

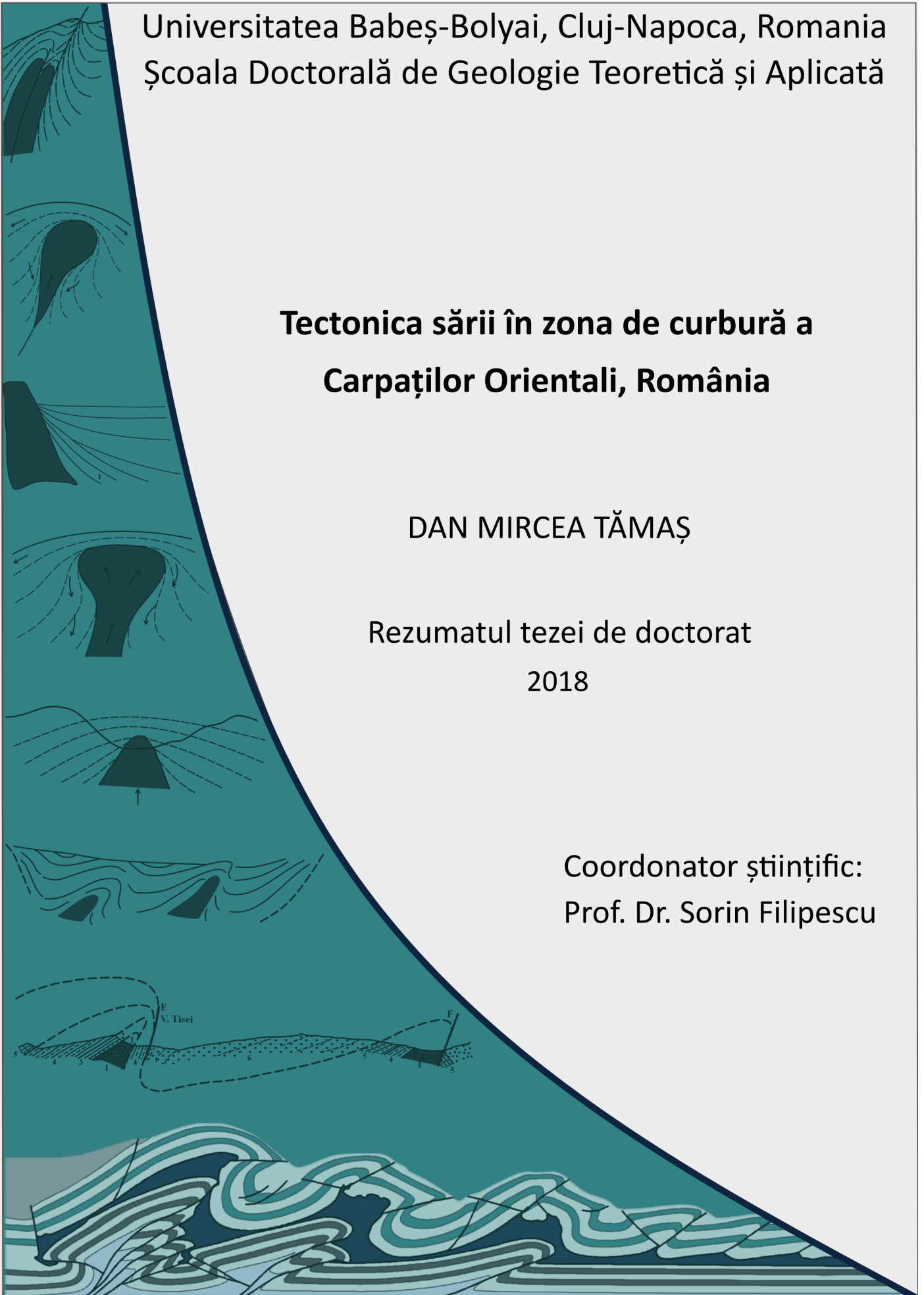
Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca, Romania  
Școala Doctorală de Geologie Teoretică și Aplicată

## Tectonica sării în zona de curbură a Carpaților Orientali, România

DAN MIRCEA TĂMAȘ

Rezumatul tezei de doctorat  
2018

Coordonator științific:  
Prof. Dr. Sorin Filipescu



**UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI, CLUJ-NAPOCA**  
**ȘCOALA DOCTORALĂ DE**  
**GEOLOGIE TEORETICĂ ȘI APLICATĂ**

TEZĂ DE DOCTORAT

**Tectonica sării în zona de curbură a**  
**Carpaților Orientali, România**

- Rezumat -

Coordonator științific:

Prof. Univ. Dr. Sorin Filipescu

Doctorand:

Dan Mircea Tămaș

2018

Cluj-Napoca, Romania

# CUPRINS

---

CUPRINS .....	1
ACKNOWLEDGEMENTS .....	4
<b>1. Introducere.....</b>	<b>6</b>
1.1. Concept.....	7
1.2. Zona de interes .....	7
1.3. Obiective.....	7
1.4. Prezentarea tezei.....	8
1.5. Publicatii legate de tema tezei .....	9
1.6. Nota .....	11
<b>2. Evaporitele, tectonica sării și diapirismul .....</b>	<b>13</b>
2.1. Ce sunt evaporitele? Ce este sarea?.....	13
2.2. Proprietățile fizico-mecanice ale sării .....	14
2.3. Tectonica sării și diapirismul.....	15
2.4. Importanța pentru hidrocarburi.....	18
<b>3. Privire de ansamblu asupra Zonei de Curbură a Carpaților Orientali din România .....</b>	<b>19</b>
3.1. Munții Carpați .....	20
3.2. Descrierea stratigrafiei din Zona Cutelor Diapire .....	23
3.2.1. <i>Eocen superior – Miocen inferior</i> .....	23
3.2.2. <i>Miocen mediu</i> .....	24
3.2.3. <i>Miocen superior - Pleistocen</i> .....	25
<b>4. Înțelegerea evoluției sării în context orogenic – evoluția conceptelor în Carpații Românești.....</b>	<b>28</b>
4.1. Introducere.....	28
4.2. Vârsta sării din Carpați.....	29
4.3. Evoluția conceptelor legate de tectonica sării .....	31
4.4. Înțelegerea modernă .....	38

4.5. Discuții și concluzii .....	41
<b>5. Tectonica sării în Zona de Curbură a Carpaților Orientali – reconstituiri pe baza datelor subterane .....</b>	<b>44</b>
5.1. Introducere.....	45
5.2. Date, metode și software .....	46
5.2.1. <i>Datele din subteran</i> .....	46
5.2.2. <i>Metode și software</i> .....	47
5.3. Evoluția Burdigalian inferioară – Badenian medie a tectonicii sării .....	49
5.4. Evoluția Badenian medie – Sarmațiană a tectonicii sării .....	52
5.5. Evoluția Meotian – recentă a tectonicii sării – Faza Valahă.....	55
5.5.1. <i>Evoluția Meoțian – Ponțiană</i> .....	56
5.5.2. <i>Evoluția Dacian, Romanian și Quaternarăt</i> .....	59
5.6. Evoluția diapirului de la Moreni – potențial viitor de dezvoltare al acestui zăcământ matur. ....	61
5.7. Discuții și concluzii .....	64
<b>6. Tectonica sării în Zona de Curbură a Carpaților Orientali – reconstituiri pe baza modelării analoge .....</b>	<b>67</b>
6.1. Introducere.....	67
6.2. Modelarea analogă – materiale, metode și software .....	68
6.2.1. <i>Materiale folosite și scalarea modelelor</i> .....	68
6.2.2. <i>Pregătirea experimentelor</i> .....	71
6.2.3. <i>Metode de monitorizare, vizualizare și integrare a rezultatelor</i> .....	74
6.2.4. <i>Limitările modelării</i> .....	75
6.3. Experimentele cu falii de decroșare.....	75
6.3.1. <i>Pregătirea modelelor</i> .....	76
6.3.2. <i>Evoluția cinematică</i> .....	77
6.4. Efectele eficienței planului bazal de decolare și grosimii sării: rezultate din modele .....	78
6.5. Evoluția cinematică a Zonei Cutelor Diapire: rezultate din modele.....	82

6.5.1.	<i>Modelele 2.5 și 2.6.....</i>	84
6.5.1.1.	<i>Evoluția cinematică.....</i>	84
6.5.1.2.	<i>Mișcarea sării.....</i>	86
6.5.1.3.	<i>Deformarea penetrantă.....</i>	88
6.5.2.	<i>Modelul 2.7.....</i>	89
6.5.2.1.	<i>Evoluția cinematică.....</i>	89
6.5.2.2.	<i>Mișcarea sării.....</i>	90
6.6.	<i>Cisçuții și comparație cu modelul natural.....</i>	91
6.7.	<i>Concluzii.....</i>	95
<b>7.</b>	<b>Reevaluarea stratigrafică preliminară a datelor din carote și probe de sită.....</b>	<b>98</b>
7.1.	<i>Introducere.....</i>	98
7.2.	<i>Criterii de selecționare a sondelor, managementul datelor și limitări.....</i>	99
7.3.	<i>Analiza biostratigrafică: interpretări și rezultate preliminare.....</i>	101
7.4.	<i>Magnetostratigrafie.....</i>	102
7.5.	<i>Interpretările aflorimentelor.....</i>	105
7.6.	<i>Discuții, concluzii și plan pe viitor.....</i>	107
<b>8.</b>	<b>Concluzii.....</b>	<b>111</b>
8.1.	<i>Implicații și concluzii.....</i>	111
8.2.	<i>Sugestii pentru viitoare cercetări.....</i>	114
	<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>115</b>
	<i>Anexa 1 – Unități și abrevieri.....</i>	135
	<i>Anexa 2 – Tabel cu reinterpretările datelor din carote și probe de sită a celor 65 de sonde.....</i>	136

**Cuvinte cheie:** tectonica sării, diapirism, modelare analoagă, geologie structurală, orogene, hidrocarburi, Carpații de Curbură, Zona Cutelor Diapire.

## Capitolul 1 - Introducere

Primul capitol al tezei prezintă conceptul care a stat la baza acestui proiect de cercetare, zona de interes, obiectivele, o scurtă prezentare a conținutului tezei și modul prin care au fost diseminate rezultatele tezei. O parte din rezultatele publicate au fost incluse în teză.

Tectonica sării este un domeniu de importanță globală, nu doar ca scop de cercetare, ci și pentru importanța pe care o are în geologia hidrocarburilor. Incercările de a înțelege acest domeniu au fost o preocupare pentru geologi de mai bine de 160 de ani. Acest lucru este valabil și pentru zona de curbură a Carpaților Orientali sau Carpații de Curbură (CC).

În această zonă (CC) sunt cantonate cele mai mari zăcăminte de petrol de pe uscatul României și sunt asociate cu principalul aliniament de diapire (Gura Ocniței – Moreni – Florești – Băicoi – Țintea). Una dintre cele mai mari dificultăți în înțelegerea evoluției diapirelor din acest areal este datorată calității slabe a datelor seismice (atât de sub sare, cât și pe flancurile corpurilor de sare) și faptului că majoritatea datelor din sonde sunt relativ vechi.

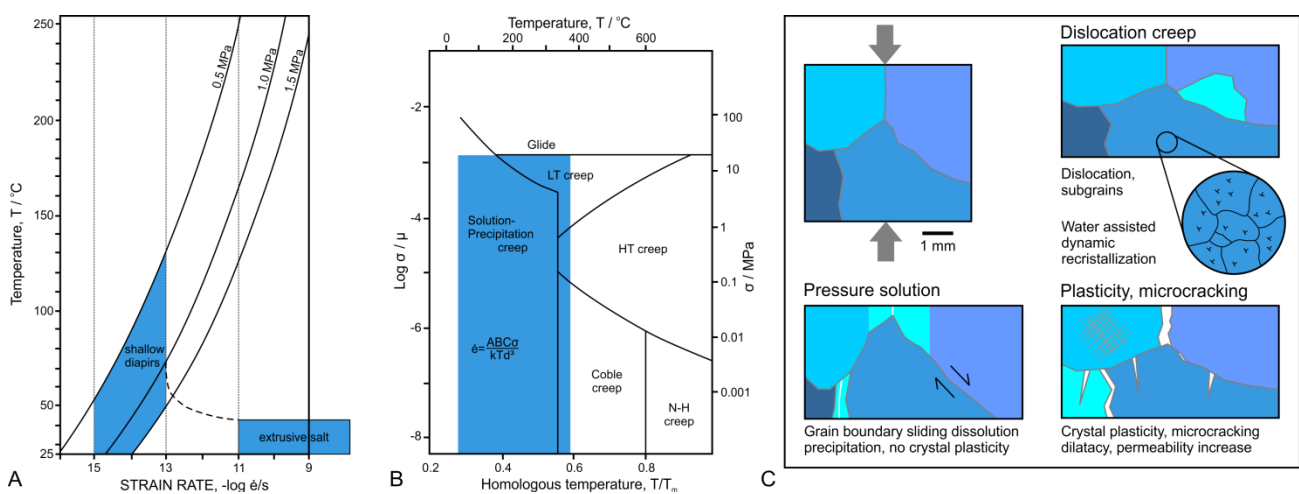
Obiectivul principal al acestei teze este obținerea unei înțelegeri mai bune a tectonicii sării regionale și sub regionale din Zona Cutelor Diapire. Pentru a îndeplini aceste obiective, a trebuit căutat răspunsul la o serie de întrebări:

- Cum s-a ajuns la modelele prezente care descriu evoluția diapirelor din Zona Cutelor Diapire (ZCD)?
- Care sunt modelele istorice în ceea ce privește evoluția cinematică a acestor diapire?
- Care sunt factorii principali care controlează/influențează stilul structural?
- Putem înțelege mai multe despre efectele eficienței nivelului bazal de decolare și grosimii sării asupra evoluției ZCD?
- Care este geometria structurilor de sub sare? Putem oare folosi modelarea analoagă pentru a prezice geometriile acestor structuri?
- Modelul stratigrafic ce este utilizat în mod tradițional pentru această zonă (mai ales cel folosit în industria hidrocarburilor) este unul curent? Mai este valabil în totalitate?

- Putem obține o corelare mai bună a unor evenimente? Putem afla mai multe detalii în ceea ce privește timpul când ele s-au petrecut (ex. Primele sedimente ce acoperă discordanța de la baza Meoțianului)?
- Care a fost evoluția diapirelor? Care a fost cauza pentru crearea lor și care a fost evoluția lor în timp?
- Care este geometria 3D acestor diapire (formă și dimensiuni)? Oare pot fi cartate aceste diapire în mai mult detaliu?
- Putem înțelege mai multe despre evoluția post-Sarmațiană a zonei bazându-ne pe datele disponibile?
- Au avut vreun efect diapirele/diaporismul asupra distribuției și compartimentalizării rezervoarelor de hidrocarburi?

