



# **ELEMENTE DE GRAVIMETRIE**

**I**

**2013**

# CAPITOLUL 1

## GRAVIMETRIA CA ȘTIINȚĂ

### *Ce este geodezia?*

În anul 1880 Helmert a oferit următorul răspuns: “Geodezia este știința măsurării și reprezentării suprafeței Pământului.” Definiția enunțată anterior merită toată atenția, nu numai pentru vechimea sa, cât mai ales pentru calitățile sale, de generalizare și de exprimare simplă, dar edificatoare, a obiectului de studiu al geodeziei, ca ramură a științelor care cercetează planeta noastră. Odată cu dezvoltările tehnologice și descoperirile făcute în domeniu, teoriile existente au fost puse sub semnul întrebării fiind privite din noi perspective. La fel s-a întâmplat și cu definiția lui Helmert; rând pe rând, oamenii de știință competenți au contestat conținutul acesteia spunând că nu ar cuprinde toate elementele studiate (determinarea potențialului gravitației, determinarea deplasărilor scoarței terestre etc.). Dar, după o analiză mai atentă, de conținut, se constată că definiția dată de Helmert nu exclude aceste aspecte, și nici altele. Desigur, evoluția geodeziei în decursul a mai bine de 130 de ani este de necontestat, atât prin perfecționările survenite în dezvoltarea aparaturii și tehnologiilor proprii sau din domeniul prelucrării datelor, cât și prin conexiunile tot mai complexe cu alte discipline. Dar, toate acestea nu au modificat obiectul de studiu al geodeziei, precizat în definiția lui Helmert, ci au ajutat la îndeplinirea acestui obiectiv prin oferirea de noi soluții din ce în ce mai precise și complexe. De exemplu, determinările GNSS, zborurile fotogrametrice, determinările aeriene și satelitare ale gravitației, cartografierea fundului oceanelor cu ajutorul submarinelor sau vaselor special adaptate pentru astfel de lucrări la ce contribuie dacă nu la determinarea și reprezentarea cât mai exactă a suprafeței Pământului?

Rezolvarea problemei fundamentale a geodeziei (determinarea formei și dimensiunilor Pământului) se poate realiza prin următoarele metode:

- metode geometrice, care au constat la început din măsurări de arce de meridian și de paralel, apoi din măsurători complexe în rețele de triangulație etc. în scopul deducerii parametrilor de bază care definesc suprafața de referință. Cu aceste metode se ocupă geodezia elipsoidală sau matematică.
- metode astrono-geodezice și cu sateliții artificiali ai Pământului. De aceste metode se ocupă geodezia cu sateliți și astronomia geodezică.

- metode fizice. Cu aceste metode se ocupă geodezia fizică, elementele de bază necesare înțelegerii fenomenelor fizice care trebuie luate în considerare în metodele de determinare a formei și dimensiunile Pământului vor fi prezentate în continuare.

### **1.1. Geodezia fizică (Gravimetria geodezică)**

Gravimetria geodezică a apărut la jumătatea secolului XIX ca una din metodele noi de determinare a formei și dimensiunilor Pământului. Ulterior, pe măsura dezvoltării ei, acestei noi științe i s-au găsit largi aplicații în domeniul prelucrării rețelelor geodezice.

După intrarea în era sateliților artificiali ai Pământului, definiției lui Helmert i s-a adăugat și atributul de determinare a câmpului fizic asociat. Așadar, din punct de vedere științific, geodezia se ocupă cu studiul figurii Pământului, a câmpului său gravific și modificările sale dinamice. În ultimul timp, din punct de vedere practic, geodezia poate fi împărțită în trei domenii de activitate:

- ❖ Poziționarea (din punct de vedere geodezic)
- ❖ Studiul câmpului gravific
- ❖ Geodinamica

O ramură importantă a Geodeziei moderne este reprezentată azi de către Geodezia Fizică cunoscută în trecut sub titulatura de Gravimetrie. O delimitare a celor două discipline este ușor sesizabilă din definițiile de mai jos:

***Gravimetria** este știința care studiază măsurarea mărimilor ce caracterizează câmpul terestru al gravității. **Geodezia Fizică** studiază câmpul gravității în asociere cu figura Pământului (Moritz, 1980).*

Piesa centrală a gravimetriei constă în proiectarea și determinarea rețelelor gravimetrice, baza tuturor determinărilor de gravitate executate pe suprafața terestră. Din acest punct de vedere, România se poate mândri cu specialiști din acest domeniu care au avut preocupări în această direcție încă din secolul trecut. Mai multe detalii vor fi furnizate în capitolul 3 destinat rețelelor gravimetrice.

Rezultatele măsurătorilor gravimetrice se folosesc în geodezie pentru:

- corectarea unghiurilor măsurate în triangulație de efectul datorat deviației verticale
- corecția nivelmentului de precizie (corecția ortometrică sau normală funcție de sistemul de altitudini adoptat)
- calculul corecțiilor de reducere pe elipsoid a distanțelor măsurate

O atenție deosebită merită acordată modului de determinare a geozilor ca formă matematică a planetei pe baza măsurătorilor gravimetrice, practic cel mai precis procedeul dacă este combinat cu nivelment și determinări satelitare.

Atât calculul corecțiilor enumerate mai sus cât și determinarea formei și dimensiunilor Pământului se bazează pe cunoașterea aceleiași mărimi: câmpul gravitațional al Pământului și rezolvă în principiu aceeași problemă: determinarea geoidului. Determinarea geoidului ca formă matematică a Pământului s-ar părea că are un scop pur științific. Adăugând la aceasta faptul că aparatura necesară acestui scop este foarte costisitoare, am putea fi tentați să credem că acest domeniu nu va intra în preocupările specialiștilor din țara noastră însă această presupunere nu ar fi adevărată.

<b>An</b>	<b>Autor</b>	<b>Cadru</b>	<b>Rezultat</b>	<b>Statut</b>
1974	Mihăilescu, M.	Teză de doctorat	Cvasigeoidul pentru teritoriul României, determinat prin metode astronomico-geodezice	Neadoptat oficial
1993	Ioane, D.	Studiu al Institutului Geologic al României, în cadrul unei colaborări cu specialiști din Canada	Geoid pentru teritoriul României, determinat pe baza modelului geopotențial global OSU91	Neadoptat oficial
1996	Serediuc, C.	Teză de doctorat	Geoid pentru o zonă test care acoperă aprox. 20% din teritoriul României, determinat utilizând metoda elementului finit	Neadoptat oficial
1998	Marinescu, M., Tomoiagă, T.	Temă de cercetare științifică dezvoltată în cadrul Agenției de Cercetare pentru Tehnică și Tehnologii Militare, având beneficiar Direcția Topografică Militară	Geoid pentru teritoriul României, determinat pe baza modelului geopotențial global EGM96 și a rețelei gravimetrice militare (256 puncte)	Neadoptat oficial

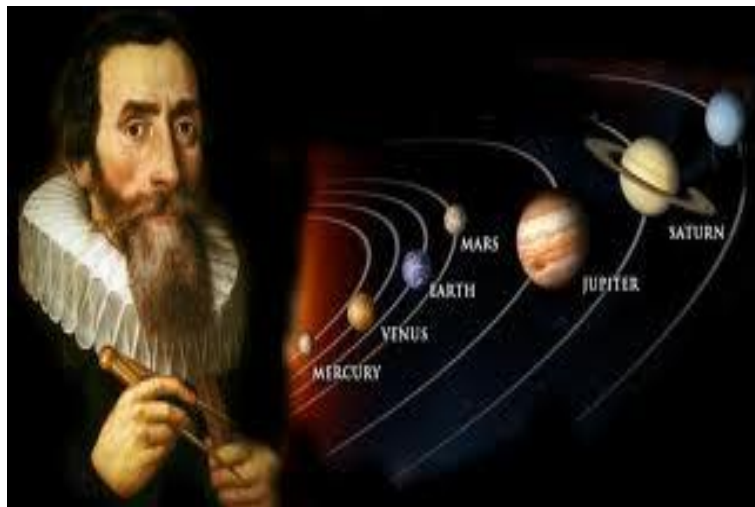
*Tabelul 1-1: Studiul undulațiilor geoidului în România*

În prezent ANCPI, prin Centrul Național de Cartografie (CNC), în parteneriat cu S.C. Prospeccțiuni S.A., manifestă o deosebită preocupare în domeniu, finalizând un proiect pilot al cărui principal obiectiv îl constituie determinarea unui model de cvasigeoid gravimetric pentru zona Municipiului București. În funcție de rezultatele obținute, se are în vedere continuarea proiectului prin extinderea metodei la nivel național.

## 1.2. Începuturile științifice ale studiului gravitației

Kepler s-a născut în 1571 în Germania și a devenit un profesor de matematică. A fost un tip extraordinar de inteligent, pasionat de lucrările lui Platon și de traiectoriile perfect circulare descrise de planete în mișcarea lor. Pentru mii de ani toți au crezut că natura trebuie să fie perfectă și simetrică. Orice încercare de a schimba aceasta opinie era considerată o nebunie. Kepler a fost primul om care a îndrăznit să provoace natura într-o asemenea manieră și a realizat că are dreptate. Planetele trebuie să se miște pe o elipsă și nu pe un cerc. Odată ce a făcut această presupunere nu a durat mult până a enunțat cele 3 legi faimoase care descriu mișcarea planetelor în jurul Soarelui:

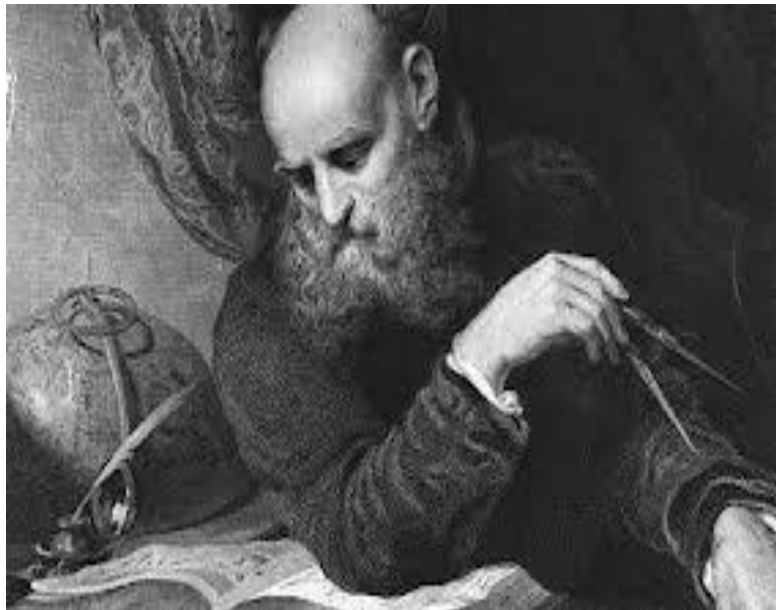
1. *“Planeta se mișcă în jurul stelei pe o orbită eliptică, în care steaua reprezintă unul din focare.”*
2. *“Linia dreaptă care unește planeta cu steaua – raza vectorială a planetei – mătură arii egale în perioade de timp egale sau formulat echivalent viteza areolară a razei vectoriale e constantă.”*
3. *“Pătratul perioadei de revoluție a planetei,  $u$ , este proporțional cu cubul semiaxei mari a orbitei.”*



*Fig. 1.1: Johannes Kepler*

Legile lui Kepler au constituit baza pentru formularea legilor gravitației de către Isaac Newton și au o deosebită importanță pentru înțelegerea mișcării corpurilor cerești, de exemplu a Pământului și a celorlalte planete în jurul Soarelui, sau a Lunii și a sateliților artificiali în jurul Pământului. Kepler a murit în 1630 la vârsta de 59 de ani lăsând în urma sa prima aproximare matematică corectă a Universului.

În timp ce Kepler era ocupat cu teoria sa asupra mișcării planetelor, în Italia, *Galileo Galilei* (n.1564 – d.1642) studia efectele generate de forța de atracție exercitată de planeta noastră (bineînțeles că cei doi nu știau la acel moment că de fapt ambii studiau o monedă cu două fețe – gravitatea). Galileo a introdus pentru prima oară esența fizicii în această problemă: trebuiau făcute experimente care testau diferitele teorii cu ajutorul unui limbaj matematic. El a creat plane cu diferite înclinații pe care rula bile măsurând timpul necesar bilelor pentru parcurgerea acelor plane. A constatat că indiferent de înclinație, într-o perioadă dublă de timp față de cea necesară parcurgerii pantei planului, o bilă se va deplasa pe o distanță de 4 ori mai mare. Folosindu-și imaginația a dedus că acest lucru ar fi valabil și pentru un plan perfect vertical, deci și în cazul corpurilor cu cădere liberă. Cu ajutorul matematicii a descoperit că acest lucru înseamnă o accelerație uniformă. Mergând mai departe, s-a gândit la corpurile lăsate să cadă în vid, o idee inimaginabilă la acea vreme. El a distrus teoria lui Aristotel și a afirmat că singurul motiv care face corpurile să cadă cu o viteză diferită era aerul; dacă experimentele s-ar repeta în vid, toate corpurile vor cădea cu aceeași viteză.



*Fig. 1.2: Galileo Galilei*

Descoperirile astronomice ale lui Galileo și cercetările sale asupra teoriei lui Copernic au lăsat o moștenire durabilă. Multe proiecte, principii și noțiuni științifice sunt numite după Galileo, printre amintim sistemul de navigație prin satelit Galileo și unitatea de măsură Gal care este o unitate folosită pentru exprimarea valorii gravității.

Galileo a murit la 8 ianuarie 1642 la vârsta de 77 de ani.

*Newton* a fost mereu fascinat de modul în care corpurile se mișcă (în secolul 17 cuvântul gravitație nu exista). Munca lui *Newton* a fost foarte importantă deoarece el a descoperit legile care explicau și susțineau descoperirile lui *Kepler* și *Galileo*; el a generalizat teoria lui *Galileo* legată de mișcarea corpurilor pe suprafața terestră spunând că se poate aplica și în cazul corpurilor cerești, lucru care a dus la explicarea mareelor oceanice: un efect al corpurilor cerești. A fost primul om de știință care a putut să enunțe legi capabile să explice atât fenomenele terestre cât și cele din Univers. Munca sa a fost atât de exactă încât timp de 200 de ani nimeni nu a putut să aducă îmbunătățiri sau contestații. De utilitate extraordinară pentru Geodezia Fizică este legea atracției universale, care afirmă că forța de atracție reciprocă  $\vec{F}$  dintre două mase punctiforme  $m_1$  și  $m_2$ , situate la distanța  $d$ , este dată de relația:

$$\vec{F} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \cdot \vec{d}_0, \quad (1.1)$$

Unde:  $d_0$  este versorul direcției care unește masele  $m_1$  și  $m_2$



*Fig. 1.3: Isaac Newton*

În țara noastră, începuturile gravimetriei geodezice pot fi legate de lucrările lui Gogu Constantin, profesor la Școala Națională de Poduri și Sosele, și anume: “Asupra variației gravitației în aceeași localitatea” – 1893. În perioada 1890 – 1896 pe teritoriul Transilvaniei s-a determinat valoarea gravitației în 12 puncte de stație, cu un aparat pendular. Sunt cunoscute în literatura de specialitate determinările efectuate de profesorul Borass în perioada 1900 – 1906, pe pilastrul situat în Observatorul Astronomic Militar, la Galați, precum și pe alți pilaștri de la capetele bazelor măsurate de Institutul Geografic Militar (astăzi Direcție Topografică Militară).

Totodată, la Observatorul Astronomic Militar din Dealul Piscului specialiștii români, împreună cu profesorul Borass, au determinat și valoarea gravității obținând 980 548 miligali în sistemul gravimetric Viena din 1900, în care Potsdamul avea valoarea gravității 981 270 miligali.

În decursul timpului, măsurătorile gravimetrice din țara noastră au fost executate în scopuri geologice și geofizice. Începând cu anul 1948 a avut loc o puternică dezvoltare a activității gravimetrice, organizându-se unități specializate, dotate cu aparatură modernă și personal calificat.

### **1.3. Instituții la nivel local și global**

Geodezia fiind o știință cu caracter global este evident că activitățile geodezice nu se pot desfășura decât printr-o cooperare internațională. Multe dintre cooperările internaționale sunt organizate prin intermediul **Asociației Internaționale de Geodezie – AIG (International Association of Geodesy – IAG)** care are cinci secțiuni:

1. Poziționare (Positioning)
2. Tehnologii spațiale (Space Technologies)
3. Gravimetrie (Gravimetry)
4. Teorie și metodologie (Theory and Methodology)
5. Geodinamică (Geodynamics)

Fiecare din aceste secțiuni are mai multe grupuri speciale de studiu și comisii structurate pe grupuri de cercetare.

În interiorul comunității geo-științelor, cooperarea cu alte științe este coordonată de Uniunea Internațională de Geodezie și Geofizică – UIGG (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG). În fiecare țară membră a UIGG, și cazul României, există un comitet național care coordonează activitatea științifică și menține contactul cu asociația.

O altă instituție foarte importantă pentru studiul gravității Pământului este **Biroul Gravimetric Internațional – BGI (Bureau Gravimetric International – BGI)**. Misiunea acestuia este de a aduna și stoca într-o bază de date informații despre câmpul gravific al Pământului și distribuția acestora la nivel global la cerere în scopuri științifice. BGI a fost creat în anul 1951 în urma unei decizii a IUGG și are sediul stabilit în orașul Toulouse, Franța în apropierea Observatorului Midi-Pyrénées (OMP). Această instituție are parte de toată susținerea posibilă din partea statului francez și a laboratoarelor și centrelor de cercetare care contribuie direct la activitățile BGI.





*Fig. 1.4: Sediul OMP*

În România, instituția responsabilă cu determinarea valorilor gravității este **Direcția Topografică Militară - DTM**, cu sediul în București. Transfăgărășanul, centrala atomnucleară Cernavodă, Porțile de Fier, Casa Poporului, canalul Dunăre – Marea Neagră, sunt doar câteva din proiectele realizate cu sprijinul Direcției Topografice Militare. Lista poate continua mult, tocmai de aceea merită să vedem ce a reprezentat DTM pentru România și prestigiul de care s-a bucurat domeniul măsurătorilor terestre. DTM a executat primele măsurători gravimetrice în anul 1961, o dată cu înființarea unui sector de gravimetrie în cadrul Observatorului Astronomic Militar. Începând cu anul 1976 DTM a organizat campanii de modernizare și întreținere a Rețelei Gravimetrice a României împreună cu Institutul de Geologie și Geofizică.

#### **1.4. Aplicațiile determinărilor gravimetrice**

Geodezia Fizică colaborează cu majoritatea disciplinelor care au ca obiect determinarea anumitor caracteristici ale structurii Pământului:

1. *Geodezia*. Importanța gravimetriei în acest domeniu se datorează în principal necesității determinării unei suprafețe matematice cât mai apropiată de forma și dimensiunile reale ale Pământului. Pentru acest motiv au apărut și rețelele gravimetrice, instrumentele utilizate și proiectele internaționale de determinare a câmpului gravitațional terestru. Totodată, măsurătorile gravimetrice sunt importante în calculul corecțiilor deviației verticalei în punctele rețelilor geodezice și calculul corecțiilor pentru sistemele de altitudine folosite la un moment dat.

