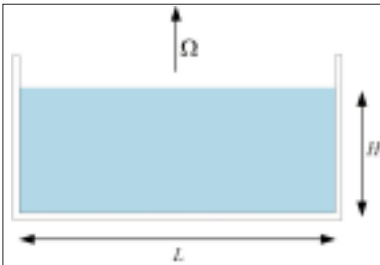


KÖRNYEZETI ÁRAMLÁSOK SZEMELVÉNYEK A KÁRMÁN LABORATÓRIUM KÍSÉRLETEIBŐL*

2. rész: Kísérletek forgatott folyadékokkal

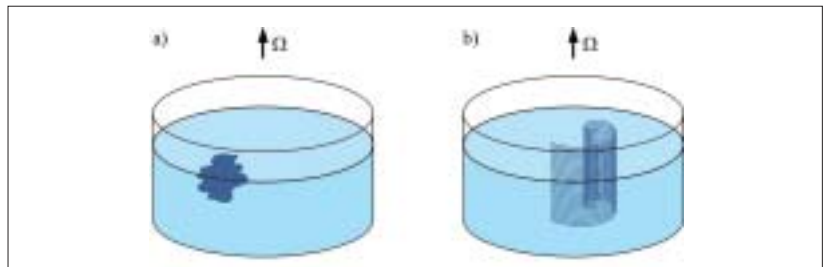
Az áramlások kétdimenziós jellege: a Taylor-oszlop

A következő kísérletekben L szélességű, függőleges tengelye körül Ω szabályozható szögsebességgel forgatott hengeres edényt használunk, amely H átlagos magasságú vizet tartalmaz (26. ábra).



26. ábra: Fogatott hengeres edény (tipikus adatok: $L=40$ cm, $\Omega=6-60$ 1/s, $H=5-20$ cm)

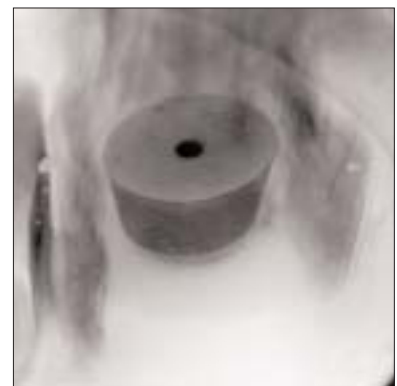
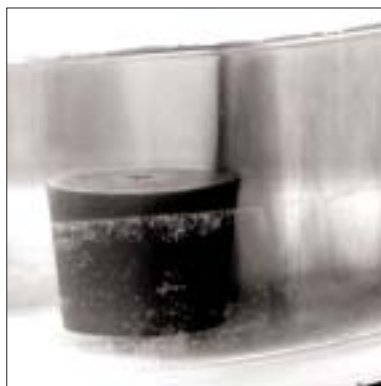
A forgatás (csakúgy, mint a rétegzettség) már önmagában is kétdimenzióssá igyekszik tenni az áramlást. Geosztrofikus egyensúlyban a Coriolis-erő és az azt kompenzáló nyomási gradiens erő a vízszintes síkban hatnak, nincs függőleges (a forgástengellyel párhuzamos) összetevőjük. Az egymás alatti vízszintes rétegek tehát azonosan, együtt mozognak. Az áramlásnak ezt a kétdimenziós szerkezetét a laboratóriumban is könnyen bemutathatjuk. Az egyik ilyen kísérletünk során színezéket juttatunk (pl. fecskendő segítségével) a forgatott folyadékba (27a ábra). A kezdetben formátlan festékfolt függőleges felületek mentén terjed szét, „festékfüggönyök” alakulnak ki (27b ábra). Az áramlás minden mélységi szinten egyformán viselkedik, a felülnézeti képen ezért jelenik meg egy éles mintázat (lásd



27. ábra: a) Fecskendő segítségével festéket juttatunk a forgatott folyadékba, kezdetben egy formátlan festékfolt látható az edényben; b) Rövid idő elteltével a folt függőleges felületek mentén oszlik el, „festékfüggönyök” keletkeznek



