

Carolyn Lampe: The effects of hydrothermal fluid flow on the temperature history of the northern Upper Rhinegraben - numerical simulation studies. 2001

Die thermische Entwicklung des nördlichen Oberrheingrabens bei Worms ist Ziel einer umfangreichen numerischen Sensitivitätsstudie. Maturitäts- und temperatursensitive Parameter aus unterschiedlichen Explorationsbohrungen sowie ein Profil entlang der seismischen DEKORP 9N Linie dienen als Grundlage für ein- und zweidimensionale Computer-Modelle zur Temperaturgeschichte unter regionalen (Querprofile über das gesamte Grabensystem) und lokalen (Temperaturmuster entlang einzelner Störungen) Gesichtspunkten. Oberflächenwärmeflußmessungen zeigen, daß die Wärmeflußdichte in der Grabenregion lokal stark schwankt. Sie ist, im Vergleich zu einem normalen kontinentalen Hintergrundwärmefluß von 65 mW/m^2 , in den Grabenrandregionen sehr niedrig (30 mW/m^2) und nimmt zum Zentrum des Grabens hin auf Werte von $>130 \text{ mW/m}^2$ zu. Diese Schwankungen lassen sich auf ein großräumiges Grundwasserzirkulationssystem zurückführen, wobei kühles Wasser entlang der tiefreichenden Grabenrandstörungen in das System infiltriert, im Untergrund aufgeheizt wird und im Grabenzentrum entlang von Störungen wieder aufsteigt. Das heutige Temperaturfeld des Oberrheingrabens ist demnach eine Kombination aus einem basalen konduktiven Wärmefluß und einem grundwasserzirkulationsbedingten, konvektiven Wärmefluß. Die vorliegende Studie befaßt sich mit zwei unterschiedlichen Aspekten der Temperatur-entwicklung innerhalb des nördlichen Oberrheingrabens. In einer ersten Simulationsstudie wird der Einfluß eines regionalen, tiefreichenden Fluidflußsystems auf das Hintergrundtemperaturfeld untersucht. In einer zweiten Studie wird der Einfluß eines lokalen, zeitlich begrenzten Fluidflußereignisses auf das Hintergrundtemperaturfeld untersucht. Dabei werden mögliche Faktoren ermittelt, die zur Bildung räumlich begrenzter Temperatur- und Maturitätsanomalien führen.

Untersuchungen an dispers verteiltem Vitrinit in einigen Explorationsbohrungen ergeben, daß die thermische Entwicklungsgeschichte des nördlichen Oberrheingrabens das Ergebnis einer Kombination aus basalem, konduktivem und Grundwasser-induziertem, konvektivem Wärmetransfer ist. Um den konduktiven/konvektiven Anteil des Wärmetransfers zu quantifizieren, wird zunächst eine Reihe numerischer Fluidfluß- und Temperaturtransfer- Modelle entlang eines Querprofils über den nördlichen Oberrheingraben bei Worms vorgestellt. Um mögliche Migrationsbahnen für das Grundwasser zu schaffen und den Einfluß der Fluidzirkulation auf das Temperaturfeld zu bestimmen, gehen die einzelnen Modelle von unterschiedlichen Störungspemeabilitäten aus. In Abhängigkeit dieser Permeabilitäten entwickeln sich im Verlauf der Simulation negative Wärmeanomalien in den Bereichen infiltrierenden Grundwassers an den Grabenflanken und positive Anomalien in den Bereichen aufsteigenden Grundwassers im Grabenzentrum. Der Vergleich zwischen einem rein konduktiv geprägten Temperaturfeld und einem gekoppelten konduktiv/konvektiven Temperaturfeld zeigt, daß das heutige Grundwasser- zirkulationssystem insgesamt einen Kühleffekt auf das Temperaturfeld des Grabens hat. Je nach Permeabilität der Störungen (= Fluidbahnen) kann die Kühlung bis zu -115°C betragen (offene Störungen). In Übereinstimmung mit den gemessenen Kalibrationsparametern liegt die advective Kühlung der konduktiven Hintergrundtemperatur jedoch bei ca. -45°C (semipermeable bis geschlossene Störungen). Geht man von einem durchschnittlichen Wärmefluß von 100 mW/m^2 aus, wie er für den Oberrheingraben postuliert wird, so müßten Vitrinitreflexionswerte ohne ein konvektives Kühlen durch Grundwasser eine größere Reife zeigen, als die tatsächlich gemessenen. Um die gemessenen Maturitäten unter rein konduktiven Bedingungen zu modellieren, würde ein durchschnittlicher Wärmefluß von nur 65 mW/m^2 ausreichen. Um jedoch die gemessenen, relativ niedrigen Maturitäten mit dem nachgewiesenen, hohen Hintergrundwärmefluß in Einklang zu bringen, wird ein kühlendes Grundwasserzirkulationssystem postuliert, das über einen langen Zeitraum hinweg ($> 10 \text{ Ma}$) aktiv war.

