

Erfassung der strukturgeologischen Situation im nord-westlichen Bodenseegebiet mit Satellitenradaraufnahmen

Ein Beitrag zu Bestandsaufnahme der Tektonik im Bereich der Aach-Quelle

VON BARBARA THEILEN-WILLIGE

1. Einführung

Vor dem Hintergrund der enormen Bedeutung des Bodensees als Trinkwasserreservoir ist die Erfassung und Überwachung seiner morphologischen und hydrogeologischen Einzugsgebiete eine dringende Notwendigkeit.

Schwierig wird die Erfassung der Wassereinzugsgebiete dann, wenn es sich um Gebiete mit anstehenden Kalkgesteinen größerer Mächtigkeit handelt wie z. B. im Nordwesten des Bodensees. Die in den Bodensee mündenden Flüsse wie die Radolfzeller Aach und Stockacher Aach beziehen ihr Wasser aus Liefergebieten, deren geologischer Aufbau durch jurassische Kalkgesteine gekennzeichnet ist. Der in diesen Gebieten fallende Niederschlag sowie auch die Wasserläufe versickern relativ rasch in den klüftigen Juragesteinen. Mit der hydrogeologischen Situation der jurassischen Gesteine sind Trockentäler, Dolinen und andere Erscheinungsformen der Verkarstung verbunden. Einen Überblick über Porengrundwasser, Karstgrundwasser und Kluftgrundwasservorkommen sowie die Schichtmächtigkeiten im Bodenseegebiet vermittelt Abb. 1.

In den massiven Kalkgesteinen des Oberen Jura hängt die Wasserwegsamkeit sehr stark von größeren, miteinander verbundenen Rissen, Spalten, Klüften, Kanälen und Kavernen ab. Die unterirdischen Karstwasserläufe folgen in ihrem Verlauf in der Regel Bruch- und Störungszonen. Häufig bilden Schichtflächen (Bankung) und tektonische Trennflächen (Klüfte) Leitlinien für Höhlensysteme. Schlucklöcher und Dolinen sind teilweise entlang von Störungen aufgereiht, größere Hohlräume oft entlang vertikaler Störungen zu finden.

Abb. 2 und 3 zeigen Aufnahmen von Dolinen und geradlinigen Tälern, deren Anlage und Form durch das Kluftnetz im Untergrund geprägt wurde, nördlich der Stadt Aach (Die Lage der Dolinen ist in Abb. 13 b gekennzeichnet.).

Kluft- und Karstwasserergiebigkeiten schwanken je nach lithologischer und struktur-geologischer Situation. Entscheidend für die Erfassung des Karstwasserspeichers ist die Lage, räumliche Verteilung und Größe der wasserwegsamten Hohlräume. Die Aufnahme und Erkundung der tektonischen Struktur dieses Karstgebietes ist daher eine wichtige Voraussetzung, um ein möglichst detailliertes Bild über den Verlauf der Karstquellen und ihrer Liefergebiete zu bekommen. Derartige Kenntnisse sind auch für die Überwachung der Wasserqualität wichtig. Bei

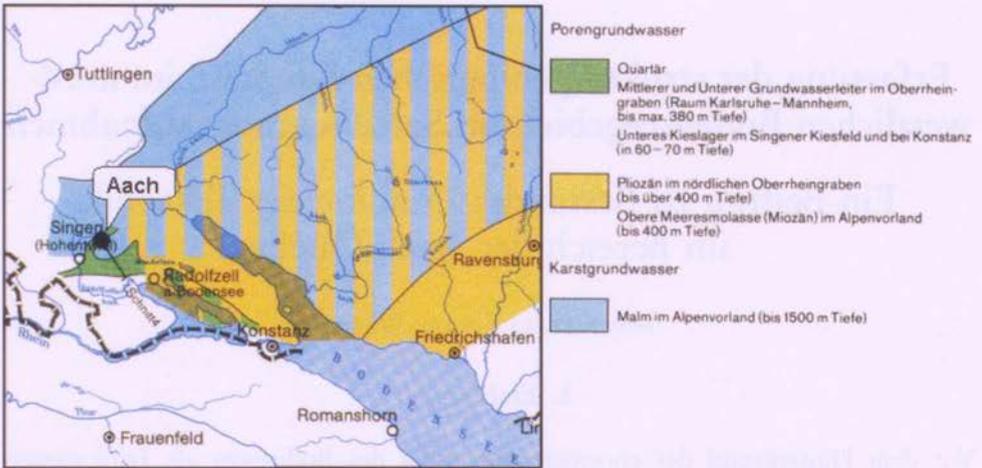


Abb. 1 Ausschnitt aus der hydrogeologischen Karte von Baden-Württemberg Grundwasserlandschaften, 5. Karte der Tiefen-Grundwässer i. e. S. und der kurzfristigen tiefen Grundwässer nach Geologisches Landesamt Baden-Württemberg/Freiburg (1985, Maßstab ca. 1 : 600 000)

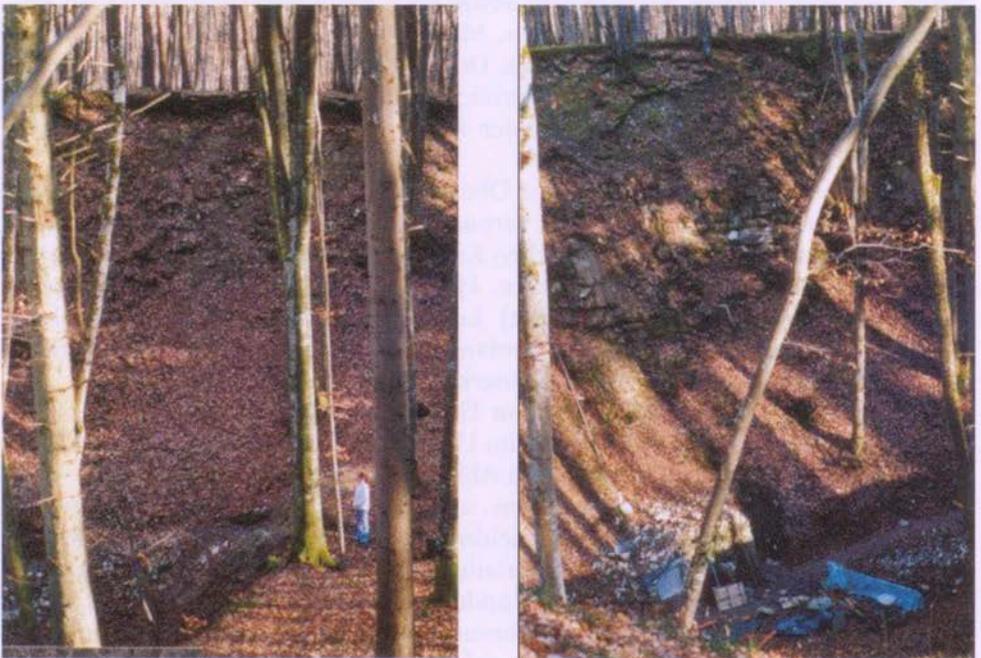
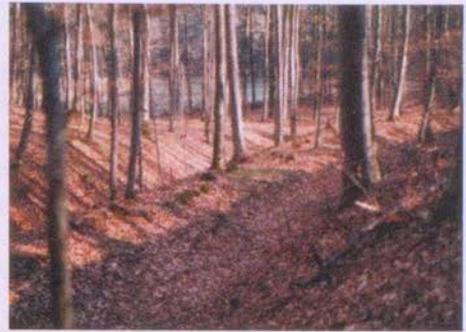


Abb. 2 Doline nördlich der Stadt Aach



Trockental nördlich der Stadt Aach



Geradliniges Trockental nordöstlich von Aach



Abb. 3 Geradlinige, durch Bruchzonen im Untergrund vorgezeichnete Täler

eventuellen stärkeren Verunreinigungen im Wasser können deren Ursprung bei ungefährem Kenntnis der Fließwege schneller ermittelt werden.