28. ábra: a) A forgatott, vízzel telt edény fenekén rögzített alacsony henger elé festéket fecskendezünk. b) A szétterjedő festék a 27. ábrának megfelelően függőleges felületek mentén oszlik szét a folyadék teljes mélységében (a felülnézeti képen ezért jelenik meg egy éles mintázat), de nem folyik rá a hengerre, hanem megkerüli a fölötte lévő vízoszlopot, a Taylor-oszlopot is



29. ábra: A Taylor-oszlop kialakulása a kísérletben: a) Oldalnézet, a festék még csak részben folyta körül az oszlopot, festékfüggönyök formájában. b) Fél-felülnézet, a körbefolyás már majdnem teljes

28. ábra). Ez a szerkezet figyelhető meg bizonyos, parttól távoli tengeráramlatok esetében is, amelyek helyenként több kilométeres mélységig azonosan mozognak.

Egy másik kísérletben egy, a

vízmélységnél lényegesen alacsonyabb henger alakú testet rögzítünk az edény fenekére, majd a rendszert, miután sokáig forgattuk, kissé lelassítjuk. Ekkor áramlás indul meg, amely megkerüli a hengert, de nem-

* A Környezetfizikai laboratóriumi gyakorlatok (szerkesztette Kiss Ádám), ELTE Eötvös Kiadó, 2005 című tankönyv képanyaga alapján.

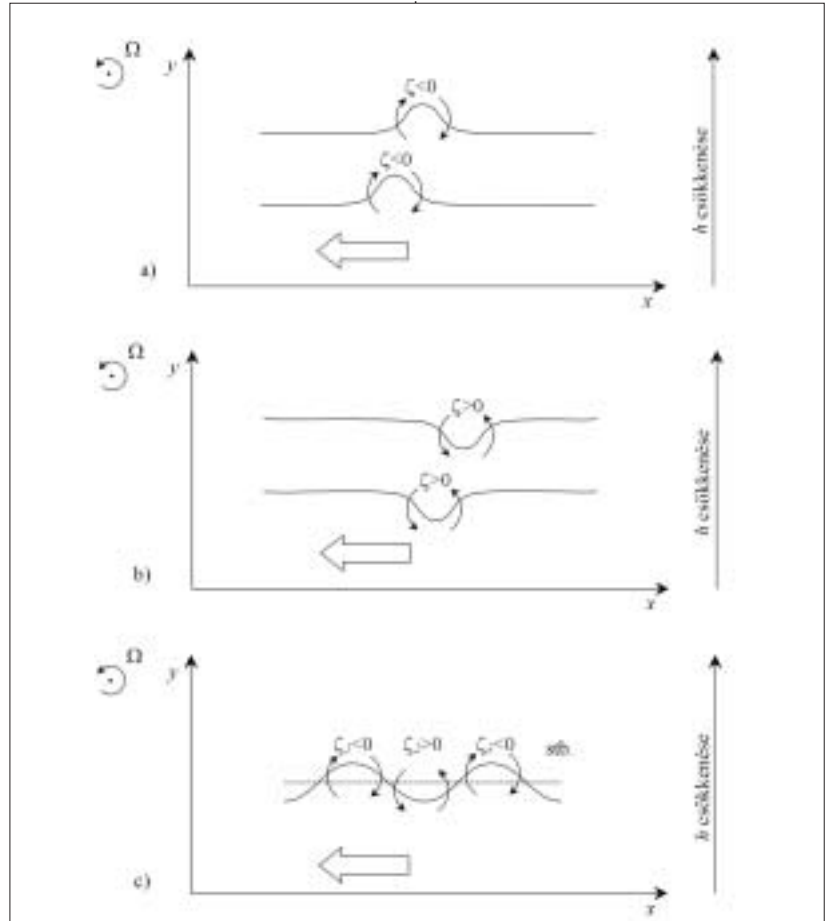
csak az edény alján, hanem a víz teljes mélységében, hiszen az áramlás minden szinten azonos. A henger feletti folyadékoszlop áll a hengerhez (és az edényhez) képest (28, 29 ábra). Ezt az ún. Taylor-oszlopot áramolja körbe a környező folyadék, ami festéssel jól láthatóvá tehető.

