

Jh. Landesamt f. Geologie Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg	39	S. 25–54	11 Abb.		Freiburg im Breisgau 30. Oktober 2003
---	-----------	----------	---------	--	--

Die Anwendung von Satellitenbilddaten zur tektonischen Analyse des Schwarzwalds und des angrenzenden Oberrheingrabens

HANS JOACHIM FRANZKE, WOLFGANG WERNER &
HANS-ULRICH WETZEL*

Fernerkundung, Strukturgeologie, Bruchtektonik, hydrothermale Bildung, Neotektonik
Schwarzwald, Oberrheingraben, Baden-Württemberg
GÜK 200: CC 7110, CC 7118, CC 7910, CC 7918, CC 8710

K u r z f a s s u n g: Die geologische Interpretation von TM- und ERS-1-Satellitenbilddaten kann wesentlich zu einer Komplettierung der Kenntnisse über das Strukturmuster des Schwarzwalds und der östlichen Schulter des Oberrheingrabens beitragen. Die Verknüpfung dieser Fernerkundungsdaten mit Daten aus der strukturgeologischen Geländearbeit belegt, daß wenig oder nicht vererzte große Störungen als Migrationszonen für hydrothermale Lösungen fungierten und die im Satellitenbild meist nicht erkennbaren, um eine Größenordnung kleineren Mineralgänge als Absatzstrukturen von hydrothermalen Mineralisationen ein gemeinsames strukturelles System bilden. Besonders deutlich heben sich durch ihre morphologische Ausprägung jungtertiäre bis rezente, meist blattverschiebend aktivierte SSW–NNE-Brüche und NW–SE-Brüche in den Satellitenbildern heraus. Duktil verformte Strukturen des kristallinen Grundgebirges wie variszische Scherzonen und die metamorphe Foliation sind mit den verwendeten Fernerkundungsdaten nur ansatzweise zu erfassen.

[The application of remote sensing data for the structural analysis of the Schwarzwald (Black Forest) and its surroundings]

A b s t r a c t: This contribution deals with a methodology to combine remote sensing data (satellite imagery) with terrestrial structural measurements to identify type and extent of fault activity, and

* Anschriften der Autoren: Dr. HANS JOACHIM FRANZKE, Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Clausthal, Leibnizstraße 10, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: hans.joachim.franzke@tu-clausthal.de; Dr. WOLFGANG WERNER, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Albertstraße 5, D-79104 Freiburg i. Br., E-Mail: werner@lgrb.uni-freiburg.de; Dr. HANS-ULRICH WETZEL, GeoForschungsZentrum Potsdam, Aufgabenbereich 1, Projektbereich 1.5, Telegrafenberg A17, D-14473 Potsdam, E-Mail: wetz@gfz-potsdam.de

to reconstruct palaeo-stressfields in the Schwarzwald area, SW-Germany. This method is thought to contribute to a better understanding of the interactions between faulting, fluid migration, and mineralization. Interpretations of TM- and ERS-1 images could identify a more complex structural pattern as known from pure geological field work. The structural pattern is dominated by morphological accentuated brittle fractures. Arcuate features give indications for the trace of the foliation and ductile shear zones in the Variscan basement. The brittle fractures could be classified as steeply dipping strike-slip and oblique normal faults with dominant NW–SE and NNE–SSW strike. Mineral veins are generally not detectable in the satellite images. In a combination of detailed structural field work with interpretation of satellite images, however, it could be determined that the fracture-sealing hydrothermal veins are located inside major fault blocks. Satellite images and field data indicate a secondary lateral fault displacement of anticlockwise reactivated SSW–NNE and NW–SE trending faults, which are oriented parallel to the Upper Rhine graben. This may be the result of the neogene to recent nealpine stressfield in SW-Germany.

[Application de la télédétection à l'analyse structurale du cristallin de la Forêt Noire et du Fossé Rhénan supérieur]

R é s u m é : L'interprétation par télédétection a fourni des connaissances substantielles concernant la structuration de la Forêt Noire et de l'épaulement oriental du Fossé Rhénan supérieur. L'interprétation combinée des données de la télédétection et des levés tectoniques sur le terrain indique qu'il existe un système structurel formé par les grands accidents qui sont peu ou non minéralisés, mais qui ont permis la migration des fluides hydrothermaux, et les filons minéralisés qui sont d'un ordre de grandeur inférieur et qu'on reconnaît moins clairement sur les photos de satellites. Celles-ci font ressortir d'une façon évidente les structures morphologiques dues aux accidents de directions SSW–NNE et NW–SE, d'un âge néogène à actuel, et qui sont le plus souvent des décrochements. Par contre, les structures de déformation ductile du socle cristallin comme les zones de cisaillement hercynien ou la foliation métamorphique apparaissent d'une façon moins bien précise.

Inhalt

	Seite
1 Einführung	27
2 Methodik der Bildinterpretation	30
2.1 Allgemeines	30
2.2 Identifizierung von Strukturformen des Grundgebirges	34
2.3 Diagnose von Bruchstrukturen	35
3 Ergebnisse	39
3.1 Regionale Übersichtsinterpretation	39
3.2 Die Strukturen des kristallinen Grundgebirges	40
3.3 Beziehungen von Grundgebirgsstrukturen zu Gangmineralisationen	42
3.4 Der Ostrand des Oberrheingrabens	44
3.5 Gangmineralisation, Streßfeld und Fernerkundung	49
4 Schlußfolgerungen	52
Literatur	52

1 Einführung

Im Umfeld des Schwarzwalds erscheinen auf der Fläche einer Satellitenbildszene (ca. 180 x 180 km) unterschiedliche Struktureinheiten. Es sind dies das variszisch geprägte kristalline Grundgebirge, das auflagernde Deckgebirge mit Schichten vom terrestrischen Zechstein bis zum Oberjura, das überregional bedeutende känozoische Rift des Oberrheingrabens, das alpine Orogen einschließlich des davon beeinflussten Vorlandes (Faltenjura und Faltenmolasse) sowie die davon nicht mehr betroffenen Bereiche des Tafeljuras und des Bayerisch-Helvetischen Molassetrogs (Abb. 1). Für die regionalgeologische Anwendung der Fernerkundung bietet dieser Raum gute Voraussetzungen, da sich die Hauptstruktureinheiten, nämlich das Kristallin des Schwarzwalds, das bruchtektonisch geprägte, jedoch gering bis ungefaltete Deckgebirge und die känozoischen Lockergesteine durch Texturmerkmale, Grautonvariationen und den Grad der tektonischen Zerteilung relativ gut unterscheiden lassen.

Beginnend mit dem Perm (SW–NE verlaufende Molassetröge) legte sich dem Kristallin eine bis zum Oberjura auf 1100 Meter anwachsende Deckgebirgsschicht auf. Durch die Hochwölbung des Oberrheinischen Schildes seit dem Oberjura wurden im Bereich des heutigen Schwarzwalds das Deckgebirge und schließlich sogar Teile des Kristallins erodiert, bis seit dem mittleren Eozän über dem Zentrum des Rheinischen Schildes der Oberrheingraben einbrach (HÜTTNER 1991, GEYER & GWINNER 1991). Da die Gesteine des heutigen Ausstrichniveaus des Schwarzwald-Kristallins seit dem Oberkarbon–Perm nicht mehr in größere Krustentiefe als ca. 1–2 km versenkt wurden, seit dieser Zeit in hochkrustaler Lage aber mehrere tektonische Impulse (alpine Orogenese, Rifting des Oberrheingrabens) aufgenommen haben, wird das Bild des Schwarzwalds und seines Umfeldes stark von mesozoisch–känozoisch aktivierten Brüchen geprägt. Diese Brüche setzen über die Stockwerksgrenzen hinweg aus dem Kristallin über das triassisch–jurassische Deckgebirge bis in die oberen Bereiche der bis 3,5 km mächtigen Grabenfüllung des Oberrheingrabens und auch des Bayerisch-Schweizer Molassebeckens, also bis in diagenetisch noch wenig kompaktierte Sedimente, hinein. Teile dieser Bruchstrukturen sind die Absatzstrukturen der Gangmineralisationen des Schwarzwalds, denen in diesem Beitrag unsere besondere Beachtung gelten soll.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft förderte in den Jahren von 1991–1994 ein Schwerpunktprogramm zur „~~Intrafunktionalen Lagerstättenbildung~~“ (Kordinator R. FRIEDRICH, Aachen). Hierbei wurden hydrothermale Mineralisationen des Zentral- und Südschwarzwalds in zahlreichen noch zugänglichen Bergwerken strukturgeologisch bearbeitet (FRANZKE & WERNER 1994, WERNER & FRANZKE 1994, 2001). Als Ergebnis dieser Untersuchungen entstand ein Kartensatz, in welchem Strukturelemente des kristallinen Grundgebirges (Foliationsverlauf der Gneise, duktile Scherzonen, Bewegungspolaritäten, Abb. 6) und der spät- bis postvariszischen Bruchtektonik (Verlauf mineralisierter Bruchzonen und von Magmatitgängen, Indikationen zum Bewegungsstil von Bruchzonen) zusammengestellt sind. Die Strukturelemente dieser Karten können als Referenzen dienen, um die Erkennbarkeit genetisch verschiedener Strukturelemente (Gneisfoliation, duktile Scherzonen, ruptile Störungen, Vulkanit-/Magmatitgänge, Mineralgänge) in den Satellitenaufnahmen zu testen.

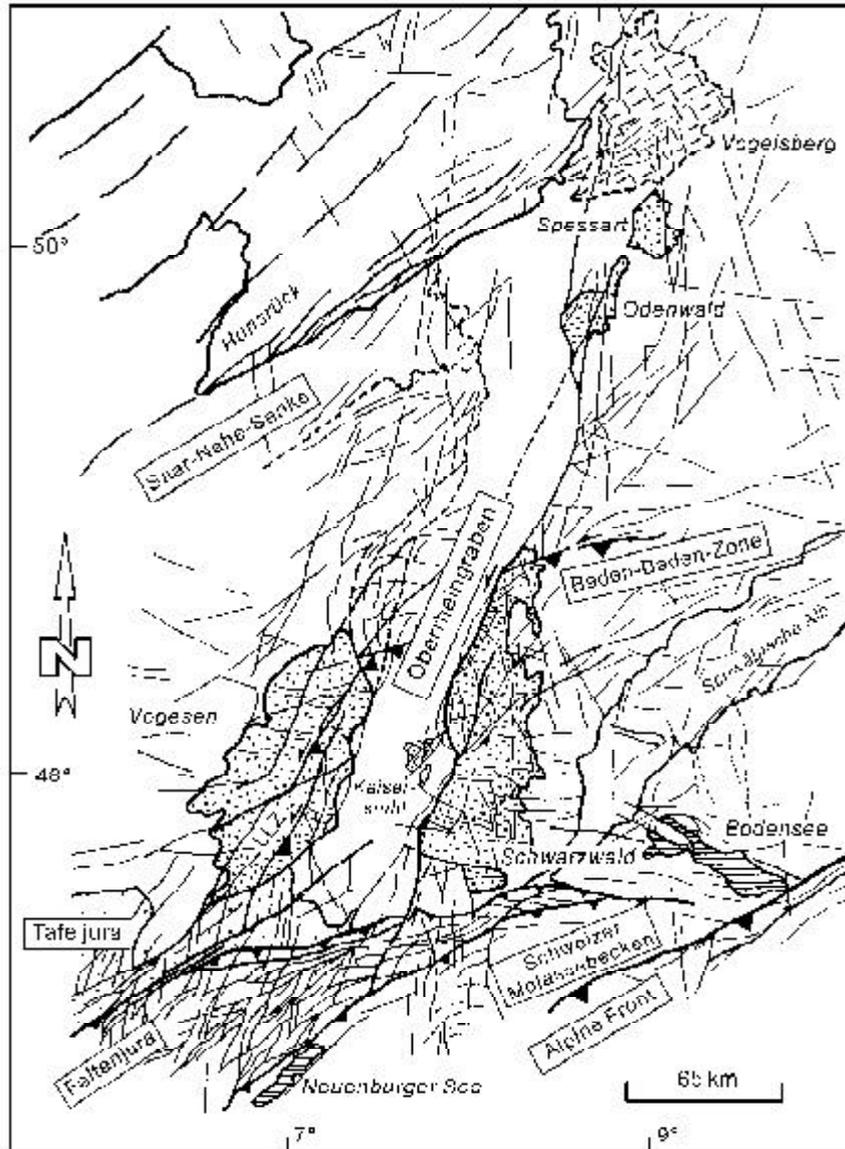


Abb. 1: Übersichtsinterpretation von SW-Deutschland und angrenzenden Gebieten

Grundlage für die vorliegende Interpretation: ERS-1-Bilddaten von 1992–1994 mit unterlegtem digitalem Geländemodell aus dem ESA-Projekt Radarkarte von Deutschland, Processing DFD/DLR; LLZ – Variszische Lorraine-Lorraine-Störungszone in den Vogesen; gepunktete Flächen – variszisches Grundgebirge

Flankierend zu den strukturgeologischen und minerogenetischen Untersuchungen wurden im Rahmen des oben genannten DFG-Schwerpunktprogrammes „Intraformationale Lagerstättenbildung“ bruchorientierte geologische Interpretationen von Satellitenaufnahmen des Schwarzwalds und seiner Umgebung durchgeführt. Das erwies sich als sinnvoll, da dieses Projekt vor allem auf die Untersuchung bruchgebundener Mineralisationen (Mineralgänge) im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwalds und dem auflagernden Deckgebirge einschließlich der östlichen Grabenschulter des Oberrheingrabens abzielte und eine Komplettierung des bekannten Bruchmusters im Gesamtbereich von Bedeutung war. Es stand zu erwarten, daß durch die Gebietskenntnis der Autoren zusätzliche strukturgeologische Informationen aus den Satellitendaten extrahiert und in die geologisch-lagerstättenkundlichen Untersuchungen rückgeführt werden könnten. Im Band 8 der Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (FRANZKE et al. 2000) wurde anhand von Thematic Mapper (TM)- und ERS-1-Daten über regionale Gesetzmäßigkeiten der Bruchzerteilung im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwalds und dem auflagernden Deckgebirge sowie innerhalb der tertiär- bis quartärzeitlichen Sedimentfüllung des Oberrheingrabens berichtet. Dabei wurde bereits das Problem gestreift, ob sich aus den verwendeten Fernerkundungsdaten auch Aussagen zur Kinematik von Störungen und an daran geknüpfte Mineralisationsprozesse und auf die sie verursachenden tektonischen Paläostreißfelder ziehen lassen. Dieser Fragestellung wird hier weiter nachgegangen, wobei die Verknüpfung von Fernerkundungsdaten mit strukturgeologischen Untersuchungen im Mittelpunkt des Interesses stehen soll. Wir konzentrieren uns auf die regionale Bruchinterpretation von Thematic Mapper- und ERS-1-Daten aus dem Bereich des Schwarzwalds.