Obwohl ein advektiver Kühlprozess in Kombination mit einem erhöhten basalen Wärmefluß eine Erklärung für die heute herrschenden Temperaturen und Maturitäten im nördlichen Oberrheingraben bietet, müssen die Temperaturbedingungen in der Vergangenheit kurzfristig deutlich abweichend gewesen sein. Dies wird in einer der Explorationsbohrungen deutlich.

Das Maturitätsprofil entlang der Bohrung Nordheim-1 zeigt einen ungewöhnlichen vertikalen Trend. Oberhalb und unterhalb einer ca. 500 m mächtigen Mergelschicht entsprechen die Maturitäten dem modernen konduktiv/konvektiv gesteuerten Temperaturregime. Innerhalb der Mergelschicht jedoch, zwischen 1000-1500 m Tiefe, ist die Vitritreflexion deutlich erhöht und zeigt einen mit zunehmender Tiefe inversen Maturitätsgradienten.

Die thermische Anomalie, die diese Maturitätsanomalie verursacht hat, muß hydrothermalen Ursprungs gewesen sein. Darüber hinaus muß sie lange genug gedauert haben, um die Vitritreflexion innerhalb der Mergelschicht zu erhöhen, muß jedoch nachgelassen haben bevor sie die Reife des organischen Materials ober- und unterhalb dieser Zone thermisch beeinflussen konnte. Es wird daher davon ausgegangen, daß die Maturitätsanomalie durch ein kurzzeitiges, hydrothermales Fluidfluß-Ereignis verursacht wurde, bei dem heißes (130-160°C) Wasser entlang von Klüften und Schichtgrenzen lateral in die Mergelschicht eingespeist wurde. Das erwärmte Grundwasser muß relativ schnell (im Bereich von m/a) aus großer Tiefe (ca. 3.5 km) entlang von Störungen aufgestiegen sein, da niedrige Fließgeschwindigkeiten ($< \text{dm/a}$) dazu führen würden, daß die Wärme des Grundwassers noch während des Aufstiegs konduktiv an das umgebende Gestein abgegeben wird.