A Rossby-hullám

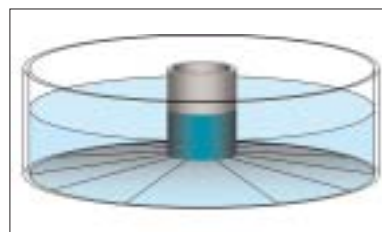
A geosztrofikus áramláshoz a kis pozitív Rossby-szám esetén hozzáadódó, gyengén időfüggő mozgást közelgeosztrofikusnak, kvázigeosztrofikusnak nevezünk. Ennek egyik legfontosabb fajtája, az ún. Rossby-hullám*, amely a forgatott közegek leglassúbb periodikus mozgása.

Ha a folyadék aljzatát képező domborzat enyhén lejt valamelyik irányban, és egy örvénymentes függőleges csíkot a sekélyedés irányában megörbítünk, akkor a magasság csökkenése miatt a potenciális örvényesség megmaradásának tétele értelmében az örvényességnek negatív értéket kell felvennie. Mélyebb rétegbe való vízszintes kitérítés esetén pedig pozitív többletörvényességnek kell kialakulnia, vagyis az örvényesség változása mindig ugyanabba az irányba sodorja a folyadékvonalat, hullám alakul ki. Pozitív forgatási szögsebesség (északi féltéke) esetén a haladás irányától jobbra esik a sekélyebb közeg, és fordítva. A létrejövő hullám a topografikus Rossby-hullám (30. ábra) amelyben a folyadékoszlopok nagyon lassan oszcillálnak, és a változó mélység miatt az oszlopok örvényessége is periodikusan változik. A vízfelszín behorpadása vagy kidurorodása (amely, ciklonális ill. anticiklonális áramlást kelt) elősegítheti a Rossby-hullám keletkezését, vagy befolyásolhatja a már meglévő hullámot.

A természetben jellemzően az óceánok enyhén lejtő partjai mentén alakulnak ki topografikus Rossby-hullámok. Nagyon lassúak, sebességük néhány km/h, periódusidejük néhány nap. Tipikus hullámhosszuk 100 km körüli.



30. ábra: a) A felső görbe vonallal jelölt folyadék rész bal oldalát a potenciális örvényesség megmaradása miatt kialakult negatív többletörvényesség y növekedésének irányában deformálja, jobb oldalát ezzel ellentétes irányban, ami által a görbület balra mozdul el (alsó görbe vonal). Mivel az örvényesség így továbbra is negatív marad, a görbület folyamatosan halad balra. b) Hasonló megfontolások alapján az ellenkező irányú görbület is folyamatosan balra halad. c) Minthogy mindkét irányú görbülés balra tolja önmagát, az egész hullámalakzat balra vonul.

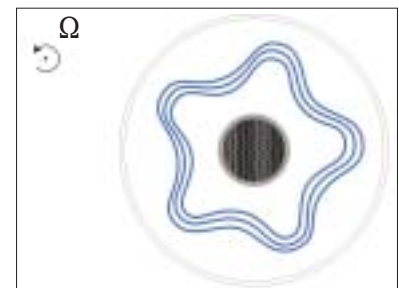


31. ábra: Enyhén kúpos aljú edény, mellyel a β -hatás laboratóriumban létrehozható

A Föld görbülete miatt (β -hatás*) is keletkeznek ilyen hullámok, ezek az ún. planetáris Rossby-hullámok, amelyek a légköri folyamatok és az időjárás meghatározó tényezői, és mindkét féltéken nyugati irányban haladnak. A topografikus Rossby-hullámok az azonos mélységi szintvonalak, a planetáris Rossby-hullámok pedig a szélességi körök mentén terjednek.

