Zeitschrift: Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Schaffhausen
Band: 72 (2020)

Artikel: Geologie der Region Schaffhausen
Autor: Stössel-Sittig, Iwan
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-880919

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

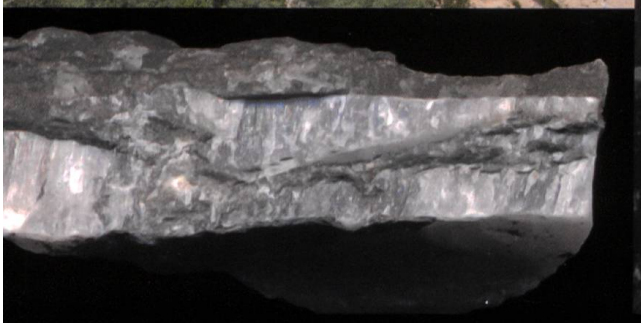
Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Geologie der Region Schaffhausen



Neujahrsblatt
der Naturforschenden Gesellschaft
Schaffhausen
Nr. 72/2020

Neujahrsblatt

der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen

Nr. 72/2020

Impressum
Redaktion: Dr. Jakob Walter, Buchenstrasse 65, 8212 Neuhausen

Bildnachweis:
Abb. 2: Museum zu Allerheiligen, Sammlung Laffon.
Abb. 5, 17, 58: Paläogeographische Rekonstruktion nach Paleomap Project, Ch. Scotese.
Abb. 9: Museum zu Allerheiligen, Sammlung Keller.
Abb. 11: Vereinfacht nach Nagra NTB 14-02, Beilage 4-2.
Abb. 16, 41: Nach Ziegler (1990).
Abb. 27, 36, 44, 70, 80, 88: Museum zu Allerheiligen.
Abb. 28, 30: Aus Bringolf (2010) Sammlung Ortsmuseum Neunkirch.
Abb. 32, 37, 50, 62, 79: Museum zu Allerheiligen, Sammlung Hofmann.
Abb. 39: Foto H. Furrer, Sammlung Museum zu Allerheiligen.
Abb. 40: Beat Scheffold.
Abb. 42: Aus Peyer (1944).
Abb. 47, 49: Museum zu Allerheiligen, Sammlung Schalch.
Abb. 48: Interkantonales Labor Schaffhausen.
Abb. 65, 66: Nach Hofmann (1991).
Abb. 69: Umgezeichnet nach Wikipedia: von Ustill - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24513240.
Abb. 73: Vereinfacht nach Hofmann, Schlatter und Weh (2000) bzw. Büchi und Müller (1989).
Abb. 74: Nach Schreiner (1968).
Abb. 81: Nach Hantke (1954).
Abb. 82: Nach Heuberger et al. (2014).
Abb. 83: Nach Graf (2009).
Abb. 84: Nach Preusser (2011).
Abb. 85: Nach Heuberger et al. (2014) bzw. Graf (1993).
Abb. 87: Nach Graf (2009).
Abb. 90: Nach Büchi und Müller (1988).
Abb. 91: Nach Heim (1931).
Abb. 91c, 92, 99, 101, 108: Geodaten des Kantons Schaffhausen.
Abb. 65, 89, 91a, 91b, 109: Geodaten von Swisstopo ©.
Abb. 93: Nach Bericht der Dr. U. Büchi SIA, 1977.
Abb. 101: Nach Daten von Tiefbau Schaffhausen.

Beiträge: Die Neujahrsblätter werden gedruckt mit Beiträgen aus dem Legat Sturzenegger und mit Unterstützung der Swiss Academy of Science (SCNAT). Das vorliegende Heft wurde zusätzlich unterstützt vom Kanton Schaffhausen (Lotteriefonds) und von der SIG Gemeinnützigen Stiftung.

Satz und Umbruch: Iwan Stössel, Druck: Unionsdruckerei Schaffhausen

Auflage: 1500 Exemplare

ISBN: 978-3-033-07609-9
© 2019 Naturforschende Gesellschaft Schaffhausen

Dank
Jakob Walter hat das Manuskript mit Akribie durchgeschaut und manche Klarstellung angeregt. Peter Wäspi lieferte wertvolle Beiträge zum Kapitel «Grundwasser», Hansruedi Graf zum Kapitel «Quartär» und Jürg Sturzenegger zum Kapitel «Rohstoffe».

Geologie der Region Schaffhausen

I. Stössel-Sittig

Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen
Nr. 72/2020

Naturforschende Gesellschaft Schaffhausen (NGSH), gegründet 1822

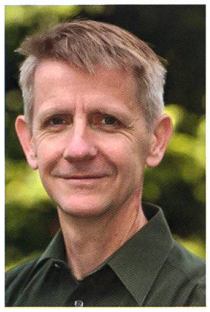
Die Naturforschende Gesellschaft will das Interesse an den Naturwissenschaften und an der Technik fördern, naturwissenschaftliche Zusammenhänge erklären und Verständnis für die Umwelt, insbesondere im Raum Schaffhausen, wecken. Ihr Jahresprogramm besteht aus allgemein verständlichen Vorträgen zu naturwissenschaftlichen Themen sowie Besichtigungen im Winterhalbjahr und naturkundlichen Exkursionen, teils zusammen mit Partnerorganisationen, im Sommerhalbjahr. In den «Neujahrsblättern der NGSH» werden naturwissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht und so allen Mitgliedern wie auch einem breiteren Publikum zugänglich gemacht. Ein Verzeichnis der lieferbaren Neujahrsblätter befindet sich hinten in diesem Heft. Die aktuellen Programme sind im Internet unter www.ngsh.ch abrufbar oder können bei der unten stehenden Adresse bezogen werden. Die Gesellschaft unterhält verschiedene Sammlungen und unterstützt die naturkundliche Abteilung des Museums zu Allerheiligen. Sie betreibt zudem eine moderne Sternwarte mit Planetarium; Informationen dazu sind zu finden unter www.sternwarte-schaffhausen.ch.

Die NGSH zählt knapp 800 Mitglieder (davon über 100 Familienmitgliedschaften). Alle naturwissenschaftlich interessierten Personen sind herzlich willkommen. Der Mitgliederbeitrag pro Jahr beträgt für Erwachsene Fr. 50.–, für Schülerinnen , Schüler, Studenten und Studentinnen Fr. 25.– und für Familien Fr. 80.–. Wer sich für eine Mitgliedschaft interessiert, kann sich bei der unten stehenden Adresse oder im Internet unter www.ngsh.ch anmelden.

info@ngsh.ch www.ngsh.ch und www.sternwarte-schaffhausen.ch

Postadresse der Gesellschaft:
NGSH, Dr. Iwan Stössel-Sittig
8200 Schaffhausen
PC 82-1015-1

info@ngsh.ch
www.ngsh.ch und www.sternwarte-schaffhausen.ch



Autor

Iwan Stössel-Sittig (geb. 1968) studierte und doktorierte in Erdwissenschaften an der ETH in Zürich. Anschliessend arbeitete er als Umweltgeologe in der Privatwirtschaft, bevor er als Kurator ans Museum zu Allerheiligen in Schaffhausen wechselte. Seit 2007 arbeitet er am Interkantonalen Labor in Schaffhausen im Bereich Umweltschutz. Seit Kindesbeinen interessiert er sich für die Geschichte des Lebens auf der Erde.

Inhaltsverzeichnis

1.	**Vorwort**	**7**
2.	**Einführung**	**8**
2.1	Landschaften lesen	8
2.2	Reise durch die Zeit	11
3.	**Die ferne Vergangenheit: Das Grundgebirge und das Erdaltertum**	**14**
4.	**Trias – Auftakt ins Erdmittelalter**	**21**
4.1	Festländische Ablagerungen (Dinkelberg-Formation – «Buntsandstein»)	23
4.2	Die Gegend versinkt unter dem Meersspiegel: «Muschelkalk»	24
4.3	Wechselvolle Ablagerungsgeschichte: Die Späte Trias	31
5.	**Am Rand des Ozeans: Das Jurameer**	**36**
5.1	Der Untere Jura: Starker Einfluss des nahen Festlandes	36
5.2	Der Mittlere Jura: Von Tonstein, Kalk und Eisenerz	41
5.3	Reine Kalke und Schwammriffe	45
6.	**Die grosse Lücke im Archiv: Fehlende Ablagerungen aus Kreide und Paläozän**	**49**
7.	**Unter dem Einfluss der wachsenden Alpen: Paläogen und Neogen**	**51**
7.1	Molasse: Zwischen Land und Wasser	53
7.2	Tektonische Bewegungen: Von der Neuhauser Störung zum Hegauvulkanismus	59
7.	**Das Zeitalter der Gletscher: Quartär**	**65**
7.1	Die Zeit der Deckenschotter	69
7.2	Die jüngeren Eiszeiten	71
8.	**Rohstoffe**	**81**
8.1	Doggererze	81
8.2	Bohnerz	81
9.3	Gips	82
9.4.	Ton	83

9.5. Sand 83
9.6. Kalk 83
9.7 Kies 84
9.8 Energierohstoffe 84
9.9 Der wichtigste Rohstoff: Wasser 85
10 Einige historische Bausteine 91
11 Blickpunkte: Schlüsselstellen zum Verständnis der geologischen Vergangenheit 95
12 Referenzen 96

1. Vorwort

Der Untergrund ist buchstäblich die Grundlage: Auf ihm verlaufen unsere Strassen, stehen unsere Häuser und wächst unser Getreide; in ihm fliesst unser Grundwasser, suchen wir nach Bodenschätzen oder Endlagern und finden wir Auskünfte über die Geschichte unseres Planeten und der Wesen, die ihn beleben.

Wir leben in einer geologisch spannenden Region: Vom Urgestein des Schwarzwaldes mit einem Alter von Hunderten von Millionen Jahren über die Vulkanschlote des Hegaus und die Ablagerungen tropischer Meere bis zu den Hinterlassenschaften der Eiszeiten, die erst vor knapp 20 000 Jahren zu Ende gingen, finden Kundige Belege in einem Umkreis von wenigen Dutzend Kilometern.

Dieses Neujahrsblatt soll nicht nur helfen, die Entstehung unseres Untergrundes zu verstehen, sondern soll auch anregen, die zahlreichen «Tatorte» zu besuchen und die Spuren zu «be-greifen».

«Geologie der Region Schaffhausen» soll den über 40-jährigen «Geologieführer der Region Schaffhausen» von Franz Hofmann und Hans Hübscher ersetzen. Nicht nur wurden seither neue Erkenntnisse gewonnen und wurden Bezeichnungen geändert, sondern Bildgestaltung und Drucktechnik bieten heute neue Möglichkeiten, das Thema mit der verdienten Anschaulichkeit anzugehen. – Als Liebhaber von Pointen: Der Koautor des «Geologieführers», Hans Hübscher, war damals Präsident der NGSH. Der Autor des aktuellen Werkes, Iwan Stössel, ist gleichzeitig Kopräsident der selben Gesellschaft.

Ich bin Iwan Stössel sehr dankbar dafür, dass er neben vielen weiteren Verpflichtungen die Aufgabe übernahm, dieses Neujahrsblatt zu verfassen und zu gestalten, und wünsche der Leserschaft eine interessante Lektüre und neue Erkenntnisse.

Jakob Walter.

2. Einführung

2. 1 Landschaften lesen

Bei der Wanderung über die Höhenzüge des Rheins, beim Bestaunen der Wassermassen am Rheinfall oder bei der sonntäglichen Radtour im Klettgau denken die meisten von uns wohl selten daran, dass diese beeindruckenden Landschaften nicht einfach nur Kulisse unseres hektischen Alltags sind, sondern wie alle Landschaften das Produkt von Kräften, die über Jahrtausende, ja Jahrmillionen gewirkt haben. Sie bieten Einblicke in den Untergrund, die uns in längst vergangene Erdzeitalter führen und leiten uns zum Verständnis von Prozessen, die zur Formung des heutigen Landschaftsreliefs, zur Bildung von Bodenschätzen sowie zur Lenkung von Grundwasserströmen führten.
Manchmal finden wir auf den Hochflächen des Randens eine Versteinerung, vielleicht einen «Schnäggestaa» (Abb. 2), der uns daran erinnert, welch flüchtiger Augenblick ein Menschenleben im Vergleich zum Alter dieser Gesteine ist. Wir fragen uns, welche Geschichte diese Berge und Hügel, diese Gesteine, diese Versteinerungen erzählen würden, wenn sie sprechen könnten.

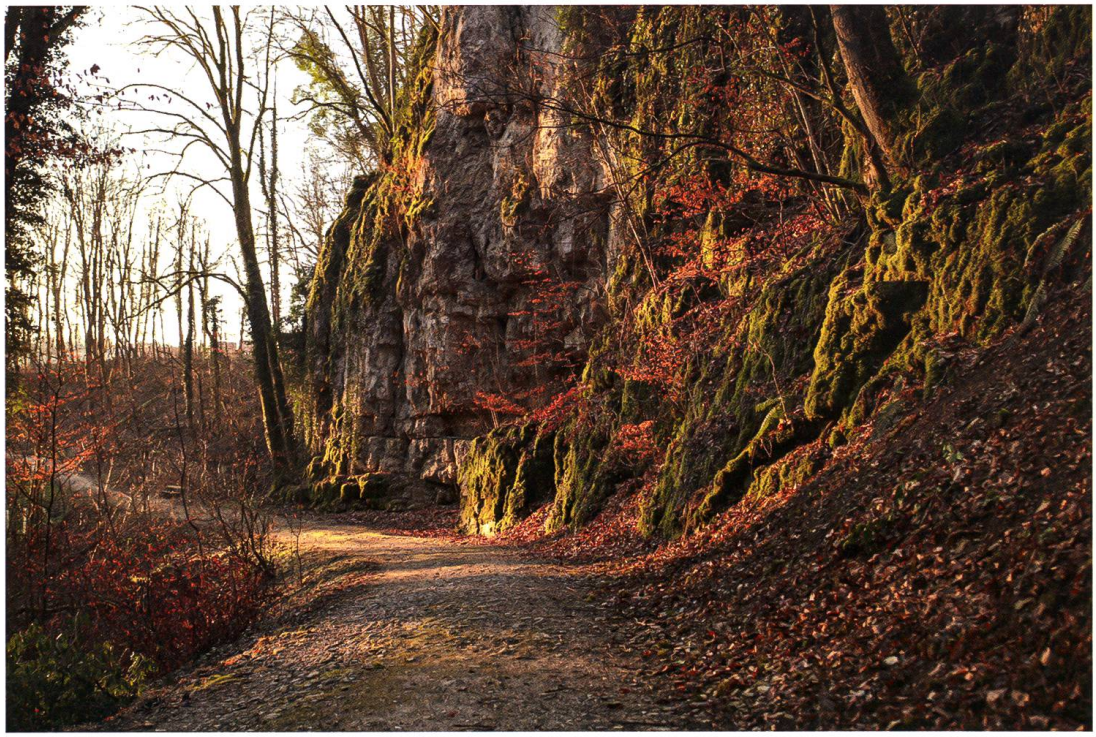


Abb. 1: Morgenspaziergang im Felsetääli bei Schaffhausen: Die Region Schaffhausen bietet Einblicke in rund 300 Millionen Jahre Erdgeschichte.

Das «Lesen der Gesteine», das «Interpretieren von Landschaften» ordnet man heute der Disziplin der Geologie, oder allgemeiner der Erdwissenschaften zu. Doch eigentlich begleiten diese Kenntnisse den Menschen seit Anbeginn seiner Geschichte. Bereits in der Steinzeit war das Wissen, wo die Rohstoffe für Silexklinge und Steinbeil gewonnen werden können, für unsere Vorfahren zentral (Abb. 3). Auch bei uns wurden Rohstoffe vor Jahrtausenden abgebaut, verarbeitet und gehandelt. So hat man beispielsweise in der Region Büttenhardt in der Jungsteinzeit um 4400 bis 3800 v. Chr. Silexvorkommen ausgebeutet (Altorfer und Affolter, 2011).

Abb. 2: Ammonit aus der historischen Sammlung von J.C. Laffon, Museum zu Allerheiligen. Ammoniten sind die versteinerten Gehäuse von Verwandten unserer heutigen Tintenfische. An bestimmten Orten im Kanton Schaffhausen sind sie häufig zu finden. Umgangssprachlich heissen sie in der Region aufgrund ihres gewundenen Gehäuses «Schnäggestaa» (=Schneckensteine). Allerdings ist das Gehäuse der Ammoniten in der Regel bilateral symmetrisch, das heisst es sieht von zwei Seiten identisch aus. Das ist beim Schneckengehäuse nicht der Fall.

Abb. 3: Silex (oder: «Feuerstein») besteht aus einer Modifikation von SiO_2. Seine mechanischen Eigenschaften wurden bei der Werkzeugherstellung sehr geschätzt. Solche Silexknollen findet man in gewissen Schichten insbesondere des Oberen Juras recht häufig im Kalkstein eingelagert. Das SiO_2 stammt in der Regel aus den kieseligen Skeletten von Organismen.

Diesen Menschen standen nicht die heutigen technischen Möglichkeiten wie Geoelektrik, Seismik, Geothermie oder Geomagnetik zur Verfügung (Abb. 4), sie orientierten sich wohl am Erfahrungswissen ihrer Vorväter.

Abb. 4: Während unsere Vorväter bei der Suche nach Rohstoffen auf uraltes Erfahrungswissen, manchmal auch auf Wünschelruten oder Pendel zurückgriffen, stehen heute vielfältige technische Methoden zur Erkundung des Untergrundes zur Verfügung. Die hier abgebildeten Lastwagen senden Vibrationswellen in den Untergrund, die an Schichtflächen reflektiert werden. Einem Echolot gleich werden diese reflektierten Wellen ausgewertet, so dass ein Abbild des Untergrundes konstruiert werden kann. Diese Fahrzeuge waren im Auftrag der nationalen Genossenschaft zur Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) in unserer Region unterwegs.

Später spielten andere Rohstoffe eine wichtige Rolle. Schaffhausen wurde für den Handel mit dem Rohstoff Steinsalz zu einer wichtigen Drehscheibe, denn das Salz musste hier wegen der prägenden Struktur des Rheinfalls umgeladen werden. Das Salz selbst stammte jedoch nicht aus der Gegend. Das Vorkommen von Bohnerz sowie das Vorhandensein von Wasserkraft waren schliesslich der Ausgangspunkt der industriellen Entwicklung der Region.
Das vorliegende Neujahrsblatt möchte Sie einladen, die Sprache der Gesteine kennen zu lernen, die Landschaft mit neuen Augen zu sehen, ihre Geschichte wahrzunehmen, die Herkunft und Bildung von Bohnerz und anderen Bodenschätzen im grösseren Zusammenhang zu sehen.
Die Region Schaffhausen blickt auf eine lange Tradition der Erforschung des geologischen Untergrundes zurück. Das Neujahrsblatt tritt in die Fussstapfen einer ganzen Reihe von geologischen Führern oder Beschreibungen der geologischen Geschichte. Doch während es früher ein Anspruch war, in diesen Schriften den aktuellen Stand des Wissens umfassend zu widerspiegeln, kann das heute nicht mehr gelingen. Das grosse Wissen, das mehrere Generationen von Geologen, Fossiliensammlern, Bauingenieuren und vielen anderen zusammengetragen haben, kann heute kaum mehr zwischen zwei Buchdeckel eingeklemmt dargestellt werden. Heute muss es eher darum gehen, das immense Wissen so aufzubereiten, zu selektieren und zu filtern, dass ein konsistenter Zugang zum vorhandenen Wissen geschaffen wird.

Der enorme Wissenszuwachs der letzten fünfzig Jahre heisst aber nicht, dass nicht auch laufend neue spannende Fragen hinzukommen. Dabei geht es oft nicht nur um «rein akademische» Gedankenspiele. Es sind ganz handfeste Herausforderungen unserer Zeit daran geknüpft: Wie können wir unsere Grundwasservorkommen schützen? Mit welcher Vortriebsart kann man den Tunnel durch den geologischen Untergrund realisieren? Wie verfahren wir mit radioaktiven oder anderen Abfällen, die nicht in einer Verbrennungsanlage verwertet werden können? Wie können wir die Erdwärme im Untergrund für unseren Energiebedarf nutzbar machen? Immer wieder ist das geologische Verständnis gefordert.
Lassen auch Sie sich entführen in diese Welt der Steine, Fossilien, Mineralien und Rohstoffe.

2. 2 Reise durch die Zeit

Eigentlich lagen die Hinweise darauf, dass sich Kontinente über die Oberfläche der Erde bewegen, schon lange vor. Sogar schon vor der berühmten Veröffentlichung der Theorie der Kontinentaldrift von Alfred Wegener 1912 gab es entsprechende Ideen und Konzepte. Doch auch Wegener, der als erster eine umfassende Theorie präsentierte, konnte sich nicht durchsetzen. Es fehlte ihm an Erklärungsansätzen für die Ursachen, die Vorstellung einer veränderlichen Erdoberfläche war zu ungeheuerlich. Erst in den 1960er Jahren gelang seiner Theorie oder eigentlich der entsprechenden Weiterentwicklung, der Theorie der Plattentektonik, der Durchbruch. Die Beweislage konnte nicht mehr ignoriert werden. Damit wurden die Erdwissenschaften umgepflügt, wie es 100 Jahre davor die Evolutionstheorie in den biologischen Wissenschaften getan hatte. Der berühmte Satz von Theodosius Dobzhansky (1900–1975) «Nichts in der Biologie ergibt einen Sinn ausser im Licht der Evolution» lässt sich mühelos auf die Erdwissenschaften übertragen: «Nichts in der Geologie ergibt einen Sinn ausser im Licht der Plattentektonik». Auch für einen geologischen Führer einer so begrenzten Region wie diejenige von Schaffhausen ist es wichtig, den plattentektonischen Rahmen im Hinterkopf zu behalten (Abb. 5).
Alfred Wegener nahm noch an, dass sich die Kontinente durch die Ozeane «pflügten». Heute wissen wir: Die Platten, die die Erde bedecken, können unterschiedlich aufgebaut sein. Sind sie schwer, so sinken sie tiefer in den Erdmantel ein. Sie sind in der Regel von tiefen Ozeanen bedeckt: man spricht von ozeanischer Kruste. Sind sie dagegen leicht, schwimmen sie, wie der Korken im Wasser, oben auf und sinken nicht so tief in den Erdmantel;

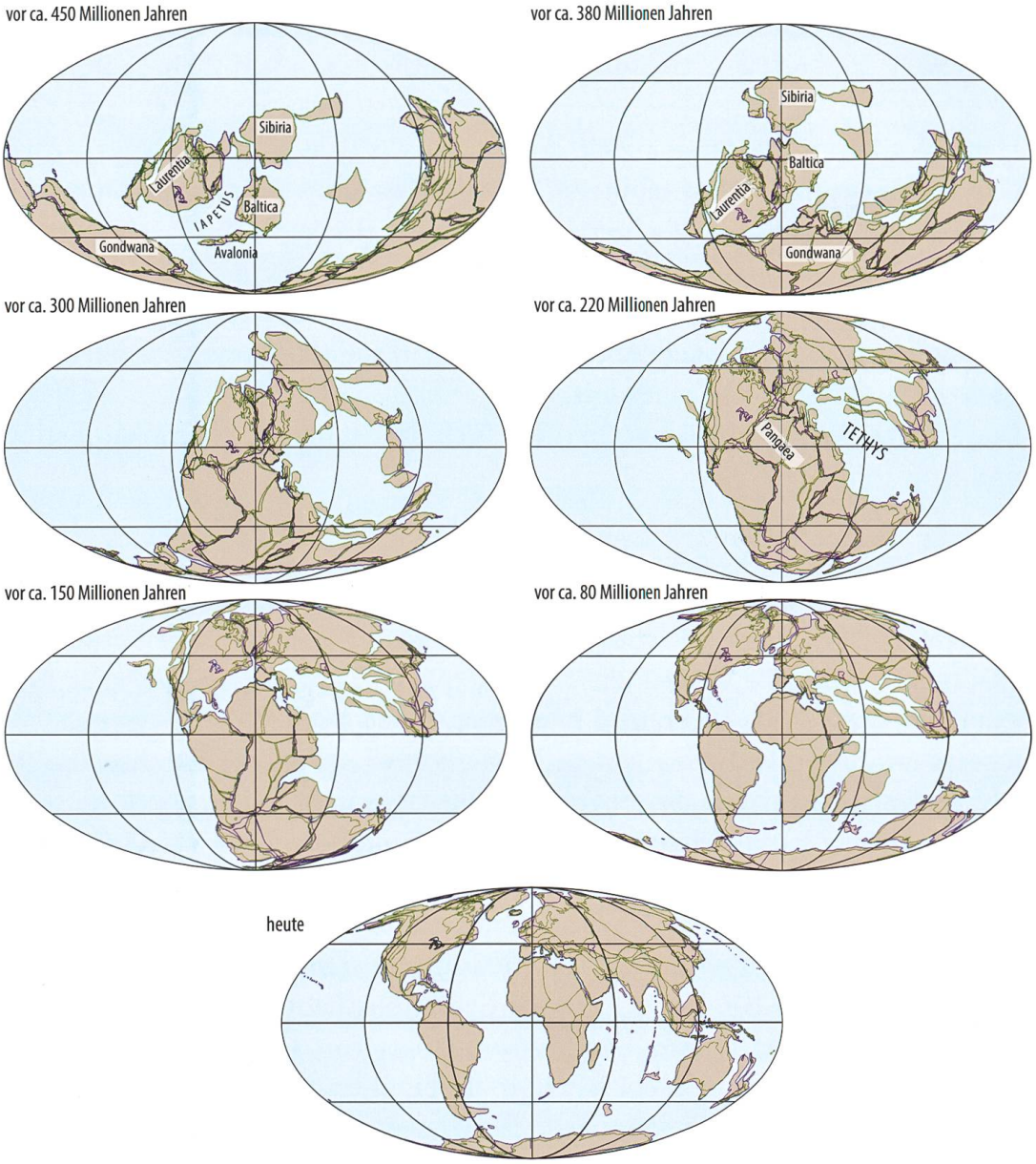


Abb. 5: Die Erdoberfläche ist einem dauernden Wandel unterworfen. Die Kontinente lagen früher nicht dort, wo sie heute liegen. Diese Wanderung der Kontinente beeinflusst das Klimasystem, die Meeresströmungen und nicht zuletzt auch die Entwicklungsmöglichkeiten der Lebensformen auf der Erde.

sie sind nicht oder nur teilweise von Wasser, also höchstens einem flachen Randmeer bedeckt. Man spricht von kontinentaler Kruste. Insbesondere ozeanische Kruste entsteht laufend neu, während sie andernorts unter anderem aufgrund ihres Gewichtes ganz in den Erdmantel abtaucht (Abb. 6).

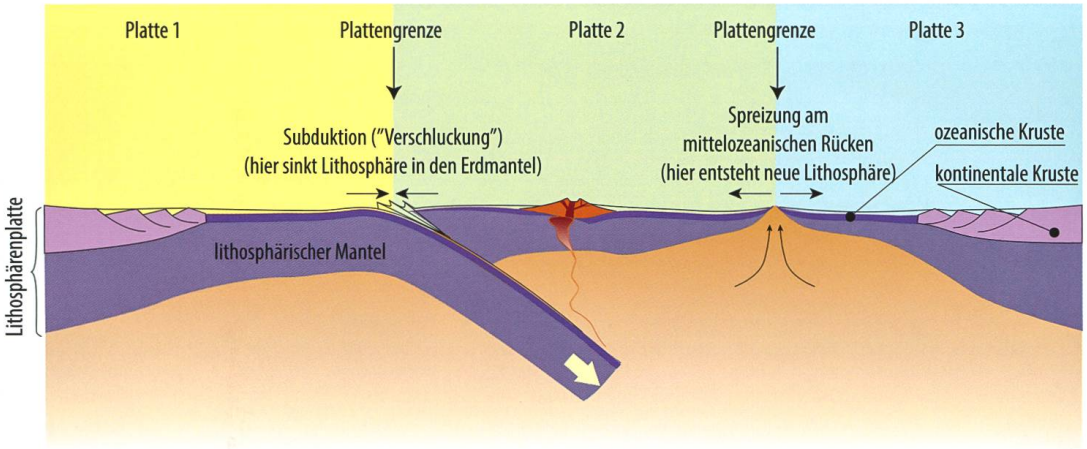


Abb. 6: Wenn man die Erdoberfläche im Querschnitt betrachten könnte, würde sich ein Bild ergeben, wie es hier schematisch dargestellt ist. Die Oberfläche ist unterteilt in Lithosphärenplatten (Lithosphäre = Kruste und fester Anteil des oberen Erdmantels). Dabei kann man aufgrund der Zusammensetzung und des spezifischen Gewichtes zwischen ozeanischen Platten und kontinentalen Platten unterscheiden. An den «mittelozeanischen Rücken» wird laufend neue ozeanische Lithosphäre produziert, an Subduktionszonen sinkt sie in den Erdmantel ab. Kontinentale Lithosphäre ist zu leicht, um in den Erdmantel abzusinken; durch diese «Fliessbandbewegung» der ozeanischen Lithosphäre ist jedoch auch der kontinentale Anteil ständig in Bewegung. Die Bewegungen liegen im Bereich von Zentimetern pro Jahr.

Entsprechende Zonen nennt man Subduktionszonen. Schaffhausen liegt auf kontinentaler Kruste und nicht an einer Plattengrenze. Doch auch hier findet man die Signaturen plattentektonischer Prozesse in den steinernen Archiven der Erdgeschichte: Zeugen von Subduktionszonen im Schwarzwald oder Hinweise auf Dehnungsbewegungen im Hegau sind Beispiele dafür.
Das Antlitz der Erdoberfläche wurde nicht nur durch die Plattentektonik gestaltet. Seit möglicherweise fast vier Milliarden Jahren gibt es Leben auf der Erde. Seither wird die Entwicklung des Lebens geprägt durch die Entwicklung unseres Planeten. Und ebenso lang prägt die Entwicklung des Lebens die Entwicklung unseres Planeten. Die Zusammensetzung der Atmosphäre, die Chemie der Meere, Klimaentwicklung, Erosions- und Sedimentationsraten – all dies muss auch als Folge des Lebens verstanden werden. Ohne Leben gäbe es kaum freien Sauerstoff an der Erdoberfläche. Und ohne freien Sauerstoff wäre auch die Erdoberfläche mineralogisch ganz anders zusammengesetzt. Nur wenn die Entwicklung des Lebens mitberücksichtigt wird, werden wir zu einem umfassenden Bild der Entwicklung unserer Erdoberfläche vorstossen (Abb. 7).

Abb. 7: Querschnitte durch zwei «Onkoide» von der Insel Werd bei Stein am Rhein. Es handelt sich um eine moderne Bildung von Kalk, der durch die Aktivität von Bakterien und Algen ausgeschieden und konzentrisch um einen Kern angelagert wird. Solche Bildungen kennt man in sehr ähnlicher Ausführung aus der Frühzeit des Lebens; sie sind Zeugen für die früheste Produktion von freiem Sauerstoff, seither ein wichtiger Bestandteil unserer Atmosphäre. Ohne diesen Sauerstoff sähe die Welt heute anders aus.

3. Die ferne Vergangenheit: Das Grundgebirge und das Erdaltertum

Tief unter der heutigen Oberfläche liegen Gesteine, die einst in unserer Region im Fokus der Nationalen Genossenschaft zur Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) standen: Granite, Gneise, Schiefer – das sogenannte Grundgebirge. Die alte Unterscheidung in Grund- und Deckgebirge, also in magmatische und metamorphe Gesteine im tieferen Untergrund und Ablagerungsgesteine nahe der Erdoberfläche ist zwar etwas irreführend, ist aber gerade für unsere Gegend ganz praktisch, da die Grenze zwischen den beiden Einheiten tatsächlich einen wichtigen Übergang repräsentiert.

Das Grundgebirge fasst Einheiten zusammen, die heute in einer Tiefe von mehreren hundert Metern unter Schaffhausen liegen (in der Nagra-Son-

Abb. 8: Gneis aus dem Schwarzwald; im Gegensatz zu Granit zeigt Gneis eine (hier sogar verfaltete) Schieferung und kann daher in Platten gespalten werden. Eine Schieferung geht auf die parallele Ausrichtung von Mineralkörnern zurück und zeugt von einer Umwandlung bei hohen Druck- und Temperaturbedingungen (Metamorphose). Ein Gneis kann aus einem Sandstein («Paragneis») oder aus einem Granit («Orthogneis») entstanden sein.

dierbohrung Siblingen rund 350 m, in der Sondierbohrung Benken fast 1000 m), die wir aber weiter westlich im Schwarzwald, beispielsweise aber auch in den Zentralalpen an der Erdoberfläche untersuchen können. Sie bieten einen Einblick in die tiefere Erdkruste eines alten, komplexen Gebirgsgürtels, der sich vor rund 350 Millionen Jahren aufgrund der Kollision mehrerer Kontinente bzw. Mikrokontinente auffaltete. Dieser sogenannte variszische Gebirgsgürtel erstreckt sich quer durch Europa und findet seine Fortsetzung einerseits in Nordafrika, andererseits in dem damals noch benachbarten Nordamerika. Dabei wurden seinerseits ältere Gesteine, ja selbst Spuren noch früherer Gebirgsbildungen überprägt, das heisst verfaltet und mineralogisch umgewandelt («metamorph»). Diese Gesteine liegen heute als Gneise und Schiefer vor (Abb. 8).

Andererseits wurden Gesteine aufgeschmolzen bzw. es drangen grosse Mengen von Gesteinsschmelzen von unten in die verfalteten, metamorphen Gesteine ein. Diese Schmelzen erstarrten zu den granitischen Gesteinen, die heute für den Schwarzwald (und auch für unsere Zentralalpen) charakte-

Abb. 9: Angeschliffenes Handstück des Schluchsee-Granites. Der Schluchsee-Granit ist ein Granit-Körper des Südschwarzwaldes, der aus der Zeit des späten Karbons stammt. Sammlung Keller, Museum zu Allerheiligen.

ristisch sind (Abb. 9). Diese Schmelzen, aber auch damit verbundene heisse Lösungen sind verantwortlich für die Bildung von einigen der für den Schwarzwald so prägenden Vererzungen (andere Vererzungen entstanden bei der späteren Hebungsgeschichte).

Der Schwarzwald bietet somit nur ein kleines Fenster in die komplexe geologische Geschichte eines sehr viel grösseren Gebirgsgürtels. Verschiedene tektonische Einheiten («Mikrokontinente»: Baden-Baden-Zone, Nord- und Mittelschwarzwälder Kristallin, Badenweiler-Lenzkirch-Zone und Südschwarzwälder Kristallin) wurden im Rahmen dieser Gebirgsbildung zusammengefügt und lassen sich noch heute im Kartenbild unterscheiden (siehe z. B. Modell von Loeschke et al., 1998).

Das variszische Gebirge wurde nach der Auffaltung erodiert und eingeebnet, so dass 100 Millionen Jahre später Gesteine an der Oberfläche lagen, die ursprünglich in der Gebirgsbildung in mehreren Kilometern Tiefe geformt worden waren. In der späten Phase der Gebirgsbildung setzten zudem Dehnungsbewegungen ein, die die Erdkruste zerfurchten. Tiefe Gräben durchziehen nicht nur den Untergrund in der Nordschweiz (Abb. 10). Wie oft bei solchen Grabenbildungen war diese Entwicklung mit der Bildung von Vulkanen verbunden. Diese ehemaligen Gräben erstreckten sich auch auf das Gebiet der heutigen Alpen; bei der sehr viel späteren Alpenfaltung wurden sie selbst wiederum verfaltet. Die Ausdehnung der Gräben im Untergrund der Nordschweiz wurde vor allem durch die Nagra dokumentiert (Naef und Madritsch, 2014).

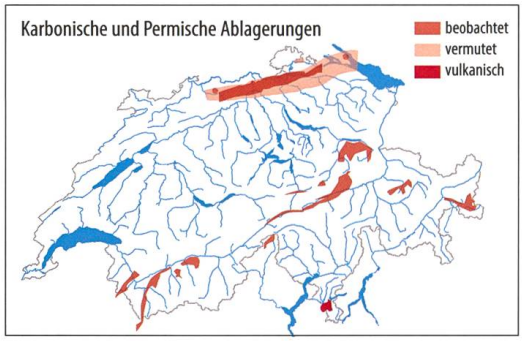


Abb. 10: In der Spätphase der variszischen Gebirgsbildung setzten Dehnungsbewegungen ein, die in der Schweiz an mehreren Stellen tiefe Tröge schufen, die mit Ablagerungen (Sedimenten) aus Perm- und Karbonzeit verfüllt wurden. Man nennt sie daher «Permokarbontröge». Einige dieser Tröge wurden später in die Alpenbildung integriert. Auch unter der Nordschweiz existierte ein grosses System eines solchen Troges, wie Abklärungen der Nagra zeigten.

In der Nagra-Bohrung in Weiach ist die sedimentäre Füllung des Grabens rund 1000 m mächtig. Es konnte anhand des Bohrkerns auch aufgezeigt werden, wie diese Gräben durch Ablagerungen verfüllt sind, die über dem Meeresspiegel abgelagert worden waren (= «festländische» oder «terrestrische» Ablagerungen). Sie sind durchsetzt von vulkanischen Gesteinen. Die Ablagerungsgesteine (Sedimente) stammen aus den geologischen Perioden Karbon und Perm;

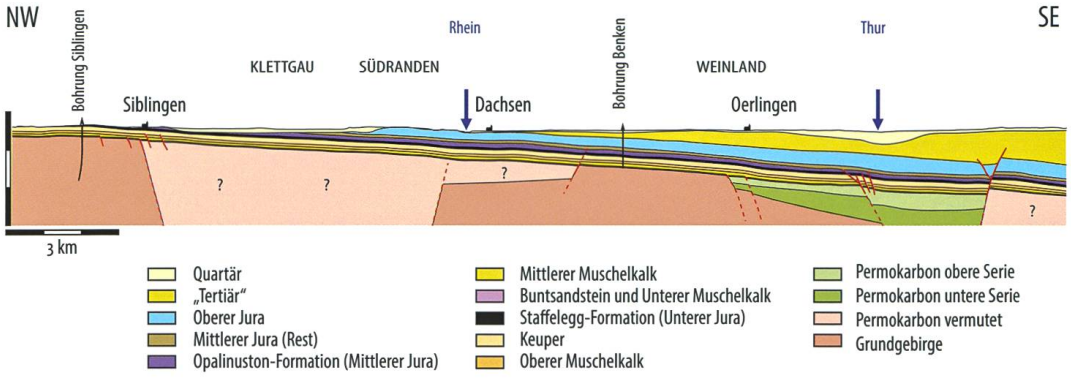


Abb. 11: Die Permokarbontröge sind zum Teil sehr tief und enthalten in einzelnen Lagen Kohle. Deren Abbau lohnt sich aber aufgrund der grossen Tiefe nicht. Unter Schaffhausen wird ein Permokarbontrog vermutet: südlich von Benken wurde er durch seismische Untersuchungen nachgewiesen.

entsprechend gingen diese Gräben als «Permokarbontröge» in die Literatur ein (Abb. 11).

Nach der Einebnung des variszischen Gebirges bzw. nach Verfüllung der Permokarbontröge war Mitteleuropa eine relativ flache, festländische Gegend. Die ursprünglich tiefliegenden Gneise und Granite des ehemaligen Gebirges lagen stellenweise bereits an der Erdoberfläche. Sie wurden in den folgenden Jahrmillionen von Ablagerungen – Sedimenten – überlagert. Diese Sedimente, heute natürlich ebenfalls längst zu festen Gesteinen verbacken, bilden das sogenannte Deckgebirge (in Abgrenzung zum oben beschriebenen Grundgebirge). Diese Sedimente bilden den Untergrund und die Struktur der engeren Umgebung der Region Schaffhausen. Wer entlang der Wutach von der Schattenmühle bis zur Wutachmühle wandert bzw. weiter bis nach Achdorf reist, durchschreitet den unteren Teil dieses Deckgebirges wie die Seiten eines Buches. Man beginnt mit dem Grundgebirge bei der Schattenmühle, lernt den rund 250 Millionen Jahre alten Buntsandstein der frühen Triaszeit kennen und beendet den Querschnitt bei Aselfingen in den Gesteinen des frühen Jura.

