

UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA DE GEOLOGIE ȘI GEOFIZICĂ
ȘCOALA DOCTORALĂ DE GEOLOGIE

**Studiul dinamicii hidro-sedimentare și morfologice
a brațului Sulina din Delta Dunării**

**TEZĂ DE DOCTORAT
REZUMAT**

Conducător Științific:

Prof. Dr. Nicolae PANIN

Membru corespondent al Academiei Române

**Doctorand,
Florin DUȚU**

București, 2014

Introducere

Fluviul Dunărea reprezintă pe lângă componenta naturală de biodiversitate, un fluviu de o importanță economică și politică deosebită pentru continentul european. Delta formată la gura de vărsare poartă amprenta evoluției condițiilor climatice și antropice ce au transformat intens condițiile naturale ale bazinului hidrografic în ultimele secole. Aceste schimbări (morfologice, hidrologice, sedimentologice, etc) de la scara bazinului au fost amplificate de amenajările recente localizate în interiorul deltei; acestea au produs variații ale fluxurilor lichide și solide și reajustări locale ale morfologiei albiei, cu efecte importante asupra dinamicii hidro-sedimentare locale.

Brațul Sulina reprezintă distributarul central al Dunării în interiorul deltei. Prezintă un interes aparte datorită tăierii meandrelor sale și a amenajărilor realizate pentru navigație în perioada 1858 – 1902. Această teză își propune să analizeze în ce mod a înregistrat brațul Sulina aceste schimbări ale albiei; în plus vom putea evalua noile condiții de transfer sedimentar și implicațiile asupra morfologiei albiei. Acestor modificări locale se adaugă și cele la scara bazinului de drenaj reprezentate în principal prin construirea a numeroase baraje hidro-energetice.

În ultimul secol numeroase fluvii au fost marcate de construirea barajelor prin efecte directe asupra morfologiei, hidrologiei și transferul sedimentelor (Williams și Wolman, 1984 ; Knox, 2006; Assani și Petit, 2004). Fiecare fluviu răspunde în mod diferit acestor modificări în funcție de localizarea bazinului, condițiile climatice sau substratul geologic. Pe de altă parte, intervențiile antropice locale, la nivelul albiei cum sunt îndiguirile, tăierile de meandre, provoacă modificări semnificative ale profilelor longitudinale (Keller, 1975).

În acest cadru tematic general, această teză se focalizează pe evoluția și dinamica recentă a unui braț deltaic modificat antropic; este un studiu integrat, multi-disciplinar (morfologie, dinamică, sedimentologie, hidrologie) realizat prin aplicarea mai multor metode de cercetare. Analiza evoluției albiei brațului Sulina (morfologie, hidrologie, sedimentologie) a permis înțelegerea dinamicii ei actuale. Noțiunea de „recent” se referă la scara temporală a ultimilor 150 ani; această perioadă a fost aleasă pentru a putea estima intensitatea influenței factorilor naturali, cât și a celor antropici și modul în care brațul fluvial înregistrează în prezent modificările antropice anterioare.

Studiul dinamicii morfologice și hidro-sedimentare a brațului Sulina este un subiect nou și dificil de abordat, datorită dificultăților de acces în zonă, necesității infrastructurii speciale de cercetare dedicate unui astfel de studiu și nu în ultimul rând a lipsei datelor vechi necesare pentru comparații.

Teza este organizată în trei părți:

- 1) **Prima parte** prezintă o sinteză a informațiilor existente despre zona de studiu. În această parte introductivă a tezei sunt prezentate componentele spațiale care formează sistemul global denumit Dunăre - Delta Dunării - Marea Neagră și ce rol are fiecare dintre ele în acest sistem: Marea Neagră ca receptor final al fluxurilor de apă și sedimente transportate de Dunăre prin intermediul brațului Sulina.
- 2) **A doua parte** arată modul de abordare ales în cuantificarea intensității modificărilor antropice în evoluția proceselor hidro-sedimentare de pe brațul Sulina. Sunt prezentate tipurile de metode de cercetare aplicate, măsurătorile efectuate și datele sursă utilizate. În plus, o amplă documentare bibliografică a permis înțelegerea proceselor de albie ale zonei de studiu și situarea ei într-un context global.

- 3) **A treia parte** este consacrată studiului dinamicii hidro-sedimentare și morfologice actuale a brațului Sulina. Obiectivul principal a fost de a studia efectele intervențiilor antropice asupra albiei și care este dinamica hidro-sedimentară și morfologică actuală a brațului Sulina. S-au abordat trei direcții:
- Studiul proceselor hidrologice din albia brațului Sulina folosind date de curenți. Scopul a fost de a evalua dinamica hidrologică a brațului și de a cuantifica parametrii dinamici cheie (viteza, tensiunea tangențială de frecare și puterea fluvială specifică);
 - Studiul proceselor sedimentare din albia brațului Sulina folosind granulometria sedimentelor de fund și a celor în suspensie și ecuații de transport sedimentar. Scopul a fost de a cuantifica debitul solid în suspensie și de a caracteriza sedimentele albiei;
 - Studiul proceselor morfologice din albia brațului Sulina folosind măsurătorile batimetrice de tip multibeam. Scopul a fost de a interpreta dinamica morfologică actuală și de a identifica și analiza puncte critice (de eroziune sau acumulare) de-a lungul albiei brațului Sulina.

PARTEA I – PREZENTARE GENERALĂ

1.1. Platforma continentală a Mării Negre în zona de Nord-Vest, receptor final al fluxurilor lichide și solide din bazinul Dunării

Marea Neagră constituie principalul receptor al aporturilor lichide și solide ale Europei Centrale (prin intermediul Dunării) și ale Europei de Est (fluviile ucrainiene Nistru, Nipru, Bugul de Sud, Donul și Cubanul). Bazinul de recepție se întinde pe aproximativ 1864000 km², cea mai mare parte fiind reprezentată de bazine de recepție ale fluviilor din partea de NV: Dunărea (43.8%), Nistrul, Bugul, Niprul și Cubanul. Debitul reunit al acestora este de cca. 276 km³/an, din care numai Dunării îi revin cca. 70 %. În ceea ce privește aportul sedimentar, cantitatea totală de sedimente transportate și deversate pe platoul continental de către acești afluenți este de cca. 61 x 10⁶ tone, din care Dunării îi revin aproximativ 81 % (Wong et al., 1994)

Procesele sedimentare actuale pe platforma continentală din partea de NV a Mării Negre sunt marcate de influența aporturilor sedimentare ale fluviilor care debușează în această zonă (Panin și Jipa, 1998): Dunărea, Nistrul și Niprul. Însă, influența Dunării este cea mai importantă în sedimentarea șelfului părții de NV a Mării Negre (Panin, 1999). Ceilalți tributari nu sunt determinanți în alimentarea cu apă și sedimente a părții de NV a Mării Negre, mai ales pentru că își varsă încărcătura sedimentară în lagune, separate de apa mării prin cordoane litorale (Panin, 1999).

1.2. Dunărea – sursă sedimentară principală pentru platoul continental din partea de NV a Mării Negre

Dimensiunea Dunării și a bazinului său de recepție, multitudinea țărilor traversate, diversitatea peisajului și prezența deltei la vărsarea sa în mare oferă acestui sistem fluvial un caracter aparte în Europa și în lume. O lungă istorie de navigație, dezvoltarea industrială, agricultura practică la scară largă, mai mult de 80 milioane locuitori în arealul bazinului

hidrografic, multiplele amenajări hidroenergetice sunt factori care influențează evoluția seculară a fluviului. Dunărea reprezintă unul dintre principalele elemente ale sistemului complex fluviu-deltă-mare, Dunăre – Delta Dunării – Marea Neagră. Aceasta influențează direct echilibrul deltei, zonei litorale și șelfului Mării Negre în principal prin evoluția aportului de apă și de sedimente.

Pe Dunăre lucrările de amenajare au început încă din secolul XVII și au avut ca scop controlul inundațiilor, îmbunătățirea condițiilor de navigație, construirea de sisteme de irigație și producerea de energie. Lucrările au constat în construirea de baraje și lacuri de acumulare, diguri, protecții de maluri, canale, dragaje și rectificări de meandre. Capacitatea hidro-energetică a întregului curs al Dunării este de 29 000 MW, realizată prin construirea unui număr impresionant de baraje (850 dintre care 700 pe afluenți) printre care Bad Abbach, KM 2041 ; Regensburg, KM 2381 ; Geisling, KM 2354 ; Gabcikovo, KM 1842.

După 1970, amenajările hidro-energetice de pe teritoriul românesc au perturbat intens modul de funcționare hidrologic și sedimentar al fluviului în cursul inferior: construcția celor două baraje hidro-energetice de la Porțile de Fier I (KM 943 în anul 1972) și II (KM 864 în anul 1984) cât și amenajările hidrotehnice realizate pe tributarii Dunării din sectorul românesc (Jiu, Olt, Vedea, Siret).

Debitul lichid mediu multianual ($6\,550\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), măsurat la intrarea în deltă (la stația hidrometrică de la Tulcea) este rezultatul bilanțului hidric al bazinului de recepție (precipitații medii de 816 mm, evaporația medie de 547 mm) (Almazov et al., 1963).

În ceea ce privește transportul de sedimente, amenajările antropice din bazinul superior și mijlociu al fluviului au dus la diminuarea fluxului sedimentar spre aval. Incepând din 1970, construcția celor două baraje hidro-energetice de la Porțile de Fier I (KM 943 în anul 1972) și II (KM 864 în anul 1984) cât și amenajările hidrotehnice de pe tributarii Dunării din sectorul românesc (Jiu, Olt, Vedea, Siret) au influențat regimul debitelor lichide și solide spre aval.

Aceste lucrări au determinat o reducere considerabilă a debitului sedimentar la gurile de vărsare ale Dunării. Pentru o perioadă de 130 ani, Bondar et al., (1991) estimează că debitul sedimentar mediu al Dunării la gurile de vărsare a fost de $51.7 \times 10^6\text{ t}\cdot\text{an}^{-1}$ cu o tendință de diminuare progresivă în timp. Sudii mai recente (Panin și Jipa, 2002; Walling, 2006) estimează că debitul sedimentar s-a diminuat de la $67.5 \times 10^6\text{ t}\cdot\text{an}^{-1}$ la $25\text{-}30 \times 10^6\text{ t}\cdot\text{an}^{-1}$.

1.3. Delta Dunării – un sistem deltaic complex

La vărsarea în mare, Dunărea a construit pe o suprafață de $5\,800\text{ km}^2$, una din cele mai importante delte ale Europei, **Delta Dunării**, desemnată patrimoniu UNESCO și rezervație a biosferei. Poziția sa geografică este dată de coordonatele $44^{\circ}25'$ și $45^{\circ}30'$ latitudine N și $28^{\circ}45'$ și $29^{\circ}46'$ longitudine E, fiind situată la contactul dintre fluviu și mare este considerată „zonă de tampon” pentru sistemul fluviu-deltă-mare Dunăre – Delta Dunării – Marea Neagră.

