

Problemy diapiryzmu solnego w północnych Niemczech

FRANZ KOCKEL

Eiermarkt 12b, D-30938 Burgwedel, Germany

Streszczenie: Krótko zarysowano historię badań soli i ich diapiryzmu w Niemczech. Systematyczne badania wszystkich, ponad 280 struktur solnych w NW Niemczech i w niemieckim sektorze Morza Północnego wykazały, że nie można sformułować wyczerpującej teorii diapiryzmu. Kilka czynników, takich jak położenie basenu solnego w układzie kier litosferycznych, litofacjalne wykształcenie deformowanych sekwencji ewaporytowych, lokalne i regionalne zmiany pola naprężeń w czasie geologicznym i szybkość diapiryzmu, odgrywa ważną rolę w rozwoju różnych typów morfologicznych struktur solnych. Przedstawiono 16 przykładów różnych typów morfologicznych struktur solnych z NW Niemiec i niemieckiego sektora Morza Północnego, zinterpretowanych geologicznie na głębokościowych przekrojach sejsmicznych w celu zademonstrowania wielkiej zmienności struktur solnych w tej części południowego basenu perm-skiego środkowej Europy.

Słowa kluczowe: tektonika, diapiryzm, sól, perm, Niemcy.

Wstęp

Struktury solne w północnych Niemczech przyciągały uwagę badaczy od ostatnich dziesiątków lat 19. stulecia, jako że występujące w nich sole potasowe stanowiły nadzwyczajny potencjał ekonomiczny. Do roku 1914 zgłębiono ponad 150 szybów i zbadano wewnętrzną budowę struktur solnych w wyrobiskach kopalnianych (por. podsumowanie w: Fulda 1938). Teoretyczne badania były już opublikowane przez Stillego (1911, 1917), który stworzył termin „ejectywne fałdowanie” (Ejectiv-Faltung), wyjaśniający powstawanie struktur solnych przez kompresyjne deformacje „saksońskiego fałdowania ramowego” (saxonische Rahmenfaltung).

Po roku 1918 struktury solne stały się celem poszukiwań węglowodorów zarówno w rejonie wybrzeży Zatoki Meksykańskiej w Stanach Zjednoczonych, jak i w północnych Niemczech. Następnie, nowe narzędzia geofizyczne, takie jak

pomiary grawimetryczne i metoda wachlarzowa sejsmiki refrakcyjnej (fan shooting refraction), pozwoliły na wykrywanie struktur solnych również pod pokrywą osadową. W latach trzydziestych i na początku lat czterdziestych XX wieku panowało przekonanie wśród niemieckich badaczy-praktyków, że ropa była generowana ze skał cechsztyńskich i dlatego towarzyszy permskim strukturom solnym (Bentz 1929, 1931, 1932a, 1932b). Finansowane przez rząd programy badawcze, takie jak „Geofizyczne zdjęcie kraju” (Geophysikalische Reichsaufnahme) i „Krajowy program wierceń” (Reichsbohrprogramm) przed i podczas drugiej wojny światowej, były prowadzone w myśl tego paradygmatu (Bentz 1949; Closs 1974).

Nową pojęciowo teorię genezy struktur solnych opublikowali Trusheim (1957, 1960), Sannemann (1963, 1968), później Jaritz (1973), a we wschodnich Niemczech Meinhold (1956, 1959) i Meinhold & Reinhardt (1967). Podstawowymi danymi do tej teorii, nazwanej przez Trusheima (1957) teorią „halokinezy”, były pomiary sejsmiczne rejestrowane analogowo.

Teoria „halokinezy”

Przyjmuje się, że na lekko nachylonej lub nieregularnej powierzchni podłoża soli cechsztyńskich tylko sól zaczyna płynąć samoczynnie, jeżeli obciążenie osadami, miąższość soli i wzrost temperatury są wystarczające. Sól płynie w kierunku poziomym i tworzy tak zwane „poduszki solne” z wysklepioną ku górze, lecz nierozzerwaną pokrywą osadową. Ponieważ sól ma mniejszy ciężar właściwy od nadległych osadów, dążąc do równowagi, tworzy strukturę wypukłą ku górze. Jednocześnie na grzbiecie wznoszącej się poduszki solnej szybkość gromadzenia osadów jest mniejsza w porównaniu z sąsiednimi obszarami, z których sól migruje do poduszki (Trusheim 1957, 1960). Jako konsekwencja kompensacji mas (Fig. 1), wokół poduszki tworzą się pierwotne synkliny (niecki) brzeżne (primary rim synclines).

Według wyżej wymienionych autorów ten rozwój, gdy się rozpocznie raz, jest już procesem autonomicznym. Ciało solne zwiększa swoją wysokość, w jego nadkładzie tworzą się pęknięcia z rozciągania (dylatacje), uskoki i rowy. Wzdłuż tych szczelin i uskoków sól może dalej penetrować swoją pokrywą osadową. Ten moment jest nazywany początkiem „fazy diapirowej”, najaktywniejszej w rozwoju diapiiru. Najpierw sól w pobliżu grzbietu wcześniejszej poduszki migruje wzdłuż pęknięć nadkładu, a deficyt mas jest bezpośrednio kompensowany przez osady. Tworzą się wtórne synkliny (niecki) brzeżne (secondary rim synclines), wypełnione grubymi osadami na sklepieniu poduszki, które poprzednio było miejscem zwolnionej sedymentacji. W spągu tych wtórnych niecek występuje zwykle niezgodność (kątowa, erozyjna lub tylko niedepozycja), której rozpoznanie wyznacza wiek początku fazy diapirowej.

Diapir może rosnąć dalej, jeżeli więcej soli z poprzednich zboczy (stóp)

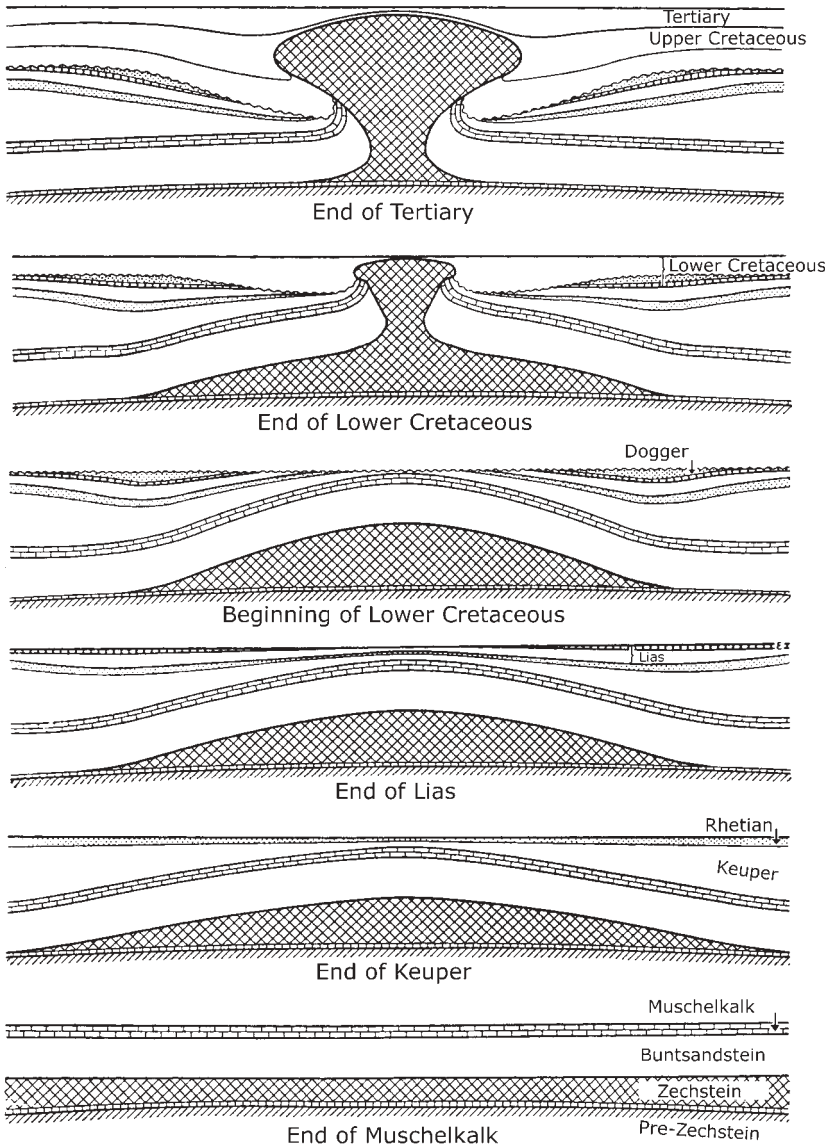


Fig. 1. Schemat rozwoju diapiru solnego według Trusheima (1957, 1960).

Początek stadium poduszkowego w czasie kajpru. Zaawansowane stadium poduszkowe od liasu do dolnej kredy, formowanie się pierwotnych niecek (synklin) brzeżnych. Początek stadium diapirowego i formowanie się wtórnych niecek brzeżnych przy końcu wczesnej kredy. Dalszy rozwój diapiru w późnej kredzie i trzeciorzędzie oraz tworzenie się niecek brzeżnych trzeciego rzędu.

1. Schematic development of a salt diapir from Trusheim (1957, 1960).

Beginning of pillow stage in Keuper times. Advanced pillow stage from the Liassic to the early Cretaceous, formation of primary rim synclines. Beginning of the diapiric stage in the late early Cretaceous, formation of secondary rim synclines. Further development of diapir in late Cretaceous and Tertiary times, formation of tertiary rim synclines.

poduszki (pillow feet) migruje do diapiru. Może to zachodzić w sposób ciągły lub pulsacyjny. Deficyt mas wokół diapiru wywołany migracją soli ze stóp poduszki jest równoważony przez osady tworzące brzeżną synklinę trzeciego rzędu (tertiary rim syncline, nachschubbedingte Randsenke). Jeżeli cała okoliczna sól przemieści się do sąsiednich diapirów, osady pomiędzy diapirami, poprzecznych „pierwotnych niecek brzeżnych”, są wysklepione, gdyż miały zwiększoną miąższość w stadium poduszkowym. Struktury te, czyli antykliny z płaskim dnem i maksymalną miąższością w centrum struktury, są nazywane „strukturami żółwiowymi” (turtle structures). W przypadku wydłużonych i równoległych diapirów solnych, tak zwanych wałów solnych (salt walls) Sannemann (1963, 1968) sądził, że migracja soli wywołuje tworzenie potomnych diapirów (daughter diapirs). Stworzył on termin „rodziny diapirów” (diapir families) z macierzystym wałem solnym w centrum i peryferycznymi „diapirami potomnymi”.

Teoria ta jest pomysłowa i wyjaśnia szereg obserwacji. Odsuwa na bok poglądy Stillego (1911, 1917), jego kompresyjną genezę diapirów solnych i jego „tektoniczne fazy”. Wszystkie struktury powinny się rozwijać ciągle, a ich powstawanie jest zjawiskiem lokalnym. Obserwowane niezgodności nie mogą być dalej traktowane jako świadectwa tektonicznych impulsów o zasięgu światowym, lecz lokalnymi konsekwencjami halokinezy. Teoria halokinezy była bez wątpienia rewolucyjną i stanowiła prawdziwą zmianę paradygmatów. Jaritz (1973) opublikował mapę, na której datował początek fazy poduszkowej i początek fazy diapirowej dla wszystkich struktur solnych NW Niemiec (por. także Jaritz 1968, 1980, 1987).

Taki był stan wiedzy w połowie lat siedemdziesiątych XX wieku.

Nowe wyzwania wobec badań diapirów w Niemczech

Trzy czynniki spowodowały nowe ożywienie badań diapirów.