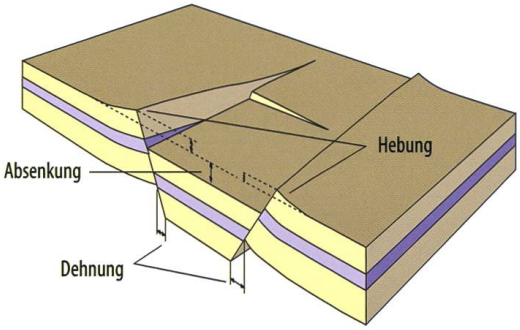


Abb. 12: Geologische Gräben entstehen durch Dehnungsbewegungen in der Erdkruste. Diese sehr schematische Darstellung soll zeigen, wie der zentrale Teil absinkt, während sich die sogenannten Trogschultern auf beiden Seiten des Grabens aufgrund der Gewichts-Entlastung leicht anheben. Dieses Muster lässt sich zum Beispiel beim Schwarzwald und den Vogesen beobachten, zwischen denen der Rheintalgraben verläuft.

«Fachchinesisch»

Wie alle Wissenschaftsdisziplinen verwendet auch die Geologie eine ganze Serie von Fremdwörtern. Dazu kommen aber auch zahlreiche Begriffe, die aus der Sprache der Bergleute stammen. So wird die «Dicke» einer Schicht als **«Mächtigkeit»** bezeichnet. Der **«Aufschluss»** ist die Stelle an der Erdoberfläche, an der eine bestimmte geologische Einheit zugänglich ist. Das **«Fallen»** ist die Richtung, in die eine Fläche geneigt ist. Das **«Liegende»** ist das Gestein, das eine bestimmte Bezugsschicht unterlagert, das **«Hangende»** das Gestein, das sie überlagert.

Die heutige Erhebung des Schwarzwaldes hat nichts bzw. sehr wenig mit dem alten Gebirge zu tun, in dem sein Gesteinsuntergrund geformt wurde. Die Erhebung geht auf viel jüngere Dehnungsbewegungen in der Erdkruste zurück: Vor rund 50 Millionen Jahren setzte eine Ost-West-Dehnung ein, die in einem grossen Graben resultierte, der heute noch die Landschaft Mitteleuropas prägt: der Rheingraben, der sich von Basel her weit nach Norden erstreckt (Abb. 12, Abb. 13). Erneut kam es zu einer Ausdünnung der Erdkruste mit begleitendem Vulkanismus (Eifel, Kaiserstuhl bei Freiburg). Östlich und westlich dieses Grabens hoben sich die sogenannten «Trogschultern» grossräumig. Im Westen bilden diese Trogschultern heute die Vogesen, im Osten den Schwarzwald. Durch diese Hebung wurde die Erosion verstärkt: das alte, einst eingeebnete und mit jüngeren Sedimenten überdeckte Grundgebirge wurde erneut freigelegt und an die Erdoberfläche befördert. Wegen des Kippens der Trogschultern treffen wir heute bei einer Reise vom Schwarzwald Richtung Osten bzw. Südosten zunehmend jüngere Gesteine an («Schichtstufenlandschaft», Abb. 15). Auch heute stehen gewisse Bewegungen der Erdkruste, die sich gelegentlich in schwachen Erdbeben in der Region manifestieren, im Zusammenhang mit dieser grossräumigen Dehnungsbewegung. Das grosse Erdbeben von Basel im Jahr 1356 geht ebenfalls auf die Aktivität an der geologischen Struktur des Rheingrabens zurück.

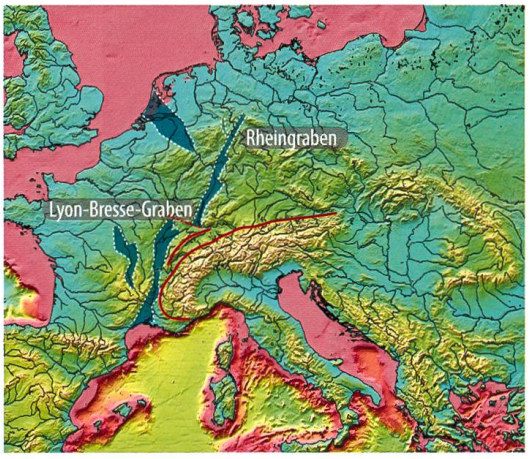


Abb. 13: Der Rheingraben ist Teil eines grösseren, sich quer durch Europa ziehenden Grabensystems.

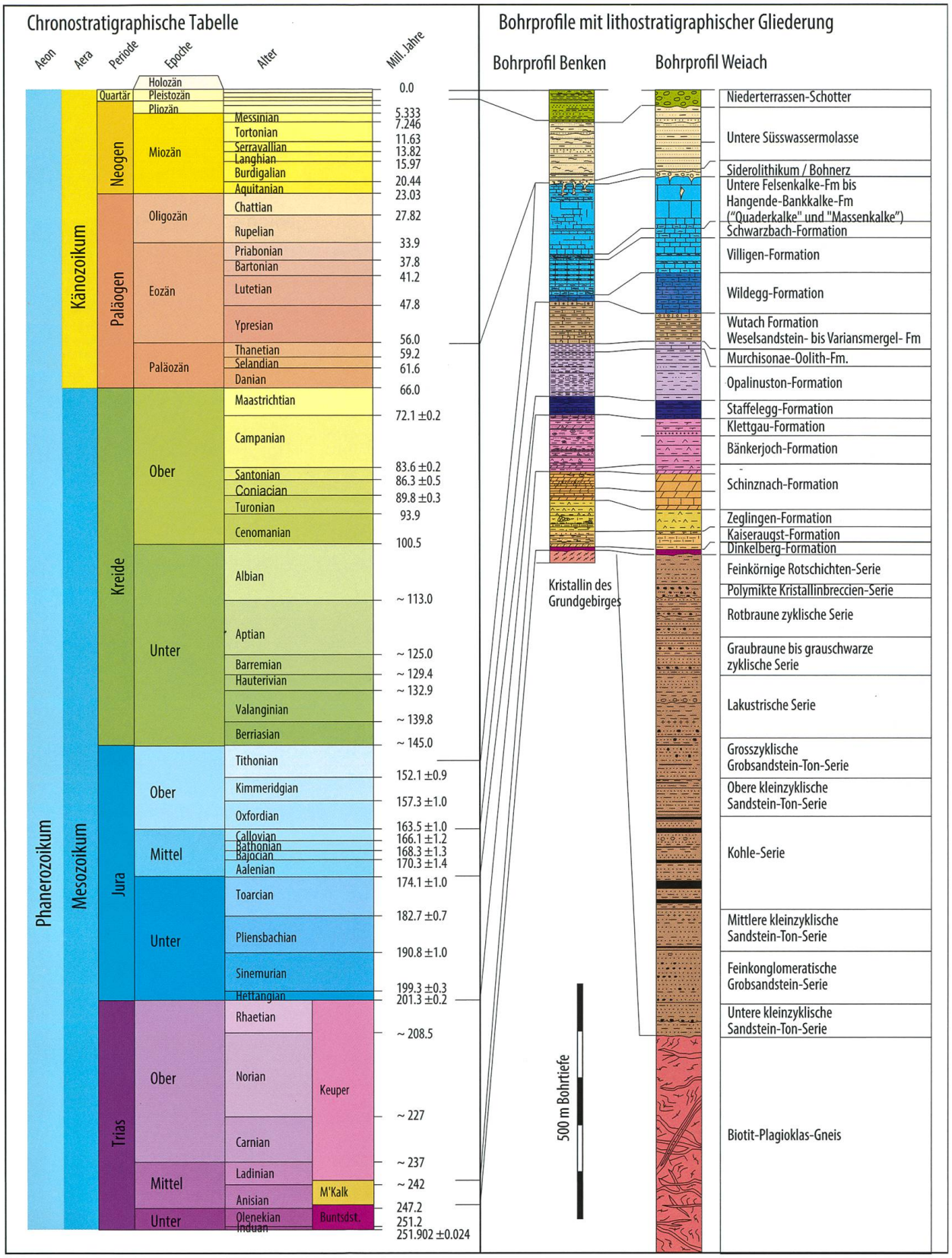


Abb. 14: Bohrungen der Nagra zeigen den Aufbau des Untergrundes bis in grosse Tiefen.

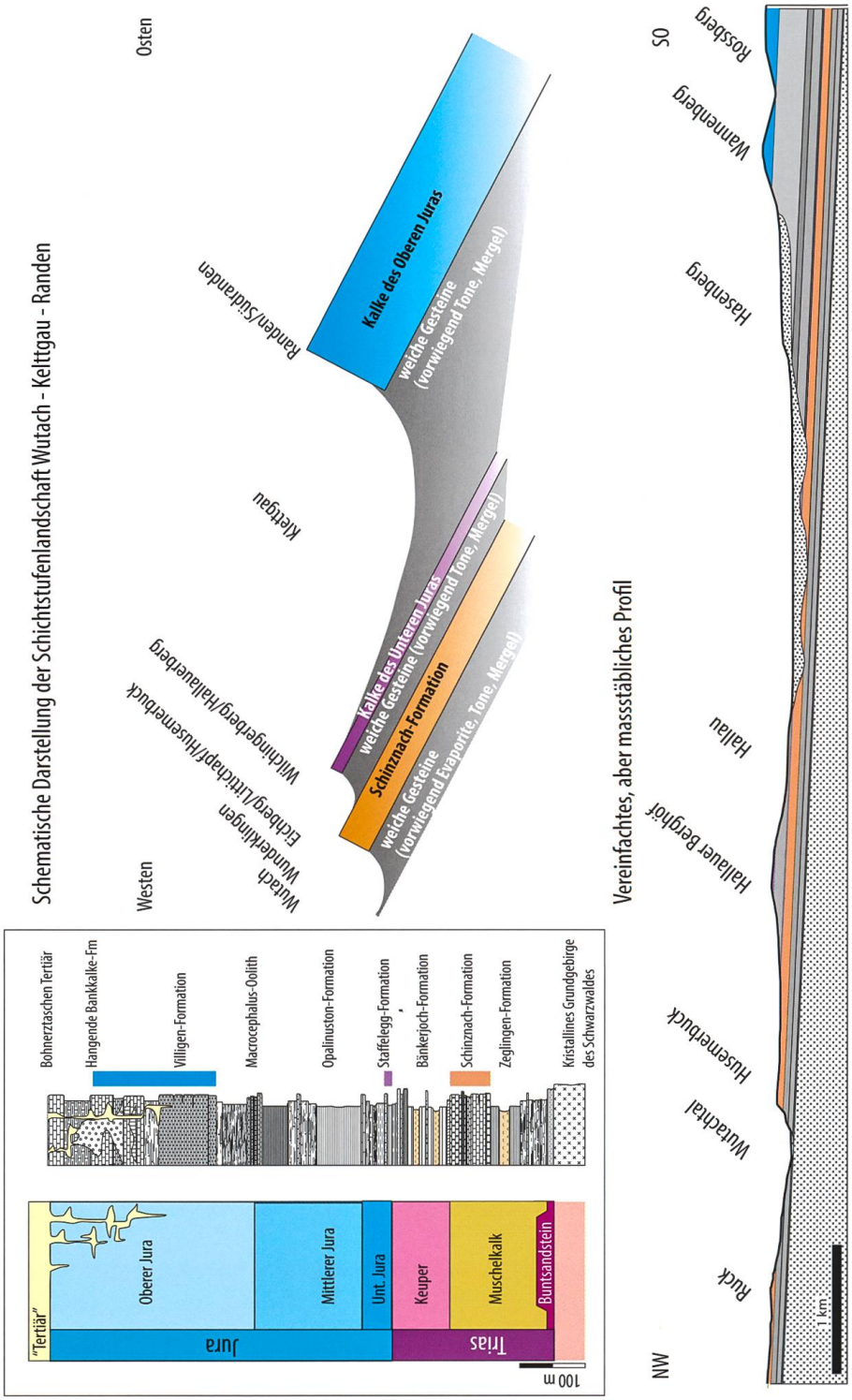


Abb. 15: Durch die Hebung des Schwarzwaldes ist die Schichtabfolge in der Region Schaffhausen leicht geneigt. Dadurch entsteht die für unsere Region charakteristische Schichtstufenlandschaft mit den älteren Gesteinen im Nordwesten und den jüngeren im Südosten.

4. Trias – Auftakt ins Erdmittelalter

Die ältesten Ablagerungsgesteine ausserhalb der Permokarbontröge, die dem Grundgebirge aufliegen, sind in Süddeutschland und der Nordschweiz mit ein paar lokalen Ausnahmen festländische Sedimente der Triaszeit (Abb. 16): Rote Sandsteine, gelegentlich mit grünen oder violetten Toneinlagerungen: der sogenannte «Buntsandstein». Darüber folgen Meeresablagerungen («Muschelkalk) und schliesslich wieder festländische Sedimente («Keuper»). Dieser dreiteilige Aufbau der Abfolge veranlasste 1834 Friedrich August von Alberti, den Begriff der «Trias» (= «Dreiheit») einzuführen, um die drei in Mitteleuropa bereits erkannten und beschriebenen Glieder zusammenzufassen. Als «Prospektionsgeologe» (diese Bezeichnung existierte damals natürlich noch nicht) erkannte von Alberti die Wichtigkeit der korrekten Einstufung der stratigraphischen Abfolge für die Suche nach Steinsalz. Er hatte zahlreiche Prospektionsbohrungen auf Steinsalz geleitet und kannte daher die Schichtabfolge unter und über dem begehrten «weissen Gold» sehr gut.
Heute ist der Begriff der «Trias» weltweit für die Periode bzw. das System zwischen 251 und 201 Millionen Jahre gültig. Dies, obschon sich die beschriebene «Dreiheit» nur im sogenannten «Germanischen Becken» beobachten lässt, einem grossen Sedimentationsgebiet, das sich zwischen England im Westen, der Nordschweiz im Süden und Polen im Osten erstreckt.

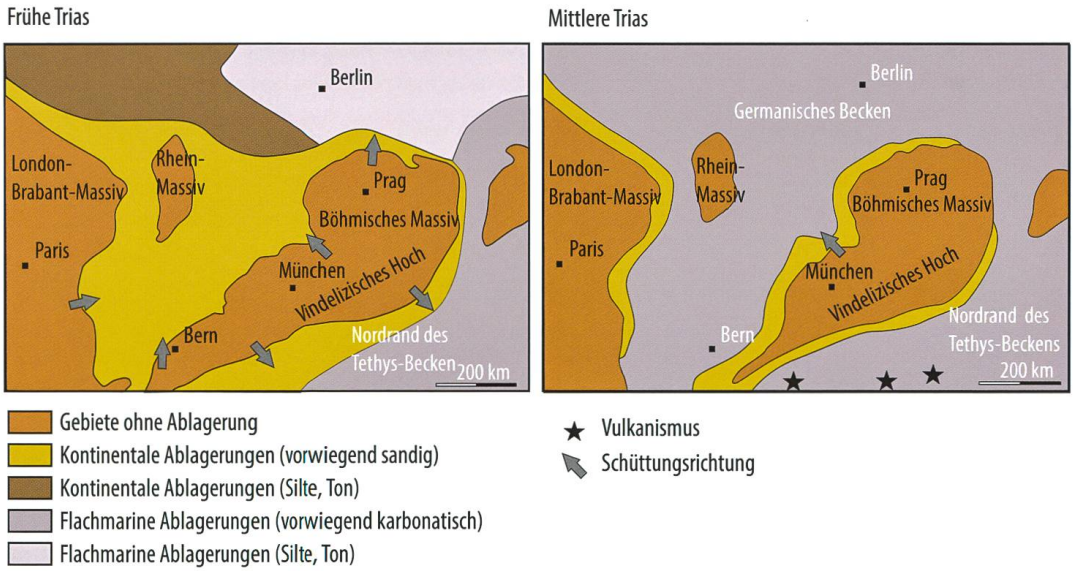


Abb. 16: Mitteleuropa war während der Triaszeit charakterisiert durch ein flaches Becken, das mal über (es entstanden festländische Ablagerungen), mal unter dem Meer lag (es entstanden Meeres- bzw. marine Ablagerungen). Weiter im Süden, also da wo heute die Alpen liegen, lag ein grosser und tiefer Ozean, die «Tethys».

Stratigraphie

Unter «Stratigraphie» bezeichnet man in den Erdwissenschaften die Beschreibung des «Nach- und Miteinanders». Heute unterscheidet man verschiedene Teilbereiche: Die **Chronostratigraphie** gliedert die Gesteinseinheiten aufgrund ihres absoluten Alters, das an geeigneten Gesteinen mit radiometrischen Alterdatierungen bestimmt werden kann. Die **Biostratigraphie** ordnet Sedimente anhand des Nacheinanders von Fossilien aufgrund ihres relativen Alters. Die Abfolge von Fossilien wird dafür in «Zonen» unterteilt; je nach Organismengruppen können dabei unterschiedliche Zonen definiert werden (z.B. Ammonitenzonen). Die **Lithostratigraphie** schliesslich beschreibt die räumliche und strukturelle Gliederung der Gesteinseinheiten aufgrund ihrer Merkmale. Bezeichnendes Merkmal dabei ist, dass Ober- und Untergrenzen nicht mit Zeitlinien zusammenfallen müssen. Wenn sich beispielsweise eine Strandlinie im Lauf der Zeit von A nach B verschiebt, wird die entsprechende Grenze zwischen Landablagerungen und Meeresablagerungen bei A älter sein als bei B. In der Lithostratigraphie werden die Gesteine in **Gruppen**, **Formationen**, **Member** und schliesslich **Bänke** oder Schichten unterteilt. So ist beispielsweise das «Beggingen -Member» ein Teil der «Staffelegg-Formation».

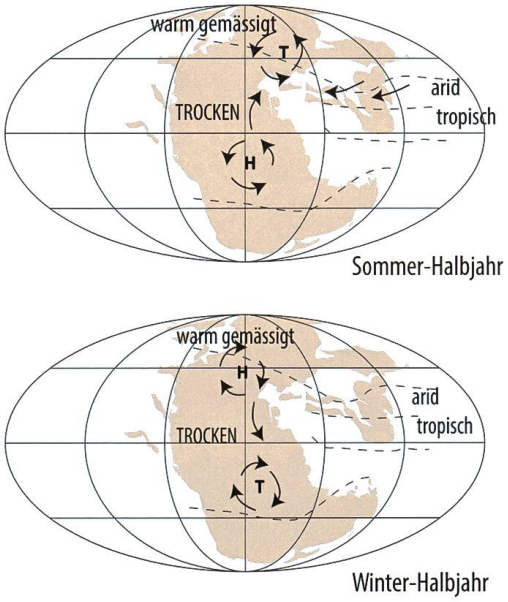


Abb. 17: Durch die grossen Landmassen nördlich und südlich des Ozeans «Tethys» bildete sich ein «Mega-Monsun-Klima», das sich mit dem heutigen Klimasystem kaum vergleichen lässt.

Dieses Becken ist intrakontinental, das heisst es liegt innerhalb der europäischen Kontinentalplatte. Die Nordschweiz und damit auch die Region Schaffhausen liegen am südlichen Rand des damaligen Beckens. Gegen Süden und Südosten wurde das Becken durch eine festländische Schwelle, das «Vindelizische Land» begrenzt. Noch weiter südlich davon lag der offene Ozean der Tethys.

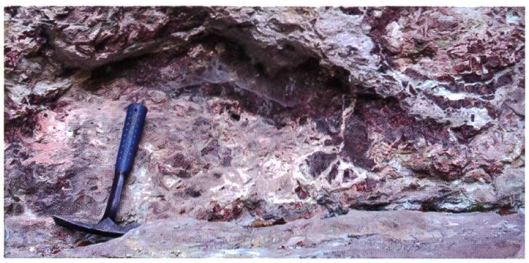
Die Zeit der Trias zeichnete sich durch hohe Temperaturen und ein «Mega-Monsun-Klima» aus (Abb. 17). Die Pole waren nicht vereist, die Kontinente waren zu einem grossen Kontinent vereint. Das dreieckige Tethys-Meer im Bereich der niederen Breiten teilte den Kontinent in einen Süd- und einen Nordteil. Durch die-

se Anordnung formte sich im Nordsommer jeweils ein grosses Tiefdruckgebiet über dem Festland des Nordkontinents, bzw. im Südsommer über dem Festland des Südkontinents. Sehr heftige saisonale Niederschläge, abwechselnd mit grosser Trockenheit, waren die Folge. Die damit verbundenen Ablagerungsbedingungen lassen sich in den Sedimenten der Trias-Zeit rekonstruieren.
Bereits im Gebiet der Tethys lässt sich die erwähnte Dreigliederung nicht mehr erkennen. Die Trias-Gesteine der Alpen, die sogenannte «Alpine Trias», zeigen einen viel komplexeren Aufbau, und der zeitliche Vergleich mit den entsprechenden Gesteinen der Nordschweiz ist sehr anspruchsvoll.

4. 1 Festländische Ablagerungen (Dinkelberg-Formation – «Buntsandstein»)

Gesteine des «Buntsandsteins» werden in der Schweiz zur **Dinkelberg-Formation** gestellt. Diese älteste Einheit der germanischen Trias ist auf dem Gebiet des Kantons Schaffhausen an der Oberfläche nicht zugänglich. Doch im nahen Schwarzwald, etwa im Merenbachtal oder entlang der Wutachschlucht sind diese Ablagerungen auch an der Oberfläche aufgeschlossen. Im oberen Wutachtal ist der «Buntsandstein» rund 40 m mächtig, in der Bohrung Siblingen waren es gerade mal noch 9,12 m. Im Zentrum des Beckens kann die Abfolge sogar mehrere hundert Meter umfassen. Starke Schwankungen in der Mächtigkeit sind einerseits vermutlich dem damaligen Relief, aber auch den weiterhin aktiven tektonischen Störungen am Rande der Permokarbontröge zu verdanken.
Es handelt sich um mehrheitlich festländische Ablagerungen: Konglomerate, Sand- und Tonsteine, die eine intensive Erosion der umliegenden Hochzonen dokumentieren. Das Material stammte hauptsächlich aus dem Südwesten. Damals lag Mitteleuropa im «Wüstengürtel» der Erde. Allerdings erfolgte der Sedimenttransport mehrheitlich durch Wasser; in dem erwähnten Klima kam es zu saisonalen Starkniederschlägen, bei denen über temporäre und wechselnde Flusssysteme grosse Mengen von Sediment transportiert und bei Überschwemmungen auch weit verteilt wurden. In den Trockenperioden kam es dann zu starker Verdunstung von aufsteigendem Grundwasser und zur Bildung von Kalkkrusten bzw. -knollen. Die Ablagerungssequenzen werden auch von grossräumig erkennbaren Boden-Horizonten untergliedert (Abb. 18). Darunter versteht man Schichten, in denen Prozesse dokumentiert sind, die für Bodenbildungen typisch sind: chemische Lösungs- und Ausfällungsprozesse, Aktivitäten von Wurzeln und Bodenorganismen usw. Auch in

Abb. 18: Fossile Bodenbildung im Buntsandstein der Wutachschlucht: solche Lagen sind wichtige Hinweise auf die Klimaentwicklung. Durch Auswaschungs- und Verdunstungsprozesse wurde SiO_2 in Knollen angereichert. Diese liegen heute als fleischrote Karneolknollen vor (siehe Detail unten).



der Bohrung der Nagra in Benken wurden entsprechende Bodenbildungen dokumentiert.

4. 2 Die Gegend versinkt unter dem Meeresspiegel: «Muschelkalk»

Vor rund 240 Millionen Jahren wurde Mitteleuropa schrittweise von Osten her von einem flachen Meer überflutet. Die in einer wüstenartigen Umgebung gebildete Ablagerung der Dinkelberg-Formation ging in die Sedimentation in einem flachen Meer über (man nennt diesen Prozess der Meeresüberflutung «Transgression»). Das liegt einerseits an einem weltweiten Meeresspiegelanstieg, andererseits an Absenkungen im Südteil des germanischen Beckens. Die Ablagerungen des «Unteren Muschelkalkes» bzw. der **Kaiseraugst-Formation** bestehen aus meist dunkelgrauen Dolomit-, Ton-, Silt- und Sandlagen. Wellenrippeln, Kreuzschichten und Lagen von Muschelschalen bezeugen ein sehr flachmarines Milieu (Abb. 19). Die Fossilien zeigen, dass in dieser Phase nur salztolerante, robuste Organismen überleben konnten; diese gediehen

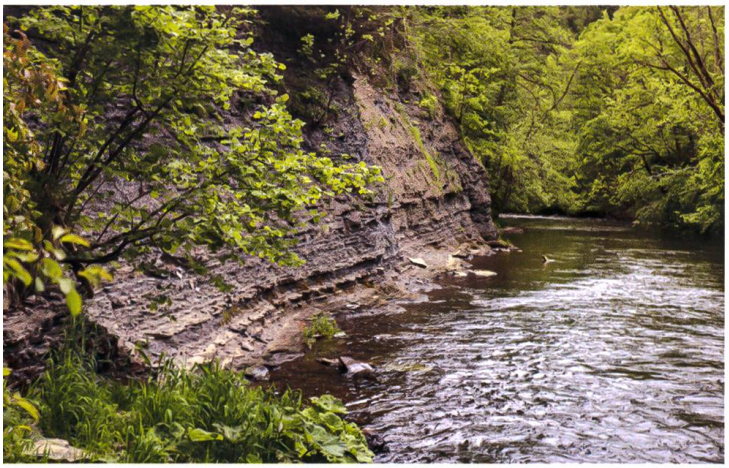


Abb. 19: Der «Untere Muschelkalk» ist in der Wutachschlucht aufgeschlossen. Er besteht aus meist fein geschichteten Lagen aus Ton und Dolomit bzw. Kalk. Die häufigen wellenförmigen Rippeln, Rinnen und Wülste verhalfen der Einheit zu ihrer heute nicht mehr gültigen Bezeichnung «Wellengebirge». In der Schweiz werden diese Schichten heute zur Kaiseraugst-Formation zusammengefasst.

dafür stellenweise in grosser Zahl. Gegen den Abschluss der Ablagerung der Kaiseraugst-Formation sinkt der Meeresspiegel wieder leicht, und es bilden sich teilweise lokal lagunäre Verhältnisse. In den Lagunen bilden sich erste Evaporitgesteine (siehe Kästchen auf Seite 26). Aufschlüsse der Kaiseraugst-Formation beschränken sich in der Region Schaffhausen auf das Wutachtal.
Der «Mittlere Muschelkalk» bzw. die **Zeglingen-Formation** schliesslich ist stark geprägt durch Evaporitgesteine: Anhydrit- und Gipsbänke, stellenweise Steinsalz, sowie Ton- und Dolomitlagen. Die Zufuhr von Wasser des offenen Ozeans wurde durch tektonische Bewegungen unterbunden oder stark eingeschränkt. Durch die klimabedingt hohen Verdunstungsraten kam es zur häufig in Zyklen erfolgenden Ablagerung der Evaporite (siehe Kästchen). Die Strukturen der Ablagerungen zeigen, dass sie mehrheitlich unter, aber teilweise auch über Wasser erfolgten. Westlich der Aare sind die Steinsalzvorkommen sehr prominent und wurden bzw. werden in der Region Schweizerhalle intensiv ausgebeutet. In der Region Schaffhausen blieben entsprechende Sondierbohrungen in den 1820er Jahren in Beggingen, Schleitheim und Siblingen und 1913 noch einmal in Siblingen erfolglos. Die Stellung Schaffhausens war in der Vergangenheit lange durch seine dominierende Rolle im Salzhandel geprägt gewesen; als aber Salz in der Nordschweiz gefunden wurde, blieb ausgerechnet Schaffhausen «auf dem Trockenen», da die entsprechenden Schichten zwar vorhanden, aber salzfrei ausgebildet sind. Allerdings konnte man in der Nagra-Bohrung in Benken ein – allerdings beschränktes – Steinsalzlager nachweisen.
Die Zeglingen-Formation ist im Kanton Schaffhausen ausschliesslich am Westrand des Kantons, also entlang der Wutach, aufgeschlossen und zugänglich. Zunächst im Tagebau, ab ca. 1790 hat man die Gipsvorkommen in diversen Stollenbauten (Wunderklingen, Schleitheim) ausgebeutet und die Gipsgesteine wirtschaftlich genutzt. Die Nutzung als Düngegips stand im Vordergrund; nur wenig wurde als Stuckaturgips verwendet. Das Gipsmuseum in Schleitheim bietet neben vielen Informationen auch die Gelegenheit, einen Teil des Stollensystems heute noch zu begehen (Abb. 21 und 22; Guyan, 1936; Stössel et al., 2005).
Der «Obere Muschelkalk» wird heute durch die **Schinznach-Formation** beschrieben. In ihr erfolgt ein Wechsel von vor allem kalkigen Gesteinen (ehemals als «Hauptmuschelkalk» bezeichnet) zu mehrheitlich dolomitischen Gesteinen (ehemals «Trigonodus-Dolomit»). Die früher separat ausgeschiedene «Lettenkohle» (Asp-Member, siehe Seite 31), traditionell bereits Teil des

Evaporitgesteine

Wenn Meerwasser verdunstet, werden im Rückstand die gelösten Salze aufkonzentriert. Steigt die Konzentration weiter an, kristallisieren die Salze in einer charakteristischen Abfolge: Gips/Anhydrit, Steinsalz, Bittersalz. Man nennt die so gebildeten Gesteine «Evaporitgesteine». Das kann entweder unter Wasser (subaquatisch), also zum Beispiel in einer Lagune passieren (Abb. 20). Es kann aber auch sein, dass in einer Küstenebene salziges Grundwasser durch Kapillarkräfte aufsteigt und an der Oberfläche verdunstet (subaerische Bildung). Dann bilden sich Evaporitgesteine über dem (Grund)wasserspiegel direkt im Sediment. Diese «Salzsümpfe» werden als «Sabkha» bezeichnet, einem aus dem Arabischen stammenden Begriff.

Anhydrit (chemische Formel: $Ca[SO_4]$) kann direkt aus Meerwasser entstehen oder aber durch die Überdeckung durch jüngere Gesteine unter dem Einfluss von Temperatur und Druck aus Gips gebildet werden (chemische Formel von Gips: $Ca[SO_4]\cdot 2H_2O$). Bei dieser mineralogischen Umwandlung wird Wasser frei, und das Volumen nimmt ab. Umgekehrt wird Anhydrit in Gips umgewandelt, wenn an der Erdoberfläche, das heisst unter Umgebungsdruck und -temperatur, Wasser zutritt. Dabei wird das Volumen entsprechend um rund 60% vergrössert. Daher sind Anhydritgesteine in der Baugeologie sehr gefürchtet: Wenn zum Beispiel im Tunnelbau solche Gesteine angeschnitten werden und Wasser zutritt, setzt die Umwandlung zu Gips ein. Die damit verbundene Volumenzunahme kann das Bauwerk stark verformen und damit schädigen. Als man in Staufen (D) bei Freiburg durch Geothermiebohrungen Wasser in eine anhydritführende Schicht einbrachte, setzten Hebungen mit schweren Folgen für den historischen Ortskern ein. Weit über 200 Gebäude erlitten grosse bautechnische Schäden.

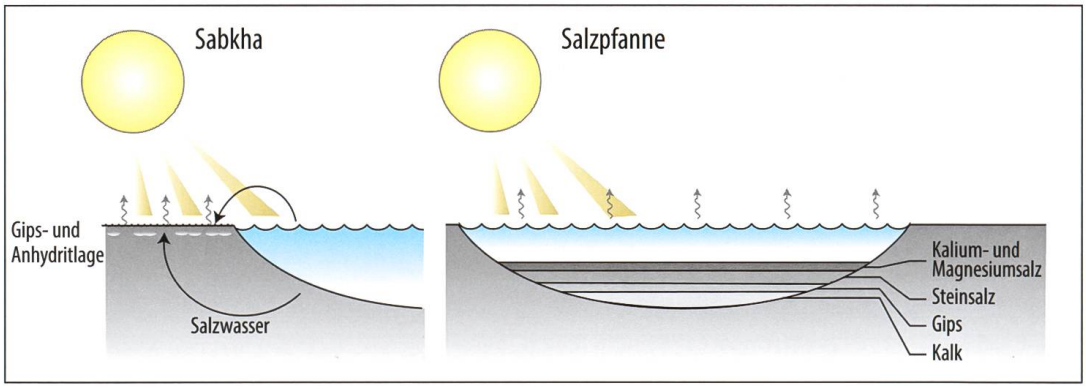


Abb. 20: Verdunstungs- oder Evaporitgesteine können entweder durch Ausfällung unter Wasser, oder durch Verdunstung in oberflächennahen Schichten über dem Wasserspiegel entstehen.

Abb. 21: In Oberwiesen bei Schleitheim wurde als Teil des Gipsmuseums ein «Mundloch» für den Gipsabbau rekonstruiert. Ein «Mundloch» bezeichnet in der Bergmannssprache den an der Tagesoberfläche liegenden Eingang eines Stollens.

Abb. 22: Das Gipsmuseum Schleitheim zeigt an den Wänden des Besucherstollens den Aufbau des gips- bzw. anhydritführenden Gesteins.

überliegenden Keupers, wird heute ebenfalls noch der Schinznach-Formation zugerechnet (Pietsch et al., 2016).

Die Kalk- und Dolomitgesteine repräsentieren ein Ablagerungsmilieu mit einer flache Rampe und einer Verbindung zu bzw. Austausch mit dem offeneren Meer. Durch eine Erhöhung des Meeresspiegels wurde zunehmend Wasser aus Südwesten («Burgundische Pforte») aus dem offenen Ozean in das germanische Becken eingetragen. Die Verdunstung war nicht mehr so hoch, dass es zur Bildung von Evaporitlagerstätten hätte kommen können. Jedoch war in unserer Gegend, das heisst am Südrand des germanischen Beckens, der Salzgehalt zeitweise noch immer erhöht, was die Fossilien einer spezialisierten Fauna belegen. Die Ablagerungen zeichnen sich oft durch sehr regelmässige Schichtung bzw. Zyklizitäten aus (Aigner und Bachmann, 1992; Palermo et al., 2010). Diese Abfolgen werden teilweise als Signatur regelmässiger Klimaschwankungen interpretiert; so wie in der jüngeren erdgeschichtlichen Vergangenheit die Schwankungen in den Parametern der Erdumlaufbahn (Präzession, Schiefe der Ekliptik, Exzentrizität: Milanković-Zyklen) den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten geprägt hätten, hätten damals diese Schwankungen die Frequenz von Stürmen, Meeresspiegelbewegungen und Weiterem gesteuert (Abb. 23 und 24).

Tatsächlich finden sich in der Abfolge zahlreiche für Sturmablagerungen («Tempestite») typische Sedimentstrukturen (Abb. 25). Offensichtlich fand die Ablagerung einerseits in entsprechend flachem Wasser statt, andererseits war diese flache Rampe nicht durch einen Korallenriffgürtel vor dem Einfluss

des offenen Meeres geschützt. Eigentliche Hurrikane dürften dabei durch die Burgundische Pforte ins Muschelkalkmeer eingedrungen sein. Auch Rippeln, also durch Wellen und Strömung verursachte wellenförmige Sedimentoberflächen lassen sich häufig beobachten (z. B. beim Baggenbrunnen bei Schleitheim, Abb. 26).

Fossilien sind in der Schinznach-Formation über weite Bereiche eher selten; entlang von einzelnen Horizonten aber treten sie sehr häufig auf, möglicher-

Abb. 23: Der «Hauptmuschelkalk» bildet u.a. im Gebiet Wutachschlucht und Wutachflühe eindrückliche, dominante Felswände.

Abb. 25: Sturmablagerungen finden sich im Hauptmuschelkalk häufig. Sie hinterlassen typische Sedimentstrukturen (Bild: Aufschluss in Wunderklingen).

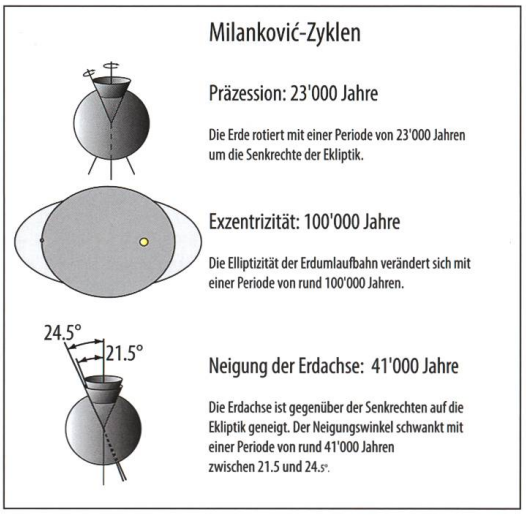


Abb. 24: Schwankungen in den Orbitalparametern der Bewegungen der Erde um die Sonne lassen sich exakt berechnen. Sie gelten als mitverantwortlich für zyklische Klimaschwankungen in der Erdgeschichte.

weise durch die Sturmfluten zusammengeschwemmt (Abb. 27–31). Oft sind diese Ansammlungen jedoch durch einige wenige Arten dominiert. So unterscheidet man beispielsweise den eigentlichen «Trochitenkalk» (**Leutschenberg-Member** und **Kienberg-Member**; Pietsch et al., 2016). Trochiten (Abb. 29) sind rädchenförmige Stielglieder von Seelilien (Abb. 30). Seelilien ihrerseits gehören trotz ihres Namens, ihrer

Abb. 26: Wellenrippeln im oberen Teil der Schinznach-Formation, Baggenbrunnen bei Schleitheim.

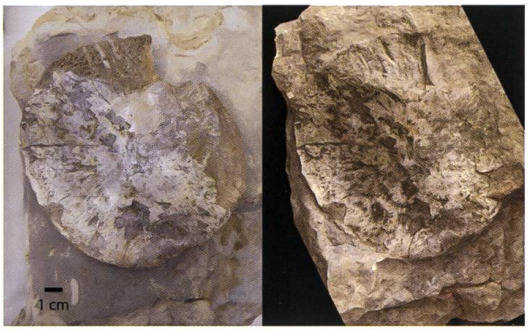


Abb. 27: Dieser versteinerte Knochen (links: präpariert, rechts: wie er gefunden wurde) wurde von einer aufmerksamen Hobby-Sammlerin entdeckt und zu Recht als besondere Entdeckung gemeldet. Nach Einschätzung der Experten handelt es sich um den Oberarm (Humerus) eines Vertreters aus der Familie der Shastasauridae. Dies sind oft sehr grosswüchsige Ichthyosaurier («Fischsaurier») der Trias.

Abb. 28: Kieferrest des Knochenfisches Saurichthys aus Wunderklingen. Länge ca. 13 cm. Sammlung Ortsmuseum Neunkirch.

Abb. 29: Angewitterter Trochitenkalk. Die Trochiten sind rädchenförmige Skelettelemente von Seelilien. Flüelihaalde, Schleitheim. Bildbreite ca. 10 cm.

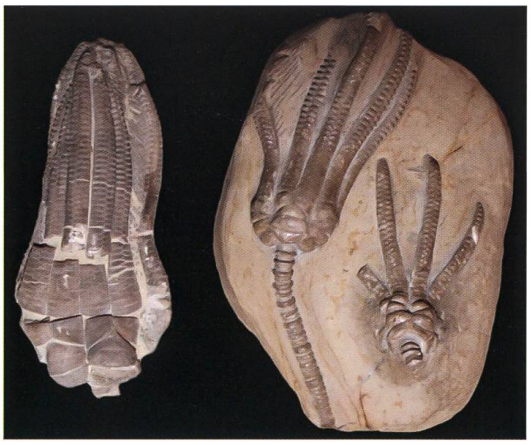


Abb. 30: Kelche der Seelilie *Encrinus liliiformis*, Sammlung Ortsmuseum Neunkirch.

