollte nur in unmittelbarer Nähe zu den höchsten Punkten der lokalen Erhebungen des Poppbergs und des Bühlrains die 20 bis 25 m Grenze erreichen bzw. leicht überschreiten.

Insgesamt handelt es sich bei der ausgehaltenen Potenzialfläche um das größte noch unverritzte Potenzial im Abbaugbiet Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn. Konkurrierende Nutzungen gibt es nur in kleinen Bereichen direkt westlich von Kirchheim (Flachland Biotope, RIS BY-Abfrage 01/2019).

5.1.4 Teilerkundungsgebiet IV

Das Teilerkundungsgebiet IV ist zugleich das Abbaugbiet für die Quaderkalkvarietäten „Kuacker“ und „Sellenberger“. In diesem Bereich wurden fünf Erkundungsbohrungen abgeteuft (Abb. 48), von denen drei als fündig einzustufen sind (Ki 2, Ki 7 und Ki 1). Die Bohrung Ki 15 erbohrt eine Verkarstung im Ausstrich des OHQ.

Der Quaderkalkhorizont beschreibt in diesem Teilabschnitt seinen größten topologischen Anstieg (Abb. 49; zwischen Ki 2 und Ki 1 gibt es einen Höhenanstieg um 27,1 m auf einer Distanz von 1,1 km) und streicht an den Tälern des Rim- und Moosbaches sowie am Hainsberg aus.

Die petrografische und gesteinsmechanische Güte der Quaderkalke ist mäßig bis gut, verringert sich allerdings analog zur Mächtigkeit in nord-nord-westlicher Richtung. Die Abraum-zu-Rohstoffverhältnisse schwanken zwischen 1,63 (Ki 7) und 0 (Ki 15).

Neben dem Oberen Hauptquaderkalk konnten noch weitere Schillkalksteine erbohrt werden. Jedoch spielen diese Einheiten für die Wirtschaftlichkeit des Quaderkalk-Abbaus kaum eine Rolle (meist zu geringmächtig bei hohem Abraum). Die einzig aushaltende Einheit, im Teilerkundungsgebiet IV mit einer möglichen ökonomischen Bedeutung ist die Zugbank im Ostracodenton. Die weiteren Schillkalkbänke besitzen mit Mächtigkeiten zwischen 0,2 und 0,65 m eine meist nicht ausreichende Mächtigkeit im Verhältnis zum zusätzlich zu bewältigendem Abraum. Eventuell könnte der Terebratelquader aus der Erkundungsbohrung Ki 15 ein ökonomisch gewinnbares Potenzial unter dem Oberen Hauptquaderkalk darstellen.

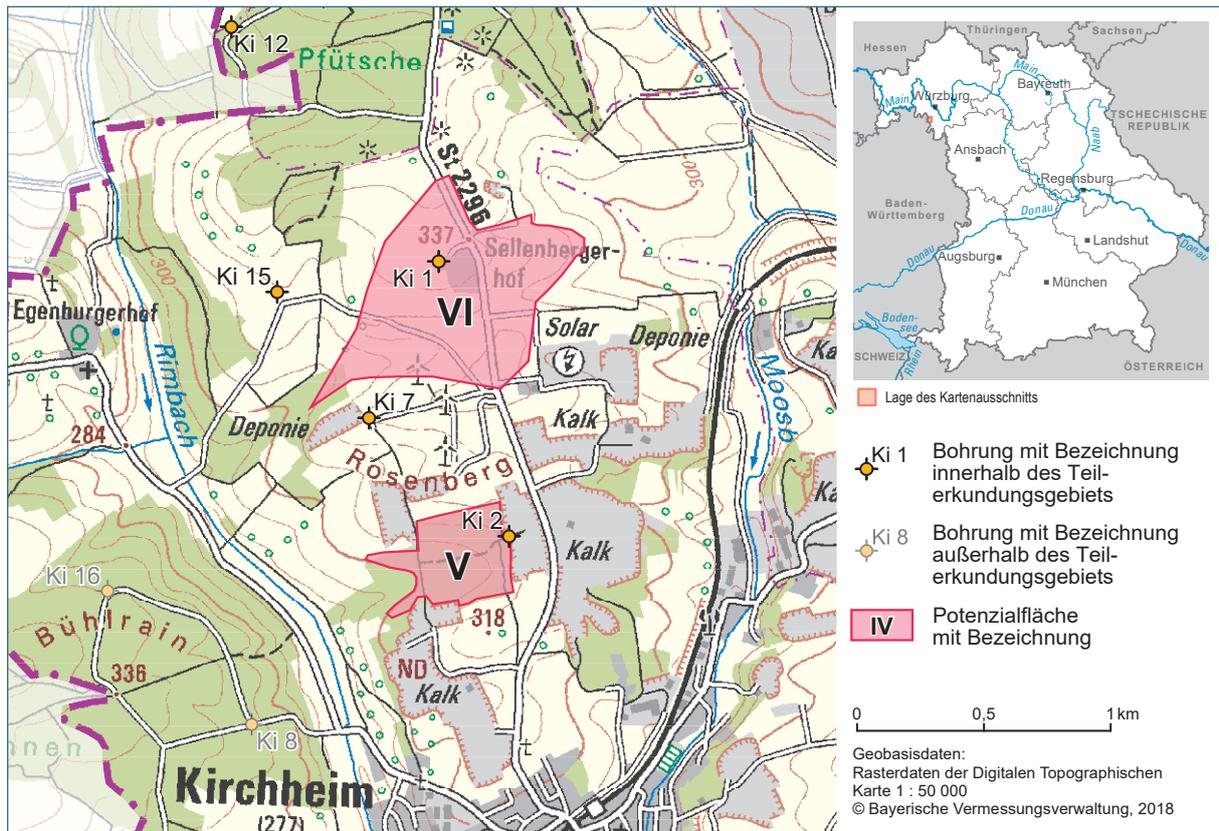


Abb. 48: Ermittelte Rohstoffpotenziale im Teilerkundungsbereich IV.

Da der erkundete Bereich bereits ein Vorranggebiet zur Rohstoffgewinnung beinhaltet sollen die ausgehaltenen Potenzialflächen dieser Studie als künftige Erweiterungsmöglichkeiten des ausgewiesenen Vorranggebiets verstanden werden. Dabei handelt es sich um eine Gesamtfläche von 63 ha (vergleiche Abb. 48), die sich aufteilt auf eine kleinere, südliche Fläche (14 ha) und eine größere, nördlich gelegene Fläche (49 ha). Nach heutigen Bewertungskriterien ist davon auszugehen, dass die größere, nördlich gelegene Fläche nur im Grenzbereich der ökonomischen Gewinnbarkeit abbaubar ist. Hingegen besitzt die Fläche im Süden trotz ihrer kleineren Ausdehnung ein höheres Potenzial. Jedoch bestehen für diese Fläche zahlreiche konkurrierende Nutzungen (Flachland Biotop, FFH-Gebiet; RIS BY-Abfrage 01/2019). Auch für die nördlich gelegene Fläche bestehen konkurrierende Nutzungen (Flachland Biotop, Siedlungen) und eine Rohstoffgewinnung ist besonders im Bereich um den Sellenberger Hof höchst unwahrscheinlich.

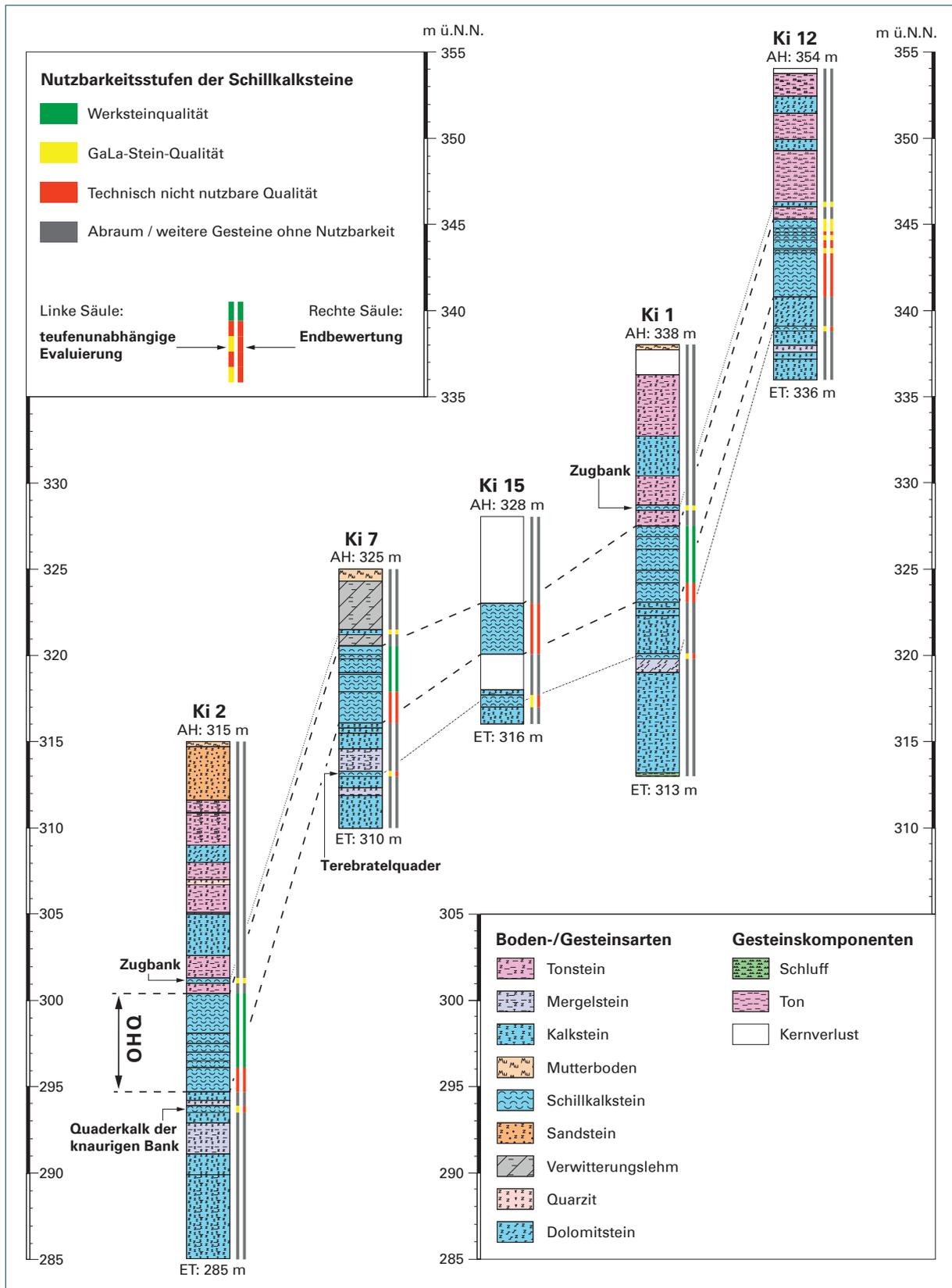


Abb. 49: Rohstoffgeologische Bewertung der fünf Erkundungsbohrungen im Teilerkundungsgebiet IV.

5.2 Modellierung des Oberen Hauptquaderkalks

Das Ergebnis der Modellierung ermöglicht eine näherungsweise Prognose über die Tiefenlage und Mächtigkeit des OHQ im Untersuchungsgebiet. Jedoch ist eine Aussage über die jeweilig vorliegende Gesteinsqualität aufgrund der sehr wechselhaften Petrografie des OHQ nicht damit möglich.

Allgemein beschreibt der OHQ im Untersuchungsgebiet eine nach Süd-Süd-Ost einfallende, z. T. stark fragmentierte Schicht (Abb. 50; „Karbonat-Rampe“) deren Mächtigkeit stark schwanken kann. Im Detail fällt auf, dass im Metermaßstab ein welliger Verlauf des Schichtpakets vorliegt (ähnlich der Zugbank im Ostracodenton). Es existieren lokale Minima und Maxima der Mächtigkeit und der Verlauf des Horizonts beschreibt kein gleichbleibendes Einfallen (z. B. zwischen Ki 2 und Ki 1).