Fernerkundliche Untersuchungen über das Gebiet des Schwarzwalds sind in den letzten Jahren zu Möglichkeiten und Grenzen der digitalen Bildverarbeitung im Zentralschwarzwald (JOPPE 1998), zur Wasserführung des Trennflächengefüges im Südschwarzwald, zur Bruchtektonik des Gebiets von Heilbronn (BRUNNER & HINKELBEIN 2000) und zur Tektonik des Oberrheingrabens, des Schweizer Jura und der alpinen Molassetröge unter der Sicht der Kohlenwasserstoffexploration (BERGER 1994) durchgeführt worden.

Wir konzentrierten unsere Satellitenbildinterpretationen (Abb. 2 und 3) auf eine dreikanalige Farbmischung (Kanäle 3, 4 und 7) einer TM-Szene, die uns von Herrn Dr. D. BANNERT (BGR) freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde, und auf Farbkopien von ERS-1-Daten (Abb. 4 und 5). Ferner stand ein Ausschnitt aus dem ERS-1-Mosaik von Deutschland der DLR (Oberpfaffenhofen) zur Verfügung (Aufnahmen zwischen 1992 und 1994). Die ERS-1-Daten sind mit einem digitalen Geländemodell kombiniert (Höhenstufen 100 m). Die Aufnahmen wurden im GFZ Potsdam (Dr. H.-U. WETZEL) in den Maßstäben 1 : 200 000 (TM) bzw. partiell bis auf 1 : 100 000 (ERS-1) zur visuellen Interpretation vorbereitet. Ferner konnten durch das freundliche Entgegenkommen der DLR (Dr. P. REINHARDTS) Höhenmodelle des Südschwarzwalds verwendet werden, die von den Stereokanälen 6 und 7 der Stereokamera MOMS-2P von der russischen Weltraumstation MIR im Rahmen des internationalen Projekts "Priroda" aufgenommen worden waren (Abb. 9).

Begriffserläuterungen:

Thematic Mapper (TM): Siebenkanaliges Scanning-System der NASA (USA). Es arbeitet im Bereich des sichtbaren Lichtes bis zum thermischen Infrarot. Die Bodenauflösung beträgt aufgrund der Pixelgröße ca. 30 x 30 Meter.

Earth Resources Satellite (ERS-1 und 2), gestartet von der ESA (European Space Agency). ERS-1 wurde 1991 gestartet, ERS-2 1995. Aktive und passive Mikrowellensensoren. Der für diesen Beitrag verwendete Wellenlängenbereich ist 3,6 cm (Radar), die Bodenauflösung beträgt etwa 25 x 25 Meter.

MOMS-2P: Modularer Optoelektronischer Multispektraler Stereoscanner, installiert auf der russischen Raumstation MIR. Die Stereokanäle 6 und 7 dienen der Erzeugung digitaler Geländemodelle („Anaglyphenbilder“), von denen eine Abspielung der DLR für diesen Beitrag verwendet wurde.

Dank: Wir danken den Herren Dr. D. BANNERT/BGR Hannover für die Bereitstellung von TM-Szenen des Schwarzwalds und Herrn Dr. B. REINHARDT/DLR für die Nutzung digitaler Höhenmodelle des Gebiets um Freiburg i. Br. Die Autoren danken ferner Herrn Prof. Dr. A. MULLER für die Hilfestellung bei der Abfassung der französischen Kurzfassung. Frau I. JOSZ/TU Claus-thal fertigte einen Teil der Abbildungen an. Nicht zuletzt danken wir den Gutachtern für die kritischen Hinweise und Herrn Priv.-Doz. Dr. D. H. STORCH, Freiburg i. Br., für die umsichtige Hilfe bei der Druckvorbereitung.

2 Methodik der Bildinterpretation

2.1 Allgemeines

Die geologischen Interpretationen verschiedener Fernerkundungsmaterialien zeigten, daß im Bereich von Schwarzwald, Vogesen, südlicher Oberrheingraben, Schweizer Jura und westliches Molassebecken relativ günstige Bedingungen für die Geo-Fernerkundung bestehen. Probleme bereiten die jungen Lockersedimente der Grabenfüllung des Oberrheingrabens und die verbreiteten, bis Zehnermeter mächtigen Ablagerungen jungquartärer äolischer Sedimente (Löß). Im Kristallin des Schwarzwalds sind die in höheren Lagen dominierenden geschlossenen Fichtenwälder ein erhebliches Problem, so daß für die Interpretation nur Reliefmerkmale, selten Texturmerkmale zur Verfügung stehen (Härtlingsbildung in Diatexiten, Stufenbildung bei bruchtektonischer Überprägung im Kristallin). Es gelang dort nur ansatzweise, strukturelle Elemente des flach bis mittelsteil einfallenden Kristallinbaus (Foliationsverlauf, duktile Scherzonen) zu diagnostizieren, da ihre Ausstriche wenig reliefiert sind, die Ausstriche bogenförmig verlaufen und damit gut maskiert sind. Das gilt sowohl für die verwendeten TM- als auch für ERS-1-Aufnahmen.

Vom kristallinen Grundgebirge des Schwarzwalds (Gneise, Anatexite und variszische Granitplutone) zum auflagernden Deckgebirge (Siliziklastika und Karbonatgesteine des Perms, der Trias und des Juras) bis zur Lockergesteinsfüllung des Oberrhein-

grabens ist eine jeweils sprunghaft abnehmende Lineationsdichte festzustellen, die einer von Stockwerk zu Stockwerk abnehmenden Intensität der Bruchzerteilung entspricht. Das hat seine Ursachen in der unterschiedlichen Viskosität der Gesteine dieser Stockwerke zur Zeit der Bruchbildung und beruht ferner darauf, daß das variszische Grundgebirge alle strukturellen Aktivierungen der gesamten Zeitspanne, das auflagernde Deckgebirge aber nur noch den mesozoisch-känozoischen Anteil und die Grabenfüllung des Oberrheingrabens (Känozoikum) schließlich nur noch die jüngsten tektonischen Impulse aufgenommen haben.

Die Unterscheidung von Klüften oder Klüftensembles gegenüber bruchhaften Störungen erfolgte über die unterschiedliche Größenordnung beider Strukturformen. Im Unterschied zu den eng gebündelten und mehrere Kilometer langen Störungszonen treten Klüftstrukturen außerdem flächenhaft verteilt auf und bilden häufig zwei- oder mehrscharige, senkrecht zueinander angeordnete („orthogonale“) Klüftmuster. Auf diese Weise ist auch eine Abtrennung der in zwei Hauptscharen geklüfteten Sandsteine und Karbonatgesteine des Deckgebirges vom Kristallin im Bereich des Schwarzwalds relativ gut möglich, da die Gneise aufgrund ihres bogenförmigen Foliationsverlaufs auch unruhige Klüftmuster aufweisen (Abb. 5). Bei den Granitplutonen des Schwarzwalds sind neben orthogonalen Längs- und Querklüften zur Unterscheidung von Sedimenten vor allem die Lagerklüfte wichtig, die sich der Plutonform anschmiegen und parallel zu den bogenförmigen Granitkontakten verlaufen.

Fernerkundliche Probleme zur Brucherkenntnis bestehen naturgemäß im Inneren des Oberrheingrabens, da dort die mächtigen quartärzeitlichen Grabenfüllungen den Untergrund von Festgesteinen (Jura und älteres) überdecken und Hinweise auf die Blockfelderung in den Festgesteinen des Untergrunds nur durch das Drainagemuster sowie diffuse Vernässungszonen (dunklere Grauwerte) an einzelnen Stellen markiert sind und damit ein Durchpauereffekt wirksam wird. Auf dieser Grundlage läßt sich erkennen, daß z. B. die Hochscholle des Tunibergs allseitig störungsbegrenzt ist. Zusätzliche Probleme für Detailinterpretationen im größeren Maßstab (Luftbilder und hochauflösende Satellitenaufnahmen) erwachsen vor allem durch die in der Vorbergzone des Schwarzwalds, dem Tuniberg und dem Kaiserstuhl verbreiteten Lößschleier, die den Untergrund vollständig maskieren können (WERNER et al. 1995).

Zu den „Möglichkeiten und Grenzen der digitalen Bildverarbeitung zur Erkennung geologischer Strukturen“ liegt eine Dissertation von JOPPE am Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Stuttgart vor, in der auch ein Testgebiet im Südlichen Schwarzwald untersucht wurde (JOPPE 1998). JOPPE schlußfolgert aus seiner Untersuchung zur automatisierten Lineationskartierung: „Große Probleme bei der automatisierten Auswertung mitteleuropäischer Gebiete bereitet die Verwechslung von geologischen Lineationen mit linearen Strukturen anthropogenen Ursprungs“. Die Untersuchungen von JOPPE zeigen, dass LANDSAT-TM-Multispektralaufnahmen aus dem Herbst oder Winter sowie digitale Höhenmodelle unter simulierter Beleuchtung

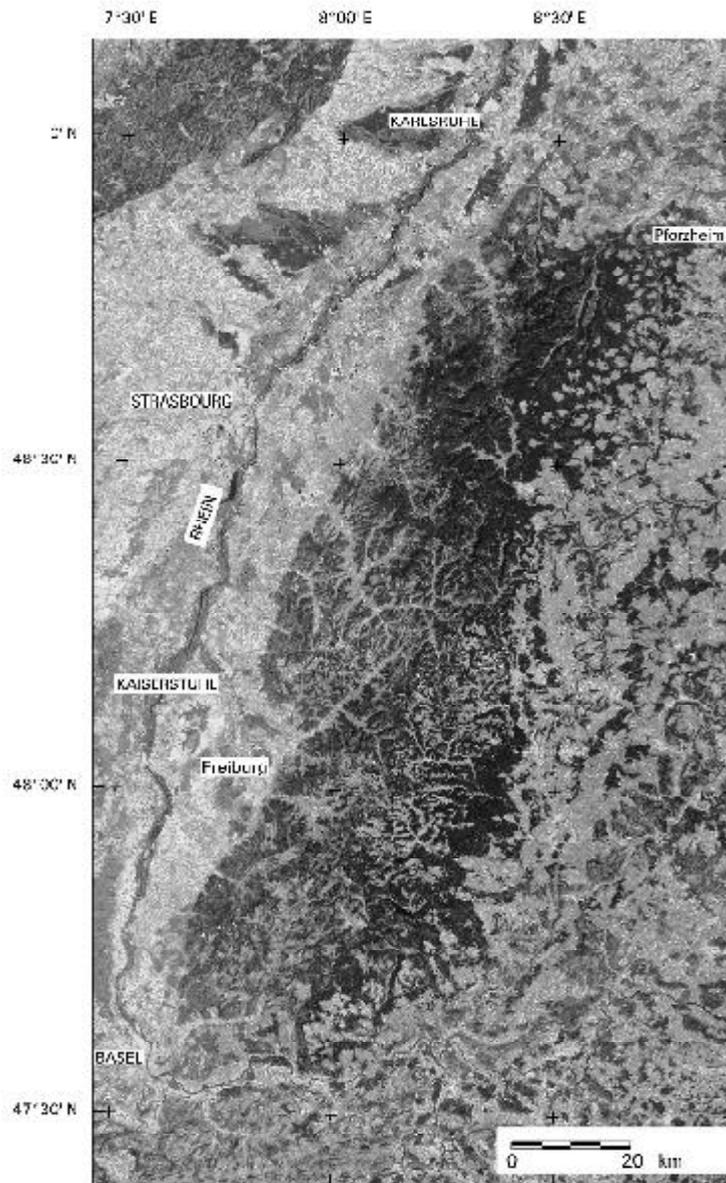


Abb. 2: LANDSAT-5, Thematic Mapper, Aufnahme datum 7. Juli 1984
„Falschfarbaufnahme“ aus den Kanälen 3, 4 und 7