Delta Dunării este situată în unitatea geologică a Depresiunii Pre-Dobrogene, la marginea Platformei Scitice limita între orogenul nord-dobrogean și teritoriul ocupat de deltă fiind dată de zona de fractură Sfântu Gheorghe. Delta este situată într-o zonă mobilă a scoarței terestre caracterizată prin subsidență ($1.5\text{-}1.8\text{ mm/an}$) și acumulări de sedimente (Panin, 1999). Depozitele sedimentare cu grosimi de 300-400 metri (Liteanu și Pricăjan, 1963) s-au acumulat în timpul Cuaternarului când Dunărea a ajuns la Marea Neagră (Panin, 2003). Construcția deltei Dunării actuale s-a făcut în cursul Pleistocenului Superior și în Holocen, în cursul mai multor

faze de progradare și regresivitate, caracterizate prin formarea unor lobi succesivi (Panin, 1989). În timpul Cuaternarului, variațiile de nivel ale Mării Negre au influențat evoluția deltei.

Campia deltaică începe la prima bifurcare a Dunării (la Ceatal Izmail) situată la 83.8 kilometri de gura de vărsare. La Ceatal Izmail, Dunărea se divide în două brațe, unul nordic, brațul Chilia și celalalt sudic, Tulcea. Acesta din urmă se bifurcă la rândul lui, 17 km spre aval, în două brațe, Sulina și Sfântu Gheorghe:

Brațul Chilia, cel mai important din acest sistem este lung de 117 km și formează frontiera cu Ucraina. La vărsare a construit o deltă secundară cu o suprafață de aproximativ 24 000 hectare.

Brațul Sulina, lung de 71.7 km și prelungit cu încă 8 km în mare, situat în partea centrală este brațul navigabil ca urmare a numeroase lucrări de rectificare din perioada 1868 – 1902 dar și de dragare. Are malurile consolidate pentru a împiedica eroziunea malurilor din cauza navigației navelor maritime.

Brațul Sfântu Gheorghe este brațul meridional al deltei. La vărsare acesta este activ morfo-dinamic și construiește o deltă secundară.

Între principalii distributari, Dunărea și-a creat o rețea de canale principale și secundare, naturale dar și artificiale care permit circulația apei și a sedimentelor dinspre principalele brațe spre depresiunile inter-distributare. Acest sistem de circulație al apei este vital pentru existența și evoluția ecosistemelor deltaice (Driga, 2004).

Evoluția deltei Dunării a fost influențată în ultimele secole de activitățile antropice intensive la care a fost supusă. Acest factor a devenit determinant pentru transportul debitelor de apă și sedimente dinspre amonte. Amenajările importante au început o dată cu înființarea Comisiei Europene a Dunării la Galați, în anul 1856. La începutul secolului XX, Autoritatea Română pentru Pescuit a început lucrări de regularizare a canalelor din deltă cu scopul de a îmbunătăți navigația în interiorul deltei. Toate aceste intervenții antropice au avut influențe asupra regimului de curgere al Dunării, asupra balanței sedimentare din zona litorală din fața deltei între Sulina și Sf. Gheorghe (Stanică și Panin, 2009) dar și asupra morfologiei șelfului din partea de NV a Mării Negre.

1.4. Brațul Sulina

Brațul Sulina, obiectul acestui studiu, reprezintă distributarul central al Dunării în interiorul deltei. Este singurul braț canalizat, de unde provine și numele de Canalul Sulina; este folosit pentru navigația maritimă și comercială, făcând legătura între bazinul Dunării și Marea Neagră. Parcursul său este rezultatul unei evoluții complexe, realizată pe etape cronologice și pe fundamente sedimentologice diferite.

Până în anul 1857 actualul canal Sulina s-a aflat în stare naturală. Vechiul braț avea un aspect sinuos, lung de 83 km, cu lățimi ce variau între 120 și 250 m iar cu adâncimile talvegului între 2.5 și 9 m sub nivelul local de etiaj al apei (Bondar și Papadopol, 1972; Bondar și Panin, 2000). Lucrările hidrotehnice au determinat adâncirea în timp a canalului de la mai puțin de 2.5 m în anul 1857 la cel puțin 9.5 m în anul 1959. Scurtarea și adâncirea albiei au schimbat total regimul de curgere al Dunării în delta prin creșterea debitului lichid al brațului Sulina.

Între anii 1858 – 1902 au fost executate mai multe rectificări ale meandrelor de pe brațul Sulina printre care cele mai ample lucrări au fost cele de tăiere a celor două meandre cunoscute sub numele de Marele M, care au permis scurtarea fluviului dintre Tulcea și Marea Neagră, și au

usurat foarte mult navigația pe canal prin asigurarea unei lățimi constante a canalului de 80 metri lățime și a unei adâncimi de 24 picioare (7.32 m) (Bondar și Panin, 2000; David, 2010). În urma acestor lucrări de tăiere a meandrelor (Fig. 1), brațul Sulina s-a scurtat cu aproximativ 25% (de la 83.8 km la 71 km); s-a dragat astfel un volum de 24 243 000 m³ (Bondar și Papadopol, 1972).

Lucrările de regularizare ale traseului brațului au constat și în construcția a 167 epiuri submerse și protejarea malurilor cu pereuri de piatră spartă nerostuită, pe o lungime de circa 91.8 km (Bondar și Papadopol, 1972; Panin și Overmars, 2012).

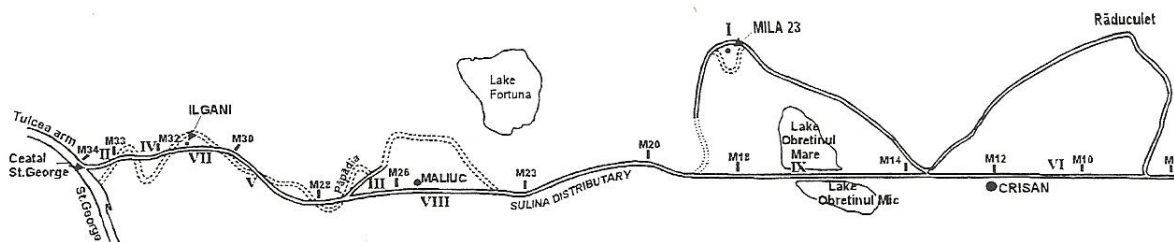


Fig. 1 – Meandrele rectificate ale brațului Sulina în perioada 1968-1992 (Panin, 1999)

Lucrările hidrotehnice de pe brațul Sulina au avut ca prim efect creșterea fluxului lichid de la 7-9% la 16-17% din totalul debitului lichid transportat de Dunăre în 1921 (Almazov et al., 1963) și până la 18-20% în prezent. Toate aceste modificări ale cursului natural al brațului Sulina au modificat condițiile hidrologice și sedimentare producând variații ale distribuției anuale ale debitelor lichide și solide.

PARTEA II – METODE ȘI TEHNICI DE INVESTIGARE A DINAMICII MORFOLOGICE ȘI HIDRO-SEDIMENTARE. GRADUL DE CUNOAȘTERE. DATE SURSĂ

Introducere

Cercetarea geomorfologică fluvială a avut în ultima perioadă o dezvoltare importantă, bazată pe accesul la tehnici de achiziție și prelucrare a datelor tot mai performante. Cartarea batimetrică de tip multifascicul și monofascicul, curentometria acustică (Doppler) și prelevarea de sedimente sunt metode folosite pentru a analiza morfologia albiei și pentru a descrie procesele hidro-sedimentare din domeniul fluvial.

În cercetarea fluvială cele mai utilizate tipuri de metode de investigație sunt: metodele geologice (directe) și metodele geofizice (indirecte). Le-am folosit pe ambele pentru realizarea acestui studiu. În această parte a tezei vom prezenta ce metode și tehnici de lucru am aplicat pentru investigarea proceselor de albie ale brațului Sulina, după care vom prezenta datele măsurate *in-situ* (datele sursă) și modul în care au fost acestea prelucrate. De asemenea, am realizat o sinteză a gradului de cunoaștere din literatura de specialitate pentru a ne plasa studiul într-un context global, științific.

Brațul ales pentru acest studiu este unul extrem de dinamic din punct de vedere al morfologiei, hidrologiei și sedimentologiei datorită rectificării sale, malurilor îndiguite, și mai ales datorită prezenței epiurilor care influențează semnificativ evoluția morfologică a albiei și tranzitul

fluxului sedimentar din amonte spre aval. Astfel, campania de achiziție a datelor din teren a fost o provocare semnificativă și a permis realizarea unui studiu complex și complet, unic până acum în zona deltei Dunării.

2.1. Transferul de sedimente dinspre amonte spre aval

Transferul de sedimente dinspre uscat spre mare a devenit problema cheie pentru determinarea fluxului sedimentar la gurile de vărsare ale fluviilor dar și pentru înțelegerea morfologiei albiilor și a formării structurilor morfologice din zona de interacțiune a gurilor de vărsare cu platformele continentale ale mărilor (Babonneau et al., 2013). Transportul de sedimente semnificativ se produce în general în timpul evenimentelor climatice sau geologice extreme, cum ar fi viituri, cutremure de pământ, furtuni, erupții vulcanice, care produc transportul unor cantități mari de material sedimentar (Korup, 2012).

Însă transportul de sedimente este influențat și de perturbările antropice care apar într-un bazin fluvial. Printre acestea, cele mai importante sunt reprezentate de barajele hidroenergetice și lacurile de acumulare asociate acestora. Un impact asupra tranzitului sedimentar cu importanță semnificativă este produs și de canalizarea unui curs fluvial (așa cum este și cazul brațului Sulina). Modificările fluxului sedimentar se reflectă implicit în morfologia albiei, prin procesele de eroziune sau acumulare din canal (Magilligan și Nislow, 2005; Petts și Gurnell, 2005; Jugaru Tiron et al., 2009).

2.2. Tehnici și sisteme de achiziție acustice de înaltă rezoluție aplicate studiului proceselor fluviale

Încă de la începutul anilor 1990, dezvoltarea tehnologiei de măsurare a batimetriei cu echipamente de tip multibeam a crescut exponențial și a adus un plus semnificativ în descrierea morfologiei albiilor prin calitatea informației măsurate și prin detalii precise oferite de o astfel de tehnică (Urgeles et al. 1997; Locat et al. 1999).

Aplicarea tehnicilor de măsurători multibeam oferă imagini inedite ale culoarelor fluviale și permite caracterizarea în detaliu a proceselor morfologice, hidrologice și dinamice (Urgeles et al. 1997; Huizinga, 2010). Pentru brațul Sulina nu există lucrări publicate în acest domeniu, fapt ce conferă acestui studiu un caracter de noutate.