Zahlreichen Karstquellen konnte bereits ihr Wassereinzugsgebiet durch Färberversuche des Wassers ungefähr zugeordnet werden. So wurde z. B. auf diese Weise das Einzugsgebiet der Radolfzeller-Aach-Quelle eingegrenzt (SCHREINER, 1979). Die Aach-Quelle bei Aach ist mit bis zu $24,8 \text{ m}^3$ eine der schüttungsreichsten Karstquellen Deutschlands (SCHREINER, 1992).

Abb. 4 zeigt die bei Wassermarkierungsversuchen festgestellten Fließwege von Karstwasser im nordwestlichen Bodenseegebiet, wobei die Linien die Luftlinien zwischen den Eingabe- und Austrittsstellen darstellen. Die tatsächlichen Wege des Karstwassers weichen davon ab (SCHREINER, 1979).

Das Wasser fließt aus einem weit verzweigten System von Spalten und gangförmigen Höhlen aus einem über 200 km^2 großen Einzugsgebiet zur Aach-Quelle. Der Verlauf der Höhlen und Bruchzonen, durch die der Aach-Quelle Wasser zugeführt werden, ist noch nicht im Detail bekannt. Es handelt sich um ein System von Spalten und gangförmigen Höhlen, die auch durch senkrechte Schächte Wasser aus verschiedenen Karstwasser-Stockwerken und versickertes Oberflächenwasser aufnehmen (Abb. 5). Die wasserführenden Schichten des Oberen Jura fallen nach Südosten ein. Nach SCHREINER (1992, S. 177) spielen bei der Entwicklung des Karstwassergerinnes Nordwest-Südost-orientierte Störungen eine bedeutende Rol-

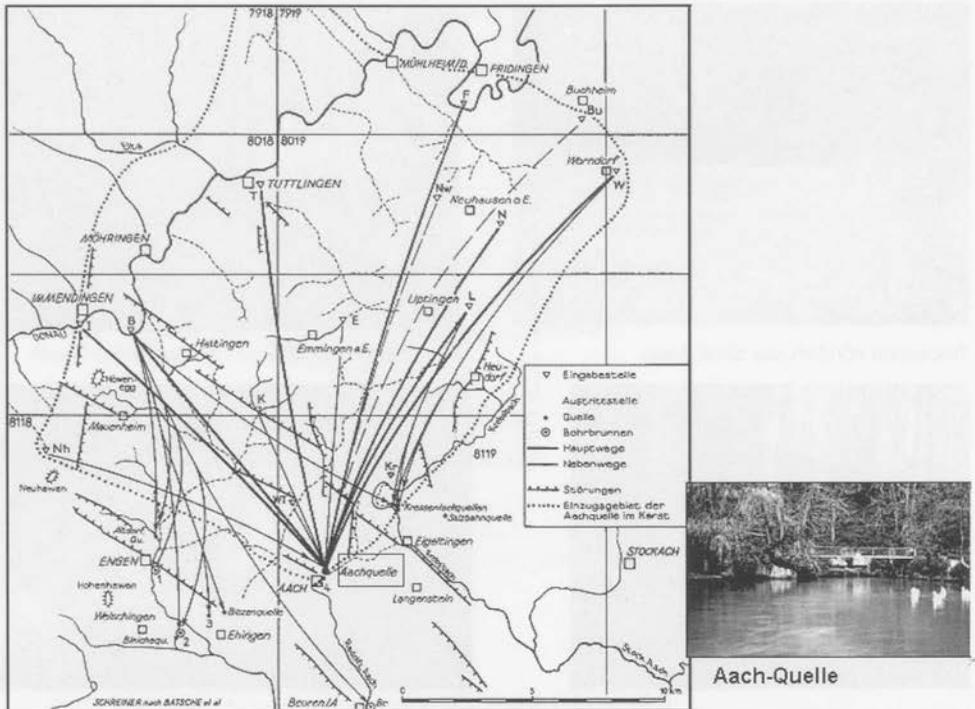


Abb. 4 Markierungsversuche im Donau-Aach-Gebiet zur Erfassung des Wassereinzugsgebietes der Aach-Quelle nach SCHREINER (1979)

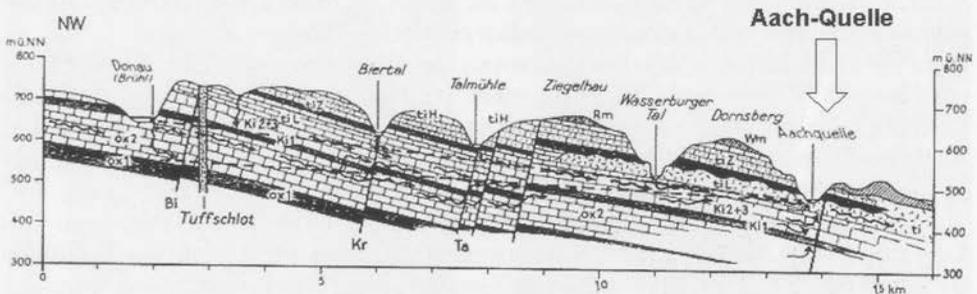


Abb. 5 Geologischer Querschnitt von der Donauversickerung zum Aach-Quelle nach SCHREINER (1992, S. 178), tiZ – Mergel, tiL – Massenkalk des Oberen Jura
 Auffällig ist der Einfluss der Tektonik auf die Wasserführung. Mit Lehm und Verwitterungsschutt gefüllte Verwerfungen bewirken eine Änderung der Wasserführung und -wege.

le. Die Versätze der Gesteinsschichten entlang der Verwerfungen sowie das dort vorhandene Verwitterungsmaterial beeinflussen und verändern die Wasserführung. Offensichtlich hat der Verlauf der NW-SE-orientierten Verwerfungen bei Aach einen Einfluss auf die Entstehung der Quellen. Das Karstwasser dringt entlang der Verwerfungszone bei Aach an die Oberfläche.

Die Aach-Quelle selbst bildet einen kleinen See. Das Wasser steigt von unten aus einer Quellschale auf. Über dem Wasserspiegel der Quelle sind in einem Bankkalk-Komplex zwei Nord-Süd verlaufende, bis 1 m breit ausgeweitete Spalten sichtbar, die sich nach unten fortsetzen (SCHREINER, 1992). Neben dem Aachtopf selbst gibt es noch 11 weitere kleine Quellen, die sich unterhalb im Fluss- und im Uferbereich befinden. Aus der kurzen Durchflusszeit, der Temperaturkonstanz und der geringen Klärung des Wassers wird geschlossen, dass es gut ausgebildete Hohlräume durchflossen haben muss.

Die Aach mündet nach einem relativ kurzen Lauf (32 km) durch den Hegau in den Bodensee.

Im Laufe dieser Untersuchungen wird geprüft, inwieweit Methoden der Fernerkundung einen Beitrag zur Erfassung von Bruch- und Verwerfungszonen im Gebiet der Aach-Quelle liefern können und damit auch von wasserwegsamem Kluftzonen. Dazu ist zum besseren Verständnis zunächst eine kurze Übersicht über die strukturgeologische Situation des nordwestlichen Bodenseegebietes erforderlich.

2. Übersicht über die strukturgeologische und hydrogeologische Ausgangssituation im Bodenseegebiet

Der Untergrund des nordwestlichen Bodenseegebietes hat seine Prägung wesentlich während der variszischen Orogenese (Karbon/ Perm) erhalten. Das »Streifenmuster« dieser tektonischen Phase quert auch das Bodenseegebiet in SW-NE-Richtung (CARLE, 1975). Eine weitere Verformung erfuhr dieser Raum bei der Gebirgsbildung und der Entstehung der rheinischen Gräben während des Tertiärs (SCHNEIDER, 1993). Für das Alter der tektonischen Strukturen wird die Zeit der beginnenden Heraushebung des Alpenvorlandes angenommen. Ein großer Teil der Bewegungen dürfte in das Mittel- bis Obermiozän fallen, ein weiterer Teil ins Pliozän bis Quartär (PAVONI, 1987, SCHREINER, 1992).