2. *Vulcanologia*. Determinările simultane de gravitate și GPS s-au dovedit a fi un instrument puternic în observarea redistribuției maselor din structura internă înainte să aibă loc erupția propriu – zisă și să evidențieze schimbările în densitatea straturilor geologice. Specialiștii în studiul vulcanilor din Italia monitorizează îndeaproape activitatea vulcanului Etna folosind, pe lângă echipamente specifice, un gravimetru amplasat la o distanță de aproximativ 20 km față de munte.
3. *Seismologia*. Un exemplu concret de contribuție a gravității în studiul cutremurelor este prezentat în finalul capitolului 2.
4. *Hidrologia*. Un management eficient al resurselor de apă potabilă presupune, pe lângă multe altele, o bună cunoaștere a volumului de apă existent atât la suprafață cât și în adâncime. Din moment ce 90% din cantitatea totală de apă dulce a planetei este stocată în subteran o contorizare precisă a modificărilor apărute este greu de atins. Soluția salvatoare este oferită de studiile gravimetrice: în urma cercetărilor s – a dovedit că o pânză de apă freatică situată sub un gravimetru amplasat pe suprafața fizică a Pământului va produce o variație a gravității  $\Delta g = 42 \mu\text{Gal}$  pe metru de apă, sensibilitate ușor de sesizat prin utilizarea unui gravimetru absolut cu o precizie bună.
5. *Explorările petroliere și gazeifere*. Prospekțiunile gravimetrice permit determinarea adâncimii, mărimii și poziției pungilor de gaze și a rezervoarelor de țiței.
6. *Astronomia*. Câmpul gravitațional terestru contribuie la calculul orbitelor sateliților artificiali și naturali ai Pământului.
7. *Fizică*. Gravitatea este indispensabilă în laboratoarele de fizică pentru calculele anumitor parametrii la un moment de timp.
8. *Geodinamică*. Variațiile temporale ale gravității obținute din măsurători repetate oferă date despre mișcările plăcilor tectonice.

### **1.5. Unități de măsură**

Din punct de vedere metrologic, câmpul gravitației poate fi determinat fie în termeni de forță (prin metode statice), fie în termeni de accelerație (prin metode dinamice). Măsurătorile duc la o valoare numerică pe care o denumim, simplu, *gravitate*. În gravimetrie și în prospecțiunea gravimetrică, câmpul gravitației este exprimat întotdeauna în unități de accelerație, indiferent de metoda folosită pentru determinarea valorii lui. Aceste unități sunt:

$$\text{(SI) } \text{m/s}^2$$

1 u cgs = 1 gal = 1 cm/s<sup>2</sup>, unde cgs reprezintă Sistemul de unități centimetru-gram-secundă

Deoarece între valoarea minimă a accelerației gravitației ( la ecuator - 978 gal) și valoarea maximă de la pol (983 gal) există o diferență doar de 5 gal și pentru că accelerația gravitației se determină cu o precizie ridicată, în mod current, se utilizează miligalul ca unitate de măsură.

$$1 \text{ mgal} = 10^{-3} \text{ gal} = 10^{-3} \text{ cm/s}^2 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ mgal} = 0.001 \text{ gal}$$

Dacă sunt utilizate instrumentele de mare precizie se utilizează ca unitate de măsură microgalul, în special pentru determinările absolute.

$$1 \text{ } \mu\text{gal} = 0.001 \text{ mgal} = 0.000001 \text{ gal}$$

$$1 \text{ Newton metru per kilogram (Nm/kg)} = 1 \text{ m/s}^2 \text{ (unitate alternativa)}$$

## **1.6. Elemente de teoria potențialului**

Se consider un punct material P situate pe suprafața fizică a Pământului. Asupra lui P acționează următoarele forțe:

- ❖ Gravitația sau forța de atracție, notată cu  $\vec{F}$ , care este îndreptată spre central de masă al Pământului
- ❖ Forța centrifugă,  $\vec{q}$ , care apare datorită mișcării de rotație a Pământului
- ❖ Forță de atracție exercitată de Soare,  $f_S$ , care este important și trebuie luată în considerare în unele calculi datorită masei Soarelui
- ❖ Forța de atracție exercitată de Lună,  $f_L$ , important datorită apropierii față de Pământ a Lunii.
- ❖ Alte forțe

Dintre forțele enumerate mai sus primele două sunt mai importante având o influență semnificativ mai mare decât celelalte astfel încât se poate spune că:

Forța totală care acționează asupra unui corp aflat pe suprafața terestră este rezultanta forței gravitaționale și a forței centrifuge datorate rotației Pământului se numește gravitate.

Se notează cu  $\vec{g}$  și are următoarea formulă:

$$\vec{g} = \vec{F} + \vec{q} + f_L + f_S \quad (1.2)$$

### **1.6.1. Gravitația. Legea atracției universale**

Legenda spune că Newton a fost lovit în cap de un măr iar acest lucru l-a determinat să se întrebe care este forța responsabilă pentru căderea mărului, cine o exercită etc. Continuându-și cercetările pentru a putea răspunde la propriile întrebări Newton a formulat principiul atracției universale.

Forța gravitațională dintre două corpuri cu masele  $m_1$  și  $m_2$ , considerate punctiforme față de distanța dintre ele, situate la o distanță  $d$  unul față de altul este o forță de atracție care acționează de-a lungul liniei care unește corpurile și este dată de relația:

$$\vec{F} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \cdot \vec{d}_0, \quad (1.3)$$

În care:  $G$  este un coeficient de proporționalitate denumit constanta atracției universal sau constanta gravitațională newtoniană. Valoarea recomandată de CODATA (Committee on Data for Science and Technology – Comitetul de date pentru știință și tehnologie) în anul 2002 este

$$G = (6672 \pm 4,1) \times 10^{-14} m^3 s^{-2} kg^{-1}.$$

Masa reprezintă cantitatea de materie pe care o are un corp deci toate corpurile au masă. Există două cantități diferite care sunt identificate prin același nume masă: masa inerțială și masa gravitațională (confundată cu greutatea). Comunitatea internațională recomandă să se folosească cuvântul greutate atunci când este vorba numai de forță și nu de masă.

Din cele expuse mai sus se poate deduce că:

*Două corpuri materiale se atrag unul pe celălalt cu o forță a cărei accelerație este egală cu produsul maselor celor două corpuri și invers proporțională cu pătratul distanței care le separă (Legea atracției universale a lui Newton).*

Constanta atracției universale este numeric egală cu forța cu care se atrag între ele două corpuri cu masele egale cu unitatea, situate unul față de celălalt la o distanță egală cu unitatea. Forța de atracție exercitată de Pământ asupra unui punct de masă egală cu unitatea poate fi exprimată, aproximativ cu relația:

$$\vec{F} = G \cdot \frac{M}{R^2}, \quad (1.4)$$

unde:  $M$  este masa Pământului;

$R$  este raza medie a Pământului;

$GM$  este constanta gravitațională geocentrică, pentru care AIG prevede (1980):

$$GM = (39860047 \pm 5) \times 10^7 m^3 s^{-2}$$

Masa Pământului este considerată ca având valoarea:  $M = 5,97 \cdot 10^{24} kg$  iar în ipoteza formei sferice a Pământului, raza acestuia se consideră a fi  $R \approx 6378 \times 10^3 m$  pentru latitudinea  $B=45^\circ$  și densitatea medie a Pământului:

$$\rho_m^s \approx 5,50 \times 10^3 kg m^{-3}$$

Într-un sistem de coordonate rectangular  $XYZ$  expresia forței de atracție este:

$$\vec{f} = -G \cdot \frac{m}{l^2} \cdot \vec{l}_0, \quad (1.5)$$

unde  $l_0$  reprezintă versorul vectorului de poziție  $\vec{l}$ .

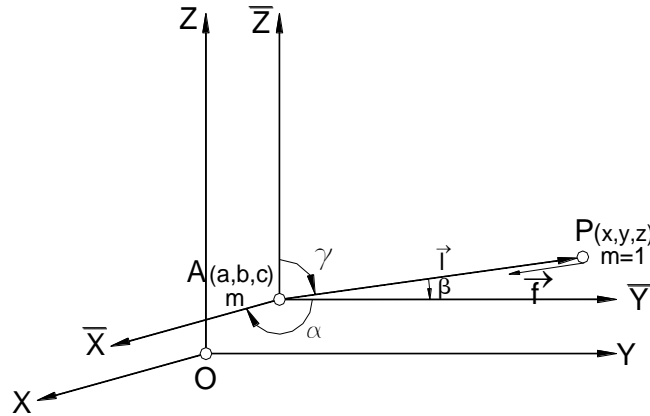


Fig. 1.5: Forța de atracție

Pentru stabilirea influenței de atracție a întregului glob terestru asupra punctului  $P$ , trebuie ținut cont de variația densității pentru fiecare element de volum  $dv$ :

$$\rho = \rho(a, b, c) = \frac{dm}{dv} \quad (1.6)$$

Componentele pe axele de coordonate vor fi:

$$\begin{aligned} F_x &= -G \iiint_v \frac{x-a}{l^3} \rho \cdot dv \\ F_y &= -G \iiint_v \frac{y-b}{l^3} \rho \cdot dv \\ F_z &= -G \iiint_v \frac{z-c}{l^3} \rho \cdot dv \end{aligned} \quad (1.7)$$

unde:

$$dv = da \cdot db \cdot dc$$

### 1.6.2. Forța centrifugă

Datorită mișcării de rotație a Pământului în jurul axei sale, punctul  $P$  este supus unei forțe centrifuge  $\vec{q}$ , ce acționează în planul paralelului de rază  $r$  al punctului  $P$ .

Expresia de definiție a forței centrifuge în cazul punctului  $P$ , cu masa egală cu unitatea și funcție de viteza liniară pe traiectorie  $v$ , este dată de:

$$\vec{q} = \frac{v^2}{r} \cdot \vec{r}_o \quad (1.8)$$

Se știe că:

$$v = r \cdot \omega \quad (\omega = \text{viteza unghiulară})$$

Deci:

$$\vec{q} = r\omega^2 \vec{r}_0 \quad (1.9)$$

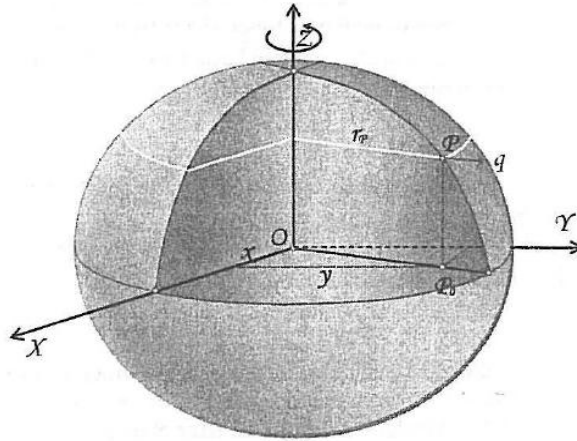


Fig. 1.6: Forța centrifugă

Viteza unghiulară medie în cazul Pământului, recomandată de *AIG (1980)* este:

$$\omega = 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad } s^{-1}$$

Forța centrifugă este variabilă pe suprafața Pământului, având o valoare maximă pentru punctele situate pe ecuator și fiind nulă pentru poli, unde  $r = 0$ .

### 1.6.3. Gravitatea (Greutatea)

Gravitatea este rezultanta forțelor care acționează asupra punctului  $P$ . Dintre toate forțele prezentate cele mai importante sunt forța de atracție și forța centrifugă. Având în vedere acest lucru, forța greutății are următoarele componente principale:

$$\vec{g} = \vec{F} + \vec{q} \quad (1.10)$$

Lucrându-se frecvent cu puncte de masă egală cu unitatea, gravitatea este numeric egală cu accelerația sa. La pol valoarea gravitației este  $\approx 983 \text{ gal}$ , iar la ecuator este de  $\approx 978 \text{ gal}$ . Datorită diferenței nesemnificative în această unitate de măsură, se lucrează de obicei în  $mgal$  ( $1mgal = 10^{-3} \text{ gal}$ ).

Considerându-se proiecțiile pe cele trei axe de coordonate, se obțin componentele gravitației:

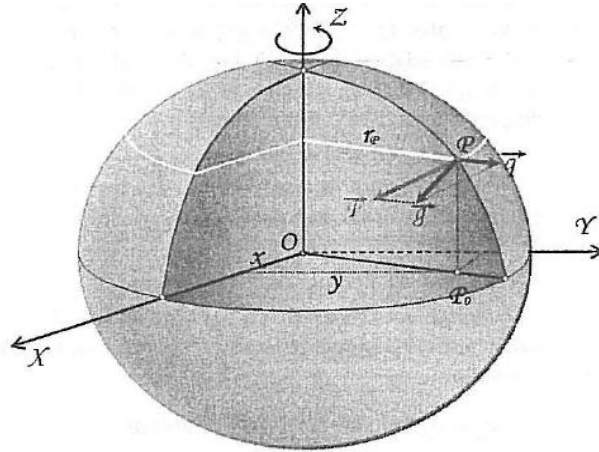


Fig. 1.7: Greutatea

$$\begin{aligned}
 g_x &= F_x + q_x = -G \iiint_v \frac{x-a}{l^3} \rho \cdot dv + x\omega^2 \\
 g_y &= F_y + q_y = -G \iiint_v \frac{y-b}{l^3} \rho \cdot dv + y\omega^2 \\
 g_z &= F_z + q_z = -G \iiint_v \frac{z-c}{l^3} \rho \cdot dv
 \end{aligned}
 \tag{1.11}$$

În geodezie, mai exact la calculul corecțiilor altitudinilor normale și la determinarea undulațiilor geoidului se folosește, pe lângă gravitatea măsurată, și gravitatea normală, notată cu  $\gamma$ .

Gravitatea normal (gravitatea calculată sau teoretică) este egală cu derivatele potențialului normal U.

$$\gamma = -dU/dh \tag{1.12}$$

Foarte important, forțele enunțate mai sus s-au definit în ipoteza în care Pământul este o sferă. Pentru gravitatea teoretică, în locul sferoidului de nivel rolul de suprafață normal este atribuit elipsoidului de rotație. În formă diferențială formula este cunoscută și cu denumirea corecția de latitudine. În decursul timpului mai multe formule au fost utilizate în practică. În România formula preferată este 1930 International Gravity Formula [Cassinis, et al, 1937]:

$$\gamma = 978049(1 + 0.0052884\sin^2(\varphi) - 0.0000059\sin^2(2\varphi)), \tag{1.13}$$

unde  $\varphi$  este latitudinea geodezică.

O altă formulă care a înlocuit pe plan internațional formula Cassinis este cea dată de Geodetic International Reference System în 1967(GRS67):

$$\gamma = 978031.846(1 + 0.005278895\sin^2(\varphi) + 0.000023462\sin^4(2\varphi)), \tag{1.14}$$

unde  $\varphi$  este latitudinea geodezică.

Mai recent o formulă adoptată de International Association of Geodesy (IAG) în 1980 și adoptată pe larg, inclusiv în sistemul WGS84:

$$\gamma = \gamma_a \frac{1 + k \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (1.15)$$

La fel ca și gravitatea măsurată gravitatea normală variază de la ecuator spre poli, unde are valoarea maximă. În 1980, AIG a publicat următoarele valori:

$$\gamma_e = 978032.67715 \text{ mgal}$$

$$\gamma_p = 983218.63685 \text{ mgal}$$

$$\gamma = \gamma_e (1 + 0.0053024 \sin^2 B - 0.00000058 \sin^2 2B)$$

#### 1.6.4. Câmpuri de forțe. Potențialul gravității. Potențialul normal

Plecând de la definiția general a unui *câmp de forțe* (regiune din spațiu, limitată sau nelimitată, unde în fiecare punct al ei se face simțită acțiunea unei forțe) se poate define câmpul oricărei forțe deci și a gravității:

*Prin câmp gravific (câmp al greutății) se înțelege regiunea din spațiu, limitată sau nelimitată, unde în fiecare punct al ei se face resimțită acțiunea unei forțe de greutate determinată în modul, direcție și sens.*

Așa cum s-a arătat la subpunctul 1.6.3. gravitatea normal presupune utilizarea unui elipsoid de rotație ca și suprafață normală. Datorită acțiunii forței proprii de atracție și a rotației elipsoidului în jurul axei sale mici se formează un câmp normal al gravității sau **câmp gravific normal sau câmp normal**, potențialul său fiind notat cu U și numit potențial normal.

Acesta trebuie să respecte următoarele condiții:

- Să aibă cu câmpul real, deci cu Pământul, aceeași viteză unghiulară
- Să fie generat prin rotația unei elipse, definită prin semiaxele sale, astfel încât elipsoidul cu două axe geocentric generat să aproximeze cât mai bine suprafața terestră
- Suprafața elipsoidului să fie una din suprafețele sale echipotențiale

Foarte logic și evident, dacă vorbim de regiunea din spațiu în care acționează forța gravitației vorbim despre **câmpul gravitațional** iar dacă facem referire la forța centrifugă vorbim despre un **câmp al forței centrifuge**.

Pentru descrierea unui câmp de forțe se utilizează o funcție introdusă de Laplace, denumită *potențial*, care poate fi definită atât matematic, cât și prin semnificațiile sale fizice. Matematic, se definește potențialul unui câmp de forțe ca funcția ale cărei derivate parțiale sunt componentele câmpului pe axele de coordonate: *Potențialul unui câmp de forțe este o*



funcție continuă și derivabilă, atașată câmpului de forțe respective, funcție ale cărei derivate parțiale sunt componentele câmpului pe cele trei axe de coordonate.

Corespunzător câmpurilor celor trei forțe amintite mai sus avem potențialul gravitațional, potențialul forței centrifuge și prin însumare, potențialul gravitației.

**1.6.4.1. Potențialul de atracție.** Potențialul câmpului gravitației numit și potențial de atracție sau potențial newtonian are expresia matematică completă în cazul unui corp solid de volum  $V$ :

$$V(x, y, z) = G \iiint_v \frac{\rho(a, b, c) da db dc}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}} \quad (1.16)$$

Prin particularizare, în cazul punctului atras de masă egală cu unitatea, potențialul de atracție al unui punct sursă de masă  $m$ , situat la distanța  $l$ , va fi:

$$V = \frac{Gm}{l} \quad (1.17)$$

Din rațiuni legate de lipsă de spațiu nu vor fi prezentate demonstrațiile matematice, oricum nu intră în scopurile lucrării, ci doar relațiile generale. Așadar, derivatele parțiale în raport cu cele 3 coordonate duc în final la următoarea relație:

$$\vec{F} = \text{grad}V \text{ sau } F = \nabla V, \quad (1.18)$$

unde  $\nabla$  este operatorul lui Hamilton:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (1.19)$$

iar  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  sunt versorii pe axele de coordonate  $x, y, z$ .

Prin urmare  $\nabla V$  este un vector:

$$\nabla V = \left( \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right) V = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} = \vec{F} \quad (1.20)$$

Prin acestea s-a demonstrat că funcția  $V$  se numește **funcție potențială sau potențialul de atracție**, ea având derivatele parțiale în raport cu coordonatele punctului atras  $P$  egale cu componentele forței de atracție pe cele trei axe de coordonate.