## Capitolul 2 - Evaporitele, tectonica sării și diapirismul

Scopul acestui capitol este de a prezenta, pe scurt, o introducere în tema evaporitelor, și în special a sării. Aici sunt prezentate proprietățile fizice și mecanice ale sării, ce este tectonica sării și care este importanța sării pentru industria de hidrocarburi. Evaporitele sunt des întâlnite în bazinele sedimentare, cum este și cazul zonei noastre de interes (CC). Ele sunt definite ca fiind roci care sunt precipitate dintr-o soluție hipersalină, într-un sistem în care majoritatea evaporării este cauzată de soare (Warren, 2016). Mai exact, în bazinele restrictive în care se depune sarea, cantitatea de apă ce părăsește sistemul trebuie să depășească cantitatea de apă ce intră în sistem (Hudec & Jackson, 2007).

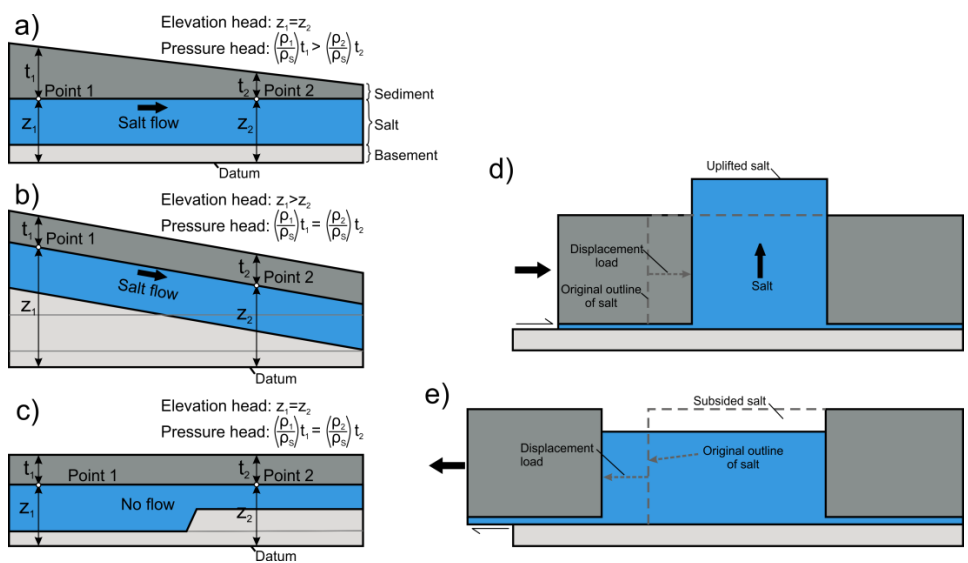


**Figura 1.** Condițiile de curgere și mecanismele de deformare ale sării (după Jackson & Talbot, 1986; Urai et al., 1986; Urai et al., 2008)

Când este folosit termenul de “sare” în această teză, de obicei referirea este către orice agregat cristalin de halit (NaCl). Majoritatea structurilor/corpurilor de sare conțin mai multe tipuri de evaporite, precum gips sau anhidrit, sau chiar non-evaporite, în cantități variabile (Hudec & Jackson, 2007).

Sarea policristalină este compusa din cristale de halit de la 0.01 mm la dm, care pot conține impurități, minerale secundare sau incluziuni fluide (Urai et al., 2008). Sarea este relativ incompresibilă și are o densitate de  $\rho_s = 2200 \text{ kg/m}^3$ , și o vâscozitate care variază între  $10^{17} - 10^{19} \text{ Pa s}$  (Jackson & Talbot, 1986; Weijermars et al., 1993; Hudec & Jackson, 2007).

Proprietățile mecanice ale sării sunt diferite de majoritatea rocilor elastice și carbonatice, dat fiind faptul că sarea se deformează ca un fluid vâscos la rate de deformare scăzute (condiții geologice) (Urai et al., 1986; Jackson & Talbot, 1986). O altă mare diferență a sării în comparație cu rocile casante este faptul că sarea prezintă o rezistență mult mai mică la tensiune și compresiune (Jackson & Vendeville, 1994).



**Figura 2.** Schițe ale gradientului hidraulic (a, b, c) și a încărcării prin mișcare (d, e), ca forțe care determină tectonica sării. (după Hudec & Jackson, 2007).

Poziția și forma corpurilor de sare depinde de modul în care rocile acoperitoare se deformează și de modul în care încărcarea diferențiată influență deformarea. Încărcarea diferențiată poate fi de 3 tipuri: gravitațională (fig. 2a, b, c), prin mișcare (fig. 2d, e) sau termică (Hudec & Jackson, 2007).

În timpul curgerii sării, aceasta poate prezenta o curgere de tip canal (curgere de tip Poiseuille) sau o curgere prin forfecare (curgere de tip Couette). Curgerea de tip Poiseuille prezintă cea mai mare



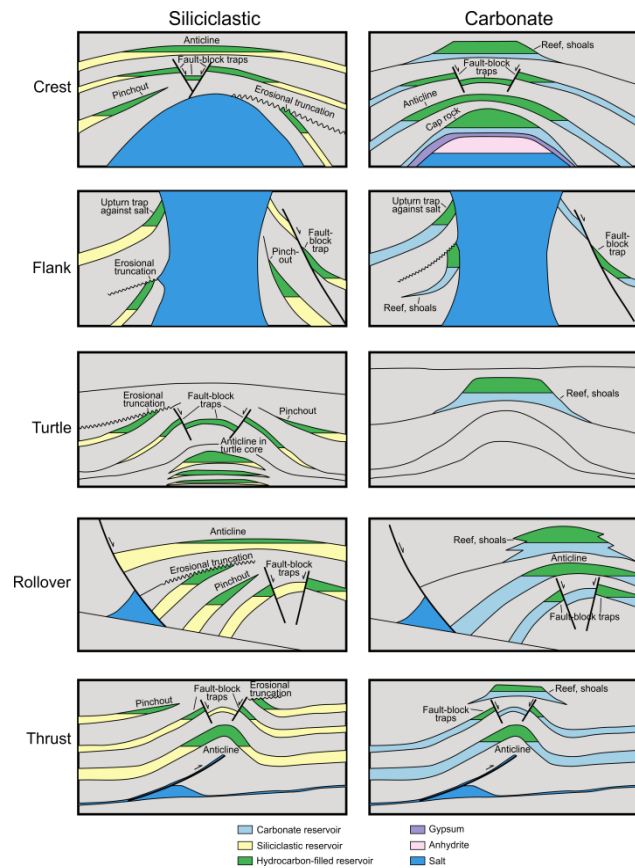
viteză în centrul stratului de sare. Stratele ce intră în contact cu stratul de sare reducând viteza de curgere a sării din cauza forțelor de frecare. Curgerea de tip Couette are loc atunci când stratele care mărginesc stratul de sare au o translație relativă unul față de celălalt, ceea ce duce la o simplă forfecare a stratului de sare. În majoritatea stratelor de sare care sunt supuse la extensie sau compresiune are loc o combinație a acestor două tipuri de curgere (Davison et al., 1996; Hudec & Jackson, 2007; Warren, 2016; Jackson & Hudec, 2017).

Unul din motivele principale pentru interesul ridicat asupra tectonicii sării este relația ei cu sistemul de hidrocarburi. Structurile de sare nu au implicații doar în ceea ce privește încapcanarea hidrocarburilor (fig. 3), ci și pentru maturarea și migrarea hidrocarburilor. În cele mai multe cazuri sarea creează ecrane perfecte, dar zonele în care grosimea sării a fost redusă (salt welds), prezintă un potențial scurgere al hidrocarburilor. Și rocile rezervoar sunt afectate de tectonica sării; nu doar prin cutare, falii și fracturare, ci și prin modul în care sarea afectează distribuția și diageneza rezervoarelor (Jackson & Hudec, 2017).

### Capitolul 3 – Privire de ansamblu asupra Zonei de Curbură a Carpaților Orientali din România

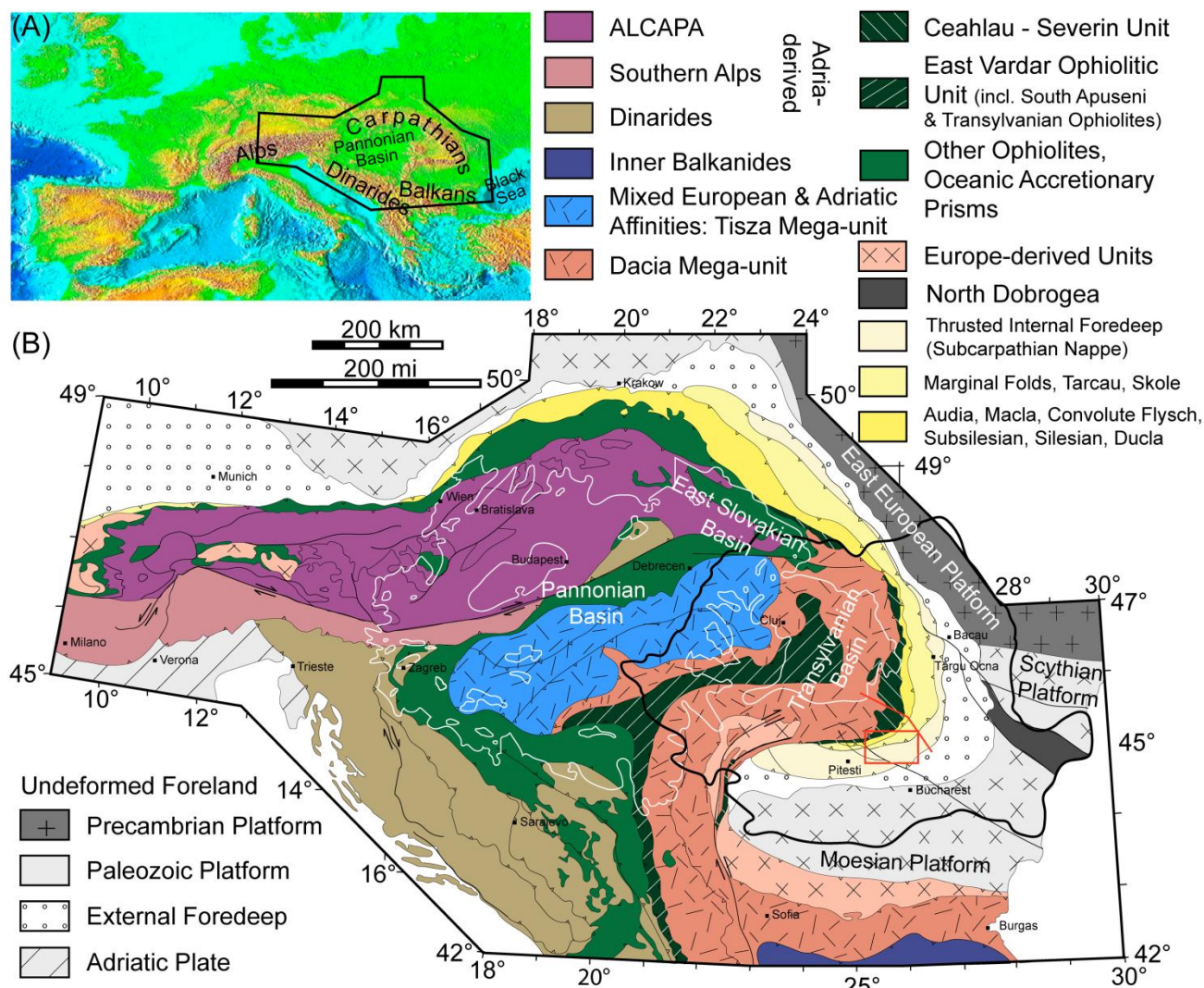
*O parte din următorul capitol este parte din publicația: Tămaș, D.M.; Schlöder, Z.; Krézsek, C.; Man, S. and Filipescu, S., 2018a, Understanding salt in orogenic settings: the evolution of ideas in the Romanian Carpathians, AAPG Bulletin, 102(6): 941-958, doi: 10.1306/0913171615517088. AAPG©2018 text și imagini reproduse cu permisiunea AAPG. Permisune de la AAPG este necesară pentru orice altă utilizare a acestor informații.*

Capitolul 3 reprezintă o privire de ansamblu asupra zonei de curbură a Carpaților Orientali și a bazinului de foreland asociat. Scopul acestui articol este de a crea un context regional, atât asupra evoluției structurale a zonei, cât și asupra stratigrafiei Eocen superior – Pleistocene a zonei (CC; fig. 4). De asemenea, acest capitol prezintă stratigrafia așa cum este ea în literatura actuală, fara a integra



**Figura 3.** Exemple de capcane de hidrocarburi asociate sării (după Jackson & Hudec, 2017).

discuțiile legate de incertitudinile prezente (a se vedea capitolul 7 pentru mai multe detalii pe această temă).



**Figure 4.** Hartă geologică regională ce prezintă unitățile tectonice majore (Schmid et al., 2008; Merten et al., 2010; Tămaș et al., 2018a). (A) Hartă ce prezintă topografia sistemului Alpino – Carpato – Dinaric. Cu un poligon negru este indicată poziția figurii 1B (Merten et al., 2010). (B) Hartă tectonică simplificată a sistemului Alpino – Carpato – Dinaric.

Carpații României sunt un orogen Alpin puternic arcuat (fig. 4) ce înregistrează evoluția Tethysului Alpin între Jurasicul târziu și Miocenul mediu (Săndulescu, 1984, 1988; Csontos & Varos, 2004; Schmid et al., 2008). Primul eveniment colizional a început în Jurasicul târziu și a pus în loc o structură internă de pânze în timpul Cretacicului mediu (Săndulescu, 1984; Csontos & Varos, 2004). [Notă, în această teză folosim stratigrafia regională a Paratethysului de Est (e.g. Laskarev, 1924; Cicha et al., 1998) pentru Dacian Basin (e.g. Jipa & Olariu, 2009).]