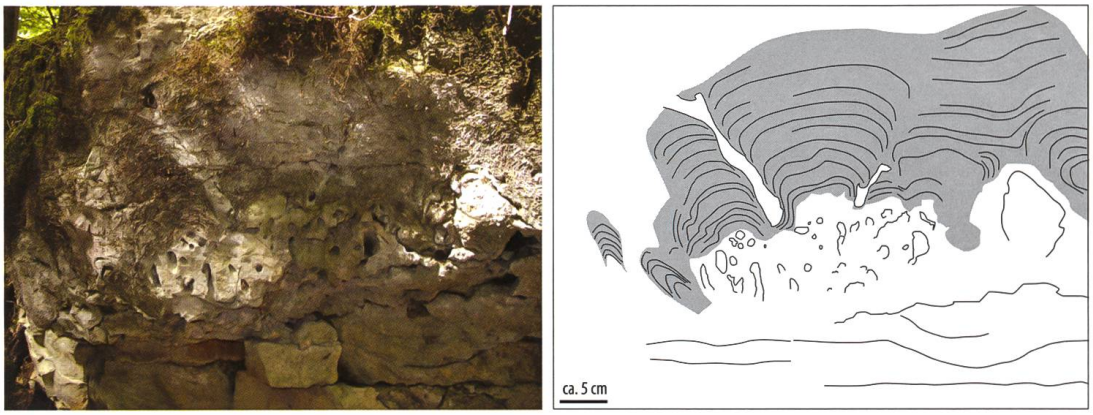


Abb. 31: Innerhalb der Schinznach-Formation gibt es lokal Bildungen von kleinen Muschelriffen (rechts Zeichnung der Situation links). Dabei wachsen unzählige Muscheln der Gattung *Placunopsis* auf einer festen Unterlage auf, umkrusten diese und bilden schliesslich einen kleinen aber vermutlich wellenresistenten Riffkörper.

blumenartigen Gestalt und ihrer fest verankerten Lebensweise nicht zu den Pflanzen, sondern zu den Tieren, genauer zu den Stachelhäutern und damit zur Verwandtschaft der Seesterne, Seeigel und Seegurken. Während zusammenhängende Kelche dieser Seelilien besonders in unserer Gegend eher selten sind, findet man die in die einzelnen Elemente zerfallenen Skelette oft gesteinsbildend. Auch hier dürften die häufigen Stürme die rasenartig am Meeresboden wachsenden Seelilien grossräumig zerstört und zusammengeschwemmt haben.

Gelegentlich findet man auch Lagen von Schalen von Muscheln oder Armfüssern. Armfüsser oder Brachiopoden sind im Erdmittelalter häufige Organismen, die ähnlich wie Muscheln aussehen und auch ähnlich leben, aber einer ganz anderen Organismengruppe angehören. Ebenfalls zu den Weichtieren gehören die Ceratiten (Abb. 28), eine Form der Vorläufer der im Jura so häufigen und weit verbreiteten Ammoniten. Sie können aufgrund ihrer raschen Entwicklung und weiten Verbreitung als Leitfossilien, also als Indikatoren für das geologische Alter dienen. Sie waren aber auch an das etwas tiefere Wasser gebunden und sind daher im Muschelkalk des Südrandes des germanischen Beckens eher selten.

Vereinzelt findet man auch Reste von Wirbeltieren. So ist im Ortsmuseum Neunkirch der Kiefer eines Fisches (Saurichthys) ausgestellt, den Emil Schutz (1916–1974) in den 1950er Jahren bei Wunderklingen/Hallau fand. Aus der Region Schleitheim/Oberwiesen kennt man zudem Rippen bzw. Wirbel von Pflasterzahn- und Nothosauriern (heute am Paläontologischen Museum der Universität Zürich). Vor kurzem wurde auch der Oberarm eines Vertreters

der riesigen Shastasauriden entdeckt, einer Gruppe von sehr grosswüchsigen Fischsauriern (Abb. 27; Museum zu Allerheiligen, Schaffhausen).
Gegen Ende der Ablagerung der Sedimente der Schinznach-Formation sank der Meeresspiegel. Es häuften sich Ablagerungen, die auf ein sehr flaches Meer hindeuten (z. B. Ablagerung von kleinen Kalkkügelchen, sogenannten Ooiden; die entsprechenden Gesteine nennt man Oolithe). Zudem wurde der oberste Teil der Schinznach-Formation während der Phase der Gesteinsbildung (Diagenese) dolomitisiert; das heisst das Mineral Calcit ($CaCO_3$), aus dem der ursprüngliche Kalk bestand, wurde in Dolomit ($CaMg[CO_3]_2$) umgewandelt. Durch zunehmende Salinität des Meerwassers entstanden magnesiumreiche Porenwässer, die diese Umwandlung auslösten. Man fasste diesen umgewandelten und durch Auslaugung und Hohlräume charakterisierten Teil des Hauptmuschelkalkes als **Stamberg-Member** (Früher: Trigonodus-Dolomit) zusammen.
Diese Abfolge fand ihren Abschluss mit dem kontinuierlichen Übergang in die ehemals als «Lettenkohle» bezeichnete Einheit (**Asp-Member**): eine Wechsellagerung von tonig-mergeligen, dolomitischen und kohleführenden Schichten mit einzelnen Evaporitlinsen. In der Region ist sie lediglich 1–2 m mächtig. Teilweise sind darin Knochenlagen («Bonebeds») mit Zähnchen und kleinen Knochenfragmenten, Lagen mit Muschelschill oder eben kohligem Pflanzenhäcksel eingelagert. In diesem Gestein zeichnet sich eine zunehmende Verlandung, also ein Absinken des relativen Meeresspiegels ab; man kann die Gesteine als Ablagerungen eines Wattenmeeres deuten. Diese an sich sehr interessanten Ablagerungen sind jedoch im Kanton Schaffhausen nur schlecht zugänglich bzw. aufgeschlossen.

4. 3 Wechselvolle Ablagerungsgeschichte: Die Späte Trias

Über der Schinznach Formation folgen die **Bänkerjoch-** (ehemals «Gipskeuper») und die **Klettgau-Formation** («Schilfsandstein», «Gansinger-Dolomit», «Stubensandstein», «Obere Bunte Mergel», «Rhät» etc.; Jordan et al., 2016).
Die **Bänkerjoch-Formation** besteht aus meist grauschwarzen, grauen, teils bunten, kalkarmen Mergeln, in die Lagen mit oft unregelmässigen, knolligen Vorkommen von Alabaster-Gips eingelagert sind (Abb. 32). Diese Schichten wurden abgelagert unter klimatisch trockenen (semiariden bis ariden) Bedingungen, nach wie vor am Südrand des germanischen Beckens. Die Gipslagerstätten bildeten sich als flachmarine und (hauptsächlich) terrestrische Evaporite in Salzsümpfen (Sabkha-Bildung). Gelegentliche Überflutungsphasen deuten auf ein flaches Relief wenig über dem Meeresspiegel und

Abb. 32: Alabaster ist eine aus mikroskopisch kleinen Kristallen bestehende Varietät des Gipses. Er ist besonders gut zur Bearbeitung geeignet. Diese Form des Gipses ist in der Bänkerjoch-Formation der Region recht häufig. Diese knollenförmige Ausbildung dürfte in einer Salzwüste («Sabkha») entstanden sein. Solche Salzwüsten finden sich heute beispielsweise im Persischen Golf.

Abb. 33: Die Gesteine der Bänkerjoch-Formation sind oft von verschiedenen Generationen (hier mit unterschiedlichen Farben) von Rissen und Klüften durchsetzt. Sulfathaltige Lösungen, die darin zirkulierten, schieden in diesen Hohlräumen Gips in unterschiedlichen Generationen aus. Ein Teil dieser Klüfte dürfte auf die Schrumpfung bzw. Ausdehnung in Zusammenhang mit der Umwandlung von Gips in Anhydrit bzw. umgekehrt zurückzuführen sein.

sind durch einzelne Einschaltungen («Quarzitische Bank» und «Pseudocorbula-Bank») dokumentiert. Die Bänkerjoch-Formation ist im Kanton Schaffhausen beispielsweise im Lachenbruch bei Schleitheim aufgeschlossen und zugänglich (Abb. 34).

Die **Klettgau-Formation** verdankt ihren Namen der Tatsache, dass einzelne Aufschlüsse diese sehr diverse Abfolge im Klettgau besonders deutlich zeigen. Allerdings zeichnet sich diese Abfolge nicht nur durch eine grosse Vielfalt, sondern auch durch rasche seitliche Übergänge und Schichtlücken aus. Die Gesteine dieser Formation sind ebenfalls weitgehend festländisch, dokumentieren aber eine markante Umgestaltung der Landschaft. Nicht mehr eine flache Küstenebene, sondern grosse Flussrinnen, die vom baltischen Schild (Skandinavien) her kommend ganz Mitteleuropa überziehen. Bemerkenswert ist insbesondere der «Schilfsandstein» (Teil des **Ergolz-Members**). Dieser feine, karbonatfreie Sandstein kann sehr variabel gefärbt sein (rot oder grün) und besteht aus Körnern von Quarz und Feldspat. Es handelt sich um die Ablagerungen der Ausläufer eines Flusssystems mit breiten

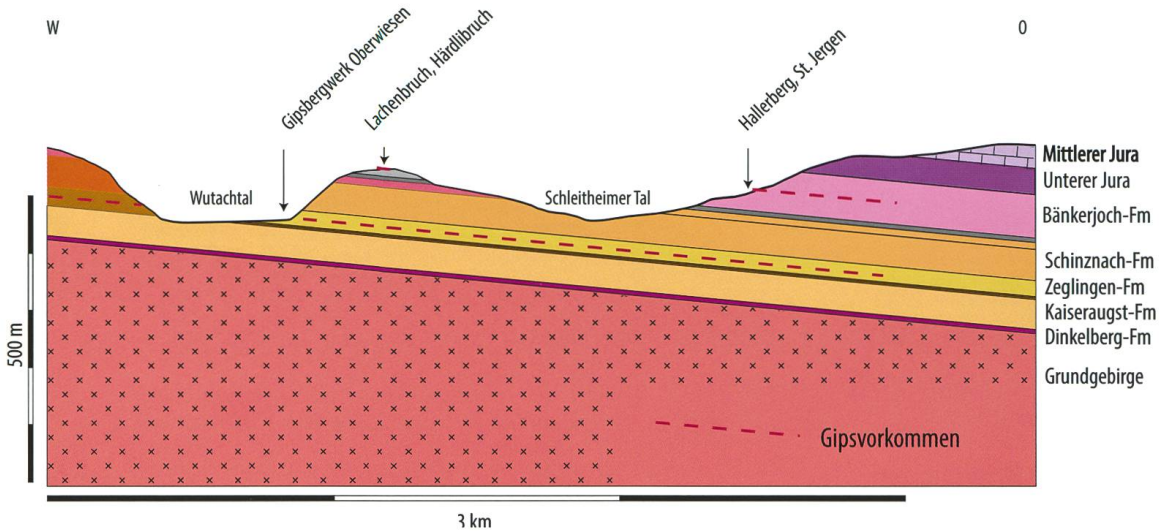


Abb. 34: In der Region Schleitheim wurde in historischer Zeit Gips aus verschiedenen stratigraphischen Niveaus abgebaut: sowohl aus der Zeglingen-Formation als auch aus der Bänkerjoch-Formation (Profil-Querschnitt überhöht).

Sandsteinsträngen und flachen Überschwemmungsebenen dazwischen. Deutlich sind oft die typischen Ablagerungsgeometrien (Kreuzschichten) erhalten. Der alte Name «Schilfsandstein» geht auf das gelegentliche Auftreten von Pflanzenfossilien zurück (Abb. 35 und 36). Allerdings handelt es sich dabei nicht um «Schilf» (also Vertreter der erst sehr viel später auftretenden Gräser), sondern meist um Vertreter von Schachtelhalmen (Equiseten; ein entsprechendes Stück aus Schleitheim ist im Museum zu Allerheiligen ausgestellt) oder der ausgestorbenen Benettitales (Gruppe der Samenpflanzen). *Cyclotosaurus* ist ein grosser Lurch, der ebenfalls im Seewi-Steinbruch in Schleitheim hat nachgewiesen werden können. Schilfsandstein war

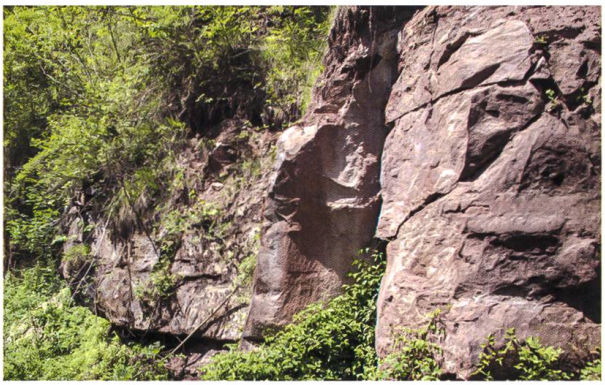


Abb. 35: Der Seewi-Steinbruch bei Schleitheim zeigt die Schichtabfolge von Schilfsandstein bis zum Stubensandstein

Abb. 36: *Pterophyllum*, ein Vertreter der ausgestorbenen Gruppe der Benettitales. Schilfsandstein aus Süddeutschland, Museum zu Allerheiligen.

in historischer Zeit ein beliebter, aber nicht sehr frostresistenter Baustein. Einzelne Säulen des Kreuzganges im Kloster Allerheiligen in Schaffhausen, aber auch die Säulen im Kreuzgang des Zürcher Fraumünsters sollen aus Klettgauer Schilfsandstein bestehen.

Nach Ablagerung des Schilfsandsteines erfolgte noch einmal ein Meeresvorstoss von Südwesten her und sorgte für eine kurzzeitige Ablagerung von Anhydrit, dem Hauptsteinmergel des Wutachgebietes und dem Durröhrlestein (Hofmann, 1981). Im nahen Aargau stammt der Gansinger-Dolomit (Gansingen-Member) aus dieser Phase.

Darüber folgen erneut feinkörnige Ablagerungen einer Überschwemmungsebene (ehemals «Obere Bunte Mergel» und «Knollenmergel»). Das Klima war nach wie vor sehr trocken, und aufsteigende Grundwässer hinterliessen markante, mit Bodenbildungen verbundene Dolomitknollen. In diese Abfolge eingelagert ist der nur sehr lückenhaft erhaltene Körper des «Stubensandsteins» (**Seebi-Member**), eines grobkörnigen, feldspatreichen Sandsteins. Im Gegensatz zum Schilfsandstein wurde der Stubensandstein nicht aus Skandinavien, sondern aus Südosten von der vindelizischen Landmasse her geschüttet.

Den Abschluss der Klettgau-Formation bildet das **Belchen-Member**, Gesteine, die man ursprünglich oft als «Rhät-Tone» bzw. als «Rhät-Bonebed» oder «Rät-Bonebed» bezeichnet hat: grünliche, kalkarme Tone mit Einlagerungen von «Kalkgrus-Schichten, die teils unverfestigt, teils kalkig zementiert sind und plattenartigen Charakter haben können» (Abb. 37; Hofmann, 1981). In diesen Schichten stiessen die beiden Schaffhauser, der Geologe Ferdinand Schalch und der Paläontologe Bernhard Peyer, in ihrer Grabung auf Braatelen bei Hallau bereits 1919 auf ein «Bonebed», also auf eine an Knochenfragmenten und Zähnen reiche Lage (Schalch und Peyer, 1919). 1942 wurde in unmittelbarer Nähe durch Bernhard Peyer eine weitere Grabung abgeteuft (Peyer, 1944). Er konnte darin winzige Zähnchen nachweisen, die weltweit zu den ältesten Nachweisen der Säugetiere zählen (Clemens, 1980; Peyer, 1956). Noch heute dienen diese Sammlungen, ergänzt durch Funde des privaten Sammlers Emil Schutz aus Neunkirch, als wichtige Referenz. So konnte vor kurzem in den alten Beständen aufgrund von Zahnfunden sogar eine für die Wissenschaft neue Echsenart beschrieben werden (Whiteside et al., 2017; siehe aber auch Kindlimann, 1984). Grössere Knochen und Knochenfragmente aus derselben Schicht wurden schon früh den Dinosauriern zugeschrieben, genauer der Art *Gresslyosaurus ingens*, eine Dinosaurierart, die man aus Niederschönthal in Baselland bereits kannte. Allerdings kamen vor wenigen Jah-

Abb. 37: Typisches Handstück des «Rhät-Bonebeds», Sammlung Hofmann, Museum zu Allerheiligen.

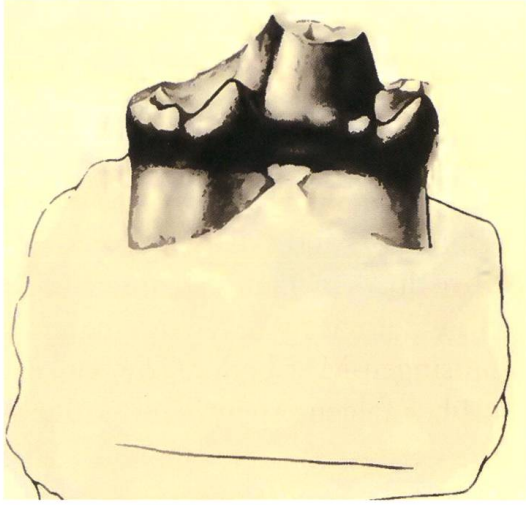


Abb. 38: Fossiler Zahn eines der ältesten Vertreter säugetierähnlicher Tiere, gefunden von B. Peyer in Hallau und später nach ihm benannt (*Morganucodon peyeri*, aus der Publikation von Clemens, 1980).

ren Zweifel an dieser Zuordnung auf. 2016 wurde in den entsprechenden Schichten auf Santierge bei Schleitheim eine neue Grabung abgeteuft; auch darin wurde u. a. eine ganze Reihe von Dinosaurierknochen gefunden (Abb. 39 und 40). Die Dinosaurierknochen aus diesen Schichten befinden sich derzeit in wissenschaftlicher Bearbeitung.

Abb 39: Rückenwirbel eines Dinosauriers, Fund aus Schleitheim, Museum zu Allerheiligen. Der vertikale Balken entspricht einem Zentimeter.

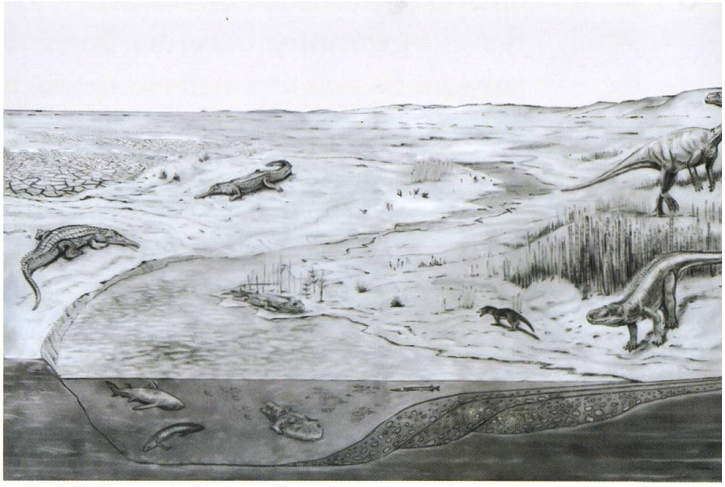


Abb. 40: Skizze einer Lebensraumrekonstruktion, gestützt auf die Funde aus Schleitheim und Hallau (Beat Scheffold).

Interessanterweise wurden gemäss Hübscher (1947–1948) die «Rätschichten» von Hallau einst von einer «Düngerfabrik aus dem Waadtland» auf den Phosphorgehalt untersucht, jedoch ohne für einen Abbau ausreichend hohe Konzentrationen nachweisen zu können.
Die ursprünglich rein auf lithologischen Kriterien abgestützte Zuordnung ins «Rhät» (oberste Stufe der Trias) konnte zunächst nicht bestätigt werden. Die genaue Datierung der entsprechenden Schichten gestaltet sich schwierig: Die palynologischen Analysen (Analyse fossiler Pollen) von Achilles and Schlatter (1986) deuten auf ein leicht höheres Alter hin, so dass das «Rhät-Bonebed» aus Hallau eben nicht ins Rhät sondern in die nächst ältere Stufe, ins Nor zu stellen wäre. In einer regionalen Übersicht über die palynologische Biostratigraphie der Nordschweiz konnte jedoch das Rhät in entsprechenden Profilen durchaus nachgewiesen werden (Schneebeli-Hermann et al., 2018). Das Rhät wurde auch in der Bohrung Benken anhand von fossilen Pollen und Sporen in dunklen Tonsteinen mit Muschelabdrücken eindeutig nachgewiesen. Es ist das erste Anzeichen des Meeresvorstosses von Norden her. Erste tektonische Bewegungen, die letztlich zur Bildung des Nordatlantiks führen sollten, läuteten eine neue Ära ein.

5. Am Rand des Ozeans: Das Jurameer

Der Übergang von der Trias in den Jura ist in unserer Gegend generell mit einer Schichtlücke dokumentiert: Zwischen dem «oberen Mittelkeuper» und der «Psilonotum-Zone» des untersten Jura (Schlatter, 1983) fehlen Ablagerungen. Es zeichnet sich ein deutlicher Wechsel ab, denn unter dem Einfluss eines steigenden Meeresspiegels etablieren sich mit dem Jurazeitalter bei uns stabil marine Bedingungen: Während der nächsten rund 50 Millionen Jahre lag die Region Schaffhausen im Meer, und zwar sowohl unter dem Einfluss des Ozeans im Süden (Tethys), als auch unter jenem des Nordmeers (Borealis) (Abb. 41).

5. 1 Der Untere Jura: Starker Einfluss des nahen Festlandes

Sandige Einlagerungen zeigen aber an, dass zunächst auf nahegelegenen Festländern (Böhmisch-Vindelizisches Festland) nach wie vor Kristallingesteine abgetragen wurden. Dadurch gelangte auch sehr viel Ton in die Meeresablagerungen, der die Sedimente dunkelgrau bis schwarz färbt. In Mitteleu-

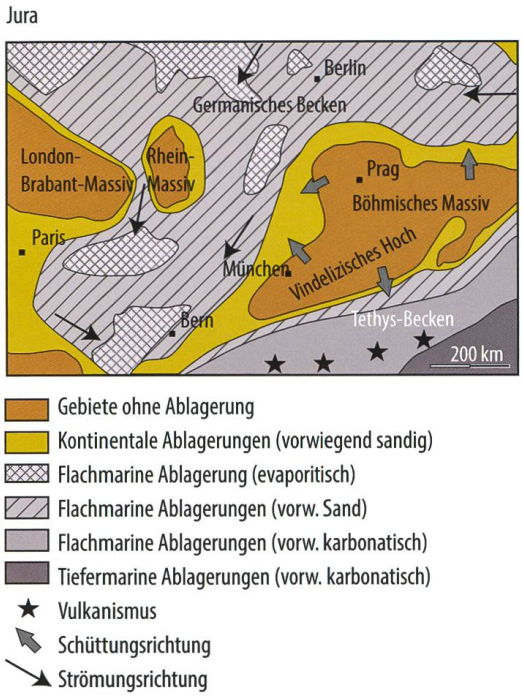


Abb. 41: Paläogeographie im Jura

ropa trägt daher der «Untere Jura» bzw. «Lias» auch die Bezeichnung «Schwarzer Jura».

Die unterste Einheit der **Staffelegg-Formation,** das **Schambelen-Member**, setzt über einer Erosionsfläche ein und ist ein dunkelgrauer bis schwarzer Tonstein («Schweichel» oder «Insektenmergel»), offensichtlich abgelagert in sehr flachem Wasser. In der erwähnten Grabung von 1942 in Hallau wurden auch diese Sedimente untersucht. Dabei wurden spektakuläre Reste von Stachelhäutern (Echinodermen) gemacht: Schlangensterne, eine Seelilie und ein Seestern, bei dem es sich um eine für die Wissenschaft neue Art handelte. Er wurde zu Ehren seines Fundortes (Hallau) als *Plesiastropecten hallovensis* beschrieben (Peyer, 1944).

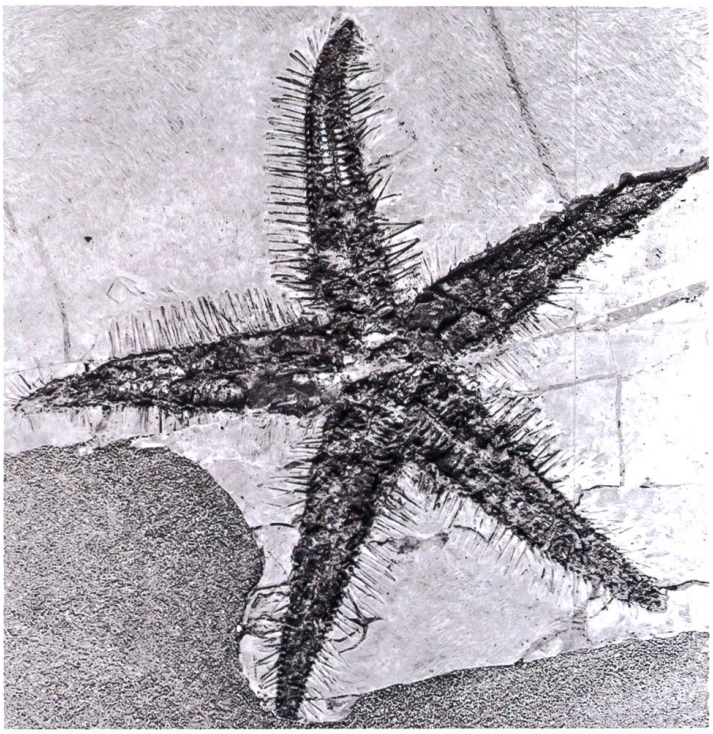


Abb. 42: Abbildung des *Plesiastropecten hallovensis* aus der Originalpublikation von Peyer (1944). Aus dem Schambelen-Member (Schwaichel) der Angulatuszone des Unteren Juras von Hallau. Durchmesser ca. 12 cm.

Trotz nach wie vor hohem Einfluss der Festländer werden aber auch Karbonate, also Kalkgesteine, zunehmend wichtiger. Die «Angulaten- und Arietenkalke» (**Beggingen-Member** der **Staffelegg-Formation**, Reisdorf et al., 2011) sind Kalksandsteine, die vor allem aus Quarzsand, Tonmineralien, Echinodermen- und Muschelfragmenten bestehen, mit geringmächtigen Zwischenlagen von Ton- und Siltsteinen (Mächtigkeit rund 3 m). Der enorme Fossilreichtum sowie die intensive Bioturbation (Durchwühlung durch Organismen) bezeugen ein von Leben erfülltes Milieu. Das Vorkommen von Phosphorit in diesen Gesteinen deutet zudem auf einen hohen Nährstoffgehalt hin. Diese Gesteine sind unter Sammlern wegen der häufigen Fossilien sehr beliebt, da sie u.a grosswüchsige Ammoniten enthalten (Abb. 43). Doch auch Muscheln (*Cardinia*, *Plagiostoma* und *Gryphaea arcuata*, s.u., Abb. 45) treten sehr häufig auf. Ein eigentlicher Aufschluss für Sammler in diesen Schichten besteht auf dem Oberhallauerberg («Rummele»).

Abb. 43: Grosswüchsige Ammoniten aus der Gruppe der Arietiten (Unterfamilie Arietitinae) mit Durchmessern bis weit über 50 cm sind charakteristisch für das Beggingen-Member und damit auch für die Region Schaffhausen. Gelegentlich findet man sie als «Wandschmuck» eingemauert bei Bauernhäusern oder wie hier in der Fassade des Museums Stemmler.

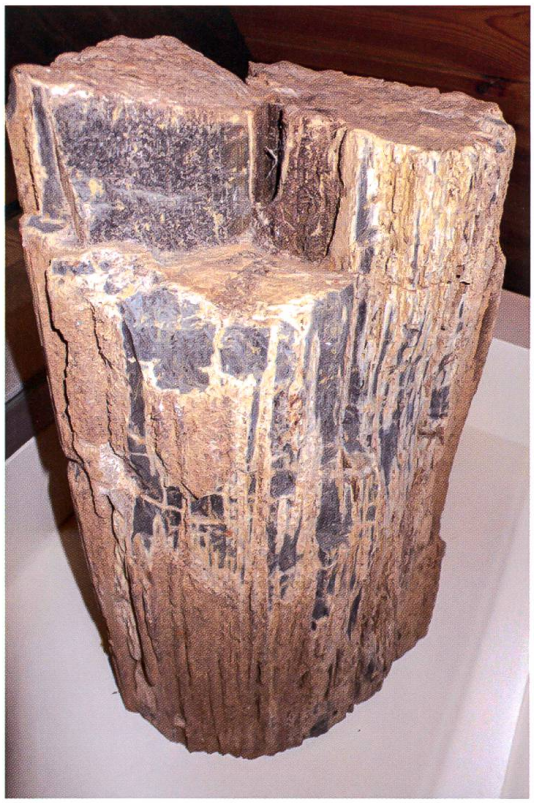


Abb. 44: Fossile bzw. verkieselte Hölzer aus dem Beggingen-Member zeugen von der Nähe der Festlandes. Es handelt sich vermutlich um den Rest des Stammes einer Araukarie. Museum zu Allerheiligen, Fundort Beggingen.

Auf manchen Feldern und Rebhängen zum Beispiel in Gächlingen, Hallau oder Oberhallau fällt das häufige Auftreten der Greifenmuschel (*Gryphaea arcuata*) auf. Diese «aberrante» Verwandte der Auster zeichnet sich durch eine besondere Entwicklung aus: während die Jungtiere auf einem harten Substrat (Stein, Muschelschale o. ä.) festgewachsen sind, leben Alttiere halb eingegraben im weichen Sediment. Ihr massenhaftes Vorkommen deutet darauf hin, dass beide Substrate im Beggingen-Member vorhanden waren. Mit einer gewissen Regelmässigkeit werden in diesen Schichten auch Reste von Wirbeltieren gefunden. Insbesondere kann dabei auf den von der Kantonsschule Schaffhausen ausgegrabenen Schwanz eines grossen Ichthyosauriers hingewiesen werden (Früh, 1959–1962). Dieser Skelettrest ist heute im Museum zu Allerheiligen ausgestellt.

Abb. 45: *Gryphaea* ist eine ausgestorbene, mit den Austern verwandte Muschelgattung. Bei uns wird sie versteinert häufig in den Schichten des Unteren Juras gefunden. Die dickwandige linke Klappe ist stark gebogen, die rechte Klappe deckelförmig. Beim adulten Tier war die gebogene linke Klappe im Substrat des Meeressediments vergraben, während die rechte Klappe sich öffnete, um Nahrung aus dem Wasser zu filtrieren. Durch die Krümmung der linken Klappe wurde verhindert, dass Substrat angesaugt wurde. Exemplar aus Gächlingen, Länge 7 cm.

Das Meer wurde im Verlauf des Unteren Jura zunehmend tiefer. Der «Obtusus-Ton» (**Frick-Member**, ca. 10 m mächtig) stellt eine monotone Abfolge siltiger Tonsteine dar. Makroskopisch erkennbare Fossilien sind selten, aber gelegentlich pyritisiert erhalten. Dünne Lagen von feinkörnigem Sandstein und Lagen von Pyrit/Markasit sowie tonige, eisenhaltige Konkretionen können auftreten. Am Raa in Beggingen war diese Abfolge vor einigen Jahren noch zugänglich; heute sind nur noch die überlagernden «Obliqua-Schichten» (Grünschholz-Member) aufgeschlossen; knollige, phosphoritreiche Kalksandsteine. Es folgt eine Zeit der Mangelsedimentation («Numismalis-» und «Amaltheenschichten»; **Breitenmatt-Member** und **Rickenbach-Member**), vermutlich unter der Wellenbasis. Mangelsedimentation heisst, dass über vergleichsweise lange Zeiträume nur wenig abgelagert wurde. Sofern gar keine Sedimentation statt fand, konnten sich sogenannte Hartgründe («Hardgrounds») bilden, also krustige Lagen mit einer starken Verfestigung durch

Kalkzemente. Typisch in dieser Phase sind einzelne «Belemnitenschlachtfelder», also Massenauftreten von zusammengeschwemmten Belemnitenrostren (Abb. 46). Diese Einheiten sind generell schlecht aufgeschlossen.

Der darüberliegende «Posidonienschiefer» (**Rietheim-Member**, ca. 7 m mächtig, jedoch stark schwankend) ist ein bituminöser, feingeschichteter Tonmergel. Da dieser Tonmergel in verwittertem Zustand in dünne, kartonartige Blätter zerfällt, gab man ihm den Namen «schistes-carton», also «Kartonschiefer». Eingeschaltete laminierte Kalkbänke stinken beim Anschlagen mit dem Hammer auffallend nach Bitumen; daher der landläufige Name «Stinkkalk». Das Rietheim-Member wurde in einem Meeresbecken abgelagert, dessen Tiefenwasser aufgrund von submarinen Schwellen nicht wie das Oberflächenwasser mit dem offenen Ozean in Verbindung stand. In diesem tieferen Wasser entwickelte sich unter dem Einfluss des warmen Klimas (26° mittlere Wassertemperatur) und der reichen biologischen Aktivität (Plankton) möglicherweise saisonal eine Sauerstoffuntersättigung. Organisches Material wurde nicht vollständig abgebaut, sondern in Form von Faulschlamm sedimentiert. Die Erhaltung der feinen Schichtung zeigt, dass grabende oder wühlende Bodenlebewesen, die die Schichtung durchmischt hätten, über lange Zeiträume kaum vorhanden waren. Tierleichen blieben unbehelligt am Boden liegen und wurden im Sediment eingebettet. In Süddeutschland sind diese Schichten viel mächtiger als in der Region Schaffhausen und dank unzähliger spektakulärer Fossilien beispielsweise von Fischsauriern weltberühmt (Holzmaden, Doggernhausen). Die «Poidonienschiefer» gehen in knollige Kalkbänke der «Jurensis-Schichten» mit ihren zahlreichen Ammoniten und Belemniten über. Die unregelmässigen harten Knollen («Knauer») bilden sich oft um organisches Material, bei dessen Abbau durch chemische Prozesse Karbonate verstärkt auskristallisieren konnten.

Abb. 46: Belemniten sind ähnlich wie Ammoniten Reste von Kopffüssern, also ausgestorbene Verwandte der heutigen Tintenfische. Sie treten in gewissen Schichten in riesiger Zahl auf, da sie durch Strömung zusammengeschwemmt wurden.

5. 2 Der Mittlere Jura: Von Tonstein, Kalk und Eisenerz

In der folgenden Zeit bildete sich in der Region des Pariser Beckens eine Karbonatplattform. Diese drang zwar bis in die Schweiz vor, jedoch nur bis maximal in das Gebiet westlich der Aare. Östlich davon war das Wasser stets tiefer, die Sedimente blieben mergeliger und toniger. Man spricht von der keltischen (Westen) und der schwäbischen (Osten) Fazies; die Sedimente in der Region Schaffhausen werden also der schwäbischen Fazies zugerechnet.

Die älteste Einheit des Mittleren Juras («Brauner Jura») ist der rund 100 m mächtige Opalinuston (**Opalinuston-Formation**), eigentlich sedimentologisch die Fortsetzung des Unteren Jura: eine recht monotone Abfolge von dunkelgrau-schwarzen Tonsteinen mit wenigen dünnen sandigen Sturmablagerungen (Wetzel und Allia, 2003). Er verdankt seinen Namen dem darin auftretenden Leitfossil *Leioceras opalinum* (Abb. 47). Die Sedimentation scheint

Karbonatfabriken der Meere

Kalksteine sind nicht nur bei uns enorm häufig. Erstaunlicherweise sind sie in der Regel nicht rein chemisch gebildet worden, sondern in den allermeisten Fällen auf die Tätigkeit von Organismen zurückzuführen. Kalksteine bestehen also in der Regel aus zerriebenen Skeletten von beispielsweise Kalkalgen, Muscheln, Schnecken, Korallen oder Stachelhäutern. Karbonat (in diesem Fall Calciumkarbonat oder Kalk) produzierende Organismen sind meist an flaches Wasser gebunden, so dass die Produktionsrate von Kalk im flachsten Wasser am höchsten ist. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sie wie die Korallen in Symbiose mit Algen leben, die Licht benötigen. So können sich unter dem Einfluss von steigendem Meeresspiegel bzw. absinkendem Meeresboden und bei (sub-) tropischem Klima Flachwasserbereiche bilden, die mit dem Meeresspiegel mithalten können, während der Meeresboden ringsherum in grössere Tiefen versinkt. Es bildet sich eine Karbonatplattform. Heute kann man diesen Prozess beispielsweise auf den Bahamas beobachten. Es werden in diesen Gebieten enorme Mächtigkeiten von biologisch gebildetem («biogenem») Kalk abgelagert. Wenn die Produktion von Kalk den Anstieg des Meeresspiegels übersteigt, kann die Karbonatplattform sich auch in die umliegenden Tiefwasserbereiche ausbreiten und dadurch auch flächenmässig wachsen.

Abb. 47: *Leioceras opalinum*, der für den «Opalinuston» namengebende Ammonit. Sammlung Schalch, Museum zu Allerheiligen.

Abb. 48: Tongrube Birchbühl; Abbaustelle im Opalinuston, ein Rohstoff für die Ziegeleiindustrie. Die Grube wird wieder aufgefüllt mit sogenanntem «Inertstoff», also mehrheitlich Bauschutt, der nicht anders verwertet werden kann.

stark durch tektonische Aktivität an Störungsflächen kontrolliert worden zu sein, die die Nordschweiz in unterschiedlich tiefe Becken gliederte. Die Absenkung war vermutlich recht hoch, wogegen die Arbeiten von Allia (1996) auf eine Ablagerungstiefe von lediglich 30–50 m hindeuten.

Der Opalinuston spielt aufgrund seiner mineralogischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften bei der Schweizer Suche nach einem Tiefenlager für radioaktive Abfälle eine prominente Rolle. Seine Fähigkeit, gewisse Isotope zurückzuhalten, seine geringe Wasserdurchlässigkeit und seine Eigenschaft, wassergängige Risse aufgrund von Quellprozessen schnell wieder dicht zu verschliessen, zeichnen ihn als mögliches Wirtgestein für diese Abfälle besonders aus. Natürlich ist er auch ein willkommenes Gestein für die Einlagerung «konventioneller» Abfälle (Abb. 48). So wurde beispielsweise die Deponie Pflumm in Gächlingen aus genau diesem Grund ebenfalls im Opalinuston angelegt.

Über dem Opalinuston folgen die in der Region Schaffhausen aber vom Opalinuston nicht unterscheidbaren «Murchisonaeschichten» (17 m mächtig, Abb. 49). Darüber folgt eine rund 30 m mächtige Abfolge von sandigen Mergeln und Kalksandsteinen. Schöne, wedelförmige Grabspuren von Würmern (Zoophycos) verhalfen dem «Wedelsandstein»

(**Wedelsandstein-Formation**) zu seinem Namen. Es folgt eine Serie von abwechslungs- und fossilreichen tonig-sandigen Schichten (Humphriesi-, Blagdeni-, Subfurcaten-, Parkinsonia-Württembergica-, Varians-, Macrocephalus- und Anceps-Athleta-Schichten). Diese ganze Serie ist einerseits durchsetzt von Hartgründen, also Zeiten mit sehr reduzierter Sedimentation, und andererseits charakterisiert durch eine starke Anreicherung von Eisen.
Eisenooide, kleine Kügelchen aus Tonmineralien und Eisenhydroxiden, treten teilweise gesteinsbildend auf. Das Eisen verleiht dem Gestein

Abb. 50: Gestein mit Eisenooiden, sogenannter Eisenoolith, war andernorts ein wichtiges Eisenerz. Er wird immer wieder verwechselt mit dem Bohnerz. Es handelt sich aber um eine ganz andere Bildung, die Eisenooide (kleine Kügelchen) sind viel kleiner als die Erzbohnen des Bohnerzes. Sammlung Franz Hofmann, Fundort Osterfingen, Museum zu Allerheiligen.