#### 1.6.4.2. Potențialul forței centrifuge

Potențialul din care derivă forța centrifugă este reprezentat de următoarea funcție, numită funcția potențială a forței centrifuge:

$$Q = \frac{\omega^2}{2}(x^2 + y^2) \quad (1.21)$$

Într-adevăr, se observă că:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = q_x; \quad \frac{\partial Q}{\partial y} = q_y; \quad \frac{\partial Q}{\partial z} = q_z = 0 \quad (1.22)$$

Deci forța centrifugă este gradient de potențialul ei, adică

$$\vec{q} = \text{grad } Q = \nabla Q \quad (1.23)$$

### 1.6.4.3. Potențialul greutateii

Având în vedere că forța greutateii este rezultanta compunerii forței de atracție terestre și a forței centrifuge ( $\vec{g} = \vec{F} + \vec{q}$ ), se poate scrie relația de determinare a potențialului greutateii:

$$W = V + Q = G \iiint_v \frac{\rho \, dv}{l} + \frac{\omega^2}{2}(x^2 + y^2) \quad (1.24)$$

Considerând relațiile (1.20) și (1.15), se obține expresia matematică a potențialului câmpului gravitației:

$$\vec{g} = \text{grad } W = \nabla W = \text{grad } V + \text{grad } Q \quad (1.25)$$

### 1.6.4.4. Potențial perturbator. Potențial normal

Potențialul câmpului normal se numește potențial normal și este notat cu  $U$ . Determinările potențialului normal este posibilă plecând de la principiul lui Dirichet: potențialul gravitațional în afara unei suprafețe  $S$  este complet determinat prin cunoașterea formei geometrice a lui  $S$  și valoarea potențialului pe  $S$ .

$$U = V + \omega^2/2(x^2 + y^2) \quad (1.26)$$

Rezultatul acestei ecuații se poate determina cu ușurință deoarece forma elipsoidului de revoluție este dată prin semiaxele  $a$  și  $b$  cunoscute,  $M$  este egal cu masa Pământului iar viteza unghiulară se știe. Fraza de mai sus poate fi tradusă astfel: prin presupunerile asumate avem un elipsoid care este o suprafață echipotențială a câmpului normal al gravitației și, prin prescrierea masei totale  $M$ , am determinat astfel complet și unic potențialul normal  $U$ . În acest caz distribuția detaliată a densității în interiorul Pământului nu necesită a fi cunoscută.

Diferența dintre potențialul real și normal se numește potențial perturbator, este notat cu  $T$ , geodeziei fizice revenindu-i sarcina determinării prin măsurători a valorii acestuia, potențialul normal putând fi ușor de determinat dacă se cunoaște masa Pământului.

$$W = U_j + T_{j+1} \quad (1.27)$$

Într-o primă aproximare se poate considera că Pământul are forma unei sfere, în următoarea aproximație se poate considera un elipsoid de revoluție și așa mai departe. Forma unanim acceptată în momentul de față pentru aproximarea formei Pământului este elipsoidul de revoluție. Deși forma reală a Pământului diferă de un elipsoid, câmpul gravitației elipsoidului este fundamental pentru că el este ușor de tratat matematic și pentru că abaterile câmpului real al gravitației de câmpul elipsoidal (normal) sunt atât de mici încât ele pot fi considerate liniare.

### **1.7. Anomaliile gravitației**

Pentru diverse scopuri geofizice și geodezice, inclusiv determinarea undulațiilor geoidului gravimetric, este necesară compararea valorilor normale cu valorile măsurate, efective ale accelerației gravitației după ce se realizează, în prealabil, reducerea acestora din urmă la suprafața geoidului sau cvasigeoidului, funcție de sistemul de altitudini adoptat oficial într-o anumită țară (Ghițau, 1983).

Anomalia gravitației  $\Delta g_r^P$  în punctul P este dată de relația (Ghițau, 1983):

$$\Delta g_r^P = g - \gamma \quad (1.28)$$

indicele  $r$  indicând reducerea geofizică ce s-a aplicat la calculul gravitației reduse  $g_r^P$ .

*O anomalie gravimetrică reprezintă diferența între ce măsurăm și ce ne așteptăm să înregistrăm într-un punct dat, în ipoteza unui sferoid omogen. Gravitatea observată este corectată cu valori corespunzătoare latitudinii și cotei stației, calculate conform sferoidului de referință, cu efectul maselor aflate deasupra geoidului sau al maselor lipsă aflate sub geoid, cu efectul curburii terestre, a presiunii atmosferice etc.*

#### **1.7.1. Anomaliile Faye (în aer liber) – $\Delta g_F$**

Anomaliile gravimetrice cele mai utilizate în geodezia fizică sunt *anomaliile Faye*. Motivul utilizării frecvente a acestor anomalii în aplicațiile geodezice se explică prin efectul indirect mic prezentat de acestea.

Într-un punct P, situat pe suprafața fizică a Pământului, anomalia Faye se calculează cu relația:

$$\Delta g_F \approx g^P + 0,3086H^P - \gamma^P \quad (1.29)$$

Dependența pronunțată față de relief a anomaliilor Faye creează variații mari chiar pe zone mici, conducând la dificultăți de reprezentare și interpolare a acestora.

Prin aplicarea acestei reduceri se urmărește eliminarea efectului introdus de diferența de nivel dintre poziția reală a punctului de observație și proiecția lui pe suprafața de referință.

Dacă altitudinea  $H$  folosită este cunoscută din determinările geodezice, adică se referă la geoid și este exprimată în metri, termenul corectiv rezultă în miligali.

## 1.7.2. Anomaliile Bouger

### 1.7.2.1. Anomaliile Bouger incomplete - $\Delta g_{BI}$

Într-un punct  $P$ , situat pe suprafața fizică a Pământului, anomalia Bouger incompletă se calculează cu relația:

$$\Delta g_{BI}^P \approx g^P - 2\pi G\rho H^P - \gamma^P \quad (1.30)$$

### 1.7.2.2. Anomaliile Bouger complete - $\Delta g_{BC}$

Într-un punct  $P$ , situat pe suprafața fizică a Pământului, anomalia Bouger completă se calculează cu relația:

$$\Delta g_{BC}^P \approx g^P + 0,3086H^P - 2\pi G\rho H^P - \gamma^P = \Delta g_F - 2\pi G\rho H^P \quad (1.31)$$

### 1.7.2.3. Anomaliile Bouger perfecționate (simple) - $\Delta g_{BP}$

Într-un punct  $P$ , situat pe suprafața fizică a Pământului, anomalia Bouger perfecționată se calculează cu relația:

$$\Delta g_{BP} = \Delta g_F - 2\pi G\rho H^P + c^P \quad (1.32)$$

unde  $c^P$  reprezintă corecția de relief.

## 1.8. Suprafețe de nivel și linii de forță

Relativ la direcția vectorului gravitației, un punct  $P$  se poate deplasa pe o infinitate de direcții două fiind importante pentru geodezie:

a) Punctul  $P$  se deplasează pe o direcție perpendiculară pe direcția gravitației

În acest caz, unghiul făcut de vectorul gravitației cu direcția de deplasare a lui  $P$  este un unghi drept deci:

$$\cos(\vec{g}, \vec{s}) = 0 \quad (1.33)$$

Diferența potențialului gravitației pe orice direcție este numeric egală cu component gravitației pe acea direcție, se deduce că:

$$W(x, y, z) = \text{constant} = C \quad (1.34)$$

Expresia (1.28), reprezintă ecuația unei suprafețe echipotențiale, denumită, de către Laplace, *suprafață de nivel*. Rezultă că suprafața de nivel este perpendiculară, în oricare din punctele sale, pe direcția gravitației. Schimbându-se valoarea constantei  $C$  se obțin diverse suprafețe de nivel.

**Suprafața de nivel** este o suprafață echipotențială care are proprietatea că în orice punct al ei forța gravitației este îndreptată după normal la această suprafață, componentele orizontale ale acestei forțe fiind nule.

Din infinitatea de suprafețe de nivel posibile, pentru geodezie prezintă o importanță deosebită suprafața de nivel zero, denumită **geoid**, noțiune propusă de Gauss ca figură matematică a Pământului.

$$W(x, y, z) = W_0 \quad (1.35)$$

Suprafețele de nivel din interiorul Pământului depind de distribuția și densitatea maselor din interiorul Pământului definirea matematică a suprafeței de nivel fiind practice imposibilă.

Pornind de la definiția suprafeței de nivel ca fiind suprafața unui lichid în stare liniștită, **geoidul** este definit ca fiind suprafața medie a mărilor și oceanelor aflate în stare liniștită prelungită pe sub continente.

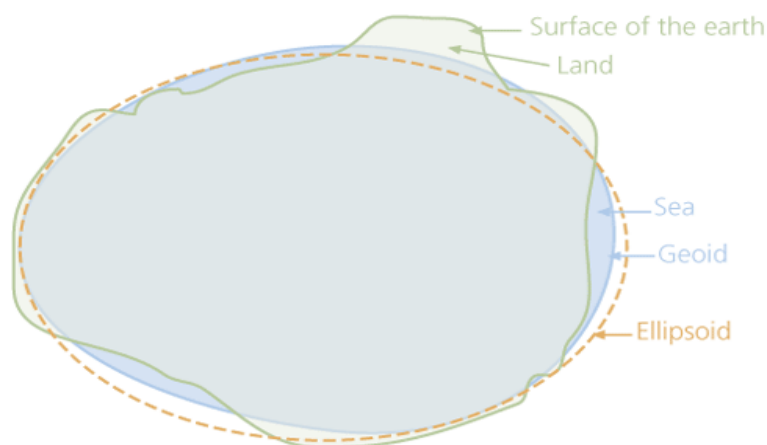


Fig. 1.8: Geoidul

Astfel, trebuie amintită prima definiție a geoidului dată de Gauss în lucrarea ”Bestimmung des Breitenunterschiedes zwischen den Sternwarten von Göttingen und Altona”, la Göttingen în anul 1828:

”Ceea ce numim suprafață a pământului în sens geometric, nu este altceva decât suprafața care intersectează direcția gravitației sub unghiuri drepte în orice punct, și aceasta coincide, în unele zone, cu suprafața mărilor și oceanelor.”

Ecuatorul geoidului este curba definită ca fiind locul geometric al punctelor pentru care latitudinea astronomică  $\Phi$  este zero. Paralelul, respectiv meridianul geoidului sunt definite de ecuațiile:  $\Phi = \text{constant}$ , respectiv,  $\Lambda = \text{constant}$ ,  $\Lambda$  fiind longitudinea astronomică.

Suprafața geoidului este una neregulată în comparație cu cea a elipsoidului de rotație, frecvent utilizat în aproximarea formei Pământului, dar considerabil mai netedă decât suprafața fizică terestră. În timp ce ultima are variații de la peste 8 km (Muntele Everest) la – 11 km (Groapa Marianelor), geoidul variază doar cu  $\pm 100$  m față de elipsoidul de rotație (figura 1.9).

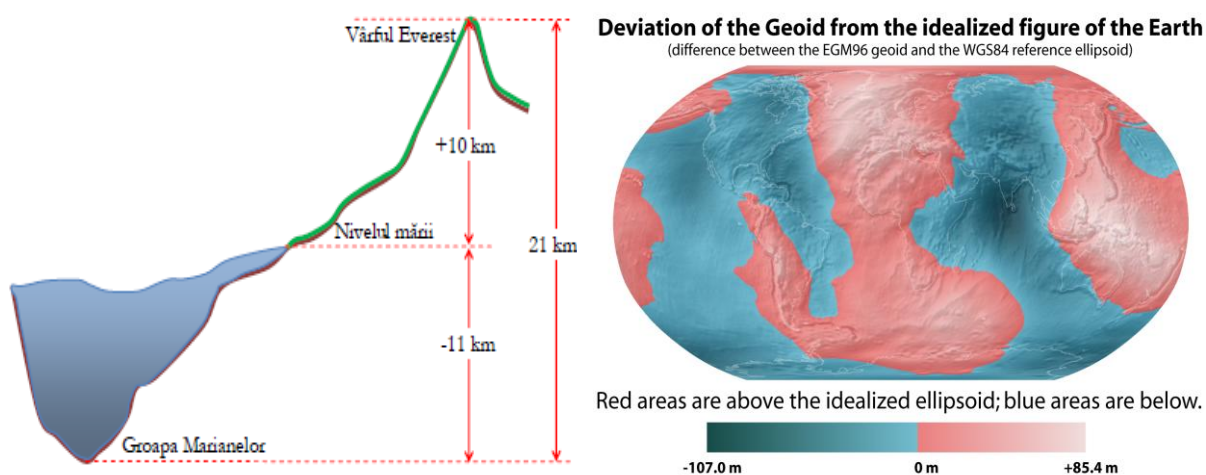


Fig. 1.9: Variația suprafeței terestre (stânga) și variația geoidului față de elipsoidul de rotație (dreapta)

Cvasigeoidul este o suprafață introdusă de Molodenski (1960) ca o soluție practică la problemele ce trebuie rezolvate în geodezie.

Altitudinea cvasigeoidală, cunoscută ca anomalia altitudinii, notată cu  $n'$  (figura 1.10) poate fi calculată, teoretic, exact. Cvasigeoidul este suprafața astfel construită încât segmentul de normală la elipsoid să fie egal cu anomalia altitudinii în orice punct în care se cunoaște această cantitate.

Pe suprafețe acvatice întinse cvasigeoidul coincide cu geoidul, sub continente existând diferențe datorate structurii interne a Pământului.

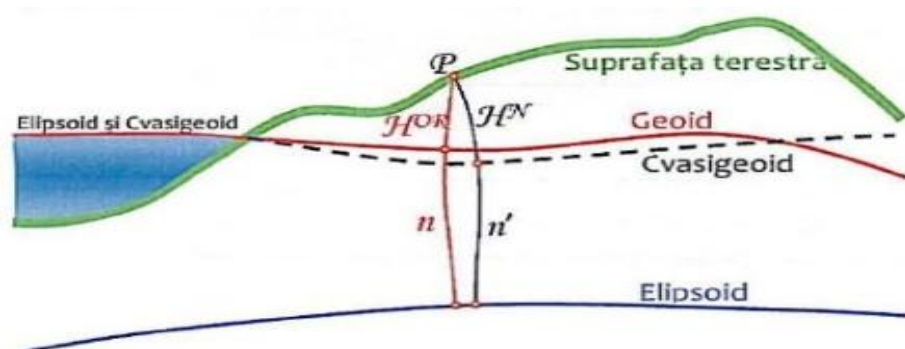


Fig. 1.10: Cvasigeoid

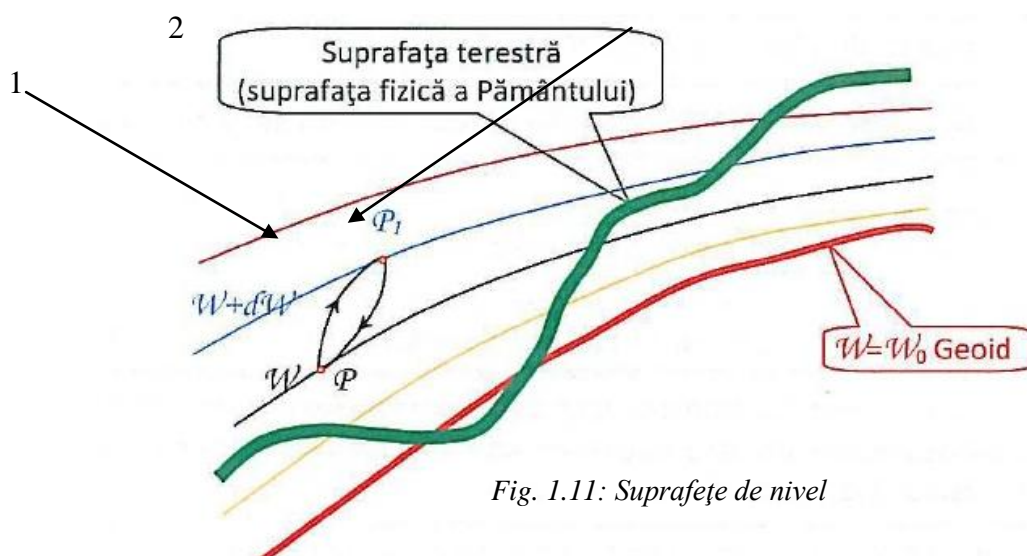
Deși cvasigeoidul nu poate fi definit fizic, așa cum este definit geoidul, el este totuși utilizat de multe țări ca suprafață de referință pentru altitudini. Sistemul de altitudini care utilizează această suprafață de referință este sistemul de altitudini normale; sistem utilizat oficial în țară noastră.

**Scopul principal al geodeziei fizice este determinarea suprafețelor de nivel ale câmpului gravific al Pământului, deci determinarea funcției potențial  $W(x,y,z)$ .**

Deoarece suprafețele de nivel sunt suprafețe echipotențiale, diferența de potențial dintre două suprafețe de nivel este o mărime constantă. Rezultă că, creșterea de potențial nu depinde de drumul parcurs, pentru trecerea unui punct de pe o suprafață de nivel pe alta (traseul 1 sau traseul 2 din figura 1.10).

Prin urmare, suma creșterilor de potențial pe un contur închis, indiferent de sensul de parcurgere, este zero:

$$\oint dW = 0 \quad (1.36)$$



b) Când punctul P se deplasează pe direcția verticalei, adică pe direcția vectorului gravitației, deci unghiul dintre cele două direcții este zero deci:

$$\cos(\vec{g}, \vec{h}) = \pm 1 \quad (1.37)$$

Pentru depărtarea dintre suprafețele de nivel se alege sensul crescător spre exteriorul suprafeței Pământului (sensul invers forței  $\vec{g}$ ), se va lua semnul minus. Cu aceasta, se obține:

$$\frac{dW}{dh} = -g, \quad (1.38)$$

sau:

$$dh = -\frac{dW}{g}, \quad (1.39)$$

unde  $dh$  reprezintă distanța dintre suprafețele de nivel caracterizate prin potențialele  $W$  și respectiv  $W+dW$ .

Relațiile (1.38) și (1.39) reprezintă un exemplu de legătură dintre aspectul geometric ( $h$ ) și cel dinamic ( $W$ ) în cadrul problematicii abordate în geodezia fizică.

Deoarece  $g_{ec} < g_{pol}$ , rezultă că distanța dintre două suprafețe de nivel se micșorează de la ecuator spre poli, deci suprafețele de nivel nu sunt paralele între ele.

Din relația (1.36) se mai poate deduce o proprietate importantă a suprafețelor de nivel: deoarece între două suprafețe de nivel,  $g$  nu poate lua niciodată valoarea infinit, rezultă că distanța  $dh$ , dintre aceste suprafețe nu poate fi niciodată zero. Aceasta înseamnă că suprafețele de nivel nu se ating și nu se întretaie niciodată. Se poate demonstra că suprafețele de nivel sunt suprafețe continue, închise, fără muchii sau vârfuri. Rezultă că liniile care intersectează suprafețele de nivel sub unghiuri drepte, vor avea o anumită curbură. Ele se numesc *linii de forță sau linii ale firelor cu plumb*. O imagine aproximativă, a suprafețelor de nivel și a liniilor de forță este reprezentată în figura (1.11).

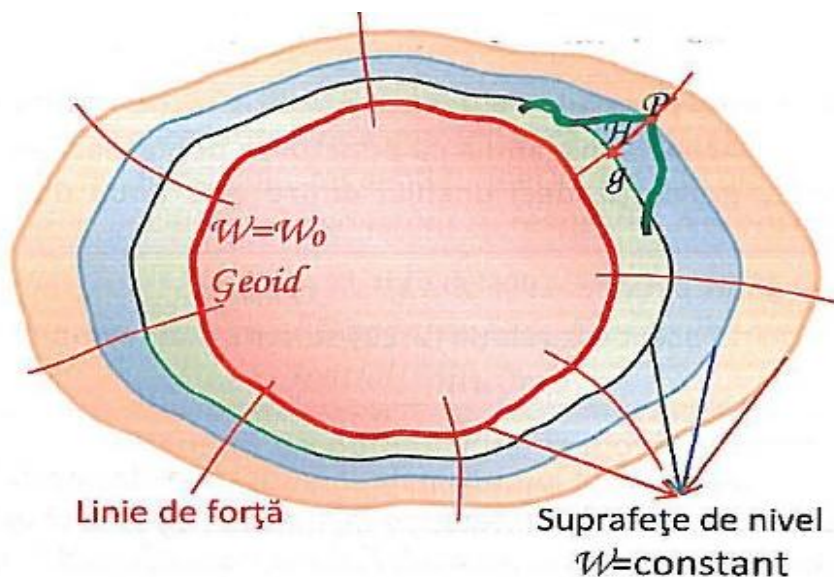


Fig. 1.12: Suprafețe de nivel și linii de forță



Din cele prezentate până acum se poate desprinde următoarea concluzie: Vectorul gravitației, în orice punct, este tangent, în acel punct, la linia de forță deci "direcția vectorului gravitației", "verticala" și "direcția firului cu plumb" sunt sinonime.