Deformările Carpaților au fost transpuse peste Platforma Moesica. Deformările Mezozoice ale Carpaților sunt caracterizate de o puternică implicare a fundamentului (e.g. Dacia, Vardar Est, Ceahlău-Severin; fig. 4). Aceste pânze află în partea vestică a Carpaților Orientali (pânzele Bucovinice), Meridionali (pânzele Getice), și formează fundamentul bazinului Transilvaniei (Băncilă, 1958; Săndulescu, 1984, 1988; Mațenco & Bertotti, 2000; Krézsek & Bally, 2006; Mațenco, 2017).

Începând cu Burdigalianul (Miocen inferior), subducția a creat o secvență de pânze (Flișului convolut, Macla și Audia). Apoi a urmat încălecare a pânzei de Tarcău în timpul Burdigalianului târziu, până în Badenian (Miocen mediu). Paroxismul din timpul Sarmatianului (Miocen mediu) a dus la punerea în loc a pânzei Subcarpatice pe forelandul nedeformat (Băncilă, 1958; Săndulescu, 1984, 1988; Mațenco & Bertotti, 2000; Merten et al., 2010; Mațenco, 2017). Mațenco and Bertotti (2000) au descris un regim de strike-slip în Sarmatianul târziu - Meoțian, care a dus la apariția de falii de strike-slip dextre, orientate ~NV-SE.

Una din particularitățile zonei este prezența a două orizonturi de sare: unul Burdigalian inferior și unul Badenian mediu (ex. Murgoci, 1905; Popescu et al., 1973). Aceste două nivele evaporitice au fost inițial depuse în zona de foreland a Carpaților, urmând ca ulterior să fie încorporate în structurile pânzelor de șariaj. În profile regionale prezentate de Ștefănescu (1986), trei orizonturi principale de decolare au fost descrise. Cel mai inferior este în Cretacic, fiind urmat de sarea Burdigalian inferioară și al treilea fiind Badenianul. Al treilea plan principal de detașare (sarea Badeniană) a fost folosit pentru traslatarea întregului orogen deasupra platformei Moesice.

Cea mai recentă fază deformațională din CC (faza Valahă) a început în Miocenul superior (Meoțian) și durează până în prezent (Hippolyte & Săndulescu, 1996). Această fază nu este legată de procesul de subducție, ci de un proces de compresiune intraplacă (Cloetingh et al. 2004), care a rezultat în până la 4 km de exondare, eroziune și deformări compresionale (Sanders et al., 1999; Merten et al., 2010). În timpul acestei faze, multe aliniamente pre-existente au fost reactivitate (Mațenco, 2017).

Cantitatea de scurtare post-Oligocenă în Carpații Orientali a fost estimată la 130 km, majoritatea (108 km) în timpul Miocenului mediu (Badenian-Sarmatian) și restul (22 km) după (Roure et al., 1993).

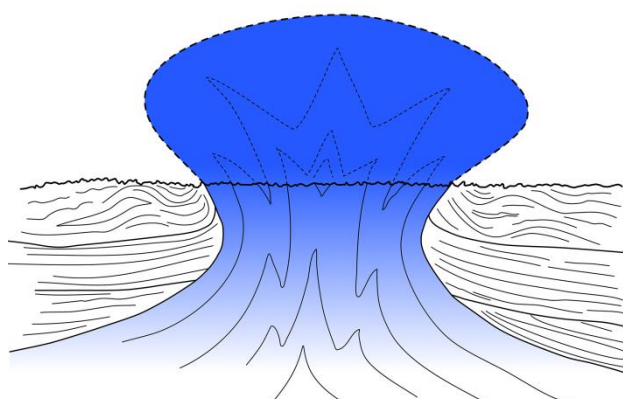
## Capitolul 4 – Înțelegerea evoluției sării în context orogenic – evoluția conceptelor în Carpații Românești

*Acest capitol este parte din publicația: Tămaș, D.M.; Schléder, Z.; Krézsek, C.; Man, S. and Filipescu, S., 2018a, Understanding salt in orogenic settings: the evolution of ideas in the Romanian Carpathians, AAPG Bulletin, 102(6): 941-958, doi: 10.1306/0913171615517088. AAPG©2018 text și imagini reproduse cu permisiunea AAPG. Permișiune de la AAPG este necesară pentru orice altă utilizare a acestor informații.*

ZCD este o zonă cu importanță internațională în ceea ce privește tectonica sării și reprezintă zona tip pentru termenul de diapir. Scopul capitolului 4 este de a prezenta în detaliu ideile inițiale legate de tectonica sării în România și cum au evoluat conceptele de atunci și până în prezent. O atenție deosebită a fost acordată muncii și rezultatelor spectaculoase obținute de geologul român, Ludovic Mrazec, cel care a definit culele cu sâmbure de străpungere și a introdus termenul de “diapir”.

Tectonica sării este un termen general care se referă la curgerea ei laterala sau verticala, miscare printre strate crearea de perne de sare sau diapirism (ex. Hudec & Jackson, 2007; Warren, 2016). Conceptele legate de tectonica sării au evoluat gradual în ultimii 150 de ani, timp în care unele descoperiri majore legate de mecanismul de deformare al sării au avut loc (Jackson, 1995, 1997). În un articol tratând evoluția conceptelor în tectonica sării, Jackson (1995) a separat trei ere principale: era pionieratului (1856 – 1933), era fluidă (1933 - ~1989) și era casantă/rupturală (~1989 – Present). În timpul “erei pionieratului” s-a descoperit faptul că sarea se deformează diferit de restul rocilor și s-au propus primele ipoteze generale privind diapirismul. În această era a fost observat caracterul discordant al sării (e.g. Posepny, 1871) și tot atunci Mrazec (1910) a propus ideile sale în ceea ce privește diapirismul. În “era fluidă” majoritatea cercetătorilor au afirmat că diferența de densitate dintre sare și rocile ce o înconjoară/acoperă este cauza principală pentru diapirism. Ulterior s-a realizat că diferența de densitate nu este factorul primar ce controlează mișcarea sării (Vendeville & Jackson, 1992a, b). Acest lucru a dat naștere “erei casante/rupturale”, când a fost aproape unanim recunoscut faptul că este nevoie de forțe externe (ex. tectonice) pentru a mișca sarea. Acest ultim concept este cel care guvernează studiile în ceea ce privește tectonica sării până în prezent.

Prima idee clară în ceea ce privește deformarea sării în România a fost propusă de Posepny (1871). El a descris caracterul discordant



**Figura 5.** Secțiune geologică prin diapirul de la Praid, ilustrând discordanța dintre stratele adiacente diapirului și deformarea sării în interiorul diapirului. Partea punctată din partea superioară a figurii e interpretată ca fiind erodată. (Posepny, 1871; Tămaș et al., 2018a). [Notă: scara a fost omisă intenționat, dar diapirul are o înălțime de aproximativ 3 km.]

al sării din Bazinul Transilvaniei și a ilustrat detalii importante atât legate de deformarea internă a diapirelor cât și structurile ce le-a observat în jurul ei. Multe din aceste observații sunt valabile până în ziua de astăzi (caracterul ductil al sării, geometriile sinclinalelor de pe flancurile diapirelor, strate răsturnate pe flancurile diapirelor).

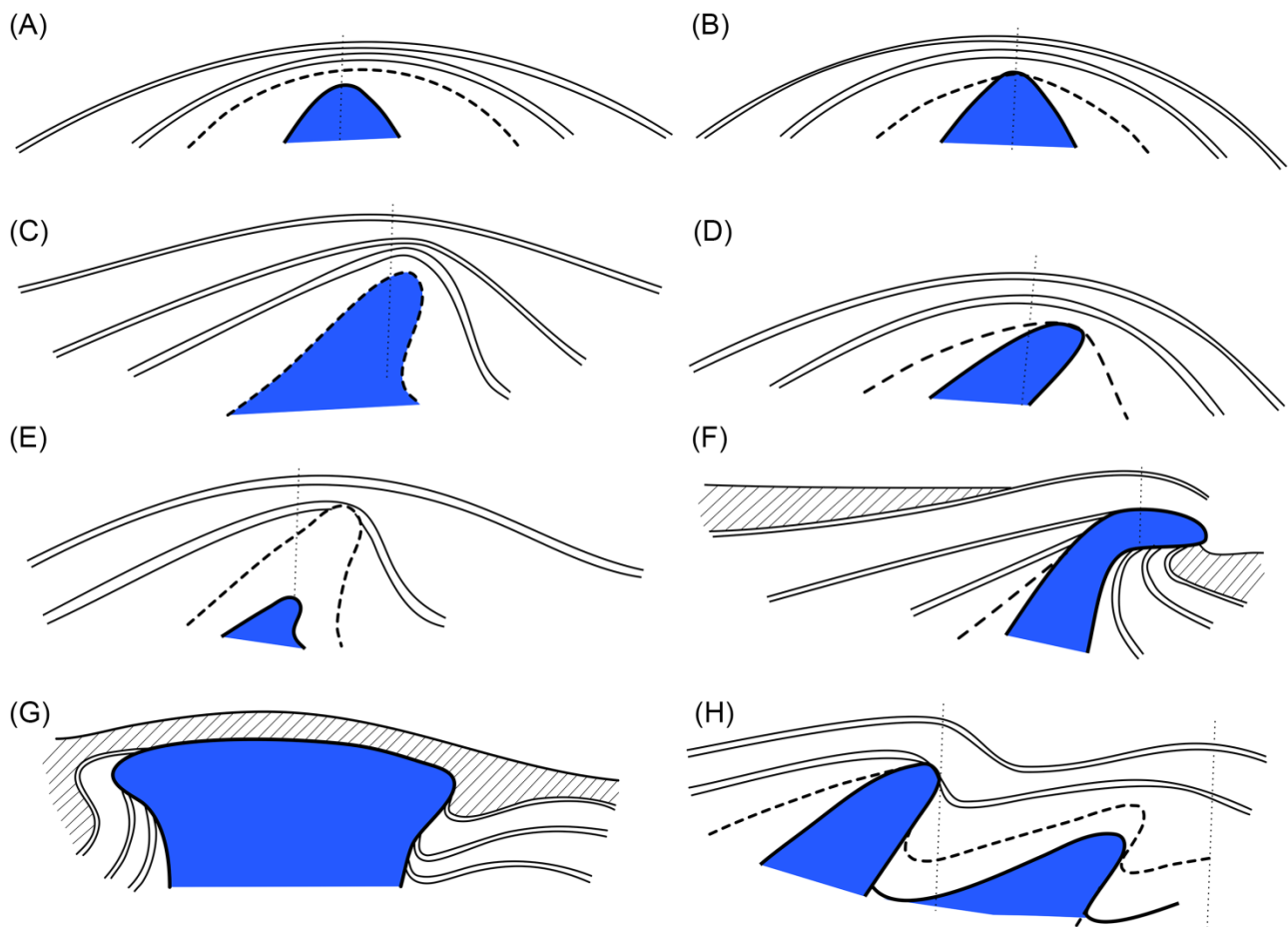
La sfârșitul secolului XIX au avut loc descoperiri importante de hidrocarburi în ZCD, lucru care a mutat atenția cercetătorilor asupra importanței tectonicii sării în crearea acestor zăcăminte de hidrocarburi.

Ludovic Mrazec (Mrazec & Teisseyre, 1902; Mrazec, 1905, 1907, 1910 1926) a observat faptul că majoritatea acestor diapire străpung crestele anticlinalelor și le-a numit cute cu sâmbure de străpungere sau cute diapire. A interpretat aceste structuri ca fiind în principal rezultatul forțelor compresionale dar de asemenea, combinate cu forța exercitată de rocile mai groase din sinclinale (de pe flancurile diapirelor). Mrazec nu a crezut că aceste structuri sunt rezultatul diferenței de densitate dintre roci sau datorită oricăror forțe “moleculare” din interiorul sării, ambele teorii fiind acceptate de unii cercetători.

Mrazec a avut multiple contribuții pentru înțelegerea tectonicii sării care au depășit cu mult cunoașterea din acea perioadă:

- Curgerea vâscoasă a sării și faptul că aceasta se manifestă prin retragerea sării și curgerea ei la suprafață
- Importanța reducerii grosimii rocilor acoperitoare înainte ca sarea să le poată străpunge și să curgă la suprafață
- Încarcarea diferențiată ca unul din factorii ce controlează tectonica sării
- Plasticitatea cristalelor în timpul curgerii sării și analogia cu plasticitatea cristalelor de gheață în timpul curgerii ghețarilor
- Modul în care se dezvoltă și evoluează sinclinalele din proximitatea diapirelor și diferitele geometrii pe care le pot avea stratele din aceste sinclinale
- Faptul că diapirele din ZCD sunt desprinse de sursa lor și că spațiul prin care a trecut această sare a fost închis/sudat (salt welds). Aceasta e posibil să fie prima mențiune a acestui fenomen.

Având în vedere cantitatea limitată de date (doar câteva sonde și aflorimente) disponibile la acel timp, este remarcabil faptul că Mrazec a putut propune o poveste așa coerentă și completă în ceea ce privește tectonica sării. Multe modele propuse de Mrazec sunt considerate valabile și astăzi.



