

Lutz Reinhardt: Dynamic stratigraphy and geochemistry of the Steinmergel-Keuper play system: a record of Pangean megamonsoon cyclicality (Triassic, Middle Keuper, Southern Germany). 2000

Die Zielsetzung dieser Studie war es, die zyklischen Ablagerungen des Steinmergel-Keuper Playasystems im Süddeutschen Keuperbecken (Oberer Mittelkeuper) zu untersuchen, um eine mögliche klimatische Steuerung der hochfrequenten Tonstein/Dolomitbank-Zyklen zu verifizieren und den Einfluss weiterer Kontrollfaktoren wie Tektonik oder Meeresspiegelschwankungen abzuschätzen. Dies erforderte zunächst die Erarbeitung eines umfassenden sedimentologischen Faziesmodells für das Steinmergel-Keuper Playasystem unter Berücksichtigung seiner paläogeographischen und paläoklimatischen Lage. Darauf aufbauend sollten aus verschiedenen geochemischen Untersuchungen weitere Parameter abgeleitet werden, die als Klimaproxies verwendet werden können. Schließlich sollten Zeitreihenanalysen der verschiedenen gewonnenen Datensätze weitere Hinweise auf Steuerungsfaktoren der Zyklizität ermöglichen. Basierend auf den detaillierten litho-chronostratigraphischen Arbeiten von Brenner (1973, 1978) und Brenner & Villinger (1981), wurde eine sedimentologische Faziesanalyse durchgeführt. Dabei wurden alle noch zugänglichen, von Brenner beschriebenen Aufschlüsse begangen, ergänzt durch weitere Aufschlüsse anderer Bearbeiter und zwei Forschungsbohrungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg. Die Bohrungen ergeben zusammen ein vollständiges vertikales Profil durch den gesamten Steinmergel-Keuper im Kraichgau, das von einem Profilschnitt entlang des Keuperausstrichs auf der Kieselsandstein-Zeitscheibe (km3sA bis km3sF) horizontal ergänzt wird. Innerhalb dieses dreidimensionalen Rahmens wurden hochauflösenden geochemischen Untersuchungen durchgeführt. Stabile Isotope von Kohlenstoff ($\delta^{13}\text{C}$) und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$) dienten als Proxies für das Paläoklima und die Paläohydrologie. RFA-Untersuchungen ergaben Spektren der Haupt- und Nebenelemente, die ebenfalls als Proxies für variierende paläoklimatische Bedingungen dienten, sowohl innerhalb des Tonstein/Dolomitbank Basiszyklus als auch für übergeordnete Zyklenhierarchien. Röntgendiffraktometrie, Dünnschliff- und Kathodenumineszenzmikroskopie lieferten ergänzende petrographische Daten. Gamma-ray Messungen der Übertage-Profile dienten der besseren Korrelation mit Bohrungs-logs. Gesteinsmagnetische Untersuchungen, die im Rahmen einer begleitenden Diplomarbeit (Schalkovski 2000) gemessen wurden, bildeten neben den geochemischen Daten eine weitere Basis für evolutionäre Spektralanalysen (ESA).

Die Untersuchungen ergaben ein neues detailliertes Faziesmodell für den Steinmergel-Keuper. Ausgehend vom vorherrschenden Megamonsoon-Klima der Pangäa, werden die sich zyklisch wiederholenden Tonstein/Dolomitbank Abfolgen als Ergebnis der durch Milankovitch-Zyklen verursachten Schwankungen der Monsun-Intensität erklärt. Dabei wechseln playa mudflats während relativ trockenerer Phasen mit playa lakes während relativ feuchterer Phasen des insgesamt semi-ariden Megamonsoonklimas ab, die jeweils zur Bildung von Tonsteinen bzw. von Dolomitbänken führen. Die Bildung von primärem Dolomit findet während der playa lake Phasen statt. Anhand des Grades ihrer subaerischen Überprägung, wurden insgesamt 5 verschiedene Dolomitbank-Typen unterschieden, die eine systematische Faziesabfolge vom Rand des Playasees zu seinem zentraleren Bereich darstellen.

Die Kovarianz von Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopen ist ein paläohydrologischer Indikator, der das Steinmergel-Keuper Playasystem als hydrologisch geschlossenes kontinentales Seesystem charakterisiert. Die schwankenden, überwiegend sehr leichten Isotopenwerte, spiegeln größermaßstäbliche klimatische Trends hin zu insgesamt humideren Verhältnissen wider. Entlang der Zeitscheibe km3sF ergibt sich vom Playarand zum Playazentrum eine systematische Tendenz hin zu leichteren Isotopenwerten. Dies spiegelt einerseits unterschiedlich starke Evaporationsverhältnisse wider, andererseits aber auch den Kontinentalitätseffekt der Isotopenfraktionierung. Elementspektren der RFA-Analysen wie z. B. Ti/Al, K/Al, etc. spiegeln ebenfalls kleinere und größere zyklische Veränderungen sowohl der hydrologischen Verhältnisse der Playa, als auch der Verwitterung im Liefergebiet wider. Das zugrundeliegende klimagesteuerte Playafaziesmodell und die