Abb. 49: *Ludwigia* - ein charakteristischer Ammonit der «Murchisonae-Schichten» des Wutach-Gebietes. Sammlung Schalch, Museum zu Allerheiligen.

die typisch rot-braune Färbung, die dem Mittleren Jura auch zur Bezeichnung «Brauner Jura» verholfen hat. Im Gegensatz zu zeitäquivalenten Schichten im Kanton Aargau ist die ganze Serie in der Region Schaffhausen sehr reich an Ton (siehe Seite 41). Diese Schichten sind sehr verwitterungsanfällig und daher bei uns generell schlecht aufgeschlossen. Ein klassisches Profil befindet sich jedoch am Westabhang des Eichberges

bei Blumberg, wo 1966 ein Bergsturz die entsprechenden Schichten freigelegt hat (Hahn, 1971). Manchmal werden zum Beispiel beim Bau von Waldstrassen diese aufgrund ihres Fossilreichtums bei Sammlern sehr beliebten Schichten angeschnitten: Ammoniten, Belemniten, Seeigel und Seelilienstielglieder sind in einzelnen Lagen häufig zu finden.

Die jüngsten Schichten des Mittleren Juras hatten jedoch auch wirtschaftliche Bedeutung: In Blumberg wurden eisenreiche Schichten (Macrocephalus-Schichten; in der Schweiz: **Bözen-Member**) während des Zweiten Weltkrieges als Eisenerz ausgebeutet. Im Fricktal (Herznach-Wölflinswil) wurde entsprechendes Material bis in die 1960er Jahre in einem Bergwerk abgebaut (Jeannet, 1951). Auch in Schaffhausen gab es Untersuchungen, die jedoch zeigten, dass die ergiebigen Schichten rasch nach Süden auskeilen und daher auf dem Gebiet des Kantons Schaffhausen zu wenig mächtig sind (Hübscher, 1947–1948). Im Mittelalter wurden diese Eisenerze insbesondere im Durachtal ausgebeutet und in lokalen Rennöfen verhüttet (Bänteli et al., 2000).

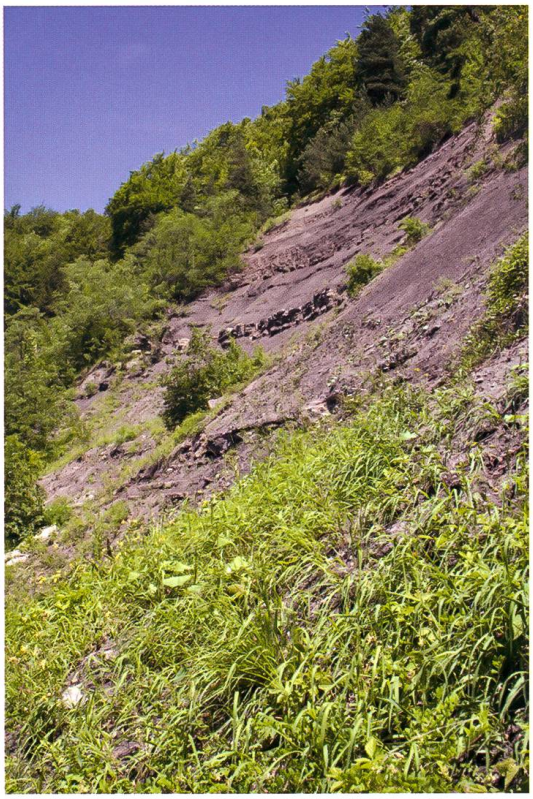


Abb. 51: Durch den hohen Tongehalt sind die Gesteine des Mittleren Juras bei uns sehr weich und verwitterungsanfällig. Es gibt daher nur wenige Stellen, an denen sie im Detail untersucht werden können. Eine dieser Stellen ist der Eichberg bei Blumberg, wo ein Bergssturz vor Jahrzehnten die entsprechenden Schichten freilegte.

Die Frage, warum es in diesen Schichten zu einer derart beachtlichen Häufung von eisenreichen Sedimenten kam, ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (z. B. Gehring, 1986). Dies hängt einerseits mit der tropischen (lateritischen) Verwitterung auf den umliegenden Festländern zusammen. Das Eisen wurde an Tonmineralien gebunden (adsorbiert) in das offene Meer transportiert und schliesslich abgelagert. Andererseits wurde das Eisen in einem Milieu mit geringen Sedimentationsraten (zum Beispiel auf lokalen Hochzonen) durch Auflösungs- und Fällungsprozesse im Sediment und unter Sauerstoffmangel, sowie durch wiederholte Erosion und Sedimentation aufkonzentriert. Es lassen sich

eigentliche, durch Schwankungen des Meeresspiegels angetriebene Zyklen erkennen, wobei vor allem bei tiefem Meeresspiegel die höchste Konzentration von Eisen zu beobachten ist.

5. 3 Reine Kalke und Schwammriffe

Am Übergang zum Späten Jura veränderte sich die paläogeographische Situation in Mitteleuropa. Im Norden bildete sich eine Schwelle (Brabanter und Rheinisches Massiv), im Süden öffnete sich der Zugang zum offenen, warmen Ozean der Tethys. Der Einfluss des vom Festland eingeschwemmten Materials wie Sand und Ton («terrigenes Material») geht zurück, die Produktion von Kalk nimmt zu. Insgesamt findet daher ein Farbumschwung der Gesteine vom «Braun» des Mittleren Juras zum «Weiss» des Späten Juras statt. Am Anfang dieser Entwicklung stehen die «Glaukonitsandmergel» (10–15 m mächtig). Glaukonit ist ein häufiges, grünliches Mineral, das sich am Meeresboden bildet, oft bei steigendem Meeresspiegel. Es folgen zunächst Tonmergel-Gesteine mit kalkigen Einlagerungen («Impressa-Mergel» bzw. **Effingen-Member** [43–49 m], **Hornbuck-Member** [10 m]), in denen fossile Schwämme, die für den Späten Jura in unserer Gegend so typisch sind, zunehmend häufiger werden. Die Schichten des Hornbuck-Members gehen in die «Wohlgeschichteten Kalke» (**Villigen-Formation**, 90 m) über. Dies sind sehr feinkörnige (mikritische), regelmässig geschichtete und häufig fossilarme Kalkbänke mit feinen mergeligen Zwischenlagen. Die Wassertiefe wird auf wenige Dutzend Meter geschätzt. Sie sind für einen Grossteil der auf dem Randen zu beobachtenden Steilstufen verantwortlich. Darüber folgen mit den «Mittleren Malmmergeln» (**Schwarzbach-Formation**, 14–30 m) noch einmal etwas tonigere Schichten bzw. eine Wechsellagerung von Kalkmergel und tonigen Kalken. Diese grauen Schichten sind ausgesprochen reich an fossilen Schwämmen, Ammoniten,

Abb. 52: Die Grenze zwischen Mittlerem und Oberem Jura ist im Feld sehr unscheinbar und, da meist stark verwittert, selten gut zu beobachten.

Belemniten, Seeigeln, Seelilienresten, Brachiopoden und Muscheln (Abb. 53, 54, 55 und 57). Dank des Tongehaltes der Schichten lassen sich die Fossilien einfach aus dem Gestein isolieren. Diese Mergel stellen einen Grossteil der berühmten Fossilfundstellen der Region Schaffhausen (z. B. Hemmental, Orserental). In der Region Thayngen wurden aus diesen Schichten Reste eines Meereskrokodils geborgen. Sorgfältige Aufsammlungen von Ammoniten erlauben durchaus feinstratigraphische Analysen (Moor, 2009). Gygi (1986) schätzt die Wassertiefe aufgrund der Fossilien auf rund 120 m.
Wegen des hohen Tongehaltes ist die Schwarzbach-Formation ein Stauhorizont, der die Karstwässer des Oberen Juras in ein unteres und ein oberes Stockwerk unterteilt. In der Formation und an ihrer Obergrenze treten zahlreiche Quellen aus.
Über der Schwarzbach-Formation folgen einerseits die «Quaderkalke» (35–40 m) mit überliegenden Setatus-Subeumela-Schichten (30 m), andererseits die «Massenkalke» (Teil der **Oberen Felsenkalke-Formation**; Abb. 56 und 59). Diese unterschieden sich weniger durch ihre stratigraphische Stellung, als durch ihren inneren Aufbau und gehen teilweise auch seitlich ineinander über. Die Wassertiefe dürfte erneut abgenommen haben. Grosse Schwamm-Mikroben-Riffe bildeten sich in grosser Zahl am Meeresgrund, und zwar in einer Meerestiefe, die sicherlich grösser war als bei heutigen Korallenriffen

Abb. 53: Fossiler Schwamm (Cnemidiastrum) aus den Schwarzbach-Schichten des Orserentales

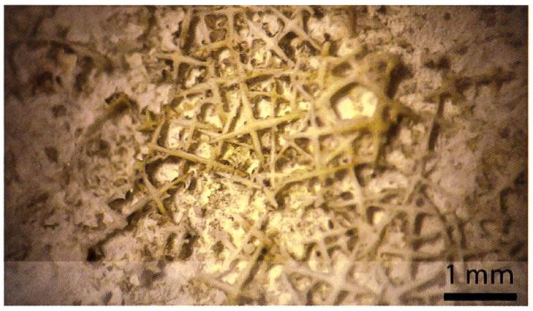


Abb. 54: Das kieselige, also aus SiO_2 bestehende Skelett der Kieselschwämme ist in der Regel nicht erhalten. Die Kieselsäure wurde normalerweise im Prozess der Diagenese gelöst und abtransportiert (siehe Abb. 3). Wenn das kieselige Skelett aber erhalten blieb, kann es mit Säure freipräpariert werden. Das abgebildete Beispiel stammt aus entsprechenden Schichten aus dem Kanton Aargau (Villiger Geissberg).

Abb. 55: Manchmal erlauben einzelne Schwämme Einblicke in die Vielfalt des damaligen Ökosystems. Hier (in der Mitte) ein Kalkröhrenwurm, der neben Bryozoen und anderen Organismen auf der Unterseite eines Schwammes aufgewachsen ist (Durchmesser der Spirale des Röhrenwurmes: ca. 2.5 mm, Fundort Orserental)

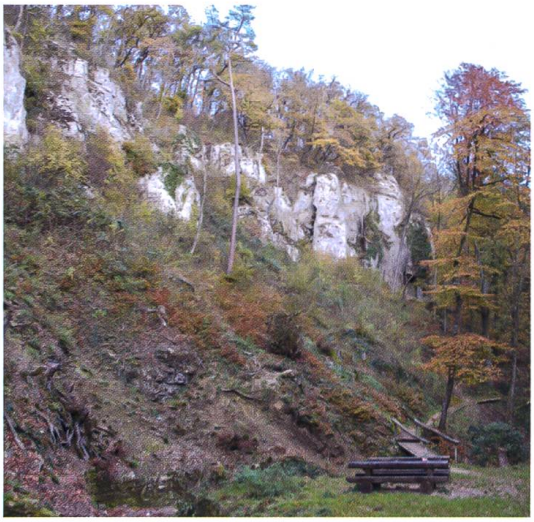


Abb. 56: Massenkalkfazies im Felsetääli in Schaffhausen. Im obersten Teil der Felsen ist der Übergang in die geschichteten Plattenkalke zu beobachten.

Abb. 57: Fossilien aus der Schwarzbach-Formation sind sehr häufig und innert kürzester Zeit findet man Ammoniten, Brachiopoden und Schwämme, sowie (hier nicht sichtbar) Belemniten, Seeigelstacheln und Seelilienstielglieder.

(Leinfelder, 2001; Leinfelder et al., 2002). Sie sind der Ursprung der ungeschichteten Massenkalkvorkommen, die das Bild der Landschaft heute stark prägen (zum Beispiel Rheinfallfelsen, Felsetääli, Kurz- und Langloch, Steinbruch Wippel bei Thayngen). In diesen Körpern sind die Schwämme heute oft kaum noch zu erkennen; diagenetische Prozesse während der Gesteinsbildung zerstörten die inneren Strukturen fast vollständig. Der Massenkalk verwittert löchrig, und er tendiert zur Höhlenbildung. Die archäologisch be-

deutsamen Höhlen vom Chesslerloch und vom Cherzenstübli sind Beispiele dafür.

Zwischen den Schwammriffen bildete feiner Kalkschlamm den regelmässigen, dickbankigen und in der Regel fossilarmen Quaderkalk. Nicht selten sind in ihm Lagen mit Feuersteinknollen zu erkennen (z. B. zwischen Lohn und Opfertshofen oder die jungsteinzeitlich ausgebeuteten Feuersteinvorkommen von Büttenhardt). Das Siliziumoxid, das die Feuersteinknollen aufbaut, dürfte nicht primär abgelagert worden sein, sondern aus den andernorts gelösten Nadeln und Skelettelementen der Kieselschwämme stammen. Massenkalk und Quaderkalk bilden über den tieferliegenden Kalken der Villigen-Formation die zweite Serie von prominenten Felsstufen in der Landschaft des Randens und des Südrandens.

Schwammriffe waren im Späten Jura ausserordentlich weit verbreitet (Abb. 58). Die Schwämme, vorwiegend die durch ein Kieselsäureskelett charakterisierten Kieselschwämme, erlebten eine enorme Blütezeit; ihre Riffkörper breiteten sich entlang der gesamten nördlichen Tethys aus, so dass wir ähnliche Riffbildungen heute von Nordamerika über Portugal, Spanien und Deutschland bis nach Rumänien beobachten können. Kieselschwämme spielen demgegenüber in den heutigen Meeren nur noch eine sehr untergeordnete Rolle. Man hat jedoch vor einigen Jahren durch Kieselschwämme aufgebaute Tiefwasserriffe vor der Küste Kanadas nachgewiesen; deren Lebensraum dürfte jedoch nicht mit jenem des Späten Juras vergleichbar sein (Conway et al., 2001). Dennoch ist die genaue Rekonstruktion der Lebensräume der jurassischen Kieselschwämme schwierig und im Detail auch heute noch umstritten (Leinfelder, 2001; Leinfelder et al., 2002).

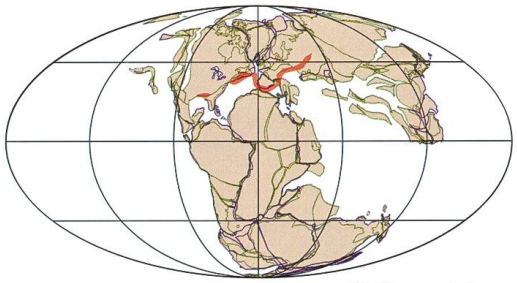


Abb. 58: Ausdehnung der jurassischen Schwammriffe am Nordrand der Tethys während der Späten Jurazeit. Es handelte sich bei dem Band jedoch nicht um ein zusammenhängendes Barriereriff, sondern um zahlreiche kleinere und grössere Riffkörper.

«Setatus-Subeumela-Schichten» und «Massenkalk» gehen nach oben in die «Plattenkalke» (ca. 30 m, im Südosten bis 60 m) über: dünngebankte, plattige Kalke mit mergeligen Zwischenlagen (Abb. 59). Dieser Wechsel erfolgte nicht überall gleichzeitig, denn an einzelnen Stellen kann man beobachten, wie auch der Plattenkalk seitlich noch in die Massenkalkfazies übergeht. Weiter im Norden wurde

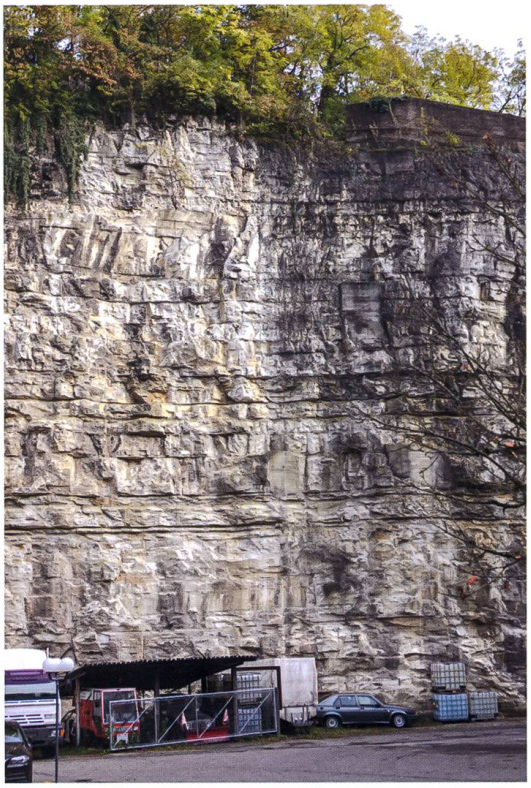


Abb. 59: Die «Plattenkalke» sind im Mühlental der Stadt Schaffhausen in Form von hohen Felswänden eindrücklich aufgeschlossen.

gleichzeitig in beinahe vollständig abgeschlossenen Lagunen der für seine Fossilien und den ikonischen *Archaeopteryx* berühmte Solnhofer Plattenkalk abgelagert. Der hiesige Plattenkalk ist deutlich gröber, weniger regelmässig und damit offenmariner geprägt. Fossilien sind in dieser Schicht selten.

Die jüngste erhaltene Einheit des Oberen Juras ist der «Zementmergel» (**Zementmergel-Formation**, bis 20 m): hellgelbe bis grauweisse, homogene Kalkmergel mit dazwischen geschalteten Mergellagen. Die Mergel verwittern plattig, scherbig und zeigen eine meist gelblich-weisse Verwitterungsfarbe.

«Plattenkalk» (und entsprechend Zementmergel-Formation) sind nur im Süden bzw. Südosten erhalten. Weiter nördlich wurden diese schon vor der Zeit der Bildung des Bohnerzes abgetragen (siehe nächstes Kapitel).

6. Die grosse Lücke im Archiv: Fehlende Ablagerungen aus Kreide und Paläozän

Ablagerungen der Kreidezeit fehlen in unserer Gegend vollständig. In den Alpen (z. B. in den Helvetischen Decken) sowie im südwestlichen Jura (südlich von Biel) sind auch kreidezeitliche Ablagerungen prominent vertreten. In unserer Gegend aber wurden Ablagerungen der Kreide und Ablagerungen des Paläozäns entweder gar nie gebildet oder aber vor der Sedimentation der noch jüngeren Gesteine («tertiäre» Molasse) bereits wieder erodiert. Es fehlen damit die Ablagerungen einer Zeitspanne von rund 100 Millionen Jahren. Modellierungen anhand mineralogischer Daten deuten darauf hin, dass in der Nordschweiz insgesamt 600–700 m Sediment erodiert wurden (Mazurek

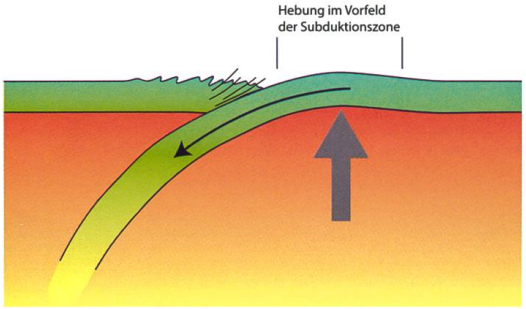


Abb. 60: Die Subduktion der ozeanischen Lithosphärenplatte der Tethys verursachte eine Aufwölbung («Forebulge») der europäischen Platte. Dies war möglicherweise einer der Gründe für die grossräumige Hebung Mitteleuropas über den Meeresspiegel während Kreide und frühem Paläogen, eine Voraussetzung für die Erosion und die Entstehung des Bohnerzes.

et al., 2006). Man erklärt sich diese Erosion während der Späten Kreide und des Paläogens durch Hebung der Kruste aufgrund des Einsetzens der alpinen Kollision weiter im Süden (dieses Phänomen heisst in der Fachliteratur «Forebulge»; Abb. 60, 61). Diese Hebung verstärkte die Erosion und verhinderte in dieser Phase die langfristige Erhaltung von Sedimenten .

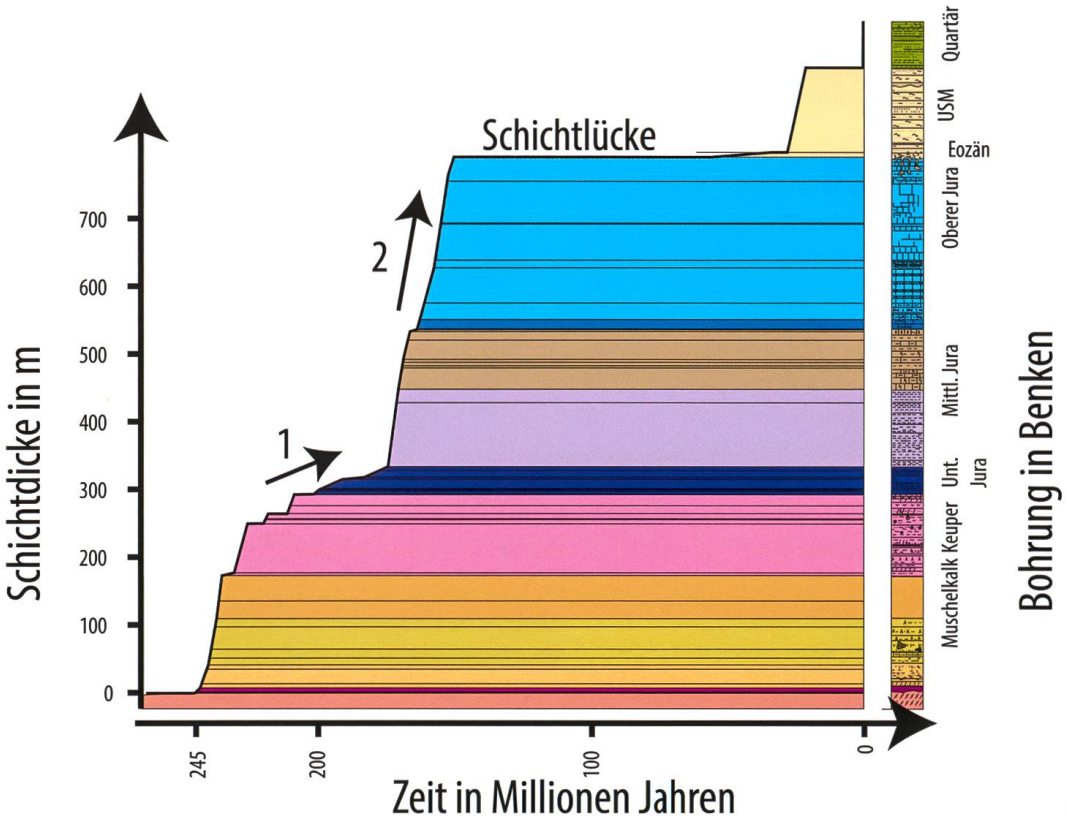


Abb. 61: Die Ablagerungsgeschwindigkeit variierte über die Zeit sehr stark. Wenn die Kurve flach verläuft (Pfeil 1), dann wird pro Zeiteinheit nur wenig Sediment abgelagert, wenn die Kurve steil verläuft (Pfeil 2), dagegen viel. In der Tiefsee ist die Ablagerungsgeschwindgkeit sehr tief: rund 1 mm pro tausend Jahre.

7. Unter dem Einfluss der wachsenden Alpen: Paläogen und Neogen

Statt kreidezeitlicher und paläozäner Ablagerungen finden wir Zeugen einer tiefgreifenden Abtragung und Verwitterung in den Gesteinen des Oberen Juras: Verkarstung sowie Verfüllung der Karsthohlräume mit eozänen oder älteren sogenannten «Residualsedimenten», also dem Rückstand, der nach intensiver Lösung und Auswaschung von Kalksteinen, Tonsteinen etc. zurückblieb: Bohnerz und Boluston. Verwitterungsrückstände aus dem Jura (und allfälligen Kreideschichten) sowie von zugeschwemmtem Material (belegt durch geringe Mengen von eingelagertem Quarzsand) waren lange der Einwirkung langanhaltender warmer und saurer Niederschläge ausgesetzt. Mineralien wurden gelöst und «leichtlösliche» Elemente wie Kalium, Calcium, Magnesium oder Silizium wurden ausgewaschen und wegtransportiert. Zurück bleiben «schwerer lösliche» Elemente wie Eisen oder Aluminium. Je nach Ausgangsmaterial und klimatischen Bedingungen kann das eine oder andere stärker angereichert werden. Das ursprünglich an Kieselsäure reiche Tonmineral (Illit) wurde in das SiO_2-arme Tonmineral Kaolinit umgewandelt. Kaolinit ist der Hauptbestandteil des Bolustons (Abb. 62). Das durch die Minerallösung freigesetzte Eisen wurde wieder ausgeschieden und sedimentierte in Form von lateritischen Krusten und Bohnerzkügelchen (Abb. 63; Berger et al., 2009). Typisch ist die stark rote, dem Eisen geschuldete Farbe solcher Böden. Vermutlich bildeten sich bereits während Kreide und Eozän auf den tiefverwitterten Kalkfelsen des Juras entsprechende Böden mit Eisenkrusten und erbsenförmigen Konkretionen. Dort, wo diese Produkte in Karsthohlräume eingeschwemmt werden konnten, blieben sie unter Umständen bis heute erhalten. Da heutige Analoga weitgehend fehlen, sind die Details der Entstehung noch nicht restlos geklärt.

Eine Karte der Ebene der Verkarstung (Abb. 65 und 66) zeigt, dass die siderolithischen Rückstandssedimente von S nach N immer tieferen jurassischen Schichten aufliegen. Das deutet darauf hin, dass die Schichten vermutlich bereits in der Kreidezeit leicht schräg gestellt wurden (Hofmann, 1981). Aus der Gegend sind aus diesen Schichten keine Fossilien bekannt; in Spaltenfüllungen der Lägern aber konnten kleine Landwirbeltiere (Säuger) aus dem Eozän anhand ihrer Zähne nachgewiesen werden.

Über dem Boluston mit den Bohnerzeinlagerungen folgt eine bis 4 m mächtige Formation von kalkigen Kaolinitmergeln (Hofmann und Peters, 1962), Quarzsanden und Krustenkalken (Hofmann, 1981). Sie werden als festländi-

Abb. 62: Bohnerz, eingebettet in Boluston, Sammlung Hofmann, Museum zu Allerheiligen.

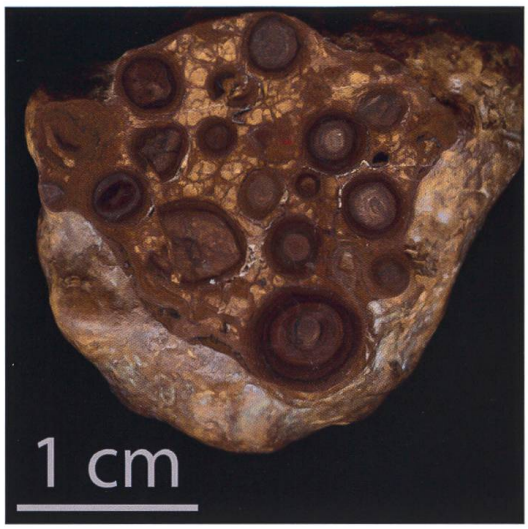


Abb. 63: Gewisse Bohnerzvorkommen zeichnen sich durch komplex zusammengesetzte Aggregate aus. Man nimmt an, dass das mit einer mehrphasigen Vererzung zu erklären ist: In einer ersten Phase bildeten sich die einzelnen «Bohnen», die in einer zweiten Phase zu den Aggregaten zusammengefügt wurden.

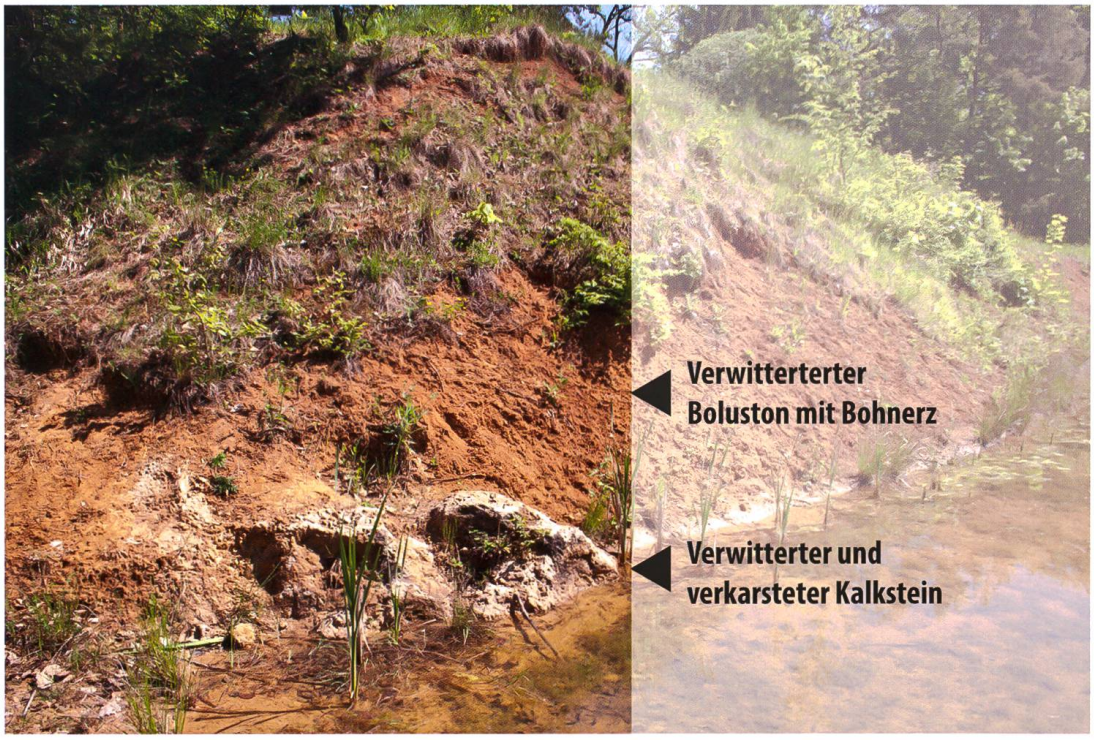


Abb. 64: Verwitterter Boluston mit Bohnerz auf verkarsteten Kalkfelsen, Färberwisli bei Beringen.

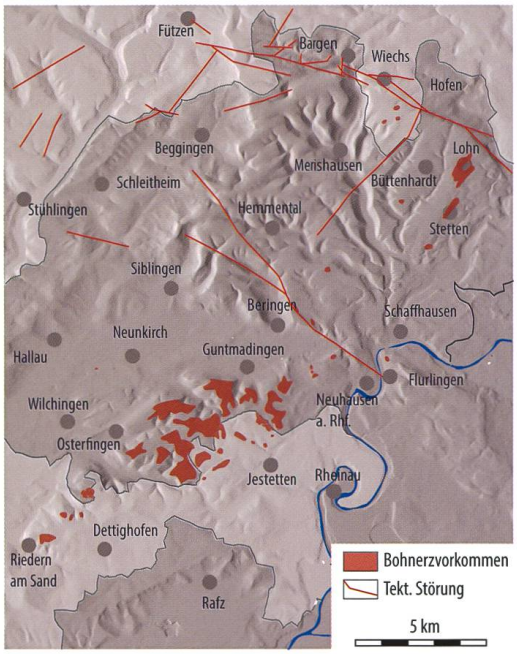


Abb. 65: Verteilung der Vorkommen von Bohnerz auf dem Randen (nach Hofmann, 1991).

sche Ablagerungen gedeutet. Dabei müssen viel trockenere Bedingungen (semiarid) angenommen werden als zur Zeit der Ablagerung der Bohnerze und Bolustone.

7. 1 Molasse: Zwischen Land und Meer

Mit der weiter gehenden Bildung der Alpen und deren Fortschreiten gegen Norden wird auch der Einfluss auf die Region Schaffhausen deutlicher. Beispielsweise an der Buechhaalde auf der linken Seite des Rheins zwischen Flurlingen und Rheinfall, aber auch in der Deponie Schwanental in Eglisau-Buchberg sind die Ablagerungen der Unteren Süsswassermolasse aufgeschlossen. Es handelt sich um schlecht verkittete Sande und Sandsteine sowie grünliche und rötliche Mergel, letztlich einer der Gründe für die zahlreichen Hangrutschungen an der Buechhaalde. Es sind dies die ersten Zeugen der **Molasse**, also der Sedimente und Sedimentgesteine, die sich im Vorfeld eines aufsteigenden Gebirgsgürtels aufgrund der gleichzeitig erfolgenden Abtragung anhäufen. Diese Gesteine bilden heute die geologische Grundlage des Mittellandes und formen parallel zum Alpenrand, da später selber noch in die Gebirgsbildung einbezogen, einige markante Gebirgs- und Hügelzüge wie Rigi, Speer oder Hörnli. Nahe der Alpenfront wurden grobkörnige und mächtige Serien von Sedimenten abgelagert, gegen Norden hin und damit in der Region Schaffhausen werden die Ablagerungen feinkörniger und weniger mächtig. Von den insgesamt vier Grosseinheiten (**Untere Meeresmolasse** UMM, **Untere Süsswassermolasse** USM, **Obere Meeresmolasse** OMM, **Obere Süsswassermolasse** OSM) sind in der Region nur die drei höheren Einheiten vertreten. Die entsprechenden Ablagerungen zeichnen sich insbesondere durch kleinräumige Ablagerungsmuster und starke Variationen aus. Es ist daher nicht immer einfach, sich in der Vielfalt der Ablagerungen geographisch und zeitlich zu orientieren.

Die erwähnten Ablagerungen an der Buechhaalde zeugen von einer flachen, von Flusskanälen durchzogenen Überschwemmungslandschaft. Mergelige

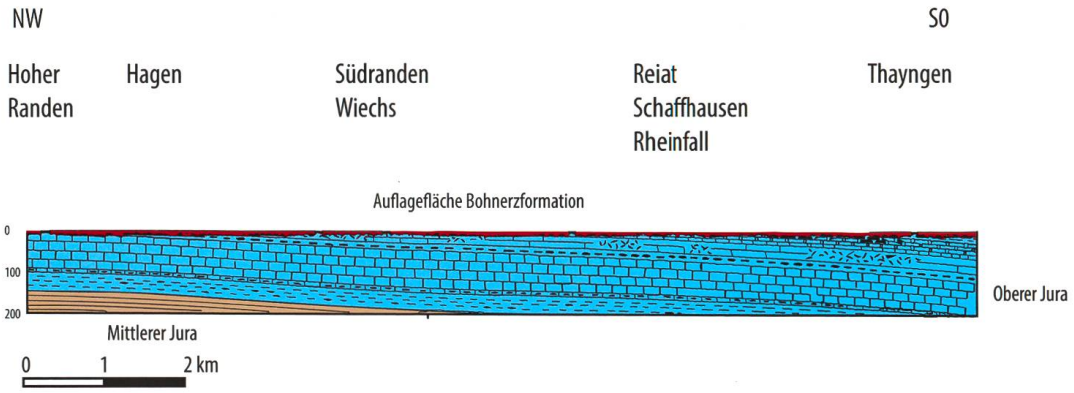


Abb. 66: Die Bohnerzformation (Siderolithikum) liegt gegen Südosten zunehmend jüngeren Gesteinen auf. Das bedeutet, dass vermutlich zur Zeit der Entstehung die tieferen Schichten bereits leicht schiefgestellt waren (Hofmann, 1991).

Hintergrundsedimentation wird von sandigen Rinnenfüllungen mit feldspatreichen (= granitischen) Sanden untergliedert. Die Entwässerung des gesamten Systems erfolgte nach Osten. Die Flüsse mündeten östlich von München ins Meer.

Von Basel an nordwärts verursachten Dehnungsbewegungen die Öffnung des Rheingrabens und als Folge davon die Hebung des Schwarzwaldes. Mit der Hebung verstärkte sich die Erosion in diesem Gebiet. Entsprechende Sedimente wurden während der Ablagerung der Unteren Süsswassermolasse erstmals von Norden bzw. Nordwesten her in unsere Gegend geschüttet. Diese sogenannte «Juranagelfluh» spielte vor allem in der folgenden Zeit der Oberen Meeresmolasse eine wichtige Rolle.

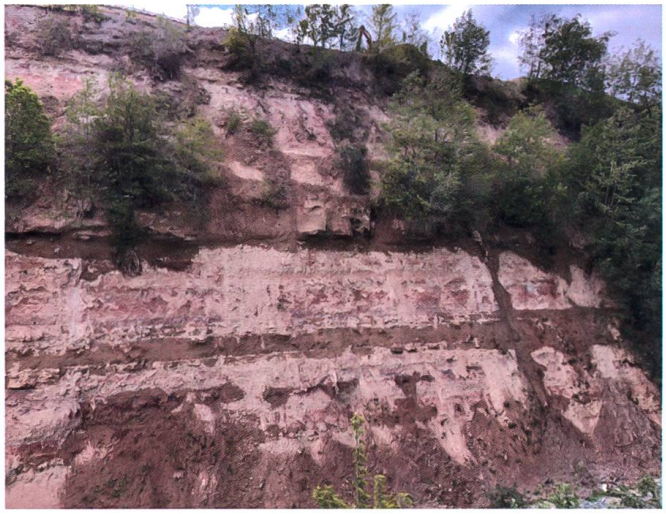


Abb. 67: Ansicht der Unteren Süsswassermolasse in der Deponie Schwanental in Buchberg bzw. Eglisau. Deutlich sichtbar ist die unterschiedliche Wasserführung der Schichten, die auf deren unterschiedliche Wasserdurchlässigkeit zurückzuführen ist.