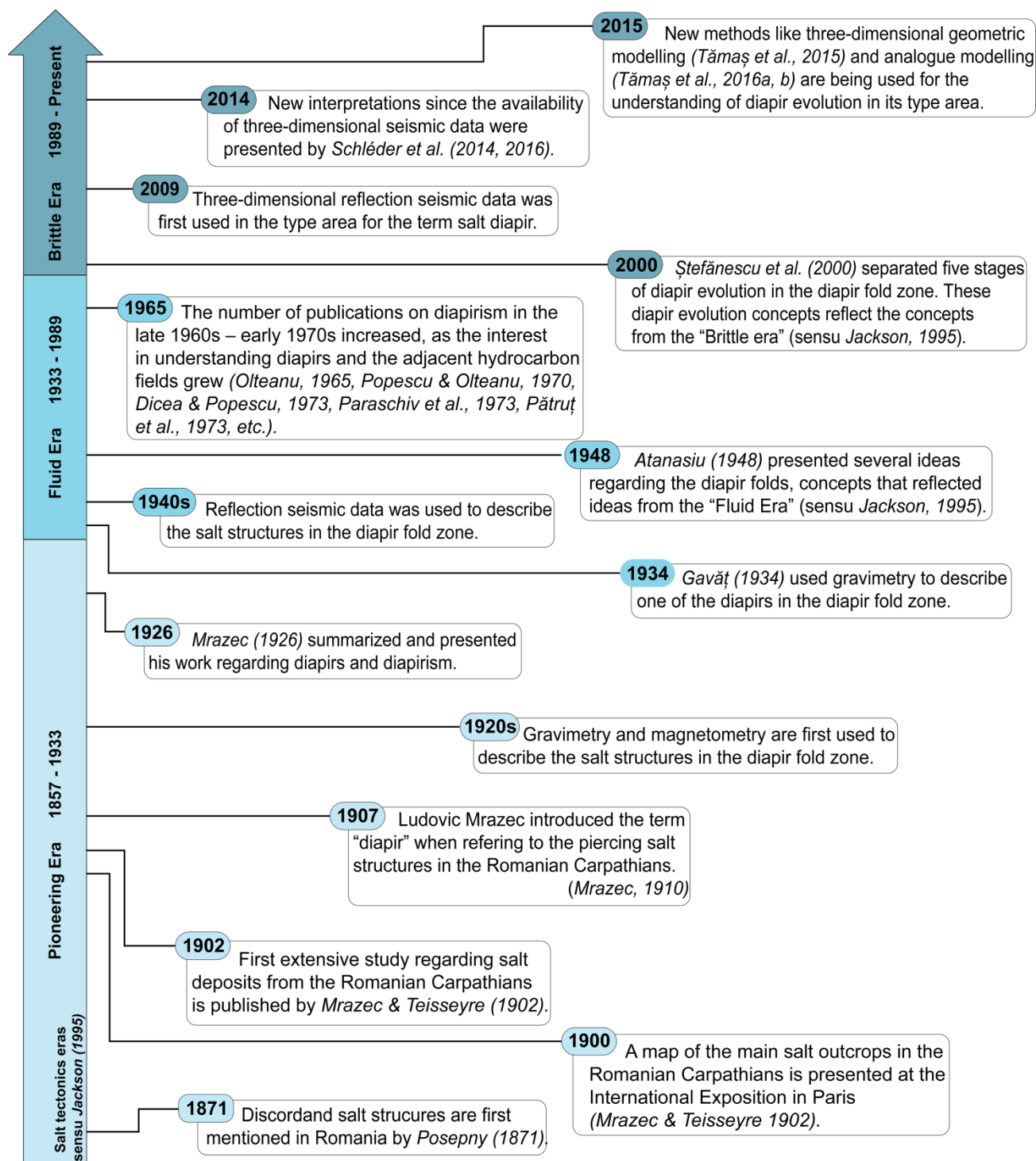
**Figura 6.** Schița prezentând tipuri de diapire din zone petrolifere din lume, așa cum a fost prezentată de Mrazec în 1907, atunci când a și introdus termenul de diapir (Mrazec, 1910; Tămaș et al., 2018a).

După Ludovic Mrazec, cercetătorii romani nu au mai avut contribuții majore la dezvoltarea conceptelor legate de modul în care se deformează sarea. Majoritatea publicațiilor au urmat evoluția conceptelor la nivel internațional. Teoriile propuse de Mrazec pentru evoluția diapirismului în ZCD urmând să primească mai puțină atenție în timpul “erei fluide” (sensu Jackson, 1995). “Era casantă/rupturală” a reluat în considerare unele din ideile propuse de Mrazec inițial, idei care acum deveneau din nou posibile.

Evoluția recentă a modelelor pentru evoluția zonei au fost strâns bazate pe disponibilitatea de date noi. Datele au evoluat de la indisponibilitatea de sonde noi (unele cu carotaje complexe) la mai multe linii seismice 2D (ex. Ștefănescu et al., 2000), sau, mai recent, date seismice 3D. Având avantajul disponibilității datelor seismice 3D, un nou model a fost propus pentru evoluția zonei (Schlöder et al., 2014, 2016b, *submitted*; Chapter 5). Crearea noului model și obținerea înțelegerii mai bune asupra

tectonicii sării din zona de interes a fost posibilă și prin utilizarea modelării analoage (Tămaș et al., 2016a, b, 2017a, b, 2018b, *submitted*; Chapter 6).

Dacă aruncăm o privire de ansamblu asupra evoluției conceptelor din ZCD în timp (fig. 7) vedem că acestea au fost puternic influențate de (i) disponibilitatea datelor și (ii) conceptul curent legat de tectonica sării.



**Figura 7.** O vedere cronologică a evoluției principalelor concepte în privința tectonicii sării în România, prezentată în cadrul teoriilor internaționale propuse de Jackson (1995) (Tămaș et al., 2018a).

## **Capitolul 5 - Tectonica sării în Zona de Curbură a Carpaților Orientali – reconstituiri pe baza datelor subterane**

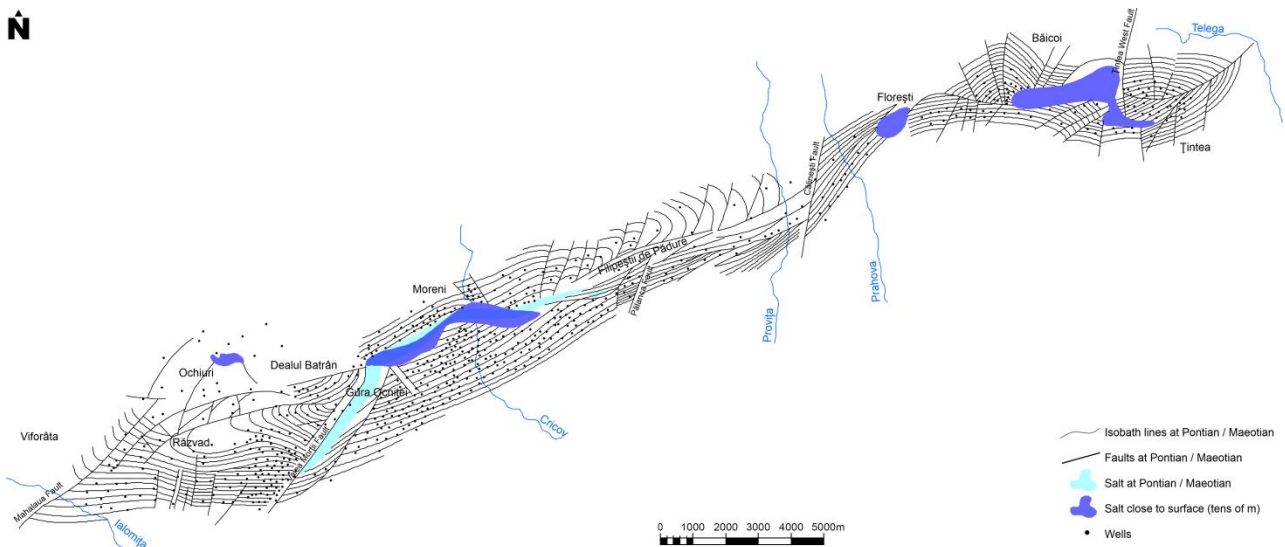
Acest capitol prezintă modul în care au fost utilizate detele geologice și geofizice subterane cu scopul de a înțelege detaliile legate de evoluția diapirelor în zona lor tip. Pentru a obține această imagine au fost combinate rezultate ale interpretării și corelării datelor geologice și geofizice din sonde, interpretării seismice, modelării geologice și restaurării structurale 2D și 3D. Efectele deformării din timpul fazei Badenian-Sarmațiene și fazei Valahe (Meoțian – recent) asupra tectonicii sării sunt de asemenea discutate în acest capitol. Unul din cele mai importante aspecte tratate în acest capitol este rolul tectonicii sării și deformărilor în crearea celor mai mari zăcăminte de hidrocarburi de pe uscatul României.

Deși câmpurile de hidrocarburi legate de aliniamentul diapir Gura Ocniței - Moreni - Florești - Băicoi - Țința au o istorie de producție de peste 140 de ani, există încă incertitudini cu privire la compartimentarea și distribuția rezervoarelor adiacente diapirelor de sare. Atât tectonica sării, cât și ultimele evenimente tectonice (Maeoțiene până la recente) au avut efecte clare asupra distribuției și compartimentării rezervoarelor Burdigalian, Sarmațian, Maeoțian, Dacian and Romanian (Miocen inferior - Pleistocene). Înțelegerea acestor efecte poate avea un impact important asupra dezvoltării acestei zone mature de hidrocarburi, precum și în perspectiva viitorului potențial de explorare.

Primele cercetări efectuate în CBZ cu scopul de a înțelege tectonica sării și efectele sale asupra sistemului de hidrocarburi au fost bazate exclusiv pe date de suprafață. Hidrocarburile asociate diapirelor au fost un punct de interes aproape de la începutul cercetării în zonă. Asadar în scurt timp mai multe informații au fost obținute datorita puțurilor săpate manual și a primele puțuri forate (pentru mai multe discuții pe această temă, vezi Tămaș et al., 2018a sau capitolul 4).

De îndată ce numărul sondelor a crescut, și înțelegerea rezervoarelor asociate diapirismului s-a îmbunătățit semnificativ. Unele hărți structurale construite pe baza sondelor între anii 1930-1980 au rămas aproape neschimbate până în ziua de astăzi. De exemplu, hărțile structurale ale topului rezervorului asociat aliniamentului diapir Viforâta - Gura Ocniței - Moreni - Filipești - Florești - Băicoi - Țința nu au suferit multe modificări. Hărțile ilustrează același stil structural de la mijlocul anilor 1930 pentru Viforâta și zona sudică Moreni (Athanasiu et al., 1935), respectiv de la sfârșitul anilor '60 la începutul anilor 1970 pentru restul campurilor menționate anterior (Paraschiv și Olteanu, 1970, Paraschiv et al., 1973, fig.8).

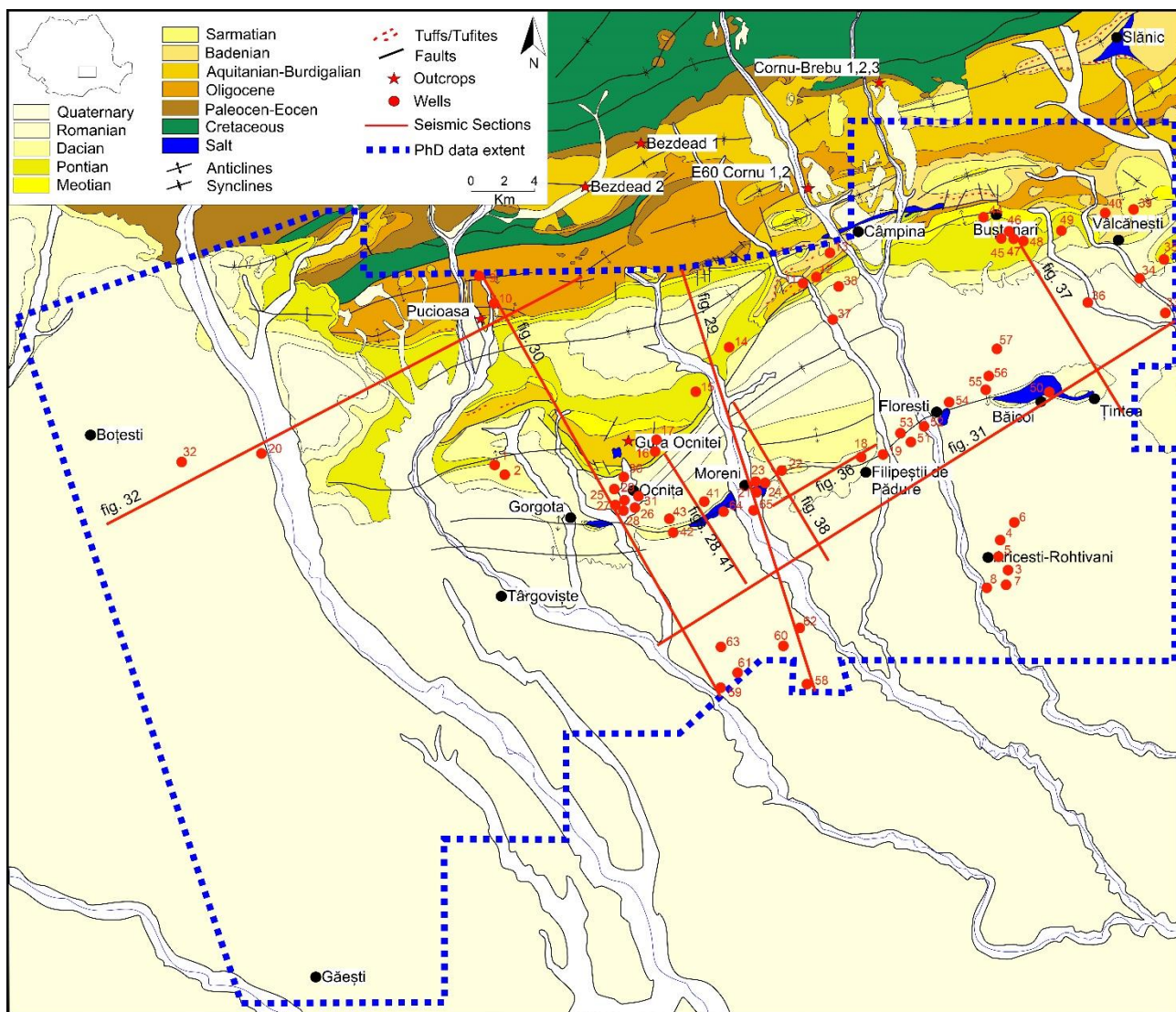




**Figura 8.** Hartă structurală la cap Meoțian (Pontian/Meoțian) din anii 1970. Harta ilustrează aliniamentul de diapir și zăcăminte Viforata – Ochiuri – Gura Ocniței – Moreni – Filipești – Florești – Băicoi – Țintea (după Paraschiv et al. 1973).

Cu toate acestea încă există incertitudini cu privire la modul în care nivelul inferior de sare a supraviețuit multiplelor faze tectonice, sau cum înaintarea sării spre suprafață a afectat depunerea și compartimentarea rezervoarelor. Capitolul curent va trata aceste probleme, folosind bogăția datelor preexistente (vezi Capitolul 4), datelor din sonde, rezultatele experimentărilor de modelare analoagă (Capitolul 6), respectiv profile seismice 2D și date seismice 3D.

Accesul la datele subterane pentru realizarea acestei teze a fost acordat de către Agenția Națională pentru Resurse Minerale (ANRM) și OMV Petrom (accesul la date a fost acordat pentru perimetrul prezentat în figura 9, la acea dată parte a blocurilor de explorare OMV Petrom, consultați [www.namr.ro](http://www.namr.ro) pentru harta completă). S-a acordat o aprobare suplimentară pentru extragerea a 129 de probe de carota din trei sonde (fig.9, sondele 36, 64, 65), cu scopul analizei paleomagnetice (vezi capitolul 7). O parte din munca efectuată și rezultatele tezei sunt supuse clauzelor de confidențialitate și au fost excluse din teză și din orice raport public. De asemenea, conform acordului, nu au fost utilizate coordonate exacte și nu au fost incluse nume și locații exacte sau adâncimi ale profilelor seismice sau a sondelor.