Ergebnisse evolutionärer Spektralanalysen (ESA) erlauben die Interpretation der vier unterschiedenen sedimentären Zyklen als Milankovitch-Zyklen zu:

- Tonstein/Dolomitbank-Paare als Basiszyklus (20-100 ky, abhängig von der Sedimentationsrate)
- Zyklenbündel aus zwei bis fünf oder mehr Basiszyklen aufgebaut (400 ky)
- Großzyklen, aus mehreren Zyklenbündeln zusammengesetzt (2000 ky)
- ein übergeordneter Trend (Zyklus 2. Ordnung, Aigner & Bachmann 1992).

Der zyklische Aufbau des Steinmergel-Keupers ist weitgehend identisch mit den Sedimentationszyklen im Sandstein-Keuper, für die ebenfalls eine überwiegend klimatische Steuerung postuliert wird.

The study's main purpose was to examine the cyclic deposits of the Steinmergel-Keuper playa system in the southern German Keuper basin (Upper Middle Keuper) in order to verify a possible climate related control of the high-frequent mudstone/dolomite cycles. The influence of additional controlling factors like tectonics or sea level changes had to be estimated, too.

This required to establish a comprehensive facies model for the Steinmergel-Keuper playa system including its paleogeographic and paleoclimate position. Based on that, additional parameters should be deduced from various geochemical investigations that can be used as climate proxies. Finally, time series analyses of the different data sets obtained will provide additional indications of factors controlling cyclicity.

Based on the detailed litho-chronostratigraphic work of Brenner (1973, 1978) and Brenner & Villingner (1981), a sedimentologic facies analysis was carried out. While doing so, all accessible outcrops described by Brenner were perused, supplemented by outcrops of other workers and two research wells of the Geological Survey Of Baden-Württemberg. Combining the two drill cores resulted in a complete vertical profile through the entire Steinmergel-Keuper in the Kraichgau-Trough. This is complemented horizontally by a section of profiles of the Kieselsandstein time slice (i.e., km3sA to km3sF). Within this three-dimensional framework the high-resolution geochemical sampling was performed.

Stable isotopes of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) were used as proxies for the paleoclimate and the paleohydrology in the Steinmergel-Keuper playa system. XRF-analyses resulted in spectra of major and minor elements that served as proxies for changing paleoclimate conditions for both the mudstone/dolomite beds of basic cycles as well as higher order cycle hierarchies. XRD-analyses, thin-sections, SEM and cathodoluminescence microscopy provided additional petrographic data. Gamma-ray measurements in outcrops enabled correlation with drilling logs.

The examination of rock magnetic properties, performed as part of a accompanying diploma thesis (Schalkovski 2000), together with the geochemical data set provide an additional basis for evolutionary spectral analyses (ESA).

The investigation of outcrops, drill cores and of the collected samples resulted in a new detailed facies model for the Steinmergel-Keuper playa system. Based on the dominating megamonsoon climate of Pangaea, the cyclically repeated mudstone/dolomite bed series are explained as a result of Milankovitch forced changes of monsoonal intensity. Playa mudflats of relative dryer periods interchange with playa lakes of relative wetter periods in an overall semi-arid megamonsoon climate resulting in the formation of mudstones and dolomite beds, respectively.

The formation of primary dolomite beds occurs during the playa lake periods. Depending on the degree of subaerial exposure, five different dolomite bed types were distinguished that represent a systematic sequence of facies from the former playa lake margin to its more central zone. The covariance of carbon and oxygen isotopes is a paleohydrologic indicator characterizing the Steinmergel-Keuper playa system as a typical hydrologically closed continental lake system. The varying mainly very light isotopic values reflect larger scale climate trends towards overall more humid conditions. Along the time slice km3sF from the playa margin towards its center a systematic tendency towards lighter isotopic values is notable. This reflects the differing extent of evaporation

conditions as well as the continentality effect during isotopic fractionation. Element spectra of XRF-analyses like Ti/Al, K/Al etc. likewise reflect smaller and larger cyclic changes of both hydrologic conditions of the playa as well as changes of the weathering in the hinterland.

The basic climate controlled playa facies model and the results of evolutionary spectral analyses (ESA) allow the interpretation of overall four different hierarchies of sedimentary cycles as Milankovitch-cycles:

- mudstone/dolomite bed couplets form the basic cycle (20 to 100 ky, depending on sedimentation rate)
- bundles are formed of two to five or more cycles (400 ky)
- larger scale cycles are composed of several bundles of cycles (2000 ky)
- an overall trend (2nd order cycle, determined by the long-term tectonic setting and longer term sea level changes).

The cyclic composition of the Steinmergel-Keuper is largely identical to the sedimentary cycles of the Sandstein-Keuper that are accordingly interpreted as being controlled by climate.