

Schichtlagerung und Bruchtektonik im Einzugsgebiet des Blautopfs und dessen Umfeld (Mittlere Schwäbische Alb)

Wolfgang Ufrecht

Zusammenfassung

Im Einzugsgebiet des Blautopfs und dessen Umfeld wurde eine Bestandsaufnahme des bruchtektonischen Inventars der Oberjurakalke vorgenommen. Die Geländearbeiten wurden durch den Einsatz moderner Methoden der Fernerkundung sowie durch umfangreiche Literaturrecherchen ergänzt.

Das Untersuchungsgebiet ist tektonisch intensiv beansprucht. Im Norden dominieren NE-SW streichende Abschiebungen (Filstalstörungen). Im übrigen Gebiet, wie auch um Blaubeuren, schwenkt die Richtung der Störungen vorrangig in die NNE-SSW-Richtung. Durch eine Häufung von Horizontalharnischen kann mehreren Bruchflächen lateraler Versatz zugeschrieben werden, meist in Form sinistraler Relativbewegung an NNE-SSW streichenden Flächen sowie dextraler Relativbewegung an W-E bzw. WNW-ESE streichenden Flächen. Zu Horizontalverschiebungen an diesen Flächen kam es frühestens ab dem ausgehenden Miozän bzw. Pliozän unter einer N-S bzw. NNW-SSE orientierten Hauptspannungsrichtung.

Das Kluftmuster zeigt Hauptklufscharen in NNE-SSW bzw. WNW-ESE-Richtung, gefolgt von der N-S und W-E-Richtung. Untergeordnet sind die NE-SW- und NNW-SSE-Richtung. Erste werden als Scherklufscharen interpretiert.

Die Höhlen zeigen erwartungsgemäß im Verlauf eine enge Abhängigkeit vom tektonischen Inventar. Dabei sind die Seligengrundhöhle sowie Teile von Vetterhöhle und Blautopfhöhle an W-E bzw. WNW-ESE streichende dextrale Blattverschiebungen angelehnt. Die Geometrie und Struktur der dortigen Höhlenpassagen zeigt keine wesentlichen Unterschiede zu anderen Höhlenabschnitten außerhalb der Blattverschiebungszonen. Versätze von Räumen oder Gängen sind nicht erkennbar. Daraus folgt, dass die Höhlenbildungsphase erst nach Ausklingen der tektonischen Aktivität in der Scherzone – frühestens ab dem ausgehenden Miozän bzw. Pliozän – einsetzte.

1 Einleitung

Im Jahre 2004 wurde auf der mittleren Schwäbischen Alb im Gebiet zwischen Magolsheim – Zainingen – Donnstetten – Westerheim – Hohenstadt – Merklingen – Berghülen und Blaubeuren, das den Einzugsbereich des Blautopfs umrahmt, mit einer Bestandsaufnahme des bruchtektonischen Inventars begonnen. Die systematischen tektonischen Untersuchungen, die Teil eines geowissenschaftlichen Untersuchungsprogramms zu Entstehung und Alter des Blauhöhlensystems sind, schließen die klufftektonische Aufnahme von Felsauf-

schlüssen und -ausbissen, die Kartierung tektonischer Elemente in größeren Höhlen sowie den Einsatz moderner Methoden der Fernerkundung ein. Sie sollen dazu verhelfen, die tektonische Situation umfassend darzustellen und zu interpretieren. Das bruchtektonische Inventar sowie das aus Bohrungen entwickelte Bild der Schichtlagerung liefern die Basis für die Untersuchung des Einflusses tektonischer Muster auf die Verkarstung und den Richtungsverlauf der im Einzugsgebiet des Blautopfs und des nahen Umfelds liegenden Höhlensysteme, insbesondere des Blauhöhlensystems.

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. WOLFGANG UFRECHT, Kaiserstr.45, 70599 Stuttgart.

2 Großtektonischer Rahmen

Das Einzugsgebiet des Blautopfs wird von verschiedenen großtektonischen Elementen umrahmt (Abb. 1). Im Norden zwischen Wiesensteig und Mühlhausen bildet die Filstalmulde (VEIT 1936) eine 10 km breite Senkungszone aus 60° streichenden Abschiebungen und Flexuren mit Gesamt-

Absenkungsbetrag von ca. 100 m. Sie geht nach Südwesten in die Schopflocher Tiefenlinie über (REICH 1915). Im Westen kartierte HOYDEM (1992) die Fortsetzung des NW-SE streichenden Fildergrabens über die Jusi-störung bis in den Raum Bad Urach-Hülben.

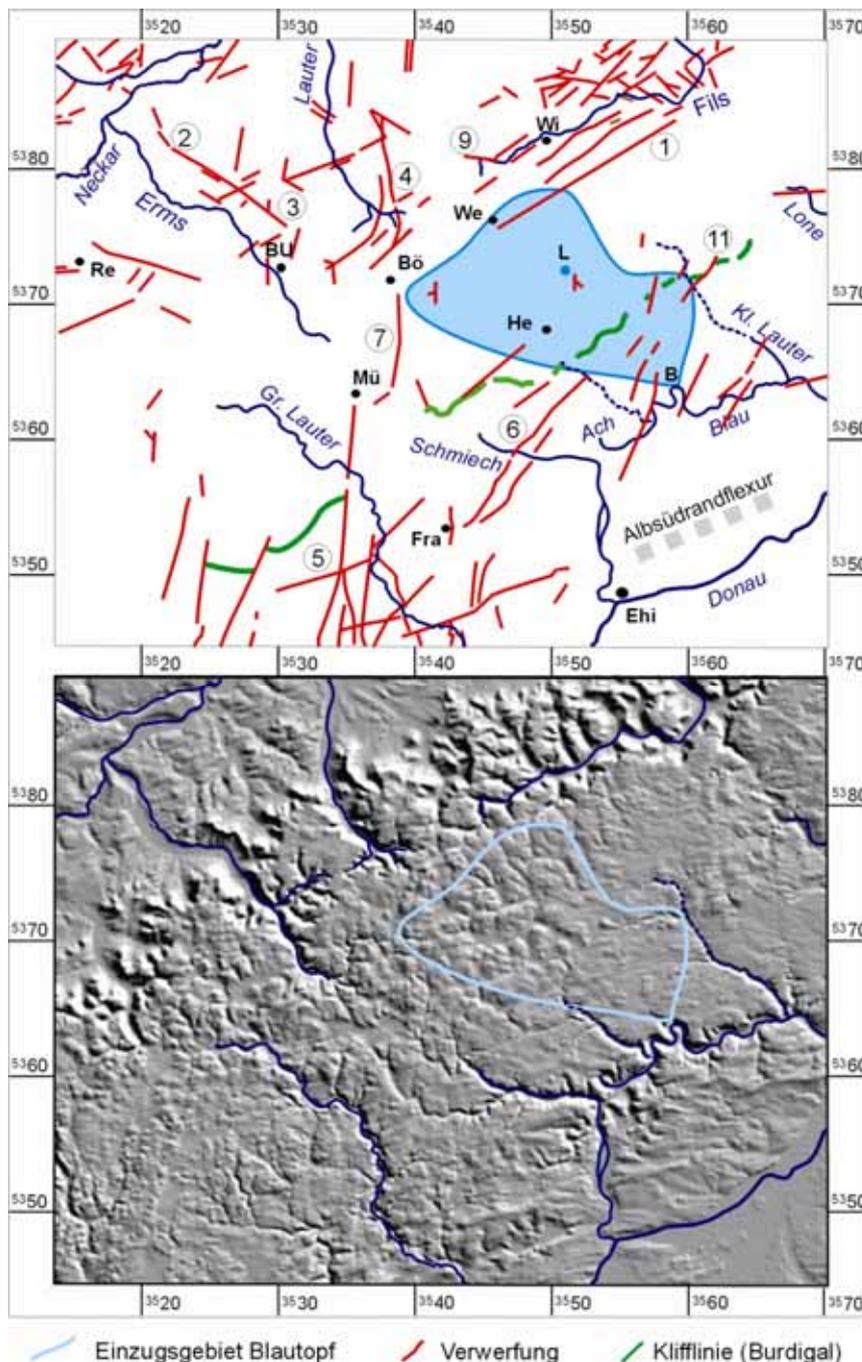


Abb. 1: Hauptstrukturelemente im Gebiet der mittleren Schwäbischen Alb mit Einzugsgebiet des Blautopfs (oben) und schattierte Relief-Hillshade-Karte (unten), basierend auf Radardaten (Shuttle Topography mission; SRTM DTED; <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>; erstellt mit freundlicher Unterstützung von Dr. K. PELZ).

1: Filstalstörungen, 2: südliche Fortsetzung Fildergraben, 3: Bad Uracher Bruchfeld, 4: Teckverwerfung, 5: Münsinger-Zwiefalter Bruchfeld, 6: Lautertal-Störungssystem, 7: Römerstein-Störung, 9: Aulaverwerfung, 11: Temmenhäuser Störung.

Zusammengestellt nach Daten aus GWINNER et al. (1974) GWINNER (1980a,b), HOYDEM (1992), KIDERLEN (1931), KRAUTTER (1995), PAULSEN (1962), PRINZ (1959), RÖDEL (1957, 1958), SCHALL et al. (2004), VEIT (1936).

BU: Bad Urach, B: Blaubeuren, Bö: Böhlingen, Ehi: Ehingen, Fra: Frankenhofen, He: Heroldstatt-Sonthem, L: Laichingen, Mü: Münsingen, Re: Reutlingen, We: Westerheim, Wi: Wiesensteig.

Eine der Fildergrabenstörungen wird östlich von Bad Urach von der N-S verlaufenden Teckverwerfung gequert, die ebenso wie die zwischen Böhlingen und Auingen parallel dazu verlaufende Römerstein-Störung

Teil des N-S gerichteten Bad Uracher Bruchfelds ist (Abb. 1). In der Verlängerung nach Süden geht dieses in das komplex strukturierte Münsinger-Zwiefalter Bruchfeld über (HAAG 1960). Von ihm zweigt bei

Frankenhofen das in der Streichrichtung zwischen 25 und 50° pendelnde Lautertal-Störungssystem ab, das über Hütten nach Justingen zieht. Die Lagerungsverhältnisse am Albsüdrand im Umfeld des heutigen Donautals werden bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts diskutiert (GROSCHOFF 1972). Während anfangs ein großer Abbruch bzw. ein schollenartiges Abtreppen der Schichten vermutet und als „Donauabbruch“ bezeichnet wurde, ist später auch die Vorstellung flexurartiger Verbiegungen hinzugekommen (Albsüdrandflexur; KIDERLEN 1931). Nach PRINZ (1959) sind diese am Südhang des Landgerichts noch mit bedeutenden Abschiebungen verknüpft, während sie in Richtung Schelklingen nur noch in einer Verstärkung des Schichtfalens nach S von 1 auf 3° bemerkbar sind.

2.1 Lineationsverlauf in Hillshade-Karten

Das aus Kartierungen bekannte und hier skizzierte überregionale Bruchinventar wird in Abb. 2 mit großräumig erfassten Strukturelementen, so genannten Lineationen, aus der Fernerkundung verglichen. Der Lineationsauswertung liegen satellitengestützte Radardaten (Shuttle Radar Topography mission; SRTM DTED; <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>) zugrunde, die mit freundlicher Unterstützung von K. PELZ (Universität Stuttgart) mit der Software ENVI prozessiert und in Form eines schattierten Reliefs und farbkodierter Höheninformation (hillshade) dargestellt werden.

Bei der Arbeit mit so genannten Hillshade-Karten werden durch Schattierung ersichtliche Lineationen als Bruchstrukturen interpretiert. Sie können Klüftzonen, Zerrüttungs- und Auflockerungszonen sowie Verwerfungen umfassen, an denen bevorzugt Verwitterung, Lösung bzw. Abtragung stattfindet. Dadurch entstehen Reliefmerkmale, wie Steilkanten, Stufen, Taleinkerbungen usw., die sich im Hillshade-Bild in Lineationen ausdrücken. Gegenüber einzelnen Lineationen, die für sich allein wenig Beweiskraft haben, kommt zum Erkennen großtektonischer Zusammenhänge und des tektonischen Grundmusters gehäuft auftretenden bzw. hintereinander aufgereihten Lineationen hohe Bedeutung zu (WETZEL &

FRANZKE 2003). Zu Lineationsbündeln zusammengefasst ergänzen sie das kartierte Verwerfungsinventar und kompensieren dadurch schlechte Aufschlussverhältnisse.

Die Lineationsmuster in den Abbildungen 2 und 3 zeigen eine deutliche Dominanz in NNE-SSW-Richtung, die im Norden tendenziell in die N-S-Richtung umzuschwenken scheint. Diese Tendenz zeigen alle Lineationsbündel in diesem Raum. Die Abstände der Lineationsbündel betragen ca. 5 km.

Die Lineationen sind besonders im Münsinger-Zwiefalter Bruchfeld häufig. Sie überlagern sich hier ausgezeichnet mit den kartierten Störungen. Ihr weiterer Verlauf nach Norden verdeutlicht, dass sich das Münsinger-Zwiefalter Bruchfeld im intensiv gestörten Bad Uracher Bruchfeld fortsetzt. Die NNE-SSW-Störungen im Bereich der Blaubeurer Talschlinge sowie die das Kleine Lautertal kreuzende Störung sind deckungsgleich mit Lineationsbündeln.

Den N-S-Bündeln nachrangig sind die WNW-ESE bis W-E streichenden und im Abstand von 5 bis 10 km verlaufenden Lineationsbündel. Ebenso wie die NNE-SSW-Lineationen können sie mit kurzen Unterbrechungen über zehner Kilometer, teilweise bis 50 km Länge verfolgt werden. Die zwischen Laichingen und dem Filstal verlaufenden Elemente scheinen die Verlängerung der Fildergrabenrand-Verwerfung anzuzeigen, die HOYDEM (1992) bis in den Raum Bad Urach kartierte. Zwischen dem Schmiechtal und Laichingen sind die WNW-ESE-Bündel sehr häufig, wo sie sich in regelmäßigem Abstand mit NNE-SSW-Lineationen kreuzen. Die knapp nördlich Münsingen verlaufende Lineationsschar zieht in die Nordflanke der Blaubeurer Talschlinge hinein. Die in der Vetterhöhle vermutete Blattverschiebung und der Eingangsbereich der Blautopfhöhle dürften an diese Struktur gebunden sein.

NE-SW bis WSW-ENE streichende Lineationen scharen sich um Laichingen und das obere Filstal. Sie korrespondieren gut mit den kartierten Filstalstörungen sowie weiteren Abschiebungen zwischen Wiesensteig und Laichingen. Deutlich ist die Auffächerung der Lineationen erkennbar mit ca. 55° Streichen im Norden und 65° Streichen um Laichingen. Die Lineationen können

nach SW bis in den Raum Bad Urach verfolgt werden, wo sie an den zum Uracher Bruchfeld gehörenden N-S-Strukturen auslaufen. Weitere Lineationsbündel zwischen Frankenhofen und Ehingen könnten mit der Absüdrandflexur zusammenhängen.

Bei einer detaillierteren Betrachtung der Hillshade-Lineationen zwischen Laichingen und Blaubeuren fallen insbesondere drei W-

E streichende Lineationen auf (Abb. 3, 22), nämlich in der Achse (a) südlich Münsingen-Schelklingen, (b) nördlich Münsingen-Breithülen - Tiefental (eine Richtungsänderung des Tals verursachend) Steigziegelhütte-Blautopf sowie (c) südlich Zainingen-Suppingen – Berghülen - Kleines Lautertal Richtung Bermaringen. Die meisten W-E-Lineationen prägen nachhaltig den Verlauf der dortigen Trockentäler.

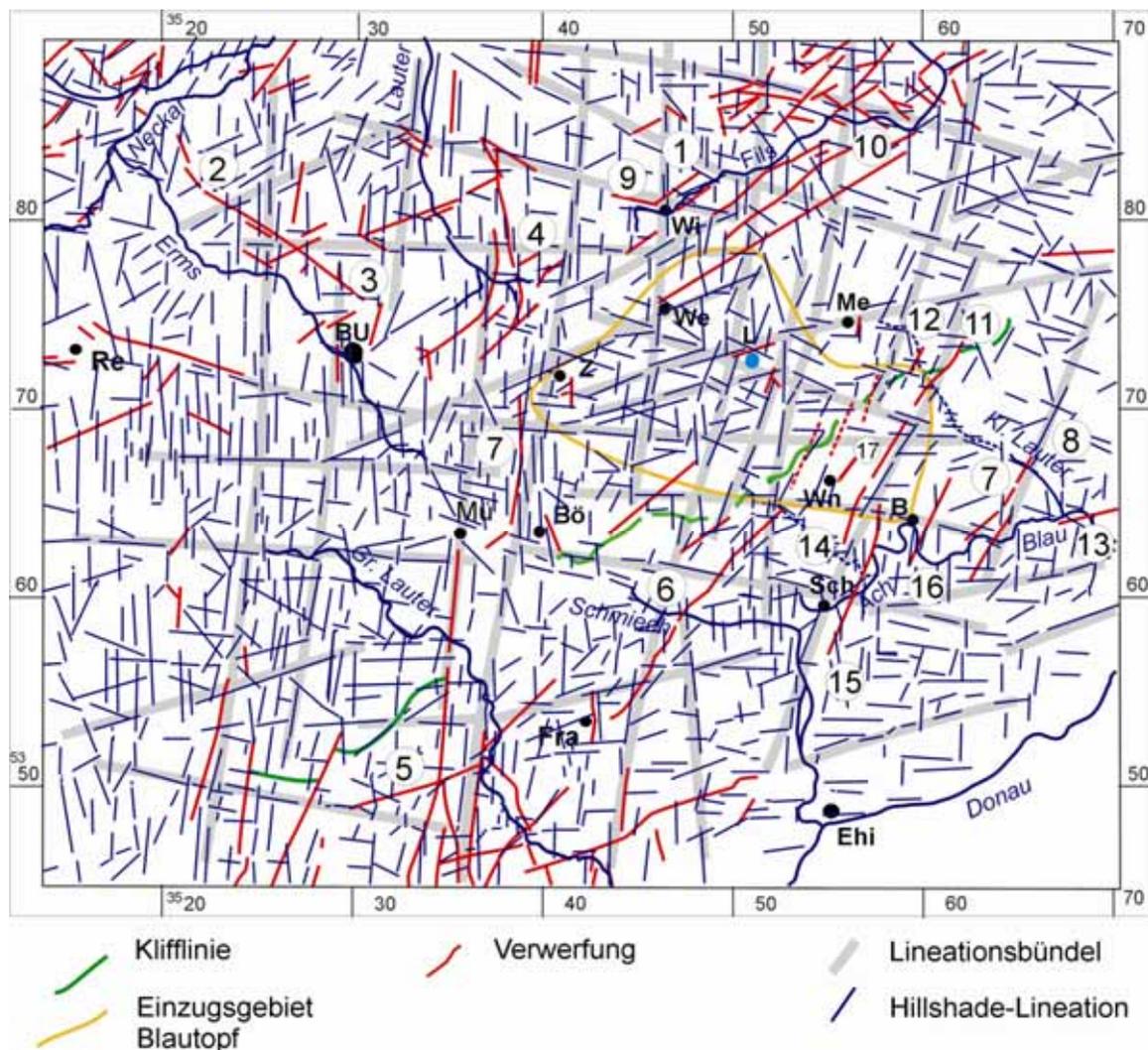


Abb. 2: Vergleich des Verlaufs kartierter Störungen im Gebiet der mittleren Schwäbischen Alb mit Hillshade-Lineationen. Der Lineationsauswertung liegen satellitengestützte Radardaten (Shuttle Radar Topography mission; SRTM DTED; <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>) zugrunde (mit freundlicher Unterstützung von Dr. K. PELZ erstellt).

Ziffern: 1: Filstalstörungen, 2: südliche Fortsetzung Fildergraben, 3: Bad Uracher Bruchfeld, 4: Teckverwerfung, 5: Münsinger-Zwiefalter Bruchfeld, 6: Lautertal-Störungssystem, 7: Römerstein-Verwerfung, 8: Weidach-Störung, 9: Autal-Störung, 10: Impferloch-Störung, 11: Temmenhäuser Störung, 12: Hübscher Stein-Störung, 13: Blautal-Störung, 14: Schinderteich-Störung, 15: Weiler Störung, 16: Rusenschloss-Störung, 17: Hessenhau-Störung, 18: Weidach-Störung. Zusammengestellt nach Daten aus GWINNER et al. (1974) GWINNER (1980a,b), HOYDEM (1992), KIDERLEN (1931), KRAUTTER (1995), PAULSEN (1962), PRINZ (1959), RÖDEL (1957, 1958), SCHALL et al. (2004), VEIT (1936). Abkürzungen: B: Blautopf, Bö: Böttingen, BU: Bad Urach, Ehi: Ehingen, L: Laichingen, Me: Merklingen, Sch: Schelklingen, We: Westerheim, Wi: Wiesensteig, Wn: Wennenden, Z: Zainingen.

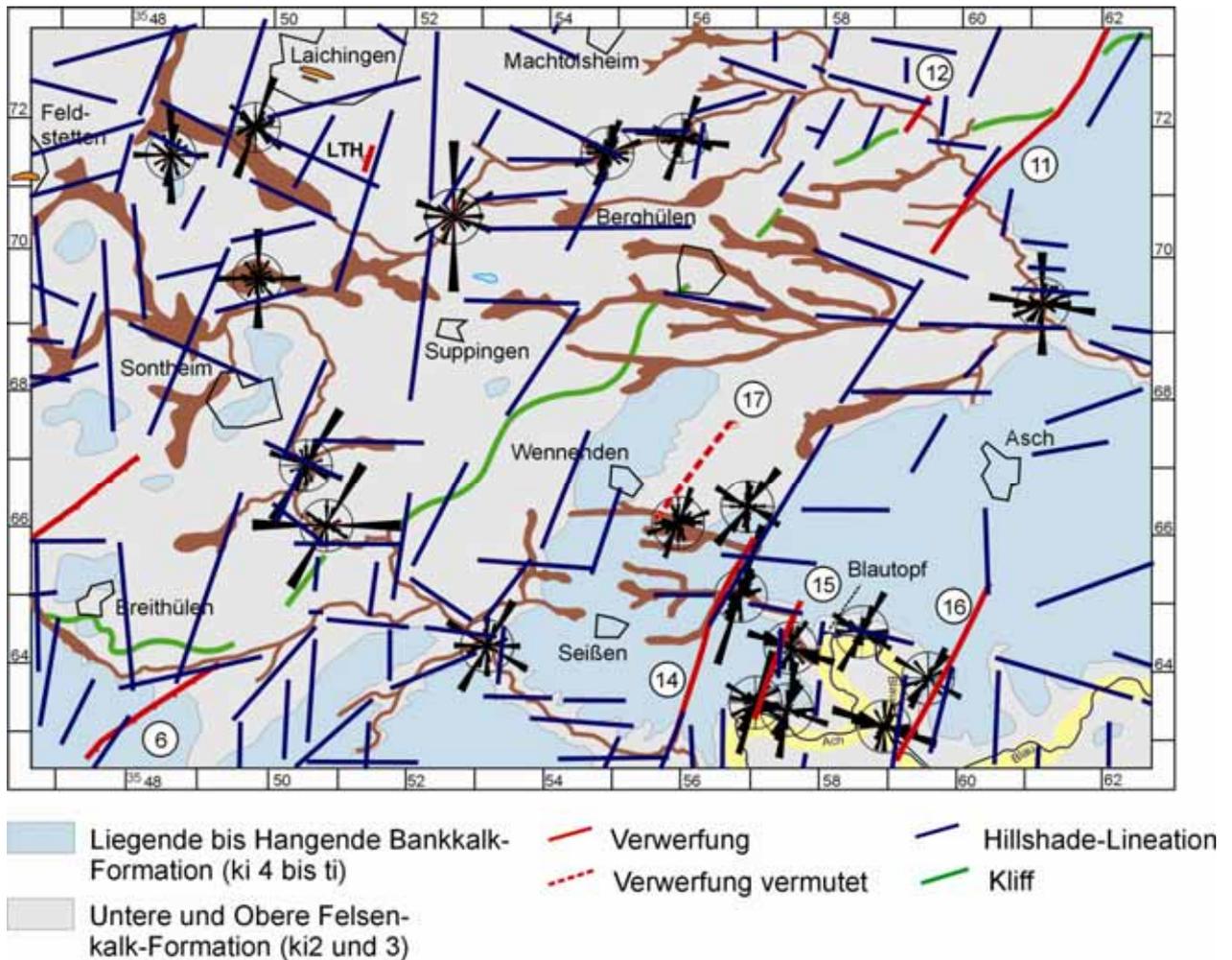


Abb. 3: Vergleich von Schichtverbreitung (Untere Felsenkalk-Formation bis Hangende Bankkalk-Formation) und Kluffrosen mit dem Verlauf kartierter Störungen und Hillshade-Lineationen. Schichtverbreitung nach Geologischer Karte 1:25.000 Blatt 7524 Blaubeuren (GWINNER 1980b); LTH: Laichinger Tiefenhöhle.