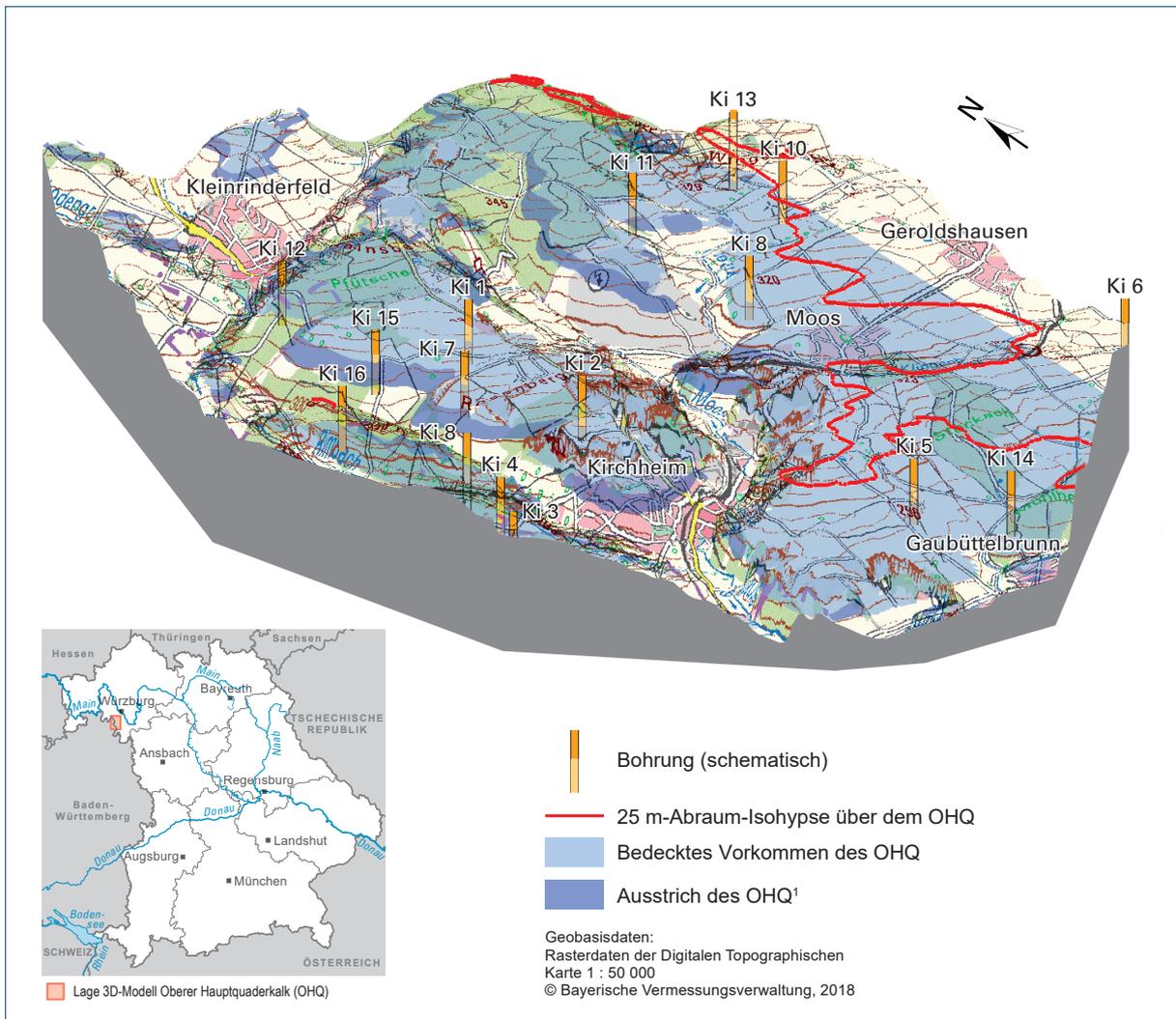


Abb. 50: Geologisches 3D-Modell (ArcScene, 10-fach überhöht dargestellt) des Oberen Hauptquaderkalks im Gebiet Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn. ¹ (nach GLA 1964, LfU 2010)

Bedingt durch den nach Süd-Süd-Ost einfallenden Charakter des Oberen Hauptquaderkalks besitzt der Bereich östlich von Moos mit sinkenden Quaderkalkmächtigkeiten, einhergehend mit steigenden Abraum, kaum rohstoffgeologisches Potenzial (Abb. 50 und Abb. 52).

Im Zuge der ökonomischen Bewertung potenzieller Quaderkalkvorkommen sticht vor allem die in Kapitel 5.1.1 ermittelte erste Potenzialfläche aufgrund ihrer hohen Quaderkalkmächtigkeit und des geringen Abraums heraus und bietet sich für eine weiterführende Erkundung an (Abb. 51 und Abb. 52). Auch die weiteren Potenzialflächen zeigen im Modell günstige Abraum-zu-Rohstoffverhältnisse.

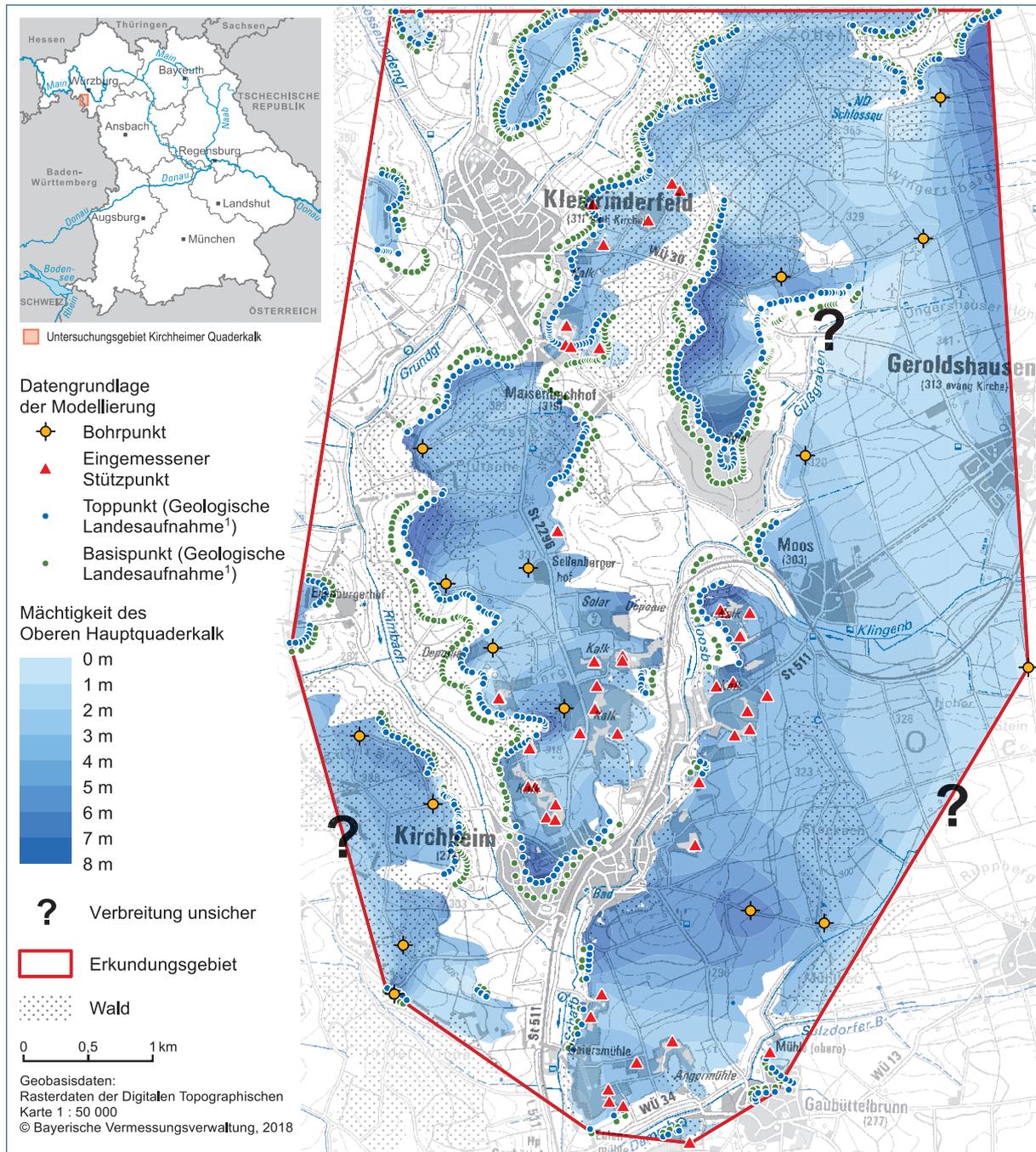


Abb. 51: 2D-Darstellung der Mächtigkeit des Oberen Hauptquaderkalks im Gebiet Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn. Verwendete Datengrundlage der Modellierung (16 Bohrungen, 51 eingemessene Stützpunkte, 1452 Punkte der geologischen Kartierung¹ – leicht verändert nach GLA 1964, LfU 2010) und Geografische Lage des Quaderkalkhorizontes.

Aufgrund der hohen Datendichte von 1.519 Punkten auf einer Fläche von ca. 4.300 ha stellt das Modellierungsergebnis einen ersten flächendeckenden Ansatz zur Abschätzung der Mächtigkeit des Oberen Hauptquaderkalks bzw. der Abraummächtigkeit aus heutiger Sicht dar (Abb. 51 und Abb. 52).

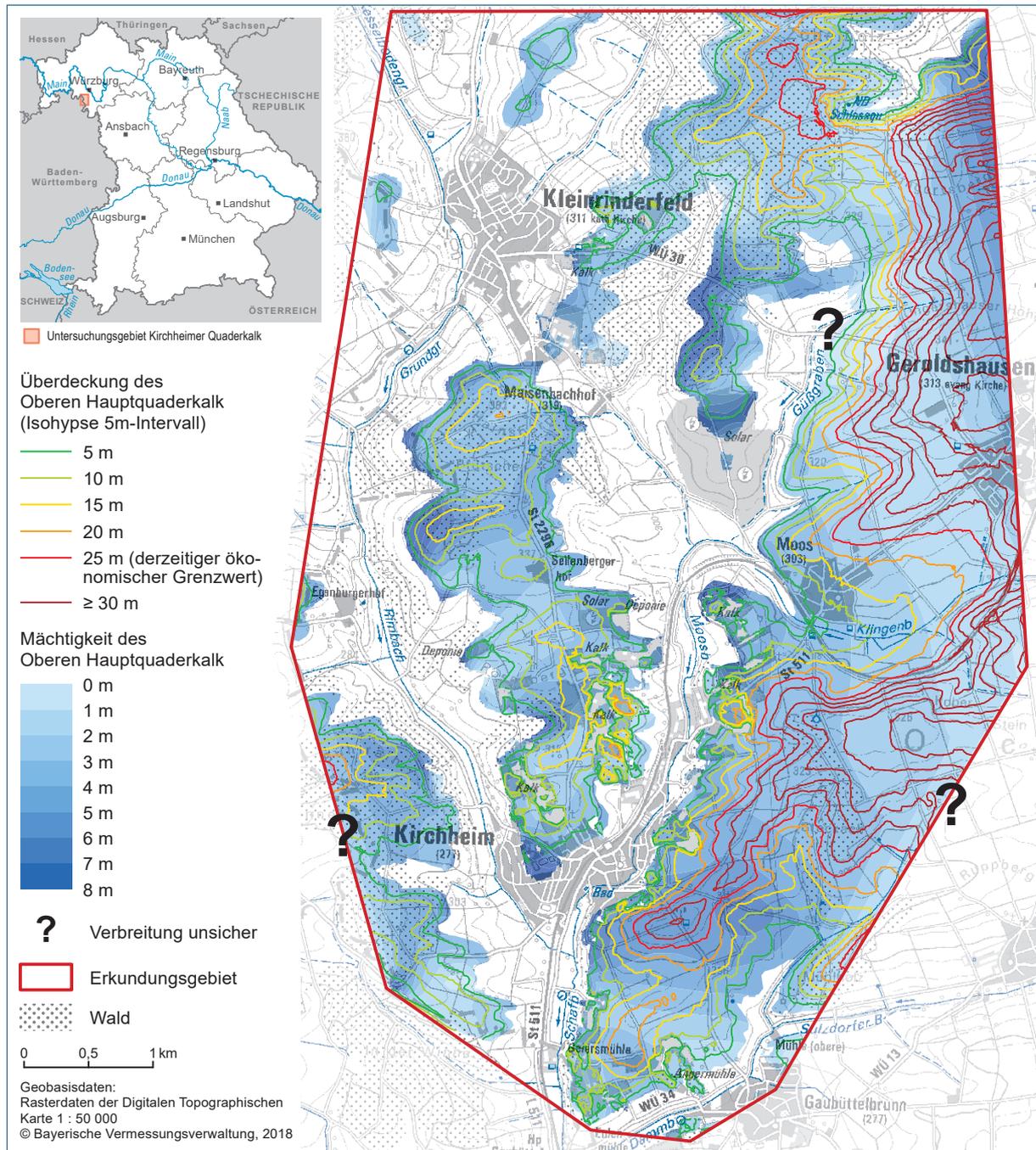


Abb. 52: 2D-Darstellung der Mächtigkeit des Oberen Hauptquaderkalks im Gebiet Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn. Kombinierte Darstellung der Mächtigkeit des OHQ mit dem darüber liegenden Abraum.