A laboratóriumban könnyen létrehozhatunk Rossby-hullámokat. A jelenség tanulmányozásához olyan kúpos aljú edényt használunk, amelyben a tengely felé haladva az edény aljzata emelkedik, azaz a folyadék vastagsága csökken (31. ábra).

A kísérletben kialakuló Rossby-hullám sémáját a 32. ábra szemlélteti.

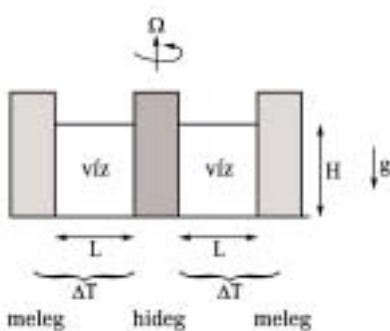


32. ábra: Laboratóriumban demonstrált Rossby-hullám felülnézetben

Pozitív forgatási irány esetén a hullám az együttforgó vonatkoztatási rendszerben megfigyelve negatív (az óramutató járásával megegyező) irányban a kerüli meg a forgástengelyt. Ennek megfelelően az északi féltekén a sekélyebb, vagy nagyobb Coriolis-paraméterű közeg a Rossby-hullám terjedési irányának jobb oldalára esik. A szélességi kör mentén önmagába záródó hullámalak hullámszámát a gerjesztés részletei szabják meg. A légkörben tipikusan 3–6 hullám alakul ki egy szélességi körön.

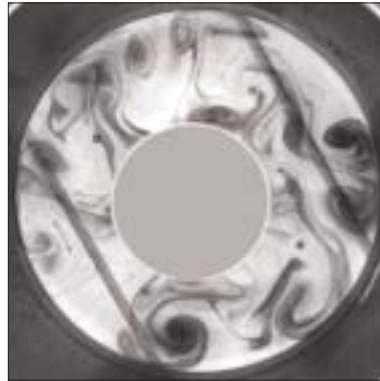
A baroklin instabilitás kísérleti kimutatása

Forgatott rendszerben, vízszintes irányú hőmérsékletkülönbségnek kitett folyadék vizsgálatához egy henger alakú edényt koaxiálisan három részre osztunk, melyeket jó hővezető falakkal választunk el. A belső kis henger hidegen tartjuk, a külső hengergyűrűt pedig melegen. Ezek képviselik a Föld vagy egy másik bolygó sarki ill. egyenlítői tartományait. A közbenső gyűrűben elhelyezkedő folyadék mozgását rendszerint a mérsékelt övi légkör modelljének szokás tekinteni. Kísérleti paraméterként változtatható az Ω szögsebesség, a ΔT hőmérsékletkülönbség, a folyadék H mélysége és a közbenső hengergyűrű L szélessége (33. ábra), illetve, különféle folyadékokat használva az α hőtágulási együttható is. Ez a XX. század 50-es, 60-as éveiben oly híressé vált Fultz-féle forgómedencés kísérlet.



33. ábra: A baroklin instabilitás kimutatásának forgómedencés kísérleti elrendezése és jellemző paraméterei

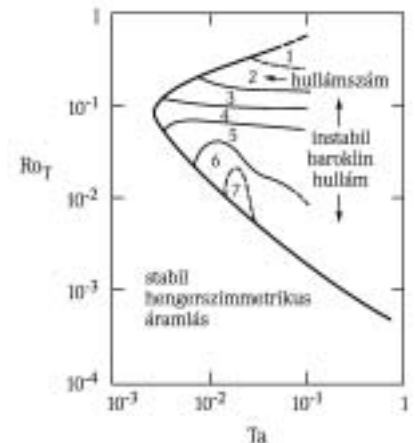
Az áramlást ismét a vízbe juttatott kis mennyiségű festékkel tesszük láthatóvá. A paraméterek változtatásával a hőmérsékletkülönbség hatására kialakuló, eredetileg forgásszimmetrikus termikus áramlás instabillá válik, ez a baroklin instabilitás. Az instabilitás hatására kialakuló baroklin hullámok a paraméterek széles tartományában egyre nagyobb amplitúdójúvá válnak, és jobbra ill. balra forgó örvényekre esnek szét (34. ábra). A kísérlet tehát egyrészt a baroklin instabilitás megvalósítását célozza elhanyagolható β -hatás esetén (hiszen az aljzat most vízszintes), másrészt pedig a globális légkörzés általános tulajdonságainak felderítését is szolgálja.