Ziffern: 6: Lautertal-Störungssystem, 11: Temmenhäuser Störung, 12: Hübscher Stein-Störung, 14: Schinderteich-Störung, 15: Weiler Störung, 16: Rusenschloss-Störung, 17: Hessenhau-Störung,

2.2 Lineationsverlauf in Luftbildern

Lokale Lineationsauswertungen von Luftbildern (sog. Fotolineationen), die freundlicherweise Dr. KNUT HINKELBEIN (Stuttgart) übernommen hat (Abb. 13, 15), konzentrieren sich auf das Umfeld des Blauhöhlensystems und den Bereich des burdigalen Kliffs bei Berghülen.

Im Umfeld des Blauhöhlensystems kommen die Richtungen W-E (80-100°), N-S sowie etwas untergeordnet die Richtung NNE-SSW zum Ausdruck. Auffallenderweise sind hier auch Lineationen in NNW-SSE-Richtung vorhanden, die sonst im kartierten

Bruchinventar und bei den Hillshade-Lineationen unauffällig sind. Die W-E-Lineationen halten richtungskonstant über weite Strecken durch und erreichen Längen bis 2 km. Besonders markant sind die Lineationen um das Seligengrund-Tal (mit Seligengrundhöhle, Kataster-Nr. 7524/119), in dem sich die Auffahrt vom Galgental nach Seißen bzw. zu Steigziegelhütte befindet (Abb. 15). Die W-E-Lineationen laufen an NNE-SSW und N-S-Lineationen aus, die mit Verwerfung 14 (Abb. 3) in Zusammenhang stehen.

Die W-E-Lineationen fallen auch mit tektonischen Strukturen zusammen, die in der Vetterhöhle raumbildend sind und signifikant die Gangrichtung vorgeben. Hier

ist in erster Linie der Bereich Griesinger Halle –Palast der Winde – Walhalla zu nennen, der seine Fortsetzung im vorderen Teil der Blautopfhöhle findet. In der Vetterhöhle sind in diesem Bereich Bretterklüftung und Harnische festzustellen. Eine zweite W-E-Lineation verläuft in der Vetterhöhle durch Teile des Nordgangs und die Abzweighalle. Östlich der Abzweighalle bricht der Nordgang nahezu um 90° scharf nach Westen an einer schräg einfallenden Bruchfläche ab (105/65 S). Diese dürfte mit der Lineation identisch sein. Die Neigung der Fläche sowie das unterschiedliche Schichtfallen südlich und nördlich der Bruchfläche lässt eine Verwerfung vermuten, ohne allerdings den Nachweis dafür erbringen zu können (kein Bezugshorizont zum Nachweis von Versatz, keine Striemung).

NNE-SSW-Lineationen ziehen engschurig von Süden Richtung Vetterhöhle, enden jedoch knapp vor der Höhle (Abb. 13). Der südliche Teil der Höhle ist jedoch raumbestimmend an NNE-SSW-Strukturen angelegt. Der Zusammenhang mit den Lineationen ist hier offensichtlich.

Im Raum Berghülen wurden Luftbilder ausgewertet, um Zusammenhänge zwischen Lineationen und dem Verlauf des Kliffs zu untersuchen. Es fallen lang aushaltende W-E-Lineationen auf, die sich im Verlauf größtenteils mit den Hillshade-Lineationen decken. Auch hier ist die enge Verknüpfung dieser Lineationen mit dem Verlauf der Trockentäler hervorzuheben. Untergeordnet sind meist kurz aushaltende NNE-SSW- bzw. N-S-Lineationen.

Insgesamt fällt auf, dass die in Hillshade-Karten abgebildeten Lineationen gegenüber den Luftbildlineationen und der Geländekartierung (vgl. Kap. 3) oftmals etwas andere Bruchmuster wiedergeben. So können die Hillshade-Lineationen das Bruchmuster im überregionalen Rahmen verkörpern und lang aushaltende übergeordnete Strukturelemente bilden, während die Luftbild-Lineationen in engerer Auflösung das kleinräumige Inventar darstellen.

3 Störungen im Einzugsgebiet des Blautopfs und dessen Umfeld

Wie in Kap. 2 aufgezeigt, gibt das in den amtlichen Geologischen Karten dokumentierte Störungsmuster für das Einzugsgebiet des Blautopfs nur einen Bruchteil des tatsächlich vorhandenen Inventars wieder. Grund hierfür sind die schwierigen Kartierbedingungen infolge schlechter Aufschlussverhältnisse (vor allem Lesesteinkartierung) sowie der vorherrschenden Massenkalk, die eine stratigraphische Ansprache und damit die Gewinnung lithostratigraphischer Bezugshorizonte erschweren bzw. unmöglich machen. Da also die tektonischen Großstrukturen mit den konventionellen Methoden der Kartierung zumeist nur schlecht fassbar sind, kann ein Gesamtbild nur durch zusätzliche Informationen aus Fernerkundung, Kluftrmessungen und Aufnahme des kleintektonischen Inventars erarbeitet werden. Die geologische Kartierung der Höhlen als Unter-Tage-Aufschlüsse (Laichinger Tiefenhöhle, Sontheimer Höhle, Vetterhöhle, Seligengrundhöhle) hat gute Ergebnisse geliefert, die erstmals für Auswertungen zur Verfügung stehen.

Wie die Ausbildung von Horizontalharnischen zeigt, muss für viele Flächen neben vertikalem auch horizontaler Versatz angenommen werden, unabhängig davon, ob die unterschiedlichen Bewegungsphasen zeitgleich oder hintereinander abgelaufen sind. Blattverschiebungen bzw. Scherzonen sind jedoch bei den gegebenen Aufschlussverhältnissen besonders schwer zu erfassen.

NE-SW bis WSW-ENE streichende Störungen

Im Raum Westerheim-Wiesensteig-Geislingen wird die von VEIT (1936) beschriebene NE-SW bis WSW-ENE streichende Fils-talmulde von zahlreichen gleichsinnig streichenden Abschiebungen und Flexuren begleitet (Abb. 1, 6). Am Westrand von Wiesensteig werden sie von der WNW-ESE streichenden Autalverwerfung (Abb.6) gequert. Spätere Kartierungen auf den Blättern Wiesensteig (KRAUTTER 1995) und Deggingen (SCHALL 1964) sowie ein umfangreiches Bohrprogramm im Zuge der Planungen für die Schnellbahntrasse Stutt-

gart-Ulm und den Ausbau der Autobahn A8 haben die Kenntnisse des tektonischen Baus in diesem Raum deutlich verbessert. Vor allem die von SCHALL (1964) verfeinerte Schichtlagerungskarte lässt die gesamte Komplexität der Filstalmulde erkennen. Es zeigt sich, dass weniger Schichtverbiegungen als vielmehr Abschiebungen und Staffelbrüche die vorherrschenden tektonischen Elemente sind. Auch außerhalb der eigentlichen Filstalmulde setzen sich die Staffelbrüche mit zwei um 55° streichende Abschiebungen bei Unterdrackenstein (Impferloch-Störung 10 in Abb. 2 und 18; SCHALL 1964, GREGAREK 1978) und im Gebiet Westerheim – südlich Hohenstadt – Widderstall (GRIESINGER et al. 1994; Widderstallstörung) fort. Die Versatzbeträge liegen

bei 15 bis 30 m. Eine weitere, etwa $65-70^\circ$ streichende Störung ist im Bereich von Laichingen und Merklingen zu vermuten (Höhenlage Glaukonitbank bzw. Grenze ki 2/1 in Bohrung Eichberg N Laichingen, Bleichberg Laichingen, Laichinger Tiefenhöhle). Ihr vermuteter Verlauf nördlich von Laichingen deckt sich mit einer aus Kluftaufnahmen bekannten intensiven Klüftung (Aufschlüsse Stuhlinger, Horn) in etwa gleicher Richtung. In Abb. 2 und 19 sind die südlichen Ausläufer der Filstalmulde wie auch die bei Laichingen verlaufende Störung deutlich in Lineationsbündeln abgebildet. Eines dieser Lineationsbündel löst sich im Steinbruch Zainingen in einer 70° streichenden Bretterklüftungzone auf (Abb. 4, 5).

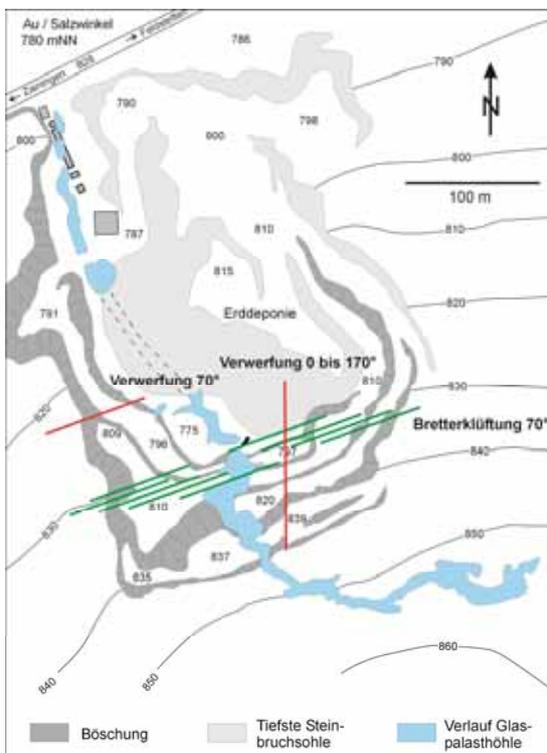


Abb. 4 links: Tektonische Elemente im Steinbruch Rösch bei Zainingen und Verlauf der Höhle „Glaspalast“ (Kataster-No.7523/011). Zeichnung Höhlenverlauf im Steinbruch nach LÓPEZ CORREA & ROSENDAHL (2002); Abb. 5 rechts: 70° streichende Bretterklüftungzone im Steinbruch Rösch mit ehemaligem Eingang zur Höhle „Glaspalast“, die heute nicht mehr zugänglich ist. Aufn.: W. UFRICHT.

Allem Anschein nach werden die NE-SW streichenden Störungen von jüngeren W-E bis WNW-ESE streichenden Störungen gekreuzt, so z.B. bei Wiesensteig die Aulaverwerfung (Abb. 6), welche die Filstalmulde im Westen begrenzt. Auch die Impferlochstörung scheint im Bereich der Ruine Hiltenburg (Blatt 7424 Deggingen) an

einer etwa WNW-ESE streichenden Störung abzubrechen (DIECK 1988).

Weitere NE-SW streichende Verwerfungen treten erst wieder im Südteil der Albhochfläche auf. Von der Münsinger-Zwiefaltener Bruchzone (5 in Abb. 2) zweigt bei Frankenhofen (TK 7523 Mehrstetten) eine

mehrfach unterbrochene, teilweise lateral versetzte und in der Streichrichtung zwischen 25 und 50° pendelnde Störung (Lautertal-Störung, 6 in Abb. 1 und 2) ab. Sie zieht über Hütten nach Justingen. Der Versatzbetrag nimmt von anfangs 60 m nach Osten bis Justingen auf weniger als 10 m ab. Die verschiedenen Streichrichtungen deuten darauf hin, dass es sich um ein komplexer aufgebautes mehrphasiges Störungssystem aus sich überlagernden NNE-SSW und NE-SW streichenden Störungen handelt. Grundsätzlich ist das Störungsmuster erklärbar, wenn es entweder an den NE-SW-Elementen zu Rechtsseitenverschiebungen oder an den SSW-NNE-Elementen zu Linksseitenverschiebungen kam. Da sich aber eine Hillshade-Lineation mit dem SSW-NNE-Abschnitt der Verwerfung überlagert und mit dieser in der Fortsetzung nach Norden am Kliff ein vergleichbarer Lateralversatz zusammenfällt, ist die Linksseitenverschiebung entlang der SSW-NNE-Elemente die plausible Interpretation.

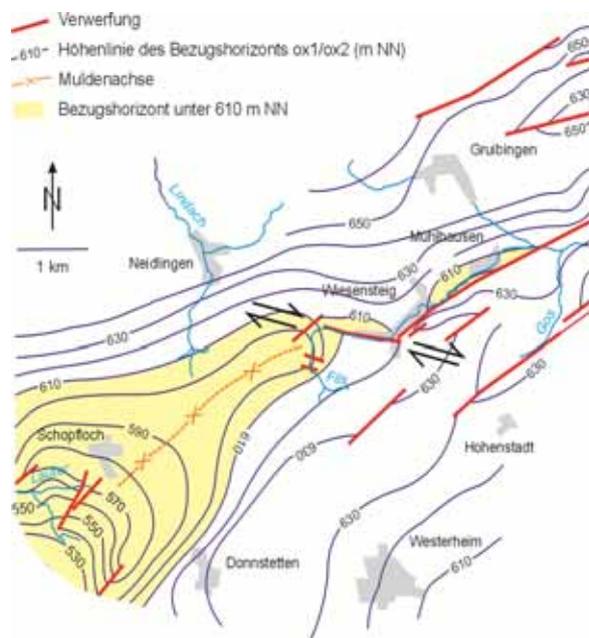


Abb. 6: Schichtlagerung (Grenze Impressamergel-Formation ox1 / Wohlgeschichtete Kalk-Formation ox2) und Störungen im Bereich der Filstalmulde zwischen Grubingen und Schopfloch. Die Tiefbereiche in der Schichtlagerung sind gelb gekennzeichnet. Zusammengestellt nach KRAUTTER (1995) und SCHALL (1964). Entlang der Aulaverwerfung kam es zu einem dextralen Versatz der Filstalmulde.

GWINNER (1980a) lässt die Lautertal-Verwerfung nicht auf Blatt 7524 Blaubeuren weiterlaufen, obwohl RÖDEL (1957, 1958) dort zwischen Suppingen, Berghülen und Treffensbuch Verwerfungen als Elemente der sog. „Kliffverwerfung“ einführt. Seit KIDERLEN (1931) wird eine Bindung des burdigalen Kliffs an Verwerfungen diskutiert. Dieser betont, dass sich die Klifflinie z. T. zwar an vorhandene tektonische Strukturen anlehnt, ohne sie jedoch durchweg als Bruchstufe auffassen zu müssen. Auch GROSCHOPF (1972) erkennt keinen direkten Zusammenhang zwischen Kliffverlauf und Tektonik. MAYER (1934) hat die Kliffverwerfung zwischen Ingstetten und Berghülen unter Bezug auf die Grenze Ulmensimergel/subeumela-Zone (ki4/3) ankartiert, konnte sie jedoch nicht weiter nach NE verfolgen. RÖDEL (1957, 1958) baute auf die vorausgegangenen Kartierungen auf und entwickelte längs des Kliffs ein kompliziert aufgebautes Staffelbruchsystem zwischen Suppingen und Berghülen mit drei 45° streichenden Störungen und zwischen Berghülen und Treffensbuch von zwei mit gleichbleibender Richtung streichenden Störungen. VILLINGER (1987) hat dieses Staffelbruchsystem auf eine Verwerfung zwischen Justingen, nördlich Wennenden und Treffensbuch reduziert und fügt analog zu GWINNER (1980b) in der Achse Bühlenhausen – Temmenhausen und quer zum Kleinen Lautertal eine zweite Verwerfung mit gleicher Streichrichtung dazu (Temmenhauser Störung). Wenig nördlich quert eine weitere Verwerfung das Kleine Lautertal am Hübschen Stein (12 in Abb. 18). Die Verwerfung ist durch eine tektonisch bedingte Reduzierung der Schichtmächtigkeit in einer Bohrung belegt, die nahe des Hübschen Steins in der Talniederung liegt. Offensichtlich hat die Bohrung exakt die Verwerfung durchfahren. Die Streichrichtung wird ebenfalls in NNE-SSW-Richtung vermutet, d.h. parallel zur Temmenhauser Störung sowie zu gehäuft in dieser Richtung auftretenden Hillshade-Lineationen.

Eine weitere WSW-ENE-Störung quert das Blautal bei Ehrenstein (13). Sie versetzt dabei die Schichtenfolge bis zur Unteren Süßwassermolasse um ca. 20 m.

In der Schichtlagerungskarte (Abb. 18) fällt südlich des Donautals eine Versteilung des

Schichtfallens nach Südosten auf. Diese flexurartige Verbiegung wird der Albsüdrandflexur (KIDERLEN 1931) zugeordnet. Von der Vorstellung eines schollenartigen Abtreppens der Schichten (früher als „Donauabbruch“ bezeichnet, GROSCOPF 1972) wird heute Abstand genommen.

N-S bis NNE-SSW streichende Störungen

Im Steinbruch Rösch bei Zainingen fällt eine um 0° streichende Verwerfung ins Auge. Aufgrund des ungewöhnlich geringen Einfallens von etwa 40° nach Osten und der gekrümmten Bruchfläche, die im unteren Drittel noch flacher wird (listrische Fläche), ist von einer Abschiebung auszugehen. Sie ist als Begleitstörung zu der westlich von Zainingen verlaufenden Römerstein-Verwerfung (7; HÜTTNER 1951) anzusehen.



Abb. 7: N-S streichende und um 40° nach Osten einfallende Verwerfung, Steinbruch Rösch, Zainingen. Blickrichtung von Norden. Aufn.: W. UFRICHT.

In der Laichinger Tiefenhöhle sind drei NNE-SSW streichende Kleinverwerfungen (A, D und E in Abb. 9) aufgeschlossen, die zu einem Störungssystem zusammengefasst werden (Abb. 9). Sie dürften für das Lineationsbündel verantwortlich sein, das in Abb. 2 und 3 durch den Bereich der Laichinger Tiefenhöhle läuft. Der Entdeckerspalt ist an eine 30° streichende und um 45° bis 60° flach nach Westen einfallende Störung (D) angelegt. Verwerfungssinn und Versatzbetrag sind nicht bestimmbar. In etwa 30 m Tiefe, wo der Entdeckerspalt in den Hauptschacht zur Großen Halle mündet,

schneidet sich diese Verwerfungsfläche mit einer zweiten Fläche, die zwischen 30 und 40° streicht und oben in Höhe der Sandhalle ca. 80° einfällt, dann aber mit der Tiefe abflacht. Auf dieser Fläche liegt ein Horizontalharnisch mit sinistralen Bewegungssinn. Das y-artige Verwerfungssystem wird in der Sandhalle von zahlreichen eng gescharten Klüften in gleicher Strichrichtung begleitet. Eine zweite Störung ist am Eingang von der Großen Halle in den Geheimen Gang zu finden (A: $30/85$ SE, Versatz ca. $0,8$ m). Eine dritte Störung liegt am Abgang von der Sächsischen Schweiz zum Maiskolben (E: $30/80$ SE, Versatz der Glaukonitbank). Parallel zu ihr verlaufen mehrere Klüfte, an die Deckenkolke sowie der Totenkopf-Schacht gebunden sind. Die Westbegrenzung der Sächsischen Schweiz bildet eine mehrere Quadratmeter große und mit 30° streichende Klufffläche, die mit einem Kalzitskalenoeder-Rasen überzogen ist.



Abb. 8: 30° streichende und um 45° bis 60° flach nach Westen einfallende Störung im Entdeckerspalt der Laichinger Tiefenhöhle. Aufn.: W. UFRICHT.

Im Steinbruch RÖSCH 500 m östlich von Merklingen ist eine um 0 bis 10° streichen-

de Verwerfung aufgeschlossen. Sie zeigt sich im Versatz (ca. 2-3 m, Tiefscholle im Osten) der Glaukonitbank. Die Versatzfläche ist selbst nicht erkennbar, da an ihr eine mit Sediment verfüllte Karstschlotte angelegt ist. Die Verwerfung wird auch von SIE-

WERT (2006) beschrieben, der eine Streichrichtung von 9° angibt. Komplementär zur N-S-Verwerfung verlaufen zwei gut erkennbare Zerrüttungszonen in W-E-Richtung. Ein Horizontalharnisch zeigt dextrale Bewegung auf.

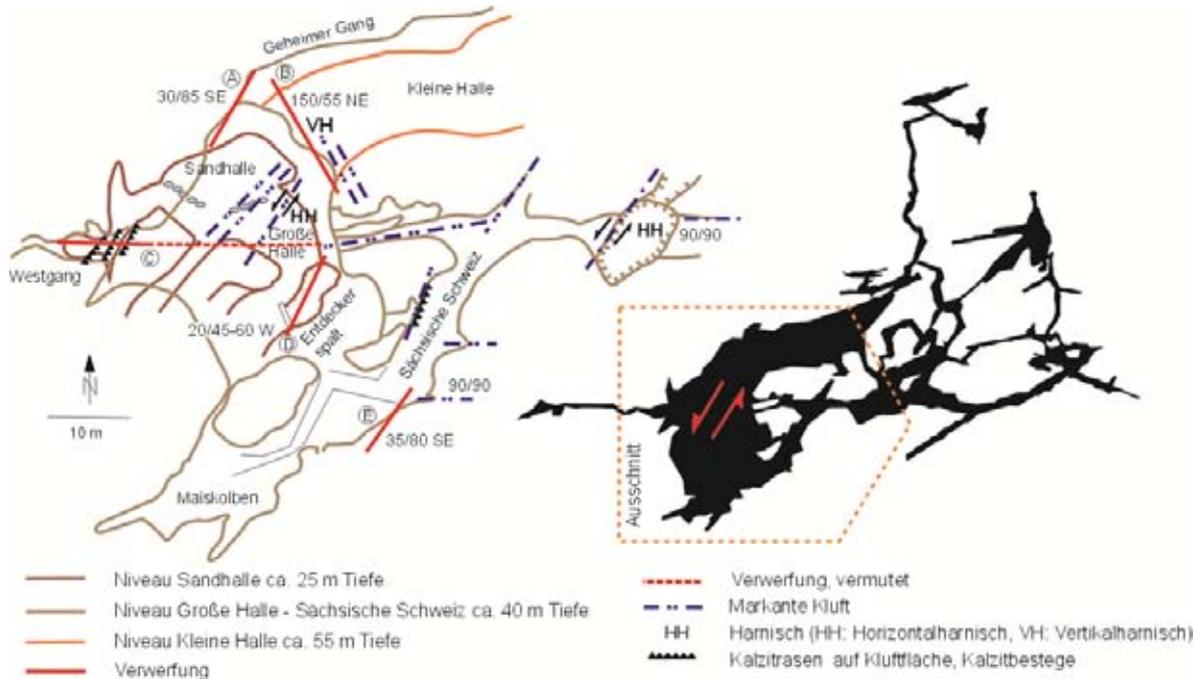


Abb. 9: Grundriss der Laichinger Tiefenhöhle mit Eintragung des kartierten tektonischen Inventars. Höhlenplan: HHV Laichingen (Zeichnung HELMUT und RICHARD FRANK).