- Boom na konstruowanie podziemnych zbiorników w kawernach solnych, wywołany kryzysem naftowym i potrzebą gromadzenia „strategicznych rezerw ropy”.
- Rozpoczęcie poszukiwań potencjalnych składowisk odpadów radioaktywnych w soli.
- Zestawienie „Tektonicznego Atlasu NW Niemiec i niemieckiego sektora Morza Północnego” (Kockel 1995; Baldschuhn *et al.* 1996, 2001). Autorzy ci byli uprzywilejowani przez to, że mieli dostęp do materiałów z około 75 000 otworów wiertniczych i ponad 1 000 000 km refleksyjnych profili sejsmicznych, w większości z zapisem cyfrowym. Dzięki temu było możliwe zbadanie wszystkich 288 struktur solnych (Fig. 2), analizowanie ich morfologii i genezy oraz porównywanie ich ze sobą. Jakość i rozdzielczość danych geofizycznych była

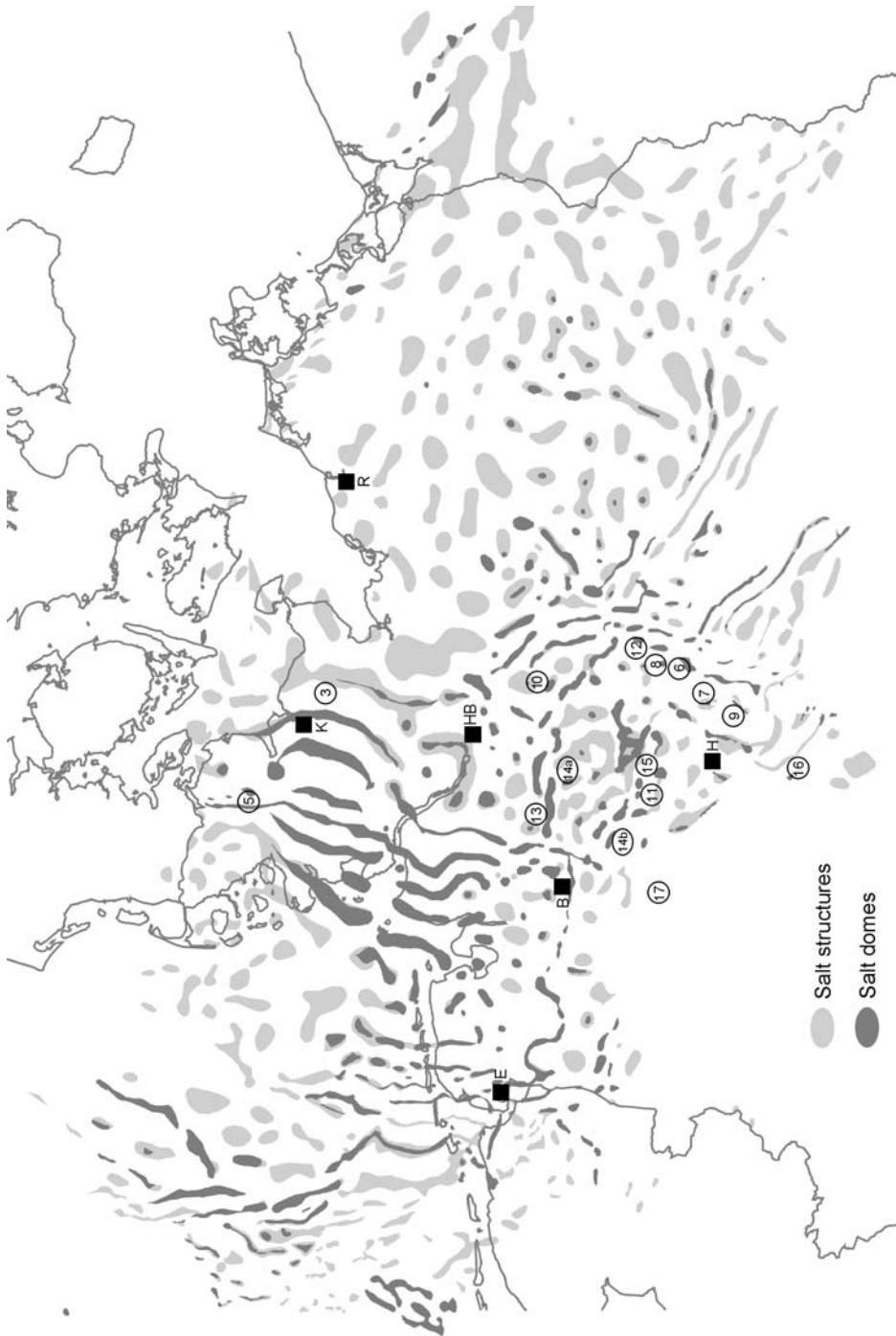


Fig. 2. Struktury solne zachodniej części południowego basenu permiankiego Europy.

Pola: czarne – diapiry, szare – poduszki solne; liczby w kółkach oznaczają położenie struktur w Północnych Niemczech przedstawionych na Fig. 3–17; czarne kwadraty – miasta: B – Brema, E – Emden, H – Hanower, HB – Hamburg, K – Kilonia, R – Rostok.

Fig. 2. The salt structures in western part of the Southern European Permian Basin.

Fields: black – salt pillows; encircled numbers in North Germany show location of structures presented in Figs. 3 –17; black squares – towns: B – Bremen, E – Emden, H – Hannover, HB – Hamburg, K – Kiel, R – Rostock.

znacznie lepsza niż ta, jaką w swoim czasie dysponował Trusheim, i pozwoliła na szczegółowe kartowanie strzaskania stropu powierzchni podsolnej (ogólnie podłoża cechsztynu). Okazało się przy tym, że Sannemann (1963) pomylił spągową powierzchnię górnego pstręgo piaskowca ze spągiem cechsztynu, co było brzemennym błędem.

- Dodatkową korzyścią były informacje o wewnętrznej budowie wielu struktur solnych zbadanych w przeszłości w kopalniach soli potasowych i obecnie przy wydobywaniu soli metodą podziemnego rozpuszczania oraz przy rozpoznawaniu w celu tworzenia składowisk odpadów radioaktywnych. Sytuacja ta jest wyjątkowa, gdyż wewnętrzna budowa diapirów solnych na świecie pozostaje w 99,99% nieznaną.

Dzięki tym danym rozwijane są konsekwentnie nowe idee o genezie struktur solnych w NW Niemczech i w niemieckim sektorze Morza Północnego (Fig. 2).

Podczas ostatnich czterdziestu lat coraz więcej obszarów z diapirami solnymi jest rozpoznawanych stale ulepszanymi metodami geofizycznymi, nie tylko w środkowoeuropejskiej prowincji słupów solnych od Polski po Wielką Brytanię, lecz także na całym świecie. Badania te wyraźnie pokazują, że teoria Trusheima i Sonnemanna o autonomicznej halokinezie nie może być zastosowana w skali ogólnoświatowej, a nawet jest wątpliwa w Europie Środkowej. Dla przykładu Jackson i in. (1996) i Ge i in. (1997) rozwinęli zupełnie inne modele genetyczne dla wyjaśnienia powstawania struktur solnych w Zatoce Meksykańskiej. Przyjmują oni, że zróżnicowane obciążenie progradującymi nasypami (klinami) osadowymi (prograding sedimentary wedges) wymusza rozpoczęcie ruchów soli. Wtórne synkliny brzeżne, charakterystyczne dla modelu Trusheima, nie występują ani w prypeckiej prowincji diapirowej soli dewońskich na Białorusi, ani w depresji perykaspjskiej w Kazachstanie, ani w irańskiej prowincji diapirowej soli kambryjskich w Górach Zagros, ani w kantabryjskiej prowincji soli kajprowych Hiszpanii, nie mówiąc o solnych strukturach w strefach orogenicznych, takich jak Pirenejskie lub Karpaty.

Struktury solne w NW Niemczech niezgodne z zasadami halokinezy

Liczne przykłady struktur solnych z NW Niemiec i niemieckiego sektora Morza Północnego wykazują morfologię niezgodną z teorią halokinezy. Jedno można stwierdzić, że prawdopodobnie „halokineza” nie jest decydującym prawem tworzenia się struktur solnych.

1. Figura 3 pokazuje poduszkę solną Plön. W spągu dolnej kredy (kru) można rozpoznać rów grzbietowy. Więc już we wczesnej kredzie poduszka solna była już w zaawansowanym stadium. Zgodnie z prawami halokinezy można wnioskować, że krótko po osadzeniu górnej kredy diapir powinien się utworzyć, tymczasem go nie ma. Niezaburzony spąg paleogenu przykrywa rów grzbieto-

wy i spąg miocenu (tmi), leży prawie płasko nad wypiętrzoną grzbietem poduszki. To przeczy podstawowym zasadom halokinezy, zgodnie z którymi poduszka solna tworzy anomalię gęstości, co wzmaga dalszy jej wzrost, aż jej szczyt przebija się tworząc diapir. Jednak w tym wypadku nie powstał diapir; przeciwnie, wysklepianie poduszki solnej podczas trzeciorzędu słabnie i prawie zanika. Zrozumieli z tego musi być wniosek, że siły wyporu soli, spowodowane różnicą gęstości, są niewystarczające do rozerwania nadkładu osadowego poduszki solnej. Zwrócili uwagę na to już wcześniejsi badacze (np. Weijermars i in. 1992; Jackson i in. 1996).

2. Prawie wszystkie diapiry solne w Niemczech i na Morzu Północnym, o ile są znane, rozciągają się wzdłuż uskoku podłoża (por. Fig. 4 i 5). Układ uskoku podłoża tego regionu powtarzają struktury solne jak perły na sznurze. Między tymi diapirami są rozmieszczone łączące je struktury inwersyjne bez lub z bardzo małym wpływem soli, które powstały wzdłuż starszych struktur rowów lub półrowów. Te struktury inwersyjne są pochodzenia typowo tektonicznego, spowodowanego rozciąganiem podłoża, a nie halokinezą. To jasno wskazuje, że ruchy uskoku w podłożu spowodowały zarówno powstanie diapirów, jak i struktur inwersyjnych (por. też Remmelts 1996).

3. Badania struktur solnych są zwykle skoncentrowane na obszarach o dużej gęstości diapirów. Tymczasem na bloku zachodnioszlazewickim, we wschodniej części Morza Północnego, i na bloku wschodniolsztyńsko-meklemburskim nie znaleziono diapirów, chociaż występują tam sole cechsztyńskie o znacznej miąższości (1100–1400 m) i jest nad nimi zachowany wystarczający nadkład (trias, górna kreda). Podłoże w tych obszarach leży stosunkowo płasko i nie jest pocięte na bloki. Widocznie to jest przyczyną braku diapirów (por. Fig. 2) – nie było wyzwających sił dla diapiryzmu w postaci ruchu bloków podłoża.

4. Większość zbadanych diapirów wykazuje asymetryczną morfologię skrzydeł (Fig. 5–8). Pierwotne i wtórne synkliny brzeżne mają różny wiek. W większości przypadków mobilizacja i dopływ soli do diapiru zaczynały się ze strony zrzuconego bloku podłoża, a dopiero później z podniesionego bloku. Siłą napędową diapiryzmu, w sposób oczywisty, są więc zróżnicowane ruchy bloków podłoża.

5. Na zbadanym obszarze jest wiele diapirów bez typowo rozwiniętych pierwotnych i wtórnych niecek brzeżnych, które Trusheim (1957, 1960) uważał za charakterystyczne dla halokinezy. Przykładami takimi są: diapir Lüneburg bez synklin brzeżnych (Fig. 10) i diapir Mölme (Fig. 9) – wypełniony solą uskok. Obie te struktury są rozwinięte na uskoku, które w czasie zmieniły kierunek przemieszczenia na przeciwny. Te przykłady, w sensie „halokinezy”, nie są rzeczywistymi diapirami.

6. Są też obszary, jak na północ od Brunszwiku, wzdłuż lineamentu Aller (Fig. 16) i na Morzu Północnym wzdłuż zachodniej granicy rowu Horn, gdzie formacja Solling środkowego pstrego piaskowca lub formacja Röt górnego pstrego piaskowca leżą wprost na cechsztynie, podczas gdy dolny i środkowy

pstry piaskowiec w sąsiedztwie ma normalną miąższość. Best (1996) oraz Thiem i Rockenbauch (1999) pokazali, że w tym obszarze należy rozważyć istnienie „kier tektonicznych”. Rozciąganie podczas fazy ryftingu przed niezgodnością Solling było tak silne, że pokrywa osadowa cechsztynu – piaskowce dolnego i środkowego pstręgo piaskowca – zostały porozrywane na bloki („kry”), a strop cechsztynu został tektonicznie zdenudowany. W przestrzeniach pomiędzy „krami” górny pstry piaskowiec, wapień muszlowy i kajper zostały osadzone wprost na soli o znacznej miąższości. Depocentra tych formacji leżały dokładnie tam, gdzie najniższego triasu brak tektonicznie. Trzeba podkreślić, że proces ten nie jest porównywalny z inwersją.

7. Już Jaritz (1973) w swoich halokinetycznych studiach pokazał, lecz nie skomentował, że diapiryzm w NW Niemczech nie zachodził w sposób ciągły lecz w fazach. Maksima zdarzeń diapirowego przebijania się występowały w czasie kajpru, późnej jury i wczesnej kredy. Te przedziały czasu są dokładnie tymi, w których NW Niemcy podlegały największemu rozciąganiu na skutek niezależnych od soli ruchów rozciągających (ryftingu), podczas otwierania Oceanu Atlantyckiego.