Utilizarea recentă a curentometrului cu efect Doppler (ADP) pentru măsurarea debitelor și a curenților fluviali a câștigat o deosebită popularitate datorită eficacității și preciziei măsurătorilor pe care le realizează (Muste et al., 2004). Mai multe studii pe fluvii mari cum ar fi Amazonul (Fiziola și Guyot, 2004), Fluviul Galben (Chen et al., 2007), Mississippi (Kim și Muste, 2012), Dunarea (Tiron Duțu et al., 2014) demonstrează eficacitatea aplicării acestei metode în mediul fluvial.

Toate datele achiziționate în timpul măsurătorilor din teren au fost integrate într-o cercetare complexă multidisciplinară (hidrologie, morfologie, sedimentologie) cu scopul de a caracteriza procesele de evoluție și modul de funcționare a unui fost braț natural, intens modificat antropic în ultimii 150 de ani, și pentru a evalua influența acestor lucrări asupra aportului sedimentar către platforma continentală a Mării Negre. Datele achiziționate în campania de teren din Februarie 2007 au oferit o bază suficient de vastă pentru studiul proceselor de albie

din brațul Sulina. Metodele moderne pe care le-am utilizat conferă acestui studiu un caracter de noutate și de unicitate necesar oricărui studiu de specialitate.

PARTEA III – DINAMICA HIDRO-SEDIMENTARĂ ȘI MORFOLOGICĂ A BRAȚULUI SULINA

3.1. Dinamica hidrologică a brațului Sulina

Viteza de deplasare a unui curent de apă este determinată de corelația care se stabilește între forța gravitațională (paralelă cu linia pantei) și forțele de rezistență care se nasc prin frecarea curenților de apă cu pereții canalului de curgere sau cu patul suprafeței peste care se deplasează. Cu cât forța de rezistență formată la contactul curentului cu substratul său este mai mică decât forța gravitațională, cu atât viteza curentului este mai mare (Anastasiu, 2004).

Măsurătorile hidrologice din campania din februarie 2007 arată starea hidrologică a brațului Sulina în perioadă de ape medii spre mari, cu un debit la intrare de $1120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ iar la vărsare de $1331 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (debitul mediu pe brațul Sulina fiind de aproximativ $1248 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Driga, 2004).

Rolul determinant în circulația apei de-a lungul brațului Sulina este reprezentat de canalele adiacente brațului și de breșe ale digurilor, care îl conectează cu zonele depresionare dintre brațele principale ale deltei și transferă debite între acestea, în strânsă relație cu nivelurile apei din amonte. Variațiile nivelurilor la stația hidrometrică Sulina sunt mai reduse tocmai pentru că între Ceatal Sfântu Gheorghe și vărsare brațul Sulina face schimburi de fluxuri lichide și solide cu zonele depresionare dintre brațe, considerate „zone tampon” (Almazov et al., 1963). Aceste schimburi constau în pierderi localizate în prima jumătate din amonte, de la Ceatal până la Gorgova (prin canalele Păpădia, Crișan și multe altele de dimensiuni mai reduse) și acumulări în jumătatea dinspre aval a brațului prin aporturile laterale din bălți (de la Gorgova la Sulina). În plus, mai trebuie luat în considerare și factorul evapo-transpirație prin care cantități de apă sunt pierdute/acumulate de către brațul principal modificând astfel fluxul de apă la vărsare.

În ceea ce privește tipul curgerii apei prin albie, pe majoritatea profilelor curgerea se situează la tranziția dintre curgerea laminară și turbulentă. Curgerea laminară este favorizată de existența malurilor îndiguite care facilitează deplasarea curenților, de lățimea mică a albiei dar și de apropierea de zona de vărsare cu pantă redusă a albiei. Totuși analizând pe trepte de adâncime direcțiile curenților pe profilele transversale, am observat că vectorii nu sunt întotdeauna paraleli cu direcția de curgere ci de multe ori formează unghiuri cu valori între 5° și 30° în funcție de condițiile morfologice locale.

De asemenea, s-a observat că, în multe cazuri, la contactul cu patul albiei există curenți inverși care creează turbioane producând astfel o curgere turbulentă în zona de contact. Aceștia sunt de fapt curenții care mobilizează sedimentele de fund, erodându-le din patul albiei și transportându-le în suspensie saltatorie și târâre. Astfel se formează și formele morfologice specifice (dune, ripple-uri, etc) de care vom vorbi în capitolul dedicat morfologiei albiei.

Un exemplu este cel al profilului de la Mila 33.8 (Fig. 2); curgerea apei păstrează aici o direcție paralelă cu albia la suprafața secțiunii și până la adâncimea de aproximativ 3 m, după care direcția curentului central își modifică sensibil direcția de curgere. Situația devine mai complexă la

contactul cu malurile: spre malul drept se observă cum un epiu situat la 35 m amonte de profil deviază curentul spre peretele lateral al albiei, explicând astfel localizarea adâncimilor mai mari spre malul drept prin eroziunea malului. În apropiere de fundul albiei din malul drept (la adâncimea de 16 - 17 m) este localizat talvegul, cu extindere laterală de aproximativ 11 m; direcția curenților aproape perpendiculară pe mal arată că în această zonă a albiei curenții sunt turbionari iar albia este supusă eroziunii.

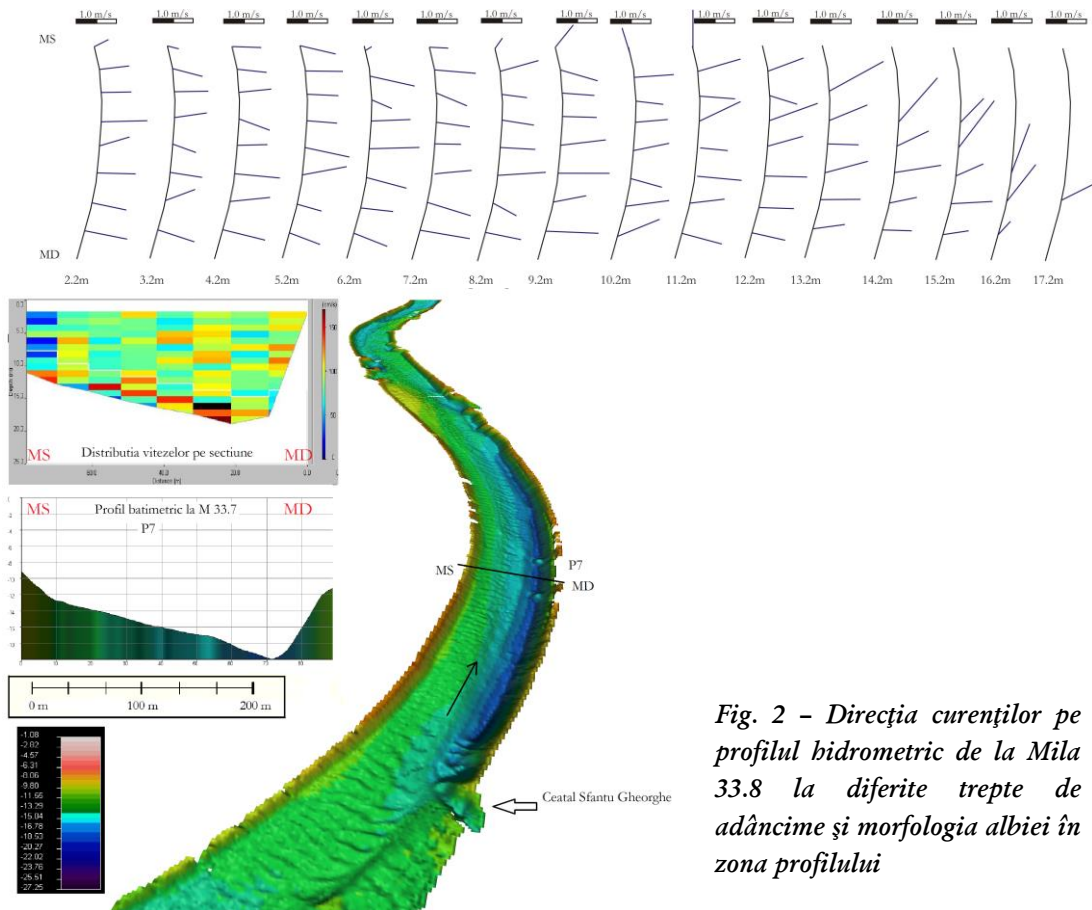


Fig. 2 - Direcția curenților pe profilul hidrometric de la Mila 33.8 la diferite trepte de adâncime și morfologia albiei în zona profilului

Pentru a înțelege procesele dinamice locale, s-au folosit două ecuații considerate indicatori ai capacității de transport fluvial și ai forței de punere în mișcare a particulelor solide: puterea specifică (ω) și forța de tracțiune (τ_0) denumită și tensiunea tangențială de frecare (Bagnold, 1966).

Valorile ω de sub 1 W.m^{-2} confirmă faptul că aceste două canale sunt în curs de sedimentare sau chiar colmatare în viitor. Sunt cele mai mici valori calculate pentru profilele investigate. Secțiunile situate în brațul principal au valori situate între 10.23 și 5.19 W.m^{-2} (Fig. 3). Zona de bifurcare de la Ceatal Sf. Gheorghe se remarcă prin valori ale puterii specifice ridicate (10.23 W.m^{-2}), acolo unde dinamica albiei este foarte activă datorită în primul rând dinamicii specifice bifurcației (viteze și adâncimi mari) dar și lățimii reduse ale albiei. Pe profilele din aval P9 și P10 valorile puterii specifice scad până la aproximativ 6 W.m^{-2} datorită lărgirii albiei care duce la diminuarea vitezei apei. Același fenomen se produce și pe profilele C3A, C3B și P12 (valori ale puterii specifice între 5.19 și 5.53 W.m^{-2}).

Valorile forței de tracțiune urmează aproximativ distribuția valorilor de putere specifică: valori ridicate (între 6.53 și 8.62 N.m^{-2}) pe brațul principal (profilele P9, P10, P11A, P11B, C3A,

C3B, P12 și C2A). Valoarea maximă de $10.41 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ se localizează în zona de bifurcație de la ceatal, pe profilul P7. Cele mai mici valori (între 2.86 și $3.06 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$) se găsesc pe profilele din meandrele tăiate, acolo unde dinamica apei este redusă semnificativ.