Deoarece suprafețele de nivel sunt "văzute" ca fiind orizontale oriunde pe suprafața terestră ele au o contribuție esențială la definirea noțiunii "orizontal" și la importanța geodezică a liniei firului cu plumb.

Altitudinea  $H$  a unui punct deasupra nivelului mării se numește altitudine ortometrică și se măsoară în lungul liniei curbate a firului cu plumb de la geoid spre punctul considerat. Asta înseamnă că sensul de măsurare al altitudinii este opus celui gravitației.

Geoidul are un o semnificație deosebită în geodezie deoarece măsurătorile din acest domeniu, chiar și cele satelitare, sunt raportate aproape în exclusivitate la sistemul suprafețelor de nivel și a liniilor firelor cu plumb.

## CAPITOLUL 2

### TEHNICI ȘI TEHNOLOGII DE MĂSURARE

În primul capitol au fost prezentate în detaliu câteva din noțiunile teoretice de bază ale Geodeziei Fizice iar ca o concluzie, mărimile care formează obiectul determinărilor gravimetrice sunt:

1. accelerația gravității  $g$
2. variații ale accelerației gravității  $\Delta g$
3. derivatele de ordinul 2 ale geopotențialului

În prezent determinările gravimetrice au atins parametri foarte înalți de precizie:

- măsurătorile în puncte staționare, în condiții deosebite de lucru în laborator, destinate etalonărilor sau determinărilor mareelor terestre au precizie cuprinsă între  $\pm 0.001$  mgal și  $\pm 0.005$  mgal
- măsurătorile de teren sunt caracterizate de erori cuprinse între  $\pm 0.01$  mgal și  $\pm 0.05$  mgal.

#### **2.1. Metode de determinare a gravității**

Observațiile gravimetrice se împart în 4 categorii importante, funcție de mediul în care au loc, și-anume:

##### **2.1.1. Determinări terestre**

Acestea presupun amplasarea unui gravimetru pe un punct materializat la sol și efectuarea unor serii de observații. Măsurătorile gravimetrice terestre sunt de două tipuri: absolute și relative.

1. Cele *absolute* se efectuează independent în puncte staționare (puncte de bază), sunt mai laborioase, deoarece gravimetrul absolut, cu care se execută aceste măsurători, este un aparat complicat și cu multe accesorii. Punctele gravimetrice absolute trebuie să fie amplasate în zone foarte stabile din punct de vedere seismic, cât mai departe de orice sursă de vibrații (trafic de autovehicule grele, tramvaie, trenuri etc.).
2. *Măsurătorile gravimetrice relative* sunt reprezentate de determinările de variații ale accelerației gravității în raport cu un punct de bază și au, în principiu, același mod de execuție ca și cele de nivelment:

- se execută în cadrul unor bucle
- se pleacă de la o stație de referință, unde se cunoaște valoarea absolută a gravității
- se fac măsurători de gravitate cu gravimetrul relativ în punctele buclelor.

*Bucla* este alcătuită din mai multe stații gravimetrice în care se determină diferențele de gravitație de către același operator utilizând același instrument. Se pornește de la un punct de gravitate cunoscută și se fac determinări relative la această valoare în restul stațiilor pentru ca în final ‘drumuirea’ să se închidă pe punctul de plecare. După cum se poate observa din figura de mai jos, există mai multe modalități de executare a buclelor:

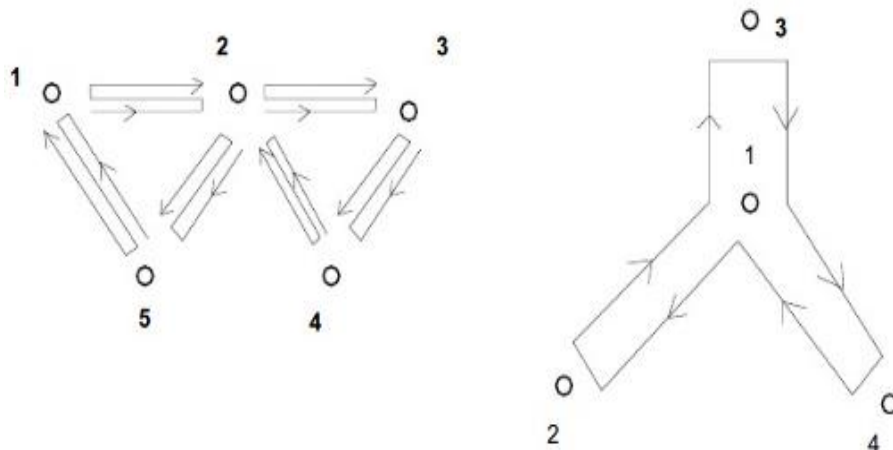


Fig. 2.1: Succesiunea 1-2-1, 2-3-2 ș.a.m.d (stânga); Succesiunea 1-2-1-3-1-4-1

Pentru punctele în care s-au executat măsurătorile este necesar să se cunoască coordonatele și altitudinea. Coordonatele pot fi determinate cu ajutorul unui receptor GPS, măsurătoarea executându-se simultan cu cea a gravității. Altitudinea poate fi determinată folosindu-se un receptor GPS și un model geoidal aproximativ sau poate fi culeasă de pe hartă.

### 2.1.2. Anomaliile gravității obținute prin măsurători pe platforme marine

Măsurătorile gravimetrice efectuate în zonele marine pe platforme instalate pe vapoare ridică probleme deosebite și au ca sursă primară de erori accelerațiile dinamice și deplasarea instabilă a vapoarelor. Aceste măsurători au în general o precizie de ~ 1-2 mgal, cu un ordin de mărime mai mic decât cele terestre. În plus, datele obținute prin această metodă au o rezoluție spațială limitată și tind să fie concentrate în anumite zone.

### 2.1.3. Anomaliile gravității obținute prin măsurători pe platforme aeriene

Principiul acestor metode de măsurare vor fi detaliate la subpunctul 2.3. unde va fi prezentată misiunea GRAV-D prin care SUA dorește să redetermine datumul vertical pe teritoriul întregii țări.

#### **2.1.4. Anomaliile gravitației obținute din gradiometria satelitară**

Conceptual, *gradiometria satelitară* constă în faptul că în locul gravitației absolute se observă gradientul gravitației. În esență, aceasta reprezintă determinarea diferențelor de gravitate între două puncte, eliminându-se astfel o serie de erori.

Gradiometria satelitală are două variante:

- urmărirea unui satelit față de altul (Satelite – to – Satellite Traking, SST)
- utilizarea unui gradiometru dedicat la bordul satelitului

Metodele SST pot utiliza urmărirea jos-jos (Satelite – to – Satellite Traking in Low-Low Mode, LL-SST), unde doi sateliți aflați pe o orbită joasă în jurul Pământului se urmăresc unul pe celălalt pentru a se determina gradientul gravitației, sau urmărirea sus-jos (Satelite – to – Satellite Traking in High-Low Mode, HL-SST), unde gradientul gravitației poate fi dedus.

O expunere mult mai detaliată se găsește la subpunctul 2.3. unde sunt exemplificate misiunile GRACE, GOCE și CHAMP.

### **2.2. Echipamente utilizate**

Istoria măsurătorilor gravitației datează din 1604 atunci când Galileo Galilei a făcut experimente prin care urmărea să înțeleagă forța care determină corpurile să cadă pe Pământ.

Instrumentele pentru măsurarea gravitației pot fi grupate în trei clase:

- aparate pendulare - în care perioada de oscilație a pendulului este invers proporțională cu  $g$
- gravimetre statice - bazate pe sisteme elastice în care extensia resortului este proporțională cu  $g$
- gravimetre absolute - bazate pe măsurarea timpului de cădere liberă pe o distanță fixată, a unei mase aflate într-un tub vidat.

#### **2.2.1. Pendulul**

Metoda de măsurare a accelerației gravitaționale ‘ $g$ ’ cu pendulul a fost introdusă pentru prima dată de Huygens în 1656, care a fost atras de simplitatea utilizării și de amplitudinea aproape independentă a perioadei de oscilație. Un pendul ideal (matematic) este reprezentat de un punct material suspendat într-un punct fix prin intermediul unui fir inextensibil care execută o mișcare de oscilație în planul vertical al punctului de suspensie, exclusiv sub influența gravitației. Un pendul real (fizic) este reprezentat de un corp material, nedeformabil, care oscilează în vid, în jurul unei axe fixe, orizontale sub influența gravitației. Condiția de oscilație a pendulului fizic este ca axa de suspensie să nu treacă prin centrul de greutate  $G$  al corpului, ci să fie situată deasupra lui.

Până la sfârșitul secolului XVIII toate determinările cu pendulul au fost de tip absolut, acest lucru presupunând o procedură anevoioasă și complicată. Pentru istoria gravimetriei merită amintite determinările făcute de Kuhn și Furtwangler între 1898 și 1904 la Potsdam folosite la implementarea Sistemului Gravimetric Potsdam (1908) extins la nivel global. Cu toate că observațiile au durat multe zile, datumul Potsdam a avut o eroare sistematică destul de importantă descoperită însă câțiva ani mai târziu. Anul 1817 a adus o descoperire importantă în domeniu, *pendulul reversibil* (pendul cu două axe paralele de suspensie, respectiv de oscilație, care sunt interșanjabile). În secolul XIX au apărut pendule utilizate în determinări relative ale accelerației gravitației. Materialele din care sunt confectionate (invar sau cuarț) au un coeficient de dilatare mic, astfel încât în exploatare se asigură o deosebită constanță în timp a parametrilor funcționali ai pendulelor în comparație cu gravimetrele. Totuși, pendulele se întrebuițesc extrem de puțin în comparație cu gravimetrele pentru asemenea scopuri. Această situație este condiționată în principal de următorii factori:

- precizia de determinare mult mai ridicată a gravimetrelor
- timpul necesar unei determinări cu gravimetrul este de circa 3 – 4 minute, sau mai mic. O determinare completă cu pendulul, într-un punct, durează cel puțin de 8 ore.

Atât pendulele absolute cât și cele relative au fost folosite până în 1940 în condiții de laborator, de teren, pe apă sau submarin.

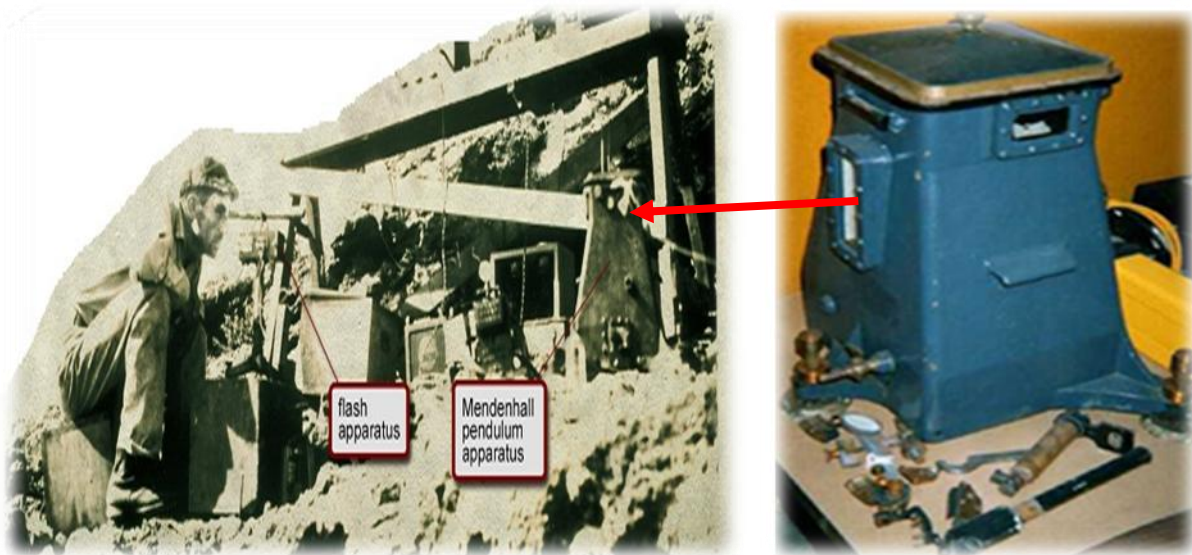


Fig. 2.2: Pendulul Mendenhall în timpul unei determinări (Hawaii, 1928)

### 2.2.2. Gravimetru

Gravimetrele moderne sunt gravimetre mecanice, al căror sistem de funcționare se bazează pe posibilitatea de constatare a unor modificări în stare de echilibru a unui sistem deformabil (resorturi, sisteme de resorturi sau sisteme de torsiune), în funcție de variațiile accelerației gravitației. Variația deformării sistemului elastic este pusă în evidență de un sistem indicator. Exigențele de determinare cu un gravimetru sunt reflectate de erori de măsurare de ordinul a  $\pm 0.01$  mgal sau și mai mici. Această precizie de măsurare deosebită este însoțită de alte calități remarcabile: construcție robustă, greutate mică, ușurință de manipulare chiar în puncte greu accesibile și în condiții dificile de exploatare.

Una dintre clasificările uzuale ale gravimetrelor este următoarea:

**a. Gravimetre statice cu sistem elastic din cuarț** - nu măsoară valori absolute ale gravitației ci numai diferențe ale gravitației între două puncte; principiul de funcționare al unui asemenea gravimetru se bazează pe un resort de lungime zero confecționat din sticlă de cuarț topită. Extensia resortului trebuie să fie corelată cu forța gravitațională într-o manieră previzibilă, de obicei liniară. Dimensiunea și proprietățile elastice ale resortului limitează intervalul de măsură al unui asemenea gravimetru la cca 140-200mgal, motiv din care în construcția sistemului elastic este inclus un șurub de resetare a intervalului de măsură pentru a acoperi variațiile globale ale gravitației. Primele astfel de gravimetre au apărut în anii '30, erau controlate termostatic și aveau drifturi instrumentale destul de mari. În prezent gravimetrele produse de Scintrex (CG-3 și CG-5) se bazează pe un astfel de sistem elastic. Dezavantajele unui astfel de gravimetru este că sistemul elastic este casant și foarte sensibil la șocuri mecanice și driftul instrumental e relativ mare.



Fig. 2.3: Gravimetrul Scintrex CG-3

**b. Gravimetre statice cu sistem elastic din metal** - similare cu cele din cuarț dar cu resortul principal din metal. Au fost dezvoltate de firma Lacoste-Romberg, au un interval de măsură foarte larg (7000 mgal), drift instrumental mult mai mic. Factorul de scară nu mai variază liniar ci după o curbă ușor parabolică, în locul unei singure constante instrumentale aparatele sunt livrate cu un tabel cu valori de scală pentru intervale de 100 mgal. Resortul metalic este mai sensibil la variațiile de temperatură, motiv din care gravimetrele sunt menținute în incinte termostatate la temperaturi de cca 50 °C. Un astfel de gravimetrul este prezentat în paginile următoare.

**c. Gravimetre absolute** - după ce măsurătorile cu aparate pendulare nu au reușit să atingă o acuratețe satisfăcătoare, cercetătorii s-au concentrat pe dezvoltarea unor instrumente bazate pe cădere liberă, folosind tehnologii noi ca lasere și ceasuri atomice. Masa în cădere este reprezentată de un cub lăsat să cadă într-o cameră vidată. Oglinzi plasate în colțurile cubului reflectă o lumină laser în poziții prestabilite în traiectoria de cădere, distanța parcursă fiind calculată prin interferometrie. Seturi de 10 sau mai multe determinări succesive dau o valoare medie a accelerației gravitaționale, (citiri mai multe acuratețe mai bună).

#### **2.2.2.1. Gravimetrele LaCoste and Romberg**

Aceste gravimetre, existente pe piață încă din 1939, au majoritatea componentelor din metal sunt mult mai robuste decât aparatele cu cuarț topit. Datorită faptului că dilatația și contracția termică a metalelor sunt în general mai mari decât a cuarțului, aparatele LaCoste & Romberg trebuie foarte bine termostatzate. Cu unele perfecționări s-a ajuns ca și în condiții de teren să se atingă o precizie de  $\pm 0.003$  mgal. În înregistrările continue, pentru studierea fenomenelor de maree terestre, în condiții speciale de exploatare, precizia de determinare este de ordinul a  $\pm 0.001$  mgal. O caracteristică remarcabilă a acestui gravimetru se referă la driftul instrumental extrem de mic, de numai 0.5 mgal/lună, în comparație cu majoritatea gravimetrelor care au un drift de 0.06 mgal/oră.

Proiectarea aparatului îi permite să fie foarte sensibil la variații mici de gravitate. Schema simplificată a aparatului arată o masă la capatul unei tije orizontale. La celălalt capăt al tije se găsește o pereche de fire fine și resorturi din metal care acționează ca o articulație lipsită de frecare pentru această tijă. Rolul resorturilor articulare este să ajute la eliminarea avariilor aparatului suferite în cazul celor mai puternice șocuri.

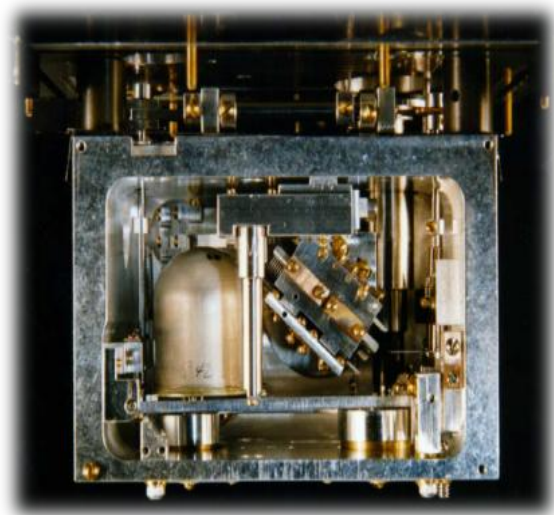
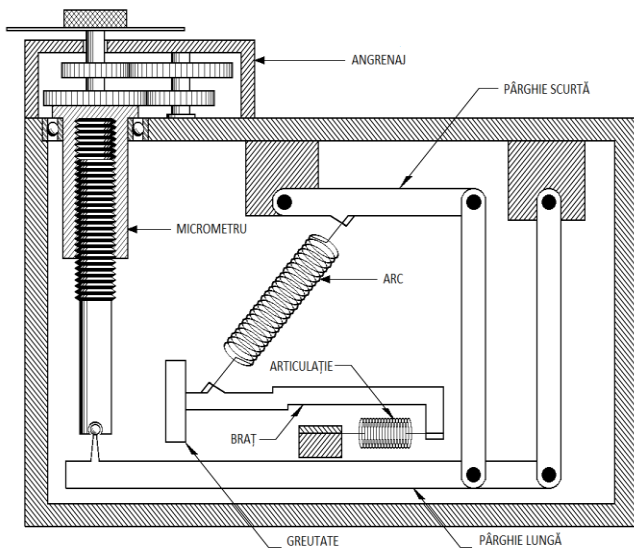


Fig. 2.4: Schema de funcționare (stânga), interiorul unui gravimetru (dreapta)

Erorile care pot afecta determinările cu gravimetrul :

- *influența orizontalității gravimetrelor.*

Relațiile referitoare la funcționarea sistemelor elastice ale gravimetrelor sunt deduse în ipoteza unei poziții corecte de lucru. O primă operațiune la fiecare determinare este orizontalizarea instrumentului, sau mai corect, aducerea în poziție verticală a axei sale principale.