Struktury solne zmodyfikowane przez siły kompresyjne

W NW Niemczech wiele struktur solnych wykazuje niezwykle cechy morfologiczne, których nie można objaśnić prostą „halokinezą”, i które były dotychczas traktowane jako wątpliwe. Struktury te mają duże przewieszki (overhangs), zwykle bardzo zgnieciony i wysmukły pień i często mają kliny solne (salt wedges) na brzegach (por. Fig. 6, 10–16). Nadto często wydają się mieć dwie wtórne synkliny brzeżne różnego wieku: jedną późnojurajsko – wczesnokredową i drugą późnokredową (por. Meissendorf na Fig. 16). Jak to można wyjaśnić? Kopuły solne weszły w swoją fazę diapirową w okresie intensywnego ryftingu i rozciągania późnojurajsko–wczesnokredowego, które doprowadziło do powstania dolnosaksońskiego basenu ryftowego. Omawiane struktury solne ciągną się wzdłuż uskoków ograniczających ryfty. Podczas późnej kredy (koniak – kampan) dolnosaksoński basen uległ inwersji, to znaczy podlegał deformacjom kompresyjnym. Ograniczające ten basen normalne uskoki zostały przekształcone w uskoki odwrócone lub nasunięcia, a wypełnienie rowu zostało wypiętrzone i wyciśnięte. Struktury solne wzdłuż tych uskoków zostały również przetworzone przez kompresję. Pnie zostały wyciśnięte i czasami struktury solne straciły połączenie z pierwotnymi cechsztyńskimi pokładami (Fig. 12 i 13). Wielkość kompresji w tych przypadkach była większa od poprzedzającego rozciągania. Wielkie przewieszki solne w obrębie osadów późnokredowych prawdopodobnie były podmorskimi „lodowcami solnymi” (salt glaciers), porównywalnymi z dobrze znanymi z rejonu Zatoki Perskiej. Najbardziej zagadkowymi strukturami na

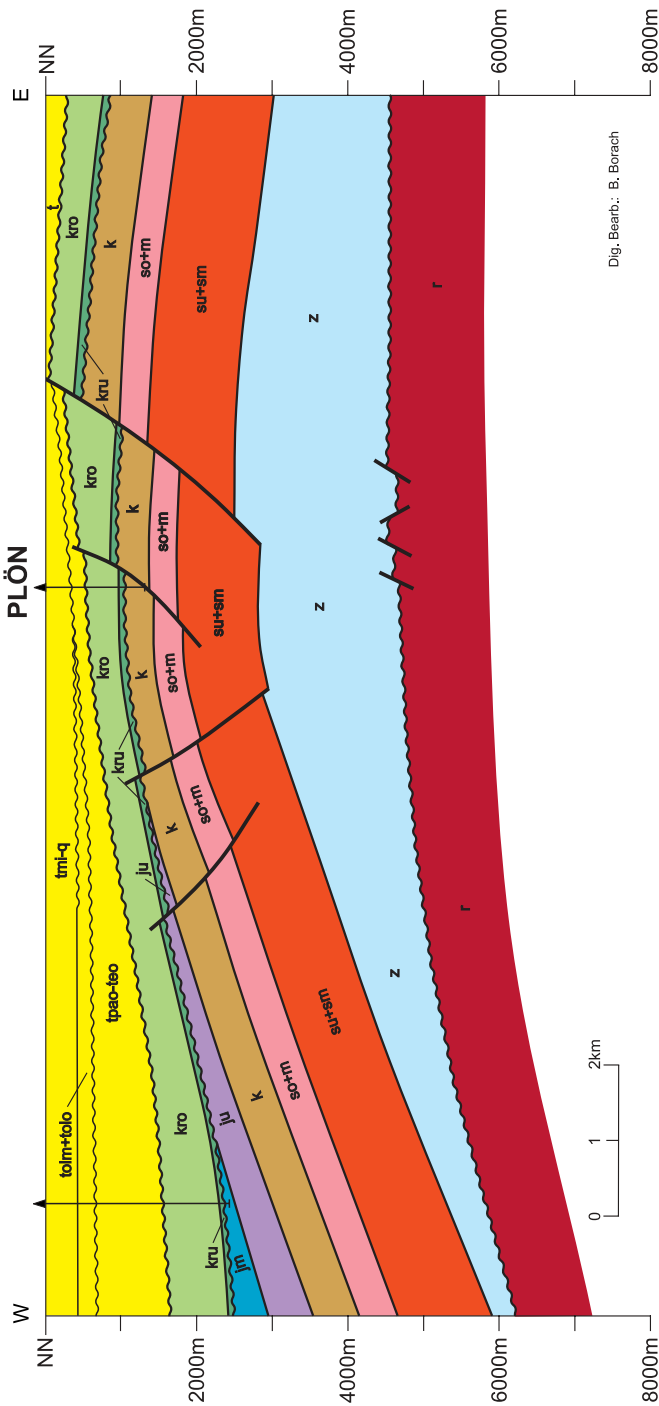


Fig. 3. Przekrój przez strukturę Plön według Deneke (1983, z Baldschuhna i in. 1996, 2001).

Cechsztyńska poduszka solna z dylatacyjnym rowem w stropie. Widac wypiętrzenie soli czerwonego spągowca (formacje Dethlingen i Hannover) poniżej spągu cechsztynu. Rozerwany strop wskazuje na silne rozciąganie, lecz diapir nie powstał. Aktywność poduszki zmniejszyła się w czasie paleogenu i neogenu.

Symbole stratygraficzne użyte na Fig. 3 – 17: q – czwartorzęd, t – trzeciorzęd, tmi – miocen, tmiR – formacja Reinbeck, tmiu – dolny miocen, tolo – górny oligocen, tolm – środkowy oligocen, teou – dolny eocen, tpao – górny paleocen, tpg – paleocen, k – kreda, kro – górna kreda, krsa – santon, kru – dolna kreda, Wd – berias (Weald), jo – górna jura, jm – środkowa jura, jmel – kelowej, jmbj – bejos, ju – dolna jura, jutco – górny pstry piaskowiec i wapień muszkowic, su+sm – dolny i środkowy pstry piaskowiec, z – cechsztyń, r – czerwonony spągowiec, c – karbon, c+d – karbon i dewon.

Cross section of the Plön Structure according to Deneke (1983, from Baldschuhna *et al.* 1996, 2001).

Zechstein salt pillow with dilatation crest graben in the roof. Note the mobilised Rotliegend salt (Dethlingen and Hannover formations) beneath the basal Zechstein. The broken roof indicates stronger dilatation, but a diapir has not developed. Pillow activity decreased in Palaeogene and Neogene times.

Stratigraphic symbols used in Figs. 3 – 17: q – Quaternary, t – Tertiary, tmi – Miocene, tmiR – Reinbeck Formation, tmiu – lower Miocene, tolo – upper Oligocene, tolm – middle Oligocene, teou – lower Eocene, tpao – upper Paleocene, tpg – Paleocene, k – Cretaceous, kro – upper Cretaceous, krsa – Santonian, kru – lower Cretaceous, Wd – Berriasian ("Wealden"), jo – upper Jurassic, jmel – Callovian, jmbj – Bajocian, ju – lower Jurassic, jutco – upper Toarcian, k – Keuper, so+m – upper Buntsandstein and Muschelkalk, su+sm = lower and middle Buntsandstein, z – Zechstein, r – Rotliegend, c – Carboniferous, c+d – Carboniferous and Devonian.

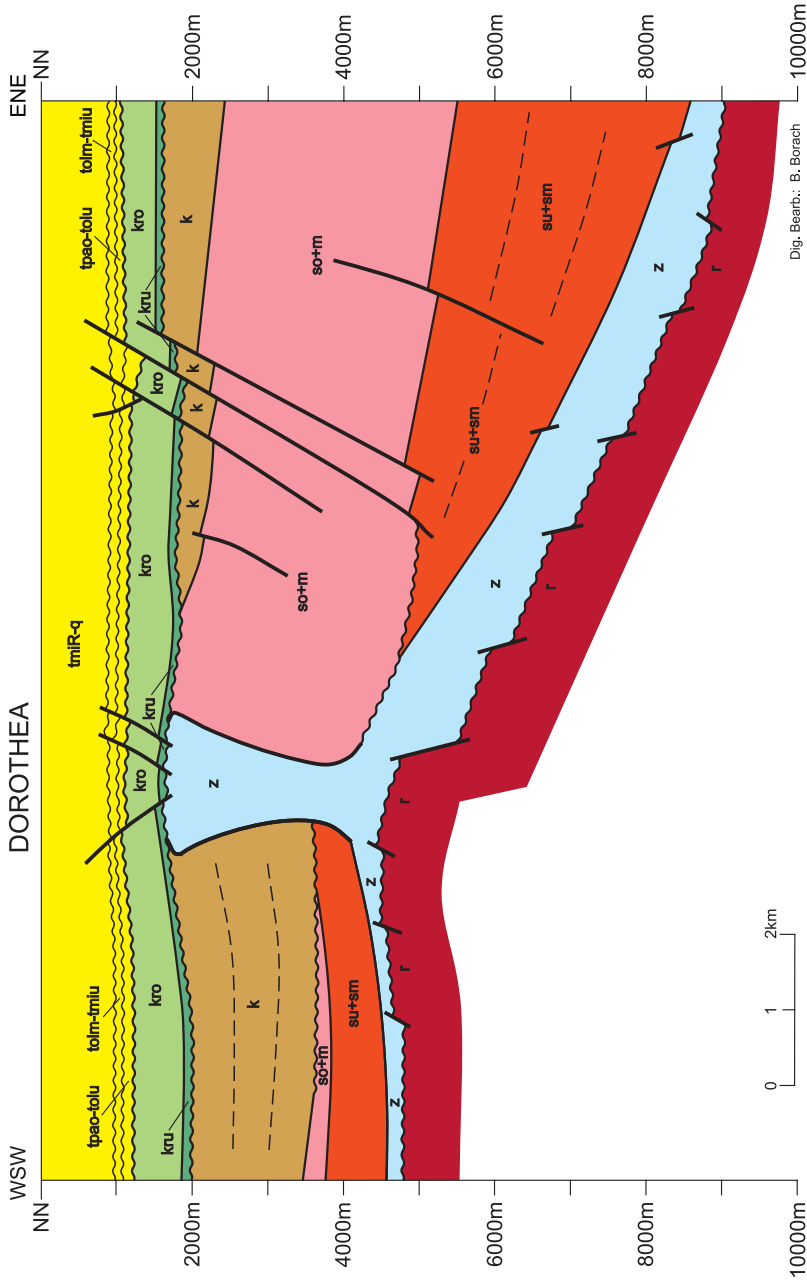


Fig. 4. Przekrój przez strukturę Dorothea według Jürgensa (1989, z Kockela i in. 1995).
 Asymetryczny diapir wzdłuż zachodniego uskoku ograniczającego rów Horn (niemiecki sektor Morza Północnego).
 Cross section of the Dorothea Structure according to Jürgens (1989, from Kockel *et al.* 1995).
 Asymmetrical diapir straddling the western boundary fault of the Horn Graben, German North Sea sector.

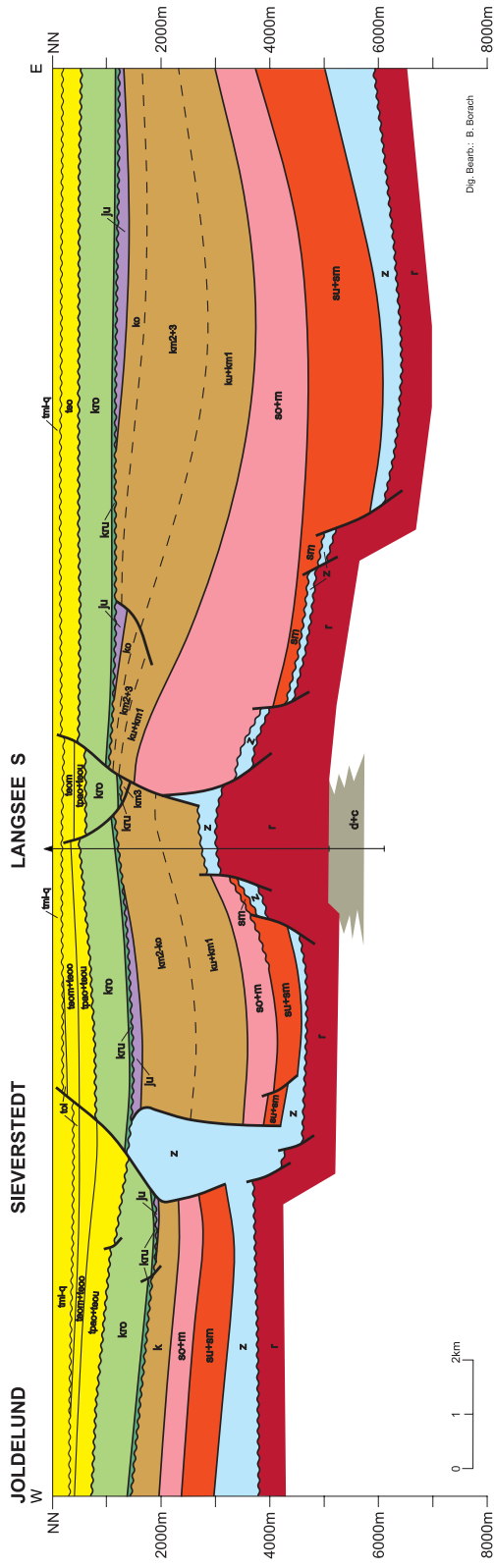


Fig. 5. Przekrój przez zachodnią granicę północnego rowu Glückstadt według Besta (1985, z Baldschuhn i in. 1996, 2001).
 Struktury solne wznoszą się nad granicami bloków podłoża.
 Cross section of the western boundary of the Northern Glückstadt Graben according to Best (1985, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001).
 The salt structures straddle basement block boundaries.