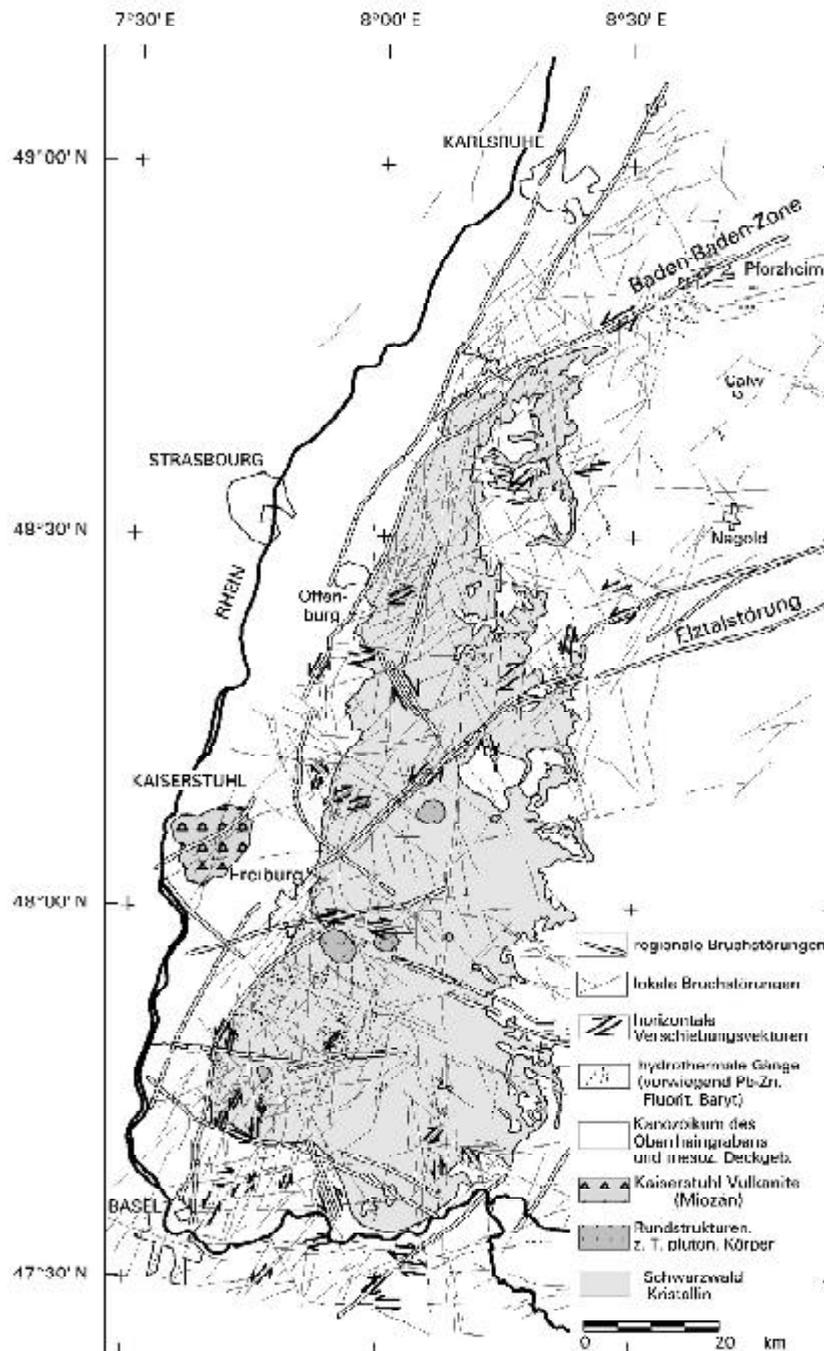


Abb. 3: Geologische Interpretation der TM-Aufnahme von Abb. 2

Der Hauptrandbruch des Oberrheingrabens stellt eine sich vergabelnde, mit anderen Strukturen interferierende Bruchzone dar. Ovale Strukturen repräsentieren Gneisdome und/oder Granitplutone mit bogigem Foliations- bzw. bogigem Lagerluftverlauf. Am Kaiserstuhl verschneiden sich mehrere Lineationszonen. Weitere Erläuterung im Text.

gut geeignet sind für automatisierte Auswertungen (Lineationskartierung), ERS-1-Radar- und panchromatische SPOT-Aufnahmen dagegen weniger. Bis zu zwei Drittel der visuell ausgewerteten Lineationen lassen sich automatisch erfassen. Große Bedeutung kommt der Beleuchtungsrichtung der Satellitenszenen zu, ein bisher wenig beachteter Faktor. Es bestätigte sich auch bei unseren Arbeiten die von JOPPE getroffene Aussage, daß die visuelle Interpretation von vorbearbeiteten Satellitendaten durch ein mit dem Gebiet vertrautes Geologenteam unter den mitteleuropäischen Klima- bzw. Vegetationsbedingungen der automatisierten Kartierung von Brüchen zur Zeit noch deutlich überlegen ist.

2.2 Identifizierung von Strukturformen des Grundgebirges

Gegenseitige Altersbeziehungen von Strukturen sind nach Verschneidungskriterien untersucht worden, indem die jeweils jüngere Störung (Fernerkundungslineation) die ältere Struktur durchtrennt und relativ zueinander verschiebt bzw. schleppt, wie dies auch in der Feldgeologie eine gängige Methodik ist. Dies kann durch weitere begleitende geowissenschaftliche Verfahren, z. B. durch radiometrische Altersdatierungen an neugebildeten Mineralphasen auf Störungen (K-Ar-Datierungen u. a.), weiter präzisiert werden (u. a. HAGEDORN & LIPPOLT 1994). Bei den strukturellen Hauptrichtungen (SSW–NNE und NW–SE) sind immer wieder alternierende Beeinflussungen und damit wechselnde relative Aktivierungsalter nachzuweisen. Schwierig ist es ebenfalls, aus dem Lineationsmuster Informationen zur Kinematik in den Störungszonen abzuleiten. Bei Vertikalverschiebungen (Ab- oder Aufschiebungen) stößt das in der Regel auf Probleme, wenn keine Gesteins-Referenzhorizonte zur Verfügung stehen, wie das in Kristallingebieten, so auch im Schwarzwald, häufig der Fall ist. Sind horizontale oder schräge Bewegungsimpulse vorhanden, können durch Gesteinsschleppung (meist sind es Verbiegungen von flächigen Elementen, z. B. Schichtungen in Sedimenten oder Foliationsflächen von Gneisen) Angaben zum Bewegungsstil von Rupturen (horizontale Komponente) gemacht werden. Vergleicht man diese Bruchinterpretationen mit dem aus regionalen Strukturuntersuchungen verschiedener Autoren kompilierten Muster der variszischen Scherzonen, so zeigt sich, daß die relativ flach einfallenden und bogenförmig verlaufenden sowie gut verheilten variszischen Strukturen hier kaum zu erfassen sind. Bruchelemente im Bereich des heutigen Oberrheingrabens sind teilweise reaktivierte variszische Strukturen, was sich aber nur in Kombination mit geologischen Felduntersuchungen klären läßt (ILLIES 1965, FRANZKE & WERNER 1994, WERNER & FRANZKE 2001). Die von BERGER (1994) gegebene Deutung, daß geradlinige Strukturen am Oberrheingrabenrand auf variszische Vorzeichnungen hindeuten, muß insofern eingeschränkt werden, als viele variszische Strukturen (Foliation, Scherzonen), so auch im Randbereich des Kristallins von Schwarzwald und Vogesen zum Oberrheingraben, aufgrund des dominant duktil-konvergenten Verformungsstils des Varisikums und des relativ flachen Einfallens ausgesprochen bogenförmig verlaufen.

2.3 Diagnose von Bruchstrukturen

Die Geometrie von Störungen ist über den Verlauf der Austrittslineare der Bruchflächen an der Erdoberfläche, also über ihre Richtungen (Streichen), die Intensitäten ihrer Krümmungen als Hinweis auf die Dreidimensionalität ihrer Form und durch die Einflüsse der Störung bzw. der Störungsspur auf die Ausrichtung der eine Lineationszone umgebenden Reliefformen an der Erdoberfläche zu erschließen. Hier ergeben sich Möglichkeiten, die Einfallrichtungen von Störungen/Lineationen durch die Kontrolle ihres Verspringens bei der Querung von Talzügen festzustellen. Variszische Strukturen (Gneisfoliation, duktile Scherzonen) sind stark gekrümmte Flächen, die an der Oberfläche analog kurvige Ausbühlungen erzeugen und so von den geradliniger verlaufenden Sprödb Brüchen problemlos unterschieden werden können.

Deshalb lassen sich die spät- bis nachvariszisch entstandenen, relativ geradlinig auch stärker gegliedertes Gelände durchtrennenden und damit steil einfallenden Bruchstrukturen (dominierende Einfallwerte zwischen 60 und 90°) aus den Satellitenbildern erschließen. Die auf Störungen beziehbaren Lineationszonen markieren außerdem häufig Zonen erhöhter Bodenfeuchte (dunklere Grauwertklassen). An diese linear gestreckten Bildelemente sind ferner Reliefmerkmale, z. B. zu den Lineationen ausgerichtete Geländerippen oder darin angelegte Ausräumungszonen, gebunden, die ein weiteres wichtiges Hilfsmittel zur Diagnose darstellen. Da die junge Morphogenese an den beiden Riftschultern des Oberrheingrabens (Schwarzwald und Vogesen) sehr intensiv ist, sind dort reliefbeeinflussende Bruchphänomene besonders gut wahrzunehmen.

Innerhalb des Oberrheingrabens und an den Grabenschultern lassen sich auch Fest- und Lockergesteine anhand von Texturmerkmalen unterscheiden; da Trennflächengefüge (Kluftstrukturen, Störungen), abgesehen von beginnender Kluftbildung im Löß, sonst nur in Festgesteinen auftreten. Für die visuelle Interpretation von Satelliten- daten sind außerdem Karstphänomene dann von Bedeutung, wenn Karbonatgesteine direkt an der Oberfläche anstehen oder sich, wie in der Vorbergzone und am Tuniberg noch durch den jungquartären Lößschleier durchpausen.

Nur in wenigen Fällen war es jedoch möglich, aus dem kartierten Lineationsmuster direkte Hinweise auf vertikale oder laterale Bewegungsimpulse (Störungsversätze) zu bekommen oder relative Altersbeziehungen verschiedener Bruchrichtungen nachzuweisen.

Ein wichtiges Ziel war die Diagnose mineralisierter Störungen (Mineralgänge) sowie von Magmatit- und Vulkanitgängen. Die Richtungsverteilung der Mineralgänge zeigt Häufungen parallel zum Rheingrabenrand (SSW–NNE bis SW–NE), außerdem in NW–SE bis WNW–ESE- und in N–S-Richtung. Letztere sind an eine wegen der geringen Störungsversätze in der Fachliteratur bisher kaum beachtete N–S-Bruchzone gebunden, die den ganzen Schwarzwald von Baden-Baden im Norden über Haslach bis über St. Blasien hinaus durchzieht (Abb. 3 und 5) und in der die Mineralgänge südlich von St. Blasien aufsitzen (FRANZKE & WERNER 1994).