Ein Teil der NW-SE streichenden Bruchsysteme gehört dem Störungssystem »Freiburg-Bonndorf-Bodensee« an, das sich in NW-SE-Richtung (vom Bodensee im Südosten über den Schwarzwald bis zum Rheingraben im NW nachweisen lässt (CARLE, 1955, GEYER & GWINNER, 1991). Diese zahlreichen, parallel zueinander verlaufenden, NW-SE streichenden Bruchsysteme haben sich auch auf die Reliefentstehung entscheidend ausgewirkt. Die Konturen des Bodensees, des Bodanrücks, sowie der Verlauf der Hügelketten und Talzüge wurde vor allem im nordwestlichen Bodenseegebiet durch diese Bruchsysteme vorgezeichnet. Dass Schwächezonen im Untergrund die Reliefentwicklung im nordwestlichen Bodenseegebiet geprägt haben, verdeutlicht die auf der Basis des digitalen Geländemodells erstellte simulierte Reliefdarstellung (Abb. 6). Diese simulierte Reliefdarstellung vom nordwestlichen Bodenseegebiet auf der Basis der digitalen Höhendaten 1:50 000 (Landesvermessungsamt B.-W., Stuttgart) veranschaulicht die Reliefsituation im nordwestlichen Bodenseegebiet:

Auf der Reliefdarstellung sind lineare Reliefelemente wie geradlinige Talverläufe, vor allem SW-NE- und NW-SE-orientierte Talsegmente, eindeutig erkennbar

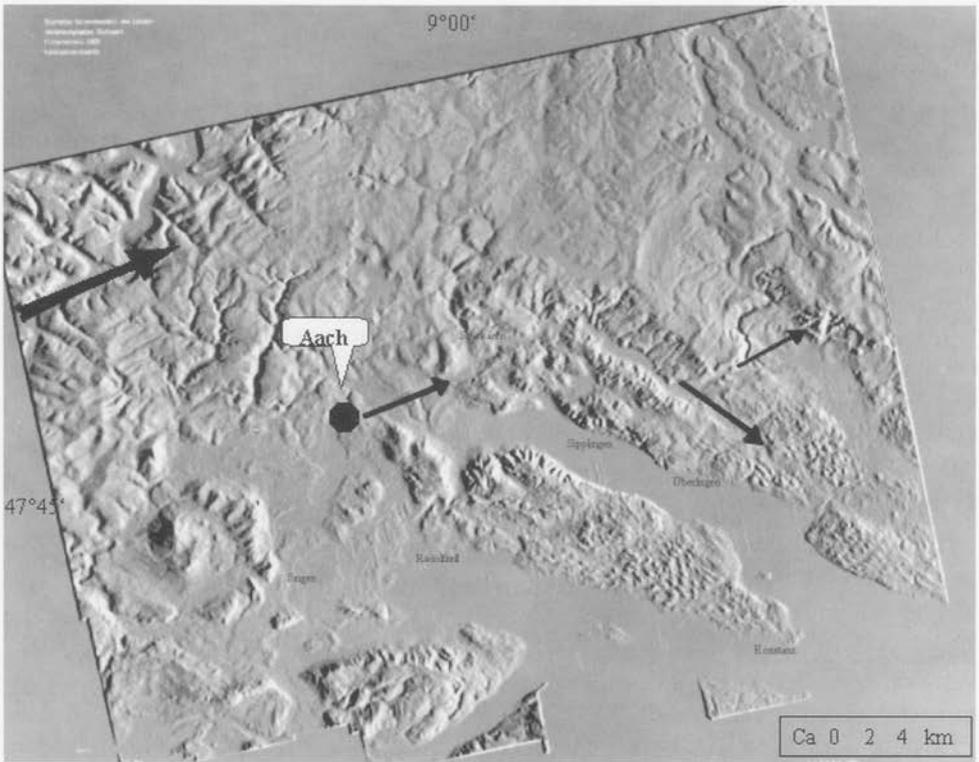


Abb. 6 Reliefdarstellung auf der Basis des Digitalen Geländemodells

(TK 50, Landesvermessungsamt Stuttgart, Erstellung des Bildproduktes durch C. König/BVBK, Dießen, Ergänzungen durch B. THEILEN-WILLIGE)

und lassen sich zum Teil über den gesamten Kartenbereich verfolgen. Einige markante lineare Talverläufe sind durch Pfeile markiert (Abb. 6). Aus der parallelen und winkligen Anordnung des Entwässerungsnetzes, von Höhenrücken und Steilhängen lässt sich schließen, dass Störungen und Bruchzonen im Untergrund als Leitlinien für Erosionsvorgänge dienten. Viele dieser linearen Talverläufe lassen sich lagemäßig mit bekannten Störungszonen im Untergrund korrelieren. Der strukturgeologische Bauplan dieses Gebietes wurde seit dem Tertiär maßgeblich durch Hebungsprozesse geprägt: Als Folge der Hebung dieses Gebietes kam es zu charakteristischen Formen der Extensionstektonik mit zahlreichen Abschiebungen. Durch strukturgeologische Untersuchungen sowie Auswertungen von Bohrungen ist eine »Bruchschollen-Tektonik« entlang von häufig steil einfallenden Störungszonen mit dafür charakteristischen Horsten und Gräben belegt (SCHREINER, 1968, Abb. 7).

Immer wieder wurde eine tektonische Anlage des Bodenseebeckens als Graben diskutiert (z. B. SCHMIDLE, 1936). Nach SCHREINER (1968, 1975) sind im Bereich des Überlinger Sees jedoch keine größeren Absenkungsbeträge (bis zu 50 m) der tiefer

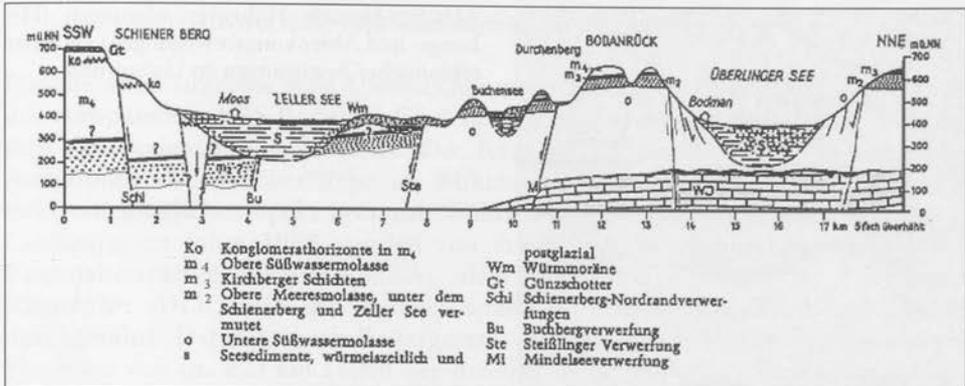


Abb. 7 Strukturelles Profil vom westlichen Bodenseegebiet zur Veranschaulichung der Bruchschollentektonik nach SCHREINER (1975, S. 63)



Abb. 8 Perspektivische Ansicht einer LANDSAT-TM Aufnahme vom Gebiet der Überlinger See-Randstörung

Überlagerung der LANDSAT TM-2-Aufnahme mit dem Digitalen Höhenmodell (BVBK, Dießen, 1998)

gerutschten Schollen erfasst worden, sodass eine tieferreichende Grabenbildung hier nicht nachweisbar ist. Das geologische Querprofil (Abb. 7) zeigt deutlich die Existenz einer sich entwickelnden Grabensituation. Das Überlinger See-Becken setzt sich nach Nordwesten bis in das Untersuchungsgebiet um das Einzugsgebiet der



Abb. 9 Aktuelle Höhenveränderungen (Hebungs- und Absenkungsbewegungen) als Folge tektonischer Bewegungen im Untergrund

Quelle: MÄLZER, H. et al. (1988): Höhenänderungen der Nordschweiz und im Südschwarzwald bis zum Bodensee – NAGRA Technischer Bericht 88-05, CH-Baden

Aach-Quelle fort. Dies veranschaulicht die perspektivische Ansicht einer LAND-SAT TM-Satellitenaufnahme dieses Gebietes (Abb. 8).