**Figura 9.** Hartă geologică simplificată a zonei de interes. Această hartă ilustrează perimetrul pentru care s-a obținut acces la datele subterane pentru realizarea tezei (albastru punctat), precum și o poziție aproximativă a sondelor (puncte roșii) și liniilor seismice (linii roșii) prezentate în teză (hartă după Murgeanu et al., 1967, 1968).

Zona de interes (fig. 9) este o zonă petrolieră matură, cu o istorie de explorare și exploatare de peste 120 de ani. Este acoperită de mai mult de 10000 de sonde (~ 2% din care ajung mai adânc de 3000 m), câteva cuburi seismice 3D (860 km<sup>2</sup> - PSTM) și mai mult de 10000 km de profile seismice 2D. Astfel, putem spune că aria este acoperită de date seismice ~ 100%, dintre care 52% sunt date 3D. Cea mai mare parte a datelor de sondă sunt vechi, unele având doar o coloană litologică de bază, iar majoritatea doar SP și/sau rezistivitate. Mai mult de 900 din aceste sonde au, de asemenea, rapoarte de laborator. 65 din aceste sonde (fig. 9) au fost selectate pentru o revizuire biostratigrafică (a se vedea capitolul 7), pentru a clarifica unele dintre incertitudinile bine cunoscute din zonă.

Mobilizarea majoră a sării a început odată cu debutul evenimentelor Badenian-Sarmațiene. În timpul acestei faze compresionale, cute de detașare cu sare acumulată în zona creastă au fost principalele structuri create. Sub axele anticlinalelor acestor cute de detașare, sub sare, au fost interpretate structuri de tip duplex (Schléder et al., 2014, 2016b, submitted). Pe măsură ce topul cutelor a fost erodat în timpul acestei compresiuni, sarea a fost liberă să curgă la suprafață și ar putea fi sursa pentru o parte din sarea mai nouă (prezentă în sinclinale). Aceste cute Burdigalian – Miocen medii reprezintă unul dintre cele mai incerte rezervoare din Zona Cutelor Diapire, mai ales datorită faptului că acestea sunt slab iluminate în datele seismice. Unele incertitudini pot fi reduse printr-o cartare riguroasă începând din zona de sinclinal și continuând spre discordanța Maeoțiană.

Evenimentul compresiunii Badenian – Sarmațian mediu a fost urmat de o eroziune puternică la baza Maeoțianului. Este încă discutabil dacă stratigrafia Meoțianului este sin-tectonică sau reprezintă o umplere pasivă a unui paleorelief.

Ponțianul inferior este fără îndoială sin-tectonic, deoarece unele dintre faliile observate în zona Băicoi au strate de creștere Pontian inferioare. Aceste compresiuni Valahe timpurii au adăugat o încărcătură orizontală asupra sării și au contribuit la rata de creștere a acestor diapire.

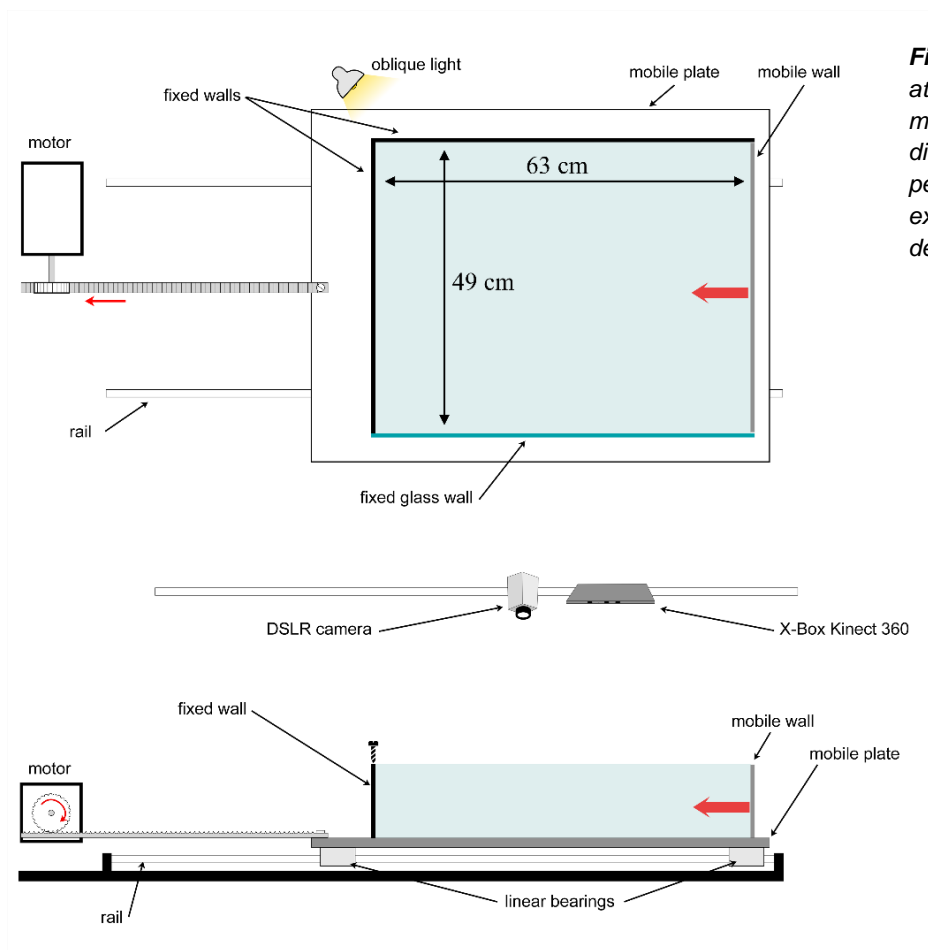
Două modele cinematice diferite sunt propuse pentru a explica evoluția diapirelor din ZCD din timpul Maeoțianului până în prezent. Unul implică o creștere pasivă a sării ținând pasul cu sedimentarea și fiind controlată de sarcina orizontală, iar cealaltă implică faptul că sarea a fost îngropată până la Dacian (acoperită de sedimentele Meoțiene și Ponțiene), și a ieșit la suprafață ca reacție a deschiderii unor bazine de tip pull-apart.

Geometria actuală a sării se datorează ultimei faze de compresiune Valahă (care este și mai importantă decât cea Valaha timpurie). Înțelegerea formei actuale a diapirului nu numai că îmbunătățește înțelegerea evoluției sale, ci și reduce riscurile legate de forarea prin sare.

## **Capitolul 6 - Tectonica sării în Zona de Curbură a Carpaților Orientali – reconstituiri pe baza modelării analoge**

*O parte din următorul capitol este parte din publicația: Tămaș, D.M.; Schléder, Z.; Tămaș, A.; Krézsek, C. Copoș B. and Filipescu, S., submitted, Middle Miocene evolution and structural style of the Diapir Fold Zone, Eastern Carpathian Bend, Romania: insights from scaled analogue modelling, In: Hammerstein, J., Di Cuia, R., Griffiths, P., Cottam, M., Zamora, G., and Butler, R. eds, Fold and Thrust Belts; Fold and Thrust Belts: Structural Style, Evolution and Exploration, Geological Society of London, Special Publications. Permisivul de la Geological Society of Londo este necesară pentru orice altă utilizare a acestor informații.*

Modelarea analoagă este o tehnică experimentală (ex. fig. 10, 11) adesea folosită cu scopul de a aduce mai multe informații care să fie folosite în înțelegerea structurilor geologice complexe. Capitolul 6 prezintă rezultate provenite din modele analoage scalate, efectuate de-a lungul studiilor. Sunt tratate subiecte precum: evoluția diapirelor în contextul unui sistem cu bazine de tip pull-apart, efectele proprietăților nivelului bazal de decolare și grosimii stratului de sare asupra geometriei structurilor de deasupra de dedesubtul sării. De asemenea este discutată evoluția cinematică a Zonei Cutelor Diapire.



**Figura 10.** Schiță ce ilustrează atât aparatul folosit pentru modelarea analoagă, cât și unele din metodele și aparatele folosite pentru monitorizarea experimentelor în timpul deformării.

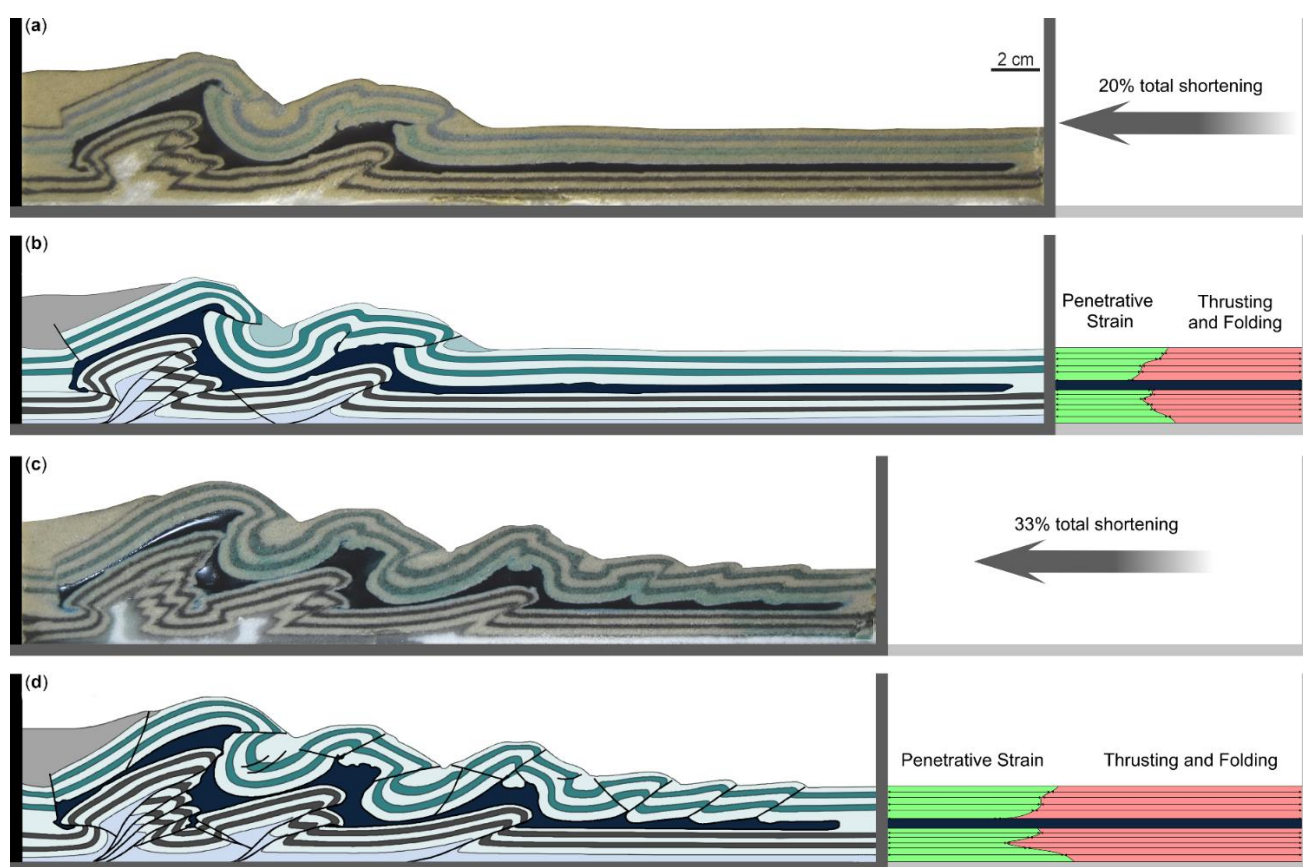
Schlöder et al. (*submitted*; Capitolul 5) au propus două posibile modele cinematice pentru evoluția diapirelor din Meoțian până în prezent. Unul din aceste modele discută posibilitatea ca aceste diapire să se fi ridicat prin spații create de apariția unor bazine locale de pull-apart (1.5-2 km lățime, mai multe detalii în Capitolul 5). Două detalii au fost investigate prin intermediul modelării analoage: câtă deplasare dextră este necesară pe acele falii pentru ca un diapir să crească până la suprafață, străpungând cei aprox. 800 m de sedimente și efectul unghiului faliei asupra primului parametru

investigat și asupra geometriei diapirului. Rezultatele investigației arată că unghiul faliei este unul din factorii care au cel mai mare control atât asupra formei diapirului și asupra cantității de deplasare necesară pentru ca diapirul să strapungă stratele de deasupra. În modelul 1.1 (cu unghi al faliei de  $30^\circ$ ), diapirul a avut o formă de clopot și a avut nevoie de 3.6 cm de deplasare ca diapirul să ajungă la suprafață, pe când în modelul 1.2 (cu unghi al faliei de  $45^\circ$ ), diapirul a avut o formă de ciupercă (similară cu geometria diapirului de la Băicoi) și a fost nevoie doar de 2.4 cm de deplasare ca diapirul să ajungă la suprafață.

Celălalt model cinematic care a fost propus pentru evoluția post-Sarmatiană a diapirelor este că ele au crescut ca diapire pasive și rata creșterii a fost controlată atât de încărcarea diferențiată pe verticală, cât și pe orizontală (rata compresiunii). Acest model a fost de asemenea investigat prin modelare analoagă și deși deformările de sub sare sunt mai intense decât este normal așteptat din cauza unei rate de eroziune crescută care a fost aplicată, evoluția „post-Sarmatiană” a modelului a fost extrem de relevantă pentru scopul cercetării. Evoluția experimentului a arătat nu doar că diapirele de sare au continuat să crească după oprirea evenimentului compresional analog pentru faza Badenian-Sarmatiană, ci și faptul că rata de creștere a diapirelor a fost puternic influențată de fiecare mișcare aplicată analog fazei Valahe. De asemenea, nu doar că rata la care creșteau diapirele a fost afectată, ci s-a observat și reactivarea multor falii care au fost create în timpul fazei Badenian-Sarmatiene. De asemenea, unele diapire care nu continuaseră să crească pasiv după eroziunea aplicată, au crescut doar datorită compresiunii corespondente fazei Valahe. Acest experiment confirmă faptul că și acest model este unul valid din punct de vedere cinematic și ne aduce noi informații legate de modul în care au fost afectate rocile rezervor din proximitatea diapirelor.

