

Brandenburg. Geowiss. Beitr.	Cottbus	Bd. 32/2025	S. 9–30	18 Abb., 1 Tab., 54 Lit.
------------------------------	---------	-------------	---------	--------------------------

Rotliegend Paläomorphologie in Norddeutschland **Paläomorphologische Rekonstruktion der Sedimentverteilung** **im Rotliegend des Südlichen Perm-Beckens im Vergleich zu rezenten,** **ariden Seeablagerungen in Nordafrika, Kalifornien und Australien**

Rotliegend palaeomorphology in northern Germany **Palaeomorphological reconstruction of the sediment distribution** **in the Rotliegend of the Southern Permian Basin in comparison to** **recent arid lake deposits in North Africa, California and Australia**

REINHARD GAST

1 Einleitung

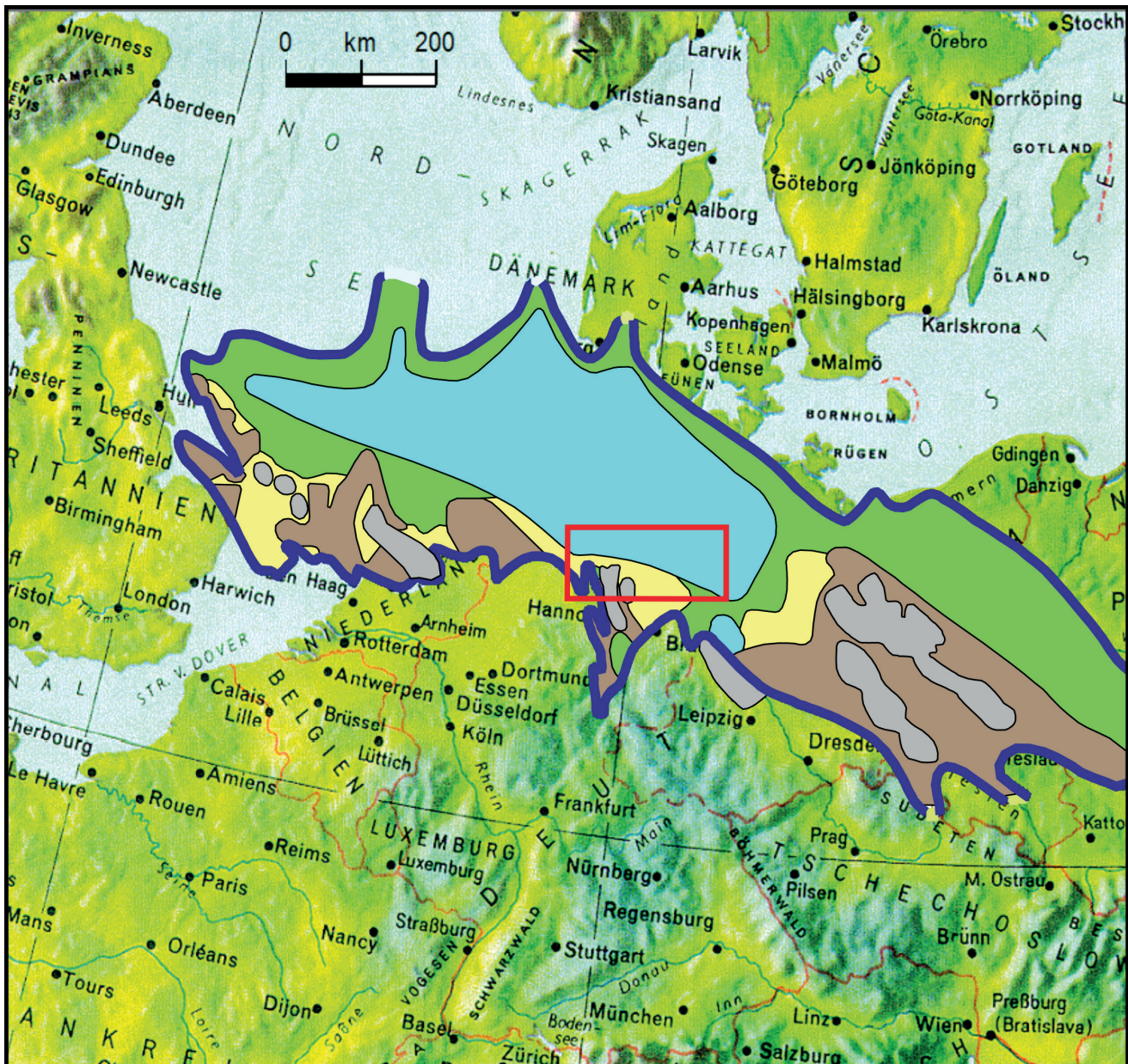
Eine erfolgreiche Rotliegend-Exploration im südlichen Perm-Becken in Norddeutschland (Abb. 1) hängt von der Fähigkeit ab, das Vorkommen von Reservoir-Sanden des Erg-Dünentyps (trockene Wüste) oder des küstenparallelen Reservoir-Sandgürteltyps vorherzusagen. Da die Faziesverteilung innerhalb eines Beckens von der Paläomorphologie und dem Klima gesteuert wird, wurde eine Studie durchgeführt mit dem Ziel, die Paläomorphologie in die Modellierung des Ablagerungsraumes und in die Vorhersage von Lagerstättensanden zu integrieren (GAST 1997). Vor allem die Sandsteine des Küstengürtels sind nicht nur für die Exploration auf Erdgas von sehr großer Bedeutung, sondern könnten auch in Zukunft für die Nutzung von Erdwärme (Geothermie) und zur Lithium-Gewinnung eine große Rolle spielen. Die Lithium-Gehalte könnten wegen des direkten Kontakts mit den Salzseeporenwässern in dieser Zone höher sein als in den landwärtig gelegenen Dünen-sanden. Höher als die Lithium-Gehalte im Rheintal, die bereits gewonnen werden, sind sie auf jeden Fall.

Während der Ablagerung der Oberrotliegend-Sedimente war die Absenkung des Südlichen Perm-Beckens hauptsächlich auf thermische Subsidenz der Kontinentalplatte zurückzuführen, die auf großräumige tektonische Verschiebungen während des Oberkarbons und des Unterrotliegend folgte (BACHMANN & HOFFMANN 1995; GLENNIE, PUGH & GOODALL 1994; ZIEGLER 1990). Durch die Trennung vom offenen Meer zeigt die Sedimentationsgeschichte des Oberrotliegend überwiegende eine Beeinflussung durch aride kontinentale Bedingungen (PLEIN 1978, 1993; VERDIER 1996; VAN WEES et al. 2000; GAST et al. 2010) (Abb. 2, 3).

Tektonisch beeinflusste Perioden während der Geschichte des Oberrotliegend II beschränken sich auf drei Ereignisse, die durch eine geringe Diskordanz zwischen Havel und Elbe-Untergruppe, eine Basalt-Intrusionsphase, mit der eine Störung des zyklischen Musters im Wustrow-Schichtglied verbunden ist, und schließlich die Öffnung des Seeweges zur Zechstein-Ingression durch Rifting dokumentiert sind (GLENNIE & BULLER 1983; GAST & GUNDLACH 2006; LEGLER 2006). Die maximale Ausdehnung des epikontinentalen Beckens betrug etwa 1 500 km in E–W-Richtung und etwa 300 km in N–S-Richtung. Eine absolute Zeitskala für das Rotliegend wurde von MENNING (1995) und MENNING et al. (2022) veröffentlicht.

Eine kontinuierliche Subsidenz eines Sedimentbeckens in einem ariden Klima ist ein ausgezeichnetes Modell, um die Auswirkungen selbst kleiner klimatischer Veränderungen auf die Sedimentation zu untersuchen. Das Untersuchungsgebiet mit dem perennialen Oberrotliegend-Salzsee im Norden und der Randwüste im Süden und Osten ist durch mehrere hundert Öl- und Gasbohrungen in den alten Bundesländern und entsprechend vielen in den neuen Bundesländern gut bekannt. Von den Tiefbohrungen aus den Salzseegebieten in Ostdeutschland ist außerdem viel Kernmaterial vorhanden (MINGRAM 1988; LEGLER et al. 2011). GEBHARDT (1994) hat die Genese der Rotliegend-Salinare beschrieben und auch eine Massenbilanz berechnet, wobei marine Ingressionen eine Rolle gespielt haben, aber von den Brom- und Chlor-Gehalten her auch rein kontinental erklärt werden können.

Der Einfluss klimatischer Veränderungen auf den Oberrotliegend-Seespiegel wurde bereits in den ersten Jahren der Rotliegend-Exploration erkannt (TRUSHEIM 1971; GLENNIE



Redrawn from PLEIN (1996)

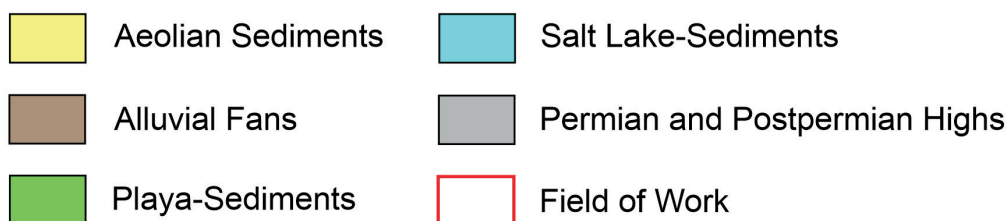


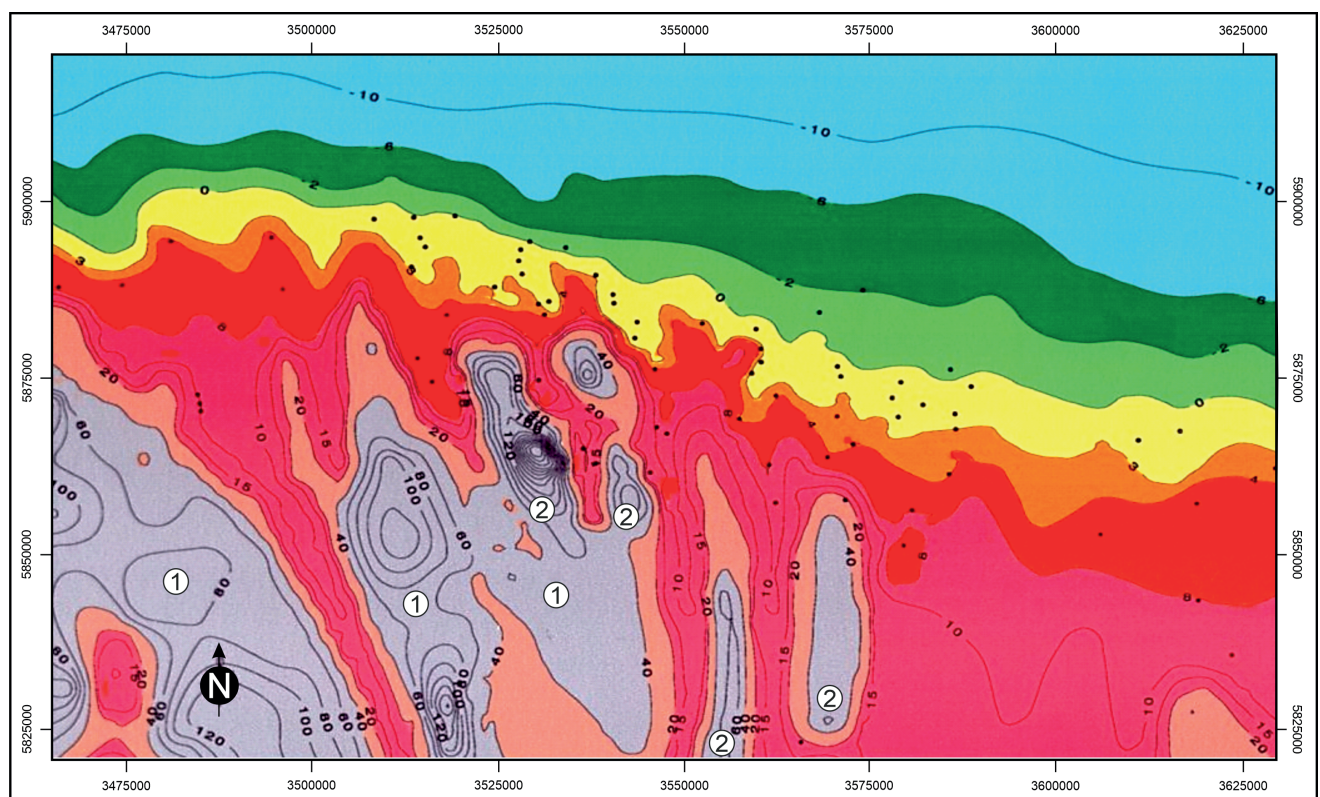
Abb. 1: Übersicht über das südliche Perm-Becken mit den wichtigsten Faziesbereichen im Oberrotliegend. Das Arbeitsgebiet von Abb. 2 liegt in dem Rechteck nördlich von Hannover.

Fig. 1: Overview of the southern Permian Basin with the most important facies areas in the Upper Rotliegend. The working area shown in Fig. 2 is located in the rectangle north of Hanover.



Abb. 2:
Oberrotliegend Dünen im Steinbruch „Sventesius“ bei Bebertal im Flechtingener Höhenzug. Die Sandsteine besitzen immer noch Porositäten von ~10–12 % und Durchlässigkeiten von ~10–30 mD. Die Grainflow-Schichten der Dünen werden als Gehwegplatten verwendet.

Fig. 2:
Oberrotliegend dunes in the ‘Sventesius’ quarry near Bebertal in the Flechtingen mountain range. The sandstones still have porosities of ~10–12 % and permeabilities of ~10–30 mD. The grainflow layers of the dunes are used as pavement slabs.



Facies		Palaeomorphology (m asl.)	
Salzsee/Salt Lake	> -6	Randliche Wüste/Erg Margin	3 - 8
Untere Playa/Lower Playa	-2 - -6	Trockene Wüste/Erg	8 - 20
Obere Playa/Upper Playa	-2 - 0	Schwemmfächer/Alluvial Fan	20 - 40
Küstengürtel/Coastal Belt	0 - 3	Bergland/Mountains	> 40
Sebkhah/Sebkhah	3 - 8		
● Bohrungen/Boreholes	① Carboniferous Highlands	② Volcanic Topography	

Abb. 3: Karte der Paläomorphologie und wichtigsten Fazieseinheiten der Zeitscheibe des niedrigsten Wasserstands im Wustrow-Schichtglied (Sequence Boundary). Die Lage des Gebietes siehe Abb. 1

Fig. 3: Map of the paleomorphology and the most important facies units of the time slice of the lowest water level in the Wustrow stratigraphic unit (Sequence Boundary). See fig. 1 for the location of the area.

1972). Die Prinzipien der klimatisch bedingten Schwankungen eines Seespiegels wurden schon in den frühen geologischen Forschungen, zum Beispiel von WALTHER im Jahre 1900, beobachtet und beschrieben.

In ariden Regionen der Erde gibt es große Schwankungsbreiten der Seespiegel (z. B. extrem mit ca. 300 m für den Great Salt Lake/Lake Bonneville, WALTHER 1900; CURREY 1990). Nicht nur das Ausmaß der Schwankungen kann groß sein, sondern auch die kurzfristigen Schwankungen beim Auffüllen eines Beckens und beim Wiederabsinken des Seespiegels. Der große australische Lake Eyre beispielsweise füllte sich im Winter 1949 und fiel erst 2 Jahre später trocken (KING 1956), wobei er ausgeprägte Strandsand-Bildungen mit Strandhaken hinterließ, die im Luftbild gut zu erkennen sind.

Für großräumige Schwankungen mit Seespiegeländerungen in der Größenordnung von 100 m oder mehr, wie die des Bonneville-Sees, des Salton Sea Basins und des Quaidam-Beckens (CHEN & BOWLER 1986; GAST 1991), sind jedoch in der Regel langfristige klimatische Veränderungen erforderlich.