Für das Umfeld der Blaubeurer Talschlinge ergeben sich mehrere Hinweise auf die Existenz NNE-SSW streichender Störungen, die in der amtlichen Geologischen Karte (GWINNER 1980b) nicht vermerkt sind: RÖDEL (1958) weist eine ca. 25°streichende Störung aus, die das Tiefental im Gewann Schinderteich schneidet (Schinderteichverwerfung). In seiner Schichtlagerungskarte zielt sie auf die Einmündung der Straße Seißen-Steigziegelhütte in die B28 (Blaubeurer Steige). RÖDEL (1958) erwähnt jedoch, dass er die Störung nur im Tiefental sicher fassen konnte, wo Liegende Bankkalke (ki4) gegen Obere Felsenkalke (ki3) versetzt seien (Versatzbetrag ca. 30 m, Tiefscholle im Osten). Möglicherweise ist diese Verwerfung in einer Bretterkluftzone (mit sinistralen Horizontalharnisch) im unteren Teil der Steige nach Steigziegelhütte abgebildet. Etwa 300 m westlich davon ist in der Seligengrundhöhle (Bereich Balkon) eine parallel dazu verlaufende NNE-SSW-

Zerrüttungszone erkennbar (Abb. 15), die außerhalb im Straßenaufschluss Horizontal- und Vertikalharnische aufweist. Verlängert man die Schinderteich-Störung nach NNE, dann trifft sie am oberen Ende der Blaubeurer Steige – knapp westlich der Abzweigung der Straße nach Berghülen – auf eine Reihe von mit Hangschutt überdeckten Karstspalten mit starker Bewitterung (Aufgrabung durch den HHV Laichingen; BADER 1991), die wiederum mit einer starken tektonischen Zerrüttung verbunden sein dürfte und möglicherweise entlang einer Störung eine Verbindung zum Blauhöhhlensystem anzeigt. Für eine weitere Fortsetzung der Verwerfung nach NNE spricht, dass nördlich der Vorderen Hessenhöfe die Streichrichtung der vermuteten Verwerfung mit der kartierten Schichtgrenze ki3 und ki4 zusammenfällt (Tiefscholle im SE) und schließlich in Höhe des Kleinen Lautertals in die kartierte Temmenhäuser Störung (11) übergeht (Streichrichtung 40°). Damit ist eine mindes-

tens 12 km lange Störung ersichtlich. Die Bewegungsabläufe an der Störung sind einerseits durch Abschiebung gekennzeichnet, da auf der Tiefscholle in geschützter Lage noch Liegende Bankkalke erhalten sind. Andererseits scheint es jedoch auch zu Horizontalbewegungen gekommen zu sein, wie der „zick-zack-ähnliche“ Verlauf des Kliffabschnitts und das Ausweichen des Kliffs nach Norden an der NNE-SSW streichenden Störung bei Temmenhausen verdeutlicht. Betrachtet man den Kliffverlauf im gesamten Blautopf-Einzugsgebiet (vgl. Schichtlagerungskarte Abb. 18), so scheinen sich diese Mechanismen mehrfach zu wiederholen, vorzugsweise im Abschnitt zwischen Suppingen und Temmenhausen. Hier entsteht der Eindruck, dass eine breite sinistrale Blattverschiebungszone den Kliffbereich quert. Ein analoges Bild zeigt auch die Lautertal-Verwerfung. Die Beobachtungen am Kliff decken sich mit denen von GOLWER (1959), ILLIES (1978) und PRINZ (1959), die zwischen Ebingen und Münsingen an NNE-SSW streichenden Verwerfungen ebenfalls einen mehrfachen linkslateralen Versatz der burdigalen Klifflinie sehen. In den dort kartierten Störungen häufen sich Horizontalharnische mit entsprechender Orientierung. Östlich der Schinderteich-Temmenhäuser Störung wurde von RÖDEL (1958) eine dazu parallel verlaufende Verwerfung kartiert. Sie

ist im Hang des Tiefentals östlich von Weiler durch den Versatz der ki2/ki3-Grenze kartiert (Weiler Störung, Versatzbetrag ca. 10 m). Allerdings wurde sie in die amtliche Geologische Karte nicht übernommen, obwohl dort ein Schichtversatz ersichtlich ist, wenn er auch durch den Eintrag von Hangschutt kaschiert wurde. Die Störung ist sicher bis in das Blaubeurer Galgental zu verfolgen. Dort ist in der ersten Kurve oberhalb des Eingangs zur Vetterhöhe links und rechts der Bundesstraße B28 die Glaukonitbank mit geringem Höhenunterschied aufgeschlossen (GWINNER 1980a). Das Schichtfallen zeigt westlich der Straße nach Norden, östlich der Straße ist es nahezu söhlig. Etwas südlich dieses Aufschlusses quert die Verwerfung die Vetterhöhe zwischen dem Westende des Nordgangs und dem Kartenhaus (Abb. 13). Eine solitäre Verwerfungsfläche ist nicht auszumachen, dafür aber eine ca. 5-7 m breite engscharig geklüftete und stark verkarstete Zone. Das Klufnmuster an der Decke des Kartenhauses (Abb. 10), dem derzeitigen nordwestlichen Ende der Höhle etwa 80 m westlich der Störung, zeigt ein typisches Fiederklufnmuster mit en echelon, d.h. diagonal zu einer Verschiebungsfläche gestaffelten Bruchflächen. Derartige Strukturen werden als Elemente einer sinistralen Blattverschiebungszone mit NNE-SSW-Streichen gedeutet.

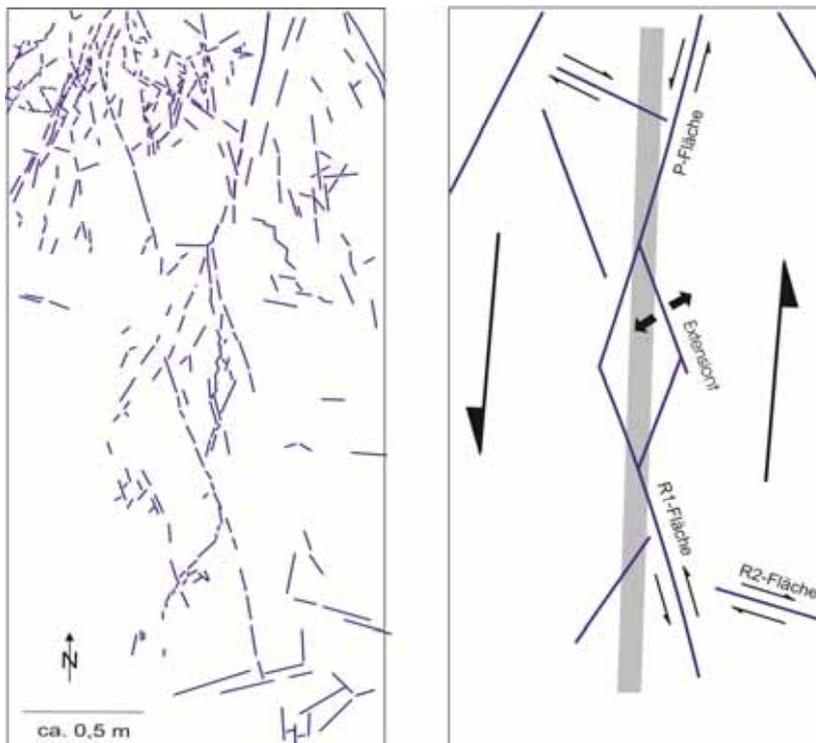


Abb. 10: Kluftnetz an der Decke des Kartenhauses (Vetterhöhle), Klüfte sind innerhalb einer Scherzone en echelon, d.h. diagonal zur Scherrichtung angeordnet. Die Rekonstruktion des Musters erfolgte über eine Fotodokumentation der Decke. Von den Bildern wurden die Klüfte auf Papier übertragen und für die Projektion zur Draufsicht gespiegelt. Links: Projiziertes Klufnmuster, nach Spiegelung von oben betrachtet; B: Genetische Interpretation des projizierten Klufnmusters (Betrachtung von oben).

Eine weitere NNE-SSW streichende Störung verläuft nach RÖDEL (1958) durch die Felsengruppe beim Rusenschloss an der Ostflanke der Blaubeurer Talschlinge (Rusenschloss-Störung, 16). Die Existenz der Störung und der Versatzbetrag von ca. 30 m (Tiefscholle im Osten) ist nach RÖDEL morphologisch im Verlauf des Felsenkranzes wahrzunehmen. GWINNER (1980a) hat diese Verwerfung nicht übernommen, obwohl er die enge Scharung der Streichlinien in seiner Schichtlagerungskarte als deutlichen Hinweis für das Bestehen der von RÖDEL beschriebenen Störung interpretiert. Das in der geologischen Karte verzeichnete starke Einfallen der Schichtgrenze ki2/3 auf kurze Distanz um ca. 30 m (Rusenschloss 590 bis 600 m NN, Frauenberg 560 m NN) entspricht etwa der von RÖDEL (1958) angegebenen Sprunghöhe der Störung.

Am Felsaufschluss in der Hessenhauoline (Waldstück „Buch“, 1 km NNW Hessenhöfe) ist eine dominante Kluftrichtung von 30° gemessen worden, bevor die Felswand zur Sicherung des Schachteinstiegs abgetragen wurde. Dabei war eine besonders engständige Klüftung in dieser Streichrichtung mit Kluffabständen von ca. 10 bis 15 cm feststellbar. In der in ca. 30 m Tiefe entdeckten i-Punkt-Halle (Hessenhauhöhle, Kataster-No. 7524/117) verstärkt sich der Eindruck extremer tektonischer Gebirgsbeanspruchung. In der Halle sind zwei schmale, nur wenige Meter breite 25 bis 35° streichende Verbruchzonen (Fallwinkel 65 bis 80°) aufgeschlossen. Das Gestein ist zerrüttet, teilweise einer Breccie ähnlich (Abb. 11). Die Kluffkörper sind etwa pflasterstein- bis kopfgroß. Andere Streichrichtungen der Klüfte sind deutlich untergeordnet. Nur im Südostteil der Halle kommt etwas markanter die 70°-Richtung zum Ausdruck. Offensichtlich liegt die Halle in einer mehrere Meter breiten, 30 bis 35°streichenden Bruchzone (Hessenhau-Störung, 17, Abb. 3), die aufgrund der extremen Gebirgsbeanspruchung am ehesten als Scherzone (Blattverschiebung) zu deuten ist. Obwohl die schräg einfallenden Kluffflächen die Zerrüttungszone in der i-Punkt-Halle gut sichtbar begrenzen und damit einen tektonischen Ursprung belegen, können an der intensiven Zerlegung des Gebirges auch Versturzvorgänge beteiligt sein. Es ist sehr wahrscheinlich, dass neben der i-Punkt-

Halle noch weitere Karsthohlräume an der Störungszone angelegt wurden. Das Einstürzen der Hohlräume führt zum Nachbrechen und zur Gefügelockerung des überlagernden Gebirges. Für diese Vorstellung spricht, dass beim Abteufen des Hessenhau-Schachts mehrfach Sinterbrocken innerhalb der lockeren Felsmassen gefunden wurden. Besonders interessant ist der Fund eines 40 cm langen Stalagmiten (Durchmesser ca. 10-15 cm), der „kopfüber“ zwischen zwei Versturzböcken eingekleimt war. Eine U/Th-Datierung des Tropfsteins (Prof. A. MANGINI, Heidelberger Akademie der Wissenschaften) ergab ein über die Datierungsgrenze von 400.000 Jahren hinausreichendes Alter.

In der Zerrüttungszone nahe des Eingangs zur i-Punkt-Halle (MP6, Abb. 11) ist der Kluffzwischenraum mit gelbbraunem, polyedrisch zerfallendem Ton und Schluff ausgefüllt. Der Ton überzieht die Kluffflächen z.T. als dünner Saum, z.T. ist er aber mehrere Zentimeter dick. Auf den Tonoberflächen sind Strömungen und „glatt polierte, leicht gebogene Flächen“ zu finden. Die Strömung ist teils vertikal, teils schräg bis horizontal, d.h. sie erklärt sich nicht allein durch das gravitative Absinken von Blöcken innerhalb der Zerrüttungszone. Als mögliche Erklärung ergibt sich neben einer internen Rotation von Gesteinsblöcken im Zuge des Versturzvorgangs auch horizontale Bewegung einzelner Kluffkörper infolge tektonischer Scherbeanspruchung. In diesem Fall ist für diese Zerrüttungszone eine mehrphasige Entstehung festzustellen:

1. Zerschneidung des Gebirges und beginnende Zerkleinerung der Kluffkörper,
2. Ausfüllung der entstandenen Hohlräume zwischen den Kluffkörpern durch gelbbraunen Ton,
3. Reaktivierung bzw. Fortgang der Scherbewegungen.

Der gelbbraune Ton, auf dessen Oberfläche oft schwarze Eisen-Mangan-Bestege zu finden sind, ähnelt sehr dem sog. Alblehm (Pliozän bis Pleistozän). Dieser ist auf der Albhochfläche weit verbreitet und füllt sehr häufig die Trockentäler und Karstsenken aus.

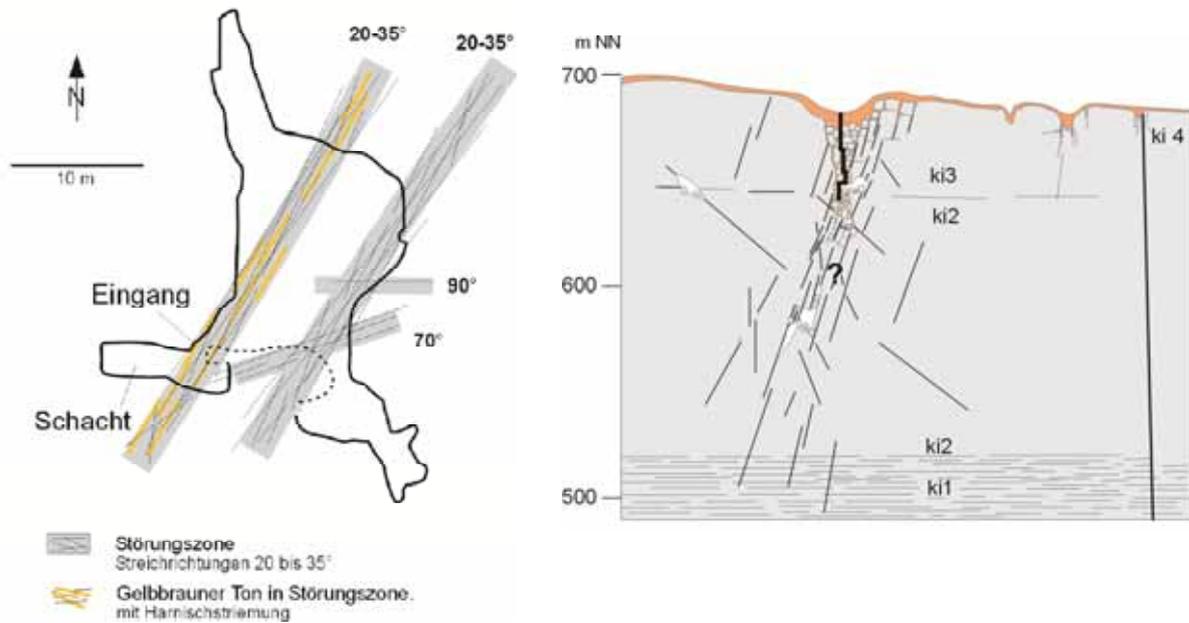


Abb. 11: Hessenhau-Höhle (Kataster-No. 7524/117), oben links: Darstellung der 20 bis 35°-Störungszone in der i-Punkt-Halle, oben rechts: Prinzipschnitt der i-Punkt-Halle und des abgeteuften Schachts in der Störungszone unterhalb der Hessenhau-Doline, unten: Blick auf die flach einfallende Störungszone in der i-Punkt-Halle (Aufn.: ANDREAS SCHOBER).

Verlängert man diese Scherzone im gemessenen Streichen nach SW, stößt man an der Bundesstraße SE Wennenden auf eine Zone, die sich durch starke Bewette-

rung bemerkbar macht. Austretende Warmluft während der Wintermonate sorgt hier für Abschmelzen des Schnees. Diese Zone wird mit der vom Laichinger Pfarrer MAYER

beschriebenen Großdoline in Verbindung gebracht, die 1681 bei Wennenden eingebrochen ist (VILLINGER 1987). Ob die Störung in nordöstlicher Verlängerung mit der durch eine Bohrung erkannten Verwerfung im Kleinen Lautertal (Abb. 3, Hübscher Stein, 12; unveröffentlichtes Schichtenverzeichnis LGRB) zusammenhängt, kann nur vermutet werden. In der Bohrung ist zwar eine Schichtverkürzung nachzuweisen, jedoch ist das Streichen der die Schichtverkürzung verursachten Verwerfung nicht bekannt. In Anlehnung an zahlreiche Hillshade-Lineationen sowie an die kartierte Temmenhäuser Störung wird NNE-SSW-Richtung angenommen.

Westlich Wennenden und Berghülen fallen lang durchhaltende NNE-SSW-Hillshade-Lineationen auf (Abb.3), deren Verlauf der von GWINNER kartierten Grenze von Oberen Felsenkalken und Liegenden Bankkalken (ki3/ki4) entspricht. Die Verbreitung der Liegenden Bankkalke (ki4) scheint daher nach Westen tektonisch begrenzt zu sein. Es ergibt sich hier dieselbe Vermutung, wie für die Schinderteich-Störung (14), die zumindest abschnittsweise von RÖDEL kartiert wurde. Mehrere Störungen mit NNE-SSW-Streichen sind auch westlich und nordwestlich der Schinderteich-Störung anzunehmen (Abb. 3).

Östlich Altental quert die ca. 50° streichende Weidach-Verwerfung (18) das Blautal (GEYER 1997). Nördlich des Tals biegt sie in die 30°-Richtung um. Wahrscheinlich durchzieht sie SW Weidach das Kleine Lautertal und ist dort für den markanten Knick im Talverlauf verantwortlich, was bereits KIDERLEN (1931) vermutet. Er deutet auch an, dass die Fortsetzung der Verwerfung nach NNE (Katharinenholz, Hetzfeld, Katzenberg) morphologisch erkennbar sei. In der Fortsetzung der Störung nach Norden springt auch die Klifflinie aus der 75°-Richtung bei Westerstetten in die Richtung der Verwerfung um. Durch Bohrungen im Blautal kann der Weidach-Verwerfung ein vertikaler Versatzbetrag von ca. 25 bis 30 m zugeschrieben werden. Sie versetzt Untere Süßwassermolasse und gibt damit ein ungefähres Alter der Bewegung.

WNW-ESE bis W-E streichende Störungen

In der Vetterhöhle sind zwei markante W-E verlaufende Gangabschnitte bekannt. Der erste wird von der Herbert-Griesinger-Halle, dem Palast der Winde und der Walhalla gebildet. Er setzt sich nach Osten im vorderen Teil der Blautopfhöhle fort. Entlang dieser 90 bis 100°-Achse sind mehrere Bretterkluftzonen aufgereiht ((Herbert Griesinger-Halle, Abgang zur Walhalla, Walhalla Richtung Biwak sowie in der Blautopfhöhle in der Scooter-Klamm, Abb. 21). Der zweite W-E verlaufende Gangabschnitt in der Vetterhöhle, der von der Abzweighalle in den Nordgang verläuft, ist an eine markante Trennfläche gebunden, die aufgrund ihres geringen Fallwinkels von 65° nach Süden wahrscheinlich als Verwerfung zu charakterisieren ist. Beiden Gangabschnitten können Luftbild-Lineationen zugewiesen werden (Abb. 13).



Abb. 12: In der Vetterhöhle bricht der Nordgang an einer markanten Trennfläche (105/65 S) nahezu um 90° scharf nach Westen in Richtung Abzweighalle ab. Das Einfallen der Fläche nach Süden sowie die Übereinstimmung mit einer Luftbild-Lineation lässt eine etwa W-E streichende Verwerfung vermuten. Aufn.: W. UFRICHT.

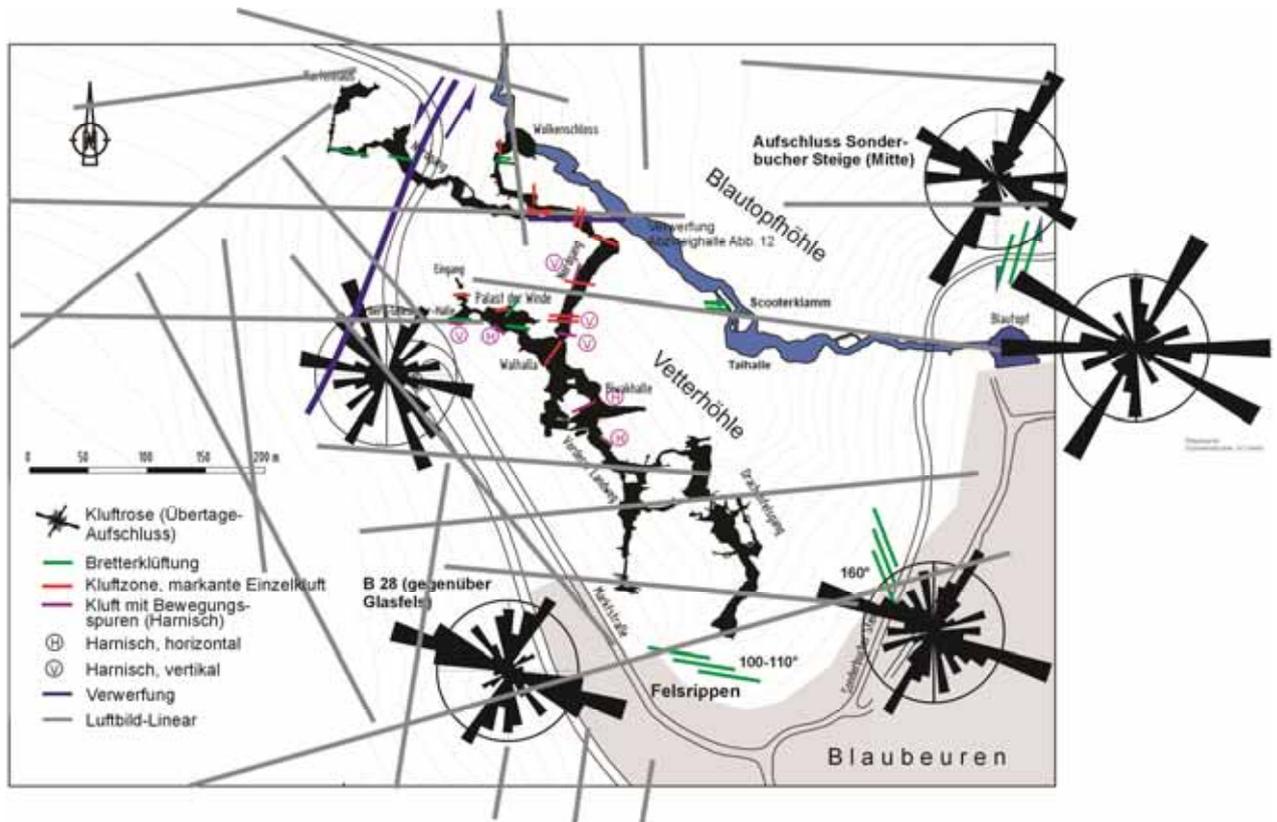


Abb. 13: Verlauf von Vetterhöhle und vorderem Teil der Blautopfhöhle im Vergleich zu tektonischen Elementen (Luftbild-Lineationen, Verwerfung, Klüftstatistik, Bretterklüftung, Bewegungsspuren). Plan Blauhöhlensystem Arge Blautopf, Arge Höhle & Karst Grabenstetten, Zeichnung: HERBERT JANTSCHKE und FRITZ MAMMEL.

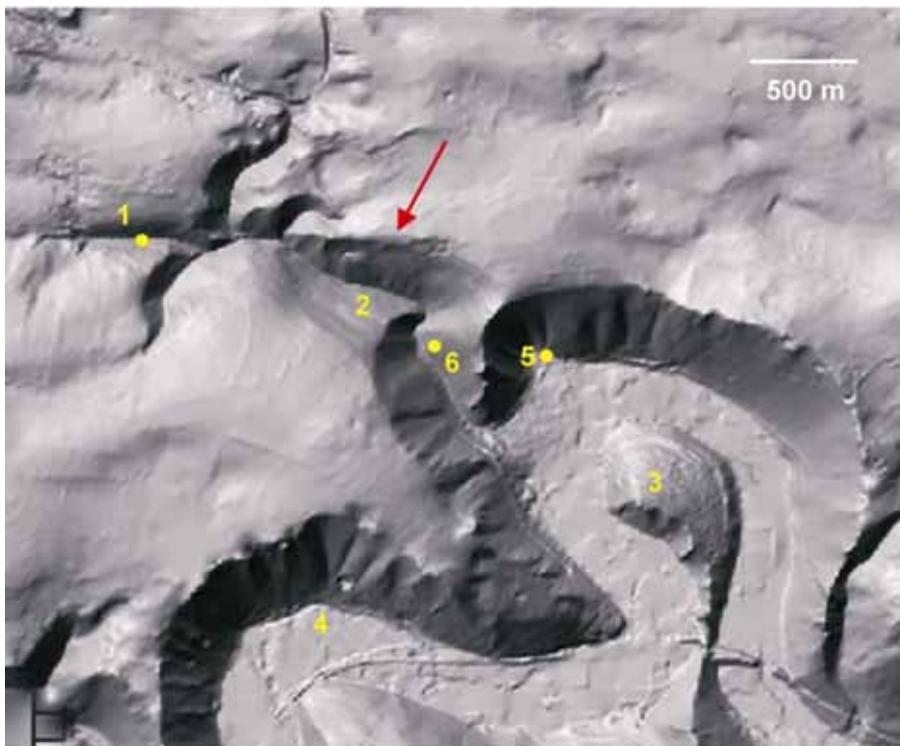


Abb. 14: Digitales Höhenmodell mit Gelände relief für das Gebiet des Seligengrundtals, Galgentals und der Blaubeurer Schlinge. Deutlich ist die strukturelle Prägung des Seligengrundtals an eine W-E-Lineation gebunden, die östlich des Galgentals eine Stufe abbildet. (DGM-Daten Landesvermessungsamt Baden-Württemberg vom 08. November.2004, Az: 2851. 2-D/2168). Graphik: THOMAS WIEGAND.
1: Eingang zur Seligengrundhöhle, 2: Galgental, 3: Rucken, 4: Weiler, 5: Blautopf, 6: Eingang Vetterhöhle.