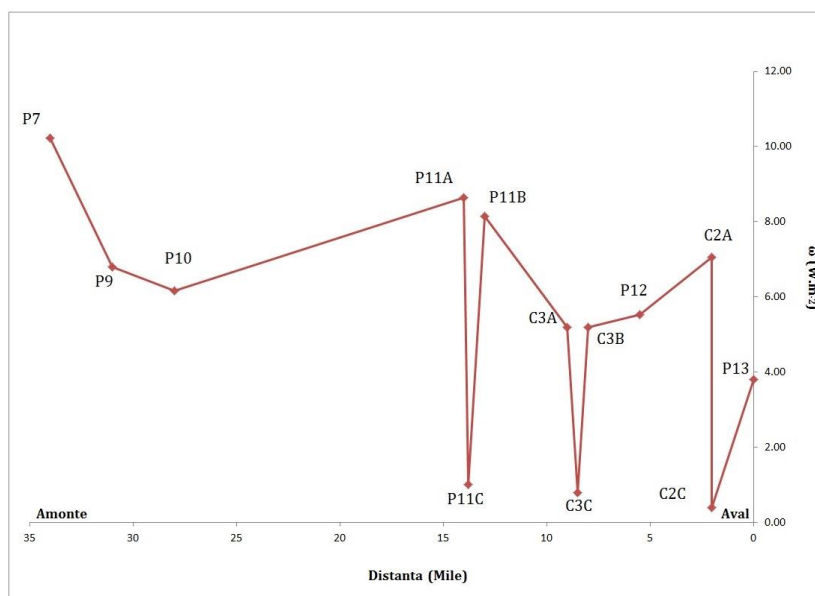


Fig. 3 – Puterea specifică pe profilele investigate pe brațul Sulina

Aceste valori arată că brațul Sulina posedă încă o competență ridicată de transport și eroziune, în special în zona de bifurcație de la Ceatal Sf. Gheorghe și are tendința de diminuare progresivă spre aval, odată cu apropierea de zona de vărsare.

3.2. Procese sedimentare în albia brațului Sulina

Capacitatea de transport solid reprezintă volumul maxim de sedimente care tranzitează un tronson de fluviu într-o unitate de timp (Ramez, 1995). În dinamica albiilor, transportul aluviunilor joacă un rol la fel de important ca eroziunea și acumularea. Mișcarea materialelor din albiu este rezultatul forței exercitate de apa curgătoare asupra patului aluvial. Două variabile sunt fundamentale în activitatea de transport: viteza de curgere și materialul albiei. Mai exact, trebuie apreciate viteza critică (viteza la care curgerea laminară se transformă în curgere turbulentă), forma, dimensiunea și coeziunea materialelor din albiu. Relațiile dintre aceste variabile sunt complexe (Loghin, 2009).

Trei tipuri de transport în cadrul albiilor au fost identificate: în soluție, în suspensie și de fund (bed-load). Cercetările au relevat că există o condiție limită pentru ca particulele din aluviuni să înceapă deplasarea în albie. Această condiție corespunde presiunii critice sau forței de tracțiune critice exercitată de apă asupra albiei.

Pe patul albiei, interacțiunile hidrodinamice (turbulențe) și cele mecanice generează mai multe tipuri de mișcări ale particulelor solide: rostogolire, alunecare și saltație, împreună formând încărcătura de fund (Șerban et al., 1989). Acest tip de transport este cel mai important pentru eroziunea râurilor.

În ceea ce privește *sortarea* sedimentelor prelevate de pe brațul Sulina, am determinat valori între 0.25 și 0.87 încadrându-se astfel în clasele bine și foarte bine sortate. Două probe sunt

situate în afara acestui interval (slab sortate cu valori de 2.28 și 2.47 pe profilele P10 și P11A) și aceasta se explică prin localizarea probelor în zone de contact cu brațe adiacente care aduc sedimente cu granulație diferită, formând astfel mai multe clase granulometrice (ce dau sortare slabă).

Pentru majoritatea sedimentelor prelevate, parametrul D50 este situat în jurul valorii de 0.20 mm ceea ce arată că particulele sunt ușor erodate de curenții acvatici (Inman, 1949).

Diagrama lui Shields (1936) permite delimitarea transportului laminar de transportul turbulent. Numărul lui Shields este folosit pentru a calcula inițierea mișcării unei particule sedimentare într-un fluid.

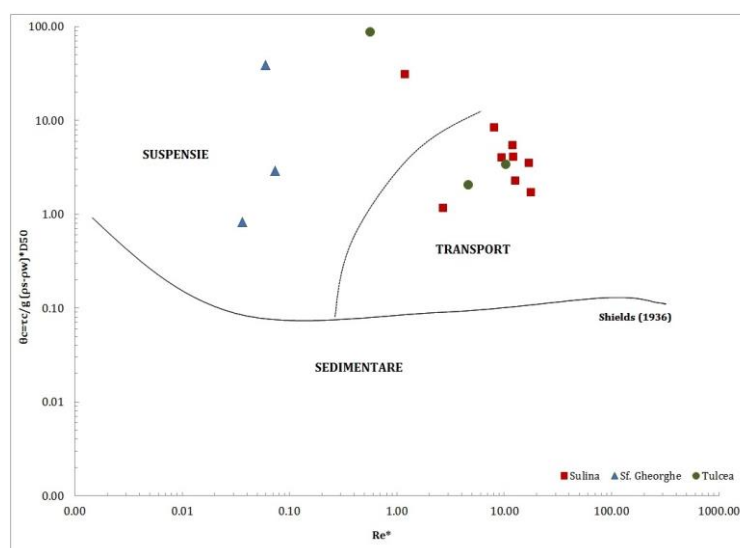


Fig. 4 - Diagrama lui Shields (1936)

Cele mai mici valori ale parametrului Shields se regăsesc în zona nisipurilor (între 0.06-2.00 mm), nisipul fiind suficient de redus ca dimensiune și ca masă dar în același timp prea mare ca să adere pe patul albiei. Diagrama lui Shields confirmă că nisipul este cel mai ușor de erodat. Siltul și argila, în ciuda dimensiunii reduse, necesită o forță de frecare mai mare pentru a fi pus în mișcare. Aderența lor față de albie devine extrem de mare iar consolidate devin destul de greu de erodat. Distribuția punctelor pe graficul din figura 4 permite identificarea modului de transport al sedimentelor la contactul cu albia atât pe brațul Sulina cât și pe cele două profile de la Ceatal Sfântu Gheorghe (pe brațele Tulcea și Sfântu Gheorghe).

La zona de bifurcație de la Ceatal Sfântu Gheorghe parametrul Shields se situează în zona de suspensie pentru toate cele trei probe de pe brațul Sfântu Gheorghe, în timp ce pe brațul Tulcea sedimentele albiei sunt supuse transportului (ce poate fi interpretat și ca eroziune). Excepție face o singură probă (022) care este proiectată în zona de suspensie, însă aceasta este prelevată din patul argilos compact al albiei, unde sedimentele lipsesc datorită forței curențului care le transportă. Este sigur că și în această zonă eroziunea și transportul sunt procesele dominante. Pentru brațul Sulina în aval de bifurcație se constată că majoritatea profilelor investigate sunt proiectate pe diagrama Shields în zona de transport (eroziune). Excepție face proba 029 de pe profilul P11A care datorită predominării materialului fin (silt) este situată în zona de suspensie. Însă, această probă este de fapt prelevată din patul albiei, ceea ce înseamnă că în zona respectivă nu existau sedimente depuse, indicând astfel procese locale de transport și

eroziune. Toate secțiunile investigate prin această metodă arată ca brațul Sulina este caracterizat prin procese de transport și eroziune a patului albiei iar condițiile critice de transport sunt încă posibile pe toată lungimea brațului.

Aceste rezultate au fost comparate cu cele care au rezultat din aplicarea altei formule de transport fluvial, și anume diagrama lui Hulstrom.

Diagrama Hjulström (1935) arată că între dimensiunea particulelor și viteza curentului nu se stabilește o relație liniară. Această curbă arată că viteza critică cea mai redusă are loc pentru nisipuri bine sortate de 0.2 până la 0.5 mm în timp ce viteze critice mai mari sunt necesare pentru pietriș și argile coezive (Grecu și Palmentola, 2003). Diagrama Hjulström arată că după inițierea deplasării particulelor, acțiunea de transport continuă și la viteze mai mici decât viteza minimă de eroziune. În momentul în care viteza curentului devine inferioară vitezei de sedimentare, deplasarea particulelor încetează, procesul dominant fiind sedimentarea.

Pe această diagramă (Fig. 6) toate eșantioanele prelevate atât pe brațul Sulina cât și pe cele două profile de la Cetal Sf. Gheorghe se situează în zona de transport potențial, câteva probe fiind aproape de limita de transport în suspensie (probe situate pe profilul P9). Aproape de zona de sedimentare se află probele prelevate în zona meandrelor Marele M pe profilul P11B). Această diagramă arată că albia brațului Sulina are capacitate de eroziune, încărcătura sedimentară putând fi realimentată prin eroziunea patului albiei.

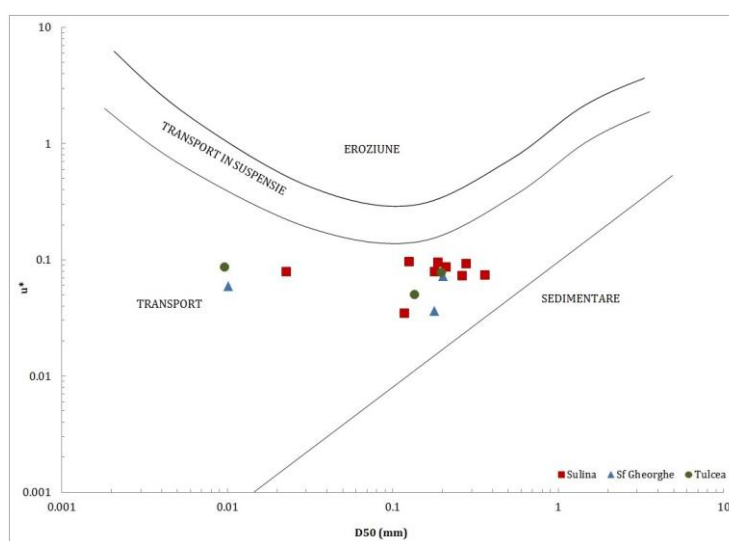


Fig. 6 – Proiecția punctelor pe diagrama Hjulström

Aceste rezultate confirmă cele arătate de diagrama lui Shields și anume că brațul Sulina are o dinamică sedimentară activă și că are capacitatea de a alimenta încărcătura sedimentară în suspensie prin eroziunea albiei.

Diagramele Shields și Hjulstrom au devenit baza de referință în precizarea condițiilor de eroziune a unui curs de apă. Rezultatele pentru brațul Sulina au arătat că sedimentele prelevate provin fie din eroziunea albiei, fie din sedimente stabilizate, transportate anterior de către curent. Compararea acestor rezultate obținute prin două metode de evaluare a condițiilor critice de transport duc la concluzii coerente în ceea ce privește repartitia spațială a dinamicii brațului Sulina.

Debitul sedimentelor în suspensie a fost estimat prin intermediul unei formule uzuale descrise în literatură (Carvalho et al., 2000), care se bazează pe corelarea concentrației în suspensii cu viteza apei și aria secțiunii (debitul).