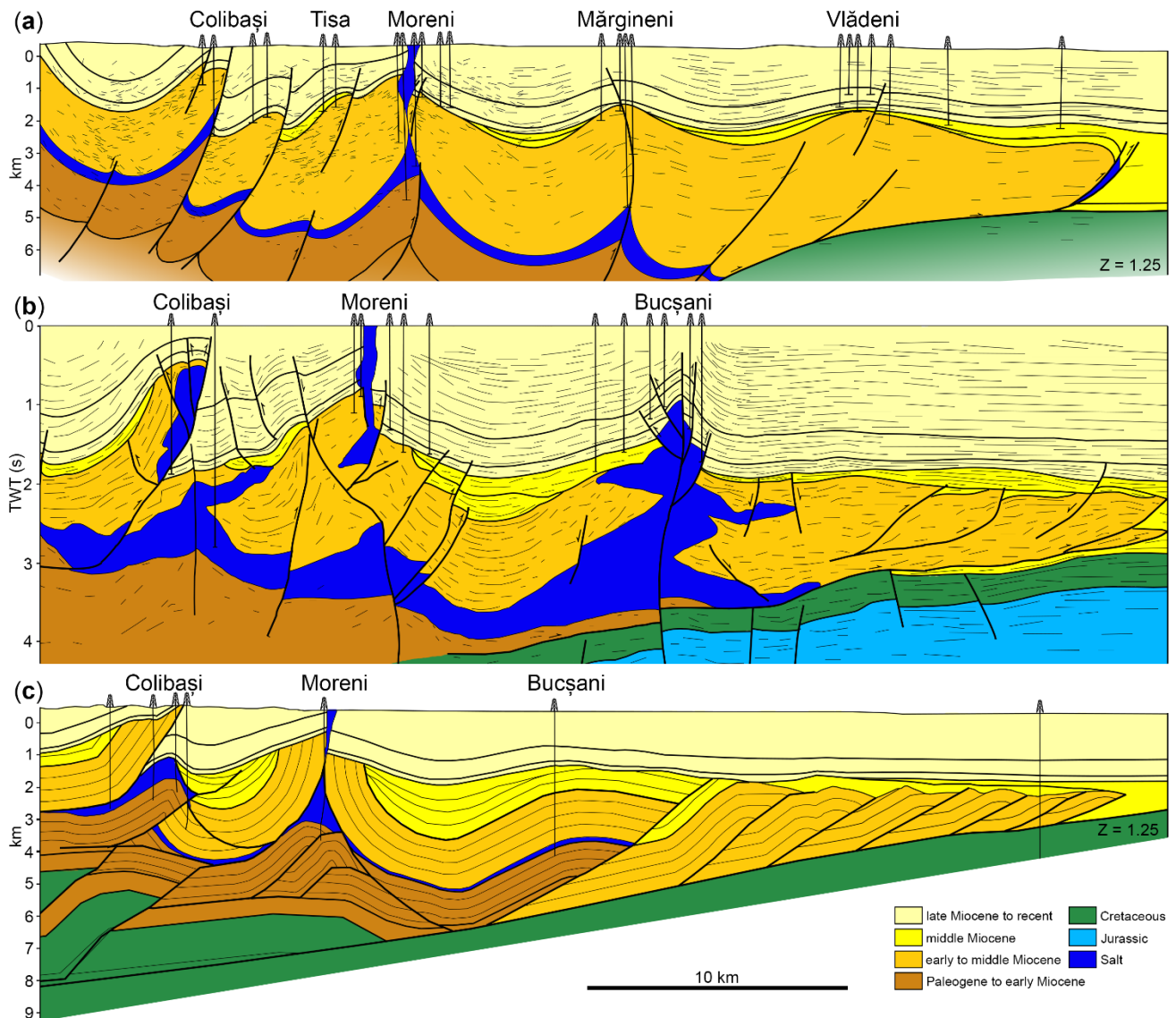
Întelegerea efectelor fazei Badenian-Sarmatiene în ZCD a fost cel mai de interes subiect care a fost tratat prin metode experimentale, deoarece existau foarte multe incertitudini, atât în ceea ce privește grosimea inițială a sării, cât și a eficienței planului de decolare. Ambele incertitudini au fost reduse prin modelare analoagă. Rezultatele experimentelor arată că prin scăderea frecării la baza modelelor influențează puternic geometriile ce se dezvoltă sub sare, mai exact geometriile structurilor de tip duplex. Acestea au variat de la un monoclin progradant (în experimentele fără plan bazal de decolare), la anticlinale-rampă spațiate (microsfere de sliclă ca plan bazal de decolare), până la un set de falii de încălecare de tip piggy-back cu o lungime de undă foarte mare (silicon ca plan bazal de decolare) (pentru mai multe detalii legate de aceste geometrii, se pot vedea și rezultatele din Couzens-Schultz et al., 2003).

Distanța (lungimea de undă) dintre aceste structuri de tip duplex de sub sare a fost de asemenea influențată de grosimea sării. Schimbările în grosime ale sării au influențat de asemenea și stilul de deformare deasupra sării. Din cauza reducerii grosimii sării, a crescut cuplarea între sistemul de deasupra și cel de dedesubtul sării, ceea ce a condus mai departe la creșterea spațiului dintre structurile de tip duplex de sub sare și deformarea de deasupra sării a devenit mai mult caracterizată de cute de detașare decât de falii. Falierea acestor cute de detașare a avut loc, de cele mai multe ori după formarea cutelor. Deformarea de deasupra sării după ce a crescut cuplarea între sistemul de deasupra și cel de dedesubt a fost conectată, astfel încât crestele anticlinalelor cutelor de detașare sunt localizate deasupra structurilor de tip duplex de sub sare.



**Figura 11.** Secțiuni prin modelele 2.5 (scurtare 20%) și 2.6 (scurtare 33%). În partea dreaptă a fiecărei imagini interpretate (b, d) se poate observa contribuție deformării penetrante (scurtării paralele cu stratul; cu verde), respectiv cantitatea de deformare prin cute și falii (cu roșu).

Stilul de deformare interpretat în modelele analoge arată un grad ridicat de similaritate cu geometriile structurilor de deasupra sării observate în seismica 2D și 3D din ZCD (Capitolul 5; fig. 12). Acest lucru ne-a condus să avem și mai multă încredere în stilul structural interpretat sub sare. Așadar, avem încredere că atât stilul structural din modele, cât și timpul în care aceste structuri s-au produs sunt similare cu cele din ZCD (fig. 12c).



**Figura 12.** Secțiuni geologice prin zona cutelor diapire, ilustrând diferite stiluri structurale interpretate pentru această zonă. (a) Hristescu and Olteanu 1973; Pătruț et al. 1973; Tămaș et al. 2018a. (b) Ștefănescu et al. 2000; Tămaș et al. 2018a. (c) Schléder et al. submitted.

Principalele rezultate provenite din partea experimentală a tezei sunt:

(1) Modelarea analoagă scalată, cuplată cu: fotografierea la intervale constante de timp atât de deasupra, cât și din lateral, metode digitale de corelare a imaginilor (particle image velocimetry) și modele digitale de elevație reprezintă un adaos foarte important pentru interpretarea seismică și ajută la precizarea stilului structural și geometriilor în zone unde datele nu sunt suficiente sau au o calitate redusă (cum este Zona Cutelor Diapire). Rezultatele obținute din aceste experimente au ajutat în a prezice mai bine geometriile rezervoarelor de hidrocarburi atât lângă, cât și dedesubtul sării.

(2) Modelele compresionale efectuate au prezentat un stil structural caracterizat de structuri de tip duplex sub sare, structuri care deasupra lor au avut dezvoltate cute de detașare cu flancuri foarte abrupte (până la verticale). Stilul structural din aceste modele confirmă modelele propuse pe baza interpretării seismice și modelării structurale (Capitolul 5; fig. 12c).

(4) În capitolul 5 au fost prezentate două modele cinematice posibile care să explice evoluția post-Sarmațiană a diapirelor din această zonă. Ambele modele au fost investigate prin modelare analoagă și au fost confirmate ca fiind modele valide, ambele la fel de posibile. Efectele fiecărui tip de model asupra compartimentalizării rezervoarelor a fost luat în considerare și discutat. Este foarte posibil ca evoluția diapirelor din această zonă să fie o combinație dintre cele două modele propuse.

(5) Deformarea penetrativă este un detaliu important al deformării orogenelor. Chiar dacă modul prin care acest tip de deformare se manifestă în natură și în experimente este diferit, modelarea analoagă oferă detalii importante legate de cum variază acest tip de deformare în spațiu și timp. În timp ce cantitatea de scurtare a unui orogen crește (în timp), contribuția deformării penetrative ca procent din deformarea totală scade. Rezultate similare au fost de asemenea menționate de alte studii (e.g. Koyi et al., 2004; Burberry, 2015). Deformarea penetrativă scade cu adâncimea deasupra nivelului de sare, apoi, sub sare, inițial scade și apoi crește din nou spre baza modelului (fig. 11).

(6) Rezultatele modelării analoage efectuate au clarificat evoluția timpurie a tectonicii sării din regiune, au adus mai multe informații legate de evoluția cinematică a structurilor de tip duplex, a cutelor de detașare și a factorilor care influențează geometriile acestor structuri. De asemenea, prin modele analoage au fost validate și ambele modele propuse pentru evoluția Meoțian-recentă a diapirelor. Datele generate de aceste experimente pot fi folosite ca șablon pentru interpretarea seismică în zone unde seismica este de slabă calitate, sub și în proximitatea sării.

## **Capitolul 7 - Reevaluarea stratigrafică preliminară a datelor din carote și probe de sită**

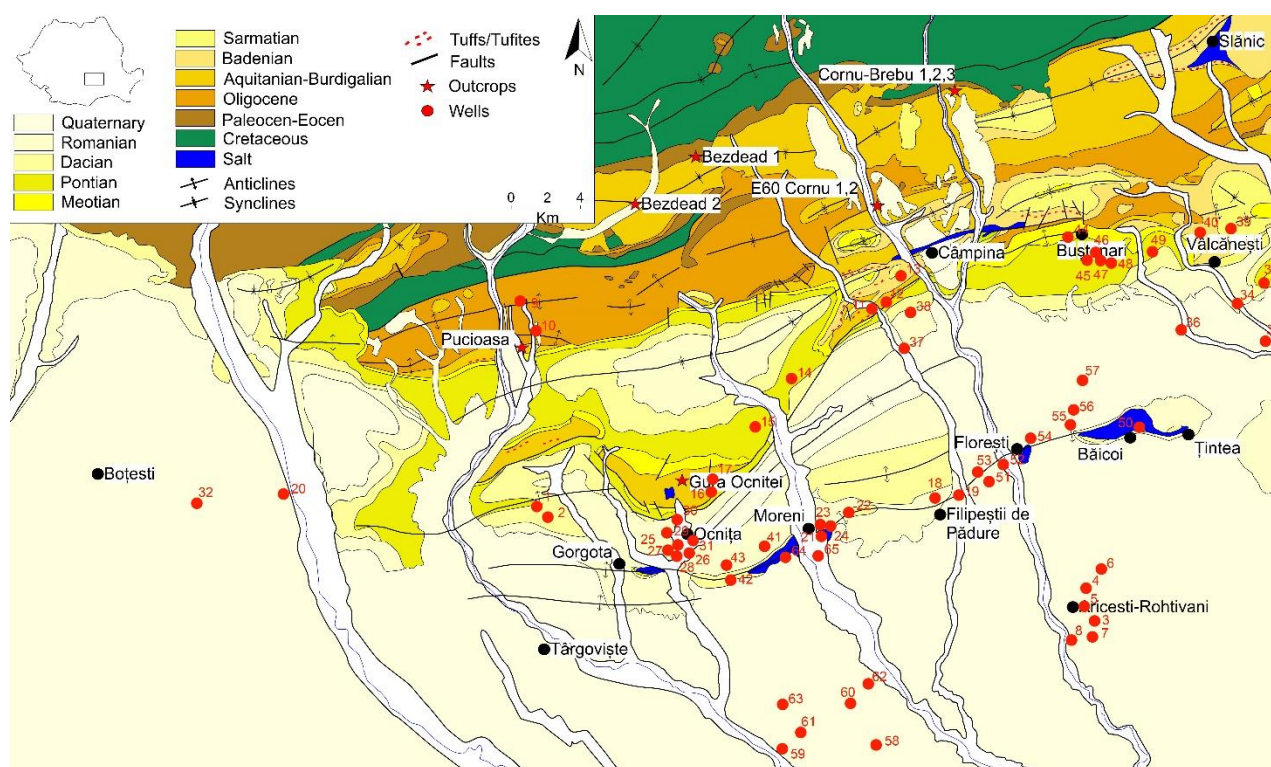
O parte din stratigrafia zonei prezintă mari incertitudini legate de vârste, ca atare, în capitolul 7 prezentăm rezultatele preliminare ale unui studiu de reevaluare biostratigrafică și cronostatigrafică a unor date provenite din rapoartele carotelor și probelor de sită din ZCD. Au fost selectate un număr de 65 de sonde cu rapoarte de analiza consistente. Pe baza taxonilor identificați în aceste rapoarte s-a realizat o reinterpretare biostratigrafică, aceasta fiind apoi integrată în modelul bazat pe datele seismice



2D și 3D. De asemenea, carotele a trei sonde mai recente au fost probate pentru realizarea unui studiu paleomagnetic, carotele a doua din aceste sonde dând rezultate bune.

Nevoia de revizie a stratigrafiei Oligocen-Miocene este de multe ori datorată faptului că unitățile stratigrafice formale și informale folosite în industria petrolului nu sunt la curent (Munteanu et al., 2014; Bercea et al., 2016a, b pentru discuții similare).

Având în vedere că acest studiu este în principal bazat pe reinterpretarea rapoartelor micro și macropaleontologice deja existente, există un grad ridicat de incertitudini legat de rezultate / reevaluări. Aceste incertitudini au fost reduse prin două metode: prelevarea de probe din aflorimente din vârstele ce prezintă cele mai mari semne de întrebare și integrarea rezultatelor în modelul structural/stratigrafic deja interpretat pe baza datelor seismice.



**Figura 13.** Hartă geologică simplificată a Zonei Cutelor Diapire (modificată după Murgeanu et al., 1967, 1968). Pe hartă sunt ilustrate și pozițiile celor 65 de sonde folosite în acest studiu.