Etwa 800 m nordwestlich der Vetterhöhle weisen auch die Befunde in der Seligengrundhöhle (Kataster-No 7524/119) sowie im Felsaufschluss entlang der Straße zur Steigziegelhütte bzw. nach Seißen auf eine weitere W-E verlaufende Störungszone (Abb. 14 und 15). Sie sticht im digitalen Höhenmodell als scharfe Bruchkante hervor. Das Luftbild zeigt Lineationen in W-E-Richtung, die im Unterlauf des Seitentals in einen Streichwinkel von 105° drehen. Sie prägen den Verlauf des vom Galgental nach Westen abgehenden Seitentals Richtung Steigziegelhütte und Seißen.

Eine im Seligengrund an einer Felsnische festgestellte Bewetterung war Anlass für eine Grabung (Arge Blaukarst), die zur Entdeckung der Seligengrundhöhle führte. Der Eingangsschacht wurde entlang einer 4 bis 10 cm klaffenden und mit ca. 110° strei-

chenden Kluft abgeteuf. Die Kluft ist an beiden Seiten mit senkrecht auf der Kluftwand stehenden Kalzitkristallen belegt. Die Kristalle sind honigfarben, einige sind mit einem schwarzen Belag überzogen. Die Kalzitkluft geht nach Westen Richtung Faltegang sowie nach Osten – erkennbar im Felsaufschluss am Feldweg 25 m vom Höhleneingang entfernt – in 90° streichende Klüfte über (Abb. 15). Sie sind in beiden Richtungen aber weder geöffnet, noch weisen sie Kalzitbestege auf. Die 90°-Kluftzone ist 140 m weiter östlich wieder in der Felsböschung an der Straße zur Steigziegelhütte in einer 2 m breiten Bretterkluftzone erkennbar. Diese wird von einer NNE-SSW-Kluftzone gequert, die wahrscheinlich der von RÖDEL (1958) ausgewiesenen Schinderteich-Verwerfung (14, Abb. 3) entspricht. Auf den 20 bis 40° streichenden Klüften finden sich Horizontalharnische.

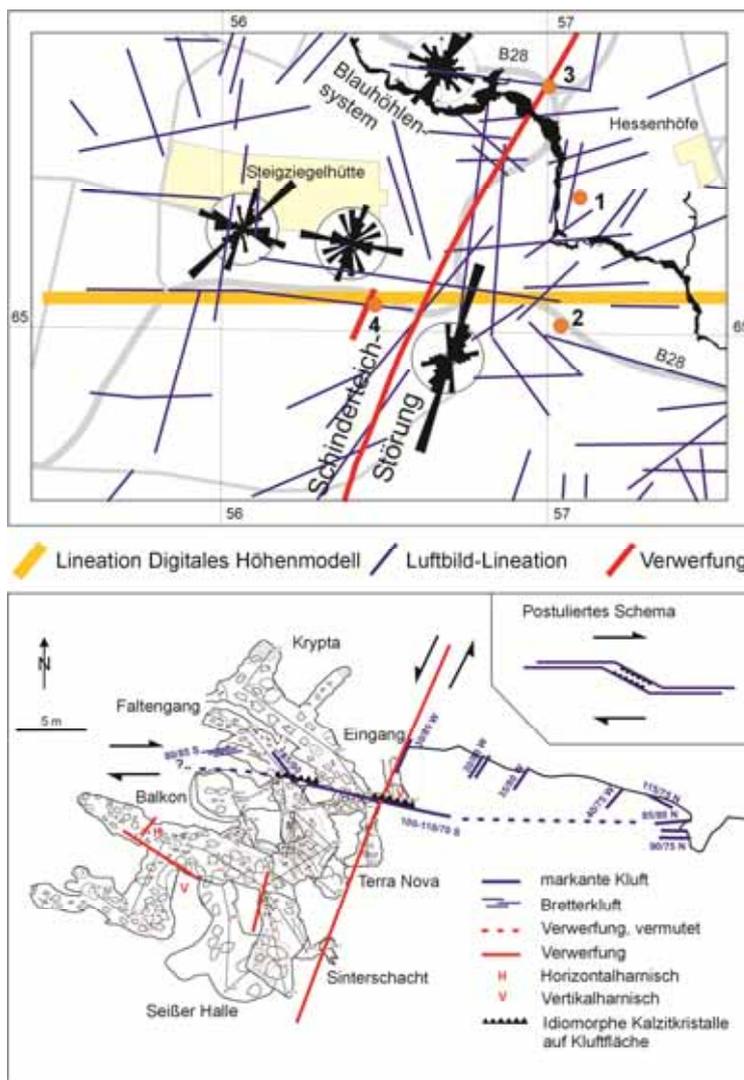


Abb. 15 : Tektonische Situation im Seligengrund-Tal. Oben: Tektonische Strukturelemente (1: Doline mit Bewetterung, 2: Ponor im Galgental, 3: Kluftzone mit Bewetterung, 4: Seligengrundhöhle. Unten: Grundrissplan Seligengrundhöhle bis 30 m Tiefe (Vermessung Arge Blaukarst, Zeichnung JÜRGEN BOHNERT) mit kartiertem tektonischen Inventar.



Abb. 16: Seligengrundhöhle. Links: Geöffnete Kluft mit beiderseits senkrecht zur Kluftwand stehenden Kalzitkalenoedern. Höhe des Bildausschnitts ca. 50 cm. Oben rechts: Wandbereich im Nahfeld der Kluft. Deutlich erkennbar ist die breccienähnliche Struktur des Weißjura-Kalksteins, die als tektonische Zerrüttungszone interpretiert wird. Die Kalzitkristalle in der Kluft sitzen der Zerrüttungszone auf. Unten rechts: Detailaufnahme der Kalksteinbreccie. Alle Aufn.: W. UFRECHT.

Entlang der mit Kalzitkristallen besetzten Kluft ist das Gestein intensiv zerrüttet, so dass der Eindruck einer versinterter Breccie entsteht. Die von Kalzit umschlossenen Kalksteinbrocken haben Faustgröße bis 5-Cent-Größe (Abb. 15). Sie sind kantig und zeigen raue Bruchflächen ohne Spuren von Korrosion oder Übersichtung mit Lehm, Humus o.ä. Der Kalzit ist klar und rein. An einigen Handstücken erkennt man einen scharfen Übergang von massigem unbeeinflusstem Fels zur Breccienzone. Auch in größerer Entfernung zur Kalzitkluft ist der Fels von zahlreichen Klüften durchzogen, die sekundär wieder verheilt sind.

Insgesamt muss eine mehrphasige Entstehung dieser Struktur angenommen werden:

1. Tektonische Gesteinszertrümmerung (Breccierung) unter Abnahme der Intensität mit Entfernung zur Trennfläche,
2. Verkittung der Gesteinsbreccie durch Kalzit, Trennfläche ist noch geschlossen,
3. Aufreißen der Trennfläche,

4. Wachstum der idiomorphen Kalzitkristalle senkrecht zur Kluftwand, Kalzitabscheidung unter vollständiger Wassererfüllung der Trennfläche.

Die mehrphasige tektonische Aktivität und die intensive Gesteinszerrüttung machen eine laterale Scherbeanspruchung wahrscheinlich. Sieht man die geöffnete Kalzitkluft zusammen mit weiteren 110°-Klüften als fiederig zur Scherrichtung angeordnet, dann könnte sich daraus die W-E-Richtung als Hauptbewegungsbahn mit dextralem Relativbewegungssinn ergeben (siehe Prinzipbild in Abb. 15). Allerdings ist der Winkel zwischen Bewegungsbahn und Fiederkluft sehr klein gegenüber den theoretisch zu erwartenden 45°.

Die in der Vetterhöhle und Seligengrundhöhle kartierten und im Streichen mit Lineationen identischen tektonischen W-E-Strukturen lassen sich bis in die Blautopfhöhle verfolgen. Sie bestimmen in weiten Teilen den Richtungsverlauf der Gänge.

Besonders hervorzuheben ist der Abschnitt Griesinger Halle – Palast der Winde – Walhalla, der seine Fortsetzung im vorderen Teil der Blautopfhöhle (Talhalle – Bunker – Düse) findet.

Die beschriebenen tektonischen Einzelelemente im Seligengrund und im Blauhöhle-System geben Hinweise auf eine dextrale Blattverschiebung, die in Richtung und Lage mit einer Hillshade-Lineation übereinstimmt.

NW-SE streichende Störungen

In der Laichinger Tiefenhöhle ist neben den NNE-SSW-Störungen auch eine 150° streichende Störung bekannt, an die der Abgang von der Großen Halle zur Kleinen Halle angelegt ist. Die mit 60° nach NE einfal-

lende Störung ist großflächig mit einem Harnisch belegt. Aus kleinen Absätzen bzw. Stufen auf der Harnischfläche kann der relative Bewegungssinn entlang der Bruchfläche abgelesen werden, der die Verwerfung als Aufschiebung kennzeichnet.

Auf der Verwerfungsfläche sind Anastomosen ausgebildet. An Klüften parallel zur Störung entstanden in engem Abstand zueinander einzelne isolierte elliptische Karst-röhren. Ansonsten ist die Verwerfung in Bezug auf die Gesamterstreckung der Höhle nicht raumbestimmend und als wasserwegsame Bahn nur von örtlicher Bedeutung.



Abb. 17 links: Blick auf die 150° streichende Aufschiebung in der Laichinger Tiefenhöhle zwischen Großer Halle und Kleiner Halle. Links Anastomose auf der Verwerfungsfläche (oberer Teil der aufgeschlossenen Verwerfung in Höhe der Großen Halle), rechts oben: Vertikalharnisch auf der Verwerfungsfläche (Abgang zur Kleinen Halle), rechts unten: kluffgebundene Anastomosen parallel zur Aufschiebung (im Bild links). Alle Aufn.: CHRISTIAN UFRECHT.

4 Schichtlagerung

Die Erfassung der Lagerungsverhältnisse ist besonders schwierig, da in den Massenkalken des Oberjuras stratigraphische Ansprachen nur bedingt möglich sind. Ein weiteres Problem sind örtlich wechselnde Faziesausbildungen, die zu großen Mächtigkeitsunterschieden der Schichtglieder führen können. Folglich kann von kartierten oder erbohrten Schichtgrenzen meist nur mit Inkaufnahme von Fehlern die Höhenlage des für die Konstruktion der Schichtlagerung gewählten Bezugshorizonts errechnet werden. Der in den Unteren Felsenkalken liegenden Glaukonitbank kommt zwar eine wichtige Bedeutung für die stratigraphische Orientierung im Massenkalk zu. Ihre Wahl als Bezugshorizont ist dennoch mit Problemen verbunden, weil sie in der Massenkalkfazies auch das submarine Relief zu ihrer Bildungszeit widerspiegelt. Die Mächtigkeitsunterschiede der Unteren Felsenkalke 1 bis 3 (ki 2.1 bis 2.3) in Normalfazies (gebankte Kalksteinfohlen) gegenüber Massenkalkfazies (Schwammfazies) können bis zu 60 m betragen. Auswirkungen des submarinen Reliefs auf die Höhenlage der Glaukonitbank hat UFRICHT (1983a) im lokalen Maßstab für die Laichinger Tiefenhöhle dargestellt. Damit nur tektonisch begründete Schichtverbiegungen Berücksichtigung finden, ist ein stratigraphischer Bezugshorizont unterhalb der Massenkalkbasis anzustreben. Hierfür kommt die Grenze zwischen der Lacunosamergel-Formation und der Unteren Felsenkalk-Formation in Betracht. Leider ist diese jedoch sehr selten aufgeschlossen und nur einige Bohrungen reichen bis in die Lacunosamergel-Formation hinein. Die Glaukonitbank kann in die Konstruktion der Schichtlagerung nur dann näherungsweise einbezogen werden, wenn mit lokalen Mächtigkeiten für die Schichtglieder zwischen Lacunosamergel-Formation und Glaukonitbank operiert wird und damit aus der NN-Höhe der Glaukonitbank durch Abzug der Mächtigkeit der Schichtglieder Untere Felsenkalke 1 bis 3 auf die NN-Höhe des Bezugshorizonts Lacunosamergel-/Untere Felsenkalk-Formation geschlossen werden kann. Dies wird mit einer Isopachenkarte ermöglicht, in der auf Basis erbohrter Schichtmächtigkeiten eine linear interpolierte Mächtigkeitsverteilung der Unteren Felsenkalke 1 bis 3 für den Untersuchungsraum dargestellt ist

(BARTENBACH 2008, BARTENBACH & UFRICHT 2009). Die bei BARTENBACH & UFRICHT (2009) abgebildete Karte zeigt, dass sich für ki 2.1-2.3 die großen Schichtmächtigkeiten von über 80 m auf das Gebiet zwischen Laichingen, Merklingen und Blaubeuren konzentrieren, während im Raum Westerheim – Wiesensteig das gleiche Schichtglied unter 20 m mächtig ist. Von Schichtgrenzen über der Glaukonitbank kann nicht mehr bis zur Lacunosamergel-Formation gerechnet werden, da sich dann die Unsicherheiten in den anzusetzenden Mächtigkeiten der dazwischen liegenden Schichten verstärken. Neben den verfügbaren stratigraphischen Schichtansprachen von Bohrungen, die im überwiegenden Fall zur Beobachtung bzw. zur Erschließung von Grundwasser im Blautal, Tiefental und Kleinen Lautertal abgeteuft wurden, kam es im Rahmen der geowissenschaftlichen Erkundung des Blauhöhlensystems auch zur Ausführung einer 69 m tiefen Bohrung bei der Schimmelmühle in Blaubeuren (BARTENBACH & UFRICHT 2009), in welcher die Lacunosamergel-Formation (ki1) bei 446 mNN erreicht wurde. In dieser Bohrung, in mehreren zugänglichen Grundwassermessstellen sowie auch entlang der Schachtwände der Laichinger Tiefenhöhle (Tiefenbereich 20 bis 70 m) wurden zur stratigraphischen Einordnung gamma-raylogs durchgeführt (BARTENBACH 2008). Ein großräumiges synoptisches Bild der Schichtlagerung kann aus den einzelnen Strukturkarten der amtlichen Geologischen Karten 1:25.000 nicht erschlossen werden, da dort unterschiedliche, jeweils für das einzelne Kartenblatt geeignete Bezugshorizonte zur Konstruktion der Isolinien gewählt wurden. Eine großräumige Karte für die Grenze Lacunosamergel-Formation/Untere Felsenkalk-Formation (ki 1/ki 2) bzw. Untere Felsenkalke 3/4 (ki 2.3/ki 2.4; Glaukonitbank), wie sie GIESE & WERNER (1997) für einen Teil der mittleren und westlichen Schwäbischen Alb darstellen, kann nur die großräumigen Struktureinheiten wiedergeben. Die aus diesen Karten ablesbaren Höhen der Schichtgrenzen im Raum Laichingen-Blaubeuren passen allerdings mit den vor Ort gewonnenen Daten (BARTENBACH 2008) nur sehr ungefähr zusammen und zeigen Differenzen von bis zu 50 m.

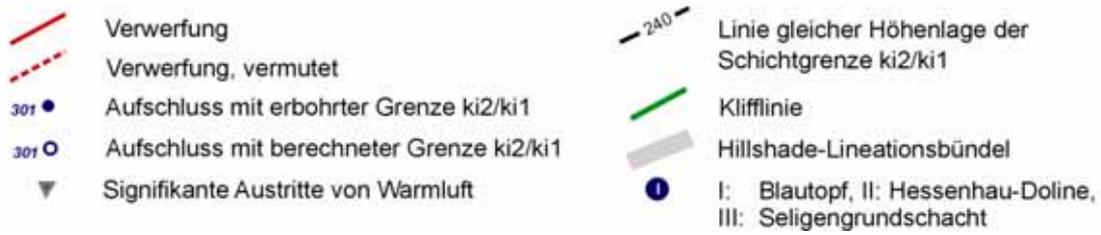
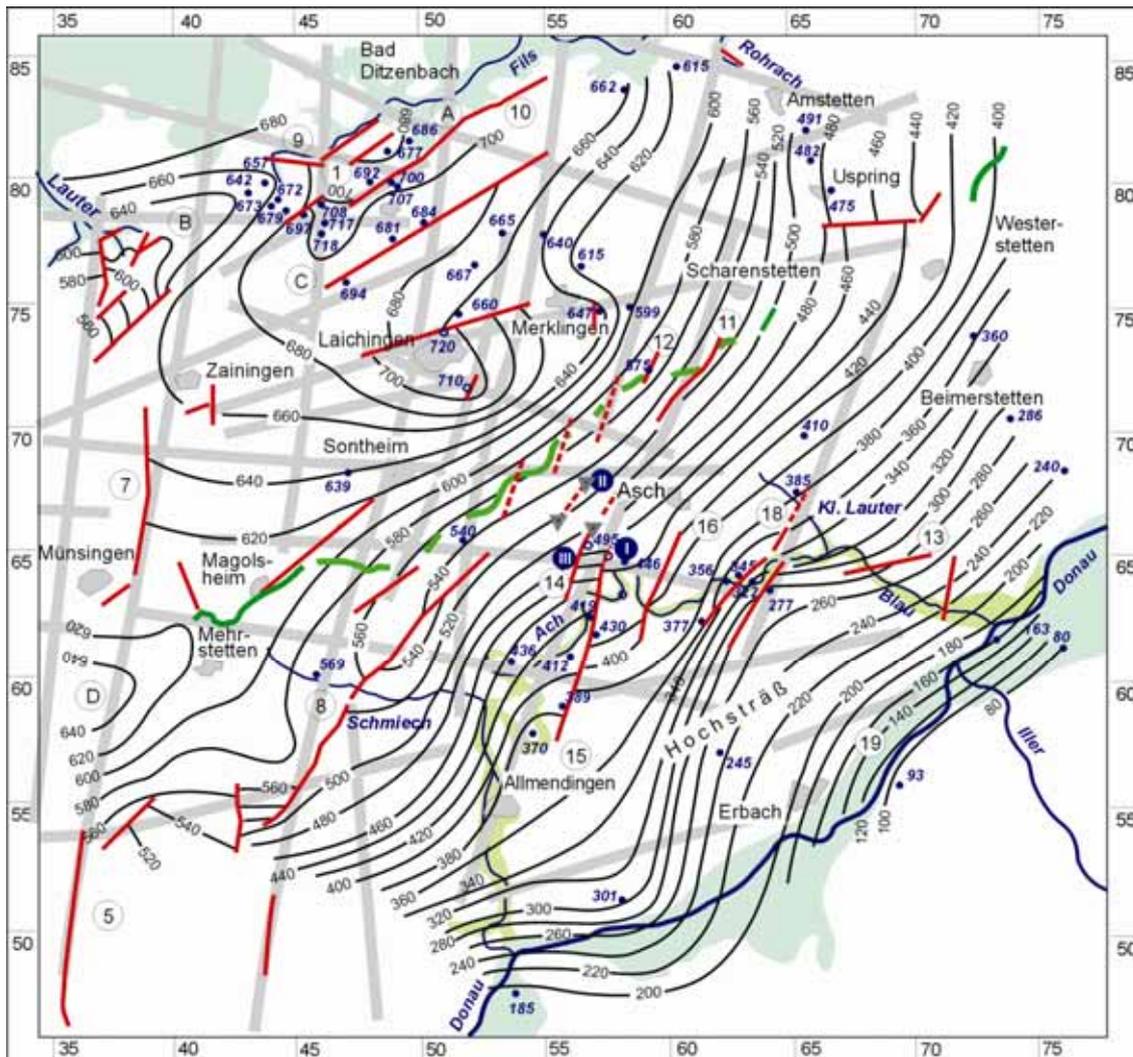


Abb. 18: Strukturkarte mit Schichtlagerung (Bezugshorizont Schichtgrenze Lacunosamergel-Formation, ki1/Untere Felsenkalk-Formation, ki2) und Verwerfungen im Blautopf-Einzugsgebiet und der weiteren Umgebung. Zum Vergleich sind Hillshade-Lineationen grau hinterlegt. Verwerfungen: 1: Filstalstörungen, 5: östliche Ausläufer des Münsinger-Zwiefalter Bruchfelds, 6: Lautertal-Störungssystem, 7: Römerstein-Verwerfung, 8: Weidach-Störung, 9: Autal-Störung, 10: Impferloch-Störung, 11: Temmenhäuser Störung, 12: Hübscher Stein-Störung, 13: Blautal-Störung, 14: Schinder-teich-Störung, 15: Weiler Störung, 16: Rusenschloss-Störung, 17: Hessenhau-Störung, 18: Weidach-Störung, 19: Albsüdrandflexur. Schichtverbiegungen: A: Filstalmulde mit Filstalstörungen, B: Schopf-locher Tiefenlinie, C: Westerheimer Hochgebiet, D: Mehrstetter Hochgebiet.

Verwendete Literatur: BLOOS (1967), BOCK (2001), BRODBECK (1989), EISELE (1985), FRANZ et al. (2001), GEYER (1997), GEYER & VILLINGER (2001a,b), GREGAREK (1978), GRIESINGER et al. (1994), GROSCOPF (1971), GWINNER et al. (1974) GWINNER (1980), HOYDEM (1992), KIDERLEN (1931), KRAUTTER (1995), MAUS (2000), PAULSEN (1962), RÖDEL (1957, 1958), SCHALL (2002), SCHALL et al. (2004), VEIT (1936), VILLINGER (1987).

Die für das Einzugsgebiet des Blautopfs und sein weiteres Umfeld erstellte Schichtlagerungskarte mit dem Bezugshorizont Lacunosamergel-/Untere Felsenkalk-Formation (ki 1/ki 2) ist in Abb. 18 dargestellt. Da bei vielen Verwerfungen weder der Versatzbetrag noch die Versatzrichtung bekannt sind, werden die Linien gleicher Höhenlage der Schichtgrenze im Nahbereich der Störungen abgesetzt.

Das großräumige Schichtfallen ist von Nordwesten nach Südosten gerichtet. Der Fallwinkel beträgt im Mittel etwa 1 bis maximal 2°. Im Hochsträß und südlich davon versteilt sich das Schichtfallen auf 2 bis 3°. Hierin könnte sich die Albsüdrandflexur (KIDERLEN 1931) widerspiegeln. Die Schichtlagerungskarte zeigt ausgeprägte Hochgebiete um Hohenstadt (Westerheimer Hochgebiet) und südöstlich Münsingen (Mehrstetter Hochgebiet) sowie ein Tiefgebiet um Wiesensteig – Mühlhausen, das schon seit VEIT (1936) als Filstalmulde bezeichnet wird. Die Kartierungen von KRAUTTER (1995) und HOYDEM (1992) im Raum Bad Urach – Gutenberg – Donnstetten belegen die Fortsetzung der Filstalmulde nach Südwesten in die bereits auf REICH (1915) zurückgehende Schopflocher Tiefenlinie, die ebenfalls wie die Filstalmulde von SW-NE streichenden Störungen begleitet wird. Südöstlich der Achse Magolsheim – Sontheim – Merklingen wird das großräumige Bild der Schichtlagerung zunächst einheitlicher, verkompliziert sich jedoch wieder im Gebiet Allmendingen – Blaubeuren – Asch – Scharenstetten. Der stark gebogene und durch Bohrungen vergleichsweise gut belegte Isolinienverlauf der Schichtgrenze ki 1/2 im Schmiech- und Achtal könnte auf sinistralen Versatz an den dort gehäuft auftretenden NNE-SSW bzw. N-S-Störungen hinweisen.

Obwohl man die tatsächlichen strukturellen Gegebenheiten aufgrund mangelnder Aufschlusslage im Detail nicht auflösen kann, ergeben sich aus einzelnen Befunden auch Hinweise auf kleinräumige Schichtverbiegungen. In seiner auf der ki2/3-Grenze beruhenden Schichtlagerungskarte hebt GWINNER (1980b) im lokalen Maßstab Schichtverbiegungen bei Berghülen sowie eine signifikante Schichtaufwölbung bei Blaubeuren hervor. Eingezwängt zwischen die NNE-SSW streichenden Störungen bei

Weiler (No. 15) und dem Rusenschloss (No. 16), kann diese als Abbild horizontaler Einengung durch Scherbewegungen gesehen werden.