Nach der Ablagerung der Unteren Süsswassermolasse versank die Gegend zum ersten Mal nach langer Zeit wieder im Meer, so dass über den der Buechhaalde entsprechenden Sedimenten Meeresablagerungen folgen. Diese setzen mit einem durch das Mineral Glaukonit grün gefärbten Sandstein ein, der zum Beispiel in der Region Rüdlingen-Flaach beobachtet werden kann. Aus dieser Zeit stammen auch die als Baustein berühmten Berner Sandsteine, oder die auch in Schaffhausen eingesetzten Sandsteine aus der Region Überlingen (Epitaphien im Kreuzgang des Museums zu Allerheiligen).
Es war kein tiefes Meer, die Strandlinie war nahe. Dies wird beispielsweise durch den «**Randen-Grobkalk**» verdeutlicht, ein gelbes, schräggeschichtetes und grobsandiges Sediment aus Muschel- und Schneckenschalenfragmenten sowie mit grobem Quarzsand bis -feinkies (= Sandkalk, Citharellenkalk; Abb. 68; Hofmann, 1967). Ähnliche Sedimente finden sich entlang einer alten Strandlinie, die vom Kanton Aargau bis zum Bodensee reicht; sie begrenzte das damalige Molassemeer gegen Norden. In der Region Tengen-Engen sind sie besonders deutlich ausgebildet und wurden früher als Baustein abgebaut. Ein kleineres Vorkommen findet sich am nördlichen Buechbärg in Merishausen. Dieses leicht sägbare Material wurde vor allem im 11. bis 15. Jahrhundert in Schaffhausen verwendet und kann noch heute an historischen Bauwerken bewundert werden.
In dem damaligen Meer lässt sich anhand der Sedimentstrukturen eine Strömung von Südwesten nach Nordosten rekonstruieren. Im Bereich des Napfs und des Hörnlis wurden grosse Deltas bzw. Schuttfächer aufgebaut, über die der alpine Schutt ins Meer geschüttet wurde. Während weiter südlich 600 bis 800 m Sediment in dem Meeresarm angehäuft wurden, liegt beispielsweise in Bargen die Mächtigkeit bei etwa 10 m (Hofmann, 1967).
Im nördlichen Randen (Bargen-Wiechs-Tengen) finden sich über dem Niveau der Randengrobkalke Hinweise, dass das Gebiet wieder verlandete: Der Albstein, ein rötlicher, oft massig dichter Krustenkalk, wurde in dieser Zeit gebildet.
An der Wende von der Oberen Meeresmolasse zur Oberen Süsswassermolasse bildete sich eine markante Struktur: Die **Graupensandrinne** (Abb. 69). Es handelt sich um eine rund 10 km breite und 260 km lange, stellenweise tief einerodierte Rinnenstruktur, die von Donauwörth her dem Nordrand des Molassebeckens folgt und bis in die Nordschweiz führt (Bühl, 2017). Die Rinne ist in ihrem tiefsten Teil verfüllt mit den fossilführenden sogenannten Graupensanden (Grimmelfinger Schichten), groben, kalkarmen Quarzsanden. Aufgrund der darin enthaltenen Schwermineralien wurde argumentiert,

dass das Liefergebiet nicht in den Alpen, sondern in Gebieten im Nordosten gesucht werden müsse. Nach einigen Autoren stellen die in Benken und in Riedern am Sand abgebauten Quarzsande die Fortsetzung der Grimmelfinger Schichten dar, wobei es sich hier um einen Übergang einer fluviatilen Rinne in das Meer der Oberen Meeresmolasse handle. Andere Autoren interpretieren die Graupensande als marine Ablagerung. Gestützt auf die Funde von Haizähnen und fossilen Austern wurde auch in Benken die Abfolge samt den überlagernden Sedimenten (die demnach den Kirchberger Schichten Süddeutschlands entsprechen würden) als marine Ablagerungen bzw. als Abschluss der Meeresmolasse gedeutet (Hofmann, 1967; Hofmann, 1976; Hofmann und Hantke, 1964). Diese Interpretation wurde in Frage gestellt (Bühl, 2017; Zöbelein, 1995); die Fossilien könnten auch aufgearbeitet sein und ursprünglich aus älteren Sedimenten stammen. Zudem wird seit einigen Jahren eine intensive Kontroverse um das Alter der Grimmelfinger Schichten geführt (siehe Bühl, 2017, und die darin aufgeführten Referenzen), die die Interpretation zusätzlich erschweren.

Die Quarzsande wurden bei Benken-Wildensbuch seit der Entdeckung 1836 bis in die 1980er Jahre abgebaut und für verschiedene industrielle Prozesse eingesetzt. Die Ausbeutung betrug durchschnittlich 11 000 Tonnen Quarzsand pro Jahr. Das Material wurde u.a. in Glashütten, Giessereien, Sportanlagen, Kläranlagen und als Streusand eingesetzt.

Abb. 68: Randengrobkalk – in gewissen Phasen ein beliebter Baustein in Schaffhausen und Umgebung. Bildbreite ca. 10 cm.

Die Sande sind bei Fossiliensammlern insbesondere aufgrund der häufig gefundenen Haizähne bekannt. Es wurden aber auch Reste von diversen anderen Tieren (Wirbellose wie Muscheln, Schnecken, Krebse, Korallen, Moostierchen und Wirbeltiere wie Meerbrassen, Schildkröten, Krokodile, Rüsseltiere, Nashörner, Tapire, div. Paarhufer, Nagetiere, Urraubtiere, Raubtiere, Zahnwale und Seekühe) nachgewiesen. Konglomeratbänke innerhalb der Abfolge gingen aufgrund der darin enthaltenen Austern als «Austernnagelfluh» in die Literatur ein (Bühl, 2017).

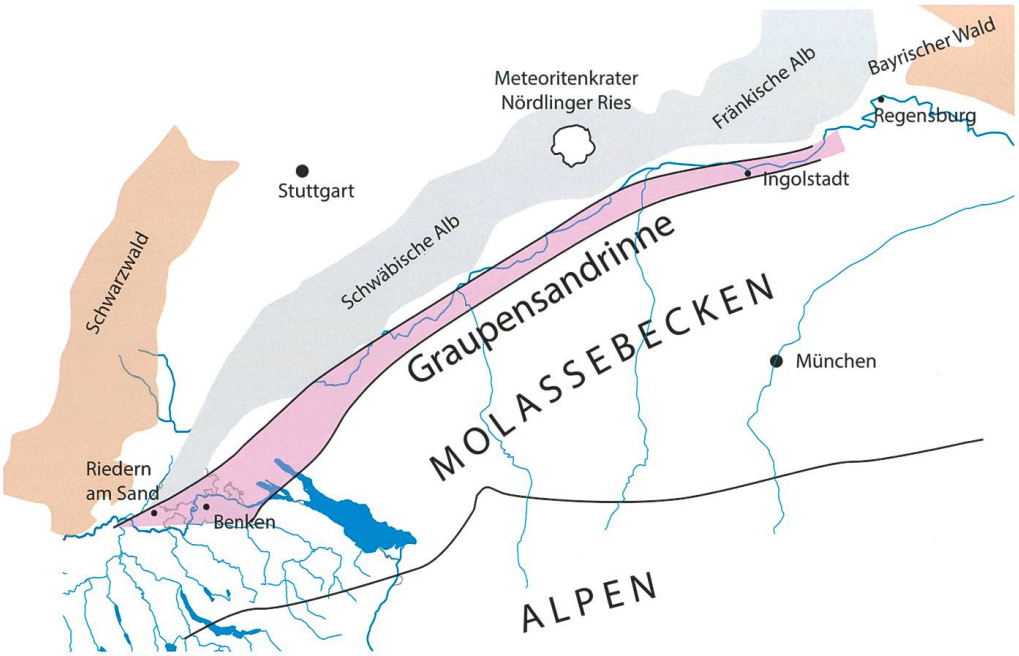


Abb. 69: Der Verlauf der Graupensandrinne. Das Alter der Rinne wird kontrovers diskutiert; während die einen Wissenschafter den Fossilinhalt der Rinnenfüllung auf 17 bis 18 Millionen Jahre datieren, wollen die anderen anhand von «geschockten Quarzen» eine Verbindung zum Einschlagkrater des Nördlinger Ries herstellen. Dann wäre die Füllung der Rinne lediglich 14,5 Millionen Jahre alt.

Abb. 70: Unterkiefer eines hirschartigen Tieres aus Benken, ZH. Museum zu Allerheiligen.

Abb. 71: Oberer Teil der Ablagerungen in der Quarzsandgrube Benken. Die abgebauten Sande liegen im unteren Teil der Wand und sind heute durch den nachrieselnden Hangschutt vollständig zugedeckt.

Spätestens nach der Ablagerung der Kirchbergerschichten zog sich das Molassemeer endgültig aus der Region Schaffhausen und schliesslich aus der Nordschweiz zurück. Es kehrte ein Sedimentationsmilieu ein, das jenem aus der Unteren Süsswassermolasse vergleichbar ist: Überschwemmungssedimente und Flussablagerungen wechseln sich ab. Wiederum nimmt die Mächtigkeit der Schichten von Norden gegen den Alpenrand hin zu (300 m im Hegau, bis 1500 m im Hörnligebiet). Wiederum wurde Sediment über grössere Deltasysteme (Napf, Hörnli, Bodensee) vor allem von Süden und in geringerem Ausmass von Norden her (Juranagelfluh) in die Vorlandsenke des Mittellandes geschüttet. Juranagelfluh ist beispielsweise im Hügelzug zwischen Rafzerfeld und dem badischen Klettgau erhalten.
In der Vorlandsenke bildete sich ein Entwässerungssystem mit Nordost-Südwest-Schüttung aus, die sogenannte Glimmersandrinne. Es handelt sich um ein rein von Flüssen (fluviatil) dominiertes Ablagerungssystem, das sich von den österreichischen Ostalpen als Sammelrinne dem Alpenvorland entlang bis ins Rhonetal und Mittelmeer erstreckte. Diese Glimmersande sind in unserer Gegend zum Beispiel am Schienerberg oder am Rodenberg bei Diessenhofen sehr markant erhalten, wo sie gemäss Hofmann und Hantke (1964) mächtige Abfolgen von 50, 100 und mehr Metern ohne Mergelzwischenlagen bilden können. Einzelne Linsen sind fossilreich (Flussmuschel

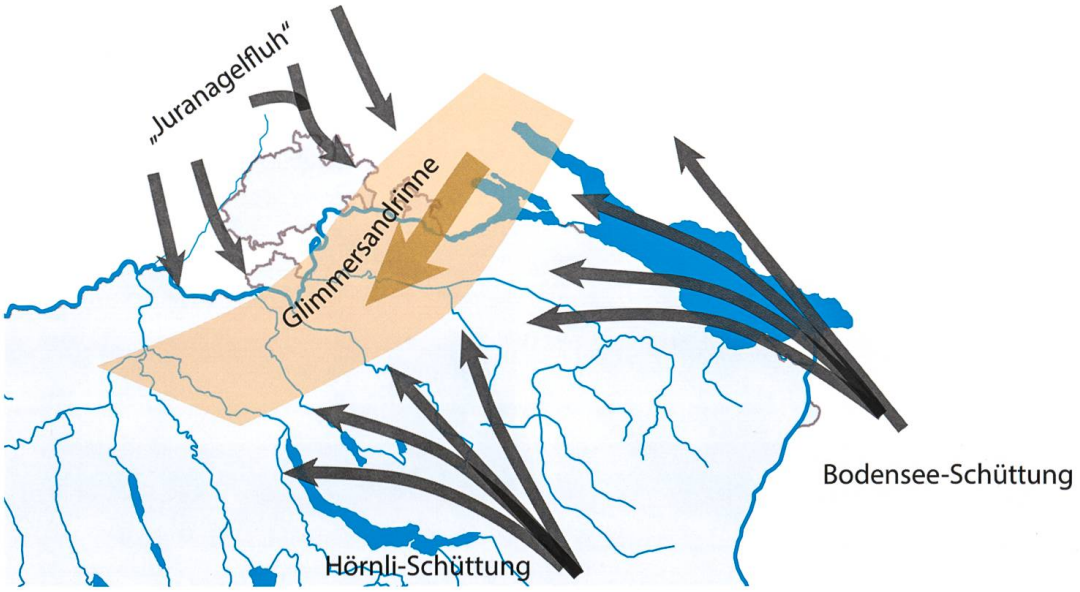


Abb. 72: Die Glimmersandrinne zeigt einen Transport von Nordosten nach Südwesten an. Von Süden wurde der Erosionsschutt der Alpen, von Norden jener des Schwarzwaldes und des Juras in die Rinne geschüttet.

Unio oder Pflanzenfossilien); insbesondere die Vorkommen an der Schrotzburg am nördlichen Schienerberg sind berühmt geworden (Hantke, 1954) und müssen natürlich auch in Kombination mit den Fossilien aus Öhningen (siehe Seite 64) betrachtet werden. Eine neuere Analyse der Flora erlaubt eine Rekonstruktion der klimatischen Verhältnisse: Die mittlere Jahrestemperatur wird auf 15-16° C geschätzt, der kälteste Monat auf 7° C und der wärmste Monat auf 25 bis 26°. Der Jahresniederschlag lag gemäss dieser Rekonstruktion bei 1300 mm/Jahr (Uhl et al. 2006). Zum Vergleich: in Schaffhausen beträgt die Jahresmitteltemperatur heute 9,4° und der Niederschlag 907 mm (Quelle: Klimadaten MeteoSchweiz).
Das Gefälle gegen Westen hielt bis zum Ende der Molassesedimentation an. Neben den vulkanischen Schichten bilden die Glimmersande die geologische Unterlage des Hegaus.

7. 2 Tektonische Bewegungen: Von der Neuhauser Störung zum Hegauvulkanismus

Im Zusammenhang mit der Öffnung des Oberrheingrabens setzten auch in unserer Gegend Dehnungsbewegungen und Vulkanismus ein. Dabei scheinen auch alte, sogenannt herzynische, Brüche wieder reaktiviert worden zu sein. In der Region Schaffhausen sind sowohl Brüche mit einer NNO-SSW-Ausrichtung (parallel zum Oberrheingraben) als auch Brüche mit einer WNW-OSO- Ausrichtung zu beobachten. Letztere Ausrichtung folgt dem Bodensee-Hegau-Graben bzw. dem Bonndorf-Graben, an dem deutliche Dehnungsbewegungen stattfanden. Einen markanten Einblick in dieses System bietet die bei Thayngen/Almenbühl aufgeschlossene Abschiebung, bei

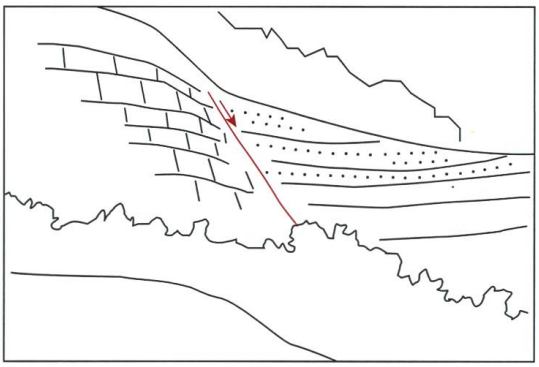


Abb. 72: In der ehemaligen Tongrube Almenbühl ist das Bruchsystem der Randenstörung sehr deutlich zu sehen: Das System von Abschiebungen zwischen den Kalken und Tonen des Oberen Jura (grau) und der Molasse (braun) versetzt die Gesteinsschichten um insgesamt 225 m gegeneinander.

der an einer 70–80° geneigten Scherfläche Molassesedimente (Nordost) in direkten Kontakt mit Sedimenten des Oberen Jura (Südwest) gesetzt wurden (Abb. 72). Der vertikale Versatz an dieser Störung beträgt rund 225 m. Diese sogenannte Randenstörung ist auch im Bild der geologischen Karte deutlich zu sehen. Zwischen Thayngen und Bargen spaltet sich die Bruchfläche in mehrere Äste auf.

Ein anderer jedoch wesentlicher «Seitenast» dieses Störungssystems ist die Neuhauser Störung, ebenfalls eine Abschiebung, aber mit deutlich geringerem Versetzungsbetrag als die Randenverwerfung. Sie ist einerseits in der Teufelsküche bei Beringen indirekt sichtbar (der «Wohlgeschichtete Kalk» der Villigen-Formation liegt auf gleicher Höhe und in unmittelbarer Nachbarschaft zum «Quaderkalk» der Oberen Felsenkalk-Formation). Andererseits ist eine kleine damit in Zusammenhang stehende Verwerfung in der Sandgrube Benken-Wildensbuch sichtbar (siehe z. B. Bühl, 2017; Abb. 75). Analysen von modernen Erdbeben deuten darauf hin, dass auch heute Bewegungen an dem System Neuhauser Störung/Randenstörung stattfinden.

An der Schnittstelle zwischen dem Oberrheingraben und einer solchen herzynischen Störung setzte im Oberrheingraben selbst vor rund 20 Millionen Jahren der Vulkanismus des Kaiserstuhls ein. Vor rund 14 Millionen Jahren, als der Kaiserstuhl-Vulkanismus am Ausklingen war, folgte während der Hauptabsenkung des Bonndorfer Grabens der Vulkanismus im Hegau (Abb. 76, 77 und 78). Diese Phase dauerte ungefähr bis vor 7 Millionen Jahren. Aufgrund der Zusammensetzung der geförderten Schmelzen kann man unterscheiden zwischen «basaltischen» (Hohenstoffeln, Hohenhewen, Höwenegg, Blauer Stein) und phonolithischen (Hohentwiel, Hohenkrähen, Stau-

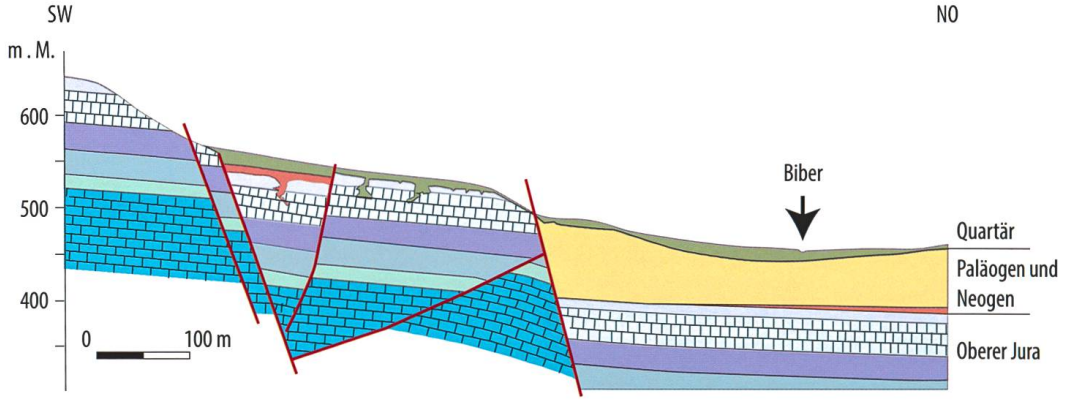


Abb. 73: Schematische Darstellung der Randenstörung bei Thayngen, gestützt auf Bohrungen (nach Hofmann et al. 2000).

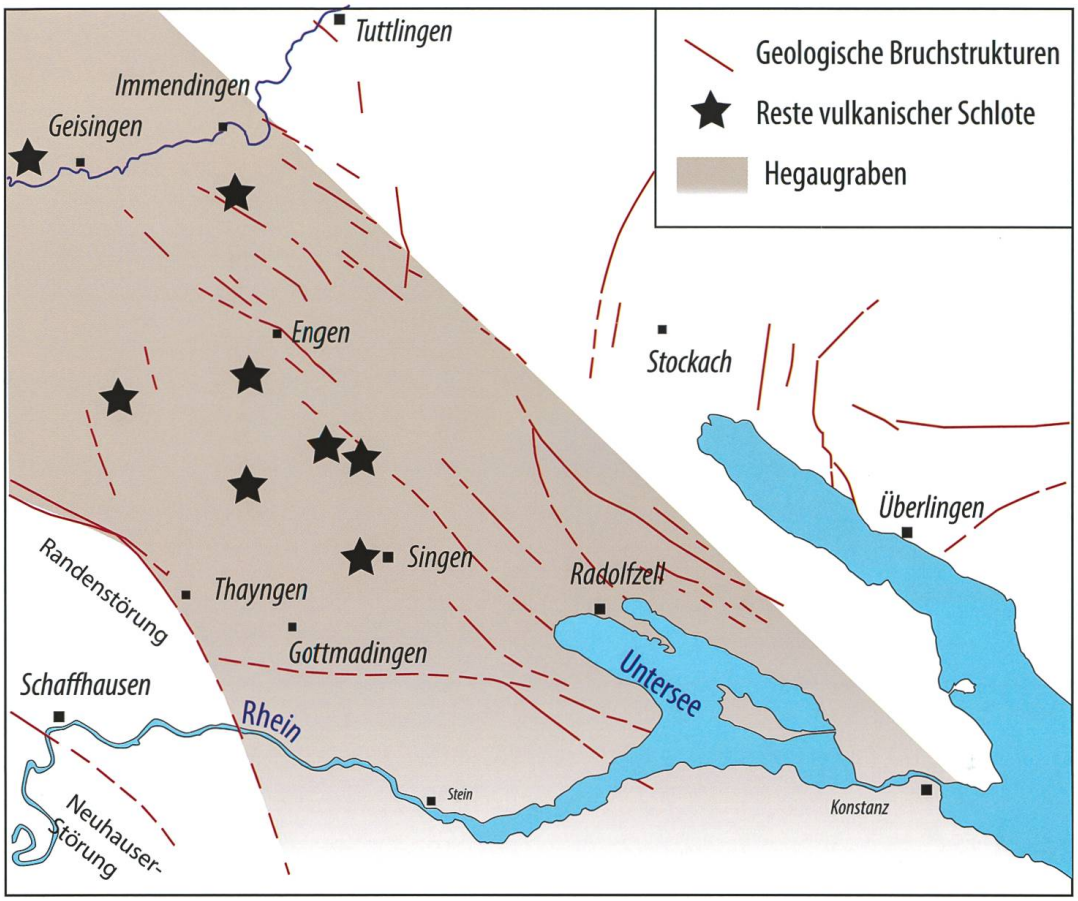


Abb. 74: Der Hegaugraben mit seinen tektonischen Störungen und den vulkanischen Zentren (nach Schreiner, 1968).

fen) Magmen, wobei letztere bereits im Förderschlot erstarrten. Das Alter der basaltischen Magmen liegt im Bereich von 11,8 Millionen Jahren, dasjenige der Phonolithe zwischen 7 und 9,5 Millionen Jahren (Weiskirchner, 1972). Die ältesten vulkanischen Aktivitäten reichen jedoch noch weiter zurück: Zu den ältesten Zeugen zählt der Pyroxentuff von Ober Salen und von Wangen. Die Deckentuffe sind nach Schreiner (1992) 12–15 Millionen Jahre alt. Es handelt sich dabei um vulkanische Sedimente (Pyroklastite), die sowohl als Schlotfüllungen als auch eingeschaltet in den umliegenden Molassesedimenten dokumentiert sind. Tuffhorizonte wurden auch auf der schweizerischen Seite dokumentiert (Hofmann, 1958; Hofmann and Jäger, 1959); kleinere vulkanische Körper wurden in der Region Ramsen und Hofen nachgewiesen (Hofmann, 1956).

Die Vulkane selbst sind eigentlich heute nicht mehr erhalten, nur noch ihre Schlotfüllungen (Abb. 76). Diese haben sich gegenüber der Erosion wider-

Abb. 75: Am Rand der ehemaligen Abbauwand der Quarzsandgrube Benken ist eine Abschiebung zu erkennen. Es handelt sich um einen Seitenast der Neuhauser Störung.

standsfähiger als die Molassegesteine erwiesen, die sie durchschlagen haben; sie blieben daher als «Härtlinge» erhalten. Der eigentlich Vulkankegel, soweit die Schmelzen überhaupt bis zur Oberfläche durchbrachen, wurde längst abgetragen.

Der Wannenberg bei Blumenfeld bzw. Tengen bietet einen anderen, wenig bekannten Aspekt des Hegau-Vulkanismus. Auf seiner Kuppe finden sich sinterartige, teilweise verkieselte Ablagerungen, die vermutlich im Zusammenhang mit dem Austritt von heissen vulkanischen Thermalwässern stehen. Einen sehr guten Überblick über den Vulkanismus im Hegau vermitteln die von Geyer (2003) zusammengestellten Ausflüge.

Eine aus paläontologischer Sicht besonders bemerkenswerte Bildung aus der frühen Phase des Hegau-Vulkanismus ist der Öhninger Süsswasserkalk, eine lokale und örtlich sehr beschränkte Ablagerung in einem ehemaligen Maarsee, also einem See in einer schüsselförmigen Geländemulde vulkanischen Ursprungs. Die ungewöhnlich häufigen und gut erhaltenen Fossilien von diversen Pflanzen, Insekten, Fischen, Amphibien und Reptilien führten zu einer recht detaillierten Abschätzung der klimatischen Bedingungen. Es wird in der Fachliteratur eine geschätzte mittlere Jahrestemperatur von 15,5 bis 16,5° C angegeben (kältester Monat: 8–11°, wärmster Monat 24°) und einer Niederschlagsmenge von 1300 bis 1500 mm pro Jahr (Fikáček und Schmied, 2013). Es sollen rund 900 Tier- und 450 Pflanzenarten nachgewiesen worden sein (Abb. 80). Eine Besonderheit ist der Riesensalamander *Andrias scheuchzeri*, der 1726 vom Zürcher Stadtarzt Johann Jakob Scheuchzer als Skelettrest eines in der Sintflut umgekommenen «armen Sünders» gedeutet wurde. Es handelt sich damit um eines der ersten «wissenschaftlich» beschriebenen, wenn auch falsch interpretierten Fossilien (Leu, 2013). Verwandte dieses Riesensalamanders leben noch heute in China und Japan. Aufgrund von Scheuchzer und anderen frühen Sammlern hat die Fundstelle Öhningen für

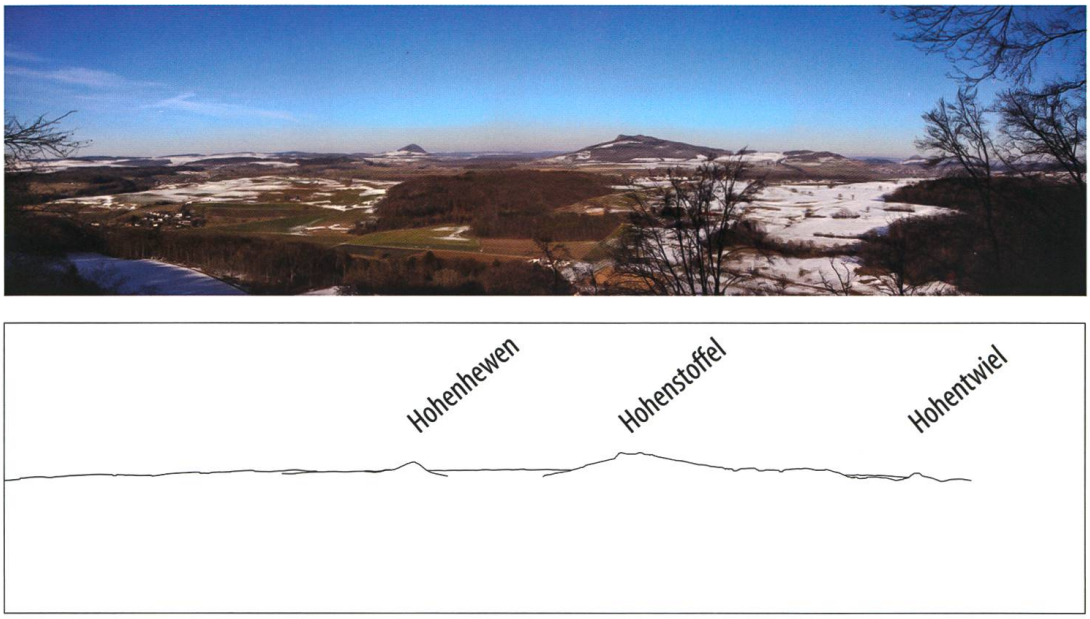


Abb. 76: Aussicht vom Cherzenstübli bei Thayngen auf einige der «Vulkankegel» des Hegaus.

Abb. 77: «Basalt» mit Einschluss vom Hohenstoffel. Genau genommen handelt es sich mineralogisch nicht um Basalt, sondern um Olivin-Melilithit. Dabei handelt es sich um ein Gestein, das aus einer an Kieselsäure armen Schmelze entstand.

Abb. 78: «Basaltsäulen» am Hohenstoffel. Die im Querschnitt sechseckigen Säulen entstehen aufgrund der gleichmässigen Abkühlung und damit Volumenabnahme des vulkanischen Gesteins. Die Säulen sind senkrecht zur damaligen Oberfläche orientiert.

Abb. 79: Vulkanischer Tuff, Sammlung Hofmann, Fundort Hirschenbrünneli, S Chrobachhütte, Museum zu Allerheiligen.

Abb. 80: Fossiles Ahornblatt aus Öhningen, Museum zu Allerheiligen.

die Geschichte der Paläontologie eine herausragende Bedeutung (das wird auch deutlich durch eine Anfang des 19. Jahrhunderts ans British Museum in London verkaufte Sammlung des Schaffhauser Arztes Conrad Ammann; Brignon, 2016). Etwas jünger (11 Millionen Jahre) sind die Fossilien, die in der Umgebung des nördlichsten Hegauvulkans Höwenegg geborgen wurden: Säbelzahntiger, Riesenfaultier sowie das mit den Elefanten verwandte *Deinotherium* sind einige Beispiele; besonders bekannt jedoch sind die Funde mehrerer Exemplare des dreizehigen Urpferdes *Hipparion*.

Irgendwann zwischen 5 und 10 Millionen Jahren vor heute ging die Ablagerungsphase der Molasse zu Ende; es folgte eine Phase der Erosion. Der jüngste Teil der Molasseablagerung scheint dabei erodiert worden zu sein. Die Entwässerung der Glimmersandrinne nach Südwesten wurde vermutlich wegen tektonischer Verkippung des Mittellandes umgedreht, und das Mittelland entwässerte in der Folge gegen Nordosten (Abb. 82). Ablauf und genauer Zeitpunkt dieses Prozesses ist bisher kaum bekannt. Die nächstjüngeren Sedimente stammen vom «Aare-Donau-System», das aber nur sehr lückenhaft überliefert ist. Einzelne, meist lokale Reste des sogenannten «**Aare-Donau-Höhenschotters**» finden sich entlang eines Bandes vom Schweizer Mittelland über Blumberg, Tuttlingen bis nach Ulm. Durch rückschreitende Erosion eines Vorläufers des Rhone-Zuflusses Doubs scheint das Aare-Donau-System jedoch später seines Oberlaufs beraubt worden zu sein und die «Ur-Aare» wurde nach Westen umgeleitet (Abb. 82).

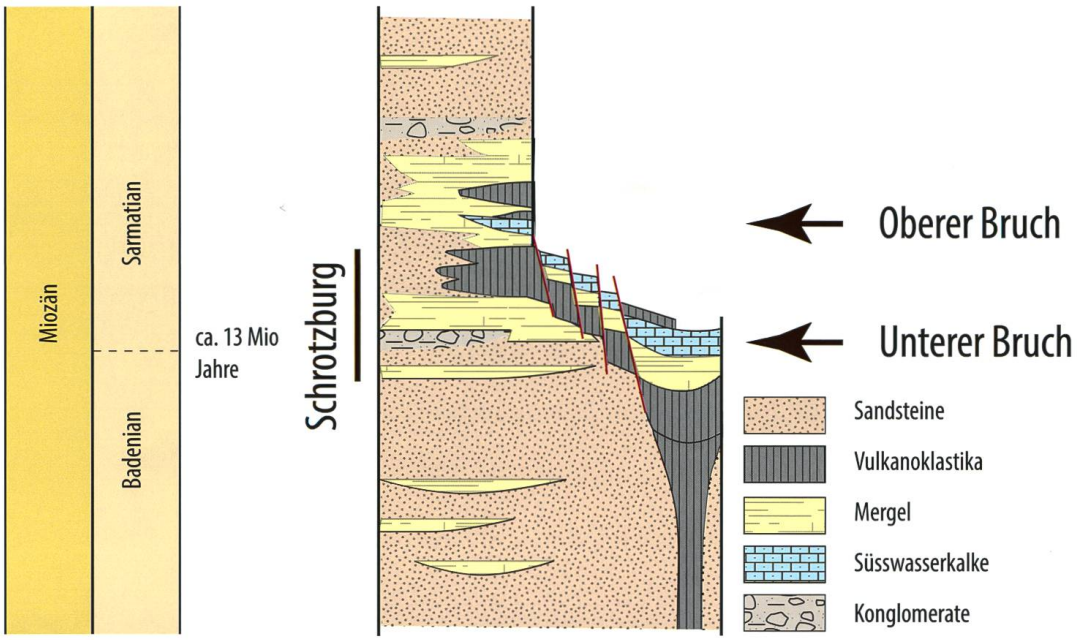


Abb. 81: Geologische Situation der beiden Steinbrüche in Öhningen und deren altersmässiger Vergleich mit den Pflanzenfossilien von Schrotzburg. Die Fossilien in Öhningen stecken in den als «Süsswasserkalke» bezeichneten Einheiten.

8. Das Zeitalter der Gletscher: Quartär

Heute hat die Region Schaffhausen wenig Ähnlichkeiten mit den glazialen Landschaften des Hochgebirges. Entsprechend schwierig ist es, sich die Zeit vorzustellen, als Gletscher bis ins Tiefland und bis gegen unsere Gegend vorrückten. Diese Vorstellung war auch für die Wissenschaft in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts ungeheuerlich (siehe Kasten). Heute ist jedoch unbestritten, dass beide Pole der Erde seit rund 2,6 Millionen Jahren vereist sind (die Antarktis ist schon viel länger vereist: bereits seit rund 34 Millionen Jahren), und dass sich diese Eiskappen in regelmässigen Abständen stark ausdehnen. Die entsprechenden Phasen nennt man Eis- oder eigentlich korrekter Kaltzeiten. Diese (länger dauernden) Kaltzeiten (Glaziale) werden von kürzeren Warmzeiten (Interglaziale) unterbrochen. Ausgelöst werden diese natürlichen Klimavariationen durch regelmässige Schwankungen der Parameter der Erdumlaufbahn (siehe Milanković-Zyklen, Abb. 24): Die Neigung und Richtung der Erdachse gegenüber der Ebene der Erdumlaufbahn und die

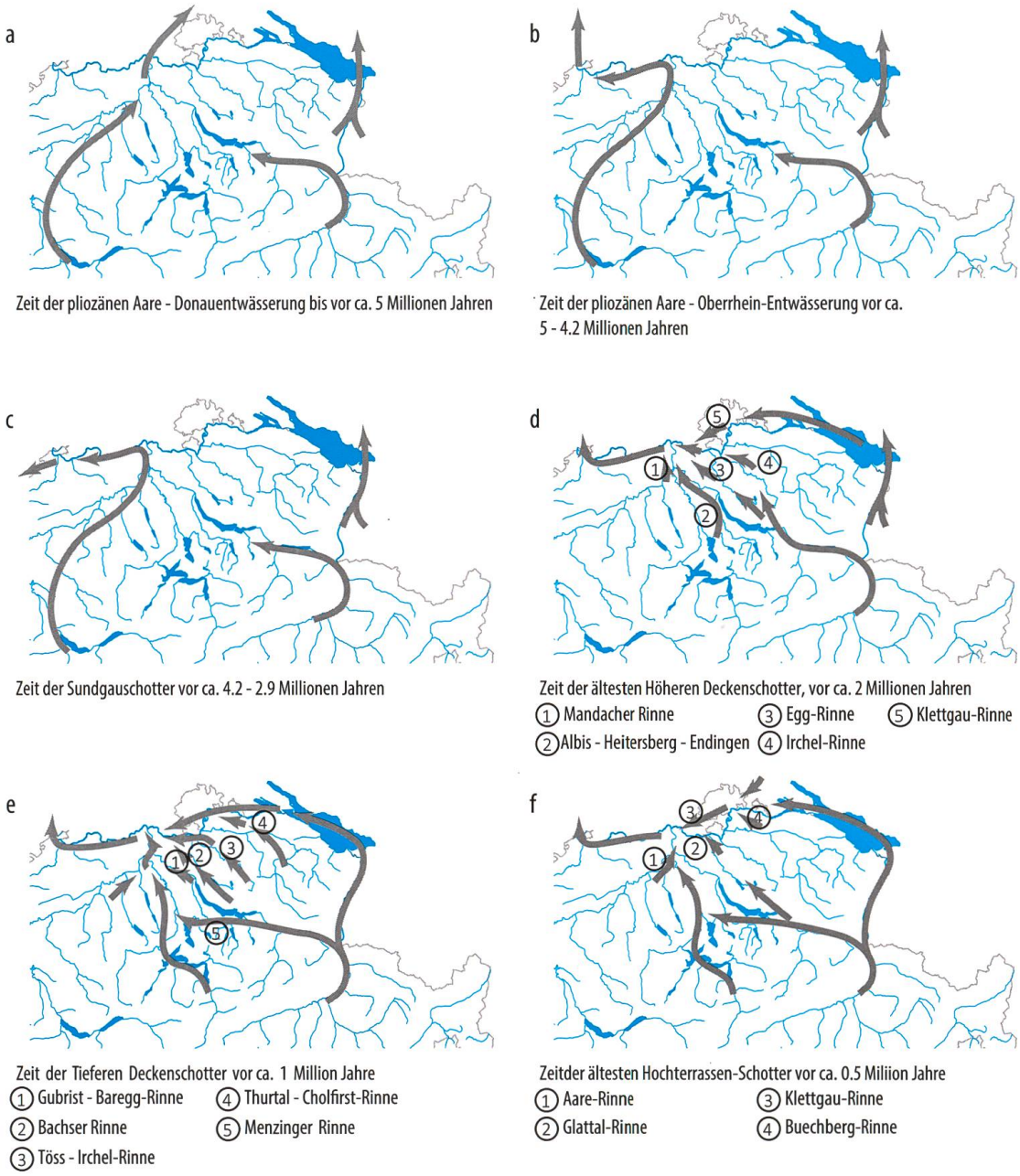


Abb. 82: Im Lauf der letzten Jahrmillionen änderte die Entwässerung der Nordschweiz mehrere Male sehr grundsätzlich. Dafür war einerseits die fortschreitende Erosion verantwortlich, andererseits auch tektonische Bewegungen. Anfänglich entwässerte die Nordschweiz via Aare-Donau nach Nordosten. Später folgte die Aare dem Rhein, in einer gewissen Phase sogar dem Doubs Richtung Südwesten, bevor sich vor rund zwei Millionen Jahren in groben Zügen das moderne Entwässerungssystem ausbildete. Nach Graf 1993 bzw. Heuberger et al. 2014.