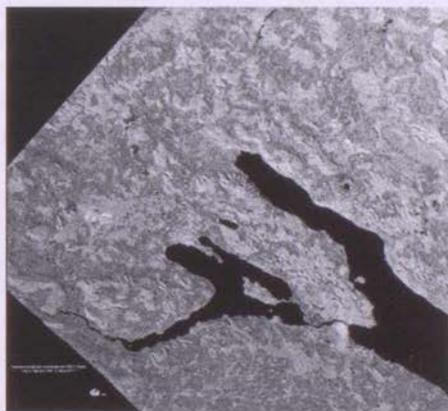
Hebungs- und Absenkungsbewegungen im Bodenseegebiet dauerten mit lokal und zeitlich wechselnder Intensität über längere geologische Zeiträume an. Noch anhaltende Bewegungen im Untergrund, die durch geodätische Feinnivellements nachgewiesen wurden, wirken sich je nach den regionalen Gegebenheiten auch auf die Fließbewegungen im Grund- und Karstwasser aus. Das Untersuchungsgebiet befindet sich in einem Übergangsbereich zwischen negativen und positiven Höhenänderungen (MÄLZER et al., 1988, Abb. 9). Im nordwestlichen Bodenseegebiet erreichen die negativen Absenkungsgeschwindigkeiten in Tuttlingen und Lipzingen (Lage der Orte, siehe Abb. 4) ihr absolutes Maximum von über 0,7 mm/a. Dort sind Höhenveränderungen bis zu $-0,7$ mm/Jahr feststellbar (MÄLZER et al. 1988). Südlich von Stockach deuten die Bewegungsraten wiederum mit 0,1–0,2 mm/a eine positive Tendenz an, die sich entlang des Gnadensees und der Mainau bis nach Konstanz fortsetzt. Im Wassereinzugsgebiet der Aach-Quelle sind nach diesen Ergebnissen lokal negative Höhenveränderungen vorherrschend, die sich offenbar auf die Karstwasserergiebigkeit auswirken. Zumindest sind die anhaltenden Höhenveränderungen ein Hinweis auf tektonische Bewegungen in diesem Gebiet ebenso wie die zahlreichen kleineren und mittleren Erdbeben.

Das folgende Kapitel befasst sich nun mit dem Beitrag strukturgeologischer Auswertungen von Satellitenradaraufnahmen zur Erfassung der Bruchtektonik dieses Gebietes, um Hinweise auf karsthydrologisch relevante Bruchzonen und damit auf den Verlauf von Fließwegen zu erhalten.

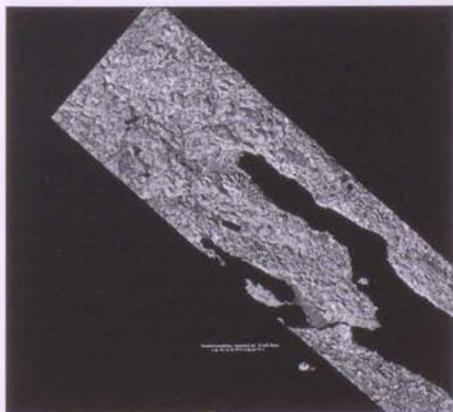
3. Auswertung von Satellitenradararbeiten der Karstgebiete

Für die struktureologische Untersuchungen wurden Satelliten-Radaraufnahmen des europäischen ERS-Radarsatelliten herangezogen, der seit 1991 auch Aufnahmen des Bodenseegebietes liefert. Der Radarsatellit zeichnet aus 785 km Höhe Aufnahmen der Erdoberfläche im Mikrowellenbereich (C-Band, 5,3 GHz) des elektromagnetischen Spektrums auf. Während der Shuttle Imaging Radar (SIR) – C-Mission im Jahre 1994 wurden von der NASA, der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Agenzia Spaziale Italiana (ASI) Radarexperimente durchgeführt. Dabei nahmen Radargeräte aus dem Space Shuttle heraus in einer Flughöhe von ca. 225 km Daten der Erdoberfläche mit unterschiedlichen Radarfrequenzen (X-, C- und L-Band, d.h. bei Wellenlängen von 3 cm, 6 cm und 24 cm) und Polarisationen sowie Einfallswinkeln auf. Abb. 10 zeigt zwei dieser Radaraufnahmen, die im C-Band und X-Band aufgenommen wurden.

Mit der Verfügbarkeit dieser Daten ergab sich die Möglichkeit, Radaraufnahmen des Bodenseegebietes geologisch auszuwerten. Die Radardaten wurden mit Hilfe des ArcView-GIS 3.2.-Programms (Fa. ESRI, Kranzberg), einem Geographi-



Satellitenradaraufnahme im C-Band (2.10.1994)



Satellitenradaraufnahme im kurzwelligen X-Band (10.4.1994)

Abb. 10 Shuttle Imaging Radaraufnahmen (SIR-C-CHV und X-SAR) des Bodenseegebietes

schen Informationssystem, bearbeitet. Im Folgenden wird nun untersucht, ob die Kartierung linearer Bildelemente auf Satellitenradaraufnahmen (Lineationskartierungen) zur verbesserten Kenntnis von hydrogeologisch relevanten Bruchzonen und Verwerfungen beitragen können. Zum besseren Verständnis der Arbeiten werden noch einige Hintergrundinformationen zur Methodik der Lineationskartierung gegeben.

3.1. Methodik der Lineationskartierungen

Die Kartierung linearer Bildelemente auf Flugzeug- und Satellitenaufnahmen bildet inzwischen ein wichtiges und erprobtes Hilfsmittel bei strukturgeologischen Bestandsaufnahmen. Seit über 30 Jahren liegen Erfahrungen über die Beziehungen zwischen linearen Bildelementen, den sog. Lineationen, auf Satelliten- und Flugzeugaufnahmen mit geologischen Geländebefunden vor, die in vielen Fällen eindeutige Zusammenhänge belegen (GUPTA, 1991). So lassen sich z. B. Zusammenhänge zwischen der Lage und Orientierung von Bruchzonen bzw. einzelnen Störungen und dem Verlauf von Lineationen auf Satellitenbildern erkennen. Die wesentliche Bedeutung der mit Satellitendaten durchgeführten Lineationskartierungen wird in der übersichtsartigen Erfassung regionaler und überregionaler Bruchzonen gesehen, die sich im Gelände, wenn überhaupt, nur durch aufwendige kluft- und störungstektonische Bestandsaufnahmen ermitteln lassen.