Das beschriebene Modell kann unter www.lfu.bayern.de/geologie/rohstoffe/rohstoffprogramm/qua-derkalk abgerufen und zur interaktiven Mächtigkeitsabfrage verwendet werden (Abb. 53). Die dargestellten Ergebnisse besitzen keine kleinmaßstäbliche Punktsicherheit, sondern sollten eher als „Tendenzen“ verstanden werden. Da eine Modellierung mit einer Vereinfachung komplexer Sachverhalte einhergeht, besitzt das generierte Modell natürlicherweise einen mehr oder weniger großen Fehler und die wiedergegebenen Inhalte entsprechen nicht 1 zu 1 der Realität.

In Hinblick auf eine Datenevaluierung der Stützpunkte sei gesagt, dass, bedingt aus der Schwierigkeit der geologischen Feldkartierung einer relativ gering mächtigen Schicht in einem agrarwirtschaftlich intensiv genutzten Gebiet, es plausibel erscheint, wenn die Daten der geologischen Feldkartierung weniger genau sind, als die ermittelten Werte der Bohr- und Stützpunkte. Daraus resultierend ergeben sich vereinzelt wenige Bereiche, die nicht grundlegend falsch sein müssen, aber eine unrealistische geologische Form der Mächtigkeitsverteilung aufweisen (Abb. 51 und Abb. 52, z. B. der mit einem Fragezeichen markierte Bereich nordwestlich von Geroldshausen).

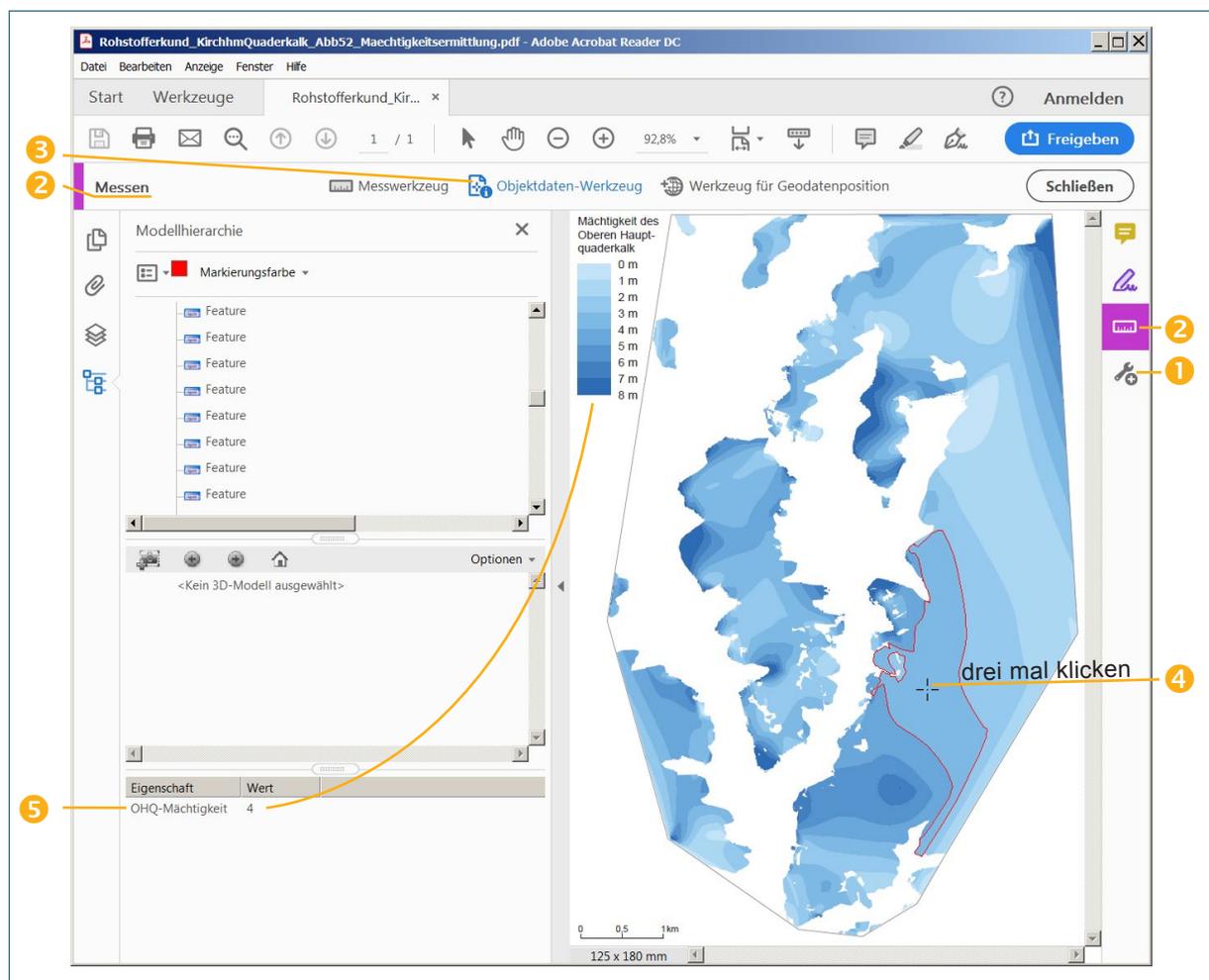


Abb. 53: Möglichkeit der Mächtigkeitsermittlung über das Tool „Messen“ und „Objektdatei-Werkzeug“ im Adobe Acrobat Reader DC. Nach dreimaligem Klicken der linken Maustaste auf die gewünschte Stelle ist die Mächtigkeitsangabe des Oberen Hauptquaderkalks bzw. die Abraummächtigkeit in der unteren linken Ecke zu finden.

5.3 Der Gelbfäserkalk und seine Verwendbarkeit

Der Gelbfäserkalk ist ein Kalk-/Schillkalkstein, der durch eine meist sehr dichte Matrix mit zahlreichen gelblichen Einschaltungen zu charakterisieren ist. Sie „durchflasern“ das Gestein diffus bis schlierenförmig und weisen unterschiedliche Härten auf. Im Raum Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn bildet dieser Horizont typischerweise den lithostratigraphischen Übergang zwischen dem Oberen Hauptquaderkalk und dem Gelben Kipper (Gelbe Mergel β) und erreicht Mächtigkeiten zwischen mehreren Dezimetern und Metern. In den aktiven Steinbrüchen im Raum Kirchheim ist der Gelbfäserkalk eine Art Grenzhorizont, bis zu dem der Werkstein ökonomisch gewonnen werden kann (Abb. 54 A und B).

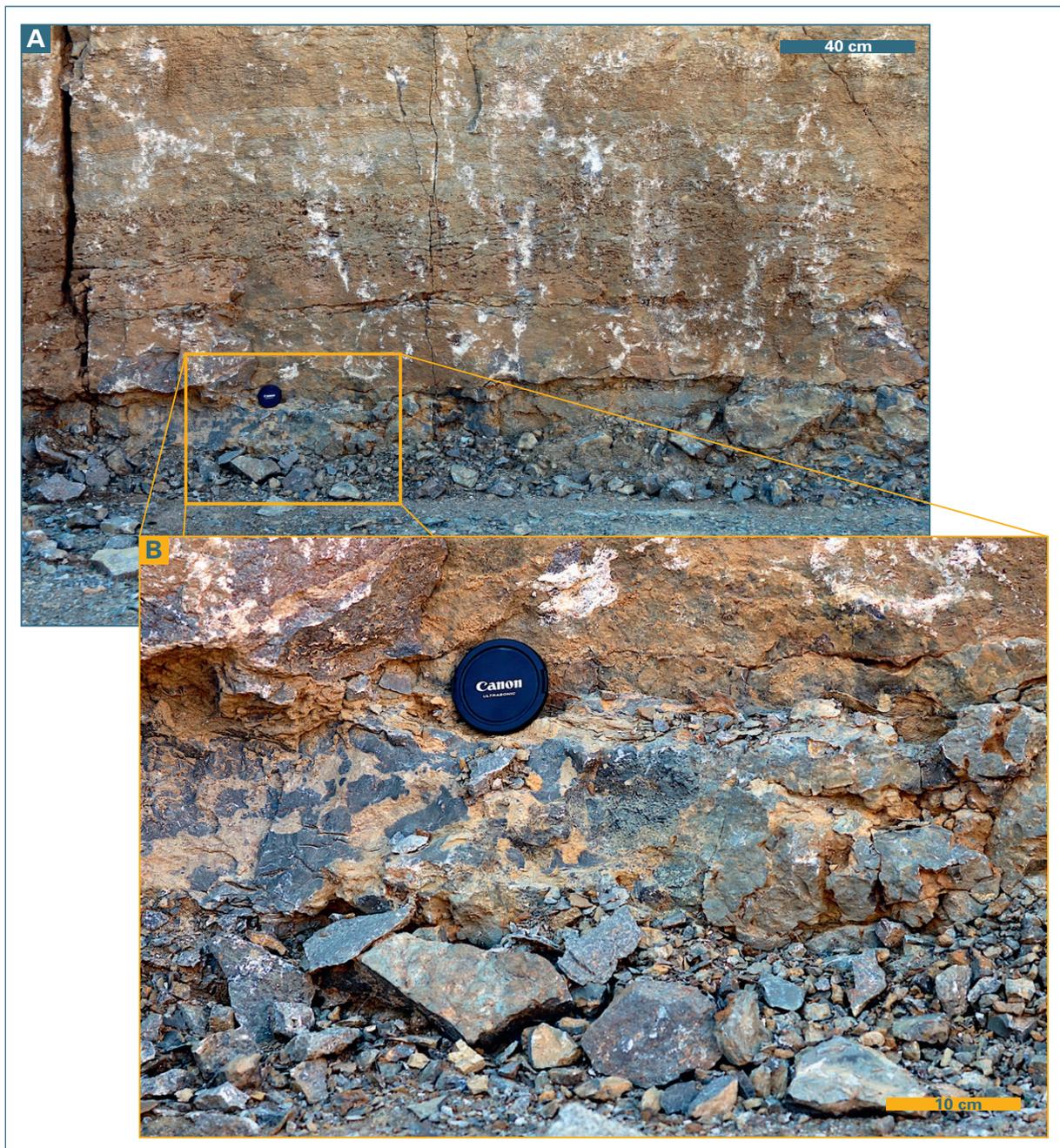


Abb. 54: Gelbfäserkalk an der Basis des Oberen Hauptquaderkalks im Gemeinschaftssteinbruch der Fa. Seibert und Verostone.

Durch seine Optik, die der Goldbank sehr ähnlich ist, kann es zu einer Verwechslung mit dieser kommen (Abb. 55 A und B). Dies bedingt, dass fälschlicherweise Gelbfaserkalk als Goldbank in den Handel gelangt. Begünstigt ist diese Beobachtung dadurch, dass die Goldbank meist nur eine sehr geringe Mächtigkeit aufweist und damit die Gewinnung für großdimensionierte Bauteile häufig nicht möglich ist. In der Praxis gestaltet sich die Unterscheidung auch deshalb schwierig, weil es häufig zu Überschneidungen zwischen den beiden „Varietäten“ kommt. Eine Unterscheidung dieser beiden Typen ist vor allem aus mineralogischer Sicht möglich, da eine Goldbank nach GLA (1984) eine Blaubank ist, die durch oxidative Umwandlung der kalkigen Matrix eine ockerfarbene Tönung angenommen hat.