Exzentrizität der ellipsenförmigen Erdumlaufbahn verändern sich mit streng mathematischer Regelmässigkeit. Jeder dieser drei Parameter beeinflusst damit die Menge an Sonnenenergie, die durch die Erde eingefangen wird. Die rechnerische Überlagerung der Variationen dieser drei Parameter erlaubt eine genaue Rekonstruktion der vergangenen bzw. eine Prognose der zukünftigen Strahlenbilanz der Erde. Wie sich dieses an sich streng mathematische Muster dann in konkrete Temperaturveränderungen bzw. in Wachstum der Gletscher übersetzt, ist aufgrund einer Vielzahl von positiven und negativen Rückkoppelungseffekten jedoch komplexer und nicht so einfach kalkulierbar. Auch die Gletscher der Alpen reagierten auf diese Klimaschwankungen. In Kaltzeiten dehnten sie sich weit über den inneralpinen Bereich hinaus aus und drangen in der Nordschweiz wiederholt bis nach Schaffhausen und darüber hinaus vor. Früher glaubte man in der Abfolge von Moränen und Schotterterrassen in der Nordschweiz und Süddeutschland vier Kaltzeiten zu

Die Entdeckung der Eiszeiten

Besorgt über die zunehmende Vergandung der Alpen, schrieb die noch junge Schweizerische Naturforschende Gesellschaft 1820 einen Wettbewerb über die Temperaturentwicklung in den Alpen aus. Man wollte mehr über die Entwicklung der Weiden, der Wälder und der Gletscher erfahren. Der einzige, der 1821 einen Wettbewerbsbeitrag einreichte, war der Walliser Kantonsingenieur Ignaz Venetz. Er postulierte, dass die Gletscher riesigen Thermometern gleich auf die Temperaturentwicklung in den Alpen reagieren und auch früher reagiert haben. Er gewann den Preis. In den folgenden Jahren trug er immer mehr Information über die frühere Ausdehnung der Gletscher zusammen. Er gelangte zur Ansicht, dass sich die Gletscher einst bis weit ins Mittelland erstreckten und lieferte damit auch eine Interpretation des bis dahin rätselhaften Vorkommens der Findlinge. 1833 veröffentlichte er dazu eine Publikation. Doch seine damals abstrus erscheinende Theorie wurde von der Forschergemeinde fast einstimmig verworfen. Aber er konnte Jean Charpentier (Bergwerksdirektor von Bex), und später den renommierten Naturforscher Louis Agassiz überzeugen. Es sollte jedoch noch Jahrzehnte dauern, bis sich die Erkenntnis, dass Gletscher sich einst viel weiter ausgedehnt hatten, durchsetzen sollte.

erkennen (Günz-, Mindel-, Riss- und Würmeiszeit), die man mit den vier auch in der Region Schaffhausen morphologisch unterscheidbaren lithologischen bzw. geomorphologischen Einheiten in Verbindung brachte: Höhere Deckenschotter, Tiefere Deckenschotter, Hochterrassenschotter und Niederterrassenschotter (Abb. 83). Doch u.a. aus dem internationalen Vergleich und zunehmend präziseren Altersdatierungen zeigte sich, dass diese Zuordnung der vier Einheiten zu vier Kaltzeiten zu stark vereinfacht war. Heute nimmt man an, dass die Gletscher bis gegen 15 Mal ins Vorland der Alpen vorstiessen, und die Zuordnung einzelner Ablagerungen zu einzelnen dieser Phasen bleibt eine grosse Herausforderung (Abb. 84). Erschwerend hinzu kommt, dass sich die Gletscher auch innerhalb eines einzelnen Klimazyklus nicht immer synchron verhielten: Während sie beispielsweise am einen Ort bereits zurückschmolzen, stiessen sie andernorts gleichzeitig weiter vor.
Doch auch wenn man die genaue Datierung einzelner glazialer (eiszeitlicher) Ablagerungen noch immer kontrovers diskutiert, so ist doch unbestritten, dass die Region Schaffhausen, insbesondere auch die nähere Umgebung der Stadt Schaffhausen, mehrmals nahe dem Maximalstand der eiszeitlichen Gletscher lag. Das erklärt die ausgesprochen komplizierte Architektur der eis-

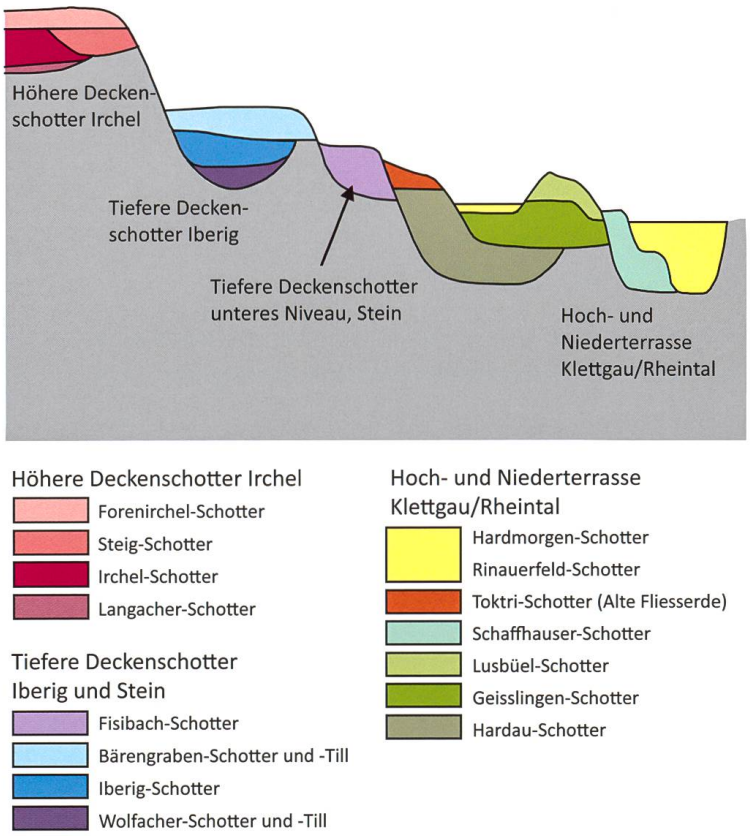


Abb. 83: Die Schotterkörper lassen sich u. a. aufgrund ihrer Zusammensetzung und Höhenlage in vier Einheiten gliedern. Nach Graf 2009 a.

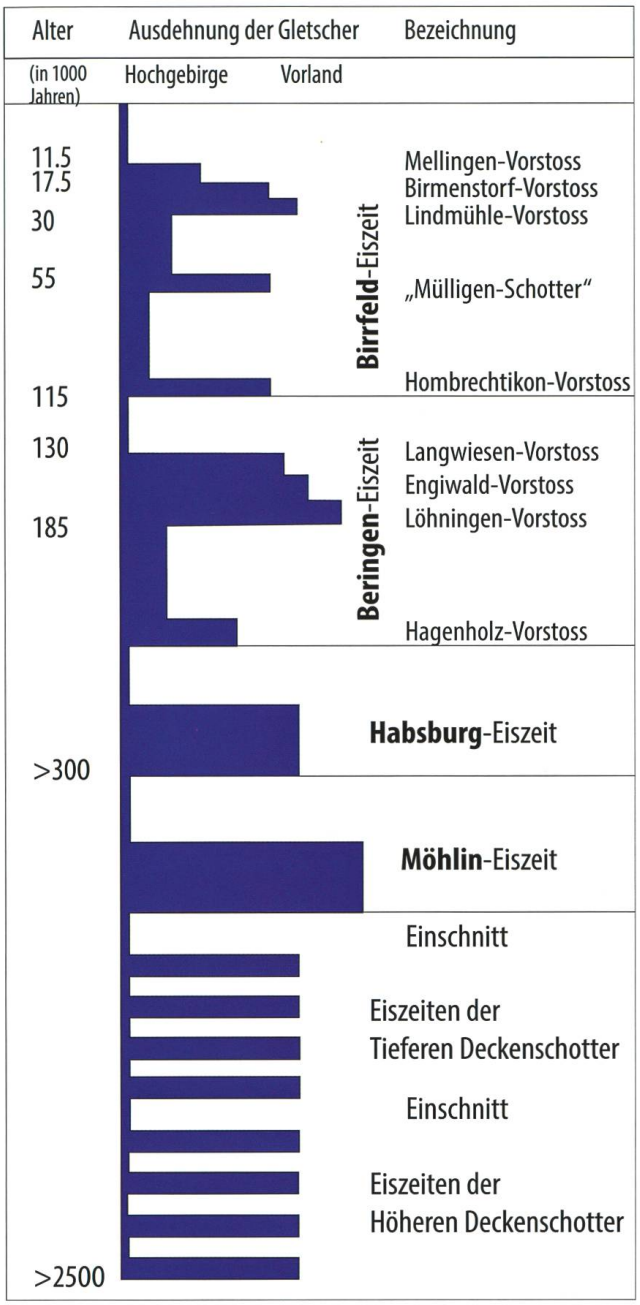


Abb 84: Heute geht man nicht mehr von nur vier Vereisungen aus, sondern von gegen 15. Doch die Zuordnung der einzelnen Sedimentkörper und die Datierung bleiben eine Herausforderung.

zeitlichen Lockersedimente. So liegen heute Hügelzüge da, wo einst Talsenken lagen. Topographische Rücken werden vom Grundwasser unterquert. Täler – allen voran der prominente Klettgau – wurden von einem Fliessgewässer geformt, von dem heute im Tal selbst nichts mehr sichtbar ist. Das Entwirren der einzelnen Phasen ist komplex und auch heute noch gibt es viele Fragezeichen. Doch die Untersuchung bzw. Beschreibung der quartären Geschichte der Region Schaffhausen hat eine lange Tradition (z. B. Graf, 2000; Graf und Hofmann, 2000; Graf, 2009 a; Graf, 2009 b; Heim, 1931; Hofmann, 1977; Keller und Krayss, 2005 a; Keller und Krayss, 2005 b; Keller und Krayss, 2010; Lowick et al., 2015; Meister, 1898; Merklein, 1869; Preusser et al., 2011).

8. 1 Die Zeit der Deckenschotter

Man geht davon aus, dass die grösste Intensität der Schotterablagerung während des Vorrückens und während des Hochstandes der Gletscher zu verzeichnen ist. Es entstehen ausgedehnte, mächtige Schotterfluren, die durch die abfliessenden Flüsse und Rinnsale geprägt und geformt werden. Mit dem Rückschmelzen der Gletscher beginnt die Erosion dieser Schotterfluren, tief

fressen die zurückerodierenden Flüsse sich in die vormals aufgeschütteten Schotterebenen ein, es entstehen an den Talflanken die erwähnten Terrassen. Bei erneutem Gletschervorstoss werden die alten Terrassen entweder zugedeckt, oder – bei absinkendem Erosionsniveau – es werden neue Terrassen auf einem topographisch tieferen Niveau angelegt. Eine Kartierung der Schotterterrassen in der Nordschweiz zeigt, wie das Erosionsniveau zunehmend tiefer gelegt wurde (Abb. 85). Heute topographisch hochliegende, oft gut verkittete Schotterkörper, die nur noch in vergleichsweise kleinen Resten in hohen Lagen und auf Hügelkuppen erhalten sind, werden als Deckenschotter zusammengefasst (Abb. 86). Sie stellen kleine Restflächen einer einst zusammenhängenden Schotterfläche dar, die seither durch die Erosion weitgehend ausgeräumt wurde; das Erosionsniveau hat sich seither tiefer in die Landschaft abgesenkt. Diese Schotter wurden eingehend vom Schaffhauser Geologen H. Graf in seiner Dissertation (Graf, 1993) untersucht und in einer Reihe von Publikationen dokumentiert. Er konnte zwei bzw. drei Einheiten unterscheiden: Mit abnehmendem Alter sind das die Höheren Deckenschotter, die Tieferen Deckenschotter und die Tieferen Deckenschotter unteres Niveau (Graf, 2009 a). Ein Vorkommen der Höheren Deckenschotter am Irchel wurde anhand des Fundes winziger Zähnchen von Säugetieren auf ein Alter von 1,8 bis 2,5 Millionen

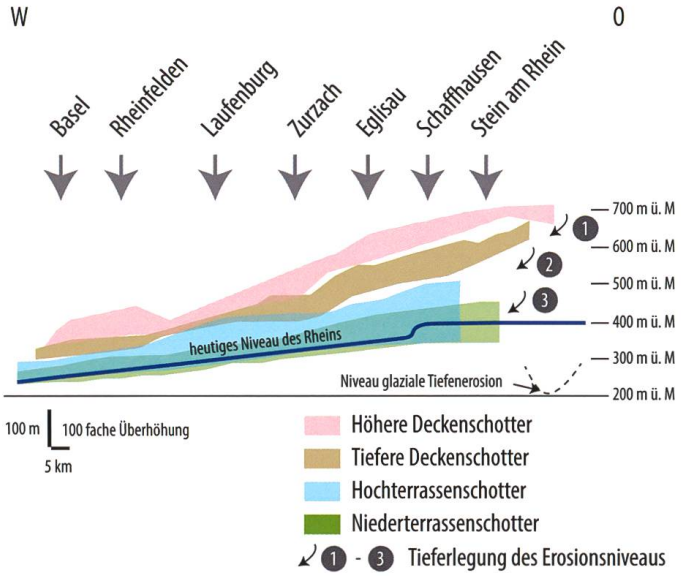


Abb. 85: Werden die topographischen Höhen der verschiedenen eiszeitlichen Schotter-Ablagerungen in einem Ost-West-Profil aufgezeichnet, zeigt sich einerseits das konstante Ost-West-Gefälle, andererseits das Tieferlegen des Erosionsniveaus von den älteren Einheiten (Höhere Deckenschotter) zu den jüngeren Einheiten (Niederterrassenschotter). Stark vereinfacht nach Heuberger et al. 2014.

Abb. 86: Tiefere Deckenschotter beim Pierchäller, Neuhausen am Rheinfall

Jahren datiert (Bolliger et al., 1996). Die Deckenschotter repräsentieren mit Sicherheit mehrere Vereisungsphasen. Doch ein Entschlüsseln dieser Phasen ist anhand der sehr lückenhaft erhaltenen bzw. durch spätere Erosion abgetragenen Ablagerungen schwierig. In der Region Schaffhausen sind entsprechende Vorkommen am Buechbärg und Bärg bei Thayngen, am Schienerberg, ein grosses Vorkommen am Cholfirst, mehrere kleinere Vorkommen in Schaffhausen und Neuhausen (Hohbärg, Dachsebüel, Gäissbärg, Öölbärg, Neuhuuserwaald) sowie am Hasenberg bei Wilchingen erhalten.

8. 2 Die jüngeren Eiszeiten

In einer noch nicht genau datierten Phase nach der Ablagerung der Deckenschotter fand ein Ereignis statt, das zu intensiver Erosion führte. Es wurden neue Flussrinnen geschaffen, die Topographie wurde tiefgreifend umgestaltet. Das Entwässerungsnetz wurde um 100 bis 120 m abgesenkt. Der Auslöser dieser Phase könnte tektonischer oder klimatischer Art gewesen sein. Jedenfalls spielte diese Phase in der Entwicklung unserer heutigen Landschaft eine zentrale Rolle. Sie prägte das Bühnenbild, vor dem sich die «jüngeren Eiszeiten» abspielten: Möhlin, Habsburg, Hagenholz, Beringen und Birrfeld (Abb. 87).

Vermutlich sind die alpinen Findlinge (= Erratiker) auf dem Hallauer Rücken sowie eiszeitliche Ablagerungen bei Schleitheim («Schleitheim-Vorstoss») der **Möhlin-Eiszeit** zuzuordnen, wobei nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann, dass sie aus noch früheren Vereisungsphasen stammen (Graf, 2009 b). Die Möhlin-Eiszeit wäre demnach nicht nur generell in der Nordschweiz, sondern explizit auch in der Region Schaffhausen die grösste Vereisung zumindest des jüngeren Pleistozäns. Ob die für unsere Landschaft so prägende Klettgau-Rinne bereits davor oder kurz danach angelegt wurde, konnte bisher nicht mit Sicherheit bestimmt werden. Die Gletscher der Möhlin-Eiszeit scheinen aber die ersten glazial übertieften Rinnen geschaffen zu haben (Preusser et al., 2011). Glazial übertiefte Täler sind ein bemerkenswertes Phänomen: Unter dem Einfluss der Gletscher kann Erosion bis tief unter das Niveau der Vorfluter erfolgen (glaziale Tiefenerosion). Es entsteht ein regional rückläufiges Gefälle, wie es Erosion durch Wasser nicht bewirken kann. Glaziale Prozesse und unter Druck stehendes subglaziales Schmelzwasser müssen am Werk gewesen sein. Es entstanden in der Nordschweiz eine ganze Reihe sehr tiefer, heute durch Lockergesteine verfüllter Täler, die in gewissen Fällen bis auf Meeresniveau hinunterreichen. Sie bildeten sich offensichtlich vor allem im Zungenbereich der Gletscher nahe der Vereisungsfront.

In der Nordschweiz wurden diese Täler durch die Arbeit von Pietsch und Jordan (2014) dokumentiert. Zeitpunkt und Geschwindigkeit der Ausräumung dieser Täler sind in der Wissenschaft noch umstritten bzw. werden intensiv diskutiert, nicht zuletzt auch da man die beteiligten Prozesse noch nicht restlos hat klären können.

Die nachfolgende **Habsburg-Eiszeit** erreichte nicht mehr die Ausmasse der Möhlin-Eiszeit. Dennoch wurden entlang von Aare und Rhein grosse Mengen von Sediment abgelagert. Nach dem Rückschmelzen der Habsburg-Eiszeit entstand nach Graf (2009 b) mit der heute verfüllten Neuhauserwald-Rinne ein Durchbruch durch den Hügelzug des Südrandens.

Beim nächsten Gletschervorstoss, der **Beringen-Eiszeit,** kam es zu einer erneuten Aufschotterung. Durch die Neuhauserwald-Rinne wurden Schotter

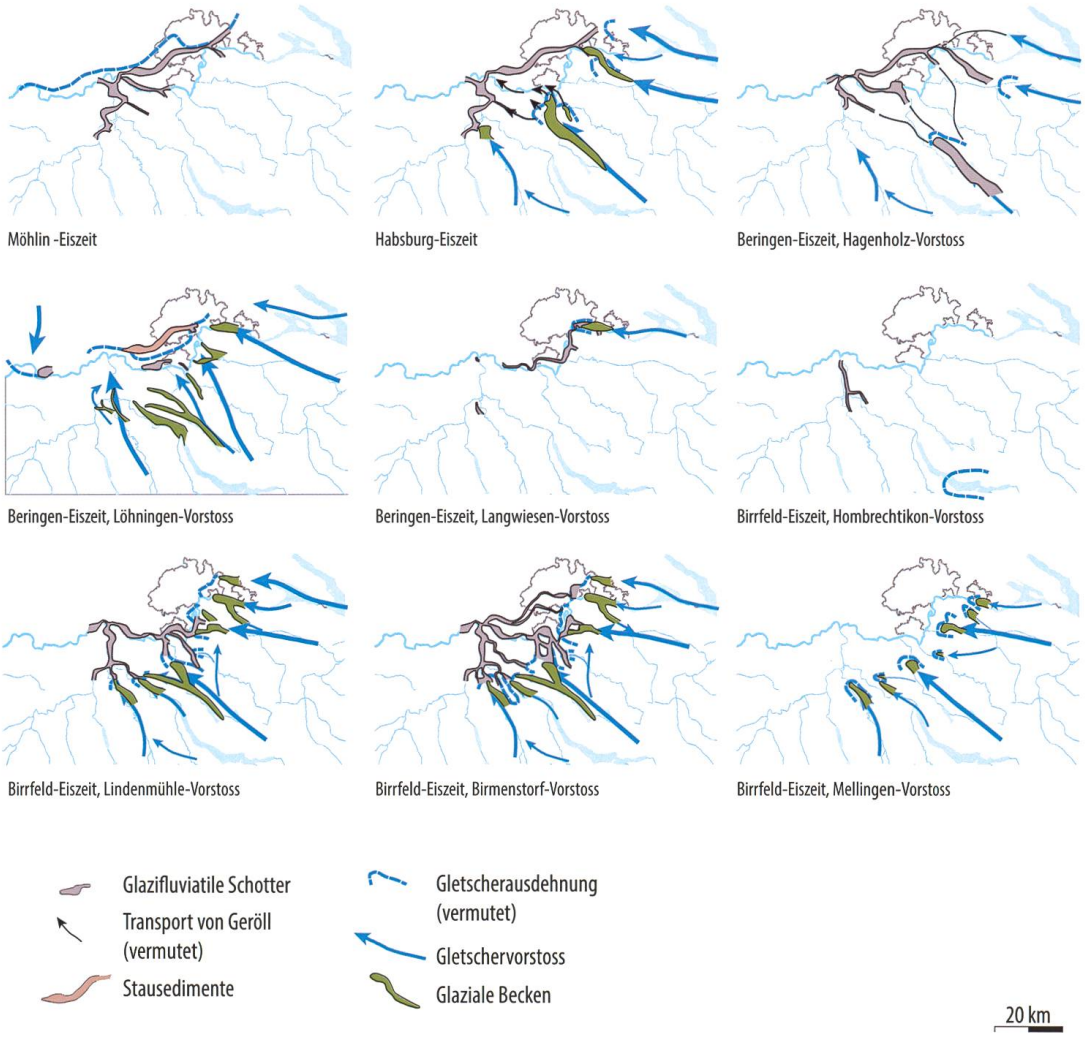


Abb. 87: Stark schematisierte Kärtchen der Merkmale der einzelnen Vergletscherungen (nach Graf 2009).

ins Klettgau geschüttet, die gemäss Analysen der Gerölle auf den Linth-Walensee-Rheingletscher zurückzuführen sein müssen. Es stiessen einerseits der Bodensee-Rhein-Gletscher und andererseits der Linth-Walensee-Rheingletscher bis in den oberen Klettgau vor. Letzterer nahm gegen Westen auch das Gebiet bis zum unteren Aaretal ein, wo er mit dem vereinigten Aare-Reussgletscher zusammentraf (Graf, 2009 b). Die unterschiedliche Herkunft der Schotter lässt sich auch hier anhand der Geröllzusammensetzung eruieren. Typische Gesteine aus dem heutigen Glarnerland müssen vom Linth-Walensee-Rheingletscher transportiert worden sein und können nicht dem Bodensee-Rhein-Gletscher entstammen.

Weil sowohl am oberen als auch am unteren Ausgang des Klettgaus Gletscherzungen lagen, entstand im Klettgau eine Stausituation mit Seeablagerungen. Der erste Vorstoss (Hagenholz-Vorstoss) erreichte die Region Schaffhausen nicht, im folgenden (Löhningen-Vorstoss) erreichte der Bodensee-Rhein-Gletscher Löhningen. In einem weiteren Vorstoss, dem Engiwald-Vorstoss, hinterliess der Gletscher sehr komplex aufgebaute Lockergesteinskörper im oberen Klettgau. Dabei wurde der bisherige Zugang des Rhein-Systems zum Klettgau durch einen Schotterriegel verschlossen. In der folgenden Rückzugsphase wurde durch intensive Flusserosion das Entwässerungsnetz wiederum stark abgesenkt. Der Rhein jedoch fand sein altes Flussbett nicht mehr; der Engiwald-Riegel war offensichtlich zu massiv, um erodiert zu werden. Der Rhein wurde im Gebiet der Stadt Schaffhausen nach Süden abgelenkt, folgte aber damals noch der Urwerf-Rafzerfeld-Rinne. In einem erneuten Vorstoss (Langwiesen-Vorstoss) wurden diese neuen Rinnen jedoch wiederum mit Schotter verfüllt (Schaffhausen Schotter). Mit dem späteren vollständigen Eisrückzug wurde ein grosser Teil der Ablagerungen wieder erodiert. Es lag nun ein Entwässerungssystem vor, das im Wesentlichen der heutigen Verbreitung der Niederterrassen entsprach.

Mächtige Paläoböden zeugen von der nachfolgenden Warmphase. Aus dieser Zeit dürfte die Ablagerung des Flurlinger Kalktuffes stammen. Dieser 12 bis 15 m mächtige Kalktuff wurde bis Anfang des 20. Jahrhunderts als Baustein abgebaut. Es konnten zahlreiche Fossilien geborgen werden (Abb. 88; z. B. *Rhinoceros merckii*). Bereits 1716 erwähnt Johann Jakob Scheuchzer ein 1708 ausgegrabenes Hirschskelett aus der Fundstelle (Hünermann, 1985). Unter den Pflanzen dominieren Bergahorn und Buchsbaum (Guyan und Stauber, 1941; Heim, 1931; Hünermann, 1983; Meister, 1898; Wehrli, 1894). Radiometrische Altersdatierungen einer Probe aus einem losen Block ergaben ein Alter des Sediments von 102 000 ± 8000 Jahren (Graf, 2009 b).

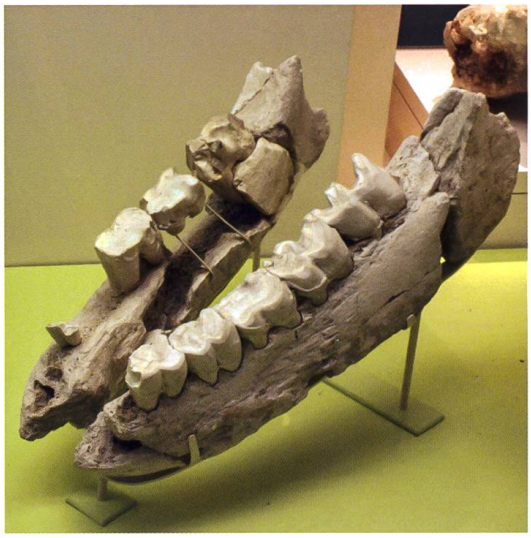


Abb. 88: Kiefer eines Waldnashornes, Kalktuff von Flurlingen. Museum zu Allerheiligen. Länge 40 cm.

Die schliesslich jüngste Eiszeit wurde ehemals als Würm und wird heute als **Birrfeld-Eiszeit** bezeichnet. In der unmittelbaren Umgebung der Stadt Schaffhausen wurde die Abfolge insbesondere der jüngsten Eiszeit sehr umfassend von Schindler (1985) dokumentiert. In einem ersten, nur in Bohrungen dokumentierten Gletschervorstoss (entspricht dem Lindmühle-Vorstoss im Reusstal) folgte ein Eisrückzug. Schindler erkannte, dass es aufgrund einer Stausituation zwischen zwei Gletscherlappen auf Stadtgebiet für längere Zeit zur Bildung eines Sees kam. Demnach hätte der im Süden des Kohlfirstes vorstossende, mit dem Thurgletscher vereinigte Teil des Rheingletschers den Rhein bis auf eine Höhe von 460 m ü. M., also 70 m über der heutigen Talsohle, hochgestaut. Der Gletscher wäre somit bis in den Bereich des Aazheimer Hofes vorgestossen. Das entspricht ungefähr dem Maximalstand der Gletscher der Birrfeld-Vereisung. Schindler (1985) fand

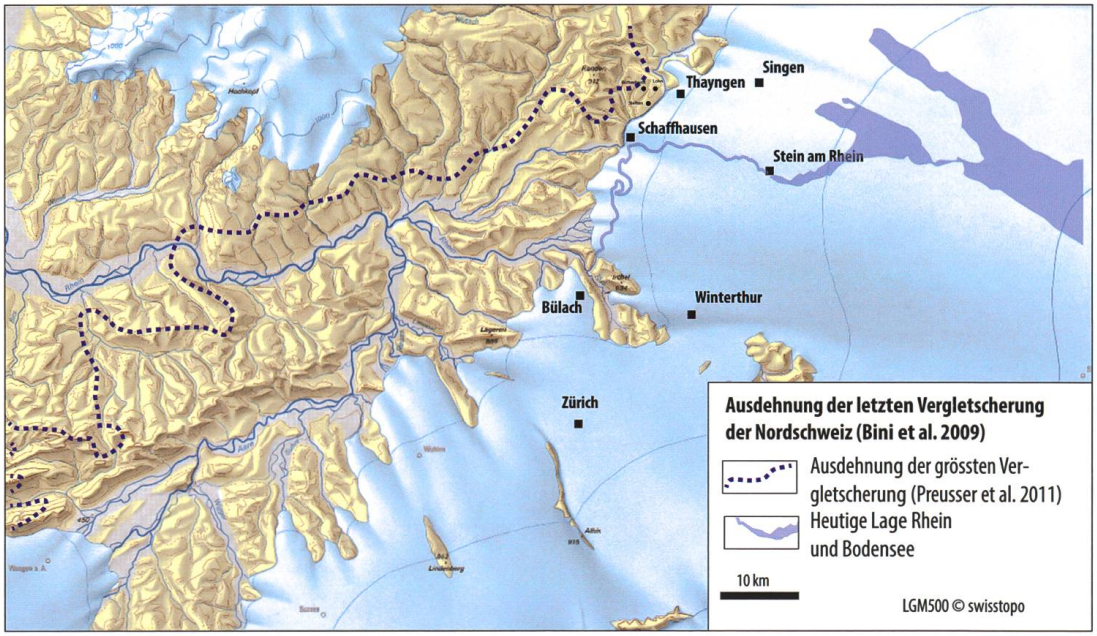
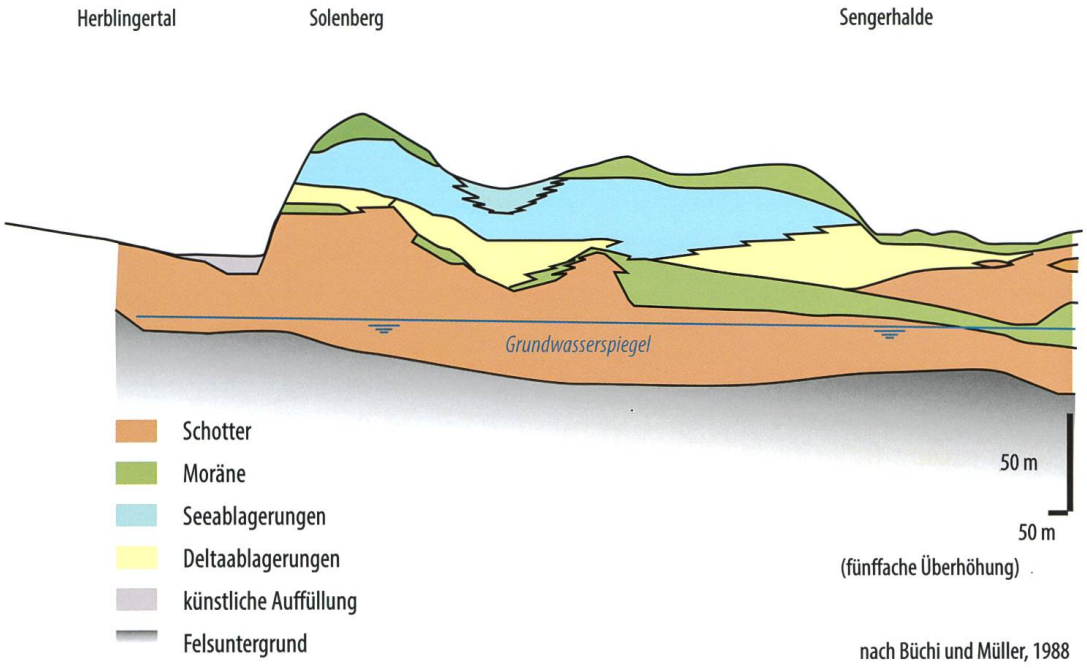


Abb. 89: Visualisierung der Eisausdehnung während der letzten Vergletscherung. Die Region Schaffhausen lag bei verschiedenen Vergletscherungsphasen jeweils kurz vor oder kurz hinter der Front der Maximalstände des Eises.



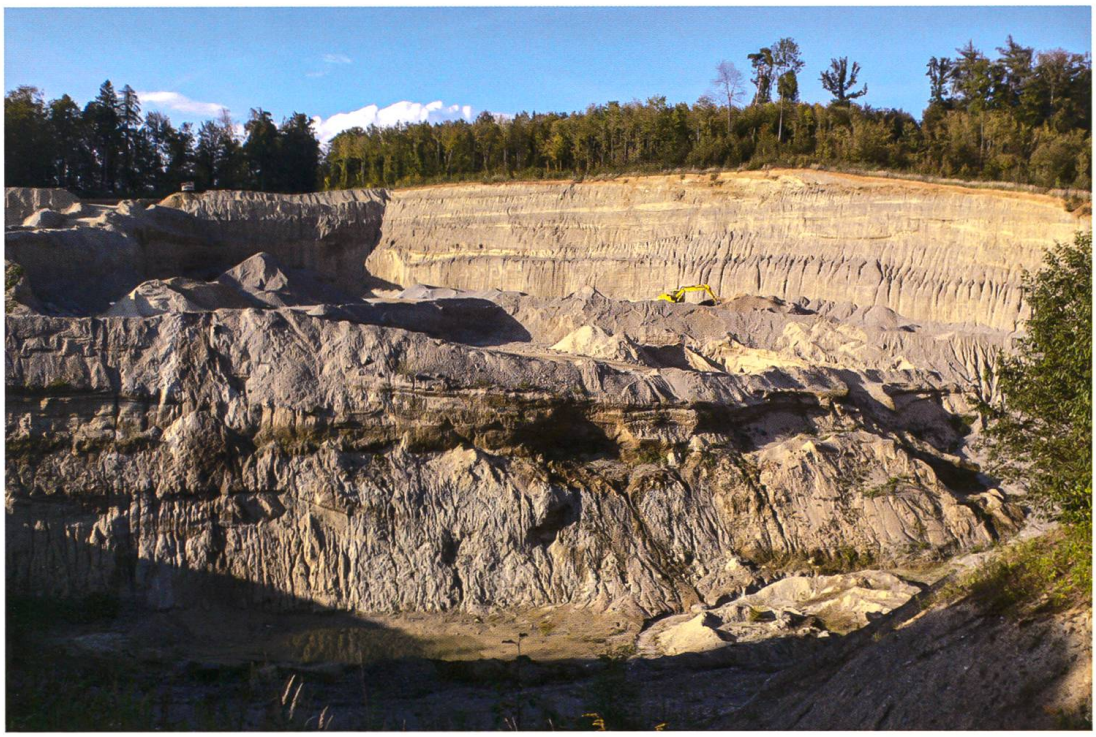


Abb. 90: Eiszeitliche Schotter werden an verschiedenen Stellen im Kanton Schaffhausen abgebaut. Eine solche Abbaustelle befindet sich am Solenberg. Sie erschliesst zwei durch eine Moränenschicht getrennte Schottervorkommen. Oben: Schematischer Querschnitt, unten: Ansicht der Grubenwand im Schotterkörper.

Hinweise auf «Eisbergsedimente» in den Seeablagerungen, also «Dropstones» bzw. Steine, die gelegentlich aus schmelzenden Eisbergen in das ansonsten feinkörnige Seesediment fielen. Das scheint zu bestätigen, dass der stauende Riegel tatsächlich aus Eis bestand. Der Autor schätzt, dass der See während einigen hundert Jahren Bestand gehabt haben dürfte. Der Ausfluss des Sees soll über den Durchbruch bei der Enge in den Klettgau erfolgt sein. Während dem Bestehen des Sees kam es in diesem Bereich zu keiner Ablagerung von Schotter. Der Thurlappen dürfte aber im Rafzerfeld und weiter talabwärts viel Kies geliefert haben (Schindler, 1985). Später scheinen sich die verschiedenen Gletscherlappen (Thurlappen, Singener Lappen, Steiner Lappen) vereint zu haben bzw. zusammengewachsen zu sein. Die Seesedimente wurden vom Eis überfahren (entspricht dem Birmenstorf-Vorstoss im Reusstal).
Obermoränen sowie Stirn- und Seitenmoränen sind aus dem Maximalstand der Birrfeld-Vergletscherung nur ansatzweise erhalten, so dass sich die genaue Lage des Eisrandes nur undeutlich abzeichnet. Obermoränenreste sind zwischen Charlottenfels und Hofstetten, zwischen Uhwiesen und Allenwinden und im Streifen zwischen Kantonsspital – Birchäcker – Unterholz nachweisbar. Während des Maximalstandes wurden auch die Randentäler (Merishausertal, Orserental, Freudental) abgeschnitten. Auch hier besteht die Möglichkeit einer temporären Seebildung. Tatsächlich wurden im Durachtal entsprechende Seeablagerungen festgestellt.
Das Rückschmelzen der letzteiszeitlichen Gletscher hinterliess in der Region Schaffhausen eine Reihe von absteigenden Schotterterrassen, die sich in der heutigen Topographie noch immer abzeichnen (Breiteterrasse, Stokar-Terrasse, Munot-Terrasse). Im Fulachtal («Singener Zunge des Rheingletschers» und im Rheintal («Steiner Zunge») dokumentieren Moränenwälle und Erosionsformen entlang der Fliesswege des Schmelzwassers das Zurückschmelzen. Relativ rasch scheint sich der Thurlappen zurückgezogen zu haben, so dass die Entwässerung während einer bestimmten Phase via Wangental in den Klettgau erfolgen konnte. Auch weiter südlich löste sich der Thurlappen von den Moränenwällen des Maximalstandes, und die Entwässerung wandte sich gegen Süden zum Durchbruch gegen die Tössmündung. Damit war die Schüttung gegen das Rafzerfeld beendet, das Erosionsniveau wurde rasch tiefer gelegt; unterhalb von Schaffhausen entstand ein starkes Gefälle mit intensiver rückschreitender Erosion. Pendelbewegungen der Gletscher sind durch Wallmoränen in den Regionen Andelfingen, Diessenhofen und Gottmadingen dokumentiert.

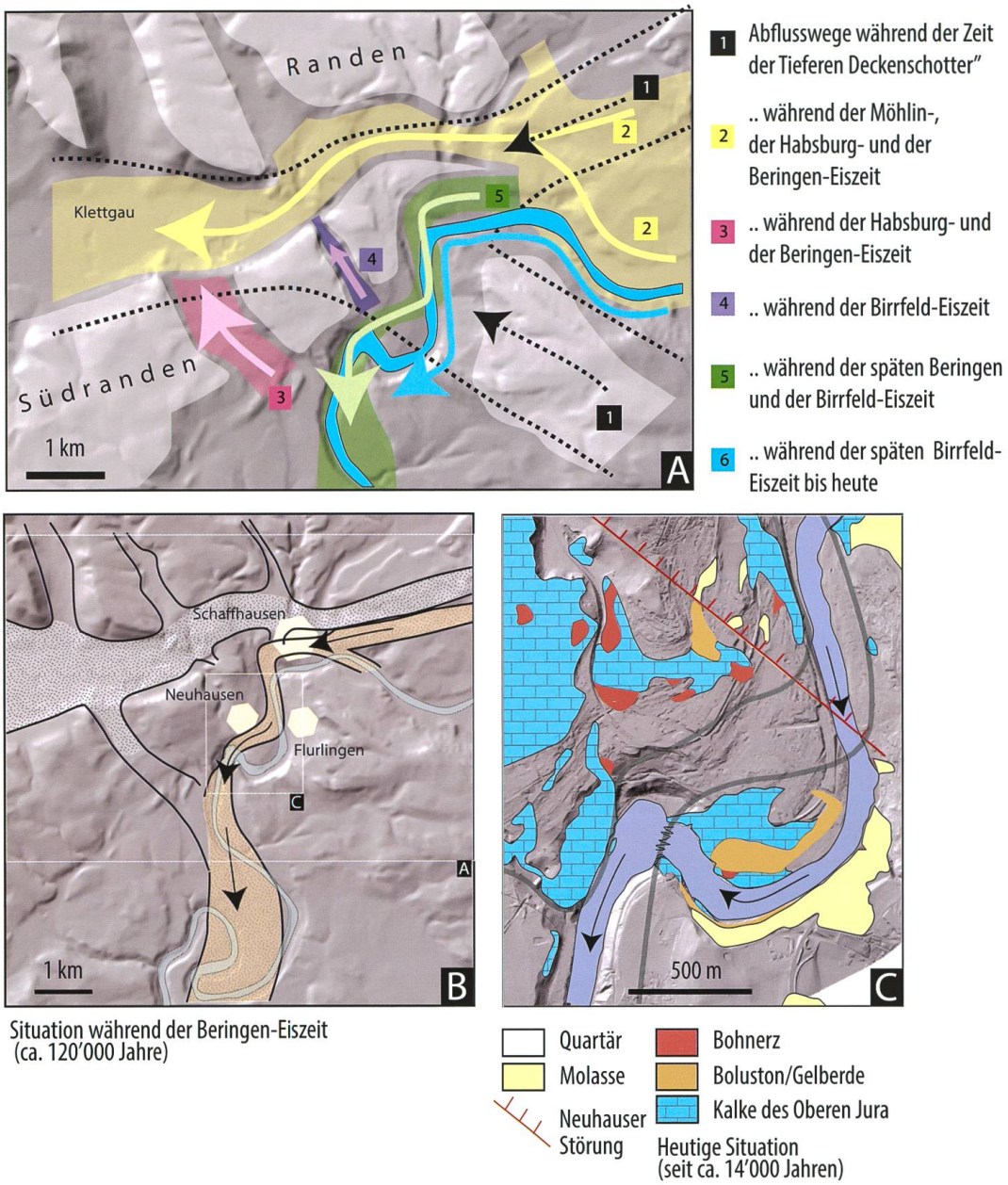


Abb. 91: Der Rheinfall ist wohl das klassische Beispiel einer eiszeitlich geprägten Umgestaltung der Topographie und des Entwässerungssystems. (A) regionale Situation, (B) die wichtigsten Entwässerungsrinnen während der Beringen-Eiszeit und (C) die heutige Situation. Nach Heim (1931), Keller und Krayss (2010) und Preusser (2011): Relief: Swisstopo.

Kurzloch und Langloch

Nordwestlich des Fulachtales verläuft eine Serie von schluchtartigen Tälchen, die sich wie eine Perlenkette bis in das Gebiet der Stadt Schaffhausen fortsetzt. Die bekanntesten Abschnitte sind Kurz- und Langloch bei Thayngen sowie das Felsentäli in der Stadt Schaffhausen. Kurz- und Langloch sind heute Trockentälchen, denn die Entwässerung erfolgt heute durch das parallel dazu liegende Fulachtal. Diese Tälchen sind tief in den Felsuntergrund eingeteuft; viel tiefer als heute noch sichtbar, denn die Felsoberfläche liegt gemäss einer Bohrung im Langloch noch 40 m tiefer als die heutige Geländeoberfläche. Im Felsentäli sind tief in der markanten Spalte sogar noch eigentliche Gletschertöpfe erhalten geblieben. Diese sind aber in der Regel aufgrund der eingeschwemmten Materialien nicht sichtbar.