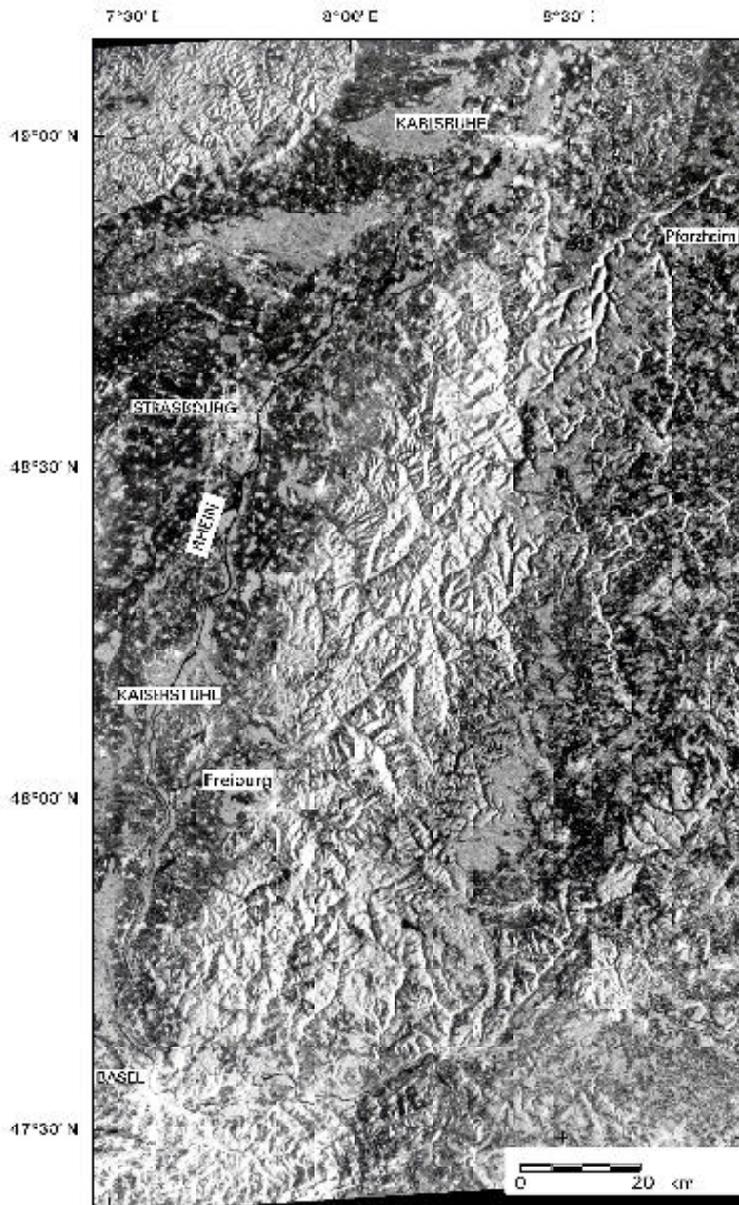


Abb. 4: ERS-1-Aufnahme (Radar, Wellenlänge 3,6 cm) des Schwarzwalds und des unmittelbaren Umlands

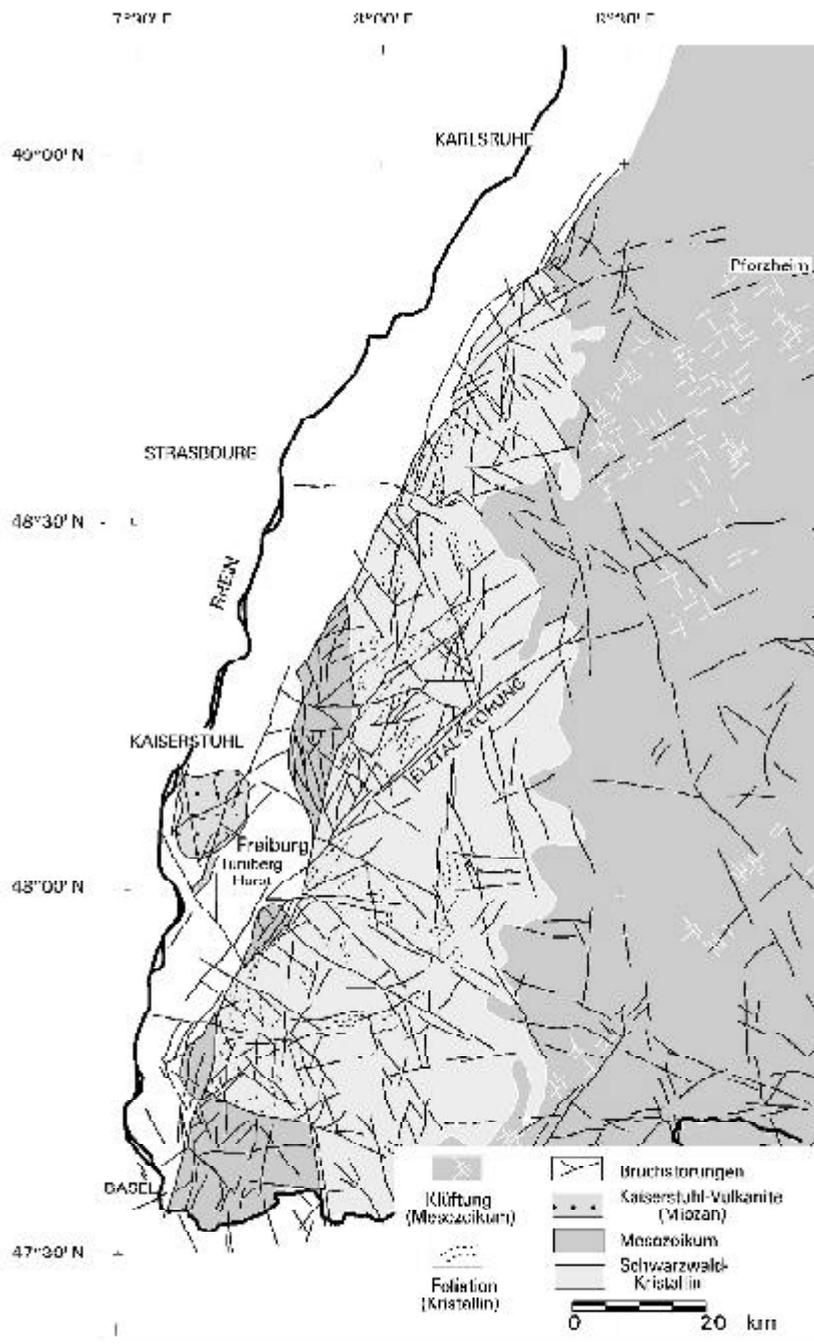


Abb. 5: Geologisch-strukturelle Interpretation der Radarsatellitenaufnahme von Abb. 4
 Enthalten sind die wesentlichen Bruchstrukturen, die Gneisfoliation im Schwarzwald und die Deckgebirgsklüftung im Umland des Kristallins. Gegenüber der TM-Interpretation ist eine detailliertere Kartierung der Deckgebirgsklüftung und der Gneisfoliation möglich.

Die Mineralgänge selbst haben nur geringe streichende Ausdehnungen in der Spannweite von einigen Zehner- bis zu wenigen hundert Metern. Störungen mit mineralisierten Abschnitten von mehr als einem Kilometer Länge treten nur auf großen Bruchstrukturen auf (z. B. Brenden, Gottesehre bei St. Blasien, Finstergrundgang bei Wieden, Grube Clara bei Wolfach, Käfersteige bei Pforzheim und im Freudenstädter Graben). Meist treten die Hydrothermalgänge schwarmartig innerhalb größerer Störungszonen auf und bilden dann „Gangzüge“ oder locker gruppierte Gangschwärme („Gangfelder“). Wenn mehrere Gangzüge oder größere Gangfelder in einem Gebiet auftreten, kann man diese als Gangreviere bezeichnen (Revier am Schauinsland, Neuenbürger Revier u. a.). Die Mächtigkeiten einzelner Gänge liegen mit wenigen Ausnahmen, z. B. des Fluoritgangs der Grube Käfersteige bei Pforzheim im Nordschwarzwald (hier bis 30 m), nur im Meterbereich. In Gangzonen treten, von Zwischenmitteln aus Nebengestein getrennt, oftmals mehrere Gangtrümer auf. Die unmittelbare Umgebung der mineralisierten Gangstörungen (Mineralgänge) ist in der Regel hydrothermal alteriert (Tonmineralneubildung, Silifizierung, Hämatitisierung), wodurch mit dem TM-System (Kanal 7, Wellenlänge 2,0 bis 2,3 μm) eine gute Identifikationsmöglichkeit besteht, sofern keine dichte Vegetations- oder mächtige Bodenbedeckung das verhindert.

Da die Mineralgänge nur im Bereich starker Nebengesteinssilifizierung oder beim Vorhandensein morphologisch wirksamer Gangfüllungen wie am Quarzriff bei Badenweiler (bis 40 m mächtiger Quarzgang) und am Keppenbacher Schloßberg in Freiamt (Revier Freiamt–Sexau, Landkreis Emmendingen) an der Schwarzwaldrandverwerfung morphologisch auf kurze Erstreckung ausgeprägt sind, besteht unter den Vegetationsbedingungen des Schwarzwalds mit Luftbildern und gut auflösenden Satellitendaten nur lokal die Möglichkeit, die geringmächtigen Mineralgänge bzw. die Gangstörungen durch die Fernerkundung zu lokalisieren. Vor allem Bergbauspuren wie Pingenzüge, Halden und Stollenmundlöcher können hier örtlich erkannt werden. Nur die übergeordneten Störungszonen, in denen sich abschnittsweise diese mineralisierten Störungsfüllungen (Gänge) befinden, sind bereichsweise durch linear gestreckte Grauwertanomalien zu erfassen. Die indirekte Lokalisation der Mineralisationen durch Alterationshöfe, wie in der Fernerkundungsliteratur aus ariden Gebieten der Erde häufig beschrieben (SABINS 1987), scheidet aufgrund der fast völligen Vegetationsbedeckung aus. Deshalb wurde für ein größeres Gebiet wie das des Schwarzwalds und seines Umfelds (Fläche 150 x 150 km) das Konzept verfolgt, durch die Satellitenbild-Interpretation des Bruchmusters und den Vergleich dieses Musters mit Störungen und Mineralgängen, die in den amtlichen geologischen Karten und lagerstättengeologischen Publikationen verzeichnet sind, systematische Verteilungsmuster zu erkennen. Dies kann Hinweise für Paläo-Fluidmigrationen und zur Lokalisation von Mineralkonzentrationen geben sowie Beiträge zur Genese und Altersstellung der hydrothermalen Gangstrukturen des Schwarzwalds leisten.

Ähnlich problematisch ist die Erkennbarkeit der im Schwarzwald-Kristallin verbreiteten oberkarbonisch-permischen Magmatit- und Vulkanitgänge, da durch die bei der

Spaltenfüllung erfolgte Bruchverheilung die ohnehin schwachen Störungen wieder versiegelt wurden. Sie können nur dann im Satellitenbild verfolgt werden, wenn eine deutliche morphologische Akzentuierung eingetreten ist.

Gegenseitige Altersbeziehungen von Strukturen sind nach dem Verschneidungskriterium untersucht worden. Kinematische Rückschlüsse (Horizontalkomponente von Störungsbewegungen) wurden punktuell durch den Bewegungssinn und Betrag von Verschiebungen anhand des Versatzes von Referenzmarken wie charakteristischen Gesteinen beiderseits einer Störung ermittelt. Alterseinstufungen lassen sich ergänzend durch weitere Verfahren, wie z. B. durch K-Ar-Altersdatierungen an Störungsgesteinen vom Typ der Illit-reichen Störungskataklasite im Grundgebirge, den „Ruscheln“ der Bergleute, ermitteln (Ergebnisse bei HAGEDORN & LIPPOLT 1994, WERNER & FRANZKE 2001). Dennoch ist es sehr schwierig, aus dem Lineationsmuster Informationen zur Kinematik von Störungen abzuleiten. Bei Ab- oder Aufschiebungen stößt das in der Regel auf Probleme, wenn keine Referenzhorizonte im Gesteinsverband zur Verfügung stehen, wie das im Kristallin häufig der Fall ist. Sind horizontale oder schräge Bewegungsimpulse vorhanden, können durch die Schleppung flächiger Strukturelemente (Schichtung in Sedimenten, Foliationsflächen in Gneisen) Angaben zum Bewegungsstil von Rupturen gemacht werden.

3 Ergebnisse

3.1 Regionale Übersichtsinterpretation

Die Grenzbereiche der alpinen Deformationsfront und des nördlich vorgelagerten Molassebeckens sowie des Falten- und Tafeljuras sind bereits von BERGER (1994) unter erdölgeologischen Aspekten fernerkundlich interpretiert worden. Eine bruchtektonische Interpretation des Schwarzwalds mit seinem Umfeld auf der Grundlage des von der DLR publizierte Radarmosaiks von Deutschland und von Thematic Mapper-Aufnahmen ergab, daß dieser Raum von einer Fülle von Strukturlinien durchzogen wird (Abb. 1–6). Nach der dominierend geradlinigen bis leicht bogenförmigen Geometrie weist das Lineationsmuster hauptsächlich auf steil einfallende Bruchstrukturen hin. Im Schwarzwald sind sowohl grabenparallele SSW–NNE- bis SW–NE-Brüche, außerdem WNW–ESE- bis NW–SE-Brüche und N–S-Brüche zu diagnostizieren. So kann die SW–NE streichende Elztal-Störung, im größeren Zusammenhang betrachtet, als Fortsetzung der Transform-Störungen zwischen dem Nordende des Bresse-Grabens und dem südlichen Oberrheingraben interpretiert werden. Gerade im Ostteil des südlichen Oberrheingrabens häufen sich die Hinweise auf eine größere sinistrale Scherzone im Untergrund der quartären Sedimentfüllung (WERNER & FRANZKE 2001). Die NW–SE gerichtete Horst- und Grabentektonik des Zentralschwarzwalds (Schauinsland–Feldberg-Horst, Albtalgraben u. a.) kann als westliche Fortsetzung der Horst- und Grabensituation um den Bodensee, vor allem der jungmesozoisch–känozoisch

aktiven Bonndorfer Grabenzone, betrachtet werden. Am Kaiserstuhl wird eine starke Verschneidung von Fotolineationen offenbar, so daß sich die Position des vulkanischen Zentrums innerhalb des Bruchmusters des Oberrheingrabens aus der engen Vergitterung von NW–SE, N–S und NNE–SSW verlaufenden Lineationen und der daraus ableitbaren Bruchzerteilung der oberen Erdkruste erklären lassen könnte.