2 Zyклоstratigraphischer Ansatz als Voraussetzung für Paläomorphologie

2.1 Analyse klimatischer Zyklizität anhand von Bohrlochmessungen und Subsidenzraten

Die Interpretation von Bohrlochmessungen aus Rotliegend-Bohrungen (Gamma-Ray und Sonic), zusammen mit Beobachtungen an Spülproben und Bohrkernen, ermöglichen die Untersuchung der sedimentären Zyklizität in Seen und in Seerandgebieten. In dicht erbohrten Regionen ist die Zyklizität auch in landwärtigen äolischen Abfolgen erkennbar (GAST 1992; KOCUREK 1988, 1996). Sowohl die großräumige als auch die kleinräumige Klimazyklizität zeigt sich am besten in Logs und Bohrkernen von Seerandgebieten, die naturgemäß am stärksten von kleinräumigen Seespiegelschwankungen betroffen sind. Ein schematischer Schnitt nördlich von Hannover durch den Oberrotliegend Salzsee über den Unterrotliegend-Vulkaniten und sein Hinterland ist in Abbildung 4 dargestellt. Er zeigt die sedimentäre Entwicklung des Oberrotliegend von dem Vulkanit an der Basis bis zur Zechsteintransgression.

Die Erhaltung und Auflösung selbst kleinräumiger Milankovich-Zyklen von ca. 20 000 Jahren (MILANKOVITCH 1941) kann in der Tat so gut ausgeprägt sein, dass sie in der Auflösung fast mit Eiskernanalysen der jüngeren Vergangenheit vergleichbar sind (z. B. BERGER et al. 1992; STRASSER et al. 2006). Die Zeitvergleiche sind etwas ungenau, da sich die Periodizitäten im Laufe der Erdgeschichte verlangsamt haben (BERGER et al. 1992).

Aufgrund der größeren Zeitspanne, die abgedeckt wird, und damit der größeren Mächtigkeit der Ablagerungen, können die größeren Zyklen von ca. 100 000 und 400 000

Jahren allerdings meistens besser unterschieden werden als die 20 000 Jahreszyklen (Abb. 5).

Das in Abbildung 5 gezeigte Beispiel stellt eine Bohrung dar, die in einer randlichen Playa-Umgebung liegt und deshalb die Kombination von 20 000, 100 000 und 400 000 Jahres-Zyklizität am besten zeigt.

Infolge der gut etablierten Zyklizität der Oberrotliegend-Sedimente basiert der zugehörige stratigraphische Standard in Deutschland auf der beckenweiten Korrelation von zeitäquivalenten Sedimentzyklen (SCHRÖDER et al. 1995). Ein ähnlicher zyklisch-stratigraphischer Ansatz wurde von LADIPO (1997) für das Oberrotliegend in den Niederlanden veröffentlicht. Eine weitere Methode zur Analyse des Zyklizitätsmusters von Sedimenten ist die von YANG & BAUMFALK (1994) entwickelte automatische Spektralanalyse von Wireline-Logs, die mit den Milankovitch-Zyklen oder biologischen und absoluten Zeitmarkern abgeglichen werden kann.

Die Plausibilität der angewandten klimatischen Zyklizität in den Oberrotliegend-Sedimenten kann überprüft werden, indem ein anderes Zyklusszenario mit zum Beispiel 100 000 statt 400 000 Jahren modelliert wird. Das Ergebnis wäre eine viermal höhere Senkungsrate für die untersuchte Sedimentbeckenfüllung. BORER & HARRIS (1991) verwendeten diesen Ansatz für die Analyse der Subsidenzraten der Yates-Formation des amerikanischen Perm-Beckens. Sie stellten fest, dass eine Rate von 5,2–14,3 cm/1000 a ein realistischerer Wert ist als das Resultat einer sehr viel schnelleren Absenkung, wenn man eine falsche Zyklizität anwenden würde. Die dort gefundenen Raten lassen sich gut mit den hiesigen Subsidenzraten vergleichen, die zwischen 4 cm am Beckenrand und 24 cm/1000 a im Beckenzentrum des norddeutschen Oberrotliegend beobachtet wurden (Abb. 6). Einige Subsidenzraten im Unterrotliegend wurden in Ostdeutschland auf der Basis biostratigraphischer Zonen, teilweise in Gebieten mit aktivem Rifting, berechnet und ergaben Werte zwischen 6,3 cm und 38 cm/1000 a im Tucherer Trog (GAITZSCH 1995).

2.2 Kompaktionsfrage

Die oben genannten Daten lassen alle die Kompaktion nach der Ablagerung unberücksichtigt. In einer salzhaltigen Seeumgebung, in der die Sedimente überwiegend aus tonhaltigen, salz- und gipszementierten Sedimenten bestehen, spielt die Kompaktion jedoch wahrscheinlich nur eine geringe Rolle. Es wird angenommen, dass der Großteil der Setzung oder Entwässerung der Tonsteine sowie die frühe Diagenese-Zementierung nach einigen tausend Jahren nahezu abgeschlossen sind. Aufgrund der sehr frühen Zementierung sind die eingeschalteten Küstensandsteine oft erstaunlich gut erhalten und sicherlich weniger von der Kompaktion betroffen als die äolischen Sandsteine des Erg- und Ergrand-Bereichs. Hier führte die Kompaktion der Oberrotliegend-Sedimente zu einer

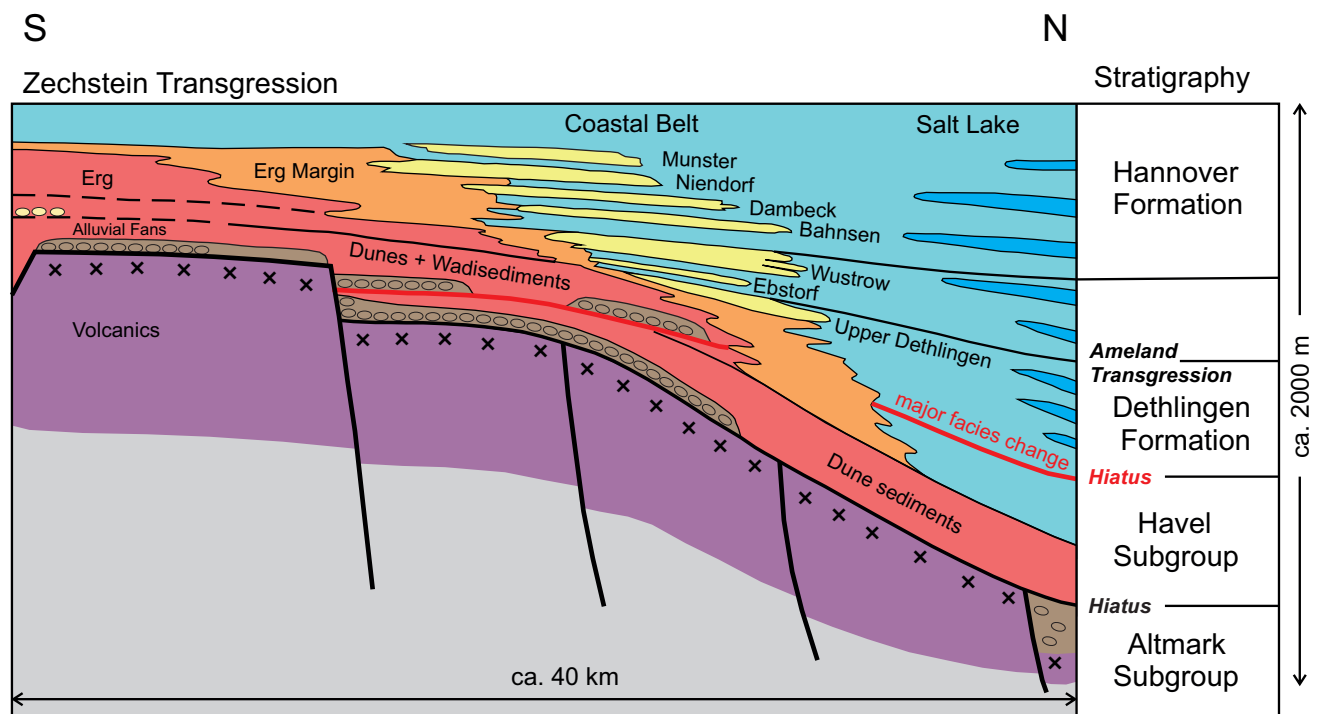


Abb. 4: Vereinfachter Querschnitt des Oberrotliegend-Beckens mit den wichtigsten chronostratigraphischen Grenzen. Die mittlere Beckenrandneigung beträgt ca. 0,35 m/km. Die Lücke zwischen Altmark-Vulkanit und der Havel-Subgruppe entspricht der Mürz-Subgruppe (Oberrotliegend I).

Fig. 4: Simplified cross-section of the Upper Rotliegend Basin with the most important chrono-stratigraphic boundaries. The average basin margin slope is approximately 0.35 m/km. The gap between the Altmark Vulcanite and the Havel Subgroup corresponds to the Mürz Subgroup (Oberrotliegend I).

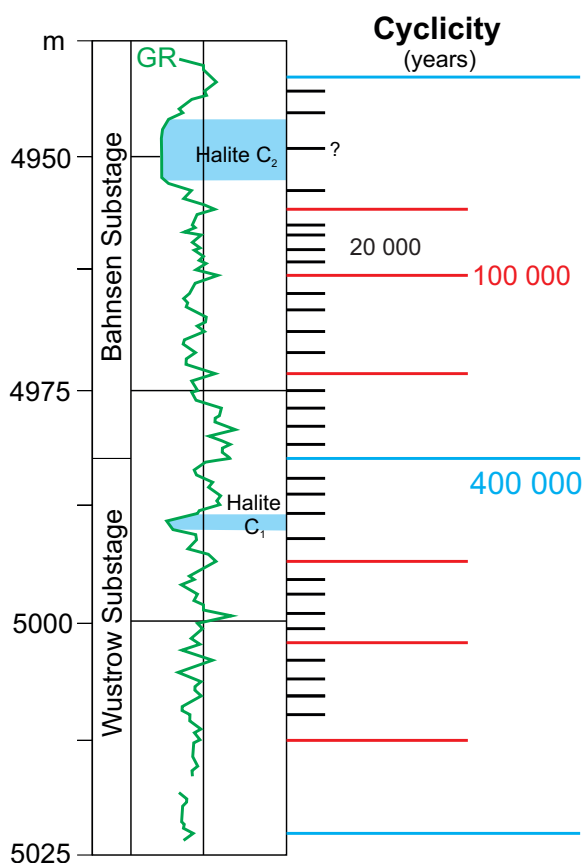


Abb. 5: Gamma-ray-Log einer Beckenrandbohrung im Oberrotliegend mit überwiegend Playa- und Playa-See-Sedimenten. Es zeigt eine Klimazyklizität in der Größenordnung von etwa 400 000, 100 000 und 20 000 Jahren.

Fig. 5: Gamma-ray log of a basin margin borehole in the Upper Rotliegend with predominantly playa and playa lake sediments. It shows a climatic cyclicity in the order of about 400 000, 100 000 and 20 000 years.

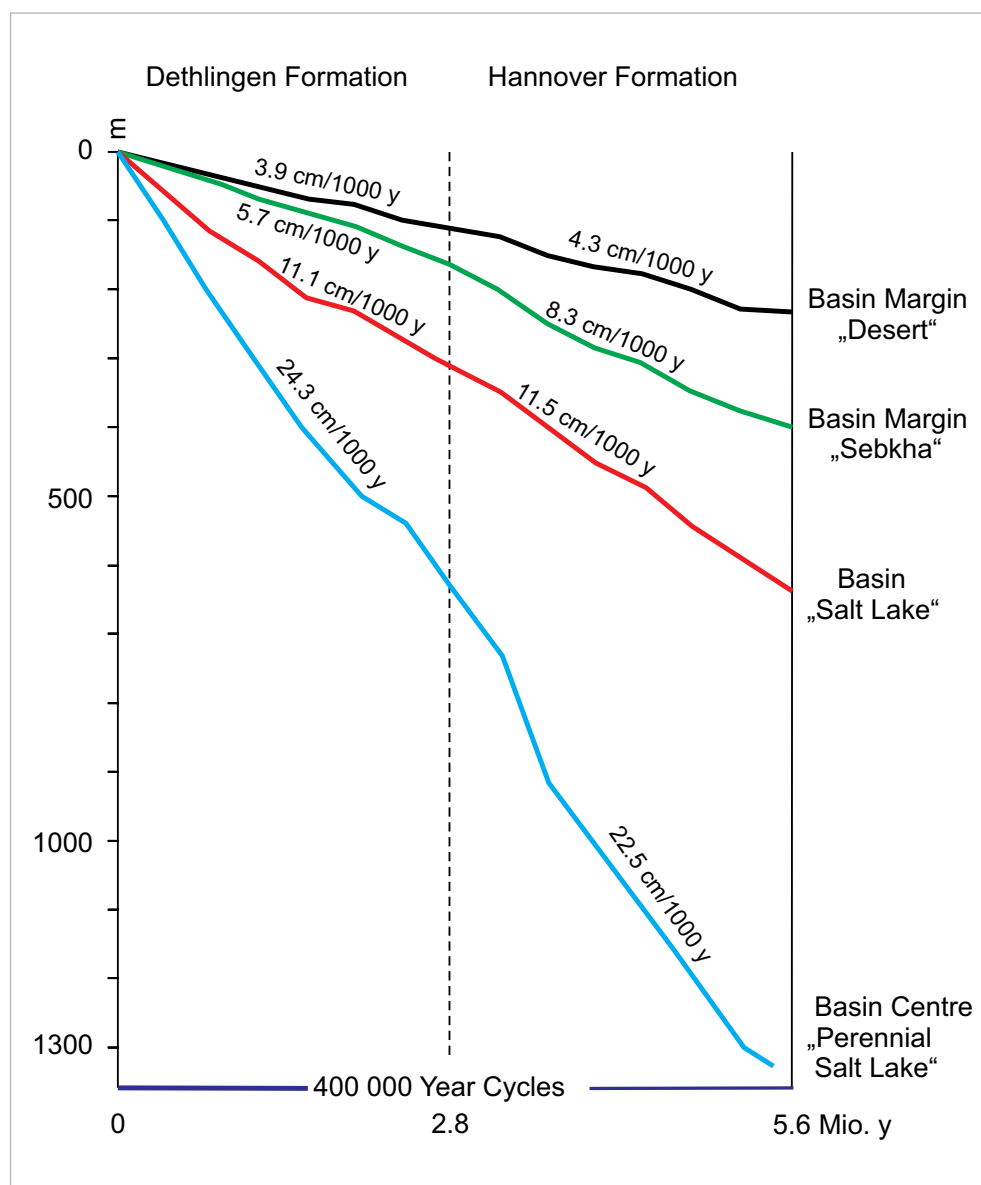


Abb. 6:
Oberrotliegend-
Subsidenzraten von
verschiedenen Stellen des
Oberrotliegend-Beckens.
Die Raten wurden auf
der Grundlage der
Klimazyklizität berechnet,
wobei die Kompaktion
nicht berücksichtigt wurde.

Fig. 6:
Upper red tide
subsidence rates from
different locations in the
Upper Rotliegend basin.
The rates were calculated
on the basis of climatic
cyclicality, whereby
compaction was not taken
into account.

Verringerung der Porosität um 20–30 %, wenn man eine Absenkungstiefe von 3 500 m bis 5 500 m berücksichtigt. Die verbleibenden Porositäten der äolischen Reservoirs erreichen allerdings immer noch hohe Werte von bis zu mehr als 20 %, was mit den Sandsteinen der Küste vergleichbar ist (GAUPP et al. 1993).