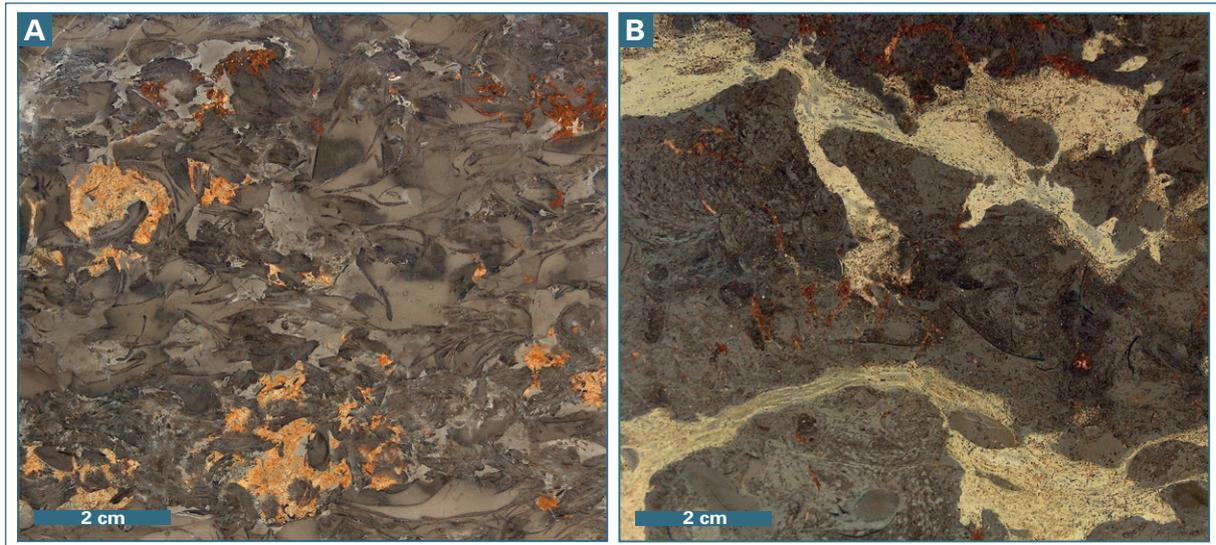


Abb. 55: Optischer Vergleich von Goldbank (A) und Gelbfaserkalk (B).

Jedoch impliziert die Gesteinsansprache „Gelbfaserkalk“ nicht per se, dass dieses Gestein unbrauchbar ist. Mit Blick auf seine gesteinsphysikalischen Kennwerte ist vor allem die Intensität und Verteilung der gelblichen Einschaltungen („Grad der Gelbfaserung“) ein wichtiges Kriterium für eine mögliche Verwendung. Denn mit steigendem Anteil der gelben Einschaltungen verschlechtern sich z. T. drastisch die bautechnischen Eigenschaften des Gesteins. Besonders davon betroffen sind die Druckfestigkeit, der Masseverlust nach 168 Frost-Tau-Wechseln oder die Längenänderung bei Wasseraufnahme (Abb. 56 A bis D).

In Hinblick auf eine technische Verwendbarkeit ist es wichtig, dass verwendete Blöcke nur relativ kleine Mengen diffus verteilte, gelbe Einschaltungen aufweisen, die keine größeren Schichtflächen und Fugen ausbilden, da diese die Anfälligkeit für Desintegration und Masseverlust bei natürlich ablaufenden Frost-Tau-Wechseln drastisch erhöhen würde. Eine direkte Quantifizierung dieser Problematik, also die Ausweisung eines Grenzwertes, ist mit den erzielten Ergebnissen nicht möglich. Um den verarbeitenden Betrieben einen besseren Überblick über besonders anfällige Verteilungsmuster zwischen Kalk-/Schillkalksteinen und gelblichen Einschaltungen zu verschaffen, wurden die Prüfkörper mit den größten Masseverlusten nach 168 Frost-Tau-Wechseln und den größten Werten der hygrischen Dilatationen (Extremwerte) in nachfolgender Abbildung (Abb. 57 A bis I) dargestellt. Um eine bessere Unterscheidung nach einer möglichen Verwendbarkeit zu ermöglichen, wurden die untersuchten Gelbfaserkalksteine nach Art und Menge der tonig-mergligen Einschaltungen in zwei Gruppen unterteilt, Gelbfaserkalk I und Gelbfaserkalk II.

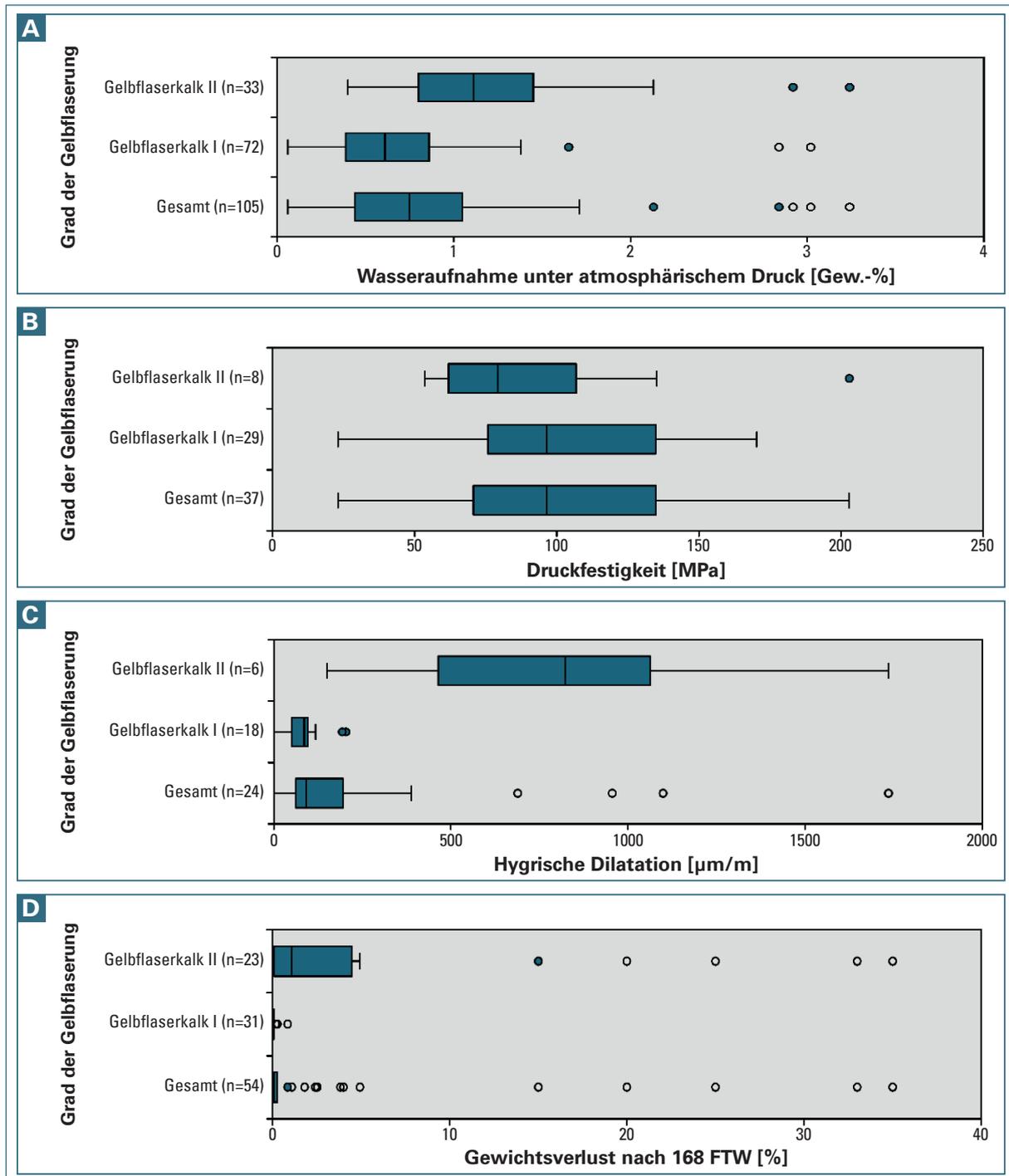


Abb. 56: Auswertung der gesteinsphysikalischen Messwerte der Gelbfaserkalksteine.

- Gelbfaserkalk I – Geeignet für zahlreiche bautechnische Verwendungen z. B. im Innenausbau als kleindimensionierte Bauteile oder für den GaLa-Bau (Abb. 58 A und B),
- Gelbfaserkalk II – Im Grenzbereich der technischen Verwendbarkeit, meist jedoch ungeeignet

Gruppe I ist zu charakterisieren durch eine geringe bis moderate Anzahl von fein- bis schlierenförmig im Kalkstein verteilten, gelblichen Einschaltungen, die keine Schichtfugen bilden.

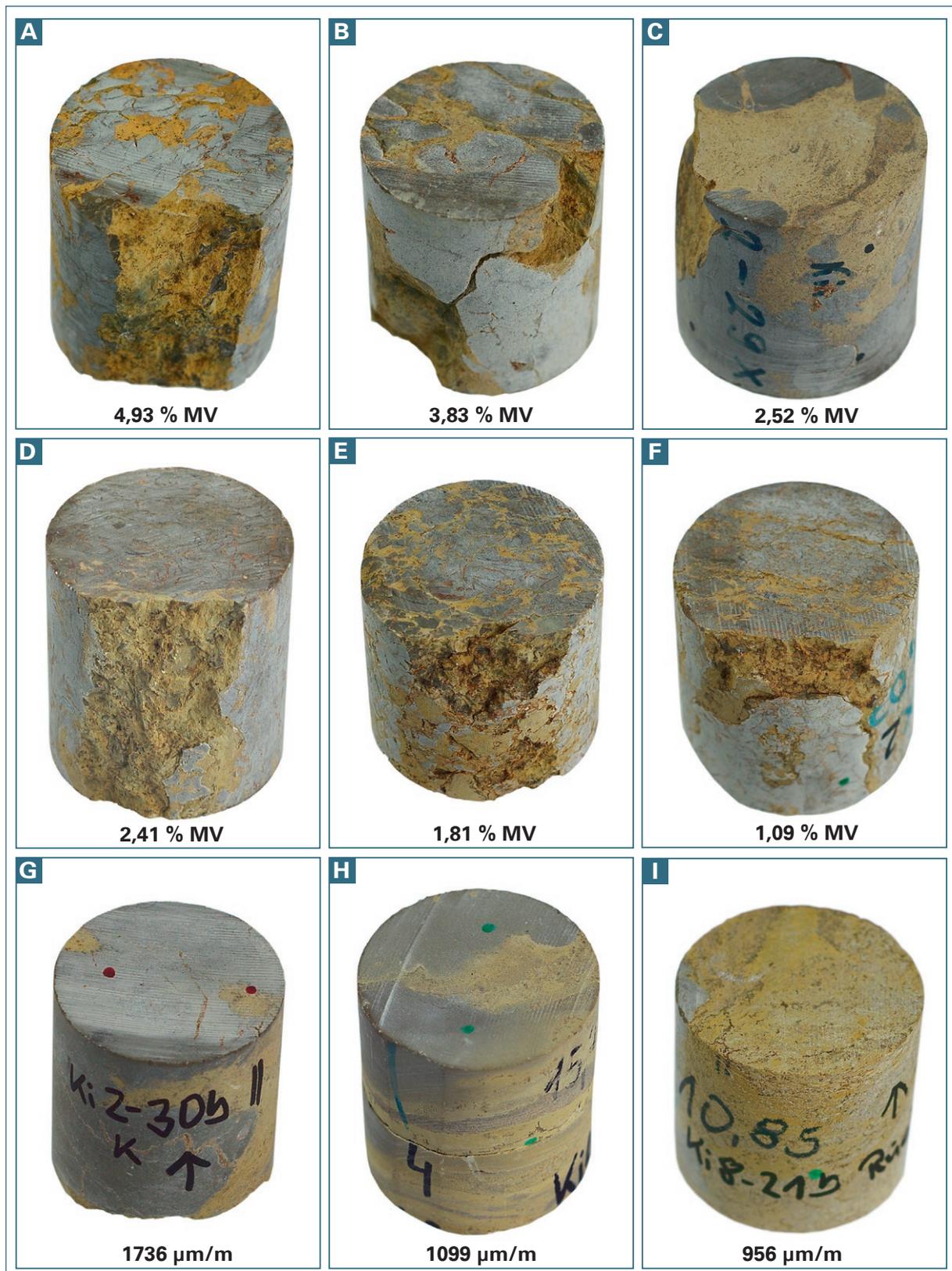


Abb. 57: Typische Gesteinsmuster die besonders anfällig sind für schadhafte Einflüsse der Witterung (MV=Masserverlust). (A bis F) Ergebnisse des Masserverlusts nach 168 Frost-Tau-Wechseln. (G bis I) Ergebnisse der hygrischen Dilatation.

Gruppe II hingegen zeigt Schichtfugen und größere zusammenhängende Ansammlungen des gelblichen Materials. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Gefügebildung des Kalk-/Schillkalksteins. Liegen bereits schadhafte Veränderungen wie Haarrisse oder Störungen zusätzlich zu den gelblichen Einschaltungen vor, sollte von einer Verwendung des Gesteinssegmentes abgesehen werden.

Da die Thematik des Gelbflaserkalks nicht Schwerpunkt dieser Erkundungskampagne war, sind weiterführende Untersuchungen über die Verwendbarkeit und Zusammensetzung dieses Gesteins erforderlich. Im Besonderen könnte die chemische und mineralogische Zusammensetzung in Abhängigkeit vom Abbaugbiet eine interessante Thematik sowohl für die Ergründung der Genese als auch für die zukünftige Verwendung darstellen.