Die visuelle Interpretation von Radarbildern nimmt eine Sonderstellung ein, da Radarbilder nicht den allgemeinen menschlichen Sehgewohnheiten und Erfahrungen entsprechen. Die den Bildaufbau bestimmende Rückstreuung der Mikrowellen folgt anderen Gesetzmäßigkeiten als die gerichtete Reflexion der Sonnen- und Himmelsstrahlung (HILDEBRANDT, 1996). Abb. 11 gibt eine kurze Übersicht über die wichtigsten Hintergrundinformationen, die bei der Auswertung von Radarbildern berücksichtigt werden sollten:

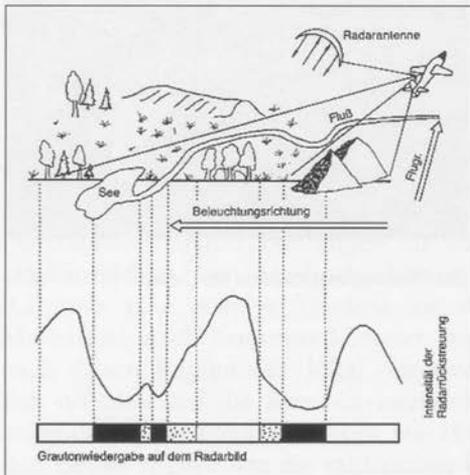


Abb. 11 Abhängigkeit der Geländewiedergabe auf dem Radarbild von der Beleuchtungsgeometrie nach SABINS (1978) und BÄHR (1985)

Von einem Satelliten- oder Flugzeug-Radarsystem werden Mikrowellen entlang des Flugweges nach unten ausgesendet und der nach Streuung und Reflexion an der Erdoberfläche zurückkehrende Echoanteil dieser Signale gemessen und zur Bilderzeugung gespeichert. Die Beleuchtungsrichtung, d. h. die Orientierung der Radarantenne zur Geländeoberfläche ist wesentlich für deren Wiedergabe auf dem Radarbild (Abb. 11). So rufen morphologische Erhebungen an der zur Antenne gewandten Seite eine relativ star-

ke Reflexion der Radarsignale hervor, was sich an sehr hellen Grautönen auf dem Radarbild zeigt. Die von der Antenne abgewandte Seite liegt im Radarschatten und erscheint dementsprechend dunkel auf dem Radarbild (THEILEN-WILLIGE, 1989, 1993, HILDEBRANDT, 1996). Lineare Bildelemente, die parallel zur Beleuchtungsrichtung verlaufen, sind im allgemeinen nur schwer erkennbar, während senkrecht zur Beleuchtungsrichtung orientierte Lineationen oft akzentuiert hervortreten.

Die Ursachen für das Erscheinen von linearen Bildelementen sind sehr komplex: Bei den auf den Satellitenaufnahmen/Flugzeugaufnahmen sichtbaren Lineationen lassen sich am deutlichsten **geomorphologische Lineationen** erkennen. Morphologisch bedingte Lineationen sind durch geradlinige Talverläufe, Bruchstufen, Geländekanten, linear angeordnete Bergkämme und Hügelketten erkennbar (Abb. 12 a). Im westlichen Bodenseegebiet sind morphologische Lineationen deutlich ausgeprägt. Im Bereich der SE-NW-streichenden Überlinger See-Randstörung weist der geradlinige Verlauf des Höhenrückens sowie das Tal- und Gewässernetz auf Schwächezonen im Untergrund hin.

Am deutlichsten sind Gewässernetzlineationen kartierbar. Sie zeichnen sich durch lineare und oft gleichmäßig winkelige Anordnung bzw. Orientierung des Entwässerungsnetzes ab.

Grauton-Lineationen können durch selektiv erhöhte/reduzierte Durchfeuchtung im Bereich von Bruch- und Störungszonen hervorgerufen werden. Die Interpretation von derartigen Lineationen ist in einem vergleichsweise dicht besiedelten Gebiet jedoch schwierig. Nur allzu oft sind Grautonlineationen auf Feldergrenzen, Feldwege, etc. zurückzuführen, sodass die Gefahr von Fehlinterpretationen groß ist. Am Beispiel eines stark vergrößerten Ausschnittes aus der X-SAR-Aufnahme vom 10. 4. 1994 aus dem Gebiet westlich von Wahlwies (ca. 1:50 000) werden morphologische Lineationen und Grautonlineationen gezeigt (Abb. 12 a und b). Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahme-Systemparameter und Beleuchtungsgeometrie der Radaraufnahmen ergibt sich eine unterschiedliche Erkennbarkeit linearer Bildelemente auf der ERS-(Beleuchtungsrichtung: SW) und SIR-C-Satellitenradaraufnahmen (Beleuchtungsrichtung: NE).

Die zumindest stichprobenartige Überprüfung im Gelände sollte Voraussetzung für die Verwendung von Lineationskartierungen sein, da sonst zu viele Fehlinterpretationen möglich sind und strukturgeologische Aussagen aus Lineationskartierungen allein nicht ableitbar sind. Ist diese Voraussetzung gegeben, dann stellt die Methode der Lineationskartierung eine wertvolle Ergänzung dar.

3.2. Lineationskartierungen auf der Basis von Satellitenradardaten des Bodenseegebietes

Durch eine detaillierte bruchtektonische Auswertung der Satellitenradardaten soll ermittelt werden, ob oder welche Zusammenhänge zwischen sichtbaren Lineationen auf den Satellitenradaraufnahmen und der vorhandenen Bruchtektonik in den Karstgebieten bestehen. Abb. 13 a und b zeigen die Lage des Untersuchungsgebietes sowie die Satellitenradaraufnahme in Kombination mit topographischen und hydrologi-

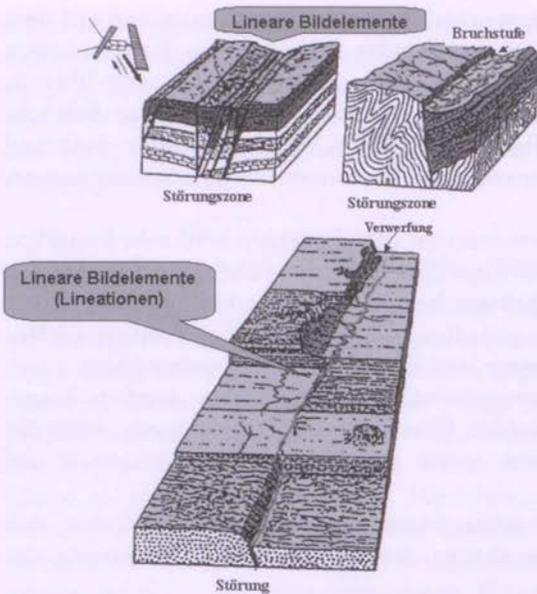
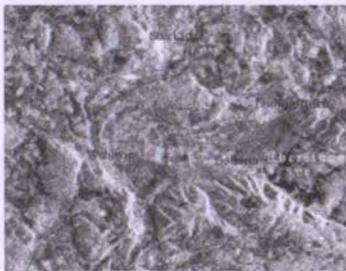
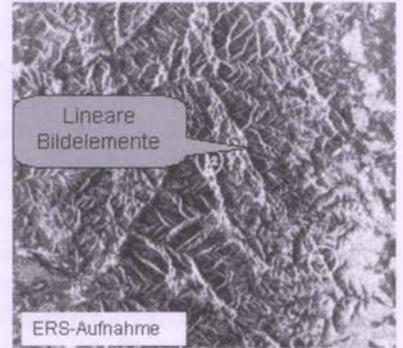
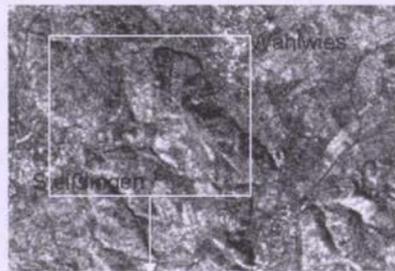


Abb. 12 a Mögliche Beziehungen zwischen der Erkennbarkeit linearer Bildelemente auf Satellitenaufnahmen und der struktureologischen Situation im Gelände