Concentrațiile de sedimente în suspensie măsurate pe secțiunile investigate au valori între 35 și 57 mg.l⁻¹ și sunt destul de reduse în comparație cu valori de același tip ale altor fluvii mari ale lumii: pentru Mekong (Tailanda) s-au înregistrat valori medii de 962 mg.l⁻¹, pentru Mississippi (SUA) 849 mg.l⁻¹, și chiar 8240 mg.l⁻¹ pentru Rio Grande (SUA) (Meybeck et al., 2003).

Brațul Sulina preia la zona de bifurcație de la Ceatal Sf. Gheorghe un debit sedimentar în suspensie de aproximativ 51.05 kg.s⁻¹ (≈ 39%). Acesta se mărește până la vărsare cu 19.47 kg.s⁻¹ prin eroziunea patului albiei sau a malurilor neconsolidate dar și din alimentarea cu sedimente din canalele adiacente. Debitul sedimentar în suspensie evoluează liniar din amonte spre aval: de la zona de bifurcație de la Ceatal Sf. Gheorghe până în zona Milei 14 (la mijlocul meandrului Marele M) se produce o mărire progresivă de la 51.05 kg.s⁻¹ la 68.3 kg.s⁻¹, urmând ca la vărsare debitul sedimentar în suspensie să crească sensibil până la 70.52 kg.s⁻¹. Aceste valori arată că în jumătatea din amonte a brațului există zone de eroziune care ajută la realimentarea cu sedimente din propria albie (confirmate de altfel și de valorile mari ale puterii specifice și ale forței de tracțiune), în timp ce spre aval, chiar dacă există încă eroziune, dinamica hidro-sedimentară este mai redusă o dată cu apropierea de zona de vărsare (datorită diminuării pantei, lățimii mai mari a albiei, etc).

În ceea ce privește fluxul de sedimente în suspensie la gura de vărsare, volumul de sedimente în suspensie transportat de către brațul Sulina spre platforma continentală a Mării Negre este de 0.0061×10^6 t/zi pentru un debit de apă corespondent de aproximativ 1330 m³.s⁻¹.

Valorile pe care le-am calculat pentru campania din februarie 2007 de 0.004×10^6 t/zi la intrarea pe braț și 0.0061×10^6 t/zi la vărsare sunt semnificativ inferioare celor existente în literatură. Diferențele dintre estimări sunt importante și constau fie în metodele de calcul aplicate și erorile asociate acestora, fie faptului că ceilalți autori au estimat debitul sedimentar în suspensie pentru perioade foarte îndelungate (de peste 35 de ani) și au cuprins perioade hidrologice extrem de variate în timp ce calculele noastre reprezintă valori de flux sedimentar instantaneu, la un singur moment dat, cel al măsurătorii efective la debite medii spre mari.

3.3. Morfologia brațului Sulina

Profilul longitudinal. Profilele longitudinale ale fluviilor au fost investigate de mai mulți autori, atât pentru a înțelege evoluția lor cât și pentru a prezice dezvoltarea lor ulterioară din punct de vedere morfologic, hidrologic și hidraulic (Morris și Williams, 1999; Rădoane et al., 2003).

Pentru zona noastră de studiu, măsurătorile de multibeam au permis realizarea profilului longitudinal la o rezoluție foarte ridicată și identificarea celor mai detaliate forme morfologice din albie. Nu vom putea discuta despre un profil longitudinal ideal deoarece este doar pentru un sector de fluviu. În plus, există limitări în interpretarea lui datorită faptului că de-a lungul brațului intervenția antropică este permanentă. Dragajele materialului sedimentar din albie și prezența epiurilor aduc modificări importante în evoluția profilului longitudinal, identificate pe figura 6. Zonele de eroziune alternează cu cele de acumulare pe toată lungimea canalului. Cele mai mari adâncimi sunt cele de la M19 suprapuse unei zone de excavare a nisipurilor din albie.

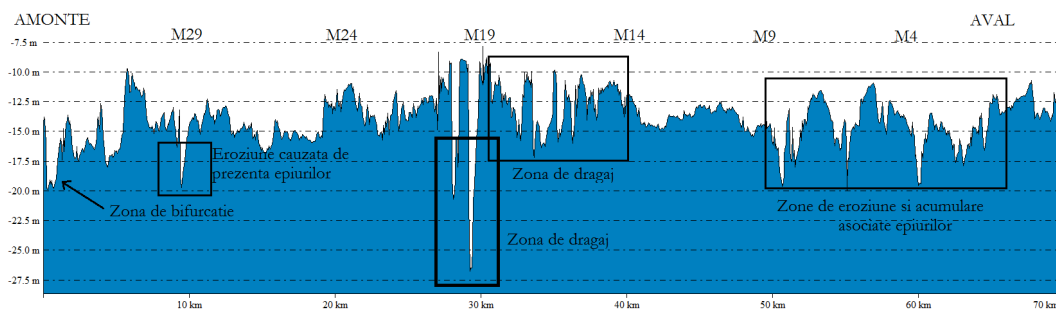


Fig. 6 – Profilul longitudinal al brațului Sulina din amonte spre aval

În aceste condiții este practic imposibil ca acest braț să atingă starea de echilibru dinamic deoarece încercarea sa permanentă de a o restabili (chiar și în condițiile impuse de prezența digurilor și a epiurilor) este perturbată de dragajele din albie. Acestea au impact asupra pantei iar balanța este dezechilibrată cu fiecare intervenție antropică realizată la nivelul albiei.

Influența curentului asupra morfologiei albiei. Formele de fund sunt rezultatul interacțiunii dintre curent, transportul de sedimente și morfologia albiei (Syvitski et al., 2005). Există multe studii în literatură despre predicția formelor de fund ale albiilor (Carling et al., 2000; Chen et al., 2012).

Migrarea sedimentelor din patul albiei determină apariția unor forme de relief pozitive (ondulații de curent) și la structuri specifice (laminații oblice). Ondulațiile de curent creează un grad mai mare de rugozitate a patului albiei, opunând o rezistență mai mare stresului creat de acțiune curentului (Chen et al., 2012).

Ashley (1990) arată că ripple-urile au înălțimi până la câțiva centimetri iar dunele sunt forme de fund cu lungimi mai mari de 1 m; însă această clasificare se pare că depinde de fiecare sistem fluvial. Mega ripple-urile sunt definite ca forme de fund cu lungimi similare adâncimii apei. Adâncimea apei pe brațul Sulina se situează între 13 și 27 m, deci vom adopta și noi această clasificare și vom defini mega ripple-uri formele cu $L < 20$ m și $H < 1$ m. Dunele cu dimensiuni mici vor fi clasificate ca având lungimi de până la câteva zeci de metri (chiar și sute de metri) și înălțimi de câțiva decimetri până la 1.5 m. Iar în final, dunele de dimensiuni mari sunt dunele cu lungimi de sute de metri și înălțimi de peste 1.5 m. Mai mult, forme de fund suprapuse se întâlnesc destul de des, mega ripple-uri sunt de multe ori suprapuse pe dunele mici și mari.

Ripple-uri au fost măsurate în zonele de interfață apă-sediment din zona malurilor submerse, acolo unde viteza apei este redusă. De asemenea, ripple-uri de dimensiuni reduse ($H < 0.04$ m și $L < 0.5$ m) au fost identificate ca fiind suprapuse pe dunele de mici dimensiuni ca forme secundare în zona milelor 4 și 2. Ripple-uri nu au fost găsite pe dunele de dimensiuni mari unde sedimentele sunt mai grosiere (D_{50} mai mare de 0.25 mm). În general aceste forme de fund au lungimi de până la 0.6 m și înălțimi de 0.01 – 0.06 m.

Mega-ripple-uri au fost identificate pe toată lungimea brațului Sulina. Ele reprezintă cea mai des întâlnită formă de fund. Au fost măsurate sistematic pe parcursul brațului, fie pe tronsoane unde au fost identificate ca forme de fund primare, fie sub formă de forme de fund secundare situate la suprafața dunelor de dimensiuni mici și mari (Fig. 7). Dimensiunile lor variază între $1 < L > 25$ m și $0.5 < H > 1$ m.

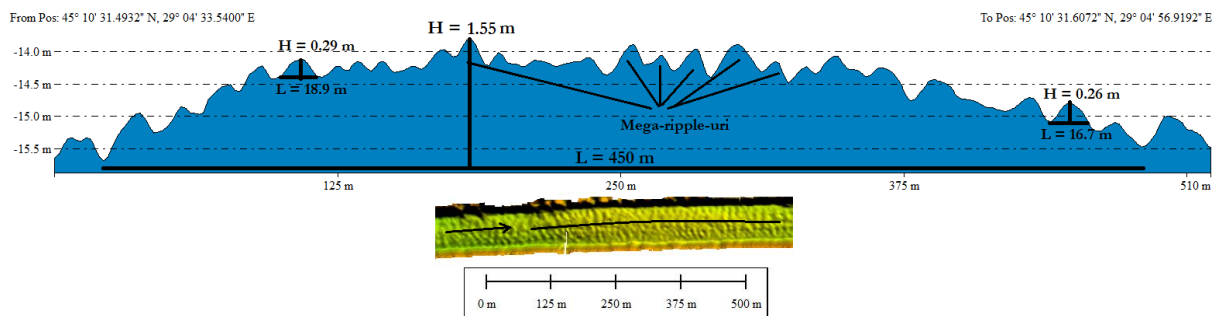


Fig. 7 – Mega-ripple-uri formate la suprafața unei dune de dimensiuni mici în zona de amonte a milei 25

Dune de dimensiuni mici. Succesiuni de dune mici cu înălțimi de câțiva decimetri și lungimi de până la aproximativ 400 sute de metri am identificat în mai multe zone ale brațului Sulina (ex. M 31.5, 25, 8, etc). De multe ori acestea sunt separate de zone de aceleași dimensiuni cu fund plat. Lungimile și înălțimile dunelor mici se situează între valorile de înălțime de $1 < H > 1.5$ m și între valorile de lungime de $25 < L > 400$ m (Fig. 7).

Dune de dimensiuni mari există în lungul brațului Sulina însă nu sunt numeroase. Cele mai ample dune măsurate au $L < 1450$ m și $H < 5$ m (Fig. 8). Dune de dimensiuni mari s-au identificat la milele 33, 32, 29, 21. La suprafața fiecărei dune mari există forme secundare de fund de tip mega-ripple.

