LiDAR-basierte Aufschlussanalogmodellierung und Datenextraktion für Reservoirmodelle – Erste Ergebnisse

G. Miernik*, J. Profe**, B. Höfle**, T. Kissner*, T. Bechstädt*/***, R. Zühlke*
*Institut für Geowissenschaften, Universität Heidelberg,
**Geographisches Institut, Universität Heidelberg, ***GeoResources STC, Heidelberg

Kurzfassung

Aufgrund der komplexen Bruchschollenarchitektur bietet der Oberrheingraben die Möglichkeit, potentielle Reservoireinheiten des Untergrunds, in Oberflächenaufschlüssen zu studieren. Im Gegensatz zu Untergrunddaten (Bohrungen, Seismik) ermöglichen Aufschlüsse die detaillierte, dreidimensionale Analyse. Hierfür werden Methoden zur Digitalisierung von Aufschlussanaloga auf Basis von terrestrischen Laserscanning (TLS) Daten, auch LiDAR genannt, entwickelt. Für die Modellierung von Flächensystemen (Klüfte, Schichten) werden verschiedene klastische und karbonatische, mesozoische Formationen analysiert. Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem Muschelkalk südlich von Heidelberg. Mit dem TLS gewonnene Punktwolken werden zu georeferenzierten 3D-Aufschlussanalogmodellen weiterverarbeitet. Durch Projektion von hochauflösenden Aufschluss-Fotos wird die Detaildichte erhöht. Dieses Modell dient als Basis für die Extraktion von Poly-Objekten (Schichtflächen, Geometrien, Klüfte). Daraus gewonnene Daten werden in weiterverarbeitende Softwarepakete importiert und ermöglichen 3D-Informationen des Aufschlusses mit 1D- und 2D-Informationen des Untergrunds zu verknüpfen.
Die Abteilung für Geoinformatik des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg arbeitet an einer Methode zur automatischen Extraktion von Kluftflächensystemen aus 3D-Punktwolken, mit dem Ziel eine schnelle, großflächige und übertragbare Analyse von Kluftsystemen anhand von TLS-Daten zu ermöglichen. Komplexe Flächensysteme werden im Aufschluss erfasst und für die digitale Weiterverarbeitung aufbereitet.

Einleitung

Bedeutende neue Ölfunde, steigende Ölpreise und verbesserte Explorations- und Produktionstechnik haben den Oberrheingraben (ORG) wieder in den Fokus der deutschen Kohlenwasserstoffexploration gerückt. Um das Explorationsrisiko zu verringern sind zusätzlich zu 1D- und 2D-Untergrunddaten Aufschlussanalogstudien von großer Bedeutung. Durch die Verwendung von terrestrischem Laserscanning (TLS) bietet sich die Möglichkeit, potentielle Reservoir-Einheiten in Aufschlüssen zu erfassen und detaillierte 3D-Aufschlussanalogmodelle zu erstellen. In der Kombination mit klassischer Feldarbeit (Profilaufnahme, Kluftmessungen) dienen sie als Basis für die Extraktion von Daten für weiterführende Modellierungen (Vewer et al., 2007; Fabuel-Perez et al., 2009; Rotevatn et al., 2009; Van Lanen et al., 2009; Fabuel-Perez et al., 2010; Wilson et al., 2011). Im Rahmen dieser Studie wurde der Muschelkalk-Steinbruch der HeidelbergCement AG südlich von Heidelberg bearbeitet. Als Ziele dienen:

1) Die Entwicklung eines Workflows für: (i) die Interpretation von Schichtflächen, Geometrien und Klüften in einem auf TLS-Daten basierendem 3D-Aufschlussanalogmodell und (ii) ihr Import in weiterverarbeitende Software zur Verknüpfung mit 1D- und 2D-Informationen des Untergrunds.
2) Die Entwicklung einer Methode zur automatischen Extraktion von Kluftsystemen aus 3D-Punktwolken.