Stratigrafia Miocen superioară – Romaniană nu prezintă mari probleme, dar în unele cazuri modificările au apărut prin faptul că am putut obține o interpretare mai detaliată (ex. Pontian inferior) pentru unele probe. De asemenea, pentru Meotian și Romanian am obținut și informații din studiul magnetostratigrafic, fapt ce a adăugat o rezoluție foarte bună pentru intervalele probate.

Din cele 626 de rapoarte de carote și probe de sită analizate, doar 36% au avut rezultate similare cu originalele (fig. 14A). Restul au fost diferite fie prin faptul că intervalul de vârstă interpretat a fost mai larg, fie diferit.

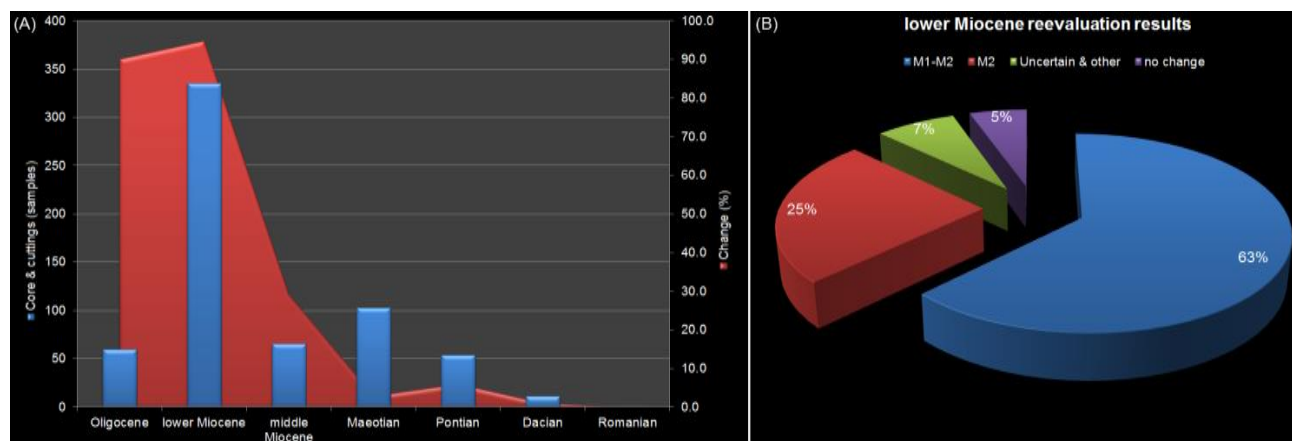


Figura 14. Rezultatele statistice ale reevaluării biostratigrafice.

Cele mai mari incertitudini au fost identificate la nivelul Oligocenului și Miocenului inferior. Mare parte din Oligocenul interpretat inițial în carotele studiate a fost de fapt reatribuit Miocenului inferior, o problemă deja binecunoscută în această zonă. Miocenul inferior a fost fie greu de separat (63% reinterpretat ca Miocen inferior-mediu) sau a fost atribuit Miocenului mediu (25%). Cu siguranță există mai mult Miocen mediu decât inițial interpretat între suprafața sării și baza Meoțianului (Schléder et al. *submitted*). Liniile seismice interpretate, prezentate în teza, urmăresc acest nou model stratigrafic.

Chiar dacă acest studiu este majoritar bazat pe reinterpretarea unor taxoni deja identificați, această abordare este una recomandată deoarece, de multe ori, datele primare pot fie să nu mai fie accesibile, sau să lipsească. De asemenea, o astfel de abordare poate îmbunătăți rezoluția interpretărilor biostratigrafice preexistente și să clarifice unele probleme. Pentru o reevaluare stratigrafică precisă este absolut necesară reprobarea, culegerea și identificarea materialului paleontologic.

## Capitolul 8 - Concluzii

Obiectivul principal al acestei teze a fost obținerea unei înțelegeri mai bune a tectonicii sării regionale și sub regionale din Zona Cutelor Diapire. Pentru a îndeplini aceste obiective, a trebuit căutat răspunsul la o serie de întrebări:

- Cum s-a ajuns la modelele prezente care descriu evoluția diapirelor din Zona Cutelor Diapire (ZCD)?
- Care sunt modelele istorice în ceea ce privește evoluția cinematică a acestor diapire?
- Care sunt factorii principali care controlează/influențează stilul structural?
- Putem înțelege mai multe despre efectele eficienței nivelului bazal de decolare și grosimii sării asupra evoluției ZCD?
- Care este geometria structurilor de sub sare? Putem oare folosi modelarea analoagă pentru a prezice geometriile acestor structuri?
- Modelul stratigrafic ce este utilizat în mod tradițional pentru această zonă (mai ales cel folosit în industria hidrocarburilor) este unul curent? Mai este valabil în totalitate?
- Putem obține o corelare mai bună a unor evenimente? Putem afla mai multe detalii în ceea ce privește timpul când ele s-au petrecut (ex. Primele sedimente ce acoperă discordanța de la baza Meoșianului)?
- Care a fost evoluția diapirelor? Care a fost cauza pentru crearea lor și care a fost evoluția lor în timp?
- Care este geometria 3D acestor diapire (formă și dimensiuni)? Oare pot fi cartate aceste diapire în mai mult detaliu?
- Putem înțelege mai multe despre evoluția post-Sarmațiană a zonei bazându-ne pe datele disponibile?
- Au avut vreun efect diapirele/diapirismul asupra distribuției și compartimentalizării rezervoarelor de hidrocarburi?

Primii cercetători care au studiat tectonica sării în România au jucat un rol important în istoria acestui domeniu, aducând contribuții importante în înțelegerea deformării și tectonicii sării. Putem spune că această istorie a început cu Posepny (1871), care nu doar că a fost primul care a descris structuri discordante de sare în zona, ci și printre primii din lume. De asemenea, a descris și ilustrat detalii ale deformării sării care sunt și astăzi valabile (deformare ductilă, geometriile sinclinalelor de pe flancurile diapirelor, stratigrafia de pe flancuri uneori rasturnată, etc.). După aceste contribuții, Ludovic Mrazec a avut și el contribuții foarte importante în înțelegerea deformării sării, nu doar faptul că a introdus termenul de diapir. Mrazec este primul care a avut un model complet și coerent în ceea ce privește tectonica sării din România.

Multe din contribuțiile aduse de Mrazec au fost cu mult înaintea timpului lui, de exemplu curgerea vâscoasă a sării, retragerea sării, curgerea liberă la suprafață a sării, importanța reducerii grosimii rocilor ce acoperă sarea, încărcarea diferențiată, plasticitatea cristalelor de sare, modul în care se dezvoltă sinclinalele de pe flancurile diapirelor, sudurile de sare (salt welds). Majoritatea modelelor ce au urmat contribuțiilor lui Ludovic Mrazec, nu au mai reprezentat lucrări care să schimbe la nivel internațional modul în care este înțeleasă tectonica sării, și au fost majoritar axate pe utilizarea datelor noi (sonde, seismică 2D și 3D) în cadrul gândirii internaționale despre tectonica sării.

Pentru realizarea obiectivelor propuse în această teză s-au folosit atât informații de suprafață (aflorimente, hărți, modele de elevație) cât și de subteran (date din sonde, seismică 2D și 3D) împreună cu metode experimentale (modelare analoagă).

Rezultatele arată că prima mobilizare importantă a sării din acest areal a avut loc în timpul fazei tectonice Badenian-Sarmațiene și stilul structural a fost caracterizat de cute de detașare deasupra sării și de structuri de tip duplex sub sare, localizate sub creasta acestor cute de detașare. În timp ce crestele anticlinalelor ce se formau în stratigrafia de deasupra sării erau erodate, sarea a fost expusă la suprafață, fiind liberă să curgă.

Rezultatele modelării analoage (fotografiile secțiunilor), cuplată cu: fotografierea la intervale constante de timp atât de deasupra, cât și din lateral, metode digitale de corelare a imaginilor (particule image velocimetry) și modele digitale de elevație reprezintă un adaos foarte important pentru interpretarea seismică și ajută la precizarea stilului structural și geometriilor în zone unde datele nu sunt suficiente sau au o calitate redusă (cum este Zona Cutelor Diapire). Rezultatele obținute din aceste experimente au ajutat în a prezice mai bine geometriile rezervoarelor de hidrocarburi atât lângă, cât și dedesubtul sării.

Deformarea penetrativă este un detaliu important al deformării orogenelor. Chiar dacă modul în care acest tip de deformare se manifestă în natură și în experimente este diferit, modelarea analoagă oferă detalii importante legate de cum variază acest tip de deformare în spațiu și timp. În timp ce cantitatea de scurtare a unui orogen crește (în timp), contribuția deformării penetrativă ca procent din deformarea totală scade. Deformarea penetrativă scade cu adâncimea deasupra nivelului de sare, apoi sub sare inițial scade și apoi crește din nou spre baza modelului.

Dupa terminarea evenimetului tectonic Badenian – Sarmațian a avut loc o eroziune puternică, suprafață peste care s-a depus stratigrafia Meoțian – Cuaternar. Începând cu Meoțianul a mai avut loc

un eveniment compresional, mai exact faza Valahă. Caracterul sintectonic al Meoțianului este greu de identificat și încă discutabil, dar începând cu Ponțianul, stratigrafia are cu siguranță un caracter sintectonic. Mișcările fazei Valahe au adăugat o încărcare orizontală asupra corpurilor de sare, ceea ce a determinat o creștere a ratei de mișcare a sării.

Cinematica post-Sarmațiană a evoluției diapirelor poate fi explicată prin două modele. Unul din modele presupunea îngroparea acestor corpuri de sare până în Dacian, când prin reactivarea unor aliniamente preexistente se deschid mici bazine de pull-apart prin care această sare urcă la suprafață. Modelul alternativ prezintă un caz în care sarea continuă să evolueze sub forma unor diapire pasive care au ținut mai mult sau mai puțin pasul cu sedimentarea. Ambele scenarii au fost testate prin modelare analoagă, fiecare dintre ele fiind la fel de posibil.

Ultimele mișcări ale fazei Valahe, care au fost și cele mai intense, sunt cele care au deconectat diapirele de sursa lor și le-a pus în poziția în care le găsim în prezent. Înțelegerea formei actuale a diapirelor nu doar că ne aduce noi informații cu privire la evoluția lor, ci ne și ajută să înțelegem mai în detaliu unde este contactul dintre rezervoare și diapire și să reducem riscurile asociate săpării sondelor prin sare. Cu acest scop a fost realizat un model 3D al diapirului de la Moreni, model bazat pe date de sondă și diferite atribute seismice.

Un alt subiect important tratat în teză este gradul ridicat de incertitudine pe care îl prezintă modelul stratigrafic din zona de interes. Reevaluarea datelor din carote și probe de sită au arătat că Oligocenul și Miocenul inferior prezintă cele mai mari incertitudini. Majoritatea probelor interpretate inițial ca Oligocen au fost acum atribuite Miocenului inferior, dar această problemă este deja binecunoscută și a fost expusă și în alte studii.

Cele mai multe incertitudini sunt legate de vârsta formațiunile interpretate inițial ca Miocen inferioare. Majoritatea datelor din probe de sită și carote au fost fie imposibil de separat/atribuit unui interval de vârstă mai restrâns decât Miocen inferior-meniu sau au fost atribuite Miocenului mediu. După integrarea acestor rezultate cu modelul bazat pe interpretare seismică am putut observa că o bună parte din ceea ce era înainte atribuit Miocenului inferior acum ar trebui atribuită Miocenului mediu.

Pentru stratigrafia mai recentă, (Meoțian și Romanian) am reușit să aducem informații mai detaliate prin cuplarea rezultatelor din biostratigrafie cu un studiu magnetostratigrafic. Acest studiu ne-a ajutat să avem o rezoluție mai bună a informațiilor în zonă și a oferit informații importante legate de momentul în care au avut loc unele evenimente (ex. primele sedimente Meoțiene din proximitatea diapirului de la Moreni) și rate de sedimentare (informații importante și pentru modelarea analoagă).

## Bibliografie

- Atanasiu, I., 1948, Zăcămintele de țitei din România: Revistele tehnice AGIR, v. 3, p. 111-125.
- Athanasiu, I., Basgan, G., Bejan, P.N., Botez, G., Dumitrescu, V., Filipescu, D., Grozescu, H., Hugel, H., Iscu, V., Macovei, G., Mircea, E., Mrazec, L., Preda, D.M., Scriban, N., Ștefănescu, G., Teisseyre, W., Popescu-Voitești, I. and Wyszynski, O., 1935, Geological map of the hydrocarbon fields of Romania, scale 1:125000, Carpathian Geological Service, Warsaw, Poland.
- Băncilă, I., 1958, Geologia Carpaților Orientali. Editura Tehnică, Bucharest, Romania. 368 p.
- Bercea, R., Bălc, R., Filipescu, S., Zaharia, L. and Pop, S., 2016a, Middle Miocene micropalaeontological and sedimentary aspects within a piggy-back basin, Pucioasa section, Carpathian Bend Zone, Romania. AAPG European Regional Conference and Exhibition, Bucharest, Abstract Book, p. 50.
- Bercea, R., Bălc, R., Filipescu, S., Zaharia, L. and Pop, S., 2016b, Sedimentological and micropaleontological features of a Middle Miocene piggy-back basin – Pucioasa section, Carpathian Bend Zone. "I.Popescu-Voitești" Annual Scientific Session, Cluj-Napoca, Romania, Abstract Book, Presa Universitară Clujeană, p. 7-10.
- Burberry, C.M., 2015, Spatial and temporal variation in penetrative strain during compression: Insights from analog models: Lithosphere, v. 7, no. 6 p. 611–624, doi: 10.1130/L454.1.
- Cicha, I., Rögl, F., Rupp, C., and Ctyroka, J., 1998, Oligocene - Miocene foraminifera of the Central Paratethys: Abhandlungen Der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft, v. 549, p. 1–325.
- Cloetingh, S.A.P.L., Burov, E., Mațenco, L., Toussaint, G., Bertotti, G., Adriessen, P. A. M., Wortel, M. J. R. and Spakman, W., 2004, Thermo-mechanical controls on the mode of continental collision in the SE Carpathians (Romania): Earth and Planetary Science Letters, v. 218, p. 57-76, doi: [10.1016/S0012-821X\(03\)00645-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00645-9).
- Csontos, L. and Voros, A., 2004, Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 210, p. 1–56, doi: 10.1016/j.palaeo.2004.02.033.