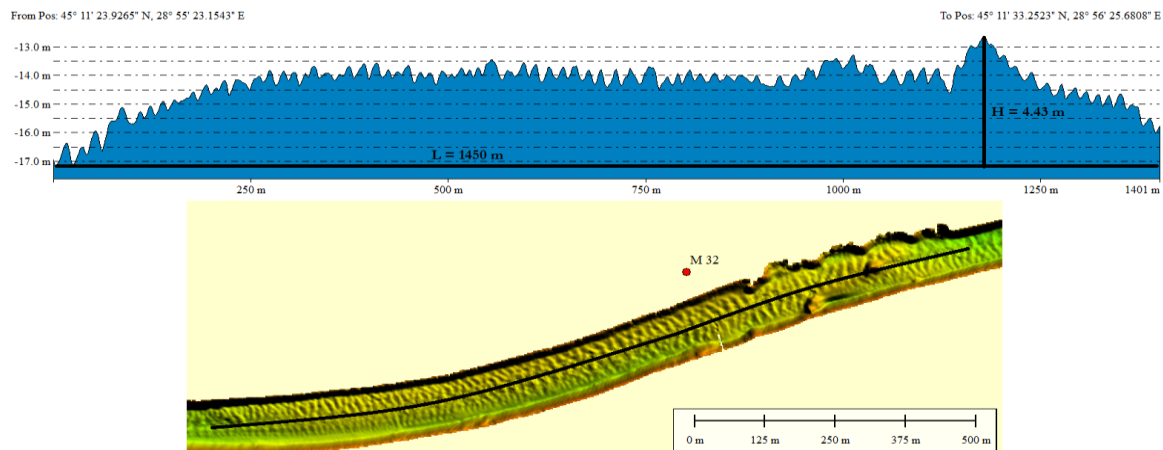


Fig. 8 – Dună de dimensiune mare în zona milei 32

Pentru a evalua gradul de maturitate al formelor de fund am aplicat ecuația propusă de Flemming (1988) care presupune existența unui echilibru geometric între L și H prin faptul că dunele în mediu natural se apropie de o limită a maximumului de înălțime pentru o lungime dată, printr-o funcție empirică:

$$H_{max} = 0.16 \cdot L^{0.84}$$

Ecuația reprezintă un interval al gradului de înclinare maximă a formelor de fund între 0.08 și 0.1. Dunele cu $H/L < 0.06$ sunt în non-echilibru sau reprezintă forme în curs de remodelare.

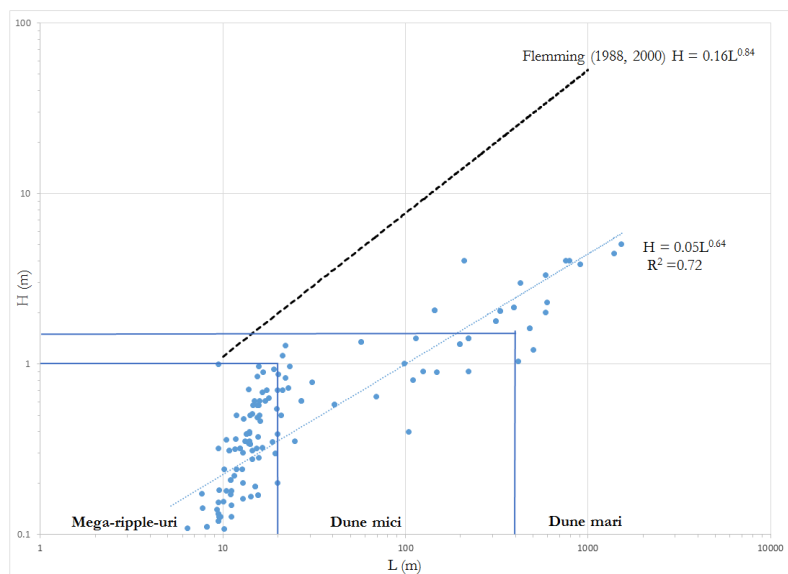


Fig. 9 – Corelarea dintre înălțimea și lungimea formelor de fund măsurate de-a lungul brațului Sulina comparativ cu linia de înălțime maximă a lui Flemming (1988)

Am estimat corelarea dintre acești doi parametri (L și H) în cazul formelor de fund de pe brațul Sulina prin măsurarea a peste 150 de forme de fund de toate categoriile din albie. Graficul din figura 11 arată că pentru brațul Sulina înălțimea maximă a formelor de fund este plasată la limita maximă de $H = 0.05L^{0.64}$. Această ecuație a fost obținută cu un coeficient de variație de $R^2 = 0.72$ (Fig. 9). În figura 3.34 se poate observa că majoritatea punctelor sunt destul de bine corelate. Toate formele de fund măsurate sunt situate sub linia de referință a lui Flemming (1988, 2000), însă mega-ripple-urile mai înalte și câteva dintre dunele mici sunt destul de aproape de linia de maxim. Valorile H/L sunt pentru toate cazurile situate sub valoarea de 0.06 (între 0.002 și 0.06) ceea ce arată că toate formele măsurate în albia brațului Sulina nu sunt în echilibru. Ele reprezintă forme de fund dezvoltate și ajunse la maturitate în timpul unor condiții hidrologice anterioare iar în momentul măsurării sunt în curs de remodelare.

În ceea ce privește **granulometria formelor de fund**, acestea au fost reproduse experimental în condiții de laborator, dovedindu-se că aspectul și dimensiunile lor sunt influențate nu numai de viteza curentului care este factorul fundamental, dar și de granulometria sedimentelor (Southard, 1975) (Fig. 10).

Carling et al., (2000) arată că pe fluviul Rin dunele sunt formate din nisip mediu și mare, bine sortat ($D_{50} = 0.81 - 0.96$ mm) iar ripple-urile se dezvoltă în fracții mai fine (cu diametrul median între 0.5 și 0.7 mm).

Pe diagrama propusă de Southard (1975), brațul Sulina ocupă un domeniu destul de extins și variat: micro-forme de tip ripple-uri, dune și pat plat superior. Am arătat deja mai sus că majoritatea formelor de fund de pe brațul Sulina se situează la tranziția dintre ripple-uri și dune așa încât am delimitat cele două forme intermediare folosite în literatura și pentru alte fluviu: mega-ripple-uri și dune de dimensiuni mici. Pe brațul Sulina toate formele din albie sunt formate pe nisipuri foarte fine, fine și medii, cu D_{50} între 0.06 și 0.35 mm.

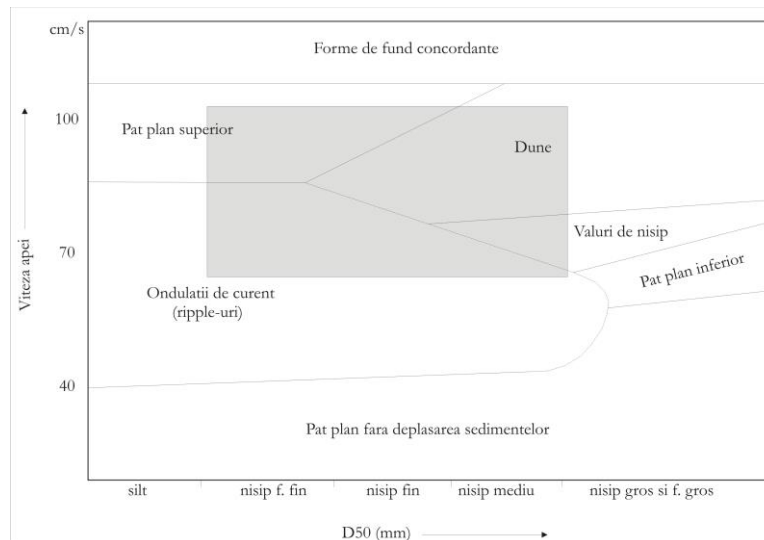


Fig. 10 - Diagrama schematică a formelor de fund existente în funcție de viteza curgerii și granulometria sedimentelor din patul albiei (cu gri este domeniul în care se încadrează brațul Sulina) (după Southard, 1975)

Epiurile și formele morfologice create de acestea albie. Epiurile, sunt construcții de regularizare așezate transversal în albie. Forma secțiunii transversale a unui epiu este în general un trapez. Epiurile se construiesc pentru a modifica condițiile de curgere a apei și dinamica sedimentelor în albie. De-a lungul brațului Sulina s-au construit în perioada 1858 -1902 un număr de 167 epiuri. În funcție de poziționarea lor în albie, pe brațul Sulina epiurile au modificat tranzitul sedimentar local în mod diferit iar în multe cazuri scopul amplasării lor nu a fost îndeplinit. Am identificat două tipuri de situații: eroziune localizată în jurul epiurilor și acumulări sedimentare în spațiile dintre epiuri. Ambele situații vor fi analizate și exemplificate mai jos.

Eroziune localizată în zona epiurilor. Această situație este destul de des identificată pe hărțile batimetrice ale brațului Sulina. În multe cazuri, zonele cu epiuri în jurul cărora s-a produs eroziunea albiei sunt suprapuse pe sinuoziții ale albiei iar condițiile morfologice locale au diminuat, anulat sau chiar inversat scopul poziționării epiurilor. În general materialul sedimentar erodat se localizează acumulat în imediata apropiere spre aval sub formă de dune de dimensiuni mici sau mari. De multe ori există înlănțuirii de sectoare de eroziune și acumulare a sedimentelor. Astfel de zone au fost identificate pe hărțile batimetrice 3D în apropierea milelor 34, 33, 29, 29.8, 27, 22, 21, 7, 5 și 4.5 suprapuse pe zone sinuoase ale brațului.

Un exemplu este cel din zona de bifurcație de la Ceatal Sfântu Gheorghe. Aici epiurile situate în malul drept (pe zona de concavitate a sinuoziității) nu au diminuat tendința de eroziune specifică unui mal concav (Fig. 11). Sedimentele erodate din albie s-au acumulat înspre aval pe malul opus sub forma unei dune cu lungime de aproximativ 350 m și înălțime de 2.8 m.

Este posibil ca această dună să fie alimentată și de sedimentele erodate local, dintre epiurile de pe malul drept. Forma ei asimetrică arată că se deplasează spre aval până la primul obstacol din albie care este un epiu situat la M 33+470 m. Spre aval, în zona malului stâng se localizează o nouă zonă de eroziune între două epiuri succesive. Aici eroziunea a creat o formă morfologică circulară (datorită curenților turbionari) iar adâncimea maximă în zona erodată este de 20 m față de adâncimea din centrul canalului, de aproximativ 13.3 – 14 m). Sedimentele erodate sunt depozitate imediat înspre aval sub forma unei dune localizată în zona centrală a canalului. Se creează astfel o succesiune de zone de eroziune-acumulare dar din păcate fără a se

produce efectul dorit în albie în urma instalării epiurilor, cel de a devia curentul spre centrul canalului, prin sedimentarea zonelor dintre epiuri.