3 Methoden der Paläomorphologie-Rekonstruktion und Vergleich mit rezenten Salinarbecken

3.1 Der Akkommodationsraum und die Rekonstruktion von Gefällegradienten

Der Akkommodationsraum bzw. Akkumulationsraum ist definiert als der Raum in einem sich bildenden Becken, der für die Ablagerung von Sedimenten zur Verfügung steht. Er lässt sich am besten abschätzen, wenn die stratigraphische Aufzeichnung hinreichend genau ist

und wenn die Kompaktion der Sedimente berücksichtigt wird. Unter der Voraussetzung, dass die Kompaktion der klastischen Ablagerungen in diesem „Hungerbecken“ (starved basin) nach relativ kurzer Zeit weitgehend abgeschlossen war, kann die Absenkungsrate für jeden Sedimentationszyklus berechnet werden. Nach dem Vergleich der Mächtigkeiten an verschiedenen Bohrlochstandorten können für jede stratigraphische Ebene Hangneigungen abgeleitet werden.

Die Rekonstruktion von Hanggradienten durch BORER & HARRIS (1991) für den nordwestlichen Schelf im amerikanischen Perm-Becken ergab 0,5 m/km und 1,7 m/km für den Hang ins Zentralbecken. Diese Autoren berechneten die Neigungsgradienten mit einer vergleichbaren Methode, die sich ebenfalls auf eine gut etablierte Chronostratigraphie und den Vergleich mit den an verschiedenen Bohrlochstandorten im Becken erhaltenen Sedimentaufzeichnungen stützt.

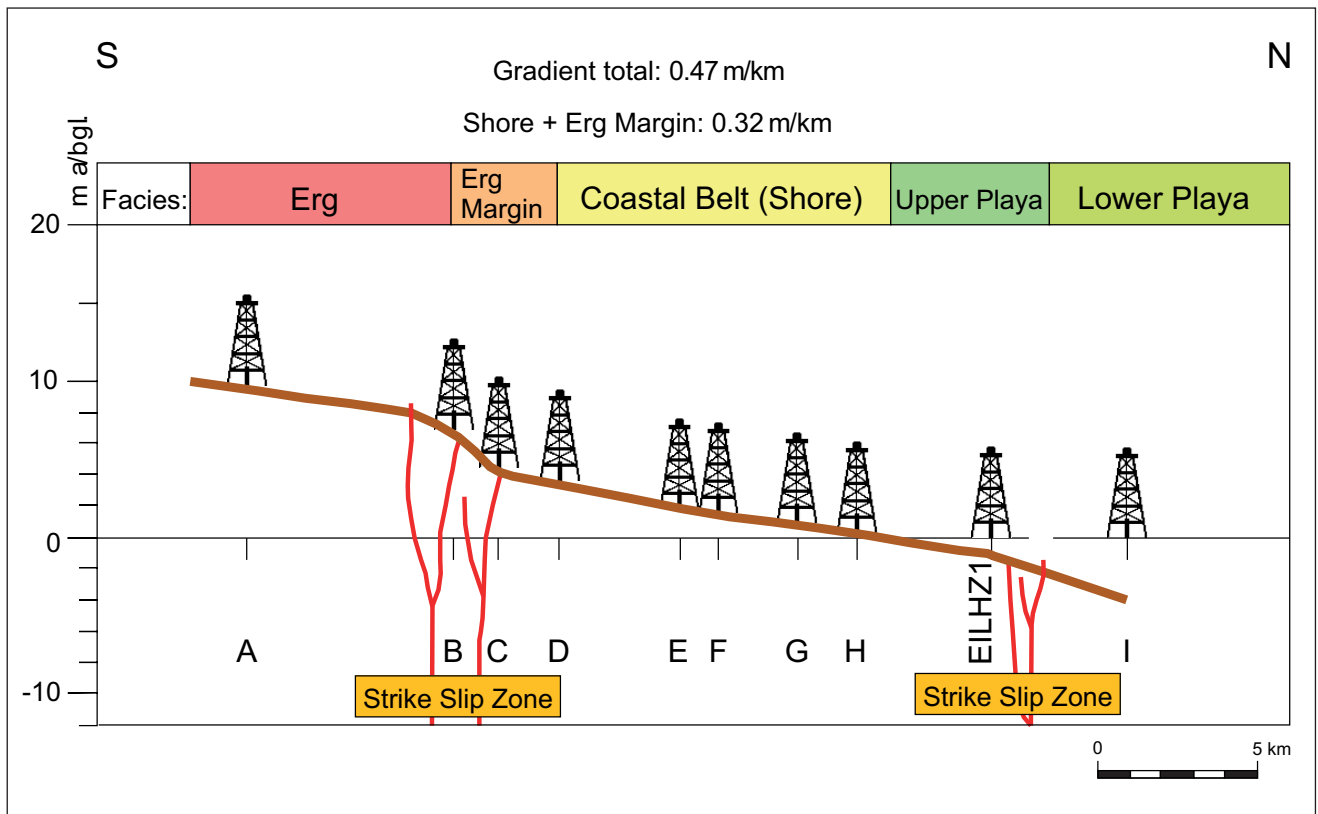


Abb. 7: Paläomorphologischer Nord-Süd-Querschnitt entlang der Grabenachse des Schneverdinger Grabens nördlich von Hannover.

Fig. 7: Palaeomorphological north-south cross-section along the ditch axis of the Schneverdinger Graben north of Hanover.

Beispiele für das südliche Perm-Becken werden hier für den Wustrow-Zyklus gegeben, der den wichtigsten Speichersandstein im Oberrotliegend darstellt (Abb. 7, 8–10). Die Gradienten wurden auf der Grundlage von Karten berechnet, in denen die Konturlinie -10 m unter dem Basisniveau in den beckenzentralen Gebieten und die Konturlinie +10 m über dem Grundwasserspiegel (Basisniveau) im Hinterland dargestellt ist.

Die größten Steigungen, die zwischen 1,1 und 1,4 m/km lagen, wurden im Allgemeinen entlang von Profilen gemessen, die sich von alten karbonischen oder vulkanischen Höhenlagen in das Becken hinein erstrecken. Die geringsten Gradienten wurden für die Gebiete in der Nähe der niederländischen Grenze mit 0,3 m/km entlang eines Paläo-Ästuars, 0,25 m/km am nördlichen Ende der Hessischen Senke in Niedersachsen und 0,2–0,5 m/km am östlichen Ende des ostdeutschen Oberrotliegend-Teilbeckens berechnet.

In den Gebieten, in denen die Wustrow-Sandstein-Lagerstätten eine hervorragende Lagerstättenqualität aufweisen, sind die Hangneigungen im Allgemeinen höher und liegen zwischen 0,3 m/km entlang der Grabenachsen (Gasfelder Söhlingen und Munster) und 1,3–1,4 m/km auf den etwas höher gelegenen Flächen zwischen den großen Gräben (Felder Nord-Hannover und Soltau). Die Häufung besser sortier-

ter Reservoir-Sandsteine entlang steilerer Hänge wurde auch von BORER & HARRIS (1991) diskutiert. Die besten Lagerstättentrends sind entlang der nördlichen Ränder der Horste zu beobachten, die die großen Grabensysteme trennen.

3.2 Vergleich mit rezenten Salzseen

Der Vergleich mit rezenten Salzseen zeigt eine ähnliche Verteilung von Faziesgürteln um die Seen und auch vergleichbare Gradienten des Grundwasserspiegels. Die enorme Größe des meist perennialen Oberrotliegend-Sees (GAST 1991), der mit seiner Länge von 1 500 km und 300 km Breite einem epikontinentalen Meer ähnelt, wird deutlich, wenn man das 50 x 35 km kleine Satellitensalzbecken Ostdeutschlands in Abb. 8 mit dem nur ca. doppelt so großen Chott el Djerid (100 x 70 km) in Tunesien vergleicht. (Abb. 9)

Der im Vergleich zu den niedersächsischen Gebieten umfangreichere Süßwassereintrag in dem ostdeutschen Teil des Oberrotliegendbeckens lässt sich an der größeren Entfernung des ersten Salzvorkommens vom Ufer ablesen. Die gleiche Beobachtung wurde in der Nähe der niederländischen Grenze gemacht, wo ebenfalls ein höherer Anteil an Süßwasserzuflüssen mit fluvialen Sedimenten in den Oberrotliegend-Sandsteinen angetroffen wurde.

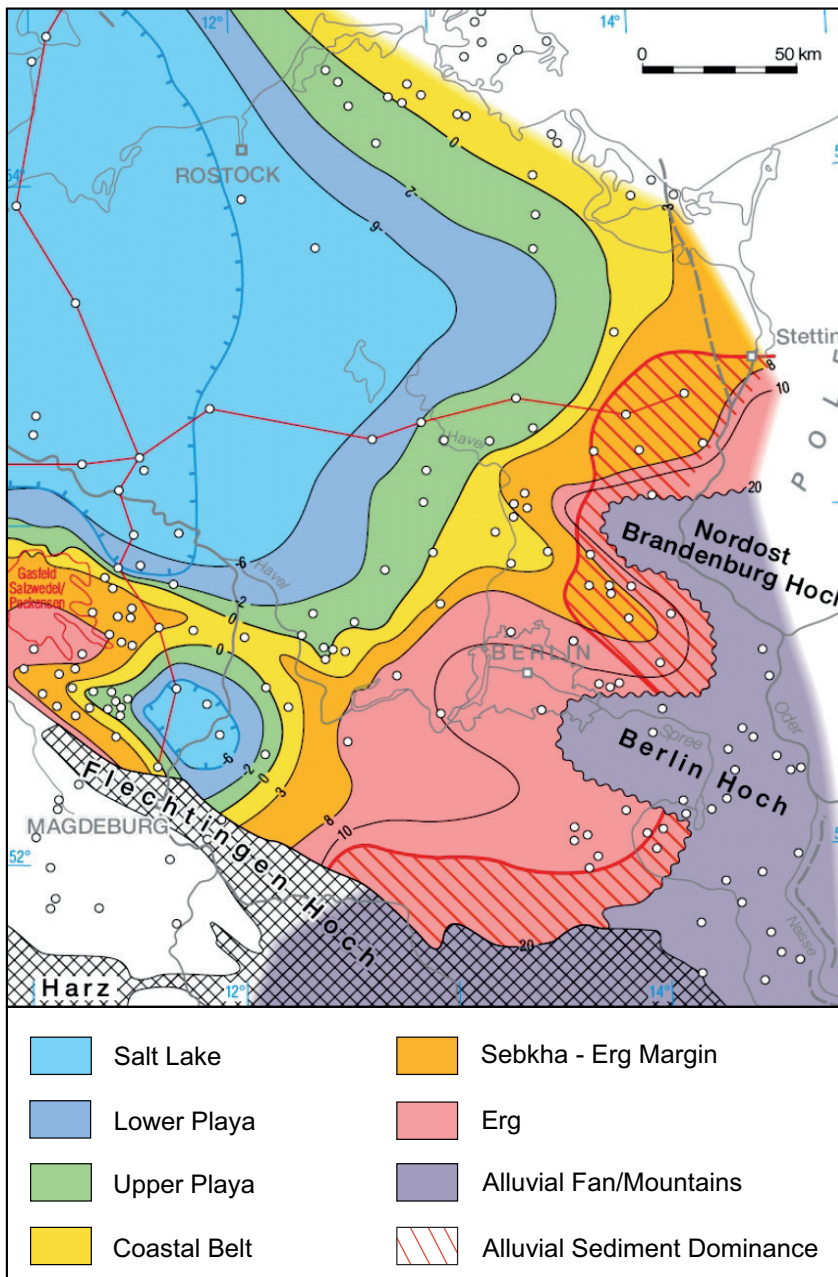


Abb. 8:
Paläomorphologie und Faziesverteilung des Oberrotliegend Wustrow-Sandsteins im Oberrotliegend Ostdeutschlands. Die Isolinien mit positiven Werten geben die Höhen über dem Basisniveau (Grundwasserspiegel) und die negativen Werte Tiefen unter dem Seespiegel an (Jahreshöchststand des Salzsees). Bohrungslokationen des Altmark-Feldes wurden ausgelassen (aus GAST et. al 1999). In KATZUNG ab 1983 (z. B. KATZUNG 1995) wird das Berlin Hoch als Ostbrandenburg-Schwelle und das Nordost Brandenburg Hoch als Oderbruch-Schwelle bezeichnet.

Fig. 8:
Palaeomorphology and facies distribution of the Upper Rotliegend Wustrow Sandstone in the Upper Rotliegend of eastern Germany. The isolines with positive values indicate the heights above the base level (groundwater level) and the negative values indicate depths below the lake level (annual maximum level of the salt lake). Borehole locations of the Altmark field were omitted (from GAST et. al 1999). In KATZUNG from 1983 onwards (e.g. KATZUNG 1995), the Berlin High is referred to as the East Brandenburg Threshold and the Northeast Brandenburg High as the Oderbruch High.

3.2.1 Beispiel Chott el Djerid

Die Fazieskarte Abbildung 9 des Salzseengebiets vom Chott el Djerid in Tunesien zeigt eine Region mit schneller rezenter Subsidenz bei noch bestehender Hebung des Atlasgebirges im Norden des Salzsees und daher viel höheren Hangneigungen als im Oberrotliegend-Becken. Dennoch eignet sich dieser Salzsee als Vergleich, weil der Gefällegradient überwiegend nur die Breite eines Faziesgürtels bestimmt. Die Verteilung der Gesteinsschichten an der Oberfläche wird jedoch überwiegend durch die Höhe des Bodens bzw. der Oberfläche über dem Grundwasser bzw. dem Basisniveau bestimmt. Man beachte, dass die Ablagerung der Erg-Sedimente bei ca. 8 m über dem Grundwasser beginnt (mdl. Mitt. GLENNIE 1999). Die Größe des Chott el Djerid entspricht dem kleinen Satelliten-Salzbecken nördlich des

Flechtingen Hochs von Abbildung 8. Ein Querschnitt über den Salzsee in Abbildung 10 verdeutlicht die tektonische Situation mit steilem Anstieg zum Atlasgebirge und kleinen Randbecken wie dem Chott el Gharsa parallel zur Auf-faltung des Gebirges. Ein ehemaliger höherer Wasserstand im Becken ist in fossilen Uferwällen (beach ridges) aus der letzten Eiszeit und dem hohen Wasserstand danach erhalten.