5 Kleintektonisches Inventar

5.1 Klüfte

Bei der Aufnahme des Kluffinventars wurden Aufschlüsse auf der Albhochfläche wie auch in Taleinschnitten berücksichtigt, um möglichst eine repräsentative Verteilung des tektonischen Kluffinventars im Einzugsgebiet des Blautopfs zu erhalten (Aufschlussverzeichnis vgl. Tab. 1). Gerade auf der Hochfläche ist die Dichte der Tagesaufschlüsse gering und konnte nur zum Teil durch die tektonische Aufnahme von Klüften in Höhlen ausgeglichen werden (Sontheimer Höhle, Laichinger Tiefenhöhle, Vetterhöhle, Hessenhauhöhle).

Insgesamt wurden 45 Aufschlüsse mit insgesamt 4558 Kluffwerten erfasst, wovon allein 17 Aufschlüsse im direkten Umfeld der Blaubeurer Talschlinge liegen. Um das Kluffinventar statistisch repräsentativ zu erheben, wurden für jeden Aufschluss ca. 100 Kluffmessungen angestrebt. An langgezogenen Aufschlüssen, wie z.B. Sonderbacher Steige oder Straße zur Steigziegelhütte, wurden die Felswände aufgeteilt und das tektonische Inventar jeweils in getrennten Kluffrosen-Diagrammen dargestellt. Obwohl in der Literatur (z.B. BAYER 1982a) aufgrund starker Streuung der Kluffrichtungen im Massenkalk eine hohe Zahl an Messungen zur Erlangung einer statistisch repräsentativen Streichrichtung einzelner Kluffscharen gefordert wird, haben sich hier Werte um 100 bis 110 Klüfte pro Aufschluss durchaus als ausreichend erwiesen. Die kleinen Felsgruppen auf der Albhochfläche gaben aufgrund ihrer geringen Ausstrichsfläche oftmals weniger Messwerte (50 bis 90 Kluffflächen) her.

Das kleintektonische Inventar wurde mit dem Breithaupt-Gefügekompas aufgenommen. Bei der Ablesung bzw. Umrechnung der Messwerte wurden die Streich- und Fallwinkel auf 5° gerundet. Zur statistischen Auswertung der Kluffwerte und Kluffrichtungsanalyse wurden symmetrische Kluffrosen mit Streichrichtungsklassen von

10° gewählt. Die zum Teil in Abb. 3 und 19 dargestellten Kluffrosen gehen auf die eigenen Messkampagnen zwischen 2005 und 2007 zurück. In die Interpretation des tektonischen Gesamtinventars gehen auch

Kluffmessungen von BAYER (2002), BRODBECK (1989), EISELE (1985), GREGAREK (1978), GRIESINGER et al. (1994), HOYDEM (1992), UFRICHT (1983b), RÖDEL (1957, 1958) und SIEWERT (2006) mit ein.

Tab.: 1: Verzeichnis der Aufschlüsse im Umfeld der Blaubeurer Talschlinge, an denen Klüfte aufgenommen wurden.

Aufschluss-No.	Aufschluss	Rechtswert	Hochwert	Anzahl Klüfte
1	B28 Wennenden	3555600	5366250	110
2	Steinbruch B28 gegenüber Gewerbegebiet Blaubeuren	3556700	5365900	110
3	Straße Blaubeuren-Seißen, Abzweigung Steigziegelhütte (oben)	3556050	5365150	90
4	Straße Blaubeuren-Steigziegelhütte; Mitte	3556400	5365120	140
5	Abzweigung B28 – Steigziegelhütte (unten)	3556700	5365100	95
6	B28 gegenüber Glasfels	3557680	5364200	115
7	Umfeld Vetterhöhle	3557650	5364700	75
8	Glasfels – Beginn Sonderbucher Steige (unten)	3558000	5364450	105
9	Sonderbucher Steige, über Blautopf	3558050	5364650	110
10	Sonderbucher Steige (oberer Teil)	3558800	5364600	115
11	Parkplatz Blaubeuren, gegenüber Bahnhof	3558000	5363150	90
12	Steinbruch Weiler	3557550	5363350	110
13	Blaubeuren, Südseite Rucken („Ruck“)	3558900	5363350	80
14	Böschung B28 gegenüber Glasfels	3557650	5364400	115
15	Knoblauchfels	3559500	5363650	80
16	Fußweg Seißer Steige	3557550	5364700	80
17	Wachtfels Weiler	3556700	5363580	100
18	Kreuzung Blaubeurer Steige B28 und Straße nach Berghülen	3557080	5365750	105
19	Ponyhof Machtolsheim	3554950	5371540	130
20	Langes Tal Oberlauf	3555500	5371700	125
21	Hessenhau, Südrand Wald	3556800	5366750	70
22	Merklingen, Stbr. Rösch	3556780	5375080	80
23	Bermaringen, Kleines Lautertal	3561650	5369500	100
24	Hohenstadt, Autobahn-Unterführung	3548480	5377600	100
25	Laichingen „Schlössle“	3551200	5376120	115
26	Langes Tal - Himpfertal	3552920	5371100	51
27	Kläranlage Sontheim	3550550	5366900	105
28	Kuttel-Apel-Stein	3550550	5375480	105
29	Sontheim Trockental	3549820	5369280	80
30	Stbr. Rösch Zainingen	3542000	5372000	80
31	Stbr. Salzwinkel	3543150	5372540	105
32	Galgenberg Laichingen	3549380	5373500	67
33	Hohler Stein Feldstetten	3548420	5371580	90
34	Behelfsausfahrt Hohenstadt	3547920	5378840	105
35	Schertelshöhle Westerheim	3543420	5377620	80
36	Steinbruch Westerheim	3545950	5375080	105
37	Donnstetten	3542520	5376140	125
38	Straße Magolsheim - Justingen	3545300	5362600	100
39	Spitzkehre Magolsheim-Böttingen	3542900	5363800	80
40	Tiefental (Grillhütte)	3553120	5364330	110

41	Alter Steinbruch Füllemann	3549980	5371820	110
42	Laichinger Tiefenhöhle	3551440	5371340	240
43	Steinbruch Schill, Laichingen	3551720	5373320	110
44	Horn, Laichingen	3549470	5374780	90
45	Stbr. Stuhlinger Laichingen	3550650	5373900	76
46	Sontheimer Höhle	3550640	5366160	62
47	Blaubeuren, Schimmelmühle	3558280	5364570	90
48	Zainingen, Panzerstraße	3542120	5370950	100

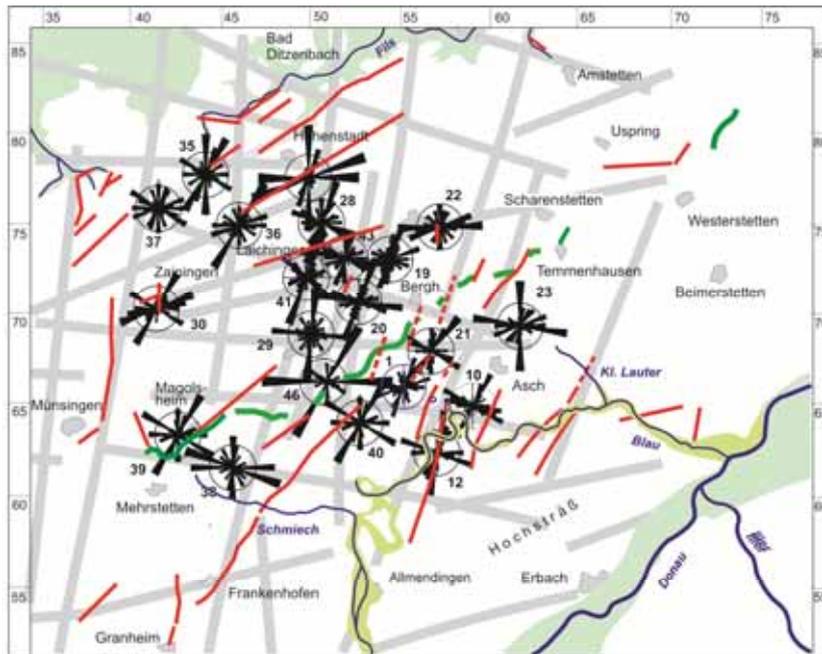
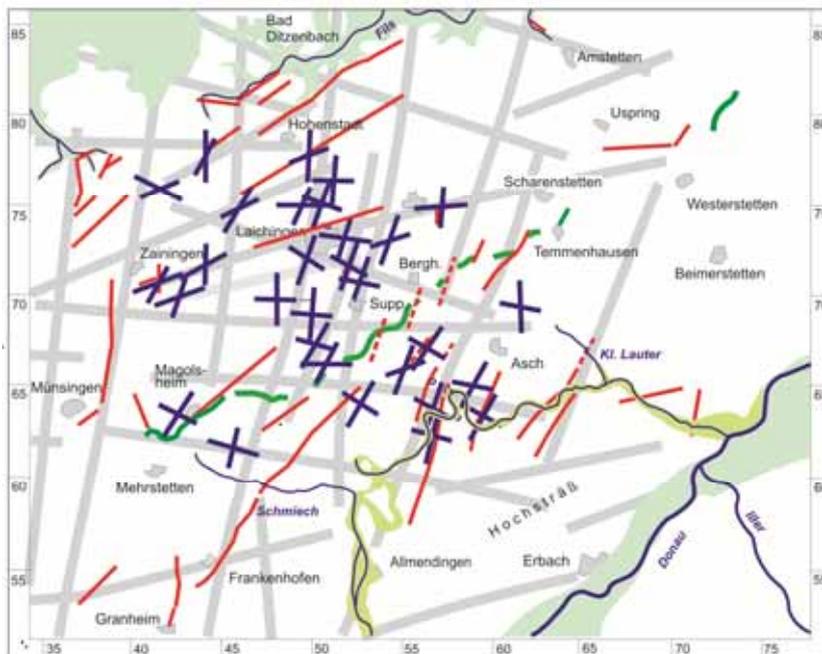


Abb. 19: Kluffmuster im Blautopf-Einzugsgebiet und näheren Umfeld. Oben: Symmetrische Kluffrosen, der Kreis entspricht 10 % der gemessenen Trennflächen; unten: Zur besseren Übersicht ist nur die 1. und 2. Hauptklufftrichtung aus den Kluffrosen dargestellt. Die abgebildeten Nummern beziehen sich auf das Aufschlussverzeichnis in Tab.1.



- Verwerfung
- - - Verwerfung, vermutet
- Hillshade-Lineationsbündel
- Klifflinie
- X 1. und 2. Hauptklufftrichtung nach Kluffrose
- * Kluffrose

Obwohl im regionalen Rahmen von Aufschluss zu Aufschluss die Kluffrichtungen in ihrer Wertigkeit wechseln können, die Streichrichtungen der Kluffscharen um Winkel von bis zu 10° variieren oder Hauptkluffrichtungen aufsplintern, ist dennoch ein regionales Bild mit einem charakteristischen Kluffmuster zu erkennen: In zwei Drittel der Aufschlüsse dominieren als Hauptkluffscharen die NNE-SSW bzw. ESE-WNW-Richtung, gefolgt von der N-S und W-E-Richtung sowie schließlich von der NE-SW bzw. NNW-SSE-Richtung.

Die NNE-SSW-Kluffschar variiert in den einzelnen Diagrammen in der Streichrichtung zwischen

10 und 40° mit einer Häufung bei 20 bis 30°. Die N-S- bzw. W-E-Scharen streuen minimal und liegen bei 0 bzw. 90°. Aufschlüsse, in denen die Hauptklufscharen in N-S- bzw. W-E-Richtung verlaufen und gegenüber den sonst dominierenden Hauptklufscharen NNE-SSW und WNW-ESE hervortreten, finden sich zwischen Feldstetten, Heroldstatt und Suppingen. Die allgemein untergeordnete, aber im Gebiet von Zainingen – Donnstetten – Westerheim – Hohenstadt hervortretende Streichrichtung NE-SW nimmt Streichwinkel von 70°, selten auch von 80° ein. Im Raum Blaubeuren, insbesondere im Galgental und in der Blaubeurer Talschlinge, hat die 150-160°-Richtung eine höhere Wertigkeit, erreicht jedoch nicht die Bedeutung einer Hauptklufschar.

5.2 Bretterklüftung

Bei den hochreinen Massenkalken kann die tektonische Beanspruchung des Gebirges zu einer bretterartigen Zerlegung des Gesteinsverbands führen. Die engständige Klüftung wird meist als senkrecht stehend beschrieben, gerade im Einzugsgebiet des Blautopfs sind jedoch auch Einfallswinkel von 60 bis 80° häufig. Möglicherweise hängt dies mit dem internen Schichtaufbau zusammen. So beschreibt GOLWER (1978) für das Lauchertgebiet, dass der Fallwinkel der Bretterklufflächen geringer wird, sobald der Anteil der Flaserung bzw. der Bankung im Massenkalk abnimmt. Die Bretterklüftung ist zwar ein Charakteristikum des Massenkalks, tritt dort aber räumlich begrenzt auf und kann Zonen von wenigen Metern bis zu hundert Meter (z.B. Steinbruch Rösch, Zainingen) Breite umfassen. Ihre räumliche Begrenzung ist als Hinweis auf eine lineare Bruchstruktur, möglicherweise sogar auf eine Verwerfung zu werten. Dies bestätigt eine Beobachtung im Steinbruch Rösch (Zainingen), wo eine Verwerfung in geschichteten Liegenden Bankkalken sich im darunter folgenden Massenkalk in 60 bis 70° einfallende Bretterklüfte auflöst. Auch im Gebiet des Lauchertgrabens, wo HENNIG (1926) die Bretterkalke erstmals beschrieb, sind sie in auffälliger Weise mit Verwerfungen verbunden.

In Kenntnis der oben genannten Beobachtungen wurde bei der tektonischen Feldaufnahme der Erfassung der Bretterklüftung

hohe Bedeutung beigemessen. Für die Kartierung von Störungen im Gelände – vor allem aber auch unter Tage in den Höhlen – ist sie ein wichtiges Argument.



Abb. 20: Bretterklüftungzone im Umfeld einer Störungszone, Steige nach Steigziegelhütte und Seißen, Aufn.: W. UFRICHT.



Abb. 21: Blautopfhöhle Scooterklamm, mit Vorkommen von Bretterklüftung. Aufn. HENNIG MEZGER.

Der Steinbruch Zainingen-Salzwinkel (Aufschluss 31, Tab. 1) wird von einer ca. 50 m breiten und 70° streichenden Bretterklüftungzone durchzogen. Mehrere kleine Verwerfungen und Harnische in gleicher Streichrichtung zeigen Bewegung an der Bretterklüftung an. Die Zone zieht vom

Steinbruch aus nach NE, wo sie in eine zum Filstalstörungssystem gehörende Verwerfung übergeht. Spitzwinkelig dazu verläuft im Bruch eine gut aufgeschlossene Verwerfung mit 0 bis 170° Streichen. Sie ist parallel zu einer in der Geologischen Karte westlich von Zainingen eingezeichneten Verwerfung. Im Steinbruch Merklingen sind zwei jeweils ca. 5 bis 10 m breite Zerrüttungszonen mit starker Verkarstung aufgeschlossen. Die Streichrichtung beträgt 90°, auf einer Fläche ist ein dextraler(?) Horizontalharnisch angelegt.

In der Steige von Blaubeuren zur Steigziegelhütte (Aufschlüsse 3 bis 5, Tab. 1) sind zwei nur wenige Meter breite Bretterklüftzonen auffällig. Im unteren Drittel der Steige ist eine nur wenige Meter breite Zone sichtbar, deren Klüfte um 20 bis 30° streichen und um 60 bis 70° nach Westen einfallen. Auf einer Fläche ist ein markanter Horizontalharnisch mit sinistralen Versatz erkennbar. Sie dürfte lagemäßig mit einer NNE-SSW streichenden Verwerfung identisch sein, die nach RÖDEL (1957) aus dem Raum Weiler bekannt ist. Westlich davon dominiert engständige Bretterklüftung in W-E-Richtung, die auch im digitalen Höhenmodell sowie in den Hillshade-Karten morphologisch als Felsgrad bzw. als geradliniges Kerbtal mit steilen Flanken deutlich zum Ausdruck kommt.

In der Vetterhöhe ist der Abstieg vom Palast der Winde zur Walhalla an einer markanten raumbestimmenden W-E-Bretterklüftung angelegt, die Teil einer dextralen Blattverschiebung ist. Zum gleichen System gehört die Bretterklüftung in der weiter östlich gelegenen Scooter-Klamm der Blautopfhöhle. Sie liegt auf einem 100° streichenden Luftbild-Linear, das ebenfalls zur genannten Blattverschiebungszone gehört (Abb.21).

In der Steige von Blaubeuren nach Sonderbuch ist direkt in Höhe des Blautopfs eine schmale N-S- streichende Bretterklüftung vom Felsaufschluss nördlich der Straße bis in die Felsgruppen am Steilhang südlich der Straße zu verfolgen.

Engständige Klüftung wirkt sich auch in der Morphologie der Felsen am Beginn der Blaubeurer Steige aus. Vom freistehenden Glasfelsen ziehen etwa 90° streichende schmale Felsrippen zur Felsgruppe am Trauf.

5.3 Harnischstriemung

Auf vielen Klüften sind Spuren, wie sichelförmige Bruchflächen, Harnische oder wellige Oberflächen als Hinweis auf Bewegungen an den Flächen zu finden. Bei der Aufnahme des bruchtektonischen Inventars wurden in 18 Aufschlüssen Harnische als häufigste Merkmale für Bewegung erfasst. Überraschend war das häufige Auftreten von Horizontalharnischen als sicherer Hinweis auf Lateralbewegungen (Abb. 22). Zu den beachtlichsten Striemungen, die im Untersuchungsgebiet aufgefunden wurden, gehört der an einer Aufschiebungsfläche angelegte Vertikalharnisch in der Laichinger Tiefenhöhle (Abstieg zur Kleinen Halle, Abb. 17) sowie der Horizontalharnisch mit sinistralen Bewegungssinn in der Vetterhöhle (Biwakhalle).

Oft kommen auf den Harnischflächen kleine Absätze vor, die senkrecht zur Bewegungsrichtung stehen. Die Bruchflächen sind also nicht glatt, sondern „gestuft“. Aus ihnen kann der Relativbewegungssinn abgeleitet werden, da die Stufung – sofern erkennbar und nicht durch Verwitterung oder korrosive Anlösung zerstört – die Bewegung nur in eine Richtung zulässt.

Horizontalharnische finden sich in überwiegendem Maß auf Flächen in NNE-SSW und WNW-ESE bis NW-SE-Richtung. Sinistraler Bewegungssinn wurde überwiegend auf NNE-SSW-Flächen und in je einem Fall auf einer NNW-SSE- bzw. einer ENE-WSW-Fläche festgestellt. Dextraler Horizontalversatz ist für eine 90° bzw. eine 100° streichende Fläche belegt. FRÖHLICH (2000) hat im Steinbruch Herrlingen zahlreiche Horizontalharnische feststellen können, die zwischen 0 und 60° streichen und überwiegend sinistralen Schersinn zeigen.

Aufgrund des gehäuftten Vorkommens von sinistralen Horizontalharnischen auf N-S bzw. NNE-SSW streichenden Klüften können diese als Scherflächen gedeutet werden. Analog dazu sind die W-E bis WNW-ESE streichenden Klüfte als konjugiertes Scherflächenpaar anzusprechen. Obwohl mehrere Horizontalharnische auf diesen Flächen gefunden wurden, konnte jedoch nur an einem dextralen Bewegungssinn festgestellt werden.

Tab. 2: Verzeichnis der bei der Geländeaufnahme festgestellten Harnische.
 VH: Vertikalharnisch, HH: Horizontalharnisch, Stbr.: Steinbruch, MP: Messpunkt.

Aufschluss	Rechtswert Hochwert	Harnisch-Typ	Streichen der mit Harnisch besetzten Kluftfläche (Angaben in Grad)	Bewegungssinn bei Horizontalhar- nisch
Hessenhauhöhle, i-Punkt-Halle	3556730 5367545	VH	35	
Hessenhau, Südrand Wald	3556800 5366750	HH	90	
Stbr. Stuhlinger Laichingen	3550650 5373900	HH	10	sinistral
Laichinger Tiefenhöhle Kleine Halle Sandhalle Nasser Schacht	3551440 5371340	VH HH HH	150 30 35	sinistral
Stbr. Westerheim	3545950 5375080	VH	115	
Stbr. Rösch, Zainingen	3542000 5372000	VH HH	60 35	sinistral
Stbr. Rösch Merklingen	3556780 5375080	HH HH HH	0 155 90	sinistral sinistral dextral ?
Blaubeuren, Fußweg Seißer Steige	3557550 5364700	HH	50	
Stbr. Weiler	3557550 5363350	VH	100	
Sonderbucher Steige, oberer Teil	3558800 5364600	HH	100	dextral
Sonderbucher Steige, mittlerer Teil (über Blautopf)	3558050 5364650	HH HH	15 15	sinistral
Sonderbucher Steige, unterer Teil (Ortsende)	3558000 5364450	VH VH HH	5 90 30	
Umfeld Eingang Vetterhöhle	3557650 5364700	VH VH	120 85	
Steige Steigziegelhütte Mittlerer Teil	3556400 5365120	HH HH HH VH	90 20 35 90	sinistral
Steige Steigziegelhütte unten	3556700 5365100	HH	40	sinistral
Steigziegelhütte Seligeng- rund	3556120 5365130	HH VH	90 20	

Tab. 3: Verzeichnis der bei der Kartierung der Vetterhöhle festgestellten Harnische.
 VH: Vertikalharnisch, HH: Horizontalharnisch, Stbr.: Steinbruch, MP: Messpunkt.

Teilbereich	Harnisch-Typ	Streichen der mit Harnisch besetzten Kluftfläche (Angaben in Grad)	Bewegungssinn bei Horizontal- harnisch
Griesinger Halle	VH	75-80	
Palast der Winde, MP 129	HH	140	
Biwakhalle, MP 69	HH	70	sinistral
Landgang, MP 71	HH	125	
Walhalla, Zugang Nordgang, MP 43	VH	100-105	
Walhalla, Zugang Nordgang, MP 44	VH	5	
„Siphon“, MP 4.5-4.6	VH	5-10	

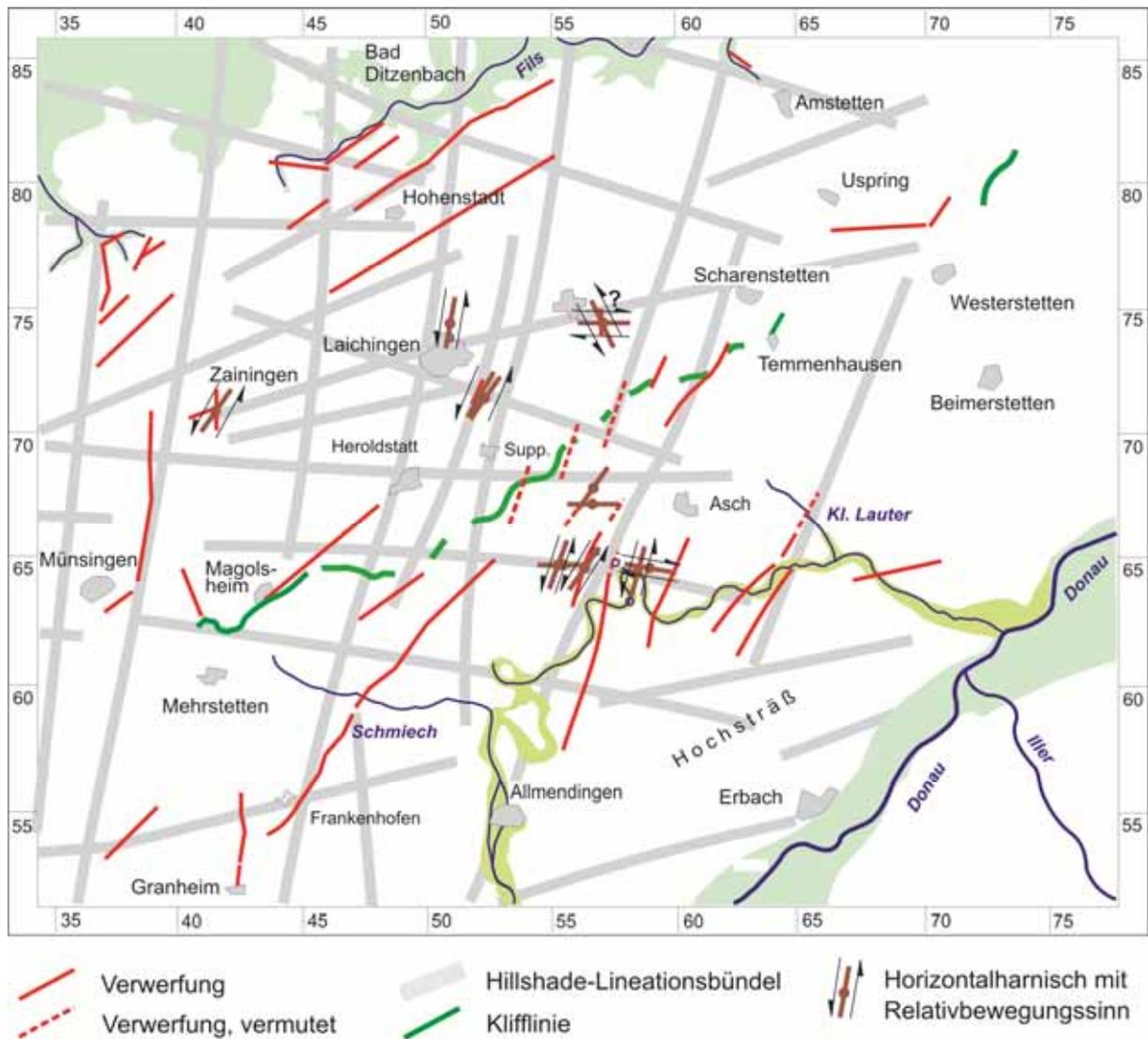


Abb. 22: Richtungsvergleich von Horizontalharnischen mit Verwerfungen und Hillshade-Lineationen.