34. ábra: A baroklin instabilitás következtében kialakuló tipikus áramlási kép a forgómedencés kísérletben ($L=10$ cm, $\Omega=10$ rpm). A megfestett tartomány kezdetben egy körgyűrű, s az hasad fel ciklonális és anticiklonális örvényekre az instabilitás hatására. (A két párhuzamos csík az edény alatt lévő szerkezeti elem, az áramlást nem befolyásolja.)

Az eredményeket dimenziótlan kombinációk függvényében érdemes megadni, hogy az áramlások hasonlósági törvényei szerint rögtön leolvasható legyen jelentésük a környezeti jelenségek szempontjából is. A termikus áramlás erősségét a $Ro_T = g\alpha \cdot \Delta T \cdot H / 2\Omega L^2$ dimenziótlan szám, az ún. termikus Rossby-szám fejezi ki. A másik fontos dimenziótlan paraméter a forgatás erősségét mérő $Ta = \Omega^2 / L$ Taylor-szám. A Ro_T és Ta paraméter tipikus értéke 10 cm-es L szélességgel és H mélységgel, 10°C hőmérsékletkülönbséggel és percnkénti 3 fordulattal $\Omega=0,3$ 1/s) számolva $0,5$, ill. 10^{-3} .

A kísérletek eredményeit a Ta - Ro_T paramétersíkon a 35. ábra foglalja össze. A vastag vonal a stabil forgásszimmetrikus termikus áramlás tartományát választja el a hullámszerű viselkedéstől, ahol a termikus áramlás már instabil. Ez a vonal tehát a baroklin instabilitás határgörbéje. A baroklin hullámok tartományában feltüntetjük a hengergyűrűben megjelenő hullámok számát is. A megfigyelt baroklin hullámok nem kis amplitúdójú lineáris rezgések, hanem nagy amplitúdójú nemlineáris mozgások. Az instabilitás következtében időben eleinte növekvő amplitúdónak a tartály véges geometriai méretei szabnak határt. A hullámhossz is az L vastagsággal azonos nagyságrendű. Sokszor felismerhető egy meanderező központi jet is. Erősebb forgatásoknál a végállapot mindig az, hogy nagy ciklonális és anticiklonális örvények szakadnak le (34. ábra), melyek ugyan változó alakúak, de számuk időben változatlan (35. ábra).



35. ábra: A forgóhengeres kísérlet eredménye a Taylor-szám és a termikus Rossby-szám által definiált paramétersíkon (Phillips, 1963).

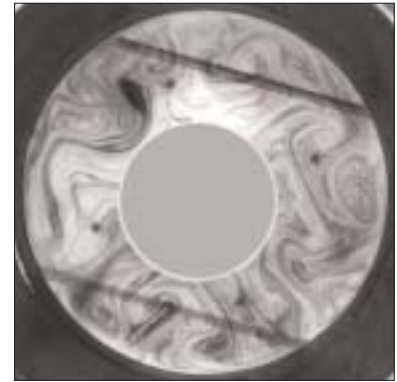
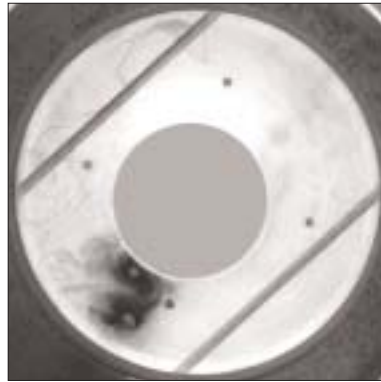
Adott hőmérsékletkülönbség mellett a forgatási sebesség növelése a 35. ábrán egy -1 meredekségű egyenesen lefelé történő elmozdulásnak felel meg. Az egyenes annál feljebb fut, minél nagyobb ΔT . Azt látjuk, hogy a létrejövő instabilitás során leggyorsabban növekvő hullámok hossza (azaz a megfigyelt hullámhossz)