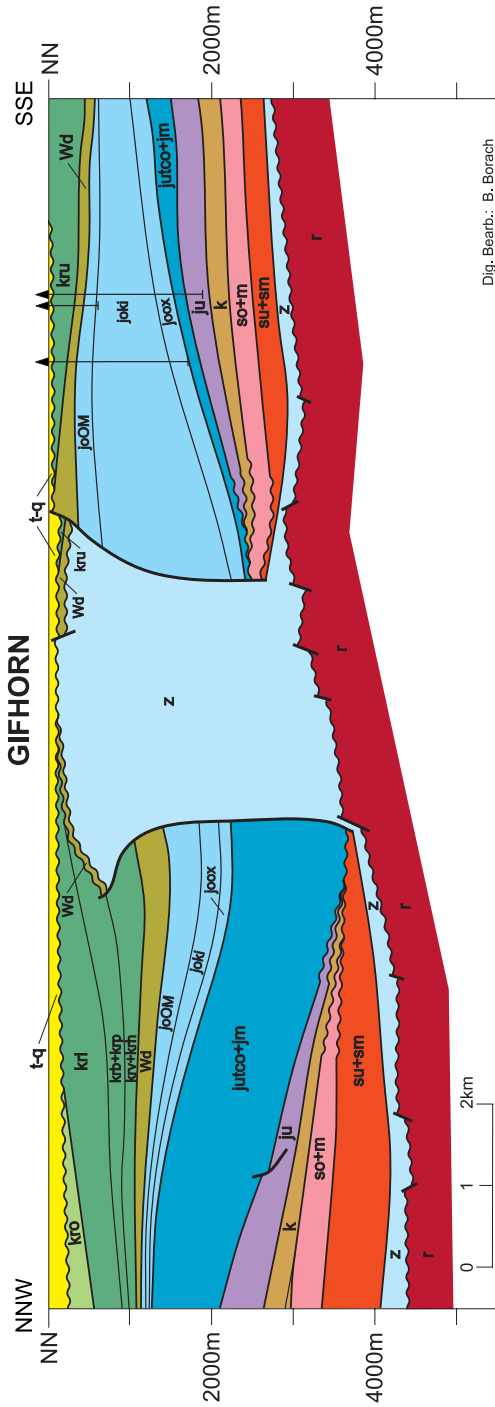


Fig. 6. Przekrój przez strukturę GIFhorn według Baldschuhna (1983, z Baldschuhn i in. 1996, 2001).

Asymetryczny diapir solny wzdłuż strefy uskoku podłoża. Widać różny wiek wtórnych synklin obrzeżających, po lewej stronie (na zruzuonym bloku) bajtos – kelowej, a po prawej późna jura.

Cross section of the GIFhorn Structure according to Baldschuhn (1983, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001).

Asymmetrical salt diapir straddling basement fracture zone. Note the different ages of the secondary rim synclines to the left (downthrown block, Bajtosian – Callovian) and right (late Jurassic).

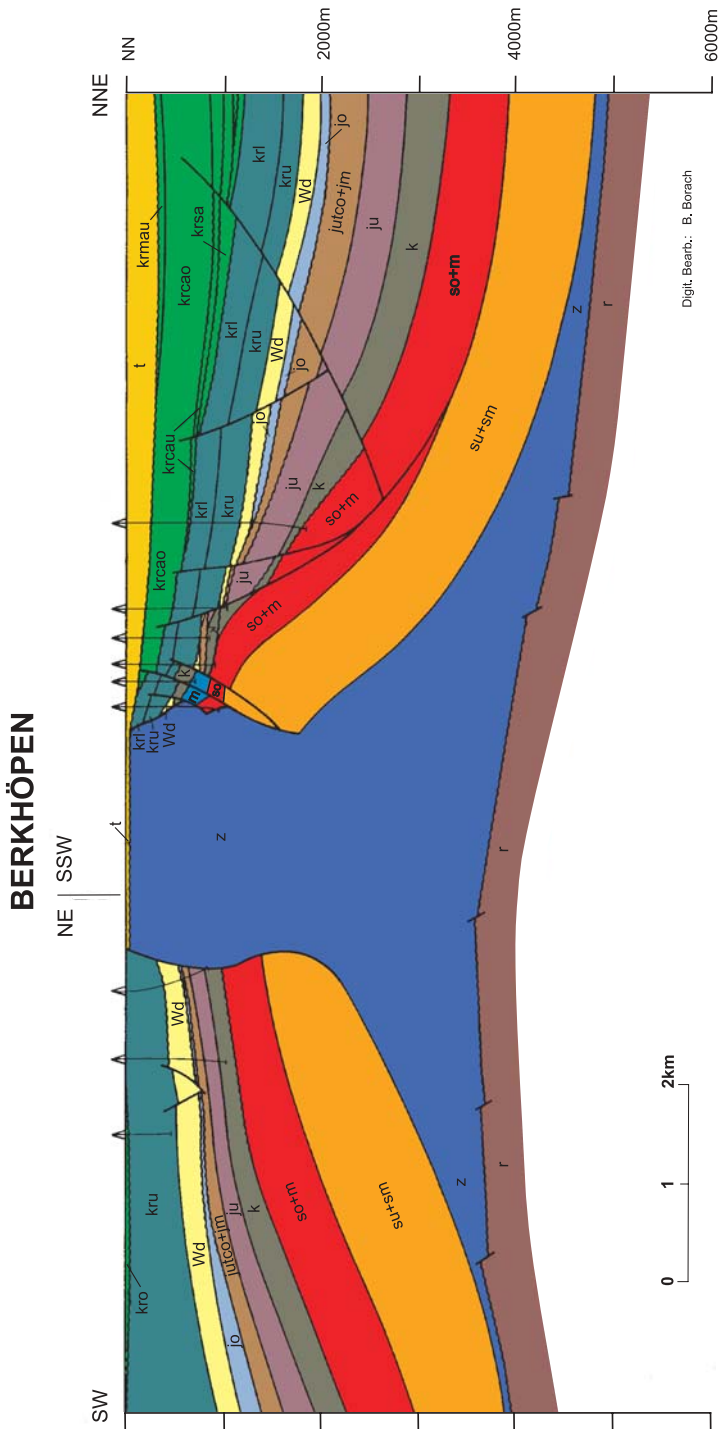


Fig. 7. Przekrój przez strukturę Berkhöpen według Baldschuhna (1983, z Baldschuhn i in. 1996, 2001).

Asymetryczny diapir solny wzdłuż strefy dyslokacyjnej w podłożu.

Cross section of the Berkhöpen Structure according to Baldschuhn (1983, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001).

Asymmetrical salt diapir straddling basement fracture zone.

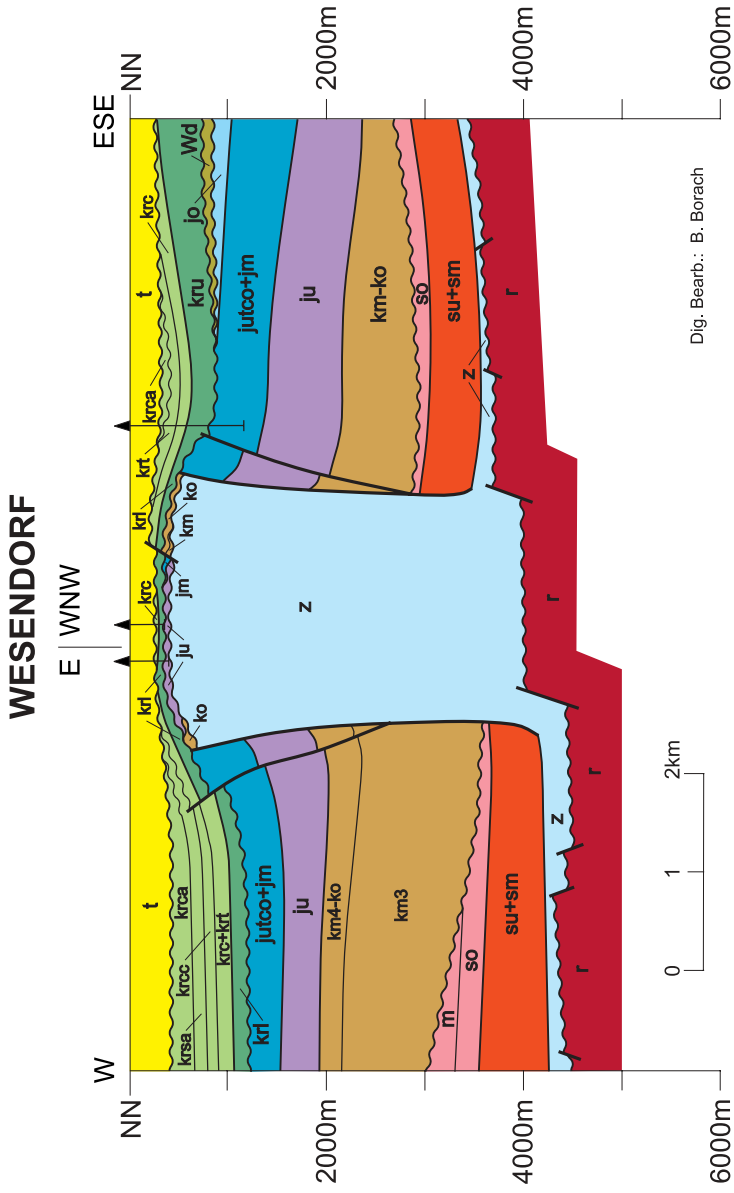


Fig. 8. Przekrój przez strukturę Wesendorf według Baldschuhna (1983, z Baldschuhn i in. 1996, 2001). Asymetryczny diapir solny wzdłuż strefy dyslokacyjnej w podłożu.

Cross section of the Wesendorf Structure according to Baldschuhn (1983, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001). Asymmetrical salt diapir straddling basement fracture zone.