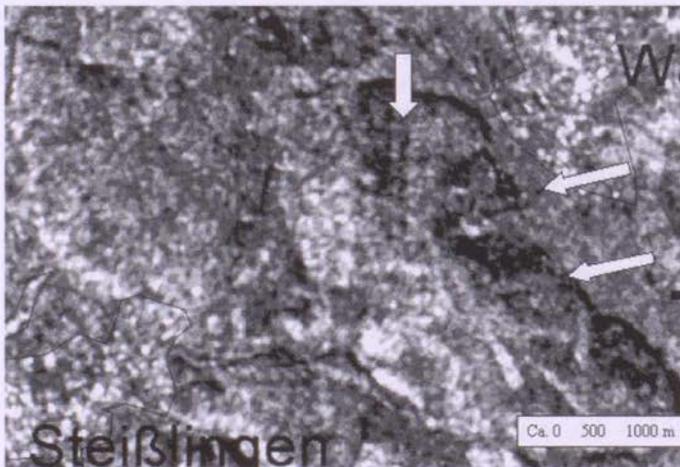


ERS-1-Aufnahme



SIR-C-X-Band

Abb. 12 b Ausschnitt aus der ERS-1-C-Band-Aufnahme vom 23.6.1992 und der X-SAR-Aufnahme vom 10.4.1994 westlich von Wahlwies



Erkennbarkeit linearer Bildelemente (Pfeile) auf der Radaufnahme (X-Band, 10.4.1994) Lineationskartierung



Steil stehende Klüfte

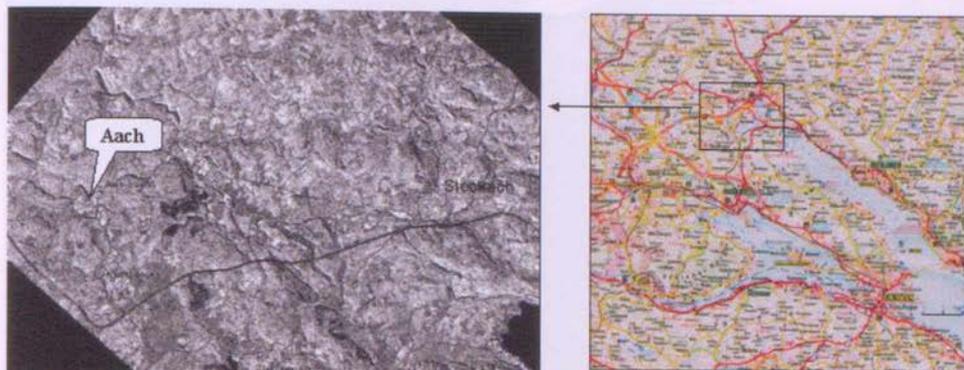
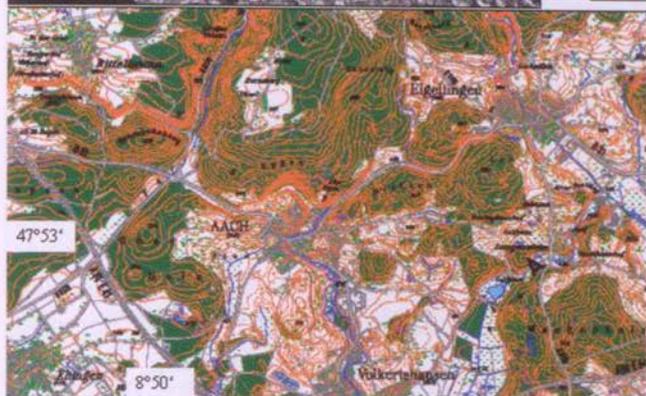


Abb. 13 a Topographische Karten und Satellitenradaraufnahme (Shuttle Imaging Radar-X-SAR, 10.4.1994) vom nordwestlichen Bodenseegebiet



Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1:50 000, Blatt 8318 Singen, Landesvermessungsamt B.-W., Stuttgart

schen Daten. Durch diese Überlagerung der Radardaten mit anderen Geodaten wird die Orientierung auf den Radarbildern erleichtert und damit ihre Auswertung.

Das oberflächliche Entwässerungsnetz des Untersuchungsgebietes zeichnet durch lineare, winkelige Fluss- und Bachsegmente in seinem Verlauf Schwächezonen nach und liefert damit deutliche Hinweise auf den Verlauf von ausgeprägten Bruch- und Störungszonen im Untergrund.

Lineationskartierungen auf der Basis von X-SAR-Daten und ihre farbkodierte Bildprodukte vom Gebiet um Aach sind auf Abb. 14 a und b und Abb. 15 dargestellt. Bei der Farbkodierung der Radaraufnahmen wurde jedem Grauton ein Farbwert zugeordnet, um geologische Informationen herauszuarbeiten.

Die Lineationskarte auf der Basis von X-SAR (10. 4. und 2. 10. 1994)-Daten lässt im Bereich von Aach NNW-SSE-, NNE-SSE-, SW-NE- und NW-SE-orientierten Lineationen erkennen. Der Austritt der Aach-Quelle ist auf dem Radar-Bildprodukt markiert.

Es lassen sich deutlich Zusammenhänge zwischen der Lage und Orientierung von Bruchzonen bzw. einzelnen Störungen im Gelände und dem Verlauf von Lineationen auf Satellitenbildern erkennen: Die Aach-Quelle befindet sich auf dem Radarbild im Kreuzungsbereich von NNW-SSE-, NW-SE- und SW-NE-Richtung verlaufenden Lineationen (Abb. 15 und 16). Die auf dem Radarbild sichtbaren

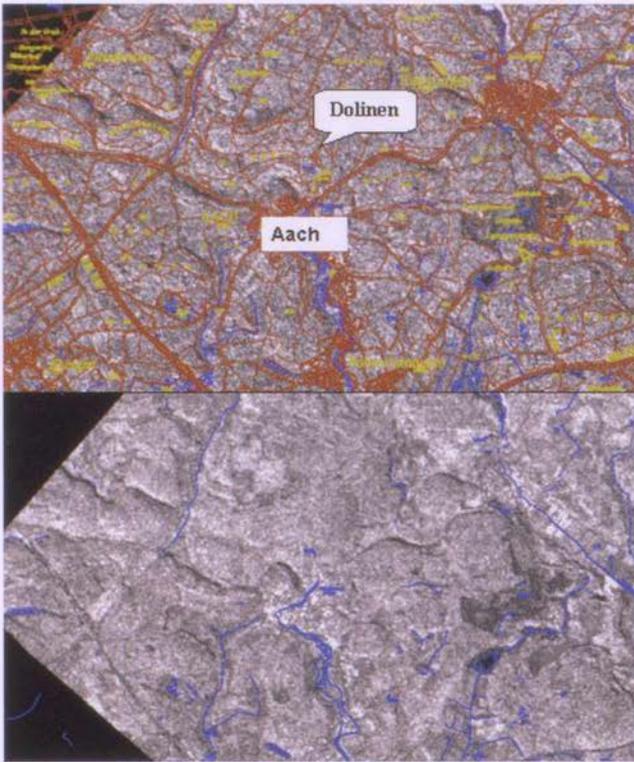


Abb. 13 b Überlagerung der Satellitenradaraufnahme vom Gebiet um Aach mit topographischen und hydrologischen Daten