csökken Ω növelésével. A nagy külső hőmérsékletkülönbség hatására kialakuló baroklin hullámok hatékony hőcserét hoznak létre, s a folyadék belsejében megnövelik a lokális sűrűségkülönbséget az alsó és felső rétegek között. A hullámhossz olyan nagyra válhat, hogy már egyetlen hullám sem fér rá a gyűrűre, s ezzel megszűnik az instabilitás. Ez történik a vastag görbe felső ága mentén.

A globális légkörzés szempontjából a kísérletben a kis Taylor-számoknál tapasztalt viselkedés a Földön megfelel a stabil szubtrópusi zonális áramlásoknak, hiszen itt a Coriolis-paraméter kicsi. Ugyanez a tartomány jellemzi a lassan forgó bolygók (pl. a Vénusz) egész légkörét, ahol a baroklin instabilitás nem játszik szerepet. A mérsékelt égövi tipikus hőmérsékletkülönbségek a Földön jóval nagyobbak, mint a szubtrópusiak. Mivel az átlagos Coriolis-paraméter is hasonlóan változik, ezért a termikus Rossby-szám azonos nagyságrendű e két égövben, a Taylor-szám viszont nem. A szubtrópusiból a mérsékelt égövi zónába való átlépés a kísérletben tehát egy állandó Ro_T -hez tartozó vonal menti jobbra haladásnak felel meg. Az eredmény jól mutatja, hogy a baroklin instabilitás és a nagy amplitúdójú baroklin hullámok megjelenése földi viszonyok között a közepes szélességeken elkerülhetetlen. Az instabillá váló baroklin hullámokból kialakuló nagy örvények a légkörben a ciklonoknak, az óceánokban pedig az áramlatokról leszakadó örvényeknek, gyűrűknek felelnek meg.

Szennyezések nagyskálájú terjedése

A baroklin instabilitást demonstráló kísérlet kapcsán betekintést nyerhetünk egy egészen más jellegű jelenségbe is, a szennyezések nagy távolságskálákon történő terjedésébe. Ehhez először vegyük észre, hogy a nyomjelzőként használt festék maga is tekinthető szennyező anyagnak. A 34. ábra rajzolata világosan mutatja,



36. ábra: Festék szétterjedése a forgómedencés kísérletben. a) Kezdeti lokalizált festékeloszlás, nem sokkal a befejezőkészenítés után. b) Néhányszor tíz fordulat után a festék finom szálas mintázatot mentén helyezkedik el az edény teljes terjedelmében

hogy a festék vékony szálak mentén terjed szét, s az egymás alatti folyadékrétegekben azonos módon. Ennek oka az, hogy nagy skálán a Coriolis-erő dominál, s az minden rétegben azonos módon hat. Az áramlás, mint ahogy a Taylor-oszlopok esetében is láttuk, kétdimenziós.

A szennyezés-terjedés részleteinek megismerése érdekében jutassunk feckendővel festéket egy kis tartományba. Ez eleinte ugyan gombolyag alakot vesz fel, de néhány másodperc után kacsok alakulnak ki, melyek időben egyre hosszabb és vékonyabb szálakba fejlődnek (36. ábra). A szálak hossza időben exponenciálisan nő. Az exponenciális megnyúlás a kaotikus időfejlődés jele: valóban, a szennyezések terjedési dinamikája nagy skálán, ahol a diffúzió hatása elhanyagolható, kaotikus folyamat. Légköri és óceáni megfigyelésekből ismert, hogy a növekedést jellemző (*e*-szereződési*) időtartam a légkörben néhány nap, az óceánban néhány hét. Ezen karakterisztikus idő reciprok a káosz mérőszámaként használt Ljapunov-exponens (Götz, 2001). Az egyedi szennyező részecskék kaotikus mozgásának következménye, hogy összességük szálas rajzolatú fraktál alakzatot* alkot (36. b ábra) (Tél, Gruiz, 2006).