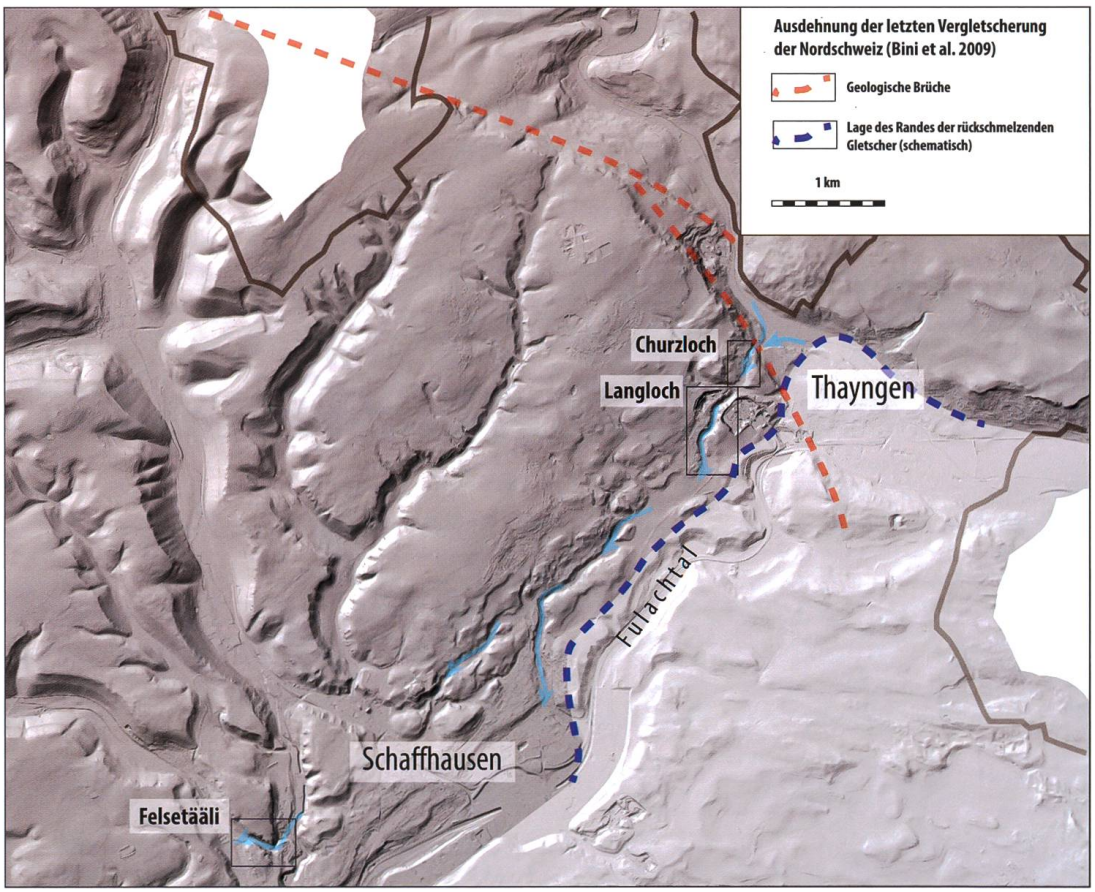


Abb. 92: Spektakuläre Erosionsformen, angelegt durch Schmelzwasserrinnen der vermutlich vorletzten und letzten Vergletscherungen verlaufen parallel zum Fulachtal in Richtung Rhein.

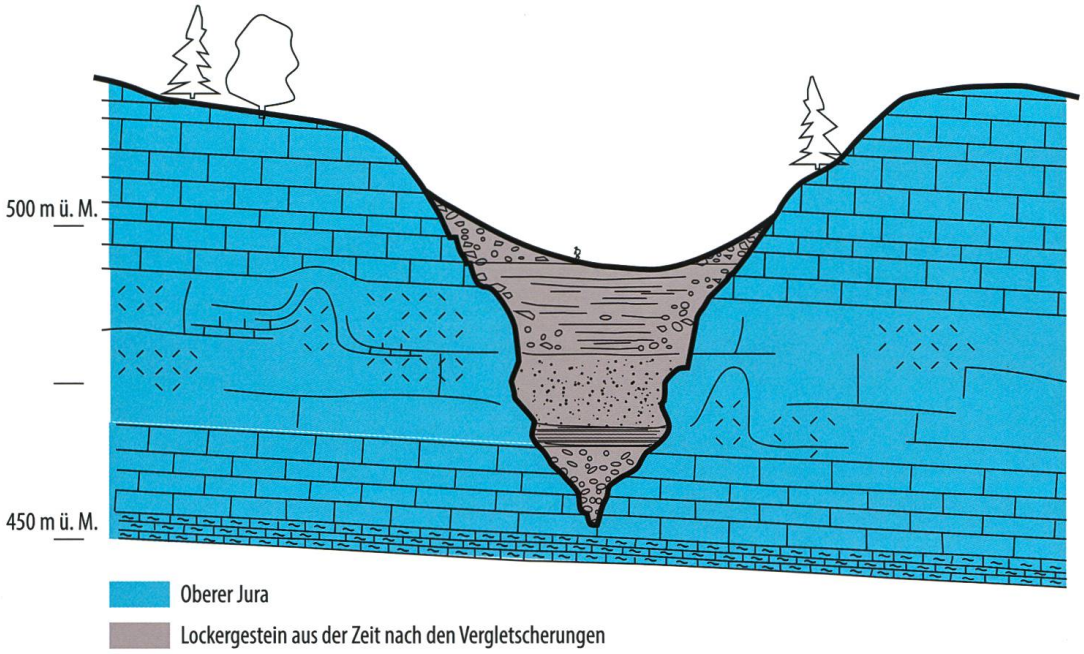


Abb. 93: Das Langloch ist eigentlich bereits jetzt mit seiner Topographie eine beeindruckende Struktur. Doch erst wenn man berücksichtigt, dass es inzwischen wieder zu zwei Dritteln aufgefüllt ist, erschliesst sich einem die wahre Dimension. Nach Bericht der Dr. U. Büchi SIA, 1977.

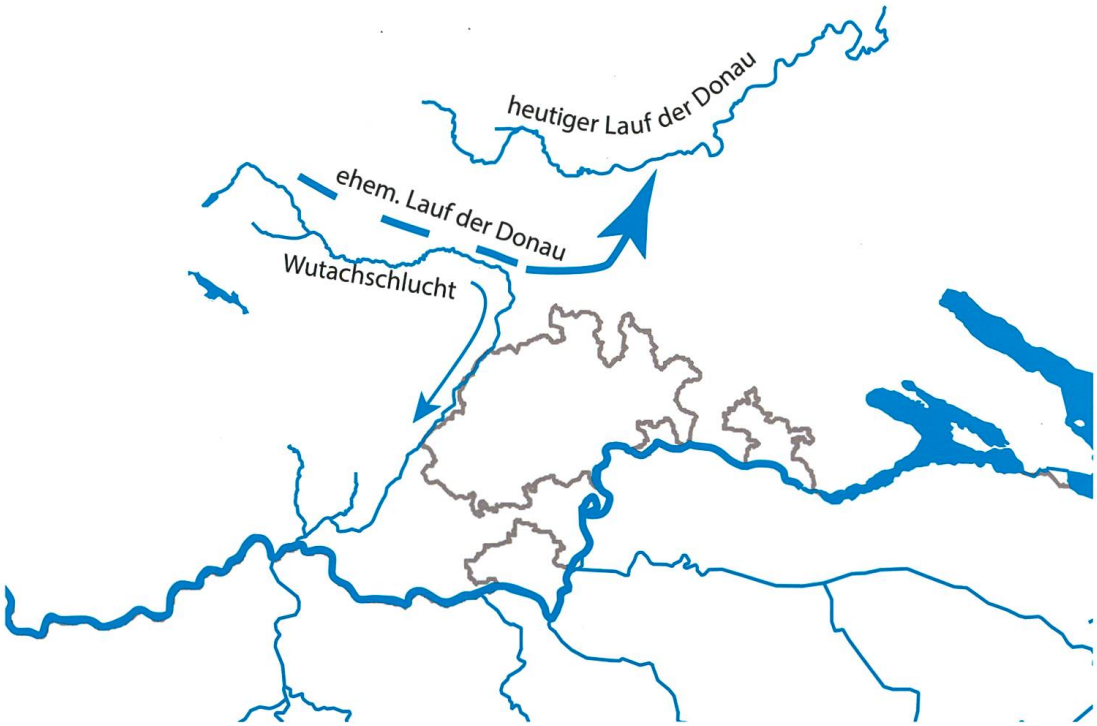


Abb. 94: Die Umlenkung der Wutach vor rund 18 000 Jahren vergrösserte das Einzugsgebiet des Rheins zu Lasten desjenigen der Donau.

Im Zuge der raschen Erosion unterhalb von Schaffhausen fand der Rhein sein ursprüngliches Bett nicht überall wieder. Er wich zur linken Talflanke hin aus, erodierte dort bis auf den harten Malmkalk und stürzt am heutigen Rheinfall in sein altes Bett.
Dank des Bodenseebeckens ist heute das Rheinwasser bei Schaffhausen arm an Geröll und Sand. Die erosive Wirkung des Wassers ist damit stark eingeschränkt, und der Rheinfall hat sich daher seit seiner Entstehung kaum flussaufwärts verschoben, er ist weitgehend stabil, gleichwohl wurden die Felszähne 1879 bzw. 1985 mit künstlichen Massnahmen geschützt.

Umlenkung der Wutach

Am Oberlauf der Wutach fällt die eigenartige, fast alpine Geländeform auf: In der von sanften Hügeln geprägten Landschaft öffnet sich plötzlich eine tiefe, schroffe Schlucht. Dieser «geomorphologische Bruch» liegt in der erdgeschichtlichen Entwicklung begründet: Der Oberlauf der Wutach floss einst der Donau zu bzw. bildete den Oberlauf der damaligen Donau. Die Donau floss in dieser Zeit vom Titisee parallel zur heutigen Wutach Richtung Blumberg, dort folgte sie dem Lauf der heutigen Aitrach bis in die Region von Geisingen bzw. Hausen ins heutige Donautal. Das Erosionsniveau des Einzugsgebietes der nach Osten entwässernden Donau lag deutlich höher als jenes des nach Westen bzw. nach Norden entwässernden Rheins. Diese Niveaudifferenz führte dazu, dass die Zuflüsse des Rheins durch rückschreitende Erosion zunehmend das Einzugsgebiet der Donau «parasitierten». So dehnte ein kleiner Zufluss des Rheins, der dem heutigen Unterlauf der Wutach entspricht, sein Einzugsgebiet zunehmend nach Norden aus. Vor rund 18 000 Jahren, also gegen Ende der letzten Eiszeit, war es dann so weit: der kleine Rheinzufluss schuf im Bereich von Achdorf einen Abfluss des Oberlaufs der damaligen Donau, dieser wurde in das Einzugsgebiet des Rheins integriert. Durch die grosse Höhendifferenz setzte nun eine starke und rasche Erosion ein. Bereits rund 6000 Jahre später hatte die Wutach im Bereich von Bad Boll annähernd ihr heutiges topographisches Niveau erreicht; das Flüsschen hatte sich also mit einer Erosionsrate von rund 25 m pro tausend Jahre in den Untergrund eingetieft. Das ehemalige Donautal bei Blumberg fiel trocken, und der kleine Bach der Aitrach kann dem grossen breiten Tal heute kaum noch gerecht werden.

9. Rohstoffe

Die Gewinnung von Rohstoffen war und ist eine wichtige Grundlage für die industrielle Entwicklung der Region Schaffhausen. Während einige Rohstoffe eher kleinräumig ausgebildet waren und wenig Einfluss hatten, waren andere wie beispielsweise das Bohnerz von prägender Bedeutung und mit Einfluss weit über die Grenzen der Region hinaus. Die folgende Liste ist nicht abschliessend und soll lediglich einen Eindruck von der Vielfalt an Rohstoffen und Verwendungen vermitteln.

9. 1 Doggererze

Oolithisches Eisenerz aus dem Mittleren Jura wurde im Durachtal ab dem frühen Mittelalter bis ins Hoch- uns Spätmittelalter abgebaut und in Rennöfen verhüttet. Davon zeugen diverse archäologische Funde aus Bargen, Merishausen und dem verschwundenen Dorf Berslingen (Bänteli et al., 2000). Das entsprechende Gestein wurde schon in historischer Zeit auch in Blumberg auf der Baar abgebaut und ab 1661 in einem Hüttenwerk verarbeitet. Allerdings blieb der Durchbruch aufgrund von Qualitätsproblemen und Schwierigkeiten mit der Wasserversorgung vorerst aus. Im Rahmen der nationalsozialistischen Autarkiepolitik wurde 1937 bis 1942 durch die Doggererz-Bergbau GmbH bzw. Doggererz AG das lokale Eisenerz abgebaut. Es gelang jedoch nicht, das Bergwerk wirtschaftlich zu betreiben, und als die anfänglichen Erfolge der deutschen Wehrmacht den Zugriff auf höherwertige Eisenerzlagerstätten ermöglichten, wurde das Bergwerk in Blumberg stillgelegt. Doch die wenigen Jahre haben die ursprünglich landwirtschaftlich geprägte Ortschaft strukturell tiefgreifend verändert. Auch bei Bargen, Merishausen und Beggingen wurden die Vorkommen während des zweiten Weltkrieges untersucht. Doch die geringe Mächtigkeit und der lediglich bei maximal 24% liegende Eisengehalt erfüllten die Erwartungen nicht (Hübscher, 1948).

9. 2 Bohnerz

Bohnerz wurde in der Region bereits in der Eisenzeit abgebaut und spielte in der Neuzeit für die industrielle Entwicklung der Region Schaffhausen eine zentrale Rolle (z. B. Wunderlin, 2019). Dies hat Ch. Birchmeier in einem früheren Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft eingehend beschrieben (Birchmeier, 1985). Die lagerstättenkundlichen Aspekte wurden von Franz Hofmann beleuchtet (Hofmann, 1991). Die gewaschenen Erzbohnen bestehen aus den Eisenhydroxiden Goethit und Limonit und wei-

Abb. 95: Unzählige Bohnerzgruben zeugen insbesondere auf dem Südranden vom intensiven Abbau. Heute dienen die Löcher, die oft mit Wasser volllaufen, als wichtige Biotope für Amphibien.

sen einen Eisengehalt von 40–45% auf. Hofmann (1991) schätzt, dass das Bohnerz in gegen tausend kleinen Löchern von kaum mehr als 10 m Durchmesser gewonnen wurde. Hauptabbaugebiete waren der Lauferberg, Wasenhau, mittlerer und hinterer Häming, Wannen- und Rossberg und die Gegend des Frankegrabens und Ettengrabens in Jestetten (Hofmann 1991). Ein kleineres Vorkommen befand sich in der Gegend Pantli WSW von Stetten. Der neuzeitliche Abbau begann im 16. Jahrhundert, war aber zwischen 1678 und 1770 bzw. zwischen 1802 und 1850 am intensivsten. Das Erz wurde in der Eisenschmelze Eberfingen und ab 1693 im Hochofen am Rheinfall verhüttet. Die Geschichte der Region Schaffhausen hätte ohne diesen vor allem im 19. Jahrhundert zentralen Rohstoff zweifellos eine andere Wendung genommen. Entsprechend weit reicht auch das wissenschaftliche Interesse an Zusammensetzung und Entstehung zurück (z. B. Fol, 1856–1858).

9. 3 Gips

Gips wurde sowohl aus den Vorkommen des Muschelkalkes (Untertagebau) als auch aus jenen des Keupers (Tagebau) gewonnen, nicht nur in der Gegend Schleitheim-Beggingen, sondern auch bei Grimmelshofen und der Unteren Mühle in Weizen zeugen zerfallende Mundlöcher vom Abbau. Das bedeutendste Bergwerk dürfte dasjenige von Oberwiesen gewesen sein. Abgebaut wurde im Zeitraum 1790 bis 1904 bzw. 1944 (Hofmann, 1981). Der Gips wurde vor allem zu Düngezwecken verwendet. Zur Zeit der Hochblüte waren rund 120 bis 150

Abb. 96: Eine szenische Installation im Gipsmuseum Schleitheim soll die harte Arbeit der Gips-Bergleute verdeutlichen.

Personen im Gipsgewerbe beschäftigt und um die 100 Pferde standen für die Transporte zu den Abnehmern im Einsatz. Die grösste Abbaumenge wurde im Jahre 1860 mit 180 000 Zentnern (rund 9000 Tonnen) erreicht (Stössel et al. 2005)

9. 4 Ton

Ton ist der Rohstoff für die Vielzahl von keramischen Produkten, die den Menschen seit Urzeiten begleiten: von Gefässkeramik über Baukeramik bis zur technische Keramik, die heute neue feuerfeste Werkstoffe erschliesst. Auch in der Region Schaffhausen wurden verschiedene Tonqualitäten abgebaut bzw. verarbeitet. Boluston, der aufgrund seiner Entstehung eng verknüpft mit dem Bohnerz auftritt, diente mit seinem Hauptbestandteil Kaolinit als Ausgangsprodukt für die lokale Keramikindustrie und wurde zum Beispiel beim Färberwisli (Beringen) und in Stetten abgebaut. Ebenfalls wurde der Bänderton für Ziegeleizwecke westlich von Hofen und nordwestlich von Bibern abgebaut. Aus der «Brackwassermolasse» von Lohn wurden vom 17. bis ins 20. Jahrhundert Gebäckmodel hergestellt (Widmer und Stähelin, 1999). Weitere lokale Vorkommen unterschiedlicher Tone (Grundmoränenlehm, Gehängelehm usw.) wurden an verschiedenen Orten der Region meist lokal genutzt.
Opalinuston wird u. a. noch heute in Siblingen (Grube Birchbühl), sowie Ton aus der Oberen Bunten Moasse (USM) in Buchberg (Grube Sollbühl) als Rohstoff für die Ziegeleiindustrie (heute vorwiegend Backsteine) gewonnen. Allerdings ist die Nachfrage in den letzten Jahrzehnten stark zurückgegangen. Diese Baustoffe werden zunehmend durch andere Substanzen (z. B. Beton) bzw. neue Bauweisen (Flachdach) konkurrenziert. In Beggingen (im Raa) wurde zudem der Obtususton ebenfalls als Ziegeleirohstoff abgebaut.
Ton in Verbindung mit Kalk wird als Mergel bezeichnet. Mergel ist ein wichtiger Rohstoff für die Zementindustrie. Entsprechende Ausgangsmaterialien wurden in der Region Schaffhausen insbesondere um Thayngen abgebaut: In der Tongrube Almenbühl bzw. Biberegg waren das Mergel der Unteren Süsswassermolasse.

9. 5 Sand

Der Quarzsand von Benken und Wildensbuch wurde vor allem in der Glasherstellung und als Giessereisand in Schaffhausen, aber auch als Schleifsand, Streusand für Lokomotiven, Gussasphaltzuschlag, in Sportanlagen, für Verputze und anderes verwendet. Der Abbau war schwierig, da bis 20 m überlagernde Schichten abgetragen werden mussten.

9. 6 Kalk

Kalksteine wurden einerseits für die Herstellung von Bausteinen, andererseits aber auch in der Zementindustrie und lokal für metallurgische Zwecke (Giesserei im Mühlental) verwendet. Für Bausteine in historischer Zeit ist der Steinbruch Mühlenen von herausragender Bedeutung. In der Zementindustrie ist beispielsweise der Steinbruch Wippel in Thayngen oder der Abbau von Muschelkalk östlich von Grimmelshofen zu erwähnen.

9. 7 Kies

Kiesabbau ist heute ein wichtiges Standbein der Bauindustrie. Auch wenn künftig die Stoffkreisläufe für Baustoffe zunehmend geschlossen werden, die Nachfrage nach primärem Material wird auch für die nächsten Jahre und Jahrzehnte voraussichtlich gross bleiben. In der Region sind die vergleichsweise umfangreichen Vorkommen von fluviglazialem Kies (Nieder- und Hochterrassenschotter) daher von grosser Bedeutung: Klettgau und Rafzerfeld beherbergen nach wie vor regional wichtige Reserven. Die Flächen, die für einen Abbau zur Verfügung stehen, sind jedoch begrenzt: Die grossen Kiesvorkommen sind sozusagen aufgrund ihrer Entstehung an die wichtigen Grundwasservorkommen und an das fruchtbare Landwirtschaftsland gebunden. Zielkonflikte sind damit vorgezeichnet und müssen mit raumplanerischen Instrumenten entschärft werden. Der Abbau von Kies ist sehr direkt an die Aktivität in der Bauindustrie geknüpft, und die Schaffung von Versorgungssicherheit wird durch die entsprechenden Prognose-Schwierigkeiten erschwert. Zur Zeit werden in Schaffhausen jährlich rund 300 000 m^3 Kies und Sand abgebaut. Die Abbaustellen werden in der Regel wieder mit sauberem Aushubmaterial aufgefüllt. Nach wie vor ist auch das zur Verfügung stehende freie Auffüllvolumen ein gesuchter Rohstoff.

Abb. 97: Kiesgrube Solenberg bei Schaffhausen

9. 8 Energierohstoffe

Im Zweiten Weltkrieg bestand in der Deutschen Wehrmacht eine enorme Nachfrage nach Mineralöl. Verschiedene Gesellschaften bzw. Organisationen

bemühten sich, ein Verfahren zur Ölgewinnung aus Ölschiefer zu entwickeln. Dabei wurden unterschiedliche, aber bis zuletzt wenig ergiebige Verfahren untersucht. Im Juli 1944 wurde das «Unternehmen Wüste» beschlossen: Aus dem Posidonienschiefer der Schwäbischen Alb sollte trotz unbefriedigender Ergebnisse früherer Versuchsanlagen Mineralöl gewonnen werden. Innerhalb kürzester Zeit wurde der Bau von zehn Ölschieferwerken vorangetrieben. Für den Abbau wurden vor allem KZ-Häftlinge eingesetzt. Dazu wurden mehrere Lager aufgebaut, über 10 000 Häftlinge wurden von der SS hier eingesetzt. Davon starben mindestens 3480.

Die hochgesteckten Ziele wurden nicht erfüllt. Nur vier von zehn Werken gingen vor Kriegsende in Produktion, die Ausbeute war gering und das Öl qualitativ minderwertig. Nach Kriegsende wurde durch die französische Besatzungsmacht ein Versuch unternommen, das Unternehmen noch weiter zu entwickeln. Doch die Ausbeute war zu gering, und 1949 wurden die Gesellschaften aufgelöst.

Auch in der Schweiz war die Verknappung der Treib- und Heizstoffe während des Krieges eine Herausforderung. So wurden in den Jahren 1940 und 1941 Proben von Posidonienschiefer aus Beggingen und Siblingen zuerst im Gaswerk Schaffhausen und anschliessend an der Eidgenössischen Materialprüfungs- & Versuchsanstalt (EMPA) untersucht. Leider lautete die Schlussfolgerung der Empa ernüchternd: «Auf Grund dieser Feststellungen betrachten wir das untersuchte Material für die Herstellung von Leuchtgas und für die Verwendung als Brennmaterial als nicht geeignet». 1943 erfolgte ein weiterer Test an Posidonienschiefer aus Gächlingen. Mit einer Ausnahme (3,15%) lagen die Werte für den öligen Anteil bei weniger als 1%. Der Posidonienschiefer ist damit weniger bituminös als derjenige in Baden-Württemberg.

In jüngerer Vergangenheit kam der Posidonien-Ölschiefer wieder ins Gespräch, als eine englische Firma Interesse anmeldete, die Schiefergasvorkommen im Bereich des Bodensees zu untersuchen. Der Widerstand gegen dieses Vorhaben ist jedoch aufgrund von Umweltbedenken sehr gross, und eine Realisierung in absehbarer Zeit wenig wahrscheinlich.

9. 9 Der wichtigste Rohstoff: Wasser

Die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser ist ein zentraler Pfeiler der Gesellschaft. Im Jahr 2016 betrug der tägliche Wasserverbrauch in der Schweiz 299 Liter pro Kopf, bei leicht sinkender Tendenz. Die Geschichte der Wasserver- und -entsorgung und die historische Entwicklung der Städte und Dörfer sind eng verknüpft. Bänteli (2009) zeigt das am Beispiel der Stadt

Schaffhausen auf. Das Grundwasser ist heute für uns die wichtigste Trinkwasserquelle und zählt damit zu den wichtigsten Rohstoffen generell. Dem Schutz vor Verschmutzungen wird grosses Gewicht beigemessen. Einträge durch belastete Standorte, Stör- und Unfälle, Rohstoffabbau, Deponien, Kläranlagen und landwirtschaftliche Nutzung werden intensiv untersucht und weitgehend minimiert bzw. verhindert. Die Trink- und Grundwasserverhältnisse in der Region Schaffhausen wurden daher schon früh in umfassenden Übersichten eingehend beschrieben (z. B. Hübscher, 1951; Meister, 1907; Meister, 1926/1927; Müller, 1997; Strauss, 1972).

Bis 1875 erfolgte die Versorgung der Schaffhauser Bevölkerung nur durch Quellwasser (Müller, 1997). Anschliessend wurden aber in rascher Folge Grundwasserfassungen erstellt und in Betrieb genommen (Rheinfallbecken in Neuhausen am Rheinfall: 1872/1875, Engistieg: 1885, Brauerei Falken: 1900, Merishausen: 1907, Rheinhalde: 1907, IVF: 1908). Mit zunehmender Beeinträchtigung der Qualität des Wassers wuchsen ab den 1960er Jahren auch die Anstrengungen zum planerischen Schutz der Grundwasservorkommen. Heute werden dazu u. a. Gewässerschutzbereiche, Grundwasserschutzareale, Grundwasserschutzzonen und Zuströmbereiche ausgeschieden.

Abb. 98: Wenn durch Grundwasser gelöste Hohlräume in Gestein (normalerweise Kalk- oder Evaporitgestein) einstürzen, können Löcher bis zur Oberfläche durchbrechen. Im Bild eine kleine Doline in Büttenhardt.

Bei uns kommt Grundwasser entweder im Lockergestein oder aber im Karst vor. Unter **Karst** versteht man durch Lösungserscheinungen gebildete unterirdische (Karsthöhlen) oder oberirdische Geländeformen (Oberflächenkarst). Anfällig dafür sind Gesteine aus Kalk, Dolomit, Gips und Steinsalz, also Gesteine, die teilweise auch in der Region Schaffhausen reich vertreten sind. Durch über geologische Zeiträume durch Risse und Spalten einsickerndes Wasser können grössere, zusammenhängende Höhlensysteme entstehen, durch die das Wasser zirkuliert. Es entstehen dadurch eigentliche unterirdische Bachläufe mit hohen Fliessgeschwindigkeiten (bis ca. 15 km/Tag). Die genauen Fliesswege sind oft nur schwer bestimmbar. Die Verweil-

zeit des Wassers im Untergrund ist unter Umständen sehr gering, die Reinigungsleistung klein. Karstquellen sind daher qualitativ oft problematisch. Daher werden diese Quellen für die Trinkwassernutzung heute möglichst gemieden, und in Schaffhausen ist die Verwendung von Karstwasser nur noch von untergeordneter Bedeutung.
Im Kanton Schaffhausen betrifft der Karst vor allem die Malmkalke und die Gesteine des Muschelkalkes, wobei die Malmkalke noch in den höheren und tieferen Malm getrennt werden können. Durch die dazwischenliegenden tonigen Gesteine (Schwarzbach-Schichten im Oberen Jura, sowie fast generell die Schichten des Mittleren und Unteren Juras) können diese «Stockwerke» über weite Bereiche als getrennt betrachtet werden. Die Karstgrundwasserkörper werden durch die Topographie der Felsoberfläche gegliedert. Dort, wo die Felsoberfläche den Karstgrundwasserkörper schneidet, kann aber natürlich auch ein Austausch zwischen dem Lockergesteinsgrundwasser und dem Karstwasser erfolgen. So kann im genutzten Lockergesteinsgrundwasser in Thayngen Wasser nachgewiesen werden, das aus der im Karst erfolgenden Versickerung der Donau stammt. Auch im Klettgau kann erwartet werden, dass ein Teil des Lockergesteinsgrundwassers unterirdisch in den Karstgrundwasserkörper des Südrandens übertritt.
Dort, wo die entsprechenden Gesteinskörper sehr tief liegen (betrifft bei uns vor allem den Muschelkalk, der nach Südosten abtaucht), kann das Wasser schon sehr alt, stark mineralisiert und je nach Tiefe temperiert vorliegen. Dieses Thermalwasser kann für die thermische Nutzung bzw. die Energiegewinnung sehr interessant sein (z. B. Bohrungen des Gemüsebaubetriebes Grob in Schlattingen).
Für die Trinkwasserversorgung sehr viel zentraler ist das **Grundwasser im Lockergestein**. Hier fliesst das Wasser im Porenraum von Kies und Sand. Die Fliessgeschwindigkeit hängt damit ganz wesentlich vom verfügbaren Porenraum ab. Kiese und Sande wirken als Filter und haben dadurch eine hohe Reinigungswirkung. Viele Verunreinigungen werden an den Oberflächen der Mineralien adsorbiert, werden oxidiert oder anders chemisch aufgeschlossen bzw. abgebaut. Grundwasser, das aus Lockergesteinen gefördert wird, ist daher in der Regel sehr rein. Allerdings gibt es gewisse Substanzen, die diese Filter unbeschadet durchlaufen. Dies betrifft beispielsweise das Nitrat oder aber auch eine Reihe von Pflanzenschutzmitteln.
Die Grundwasserläufe im Lockergestein folgen den geologischen Schotterkörpern und sind daher eng an die geologische Geschichte geknüpft. In

Schaffhausen lassen sich anhand der Grundwasservorkommen beispielsweise die ehemaligen Verläufe des Rheins kartieren (Abb. 99).
Die für die Versorgung wichtigsten Grundwasserkörper liegen im oberen Bibertal (zwischen Hofen und Thayngen), im unteren Bibertal (Buch/Ramsen bis Hemishofen), zwischen Thayngen und Schaffhausen («Schaffhauser Rin-

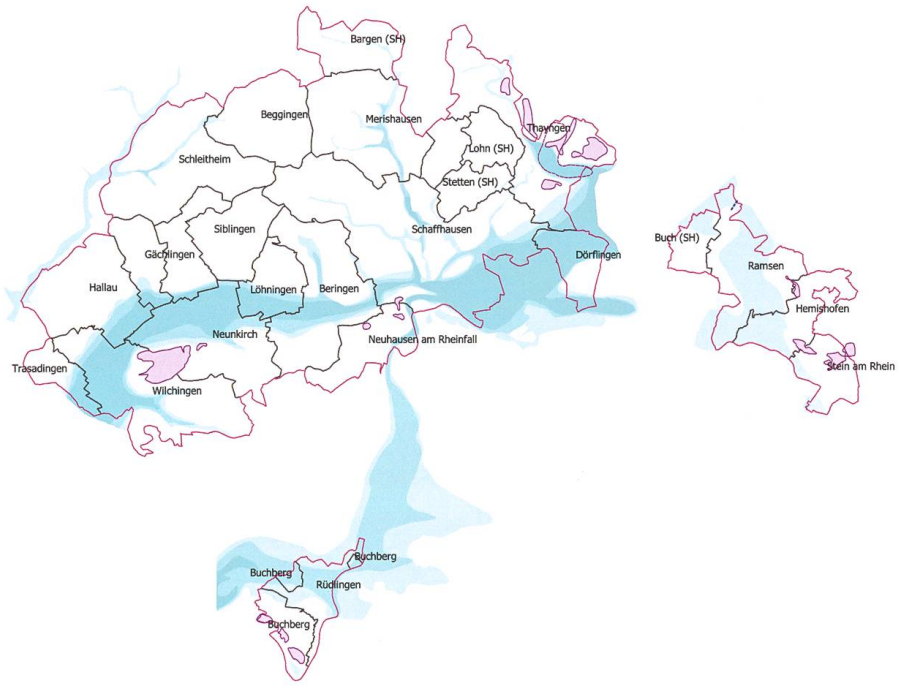


Abb. 99: Die Grundwasserkarte des Kantons Schaffhausen und seiner angrenzenden Gebiete verdeutlicht, wie die grossen Grundwasserströme der Region noch heute den alten, längst trocken gefallenen Tälern des Rheins folgen: zum Beipiel im Klettgau oder im Rafzerfeld.

nenschotter»), im Klettgau und entlang des Rheins bis ins Rafzerfeld. In einigen Fällen können mehrere Stockwerke von Grundwasserkörpern unterschieden werden. So verläuft beispielsweise ein genutztes Grundwasservorkommen im sogenannten Binninger Rinnenschotter in einem tieferen Stockwerk als das «normale» Talgrundwasser des Bibertals. Es wird in den Grundwasserfassungen «Büten» und «Merzenbrunnen» erschlossen. Die einzelnen Schotterkörper unterscheiden sich natürlich in ihrer Zusammensetzung und damit auch in ihrer Durchlässigkeit.
Die Lockergesteinsgrundwasservorkommen unterstehen oft einem doppelten Zielkonflikt. Einerseits liegen diese Vorkommen naturgemäss im Bereich, in

dem qualitativ hochstehende und für die Bauindustrie wertvolle Kies- und Sandvorkommen konzentriert sind. Dies lässt sich beispielsweise im Klettgau beobachten: Im Untergrund fliesst der regional wichtige, grenzüberschreitende Grundwasserfluss des Klettgaus, an der Oberfläche werden Kies und Sand an diversen Stellen abgebaut. Doch dem Grundwasserschutz wird hoher Schutzstatus eingeräumt: Die Abbausohle muss mindestens 5 m über dem höchsten festgestellten Grundwasserspiegel liegen, Material zur Wiederauffüllung der Kiesgruben untersteht einer strengen qualitativen Kontrolle.
Auch der zweite Zielkonflikt lässt sich am Klettgauer Grundwasserstrom aufzeigen: Die Kiesvorkommen liegen oft unter fruchtbaren und landwirtschaftlich wertvollen Flächen. Durch Einträge von Stickstoffdünger und Pflanzenschutzmitteln, die über den Sickerwassertransport ins Grundwasser gelangen

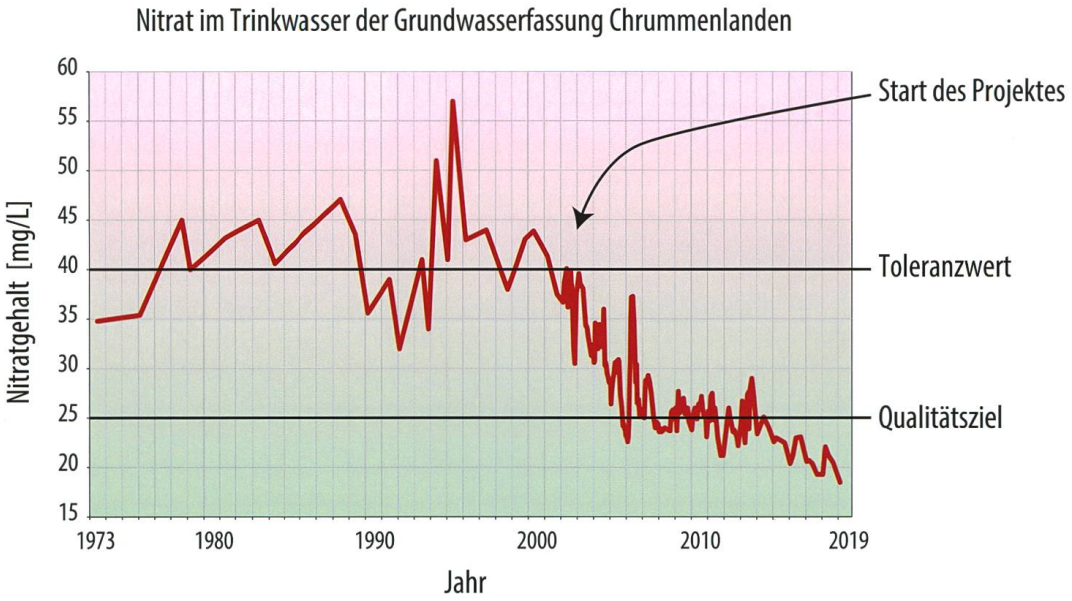


Abb. 100: Die Kurve der Nitratkonzentration im Grundwasserpumpwerk Chrummenlanden (Neunkirch/Gächlingen). Massnahmen im Einzugsgebiet resultierten in einem raschen Rückgang der Konzentration.

können, besteht eine qualitative Gefährdung des Grundwassers. So wurden im Klettgau vor einigen Jahrzehnten stark erhöhte Nitratwerte festgestellt. Das Wasser des Grundwasserpumpwerkes Chrummenlanden durfte zeitweise nicht mehr ins Trinkwassernetz eingespeist werden (Abb. 100). Durch Einschränkungen in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung konnte dank gemeinsamem Engagement von Landwirten, Gemeinden, Kanton und Bund dann aber in erfreulich kurzer Zeit die für die Trinkwassernutzung notwendige Qualität des Grundwassers wieder erreicht werden; heute ist das besagte

Grundwasserpumpwerk ein wichtiges Standbein der Trinkwasserversorgung des Klettgaus.