Abb. 58: Verwendungsbeispiel für den Gelbflaserkalk im GaLa-Bau.

6 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Rohstofferkundung konnten sechs Quaderkalk-Rohstoffpotenzialflächen mit einer Gesamtfläche von 466 ha ausgewiesen werden (Tab. 28).

Tab. 28: Abschlusseinschätzung der ermittelten Potenziale (* Potenzialfläche 1 mit der Fläche des Solarparks). Die rohstoffgeologische Bewertung ist folgendermaßen abgestuft: Sehr hohes Potenzial>hohes Potenzial>gutes Potenzial>mäßiges Potenzial.

Potenzialfläche	Ausdehnung [ha]	Teilerkundungsgebiet	Beleg Bohrkern(e)	Gesamtbewertung
1	111*	I	Ki 11	Gutes bis hohes rohstoffgeologisches Potenzial, jedoch konkurrierende Nutzungen, weitere Erkundung notwendig
2	84	II	Ki 5; Ki 14	hohes rohstoffgeologisches Potenzial, kaum konkurrierende Nutzungen
3	88	III	Ki 3; Ki 4	Sehr hohes rohstoffgeologisches Potenzial, kaum konkurrierende Nutzungen
4	112	III	Ki 8; Ki 16	Sehr hohes rohstoffgeologisches Potenzial, keine konkurrierenden Nutzungen
5	14	IV	Ki 2	Hohes rohstoffgeologisches Potenzial, jedoch konkurrierende Nutzungen
6	49	IV	Ki 7; Ki 1; Ki 15	Mäßiges bis gutes rohstoffgeologisches Potenzial, z. T. gravierende konkurrierende Nutzungen (v. a. Sellenberger Hof!)

Auf die Angabe eines wahrscheinlichen Lagerstätteninhalts wird allerdings bewusst verzichtet, da aufgrund der petrografisch und gesteinsmechanisch schwankenden Natur des Quaderkalks oftmals ein stark selektiver Abbau betrieben werden muss und nur eine Teilmenge der Abfolge des Oberen Hauptquaderkalks als Werk- oder GaLa-Bau-Stein Verwendung finden kann. Jedoch bietet das Erkundungsergebnis nun die erforderliche Basis für eine regionalplanerische Fortschreibung dieses Rohstoffs. Notwendig deshalb, weil die bekannten Rohstoffreserven zunehmend knapper werden und durch die steigende Anzahl konkurrierender Flächennutzungen verstärkt in Bereiche mit ungünstigeren Abbaubedingungen (mit Abraum-Mächtigkeiten jenseits der 20 m) ausgewichen werden muss.

Die durchgeführten Arbeiten zeigen, dass in einigen Gebieten ein Abbau mit günstigen Abraum- zu-Rohstoffverhältnissen denkbar wäre. Insbesondere sind in diesem Zusammenhang die Potenzialflächen 3 und 4 zu nennen. Sie beinhalten die größten unverritzten Quaderkalkvorkommen im Lagerstättengebiet, die im Falle einer Erschließung nur in geringem Umfang mit konkurrierenden Flächennutzungen abgewogen werden müssten. Eine Anbindung an das bestehende Verkehrsnetz wäre aufgrund der geringen Distanz nach Kirchheim relativ leicht realisierbar. Auch die übrigen Potenzialflächen (vergleiche Tab. 28) können die Rohstoffversorgung mit Kirchheimer Quaderkalk kurz- und mittelfristig ergänzen. Jedoch sind dafür weiterführende Abwägungen mit konkurrierenden Nutzungen erforderlich.

Als weiteres Ergebnis dieser Studie sind mögliche Potenziale im geschichtsträchtigen Zentralbereich um den Kuacker- und Sellenberger Abbau zu vermuten. Diese sind jedoch im Vergleich zu den weiteren Potenzialen eher gering.

7 Ausblick

Auf Grundlage aktueller rohstoffgeologischer Untersuchungen existieren zusätzlich zu den ermittelten Potenzialen wahrscheinlich noch weitere, bisher nicht erkundete Quaderkalkvorkommen im Bereich Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn-Gützingen-Büttthard, die für zukünftige Erkundungsarbeiten noch Raum bieten und somit eine langfristige Versorgung mit Quaderkalk gewährleisten können. Dabei handelt es sich u. a. um Gebiete um Kleinrinderfeld (Abb. 59 A) oder zwischen Gaubüttelbrunn und Gützingen (Abb. 59 B).

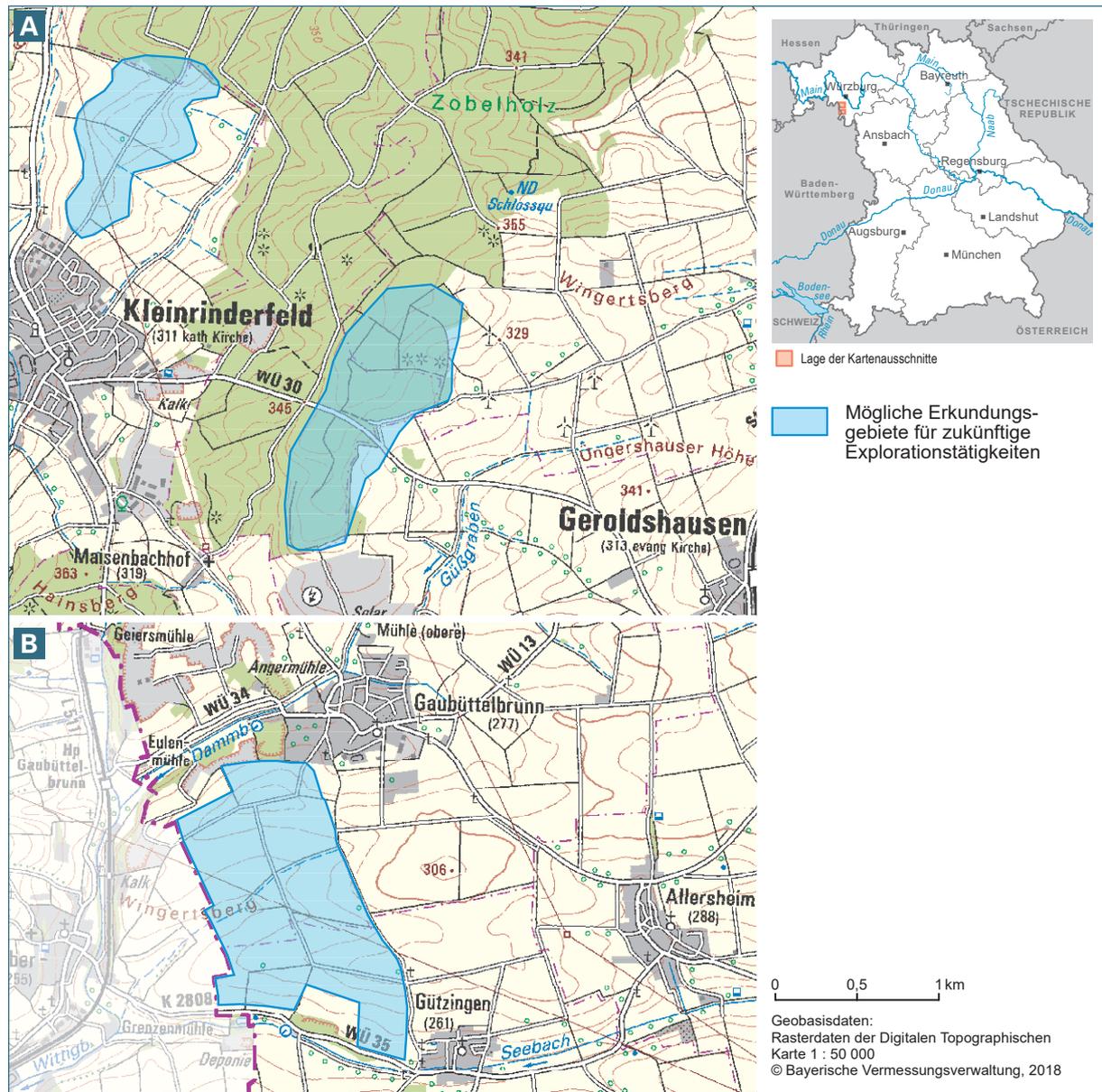


Abb. 59: Mögliche Erkundungsgebiete für zukünftige Explorationsmöglichkeiten im Bereich um (A) Kleinrinderfeld (B) Gaubüttelbrunn & Gützingen.

Glossar

BIS: Bodeninformationssystem

Fazies (i.e.S. sedimentäre F.): Beschreibung der Gesteinseigenschaften von Sedimenten (sog. Lithofazies), die auf die Bedingungen während der Sedimentation ohne die nachfolgende Diagenese zurückzuführen sind und damit den ehemaligen Ablagerungsraum charakterisieren.

GaLa-Bau: Garten – und Landschaftsbau

Lithostratigraphie: Teildisziplin der Stratigraphie, die die räumliche und strukturelle Gliederung von Gesteinseinheiten ausschließlich nach ihren lithologischen Eigenschaften (Gesteinsmerkmale: Zusammensetzung, Farbe, Gefüge, Korngröße, etc.) durchführt.

RIS BY: Rauminformationssystem Bayern

Schill: Ablagerungen von tierischen Skeletten aus Kalk, die vor allem an Meeresküsten entstehen.

(Bruch-)Schillkalkstein: Kalkstein, der nahezu vollständig aus Versteinerungen abgestorbener Tiere (Muscheln, Schnecken oder aus deren Bruchstücken) besteht.

Stich: Riss oder Haarriss im Gestein (Begriff aus der Naturwerksteinindustrie).

Stratigraphie: Teildisziplin der Geologie, deren Methoden zur Korrelation und zur relativen Datierung besonders von fossilführenden Sedimentgesteinen genutzt werden.

Stylolith: Feinliniare und wellig-zackige Struktur, die aus dünnen Säumen von Ton und schwer löslichen Material besteht und sich meist aderförmig abzeichnet (TUCKER 1985). Die Entstehung von Stylolithen ist bedingt durch Auflösungserscheinungen in Sedimentgesteinen, überwiegend in sedimentären Karbonatgesteinen (VINX 2011).

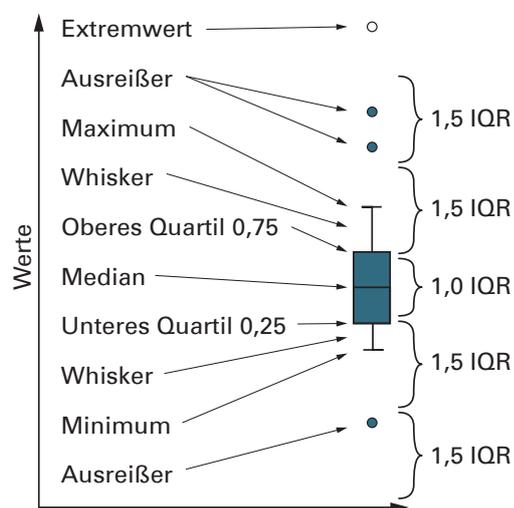
Tempestit (od. Sturmablagerung): Allochthone, gradiert aufgebaute und häufig geröllführende Schillkalke werden als Tempestit bezeichnet (AGER 1974).

Transgression (Adj. transgressiv): Vordringen eines Meeres auf bis dahin trocken liegende Teile eines Kontinents.

Erklärungen zur Statistik

Kastengrafiken (Boxplots) geben Streuung und Lage eines Datensatzes mithilfe einer Box an. Die Box repräsentiert die Grenzen des mittleren Bereichs der Daten, d. h. den Bereich zwischen oberem und unterem Quartil, die Länge der Box gibt den Interquartil-Abstand und ein horizontaler Strich in der Box den Median an. Die Länge der Box spiegelt die Streuung der Daten innerhalb des unteren und oberen Quartils wider. Zusammen mit dem Median lässt sich so die Verteilungsschiefe eines Datensatzes erkennen. Die außerhalb der Box liegenden Werte werden mithilfe von Antennen visualisiert. Antennen geben die Werte außerhalb des oberen und unteren Quartils wieder, die Länge der Antennen sollte den 1,5-fachen Wert des Interquartilsabstands nicht überschreiten. Falls keine Daten außerhalb dieses Bereichs liegen, wird die Länge der Antennen von Minimal- und Maxima-Wert bestimmt. Werte, die außerhalb des 1,5-fachen Interquartil-Abstandes liegen, können als Ausreißer angesehen werden.