3.2 Die Strukturen des kristallinen Grundgebirges

Die Strukturelemente des kristallinen Grundgebirges sind durch duktile Verformungen geprägt, die sich in der Gneisfoliation und daraus gebildeten Kuppelstrukturen verschiedener Größenordnung manifestieren. Seit dem Unterkarbon kam es zur Bildung großer duktiler Scherzonen (Abb. 6), die sich als konvergente variszische Strukturen größtenteils aus der Foliation heraus entwickelt haben. Diese wurden oftmals im Oberkarbon zu Weitungsstrukturen (schräge Abschiebungen) invertiert (KROHE & EISBACHER 1988, EISBACHER et al. 1989). Sie streichen um SW–NE bis E–W und fallen flach bis mittelsteil nach SE oder NW ein. Die variszischen Granite sind zum Teil noch syndeformativ-variszisch (beginnend bei ca. 360 Ma) in die bereits foliierten Gneise eingedrungen. Ihre Bildung reicht zeitlich bis in die postkompressive Inversionsphase der variszischen Tektonik hinein (bis etwa 310 Ma, KALT et al. 1994). Die Scherindikationen auf der Gneisfoliation (Streckungslineare) und auf den Gleitflächen der duktilen Scherzonen (Scherlineare) signalisieren einen aus den Satellitendaten allerdings nicht nachweisbaren tektonischen Transport nach NW–W (KROHE & EISBACHER 1988). Der duktile Verformungsstil und das flache bis mittelsteile Einfallen dieser variszischen Strukturelemente haben stark gekrümmte Ausbißlinien an der reliefierten Oberfläche des heutigen Schwarzwalds hervorgebracht. Die thermische Verschweißung innerhalb der Gneisareale (jüngere variszische Hochtemperaturmetamorphose) hat bereichsweise zu einer Gesteinshomogenisierung und folglich zu einer nur geringen morphologischen und textuellen Ausprägung von Foliation und Scherzonen beigetragen, so daß selbst bedeutende Scherzonen wie die Badenweiler–Lenzkirch-Zone (LOESCHKE et al. 1998, HANN & SAWATZKI 1998) zwischen Zentral- und Südschwarzwald in den Satellitenbildern kaum erkennbar sind. Das morphologische Bild im Bereich des Kristallins wird deshalb von lokal auftretenden, linsig ausgebildeten Härtlingen (Amphibolit- und Eklogitscherlingen) bestimmt, die in die Gneisfoliation eingeschichtet sind. Ferner wird das Relief von variszischen Plutoniten und der morphologischen Herauspräparierung anatektisch beeinflusster Zonen in den variszischen Gneisen, z. B. im Schauinsland-Gebiet, vor allem durch die spätmesozoisch–känozoische Blocktektonik dominiert.

Entlang dem heutigen Oberrheingraben existieren ebenfalls variszische Vorzeichnungen, auf die bereits ILLIES (1965) hingewiesen hat. Durch die Bearbeitung von Mineralgangrevieren im grabennahen Kristallin (Gangreviere Freiamt–Sexau, Schauinsland, St. Ulrich) konnte dies bestätigt werden (WERNER & FRANZKE 1994, 2001). Ein weiträu-

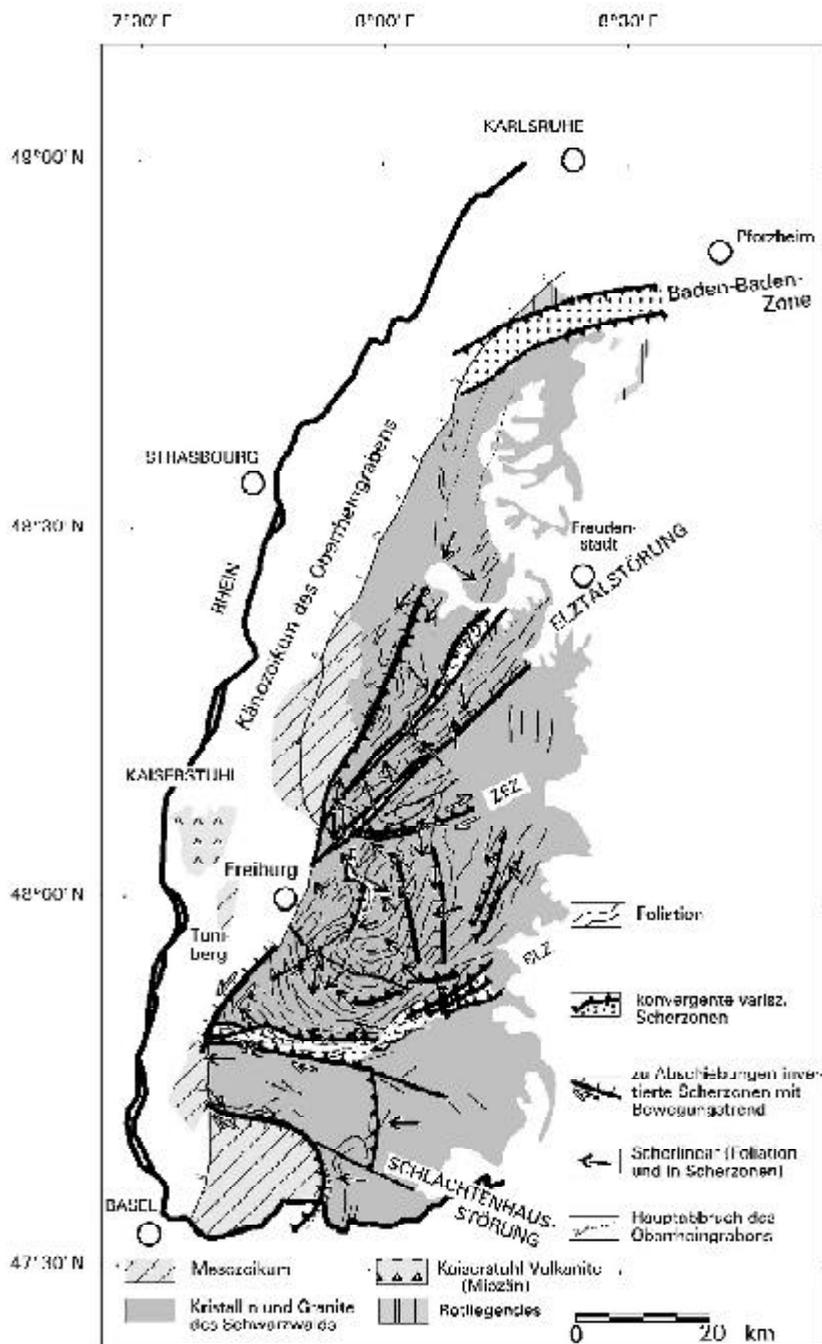


Abb. 6: Interpretation der Kristallintektonik (konvergente Scherzonen, ruptile Bruchzonen, Verlauf der Gneisfoliation) aus Thematic Mapper- und ERS-1-Daten

Die Scherlineare sind aus Literaturdaten entnommen (hauptsächlich nach KROHE & EISBACHER 1988, EISBACHER et al. 1989) und durch eigene Felddaten ergänzt.

miger Schleppungshof im Gneisrahmen der Hauptstörung der auflässigen Ba-Pb-Ganglagerstätte Caroline (Schaubergwerk) zeigt linksseitige Blattverschiebungen in einem duktil-kataklastischen Milieu, die sich vor der jungmesozoisch–tertiären Gangmineralisation ereigneten und als variszische Verformung zu deuten sind, wie sie auch von ILLIES (1965) angenommen wurde. Die Lineationskartierung der ERS-1- und TM-Aufnahmen weist im Bereich des Oberrheingrabens ebenfalls auf linkslaterale Verschiebungen bis Schrägabschiebungen im Känozoikum hin. Die zeitliche Auflösung in zwei Hauptereignisse ist hier nur in der Verknüpfung mit „bodengestützten“ strukturellen Untersuchungen möglich.

3.3 Beziehungen von Grundgebirgsstrukturen zu Gangmineralisationen

Die Verknüpfung der zwei Stränge der variszischen linkslateralen Lalaye–Lubin-Zone (LLZ in Abb. 1) der Vogesen mit der Baden-Baden-Zone im Nördlichen Schwarzwald als der Grenzsutur zwischen der Saxothuringischen Zone der Varisziden im Norden und der Moldanubischen Zone im Süden zeigt, daß an beiden Flanken des Oberrheingrabens ein linksdrehender Versatz von insgesamt einigen zehner Kilometern vorliegt, da keine kontinuierliche Fortsetzung dieser variszischen Scherzonen über den Graben hinweg zur Baden-Baden-Zone gegeben ist. Die Baden-Baden-Zone als Fortsetzung der LLZ im Nordschwarzwald ist eine nach SE einfallende konvergente variszische Suturzone (WICKERT et al. 1990), auf der sich durch spätere störungskontrollierte dilatative Grabenbildung im Perm der mit kontinentalen Sedimenten und Vulkaniten gefüllte Molassetrog von Baden-Baden gebildet hat. Da das mesozoische Deckgebirge diese variszische Terrane-Grenze weitgehend bedeckt, ist sie nur an einzelnen Stellen aufgeschlossen. Sie wird in den Satellitenaufnahmen jedoch durch eine 5–10 km breite, leicht geschwungene Zone von WSW–ENE streichenden, jeweils bis mehrere Kilometer langen Lineationen charakterisiert, die sich auch durch die Sedimente des Deckgebirges durchpausen. Nahezu senkrecht hierzu treten hydrothermale Gangmineralisationen auf (Müllenbacher-, Neuenbürger- und Freudenstädter Revier), die in die NW–SE-Schar der zu Störungen durchgerissenen Deckgebirgsklüftung (Buntsandstein) eingedrungen sind (Abb. 7). Aus den Ganggefügen (Geometrie der Gänge, Bewegungsindikationen) ist strukturgeologisch zu schließen, daß die NW–SE-Kluftrichtung aufgrund der Ausrichtung zum Paläostreßfeld (minimaler Horizontalstreß während der Gangmineralisation: SW–NE) dehnungskinematisch bevorzugt war und deshalb zu Gangstrukturen geöffnet wurde. Die Gegenrichtung der Deckgebirgsklüfte (SW–NE) fällt angenähert mit der variszischen Scherzonenrichtung des kristallinen Sockels zusammen und ist während der Mineralisationsprozesse z. T. zu dextral bewegten Kleinabscherungen transformiert worden. Bewegungsindikationen aus den Satellitenaufnahmen signalisieren jedoch eine sinistrale Bewegungstendenz. Diese kann als Folge des überprägenden neotektonisch (Jungtertiär–Quartär) wirksamen Streßfelds mit

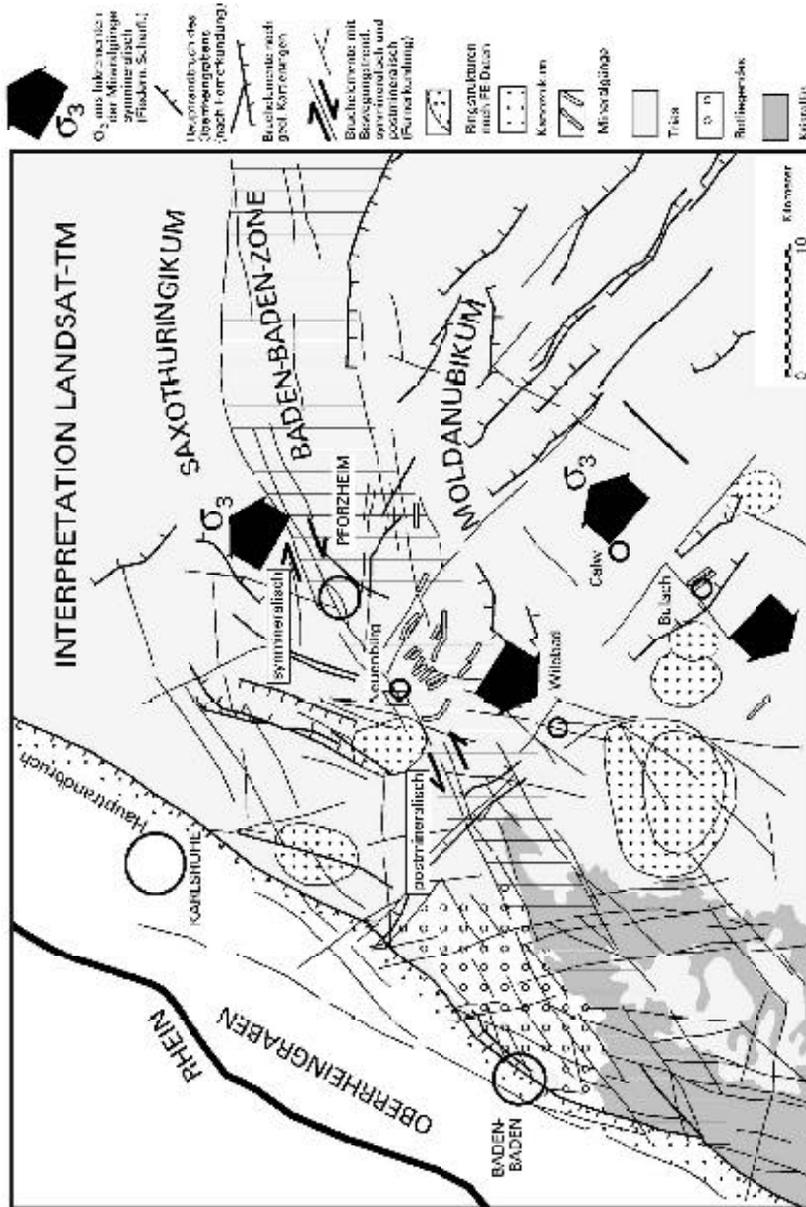


Abb. 7: Geologische Strukturkarte des Gebiets zwischen Baden-Baden und Pforzheim mit eingefügten Ergebnissen der Fernerkundung Grundlage: ERS-1- und TM-Daten aus den Abb. 2 und 4. Erläuterung im Text.

maximaler Kompression aus SSE (GREINER 1976) angesehen werden. Die Lineationskartierung belegt, daß die Mineralgänge im Gebiet zwischen Pforzheim und Neuenbürg räumlich an die variszische Suturezone gebunden sind, innerhalb der sie auf NW–SE-Strukturen aufsitzen, die sich im Fildergrabensystem nach SE fortsetzen. Die Störungen sind durch das synmineralisch anliegende Streißfeld (Dehnung in SW–NE) aufgeweitet worden (Abschiebungen bis Schrägverschiebungen).