- *influența factorilor atmosferici*

Factorii atmosferici, în mod deosebit presiunea atmosferică, determină apariția unei erori de măsurare care se poate realiza prin utilizarea unor materiale cu densitate foarte mare (efectul limitat)

- *influența variațiilor de temperatură*

Variațiile de temperatură au efect asupra sistemului elastic, chiar și la gravimetrele foarte perfecționate. Gravimetrele LaCoste Romberg, având majoritatea componentelor metalice, au nevoie de o termoizolare perfectă pentru a nu fi afectate de variația temperaturii.

- *reducerea de drift*

Modificarea în timp a proprietăților elastice ale sistemelor deformabile conduce la apariția unor erori care au semnificația unor deplasări ale punctului zero al gravimetrului. Acestea se numesc **erori de mers sau de derivă sau de drift instrumental**. Datorită calității constructive a gravimetrelor, aceste erori sunt mici, însă reducerea de drift se aplică în cazul majorității instrumentelor cunoscute.



La momentul actual, gravimetrele LaCoste Romberg sunt cele mai utilizate, oferă posibilitatea determinărilor absolute și relative, pot fi amplasate pe platforme marine sau aeriene, funcționează perfect în cele mai grele condiții de teren și oferă, după cum s-a văzut, o precizie mai mult decât bună.



Fig. 2.5: Modelul A20 la  $-40^{\circ}\text{C}$  (Alaska, 2002); Modelul A10 la  $+47^{\circ}\text{C}$  (Australia)

#### 2.2.2.2. Gravimetrul INO Scintrex

Acest model folosește senzori de cuarț încorporați într-un sistem submersibil. INO are la bază un sistem electronic avansat cu un software prietenos prin intermediul căruia sunt prelucrate date culese pe fundul oceanului. Modelul rezistă până la o adâncime maximă de 600 m datorită sferei de aluminiu cu care este protejat și care asigură legătura prin cabluri cu vasul de la suprafață.

Cu o pregătire de doar câteva zile utilizatorul poate colecta și înregistra rapid datele gravimetrice. Un alt avantaj constă în compensarea automată: pe baza senzorilor electronici, INO poate să compenseze măsurătorile în ceea ce privește influența neorizantalizării aparatului odată amplasat pe fundul apei (precizia  $\pm 0.005$  mgal iar driftul  $\pm 0.02$  mgal/zi).

Aplicabilitate:

- explorări petroliere și gazeifere. Gravitatea poate fi utilizată la determinarea localizării domurilor de sare care pot conține pungi de petrol sau gaze.
- cartare geologică. Gravitatea poate fi folosită la completarea hărților geologice marine.
- geotehnică. Gravitatea poate fi folosită la determinarea masei investigate.



Fig. 2.6: Sistemul de control (stânga), sfera de aluminiu cu gravimetrul (mijloc) și vasul-mamă (dreapta)

### 2.2.3. Platformele aeriene

În 1965 LaCoste&Romberg a introdus primele platforme gravimetrice stabile pe apă și în aer. Acestea au revoluționat geofizica făcând posibile determinările de mare precizie de pe o platformă marină și aeriană mobilă. De atunci, peste 100 de astfel de instrumente au navigat sau zburat în jurul lumii înregistrând milioane de ore de observații. În 2005, LaCoste și Romberg au fuzionat cu Micro-g Solutions formând Micro-g LaCoste, liderul mondial pe piața gravimetrelor disponibile determinărilor aeriene și mobile. O astfel de platformă aeriană este folosită de către National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA în misiunea GRAV-D (Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum) prin care statul american urmărește redeterminarea datum-ului vertical național până în anul 2020.

Sistemul este alcătuit din avionul Cessna Citation II CE-550 și gravimetrul Micro-g LaCoste TAGS (Turn-key Airborne Gravimetry System). TAGS este un echipament modern cu o precizie de 0.001mgal, cu accelerometru orizontal și control computerizat obținând un volum de date însemnat. Pe lângă acest gravimtru, avionul mai este dotat și cu o antenă GPS absolut necesară pentru determinarea poziției și care înregistrează semnale atât de la sateliți cât și de la receptoarele de la sol amplasate în puncte cunoscute.

Datele pot fi structurate astfel:

- poziționare
  - latitudine, longitudine, altitudini elipsoidale, adițional și coordonatele geocentrice X,Y,Z în sistemul de referință WGS'84
  - viteza și accelerația avionului
- orientare (IMU – Inertial Measurement Unit):
  - unghiul de rotație în jurul axei longitudinale a avionului (axa fuselajului), unghiul de rotație în jurul axei aripilor și unghiul de rotație în jurul axei verticale
  - accelerația longitudinală și transversală a platformei
- componentele gravimetrice:
  - gravimetrul TAGS cu toate componentele sale
- metadate:
  - tija de legătură între antena GPS și gravimetrul
  - distanța verticală de la gravimetrul la punctul de la sol în care se determină g
  - gravitatea la nivelul punctului de la sol

Produsul final va consta în obținerea valorilor gravității în lungul liniilor de zbor. Acest lucru va fi explicat în subpunctul destinat misiunii GRAV-D.

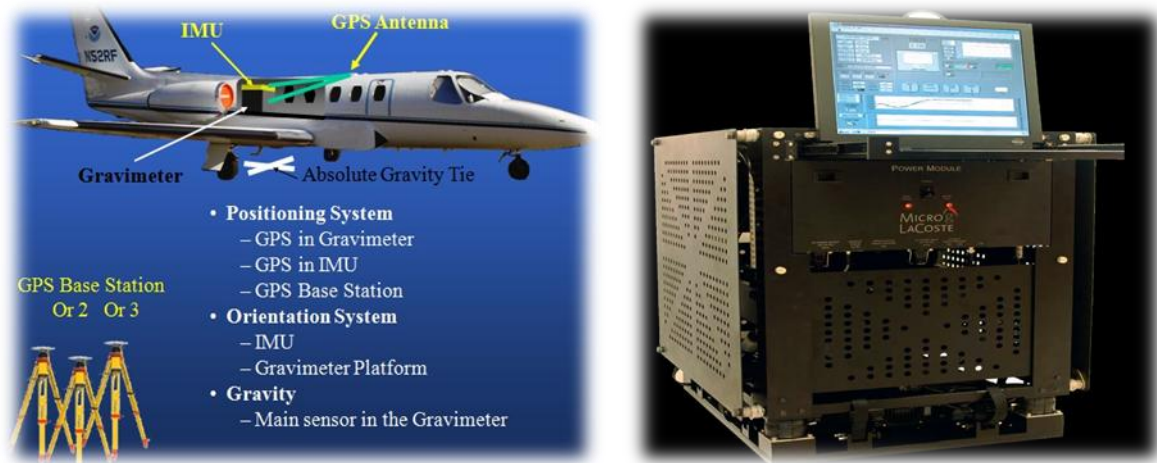


Fig.2.7: Echipamentele sistemului utilizat în misiunea GRAV-D

Așa cum se cunoaște, orice proces de măsurare este afectat de diverse erori. În acest caz cea mai importantă eroare este determinată de neorizantalitatea gravimetrului iar  $g^{\text{măsurat}} < g^{\text{real}}$ . Există două moduri de corecție:

- determinarea unghiului de înclinare în funcție de accelerație longitudinală a platformei
- utilizarea diferenței dintre accelerația înregistrată de avion și de gravimetrul

#### 2.2.4. Sateliții

O altă metodă foarte precisă de achiziție a gravității constă în utilizarea sateliților. Pe scurt, satelitul este urmărit de la sol pentru a cunoaște distanța care îl desparte de receptoarele instalate pe suprafața terestră. Dacă cunoaștem poziția satelitelui într-un sistem de referință cunoaștem și poziția noastră în același sistem. Pentru o locație exactă a satelitelui avem nevoie și de câmpul gravific al planetei, factor esențial în determinarea orbitelor. În consecință, putem utiliza orbitele observate la o constrângere mai bună a câmpului gravific. Mai mult, prima utilitate a sateliților a fost să ofere informații mai bune despre gravitate. Pe măsură ce datele culese s-au îmbunătățit, erorile orbitale s-au micșorat suficient de mult încât să permită determinarea variațiilor în rotația pământului chiar mai bine decât metodele astronomice.

Pentru maximizarea eficienței acestei metode în cadrul aplicațiilor gravimetrice, orbita sateliților trebuie să aibă o *înclinație* mare (unghiul făcut de planul orbital cu planul ecuatorului) care permite satelitelui să fie vizibil o perioadă mai îndelungată de stațiile de la

sol. Orbitele cu un unghi de înclinație de  $90^\circ$  se numesc orbite polare și reprezintă o caracteristică a sateliților 'joși' (Low Earth Orbit – LEO) după cum vom putea vedea în subpunctul 2.3. unde sunt descrise câteva misiuni satelitare gravimetrice. Singura diferență este că pe orbita polară sateliții circulă pe direcția nord-sud (fața de obișnuita direcție est-vest), Pământul se învâрте pe direcția est-vest. În acest fel, un satelit pe orbita polară poate scana întreaga suprafață a Pământului acoperind pe rând cate o fâșie ca la sfârșit să fie tot.

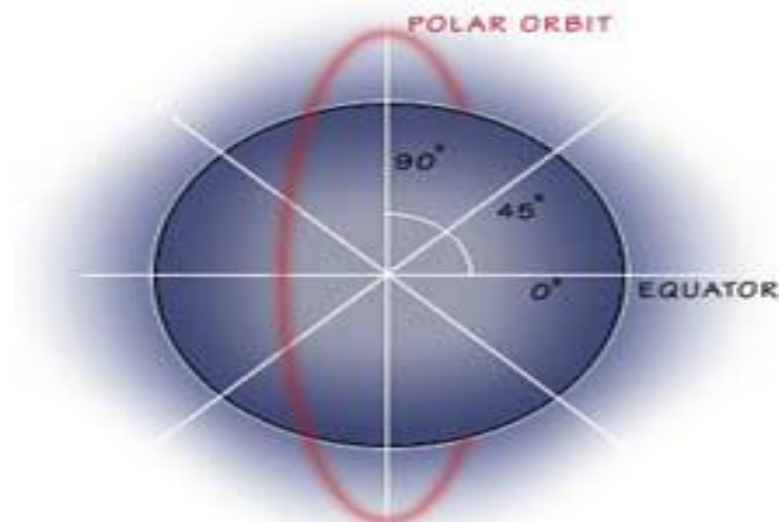


Fig. 2.8: Orbită polară

Înainte de folosirea informațiilor oferite de orbite în determinarea câmpului gravific trebuie luate în considerare și câteva efecte orbitale non-gravitaționale:

a. *atracția atmosferică*

Se poate micșora influența ei amplasând sateliții pe orbite înalte, unde nu se mai găsesc straturi atmosferice. Pe de altă parte, dacă obiectivul nostru este să învățăm cât mai multe despre câmpul gravific, atunci trebuie să fim cât mai aproape de suprafața terestră.

b. *presiunea radiațiilor solare*

Foarte dificil de eliminat; se utilizează fie un procedeu empiric fie filtrarea lor.

c. *distribuția neuniformă a gravității pe suprafața satelitului*

Un satelit nu este un punct de masă uniformă iar gravitatea variază pe suprafața lui. Acest lucru duce la vibrarea satelitului (ușoare abateri de la traiectoria aleasă) și implicit la perturbații în determinările gravitaționale. Cea mai bună soluție presupune folosirea unor sateliți cu formă sferică, lucru imposibil de cele mai multe ori.

Modul în care funcționează sateliții care au drept misiune determinarea câmpului gravific va fi expus în cele ce urmează.

### **2.3. Misiuni gravimetrice**

Misiunea centrală a geostiintelor pentru următorul deceniu va consta în studierea și înțelegerea Pământului ca un întreg: un sistem compus din părți solide, părți lichide și părți gazoase care prezintă variații spațiale și temporale și între care au loc interacțiuni complexe. Un astfel de sistem are nevoie un studiu amănunțit al fenomenelor care se produc în interiorul și între componentele sale iar datele necesare pot fi achiziționate doar de către sateliți cu orbite joase ( Low Earth Orbite – LEO) care prezintă totuși neajunsuri în ceea ce privește altitudinea. Combinația între determinările satelitare globale și determinările la sol reprezintă cea mai bună soluție. Mai concret, datele colectate de sateliți sunt utile pentru o reprezentare de bază, globală a câmpului gravitațional al planetei iar dacă se adaugă măsurătorile gravimetrice terestre și determinările altimetrice de – a lungul suprafeței mărilor și oceanelor se obține o reprezentare mult mai detaliată și precisă a câmpului gravitațional. Pentru o înțelegere mai bună a celor enunțate mai sus, urmează să fie prezentate 3 misiuni satelitare ce urmăresc determinarea câmpului gravitațional și campania GRAV-D:

#### **2.3.1. Misiunea CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload)**

GFZ Potsdam (Centrul Geofizic Potsdam), în iulie 2000, a lansat această misiune ale cărei *obiective* principale sunt:

- cartografierea câmpului gravitațional și variațiile sale temporale cauzate de atmosferă, marea oceanice și schimbări ale nivelului mărilor datorate topirii ghețarilor
- crearea profilului ionosferei și troposferei pe baza semnalului GPS refractat

#### ***Arhitectura sistemului:***

- 1 satelit LEO amplasat pe o orbită aproape circulară ( $e < 0.00004$ ) și polară ( $i = 89^\circ$ )
- altitudine de 454 km optimă pentru determinarea câmpului magnetic și gravitațional
- durata de viață a satelitului estimată la 5 ani
- greutatea satelitului în jur 522 kg, lungime 8.3 m

Pentru acuratețea determinării câmpului gravitațional satelitul CHAMP ar trebui să fie amplasat la o altitudine cât mai mică însă acest neajuns va fi eliminat odată cu trecerea timpului datorită forței de atracție exercitată de Pământ.

Pentru îndeplinirea obiectivelor stabilite, satelitul CHAMP are următoarele *dotări*:

- un receptor GPS de dublă frecvență pentru determinarea orbitei pe baza observațiilor cu coduri și faze

- un accelerometru 3D pentru a măsura accelerația nongravitațională produsă de presiunea radiațiilor solare, frecarea cu aerul etc.
- echipamente pentru determinarea densității ionilor și câmpului electric

**Principiul de măsurare** se bazează pe conexiunea satelit – satelit în modul ‘high – low’. Orbita satelitului ‘jos’ (LEO) este determinată continuu de către sateliții ‘înalți’ ai sistemului GPS și GLONASS. În realitate acești sateliți ocupă orbite medii, Medium Earth Orbite – MEO și nu înalte, High Earth Orbit – HEO (orbitele sunt considerate înalte în raport cu poziția satelitului CHAMP). În problemă intervine și accelerometrul amintit anterior care determină variațiile în viteza de deplasare a satelitului pe orbită. Aceste accelerații și decelerații corespund derivatelor de ordinul I ale potențialului gravitațional.

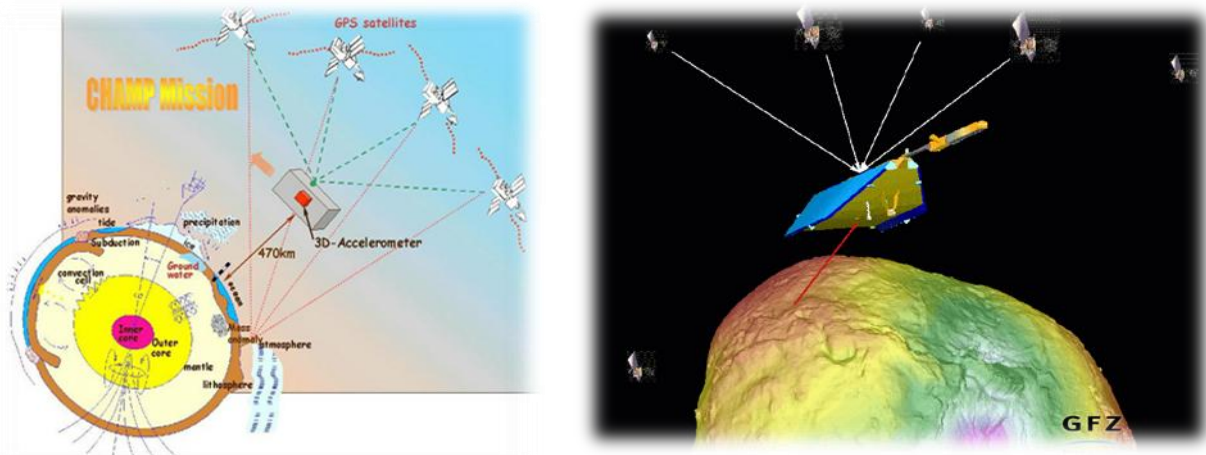


Fig. 2.9: Principiul de funcționare al misiunii CHAMP

### **Contribuția CHAMP în știință:**

- Geosferă: investigații asupra structurii și dinamicii structurii Pământului de la nucleu la scoarța terestră, investigații asupra interacțiunii cu oceanele și atmosfera.
- Hidrosferă: o monitorizare mai detaliată a circulației oceanelor, schimbării nivelului mărilor more și schimbările pe termne scurt în echilibrul acvatic precum și interacțiunea cu clima.
- Atmosferă: distribuția straturilor verticale de ioni și relațiile cu temperaturile de la nivelul scoarței terestre și în spațiu.

### **2.3.2. Misiunea GRACE**

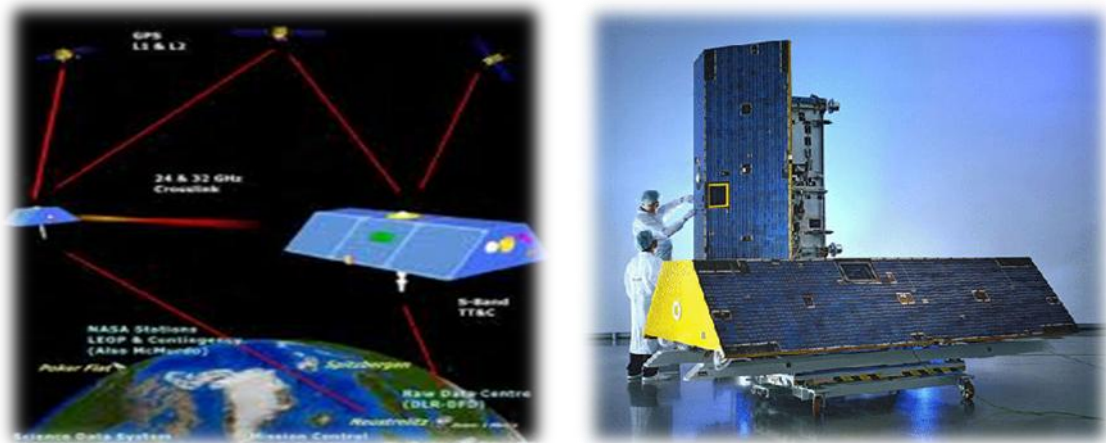
Gravity Recovery and Climate Exchange – GRACE reprezintă o colaborare între National Aeronautics and Space Administration – NASA și Deutsches Zentrum fur Luft – und Raumfahrt – DLR.