3.2.2 Beispiel Tschadsee

Der Tschadsee mit einer rezenten Größe von 240 x 200 km ist in seiner Flächenausdehnung eher als der Chott el Djerid mit der Fläche des ostdeutschen Teils des Oberrotliegend-Sees vergleichbar. Nach ROGNON (1979) bedeckte der See bei maximaler Ausdehnung im Holozän (vor 6000 Jahren) eine

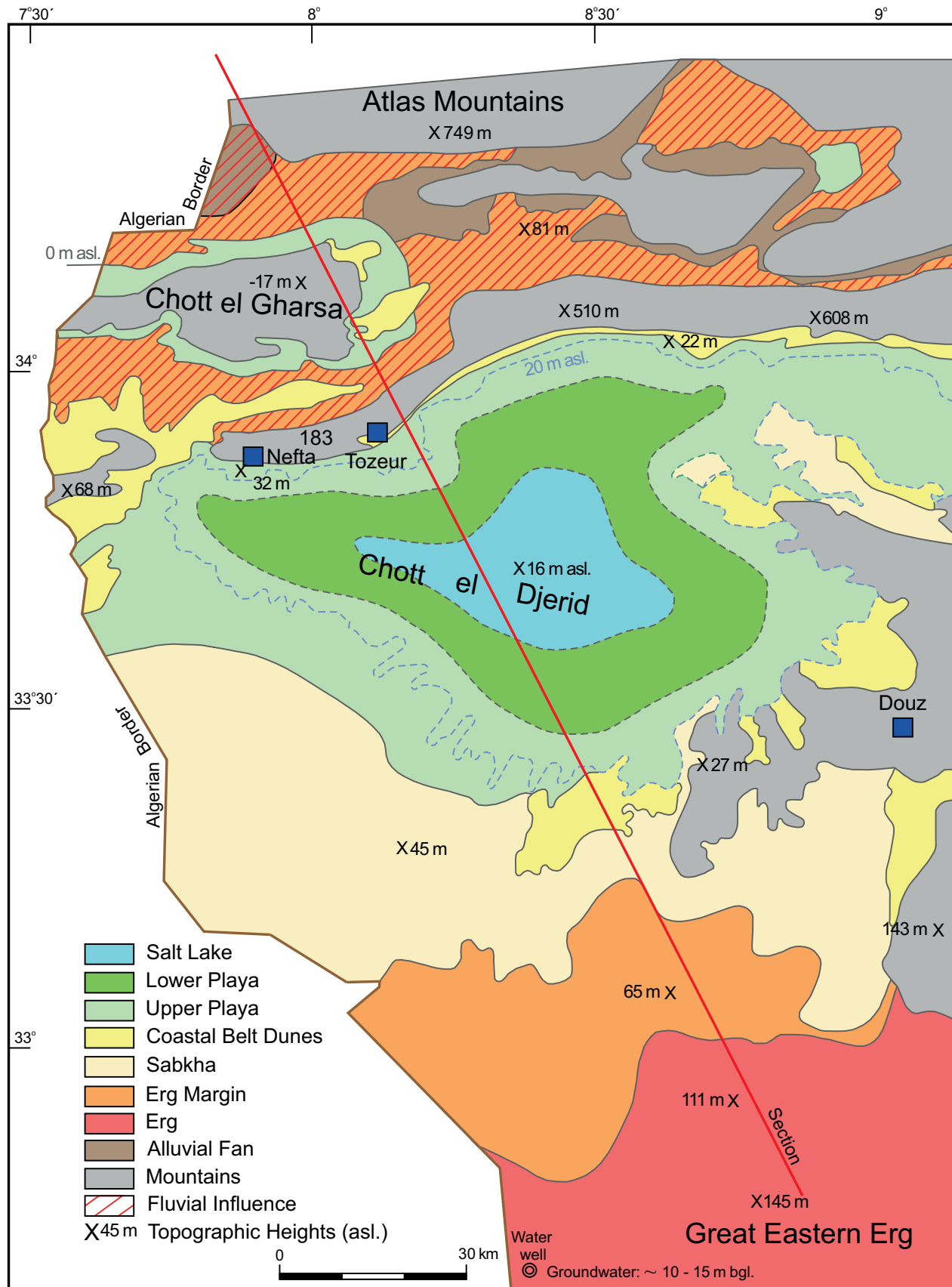


Abb. 9: Fazieskarte des Salzseengebiets von Chott el Djerid in Tunesien. Kleinere küstennahe Dünen (Sebkha- Erg Margin-Bereich) sind in Gelb und die trockenen Dünen des „Great Eastern Erg“ im Süden in Rot dargestellt.

Fig. 9: Facies map of the salt lake area of Chott el Djerid in Tunisia. Smaller dunes near the coast (Sebkha-Erg Margin areas) are shown in yellow and the dry dunes of the 'Great Eastern Erg' in the south in red.

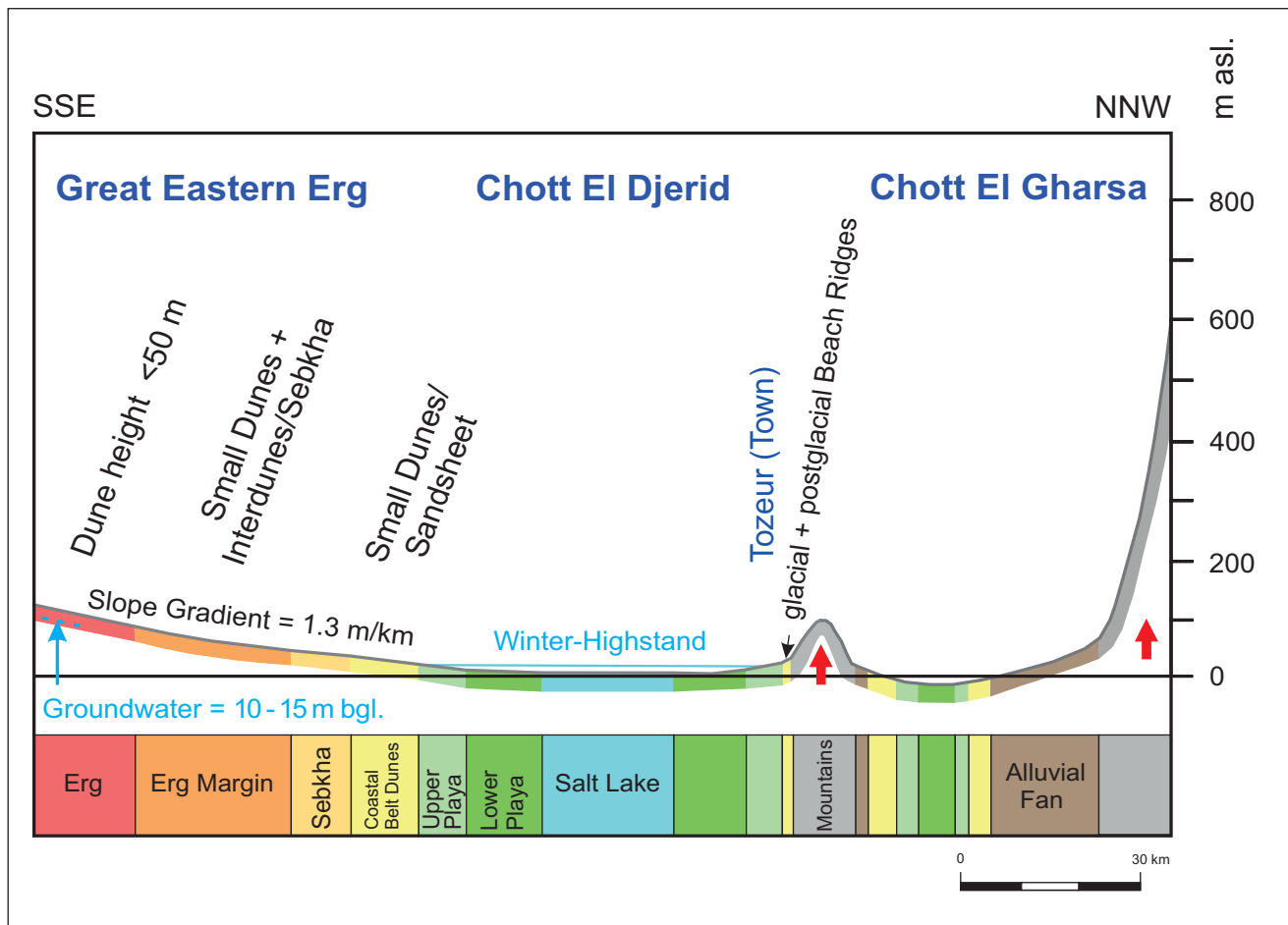


Abb. 10: Morphologischer Querschnitt mit der Verteilung der rezenten Fazies im Verhältnis zum Grundwasserspiegel in der Region Chott el Djerid in Tunesien. Unterhalb der „trockenen“ Dünen beträgt der Abstand $> ca. 8\text{ m}$. Ein Hinweis auf ehemalige höhere Wasserstände im Becken ist in fossilen Strandwällen (beach ridges) erhalten.

Fig. 10: Morphological cross-section showing the distribution of recent facies in relation to the groundwater table in the Chott el Djerid region in Tunisia. Below the 'dry' dunes, the distance is $> approximately 8\text{ metres}$. An indication of former higher water levels in the basin is preserved in fossilised beach ridges.

Fläche von etwa $850 \times 400\text{ km}$, was den Oberrotliegend-Teilbecken von Nord- und Ostdeutschland zusammen entspricht. Auch der Tschadsee ist ein Beispiel für einen See, der durch einen kontinuierlichen Zufluss von Süßwasser beeinflusst wird. Dort, wo im Süden der Fluss Chari mit einem Delta in den Tschadsee mündet, leben die Menschen vom Fischfang, während am nördlichen Ende des Sees gleichzeitig Salz abgelagert wird. Ein ehemaliges wassergefülltes Unterbecken des Tschadsees ist heute trotz seiner geringeren topografischen Höhe (90 m tiefer als der Tschadsee) ausgetrocknet. Die vom Salzhandel berühmte Oase Bilma liegt mitten der großen Sandwüste nördlich vom Salzsee (Abb. 11).

3.2.3 Beispiel Salton Sea Basin, Kalifornien

Die Region Salton Sea war bis vor etwa 4,4 Millionen Jahren ein Teil des Golfs von Kalifornien. Eine Anhäufung von Sedimentfracht des aus östlicher Richtung quer zum Tal einmündenden Colorado River trennte schließlich den

Golf und die Region Salton Sea vom Pazifischen Ozean. Im Laufe der Zeit wurde das Becken, in dem sich der heutige Salton Sea befindet, im Laufe der Jahrtausende von mindestens 5 Seen eingenommen. Die Karte der Salton Sea Region (Abb. 12) zeigt auf der weniger steilen Seite die typischen Paläo-Strandsande und Hinterlanddünen, deren Sand aus den Strandgürteln des einst viel größeren Sees stammt. Die Strandsand-Ablagerungen vom letzten dauerhaften Hochstand von ca. 1770 nach Christus werden heute abgebaut.

Der heutige Salton Sea entstand zwischen 1905 und 1907, als der Colorado River durch die Umleitungskanäle des Bewässerungssystems im Imperial County brach. Es handelt sich heute um einen flachen, salzhaltigen, endorheischen See, der direkt an der San-Andreas-Verwerfung im Imperial Valley liegt. Der Querschnitt des Salton Sea-Beckens in der Abbildung 13 verdeutlicht die Asymmetrie eines Halbgrabens.

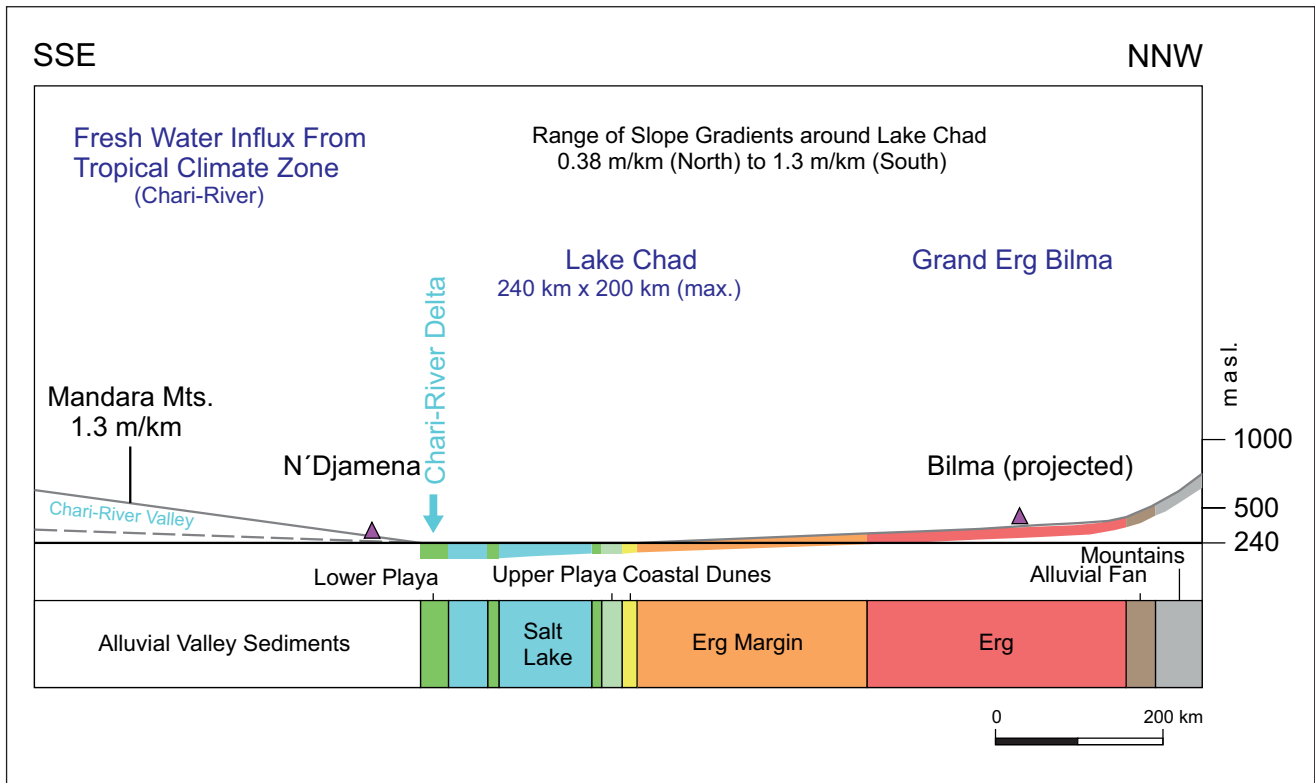


Abb. 11: Tschadsee: Morphologischer Querschnitt mit der Verteilung der rezenten Fazies. Der Schnitt quert das Tschadbecken vom subtropischen Süden bis in den sehr trockenen Sahara-Norden.

Fig. 11: Lake Chad: Morphological cross-section showing the distribution of recent facies. The section crosses the Chad Basin from the subtropical south to the very dry Sahara in the north.

3.2.4 Beispiel Lake Eyre, Australien

Aus geologischer Sicht liegt Lake Eyre im Lake Eyre Basin, einem ausgedehnten flachen epikontinentalen Becken mit einer Fläche von über 1,2 Millionen Quadratkilometern. Das Becken selbst ist ein riesiges Sedimentbecken, das sich über Teile von Queensland in Südastralien und das Northern Territory erstreckt. Wahrscheinlich existiert das Lake Eyre-Becken seit dem Mesozoikum (Quelle: https://www.flickr.com/photos/patrick_k59/48372059862/; Abb. 14).

Lake Eyre lässt sich von seiner Fläche noch am ehesten mit dem Salzsee des Oberrotliegend vergleichen, ist aber von seiner Topographie viel flacher, obwohl die gesamte Sedimentfüllung mehr als 400 m beträgt. Als Beispiel wurde er hier aufgenommen, weil er die Ausformung von Strandbildungen mit Kliffbildungen, Nehrungshaken und Stranddünen besonders eindrucksvoll zeigt (KING 1956; MAGEE et al. 1995; Abb. 15). Diese Sedimente werden trotz der seltenen Wasserführung des Salzsees (im Mittel alle 8–10 Jahre) und der ausgeprägten Deflation im geologischen Profil erhalten. Auch Playa-Gebiete, die ephemer überflutet werden, wurden dokumentiert. MAGEE et al. (1995) haben die Geschichte des Lake Eyre mit Hilfe von Thermoluminiszenz über die letzten 130 000 Jahre verfolgt. Demnach war seine perenniale Phase vor 3 000–

4 000 Jahren beendet, die von ephemeralen Bedingungen abgelöst wurde. Ähnlich wie im Oberrotliegend sind auch im Lake Eyre Salzlagen erhalten.

4 Sedimentologischer Ansatz der Paläomorphologie des Oberrotliegend

4.1 Kartierungsmethode

Fazieskarten stellen die Faziesverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt dar und können nur dann korrekt erstellt werden, wenn ein zeitlich-stratigraphisches Rahmenwerk zur Verfügung steht.

Um die Sedimentfazies aller relevanten Reservoir-Sandsteine des Oberrotliegend in einer neuen, zuverlässigeren Weise zu kartieren, wurden alle vorhandenen Faziesbeschreibungen aus Bohrkernen und Logs mit Paläogradientendaten kombiniert, um Paläomorphologiekarten zu erstellen. Ausgewählte Konturen der Morphologie einer Zeitscheibe (am maximalen Regressionsniveau oder an der Sequenzgrenze nach VAIL et al. (1977) stellen die Faziesübergänge bzw. deren meist unscharfe Grenzen dar.