3.4 Der Ostrand des Oberrheingrabens

Das Kristallin des Schwarzwalds war, bevor die taphrogene Entwicklung des Oberrheingrabens und die damit verbundene Heraushebung des Schwarzwaldblocks einsetzte, vollständig mit mächtigen triassisch–jurassischen Sedimenten überdeckt. Anhand von Tiefbohrungen im Graben und Aufschlüssen in der Vorbergzone läßt sich die Mächtigkeit der ehemals über dem Kristallin gelegenen permischen und mesozoischen Sedimentgesteine auf maximal 1100 m abschätzen. Das Tertiär erreichte auf dem Kristallin Mächtigkeiten von annähernd 200 m. Am Oberrheingrabenrand wird durch die Schollentreppe der Vorbergzone das Spektrum der vor dem Rifting sedimentierten mesozoischen Gesteine aufgeschlossen, die vordem auch die heutige Hochscholle des Schwarzwalds (und der Vogesen) in gleicher oder ähnlicher Fazies bedeckten. Die tertiärzeitliche Bildung des Oberrheingrabens ist aus den Faziesmustern und Mächtigkeitsverteilungen des Mesozoikums noch nicht zu erkennen (TRUNKO 1998). Den mesozoischen Schichten lagern mit einer zeitlichen Lücke, die im Oberjura beginnt (Verkarstung der Karbonate, vor allem des Hauptrogensteins), tertiärzeitliche Küstensedimente auf, die mit ihren eng zonierten Fazieswechseln und grabenwärts orientierten Schuttströmen den Einbruch des Oberrheingrabens seit dem oberen Eozän (HÜTTNER 1991) bei synchroner Hebung der Grabenschultern dokumentieren.

Die meisten Erz- und Mineralgänge des Süd- und Zentralschwarzwalds sind parallel zur Randverwerfungszone orientiert, was bereits genetische Beziehungen zur Entwicklung des Grabens nahelegt. Das belegen auch die Untersuchungen zum Paläostreißfeld (FRANZKE & WERNER 1994), die deutliche Bezüge zur Wölbung des Rheinischen Schildes und zum daraus sich im Alttertiär entwickelnden Rifting-Prozeß des Oberrheingrabens zeigen (Abb. 11). Das Bruchmuster des Schildes wurde nach ILLIES (1965) seit dem Dogger durch abschiebende Bewegungen reaktiviert. Weitere Vorläufer des Oberrheingrabens stellen die vulkanischen Spalten dar, die seit der Wende von der Unter- zur Oberkreide aufrissen, wobei die Spaltensysteme keineswegs nur auf den späteren Grabenrand begrenzt waren, sondern mehrere Kilometer weit in das Schwarzwald-Kristallin hineinreichen (HÜTTNER 1991). Auch die mesozoischen–känozoischen Hydrothermalereignisse blieben nicht auf die Störungen am Schwarzwaldrand beschränkt, da das weitverzweigte Bruchgitter des Schildes unter dem herrschenden extensionalen Krustenregime seit dem jüngeren Mesozoikum großräumig von Hydrothermenzirkulationen erfaßt werden konnte. All dies vollzog sich bis in das Jungtertiär

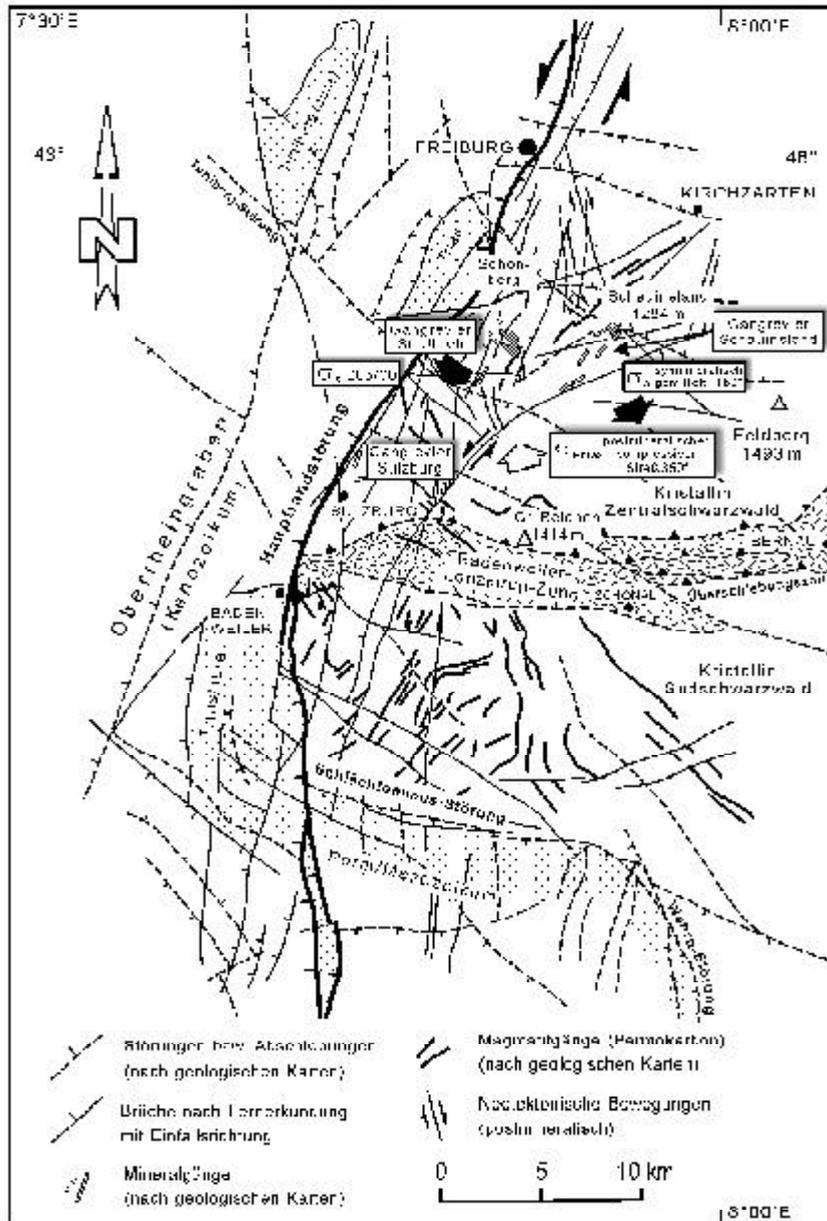


Abb. 8: Strukturkarte des Zentralschwarzwalds östlich von Freiburg aus der Kombination von geologisch kartierten Störungen (VILLINGER 1999) und der Fernerkundung

Der Ostrand des Oberrheingrabens stellt sich als ca. 5 km breite Randstapel von nach Westen einfallenden Abschiebungen bis Schrägabschiebungen mit Mineralgängen dar (Schauinsland). Mineral- und Magmatitgänge folgen außerdem dem NW-SE-Störungsmuster (z. B. bei St. Ulrich), das an die Horst-Grabentektonik zwischen Schauinsland-Feldbergegebiet und dem Bodensee gebunden ist. Punktsignatur – Mesozoikum; Strichelung – Badenweiler-Lenzkirch-Zone

hinein unter einer weitgehend abdichtenden Deckgebirgshülle (WERNER & FRANZKE 2001). In einigen Bereichen setzen die Mineralgänge auch aus dem Kristallinstockwerk in das Deckgebirge bis einschließlich Jura hinein (u. a. Freudenstadt, Pforzheim, Wittichen, Badenweiler, Freiamt–Sexau).

Die Hebung der westlichen und östlichen Grabenschultern und die damit verbundene Einsenkung des Grabens setzte nach schwachen Vorläufern im Mitteleozän (mit Tuffschlot-Vulkanismus) mit starker Einsenkung im höheren Obereozän ein (HÜTTNER 1991). Im Pliozän hatte dann die mit der Heraushebung verbundene schnelle Erosion des Deckgebirges auf dem Schwarzwald-Kristallin bereits das Niveau des Oberen Muschelkalks erreicht, was durch die Verbreitung von Bohnerzlehmen in diesem Niveau belegt ist (KESSLER & LEIBER 1991). Aus dem Vergleich der Mächtigkeiten der tertiärzeitlichen Sedimente im Grabeninneren und am Grabenrand lassen sich für das Unter- und Mitteloligozän Absenkungsraten von 1–2 cm pro 100 Jahre (0,1–0,2 mm/a) rekonstruieren (SCHREINER 1991). Die rezenten Höhenänderungen im Breisgau betragen an der Randverwerfung 0,2 mm/a und an der „Rheinverwerfung“, also zwischen Graben- und Grabenrandscholle, rund 0,6 mm/a, wie neuere Untersuchungen zeigen (SCHWEIZER 1992). Die Senkungsraten im Graben liegen damit in der gleichen Größenordnung wie im Oligozän, so daß Grabenbildung und tektonische Aktivität auf den Randstörungen keineswegs als abgeschlossen betrachtet werden können. Dies macht verständlich, warum auch die jüngsten Mineralisationen auf den Mineralgängen (Brauneisen und Psilomelan) am Grabenrand noch zerschert sind (Revier Freiamt–Sexau).

Aus der Lineationskartierung mit Hilfe der TM-Aufnahmen und der speziellen Interpretation des Gebiets östlich von Freiburg mit Hilfe einer Kombination von digitalem Geländemodell und Satellitenaufnahme (Abb. 9) sind am Ostrand des Oberrheingrabens Abschiebungsstrukturen mit Tendenz zu linkslateralen Verschiebungen zu erkennen. Es ist dabei zu beachten, daß mit der Fernerkundung das additive Ergebnis einer langen strukturellen Entwicklung registriert wird. Die tertiärzeitliche Grabentektonik überlagerte hier ältere Verformungen gleichsinnig, d. h., linkslaterale variszische Verschiebungen auf grabenparallelen Scherzonen (ILLIES 1965) wurden beim tertiärzeitlichen Rifting durch eine schräge Abschiebungstreppe etwa gleichsinnig weiter ausgeformt. Dextrale Gegenbewegungen an Parallelstörungen führten zur NE- bzw. SW-Bewegung von beidseitig störungsbegrenzten Segmenten.

In einer Lineationskartierung (Abb. 10) nördlich von Freiburg sind unterschiedliche Schubbewegungen der von Störungen eingerahmten Blocksegmente bezüglich der erkennbaren Horizontalkomponenten der Bewegungen und ein starkes Auffächern der im Stadtgebiet noch eng gebündelten Grabenrandstörung in NE-Richtung zu dokumentieren. Dies wird von uns bruchmechanisch als Rißausbreitung unter fortgesetztem Aufspießen der Störungszone in NE-Richtung gedeutet. In der Form, nicht jedoch in der Dimension, ähnelt das Bild einem Fächerbruch an einer Kluftzone, die durch starke Energieabstrahlung charakterisiert ist (BANKWITZ & BANKWITZ 2000). Das Zerspließen hat sich aus dem Initialfeld des eng gebündelten Haupttrandbruchs