**Obiectivele** misiunii sunt:

- determinarea câmpului gravific al Pământului
- variațiile temporale ale gravitației

Pe scurt, GRACE va obține o hartă a câmpului gravific al Pământului urmărind variația masei în anumite puncte ale suprafeței terestre cu ajutorul celor doi sateliți. Între masă și gravitate există o legătură directă, cu alte cuvinte, o creștere a masei este corelată cu o creștere a forței gravitaționale. Masa este legată și de densitate. De exemplu, roca este mai densă (mai multă masă pe unitatea de volum) decât apa, iar apa în stare lichidă este mai densă decât în stare solidă. Din moment ce suprafața terestră are o formă variată (munți, văi, grote etc.), masa nu este distribuită uniform pe glob și diferite trăsături fizice pot fi diferențiate. Porțiunile observate în câmpul gravific rezultă din această neuniformitate în distribuția maselor pe suprafața planetei și GRACE va cartografia aceste perturbații cu mare acuratețe.



*Fig. 2.10: Cei doi sateliți GRACE*

Adițional, a fost stabilit că trebuie să fie determinat și conținutul de electroni prin determinări GPS pentru a se aprofunda cunoștințele despre refracția ionosferei și troposferei. Cei doi sateliți, GRACE-A și GRACE-B, au fost lansați simultan în 17 martie 2002 de pe cosmodromul rusesc Plesetsk.

**Arhitectura sistemului** cuprinde:

- o orbită polară ( $i = 89^\circ$ ) aproape circulară (excentricitatea  $e < 0.005$ )
- altitudine inițială între 485 și 500 km
- durată de exploatare – 5 ani

- cei doi sateliți sunt la o distanță de 220 km unul de celălalt, lucrul acesta presupune o urmărire atentă a orbitei și vitezei sateliților
- greutatea sateliților este în jur de 480 kg și o lungime de 3 m.

**Principiul** care stă la baza acestei misiunii poartă denumirea de ‘satelite – to – satelite tracking in low – low mode’ și presupune că cei 2 sateliți LEO sunt plasați pe aceeași orbită la o distanță de 220 km, măsurată cu mare precizie. Individual orbita fiecărui satelit LEO este afectată de variații ale accelerației care corespund derivatelor de ordinul I ale potențialului gravitațional,  $V$ . Poziția sateliților GRACE este determinată cu ajutorul sateliților NAVSTAR-GPS. Variațiile în câmpul gravitațional cauzează variații și în distanța dintre sateliți deoarece porțiunile cu gravitate mai puternică va afecta prima oară satelitul lider - GRACE-A, care va căpăta o viteză mai mare și prin urmare se va depărta de satelitul GRACE-B.

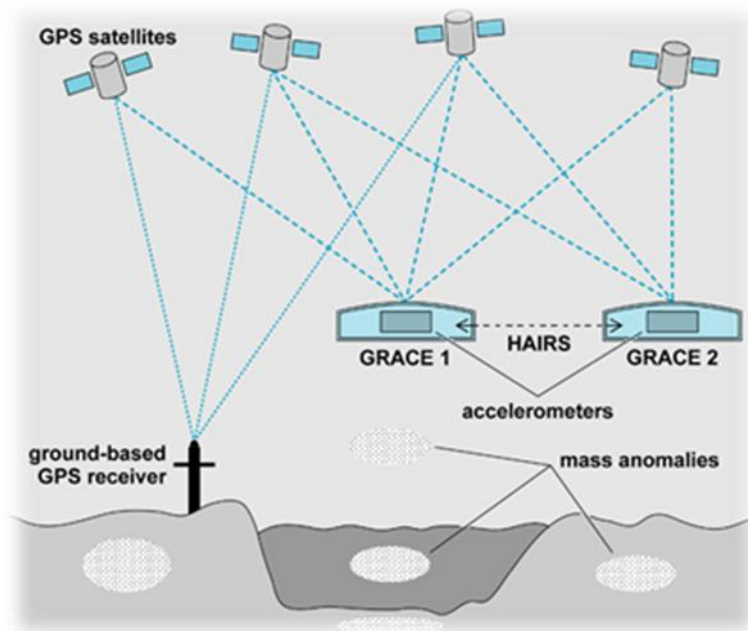


Fig. 2.11: Principiul de funcționare

În 2004, echipa GRACE a făcut publică prima versiune a noului câmp gravitațional al Pământului, GRACE Gravity Model 01 – GGM 01. Geoidul rezultat împreună cu altimetria satelitară va contribui la dezvoltarea oceanografiei și geodeziei (încălzirea oceanelor, modificarea nivelului mării, curenții oceanici, poziționare, determinarea orbitelor sateliților de poziționare și nivelment). În prezent s-a ajuns la modelul GGM 03 considerat a fi cel mai precis, el bazându-se pe o îmbunătățire continuă a GGM 01 și 02.



### 2.3.3. Misiunea GOCE (The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer)

Lansată în 2007, este coordonată de către ESA (European Spatial Agency – Agenția Spațială Europeană) și face parte din programul Living Planet.

**Obiectivele** acestei misiuni sunt reprezentate de măsurarea câmpului gravitațional și modelarea geoidului cu multă acuratețe. Mai specific:

- să determine anomaliile gravitației cu o precizie de 1mgal
- să determine geoidul cu o precizie de 1 – 2 cm

Din punct de vedere geodezic, un câmp gravitațional și un geoid atât de precis determinați pot fi folosiți pentru următoarele **scopuri**:

- controlul sau înlocuirea nivelmentului tradițional cu nivelmentul satelitar. Cu valoarea  $N$  (ondulația geoidului) determinată de GOCE și  $h$  măsurat cu ajutorul tehnologiei GPS, altitudinea ortometrică,  $H$  poate fi obținut foarte ușor după cum arată și relația:

$$H = h - N \quad (2.1)$$

- unificarea la nivel global a sistemelor de altitudini și obținerea unui singur datum vertical care ar permite compararea nivelului mărilor și schimbările survenite în nivelul mărilor (creșteri, descreșteri). Așa cum știm, geoidul este o suprafață echipotențială confundată cu suprafața oceanelor și mărilor în stare liniștită. În consecință, un geoid precis este crucial pentru măsurarea curenților oceanici și schimbărilor nivelului mărilor.
- posibilitatea unei îmbunătățiri semnificative în determinarea orbitei sateliților plasați pe orbite joase (LEO).

#### **Arhitectura sistemului:**

- 1 satelit LEO cu o lungime de 5 m
- orbite înclinate la  $96.5^\circ$ , altitudine de zbor, 250 km
- stație de control la sol în Kiruna (Suedia) pentru schimbul de date și comandă

#### **Echiparea satelitului:**

- gradiometru triaxial bazat pe 3 perechi de accelerometre electrostatice pentru a măsura gradientul gravitației pe 3 direcții.
- receptor GPS de dublă frecvență folosit la determinarea orbitei satelitului GOCE
- un retroreflector care asigură legătura cu stația de control

**Principiul de funcționare.** Așa cum am putut vedea anterior, sateliții misiunii GRACE se află la o distanță mare unul față de celălalt (220 km) însă pentru misiunea GOCE acest lucru nu era posibil deoarece folosește un singur satelit. Principiul se păstrează în mare parte datorită faptului că perechea de accelerometre, în loc să fie amplasată pe două corpuri diferite, este amplasată în cadrul unui singur satelit la distanță foarte mică (0.5 m). Tehnica poartă numele de *gradiometrie satelitară* și reprezintă determinarea diferențelor de accelerație înregistrată pentru un sistem ortogonal cu 3 direcții de perechile de accelerometre, situate la o distanță foarte mică una față de cealaltă.

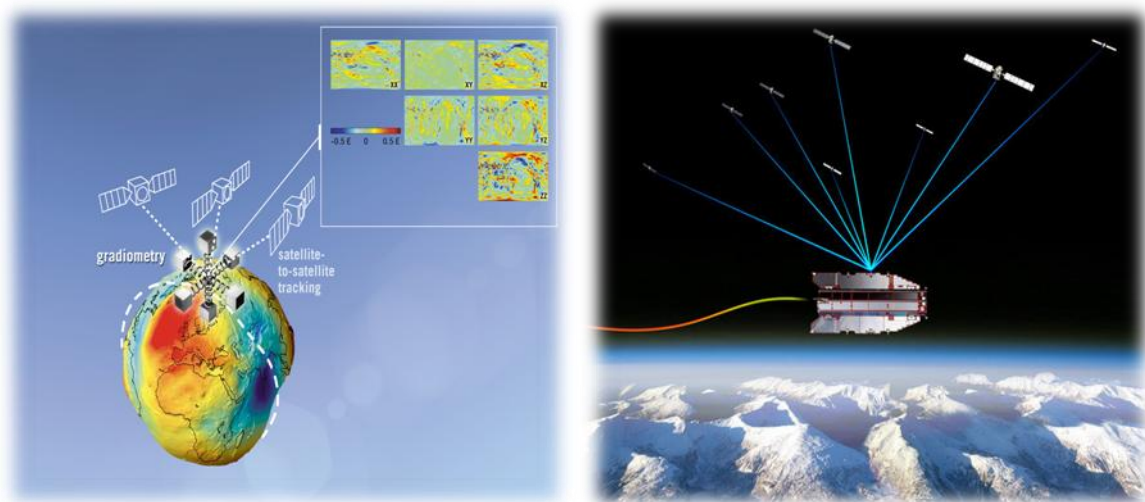


Fig. 2.12: Principiul de funcționare

În urma prelucrării se obțin altitudini ortometrice ( $H$ ), anomalii gravitaționale și date oceanografice.

O altă aplicație importantă a misiunii GOCE se leagă de seismologie, satelitul GOCE fiind primul seismograf satelitar. Cutremurele mari nu eliberează doar undele seismice care străbat interiorul planetei ci eliberează și unde sonore care se propagă în atmosferă și fac Pământul să vibreze ca o tobă. Aceste unde cauzează mișcări pe verticală care extind și contractă atmosfera prin accelerația indusă particulelor de aer. În 11 martie 2011 Japonia a fost lovită de un cutremur foarte puternic iar studiile au dezvăluit că undele au fost simțite și în spațiu. Când GOCE a trecut peste zona undelor, accelerometrele sale au simțit perturbațiile apărute în structura atmosferei într-o manieră similară cu seismografele de la sol.

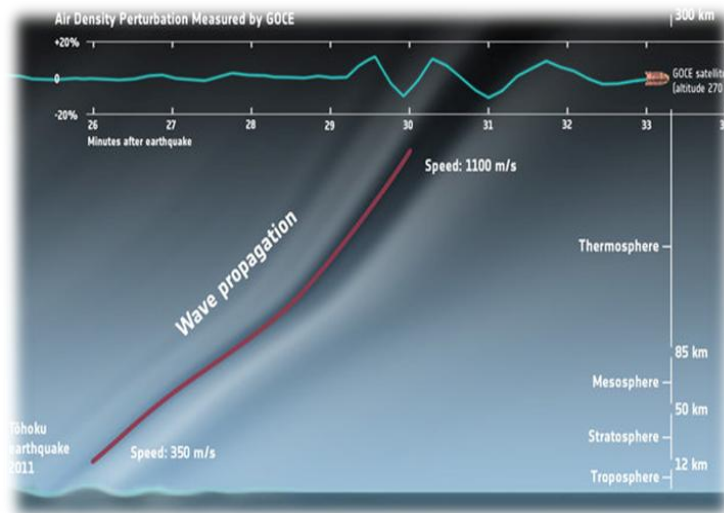


Fig. 2.13: Cutremurul din Japonia (2011) simțit de satelitul GOCE

#### 2.3.4. GRAV-D

Agencia Națională de Geodezie (National Geodetic Survey – NGS) a inițiat un program ambițios de redefinire a datumului vertical al SUA până în anul 2022. Proiectul se numește ‘‘Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum (Gravitatea pentru Redefinirea Datumului Vertical American)’’ sau, pe scurt, GRAV-D. Noul datum va avea o precizie de 1-2 cm, în cea mai mare parte a țării, față de 50 cm cât este eroarea datumului actual, NAVD 88. Altitudinile ortometrice pot fi folosite la studiile mareelor oceanelor, alunecărilor de teren și alți factori care afectează câmpul gravific al Pământului. La ora actuală, tehnologia GPS oferă doar altitudini elipsoidale dar datumul obținut cu ajutorul GRAV-D va facilita accesul la altitudinile ortometrice.

GRAV-D constă în 3 campanii majore:

- prima, survolarea țării pentru culegerea de date gravimetrice, campanie în totalitate aeriană
- a doua, observarea variației gravității
- ultima campanie, măsurători pe baza unor parteneriate regionale

Prima campanie se va executa în mai multe etape iar setul de date trebuie să fie unul standardizat, obținut pe blocuri. Specificațiile unui bloc:

- altitudinea de zbor ~ 6 300 m
- viteza de zbor 250 mile/h
- rata de captare a datelor gravimetrice, 1 probă/s (din 128.6 m în 128.6 m)
- lungimea unei linii de zbor, 400 km
- distanța dintre două linii de zbor, 10 km

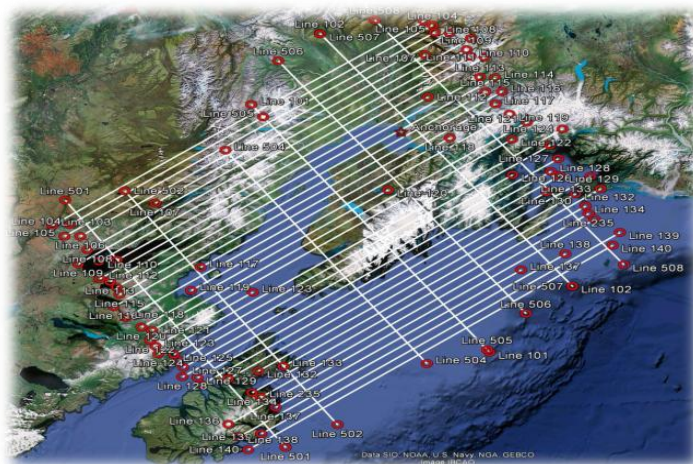


Fig. 2.14: Blocul AS01, primul al campaniei (Alaska)

Toate aceste lucruri sunt posibile prin folosirea unui gravimetru Micro-g LaCoste TAGS (descriș anterior) echipat cu antena GPS NovAtel DL-4 care oferă date precise în ceea ce privește poziția gravimetrului în timp real.

A doua campanie, una terestră, presupune vizitarea punctelor absolute și monitorizarea variației temporale a accelerației gravitaționale  $g$ . Această fază va duce la obținerea unui geoid dependent de timp, implicit și altitudini ortometrice dependente de timp. Sunt utilizate 3 stații de referință GPS instalate în apropierea aeroportului principal al blocului respectiv (suprafața care urmează să fie survolată) în zone cu vizibilitate cât mai bună spre cer și ferite de apariția efectului de multipath. Scopul acestor stații presupune crearea unei legături cu avionul astfel încât să fie obținute toate corecțiile necesare pentru erorile cauzate de viteză, unghiul de zbor etc. Din punct de vedere gravimetric, în această campanie sunt folosite 2 gravimetre absolute (Micro-g LaCoste FG – 5 102 și A – 10) și 1 gravimetru relativ (Micro-g LaCoste G-157). Instrumentele de la sol vor face determinări în câteva puncte cheie, simultan cu gravimetrul din avion dar la o altitudine mult mai mică pentru determinarea gradientului vertical al gravității pentru acel bloc.

Datele culese trebuie prelucrate cât mai repede iar pentru acest lucru se folosesc calculatoare dotate cu programe software foarte puternice. Datele care se obțin: câmpul gravific, altitudini ortometrice și anomalii de aer liber.

În ultima etapă a proiectului, NGS caută să semneze parteneriate locale cu instituții care doresc să sprijine acest proiect fie prin contribuirea la obținerea de date fie la monitorizarea lor. Economic, proiectul GRAV-D va aduce un profit de 4.8 miliarde \$ statului american.

## CAPITOLUL 3

### REȚELE GRAVIMETRICE

În capitolul anterior au fost prezentate cele mai moderne tehnici și tehnologii de măsurare dintre care putem evidenția gravimetrele absolute și relative ca principale echipamente folosite în determinările gravimetrice terestre. Spre deosebire de un gravimetru absolut care poate fi amplasat în orice punct, el oferind valoarea absolută a accelerației gravitației, un gravimetru relativ (cele mai utilizate) citește doar diferență de gravitate între un punct nou și un punct de gravitate cunoscută iar pentru a le putea folosi cu succes rețelele gravimetrice și sistemele de referință au devenit indispensabile. Ca orice rețea, *rețelele gravimetrice* sunt mulțimi de puncte materializate în teren, cărora li s-au determinat, prin metode de măsurare specifice anumiți parametri, în acest caz cei care descriu câmpul fizic asociat.

#### **3.1. Sisteme gravimetrice de referință utilizate în România**

Un datum este o referință față de care se fac determinări. Datumurile sunt utilizate pentru cantități relative cum ar fi poziția. De exemplu, latitudinea și longitudinea reprezintă unghiuri relative măsurate față de referințele Ecuator și Greenwich, alese arbitrar. Aceste referințe sunt arbitrare din moment ce convenția alcătuită din Polul Sud și Paris (meridianul francez) puteau la fel de bine să fie alese. Cotele sunt distanțe pe verticală măsurate deasupra sau dedesubt de “ceva”. De regulă, acel ceva este geoidul (suprafața oceanelor în stare liniștită prelungită sub continente). În unele țări fără ieșire la mare referința poate fi un reper fundamental cu o anumită elevație.

O întrebare logică ar fi “De ce avem nevoie de datumuri atunci când vine vorba de date gravimetrice?” Până la urmă, gravitatea este o mărime absolută. Nevoia pentru sistemele gravimetrice de referință (datumuri gravimetrice) se datorează instrumentelor utilizate și materializării stațiilor de referință.

Instrumentele utilizate pentru măsurătorile absolute au avut mereu o precizie scăzută. Astfel majoritatea instrumentelor folosite în măsurători sunt de tip relativ. Echipamentele relative determină diferența de gravitate între o stație cu valoarea cunoscută, determinată absolut, și o stație nouă. Instrumentele relative determină diferențele față de o rețea de stații pentru a crea o rețea de îndesire formată din puncte de referință.

Atât pendulele cât și gravimetrele pot face determinări relative cu un grad de încredere ridicat, rapid și cu ușurință.

Înainte de 1960, singurul mod precis pentru executarea unei măsurători absolute presupunea folosirea unui pendul reversibil (descries în capitolul anterior) în condiții de laborator.

### **3.1.1. Sistemul gravimetric Viena 1900**

Spre sfârșitul secolului 19 – începutul secolului 20 (1898 – 1901), Helmert a realizat în Viena (Austria) o serie de determinări utilizând pendulul. Pe baza lor, a introdus Sistemul gravimetric de referință Viena 1901 utilizat pentru o perioadă scurtă și în România. Precizia sistemului este apreciată la  $\pm 10$  mgal. În prezent, acest datum nu mai este folosit.

### **3.1.2. Sistemul gravimetric de referință Potsdam**

Până în anul 1909 Sistemul Viena a fost înlocuit cu Sistemul gravimetric Potsdam (Germania de Est) care oferea o precizie de  $\pm 3$  mgal. Pentru definirea lui au fost folosite înregistrările făcute cu pendulul la Institutul Geodezic din Potsdam iar pentru mai bine de șase decenii (1909-1971), valoarea gravității absolute, determinată la în perioada 1898 – 1906 la Potsdam a servit ca valoare de referință a gravității pe plan internațional.