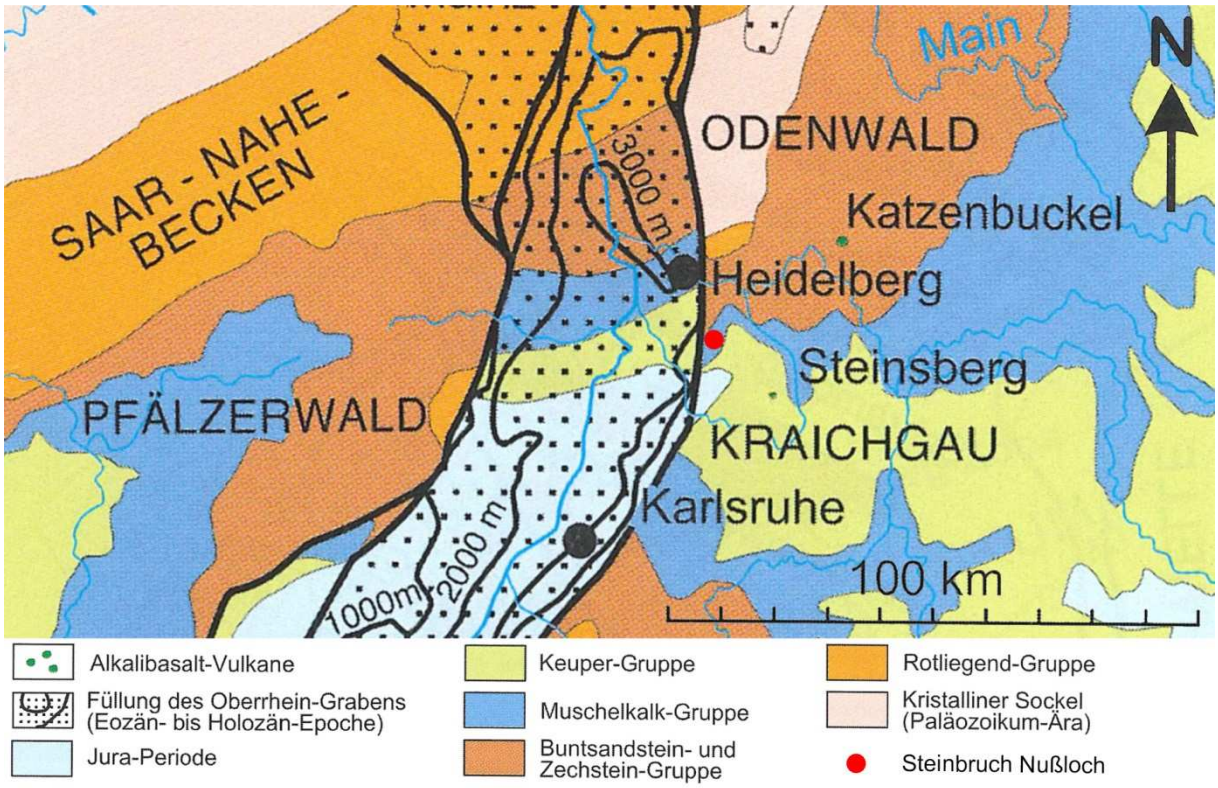

Abb. 1: Geologische Karte des ORG (nach Eisbacher & Fielitz, 2008).