A Ljapunov-exponens* légkörre vonatkozó néhány napos értéke azt jelenti, hogy egy kezdetben 1 km sugarú szennyezés 1 hónap alatt folyja körbe a Földet, a közepes szélességeken. A megfigyelésekkel összhang-

ban azonban a szennyező anyag nem egy körgyűrű mentén, hanem szálas, fraktál alakzat mentén helyezkedik el. Kísérletünk a légköri szennyezések terjedése szempontjából is hű modellje a mérsékeltövi viselkedésnek, hiszen a kezdeti festékfolt mintegy 30 fordulat után öleli körbe az edényt.

A cikkünk első részében (2006. 1. szám) a szennyezések lokális terjedését bemutató „turbulens fáklya, kéményfüst” témájú kísérlettel összevetve azt mondhatjuk, hogy a szennyezések terjedésében a mintegy 1 km-es távolságokig a turbulencia és az általa felerősített diffúzió fontos szerepet játszik. A 100-1000 km-es skálán azonban ez a hatás már elhanyagolhatóvá válik, s ott a sodródás kaotikus és fraktál jellege határozza meg szennyezés-eloszlást. A Kármán Laboratóriumban a szennyezések terjedésének mindkét arculata jól tanulmányozható.

Irodalom

- Czelnai R., 1999: A világoceán. Vince Kiadó, Budapest
 Czelnai R., Götz G., Iványi Zs., 1982: A mozgó légkör és óceán. OMSZ, Budapest
 Götz G., 2001: Káosz és prognosztika, OMSZ, Budapest
 Gyüre, B. and I. M. Jánosi, 2003: Stratified flow over asymmetric and double bell-shaped obstacles. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 37, 155-170 pp.

Jánosi I., Tél T., Szabó G., Horváth V., 2001: A környezeti áramlások fizikája, *Fizikai Szemle* 2001/1, 6-8. old.

Jánosi I., 2005: A cunami (Mi a titka?). *Természet Világa*, 136, 2005/4, 180. old.

Jánosi I., 2006: A cunami (Mindentudás az iskolában). *Fizikai Szemle*, 2006/1.

Phillips, N. A. 1963: Geostrophic Motion, *Rev. Geophys.* 1, 123-176 pp.

Rákóczi F., 1998: Életterünk a légkör. *Mundus Kiadó*, Budapest

Simpson, J. E., 1997: Gravity currents in the environment and the laboratory. *Cambridge University Press*, Cambridge

Tél T., 2003: Környezeti áramlások (jegyzet-kézirat). *ELTE Elméleti Fizikai Tanszék*

Tél T., Gruiz M., 2006: *Caohaltic Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge

Tritton, D. J., 1988: *Physical fluid dynamics*. *Oxford University Press*, Oxford

**Gyüre Balázs, Jánosi Imre,
Szabó K. Gábor és Tél Tamás
ELTE Fizikai Intézet,
Környezeti Áramlások Kármán
Laboratórium**

Dr. Starosolszky Ödön

(1931–2006)

Nem szokványos, hogy lapunkban más szaktudományok művelőjének haláláról emlékezünk meg. Jelen esetben mégis bizonyára helyénvalónak találják olvasóink, hogy a kiváló hidrológus szakember, *Dr. Starosolszky Ödön* emlékét ezúton is megőrizzük, hiszen sokan ismerték őt, elsősorban a hidrometeorológiával kapcsolatos hivatali és tudományos tevékenységén keresztül. Sokszor megfordult az OMSZ-ban a mindenkori OMSZ elnök tárgyalópartnereként, elsősorban a nemzetközi szakmai ügyek megtárgyalására, vagy a két szakterületet érintő aktuális kérdések megvitatására.