Um diese Hypothese zu testen, ist eine Reihe von vereinfachten Modellen erstellt worden, die sowohl Grundwasserfluß, als auch Wärmetransport und die Kinetik der Vitritalteration berücksichtigen. Diese Modelle ermöglichen es, unterschiedliche Parameter und ihre Randbedingungen gegeneinander zu testen. Ziel ist es, diejenigen hydrothermalen Bedingungen zu quantifizieren, die als Voraussetzung für die Bildung einer Maturitätsanomalie gegeben sein müssen. Die Modelle gehen von einem einzelnen Aquifer aus, der nach oben und nach unten von Grundwassernichtleitern begrenzt ist. Die Lage und Mächtigkeit des Aquifers entspricht hierbei der Position der Maturitätsanomalie. Die Randparameter entlang der linken Modellgrenze lassen sich über die Zeit variieren, um einen seitlichen (von links nach rechts gerichteten) Fluidfluß in das Becken hinein zu simulieren. Die Temperatur des Grundwassers, die horizontale Fließgeschwindigkeit, die Fließdauer und die Wiederholung der Fließereignisse sowie die Mächtigkeit des Aquifers lassen sich dabei beliebig variieren. Der Einfluß der unterschiedlichen Parameter auf die Temperatur- und Maturitätsentwicklung ist in einer umfangreichen Sensitivitätsstudie untersucht worden. Die Größe und die Form der Maturitätsanomalie erlaubt Spekulationen hinsichtlich der Dauer und der Größenordnung der Temperaturanomalie. Zusätzlich können Aussagen über die Entfernung der Maturitätsanomalie zu dem Störungssystem gemacht werden, entlang dessen die warmen Wässer aufsteigen können. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, daß thermische Maturitätsanomalien nur unter der Voraussetzung einer restriktiven Kombination der oben genannten Parameter gebildet werden können. Es ist möglich, eine Maturitätsanomalie mit einem inversen Reifetrend und in der Größenordnung der im nördlichen Oberrheingraben beobachteten Anomalie mittels eines einzelnen 10.000 Jahre andauernden Fluidflußereignisses zu simulieren, wobei das Grundwasser eine Temperatur von 130°C und eine Fließgeschwindigkeit von 1 m/a hat. Die Anomalie bildet sich dabei in einer Entfernung von ca. 500 m zu dem Störungssystem aus, entlang dessen das Wasser aus der Tiefe aufsteigt (= linker Rand des Modells). Dauert das Fließereignis länger als 100.000 Jahre, bildet sich zwischen dem "heißen" Aquifer und der darunter liegenden, konduktiv erwärmten Schicht ein neuer Temperaturgradient aus. Die entstehenden Gleichgewichtsbedingungen lassen die Anomalie allmählich verschwinden und das gesamte Vitritreflexionsprofil verschiebt sich hin zu höheren Maturitäten.

Temperaturanomalien, die ein glockenförmiges vertikales Temperaturprofil aufweisen, so wie es für einen lateralen Eintrag von heißem Grundwasser in einen vergleichsweise kühlen Grundwasserleiter typisch ist, sind heute im nördlichen Oberrheingraben nicht dokumentiert. Die beobachtete Maturitätsanomalie jedoch läßt darauf schließen, daß derartige Temperaturbedingungen in der Vergangenheit temporär geherrscht haben müssen. Die Vitrit-reflexion sowie andere temperatursensitive Parameter (Apatit Spaltspurenuntersuchungen, T_{max}-Bestimmungen) erlauben eine Abschätzung der Mindest- und Höchstdauer der Temperatur-anomalie (Fluidflußereignis), die

letztendlich zu einer Maturitätsanomalie führen. Permeabilitätsänderungen der Störungszonen, die zeitweise einen schnellen Aufstieg heißer Wässer aus dem Untergrund erlaubten, sind beispielsweise durch eine Reaktivierung der Störungen im Zuge der zweiten Riftphase des Grabensystems vor ca. 5 Million Jahren gegeben.