Kombination von Gewässernetz- und Radardaten

Bildverarbeitung: Bildverarbeitungsbüro König, Dießen, 1999

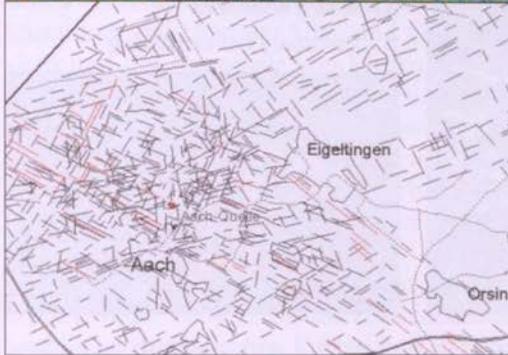
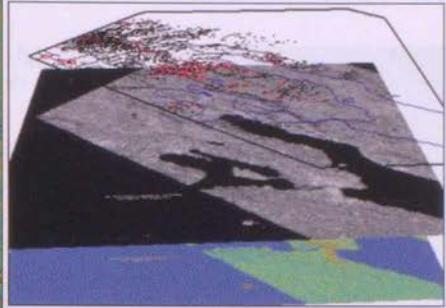
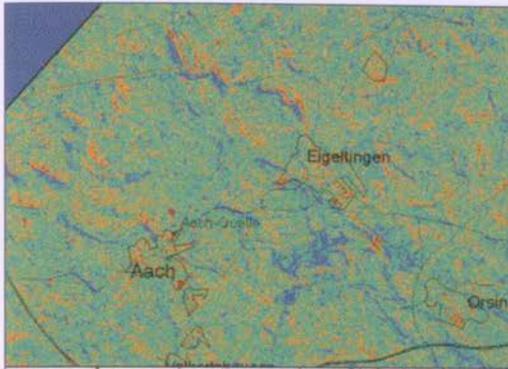
Lineationen entsprechen zum großen Teil bekannten Bruch- und Störungszonen der gleichen räumlichen Lage. Dies gilt vor allem für die NW-SE- und N-S-orientierten Lineationen (Vergleich: Abb. 4 und 14 a, b, 15 und 16). Die Kartierung linearer Bildelemente ermöglicht demnach Rückschlüsse auf den strukturellen Bauplan des Einzugsgebietes der Aach-Quelle.

Westlich von Eigeltingen liegt z. B. als Lineationsschar deutlich sichtbar die Überlinger See-Südrand-Störung. Zum Vergleich mit dem X-SAR-Radarbildprodukt und der Lineationskarte wird eine Kluftröse nach JOST (1997), die auf der Basis von Trennflächen im Kalksteinbruch bei Schloss Langenstein erstellt wurde, gezeigt. Die Hauptstreichrichtungen der Klüfte stimmen mit der Richtungsverteilung der Lineationen in diesem Bereich überein (Abb. 16).

In Kreuzungsbereichen von Lineationsscharen häuft sich das Vorkommen von Dolinen und Quellen.

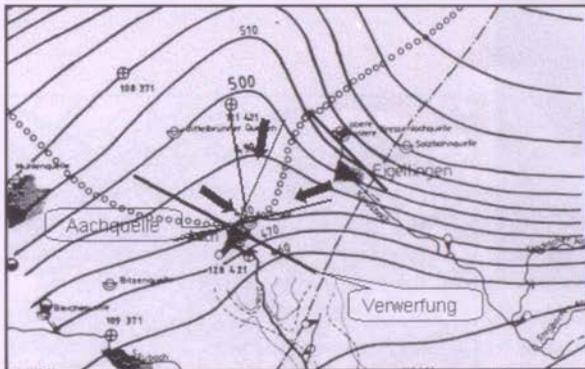
Abb. 16 gibt einen vergrößerten Ausschnitt aus der Radarszene wieder. Deutlich zeigt sich, dass die Aach-Quelle im Kreuzungsbereich von NNE-SSW-, N-S-, NW-SE- und WSW-WNE-orientierten Lineationsscharen befindet.

Die NW-SE streichenden Verwerfungen, die offenbar den Karstwasserfluss behindern und zum Aufstieg des Karstwassers im Bereich der Aach-Quelle führen, sind in ihrer Lage deckungsgleich mit Lineationsscharen auf den Radaraufnahmen in diesem Bereich.



- Dolinen
- Verwerfungen
- Lineare Bildelemente (lineationen)
- Seen
- Straßen
- Autobahn
- Orte

Abb. 14 a Kartierung linearer Bildelemente auf der Basis von Satellitenradaraufnahmen und ihrer farbkodierten Bildprodukte



- Quelle
- Meißstelle im Karst
- Pegel mit Abflußmessung
- Linie gleichen Karstwasserpotentials m + NN (Stand 15.4.85)
- Auffällige Grenze des unterird. Einzugsgebiets der Aachquelle
- Flußwasserversickerung
- Begrenzung Oberes Kieslager
- Begrenzung Unteres Kieslager
- Randbereich der Überdeckten Zone
- Zentralbereich der Überdeckten Zone der Tiefen Karsts

Nach VILLINGER, E. 1977 und KATZENBERGER, 1985, LFU-IVVA, Anlage 21

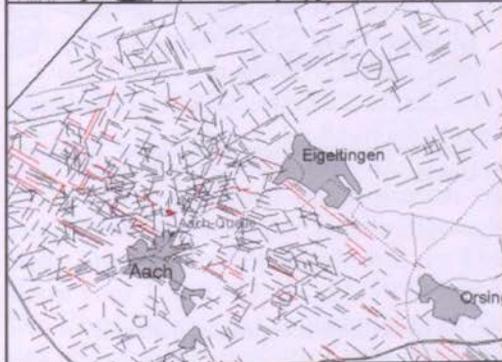


Abb. 14 b Mögliche Zusammenhänge zwischen dem Vorkommen von Karstquellen, Lineationen auf Satellitenradaraufnahmen und der Bruchtektonik im Gebiet der Aachquelle

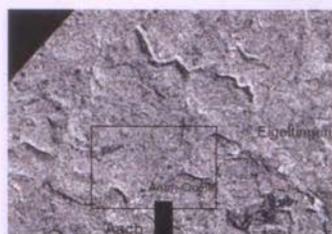
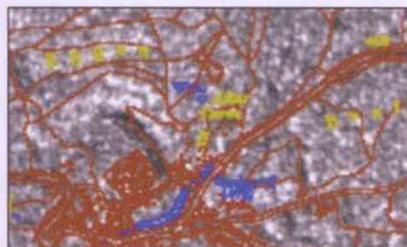


Abb. 15 Satellitenradar (X-VV, 2.10.1994) – Szene vom Gebiet der Aach-Quelle und Ausschnittsvergrößerung

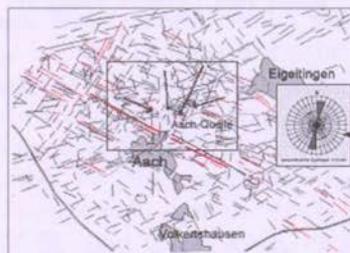


Pfeile zeigen die Lge der Lineationen an. Die Hauptrichtungen der linearen Bildelemente sind erkennbar.

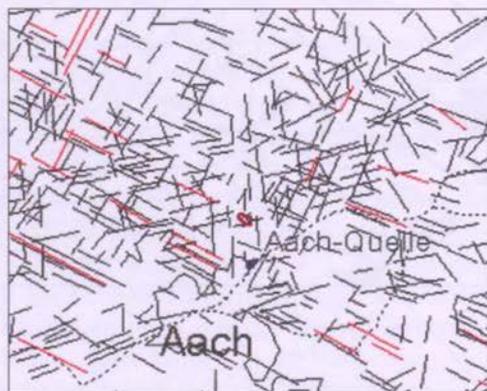
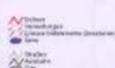
D – Dornsberg Ostrandstörung



Satellitenradaraufnahme, X-SAR 2. 10. 1994



Kluftröse



Ausschnittsvergrößerung vom Gebiet der Aach-Quelle

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 300 310 320 330 340 350 360 370 380 390 400 410 420 430 440 450 460 470 480 490 500 510 520 530 540 550 560 570 580 590 600 610 620 630 640 650 660 670 680 690 700 710 720 730 740 750 760 770 780 790 800 810 820 830 840 850 860 870 880 890 900 910 920 930 940 950 960 970 980 990 1000

Abb. 16 Lineationskartierung auf der Basis der Satellitenradaraufnahmen vom 10. 4. und 2. 10. 1994

4. Zusammenfassung

Die Auswertungen der SIR-C/X-SAR-Daten haben wesentliche ergänzende Informationen zur Bruchtektonik des nordwestlichen Bodenseegebietes erbracht: Die Überlagerungen der Lineationskartierungen mit z. B. hydrogeologischen, geodätischen oder topographischen Daten ergeben zum Teil neue Aspekte bei Fragestellungen zur Karsthydrologie oder tragen zur Verdeutlichung bereits bekannter Sachverhalte bei.