Als Bezugsebene für die Karten wurden in Seegebieten die Winterhochstände verwendet. An Land wurde der je-

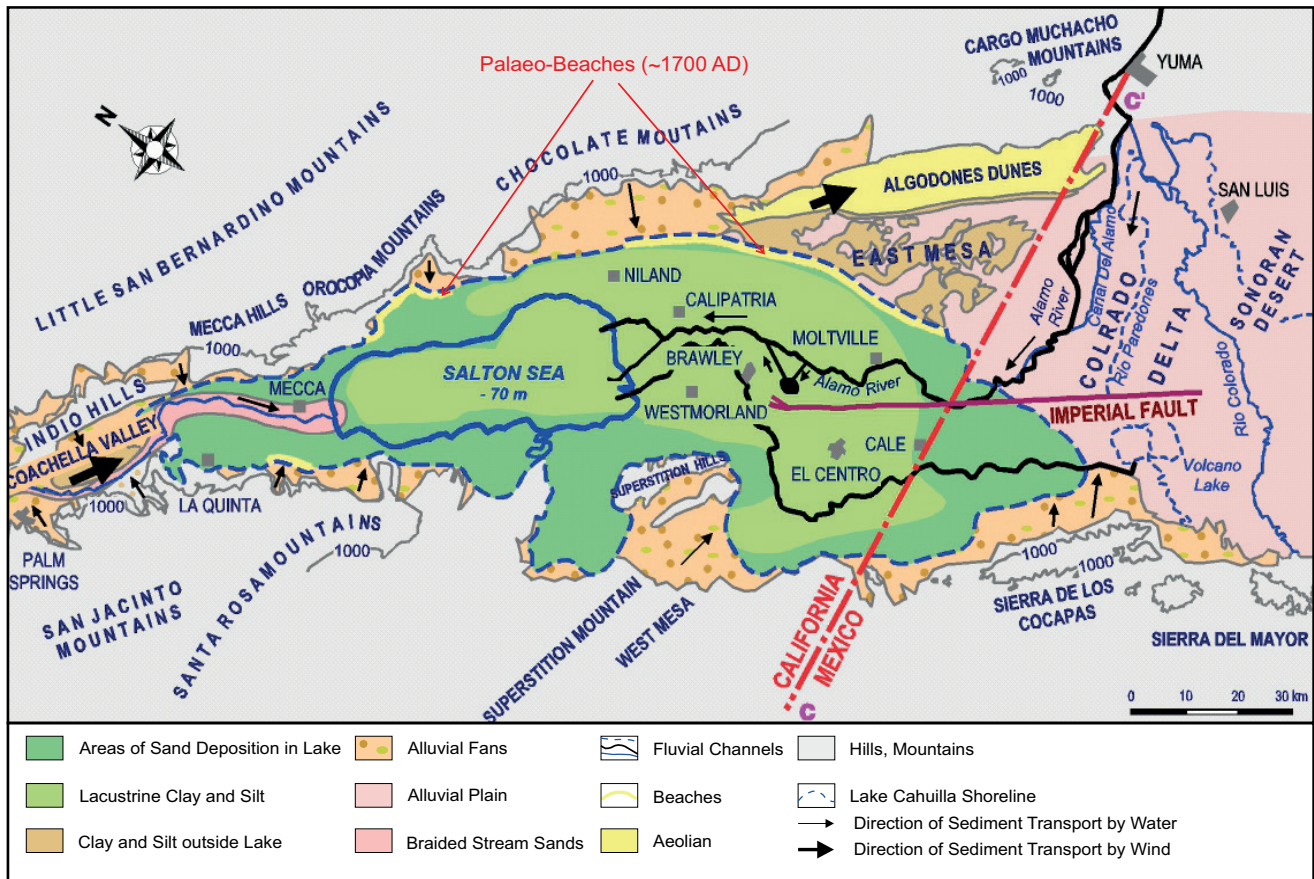


Abb. 12: Salton Sea-Region mit Paläo-Strandsanden und Hinterlanddünen, deren Sand aus den Strandgürteln des einst viel größeren Sees stammt. Die Strandsandablagerungen von ca. 1770 n. Chr. werden heute abgebaut.

Fig. 12: Salton Sea region with palaeo beach sands and hinterland dunes whose sand originates from the beach belts of the once much larger lake. The beach sand deposits from around 1.770 AD are mined today.

weilige Grundwasserspiegel (Basisniveau) berücksichtigt. Dabei ist zu beachten, dass die Höhen über dem Grundwasserspiegel nicht unbedingt mit den topographischen Höhen (die höher sein können) identisch sind, da der Grundwasserspiegel bis zu einem gewissen Grad der Morphologie folgt (Beispiel Chott el Djerid Abb. 9, 10). Folglich wird die Paläomorphologie des Oberrotliegend wahrscheinlich unterschätzt, und die Paläosteigungen könnten in der Nähe des Hinterlandes steiler sein. Im Seegebiet besteht dieses Problem nicht, da seine Morphologie in Bezug auf den Seespiegel der Winterhochstände beschrieben wird.

Um eine Verbindung zwischen den salzhaltigen Seesedimenten des Beckenzentrums und den angrenzenden Playa-Sedimenten mit den topographischen Daten herzustellen, wurde die Fazies in verschiedene Typen unterteilt, die von HARDIE, SMOOT & EUGSTER (1978) definiert wurden und seitdem Standard in der Faziesbeschreibung von salinaren Seen sind (Tab. 1).

Beginnend in salzseezentralen Bereichen mit schon früh im Oberrotliegend abgelagerten Salzlagen eines perennialen Sees folgen landwärts Playa-Mudflats (untere Playa), Playa-Sandflats (obere Playa) und schließlich küstenparal-

lele Strandsandbereiche, die je nach Steigung oder Gefällegradient auch ausfallen und direkt in landwärtige Sebkhä übergehen können.

Die marginale Playa-Sandflat- oder obere Playa-Fazies, die in der während des Winterhochwassers nur unregelmäßig überfluteten Region abgelagert wird, wird zwischen 0 und -2 m unter der Basis kartiert. Die untere Playa-Fazies erstreckt sich bis zu einer Tiefe von ca. -6 m unter dem Seespiegelhochstand. Unterhalb von -6 m könnte Salz in der geologischen Schichtenfolge erhalten geblieben sein, da die Schichtung der Salzsole in dieser Wassertiefe nur in geringem Maße durch Wellenschlag gestört wird und die tieferen Bereiche des Salzsees selten vollständig austrocknen (GAST 1991).

Landwärts des Salzsees wurden vier Faziestypen mit morphologischen Höhenlagen verbunden und entsprechend kartiert (Tab. 1).

Zwischen 0 und 3 m über der Basis wurden die Sedimente des Paläoküstengürtels kartiert. Der Küstengürtel selbst besteht aus einer gemischten Abfolge von meist äolischen Ufersanden (Küstendünen), Sebkhä-Sanden und oberen Playa-Tonsteinen, aber auch aus Strandsanden, die beson-

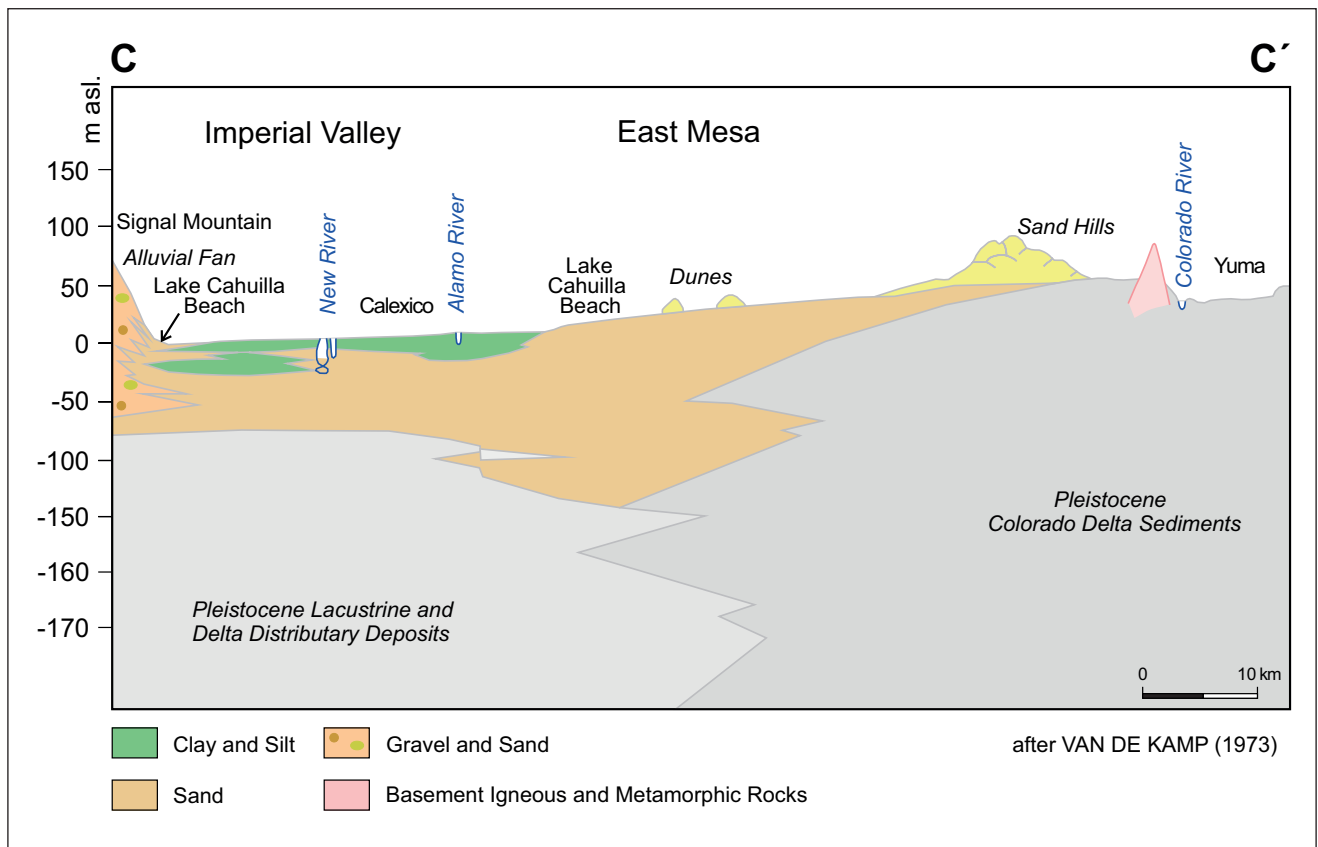


Abb. 13: Schnitt durch das asymmetrische Becken (Halbgraben) der Salton Sea-Region im Imperial Valley von Kalifornien. Auch auf der steilen Seite kann man Strandwälle kartieren, die aus der Hochstandsphase des 18. Jahrhunderts stammen.

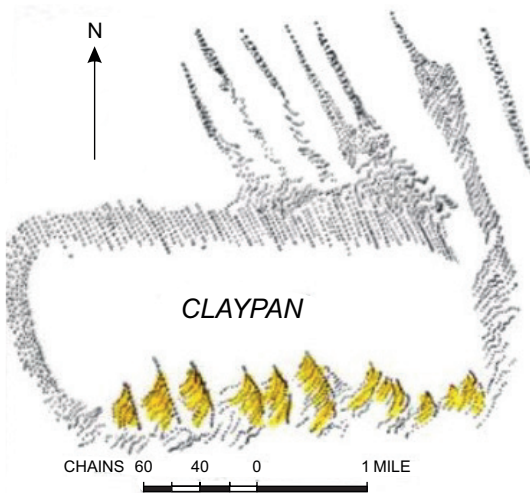
Fig. 13: Section through the asymmetrical basin (halfgraben) of the Salton Sea region in the Imperial Valley of California. Beach ridges dating from the 18th century highstand phase can also be mapped on the steep side.



Abb. 14: Strand- und Strandwallbildung während einer Hochwasserphase im Lake Eyre, die nur alle Jahrzehnte vorkommt, aber in Bohrkernen vergangener Epochen ebenfalls nachgewiesen sind (Kati Thanda, Foto: PATRICK KAVANAGH, 26.06.2019; https://www.flickr.com/photos/patrick_k59/48372059862/; Lizenz: cc-by-2.0)

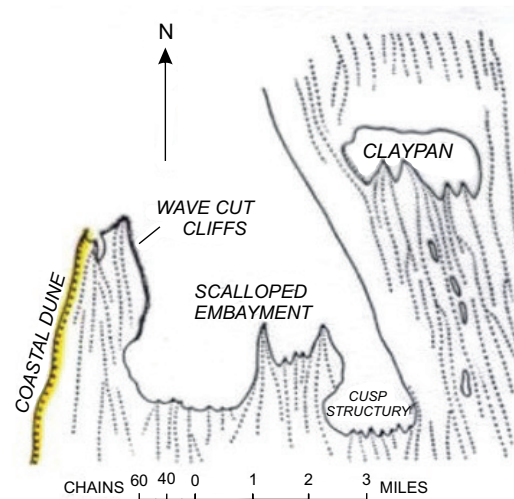
Fig. 14: Beach and beach ridge formation during a flood phase in Lake Eyre, which only occurs every decade, but is also documented in drill cores from past epochs (Kati Thanda, photo: PATRICK KAVANAGH, 26.06.2019; https://www.flickr.com/photos/patrick_k59/48372059862/; license: cc-by-2.0)

DIAGRAMS SHOWING TOPOGRAPHIC EXPRESSION OF LAKE AND DUNE EVOLUTION UNDER THE INFLUENCE OF WIND AT LAKE EYRE NORTH



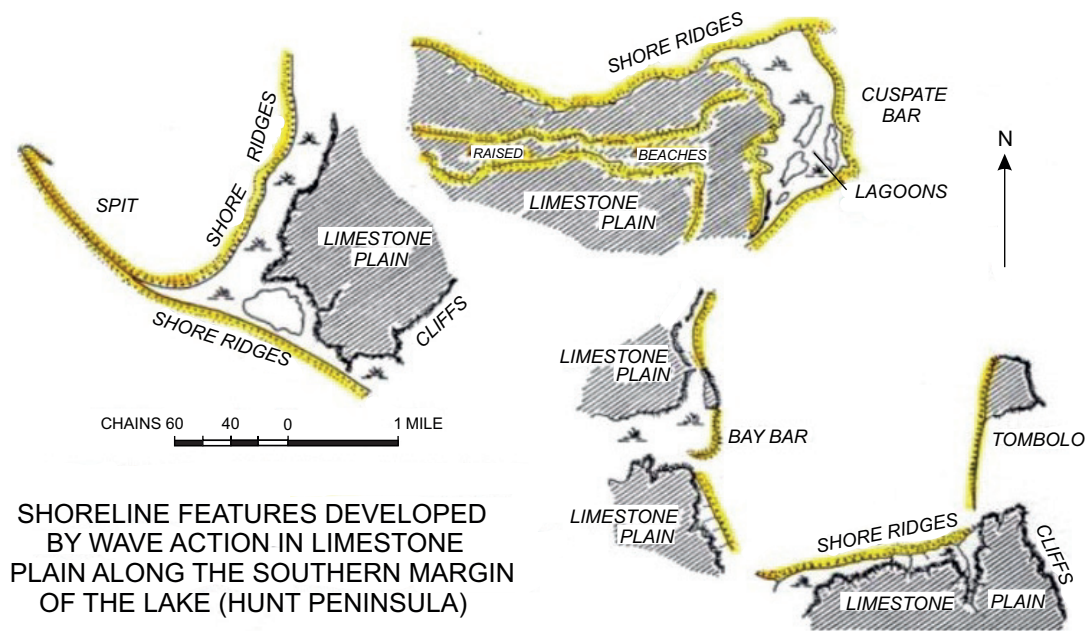
EARLY STAGE IN THE FORMATION
OF THE LONGITUDINAL DUNE AND
SHORELINE CUSPATE STRUCTURE
IN DRIFTING SAND

NEAR LAT. 29°00' S. Long 159° 15' E.