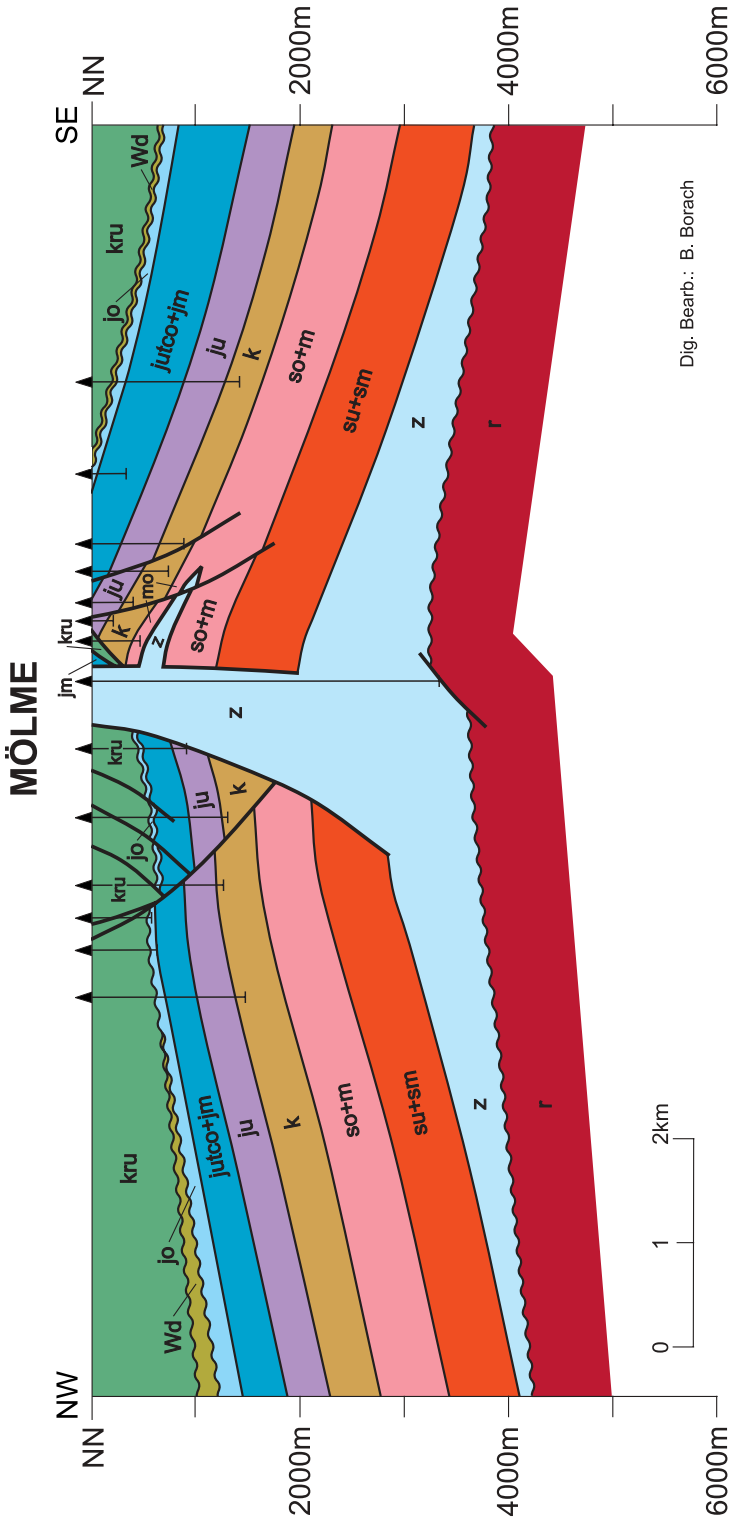


Fig. 9. Przekrój przez strukturę Mölme według Kockela (1984, z Baldschuhna i in. 1996, 2001). Uskok wypełniony solą, którego aktywność powtarzała się w mezozoiku. „Diapir” ten nie ma wtórnych niecek brzeżnych. Cross section of the Mölme Structure according to Kockel (1984, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001). Salt-filled fault, repeatedly active during the Mesozoic. Note, that this “diapir” has no secondary rim synclines.

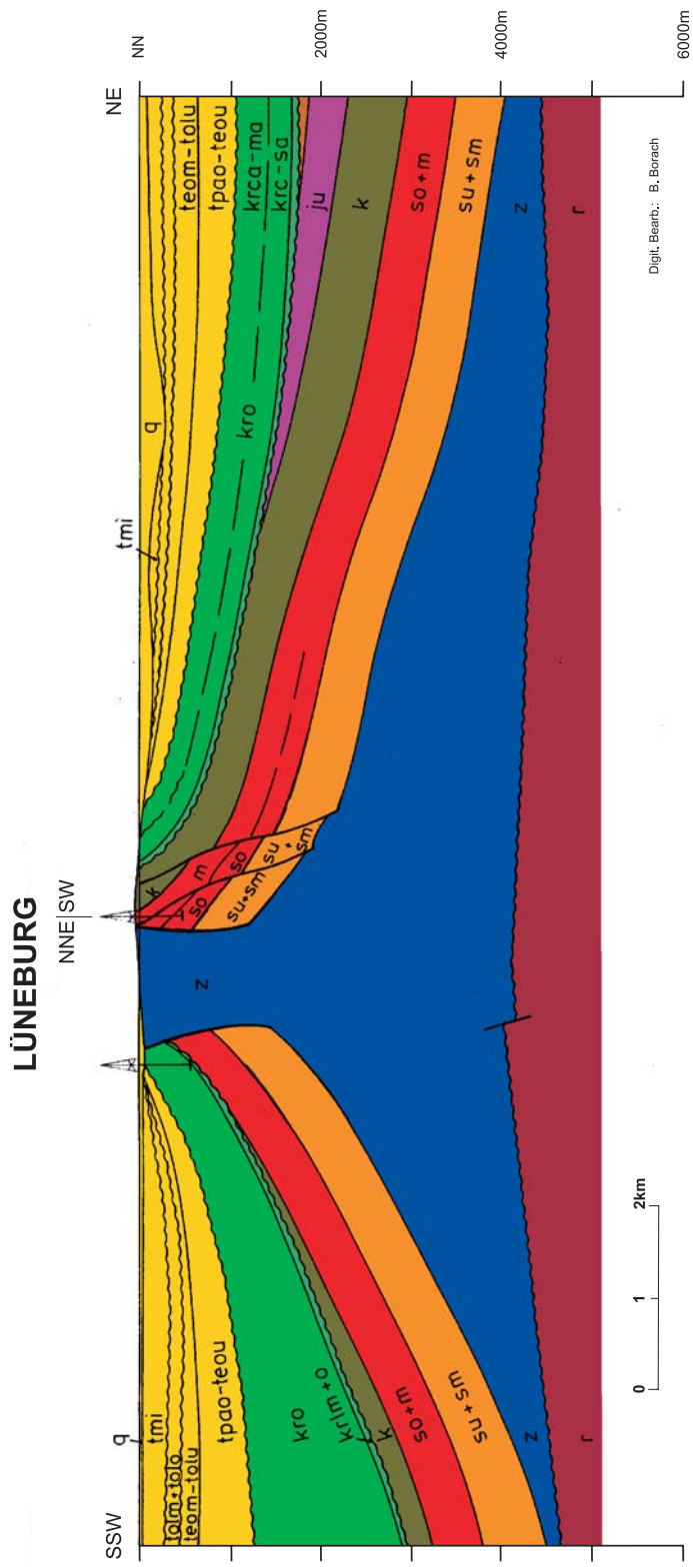


Fig. 10. Przekrój przez strukturę Lüneburg według Jürgensa (1982, z Baldschuhna i in. 1996, 2001).

Diapir ten osiągnął powierzchnię, ale nie wytworzył wtórnych synklin obniżających.

Cross section of the Lüneburg Structure according to Jürgens (1982, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001).

This diapir which reaches the surface, has not yet developed secondary rim synclines.

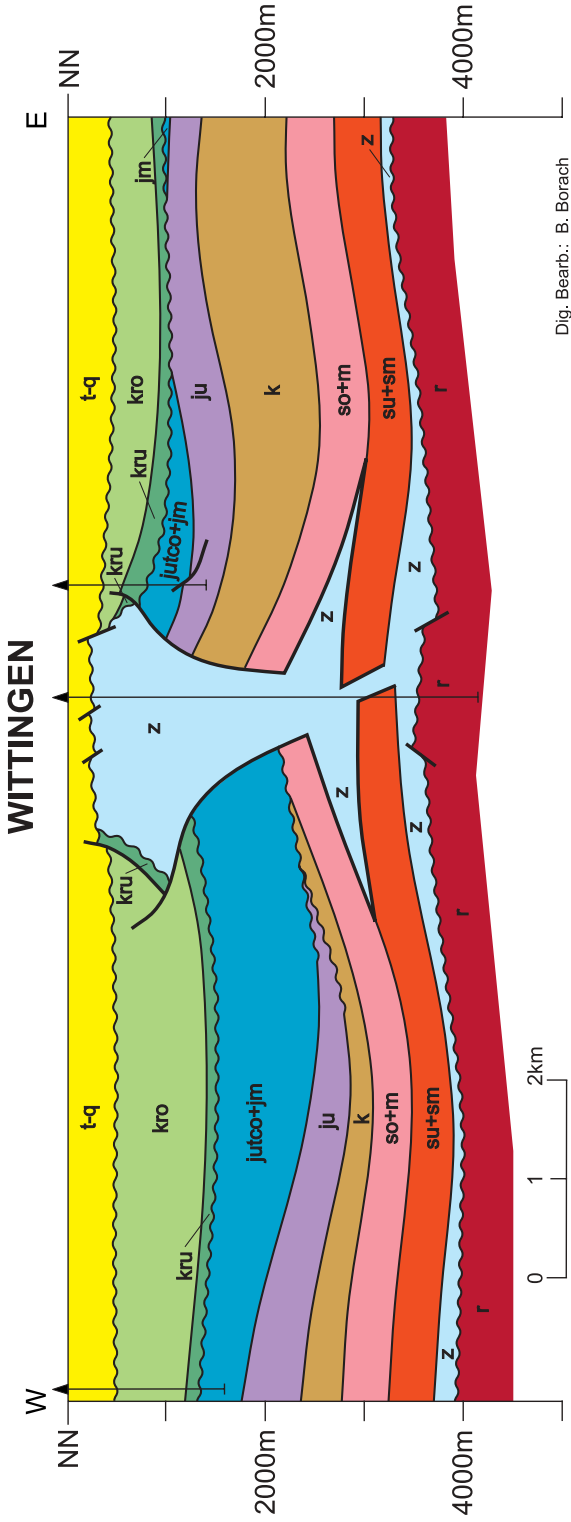


Fig. 12. Przekrój przez strukturę Wittingen według Frischa (1994, z Boldschuhna i in. 1996, 2001).

Diapir nad strefą rozłamanową Brunswik – Gifhorn o kierunku NNE-SSW. Faza diapirowa miała miejsce w środkowej jurze, a deformacje kompresyjne i wciskanie klinów solnych w poziom solny górnego pstręgo piaskowca zachodziło w czasie późnej kredy.

Cross section of the Wittingen Structure according to Frisch (1994, from Boldschuhn *et al.* 1996, 2001).

Salt diapir straddling the NNE-SSW-trending Braunschweig-Gifhorn fracture zone. The diapiric phase took place in the middle Jurassic, compressional deformation and formation of salt wedges in the Upper Buntsandstein salt level in late Cretaceous times.

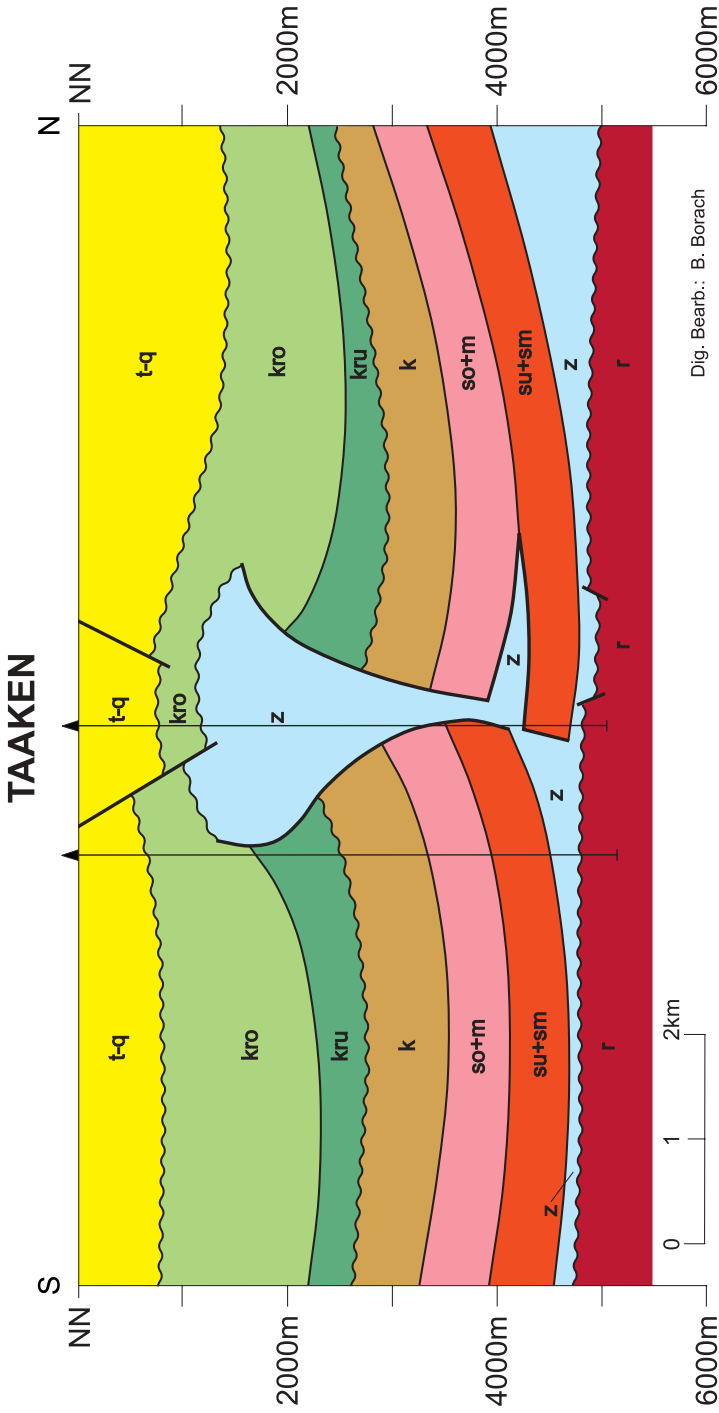


Fig. 13. Przekrój przez diapir solny Taaken według Frischa (1994, z Baldschuhna i in. 1996, 2001).