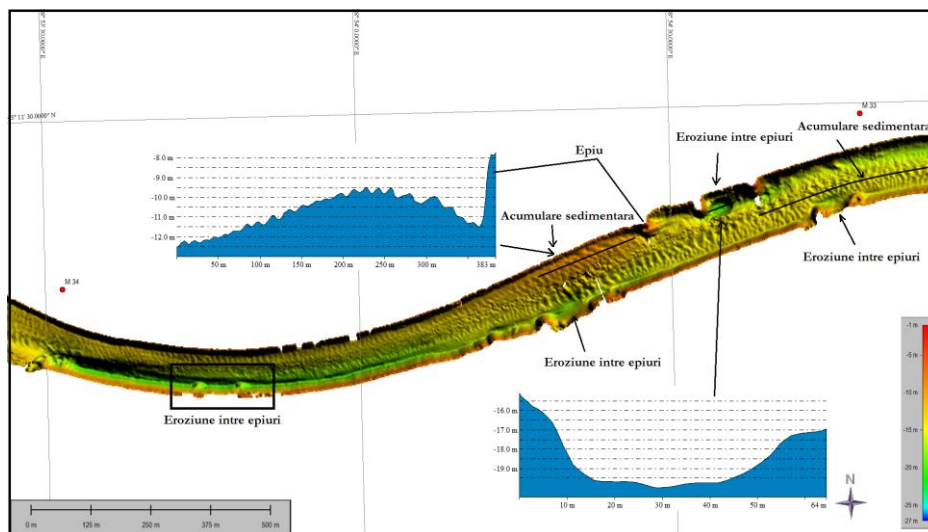


Fig. 11 – Zone de eroziune localizate între epiuri în zona dintre milele 34 și 33

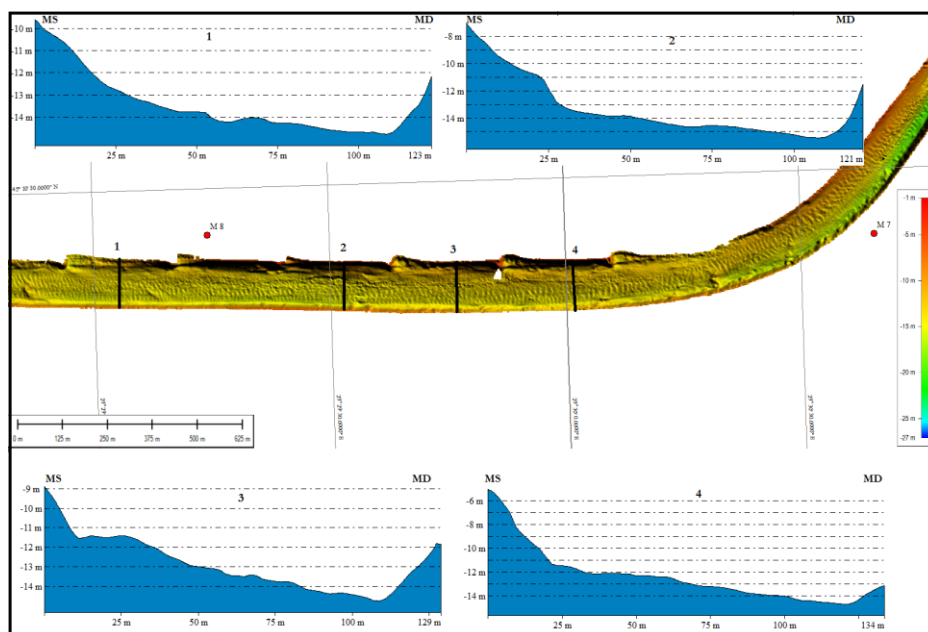


Fig. 12 – Zone de acumulări sedimentare localizate între epiurile dintre milele 8 și 7

Acumulări sedimentare localizate în zona epiurilor. De-a lungul brațului Sulina s-au identificat numeroase sectoare în care epiurile au atins scopul propus. Exemple sunt cele din zona milelor 20, 14, 8 (Anexele 5, 7, 9) unde se pot observa acumulări sedimentare în spațiul dintre epiuri (Fig. 12). În figura 14 am extras din harta batimetrică un sector din zona milei 8. Pe profilele transversale ale albiei se observă că depunerile sedimentare sunt localizate în zona malului stâng, în zonele dintre epiuri.

Concluzii generale

Bazinul Dunării a fost supus în ultimele secole mai multor factori de natură naturală sau antropică care i-au modificat evoluția. Se încadrează astfel în contextul general al reducerii globale ale fluxurilor lichide și solide ce caracterizează majoritatea fluviilor europene.

Zona de deltă a fost de asemenea supusă numeroaselor constrângeri locale dar și globale, naturale dar și antropice. Fiind o axă economică importantă în Europa, la nivelul bazinului de receptie, fluviul a fost supus unor importante transformări care au influențat pe termen mediu și lung (de multe ori la un nivel neașteptat de mare) întregul său parcurs spre aval.

Toate amenajările realizate pe Dunăre (amenajări hidro-energetice, îndiguiri, dragaje și rectificări de meandre) au perturbat modul de funcționare hidro-sedimentar natural al fluviului. Înainte de amenajări, Dunărea tranzita un volum impresionant de apă și sedimente; acest regim natural s-a modificat treptat în scopuri economice ale țărilor riverane producând artificializarea progresivă a Dunării.

La scară locală, amenajările succesive din cadrul deltei încă din perioada 1868 – 1902 (rectificările meandrelor brațelor Sulina, construcția de diguri și canale) au determinat variații ale fluxurilor lichide și solide și reajustări locale ale morfologiei albiei, cu efecte importante asupra dinamicii hidro-sedimentare locale dar și asupra platformei continentale din partea de NV a Mării Negre ca receptor final.

În ceea ce privește brațul Sulina, la Ceatal Sfântu Gheorghe, dinamica hidrologică este accelerată datorită îngustării artificiale a albiei și a valorii mari a unghiului de divisiune de la bifurcație. Vitezele apei sunt mari și datorită faptului că nu pot eroda malurile îndiguite, se concentrează asupra patului albiei, rămas natural. Spre aval, în funcție de tipologia malurilor (îndiguite sau naturale), de traiectoria canalului și de fundamentul albiei, procesele hidrologice evoluează diferit. Curentul principal este concentrat în zona centrală pe majoritatea profilelor transversale realizate a profilelor urmărind linia celor mai mari adâncimi.

La intrarea pe brațul Sulina debitul măsurat a reprezentat aproximativ 39% din debitul brațului Tulcea. Această valoare este caracteristică perioadelor de ape medii spre mari. Date mai vechi arată că brațul Sulina tranzitează o cantitate variabilă de apă în funcție de nivelul apei din amonte (între 30 și 55% din debitul brațului Tulcea la Ceatal Sfântu Gheorghe).

În ceea ce privește evoluția debitelor de-a lungul brațului, fluxul lichid dinspre amonte spre aval a crescut pe durata măsurărilor atât datorită creșterii nivelului de la stația hidrometrică din amonte (Tulcea) dar și datorită unor aporturi dinspre canalele ce fac legătura cu depresiunile inter-distributare. În același timp am observat și schimburi în sens invers, dinspre canalele adiacente spre braț. Am arătat că este destul de dificil să cuantificăm cantitățile de apă care sunt implicate în aceste schimburi deoarece ele sunt permanente și de multe ori în ambele direcții (dinspre brațul Sulina sau spre brațul Sulina).

La vărsare dinamica hidrologică este modificată de pătrunderea penei de apă sarată din Marea Neagră uneori și până la distanțe de 17 km spre amonte (Bondar et al., 2011). Interacțiunea dintre curenții marini și cei fluviali produc modificări hidrologice locale prin diminuarea vitezelor. Se modifică astfel și debitele prin aportul de apă de mare pe braț. Bilanțul hidrologic în timpul măsurărilor a fost pozitiv ($IN < OUT$).

Rezultatele estimării capacității și competenței canalului în secțiunile transversale investigate încadrează brațul Sulina în tipologia sistemelor fluviale specifice zonei de deltă,

caracterizate prin diminuarea energiei fluviale și a capacității de transport datorită apropierii de zona de vărsare, dar care încă posedă potențial dinamic semnificativ. Zona cea mai dinamică este cea de la bifurcație (valori ale puterii specifice situate între 10.23 și 5.19 W.m⁻², iar forța de tracțiune 10.41 N.m⁻²); spre aval energia fluvială scade (la aproximativ 5 - 6 W.m⁻²) datorită măririi secțiunii de curgere și diminuării vitezei apei. Canalele vechiului meandru activ „Marele M” sunt caracterizate prin diminuarea semnificativă a energiei fluviale și a forței de tracțiune (sub 1 W.m⁻² și respectiv între 2.86 și 3.06 N.m⁻²); dinamica acestor canale este semnificativ diminuată.

Analiza sedimentelor brațului Sulina a permis conturarea unor concluzii importante în ceea ce privește dinamica sedimentară actuală a acestui distributar al Dunării. Sedimentele prelevate din patul albiei sunt încadrate în clasele granulometrice de nisip foarte fin, fin și mediu, bine sortate, cu rare intercalații de sedimente fine. Variabilitatea granulometrică poate fi interpretată ținând cont de complexitatea morfo-hidrologică a sistemului studiat. În funcție de condițiile geomorfologice locale sedimentele sunt omogene sau amestecate, variații locale pot fi cauzate de aporturile sedimentare cu granulație foarte fină dinspre canalele laterale ale brațului sau din dragajele din albie. Din aceleași cauze, în evoluția granulometriei dinspre amonte spre aval nu s-a putut stabili o tendință semnificativă de diminuare a dimensiunii sedimentelor din amonte spre aval. De-a lungul albiei, s-au identificat zone unde transportul aluviunilor din încărcătura de fund se face direct pe patul albiei format din argile compacte, sub forma unei pelicule de câțiva centimetri de nisip. Aceste sedimente nu sunt vechi, consolidate, ci reprezintă cu siguranță ultima depunere sedimentară a brațului.

Metodele de cercetare aplicate au permis identificarea modului de transport al sedimentelor la interfața apă sediment atât pe brațul Sulina cât și pe cele două profile de la Ceatal Sfântu Gheorghe (pe brațele Tulcea și Sfântu Gheorghe). S-a evidențiat că sedimentele se află în zona de transport potențial (ce poate fi interpretată și ca eroziune). Se pare că albia brațului Sulina are capacitate de eroziune, încărcătura sedimentară putând fi realimentată prin eroziunea patului albiei.

Estimările de flux sedimentar în suspensie la gura de vărsare pentru un debit de apă de aproximativ 1330 m³.s⁻¹ din timpul măsurătorilor, arată că volumul de sedimente în suspensie transportat de către brațul Sulina spre platforma continentală a Mării Negre a fost de 0.0061×10⁶ t/zi. Această valoare este inferioară estimărilor anterioare (Panin și Jipa, 2002, Panin, 2003).

Batimetria de tip multifascicol a permis evidențierea unor forme morfologice ale albiei dificil sau chiar imposibil de identificat pe hărțile batimetrice clasice și identificarea mai multor concluzii referitoare la caracteristicile morfologiei albiei brațului Sulina. Acest tip de investigație a reprodus fidel forma albiei brațului Sulina la momentul măsurătorilor, în luna februarie 2007, în condiții hidrologice de ape medii spre mari.