SHORELINE FEATURES DEVELOPED
BY DRIFT IN SANDY DESERT ALONG
THE EASTERN MARGIN OF THE LAKE

LAT. 28°20' S. LONG. 137°40' E.



SHORELINE FEATURES DEVELOPED
BY WAVE ACTION IN LIMESTONE
PLAIN ALONG THE SOUTHERN MARGIN
OF THE LAKE (HUNT PENINSULA)

Redrawn after KLEIN (1996)

Abb. 15: Küstenformen von der Nordseite und der Südseite des Lake Eyre. Hochstandsphasen haben jeweils typische Sedimentformen hinterlassen (KING 1956).

Fig. 15: Shoreforms from the north and south sides of Lake Eyre. Highstand phases have left behind typical sedimentary forms in each case (KING 1956).

Höhenlage in m	Fazies
> -6	Salzsee (Salt Lake), meist feingeschichtete Seetone und Salzlagen, seltener Flaserschichtung
-2 – -6	Tiefere Playa (Lower Playa), tonige, meist gestörte Lagen von Ton- bis Siltsteinen mit Flaserschichtung
0 – +3	Küstensandsteine (Coastal Belt), Strandsandablagerungen, Küstendünen, feuchte Sandebenen
+3 – +4	Sebkha, sandige bis tonige Sedimente mit Flaserschichtung und wenigen Trockenrissen, hoher Anhydrit- und Calcit-Gehalt
+4 – +8	Erg Margin (randliche Wüste), kleine Dünen aus schlecht sortierten Sanden, äolisch dominierte Sanddünen, Flaserschichtung, Trockenrisse, hoher Anhydrit- und Calcit-Gehalt im Porenraum
+8 – +20	Erg (zentrale Wüste), größere Dünen, Sand- bis Steinebenen, Interdünen mit teilweise tonigeren Sedimenten und Trockenrissen
+20 – +40	Alluviale Schwemmfächer (Alluvial Fans)
> +40	Hügel, Berge (Mountains)

Tab. 1: Paläomorphologie eines Salzseebeckens mit Angabe der Faziesverteilung in Relation zur Höhenlage bzw. zur Tiefe des Salzsees (eigene Arbeit)

Tab. 1: Palaeomorphology of a salt lake basin showing the facies distribution in relation to the altitude or depth of the salt lake (own results)

ders gute Lagerstätteneigenschaften besitzen. Wenn sie örtlich nicht näher untergliedert werden können, könnte man diesen Sedimentationsraum auch als feuchte Sandebene (wet sandflat) bezeichnen, welche im Gegensatz zu den trockenen Sandflats der Wüstengebiete im Landesinneren steht. Die Tabelle 1 fasst diese Ergebnisse zusammen.

Die Qualität der Dünen am Seeufer, die besser sortiert sind als die Dünen im Binnenland (AHLBRANDT 1979), macht sie zu Küstendünen, die vor ihrer Konservierung einer aquatischen Sortierung unterzogen wurden. Entsprechend zeichnen sich die in dieser Zone abgelagerten Sandsteine durch ihre gute Sortierung aus, die vermutlich größtenteils das Ergebnis aquatischer Aufarbeitung ist. Durch ihre spezielle, vom Salzsee beeinflusste Chlorit-Diagenese hat der Sandstein Porositäten von bis zu 20 % bewahrt (GAST, GESSNER & GUNDLACH 1999). Diese Sandsteine sind nicht nur für die Exploration auf Erdgas von sehr großer Bedeutung gewesen, sondern könnten auch in Zukunft für Geothermie und Lithium-Gewinnung eine große Rolle spielen. Die Lithium-Gehalte dürften wegen des direkten Kontakts mit den Salzseeporenwässern in dieser Zone höher sein als in den landwärtig gelegenen Dünensanden.

Die Erg-Margin-Fazies mit normalerweise schlecht sortierten Sandsteinen ist ab ca. 3 bis 8 m über dem Basisniveau (Grundwasserspiegel) anzutreffen, eine Zone, die deshalb noch stark von Kapillarverdunstung und damit früher Gipszementierung geprägt ist und nur selten gute Reservoir-Eigenschaften aufweist.

Trockene äolische Fazies eines Erg-Milieus mit teilweise hervorragenden Reservoir-Eigenschaften werden ab ca. > 8 m über dem Grundwasser angetroffen (z. B. Great Erg Südtunesien; mdl. Mitt. GLENNIE). Diese morphologische Einteilung der Sandsteinfazies erwies sich als hilfreich für das Verständnis der Verbreitung der Oberrotliegend-Speichergesteine.

Eine besonders gute Übersicht über rezente Dünensedimente und zur geologischen Vergangenheit sowie zum Einfluss der Ablagerungsorte und der Morphologie auf die Reservoirqualität haben GLENNIE & HURST (2007), RODRIGUEZ-LOPEZ et al. (2014) und FRYBERGER, HERN, & JONES (2017) gegeben. Als eine für das Rotliegend wichtige Beobachtung erwies sich die Einlenkung der Winde in Grabenrichtung, was die Ausrichtung und Anhäufung von Dünensedimenten stark beeinflusst hat. Eine frühzeitige Rekonstruktion der paläomorphologischen Situation hätte in diesem Fall sicherlich einige Fehlbohrungen verhindert.

Die letzte Faziesgruppe der Kartierungen umfasst Schwemmfächer und Hochländer oberhalb von ca. 20 m NHN. Um einen Eindruck von der Morphologie der Paläohöhen zu erhalten, die aus Hügeln des Karbons und vulkanischen Plateaus des Unterrotliegend bestehen, wurde die Differenz zwischen der Ablagerungsgrenze der kartierten Sequenz und dem Niveau der Oberrotliegend- oder Zechstein-Transgressionen gemessen und mit dem Ausmaß der Erosion verglichen, das sich zum Beispiel aus den tertiären bis quartären Hoggar-Bergen in der zentralen Sahara ergibt. Im Hamwiede-Gebiet nörd-

lich von Hannover zeigten die Bohrergebnisse zum Beispiel, dass die Zechsteintransgression den „Hamwiede-Vulkanberg“ erst im Zechstein (Staßfurt-Karbonat, Ca₂) überflutet hat.

4.1.1 Berechnung des Sand-/Ton-Verhältnisses aus Gammaray-Logs

Entlang von Profilen, die senkrecht zur Beckenachse verlaufen, wurde das Sand-/Ton-Verhältnis für den Wustrow-Zyklus auf der Grundlage von 1/200 skalierten Gammastrahlenprotokollen mit einem 40 %igen GR-Cut Off bestimmt.

Die Ergebnisse wurden mit der Gesamtmächtigkeit des Zyklus und dem rekonstruierten Paläogefälle verglichen (Abb. 16). Ausgeprägte Veränderungen des Sand-/Ton-Verhältnisses stimmen mit dem Übergang von Faziesgürteln überein, die anhand von Kernbeschreibungen ermittelt wurden, sowie mit Trends von Amplitudenveränderungen, die auf der seismischen 3D-Interpretation basieren. Diese Amplitudenänderungen trennen Bereiche mit unterschiedlichen Porositätsbereichen, von denen man annimmt, dass sie für bestimmte Faziestypen charakteristisch sind.

Im Allgemeinen sind die höchsten Sandanteile in äolischen Gebieten vom Typ Erg und Erg-Margin (randliche Wüste)

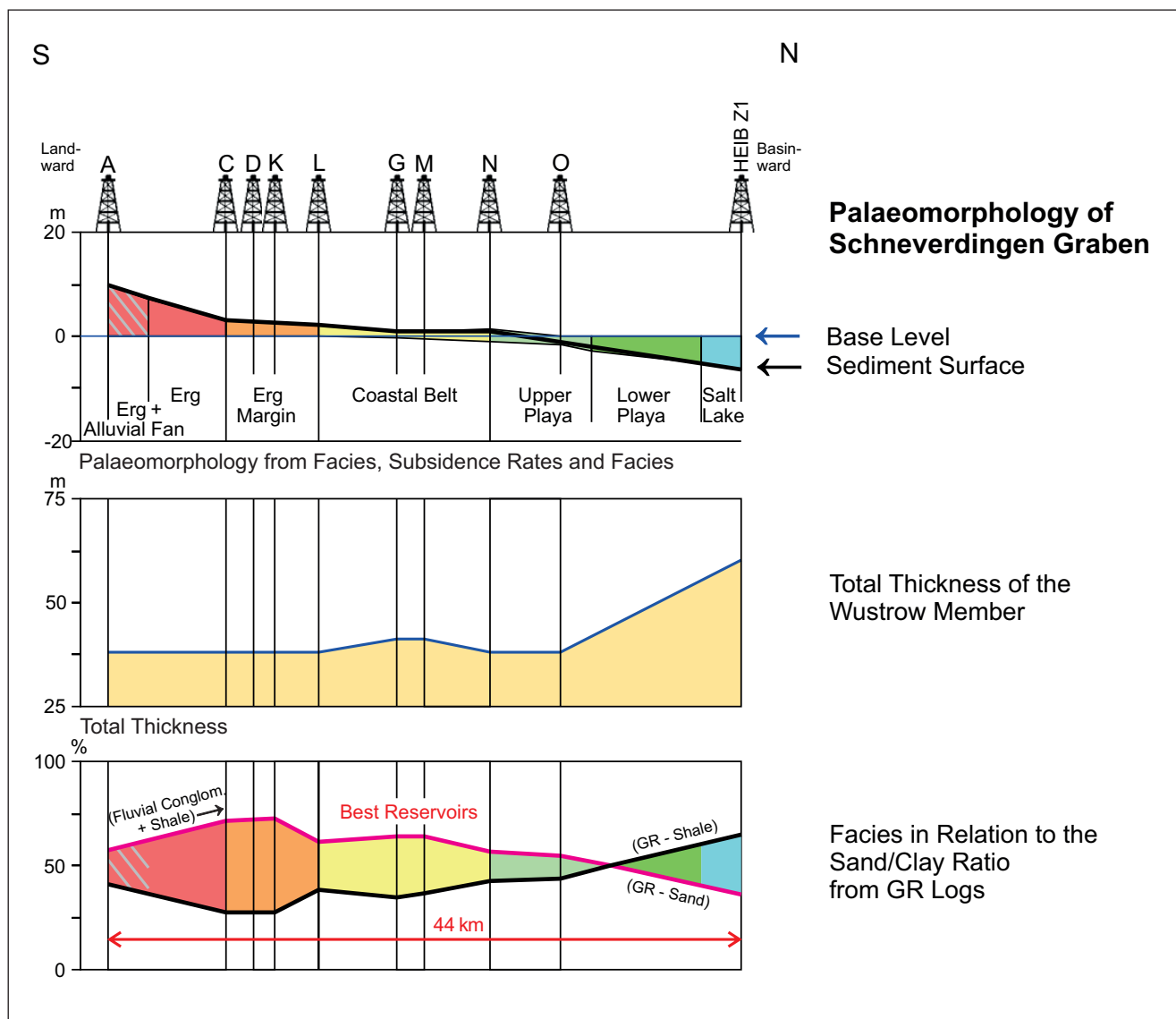


Abb. 16: Der obere Teil zeigt einen weiteren paläomorphologischen Schnitt zur Zeit der Wustrow Sequenzgrenze (Sequence Boundary). Darunter ist die Gesamtmächtigkeit des Wustrow-Zyklus dargestellt und unten das Sand-/Ton-Verhältnis aus Gammaray-Logs, was den Zusammenhang zwischen der Faziesdefinition und dem Sand-/Ton-Verhältnis verdeutlicht.

Fig. 16: The upper part shows another palaeomorphological section at the time of the Wustrow Sequence Boundary. Below is the total thickness of the Wustrow cycle and below the sand/clay ratio from gammaray logs, which illustrates the relationship between the facies definition and the sand/clay ratio.

zu beobachten. In diesem Fall (Abb. 16) führt jedoch der zunehmende Anteil fluviatiler Konglomerate (höhere Gammastrahlenwerte) im Süden zu einem sinkenden Sand-/Ton-Verhältnis (Bohrung A).

Der Punkt auf dem Diagramm, an dem die GR-Sand-Linie die Ton-Linie kreuzt und der Anteil des Tons mehr als 50 % beträgt (s. Abb. 16), bestimmt den Übergang vom Playa-Sandflat zum Playa-Mudflat. Die Zunahme der Gesamtdicke zwischen Playa-Sandflat und Playa-See ist das Ergebnis einer schnelleren Absenkung in den beckenzentralen Bereichen im Vergleich zum Hinterland. Da der vorliegende Abschnitt parallel zur Schneverdingen Grabenachse verläuft, ist die Mächtigkeit des Wustrow-Zyklus relativ stabil.

Die besten Reservoirqualitäten wurden in einem küstenparallelen Sandgürtel gefunden, der aus äolisch und aquatisch sedimentierten Sandsteinen mit eingelagerten dünnen Playa-Sebkha-Lagen besteht und somit eine Umgebung mit einem etwas geringeren Sandstein-Anteil darstellt. Der Übergang von den Sandsteinen des Küsten-Sandgürtels in den Bereich des Playa-Sandflats ist subtil und lässt sich nur schwer ausschließlich anhand des Sand-/Ton-Verhältnisses bestimmen. Ausnahmen bestehen dort, wo entlang von Blattverschiebungen eine Art Geländestufe entstanden ist und den eigentlichen Strandsaum schmaler werden ließ (Abb. 7).

4.1.2 Diskussion der Interpretation des „Basisniveaus“ (Grundwasserspiegels) und Rekonstruktion der Gradienten aus der Fazies

Die Paläomorphologie des Hinterlandes des Oberrotliegend-Beckens wird von vulkanischen und karbonischen Hochlagen geprägt. Zur Zeit der Zechstein-Transgression wurde die vorhandene Topographie in kurzer Zeit überflutet. Die geschätzten Wassertiefen im Zentrum des Beckens reichen bis zu mehreren hundert Metern (GLENNIE & BULLER 1993; GAST 1995). Diese schnelle Überflutung impliziert, dass der Beckenboden des Oberrotliegend-Beckens wahrscheinlich unter dem Meeresspiegel lag, vergleichbar mit der Situation am Toten Meer. Die Karbonat-Faziesverteilung der ersten beiden Evaporitzyklen im Zechstein (GÖTHEL 2020) des Zechstein-Zyklus lässt das vorbestehende Oberflächen-Relief des Rotliegend als sehr ausgeprägt erkennen. Durch Oolithe belegte Untiefen auf ehemaligen vulkanischen Unterrotliegend- und Karbon-Hochflächen (Gaslagerstätten des Oldenburger Raumes) und Hangfazies entlang der alten Böschungen und schließlich Beckentone in unmittelbarer Nähe, zeigen zumindest in einigen Regionen eine hohe Hangneigung an.

Das Gesamterelief des südlichen Perm-Beckens zur Zeit der Zechstein-Transgression wird auf 300 m geschätzt (BITZER 1996). Die maximale Wassertiefe im Oberrotliegend wurde vom gleichen Autor auf 150 m berechnet, so dass die Oberfläche eines Oberrotliegend-Sees 150 m unter dem Meeresspiegel liegen müsste.

Ein weiterer Ansatz zur Rekonstruktion von Hangneigungen ist das Gleichgewichtsprofil eines Beckenrandes, der sich durch Erosion und Sedimentation allmählich ausbildet, unabhängig vom Ausmaß der Absenkung des Beckens oder dem Anstieg der Hebungsgebiete (z. B. SIEVER 1988).

Paläogradienten können auch rekonstruiert werden, indem die Lage des Basisniveaus im Verhältnis zum Sedimenttyp an der Oberfläche geschätzt wird. Der Wert 0 m stimmt beispielsweise mit den Sedimenten der Paläoküste überein, und die Trockendünen einer Erg-Umgebung entwickeln sich am besten bei ca. > 8 m über dem Grundwasser (Großer Erg Südtunesien; mdl. Mitt. GLENNIE). Die sich daraus ergebende Neigung gibt nur den Mindestneigungswinkel an, da der Grundwasserspiegel mit dem Bodenniveau ansteigt. Seine Zuverlässigkeit bleibt daher auf küstennahe Gebiete beschränkt. Die Bedeutung, die ein fluktuierender Grundwasserspiegel auf die Sediment-Ablagerungstypen auf der Oberfläche hat, wird auch von LEGLER et al. (2011) betont. In dieser Arbeit wird ein Schnitt aus dem äolisch dominierten Hinterland des Altmark-Gasfeldes in das Salinarbecken des Oberrotliegend beschrieben und detailliert analysiert.

4.2 Beispiel Wustrow-Schichtglied (Member)

Als Beispiel für die Paläotopographie und die damit verbundene Faziesverteilung ist das Wustrow-Schichtglied (Member) an der Sequenzgrenze bzw. dem maximalen Regressionsniveau im Bereich Ostdeutschlands dargestellt (Abb. 8). Die Karte zeigt die verschiedenen Typen von Ablagerungsmilieus entlang des Randes des großen Oberrotliegend-Salzsees und seines Hinterlandes.

Südlich und östlich des Sees befanden sich Hochebenen bzw. ein Bergland, auf denen kein Wustrow-Sandstein abgelagert wurde. Von hier aus wurden Schwemmfächer in die Täler und in den Oberrotliegend-Salzsee geschüttet. Die Berghänge waren von Dünenfeldern oder äolischen Sandflächen umgeben, die hangabwärts in die Erg-Randfazies und schließlich in Sebkha und Küstensandflächen übergingen (Abb. 17).

Für eine Korngrößenstudie, die zum Ziel hatte, die Sedimenttypen des Wustrow-Sandsteins mit Hilfe einer Clusteranalyse statistisch valide zu analysieren, wurden mehr als 2 000 Proben gemessen und die Ergebnisse an rezenten Proben geeicht. Dabei ergab die Sortierung das signifikanteste und am leichtesten zu verstehende Resultat (Abb. 17, 18; GAST, GESSNER & GUNDLACH 1999).

5 Seismischer Interpretationsansatz

Ohne die Einbeziehung des aus der 2D- und insbesondere der 3D-Seismik abgeleiteten Detailstrukturen wären die paläomorphologischen Karten viel gröber und daher weniger hilfreich bei der Lokalisierung der Reservoirfazies. Die paläomorphologische Karte von Ostdeutschland (Abb. 8)

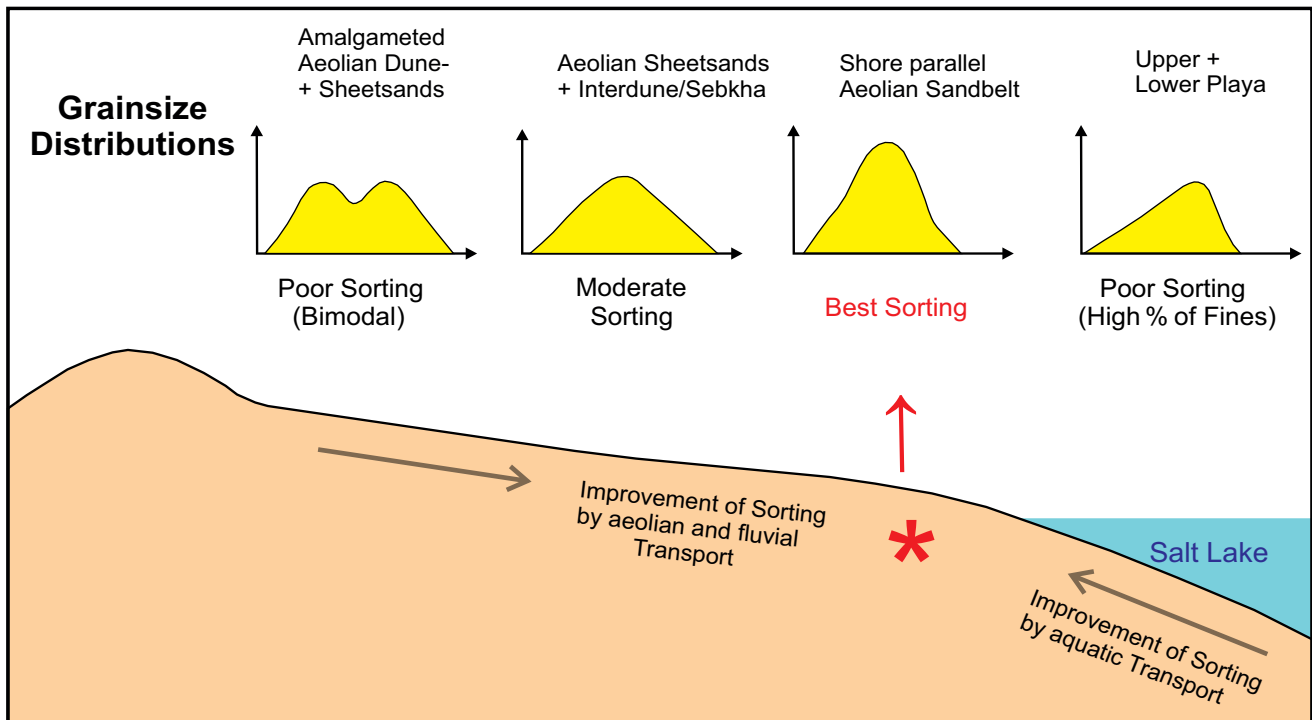


Abb. 17: Einfluss der paläomorphologischen Situation auf die Korngrößenverteilung und damit die Reservoirqualität eines Sandsteins. Die Daten stammen aus mehr als 2 000 Korngrößenanalysen von Bohrkernen des Wustrow-Sandsteins und betreffen die Zeitlinie der Sequenzgrenze (SB = Sequence Boundary; Quelle: GAST et al. 1999).

Fig. 17: Influence of the palaeomorphological situation on the grain size distribution and thus the reservoir quality of a sandstone. The data originate from more than 2000 grain size analyses of drill cores of the Wustrow Sandstone and relate to the time line of the sequence boundary (SB = Sequence Boundary; source: GAST et al. 1999).

ist ein Beispiel für eine Übersichtskarte, in der nur die größten syndementär aktiven Strukturelemente des Beckens berücksichtigt sind.

In den wirtschaftlich attraktiveren Gebieten wurde die Kartierung unter Berücksichtigung aller verfügbaren Informationen aus seismischen Daten wesentlich detaillierter durchgeführt. Dazu gehörten nicht nur die syndementären aktiven Störungssysteme, sondern auch die Verteilung seismischer Attribute (z. B. Amplitudenanomalien). Die seismische Inversion erwies sich als hilfreich, um küstennahe Sandstein-Vorkommen oder äolische Sedimenttrends zu umreißen.

Paläomorphologische Karten können bei der Exploration auch dazu verwendet werden, um einige Fallstricke bei der seismischen Interpretation zu vermeiden. In einigen Gebieten wurden seismische Amplitudenanomalien durch Impedanzkontraste zwischen schiefrigen Sedimenten und Vulkaniten verursacht, oder in anderen Beispielen wurden Amplituden durch Tonsteine über Salzschieben im Becken verursacht, oder lokale Anomalien wurden fälschlicherweise als gute Sandstein-Reservoirs interpretiert und führten zu Fehlbohrungen.

6 Schlussfolgerung

Der traditionelle Ansatz der Fazieskartierung anhand von Bohrkernen und Bohrlochmessungen und Bohrklein (Cuttings) sollte durch die rekonstruierte Paläomorphologie ergänzt werden. Sie kann jedoch nur dann erfolgreich sein, wenn ein chronostratigraphischer Rahmen die Grundlage für den Ansatz bildet. In dem Sedimentationsraum des Oberrotliegend-Beckens und seines Wüsten-Hinterlandes erwies sich die Milankovich-Zyklicität vor allem der Salzseeablagerungen und ihres Hinterlandes im Gebiet des südlichen Perm-Beckens als der beste Weg, eine hochauflösende Stratigraphie zu erstellen.

Die Paläomorphologie einer Zeitscheibe kann mit Hilfe mehrerer sich ergänzender Methoden rekonstruiert werden. Dazu gehört im Hinterland des Beckens die Analyse der Höhe über dem Basisniveau (Grundwasserspiegel) für verschiedene Wüsten-Sedimenttypen. Außerdem die Berechnung der Hangneigungen des Sedimentbeckens durch eine Analyse der Klimazyklicität und schließlich die Abschätzung des Erosionsbetrags auf den umliegenden Paläohochlagen.

Um die Plausibilität solcher Berechnungen zu überprüfen, erwies sich der Vergleich mit der Morphologie moderner Äquivalente in ariden Binnenbecken wie Chott el Djerid, Tschadsee und Lake Eyre als hilfreich.

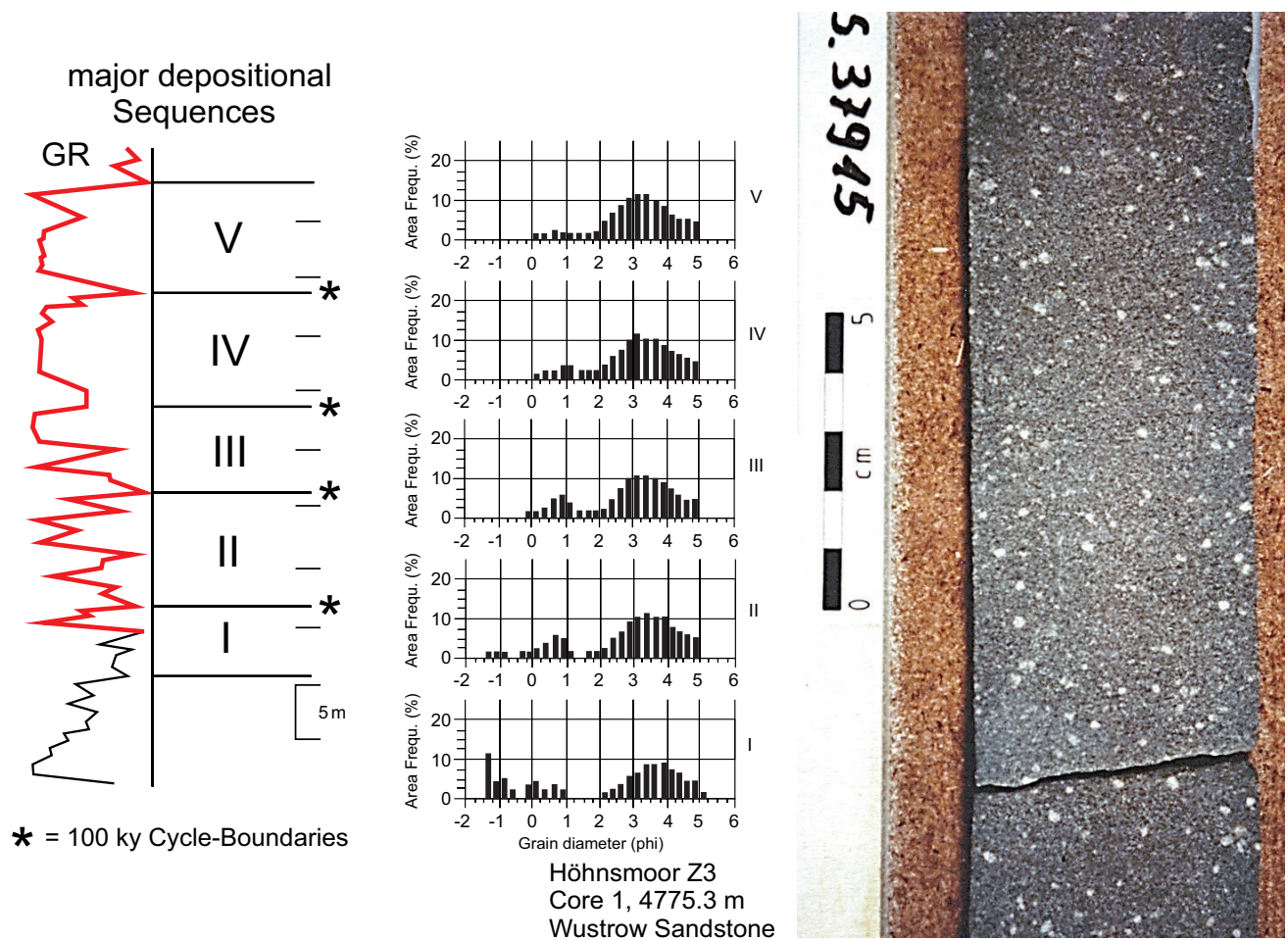


Abb. 18: Das Wustrow-Schichtglied, der in Niedersachsen produktivste Oberrotliegend-Sandstein. Abgelagert als Küstensediment mit meist äolischer Schichtung, aber auch oft entschichtet durch aquatische Prozesse. Typisch sind die gute Sortierung und die Chlorit-Diagenese der oberen Sande, die sich positiv auf die Erhaltung von Porosität und Permeabilität ausgewirkt haben. Die Korngrößen-Diagramme sind das Ergebnis von > 2 000 Korngrößen-Analysen.

Fig. 18: The Wustrow Member, the most productive Upper Rotliegend sandstone in Lower Saxony. Deposited as coastal sediment with mostly aeolian stratification, but also often de-laminated by aquatic processes. Typical are the good sorting and chlorite diagenesis of the upper sands, which have had a positive effect on the preservation of porosity and permeability. The grain size diagrams are the result of > 2.000 grain size analyses.

Schließlich kann die resultierende Paläomorphologie und Fazieskarte unter Einbeziehung seismischer Amplituden- und Inversionsdaten sowie des Einflusses aktiver synsedimentärer Verwerfungen, die aus der Seismik abgeleitet wurden, feinabgestimmt werden.

Die Anwendbarkeit der Methode der Paläomorphologie- und Fazieskartierung bei der Identifizierung potenzieller Reservoirs wurde in Bohrungen erfolgreich getestet. Die Erhöhung der Genauigkeit bei der Vorhersage der Reservoir-Fazies ist bemerkenswert und sicherlich die Mühe wert.

Die paläomorphologische Analyse kann natürlich auch in anderen sedimentären Umgebungen wie zum Beispiel karbonatischen Ablagerungsräumen angewandt werden, um die Erkennung der Verteilung der Reservoir-Fazies zu verbessern.

Danksagungen

Der Autor dankt dem BEB Unternehmen Erdgas und der Wirtschaftsvereinigung Erdöl- und Erdgasgewinnung e. V. (WEG) für die Genehmigung zur Veröffentlichung dieses Artikels. Diese Studie profitierte enorm von den Diskussionen mit den Kollegen von BEB, Ken Glennie, Jean-Paul Verdier, Reinhard Gaupp, Jörg Geßner sowie von Michael Göthel und Jaqueline Strahl (Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg).

Zusammenfassung

Die Verteilung der Fazies innerhalb eines Sedimentationsraumes wird durch die Paläomorphologie und das Klima gesteuert. Ohne genaue stratigraphische Gliederung ist aller-

dings keine paläogeographische Rekonstruktion einer Landschaft möglich. In dieser Studie wurde versucht, durch die Rekonstruktion der Paläomorphologie eine bessere Voraussage der Sedimentverteilung im Rotliegend-Ablagerungsraum Norddeutschlands zu erzielen. Dafür wurden mehrere Ansätze zur Rekonstruktion der Paläomorphologie gewählt:

Die orbital gesteuerte Klimazyklizität der Rotliegend-Sedimente diente der Erstellung eines chronostratigraphischen Gerüsts. Sie zeigt deutliche Rhythmen vom Milankovich-Typ mit Perioden von ca. 20 000, 100 000 und 400 000 Jahren. Darauf aufbauende Berechnungen der Subsidenzraten ergaben ca. 4 cm/1 000 Jahre am Beckenrand und ca. 24 cm/1 000 Jahre im Zentrum des Beckens. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden Hangneigungen berechnet und für die Rekonstruktion der Paläomorphologie verwendet. Eine Plausibilitätsprüfung umfasste den Vergleich mit rezenten großflächigen epikontinentalen Becken wie dem Chott el Djerid, dem Tschadsee in Nordafrika, dem Salton Sea in Kalifornien und dem Lake Eyre in Australien.