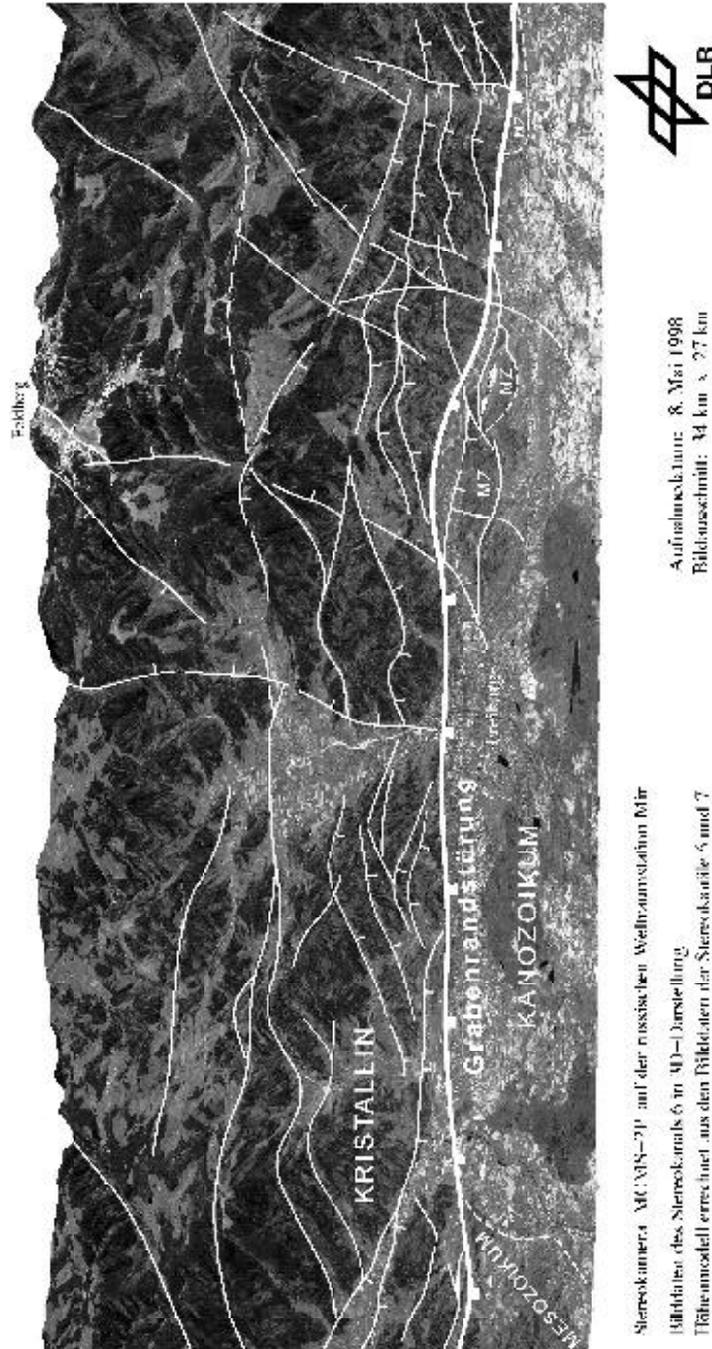


Abb. 9: Digitales Höhenmodell des Gebiets um Freiburg bis zum Feldberg. Die Blickrichtung geht nach Osten. Stereokamera von MOMS-2P, Bilddaten des Stereokanals 6 in 3D-Darstellung. Die eingetragenen Lineationen werden als nach Westen einfallende Staffelfröche interpretiert, die die Grabenschulter des Oberheingrabens aufbauen. Die NW-SE-Strukturen gehören zum Feldberg-Horst und zum Müntertal-Graben.

der Grabenrandstörung bei Freiburg durch offenbar mehrphasige Aktivierung und Rißausbreitung nach Norden entwickelt. Das wird durch das Auftreten mehrerer, tektonisch untergliederter Mineralparagenesen im Gangrevier Freiamt–Sexau belegt (WER-

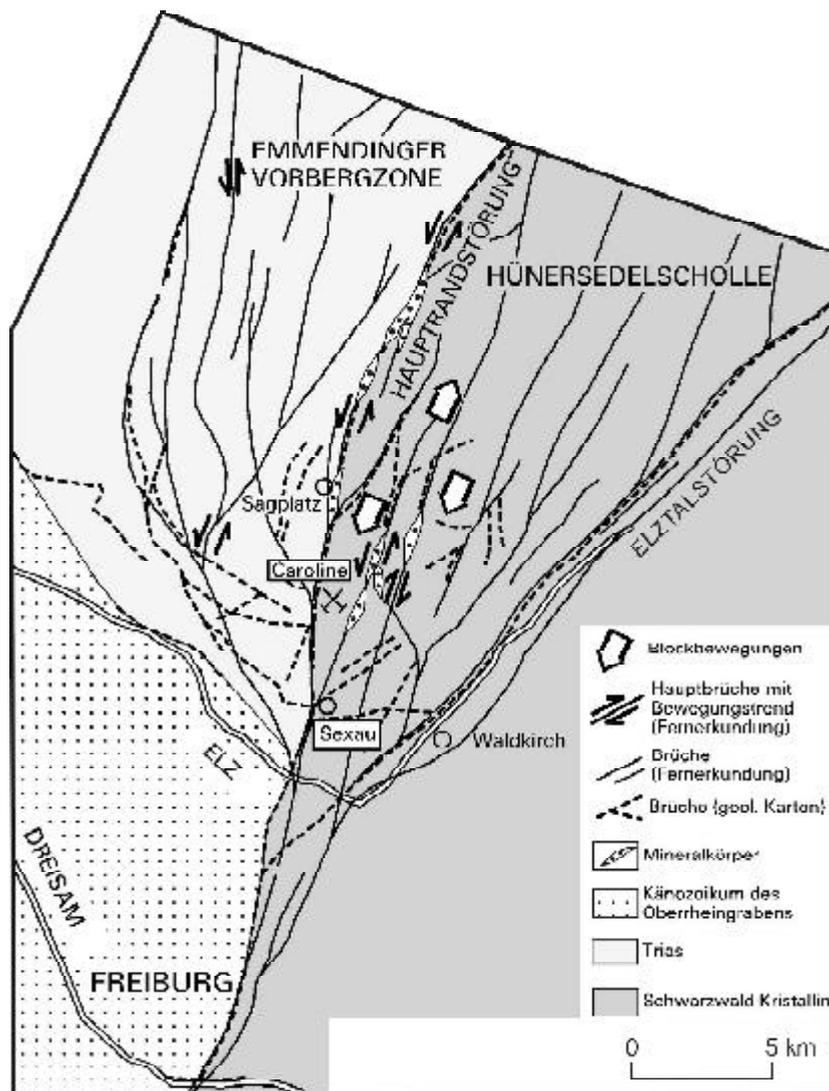


Abb. 10: Lineationskartierung des Grabenrands nördlich von Freiburg auf der Basis von Thematic Mapper-Aufnahmen

Aufspeen des Grabenrandes nach NNE und gegenläufige Blockbewegungen zwischen der Elztalstrung und der Emmendinger Vorbergzone (Mesozoikum), Erläuterung im Text.

NER & FRANZKE 1994). Die Polysulfidgänge mit Baryt und Karbonaten sitzen im vorderen bis mittleren Aufspießbereich der Haupttrandstörung des Oberrheingrabens auf und markieren die Zone des ehemals stärksten Fluidstaus im Tertiär (Gangmineralisation) und der nachfolgend intensivsten Mineralausscheidung. Die auf den Störungen fixierten Mineralisationen dokumentieren Bereiche von mehrphasig-pulsierenden („seismischen“) Strukturaktivierungen. Die zeitliche Auflösung der Gangtektonik in mehrere, mindestens vier Hauptereignisse war durch die Verknüpfung mit bodengestützten strukturellen Untersuchungen an mehreren Gangstrukturen des Zentral- und Südschwarzwalds möglich (WERNER & FRANZKE 2001).

Das progressive Aufspießen der Störungszone nach NE führte an den sich zerlappenden und schließlich nach Norden auslaufenden Reißspitzen zu abnehmender Migrationsfähigkeit für den Fluidtransfer und drastisch abnehmender struktureller Raumschaffung und Mineralisation. Diese Aussage ergibt sich nach der Komplettierung des Strukturmusters auf der Grundlage der Auswertung der Fernerkundungsdaten. Die kartierten horizontalen Komponenten der Bewegungsindikationen an den Gangstrukturen sind mit dem Einbruch des sich nach Westen absenkenden Grabens an sinistralen Schrägabschiebungen kompatibel.

Die jungtertiären bis rezenten („neotektonischen“) Bewegungstrends sind aufgrund der Herdflächenlösungen von Erdbeben (GREINER 1976, BAUMANN 1981, PRODEHL et al. 1995, STANGE in: WERNER & FRANZKE 2001) und weiterer struktureller Kriterien auf den SSW–NNE-Randstrukturen (verbreitet festzustellende subhorizontale sinistrale Gleitspuren auf SSW–NNE-Störungen) des Oberrheingrabens als linksdrehend-blattverschiebend einzuordnen. Sie reagieren damit sinistral-blattverschiebend auf das vom alpinen Orogen her einwirkende kompressive Streßregime. An einzelnen, offenbar blockierten („hängen gebliebenen“) Blocksegmenten sind auch rechtsdrehende Verschiebungen und deren relative Norddrift eingetreten.

Die NW–SE-Brüche des Schwarzwalds und seines Umfelds wurden demgegenüber schräg-kompressiv (= transpressiv) eingespannt. Dadurch bildeten sich rechtsdrehende Seitenverschiebungen bis kompressive Schrägverschiebungen (Beispiel Schumachersche Ruschel im Schauinsland, WERNER & FRANZKE 2001).

3.5 Gangmineralisation, Streßfeld und Fernerkundung

Die Richtungsverteilung der Mineralgänge zeigt Häufungen parallel zum Grabenrand (SSW–NNE bis SW–NE). Außerdem sind NW–SE bis WNW–ESE streichende Gänge und auch um Nord–Süd streichende Gänge entwickelt. Letztere sind an eine wegen geringer bis fehlender Störungsversätze in geologischen Karten bisher nicht enthaltene Bruchzone gebunden, die nach der Fernerkundung den Schwarzwald von Baden-Baden im Norden über Haslach bis über St. Blasien hinaus durchzieht und in der u. a. die Mineralgänge bei Wolfach und Haslach im Zentralschwarzwald und südlich von

St. Blasien aufsitzen (Abb. 3 und 5). NW–SE-Bruchzonen haben einen fiederigen Bau, dessen Bruchanordnung auf dominierend dextrale Bewegungstendenzen verweist, das Gefüge von SW–NE-Bruchzonen deutet auf linksdrehende Kinematik hin. Das wird auch für das Deckgebirge des Schwarzwaldumlands, so für das Gebiet von Heilbronn, beschrieben (BRUNNER & HINKELBEIN 2000).

Am Beispiel des Gebiets um den Schauinsland südlich von Freiburg (Abb. 8) kann man zeigen, daß die Kenntnisse über das Bruchmuster dieses Gebiets durch den Einsatz der Fernerkundung ergänzt werden können. Die östliche Grabenschulter des Oberrheingrabens stellt eine mehrere Kilometer breite Zone erhöhter Bruchzerlegung dar, die als linksdrehend nach Westen abtreppende Zone von Schrägabschiebungen ausgebildet ist und bis an die Gangstrukturen des Schauinslands heranreicht. Die durch bergmännische Auffahrungen bekannten Mineralgänge (WERNER et al. 2002) konzentrieren sich in Bereichen, die nach der Bruchinterpretation der Satellitenaufnahmen allseitig von nicht mineralisierten Störungen eingerahmt werden. Es handelt sich wahrscheinlich um hydraulische Fallensituationen, da die Brüche auch zum Hangenden hin (Deckgebirge) während der Mineralisation noch von der abdichtenden Barriere des später erodierten Deckgebirges abgedeckt waren. Innerhalb des Grundgebirges treten außerdem hydraulisch abdichtende, flach bis mittelsteil einfallende Scherzonen auf (lettige, sehr feinkörnige Kataklastite/Brekzien, im Bergbau als Ruscheln bezeichnet), die aus variszischen Scherzonen (Myloniten) durch spät- bis postvariszische Überprägungen hervorgegangen sind und der Gneisfoliation folgen. Auch sie können für die Hydrothermenzirkulation abdichtende Barrieren bilden. Die Mineralgänge stellen durch Mineralisation verheilte kleinere Brüche dar und sind trotz der späteren Freilegung durch Erosion auch wegen ihrer geringen Dimensionen und fehlender morphologischer Ausprägung (Ausnahme: Quarzriffe bei Badenweiler) für die Satellitenbildfernerkundung kaum zugänglich. Das trifft ebenso auf die mächtigeren permokarbonischen Magmatitgänge zu, die sich nur bei stärkerer morphologischer Ausprägung auffinden lassen. Die Dualität des Auftretens großer, miteinander in Verbindung stehender, aber selbst nicht mineralisierter Brüche (Satellitenbild-Lineationen) und mineralisierter Brüche (Mineral- und Magmatitgänge) kurzer Erstreckung liefert Anhaltspunkte, um zwischen Migrationszonen (alteriert, unmineralisiert) und Absatzstrukturen (Mineralgänge/Magmatitgänge) zu unterscheiden.