- Davison, I., Alsop, G.I. and Blundell, D.J., 1996, Salt tectonics: Some aspects of deformation mechanics. Geological Society London Special Publications, v. 100, no. 1, 1-10, doi: 10.1144/GSL.SP.1996.100.01.01.
- Dicea, O., and Popescu, I., 1973, Eficiența metodelor geofizice în cercetarea structurilor diapire din avansosa Carpaților din România: Petrol și Gaze, v. 24, no. 9, p. 570-577.
- Gavăț, I., 1934, Sur les anomalies de gravitation constatees a Florești (Prahova) et dans les environs: Anuarul Institutului Geologic al României, v. 16, p. 683-706.
- Hippolyte, J. C. and Săndulescu, M., 1996, Paleostress characterization of the 'Wallachian' phase in its type area, Southeastern Carpathians, Romania: Tectonophysics, v. 263, p. 235-269, doi [10.1016/S0040-1951\(96\)00041-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00041-8).
- Hristescu, E., and Olteanu, G., 1973, Rolul diapirismului în formarea și distribuția hidrocarburilor din zona miopliocenă: Petrol și Gaze, v. 24, no. 9, p. 550-558.
- Hudec, M. R., and Jackson, M. P. A., 2007, Terra infirma: Understanding salt tectonics: Earth-Science Reviews, v. 82, p. 1-28, doi [10.1016/j.earscirev.2007.01.001](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.01.001).
- Jackson, M.P.A. and Talbot, C.J., 1986, External shapes, strain rates and dynamics of salt structures. Geological Society of America Bulletin, v. 97, p. 305-323.
- Jackson, M.P.A. and Vendeville, B., 1994, Regional extension as a geologic trigger for diapirism. Geological Society of America Bulletin, v. 106, no. 1, p. 57-73, doi: 10.1130/0016-7606(1994)106<0057:REAAGT>2.3.CO;2.
- Jackson, M.P.A., 1995, Retrospective salt tectonics, in M. P. A. Jackson, D. G. Roberts and S. Snelson, eds., Salt tectonics: a global perspective: AAPG Memoir, no. 65, p. 1-28.
- Jackson, M.P.A., 1997, Conceptual Breakthroughs in Salt Tectonics: A Historical Review, 1856-1993. Report of Investigation no. 246, Bureau of Economic Geology, University of Austin, Texas, 51 p.
- Jackson, M.P.A. and Hudec, M.R., 2017, Salt Tectonics: Principles and Practice. Cambridge: Cambridge University Press, doi:10.1017/9781139003988.
- Jipa, D. C., and Olariu, C., 2009, Dacian Basin. Depositional architecture and sedimentary history of a Paratethys sea: Geo-Eco-Marina Special Publication, v. 3, GeoEcoMar, Bucharest, 264 p.

- Koyi, H. A., Sans, M., Teixell, A., Cotton, J., and Zeyen, H., 2004. The Significance of Penetrative Strain in the Restoration of Shortened Layers - Insights from Sand Models and the Spanish Pyrenees. In: Thrust tectonics and hydrocarbon systems. (K. R. McClay, ed.). AAPG Memoir 82, p. 207-222.
- Krúzsek, C., and Bally, A. W., 2006, The Transylvanian Basin (Romania) and its relation to the Carpathian fold and thrust belt: Insights in gravitational salt tectonics: Marine and Petroleum Geology, v. 23, p. 405–442, doi: [10.1016/j.marpetgeo.2006.03.003](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2006.03.003).
- Laskarev, V., 1924, Sur les équivalents du Sarmatien supérieur en Serbie, in P. Vujevic, ed., Recueil de travaux offert à M. Jovan Cvijič par ses amis et collaborateurs: Belgrad, Drzhavna Shtamparija, p. 73-85.
- Mațenco, L. and Bertotti, G., 2000, Tertiary tectonic evolution of the external East Carpathians (Romania). Tectonophysics, v. 316, p. 255-286.
- Mațenco, L., 2017, Tectonics and Exhumation of Romanian Carpathians: Inferences from Kinematic and Thermochronological Studies. In: Rădoane M, Vespremeanu-Stroe A (eds) Landform Dynamics and Evolution in Romania. Springer Geography, doi: [10.1007/978-3-319-32589-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32589-7_2).
- Merten, S., Mațenco, L., Foeken, J.P.T., Stuart, F.M., and Andriessen, P.A.M., 2010, From nappe stacking to out-of-sequence post collisional deformations: Cretaceous to Quaternary exhumation history of the SE Carpathians assessed by low-temperature thermochronology: Tectonics, v. 29, TC3013, doi: [10.1029/2009TC002550](https://doi.org/10.1029/2009TC002550).
- Mrazec, L., and Teisseyre, W., 1902, Privire geologică asupra formațiunilor salifere și zăcămintelor de sare din România: Monitorul Petrolului Român, v. 3, p. 1-55.
- Mrazec, L., 1905, Contribuțiune la geologia regiunii Gura Ociței – Moreni: Monitorul Petrolului, no. 28, p. 785-788.
- Mrazec, L., 1907, Despre cute cu sîmbure de străpungere: Buletinul Societății de Științe, v. 16, p. 6-8.
- Mrazec, L., 1910, Über die Bildung der rumänischen Petroleumlagerstätten: Third International Petroleum Congress (1907), Bucharest, Comte Rendu, v. 2, p. 80-134.
- Mrazec, L., 1926, Les plis diapirs et le diapirisme en general, Institutul Geologic al României: Compte Rendu, v. 6 (1914-1915), p. 215-255.



- Munteanu, I., Popescu, D., Borosi, V., Dobre, S., Maioru, V. and Iusco, G., 2014, Stratigraphic re-evaluation of the Oligocene-Lower Miocene formations in the Diapiric Fold Zone, Eastern Carpathians, Romania. Search and Discovery Article #90192, European Regional Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, 13-15 May 2014.
- Murgeanu, G., Mota, I., Bandradur, T., Ghenea, C. and Săndulescu, M., 1967, Harta Geologica a Romaniei, scara 1:200000, foaia 36-Ploiesti: Institutul Geologic al Romaniei, Bucuresti.
- Murgeanu, G., Patrulius, D., Gherasi, N., Ghenea, A. and Ghenea, C., 1968, Harta Geologica a Romaniei, scara 1:200000, foaia 35-Targoviste: Institutul Geologic al Romaniei, Bucuresti.
- Murgoci, G. M., 1905, Tertiary formations of the Oltenia with regard to salt, petroleum and mineral springs: *The Journal of Geology*, v. 13, no. 8 (Nov-Dec, 1905), p. 670-712.
- Olteanu, G., 1965, Salt rising mechanism in the pre Carpathian area of the Ploiești region: Sofia, Carpatho-Balkan Geological Association, Congres VII, v. 1, p. 157-163.
- Paraschiv, D., and Olteanu, G., 1970, Oil fields in mio-pliocene zone of Eastern Carpathians (District of Ploiești), in M. T. Halbouty, ed.: AAPG Memoir, no. 14, p. 399-427.
- Paraschiv, D., Olteanu, G., Sîrbu, C., and Pauliuc, S., 1973, Structura Moreni – Băicoi. Cută diapiră productivă reprezentativă în zona mio-pliocenă: *Petrol și Gaze*, v. 24, no. 9, p. 559-569.
- Pătruț, I., Paraschiv, D., and Dicea, O., 1973, Consideratiuni asupra modului de formare a structurilor diapire din România: *Petrol și Gaze*, v. 24, no. 9, p. 533-542.
- Posepny, F., 1871, Studien aus dem Salinargebiete Siebenbürgens: *Kaiserlich-Königlichen Geologischen Reichsanstalt Jahrbuch*, v. 21, p. 123–186.
- Roure, F., Roca, E. and Sassi, W., 1993, The Neogene evolution of the outer Carpathian flysch units (Poland, Ukraine and Romania); kinematics of a foreland/fold-and-thrust belt system. *Sedimentary Geology*, v. 86, p. 177–201.
- Sanders, C.A.E.; Andriessen, P.A.M. and Cloetingh, S.A.P.L., 1999, Life cycle of the East Carpathian orogen: Erosion history of a doubly vergent critical wedge assessed by fission track thermochronology. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, no. B12, p. 29,095–29,112.
- Săndulescu, M., 1984, *Geotectonica României*, Editura Tehnică București, 335 p.

- Săndulescu, M., 1988, Cenozoic tectonic history of the Carpathians, in Royden, L. and Horváth, F., eds., The Pannonian Basin: A study in basin evolution, AAPG Memoir, no. 45, p. 17-25.
- Schléder, Z., Krézsek, C., Oterdoom, H., Ho, F., Dobre, S., Maioru, V., and Popescu D., 2014, How New 3D Seismic Data Changed the Way We Think about Structures in an Old Hydrocarbon Province: A Case Study from the Carpathian Bend Zone, 41st Central – Eastern Europe and Caspian Scout Group.
- Schléder, Z., Man, S., Tămaş, D.M., 2016a, History of Salt Tectonics in the Carpathian Bend Zone, Romania, AAPG European Regional Conference and Exhibition, Bucharest, Field-trip guide, May 18th 2016, 22 p.
- Schléder, Z., Maioru, V., Krézsek, C., Dobre, S., Arnberger, K., Popescu D., and Tulucan, A., 2016b, Structural style in the type locality of the salt diapir, Carpathian Bend Zone, Romania (abs.): AAPG European Regional Conference and Exhibition, Abstract Book, Bucharest, p. 109-110.
- Schléder, Z., Tămaş, D., Arnberger, K., Krézsek, C. and Tulucan, A., *submitted*, Salt tectonics style in the Bend Zone sector of the Carpathian fold and thrust belt, Romania. International Journal of Earth Sciences
- Schmid, S. M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Maţenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M., and Ustaszewski, K., 2008, The Alpine–Carpathian–Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units: Swiss Journal of Geoscience, v. 101, no. 1, p. 139–183, doi: [10.1007/s00015-008-1247-3](https://doi.org/10.1007/s00015-008-1247-3).
- Ştefănescu, M., 1986, Elaborarea profilelor geologice, scara 1:200,000 pentru completarea imaginii geologice a teritoriului României. Institutul de Geologie si Geofizica, Bucuresti.
- Tămaş, D.M.; Krézsek, C. and Schléder, Z., 2015, 3D diapir modeling in the type area for salt diapirism, preliminary results (Moreni, Romania). "I.Popescu-Voiteşti" Annual Scientific Session, Cluj-Napoca, Romania, Abstract Book, Presa Universitară Clujeană, p. 46-49.
- Tămaş, D.M.; Tămaş, A.; Schléder, Z.; Krézsek, C. and Filipescu, S., 2016a, Analogue modeling of salt diapirs in the Eastern Carpathian Bend Zone. First insights. "I.Popescu-Voiteşti" Annual Scientific Session, Cluj-Napoca, Romania, Abstract Book, Presa Universitară Clujeană, p. 68-71.

- Tămaş, D.M.; Schléder, Z.; Krézsek, C.; Man, S.; Gangatharan, G. and Filipescu, S., 2016b, A Brief History of Salt Tectonics in the Carpathian Bend Zone and Analogue Modeling of some of the Concepts. AAPG European Regional Conference and Exhibition, Bucharest, Abstract Book, p. 11-12.
- Tămaş, D.M.; Tămaş, A.; Schléder, Z.; Krézsek, C. and Filipescu, S., 2017a, Analogue (physical) modelling: an invaluable research and educational tool. "Ion Popescu-Voiteşti" Annual Scientific Session, Cluj-Napoca, Romania, Abstract Book, Presa Universitară Clujeană, p. 42-44.
- Tămaş, D.M.; Tămaş, A.; Schléder, Z.; Krézsek, C. and Filipescu, S., 2017b, Insights into detachment folds and subsalt duplex geometries in the Eastern Carpathian Bend Zone, Romania: an analogue modelling approach. GSL Conference: Fold and Thrust Belts: Structural style, evolution and exploration, 31 Oct – 2 Nov, Abstract Book.
- Tămaş, D.M.; Schléder, Z.; Krézsek, C.; Man, S. and Filipescu, S., 2018a, Understanding salt in orogenic settings: the evolution of ideas in the Romanian Carpathians, AAPG Bulletin, v. 102, no. 6, p. 941-958, doi: 10.1306/0913171615517088.
- Tămaş, D.M.; Tămaş, A.; Schléder, Z.; Krézsek, C. and Filipescu, S., 2018b, Salt tectonics in the Eastern Carpathian Bend Zone, Romania: an analogue modelling approach. Geophysical Research Abstracts, vol. 20, EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria.
- Tămaş, D.M.; Schléder, Z.; Tămaş, A.; Krézsek, C. Copoţ B. and Filipescu, S., *submitted*, Scaled analogue modelling of salt tectonics in a contractional setting: insights into the dynamics of the Carpathian Bend Zone evolution (Romania), In: Hammerstein, J., Di Cui, R., Griffiths, P., Cottam, M., Zamora, G., and Butler, R. eds, Fold and Thrust Belts; Fold and Thrust Belts: Structural Style, Evolution and Exploration, Geological Society of London, Special Publications.
- Urai, J., Means, W.D. and Lister, G., 1986, Dynamic recrystallization of minerals, in Hobbs, B.E., and Heard, H.C., eds., Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies: The Paterson Volume: American Geophysical Union Geophysical Monograph, v. 36, p. 161-199, doi: 10.1029/GM036p0161.
- Urai, J., Schléder, Z., Spiers, C. and Kukla, P., 2008, Flow and transport properties of salt rocks, in: Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System, (R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski, S., and Nelskamp eds.), p. 291–304, Springer, Berlin Heidelberg.

- Vendeville, B.C. and Jackson, M.P.A., 1992a, The rise of diapirs during thin-skinned extension: *Marine and Petroleum Geology*, v. 9, p. 331-354, doi: [10.1016/0264-8172\(92\)90047-I](https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90047-I).
- Vendeville, B.C. and Jackson, M.P.A., 1992b, The fall of diapirs during thin-skinned extension: *Marine and Petroleum Geology*, v. 9, p. 354-371, doi: [10.1016/0264-8172\(92\)90048-J](https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90048-J).
- Warren, J.K., 2016, *Evaporites, a geological compendium: Switzerland*, Springer International Publishing, 2<sup>nd</sup> edition, 1813 p., doi: [10.1007/978-3-319-13512-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13512-0).
- Weijermars, R., Jackson, M.P.A. and Vendeville, B.C., 1993, Rheological and tectonic modeling of salt provinces. *Tectonophysics*, v. 217, p. 143–174, doi: [10.1016/0040-1951\(93\)90208-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90208-2).