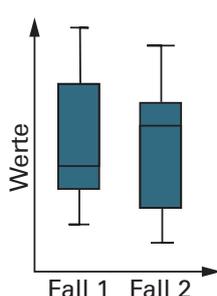
Boxplots:



- In der Box zwischen dem 0,25-Quartil (unteres Quartil bzw. unterer Abschluss) und dem 0,75-Quartil (oberes Quartil bzw. oberer Abschluss) liegen die mittleren 50 % der Daten.
- Der Querstrich in der Box beschreibt den mittleren Datenwert (0,50-Quartil, Median).
- Die Differenz der Quartilwerte (0,25 und 0,75 bzw. Boxunter- und -oberseite) beschreibt den sog. Interquartilsabstand (IQR).
- Der Interquartilsabstand (IQR) bezeichnet das Maß der Daten-Streuung.
- Die Lagen der maximalen und minimalen Datenwerte der Datenpopulation (ober- und unterhalb der Box) werden jeweils durch die Querstriche am Ende der sog. Antennen (Whisker) angegeben.

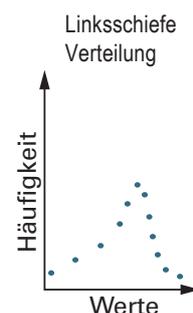
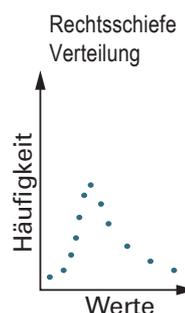
- Demnach liegen 25 % der Fälle zwischen dem Oberen Quartil und dem Daten-Maximum, 25 % der Fälle zwischen dem Unteren Quartil und dem Daten-Minimum.
- Alle Werte mit einer Abweichung größer des 1,5-fachen IQR und kleiner des 3,0-fachen IQR werden als „normale“ Ausreißer in der Grafik mit einem gefüllten Kreissymbol wiedergegeben.
- Werte, die sogar noch außerhalb dieser Bereiche liegen (>3,0 IQR), gelten als Extremwerte und werden mit einem Kreissymbol markiert.

Daten-Verteilungen:



Fall 1:
Median nach unten verschoben
→ rechtsschiefe Verteilung.

Fall 2:
Median nach oben verschoben
→ linksschiefe Verteilung.



Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Stratigraphische Abfolge der Germanischen Trias und des Oberen Muschelkalks in Unterfranken.	7
Abb. 2:	Ausbreitung und Mächtigkeiten der unterschiedlichen Quaderkalkhorizonte.	8
Abb. 3:	Handelsübliche „Varietäten“ des Kirchheimer Quaderkalks.	9
Abb. 4:	Quaderkalk-Profil aus dem Sellenberger Abbaugbiet.	11
Abb. 5:	Steinbruch-Profil aus dem Sellenberger Abbaugbiet.	12
Abb. 6:	Illustration des Fränkischen Schichtstufenlands als geologisches Blockbild.	13
Abb. 7:	Geologische Karte (auf Grundlage der dGK 25) des Erkundungsgebiets.	14
Abb. 8:	Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets mit eingezeichneten Bohrpunkten.	16
Abb. 9:	Gesteinsphysikalische Versuchsdurchführung im Bohrkern- und Rohstoffanalytik-Zentrum in Hof.	17
Abb. 10:	Varietäten des Kirchheimer Quaderkalks und assoziierte Gesteine.	19
Abb. 11:	Das zweistufige Evaluierungssystem bewertet sowohl die reine Gesteinsqualität, als auch das ökonomische Potenzial dieses Gesteinspakets.	20
Abb. 12:	Einteilung des Erkundungsgebiets in vier Teilerkundungsgebiete.	22
Abb. 13:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 9 (R: 4347007, H: 5507519).	23
Abb. 14:	Bohrprofilardarstellung im Bereich nordöstlich von Kirchheim, Teilerkundungsgebiet I.	24
Abb. 15:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 10 (R: 4347921, H: 5509234).	26
Abb. 16:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 11 (R: 4346811, H: 5508908).	28
Abb. 17:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 13 (R: 4348052, H: 5510310).	30
Abb. 18:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 5 (R: 4346598, H: 5503966).	32
Abb. 19:	Bohrprofilardarstellung im Bereich östlich von Kirchheim, Teilerkundungsgebiet II.	33
Abb. 20:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 6 (R: 4348752, H: 5505851).	35
Abb. 21:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 14 (R: 4347159, H: 5503865).	37
Abb. 22:	Beispiele für Verkarstungserscheinungen im Untersuchungsgebiet.	39
Abb. 23:	Bohrprofilardarstellung im Bereich östlich von Kirchheim, Teilerkundungsgebiet II.	40
Abb. 24:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 4 (R: 4343899, H: 5503693).	41
Abb. 25:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 8 (R: 4344042, H: 5504759).	43
Abb. 26:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 16 (R: 4343560, H: 5505324).	45

Abb. 27:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 7 (R: 4344589, H: 5506008).	47
Abb. 28:	Bohrprofilardarstellung des Teilerkundungsgebiets IV.	48
Abb. 29:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 1 (R: 4344871, H: 5506605).	50
Abb. 30:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 2 (R: 4345128, H: 5505541).	52
Abb. 31:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 12 (R: 4344226, H: 5507661).	54
Abb. 32:	Rohstoffhöfliche Bereiche der Kernbohrung Ki 15 (R: 4344243, H: 5506482).	56
Abb. 33:	Boxplot der Wasseraufnahme in Gew.-%, gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation.	59
Abb. 34:	Boxplots untersuchter gesteinsphysikalischer Basiseigenschaften, gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation.	60
Abb. 35:	Boxplot der wasserbedingten Längenänderung ($\mu\text{m}/\text{m}$), gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation. Die X-Achse ist logarithmisch skaliert.	62
Abb. 36:	Boxplot der Schallgeschwindigkeiten (m/s), gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation.	64
Abb. 37:	Einteilung der ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten der Quaderkalke nach DIN EN ISO 14689-1.	65
Abb. 38:	Boxplot der einaxialen Druckfestigkeit (MPa) gegliedert, nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation.	66
Abb. 39:	Boxplot der Gewichtsverluste nach 168 FTW (%), gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation. Die X-Achse ist logarithmisch skaliert.	68
Abb. 40:	Ausprägung und Verlauf verschiedener schadhafter Gefüge-Assoziationen innerhalb der untersuchten Prüfkörper.	69
Abb. 41:	Boxplot der gemessenen Schallgeschwindigkeiten nach 168 FTW (m/s), gegliedert nach den Gruppen der Steinbrecher-Klassifikation.	70
Abb. 42:	Rohstoffpotenziale im Teilerkundungsbereich I.	73
Abb. 43:	Rohstoffgeologische Bewertung der vier Erkundungsbohrungen im Teilerkundungsgebiet I.	74
Abb. 44:	Ermittelte Rohstoffpotenziale im Teilerkundungsbereich II.	75
Abb. 45:	Rohstoffgeologische Bewertung der drei Erkundungsbohrungen im Teilerkundungsgebiet II.	76
Abb. 46:	Ermittelte Rohstoffpotenziale im Teilerkundungsbereich III.	77
Abb. 47:	Rohstoffgeologische Bewertung der vier Erkundungsbohrungen im Teilerkundungsgebiet III.	78
Abb. 48:	Ermittelte Rohstoffpotenziale im Teilerkundungsbereich IV.	80

Abb. 49:	Rohstoffgeologische Bewertung der fünf Erkundungsbohrungen im Teilerkundungsgebiet IV.	81
Abb. 50:	Geologisches 3D-Modell (ArcScene, 10-fach überhöht dargestellt) des Oberen Hauptquaderkalks im Gebiet Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn.	82
Abb. 51:	2D-Darstellung der Mächtigkeit des Oberen Hauptquaderkalks im Gebiet Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn. Verwendete Datengrundlage der Modellierung und Geografische Lage des Quaderkalkhorizontes.	83
Abb. 52:	2D-Darstellung der Mächtigkeit des Oberen Hauptquaderkalks im Gebiet Kleinrinderfeld-Kirchheim-Gaubüttelbrunn. Kombinierte Darstellung der Mächtigkeit des OHQ mit dem darüber liegenden Abraum.	84
Abb. 53:	Möglichkeit der Mächtigkeitsermittlung über das Tool „Messen“ und „Objektdaten-Werkzeug“ im Adobe Acrobat Reader DC.	85
Abb. 54:	Gelbfaserkalk an der Basis des Oberen Hauptquaderkalks im Gemeinschaftssteinbruch der Fa. Seubert und Verostone.	86
Abb. 55:	Optischer Vergleich von Goldbank und Gelbfaserkalk.	87
Abb. 56:	Auswertung der gesteinsphysikalischen Messwerte der Gelbfaserkalke.	88
Abb. 57:	Typische Gesteinsmuster die besonders anfällig sind für schadhafte Einflüsse der Witterung.	89
Abb. 58:	Verwendungsbeispiel für den Gelbfaserkalk im GaLa-Bau.	90
Abb. 59:	Mögliche Erkundungsgebiete für zukünftige Explorationstätigkeiten im Bereich um Kleinrinderfeld Gaubüttelbrunn & Gützingen.	92

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Steinbrecher Klassifikation der Quaderkalke des Oberen Hauptquaderhorizontes.	10
Tab. 2:	Teufenunabhängige Bewertung der Rohstoffqualität der Quaderkalke.	20
Tab. 3:	Für die 3D-Modellierung via „ArcGis“ getroffene Vereinfachung der geologischen Abfolge.	21
Tab. 4:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 9.	25
Tab. 5:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 10.	27
Tab. 6:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 11.	29
Tab. 7:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 13.	31
Tab. 8:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 5.	34
Tab. 9:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 6.	36
Tab. 10:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 14.	38
Tab. 11:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 4.	42
Tab. 12:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 8.	44
Tab. 13:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 16.	46
Tab. 14:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 7.	49
Tab. 15:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 1.	51
Tab. 16:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 2.	53
Tab. 17:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 12.	55
Tab. 18:	Technische Kennwerte für die beprobten Gesteinszylinder (n=Probenanzahl) aus Erkundungsbohrung Ki 15.	57

Tab. 19:	Gesteinsmechanische Eigenschaften der analysierten Quaderkalk-Varietäten.	58
Tab. 20:	Übersicht der hygrischen Dilatation der unterschiedlichen Quaderkalke.	62
Tab. 21:	Gemessene Kompressionswellengeschwindigkeit V_p der unterschiedlichen Quaderkalke.	63
Tab. 22:	Gemessene einaxiale Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Quaderkalke.	64
Tab. 23:	Durchschnittliche Sättigungswerte der untersuchten Quaderkalke.	66
Tab. 24:	Ermittelte Masseverluste nach 168 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen.	67
Tab. 25:	Ergebnisse der Ultraschallanalytik nach 168 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen.	70
Tab. 26:	Ermittelte Frostbeständigkeit der untersuchten Schillkalk-/Kalksteine.	71
Tab. 27:	Bewertung der nutzbaren Gesteinsmächtigkeiten des OHQ in den Bohrkernen Ki 1 bis Ki 16.	72
Tab. 28:	Abschlusseinschätzung der ermittelten Potenziale.	91
Tab. 29:	Verortung, Ansatz- und Basishöhe der abgeteuften Bohrungen für den Oberen Hauptquaderkalk, die die Grundlage für die durchgeführte 3D-Modellierung bilden.	105
Tab. 30:	Probenliste der Prüfsylinder der Bohrkern Ki 1 bis Ki 16.	106

Literaturverzeichnis

- AGER, D. V. (1974): Storm deposits in the Jurassic of the Moroccan High Atlas.- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 15, S. 83–93.
- AIGNER, T. (1979): Schilltempestite im Oberen Muschelkalk (Trias, SW-Deutschland).- N. Jb. Geol. Paläontolog. Abh. 157, S. 326–343.
- AUST, H. (1969): Lithologie, Geochemie und Paläontologie des Grenzbereiches Muschelkalk-Keuper in Franken.- Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins Würzburg 10, S. 3–155.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1964): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt 6225 Würzburg Süd. - Bearbeiter: Hoffmann, U. - München.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1967): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1: 25 000, Blatt Nr. 6225 Würzburg Süd. - Bearbeiter: Hoffmann, U. -München: 134 S.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1984): Oberflächennahe mineralische Rohstoffe von Bayern – Lagerstätten und Hauptverbreitungsgebiete der Steine und Erden mit einer Karte 1:500000.- Geologica Bavarica 86. - Bearbeiter: Weinig, H., Dobner, A., Lagally, U., Stephan, W., Streit, R. & Weinelt, W. -München: 563 S.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1993): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main – Hydrogeologie. - Bearbeiter: Apel, R., Büttner, G., Dobner, A. & Frank, H., München: 138 S.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1996): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt 6324 Tauberbischofsheim-Ost. - Bearbeiter: Albert, K., Simon, T. - München.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1997): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:25000, Blatt Nr. 6425 Röttingen. - Bearbeiter: Freudenberger, W. - München: 133 S.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2010): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt 6325 Giebelstadt. - Bearbeiter: Voßmerbäumer, H., Haunschild (1992), H. - Augsburg.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2013): Geotope in Unterfranken.- Erdwissen-schaftliche Beiträge zum Naturschutz. Band 8. - Bearbeiter: Loth, G., Geyer, G., Hoffmann, U., Jobe, E., Lagally, U., Loth, R., Pürner, T., Weinig, H. & Rohrmüller, R. - Augsburg. 197 S.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2017): Erkundung und Untersuchung von Regensburger Grünsandstein. - Bearbeiter: Poschlod, K., Sutterer, V., Wamsler, S. & Woznik, E. - Augsburg: 78 S.
- BRAUN, S. (2003): Quantitative analysis of carbonate sandbodies: Outcrop analogue study from an epicontinental basin (Triassic Germany).- Diss. Universität Tübingen, 167 S.
- BUNTEBARTH, G. & WELLER, A. (2017): Zusammenhänge zwischen Benetzung poröser Medien und ihrer Volumenänderung.- Treffen des Arbeitskreises Thermophysik, April 2017, Selb.
- DEUTSCHE STEINBRUCHKARTEI (1938): Steinbruch: Klößberg-Bruch. Bstk. 47: 547/26.

- DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016.
- Hrsg.: Redaktion, Koordination und Gestaltung: Menning, M. & Hendrich, A. - Potsdam
(GeoForschungsZentrum).
- DEUTSCHER NATURWERKSTEINVERBAND E. V. (2010): Nachhaltigkeitsstudie – Ökobilanz von
Fassadenkonstruktionen mit Naturstein und Glas.- 43 S.
- DIN 12223: „Ultraschallprüfung“.
- DIN 14579: „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung“.
- DIN 14689-1: „Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und
Klassifizierung von Fels – Teil 1: Benennung und Beschreibung“.
- DIN 52008: „Prüfverfahren für Naturstein – Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit“.
- DIN 52450: „Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Prüfkörpern“.
- DIN EN 12371: „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes“.
- DIN EN 13755:2008: „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmo-
sphärischem Druck“.
- DIN EN 1926:2006: „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit“.
- DIN EN 1936:2006: „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der
offenen Porosität und der Gesamtporosität“.
- DIN EN ISO 14689-1:2011: „Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung,
Beschreibung und Klassifizierung von Fels“ Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14689-
1:2003).
- DREUSE, H., ZIER, H.-W. & GRASSEGER-SCHÖN, G. (2015): Abschlussbericht – Entwicklung
eines Leitfadens für die Planung und Ausführung von Neuverfugungen an
Natursteinmauerwerksoberflächen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit.- Forschungsinitiative
Zukunft Bau, Band F 2946; Stuttgart (Fraunhofer IRB Verlag), 62 S.
- DREXLER, P. (1964): Der Quaderkalk im Hauptmuschelkalk Frankens (Eine Geowirtschaftliche
Studie).- Diss. Universität Würzburg, 141 S.
- EMMERT, U. (1964): Muschelkalk. – Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1: 500 000.-
Bayerisches Geologisches Landesamt, München: S. 81–95 und 307–309.
- GEBRANDE, H. (1982): Elastic wave velocities and constants of elasticity at normal conditions. In:
Angenheister, G. (ed.): Physical properties of rocks. Landolt-Börnstein-Numerical Data and
Functional Relationships in Science and Technology. Group V: Geophysics and Space Research.-
Volume 1b, Berlin (Springer-Verlag), S. 8–35.
- GEISLER, R. (1938): Zur Stratigraphie des Hauptmuschelkalkes in der Umgebung von Würzburg mit
besonderer Berücksichtigung der Ceratiten.- Jb. Preuß. Geol. Landesanstalt 59, Berlin, S. 197–248.

GEYER, G. (2002): Geologie von Unterfranken und angrenzende Regionen.- Fränkische Landschaften. Arbeiten zur Geographie von Franken 2, Gotha/Stuttgart (Klett-Perthes), 588 S.

GLA: siehe unter Bayerisches Geologisches Landesamt

GÖTZE, J. & GÖBBELS, M. (2017): Einführung in die Angewandte Mineralogie.- Berlin (Springer-Verlag), 271 S.

GRANER, D. (1984): Zur Petrographie und Genese der Quaderkalkfazies (Trias, mo3) im fränkisch-württembergischen Raum.- Dissertation Universität Würzburg, 114 S.

GRIEGER, C. & THIEL, T. (o.J.): Die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes an Straßenbeton – Beurteilung der Aussagefähigkeit verschiedener Prüfverfahren.- 9 S., www.htw-dresden.de/file-admin/userfiles/biw_arch/bauing/baustoffe/Frost/Grieger__G.__Thiel__T._-_Die_Pruefung_des_Frost-Tausalz-Widerstandes_an_Strassenbeton.pdf, aufgerufen am 06.08.2019.

GRIMM, W.-D. (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Mit Beiträgen von Ballerstädt, N., Clemens, K., Erfle, E., Grimm, W.-D., Lukas, R., Niehaus, F., Poschlod, K., Schürmeister, R., Schwarz, U., Simper, M. & Weiss, G.- Arbeitsheft Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, 50. 255 S.

GRIMM, W.-D. (2018): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Mit Beiträgen von Ballerstädt, N., Clemens, K., Erfle, E., Grimm, W.-D., Lukas, R., Niehaus, F., Poschlod, K., Schürmeister, R., Schwarz, U., Simper, M., Weiss, G, Koch, R., Haas, J., Werner, W., Bayer, S., Häfner, F., Reischmann T., Flick, H., Katzschmann, L., Meinhardt, J., Beeger, D., Siedel, H., Ehling, A., Schäfer, I. & Lepper, J. - 2. Erweiterte Auflage, Teil II: Bildband, 536 S.

HAGDORN, H. & SIMON, T. (1985): Geologie und Landschaft des Hohenloher Landes. In: Forschungen aus Württembergisch Franken.- Sigmaringen (Jan Thorbecke Verlag), 181 S.

HALISCH, M., KRUSCHWITZ, S., WELLER, A., MENSCHING, B. & GÜRLICH, L. (2017): Maximizing the core value – joint investigations with special emphasis on the complex electrical conductivity give new insights into Fontainebleau Sandstone.- Annual Symposium of Society of Core Analysts, Vienna 2017, paper SCA2017-035, S. 404–413.

HAN, D., NUR, A. & MORGAN, D. (1986): Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstone.- Geophysics, 51 (11). S. 2093–2107.

HATZOLD, W. (1981): Zum Quaderkalk (Trias, mo) Frankens.- Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F. 63. S 211–217.

KATZSCHMANN, L., ASELMAYER, G. & AURAS, M. (2006): Natursteinkataster Thüringen.- Bericht 23, Mainz (Institut für Steinkonservierung). 196 S.

KOCHER, M. (2004): Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen.- Dissertation LMU München. 135 S.

LFU: siehe unter Bayerisches Landesamt für Umwelt

- MÖLLER, M., BUNTEBARTH, G. & WELLER, A. (2017): Einfluss petrophysikalischer Parameter auf die Sättigungsdehnung von Sandsteinen. 77. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, März 2017, Potsdam.
- MONTANI, C. (2018): marble and stones in the world-XXIX Report.- 28th Edition, 268 S.
- MOSCH, S. (2008): Optimierung der Exploration, Gewinnung und Materialcharakterisierung von Naturwerksteinen.- Diss. Georg-August-Universität Göttingen, 285 S.
- MÜLLER, F. (1984): Gesteinskunde – Lehrbuch und Nachschlagewerk über Gesteine für Hochbau, Innenarchitektur, Kunst und Restauration.- Ulm (Ebner Verlag), 160 S.
- PALERMO, D., AIGNER, T., NARDON, S. & BLENDINGER, W. (2010): Three-dimensional facies modeling of carbonate sand bodies: Outcrop analog study in an epicontinental basin (Triassic, southwest Germany).- AAPG Bulletin 94 (4), S. 475–512.
- PETROVIC, A. & AIGNER, T. (2017): Are shoal reservoirs Discrete Bodies? A Coquina shoal outcrop analogue from the mid Triassic upper Muschelkalk, SW Germany.- Journal of Petroleum Geology, Vol 40 (3), July 2017. S 249–275.
- PETROVIC, A. (2016): Complexity of carbonate ramp reservoirs: Regional sedimentological evaluation and modeling of an Upper Muschelkalk coquina shoal complex (Triassic, SW Germany).- University of Tübingen, Germany, Ph.D.Thesis, 260 S.
- PETROVIC, A., AIGNER, T., PONTIGGIA, M. (2018): Facies Heterogeneities in a ramp carbonate reservoir analogue: a new high-resolution approach for 3D facies modelling.- Journal of Petroleum Geology, Vol. 41 (2). S 155–174.
- POSCHLOD, K. & KATZSCHMANN, L. (1994): Untersuchungen zur Aussagekraft des Sättigungswertes "S"; dargestellt an Natursteinen bayerischer und thüringischer Provenienz.- 12. ibausil Weimar. S. 206–209.
- POSCHLOD, K. (1990): Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluß auf die Verwitterung.- Münchner Geowiss. Abh. (B) 7; München (Pfeil). 62 S.
- PRINZ, H. & STRAUSS, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie.- 4. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag. 674 S.
- REIS, O. M. (1909): Beobachtungen über Schichtenfolge und Gesteinsausbildungen in der Fränkischen Unteren und Mittleren Trias. I. Muschelkalk und Untere Lettenkohle.- Geogn. Jb. 22, München. S. 1–284.
- RIETH, A. (1964): Zur Frage der Verwendung von Muschelkalk-Blaubank. In: Nachrichtenblatt der Denkmalpflege in Baden-Württemberg.- Organ der Staatlichen Ämter für Denkmalpflege, Bd. 7 Nr. 4. S. 117–121.
- RUTTE, E. & WILCZEWSKI, N. (1983): Mainfranken und Rhön.- Sammlung geologischer Führer, 74: VII. Berlin, Stuttgart (Borntraeger). 217 S.

- RUTTE, E. (1981): Bayerns Erdgeschichte. Der geologische Führer durch Bayern.- München (Ehrenwirth). 266 S.
- SANDBERGER, F. (1867): Die Gliederung der Würzburger Trias und ihrer Aequivalente.- Würzburger Naturwiss. Zeitschr. 5. S. 131–208.
- SCHÖN, J.-H. (1996): Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics.- In: HELBIG, K. & TREITEL, S. (Hrsg.): Handbook of geophysical Exploration – Section I, Seismic exploration.- Vol. 18, Oxford (Elsevier Verlag). 577 S.
- SCHUSTER, M. (1936): Kalksteine des Muschelkalkes. In: Bayerisches Oberbergamt (Hrsg.): Die nutzbaren Mineralien, Gesteine und Erden Bayerns. II. Band: Franken, Oberpfalz und Schwaben nördlich der Donau.- München. S. 34–66.
- SEBASTIAN, U. (2014): Gesteinskunde – Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender.- 3. Auflage, Berlin Heidelberg (Springer-Spektrum Verlag). 212 S.
- SIBSON, R. (1981): A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. In: Barnett, V., Ed., Interpolating Multivariate Data. New York (John Wiley & Söhne). S. 21–36.
- SIMON, T. (1999): Erläuterungen zur geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Blatt Nr. 6324 Tauberbischofsheim-Ost.- Freiburg i. Br. (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg). 127 S.
- TUCKER, M. E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie.- Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag). 265 S.
- VINX, R. (2011): Gesteinsbestimmung im Gelände.- 3. Auflage 2011, Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag). 480 S.
- WAGNER, G. (1913): Beiträge zur Stratigraphie und Bildungsgeschichte des oberen Hauptmuschelkalks und der unteren Lettenkohle in Franken.- Geologische und Palaeontologische Abhandlungen, N. F. Bd. 12 H. 3. Jena (Fischer Verlag). 180 S.
- WELLER, A. & SLATER, L. (2015): Induced polarization dependence on pore space geometry: Empirical observations and mechanistic predictions.- Journal of Applied Geophysics 123, S. 310–315.
- WELLER, A., SLATER, L., HUISMAN, J. A., ESSER, O. & HAEGEL, F.-H. (2015): On the specific polarizability of sands and sand-clay mixtures.- Geophysics 80, No. 3, S 57-61.
- WELLER, A., ZHANG, Z., SLATER, L., KRUSCHWITZ, S. & HALISCH, M. (2016): Induced polarization and pore radius – A discussion.- Geophysics 81, No. 3, S 519-526.