După 1906 s-au executat numeroase determinări ale gravității absolute și în alte puncte: Washington 1934-1935, Londra 1936-1938 și Leningrad 1956. Rezultatele obținute au dus la concluzia că valoarea gravității absolute Potsdam este caracterizată de o eroare medie de  $-14$  mgal însă oamenii de știință au considerat că este mai bine păstrarea nemodificată a datumului până la introducerea unuia mai precis definit.

### **3.1.3. International Gravity Standardization Net-1971 (IGSN-71)**

Pe la începutul anilor '50 comunitatea geodezică internațională a decis că datumul Potsdam nu îndeplinește precizia necesară aplicațiilor geodezice. În 1954, Asociația Internațională de Geodezie a format o echipă de cercetători responsabili cu crearea unui nou datum gravimetric. O rețea compusă din 34 de stații a fost aleasă în 1956 drept rețeaua globală de ordinul I. În următorii 8 – 9 ani, au fost executate măsurători relative pe întreg globul pământesc iar toate datele culese au fost strânse la un loc formând un nou datum gravimetric, International Gravity Standardization Net-1971. Sistemul IGSN-71a fost adoptat ca sistem gravimetric de referință pentru toate țările la cea de a XV-a Adunare Generală a Uniunii Internaționale de Geodezie și Geofizică, desfășurată la Moscova în 1971, astfel fiind înlocuit sistemul Potsdam. Acest sistem era alcătuit din aproximativ 1900 de stații răspândite la nivel global dintre care 500 de puncte făceau parte din Rețeaua Internațională Standardizată de Gravitare – 1971 (de aici și numele).

În cadrul IGSN-71, în 15 stații gravimetrice din România (Rețeaua de ordinul I proiectată în anii 1956-1957) a fost determinată valoarea gravității cu o precizie de  $\pm 3$  mgal (Tabelul 3-1).

<b>Denumire punct</b>	<b>Valoarea accelerației gravitaționale în "mgal" (sistem IGSN-71)</b>
Brașov	980532.56
Baia-Mare	980802.40
Bacau	980702.35
Cluj-Napoca	980689.96
Constanța	980560.55
Deva	980638.51
Galați	980647.88
Iași	980782.08
Oradea	980780.91
Roșiori de Vede	980525.49
Sibiu	980585.36
Suceava	980751.51
Timișoara	980678.75
Turnu-Severin	980535.83

*Tabelul 3-1. Puncte din România - IGSN-71*

IGSN-71 este datumul utilizat și la ora actuală când vine vorba de determinări gravimetrice. iar pentru monitorizarea lui unele țări au redeterminat valoarea gravității din anumite puncte cheie. Pe lângă determinarea unor erori, un număr de variații temporale datorate schimbărilor geologice au fost consemnate.

#### **3.1.4. Determinările absolute**

În prezent există numeroase gravimetre absolute folosite pentru măsurători de gravitate pe întreg cuprinsul globului. Aceste echipamente au confirmat valorile oferite de datumul IGSN-71. Determinările gravimetrice absolute sunt practic propriul lor datum din moment ce ele măsoară direct valoarea gravității fără a fi necesară legătură cu o altă stație cu gravitate cunoscută (determinări relative).

Unul din neajunsurile acestor instrumente constă în faptul că nu poate fi garantat că valoarea afișată este valoarea adevărată a gravitației în punctul respectiv dar această problemă este eliminată prin calibrarea anuală a gravimetrelor pe o linie de calibrare cu puncte de gravitate cunoscută și utilizarea mai multor gravimetre absolute pentru compararea valorilor afișate.

### **3.2. Rețeaua gravimetrică a României**

În concepția actuală privind realizarea Sistemului Național de Referință Spațială, acest tip de rețele sunt utile în special pentru rezolvarea problemei privind determinarea unui cvasigeoid al României. Precizia determinărilor relative de gravitate este în prezent de ordinul a câtorva microgali. O problemă de clarificat este cea a „clasificării” unor informații legate de aceste rețele de referință: condițiile, modul de acces și manipulare a acestor informații.

#### **3.2.1. Necesitatea rețelelor gravimetrice**

Una din cele mai importante preocupări ale geodeziei impune cunoașterea precisă și detaliată a câmpului gravitațional, atât pentru lucrările de determinare a formei și dimensiunilor planetei cât și pentru lucrările privind realizarea de rețele geodezice naționale sau convenționale.

Primul tip de lucrări (determinarea globală a geoidului și a câmpului gravitațional al Pământului) se realizează cu ajutorul unor procedee care utilizează concomitent datele de observare a sateliților artificiali și valorile observate ale gravitației pe suprafața terestră.

Creșterea preciziei lucrărilor geodezice a forțat instituțiile responsabile la nivel național și internațional să extindă lucrările de gravimetrie prin realizarea de rețele gravimetrice și de asemenea prin lucrări de gravimetrie marină și aeriană pentru determinarea câmpului gravitațional. În trecut, o preocupare la nivel internațional a fost realizarea rețelei gravimetrice de ordin superior, rețea care avea unul din puncte pe teritoriul României (București – Băneasa).

La nivel național, o rețea gravimetrică pentru scopuri geodezice devenea din ce în ce mai necesară pentru următoarele tipuri de lucrări:

- Determinarea deviației verticalei
- Determinarea corecțiilor de reducere la un anumit tip de altitudini în lucrările de nivelment
- Determinarea undulațiilor geoidului
- Reducerea măsurătorilor astrono-geodezice pe suprafețe convenționale (elipsoid de referință)



În concluzie se poate afirma că realizarea și modernizarea rețelelor gravimetrice a rămas o preocupare actuală a tuturor țărilor lumii de la care România nu putea face excepție.

### **3.2.2. Principii de proiectare a rețelelor gravimetrice naționale:**

- rețeaua este concepută pe 2 ordine (numărul punctelor fiecărui ordin variind cu timpul). Acest lucru este motivat în felul următor: rețeaua de ordinul I nu este necesară din motive de precizie sau de ușurare a calculelor, ci din rațiuni de colaborare internațională; rețeaua de ordinul II oferă o imagine amănunțită a câmpului gravitațional național, care constituind o dată secretă, nu poate participa la schimburi internaționale

- rețelele trebuie aduse într-un sistem absolut. Deoarece în procesul de realizare al rețelelor se execută măsurători de diferențe de gravitate, rezultatele finale vor conține valori relative ale gravității. Pentru aducerea rețelei în sistemul absolut al unei rețele unice mondiale trebuie ca în cel puțin un punct să fie cunoscută valoarea absolută a gravității în sistemul internațional (în trecut, punctul amplasat pe aeroportul Băneasa iar în prezent avem 4 puncte absolute Iași, București, Constanța și Timișoara)

- o primă condiție pe care trebuie să o îndeplinească este aceea de a acoperi cât mai uniform suprafața țării la o densitate corespunzătoare rangului lor

- o altă condiție prohibitivă în proiectarea configurației rețelei o reprezintă existența unor căi de acces care să permită transportul rapid și în bune condiții al aparaturii gravimetrice între stații

- punctele gravimetrice pe teritoriul aeroportului se amplasează în apropierea locurilor de parcare a avioanelor, ce asigură executarea determinărilor gravimetrice în termen scurt și totodată nu se prevăd schimbări în reconstrucția aeroportului

- intervalul de gravitate pe laturi să nu depășească domeniul mic de măsură al gravimetrelor utilizate (90-100 mgal)

### **3.2.3. Etape de dezvoltare**

Din informațiile primite de la Direcției Topografice Militare și Centrului Național de Cartografie rezultă că de-a lungul timpului rețeaua gravimetrică națională a suferit mai multe modificări, după cum urmează:

a) Prima rețea gravimetrică națională a fost proiectată și realizată între anii 1941-1948 fiind constituită din 50 de stații de pendul, care au permis întocmirea primei hărți gravimetrice naționale la scara 1:500.000.

Această rețea, lipsită de o densitate propice și cu o repartitie teritorială neuniformă, a avut și dezavantajul unei precizii inferioare datorate performanțelor reduse pe care le aveau aparatele pendulare la acea dată.

b) Prima rețea națională realizată cu gravimetrul static se datorează lui R. Botezatu și a fost executată între anii 1950 – 1957 sub forma unei triangulații cu punct central în aeroportul Băneasa (București) cu lungimea laturilor de 400 km. Rețeaua de ordinul I era alcătuită din 15 puncte (inițial 20 de puncte dar până la finalizarea lucrărilor 5 puncte au fost distruse), amplasate pe principalele aeroporturi din țară repartizate astfel încât să acopere zonele marginale ale țării și pe cât posibil și zona centrală. Rețeaua de ordinul II, proiectată tot de către R. Botezatu, era alcătuită din 216 puncte dispuse la o distanță de 30 – 70 km, nu a mai fost măsurată integral (doar în proporție de 30%); au fost măsurate numai punctele dispuse în zonele ce au prezentat interes din punct de vedere geofizic. În anul 1971 România a început să folosească drept sistem de referință datumul IGSN-71 iar cele 15 puncte de ordinul I (Tabelul 3-1) au fost încorporate în acest sistem.

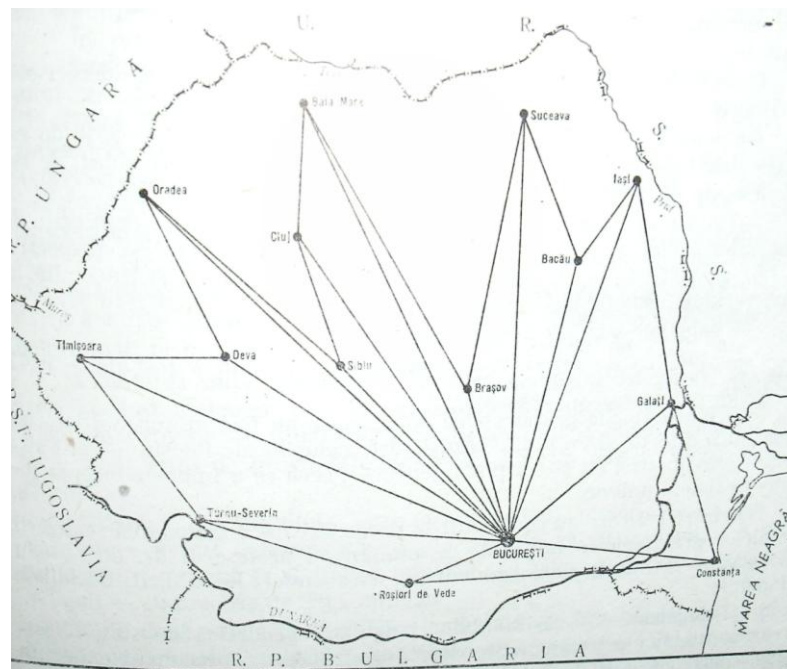


Fig. 3.1: Rețeaua Gravimetrică de Ordinul I (conform Ghițău, 1981)

c) Dispariția unei părți importante a rețelei de ordinul I a condus la refacerea ei. Cu ajutorul informațiilor oferite de rețeaua de ordinul II creată anterior, în 1976 a fost proiectată o rețea de ordinul I alcătuită din 19 puncte legate între ele printr-o rețea de triunghiuri ale căror laturi sunt cuprinse între 150 – 300 km.

Pentru această nouă rețea amplasarea stațiilor de ordinul I nu mai este condiționată de existența unor terenuri de zbor special amenajate (aeroporturi) amplasate doar pe lângă marile orașe. Oricum, această practică s-a dovedit falimentară în trecut deoarece odată cu dezafectarea sau modernizarea anumitor aeroporturi au dispărut mai multe din vechile puncte gravimetrice. Dintre stațiile vechii rețele, au fost păstrate următoarele: București, Brașov, Baia Mare, Constanța, Cluj, Deva, Iași, Sibiu, Suceava și Oradea, adică 10 stații din cele 15 (20 inițiale din care 5 puncte s-au distrus înainte de finalizarea vechiului proiect). Noile stații sunt: Arad, Moravița, Orșova, Sulina, Brăila, Târgu-Ocna, Praid, Corabia, Drăgășani.

Conservarea a cât mai multe din vechile puncte ale rețelei de ordinul II au fost integrate și în noua rețea (96 de puncte). La proiectare, configurația triunghiurilor a fost modificată astfel încât laturile să aibă intervale de gravitate mai mici decât domeniul mic de măsurare al gravimetrelor utilizate. Rețeaua cuprinde un număr de 223 de puncte legate între ele prin 605 laturi care alcătuiesc 387 triunghiuri. Lungimea medie a laturilor rețelei este de 40 km, iar diferențele de gravitate nu depășesc pe nici una din ele domeniul de măsurare de 100 mgal.

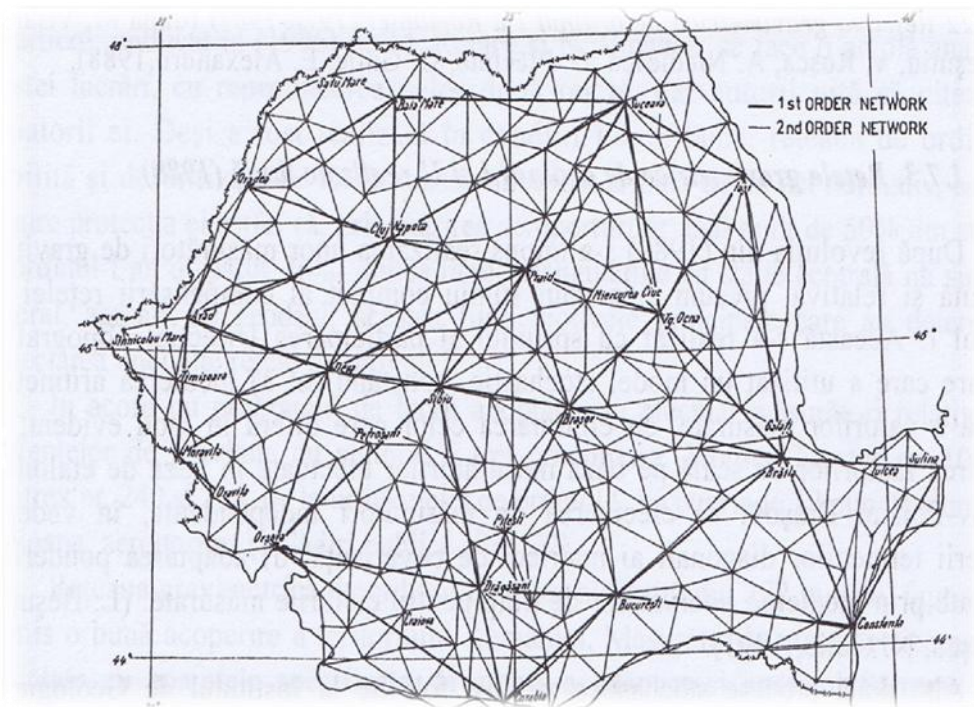


Fig. 3.2: Configurația rețelelor de ordinul I și II (după Besuțiu, Roșca, Gulie, 1993)

Amplasarea stațiilor de ordinul II în noua variantă urmărește în general menținerea punctelor vechi, proiectate anterior, fiind necesară totuși introducerea de stații noi în vederea asigurării unei distribuții uniforme a punctelor pe teritoriul țării.

Atât pentru stațiile de ordinul II cât și pentru stațiile de ordinul I se va întocmi o fișă de evidență care va cuprinde toate informațiile geodezice (latitudine, longitudine, altitudine, schiță de reperaj, fotografii) și gravimetrice (valoarea gravității, valoarea anomaliilor Faye, Bouguer).

Pentru acest nou proiect au fost parcurse următoarele etape:

- a. recunoașterea și bornarea stațiilor, concomitent cu determinarea coordonatelor geografice și a cotelor, necesare identificării punctelor pe teren
- b. întocmirea programului măsurătorilor de gravitate
- c. executarea măsurătorilor
- d. compensarea simultană a rețelelor
- e. întocmirea cataloagelor rețelelor gravimetrice naționale de ordinul I și II

d) În România, rețeaua gravimetrică de ord. I a fost refăcută prin determinări în anii 1994 și 1995 (când s-a realizat și rețeaua GPS primordială a țării) printr-o colaborare între DTM (Direcția Topografică Militară) și DMA-SUA (Defense Mapping Agency). Este evident că există discordanțe între datele prezentate în diverse lucrări academice în legătură cu rețeaua gravimetrică de ordinul I. Cinci din punctele rețelei de ordinul I au fost determinate și prin valori absolute de gravitate (Surlari, Timișoara, Constanța, Iași, Cluj - Napoca) efectuate cu ajutorul unuia dintre cele mai performante instrumente existente la vremea respectivă (gravimetrul absolut FG5 - SUA).

În fiecare din cele 5 locații s-a determinat câte un reper central (cu instrumentul FG5, bazat pe căderea liberă) și două repere martor (unul în apropierea celui central, iar celălalt la cel mai apropiat aeroport) determinate relativ cu instrumente de tip LaCoste&Romberg model G. Precizia instrumentală a FG5 este de circa  $\pm 1 \mu\text{gal}$ . Precizia rețelei de ord. I, după compensare a fost de  $\pm 0.01 \text{mgal}$ . Rețeaua de ordinul II conține 231 de puncte.

După cum se poate observa din figura de mai jos rețeaua a suferit noi modificări în ceea ce privește stațiile incluse. Odată cu distrugerea aeroportului utilitar Moșnița punctul gravimetric de ordinul I a fost distrus astfel că pentru această parte a țării s-a decis instalarea unui punct de ordinul I în orașul Arad (figura 3.2.).

În noul proiect, Direcția Topografică Militară și Defense Mapping Agency au făcut determinări absolute în punctul de ordinul II (conform proiectului rețelei din 1976) situat pe aerodromul AVIASAN.

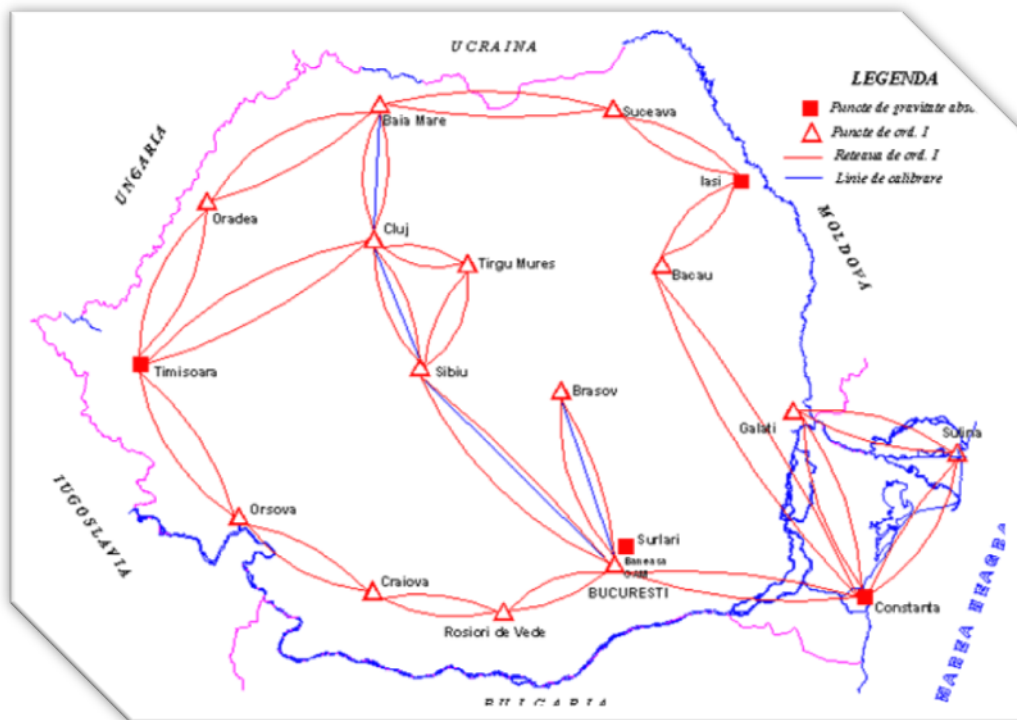


Fig. 3.3: Rețeaua Gravimetrică de Ordinul I (1995)

Așa cum am afirmat mai sus cele 5 puncte absolute au fost completate cu doi reperi martori în care s-au făcut determinări relative de gravitate. Punctul absolut, punctul de ordinul II cât și reperul de control amplasat pe Aeroportul Internațional Traian Vuia, au fost identificate pe teren.