Das Grundwasservorkommen im Klettgau ist in mehrfacher Hinsicht interessant. Es fliesst in einem Schotterkörper, der seinen Anfang in der Stadt Schaffhausen/Breite hat, via Engewald in den Klettgau zieht und schliesslich den ganzen schweizerischen und deutschen Klettgau im Untergrund begleitet, bevor es sich bei Waldshut mit dem Grundwasservorkommen des (heutigen) Rheins vereinigt. Aufgrund der geologischen Geschichte (Riegel des Engewald-Komplexes) scheint der quantitative Einfluss vom Stadtgebiet Schaffhausen her gering zu sein; der ganze Grundwasserkörper steht daher in seinem Oberlauf nicht

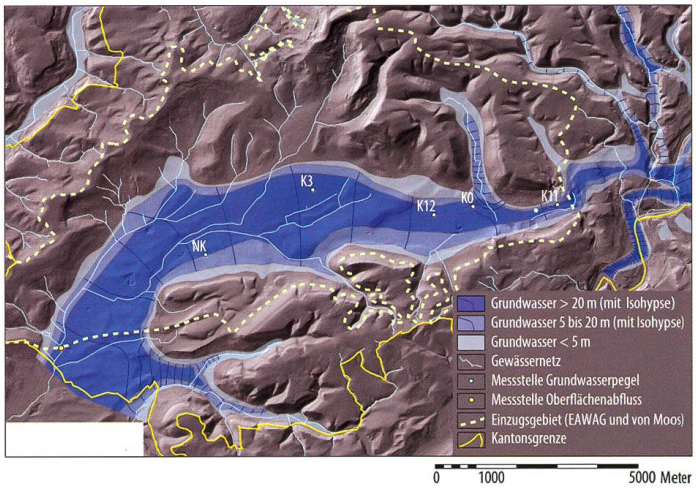
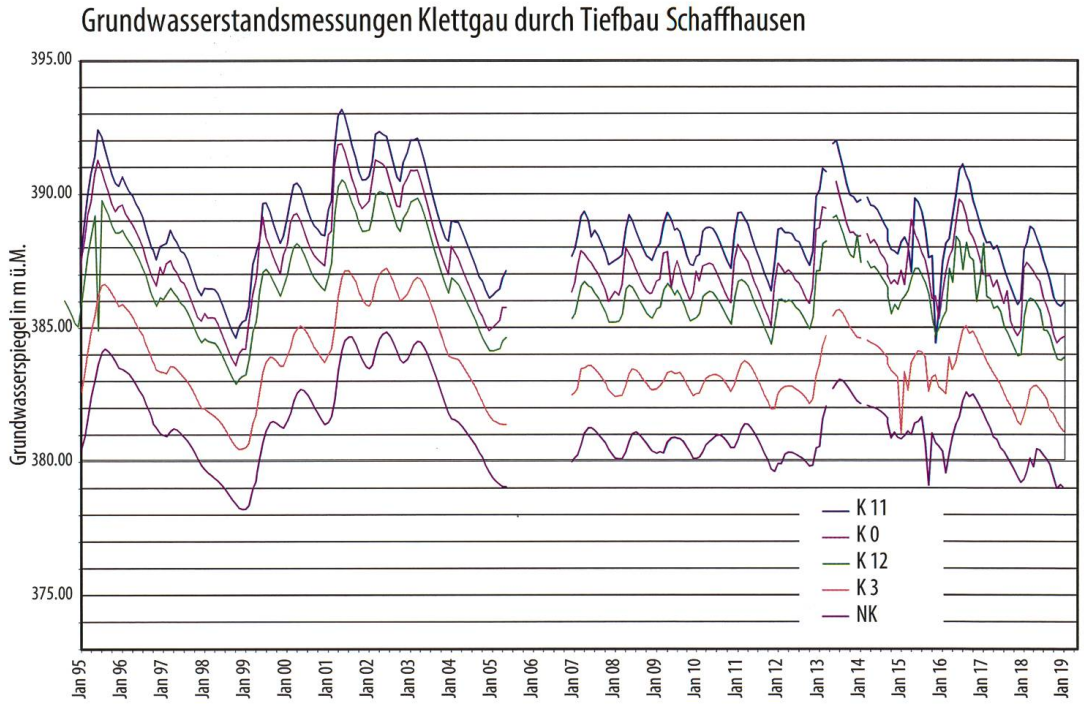


Abb. 101: Grundwasserstände (unten) einzelner Messpegel im Klettgau (links). Die Schwankungen sind sehr gross, verlaufen aber erstaunlich parallel.



mehr mit dem Rhein in Verbindung, die gesamte Grundwasserneubildung erfolgt damit über den Niederschlag im Einzugsgebiet des Klettgaus (Abb. 101). Der Grundwasserstrom ist 500 bis 2200 m breit und 30 bis 50 m mächtig. Der Grundwasserspiegel liegt mehrere Dutzend Meter unter der Oberfläche; es ist daher gut geschützt vor kurzzeitigen negativen Einflüssen. Das Gefälle der Felsoberfläche ist im Schaffhauser Teil des Klettgaus sehr gering, entsprechend sind die Fliessgeschwindigkeiten klein. Dennoch: aufgrund der Grösse ist der Abfluss beachtlich. Kühnle-Baiker et al. (1992) schätzen den Abfluss (inkl. Zufluss Wangental) an der Landesgrenze auf etwa 36 000 Liter pro Minute. Im Vergleich dazu: Im Jahr 2018 betrug der mittlere Abfluss des Rheins bei Flurlingen gemäss Datenerhebung des Bundesamtes für Umwelt 308 m^3 pro Sekunde oder 18 480 000 Liter pro Minute. Im Rhein fliesst über 500 mal mehr Wasser.
Der Klettgauer Grundwasserstrom zeigte in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Spiegelschwankungen (bis mehr als 8 m). In den letzten Jahren scheint sich jedoch dieses Regime verändert zu haben. Über die gesamte Beobachtungsphase (seit 1969) scheint sich der Grundwasserspiegel tendenziell etwas abgesenkt zu haben; ob diese Absenkung statistisch relevant ist, ist derzeit aber noch schwer abschätzbar. Die Ursachen für beide Phänomene sind nicht bekannt.

10. Einige historische Bausteine

Schaffhausen ist geprägt durch eine grosse Vielfalt von historischen Bausteinen, die sich zum Teil schon bei einem einzelnen Gebäude zeigen (Abb. 102). Doch die Veränderung der Bausteine im Lauf der Zeit widerspiegelt auch die veränderten technischen Möglichkeiten: neue Transportwege wurden erschlossen oder neue Verarbeitungstechniken entwickelt.

Abb. 102: Am Obertorturm erkennt man eine ganze Reihe von Bausteinen: Kalkstein aus der Umgebung der Stadt, Schilfsandstein aus dem Klettgau, Bollensteine aus dem Rhein und Plattensandstein aus dem Bodenseegebiet.

Der **Muschelkalk** (insbes. der sogenannte «Elbenstein») lieferte wegen

seines massigen Charakters und seiner geringen Porosität ein witterungsbeständiges Gestein, das zum Beispiel für Brunnentröge verwendet werden konnte. Dieses Gestein ist nicht zu verwechseln mit dem **Muschelkalksandstein** aus der Meeresmolasse des Kantons Aargau. Auch dieses Gestein wurde für Brunnentröge verwendet (bspw. Zehneck-Plattenbecken des Mohrenbrunnens).

Ein historisch bedeutender Baustein ist der **Schilfsandstein** aus dem Klettgau (Seewi-Steinbruch, am Hochwald und am Worberg sowie mehrere kleine Brüche zwischen Beggingen und Schleitheim; die Abbaustellen in der Region wurden Anfang des 20. Jahrhunderts aufgegeben). Der meist rote, gelegentlich auch grünliche Sandstein ist feinkörnig (Körner um 0,2 mm) und gleichmässig. Er besteht aus Quarz, Feldspat und Glimmer. Der Kornverband ist ziemlich locker; die Gesteine können gut gesägt und behauen werden. Die Druckfestigkeit ist jedoch beschränkt. Der Stein wurde vor allem im 11. bis 16. Jahrhundert verwendet (Münster Schaffhausen, Kloster zu Allerheiligen, Kirche Hallau; Abb. 103 und 104). Schilfsandstein aus Schleitheim soll auch nach

Abb. 103: Einzelne rote Säulen im Kreuzgang des Klosters Allerheiligen bestehen aus rotem Schilfsandstein.

Abb. 104: Reliefdarstellung von Elefanten im Schilfsandstein. Elefanten sind Symbole für Kraft, Stärke und Ausdauer. Münster Schaffhausen.

Abb. 105: Randengrobkalk vor dem Münster in Schaffhausen. Selbst im Baustein sind die Sedimentstrukturen gut erkennbar.

Zürich (Kreuzgang im Fraumünster), Basel (Elisabethenkirche), St. Blasien (Klostergebäude) und Koblenz (Rheinbrücke) geliefert worden sein (de Quervain, 1969).

Der **Stubensandstein** wurde teilweise als Baustein verwendet, soll aber auch als Scheuersand (daher der Name) gedient haben.

Der **Randengrobkalk** besteht aus einer feinzerriebenen, festverkitteten Masse von Muschel- und Schneckenschalen plus grobem, gut gerundetem Quarz. Das Gestein zeigt oft Kreuzschichtung, ist von rauer, grober und löchriger Struktur. Es ist ziemlich druckfest und wetterbeständig. Randengrobkalk wurde in Altdorf und im benachbarten badischen Gebiet bei Wiechs und Tengen abgebaut und zu Sockelmauern, Fassadensteinen oder auch zu Quadern für Brücken (Eisenbahnbrücke oberhalb Rheinfall) verarbeitet (Abb. 105; de Quervain, 1969).

Der **Plattensandstein** aus der Region Rorschach ist im frischen Bruch grau, verfärbt sich aber mit der Zeit ins Grünliche. Plattensandsteine sind plattig geschichtet und daher gut zu verarbeiten. Sie sind jedoch ziemlich sulfatempfindlich: unter dem Einfluss von schwefelhaltigen Abgasen bilden sich Gipskristalle, die die Kornstruktur an der Oberfläche «aufsprengen». Es lässt sich daher

Abb. 106: Epitaphien im Kreuzgang des Klosters Allerheiligen. Trotz gutem Witterungsschutz sind Alterungsschäden deutlich erkennbar.

oft ein Abblättern beobachten. Den Plattensandstein findet man beispielsweise an den Epitaphien im Kreuzgang zu Allerheiligen (Abb. 106), aber auch in Bodenplatten. Diese zeigen zum Teil erhebliche Verwitterungsschäden; die Restaurierung ist aufwändig und kostspielig. Ein weiteres Beispiel der Verwendung ist die Brunnensäule und -figur des Mohrenbrunnens.

Weisse **Kalke des Oberen Juras** wurden in der Region an diversen Stellen abgebaut. Im «Massenkalk» und «Quaderkalk» fand vergleichsweise wenig Abbau statt (Bargen, Herblingen, Stetten). Der «Plattenkalk» und die «Wohlgeschichteten Kalke» hingegen wurden intensiv als Mauerstein und für Hausteinarbeiten genutzt (Munot; Abb. 107, Turm des St. Johann, Türme der Stiftskirche von Rheinau). Abgebaut wurde der «Plattenkalk» direkt im Stadtgebiet, in den Mühlenen, im Mühletal, im Fulachtal, bei Herblingen und bei Neuhausen (de Quervain, 1969), wobei der Steinbruch in den Mühlenen in historischer Zeit die wichtigste Quelle darstellte.

Schliesslich lieferten mehrere lokale Brüche (Rohrbachtal) sowie das bekannte Flurlinger Vorkommen **Kalktuffe**, die als Bausteine Verwendung fanden.

Abb. 107: Auch das Wahrzeichen Schaffhausens, der Munot, ist aus weissem Kalk des Oberen Juras gebaut. Doch während die meisten anderen Bauwerke der Stadt mit Steinen aus dem Mühlenen-Steinbruch gebaut wurden, soll der Munot vor allem aus Gestein aus dem Gebiet Hochstrasse bestehen.

11. Blickpunkte – Schlüsselstellen zum Verständnis der geologischen Vergangenheit

Der Geologe Franz Hofmann initiierte vor Jahrzehnten einen geologischen Lehrpfad, dessen Stationen mit entsprechenden Informationstafeln bestückt wurden (Hofmann und Hübscher, 1977). Diese Stellen, wenngleich sie mittlerweile stark eingewachsen und die Tafeln oft nur noch schlecht lesbar sind, sind noch immer geeignet, um dem Hauptzweck zu dienen: Sie gewähren Einblicke in Schlüsselaspekte der Geologie. Die Lokalitäten sind als kantonale Schutzobjekte erfasst und im kantonalen Richtplan verzeichnet.

(1) Ängiwaald – Tanzboden, Schaffhausen: Eiszeitliche Schotter
(2) Färberwisli, Beringen: Bohnerzlehm auf verkarsteter Oberfläche.
(3) Beringer Randen, Beringen: Massenkalk
(4) Füetzemerstäägli, Beringen: Massenkalk
(5) Hägliloo, Hemmental: Quaderkalk
(6) Langtal, Hemmental: Mittlere Malmmergel
(7) Langer Randen: Mittlere Malmmergel
(8) Räckolterebuck, Gächlingen: Wohlgeschichtete Kalke
(9) Räckolterebuck, Gächlingen: Grenzschichten zwischen Dogger und Malm
(10) Räckolterebuck, Gächlingen: eiszeitlicher Gehängeschutt
(11) Hinderi Pflumm, Gächlingen: Opalinuston
(12) Buckfore, Gächlingen: Posidonienschiefer
(13) Chüetel, Gächlingen: Eiszeitlicher Findling
(14) Rummele, Oberhallau: Arietenkalk
(15) Seebehau, Hallau: Eiszeitlicher Findling
(16) Seebehau, Hallau: Doline
(17) Schärersgrabe, Hallau: Grenzzone Muschelkalk/Keuper
(18) Littichapf, Hallau: Hauptmuschelkalk
(19) Siitentobel, Hallau: Keupermergel
(20) Mörderraa, Hallau: Eiszeitlicher Findling
(21) Im Toote Chrieger, Beggingen: Wohlgeschichtete Kalke
(22) Nesselbode, Beggingen: Impressamergel
(23) Hohle Gasse, Beggingen: Posidonienschiefer
(24) Am Raa, Beggingen: Obtususton: aufgeschüttet
(25) Allerstiig, Beggingen: Arietenkalk
(26) Seewi, Schleitheim: Sandsteinkeuper

(27) Lache, Schleitheim: Gipskeuper
(28) Baggebrunne, Schleitheim: Grenzzone Muschelkalk/Keuper
(29) Flüelihalde, Schleitheim: Hauptmuschelkalk
(30) Oberwiesen, Schleitheim: Gipsmuseum
(31) Gampenhäuli, Brämlen: Stetten: Bohnerz-Löcher
(32) Schenenbüel, Lohn: Boluston
(33) Langloch – Kurzloch: Thayngen und Lohn: eiszeitliche Abflussrinnen
(34) Allmebüel, Bibern-Thayngen: Eiszeitlicher Findling
(35) Allmebüel, Bibern-Thayngen: Randenstörung

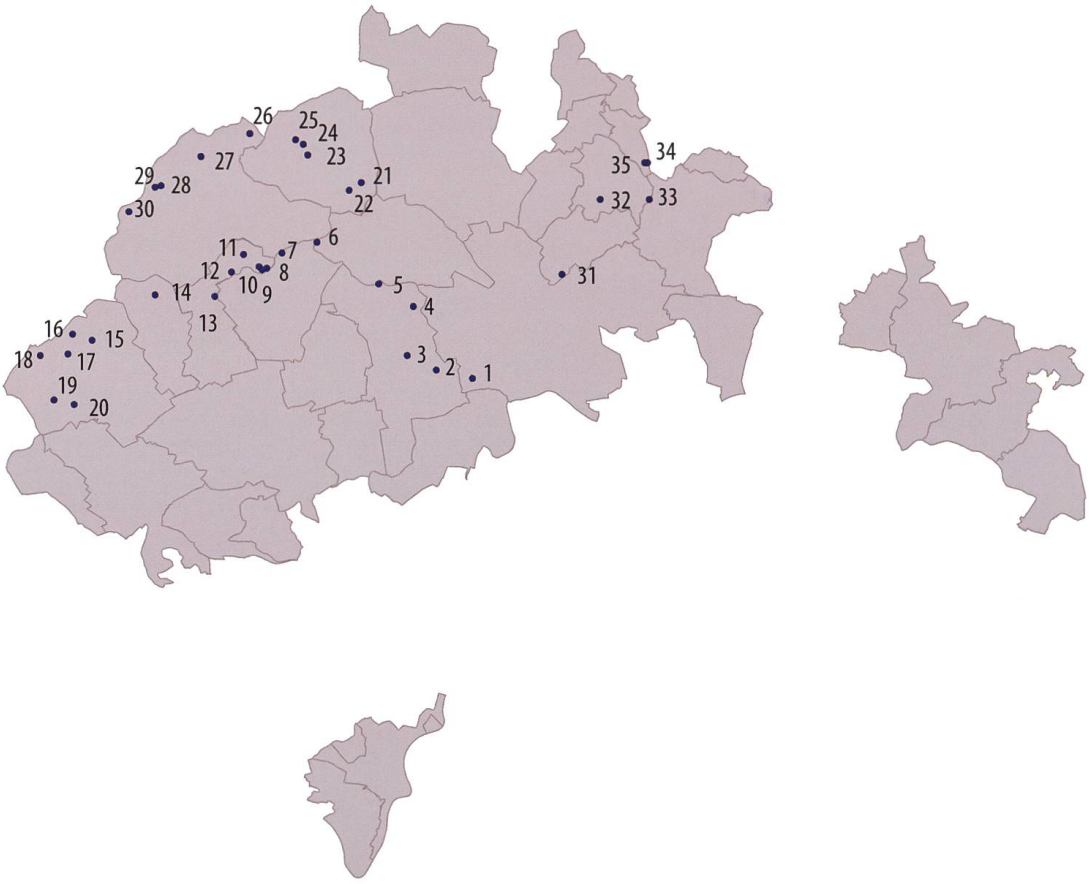


Abb. 108: Stationen des geologischen Lehrpfades von F. Hofmann und H. Hübscher.

12. Referenzen

Zur Vertiefung empfohlene Literatur:

Altorfer, K., und Affolter, J., 2011, Schaffhauser Silex-Vorkommen und Nutzung, Beiträge zur Schaffhauser Archäologie, 160 p.:

Bänteli, K., 2009, Wasserversorgung und Entsorgung im mittelalterlichen und neuzeitlichen Schaffhausen: Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Archäologie des Mittelalters und der Neuzeit, v. 21, p. 161–172.

Bänteli, K., Höneisen, M., und Zubler, K., 2000, Berslingen – Ein verschwundenes Dorf bei Schaffhausen. Mittelalterliche Besiedlung und Eisenverhüttung im Durachtal, Schaffhauser Archäologie.

Birchmeier, C., 1985, Bohnerzbergbau im Südranden, Schaffhausen, Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, Nr. 38.

Demmerle, S. (Hrsg.), 2016, Regionaler Naturpark Schaffhausen – Der Natur auf der Spur. Ott-Verlag, 198 Seiten.

de Quervain, F., 1969, Die nutzbaren Gesteine der Schweiz, Komm. Kümmerly & Frey. **Bringolf, A. 2010**, Die frühgeschichtlichen Funde der Gemeinde Hallau, Hallau.

Geyer, M., 2003, Vulkane im Hegau. Geologische Streifzüge durch den Hegau, am westlichen Bodensee und die angrenzende Schweiz, Stuttgart, Landesvermessungsamt Baen-Württemberg.

Hofmann, F., und Hübscher, H., 1977, Geologieführer der Region Schaffhausen, Rotary Club Schaffhausen, 139 Seiten.

Stössel, I., Stehrenberger, W., und Stamm, U., 2005, Das Schleitheimer Gipsgewerbe, Schleitheim, Stiftung zur Förderung des Gipsbergwerkes und Gipsmuseums Schleitheim.

Weitere im Text zitierte Referenzen:

Achilles, H., und Schlatter, R., 1986, Palynostratigraphische Untersuchungen im «Rhät-Boneded» von Hallau (Kt. Schaffhausen) mit einem Beitrag zur Ammonitenfauna im basalen Lias: Eclogae Geologicae Helvetiae, v. 79, no. 1, p. 149–179.

Aigner, T., und Bachmann, G. H., 1992, Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic: Sedimentary Geology, v. 80, no. 1–2, p. 115–135.

Allia, V., 1996, Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz PhD: Universität Basel.

Berger, J., Breuer, J., Stahr, K., und Fiedler, S., 2009, Geochemie und mikroskalige Elementverteilung in lateritischen Verwitterungsresiduen-Bohnerze, in Proceedings Böden – eine endliche Ressource, Bonn, 2009.

Bolliger, T., Fejfar, O., Graf, H., und Kälin, D., 1996, Vorläufige Mitteilung über Funde von pliozänen Kleinsäugern aus den höheren Deckenschottern des Irchels (Kt. Zürich): Eclogae Geologicae Helvetiae, v. 89, no. 3, p. 1043–1048.

Brignon, A., 2016, Les poissons téléostéens d'Öhningen (Miocène, Allemagne) de la collection Johann Conrad Ammann étudiés par Georges Cuvier et leur apport à l'histoire de la paléontologie: Geodiversitas, v. 38, no. 1, p. 33–65.

Büchi und Müller AG, 1989, Geologischer Bericht Nr. 2702: Erweiterung Tongrube Bibermeregg, Unpubl. Portland Cementwerk Thayngen.

Bühl, H., 2017, Die Kontroverse um das Alter der miozänen Graupensandrinne und die Ablagerungen in der Quarzsandgrube Benken (ZH): Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, Online-Publikation.

Clemens, W. A., 1980, Rhaeto-Liassic mammals from Switzerland and West Germany: Zitteliana, v. 5, p. 51–92.

Conway, K. W., Krautter, M., Barrie, J. V., und Neuweiler, M., 2001, Hexactinellid sponge reefs on the Canadian continental shelf: A unique „living fossil": Geoscience Canada, v. 28, no. 2.

Egli, D., Mosar, J., Ibele, T., und Madritsch, H., 2017, The role of precursory structures on Tertiary deformation in the Black Forest – Hegau region: International Journal of Earth Sciences, v. 106, no. 7, p. 2297–2318.

Fikáček, M., und Schmied, H., 2013, Insect fauna of the Late Miocene locality of Öhningen (Germany) less diverse than reported: an example of the hydrophilid beetles (Coleoptera): Journal of Paleontology, v. 87, no. 3, p. 427–443.

Fol, A.-F., 1856–1858, Note sur les Bohnerz du canton de Schaffhouse: Bulletins des séances de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles, v. 5, no. 41.

Früh, H., 1959–1962, Grabungsbericht zum Saurierfund in Beggingen: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 27, p. 220–223.

Gehring, A. U., 1986, Untersuchungen zur Bildung von Eisenoolithen: ETH Zurich.

Graf, H., 2000, Quartärgeologie zwischen Rhein, Thur und Aare (Kantone Aargau, Zürich und Schaffhausen)(Exkursion G am 28. April 2000): Jahresberichte und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins, p. 113–129.

Graf, H., und Hofmann, F., 2000, Zur Eiszeitgeologie des oberen Klettgau (Kanton Schaffhausen, Schweiz) encl: 1: Jahresberichte und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins, p. 279–315.

Graf, H. R., 1993, Die Deckenschotter der zentralen Nordschweiz: ETH Zurich.

-, 2009 a, Stratigraphie und Morphogenese von frühpleistozänen Ablagerungen zwischen Bodensee und Klettgau: Quaternary Science Journal, v. 58, no. 1, p. 12–53.

-, 2009 b, Stratigraphie von Mittel- und Spätpleistozän in der Nordschweiz, Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz, 198 p.:

Guyan, W. U., 1936, Die Gipsstollen von Oberwiesen: Jahresbericht der Kantonsschule Schaffhausen.

Guyan, W. U., and Stauber, H., 1941, Die zwischeneiszeitlichen Kalktuffe von Flurlingen (Kt. Zürich), Verlag nicht ermittelbar.

Hahn, W., 1971, Der Jura, Die Wutach – Naturkundliche Monographie einer Flusslandschaft: Freiburg i. Br., Badischer Landesverein für Naturkunde und Naturschutz e. V.

Hantke, R., 1954, Die fossile Flora der obermiozänen Oehninger-Fundstelle Schrotzburg (Schienerberg, Süd-Baden): ETH Zurich.

Heim, A., 1931, Geologie des Rheinfalls: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 10.

Heuberger, S., Büchi, M. und Naef, H., 2014, Drainage system and landscape evolution of northern Switzerland since the Late Miocene. Nagra Arbeitsbericht NAB 12–20.

Hofmann, F., 1956, Die vulkanischen Erscheinungen auf schweizerischem Gebiet nördlich des Rheins in der Gegend von Ramsen (Kanton Schaffhausen), Birkhäuser AG.

-, 1958, Vulkanische Tuffhorizonte in der Oberen Süsswassermolasse des Randen und Reiat, Kanton Schaffhausen, Birkhäuser.

-, 1967, Über die Tertiärbildungen im Kanton Schaffhausen: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 28, p. 171–210.

-, 1977, Neue Befunde zum Ablauf der pleistozänen Landschafts-und Flussgeschichte im Gebiet Schaffhausen-Klettgau-Rafzerfeld: Eclogae Geologicae Helvetiae, v. 70, no. 1, p. 105–126.

-, 1981, Blatt 1031 Neunkirch (Atlasblatt 74), Erläuterungen: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000.

-, 1991, Neuere Befunde zur Geologie, zur Lagerstättenkunde und zum historischen Abbau der Bohnerze und Bolustone der Region Schaffhausen: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 36, p. 45–82.

Hofmann, F., and Hantke, R., 1964, Blatt 1032 Diessenhofen, Erläuterungen: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000.

Hofmann, F., und Jäger, E., 1959, Saponit als Umwandlungsprodukt im basaltischen Tuff von Karelienhof (Kanton Schaffhausen): Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, v. 39, no. 1–2, p. 115–124.

Hofmann, F., und Peters, T., 1962, Kaolinitische Mergel unter der Molassebasis im Rheinfallgebiet: Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, v. 42, no. 2, p. 349–358.

Hofmann, F., Schlatter, R. und Weh, M. 2000, Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000, Blatt Beggingen, mit Erläuterungen, Bundesamt für Wasser und Geologie, Landeshydrologie und -geologie.

Hübscher, J., 1947–1948, Untersuchungsergebnisse über die Doggererze und die Ölschiefer im Kanton Schaffhausen: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 22, p. 153–160.

-, 1951, Über Quellen, Grundwasserläufe und Wasserversorgungen im Kanton Schaffhausen: Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 3.

Hünermann, K. A., 1983, Dorcatherium (Mammalia, Artiodactyla, Tragulidae), das fossile Hirschferkel von Feuerthalen/Flurlingen (Kt. Zürich) bei Schaffhausen und seine Lagerstätte, Verlag nicht ermittelbar.

-, 1985, Eiszeit-Säugetiere aus dem Kanton Zürich: Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, v. 130, no. 3, p. 229–250.

Jeannet, A., 1951, Stratigraphie und Paläontologie des oolithischen Eisenerzlagers von Herznach und seiner Umgebung. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie; Lfg. 13, v. 5.

Jordan, P., Pietsch, J. S., Bläsi, H., Furrer, H., Kündig, N., Looser, N., Wetzel, A., und Deplazes, G., 2016, The middle to late Triassic Bänkerjoch and Klettgau formations of northern Switzerland: Swiss Journal of Geosciences, v. 109, no. 2, p. 257–284.

Keller, O., und Krayss, E., 2005 a, Der Rhein-Linth.Gletscher im letzten Hochglazial; 1. Teil: Einleitung; Aufbau und Abschmelzen des Rhein-Linth-Gletschers im Oberen Würm: Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, v. 150, p. 19–32.

-, 2005 b, Der Rhein-Linth.Gletscher im letzten Hochglazial; 2. Teil: Dateriung und Modelle der Rhein-Linth-Vergletscherung.: Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, v. 150, p. 69–85.

-, 2010, Mittel- und spätpleistozäne Stratigraphie und Morphogenese in Schlüsselregionen der Nordschweiz: E&G Quaternary Science Journal, v. 59, no. 1–2.

Kindlimann, R., 1984, Ein bisher unerkannt gebliebener Zahn eines synapsiden Reptils aus dem Rät von Hallau (Kanton Schaffhausen, Schweiz): Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 32, p. 3–11.

Kühnle-Baiker, E., Gudera, T., Pabst, W., Sprauer, K. J., und Straub, H., 1992, Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg, Klettgau, mit Erläuterungen.

Leinfelder, R. R., 2001, Jurassic reef ecosystems, The history and sedimentology of ancient reef systems, Springer, p. 251–309.

Leinfelder, R. R., Schmid, D. U., Nose, M., und Werner, W., 2002, Jurassic reef patterns – the expression of a changing globe, SEPM Special Publication, Volume 72.

Leu, U. B., 2013, Research Practices in the Early Eighteenth Century: The Example of Johann Jakob Scheuchzer, Scholars in Action (2 vols), BRILL, p. 591–608.

Loeschke, J., Güldenpfennig, M., Hann, H. P., und Sawatzki, G., 1998, Die Zone von Badenweiler-Lenzkirch (Schwarzwald): Eine variskische Suturzone: Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, p. 197–212.

Lowick, S. E., Buechi, M. W., Gaar, D., Graf, H. R., und Preusser, F., 2015, Luminescence dating of Middle Pleistocene proglacial deposits from northern Switzerland: methodological aspects and stratigraphical conclusions: Boreas, v. 44, p. 459–482.

Mazurek, M., Hurford, A. J., und Leu, W., 2006, Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis: Basin Research, v. 18, no. 1, p. 27–50.

Meister, J., 1898, Neuere Beobachtungen aus den glacialen und postglacialen Bildungen um Schaffhausen, H. Meier & Cie.

-, 1907, Über Quellen und Grundwasserläufe im Kanton Schaffhausen: Beiträge zum Jahresbericht der Kantonsschule Schaffhausen, 1906/1907.

-, 1926/1927, Die Wasserversorgungen im Kanton Schaffhausen: Jahresbericht der Kantonsschule Schaffhausen.

Merklein, F., 1869, Beitrag zur Kenntnis der Erdoberfläche um Schaffhausen, Schaffhausen.

Moor, E., 2009, Oxydiscites und Cymaceras vom Schaffhauser Randen: Mitteilungen der naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen – Online-Publikation.

Müller, E., 1997, Grundwasservorkommen im Kanton Schaffhausen: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 42.

Naef, H., und Madritsch, H., 2014, Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbontrogs: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schweredaten, Arbeitsbericht (NAB).

Palermo, D., Aigner, T., Nardon, S., und Blendinger, W., 2010, Three-dimensional facies modeling of carbonate sand bodies: Outcrop analog study in an epicontinental basin (Triassic, southwest Germany): AAPG bulletin, v. 94, no. 4, p. 475–512.

Peyer, B., 1944, Über Wirbeltierfunde aus dem Rhät von Hallau: Eclogae Geologicae Helvetiae, v. 36, p. 260–263.

-, 1956, Die Zähne von Haramiyden, von Triconodonten und von wahrscheinlich synapsiden Reptilien aus dem Rhät von Hallau, Kt. Schaffhausen: Schweizerische Paläontologische Abhandlungen, v. 72.

Pietsch, J., und Jordan, P., 2014, Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz – Version 2014 und ausgewählte Auswertungen, Arbeitsbericht (NAB).

Pietsch, J. S., Wetzel, A., und Jordan, P., 2016, A new lithostratigraphic scheme for the Schinznach Formation (upper part of the Muschelkalk Group of northern Switzerland): Swiss Journal of Geosciences, v. 109, no. 2, p. 285–307.

Preusser, F., Graf, H. R., Keller, O., Krayss, E., und Schlüchter, C., 2011, Quaternary glaciation history of northern Switzerland: E&G Quaternary Science Journal, v. 60, no. 2–3, p. 282–305.

Reisdorf, A. G., Wetzel, A., Schlatter, R., und Jordan, P., 2011, The Staffelegg Formation: a new stratigraphic scheme for the Early Jurassic of northern Switzerland: Swiss Journal of Geosciences, v. 104, no. 1, p. 97–146.

Ring, U., und Gerdes, A., 2016, Kinematics of the Alpenrhein-Bodensee graben system in the Central Alps: Oligocene/Miocene transtension due to formation of the Western Alps arc: Tectonics, v. 35, no. 6, p. 1367–1391.

Schalch, F., und Peyer, B., 1919, Über ein neues Rhätvorkommen im Keuper des Donau-Rheinzuges, Verlag nicht ermittelbar.

Schindler, C., 1985, Geologisch-geotechnische Verhältnisse in Schaffhausen und Umgebung, Schweizerische Geotechnische Kommission, Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kleiner Mitteilungen.

Schlatter, R., 1983, Erstnachweis des tiefsten Hettangium im Klettgau (Kanton Schaffhausen, Schweiz): Kleine Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 32, no. 1981–1984, p. 159–175.

Schneebeli-Hermann, E., Looser, N., Hochuli, P. A., Furrer, H., Reisdorf, A. G., Wetzel, A., und Bernasconi, S. M., 2018, Palynology of Triassic-Jurassic boundary sections in northern Switzerland: Swiss Journal of Geosciences, v. 111, no. 1–2, p. 99–115.

Schnellmann, M., Fischer, U., Heuberger, S., Kober, F. 2014, Erosion und Landschaftsentwicklung Nordschweiz Zusammenfassung der Grundlagen im Hinblick auf die Beurteilung der Lang-

zeitstabilität eines geologischen Tiefenlagers (SGT Etappe 2): Nagra Arbeitsbericht NAB 14–25.

Schreiner, A., 1968, Eiszeitliche Rinnen und Becken und deren Füllung im Hegau und westlichen Bodenseegebiet. Ih. Geol. Landesamt Baeden-Württemberg, 10: 79–104; Freiburg i. Br.

Schreiner, A., 1992, Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee: Geologische Karte, v. 1, no. 50.000.

Strauss, H., 1972, Die Trinkwassersituation im Kanton Schaffhausen: Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, v. 24, p. 45–55.

Uhl, D., Bruch, A. A., Traiser, C., und Klotz, S., 2006, Palaeoclimate estimates for the Middle Miocene Schrotzburg flora (S Germany): a multi-method approach: International Journal of Earth Sciences, v. 95, no. 6, p. 1071–1085.

Wehrli, L., 1894, Ueber den Kalktuff von Flurlingen bei Schaffhausen, Naturforschende Gesellschaft Zürich

Weiskirchner, W., 1972, Einführung zur Exkursion Hegau: Fortschritte in der Mineralogie, v. 50, p. 70–84.

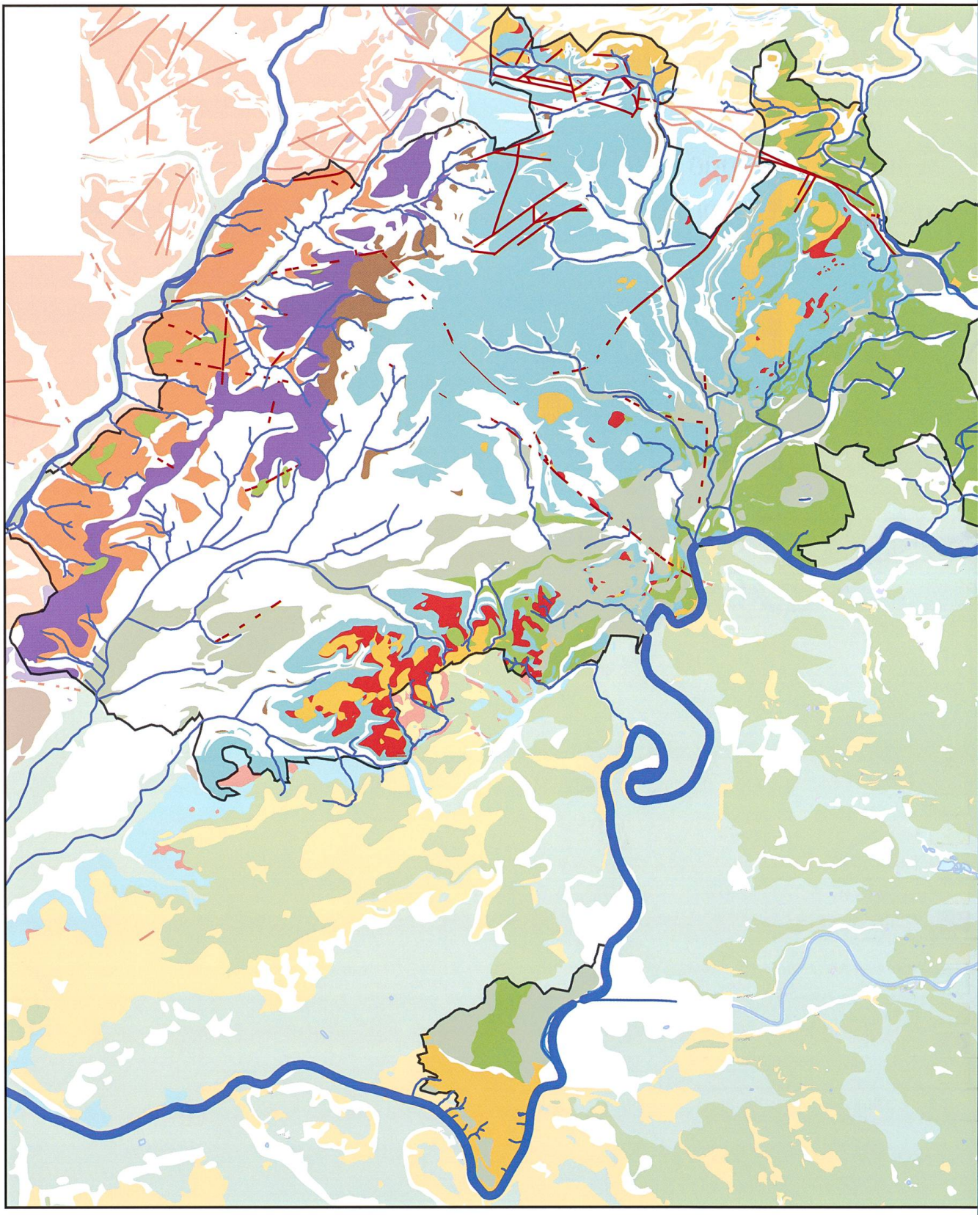
Wetzel, A., und Allia, V., 2003, Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte: Eclogae Geologicae Helvetiae, v. 96, no. 3, p. 451–469.

Whiteside, D. I., Duffin, C. J., und Furrer, H., 2017, The Late Triassic lepidosaur fauna from Hallau, North-Eastern Switzerland, and a new 'basal' rhynchocephalian Deltadectes elvetica gen. et sp. nov: Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen, v. 285, no. 1, p. 53–74.

Wunderlin, D., 2019, Keine Kurze Episode – Die Nutzung der Bohnerzvorkommen im Schweizer Jura, in Konold, W., Regnath, R. J., und Werner, W., eds., Bohnerze – Zur Geschichte ihrer Entstehung, Gewinnung und Nutzung in Süddeutschland und der Schweiz: Freiburg i. Br., Alemannisches Insitut Freiburg im Breisgau.

Ziegler, P. A. 1990, Geological atlas of western and central Europe. Geological Society of London.

Zöbelein, H. K., 1995, Die jungtertiäre Graupensandrinne in der Vorlandmolasse Südwestdeutschlands: Forschungsgeschichte, Verlauf, Entstehung, Füllung und Beziehungen zur Umrandung, Kanzler.



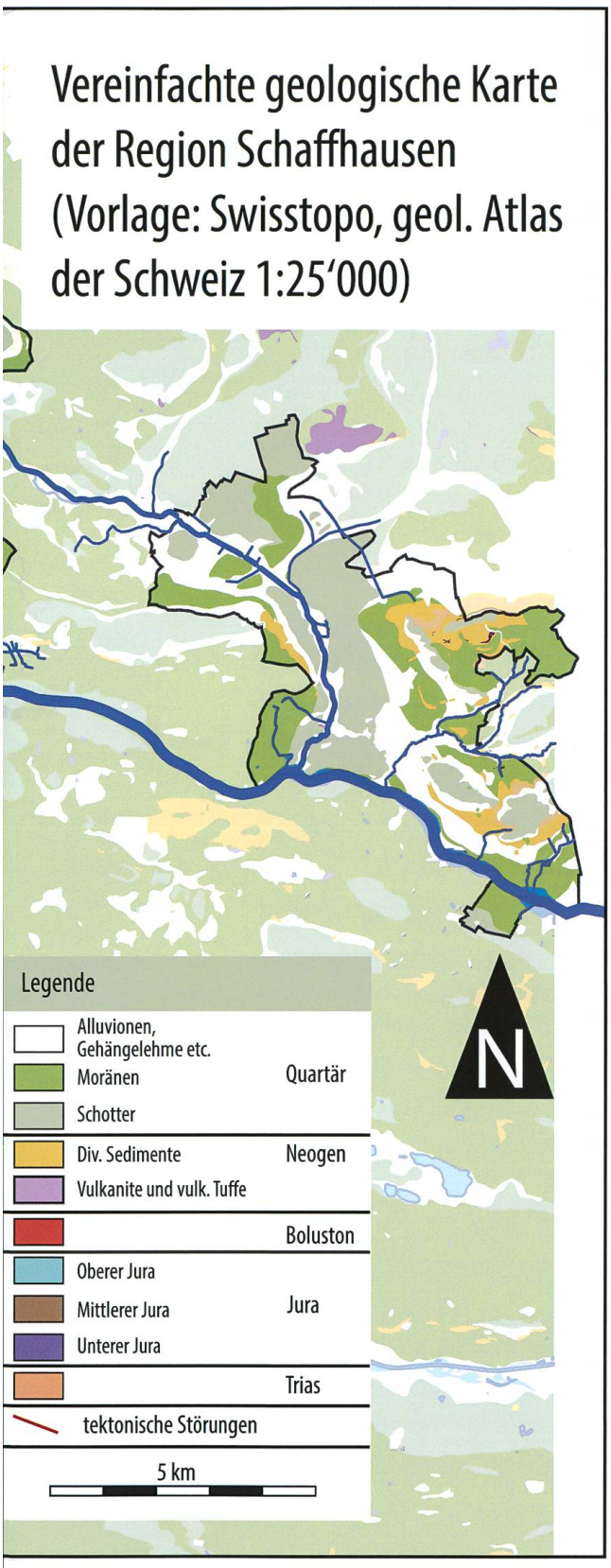


Abb. 109: Vereinfachte geologische Karte der Region Schaffhausen; Vorlage gemäss Swisstopo.