Anhang

Tab. 29: Verortung, Ansatz- und Basishöhe der abgeteufte Bohrungen für den Oberen Hauptquaderkalk, die die Grundlage für die durchgeführte 3D-Modellierung bilden. Aufgrund datenschutzrechtlicher Bestimmungen können die Daten der weiteren Stützpunkte nicht veröffentlicht werden.

Messpunkt	Rechtswert (GK4)	Hochwert (GK4)	Ansatzhöhe OHQ [m]	Basishöhe OHQ [m]
Ki 1	4344871	5506605	327,5	324,3
Ki 2	4345128	5505541	300,4	294,7
Ki 3	4343805	5503284	297,7	296,5
Ki 4	4343899	5503693	305,2	299,6
Ki 5	4346598	5503966	280,3	272,3
Ki 6	4348752	5505851	266,6	261,6
Ki 7	4344589	5506008	320,6	317,9
Ki 8	4344042	5504759	309,0	303,9
Ki 9	4347007	5507519	306,3	301,9
Ki 10	4347921	5509234	299,8	298,1
Ki 11	4346811	5508908	331,7	326,2
Ki 12	4344226	5507661	345,4	343,5
Ki 13	4348052	5510310	300,4	297,0
Ki 14	4347159	5503865	272,2	269,5
Ki 15	4344243	5506482	318,0	317,0
Ki 16	4343560	5505324	324,3	319,9

Tab. 30: Probenliste der Prüfcylinder der Bohrkern Ki 1 bis Ki 16 (wenige Prüfkörper sind im Zuge der Herstellung durch präparationsbedingte Gründe entfallen. Dadurch kann es zu vereinzelt Sprüngen innerhalb der fortlaufenden Probenliste kommen).

Prüfcylinder	Bohrmeter
Ki 1-1	9,40
Ki 1-2	9,45
Ki 1-3	10,64
Ki 1-4	10,75
Ki 1-5	10,80
Ki 1-6	10,85
Ki 1-7	11,13
Ki 1-8	11,25
Ki 1-9	11,54
Ki 1-11	11,70
Ki 1-12	12,05
Ki 1-14	12,15
Ki 1-15	12,35
Ki 1-16	12,40
Ki 1-17a	12,65
Ki 1-17b	12,70
Ki 1-18	12,80
Ki 1-19a	13,00
Ki 1-19b	13,05
Ki 1-20	13,18
Ki 1-21	13,30
Ki 1-22	13,42
Ki 1-25	18,15
Ki 1-26	13,52
Ki 1-27a	13,65
Ki 1-27b	13,75
Ki 2-1	13,75
Ki 2-2	13,80
Ki 2-3	13,87
Ki 2-4	15,35
Ki 2-5	15,40
Ki 2-6	15,73
Ki 2-7	16,00
Ki 2-8	16,15
Ki 2-9	16,20
Ki 2-10	16,30
Ki 2-11	16,45
Ki 2-12	16,50
Ki 2-13	16,63
Ki 2-14	16,68
Ki 2-15	16,75
Ki 2-16	17,07
Ki 2-17	17,12
Ki 2-18	17,18
Ki 2-19	17,30
Ki 2-20	17,35
Ki 2-21	17,52
Ki 2-22	17,65
Ki 2-23	17,70
Ki 2-24	18,08
Ki 2-25	18,20
Ki 2-26	18,25
Ki 2-27	18,31
Ki 2-28	18,50
Ki 2-29	18,72
Ki 2-30a	18,78
Ki 2-30b	18,78
Ki 2-31	21,05
Ki 2-32	21,10
Ki 2-33	21,17
Ki 2-34	14,70
Ki 2-35	14,73
Ki 2-36	16,85
Ki 2-37	17,85
Ki 2-38	17,90
Ki 3-1	11,26
Ki 3-2	12,00
Ki 3-3	12,15
Ki 3-4	12,20
Ki 3-5	12,38
Ki 3-6	12,50
Ki 3-7	12,55
Ki 3-8	12,75
Ki 3-9	12,80
Ki 3-10	12,85
Ki 3-11	13,07
Ki 3-12	13,12
Ki 3-13	13,17
Ki 3-14	13,35
Ki 3-15	14,23
Ki 3-16	14,28
Ki 3-17	14,65
Ki 3-18	14,70
Ki 3-19	16,59
Ki 3-20	16,64
Ki 3-21	17,02
Ki 3-22	17,07
Ki 3-23	21,05
Ki 3-24	21,10
Ki 3-25	32,72
Ki 3-26	32,77
Ki 3-27	32,82
Ki 3-28a	11,80
Ki 3-28b	11,87
Ki 3-30a	15,20
Ki 3-30b	15,30
Ki 3-32a	15,70
Ki 3-32b	15,80
Ki 3-33	16,10
Ki 3-34	16,15
Ki 3-36	16,30
Ki 4-1	11,26
Ki 4-2	12,00
Ki 4-3	12,15
Ki 4-4	12,20
Ki 4-5	12,38
Ki 4-6	12,50
Ki 4-7	12,55
Ki 4-8	12,75
Ki 4-9	12,80
Ki 4-10	12,85
Ki 4-11	13,07
Ki 4-12	13,12
Ki 4-13	13,17
Ki 4-14	13,35
Ki 4-15	14,23
Ki 4-16	14,28
Ki 4-17	14,65
Ki 4-18	14,70
Ki 4-19	16,59
Ki 4-20	16,64
Ki 4-21	17,02
Ki 4-22	17,07
Ki 4-23	21,05
Ki 4-24	21,10
Ki 4-25	32,72
Ki 4-26	32,77
Ki 4-27	32,82
Ki 4-28a	11,80
Ki 4-28b	11,87
Ki 4-30a	15,20
Ki 4-30b	15,30
Ki 4-32a	15,70
Ki 4-32b	15,80
Ki 4-33	16,10
Ki 4-34	16,15
Ki 4-36	16,30
Ki 5-2	12,10
Ki 5-3	12,26
Ki 5-5	12,44
Ki 5-6	12,49
Ki 5-7	13,16
Ki 5-8	13,21
Ki 5-10	13,58
Ki 5-11	14,03
Ki 5-12	14,08
Ki 5-13a	14,13
Ki 5-13b	14,13
Ki 5-14	14,64
Ki 5-15	16,69
Ki 5-16	14,81
Ki 5-17	15,16
Ki 5-18	15,21
Ki 5-19	15,32
Ki 5-20	15,37
Ki 5-21	15,69
Ki 5-22	15,74
Ki 5-23	15,88
Ki 5-24	16,25
Ki 5-25	16,30
Ki 5-26a	16,35
Ki 5-26b	16,35
Ki 5-27	16,58
Ki 5-28	16,70
Ki 5-29	16,75
Ki 5-31	17,72
Ki 5-32	19,34
Ki 5-33	19,39
Ki 5-34	19,60
Ki 5-35	19,65
Ki 5-37	11,94
Ki 5-38	14,40
Ki 5-39	14,45
Ki 5-41	18,57
Ki 5-42	18,72
Ki 5-43	18,75
Ki 6-1	50,42
Ki 6-2	50,47
Ki 6-3	50,52
Ki 6-4	50,82
Ki 6-5	54,65
Ki 6-6	54,70
Ki 6-7	54,90
Ki 7-1	4,50
Ki 7-2	4,55
Ki 7-3	4,75
Ki 7-4	4,80
Ki 7-5	4,95
Ki 7-6a	5,28
Ki 7-6b	5,28
Ki 7-7	5,33
Ki 7-8	5,38
Ki 7-9	5,56
Ki 7-10	5,80
Ki 7-11	6,04
Ki 7-12	6,17
Ki 7-13	6,43
Ki 7-14	6,56
Ki 7-15	6,61
Ki 7-16	6,72
Ki 7-17	6,77

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 16-1	6,85
Ki 16-2	6,90
Ki 16-3	7,05
Ki 16-4	7,10
Ki 16-5	7,80
Ki 16-6	7,85
Ki 16-7	7,92
Ki 16-8	7,97
Ki 16-9	8,05
Ki 16-10	8,20
Ki 16-11	8,32
Ki 16-12	8,38
Ki 16-13	8,50
Ki 16-14	8,60
Ki 16-15	8,85
Ki 16-16	8,90
Ki 16-17	9,05
Ki 16-18	9,10
Ki 16-19	9,20
Ki 16-20	10,05
Ki 16-21a	10,10
Ki 16-21b	10,20
Ki 16-22	10,33
Ki 16-23	10,50
Ki 16-24	10,60
Ki 16-25	10,75
Ki 16-26	10,80
Ki 16-27	10,90
Ki 16-28	11,10
Ki 16-29	11,20
Ki 16-30	11,30

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 13-1	18,65
Ki 13-2	18,70
Ki 13-3	18,75
Ki 13-4	18,80

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 14-1	8,05
Ki 14-2a	8,10
Ki 14-2b	8,20
Ki 14-3	8,55
Ki 14-4	8,70
Ki 14-5	8,75
Ki 14-6	8,95
Ki 14-7	9,05
Ki 14-8	9,10
Ki 14-9	9,30
Ki 14-10	9,35
Ki 14-11	9,45
Ki 14-12	9,50
Ki 14-13	9,65
Ki 14-14	9,80
Ki 14-15	9,90
Ki 14-16	10,45
Ki 14-17	10,50
Ki 14-18	12,10
Ki 14-19	12,15
Ki 14-20	12,45
Ki 14-21	12,50
Ki 14-22	8,30

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 15-1	10,40
Ki 15-2	10,45
Ki 15-3	10,60
Ki 15-4	10,65
Ki 15-5	10,80
Ki 15-6	10,85
Ki 15-7	10,95

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 11-1	8,25
Ki 11-2a	8,30
Ki 11-2b	8,40
Ki 11-2c	8,50
Ki 11-3	9,75
Ki 11-4	9,80
Ki 11-5	10,20
Ki 11-6	10,30
Ki 11-7	10,35
Ki 11-8	10,58
Ki 11-9	10,65
Ki 11-10	10,82
Ki 11-11	11,05
Ki 11-12	11,10
Ki 11-13	11,25
Ki 11-14	11,40
Ki 11-15	11,55
Ki 11-16	13,10
Ki 11-17	13,15
Ki 11-18	13,27
Ki 11-19	18,05
Ki 11-20b	18,10
Ki 11-20a	18,15
Ki 11-21	18,35

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 12-1	8,65
Ki 12-2b	8,70
Ki 12-2a	8,77
Ki 12-3	9,66
Ki 12-4	9,71
Ki 12-5	10,30
Ki 12-6	10,35
Ki 12-6a	10,40
Ki 12-6b	10,50

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 9-1	8,37
Ki 9-2	8,42
Ki 9-3	8,63
Ki 9-4	8,67
Ki 9-5	12,20
Ki 9-6	12,25
Ki 9-7a	12,30
Ki 9-7b	12,40
Ki 9-8	13,75
Ki 9-9	13,80
Ki 9-10	13,85
Ki 9-11	14,05
Ki 9-12	14,10
Ki 9-13	14,15
Ki 9-14	14,25
Ki 9-15	14,48
Ki 9-16a	14,51
Ki 9-16b	14,56
Ki 9-17	14,68
Ki 9-18	14,72
Ki 9-19	14,76
Ki 9-20	14,93
Ki 9-21	18,42
Ki 9-22	18,47
Ki 9-23	18,60
Ki 9-24	18,65
Ki 9-25	18,85
Ki 9-26	18,90

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 10-1	28,05
Ki 10-2	28,15
Ki 10-3	28,25

Prüfzylinder	Bohrmeter
Ki 8-1	7,60
Ki 8-2	7,65
Ki 8-3	7,85
Ki 8-4	8,12
Ki 8-5	8,17
Ki 8-6	8,30
Ki 8-7	8,35
Ki 8-8	8,50
Ki 8-9	8,55
Ki 8-10	8,75
Ki 8-11b	8,80
Ki 8-11a	8,90
Ki 8-12	8,95
Ki 8-13	9,03
Ki 8-14	9,07
Ki 8-15a	9,12
Ki 8-15b	9,21
Ki 8-16	9,55
Ki 8-17a	9,60
Ki 8-17b	9,70
Ki 8-18	10,22
Ki 8-19	10,70
Ki 8-20	10,80
Ki 8-21a	10,85
Ki 8-21b	10,90
Ki 8-22a	12,05
Ki 8-22b	12,15
Ki 8-23	12,33
Ki 8-24	12,38
Ki 8-25	12,50
Ki 8-26	12,55
Ki 8-27	12,71
Ki 8-28	12,76
Ki 8-29	12,81
Ki 8-30	26,39
Ki 8-31a	26,44
Ki 8-31b	26,54