Faza diapirowa miała miejsce we wczesnej kredzie, a jej kompresyjne przetworzenie w czasie późnej kredy. Zwraca uwagę, że w poziomie pstręgi piaskowca poprzednie rozciąganie zostało przewyższone przez późniejszą kompresję, dlatego dolny i środkowy pstry piaskowiec są zdwojone.

Cross section of the Taaken Salt Diapir according to Frisch (1994, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001).

The diapiric phase took place in early Cretaceous times, overprinting by compression in late Cretaceous times. Note, that in the Buntsandstein level the former dilatation is overcompensated by compression, as lower and middle Buntsandstein are doubled.

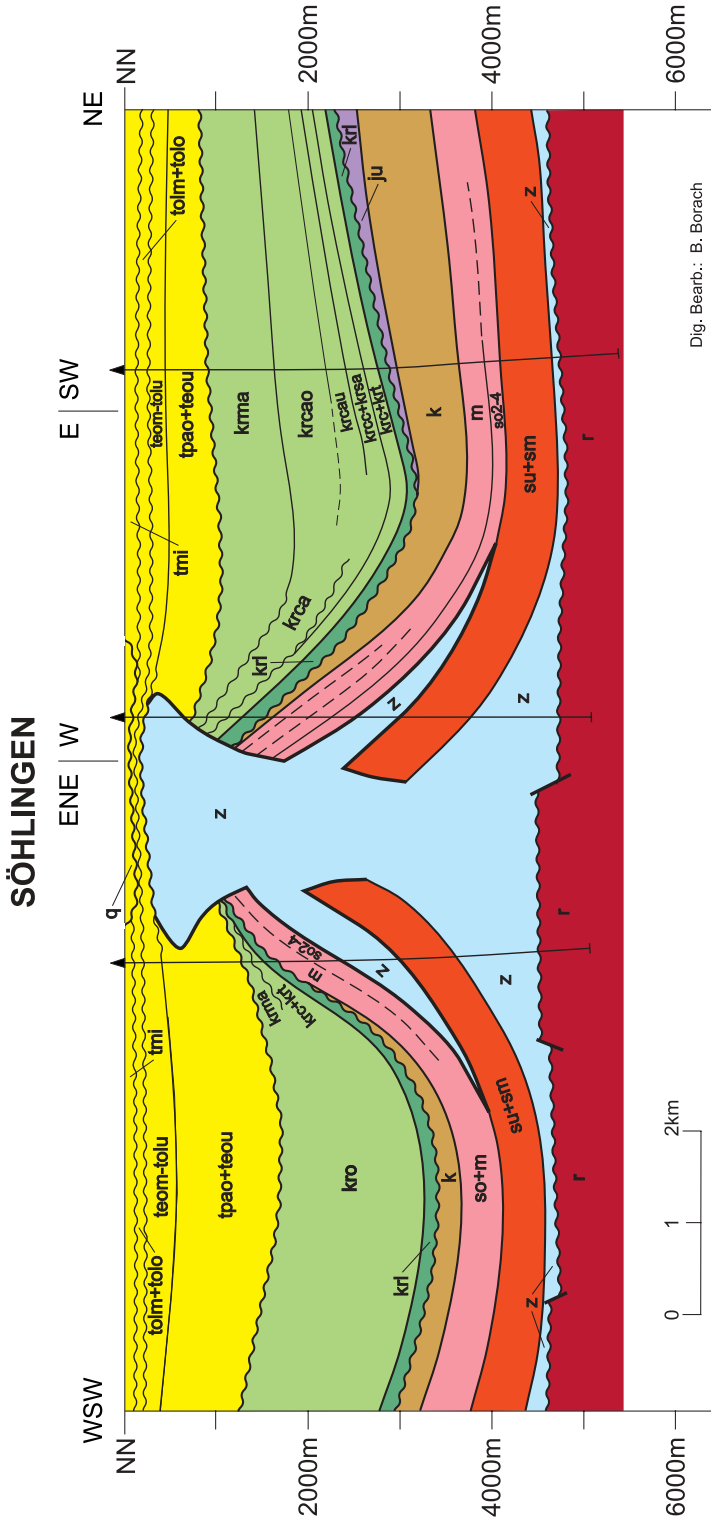


Fig. 14a. Przekrój przez strukturę Söhlingen według Baldschuhna (1987, z Baldschuhn i in. 1996, 2001).

Kliny solne w poziomie solnym retu przechylone podczas pokredowego wznoszenia diapiru.

Cross section of the Söhlingen Structure according to Baldschuhn (1987, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001).

Salt wedges in the Röt salt level. The wedges are tilted by post-Cretaceous rise of the diapir.

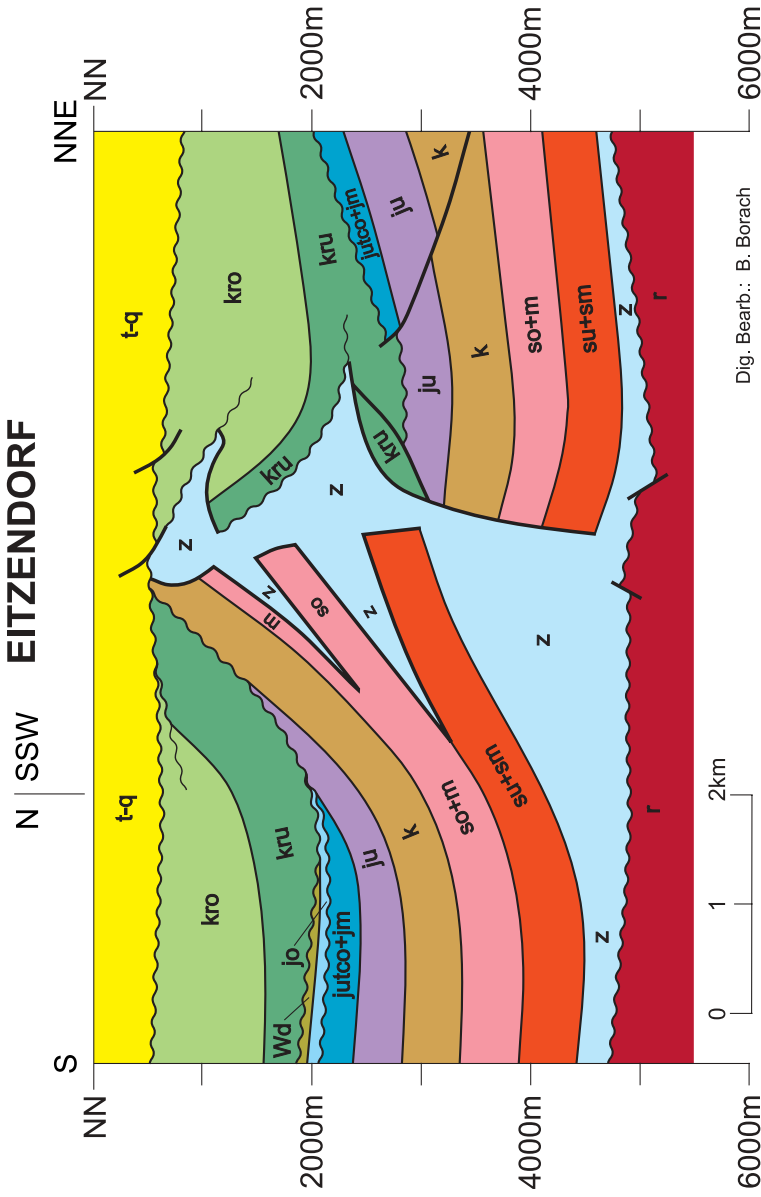


Fig. 14b. Przekrój przez strukturę Eitzendorf według Frischa (1994, z Baldschuhn i in. 1996, 2001).

Kliny solne w poziomach solnych retu i środkowego wapienia muszlowego. Struktura ta wznosi się na ziniersowanym lineamencie Aller. Cross section of the Eitzendorf Structure according to Frisch (1994, from Baldschuhn *et. al.* 1996, 2001). Salt wedges in the Röt and Middle Muschelkalk salt levels. The structure straddles the inverted Aller lineament.

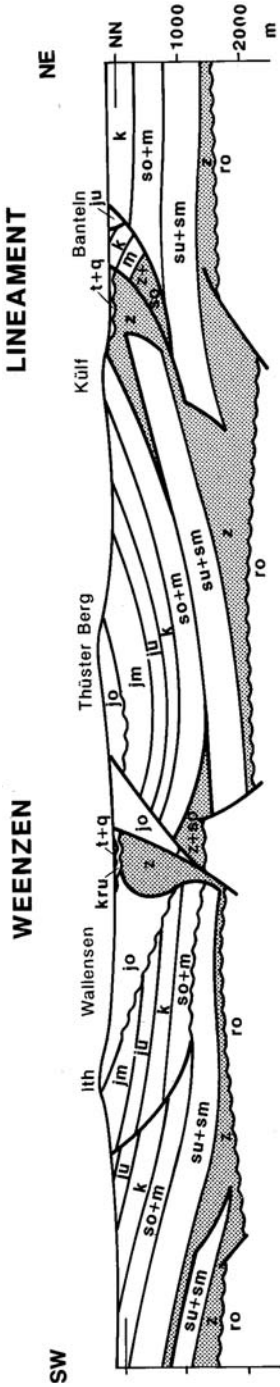


Fig. 17. Przekrój przez strukturę Doliny Leine według Kockela (1987, z Baldschuhn i in. 1996, 2001).

Struktura solna, klina solne i nasunięcie „smarowane” są. Podczas późnej jury struktura Doliny Leine była normalnym uskokiem zapadającym ku SW. W koniaku – santonie uskok ten został uaktywniony jako odwrotny i przekształcony w nasunięcie.

Cross section of the Leinetal structure according to Kockel (1987, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001).

Salt structure, salt wedges and salt-lubricated thrust. In the upper Jurassic the Leinetal structure was a normal fault, dipping towards the SW. In Coniacian-Santonian times this fault was reversely activated and transformed into an overthrust.

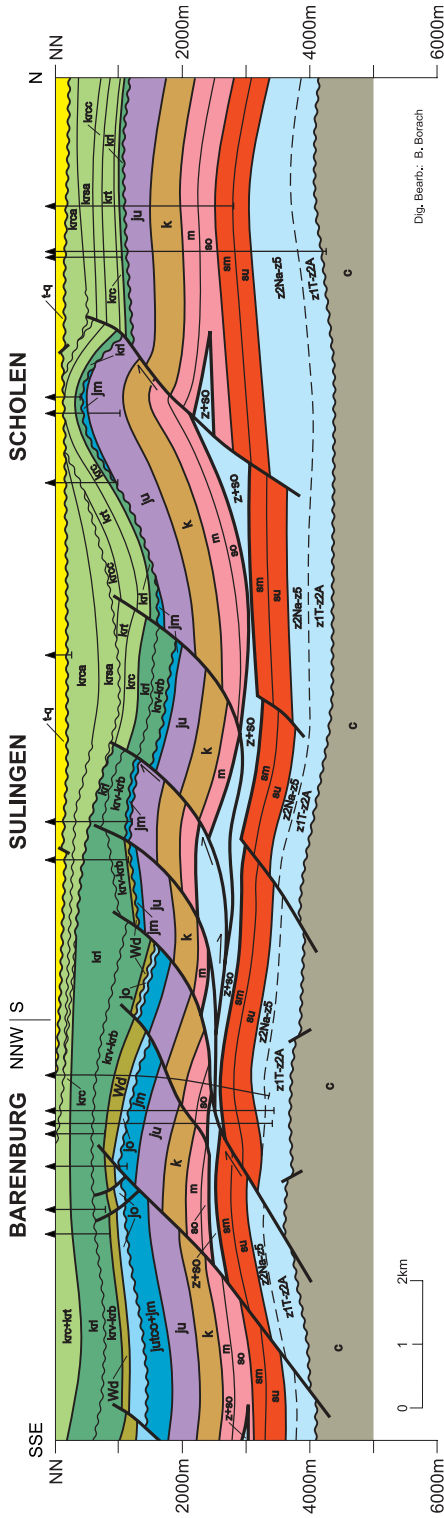


Fig. 18. Przekrój przez struktury Barenburg, Sulingen i Scholen według Baldschuhn i Kockela (1997, z Baldschuhn i in. 2001). Struktury inwersyjne na północnej granicy basenu dolnosaksońskiego. Zwracają uwagę odkucia w utworach solonośnych cechsztynu i górnego psstrego piaskowca. Powierzchnie nasunięć są „smarowane” przez sole cechsztyńskie i triasowe.