Regionale Geologie

Der ORG ist ein Teil des westeuropäischen Riftsystems, welches sich vom westlichen Mittelmeer bis zur Nordsee erstreckt. Die Grabenbildung begann vor ca. 50 Ma (Eozän). Der ORG erreicht örtlich eine Subsidenz von bis zu 4 km (Hildebrandt, 2007). Zwischen Basel und Frankfurt wird eine Länge von etwa 300 km mit einer Durchschnittsbreite von 30 bis 40 km erreicht (Abb. 1). Zwei Grabenrand-Hauptabschiebungen begrenzen den ORG und trennen die der Erosion ausgesetzten Grabenschultern vom abgesenkten, mit Sedimenten gefüllten Grabeninneren (Eisbacher & Fielitz, 2010). Die Grabenränder werden über längere Distanzen von streifenförmig angeordneten Randschollen begleitet. Im Querschnitt ist eine deutliche Asymmetrie zu beobachten (östliche Hauptabschiebung zeigt einen größeren Versatz als die westliche). Es wird vermutet, dass dies auf N- bist NE-streichende, W-einfallende, duktile Abschiebungszonen, die bei der Neubildung der westeuropäischen Lithosphäre um 325 Ma entstanden sind, zurückzuführen ist (Eisbacher & Fielitz, 2008). Die beobachtete Verkrümmung des ORG, welcher in drei Segmente unterteilt wird (NNE-verlaufendes Südsegment, NE-verlaufendes Zentralsegment, N- bis NNW-verlaufendes Nordsegment) ist auf präexistierende, krustale Scherzonen zurückzuführen. Das Grabeninnere ist durch Zweigabschiebungen in muldenförmig abgesenkte Halbgräben gegliedert und erreicht bis zu 3,5 km mächtige Sedimentabfolgen (Eisbacher & Fielitz, 2010).
Die Ablagerung des Muschelkalks der mittleren Trias-Periode (ca. 237 bis 229 Ma) in der Region Heidelberg erfolgte im Bereich einer breiten, flach NW-abfallenden Karbonatrampe (Eisbacher & Fielitz, 2010). Die lithostratigraphische Gliederung erfolgt in drei Untergruppen. Der Untere und Obere Muschelkalk bilden die vorwiegend kalkigen und dolomitischen, vollmarinen Sedimente. Zwischen ihnen sind die teilweise salinaren Gesteine des Mittleren Muschelkalks zu finden (Geyer & Gwinner, 2011). Innerhalb der drei Untergruppen werden mehrere Formationen unterschieden (Abb. 2), welche durch unterschiedliche Faziestypen charakterisiert sind (Aigner & Bachmann 1992; Eisbacher & Fielitz, 2010; Geyer & Gwinner, 2011).

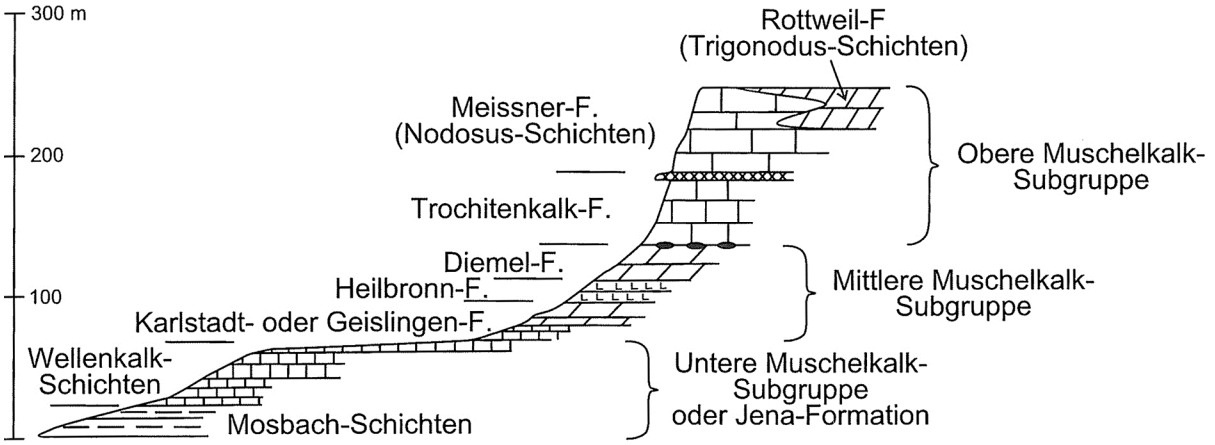

Abb. 2: Säulenprofil mit Formationsnamen der Muschelkalk-Gruppe der Region Heidelberg (nach Eisbacher & Fielitz, 2010).