Im Laufe dieser Untersuchungen konnte durch den Vergleich von bruchtektonischen Geländedaten mit Lineationskartierungen in vielen Fällen eine Übereinstimmung zwischen der Lage und Orientierung von Lineationen auf den Radarbildern und der Raumlage von Klüftzonen und Störungen im Untergrund festgestellt werden. Daher liegt der Schluss nahe, dass viele der kartierten Lineationen die bruchtektonische Situation im Untergrund nachzeichnen. Geht man von dieser Annahme aus, dass die Lineationen auf den SIR-C/X-SAR-Aufnahmen das bruchtektonische Muster des Untersuchungsgebietes nachzeichnen, dann sind Rückschlüsse aus dem Lineationsmuster auf hydrologisch relevante Bruchzonen möglich.

Die Satellitendaten für sich allein – ohne Zusatzinformationen – ausgewertet, wären wenig verwertbar. Ihr entscheidender Nutzen liegt in der Verknüpfung mit jeweiligen thematischen Karten und karsthydrologischen Zusatzinformationen.

Dank

Im Rahmen des Radar Outreach Program der NASA/JPL, Kalifornien standen für diese Untersuchungen Satellitenradar-daten dieser Shuttle Mission von 1994 zur Verfügung: die Radardaten vom Shuttle Imaging Radar SIR-C-, L- und C-Band vom Bodenseegebiet.

Vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in Oberpfaffenhofen wurden SIR-C-X-SAR-Daten (X-Band, 9.6 Ghz) vom April und Oktober 1994 in Form von geokodierten, terrainkorrigierten Produkten im Rahmen des Projektes »Beispielhafte X-SAR-Endprodukte« (XEP) bereitgestellt.

Das XEP-Projekt wurde gefördert von der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA) unter FKZ 50 EE 9714, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Raumfahrtforschung, vertreten durch das Forschungszentrum Jülich (Projektträger BEO/A).

Die topographischen Daten wurden vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg im Rahmen der Habilitationsarbeit von Dr. B. Theilen-Willige bereitgestellt. Die Habilitation wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn vom 1. 9. 1993–31. 12. 1997 (Förderkennzeichen: TH 526/1–4) gefördert. Die Überlagerung der topographischen Daten mit den Radardaten erfolgte durch das Bildverarbeitungsbüro König (BVBK)/Diessen.

Herrn Rafael Grimm/Rielasingen sei für die Bereitstellung von karsthydrologischen Daten gedankt. Für seine Führung zur Aach-Doline danke ich Herrn Dominik Wetzel/Aach.

Schließlich danke ich Herrn Prof. Dr. Friedrich Weller und Herrn Dr. Peter Eitel (beide Ravensburg) für Anregungen und Hinweise bei der Abfassung des vorliegenden Beitrags.

Literatur

- BÄHR, H. J. (Hrsg., 1985): Digitale Bildverarbeitung, Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung. – H. Wichmann-Verlag, Karlsruhe
- BAYER, H. J. (1982): Bruchtektonische Bestandsaufnahme der Schwäbischen Ostalb (Geländeuntersuchungen, Luftbild- und Satellitenbilddauswertungen). – Diss. Math.-Naturwiss. Fakultät der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
- CARLE, W. (1975): Erläuterungen zur Geotektonischen Übersichtskarte der Südwestdeutschen Großscholle. – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 2. Auflage, Druck und Vertrieb: Landesvermessungsamt B.-W., Stuttgart
- ERR, L. (1953): Die geologischen und besonders strukturellen Verhältnisse des Raums um den nordwestlichen Bodensee in geodätischer Blickrichtung. – Arbeiten der Bodenseekonferenz, II, Reihe B, 8, 5–15, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
- GEYER, O. & GWINNER, M. P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. – 4. Aufl., E. Schweitzerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- GUPTA, R. P. (1991): Remote Sensing Geology. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung – für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. – Wichmann-Verlag, Karlsruhe
- JOST, K. (1998): Strukturgeologische Bestandsaufnahme des nordwestlichen Bodenseegebietes. – Diplom-Kartierung am Institut für Geologie und Paläontologie der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
- MÄLZER, H. & ZIPPELT, K. (1986): Kriechende Spannungsumwandlungen: Rezente vertikale und horizontale Bewegungen. – SFB 108, Berichtsband 1981-83, 59-85, Karlsruhe
- MÄLZER, H. et al. (1988): Höhenänderungen in der Nordschweiz und im Südschwarzwald bis zum Bodensee. – NAGRA Technischer Bericht 88-05, CH-Baden
- SCHMIDLE, W. (1936): Die geologische Geschichte des Überlinger Sees. – Badische Heimat, Zeitschrift für Volkskunde, Heimat-, Natur- und Denkmalschutz, 23 Jg., Jahresheft 1936, Überlinger See und Linzgau, 38–49, Freiburg
- SCHNEIDER, G. (1968): Erdbeben und Tektonik in Südwest-Deutschland. – Tectonophysics, 5, 6, 459–511
- SCHNEIDER, H. (1976): Über junge Krustenbewegungen in der voralpinen Landschaft zwischen dem südlichen Rheingraben und dem Bodensee. – Mitt. d. Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen, Bd. XXX, 1973/1976, 3–99, Schaffhausen
- SCHREINER, A. (1968): Untersuchungen zur Entstehung des Bodensees. – Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung, 86. Heft, 283–294, Bregenz
- SCHREINER, A. (1975): Zur Frage der tektonischen oder glazifluviatilen Entstehung des Bodensees. – Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., N.F. 57, 61–75, Stuttgart
- SCHREINER, A. (1978): Erläuterungen zu Blatt 8119 Eigeltingen. – Geologische Karte von B.-W., – Geologisches Landesamt B.-W., Druck: Landesvermessungsamt B.-W., Stuttgart
- SCHREINER, A. (1984): Hegau und westlicher Bodensee. – Sammlung Geologischer Führer 62, Gebr. Borntraeger, 92 S., Berlin, Stuttgart

- SCHREINER, A. (1992): Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee. – Geologische Karte 1:50 000 von Baden-Württemberg, Geologisches Landesamt B.-W. (Hrsg.), Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart
- THEILEN-WILLIGE, B. (1998): Erdbebengefährdung im Bodenseegebiet – Fernerkundungsmethoden bei der Erfassung von untergrundbedingten Effekten bei Erdbeben im westlichen Bodenseegebiet. – Habilitationsschrift und Abschlußbericht für die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn, Förderkennzeichen: Th 526
- THEILEN-WILLIGE, B. (1999): Zusammenhänge zwischen Satellitenradar-Lineationen, Bruchstrukturen an der Erdoberfläche und Erdbeben im Bodenseegebiet? Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Bd. 7, Vorträge der 18. Wiss. Techn. Jahrestagung der DGPF/15. DFD-Nutzerseminar des DLR, 457–466, Berlin
- THEILEN-WILLIGE, B. (2000): Seismic Hazard Zoning based on Evaluations of Remote Sensing Data (LANDSAT TM-/SIR-C/X-SAR-Radar) of the Lake Constance Area/Southwest Germany in Comparison with Field Check. – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation (PFG), 1,19–32, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Anschrift der Verfasserin:

Dr. habil. Barbara Theilen-Willige, Birkenweg 2, D-78333 Stockach