Cross section of the Barenburg, Sulingen, Scholen Structures according to Baldschuhn & Kockel (1997, from Baldschuhn *et al.* 1996, 2001). Inversion structures at the northern boundary of the Lower Saxony Basin. Note the decollement in the Zechstein layer and in the Upper Buntsandstein salt level. The thrust plane is lubricated by Zechstein and Triassic salt.

skrzydłach tych przetworzonych przez kompresję struktur solnych są „kliny solne” albo „solne intruzje” (Baldschuhn i in. 1998; Kockel 1998). Sole cechsztyńskie są wciśnięte poziomo w warstwy mezozoiczne, przede wszystkim w warstwy solne górnego pstręgo piaskowca, środkowego wapienia muszlowego i środkowego kajpru. Te „kliny solne”, które intrudowały w warstwę solną górnego pstręgo piaskowca, wypiętrzyły wapień muszlowy i młodsze skały, tworząc w ten sposób kąt pomiędzy poziomami odbijającymi (refleksyjnymi) dolnego pstręgo piaskowca a typowym silnym poziomem refleksyjnym wapienia muszlowego. Kliny te zostały kilkakrotnie przewiercone i opróbowane na analizy składu izotopowego siarki w siarczanach towarzyszących soli. Zarówno triasowe, jak cechsztyńskie stosunki izotopowe siarki zostały w nich stwierdzone. Fakt, że w strukturach solnych cechsztyńskich może leżeć na stropie środkowego pstręgo piaskowca był już obserwowany przez Rennera (1914), lecz później został zapomniany. Dopiero w latach sześćdziesiątych Herrmann i in. (1967, 1968) ponownie opisali i dobrze udokumentowali kliny solne z południowej Dolnej Saksonii. Dotychczas rozpoznano wiele takich klinów (Fig. 12–17), a ich powstawanie przez kompresyjne przeobrażenie struktur zademonstrowano na modelach iłowych.

Gdy później taki klin solny zostanie wypiętrzony do poziomu subrozji, sól zostanie rozpuszczona i nadkład złożony głównie ze skał środkowego i górnego triasu zapadnie się. Tak zwane „obszary połamane” (Bruchfelder, broken up areas) powstają na ograniczonych powierzchniach, w których chaotycznie zorientowane bloki skał mezozoicznych odsłaniają się na powierzchni (np. Golmbacher Bruchfeld).

Skrajnym przypadkiem intruzji solnych jest nasunięcie smarowane solą. Figura 17 pokazuje taki przykład z północnego brzegu basenu dolnosaksońskiego. Sól cechsztyńska podczas inwersji i kompresji migrowała w poziom górnego pstręgo piaskowca, gdzie powstała druga powierzchnia odkłucia i dlatego obserwujemy bardzo skomplikowaną piętrową strukturę. Takie powierzchnie odkłucia mogą się rozciągać do 10 km prostopadle do biegu nasunięcia.

Czynniki wpływające na diapiryzm

Istnieje szereg czynników wpływających na proces diapiryzmu, które muszą być brane pod uwagę podczas próby sformułowania ogólnych praw tworzenia się diapirów, chociaż sądzę, że taka ogólnościowa teoria genezy diapirów jeszcze nie istnieje. Zbyt wiele jest czynników wpływających na ten proces, które nigdzie nie są dobrze poznane.

Ważne są reologiczne własności soli różnego wieku lub pochodzenia, ważna jest zawartość nie tak plastycznych jak sól składników (anhydryt, ily, zasadowe wulkanity). Dla przykładu zdolność płynięcia jest różna dla soli cechsztyńskich 2 (Stassfurt) i soli cechsztyńskich 3 (Leine). Sól Leine jest znacznie bardziej stabilna

i zwykle jej uruchomienie zaczyna się znacznie później niż soli Stassfurt lub soli czerwonego spągowca.

Prawdopodobnie, bardzo ważna jest pozycja strukturalna basenów solnych. Diapiry powstałe w basenach solnych na skraju kier kontynentalnych (Zatoka Meksykańska, Gabon, Brazylia) są zupełnie inne od diapirów w basenach intrakratonicznych, takich jak środkowoeuropejski basen permski, lub basenów położonych w pasmach orogenicznych (karpacki basen molasowy w Rumunii lub w północnych Pirenejach).

Musi być też uwzględniana historia geologiczna regionów diapirowych. Powoduje ona wielkie różnice, gdy struktury solne powstają w czysto rozciągającym polu naprężeń, albo jeżeli są później poddane działaniu kompresyjnej fazy strukturotwórczej po wcześniejszej rozciągającej.

Główne znaczenie wydaje się mieć szybkość procesu diapirotwórczego. Gdy diapiryzm jest powolnym, synsedymencyjnym procesem, jak w przypadku wielu struktur w Niemczech, może to prowadzić do jednoczesnego tworzenia wtórnych synklin (niecek) brzeżnych. Gdy proces ten przebiega gwałtownie, po sedimentacji i po fałdowaniu, dochodzi do diapiryzmu takiego jak w górach Zagros, gdzie nie mogły się rozwinąć wtórne brzeżne synkliny (niecki).

Prawdopodobnie największym utrudnieniem w stworzeniu ogólnej teorii genezy struktur solnych jest brak dostępu do danych przemysłowych. Nikt nie ma dostępu do wszystkich potrzebnych oryginalnych sejsmicznych i wiertniczych danych ze wszystkich prowincji solnych świata (od Zatoki Meksykańskiej po Turkiestan). Zwykle badacze znają bardzo dobrze 10 do 15 struktur solnych w jednym basenie, a resztę ze studiów literatury z niewystarczająco reprodukowanymi danymi sejsmicznymi. Bardzo niebezpieczne jest przenoszenie jednej hipotezy uzasadnionej w jednym szczególnym basenie na drugi znany tylko z literatury.

Struktury solne są osobliwymi strukturami i muszą być tak traktowane. To znaczy, że każda struktura musi być osobno, dokładnie kartowana i opisywana wraz ze swoim otoczeniem, ponieważ nie zostały jeszcze ustalone ogólne, stosowalne na całym świecie, prawa powstawania struktur solnych i prawdopodobnie nigdy nie będą.

Podsumowanie

Na podstawie naszych studiów struktur solnych w Niemczech można ustalić kilka prawidłowości, które są uzasadnione dla struktur solnych tego obszaru.

- Sól nie uruchamia się samorzutnie. Wymaga jakiegoś impulsu wyzwalającego jej płynięcie. Takimi inicjującymi impulsami były ruchy rozciągające (rifting movements, ruchy ryftujące) w podłożu soli, zachodzące w tensyjnym polu naprężeń.

- Struktury solne Niemiec zwykle występują wzdłuż uskoków podłoża. Rozmieszczenie diapirów solnych w Północnych Niemczech i w niemieckim sektorze Morza Północnego naśladuje układ uskoków w podłożu.

- Fazy rozciągania (ryftowania, rifting phases) rozrywają także nadległe skały, młodsze od soli i w ten sposób otwierają drogi dla soli przebijającej nadkład. Sama zdolność do pełnienia lżejszej soli jest niewystarczająca do rozerwania pokrywy osadowej.

- Tektoniczne impulsy wywołujące diapiryzm w Niemczech były krótkotrwałe i mogą być dość precyzyjnie datowane na: środkowy pstry piaskowiec przed niezgodnością „H” (Hardeggen), środkowy wapień muszlowy, górny kajper gipsowy przed niezgodnością „Steinmergelkeuper”, kilka pulsów od środkowej jury po wczesny apt (z których najintensywniejszy był podczas późnej jury) oraz kilka impulsów w trzeciorzędzie.

- Diapiryzm jest przede wszystkim wypełnianiem otwartych uskoków w nadkładzie soli. Nie musi to prowadzić automatycznie do tworzenia wtórnych niecek brzeżnych.

- Intensywne ryftowanie, takie jak w pстрыm piaskowcu przed niezgodnością „H”, może doprowadzić do „procesów tworzenia kier” (rafting processes), podczas których sedimentacyjny nadkład soli (pstry piaskowiec) został rozdrobniony na pływające w soli bloki (kry).

- Diapiry solne powstałe w rozciągającym polu sił (dilatational stress regime) mogły być przetworzone przez kompresję w czasie od koniakum do kampanu. Morfologia pierwotnych diapirów mogła więc zostać zmieniona, pień ścięziony (Fig. 11–14, 16), a wyciśnięta sól utworzyła duże przewieszki, prawdopodobnie podmorskie „lodowce solne” przykryte przez osady późnokredowe. Poprzednie rozrywanie podczas fazy ryftowania mogło zostać z nadwyżką zrównoważone (overcompensated) przez tę kompresję.

- Podczas fazy kompresyjnej i inwersji mogły powstać „kliny solne” (salt wedges), czyli intruzje soli cechsztyńskich w kształcie klinów w warstwy solne wśród mezozoicznego nadkładu. Kliny solne pochodzą ze zboczy diapirów lub uskoków wypełnionych solą.

- Istnieją przejściowe formy pomiędzy diapirami solnymi przekształconymi przez kompresję a strukturami inwersyjnymi. Struktury inwersyjne, zawierające warstwy solne często wykazują obecność klinów solnych.

- Kliny solne wykazują formy przejściowe do „nasunięć smarowanych solą” (“salt lubricated thrusts”) i stref nasunięć w zinwersowanych częściach basenu. Te nasunięcia stanowią drugie strukturalne powierzchnie odklucia ponad warstwą soli cechsztyńskich (Fig. 16–18).

Podziękowania: Przekroje przedstawiające różne typy struktur solnych NW Niemiec i Morza Północnego pochodzą z prac Baldschuhna i in. (1996, 2001). Przekroje te są oparte na interpretacji danych sejsmicznych przetworzonych na skalę głębokościową i danych wiertniczych bez pionowego przewyższenia, podane pod nimi nazwiska autorów i daty odnoszą się do członków zespołu Federalnego Instytutu Geologicznego Niemiec (Bundesanstalt für Geowissenschaften und

Rohstoffe – BGR) i wewnętrznych raportów tego instytutu. Materiały źródłowe zostały udostępnione przez niemiecki przemysł naftowy reprezentowany przez WEG (Wirtschaftsverband Erdöl Erdgas), któremu jestem wdzięczny za pozwolenie opublikowania tych wyników. Praca była finansowana przez Federalne Ministerstwo Nauki i Technologii (BMWF) i Federalne Ministerstwo Gospodarki (BMWi).