Die Tektonik des Muschelkalks im Bereich des Steinbruchs Nußloch (Abb. 3) ist relativ vielseitig. Es sind markante Verwerfungen, Flexuren, Aufpressungen und vor allem Horizontalverschiebungen beobachten.
Großdimensionale Elemente bilden hierbei: (1) die Rheingrabenhaupt-verwerfung mit einem Versatz von 600 m; (2) der parallel hierzu verlaufende Nußlocher Spalt mit einem Versatz von 20 bis 40 m; (3) die Schlangengrund-Verwerfung mit einem Versatz von 10 bis 30 m; und (4) der zweigeteilte Baiertaler Sprung mit einer Abschiebung von 30 bis 40 m im N und 15 bis 30 m im S (Hildebrandt, 1998).

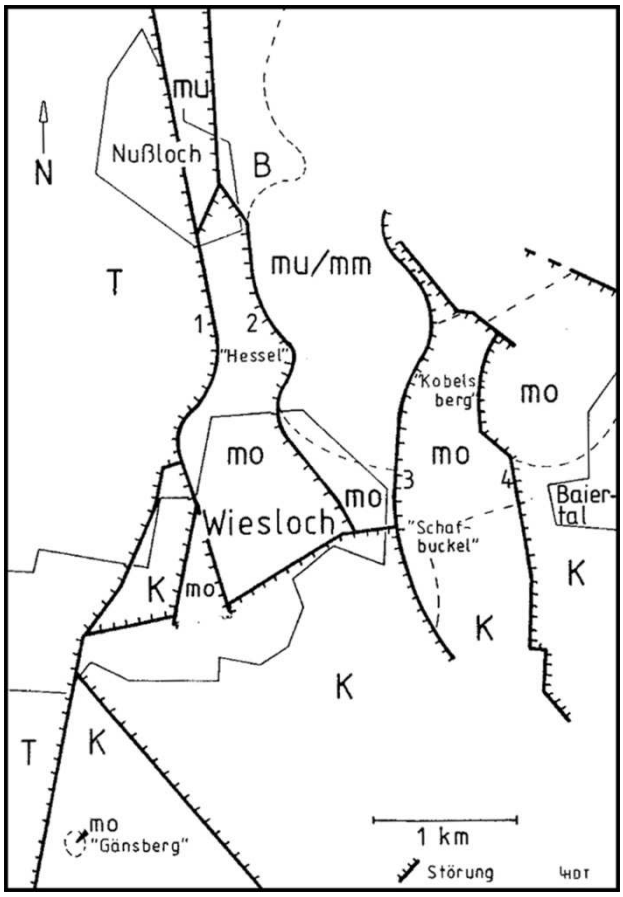

Abb. 3: Geologische Skizze des Bereichs um Wiesloch (nach Hildebrandt, 1985a). B: Buntsandstein; mu: Unterer Muschelkalk; mo: Oberer Muschelkalk; K: Keuper; T: Tertiär; 1: Rheingraben-Hauptverwerfung; 2: Nußlocher Spalt; 3: Schlangengrund-Verwerfung; 4: Baiertaler Sprung.

Methodik

Die digitale Datenbasis für die Entwicklung des 3D-Aufschlussanalogmodells besteht aus Punktwolken mit finiter Rauminformation (XYZ), GPS-Daten und hochauflösenden Aufschluss-Fotos. Die Aufnahme der Punktwolken erfolgte mit dem terrestrischen Laserscanner ILRIS HD von Optech mit einer Reichweite von 3 bis 1800 m (abhängig von der Witterung) bei 10.000 Hz. Die Steuerung des TLS erfolgt über einen Laptop. Aufschluss-Fotos wurden aus exakt gleicher Position parallel zu den Scans aufgenommen. Die räumliche Orientierung wurde durch ein GPS-Gerät und einen zusätzlichen Kompass festgelegt. Insgesamt wurden für das 3D-Auschlussanalogmodell des Steinbruchs Nußloch 60 Punktwolken aus 16 verschiedenen Positionen gescant. Ihre Punktmenge beträgt zwischen 0,7 bis 12,0 Mio Punkten bei einer Entfernung von 30 bis 300 m. Der

durchschnittliche Punktabstand beträgt 21 mm. Für das finale 3D-Aufschlussanalogmodell wurden 50 Scans verarbeitet.
Das Verbinden der Punktwolken zu einem Gesamtmodell (Abb. 4) erfolgt mit der Software JRC Reconstructor 2 von Gexcel. Hierfür werden anhand von sich überschneidenden Bereichen zweier Punktwolken gleiche Punkte gepickt. Anhand dieser Kontrollpunkte ist es der Software möglich zwei Punktwolken räumlich aneinander anzupassen. Nachdem alle Scans erfolgreich miteinander verbunden wurden, kann anhand von GPS-Daten eine Georeferenzierung durchgeführt werden.

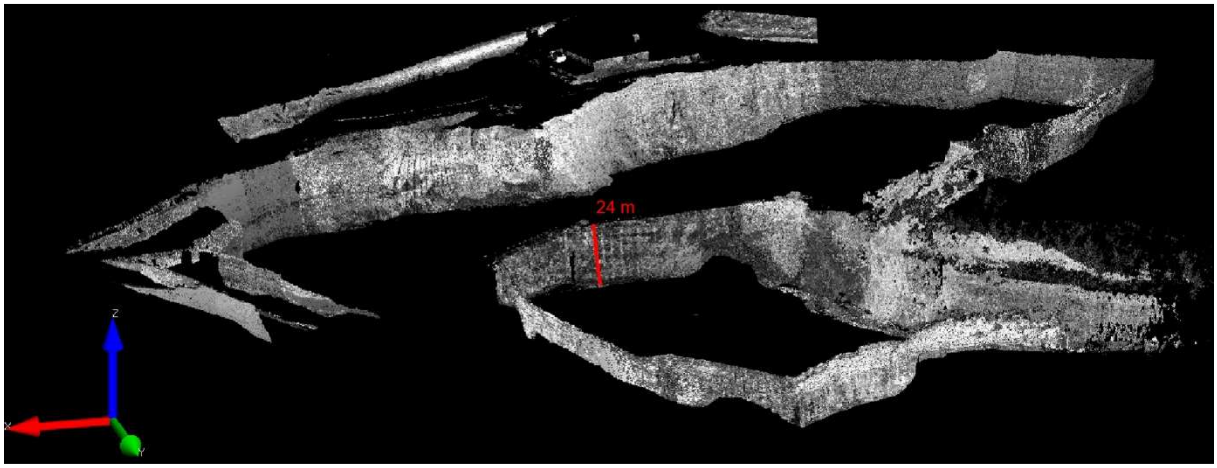

Abb. 4: 3D-Aufschlussanalogmodell des Muschelkalksteinbruchs der HeidelbergCement AG in Nußloch (JRC Reconstructor 2). Y-Achse zeigt nach N.

Abb. 5: Hochauflösende Fotoprojektion auf eine Punktwolke des Unteren Muschelkalks. Blick in südlicher Richtung. (JRC Reconstructor 2).

Für die Fotoprojektion werden der Punktwolke entsprechende Bildauschnitte extrahiert und grafisch optimiert. Mit JRC Reconstructor 2 werden korrespondierende Bereiche auf der Punktwolke und dem zugehörigen Bild gepickt. Anhand dieser Kontrollpunkte kann eine entsprechende Fotoprojektion errechnet werden.
Punktwolken mit einer korrespondierenden Fotoprojektion (Abb. 5) dienen als Basis für das Erstellen von Polyobjekten (Schichtflächen, Geometrien, Klüfte), welche wiederum exportiert und in weiterverarbeitende Software (Schlumberger Petrel) importiert werden. Das 3D-Aufschlussanalogmodell wird ebenfalls als Punktwolke exportiert und in Petrel importiert (Abb. 6).
Eine Methode zur automatischen Extraktion von Kluftsystemen aus 3D-Punkwolken wird von der Abteilung für Geoinformation des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg erarbeitet.

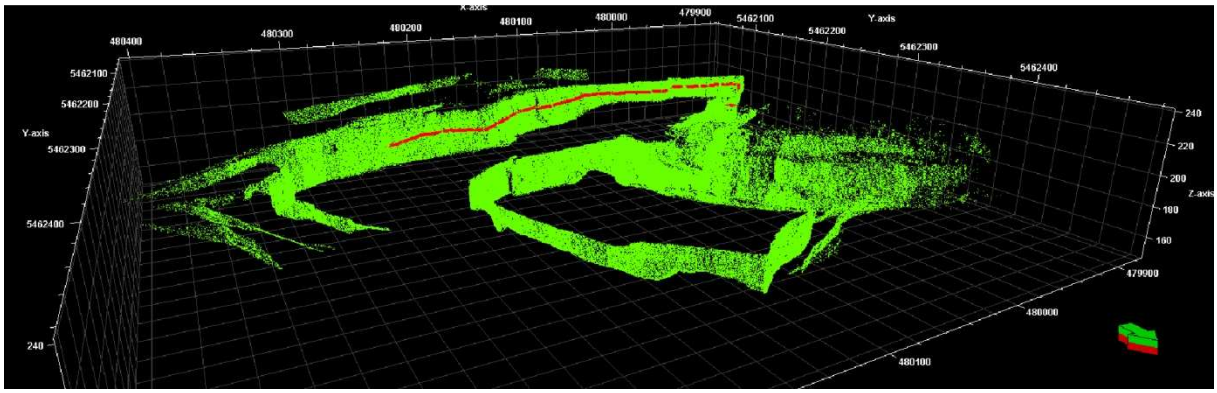

Abb. 6: In Petrel importiertes 3D-Aufschlussanalogmodell. Rote Linie symbolisiert einen in JRC Reconstructor 2 beispielhaft gepickten und in Petrel importierten Horizont.

Diskussion

Durch das Anwenden der beschriebenen Methodik ist es möglich ein hochaufgelöstes 3D-Aufschlussanalogmodell zu erstellen. Es dient als Basis für hydraulische Reservoirmodelle in weiterführenden Softwarepaketen. Dies ermöglich die Kombination von großflächigen, optimalen 3D-Aufschlussverhältnissen mit 1D- und 2D-Daten des Untergrunds und der Diagenese/Petrophysik.

Die Anwendung und das Potential der TLS-basierten 3D-Aufschlussanalogmodellierung sind aktuell Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Forschung. Einerseits stehen angewandte Studien zur verbesserten Analyse von Sedimentsystemen im Fokus, wie die Anpassung von Parametern für ein Faziesmodell eines Flußsystems (Fabuel-Perez et al., 2010), sowie die Charakterisierung von Sedimentkörpern, deren räumliche Abgrenzung und daraus generierte geostatische Datensätze anhand von 3D-Aufschlussanalogmodellen (Fabuel-Perez et al., 2009). Andererseits werden Studien mit dem Fokus auf die generelle Anwendbarkeit und das Potential zur Verbesserung geostatischer Datensätze durchgeführt (Van Lanen et al., 2009). Zu beiden Ansätzen lassen sich sich Parallelen bezüglich der Grundmethodik der hier vorgestellten 3D-Aufschlussanalogmodellierung erkennen. Allerdings zielt die aktuelle Studie verstärkt auf die Extraktion von Kluftsystem ab. Aus diesem Grund wurde keine Triangulationen (Meshing) der Punktwolken durchgeführt, wodurch das Risiko einer unbeabsichtigten „Glättung“ von Klüften verringert wird. Ähnliche Studien, die sich mit Störungs- und Kluftextraktion aus 3D-Aufschlussanalogmodellen beschäftigen, stellen Rotevatn et al. (2009) und Wilson et al. (2011) vor. Rotevatn et al. (2009) nutzt ein 3D-Aufschlussanalogmodell als Basis für eine Strömungssimulation. Zusätzlich zu den im Feld gemessenen Daten werden Störungen anhand der TLS-Daten extrahiert. Wilson et al. (2011) verwendet eine manuelle und semiautomatische Methode um Kluftsysteme aus einem 3D-Aufschlussanalogmodell zu extrahieren um anhand ihrer ebenfalls eine Strömungssimulation durchzuführen. Im Vergleich hierzu befasst sich die vorliegende Studie mit der Entwicklung einer Methode zur automatischen Extraktion von Klüften anhand von TLS-Daten um ein schnelle, großflächige und übertragbare Analyse zu ermöglichen.

Ausblick

Die beschriebenen Methodik ist die Basis für weitergehende detaillierte Reservoir-modellierungen. Aufbauend auf zusätzlichen Datensätzen (Störungskarte, Bohrdaten, Profile) soll ein hochauflösendes digitales Reservoirmodell (Petrel) entwickelt werden, das einersetits der Verbesserung der Interpretation geostatistischer Datensätze und andererseits als Basis für weitere Simulationen dient. Das Ziel ist die abschließende Strömungssimulation mit Eclipse (Petrel), welche es ermöglicht, auf unterschiedlichen Eingangsparametern basierende Ergebnisse zu vergleichen und in die Reservoircharakterisierung zu integrieren.

Literatur

Verwer, K., Adams, E.W., Kenter, J.A.M.: Digital outcrop models: technology and applications. First Break, v. 25, 57-63, (2007)

Fabuel-Perez, I., Hodgetts, D., Redfern, J.: A new approach for outcrop characterization and geostatical analysis of a low-sinuosity fluvial-dominated succession using digital outcrop models: Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, central High Atlas, Morocco. AAPG Bulletin, v. 93, 795-827, (2009)

Rotevatn, A., Buckley, S.J., Howell, J.A., Fossen, H.: Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study. AAPG Bulletin, v. 93, 407-427, (2009)

Van Lanen, X.M.T., Hodgetts, D., Redfern, J., Fabuel-Perez, I.: Applications of digital outcrop models: two fluvial case studies from the Triassic Wolfville Fm., Canada and Oukaimeden Sandstone Fm., Morocco. Geological Journal, v. 44, 742-760, (2009)

Fabuel-Perez, I., Hodgetts, D., Redfern, J.: Integration of digital outcrop models (DOMs) and high resolution sedimentology – workflow and implications for geological modeling: Oukaimenden Sandstone Formation, High Atlas (Morocco). Petroleum Geoscience, v. 16, 133-154, (2010)

Wilson, C.E., Aydin, A., Karimi-Fard. M., Durlofsky, L.J., Sagy, Amir, S., Brodsky, E.E., Kreylos, O., Kellogg, L.H.: From outcrop to flow simulation: Constructing discrete fracture models from a LIDAR survey. AAPG Bulletin, v. 95, 1883-1905, (2011)

Hildebrandt, L.H.: Der Steinbruch Nußloch-Baiertal – Geologie, Abbau, Siedlungsgeschichte und Natur. Palaeos, Heft 2, 39-44, (2007)

Eisbacher, G.H. & Fielitz, W.: Sammlung geologischer Führer: Karlsruhe und seine Region. Band 103, Gebrüder Borntraeger, Stuttgart, 342 S., (2010)

Eisbacher, G.H. & Fielitz, W.: Eine spätvariszische (325 Ma) W-fallende Abschiebung als lithosphärische Schwächezone unter dem Oberrhein-Graben. Geotectonic Research, v. 95, 39-40, (2008)

Geyer, O.F., Gwinner M.P.,: Geologie von Baden-Württemberg. Schweizerbart, Stuttgart, 627 S., (2011)

Aigner, T. & Bachmann, G.: Sequence stratigraphic framework of the German Triassic. Sedimentary Geology, v. 80, 115-135, (1992)

Hildebrandt, L.H.: Die Schwermetallbelastung durch den historischen Bergbau im Raum Wiesloch. Dissertation, Universität Heidelberg, 375 S., (1998)

Hildebrandt, L.H.: Geologie und Genese der Wieslocher Lagerstätte. Lapis, Heft 12/85, 13-14, (1985a).