5.4 Kalzitbestege

Zahlreiche Klufflächen sind mit Kalzitapeten unterschiedlicher Dicke (Sonderbucher Steige 2 bis 3 cm, sonst aber unter 1 cm) belegt. Vereinzelt sind auch Kristallrasen mit Kalzitskalenoedern senkrecht zur Kluffläche ausgebildet (Laichinger Tiefenhöhle Sächsische Schweiz, Sonderbucher Steige, Steige Steigziegelhütte, Seligengrundhöhle). Kalzitabscheidungen auf Klüften sind in Aufschlüssen um Blaubeuren auffallend häufig. Hier sind auch in einigen Fällen die Kalzitbeläge der gleichen Kluffschar zuzuordnen wie Horizontalharnische. Im Steinbruch Stuhlinger (Laichingen) kann unter guten Aufschlussbedingungen der syngenetische Bezug zwischen Kalzitabscheidung und Horizontalscherung

hergeleitet werden. Hier zeigt eine horizontal gestriemte Kluft mit gewellter Verschiebungsfläche auf geringe Distanz abwechselnd Bereiche mit Kalzitabscheidung im Druckschatten auf der konvexen Seite und Harnischstriemung im Kontaktbereich der Kluftoberflächen (konkave Seite). Auch im Eingangsbereich der Seligengrundhöhle östlich von Seißen ist der Oberjura-Kalkstein eng von kalzitverheilten Klüften durchzogen. Sie werden hier als Fiederflächen in Relation zu einer W-E verlaufenden Blattverschiebungszone gesehen.

6 Atektonische Trennflächen

Ein Aufschluss am Parkplatz zwischen Blaubeurer Bahnhof und Weiler zeigt eine intensive Zerlegung durch mehrere um 45°

einfallende Flächen, die zudem mit Striemung in unterschiedlicher Richtung belegt sind. Durch den sonst nirgendwo beobachteten geringen Fallwinkel ist ein tektonischer Ursprung eher zweifelhaft. Vielmehr werden synd sedimentäre subaquatische Gleitvorgänge vermutet, wie sie auf geneigter Unterlage an Riffböschungen im

Oberjura der Schwäbischen Alb sehr häufig beobachtet werden (GWINNER 1962). Die Striemen werden als Rutschstreifen interpretiert. Der Einfallwinkel der vermuteten Gleitflächen um 45° scheint nicht ungewöhnlich, da GWINNER (1962) für Riffhänge Rutschvorgänge auf Flächen beschreibt, die mit Winkeln um bis zu 60° einfallen.



Abb. 23: Aufschlusswand am Blaubeurer Bahnhof mit Unterer Felsenkalk-Formation. Die roten Pfeile markieren vermutete atektonische Gleitflächen, Die Breite des Bildausschnitts beträgt ca. 15 m; Aufn.: W. UFRICHT.

7 Gesamtbewertung des tektonischen Inventars

Im Einzugsgebiet des Blautopfs ist das durch Kartierung bekannte und den amtlichen Geologischen Karten entnommene Verwerfungsinventar im Wesentlichen auf das Umfeld des Albtraufs sowie auf die tiefen Taleinschnitte am Nord- und Südrand der Alb beschränkt. Dieses repräsentiert aufgrund der schwierigen Kartierbedingungen im Massenkalk und der geringen Aufschlussdichte im Bereich der Albhochfläche nur einen Teil der tatsächlich vorhandenen Störungen. Um ein flächiges Gesamtbild zu erhalten und die Kenntnislücken im Bereich der Albhochfläche zu schließen, wurden vor allem durch Kartierung unter Tage (Seligengrundhöhle, Vetterhöhle, Hesenhauhöhle, Laichinger Tiefenhöhle, Sontheimer Höhle) sowie durch den Einsatz moderner Methoden der Fernerkundung (Hillshade- und Luftbild-Lineationen) weitere Informationen zur Strukturgeologie erarbeitet. Mit diesen ist es möglich, die bruchstückhaft erfassten Verwerfungen – auch über die scheinbar strukturlose Albhochfläche hinweg – zu vernetzen und zusammen mit kleintektonischen Aufnahmen das tektonische Gesamtbild zu verbessern. So decken sich die kartierten Verwerfungen rich-

tungs- und lagemäßig oftmals mit Lineationsbündeln. Da die Lineationen meist deutlich länger – z.T. mehr als 10 km – aushalten, weisen sie auf mögliche Fortsetzungen der kartierten Störungen hin, evtl. auch nur als Zerrüttungs- oder Bretterkluffzone. Auf der Albhochfläche bilden die Hauptkluftrichtungen einzelner Aufschlüsse das Streichen der Lineationsbündel nach. Bei allen Strukturelementen fällt die Dominanz NNE-SSW (N-S)- und WNW-ESE (W-E)-Elementen auf. Das Umbiegen der Lineationsbündel nach Norden von der NNE-SSW- in die N-S-Richtung ist auf Abb. 19 deutlich erkennbar. Interessanterweise können im Filsgebiet die dominanten SW-NE-Lineationen sehr gut mit den dortigen Störungen in Verbindung gebracht werden. Dagegen fehlen im Süden in Höhe der früher vermuteten SW-NE-Kliffstörungen die in dieser Richtung verlaufenden Lineationen. Dies kann darauf hinweisen, dass diese Störungen im Umfeld des Kliffs entweder nicht existieren oder nicht SW-NE streichen.

Während seiner langen Bildungsgeschichte wurde das tektonische Inventar mehrfach beansprucht und dabei auch überprägt. Nur so sind die Kartierbefunde erklärbar, dass Störungen Vertikalversatz aufweisen, zu

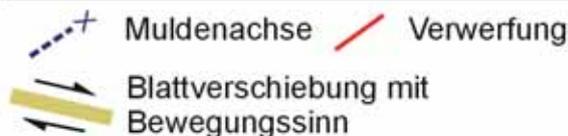
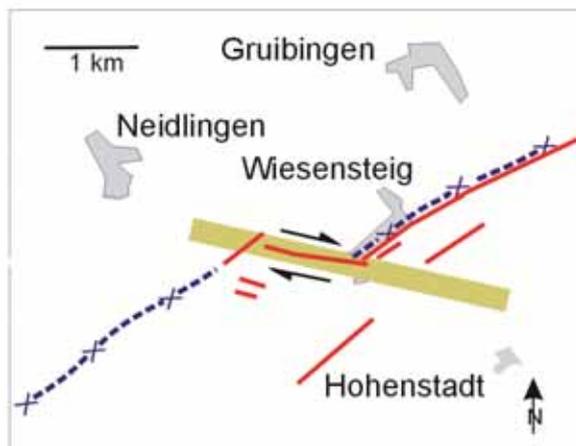
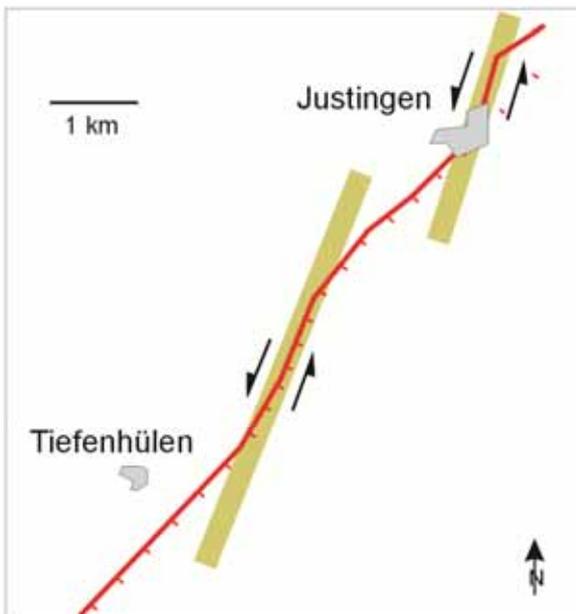
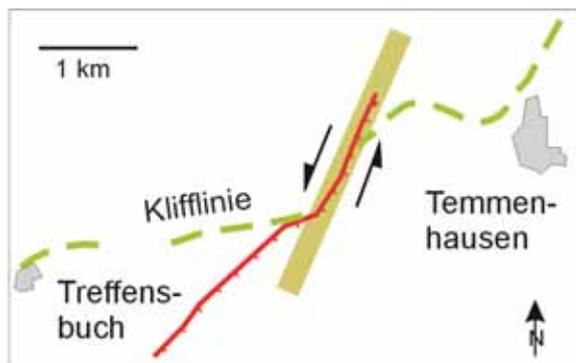


Abb. 24: Beispiele für Störungen, die vermutlich durch Blattverschiebungen lateral versetzt wurden. A: Temmenhäuser Störung, B: Lautertalstörung, C: Filstalstörung mit Filstalmuldenachse.

gleich aber auch durch Horizontalharnische auf Lateralbewegungen hinweisen (z.B. Weiler Störung, Laichinger Tiefenhöhle). Auf einzelnen Flächen sind sowohl Vertikal- als auch Horizontalharnische zu finden (z.B. Steige nach Steigziegelhütte, Seligengrundhöhle). Allerdings überlagern sie sich nirgendwo direkt, so dass kein relativer Altersbezug der Bewegungsphasen herstellbar ist. Auch die Störungen mit zick-zack-ähnlichem Richtungsverlauf sind nicht nur mit einem einmaligen Bruchvorgang erklärbar. Dieses an mehreren Störungen auftretende Merkmal wird auf einen nachträglichen lateralen Schervorgang an bereits bestehenden Verwerfungen zurückgeführt, wobei zwei verschiedene Scherrichtungen auszuweisen sind: Eine der Filstalstörungen und die Achse der Filstalmulde zeigen entlang der WNW-ESE streichenden Aultalstörung einen dextralen Lateralversatz (GREGAREK 1978). An der Lautertalstörung sowie an der Temmenhäuser Störung kann das Pendeln in der Streichrichtung mit sinistralen Versatz an SSW-NNE-Blattverschiebungen erklärt werden. Dieser Mechanismus scheint sich ebenso südwestlich der Temmenhäuser Störung – vorzugsweise südlich Suppingen und Berghülen – entlang des burdigalen Kliffs mehrfach zu wiederholen. Das ist an der morphologisch gut erkennbaren Kliffstufe nachvollziehbar, die von Westen nach Osten treppenartig nach Norden ausweicht. Die hier vermutete Blattverschiebungszone zieht nach Süden in die Blaubeurer Talschlinge hinein. Der angenommene sinistrale Versatz an den im Einzelnen nicht greifbaren Störungen drückt sich auch in dem in der Schichtlagerungskarte ersichtlichen, stark gebogenen Isolinenverlauf der Schichtgrenze $k_{1/2}$ aus, wie er besonders in der Achse Allmendingen – Blaubeuren – Asch – Scharenstetten ersichtlich ist.

Aufgrund von Einzelbefunden ergeben sich Hinweise auf eine W-E-Blattverschiebungszone in Blaubeuren zwischen Steigziegelhütte und dem Blautopf. Die in der Vetterhöhle und Seligengrundhöhle kartierten tektonischen W-E-Strukturen, die sich bis in den vorderen Teil der Blautopfhöhle verfolgen lassen, sind im Streichen mit Hillshade- und Luftbild-Lineationen identisch. Sie bestimmen in weiten Teilen den Richtungsverlauf der Gänge. Besonders hervorzuheben

ist in der Vetterhöhle das rechtwinkelige Umbiegen des Nordgangs an einer 105° streichenden und mit 60° auffallend flach geneigten Fläche sowie der Abschnitt Griesinger Halle – Palast der Winde – Walhalla, der seine Fortsetzung im vorderen Teil der Blautopfhöhle (Talhalle–Bunker–Düse) findet. Hier sind mehrfach markante Bretterklüftzonen in W-E-Richtung ausgebildet. Besonders auffallend ist der lagemäßige Zusammenhang zwischen der derzeit 100 m tiefen Seligengrundhöhle und der morphologisch gut erkennbaren Lineation einschließlich der für die mittlere Alb außergewöhnlichen Breccienzone im Eingangsbereich der Höhle. Eine derart tektonische Zerrüttung des Gebirges spricht für eine sehr intensive tektonische Beanspruchung, die im Grundsatz nur mit den Befunden in der Hessenhauhöhle vergleichbar ist, wenn auch dort der Bewegungssinn nicht wie am Seligengrund W-E, sondern NNE-SSW gerichtet war.

Das für die Störungen abgeleitete Bewegungsmuster bilden auch Horizontalharnische auf Klufflächen ab. Vorwiegend auf NNE-SSW-streichenden Klüften finden sich Harnische mit Spuren, die auf sinistralen Lateralversatz hinweisen. Von mehreren Horizontalharnischen auf WNW-ESE- bis W-E-Flächen belegt aufgrund schlechter Erhaltung allerdings nur ein Einzelner einen Dextralversatz. Nach diesen Befunden können die beiden orthogonal zueinander stehenden Klüftscharen als konjugiertes Scherflächenpaar angesehen werden.

Die Annahme von Scherbewegungen an NNE-SSW und WNW-ESE-Flächen passt in das großtektonische Bild, wie es von HOYDEM (1992) für das nordwestlich der Laichinger-Blaubeurer Alb gelegene und BAYER (1982a) für das östlich davon gelegene Arbeitsgebiet beschreiben. Für den Großraum Stuttgart weisen BRUNNER & HINKELBEIN (1998) den WNW-ESE streichenden Randstörungen des Fildergrabens, der über Bad Urach bis in den Nordteil des Arbeitsgebiets zieht, eine Überprägung durch dextralen Horizontalversatz zu. ILLIES (1978, 1982) sieht die bedeutenden Störungssysteme, wie Lauchertgraben und Münsinger-Zwiefalter Bruchfeld, als Bestandteil einer ganzen Reihe von N-S bis NNE-SSW-streichenden sinistralen Blatt-

verschiebungszonen, die im Abstand von mehreren Kilometern die Alb durchziehen. Allen Argumenten zufolge darf in Höhe von Blaubeuren eine weitere derartige Struktur angenommen werden.

8 Alter der Tektonik und Beanspruchungsplan

Die meisten tektonischen Brüche haben eine lange und komplexe Bildungsgeschichte. Was wir heute sehen, ist das Ergebnis ihrer Reaktionen auf ein zeitlich variierendes Spannungsfeld, was mehrmals zur Reaktivierung und Überprägung einer Struktur geführt haben kann. Das erschwert die Rekonstruktion der tektonischen Entwicklung eines Gebiets, zumal Indizien für Datierungen einzelner tektonischer Ereignisse spärlich bzw. nicht vorhanden sind. Am Albsüdrand ergeben sich Hinweise auf die zeitliche Stellung einzelner Strukturelemente aus ihrem Bezug zu postjurassischen Sedimenten mit bekanntem Alter. Dabei sind die Sedimente entweder in den Bruchvorgang einbezogen (z.B. Molassesedimente) oder sie plombieren zu Spalten korrosiv erweiterte Klüfte (z.B. Karstsedimente). Aus beidem ergibt sich ein relativer Altersbezug zur Bruchfläche. Zunächst ermöglicht der Nachweis fossilführender Karstspaltenfüllungen in mehreren Steinbrüchen im Blautal zwischen Schelklingen und Ulm ein Mindestalter für das Kluffinventar. Die aus Karstsedimenten ausgeschlammten Kleinsäugerreste erlauben eine zeitlich enge Datierung des Verfüllungsvorgangs der bis dahin korrosiv erweiterten Klüfte in das Oligozän (ZIEGLER & HEIZMANN 1991; Maximum im Unteroligozän). LÓPEZ CORREA et al. (2001) stellen im Herrlinger Steinbruch fest, dass dort einige fossilführende Karstspalten an NNE-SSW streichende Klüfte gebunden sind. Für die Karstspalte Ehrenstein 1 wird eine Richtung von 20° (SCHMIDT 1969), für Ehrenstein 2 etwa W-E-Richtung (SCHMIDT-KITTLER 1977) und für Ehrenstein 3 und 6 SW-NE-Richtung angegeben. Es kann also davon ausgegangen werden, dass ein primäres Kluffmuster mit den wesentlichen Kluffrichtungen schon im älteren Tertiär existierte.

Zu den ältesten datierbaren Verwerfungen im Betrachtungsraum gehören die Filstal-

brüche, die zusammen mit weiteren Großstörungen, wie Schwäbisches Lineament, Neckar-Jagst-Furche, Fränkische Furche und Albsüdrandflexur, die Süddeutsche Großscholle in WSW-ENE-Richtung im Abstand von zehner Kilometern durchziehen. Richtungsweisend für ihre Anlage sind bis ins Deckgebirge durchgepauste Nahtstellen zwischen größeren Schollen im kristallinen Untergrund, die zu verschiedenen Zeiten mit unterschiedlicher Kinematik wieder auflebten. Darauf deutet das komplexe tektonische Erscheinungsbild dieser Strukturen mit zugleich Dehnung und Einengung hin. Da das Schwäbische Lineament am Nördlinger Ries von mittelmiozänen Auswurfmassen überlagert wird (SEIBOLD 1951), ist dessen Grundstruktur mit Abschiebungen älter als das Ries-Ereignis, das nach K/Ar-Datierungen an Gesteinsgläsern auf 14,3 Mio Jahre datiert wird (BUCHNER et al. 2003). Die Schar an ca. 50-60° streichenden Abschiebungen, die das Grundmuster von Schwäbischem Lineament und Filstalstörungen darstellen, ist also spätestens unter- bis mittelmiozänen Alters. Für die tektonischen Elemente im Filstal wies erstmals GREGAREK (1978) eine Überlagerung durch WNW-ESE streichende Rechtsseitenverschiebungen (z.B. Aulalverwerfung) und dazu komplementärer NNE-SSW streichender Linksseitenverschiebung nach. Diese Flächen werden einer späteren Bruchgeneration zugewiesen. Dies ist schon allein daraus ersichtlich, dass der im älteren Tertiär bestehende Beanspruchungsplan mit vermuteter größter Hauptspannung in NNE-SSW-Richtung (nach HOYDEM 1992: 20° im Eozän-Oberoligozän, 45° im Oberoligozän) nicht ursächlich für den Schervorgang verantwortlich sein kann, d.h. beide Systeme konnten nicht gleichzeitig entstehen. Dazu ist eine Rotation des Spannungsfelds vorauszusetzen, die ab dem Miozän eine veränderte Einspannung der Süddeutschen Großscholle zunächst in N-S-Richtung bzw. ab dem Pliozän in NW-SE-Richtung bewirkt (BRUNNER et al. 1988, 2000, ILLIES 1974, 1982, WUNDERLICH 1974, ZIEGLER 1987) und eine kompressive Zerschierung des Gebirges mit sinistralen (N-S bis NNE-SSW) und dextralen Seitenverschiebungen (W-E bis WNW-ESE) einleitet. Möglicherweise deutet sich mit dem mittelmiozänen Urach-Kirchheimer Vulkanismus schon diese signifikanten Änderun-

gen im Bereich der Süddeutschen Großscholle an und der Rotationsvorgang dürfte für den Aufstieg der Magmen im Deckgebirge (z.B. infolge Schervorgänge) Trennflächen geöffnet haben. Die als östlichste Ausläufer des Urach-Kirchheimer Vulkangebiets zählenden WNW-ESE streichenden Laichinger Diatreme mit 200 bzw. 450 m Länge und 15 bzw. 70 m Breite (UFRECHT et al. 1990) zeigen eine enge Übereinstimmung zwischen den Hauptklufscharen und Luftbildlineationen in diesem Raum. Knochen, Zähne und Geweihfragmente von Säugetieren, die in Thermalsinterkalken am Westrand der Diatreme geborgen wurden, datieren die vulkanische und abschließende hydrothermale Aktivität, die zur Abscheidung der Thermalsinter führte, in das Mittelmiozän (Astaracium, MN 6-8; 10-16 Mio Jahre; der nicht ganz sichere Nachweis von *Palaeomyx bojani* würde eine Einschränkung auf MN 6, d.h. auf ein Alter von 14 bis 16 Mio Jahren bedeuten; UFRECHT et al. 1990).

Diese ab dem Mittel- bis Obermiozän eingeleitete und – wie die seismische Aktivität in Süddeutschland zeigt (SCHNEIDER 1993, 1997) – auch bis heute aktive Neotektonik prägt bzw. überprägt das Strukturinventar im Blautopfzugsgebiet ganz wesentlich. Horizontalharnische markieren eine junge Beanspruchung WNW-ESE bis W-E streichender Flächen als Rechtsseitenverschiebungen und dazu komplementärer NNE-SSW streichender Flächen als Linksseitenverschiebungen. Derartige Bewegungen deuten auch auf einen mehrfachen sinistralen Versatz der Klifflinie zwischen Wennenden und Tomerdingen. Aufgrund des bekannten Bildungsalters der Klifflinie ist ihre Zerschierung als post burdigal, d.h. jünger als 20 Mio Jahre anzusehen.

Zu einer weiteren zeitlichen Einengung der Bewegungsabläufe verhilft die Lautertalstörung, die ebenfalls wie das Kliff an NNE-SSW-Störungen lateral versetzt ist. An der Lautertal-Störung ist am Ortsausgang von Granheim Untere Süßwassermolasse (USM) in Gestalt roter Tone zwischen Schollen eingeklemmt (KIDERLEN 1931, PRINZ 1959), d.h. älteste Bewegungen sind belegt als post USM. Dagegen ist an der Baacher Teilstörung zwischen Baach und Oberwilzingen (Großes Lautertal) tektonische Aktivität bis in das Obermiozän belegt

(PRINZ 1959), da hier sogar Obere Süßwassermolasse (OSM) um bis zu 50 m verworfen ist. Für das geringe Alter spricht auch, dass die durch den Schichtversatz erzeugte Steilstufe morphologisch deutlich in Erscheinung tritt und noch nicht durch Verwitterungsvorgänge ausgeglichen wurde. Gleiches gilt für den nordöstlichen Abschnitt der Störung zwischen Hütten und Justingen (LILLICH 1962). So wurde wohl erst nach Abklingen der Vertikalbewegungen post OSM die Zerschierung dieses Störungssystems eingeleitet.