Profilul longitudinal al albiei arată că brațul Sulina nu este în echilibru dinamic; încercarea sa permanentă de a restabili starea de echilibru este modificată de activitatea antropică actuală din albie (în special de dragaje, excavații de nisip dar și de traficul naval). Acestea se suprapun peste modificările de peste un secol ale albiei (rectificări de meandre, îndiguirea malurilor, construirea epiurilor) care au impact asupra pantei iar echilibrul este dificil de realizat.

Construite de mai bine de un secol, epiurile încă au impact asupra morfologiei albiei brațului Sulina: chiar dacă scopul construirii lor a fost cel de a îmbunătăți condițiile de navigație prin modificări ale zonelor de depozitare a sedimentelor în albie și astfel reglarea „naturală” a adâncimilor pe șenal, se pare că în unele zone prezența lor a produs modificări ale morfologiei

albiei nefavorabile iar scopul amplasării lor nu a fost în multe cazuri îndeplinit. În funcție de poziționarea epiurilor în albie s-a modificat tranzitul sedimentar; s-au identificat două tipuri de situații: eroziune localizată în jurul epiurilor și acumulări sedimentare în spațiile dintre epiuri. S-a observat că în primul caz, al eroziunii localizate în jurul epiurilor cea mai mare problemă o constituie materialul erodat care este depus sub formă de dune de dimensiuni mici și mari, localizate de cele mai multe ori în zona centrală a canalului înspre aval, ceea ce duce fără îndoială la dificultăți de navigație.

Aplicarea ecuației propuse de Flemming (1988) care presupune existența unui echilibru geometric între lungimea și înălțimea unei dune a demonstrat că formele de fund măsurate în albia brațului Sulina nu erau în echilibru dinamic. Ele reprezintă forme de fund dezvoltate și ajunse la maturitate în timpul unor condiții hidrologice anterioare, iar în momentul măsurării erau în curs de remodelare. În același timp, undulațiile de curent numite mega-ripple-uri identificate în albie ca forme primare singulare sau ca forme secundare, suprapuse peste dune, s-au situat în proporție destul de mare aproape de limita maximă de evoluție. Se pare că în condiții hidrologice de ape medii spre mari brațul Sulina are competența necesară de a dezvolta doar forme de fund minore, cele de dimensiuni mari fiind doar re-mobilizate. Din păcate condițiile hidrologice din timpul măsurătorilor nu au permis identificarea unor forme de fund de dimensiuni mari aflate în perioada de maximă evoluție; este necesară efectuarea unui nou set de măsurători în condiții de debite mari pentru a putea evalua dacă brațul Sulina are competența fluvială necesară dezvoltării la maximum a formelor de fund sau acestea sunt în permanență mutate fără a se evolua mai mult.

Bibliografie

- Almazov, A.A., Bondar, C., Diaconu, C., Ghederim, V., Mihailov, A.N., Mita, P., Nichiforov, I.D., Rai, I.A., Rodionov, N.A., Stanescu, S., Stanescu, V., Vaghin, N.F., 1963. Zona de vărsare a Dunării. Monografie hidrologică. 396 pp., Ed. Tehnică, București.
- Anastasiu, N., 2004. CD-SED-2004, Sedimentologie - Curs interactiv, ArsDocendi, prin Geomedia, Compact disc și text de prezentare.
- Assani, A.A., Petit, F., 2004. Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of the Warche River (Belgium). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(2): 133-143.
- Ashley, G.M., 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *J Sediment Petrol* 60, 160–172.
- Babonneau, N., Delacourt, C., Cancouë, R., Sisavath, E., Bachèlery, P., Mazuel, A., Jorry, S.J., Deschamps, A., Ammann, J., Villeneuve, N., 2013. Direct sediment transfer from land to deep-sea: Insights into shallow multibeam bathymetry at La Réunion Island, *Marine Geology*, 346, 47–57.
- Bondar, C., Papadopol, A., 1972. Evoluția albiei Canalului Sulina, *Transporturi auto, navale și aeriene*, Vol. II (19), Nr. 3, 144-147.
- Bondar, C., State, I., Cernea, D., Harabagiu, E., 1991. Water flow and sediments transport of the Danube at its outlet into the Black Sea. *Meteorol. și Hidrol.*, 21, 1, 21-25.
- Bondar, C., Panin, N., 2000. The Danube Delta Hydrologic Database and Modeling, *GEO-ECOMARINA*, 5-6, 5-53.
- Carling, P.A., Gölz, E., Orr, H.G., Radecki-Pawlik, A., 2000. The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology. *Sedimentology*, 47, 227-252.

- Carvalho, N.O., Filizola, N., dos Santos, P.M.C., Lima, J.W. 2000. Guia de Práticas Sedimentométricas. Ed.ANEEL/PNUD/ OMM, Brasília, p.154.
- Chen, J., Wang, Z., Li, M., Wei, T., Chen, Z., 2012. Bedform characteristics during falling flood stage and morphodynamic interpretation of the middle–lower Changjiang (Yangtze) River channel, China. *Geomorphology*, 147-148, 18–26;
- David, A., 2010. Lucrările tehnice efectuate pe dunărea maritimă în perioada 1918-1938. *Analele Universității „Dunărea de Jos” Galați, Seria 19, Istorie, tom IX*, 119-144.
- Driga, B.V., 2004. Delta Dunării - Sistemul circulației apei. Casa Cărții de Știință Cluj-Napoca. 256 p.
- Filizola, N., Guyot, J.L., 2004. The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the river Amazon. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1): 143-153.
- Flemming, B.W., 1988. Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten* 29, 93-97.
- Greco, F., Palmentola, G., 2003. Geomorfologie dinamică. Editura Tehnică. pp. 392.
- Hjulström, F., 1935. Studies in the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Geol. Inst. Univ. Uppsala Bull.* 25, pp. 221-528.
- Huizinga, R.J., 2010, Bathymetric surveys at highway bridges crossing the Missouri River in Kansas City, Missouri, using a multibeam echo sounder, 2010: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5207, 61 p.
- Jugaru Tiron, L., Le Coz, J., Provansal, M., Panin, N., Raccasi, G., Dramais, G., Dussouillez, 2009. Flow and sediment processes in a cutoff meander of the Danube Delta during episodic flooding. *Geomorphology*, 106 (3-4), 186-197.
- Keller, E.A., 1972. Development of alluvial stream channels. *Bulletin of the Geological Society of America* 83, 1531-1536.
- Kim, D., Muste, M., 2012. Multi-dimensional representation of river hydrodynamics using ADCP data processing software. *Environmental Modelling & Software*, Volume 38, 158–166
- Knox, J.C., 2006. Floodplain sedimentation in the Upper Mississippi Valley: Natural versus human accelerated. *Geomorphology*, 79, pp. 286–310.
- Korup, O., 2012. Earth's portfolio of extreme sediment transport events. *Earth-Science Reviews* 112, 115–125.
- Liteanu, E., Pricajan, A., 1963. Alcatuirea geologica a Deltei Dunari, *Studii Tehnice si Economice, STE-CG-E*, 6.
- Locat, J., Sanfaçon R., 2000. Multibeam surveys: A major tool for Geosciences.
- Loghin, V., 2009. Elemente de geomorfologie fluvială. Valahia University Press, Târgoviște, pp. 80.
- Magilligan, F.J., Nislow, T.K.H., 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology* 71, 61–78.
- Meybeck, M., Laroche, L., Dürr, H.H., Syvitski, J.M.P., 2003. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change* 39, 65-93.
- Morris, P.H., Williams, D.J., 1999. Worldwide correlations for subaerial aqueous flows with exponential longitudinal profiles. *Earth Surf. Proc. Landf.* 24, 867– 879.
- Muste, M., Yu, K., Pratt, T., Abraham, D., 2004. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II: fixed-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation* 15, 17–28
- Panin, N., 1989. Danube Delta. Genesis, evolution and sedimentology. *Rev. Roum. Géol. Géophys. Géogr., Ser. Géographie*, 33: 25-36.

- Panin, N., Jipa, D., 1998. Danube river sediment input and its interaction with the north-western Black Sea: results of EROS-2000 and EROS-21 projects. *Geo-Eco-Marina* 3, 23-35.
- Panin, N., 1999. Danube Delta: Geology, Sedimentology, Evolution. Association des Sédimentologues Français, Maison de la Géologie, Paris, pp. 66.
- Panin, N., Jipa, D., 2002. Danube river sediment input and its interaction with the North - western Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 54: 551 - 562.
- Panin, N., 2003. The Danube Delta. Geomorphology and Holocene evolution: a Synthesis. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 4, 247-262.
- Panin, N., Overmars, W., 2012. The Danube Delta evolution during the Holocene: Reconstruction attempt using geomorphological and geological data, and some of the existing cartographic documents. *Geo-Eco-Marina* 18, 75-110.
- Petts, G.E., Gurnell, A.M., 2005. Dams and geomorphology: Research progress and future directions. *Geomorphology*, 71(1-2): 27-47.
- Rădoane, M., Rădoane, N., Dumitriu, D., 2003. Geomorphological evolution of river longitudinal profiles, *Geomorphology*, vol. 50, 293-306.
- Ramez, P., 1995. Erosion et transport solide en rivière – tome 1 : Guide pour la compréhension des phénomènes. CEMAGREF, Série Gestion des milieux aquatiques, 8, p.130.
- Shields, A., 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau* 26, pp. 5–24.
- Southard, J.B., 1975. Bed configuration. In Harms, J.C., Southard, J.B., Spearing, D.R., Walker, R.G. *Depositional Environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences*. SEPM Short Course No. 2, Dallas, Texas.
- Stănică, A., Panin, N., 2009. Present evolution and future predictions for the deltaic coastal zone between the Sulina and Sf. Gheorghe Danube river mouths (Romania). *Geomorphology*, 107, 41–46.
- Syvitski, J.P.M., Vorosmarty, C.J., Kettner, A.J., Green, P., 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308, 376–380.
- Șerban, P., Stănescu, Al., Roman, P., 1989. Hidrologie dinamică. Editura Tehnică, pp.494.
- Tiron Duțu, L., Provansal, M., Le Coz, J., Duțu, F., 2014. Contrasted sediment processes and morphological adjustments in three successive cutoff meanders of the Danube Delta. *Geomorphology*, Volume 204, 154-164.
- Urgeles, R., Canals, M., Baraza, J., Alonso, B., Masson, D., 1997.- The most recent megaslides on the Canary islands: The El Golfo debris avalanche and the Canary debris flow, West Hierro Island. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B9): 20.305-20.323.
- Walling, D.E., Fang, D., 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change* 39, p. 111– 126.
- Williams, G.P., Wolman, G.P., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. USGS circular 781, p. 48.
- Wong, H. K., Panin, N., Dinu, C., Georgescu, P., Rahn, C., 1994. Morphology and post-Chaudian (Late Pleistocene) evolution of the submarine Danube fan complex. *Terra Nova* 6: 502-511.