Nach den zahlreich vorliegenden paragenetischen Untersuchungen und den Altersdatierungen der Mineralisationen (HAGEDORN & LIPPOLT 1994) erfolgte die Mineralabscheidung tektonisch aufgegliedert in mehreren Phasen und über einen längeren Zeitraum verteilt zwischen der Obertrias und dem Jungtertiär. Das war der Zeitraum, in dem sich das Gebiet des Oberrheinischen Schildes aufwölbte und Bruchstrukturen verschiedener Richtungsgruppen durch die Wölbungsspannung etwa gleichzeitig und mechanisch „gleichberechtigt“ aufreißen konnten. Das Paläostreißfeld, ermittelt aus kinematischen Inkrementen der Mineralgänge (Lage der Scher- und Fiederflächenlagen, Gleitstriemung, Gesteinsschleppung, Mineralfiberwachstum), zeichnet diese Gewölbe-

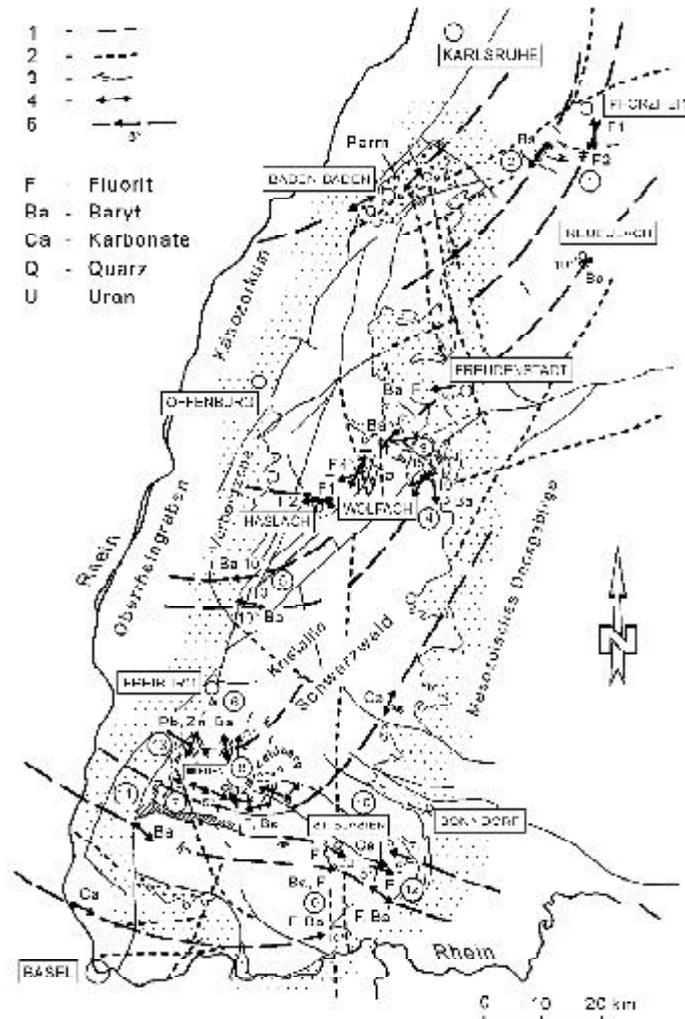


Abb. 11: Rekonstruktion des Paläostreißfelds im Bereich des Schwarzwalds für den jüngeren Anteil (Oberkreide/Tertiär) der hydrothermalen Gangmineralisation auf der Grundlage von internen Gefügeinkrementen der Gangstrukturen (ergänzt nach FRANZKE & WERNER 1994)

1 – Hauptbrüche nach geologischen Karten; 2 – Zusätzliche Brüche aus der Fernerkundung; 3 – Mineralgänge; 4 – Minimale Hauptnormalspannung subhorizontal; 5 – Geneigte minimale Hauptnormalspannungsachse

Untersuchte Lagerstätten und Gangreviere: ① Grube Käfersteige; ② Neuenburger Revier; ③ Grube Clara; ④ Revier Wittichen; ⑤ Revier Freiamt-Sexau; ⑥ Grube Schauinsland; ⑦ Grube Teufelsgrund; ⑧ Revier Wieden; ⑨ Grube Gottesehre; ⑩ Urangrube Menzenschwand; ⑪ Gänge in der westlichen Badenweiler-Lenzkirch-Zone; ⑫ Gänge bei Brenden; ⑬ Gänge bei St. Ulrich

bildung, deren Zentrum über dem (späteren) Oberrheingraben liegt, nach (Abb. 11). Im Gebiet um den Feldberghorst und den Albtalgraben sind fluktuierende Streßfelder anzunehmen, da sich die SW–NE-Strukturen (Schauinsland) und NW–E-Strukturen (St. Ulrich) alternierend oder etwa gleichzeitig öffnen konnten (WERNER & FRANZKE 2001). Durch die Verknüpfung der Kartierbefunde im Bergwerk Schauinsland mit Über-tagekartierungen (WITTENBRINK 1999) einschließlich der bruchorientierten Fernerkundungsauswertung konnte eine bessere Abstützung des tektonischen Modells der Gangbildung und vor allem eine bessere Einbindung der Gangstrukturen des Schwarzwalds in das regionale Bruchgitter erreicht werden.

4 Schlußfolgerungen

Fernerkundliche Untersuchungen auf der Basis von Satellitenbilddaten können geeignet sein, flankierende Unterstützung zu strukturgeologischen Felduntersuchungen zu geben, besonders hinsichtlich der Komplettierung des regionalen Bruchgitters. Unter den von starker Vegetation und Bodenbedeckung geprägten Bedingungen des Schwarzwalds ist es aber nur punktuell möglich, aus der Fernerkundung heraus Aussagen zum Bewegungsstil von Bruchstrukturen und zur Erfassung kleinerer Strukturen, wie z. B. von Mineralgängen, zu machen. Die teilweise fehlende Detailerkennbarkeit läßt sich jedoch etwas ausgleichen durch die Bearbeitung von gut aufgeschlossenen Arealen, wie z. B. den durch Bergwerke gut erschlossenen alten Gangrevieren auf der Ostschulter des Oberrheingrabens. Fernerkundungsdaten können strukturgeologische Geländearbeiten durch ihre andere Betrachtungsdimension und ihren Integrationseffekt sinnvoll ergänzen und dazu beitragen, die Daten aus einzelnen Geländeaufschlüssen in einen größeren tektonischen Rahmen zu stellen.

Literatur

- BANKWITZ, P. & BANKWITZ, E. (2000): Granitklüftung – Kenntnisstand 80 Jahre nach HANS CLOOS. – *Z. geol. Wiss.*, **28** (1) : 87–110, 12 Abb.; Berlin.
- BAUMANN, H. (1981): Regional stress field and rifting in Western Europe. – In: ILLIES, J. H. [Hrsg.]: Mechanism of graben formation. – *Tectonophysics*, **73** (1): 105–111, 4 Abb.; Amsterdam.
- BERGER, Z. (1994): Satellite hydrocarbon exploration. – 319 S., 97 Abb.; Berlin (Springer).
- BRUNNER, H. & HINKELBEIN, K. (2000): Erläuterungen zum Blatt Heilbronn und Umgebung. – *Geol. Kt. Baden-Württ.* 1 : 50 000: 292 S., 68 Abb., 6 Tab., 11 Beil.; Freiburg i. Br. (L.-Amt Geol., Rohst. u. Bergb. Baden-Württ.).
- EISBACHER, G. H., LÜSCHEN, E. & WICKERT, F. (1989): Crustal-scale thrusting and extension in the Hercynian Schwarzwald and Vosges, Central Europe. – *Tectonics*, **8** (1): 1–21, 7 Abb.; Washington, D. C.
- FRANZKE, H. J. & WERNER, W. (1994): Wie beeinflusste die Tektonik des Kristallins und des Rheingrabens die hydrothermale Mineralisation der Gangstrukturen des Schwarzwaldes? – *Geol. L.-Amt Baden-Württ., Abh.*, **14**: 99–118, 9 Abb.; Freiburg i. Br.

- FRANZKE, H. J., WETZEL, H.-U. & WERNER, W. (2000): Das Strukturmuster des Schwarzwaldes aus der Sicht bruchtektonisch interpretierter TM- und ERS-1-Daten. – Publ. dt. Ges. Photogr. u. Fernerkdg., **8**: 481–493, 6 Abb.; Berlin.
- GEYER, O. F. & GWINNER, M. P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. – 4. Aufl., 482 S., 244 Abb.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GREINER, G. (1976): In situ-Spannungsmessungen und tektonischer Beanspruchungsplan in Südwestdeutschland. – Geol. Rdsch., **65** (1): 55–65, 5 Abb.; Stuttgart.
- HAGEDORN, B. & LIPPOLT, H. J. (1994): Rb-Sr- und K-Ar-Isotopen-geochemische Untersuchungen an Tonpräparaten der Ruschelzonen der Grube Caroline. – Geol. L.-Amt Baden-Württ., Abh., **14**: 205–219, 5 Abb., 3 Tab.; Freiburg i. Br.
- HANN, H. P. & SAWATZKI, G. (1998): Deckenbau und Sedimentationsalter im Grundgebirge des Südschwarzwalds/SW-Deutschland. – Z. dt. geol. Ges., **149** (1): 183–195, 5 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- HÜTTNER, R. (1991): Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens – Ein Überblick mit historischer Rückschau. – Geol. Jb., **E 48**: 17–42, 10 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- ILLIES, H. (1965): Bauplan und Baugeschichte des Oberrheingrabens. – Oberrhein. geol. Abh., **14**: 1–54, 26 Abb.; Karlsruhe.
- JOPPE, C. (1998): Möglichkeiten und Grenzen digitaler Bildverarbeitung zur Erkennung geologischer Lineationen. – Profil, **14**: 75–150, 42 Abb., 29 Tab.; Stuttgart.
- KALT, A., GRAUERT, B., SCHLEICHER, H. & KRAMM, U. (1994): Petrology and geochronology of eclogites from the Variscan Schwarzwald (F. R. G.). – Contrib. Mineral. Petrol., **115** (4): 287–302, 4 Abb., 6 Tab.; Stuttgart.
- KESSLER, G. & LEIBER, J. (1991): Erläuterungen zu Blatt 7813 Emmendingen. – Geol. Karte Baden-Württ. 1 : 25 000: 155 S., 13 Abb., 3 Taf., 2 Beil.; Stuttgart (2. Aufl.).
- KROHE, A. & EISBACHER, G. (1988): Oblique crustal detachment in the Variscan Schwarzwald, southwestern Germany. – Geol. Rdsch., **77** (1): 25–43, 11 Abb.; Stuttgart.
- LOESCHKE, J., GÜLDENPFENNIG, M., HANN, H. P. & SAWATZKI, G. (1998): Die Zone von Badenweiler–Lenzkirch (Schwarzwald): Eine variskische Suturzone. – Z. dt. geol. Ges., **149** (1): 197–212, 4 Abb.; Stuttgart.
- PRODEHL, C., MUELLER, S. & HAAK, V. (1995): The Rhinegraben. – In: OLSEN, K. H. [Hrsg.]: Continental rifts: evolution, structure, tectonics. – Developments in Geotectonics, **25**: 155–173, 8 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- SABINS, F. F. (1987): Remote sensing – principles and interpretation. – 449 S., 136 Abb.; New York (Freeman & Co.).
- SCHREINER, A. (1991): Geologie und Landschaft. – Ber. naturforsch. Ges. Freiburg i. Br., **81**: 11–24, 6 Abb.; Freiburg i. Br.
- SCHWEIZER, R. (1992): Höhenänderungen von Nivellementpunkten im südlichen Oberrheingraben. – Schr. angew. Geol. Karlsruhe, **16**: 1–188; Karlsruhe.
- TRUNKO, L. (1998): Der spätere Rheingraben als permotriassische Schwelle. – Z. dt. geol. Ges., **149** (1): 71–80, 2 Abb.; Stuttgart.
- VILLINGER, E. (1999): Freiburg im Breisgau – Geologie und Stadtgeschichte. – L.-Amt Geol., Rohst. u. Bergb. Baden-Württ., Informationen, **12**: 60 S., 28 Abb., 2 Tab., 2 Beil.; Freiburg i. Br.
- WERNER, W. & FRANZKE, H. J. (1994): Tektonik und Mineralisation der Hydrothermalgänge am Schwarzwaldrand im Bergbaurevier Freiamt–Sexau. – Geol. L.-Amt Baden-Württ., Abh., **14**: 27–98, 22 Abb., 1 Tab., 3 Taf.; Freiburg i. Br.

- WERNER, W. & FRANZKE, H. J. (2001): Die postvariszische bis neogene Bruchtektonik und Mineralisation im südlichen Zentralschwarzwald. – Z. dt. geol. Ges., **152** (2–4): 405–437, 12 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- , FRANZKE, H. J., WIRSING, G., JOCHUM, J., LÜDERS, V. & WITTENBRINK, J. (2002), mit einem Beitrag von STEIBER, B.: Die Erzlagerstätte Schauinsland bei Freiburg im Breisgau. Bergbau, Geologie, Hydrogeologie, Mineralogie, Geochemie, Tektonik und Lagerstättenentstehung. – Ber. naturforsch. Ges. Freiburg, **92**: 110 S., 26 Abb., 9 Tab., 16 Taf.; Freiburg i. Br.
- , GIEB, J. & LEIBER, J. (1995): Zum Aufbau pleistozäner Kies- und Sandablagerungen des Oberrheingrabens. – Ergebnisse rohstoffgeologischer Untersuchungen im Raum Lichtenau–Karlsruhe–Waghäusel. – Geol. L.-Amt Baden-Württ., Jh., **35**: 361–394, 9 Abb.; Freiburg i. Br.
- WICKERT, F., ALTHERR, R. & DEUTSCH, M. (1990): Polyphase Variscan tectonics and metamorphism along a segment of the Saxothuringian-Moldanubian boundary. – Geol. Rdsch., **79** (4): 627–647, 10 Abb.; Stuttgart.
- WITTENBRINK, J. (1999): Petrographische und tektonische Kartierung des Zentralschwarzwälder Gneiskomplexes im Bereich der Blei-Zink-Lagerstätte Schauinsland bei Freiburg im Breisgau/Schwarzwald. – Dipl. Arb., TU Clausthal, Inst. Geol. u. Paläont.: 166 S.; 68 Abb., 4 Anl.; Clausthal-Zellerfeld. – [unveröff.]

Manuskript eingegangen am 25. April 2001