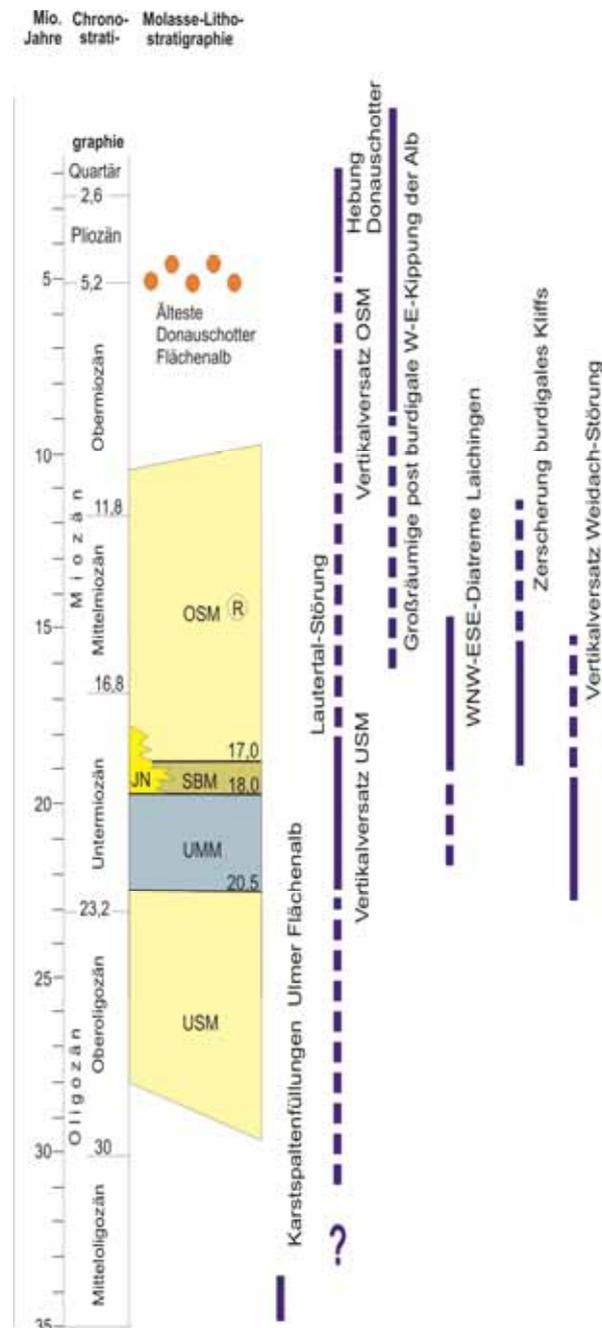


Abb. 25: Zeitliche Fixierung tektonischer Ereignisse im Arbeitsgebiet und weiteren Umfeld.

Durch verstellte unterpliozäne Schotter der Urdonau, die auf der Nordscholle der Störung zwischen Mehrstetten, Justingen und Ingstetten abgelagert wurden, sind post unterpliozäne Bewegungen zu folgern.

Überhaupt zeigen die im Untersuchungsgebiet verbreiteten Höhenschotter eine durch tektonische Verstellung beeinflusste Lage. Auffällig sind zunächst die exponierten Schotter SW Ingstetten zwischen 765 und 780 mNN (Abb. 26). Ab Hausen verringert sich die Höhenlage der Schotter von 730-700 mNN, über 675-665 mNN bei Asch und schließlich 615 mNN bei Ulm (Oberer Eselsberg). Daraus resultiert ein Gefälle der unterpliozänen Urdonau von 0,6 %, das gegenüber den altpleistozänen Terrassen (GLÖKLER 1963, VILLINGER 1986) mit 0,2 % und der jungpleistozänen Felssohle mit 0,07 % deutlich übersteilt ist. Demnach hat die Urdonau auf die Hebungsvorgänge mit Kerbtalbildung in unterschiedlichem Ausmaß reagiert. Die engsten Stellen hat das Schmiech-Blautal zwischen Schelklingen und Blaubeuren. Hier floss die Donau offensichtlich im Gebiet der stärksten Heraushebung (WAGNER 1929, GLÖKLER 1963). So treten in diesem Talstück auch kaum Terrassen auf, während in den Ober- und Unterläufen solche wohl entwickelt sind. Wahrscheinlich hat diese lokale Hebung ihren Ursprung in den beschriebenen ausgeprägten Schervorgängen. Scherung an Horizontalverschiebungsflächen kann Einengung hervorrufen, auf die das Gebirge mit Aufwölbung reagiert und nach oben ausweicht. Dass die geforderten Bewegungsabläufe mehrmals wiederbelebt wurden und somit mehrphasig sind, zeigt die Internstruktur der Hessenhau-Scherzone, in welcher der bei der Gebirgszerscherung entstandene Hohlraum zwischen einzelnen Klufkörpern mit gelbbraunem Alehm ausgefüllt und dieser wiederum in einer späteren Phase durch Reaktivierung des Schervorgangs gestriemt wurde. Der in Trockentälern und Karstsenken weit verbreitete Alehm ist pliozänen bis altpleistozänen Alters, in jedem Fall aber post OSM.

Von der großmaßstäblichen postburdigalen W-E-Kippung der Alb, die in der unterschiedlichen Höhenlage der Klifflinie (Ingstetten 760 mNN, Suppinger Berg 730 mNN, Temmenhausen 678 mNN, Heldenfingen 602 mNN) manifestiert ist (KIDERLEN

1931), fällt ein großer Anteil sicher in das Plio-Pleistozän. Die für die Kippung verantwortliche Aufdomung des Schwarzwaldes zeigt sich zwar seit dem Serravallium (höheres Mittelmiozän) in zahlreichen klastischen Sedimentschüttungen am Südrand des Schwarzwald-Vogesenmassivs (BERGER et al. 2005), DURINGER et al. (2004) schließen aus Sediment-Bilanz-Betrachtungen jedoch vor allem auf junge Hebungsprozesse während der letzten beiden Millionen Jahre. Das stimmt mit den Angaben von USTAZEWSKI & SCHMID (2007) überein, die im südlichen Oberrheingraben und dem Übergang zum Faltenjura von jüngstpliozänen bis pleistozänen tektonischen Bewegungen ausgehen. Es kam zur Reaktivierung bereits existierender NNE-SSW-Verwerfungen unter kompressivem neoge-

nem Stressfeld, wodurch die 4,2 bis 2,9 Mio Jahre alten Sundgauschotter in linkslaterale Schervorgänge einbezogen wurden.

Dieses Spannungsfeld ist in der Süddeutschen Großscholle bis heute unverändert wirksam. Die Herdmechanismen von Erdbeben, die entlang der seismisch aktiven N-S gerichteten Albstadt-Scherzone registriert werden, machen rezente sinistrale Horizontalverschiebungen der Kruste deutlich, bestimmt von einer ca. 155° gerichteten Maximalkompression (AHORNER et al. 1983, SCHNEIDER 1993, 1997). In situ Spannungsmessungen in Bohrlöchern ergeben regional leicht variierende rezente Hauptspannungsrichtungen für die oberste Kruste von 150 bis 170° (GREINER 1976).

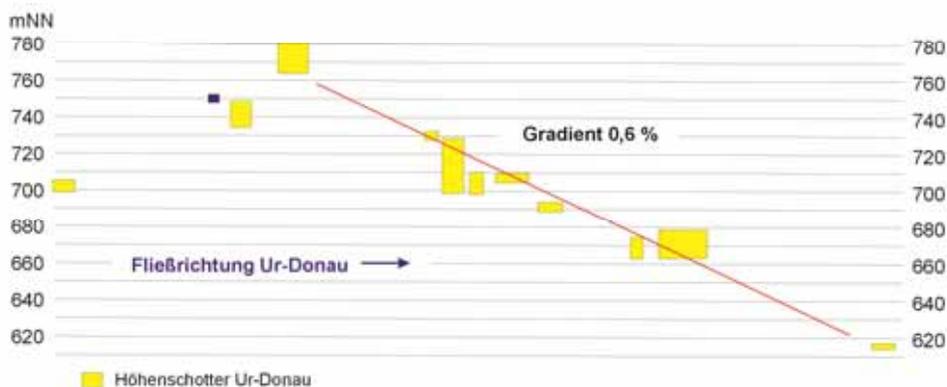
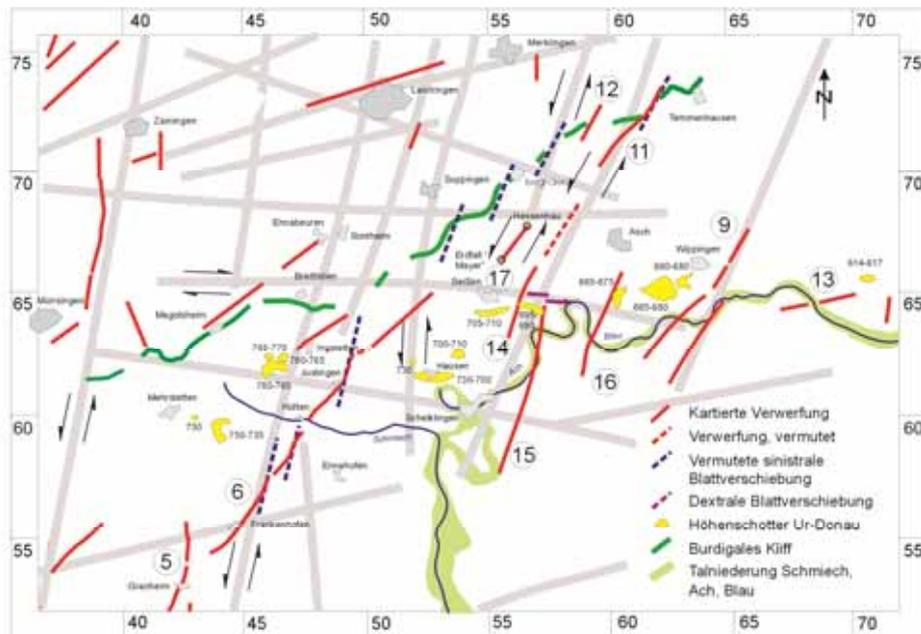


Abb. 26: Tektonisches Inventar im Vergleich zur Höhenlage von Schottern der Ur-Donau. Nummern der Verwerfungen siehe Abb. 2 und 3.

9 Tektonik – Verkarstung – Karsthydrographie

Die Oberflächen- und Reliefgestaltung samt Trockentalnetz und exogenem Karstformenschatz sowie auch die Ausprägung unterirdischer Hohlraumbildung im Zuge der Verkarstung sind strukturell gebunden. Entlang von Großklüftzonen, Zerrüttungszonen, Verwerfungen oder auch nur einfachen Klüften können sowohl erosiv Taleinkerbungen geschaffen und Felsleisten herausgeformt werden als auch korrosiv Karstformen und Höhlen entstehen. So ist das die Albhochfläche überspannende Trockentalnetz im Richtungsverlauf einzelner Äste eng an die örtliche Tektonik gebunden, wie der Vergleich mit dem bekannten Klüftinventar zeigt (Abb. 3). Besonders auffällig sind die Beziehungen im Gebiet Seißen, Wennenden, Berghülen, Asch und Blaubeuren, wo ein enger Bezug zwischen Trockentalverlauf und W-E bis WNW-ESE streichenden tektonischen Strukturen durchschlägt. Entscheidend für die groß-

räumige Ausrichtung und Orientierung des fossilen Gewässernetzes war neben der Bruchtektonik aber auch die Raumlage der Alb. Die Alb erfuhr post Burdigal – wahrscheinlich ab dem Obermiozän – eine Westaufkippung durch die Hebung des Schwarzwaldmassivs. Das sich ab dem gleichen Zeitraum entwickelnde und auf die Ur-Donau ausgerichtete Gewässernetz hat sich an diese tektonische Kippung angepasst und ausgedehnte Talarme nach Westen und nur kurze nach Osten (gegen die Kippungsachse) ausgebildet (UFRECHT 1987). Das über das Trockentalnetz markierte oberirdische Einzugsgebiet der Kleinen Ur-Lauter, das mit beginnender Hebung bis in das Pliozän noch oberirdisch entwässert wurde, war weit nach Westen ausgedehnt und dominierte mit einer Fläche von 195 km² die gesamte mittlere Alb. Als Vorläufer für das Blautopf-Einzugsgebiet verbleibt zwischen den oberirdischen Einzugsgebieten von Ur-Tiefental und Kleiner Ur-Lauter lediglich eine Fläche von 11 km² im Umfeld des Galgentals (Abb. 27).

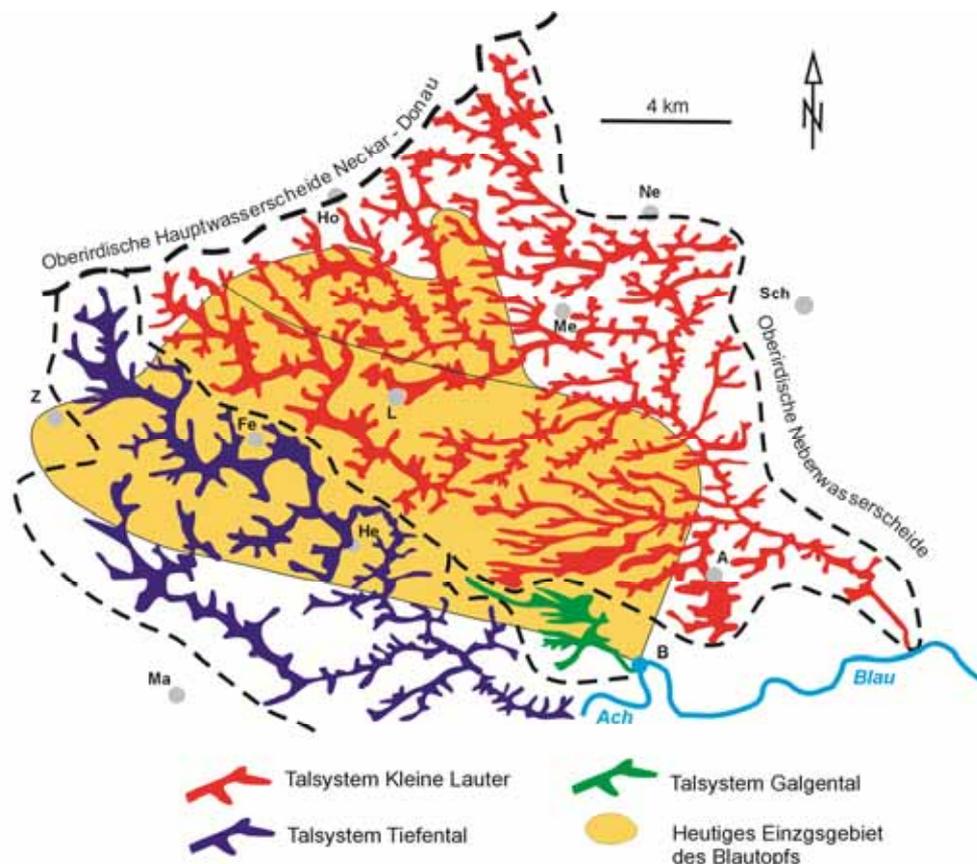


Abb. 27: Trockentalnetz und oberirdische Einzugsgebiete der Systeme Kleine Ur-Lauter, Tiefental und Galgental im Vergleich zum heutigen unterirdischen Einzugsgebiet des Blautopfs. (A: Asch, B: Blautopf, Fe: Feldstetten, He: Heroldstatt, Ho: Hohenstadt, L: Laichingen, Ma: Machtolsheim, Me: Merkingen, Ne: Nellingen, Sch: Scharenstetten, Z: Zainingen).

Zu einer völligen Neugestaltung der Entwässerung kam es mit weiteren, bis in das Pleistozän hineinreichenden Hebungen, auf welche die Ur-Donau mit Eintiefung reagierte und mit der Tieferlegung der Vorflut die Entwicklung der unterirdischen Entwässerung des Einzugsgebiets einleitete. Die Gewässeroberläufe fielen im Zuge dieser Hebung mit fortschreitender Verkarstung trocken, nachdem die Täler nicht weiter eingetieft und an die neue Erosionsbasis angepasst wurden. Die einer tektonischen Nebenkluftrichtung folgende WSW-ENE-Gangorientierung im Horizontalstockwerk der Laichinger Tiefenhöhle, das der ersten Stagnationsphase der Flusseintiefung entspricht (GLÖKLER 1963), belegt, dass die oberirdische Entwässerung zwar in die Tiefe verlagert worden ist, die karsthydrographische Ausrichtung aber zunächst noch unverändert blieb. So befand sich das Gebiet um Laichingen im Pliozän zunächst weiterhin im Einzugsbereich der Kleinen Ur-

Lauter (UFRECHT 1987, VILLINGER & UFRECHT 1989). Die sich im Pleistozän stetig fortsetzende Hebung, aus der eine ca. 200 m tiefen Einschneidung der Vorflut resultierte, führte allmählich zu einer Neuorientierung der unterirdischen Entwässerung. Das Karstgrundwasser folgte neuen Wegen, die dem hydraulisch gesehen kürzesten Weg zur Vorflut entsprachen und durch günstig dazu verlaufende tektonische Strukturen vorgegeben war. Das größtmögliche hydraulische Gefälle zwischen Albhochfläche und Ur-Donau war dort, wo eine Flusschlinge weit nach Norden gegen das bestehende Druckgefälle ausbog und das Karstwasser in der Quelle der Ur-Blau, die lagemäßig nicht dem heutigen Quellpunkt entsprochen haben muss, austreten konnte. Dies leitete sowohl die Ausweitung des Ur-Blautopf-Einzugsgebiets nach NW als auch die großräumige Entwicklung des Blauhöhle systems ein. Gleichzeitig verlor dadurch die Kleine Ur-Lauter stetig an Fläche.

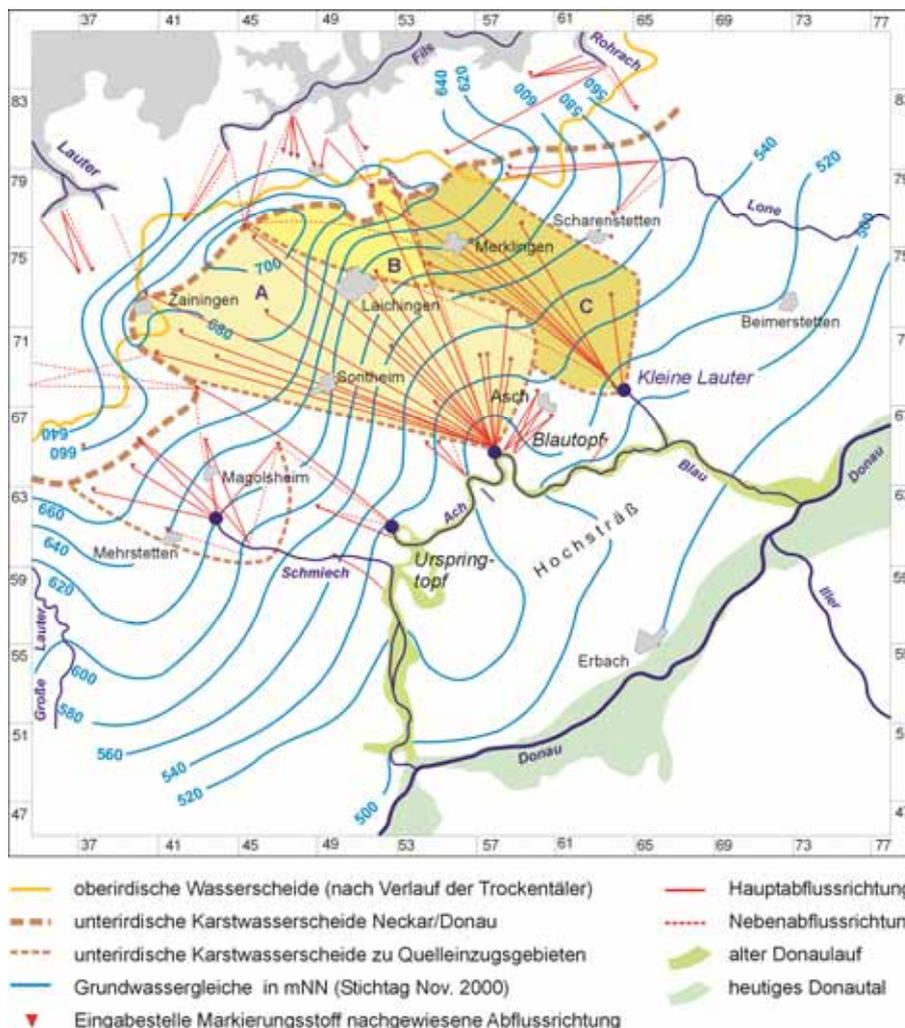


Abb. 28: Markierungsversuche im Gebiet der mittleren Schwäbischen Alb und Abgrenzung von unterirdischen Einzugsgebieten (Blautopf, Kleine Lauter, Urspringtopf und Schmiechquellen). A: Unterirdisches Einzugsgebiet des Blautopfs, B: Überlappungsbereich zwischen den unterirdischen Einzugsgebieten von Blautopf und Kleiner Lauterquelle mit Entwässerung zu beiden Quellen, C: unterirdisches Einzugsgebiet der Kleinen Lauter. Auflistung der Markierungsversuche siehe SELG & SCHWARZ (2009), die Grundwassergerichte sind verändert nach GEWÄSSERDIREKTION DONAU BODENSEE (2004).

Der Wechsel der unterirdischen Abflussrichtung klingt im Grenzbereich zwischen beiden Einzugsgebieten bis heute nach, wie die Markierungsversuche Laichingen-Nord und Westerheim mit ihrem Hauptaustritt im Blautopf und Spurenaustritten in der Kleinen Lauterquelle sowie der Versuch Machtolsheim mit umgekehrtem Ergebnis gezeigt haben (UFRECHT 1987). Heute nimmt das Einzugsgebiet des Blautopfs große Teile der oberirdischen Einzugsgebiete von Kleiner Lauter und Tiefental ein. Die bevorzugt nach W und NW gerichtete Ausdehnung ist auch hier wieder durch die großtektonische Raumlage der Alb bestimmt. Eine weitere Eroberung von Fläche in dieser Richtung wird sowohl durch tektonische Großstrukturen (Römerstein-Verwerfung, Störungen der Filstalbrüche) als auch durch die rückschreitende Erosion der sich am Nordrand der Alb entwickelnden und sukzessive nach Süden ausdehnenden neckartributären Quellsysteme Erms, Lenninger Lauter und Fils verhindert. Nachdem zunächst also danubische Systeme untereinander gerungen haben und der Blautopf weite Teile der Kleinen Ur-Lauter in Besitz genommen hat, setzt sich der „Kampf um die Wasserscheide“ nun zwischen danubischen und rheinischen Systemen fort. Hier steht der Verlierer jetzt schon fest: der Blautopf.

Die Rekonstruktion des geologischen Werdegangs des Blautopf-Einzugsgebiets im Plio-Pleistozän zeigt die wesentlichen Steuerungsfaktoren für die Karsthydrographie und somit auch für die – großräumig gesehen – bevorzugte Richtung, in der die Höhlen angelegt werden. Während in der initialen Phase die tektonische Raumlage bestimmend ist, erlangt in einer späteren Phase, die auch mit einer Neuorientierung der Entwässerungsrichtung einhergehen kann, das hydraulische Gefälle immer größere Bedeutung. Dabei finden die tektonischen Elemente bevorzugt Verwendung, die möglichst in Richtung des größten hydraulischen Gefälles streichen. Sonst werden die Flächen benutzt, deren Resultierende möglichst nahe der Richtung des Druckgradienten folgt. Bei der Auswahl der Klüfte werden dann aber auch die Klüftmerkmale geltend, die über das hydraulische Verhalten der Einzelklüfte bestimmen. So kommt es in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften, wie

Öffnungsgrad, Kluftdichte, Beschaffenheit der Kluftwände (Kluftrauigkeit), zu einer weiteren Auswahl der bevorzugten Fließwege. Hinsichtlich der durchströmbaren Wassermenge spielt insbesondere die Kluftöffnung eine wesentliche Rolle. Diese Richtungen begründen letztlich in der Überschneidung mit den großräumigen Entwässerungsrichtungen die Geometrie und Internstruktur des Höhlensystems.

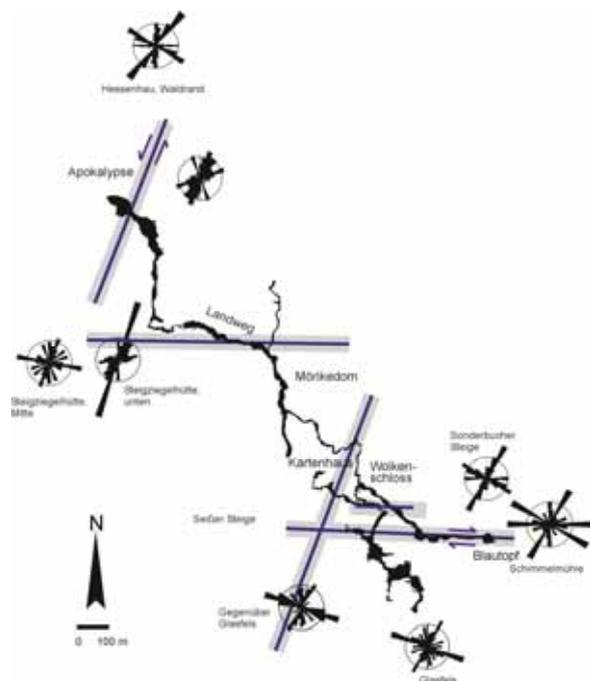


Abb. 29: Verlauf Blauhöhlensystem im Vergleich zu Verwerfungen (blau hinterlegt: vermutete Scherzonen) und dem Kluftinventar (dargestellt in Kluftrosen, aus denen gebietsweise die Hauptkluftrichtungen entnommen werden können). Die Klüfte sind an Felsaufschlüssen über Tage im Seligengrundtal, im Galgental und in der Blaubeurer Schlinge aufgenommen worden. Vermessung des Blauhöhlensystems Arge Blautopf und Arge Höhle und Karst Grabenstetten 2008, Zeichnung Höhlenverlauf, JÜRGEN BOHNERT, HERBERT JANTSCHKE und FRITZ MAMMEL).