Thum. Jerzy Głazek

Literatura

- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S., Frisch, U. & Kockel, F., 2001: Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor – Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. *Geol. Jb.*, 153: 1–95; 3 CD Rooms; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F., 1996: *Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:300 000*, Teil 3–16: 14 Strukturkarten. Bundesanstalt f. Geowissenschaften u. Rohstoffe, Hannover.
- 1998: Der Salzkeil, ein strukturelles Requisite der saxonischen Tektonik. *Z. dt. geol. Ges.*, **149**, 1: 59–69.
- BENTZ, A., 1929: Salzstöcke und Erdöllagerstätten, ein Vergleich mit bes. Berücksichtigung der deutschen Vorkommen., *Kali*, **23**: 321–326, 341–344.
- 1931: Die geologischen Grundlagen der norddeutschen Erdölvorkommen. *Petroleum*, **27**: 259–266.
 - 1932a: Geologische Voraussetzungen für das Auftreten von Erdöllagerstätten in Deutschland. *Z. dt. geol. Ges.*, **84**: 369–389.
 - 1932b: Zur Entstehung der hannoverschen Erdöllagerstätten. *Petroleum*, **28**: 1–10.
 - 1949: Ergebnisse der erdölgeologischen Erforschung Nordwestdeutschlands 1932–1947. Ein Überblick. In: Bentz (Hrsg.): *Erdöl und Tektonik in Nordwestdeutschland*: 7–18. Amt für Bodenforschung Hannover-Celle.
- BEST, G., 1996: Floãtektonek in Norddeuschland: Erste Ergebnisse reflexionsseismischer Untersuchungen an der Salzstruktur “Oberes Allertal”. *Z. dt. geol. Ges.*, **147**, 4: 455–464.
- CLOSS, H., 1974: Die geophysikalische Reichaufnahme und ihre Vorgeschichte. In: Birrett et al. (eds.): *Zur Geschichte der Geophysik*: 115–130.
- FULDA, E., 1938: *Die Salzlagerstätten Deutschlands*, 1–140. Bornträger, Berlin.
- GE, H., JACKSON, M. P. A. & VENDEVILLE, B. C., 1997: Kinematics and dynamics of salt tectonics driven by progradation. *Amer. Assoc. Petroleum Geol., Bull.*, **81**: 398–423.
- HERRMANN, A., HINZE, C. & STEIN, V., 1967: Die halokinetische Deutung der Elfes-Überschiebung im südniedersächsischen Bergland. *Geol. Jb.*, **84**: 407–462.
- HERRMANN, A., HINZE, C., HOFRICHTER, E. & STEIN, V., 1968: Salzbewegungen und Deckgebirge am Nordostrand der Sollingscholle (Ahlzburg). *Geol. Jb.*, **85**: 147–164.
- JACKSON, M.P.A., ROBERTS, D.G. & SNELSON, S. (eds.), 1996: Salt Tectonics, a global perspective. *Amer. Assoc. Petroleum Geol., Mem.*, **65**: 1–454.
- JARITZ, W., 1968: Einige Bemerkungen über die Entstehung der Salinarstrukturen Nordwestdeutschlands. *Erdöl u. Kohle*, **21**, 9: 519–520.
- 1973: Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. *Geol. Jb.*, **A10**: 1–77.
 - 1980: Einige Aspekte der Entwicklungsgeschichte der nordwestdeutschen Salzstöcke. *Z. dt. geol. Ges.*, **131**: 387–408.

- 1987: The origin and development of salt structures in NW-Germany. In: Lerche & O'brian (eds.): *Dynamical geology of salt and related structures*, Academic Press, Orlando: 479–493.
- KOCKEL, F., 1998: Salt problems in northwest Germany and the German North Sea sector. *J. seismic explor.*, **7**, 3/4: 219–235.
- KOCKEL, F. (ed.) with contributions by Baldschuhn, R., Best, G., Binot, F., Frisch, U., Grosse, U., Jürgens, U., Röhling, H.-G., & Sattler-Kosinowski, S., 1995: Structural and palaeogeographical development of the German North Sea sector. *Beiträge zur regionalen Geologie der Erde*, **26**:1–96, Bornträger, Berlin–Stuttgart.
- MEINHOLD, R., 1956: Bemerkungen zur Frage des Salzaufstieges. *Freiberger Forschungsh.*, **C 22**: 65–67.
- 1959: Salzbewegung und Tektonik in Norddeutschland. *Ber. geol. Ges. DDR*, **4**: 157–168.
- MEINHOLD, R. & REINHARDT, H.-G., 1967: Halokinese im Nordostdeutschen Tiefland. *Ber. geol. Ges. DDR, A Geol., Paläont.*, **12**, 3/4: 329–353.
- REMMELTS, G., 1996: Salt tectonics in the southern North Sea, the Netherlands. In: Rondeel, Batjes & Nieuwenhuijs (eds.). *Geology of gas and oil under the Netherlands*: 143–158. Royal geol. mining Soc. Netherlands, Kluwer Acad. Publ., Amsterdam.
- RENNER, O., 1914: Salzlager und Gebirgsbau in Mittleren Leinetal. *Archiv f. Lagerstättenforschung*, **13**: 1–123.
- SANNEMANN, D., 1963: Über Salzstock-Familien in NW-Deutschland. *Erdölz.*, **79**, 11: 499–506.
- 1968: Salt-stock families in Northwestern Germany. In: Diapirism and diapirs. *Amer. Ass. Petrol. Geol., Mem.*, **8**: 261–270.
- STILLE, H., 1911: Der Untergrund der Lüneburger Heide und die Verteilung ihrer Salzvorkommen. *Jber. niedersächsischen geol. Vereins*, **7**: 225–286.
- 1917: Injektivfaltung und damit zusammenhängende Erscheinungen. *Geol. Rdsch.*, **8**: 89–142.
- THIEME, B. & ROCKENBAUCH, K., 2001: Floßtektonik in der Trias der Deutschen südlichen Nordsee. *Erdöl, Erdgas, Kohle*, **117**, 12: 568–573.
- TRUSHEIM, F., 1957: Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. *Z. dt. geol. Ges.*, **109**: 111–158.
- 1960: Mechanism of Salt Migration in Northern Germany. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, **44**, 9:1519–1540.
- WEIJERMARS, R., JACKSON, M. P. A. & VENDEVIELLE, B. C., 1993: Rheological and tectonic modelling of salt provinces. *Tectonophysics*, **217**: 143–174.

Problems of diapirism in northern Germany

Abstract: The historical development of salt- and diapirism research in Germany is briefly outlined. A systematic investigation of all (over 280) salt structures in NW-Germany and in the German North Sea sector reveals, that a comprehensive theory on diapirism cannot be formulated. Several factors as plate tectonic setting of salt basins, lithofacial development of evaporitic sequences involved, local and regional changes of the stress field in geological times and velocity of diapirism play an important role in the development of the different morphological types of

salt structures. 16 examples of different salt structures from Northwest Germany and the German North Sea sector are presented as geologically interpreted and depth-converted seismic sections in order to demonstrate the great variety of salt structures in this part of the Southern Central European Permian basin.

Key words: tectonics, diapirism, salt, Permian, Germany.

Summary

Salt structures in Northern Germany attracted geoscientists since the last decades of the 19th century as their content of potassium salts represented an extraordinary economic potential. Until 1914 more than 150 shafts had been sunk and the interior fabric within the salt structures had been studied in detail by mining activities (for summary see Fulda 1938). Early theoretical investigations had been published by Stille (1911, 1917), who created the term “Ejectiv-Faltung”, explaining the genesis of salt structures by compressional folding in the course of the “Saxonian frame folding”. After 1918 salt structures became the target of hydrocarbon prospecting in Germany. Then modern geophysical tools like gravity measurements and “fan shooting” refraction seismic allowed the spotting of salt structures also under sedimentary cover. In the thirties and early forties it was generally believed, that oil was generated from Zechstein rocks and thus was linked to the Permian salt structures (Bentz 1929, 1931, 1932a, 1932b). Governmentally financed investigation programmes had their theoretical base in this paradigm (Bentz 1949; Cloos 1974).

A new theory for the genesis of salt structures was developed (Trusheim 1957, 1960, Sannemann 1963, 1968; Meinhold 1956, 1959; Meinhold & Reinhardt 1967; Jaritz 1973). The data base for this theory of “halokinesis” were analogously registered reflection seismic measurements. On a weakly inclined or irregular surface of the pre-Zechstein salt basement salt is assumed to start to flow autonomously, if sedimentary load, thickness of salt and increase of temperature are sufficient. The salt flows in horizontal direction and forms so called “salt pillows” with up-warped, but intact sedimentary cover. As salt is lighter than the overlying sediments, it forms an up-buckled structure because of the buoyancy effect. On the top of the rising salt pillow the sedimentation rate is less compared with that in the areas from which the salts migrates into the pillow. Thus “primary rim synclines” originate around the pillow as a consequence of mass compensation. This development is an autonomous process, once started. The salt body increases in height, in its roof dilatation cracks, faults and graben structures originate. Along these faults the salt may penetrate its sedimentary cover. The “diapiric phase”, the most active phase in the life of a diapir, is commenced. The mass deficit is immediately compensated by sediments. “Secondary rim synclines” originate, thick sedimentary troughs over the former pillow roof, which was characterised by reduced sedimentation. At the base of these troughs

normally an unconformity is found the age of which is used to date the beginning of the “diapiric phase”. The diapir may rise further continuously or in pulses. Further mass deficit around the diapir by migration of salt is compensated by sediments, which form a “tertiary syncline”. This theory was ingenious and explained several observations (Fig. 1). It put aside the views of Stille, his compressional origin of salt diapirs and his “tectonic phases”. All salt structures should develop continuously and their origin is local. The unconformities observed were no longer signs of world-wide tectonic pulses but local consequences of halokinesis. This theory was a true change in paradigm.

New impacts on diapir research in Germany were caused by: (1) the boom in constructing subsurface storage facilities in salt caverns, triggered by the oil crisis and the need to form a “strategic oil reserve”; (2) the beginning of investigations of potential radioactive waste disposal sites in salt; (3) the compilation of the “Tectonic Atlas of NW-Germany and the German North Sea sector” from industrial reflection seismic and bore-hole data (Kockel 1995; Baldschuhn *et al.* 1996, 2001). These authors had the advantage to have access to the files of ca. 75 000 bore-holes and more than 1 million of reflection seismic lines, most of them digitally recorded. It became possible to investigate all 288 salt structures (Fig. 2), analyse their morphology and genesis and compare them. The resolution quality of the geophysical data permitted a detailed mapping of the fracturing of the top of pre-salt surface. An additional advantage was the information on internal structure of several salt domes which were investigated by potassium mines in the past and recently by solution mining and examination for radioactive waste disposal sites. This is an exception, as the internal structures of 99,99% of salt diapirs in the world remain unknown.

In the last forty years more and more salt dome provinces have been investigated by increasingly advanced geophysical methods all around the world. These investigations have clearly shown that Trusheim’s and Sannemann’s theory of autonomous halokinesis cannot be applied world-wide and is even questionable in Central Europe (*e.g.* Jackson *et al.* 1996; Ge *et al.* 1997; Baldschuhn *et al.* 1998; Kockel 1998).

Some examples of salt structures in NW-Germany (for location see Fig. 2) which do not match with the principles of the halokinesis theory are presented in a sequence of sections (Figs. 3–18) and shortly commented. From our studies of the German salt structures several principles can be derived which are valid for them:

(1) Salt does not move automatically. It needs an initial pulse triggering the salt flow. This initial pulse originates from rifting movements in the pre-salt basement in a tensional stress field.

(2) Salt structures straddle basement faults (Figs. 4–5). The salt diapir distribution in Northern Germany and German North Sea sector traces the basement fault pattern (*cf.* Fig. 2). The driving force for diapirism obviously are differential movements of the basement blocks.

(3) The rifting phases brake up also the post-salt overburden and thus open pathways for salt to break through the overburden. The buoyancy ability of the salt alone is insufficient to break the sedimentary cover (Fig. 3).

(4) The tectonic pulses triggering diapirism in Germany were short-living and can be dated: Middle Buntsandstein prior to the "H"-unconformity (Herdeggen), middle Muschelkalk, lower Gipskeuper, upper Gipskeuper prior to the Steinmergelkeuper-unconformity, middle Jurassic to early Aptian (several pulses, the most intense in the late Jurassic), Tertiary (several pulses). Diapirism did not proceed continuously but in phases. Maxima of the diapiric break-through events occurred in Keuper, late Jurassic and early Cretaceous times. These time spans are those, in which NW-Germany suffered the maximal dilatation connected with salt-independent rifting movements as consequence of the opening of the Atlantic Ocean.

(5) Diapirism at first is a filling of open faults in the overburden (Figs. 8–9). This does not lead automatically to the formation of secondary rim synclines.

(6) Intensive rifting in the Buntsandstein prior to the "H"-unconformity may lead to "rafting processes" during which the sedimentary cover of salt (Buntsandstein) becomes dismembered into floating blocks (rafts, cf. Fig. 16).

(7) Salt diapirs, originated in a dilatational stress regime may be overprinted by compression in Coniacian to Campanian times. The morphology of the original diapir then will alter, the stem becomes narrow (Figs. 4–5, 11–16) and squeezed-out salt forms large overhangs (Figs. 11–16) probably submarine salt glaciers, covered by late Cretaceous sediments. The former dilatation during the rifting phase can be overcompensated by this compression.

(8) During the compressional phase and inversion, "salt wedges" may originate (Figs. 12–17). These are wedge-shaped Zechstein salt intrusions into salt layers in the Mesozoic overburden. Salt wedges proceed from diapir flanks or from salt filled faults.

(9) There are transitions between overprinted salt diapirs and inversion structures. Salt-influenced inversion structures often show salt wedges.

(10) Salt wedges show transitions to salt-lubricated thrusts and thrust zones in inverted parts of the basin (Figs. 16–18). These thrusts form a second structural decollement plain above the Zechstein salt layer (Fig. 18).

One has to consider, that perhaps "halokinesis" is not the deciding principle for origin of salt structures.