Starosolszky Ödön 1931. december 26-án, Veszprémben született. Mérnöki oklevelét 1954-ben szerezte meg a Budapesti Műszaki Egyetemen. Első munkahelye a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, ahol 1954-től 1971-ig számos beosztást betöltött, intézeti mérnöktől a főosztályvezetőig. 1971-től 1976-ig az Országos Vízügyi Hivatalban dolgozott előbb főosztályvezető-helyettesként, majd főosztályvezetőként és a kutatással, tervezéssel és szakoktatással, majd vízkészlet-gazdálkodással és környezetvédelemmel kapcsolatos feladatokat irányította. 1976-ban helyezték vissza a Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóközpontba, ahol 1989. július 31-ig a Hidraulikai Intézetet vezette. Ezután másfél évig főigazgató helyet-

tes volt, majd 1991. április 1-vel bízták meg a főigazgatói tisztség betöltésével. A VITUKI részvénytársasággá alakítása óta a vezérigazgatói munkakört látta el és az Rt. Igazgatóságának tagja volt nyugdíjazásáig, 1998. november 30-ig.

Munkássága a vízgazdálkodás több tudományterületét érinti, sok más mellett az éghajlatváltozás vízgazdálkodási vonatkozásait. Kandidátusi értekezését 1966-ban, doktori téziseit 1995-ben védte meg. Szakmai tevékenysége eredményeként mintegy 220 munkája jelent meg, belőlük mintegy 90 külföldön.

1960 óta vett részt a nemzetközi műszaki-tudományos szervezetek munkájában. 1968-ban ösztöndíjjal Norvégiában folytatott tanulmányokat. A Nemzetközi Hidraulikai Kutatási Szövetség (IAHR) Jégszakosztálya elnöke, tanácsának tagja, majd alelnöke volt. Az ENSZ szakosított szerve, a WMO Hidrológiai Bizottságának 1972 óta vezetőségi tagja és 1984-től 1993-ig elnöke volt. ENSZ szakértőként Sri Lankában, Nigériában, Egyiptomban és négyszer Indiában dolgozott nemzetközi projektek keretében. A Fejlődő Országok Akadémiájának előadója, a Tudósok Világszövetségének tagja volt. Az éghajlatváltozás vízügyi hatásaival foglalkozó OTKA téma vezetőjeként elért eredményeiről 1995-ben átfogó kiadványt jelentetett meg. Tagja volt az

Éghajlatváltozás Kormányközi Pannel (IPCC) második munkacsoportjának, és vezető szerzője a hidrológiai fejezetnek (megjelent 1995-ben). Részt vett az Európai Unió PECO projektje révén az éghajlatváltozásnak az európai vízgazdálkodásra gyakorolt hatása téma kidolgozásában és az átfogó kiadvány (1997) elkészítésében.

Egyetemi oktató munkát 1962 óta folytatott. 1988 óta címzetes egyetemi tanár a BME-n és a GATE-n. Az UNESCO égisze alatt 1966 óta rendezett angol nyelvű nemzetközi hidrológiai továbbképző tanfolyamon a hidraulikát és a hidrometriát kezdetől fogva napjainkig tanította.

Tagja volt az MTA Vízgazdálkodás-tudományi, a Meteorológiai, valamint a Hidrológiai Bizottságának. 1990-1997 között az MTA Vízgazdálkodás-tudományi Bizottsága elnökeként működött. 1996 őszén a Magyar Hidrológiai Társaság elnökévé választották, ahol két sikeres ciklust töltött el. Választmányi tagja volt hosszú időn keresztül a Magyar Meteorológiai Társaságnak is, 1998-ban életművéért a Steiner Lajos emlékérem kitüntetettjévé vált.

2006 június 3-án hosszas betegség után ragadta el a halál. Emlékét megőrizzük.

Dunkel Zoltán