Investigations on the temperature history and the geothermal evolution of the northern Upper Rhinegraben using well data (both maturity and temperature sensitive parameters) and seismic data as basis for one- and two-dimensional numerical computer simulation reveal a complex thermal history. Surface heat flow densities vary greatly on a local scale and range between low values (30mW/m^2) along the graben shoulders and highly elevated values in the rift center ($>130\text{mW/m}^2$). This has been attributed to fluid circulation recharging relatively cool groundwater into the rift system along the escarpment faults and discharging relatively hot fluids along deep fault systems towards the topographic low (center) of the graben. The temperature field observed today is the result of a combination of a conductive basal heat flow and groundwater flow induced convective heat transfer. Two aspects of heat transfer attributed to fluid flow are investigated in this study. A first series of simulations performed investigates the influence of long-term fluid flow on the background temperature field on a more regional scale, whereas a second set of simulations deals with possible constraints on episodic, transient fluid flow events resulting in spatially confined maturity anomalies. Measurements of dispersed vitrinite along several exploration wells within the northern Rhinegraben are indicative of a thermal graben history that is influenced by a combination of basal conductive and lateral groundwater flow-related convective heat transfer. To determine the conductive/convective components of heat transfer within the rift today, a series of numerical groundwater flow and heat models are developed along a cross-sectional transect across the northern Rhinegraben. Fault zone permeability is varied in the simulations of these models to determine possible fluid pathways and the effects of circulating groundwater on the graben temperature field. Negative thermal anomalies develop in areas of cool recharging groundwater along the graben flanks whereas hot discharging groundwater near the topographic low of the graben may result in positive thermal anomalies, depending on the fault permeability. Comparison of a purely conductive background temperature field with a coupled conductive/convective temperature field suggest that the modern groundwater flow system is having an overall net cooling or "refrigeration" effect on the temperature field of the rift. Depending on the permeability of the faults (= fluid pathways) the cooling can reach up to -115°C (open faults). However, calibration data indicates an advective cooling of -45°C (transmissive to tight faults). Without convective cooling by groundwater, vitrinite reflectance levels in wells are expected to be much higher on average. Although relatively high heat flow densities (100mW/m^2) are documented in the Rhinegraben, only 65mW/m^2 would be sufficient to produce observed vitrinite reflectance levels. Thus, a long-lived (> 10 million years) cooling convective fluid flow in combination with a high basal heat flow seems to be active. Although advective cooling through long-term fluid flow in combination with a high heat flow, as proposed for the Upper Rhinegraben, explains modern down-hole temperature measurements as well as the comparably low maturity levels observed in most wells, temperature conditions must have been considerably different in the past, resulting in a spatially confined maturity anomaly. Measurements of dispersed vitrinite show an unusual vertical maturity trend in one of the investigated petroleum exploration wells. Above and below a 500m marl layer vitrinite reflectance levels are consistent with modern, conductively dominated thermal gradients. Between about 1000- 1500 m depth, however, vitrinite reflectance levels are significantly elevated (about 0.6%). This anomaly cannot be explained with one-dimensional conductive or conductive/convective heat transfer models. It is unlikely that the vitrinite contained in the strata is allochthonous, i.e. brought in by alluvial fans from the basin flanks. The thermal anomaly which formed this maturity anomaly must have been hydrothermal in origin, two-dimensional in nature, and persisted long enough to elevate the vitrinite reflectance values within

this unit, yet it must have dissipated before the thermal perturbation would have altered the organic matter below and above the unit.

It is proposed that the maturity anomaly was caused by a transient thermal inversion induced by episodic, lateral flow of hot (130-160°C) groundwater along conductive fractures and bedding planes. Heat flow constraints suggest that fluids must have moved up a vertical feeder fault rapidly from a depth of at least 3.5 km before migrating laterally. To test this hypothesis, a suite of simple, idealized models of groundwater flow, heat transfer, and vitrinite maturation models is presented to determine what transient hydrothermal conditions could have produced the observed thermal anomaly. In these simulations, a single, horizontal aquifer is sandwiched between two less permeable units. The total dimensions of the model are 4x10 km. The elevation of the aquifer is coincident with the position of the observed thermal maturity anomaly in the Rhinegraben. Boundary conditions along the left edge of this aquifer were varied through time to represent the migration of hot fluids to migrate out into the basin. Inflow temperature, horizontal velocity, duration and frequency of flow, and width of the aquifer were varied. The size and shape of the anomaly allows speculations on the duration and magnitude of the transient heat pulse that caused it. Additionally, assumptions on the distance and the position of the feeder system providing the hot fluids can be made. The simulation results indicate that a thermal maturity anomaly could only be produced by a rather restrictive set of hydrothermal conditions. This encompasses a single hydrothermal flow event of 130°C fluid migrating laterally into the aquifer at a rate of 1 m/a for about 10,000 years. The anomaly is spatially confined to near the left edge of the basin. If the flow event lasted longer than 100,000 years, then the maturation anomaly disappears as the lower confining unit approaches steady-state thermal conditions.

Spatially confined temperature anomalies resulting in bell-shaped vertical temperature profiles with inverse gradients are not documented in the northern Upper Rhinegraben today. Yet, the observed maturity anomaly gives evidence of past temperature conditions that caused maturity levels to respond to a transient, short-lived, spatially confined heat pulse. It is possible that such an event occurred about 5 million years ago in response to increases in fault permeability associated with far field Alpine tectonism.