Deutlichen Einfluss auf die Geometrie des Blauhöhlensystems haben die Hauptkluftscharen in N-S- bzw. NNE-SSW und W-E- bzw. WNW-ESE-Richtung. Störungen in NNE-SSW-Richtung mit Vertikal-, sicherlich auch Horizontalversatz queren das Höhlensystem in Höhe der Apokalypse sowie zwischen Kartenhaus und Riss. Blatt-

verschiebungen in W-E-Richtung ziehen

von der Seligengrundhöhle in das Blauhöh-
lensystem Richtung Äonendom sowie von
der Herbert-Griesinger-Halle über den Pa-
last der Winde (Vetterhöhle) in den vorderen
Teil der Blautopfhöhle. Scherstrukturen
sind karsthydrographisch besonders wirk-
sam (auch wenn sie nicht in Richtung der
Hauptentwässerung liegen), da bei der
Scherbeanspruchung meist nicht nur eine
solitäre Trennfläche entsteht, sondern ein
Geflecht von Flächen. Zudem kann es bei
den niedrig (en echelon) zur Hauptbewe-
gungsrichtung angeordneten Flächen auch
zu einem Öffnen der Klüfte kommen. Als
Abbild einer intensiveren Gebirgszerrüttung
kann die Häufung von Versturz zonen ange-
sehen werden, wie sie sich in der
Vetterhöhle zwischen der Herbert-
Griesinger-Halle und der Walhalla auf der
vermuteten Blattverschiebungszone aufrei-
hen (Abb. 29). Die Geometrie und Struktur
der dortigen Höhlenpassagen zeigt sonst
keine wesentlichen Unterschiede zu ande-
ren Höhlenabschnitten außerhalb der Blatt-
verschiebungszonen. An keiner Stelle der
Vetterhöhle ist feststellbar, dass Höhlen-
wände horizontal versetzt wurden oder
ganze Gangsysteme gegeneinander abge-
setzt sind. Folglich haben nach Entstehung
der Räume keine maßgeblichen Bewegun-
gen mehr an diesen Seitenverschiebungen
stattgefunden. Das tektonische Inventar ist
somit älter als die daran angelegten Räu-
me. Das gilt auch für die Seligengrundhöhle
oder die i-Punkt-Halle in der Hessenhau-
höhle, die inmitten einer Zerrüttungszone
entstanden sind. Wie zahlreiche tektonische
Untersuchungen belegen (vgl. Kap. 8), war
die intensive horizontale Zerschering der
Alb unter horizontaler Hauptkompressions-
richtung von ca. 140° frühestens seit dem
Obermiozän, im Wesentlichen aber ab dem
Pliozän wirksam. Das macht deutlich, dass

die Entstehung der an die Blattverschie-
bungszonen gebundenen Räume erst nach
Ausklingen der tektonischen Aktivität ein-
setzte. Man kommt also sowohl unter Be-
rücksichtigung der tektonischen Analyse
wie auch durch fluss- und landschaftsge-
schichtliche Überlegungen etwa zum glei-
chen Alter der tiefgründigen Verkarstung
und Höhlenbildung.

10 Dank

Bei der Bearbeitung des tektonischen In-
ventars im Einzugsgebiet des Blautopfs
habe ich von verschiedener Seite Unter-
stützung erfahren:

Dr. KNUT HINKELBEIN (Filderstadt) nahm an
mehreren Geländebegehungen teil und war
ein geduldiger Diskussionspartner. Für das
enge Umfeld um das Blauhöhlsystem
lieferte er eine Luftbilddauswertung auf
Lineationen.

Dr. PELZ (damals Institut für Geologie und
Paläontologie, Universität Stuttgart) und
THOMAS WIEGAND fertigten die Reliefkarten
auf Basis von SRTM-Radardaten bzw. von
hochauflösenden digitalen Geländedaten
des Landes Baden-Württemberg.

Grund- und Aufrisspläne stellte die Arge
Blautopf (Blautopfhöhle, JÜRGEN BOHNERT,
HERBERT JANTSCHKE), die Arge Höhle und
Karst Grabenstetten (Vetterhöhle, FRITZ
MAMMEL) die Arge Blaukarst (Seligengrund-
schacht, Hessenhauhöhle) sowie der HHV
Laichingen (Laichinger Tiefenhöhle, Son-
theimer Höhle) zur Verfügung.

Mitglieder der Arge Höhle und Karst Gra-
benstetten, der Arge Blaukarst, des Höh-
lenvereins Blaubeuren und des HHV Lai-
chingen begleiteten mich bei den
Kartierarbeiten in den Höhlen.

Ihnen allen gilt mein herzlicher Dank für die
vielfältige Unterstützung.

Schriftenverzeichnis

- AHORNER, L., BAIER, B., BONJER, K.P. (1983): General pattern of seismotectonic dislocation and the earthquake-generating stress field in Central Europe between the Alps and the North Sea. – In: FUCHS, K. et al. (ed.): Plateau Uplift, 187-197; Berlin-Heidelberg (Springer).
- BADER, G. (1991): Eine Grabung im Galgentäle bei Blaubeuren. – Laichinger Höhlenfreund, **26**(1): 45-46; Laichingen.

- BARTENBACH, M. (2008): Facies analysis and 3D-modeling of Upper Jurassic Carbonates: Implication for resource- and reservoir-geology. – Masterarbeit Geol. Inst. Univ. Tübingen, 126 S.; Tübingen.
- BARTENBACH, M. & UFRECHT, W. (2009): Stratigraphie und Fazies des Oberjuras im Umfeld der Blaubeurer Talschlinge – Ergebnisse einer Bohrung und Untertagekartierung im Blauhöhle-System. – Laichinger Höhlenfreund, **44**: 89-106; Laichingen (in diesem Band).
- BAYER, H.J. (1982a): Bruchtektonische Bestandsaufnahme der Schwäbischen Ostalb (Geländeuntersuchungen, Luftbild- und Satellitenbilddatenauswertungen). – Diss. Techn. Univ. Clausthal, 235 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- (1982b): Einordnung des Überkinger Bruchfels in die Tektonik von Mittel-Württemberg mit Hilfe von Luft- und Satellitenbildern. In CARLÉ, W.: Geologie und Hydrogeologie der Mineral- und Thermalwässer von Bad Überkingen, Landkreis Göppingen, Baden-Württemberg (II). – Geol. Jb., **C 31**: 3-72; Stuttgart.
- (2002): Tektonischer Bau. In: SCHALL, W. (2002): Erläuterungen zum Blatt 7425 Lonsee. Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, mit Beiträgen von H.J. BAYER, H. JANTSCHKE, M. KÖSEL, B. MAUS, T. SIMON & P. WAGENPLAST, 126 S. und geologische Karte; Stuttgart.
- BERGER, J. P., REICHENBACHER, B., BECKER, D., GRIMM, M., GRIMM, K., PICOT, L., STORNI, A., PIRKENSEER, C., DERER, C. & SCHÄFER, A. (2005): Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene. – Int. J. Earth Sci., **94**(4): 697-710; Stuttgart.
- BLOOS, G. (1967): Über Jura und Tertiär im Gebiet von Ehingen/Donau (Baden-Württemberg). – Jber. u. Mitt. Oberrh. Geol. Ver., N.F. **49**: 75-115, 8 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- BOCK, H. (2001): Karte der mineralischen Rohstoffe von Baden-Württemberg 1:50.000. Erläuterungen zu Blatt L 7724/L 7726 Ulm/Neu-Ulm (Anteil Baden-Württemberg). Mit Beiträgen von B. KIMMIG, W. WERNER & C. SZENKLER. 116 S., 2 Abb., 14 Tab, 1 Kt.; Freiburg.
- BRODBECK, M. (1989): Geologische Kartierung 1:10.000 auf Blatt 7424 Deggingen NW. – Dipl. Arb. Univ. Stuttgart (Teil 2), 11 S.; Stuttgart.
- BRUNNER, H. & HINKELBEIN, K. (1998): Tektonischer Bau. In: BRUNNER, H.: Erläuterungen zum Blatt Stuttgart und Umgebung. – Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:50.000, 107-123; Freiburg.
- (2000): Tektonischer Bau. In: BRUNNER, H. & HINKELBEIN, K.: Erläuterungen zum Blatt Heilbronn und Umgebung. – Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:50.000, 123-140; Freiburg.
- BRUNNER, H., HINKELBEIN, K. & SIMON, T. (1988): Geologie und Tektonik im Gebiet von Ellenweiler (Gmde. Oppenweiler, Rems-Murr-Kreis). – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **30**: 167-200; Freiburg.
- BUCHNER, E., SEYFRIED, H. & VAN DEN BOGAARD, P. (2003): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -laser probe age determination confirms the Ries impact crater as the source of glass particles in Graupensand sediments (Grimmelfingen Formation, North Alpine Foreland Basin). – Int. J. Earth Sci., **92**: 1-6; Stuttgart.
- CARLÉ, W. (1955): Bau und Entwicklung der Südwestdeutschen Großscholle. – Beih. Geol. Jb., **16**: 272 S.; Hannover.
- DIECK, W. (1988): Geologische Kartierung 1:10.000 auf Blatt 7424 Deggingen NW. – Dipl. Arb. Univ. Stuttgart (Teil 2): 8 S.; Stuttgart.

- DURINGER, P., ELLWANGER, D., LÄMMERMANN-BARTL, J., NEEB, I., ROUSSÉ, S. & ROTSTEIN, Y. (2004): Sedimentological Evidence regarding the Uplift of the Vosges and the Black Forest Highlands. – Continental Extension SGF / GV, Strasbourg.
- EISELE, G. (1985): Lithofazielle Gliederung des Mittleren und Oberen Malm und seiner Deckschichten und Hydrogeologie im Bereich Hochsträß am Südrand der Schwäbischen Alb. – Dipl. Arb. Univ. Tübingen, 89 S.; Tübingen.
- FRANZ, M., SIMON, T., MEYER, R.K.F. & DOPPLER, G. (2001): Die Thermalwasserbohrung „Donautherme“, Neu-Ulm. – *Geologica Bavarica*, **106**: 81-106; München.
- FRÖHLICH, S. (2000): Tektonische Analyse des Mähringer Berges und angrenzender Gebiete. – Dipl. Arb. Univ. Erlangen, 45 S.; Erlangen.
- GEWÄSSERDIREKTION DONAU-BODENSEE (2004): Hydrogeologische Erkundung Baden-Württemberg, mittlere Alb 2, Grundwasserdynamik, Grundwassergleichen. – 68 S.; Ulm.
- GEYER, M. (1997): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, vorläufige Ausgabe 7525 Ulm-Nordwest. 3. Ausg., 32 S., 1 Abb., 1 Beil.; Freiburg.
- GEYER, M. & VILLINGER, E. (2001a): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, Blatt 7523 Münsingen, vorläufige Ausgabe; Freiburg.
- (2001b): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, Blatt 7624 Schelklingen, vorläufige Ausgabe; Freiburg.
- GIESE, S. & WERNER, W. (1997), mit einem Beitrag von M. SCHAUER: Zum strukturellen und lithologischen Bau des Oberjuras der Mittleren Schwäbischen Alb. – *Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg*, **37**: 49-76; Freiburg.
- GLÖKLER, K. (1963): Die Molasse-Schichtstufen der Mittleren Alb. – *Tübinger Geographische Studien*, **9**: 71 S.; Tübingen.
- GOLWER, A. (1959): Stratigraphie und Tektonik im südlichen Lauchertgraben (Schwäbische Alb). – *Arb. Geol. Paläont. Inst. TH Stuttgart*, N.F. **22**: 1-94; Stuttgart.
- GREGAREK, R. (1978): Schichtlagerung und Tektonik auf Blatt Wiesensteig NE. – Dipl. Arb. Univ. Tübingen (Teil 2), 90-118 S.; Tübingen.
- GREINER, G. (1976): In situ Spannungsmessungen und tektonischer Beanspruchungsplan in Südwestdeutschland. – *Geol. Rdsch.*, **65**: 55-65; Stuttgart.
- GRIESINGER, H., HARLACHER, C., KIRSAMER, H. & UFRECHT, W. (1994): Geologie und Tektonik im Bereich von Todsburger Höhle (7423/11) und Todsburger Schacht (7423/10), Schwäbische Alb. – *Laichinger Höhlenfreund*, **29**(1): 19-34; Laichingen.
- GROSCHOPF, P. (1971): Neue Wege der Wassererschließung am Albsüdrand. – *Mitt. Verein f. Naturwiss. und Mathematik in Ulm*, **28**: 42-49, 3 Abb.; Ulm.
- (1972): Geologischer Bau. In: *Der Stadt- und Landkreis Ulm*, 5-37; Ulm (Süddeutsche Verlagsgesellschaft).
- GUNDLACH, K. & TEICHMÜLLER, R. (1936): Die postmiozäne Verbiegung der nordalpinen Saumtiefe. – *Festschrift zum 60. Geburtstag von Hans Stille*, 169-195; Stuttgart (Enke).
- GWINNER, M.P. (1962): Subaquatische Gleitungen und resedimentäre Breccien im Weißen Jura der Schwäbischen Alb (Württemberg). – *Z. dt. geol. Ges.*, **113** (2/3): 571-590; Hannover.
- (1980a): Erläuterungen zu Blatt 7623 Mehrstetten. - Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, mit Beiträgen von E. VILLINGER, H. FRANK, H.J. MAUS, W. OHMERT & A. SCHREINER. – 60 S. und geol. Karte; Stuttgart.

- GWINNER, M.P. (1980b): Erläuterungen zu Blatt 7524 Blaubeuren. - Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, mit Beiträgen von H. J. MAUS, W. OHMERT, A. SCHREINER, E. VILLINGER & HHV LAICHINGEN. – 64 S.; Stuttgart.
- GWINNER, M.P., MAUS, H.J., PRINZ, H., SCHREINER, A. & WERNER, J. (1974): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, Erläuterungen zu Blatt 7723 Munderkingen. – 107 S.; Stuttgart.
- HAAG, H.W. (1960): Die Geologie des Blattes Zwiefalten (Nr. 7722) 1:25.000 (Stratigraphie und Tektonik der Zwiefalter Alb). – Arb. Geol. Paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F. **28**: 1-122; Stuttgart.
- HENNIG, E. (1926): Eine junge rheinische Störung in der Schwäbischen Alb. – Jh. Ver. Vaterl. Naturkde. Württ., **82**: 64-76; Stuttgart.
- HOYDEM, A. (1992): Die Tektonik der Schwäbischen Alb zwischen Jusi und Randecker Maar. – Diss. Univ. Stuttgart, 254 S.; Stuttgart.
- HÜTTNER, H. (1951): Die Geologie der Randecker Halbinsel und ihre Bedeutung für das Uracher Vulkangebiet. – Diss. Univ. Tübingen, 93 S.; Tübingen.
- ILLIES, J.H. (1974): Intra-Plattentektonik in Mitteleuropa und der Rheingraben. – Oberrhein. geol. Abh., **23**: 1-24; Karlsruhe.
- (1978): Neotektonik, geothermale Anomalie und Seismizität im Vorfeld der Alpen. – Oberrhein. geol. Abh., **27**: 11-31; Karlsruhe.
- (1982): Der Hohenzollerngraben und Intraplatten-Seismizität infolge Vergitterung lamellärer Scherung mit einer Riftstruktur. – Oberrhein. geol. Abh., **31**: 47-78; Karlsruhe.
- ILLIES, J.H., PRODEHL, C., SCHMINCKE, H.U. & SEMMEL, A. (1979): The Quaternary Uplift of the Rhenish Shield in Germany. – Tectonophysics, **61**: 197-225; Amsterdam.
- KIDERLEN, H. (1931): Beitrag zur Stratigraphie und Paläogeographie des süddeutschen Tertiärs. – N. Jb. F. Min. etc., Beil. Bd. **66**, Abt. B: 215- 384; Stuttgart.
- KRAUTTER, M. (1995): Erläuterungen zum Blatt 7423 Wiesensteig. – Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, mit einem Beitrag von M. FRANZ, 146 S. und geol. Karte; Stuttgart.
- LÓPEZ CORREA, M., STRIEBEL, T. & WISSHAK, M. (2001): Höhlen im Steinbruch der Ulmer Weißkalkwerke bei Blaustein-Ehrenstein (Blatt 7525 Ulm-NW). – Laichinger Höhlenfreund, **36**(2): 103-112; Laichingen.
- LÓPEZ CORREA, M. & ROSENDAHL, W. (2002): Über eine neue Höhle auf der mittleren Schwäbischen Alb – Zur Geologie, Paläontologie und Speläologie der Zaininger Höhle (7523/12). – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **84**: 333-353; Stuttgart.
- LILLICH, W. (1962): Die Geologie der Blätter Mehrstetten und Schelklingen (Nr. 7623 und Nr. 7624) 1:25.000. – Arb. Geol. Paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F. **34**, 111 S.; Stuttgart.
- MAUS, B. (2000): Karte der mineralischen Rohstoffe von Baden-Württemberg 1:50.000. Erläuterungen zu Blatt L 7524 Blaubeuren. Mit Beiträgen von B. KIMMIG, W. WERNER & P. WAGENPLAST, M. FRANZ & H. BOCK. 101 S., 5 Abb., 14 Tab, 1 Kt.; Freiburg.
- MAYER, A. (1934): Geologie und Morphologie der Schwäbischen Alb zwischen Laichingen und Blaubeuren. – Inaugural-Diss. Univ. Tübingen, 31 S.; Tübingen.
- PAULSEN, S. (1962): Die Geologie des Blattes Ulm-Nordwest (Nr. 7525) 1:25.000. – Arb. Geol. Paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F., **35**: 72 S.; Stuttgart.
- PRINZ, H. (1959): Die Geologie des unteren Großen Lautertales und des angrenzenden Donauebietes. – Arb. Geol. Paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F. **19**: 105 S.; Stuttgart.

- REICH, H. (1915): Stratigraphische und tektonische Studien im Uracher Vulkangebiet. – Diss. Univ. Freiburg, 67 S.; Freiburg.
- RÖDEL, C. (1957): Geologische Untersuchungen im Gebiet der Laichinger Alb. – Dipl. Arb. TH Stuttgart, 67 S.; Stuttgart.
- (1958): Die Geologie des Blattes Blaubeuren (7524) und der Nordhälfte des Blattes Böhlingen (7523), Schwäbische Alb.– Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart, **15**: 1-79; Stuttgart.
- SCHALL, W. (1964): Die Geologie der Blätter Deggingen, Geislingen a. d. Steige und Weidenstetten (Nr. 7424, 7325 und 7425) 1:25.000 (Schwäbische Alb). – Arb. Inst. Geol. Paläont. TH Stuttgart, N.F. **46**: 260 S.; Stuttgart.
- (2002): Erläuterungen zum Blatt 7425 Lonsee. Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, mit Beiträgen von H.J. BAYER, H. JANTSCHKE, M. KÖSEL, B. MAUS, T. SIMON & P. WAGENPLAST, 126 S. und geol. Karte; Stuttgart.
- SCHALL, W., GEYER, M. & FRANZ, M. (2004): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, Blatt 7424 Deggingen, vorläufige Ausgabe; Freiburg.
- SCHMIDT, N. (1969): Eine alttertiäre Spaltenfüllung von Ehrenstein westlich von Ulm. – Mitt. Bayer. Staatsslg. Paläont. hist. Geol., **9**: 201-208; München.
- SCHMIDT-KITTLER, N. (1977): Neue Primatenfunde aus unteroligozänen Karstspaltenfüllungen Süddeutschlands. – Mitt. Bayer. Staatsslg. Paläont. hist. Geol., **17**: 177-195; München.
- SCHNEIDER, G. (1993): Beziehungen zwischen Erdbeben und Strukturen der Süddeutschen Großscholle. – N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **189**: 1-3; Stuttgart.
- (1997): Abschätzung der seismischen Gefährdung für intrakontinentale Gebiete: Die Situation in Mitteleuropa. – Eclogae geol. Helv., **90** (1997): 421-432; Basel.
- SCHÖNENBERG, R. (1973): Zur Tektonik des südwestdeutschen Schichtstufenlandes unter dem Aspekt der Plattentektonik. – Oberrhein. geol. Abh., **22**: 75-86; Karlsruhe.
- SEIBOLD, E. (1951): Das Schwäbische Lineament zwischen Fildergraben und Ries. – N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **93**: 285-324; Stuttgart.
- SELG, M. & SCHWARZ, K. (2009): Am Puls der schönen Lau – Zur Hydrogeologie des Blautopf-Einzugsgebiets. – Laichinger Höhlenfreund, **44**: 45-72; Laichingen (in diesem Band).
- SIEWERT, W. (2006): Strukturgeologische Aufnahme entlang der projektierten DB-Neubaustrecke Stuttgart-Ulm. – Jber. u. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **88**: 93-117; Stuttgart.
- UFRECHT, W. (1983a): Stratigraphie und Petrographie im Raum Laichingen und in der Laichinger Tiefenhöhle, Schwäbische Alb. – Laichinger Höhlenfreund, **18**(1): 3-10; Laichingen.
- (1983b): Klufftektonik im Raum Laichingen und in der Laichinger Tiefenhöhle, Schwäbische Alb. – Laichinger Höhlenfreund, **18**(1): 11-18; Laichingen.
- (1983c): Speläogenese und Morphogenese der Laichinger Tiefenhöhle, Schwäbische Alb. – Laichinger Höhlenfreund, **18**(1): 25-38; Laichingen.
- (1987): Weitere Überlegungen zum Karstalter der Laichinger Alb. – Laichinger Höhlenfreund, **22**(2): 83-86; Laichingen.
- UFRECHT, W., SACHS, P.M. & TIMMERMANN, G. (1990): Zur Geologie der mittelmiozänen Diastrome von Laichingen (Uracher Vulkanfeld). – Jber. u. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **72**: 359-390; Stuttgart.

- USTASZEWSKI, K. & SCHMID, S.M. (2007): Latest Pliocene to recent thick-skinned tectonics at the Upper Rhine Graben – Jura Mountains junction. – *Swiss. J. Geoscience*, **100** (2): 293-312; Basel.
- VEIT, E. (1936): Geologische Untersuchungen im Gebiet des oberen Filstals. – *Jh. Ver. Vaterl. Naturkde. Württ.*, **92**: 74-138; Stuttgart.
- VILLINGER, E. (1986): Untersuchungen zur Flussgeschichte von Aare-Donau/Alpenrhein und zur Entwicklung des Malm-Karsts in Südwestdeutschland. – *Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg*, **28**: 297-362; Freiburg.
- (1987): Die Blautopfhöhle bei Blaubeuren als Beispiel für die Entwicklung des Karstsystems im schwäbischen Malm. – *Geol. Jb.*, **C 49**: 71-103; Hannover.
- VILLINGER, E. & UFRICHT, W. (1989): Ergebnisse neuer Markierungsversuche im Einzugsgebiet des Blautopfs (mittlere Schwäbische Alb). – *Mitt. Verb. Dt. Höhlen- u. Karstforsch.*, **35**(1/2): 25-38; München.
- VOGELSANG, D. (1988): Messungen der Elektromagnetik an dem Karsthöhlensystem des Blautopfes. – Unveröffentl. Bericht des Niedersächsischen Landesamts für Bodenforschung, 15 S.; Hannover.
- WAGNER, G. (1929): Junge Krustenbewegungen im Landschaftsbilde Süddeutschlands. – *Erdgeschichtliche und landeskundliche Abhandlungen aus Schwaben und Franken*, **10**: 302 S.; Öhringen.
- WETZEL, H.U. & FRANZKE, H.J. (2003): Lassen sich über die Fernerkundung erweiterte Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9°-Ost) gewinnen? – *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, **12**: 339-347; Bochum.
- WUNDERLICH, H.G. (1974): Die Bedeutung der Süddeutschen Großscholle in der Geodynamik Westeuropas. – *Geol. Rdsch.*, **63**(2): 755-772; Stuttgart.
- ZIEGLER, P. (1987): Late Cretaceous and Cenozoic intra-plate compressional deformation in the Alpine foreland – a geodynamic model. – *Tectonophysics*, **137**: 389-420; Amsterdam.
- ZIEGLER, R. & HEIZMANN, E. P. J. (1991): Oligozäne Säugerfaunen aus den Spaltenfüllungen von Lautern, Herrlingen und Ehrenstein bei Ulm. – *Stuttgarter Beitr. Naturkde.*, **B 171**: 26 S.; Stuttgart.