Eine weitere Methode zur Rekonstruktion von Paläogradien wurde entwickelt, indem die Lage des Basisniveaus in Bezug auf den Sedimenttyp an der Paläo-Oberfläche geschätzt wurde. Als Bezugsebene wurden in den subaquatischen Gebieten die Winterhochstände der Seen und an Land der jeweilige Grundwasserspiegel verwendet. Zusätzlich wurden die Sand-/Tonverhältnisse eines Sedimentationszyklus aus Bohrungen entlang von Profilen senkrecht zur Beckenachse bestimmt, um die Faziesdefinitionen anhand eines unabhängigen Parameters zu überprüfen.

Schließlich wurde die resultierende Paläomorphologie und Fazieskarte unter Einbeziehung seismischer Amplituden und Inversionsdaten sowie des Einflusses synsedimentärer aktiver Verwerfungen, die aus 3D-seismischen Daten abgeleitet wurden, in manchen Gebieten noch verfeinert.

Summary

The distribution of facies within a sedimentary area is controlled by palaeomorphology and climate. Without a precise stratigraphic structure, however, no palaeogeographic reconstruction of a landscape is possible. In this study, an attempt was made to achieve a better prediction of the sediment distribution in the Rotliegend depositional area of northern Germany by reconstructing the palaeomorphology. Several approaches were chosen to reconstruct the palaeomorphology:

The orbitally controlled climatic cyclicity of the Rotliegend sediments was used to create a chronostratigraphic framework. It shows clear Milankovich-type rhythms with periods of approx. 20 000, 100 000 and 400 000 years. Calculations of the subsidence rates based on this resulted in approx. 4 cm/1000 years at the edge of the basin and approx. 24 cm/1000 years in the centre of the basin. Based on

these results, slope inclinations were calculated and used to reconstruct the palaeomorphology. A plausibility check included a comparison with recent large-scale epicontinental basins such as the Chott el Djerid, Lake Chad in North Africa, the Salton Sea in California and Lake Eyre in Australia. A further method for the reconstruction of palaeogradients was developed by estimating the position of the base level in relation to the sediment type on the palaeosurface. The winter highs of the lakes in the subaquatic areas and the respective groundwater level on land were used as reference levels. In addition, the sand/clay ratios of a sedimentation cycle were determined from boreholes along profiles perpendicular to the basin axis in order to verify the facies definitions using an independent parameter.

Finally, the resulting palaeomorphology and facies map was further refined in some areas by incorporating seismic amplitude and inversion data as well as the influence of synsedimentary active faults derived from 3D seismic data.

Literatur

- AHLBRANDT, T. S. (1979): Textural parameters of eolian deposits. – In E.D. McKee (Ed.): A study of global sand seas. – Geological Professional Paper **1052**, S. 21–51
- BACHMANN, G. H. & N. HOFFMANN (1995): Paläotektonik. Bildung und Entwicklung des Norddeutschen Rotliegend-Beckens. – In: PLEIN, E. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland I - Norddeutsches Rotliegendbecken - Rotliegend-Monographie Teil II. – Courier Forsch.-Inst. Senckenberg **183**, S. 156–169
- BERGER, A., FICHEFET, T., GALLÉE, H., TRICOT, CH. & J. P. VAN YPERSELE (1992): Entering the glaciation with a 2-D coupled climate model. – Quaternary Science Rev. **11**, 4, S. 481–493
- BITZER, F. (1996): Quantitative Methoden zur stratigraphischen Gliederung und Subsidenzanalyse im Oberrotliegend des Norddeutschen Beckens. – Diss. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 42 S. (unveröff.)
- BORER, J. M. & P. M. HARRIS (1991): Lithofacies and Cyclicity of the Yates Formation, Permian Basin: Implications for Reservoir Heterogeneity. – AAPG-Bulletin **75**, S. 726–779
- CHEN, K. & J. M. BOWLER (1986): Late pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam basin, Qinghai province, China. – Palaeogeogr. Palaeoclimatol. **54**, S. 87–104
- CURREY, D. R. (1990): Quaternary palaeolakes in the evolution of semidesert basins, with special emphasis on Lake Bonneville and the Great Basin, U.S.A. – Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. **76**, S. 189–214, doi:10.1016/0031-0182(90)90113-L.

- FRYBERGER, S. G., HERN, C. Y. & N. JONES (2017): Modern and Ancient Analogues for Complex Eolian Reservoirs. – Search and discovery Article #51401
- GAITZSCH, B. (1995): Extramontane Senken im variscischen Finalstadium in Norddeutschland: Lithofazies, Tektonik und Beckenentwicklung. – Ph.D. Thesis TU Bergakademie Freiberg, 101 S. (unveröff.)
- GAST, R. E. (1991): The Perennial Rotliegend Saline Lake in NW-Germany. – *Geol. Jb.* **A 119**, S. 25–59
- GAST, R. E. (1992): Rotliegend Sequence Stratigraphy in the Southern Permian Basin. – *Profil Bd. 1*, 82nd Annual Meeting of GV Febr. 1992, Stuttgart
- GAST, R. E. (1995): Sequenzstratigraphie. – In: PLEIN, E. (Hrsg.): *Stratigraphie von Deutschland I - Norddeutsches Rotliegendbecken - Rotliegend-Monographie Teil II.* – *Courier Forsch.-Inst. Senckenberg* **183**, S. 47–54
- GAST, R. E. (1997): Palaeomorphological Control on Rotliegend Reservoir Distribution. – EAGE 59th Conf., Extended Abstracts Vol. 2, P522, Geneva
- GAST, R. E., PASTERNAK, M., PISKE, J. & H.-J. RASCH (1999): Das Rotliegend im nordostdeutschen Raum: Regionale Übersicht, Stratigraphie, Fazies und Diagenese. – *Geol. Jb.* **A 149**, S. 44–55
- GAST, R. & T. GUNDLACH (2006): Permian strike slip and extensional tectonics in Lower Saxony, Germany. – *Z. dt. Ges. Geowiss.* **157**, 1, S. 41–56
- GAST, R., GESSNER, J. & TH. GUNDLACH (1999): Optimisation of Facies Prediction based on Grainsize Analysis with High Resolution Scanner (Rotliegend, NW-Germany). – LIPPARD, S. J., NAESS, A. & R. SINDING-LARSEN (eds.): *Proceedings of IAMG 1999 Trondheim*, S. 343–348
- GAST, R. E., DUSAR, M., BREITKREUZ, C., GAUPP, R., SCHNEIDER, J.W., STEMMERIK, L., GELUK, M. C., GEISSLER, M., KIERSNOWSKI, H., GLENNIE, K.W., KABEL, S. & N. S. JONES (2010): Rotliegend. – In: DOORNENBAL, J.C. & A. G. STEVENSON (eds.): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area.* – S. 101–121, EAGE Publications b. v. (Houten)
- GAUPP, R., MATTER, A., PLATT, J., RAMSEYER, K. & J. WALZEBUCK (1993): Diagenesis and fluid evolution of deeply buried Permian (Rotliegende) Gas Reservoirs. – *AAPG-Bulletin* **77**, 7, S. 1111–1128
- GEBHARDT, U. (1994): Zur Genese der Rotliegend-Salinare in der Norddeutschen Senke (Oberrotliegend II, Perm). – *Freib. Forsch.-H.* **C 452**, S. 3–22
- GLENNIE, K. W. (1972): Permian Rotliegende of Northwest Europe interpreted in light of modern desert sedimentation studies. – *AAPG-Bulletin* **56**, S. 1048–1071
- GLENNIE, K. W. & BULLER, A. T. (1983): The Permian Weissliegend of North West Europe. The partial deformation of aeolian dune sands caused by the Zechstein transgression. – *Sed. Geol.* **35**, S. 43–81
- GLENNIE, K. W., PUGH, J. M. & T. M. GOODALL (1994): Late Quaternary Arabian desert models of Permian Rotliegend reservoirs. – *Exploration Bulletin* **274**, S. 1–19
- GLENNIE, K. & A. HURST (2007): Fluidization and associated soft-sediment deformation in eolian sandstones: Hope-man Sandstone (Permian), Scotland, and Rotliegend, North Sea. – *AAPG-Memoir* **87**, S. 245–252
- GÖTHEL, M. (2020): Die lithostratigraphischen Einheiten des Zechstein – Fortschritte aus Neubewertungen von Erkundungsergebnissen Brandenburgs (Deutschland) im Vergleich zu benachbarten Regionen. – *Brandenburg. geowiss. Beitr.* **27**, 1/2, S. 5–25
- HARDIE, L. A., SMOOT, J. P. & H. P. EUGSTER (1978): Saline lakes and their deposits: a sedimentological approach. – *Intern. Assoc. Sediment., Spec. Publ.* **2**, S. 7–41
- KATZUNG, G. (1995): Präzechstein in Zentral- und Ostbrandenburg. – *Berliner geowiss. Abh.* **A 168**, S. 5–21
- KING, D. (1956): The Quarternary stratigraphic record at Lake Eyre north and the evolution of existing topographic forms. – *Transactions of the Royal Society of South Australia Incorporated* **Vol 79**, S. 93–103
- KOCUREK, G. (1988): First-order and super bounding surfaces in aeolian sequences - bounding surfaces revisited. – *Sedimentary Geology* **56**, S.193–206
- KOCUREK, G. A. (1996): Desert aeolian systems.– In: Reading, H. G. (ed.): *Sedimentary environments: Processes, facies and stratigraphy.* – S. 125–153, Oxford (Blackwell Sciences)
- LADIPO, K. O. (1997): Cyclostratigraphy of the Upper Rotliegend Slochteren Formation, NE Netherlands: a genetic unit subdivision and correlation of fluvio-aeolian facies. – *Exploration and Production News Letter, Barren Sequences Special Issue*, S. 43–45
- LEGLER, B. (2006): Faziesentwicklung im Südlichen Permbecken in Abhängigkeit von Tektonik, eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Proto-Atlantik und Klimavariabilität (Oberrotliegend, Nordwesteuropa). – *Schr.-R. Dt. Ges. Geowiss.* **47**, 108 S.

- LEGLER, B., SCHNEIDER, J.W., GEBHARDT, U., MERTEN, D. & R. GAUPP (2011): Lake deposits of moderate salinity as sensitive indicators of lake level fluctuations: Example from the Upper Rotliegend saline lake (Middle–Late Permian, Northeast Germany). – *Sedimentary Geology* **234**, S. 56–69
- MAGEE, J. W., BOWLER, J. M., MILLER, G. H. & D. L. G. WILLIAMS (1995): Stratigraphy, sedimentology, chronology and palaeohydrology of Quaternary lacustrine deposits at Madigan Gulf, Lake Eyre, south Australia. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **113**, 1, S. 3–42
- MENNING, M. (1995): A numerical timescale for the Permian and Triassic periods: an integrated time analysis. – In: SCHOLLE, P. A., PERYT, T. M., & D. S. ULMER-SCHOLLE (eds.): *The Permian of Northern Pangea*. – Vol. 1, S. 77–97, Berlin, Heidelberg, New York (Springer)
- MIALL, A.D., 1996. *The Geology of Fluvial Deposits*. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- MENNING, M., GLODNY, J., BOY, J., GAST, R., KOWALCZYK, G., MARTENS, T., RÖSSLER, R., SCHINDLER, T., VON SEKKENDORFF, V. & S. VOIGT (2022): Das Rotliegend in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016). – *Z. Dt. Ges. Geowiss.* **173**, 1, S 3–139
- MILANKOVITSCH, M. (1941): *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem*. – *Belgrade Serbian Academy of Science* **133**, 633 S.
- MINGRAM, J. (1988): *Lithofazielle, milieuanalytische und petrografische Untersuchungen im höheren Saxon der südwestlichen Altmark*. – Diss. Bergakademie Freiberg, 60 S. (unveröff.)
- PLEIN, E. (1978): Rotliegend-Ablagerungen im Norddeutschen Becken. – *Z. Dt. Geol. Ges.* **129**, S. 71–97
- PLEIN, E. (1993): Bemerkungen zum Ablauf der paläogeographischen Entwicklung im Stefan und Rotliegend des Norddeutschen Beckens. – *Geol. Jb.* **A131**, S. 99–116
- RODRIGUEZ-LOPEZ, J., CLEMMENSEN, L. B., LANCASTER, N., MOUNTNEY, N. P. & G. D. VEIGA (2014): Archean to Recent aeolian sand systems and their sedimentary record: Current understanding and future prospects. – *Sedimentology* **61**, S. 1487–1534
- ROGNON, P. (1979): Pluvial and arid phases in the Sahara: The role of non-climatic factors. – *Palaeoecology of Africa and the surrounding seas* **12**, S. 45–62
- SCHRÖDER, L., PLEIN, E., BACHMANN, G. H., GAST, R. E., GEBHARDT, U., GRAF, R., HELMUTH, H.-J., PASTERNAK, M., PORTH, H. & S. SÜSSMUTH (1995): Stratigraphische Neugliederung des Rotliegend im Norddeutschen Becken. – *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg* **183**, S. 1–193, 81 Abb., 10 Tab., 8 Taf.;
- SIEVER, R. (1988): *Sand; Ein Archiv der Erdgeschichte*. – *Spektrum der Wissenschaft*, 254 S.
- STRASSER A., HILGEN, F. J. & P. H. HECKEL (2006): Cyclostratigraphy – concepts, definitions, and applications. – *Newsl. Stratigr.* **42**, S. 75–114
- TRUSHEIM, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. – *Beih. Geol. Jb.* **112**, S. 1–51
- VAIL, P. R., MITCHUM, R. M., TODD, R. G., WIDMER, J. M., THOMPSON, S., SANGREE, J. B., BUBB, J. N. & W. G. HATFIELD (1977): Seismic stratigraphy and global changes in sea level. – *AAPG-Memoir* **26**, S. 49–212
- VAN DE KAMP, P. C. (1973): Holocene continental sedimentation in the Salton Basin, California, a reconnaissance. – *Geological Society of American Bulletin* **84**, S. 827–848
- VAN WEES, V., STEPHENSON, R. A., ZIEGLER, P. A., BAYER, U., MCCANN, T., DADLEZ, R., GAUPP, R., NARKIEWICZ, M., BITZER, F. & M. SCHECK (2000): On the origin of the Southern Permian Basin, Central Europe. – *Mar. Petrol. Geol.* **17**, S. 43–49
- VERDIER, J. P. (1996): The Rotliegend sedimentation history of the southern North Sea and adjacent countries. – In: H. E. RONDEEL, et al. (eds.), *Geology of gas and oil under the Netherlands*. – S. 45–56, Dordrecht (Kluwer Academic Publisher)
- WALTHER, J. (1900): *Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit*. – 440 S., hrsg. m. Unterstützg. Königl. Akad. d. Wiss. Berlin, Berlin (Verlag Dietrich Reimer)
- YANG, C. S. & Y. A. BAUMFALK (1994): Milankovitch cyclicity in the Upper Rotliegend Group of the Netherlands offshore. – *Special Publications Int. Ass. Sediment.* **19**, S. 47–61
- ZIEGLER, P. A. (1990): *Geological Atlas of Western and Central Europe*. – 2nd ed., 239 pp, Shell Internat. Petrol. Maatschappij, The Hague
- Internet:
https://www.flickr.com/photos/patrick_k59/48372059862/
über https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lake_Eyre_2019_02.jpg (patrickkavanagh, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>, via Wikimedia Commons); *zuletzt zugegriffen am: 19.05.2025

Anschrift des Autors:

Dr. Reinhard Gast
Heidelücker Weg 9
24986 Mittellangeln