Punctul absolut este materializat printr-un pilastru în subsolul Observatorului Seismic din Timișoara. NIMA prin Defense Mapping Agency realizează periodic măsurători de gravitate în acest punct, ultima despre care se știe datează din 17-18 iulie 1997 folosindu-se un gravimetru absolut Scintrex FG-5 care a înregistrat valoarea de 980675.722 mgal.



Fig. 3.4: Punctul gravimetric absolut Timișoara (stânga) și gravimetrul FG-5 utilizat (dreapta)



Reperul martor este un punct al Rețelei Geodezice de Stat și are rolul de a oferi informații despre valoarea gravității în cazul în care punctul de ordinul I va fi distrus din diverse motive astfel nemaiputând fi folosit în scopuri gravimetrice. Celălalt reper de control se materializează în scopul controlului stabilității altitudinilor punctului. Trebuie menționat faptul că toate punctele gravimetrice sunt legate la liniile de nivelment iar stația AVIASAN este conectată cu linia de ordinul I Timișoara – Arad prin reperul de nivelment tip B.DTM (Bornă Direcția Topografică Militară) numărul 181 canton CF. km 7 + 720 (conform fișei punctului consultată în cadrul vizitei la DTM).



*Fig. 3.5: Punctul gravimetric AVIASAN Timișoara (stânga), reperul martor Traian Vuia (dreapta)*

Conform raportului Comisiei Naționale de Geodezie și Geofizică întocmit pentru perioada 1999 – 2003 autoritățile române au început procesul de integrare a rețelei naționale în sistemul gravimetric al Europei Centrale, UNIGRACE (1998). Primele rezultate ale acestei acțiuni au fost publicate de către Institutul Geologic al României în cadrul conferinței IAG de la Birmingham (UK). Extinderea campaniei internaționale de determinări gravimetrice absolute a condus la noi determinări asupra câmpului gravific pe teritoriul țării noastre în Cluj-Napoca, Beliș și Constanța (2000). Aceasta nouă campanie a fost coordonată de o echipă finlandeză iar rezultatele au fost făcute publice cu ocazia celei de a 4 – a conferințe UNIGRACE de la Trieste. Tot în această perioadă, 1999 – 2003, a fost adus în discuție un geoid gravimetric pentru teritoriul țării noastre.

Următorul raport întocmit pentru perioadă 2003 – 2007 dezvăluie următoarele:

- Direcția Topografică Militară a executat observații gravimetrice în anumite puncte ale Rețelei Gravimetrice naționale (aproximativ 270 de puncte de ordinul I și II).

Din păcate, nu există o bază de date public.

- modernizarea și întreținerea rețelei este o necesitate
- în 2004, The Federal Office of Metrology and Surveying a fost responsabil cu redeterminările absolute ale gravității în punctele de ordinul I Șurlari, Iași, Timișoara și Constanța

Ultimul raport, perioada 2007 – 2011, prezintă aceleași tendințe enumerate mai sus. Totuși, apar câteva noutăți: în anul 2011, Direcția Topografică Militară încheie o colaborare cu National Imagery and Mapping Agency – NIMA (USA), fosta Defense Mapping Agency, pentru determinarea gravității în 17 000 de puncte de pe teritoriul României care să constituie temelia generării unui cvasigeoid pentru România cu o precizie mai bună de 10 cm. Partea română, reprezentată de DTM sprijină acest proiect cu personal și mijloace de transport iar partea americană trebuie să contribuie cu câțiva specialiști și echipamente de achiziție a datelor gravimetrice.

Deși a fost semnat încă din anul 2011, proiectul nu a demarat nici până la ora actuală.

#### **3.2.4. Amplasarea, bornarea și măsuri de conservare**

Stațiile de ordinul I vor fi amplasate astfel încât să fie accesibile. Pentru aceasta se vor alege fie puncte situate pe aeroport, fie puncte situate pe arene sportive. Bornarea punctelor de ordinul I se va face cu borne metalice similare celor folosite pentru liniile de nivelement de ordinul I și vor fi încastrate în pereții uneia dintre construcțiile aeroportului sau arenei sportive care prin natura ei să prezinte cât mai bune perspective de durabilitate. Bornele vor purta inscripția în relief P.Gr.I; punctele absolute vor fi materializate printr-o marcă similară celei din Fig. 3.4. Acolo unde în punctul de bornare nu există o bază rigidă pe care să fie așezate gravimetrele în timpul măsurării, se vor amplasa astfel de baze fie sub forma unor plăci de beton turnat, cu o grosime minimă de 50 cm, fie confecționate dintr-o piatră de construcție dură de felul rocilor granitice sau calcarelor compacte. Latura de sus a bornelor, trebuie să prezinte un plan orizontal cu înclinarea nu mai mult de un grad. În centrul ei, cu eroarea nu mai mult de 2 cm de la centrul geometric se instalează marca. Borna reprezintă un pilastru de beton armat cu dimensiunile prezentate în figura de mai jos. Pe fundul gropii se toarnă un strat de beton gros de 10 cm, peste care se așează pilastrul punctului gravimetric.

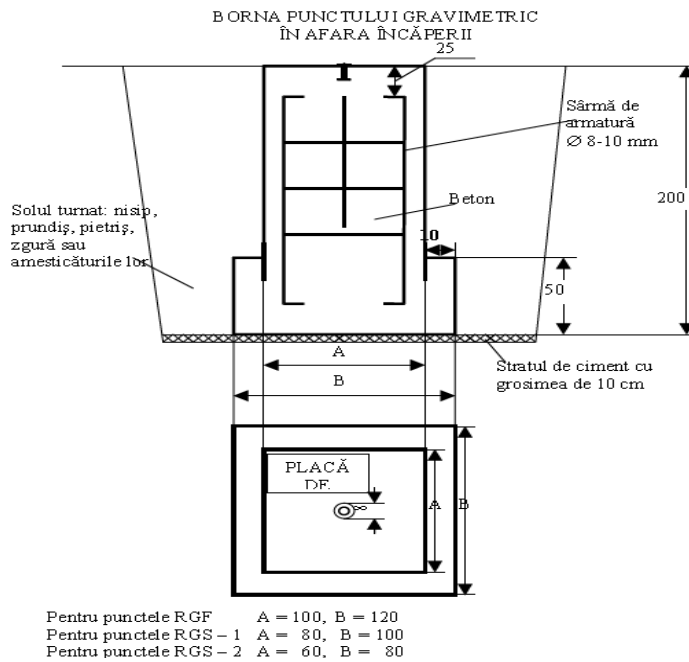


Fig. 3.6: Bornă gravimetrică

Locul de amplasare a *reperului de control* se alege în așa mod, ca transmiterea altitudinii de la reper la marca gravimetrică să se efectueze cu un număr minimal de stații de nivelment. Reperele se materializează conform instrucțiunii pentru nivelment.

La amplasarea punctelor gravimetrice pe teritoriul aeroporturilor pot fi utilizate suprafețele orizontale ale fundamentelor cu dimensiunile nu mai mici decât cele indicate în Fig. 3.5. În centrul suprafeței fundamentului se instalează marca (nu mai pot fi montate borne), iar alături pe perete se fixează placa de pază (punctul AVIASAN nu are o astfel de placă, vezi Fig.3.4.). În scopul protecției împotriva corodării mărcile se acoperă cu minimum de plumb. Clădirile și construcțiile în care sunt amplasate aceste puncte gravimetrice trebuie să fie îndepărtate de la pista de decolare mai mult de 100 m.

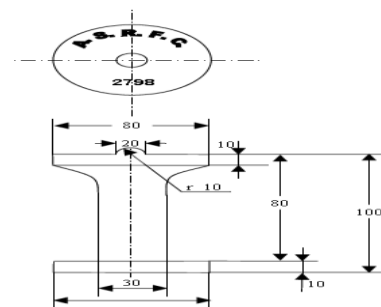


Fig. 3.7: Marca punctului de ordinul II AVIASAN (stânga), secțiune printr-o marcă (Rețeaua gravimetrică a Republicii Moldova)



Stațiile de ordinul II, așa cum reiese din cele arătate mai sus, vor fi bornate în majoritatea lor pe amplasamente deja stabilite (situația punctelor vechilor rețele încă existente). Pentru stațiile noi se vor căuta amplasamente similare celor ale stațiilor conservate. Bornarea se va face de asemenea cu reperi de tipul celor de nivelment. Pe aceste borne se va afla inscripția P.Gr.II și numărul pe care îl va primi stația în cadrul rețelei de ordinul II.

Pentru conservarea atât a stațiilor de ordinul I cât și a stațiilor de ordinul II se preconizează includerea acestora, din punct de vedere al legislației în vigoare, în actele normative existente pentru rețelele geodezice naționale.

**3.2.5. Liniile și bazele gravimetrice etalon** au fost create de către Uniunea Internațională de Geodezie și Geofizică pentru asigurarea unei bune racordări a lucrărilor gravimetrice internaționale. Acestea au fost determinate cu cea mai mare precizie posibilă și la ele se racordează lucrările gravimetrice naționale. Pentru scopuri naționale, fiecare țară are un număr oarecare de baze gravimetrice etalon, pe care se verifică și se calibrează periodic aparatura existentă în exploatare. La noi în țară se folosește baza gravimetrică din Poiana Brașov, constituită din 3 puncte ( $A_1, A_2, A_3$ ), pentru care s-au determinat diferențele de gravitate avute la dispoziție, rezultând:

$$g_{A1} - g_{A2} = 49,94 \pm 0,06 \text{ mgal}; g_{A1} - g_{A3} = 78,51 \pm 0,10 \text{ mgal} \quad (3.3)$$

De fiecare dată când un gravimetru nou este adus la noi în țară, înainte de a fi folosit în observațiile gravimetrice, acesta trebuie calibrat pe linia Brașov – Poiana Brașov.

Pentru proiectul UNIGRACE specialiștii români în colaborare cu cei finlandezi au determinat prin măsurători absolute o nouă linie de calibrare între localitățile Cluj-Napoca și Beliș.

Year	Gravity interval on the calibration line as provided by UNIGRACE absolute measurements - mgal -	Gravity interval on the calibration line as provided by LaCoste&Romberg D-214 - mgal-	Deviation -mgal-
1999	172.125	172.108	0.017
2000	172.118	172.098	0.020

*Tabelul 3-2. Valorile relative ale gravității pe linia de calibrare Beliș – Cluj-Napoca*

Odată cu realizarea noii rețele gravimetrice de ordinul I a României, s-a realizat și două baze de calibrare pe traseele Iași-Bacău-Băneasa și Baia Mare-Cluj Napoca-Sibiu-Băneasa (Fig.3.3).

### **3.3. Punctul fundamental al rețelei**

Rețeaua gravimetrică a țării noastre are ca reper fundamental stația de pendul Surlari, în cadrul Observatorului geofizic, punctul gravimetric fiind cunoscut fie sub numele de Surlari, fie sub numele de Căldărușani. Determinările au fost efectuate în anii 1947 și 1948 cu un aparat tetrapendular Askania, de către M. Socolescu obținându-se valoarea 980542.90 mgal în sistemul vechi Potsdam.

Observatorul Geomagnetic National Surlari, înființat în anul 1943, este Observator Geomagnetic Planetar (1998), membru în cadrul celui mai vast program mondial în domeniul geomagnetismului –INTERMAGNET.

Observații continue ale câmpului gravific se realizează cu gravimetrul LaCoste-Romberg (eroare rezolutivă 0.01 mgal). Pentru observațiile gravimetrice absolute este amenajat un pilon în cadrul rețelei gravimetrice naționale de ordinul I.

În gravimetrie este de remarcat, mult mai pregnant decât în cazul triangulației și nivelmentului, definirea unui sistem internațional de referință, la care urmează să se racordeze rețelele naționale.

În țara noastră punctele Surlari și Roșu (București) au fost racordate de către M.Socolescu la punctul fundamental internațional Potsdam. Acesta publică în 1950 rezultatele obținute pentru punctul Roșu:

$$g^{Potsdam} - g^{Roșu} = 2 g^{Potsdam} * [(T^{Roșu} - T^{Potsdam}) / T^{Potsdam}] = 2 * 981275.3 \quad (3.1)$$

$$[(0.99027797 - 0.98991254) / 0.98991254] = 724.5 \text{ mgal},$$

adică:

$$g^{Roșu} = 981275.3 - 724.5 = 980550.8 \text{ mgal} \quad (3.2)$$

De menționat că la nivel internațional au intervenit modificări în intervalul de timp scurs, ceea ce ar implica reconsiderări și noi determinări pentru punctul fundamental gravimetric din țara noastră.

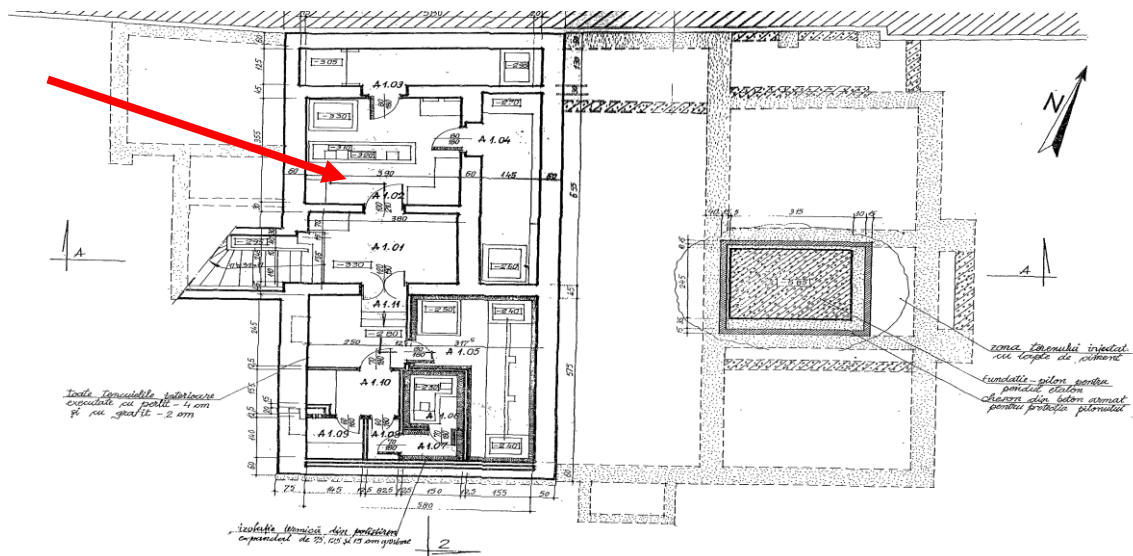


Fig. 3.8: Subsol Observator Surlari (în încăperea A1.02 este situat pilonul gravimetric)

Dintre modificările mai semnificative produse, se menționează, cronologic:

- în raport cu determinările efectuate la Potsdam în perioada 1898 – 1906, au urmat numeroase determinări în alte puncte de observație și s-a descoperit o nouă valoare a gravității la Potsdam (făcută publică în cadrul adunării Uniunii Internaționale de Geodezie și Geofizică din 1967):

$$G^{\text{Potsdam}} = 981260 \text{ mgal},$$

care diferă de cea care intervine în relația de mai scrisă mai sus

- valoarea dată în relația (3.1) era caracterizată de o eroare medie de  $\pm 14$  mgal, precum și de alte erori regionale sistematice.

Referitor la Rețeaua Gravimetrică Națională utilizatorii civili, incluzând Agenția Națională de Cadastru și Publicitate Imobiliară, nu dețin nici un fel de informații. Se cunosc 5 puncte determinate prin măsurători absolute (București, Constanța, Iași, Timișoara, determinate odată cu crearea rețelei de ordinul I și punctul din Cluj-Napoca determinat cu ocazia proiectului UNIGRACE), toate datele fiind deținute de către Ministerul Apărării Naționale prin Direcția Topografică Militară, date ce au fost secrete până în anul 2007.

## Resurse de învățare

### A. Tratat, monografii, cursuri universitare și alte lucrări de specialitate

1. GHIȚĂU Dumitru - Geodezie și gravimetrie geodezică, Editura Didactică și pedagogică, București, 1983
2. WAHR Jhon - *Geodesy and gravity*, Editura Samizdat, 1996
3. \*\*\* - *Instrucțiune cu privire la crearea rețelei gravimetrice naționale*, Chișinău, 2001
4. IAG - *National Report on Geodetic and Geophysical Activities in Romania 1999-2003*, București, 2003
5. MOLDOVEANU, Constantin - *Geodezie*, Editura MATRIXROM, 2005
6. TAPLEY B, GGM02 - *An improved Earth gravity field model from GRACE*, Journal of Geodesy, 2005
7. IAG - *National Report on Geodetic and Geophysical Activities in Romania 2003-2007*, București, 2007
8. TOMOIAGĂ Tiberius - *Contribuții privind determinarea undulațiilor geoidului folosind modele geopotențiale globale și date gravimetrice globale*, București, 2007
9. \*\*\* - *The GRAV-D project*, NOAA, SUA, 2007
10. GRECEA Carmen, MUȘAT, Cosmin, HERBAN, Sorin - *Complemente de măsurători terestre*, Editura Politehnica, Timisoara, 2007
11. MOLDOVEANU Constantin - *Bazele geodeziei fizice*, Editura CONSPRESS, 2010
12. IAG - *National Report on Geodetic and Geophysical Activities in Romania 2007 - 2011*, București, 2011
13. RUS Tiberiu, MOLDOVEANU Constantin - *Considerations on the state of Romania National Geodetic Network*, București, 2012
14. SORTA Vlad - *Contribuții privind determinarea unui geoid/cvasigeoid pentru zona României*, București, 2013

### B. Surse Internet

[http://ro.wikipedia.org/wiki/Legile\\_lui\\_Kepler](http://ro.wikipedia.org/wiki/Legile_lui_Kepler)

[http://ro.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Galilei](http://ro.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei)

<http://www.csr.utexas.edu/grace/>

<http://www.scribd.com/doc/24232617/Geodezia-elipsoidala>

<http://www.scribgroup.com/geografie/geologie/DEFINITIA-SI-SCOPUL-GEODEZIEI71535.php>

<http://isd.c.gfz.potsdam.de/index.php?module=pagesetter&func=viewpub&tid=1&pid=35>

<http://www.scribgroup.com/geografie/geologie/Campul-gravific45451.php>

<http://www.igr.ro/observator/index.php?optiune=4>

[http://geomaps.wr.usgs.gov/gump/gravity\\_base\\_stations/index.html](http://geomaps.wr.usgs.gov/gump/gravity_base_stations/index.html)

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/GOCE](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE)