

Nimeni nu-și va aduce aminte de tine pentru gândurile tale secrete.  
Cere-i Domnului tăria și înțelepciunea pentru a le exprima.

Gabriel Garcia Marquez

## PROLOG

De la **picătura de apă** „din cer” și până la **cea de la robinet** (Fig. PRO.1) este un drum lung și complicat care trece de cele mai multe ori prin structurile adânci ale Pământului. Dăruită cu **energie** de la **Soare** apa coboară în adâncuri pentru a se purifica.

Vă propun, în acest **prolog**, un **traseu Darcy** cu **XII** niveluri de inițiere. Acest **traseu Darcy** traversează lumea apelor subterane, univers complex ale cărui secrete sunt descifrate de știința apelor subterane numită **Hidrogeologie**.

Pe fiecare din cele **XII** niveluri de **inițiere hidrogeologică** sunt definite noțiuni elementare iar fiecare nivel de inițiere este o etapă a metodologiei de realizare a **modelului conceptual al hidrostructurilor**.

**Modelul conceptual al hidrostructurilor** reprezintă **spațiul** în care curg **apele subterane**, curgere determinată de caracteristicile **hidrofizice** și de distribuția **energiilor** pe frontierele și în interiorul acestui **spațiu**. Realizarea modelului conceptual al hidrostructurilor este obiectivul Hidrogeologiei generale, iar reprezentativitatea acestui model conceptual condiționează evaluarea corectă a curgerii apelor subterane.

### Hidrogeologia: știință a naturii

**Științele naturii** s-au născut din **gândirea** neliniștită, în permanentă pendulare între **observație** și **ipoteză**, gândire care încearcă să **explice** totul, cu scopul final de a **putea** totul.

**Gândirea științifică**, în totalitatea ei, caută **puterea**, puterea în raport cu **natura**. Ca **sistem**, gândirea științifică, datorită existenței numeroaselor grupuri de științe dedicate diverselor probleme, este lipsită de unitate fiind dominată de tendința de parcelare. **Gândirea științifică** are trei **funcții** prin care își atinge obiectivele:

- funcția **descriptivă**: **CE ANUME SE ÎNTÂMPLĂ?**
- funcția **explicativă**: **CUM ANUME SE ÎNTÂMPLĂ?**
- funcția **restructurantă**: **S-AR PUTEA ÎNTÂMPLA ȘI ALTFEL?!**

Funcția primordială este **descrierea**, descrierea cât mai exactă, cât mai amănunțită, și totuși **nu prea amănunțită** pentru a reține esențialul și a estompa detaliile perturbatoare. Funcția centrală a științei este **explicarea** iar produsul autentic este contribuția ei **restructurantă**.

**Hidrogeologia** este una din **științele naturii** și ea este dedicată problematicii complexe a **apelor subterane**: originea și formarea, formele de zăcământ, legile de curgere, regimul și resursele apelor subterane, interacțiunea cu rocile, calitatea și

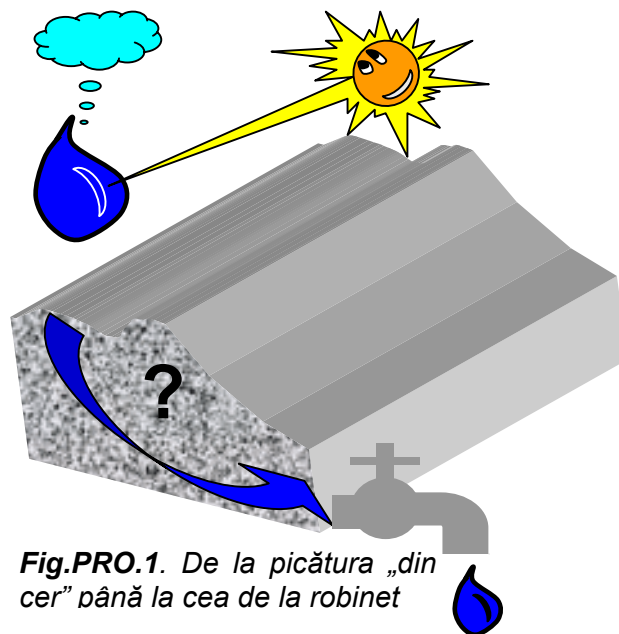


Fig.PRO.1. De la picătura „din cer” până la cea de la robinet

condițiile care determină folosirea în diferite scopuri, regularizarea sau eliminarea din terenurile acvifere.

Apartenența **Hidrogeologiei** la ciclul **științelor geologice** se datorează faptului că apa subterană este un **corp geologic** având o dinamică naturală, cu variații cantitative și calitative în timp și spațiu. Acumulările de ape subterane sunt corpuri geologice complexe care se deosebesc de minerale și roci prin procese dinamice și continui de dezvoltare, situație care provoacă dificultăți în stabilirea limitelor convenționale de clasificare.

**Hidrogeologii** încearcă pe baza unei **descrieri** complete să-și **explice** tot ce se întâmplă cu apa subterană și își doresc **să poată** dispune de toate resursele acesteia în împrejurări de o diversitate nelimitată (diversitate ce poate fi generată prin **simulare**).

Corespunzător celor **trei funcții** ale gândirii științifice **Hidrogeologia** este separată în trei subdiviziuni importante:

- **Hidrogeologia generală;**
- **Dinamica apelor subterane;**
- **Hidrogeologia aplicată.**

**Hidrogeologia generală** este dedicată în totalitate funcției **descriptive** a **Hidrogeologiei** și are ca obiectiv curgerea apei subterane. Descrierea se concentrează asupra a patru categorii de informații:

- factorii naturali ai alimentării și regimului apelor subterane (**cap. 1**);
- originea apelor subterane (**cap. 2**);
- caracteristicile hidrofizice ale terenurilor (**cap. 3**);
- caracteristicile generale ale hidrostructurilor (**cap. 4**).

**Descrierea** ambianței în care curge apa subterană se finalizează prin schematizarea hidrostructurilor (**cap. 5**) într-un **model conceptual** cu **trei componente** distincte:

- **spațiul** în care se produce curgerea apelor subterane (denumit **acvifer** sau **hidrostructură** în funcție de complexitatea acestuia);
- **distribuția spațio-temporală a caracteristicilor hidrofizice** în spațiul unde curge apa subterană (caracteristici hidrofizice reprezentate de **porozitate**, **umiditate**, **conductivitate hidraulică**, **difuzivitate hidraulică** etc.);
- **distribuția spațio-temporală a energiei** apelor subterane în spațiul de curgere și mai ales pe frontierele acestuia (numite **condiții hidrodinamice inițiale** și **condiții de margine sau pe frontiere**).

**Dinamica apelor subterane** îndeplinește funcția **explicativă** a **Hidrogeologiei** și se ocupă cu **modelarea matematică** a curgerii apelor subterane în ambianța modelului conceptual, rezultat al exercitării complete a funcției **descriptive** a Hidrogeologiei generale.

**Dinamica apelor subterane**, fundamentează **modele matematice** pe legile înmagazinării și mișcării apei subterane (ale Hidraulicii subterane) din care se deduc principalele ecuații, soluții și scheme de calcul.

**Modelele matematice** ale curgerii apelor subterane și fluidelor asociate sunt ecuații diferențiale care "**explică**" distribuția energiei de care dispune apa în funcție de **variabilele independente**  $x, y, z$  și  $t$  ( $x, y, z$  - coordonate spațiale într-un sistem de referință tridimensional și ortogonal,  $t$  - timp). Modelele matematice sunt diferențiate în funcție de:

- variabilitatea în spațiu și timp a **caracteristicilor hidrofizice** ale terenurilor prin care se deplasează apa subterană (modele omogene sau neomogene, modele izotrope sau anizotrope);
- valorile **debitelor** care traversează limitele spațiului în care se deplasează apele subterane (modele conservative sau neconservative);
- variabilitatea în timp a **energiei** pe frontierele și în interiorul spațiului în care se deplasează apele subterane (modele staționare sau nestaționare).

Gradul de precizie al rezultatelor modelelor matematice elaborate pentru evaluarea cantitativă a curgerii apelor subterane depinde în mare măsură de eroarea de analogie introdusă de schematizarea condițiilor naturale de curgere (spațiul, distribuția spațio-temporală a caracteristicilor hidrofizice și a energiilor în spațiul de curgere și mai ales pe frontierele acestuia).

**Hidrogeologia generală și Dinamica apelor subterane** constituie împreună **Hidrogeologia teoretică**.

**Hidrogeologia aplicată** are ca preocupare principală dezvoltarea funcției **restructurante** a **Hidrogeologiei**. Funcția **restructurantă** poate realiza **simularea** unor altfel de fenomene decât cele observate direct și poate răspunde în mod concret la întrebarea:

### **S-AR PUTEA ÎNTÂMPLA ȘI ALTFEL ?**

Funcția **restructurantă** se bazează pe modelele matematice ale curgerii apelor subterane cu care se realizează proiectarea lucrărilor necesare pentru utilizarea apelor subterane în diferite scopuri sau combaterea acțiunii acestora asupra lucrărilor ingineresti (ex.: monitorizarea dinamicii și calității apelor subterane, testarea hidrodinamică a acviferelor, captarea apelor subterane și stabilirea zonelor de protecție hidrogeologică pentru sursele de apă subterană, asecarea, detensionarea sau drenarea acviferelor, refacerea rezervei acviferelor, remedierea acviferelor poluate).

Marea diversitate a problemelor în care apa subterană este implicată precum și particularitățile problemelor abordate au făcut ca ramurile **Hidrogeologiei aplicate** să capete o dezvoltare din ce în ce mai mare, unele dintre ele putând fi considerate discipline științifice de sine stătătoare. Fără a face o enumerare exhaustivă, amintim: captări pentru alimentarea cu apă, hidrogeologie minieră, hidrogeologie petroliferă, hidrogeologie inginerască, (se ocupă cu studiul și îmbunătățirea condițiilor hidrogeologice pe amplasamentul construcțiilor civile, industriale și hidrotehnice), hidrogeologie hidroameliorativă (are ca obiect îmbunătățirea condițiilor hidrogeologice pe terenurile agricole în scopul creșterii fertilității solului), hidrogeologie balneară, hidrogeologia de prospecțiune, poluarea apelor subterane etc.

Rezolvarea acestor probleme nu face decât să genereze altele și mai complexe. Avantajul rezolvării corecte a unei probleme de **Hidrogeologie aplicată** este că un **adevăr** o dată stabilit, acest adevăr nici nu tinde spre imuabilitate, nici nu se transformă într-un neadevăr, ci își precizează limitele, condițiile și expresia în concordanță cu complexitatea și particularitățile situațiilor particulare studiate.

Dacă **Hidrogeologia** ca **știință a naturii** s-a născut din **neliniște**, astăzi ea generează **neliniște** întrebându-se din ce în ce mai frecvent dacă:

- Apa subterană este o resursă regenerabilă?
- Este suficientă apă pentru necesitățile în creștere ale oamenilor?
- Degradarea calității apei este un pericol care amenință viața pe Pământ?
- Ce trebuie făcut pentru a asigura apa necesară unei dezvoltări durabile pe planeta noastră?

\*\*\*

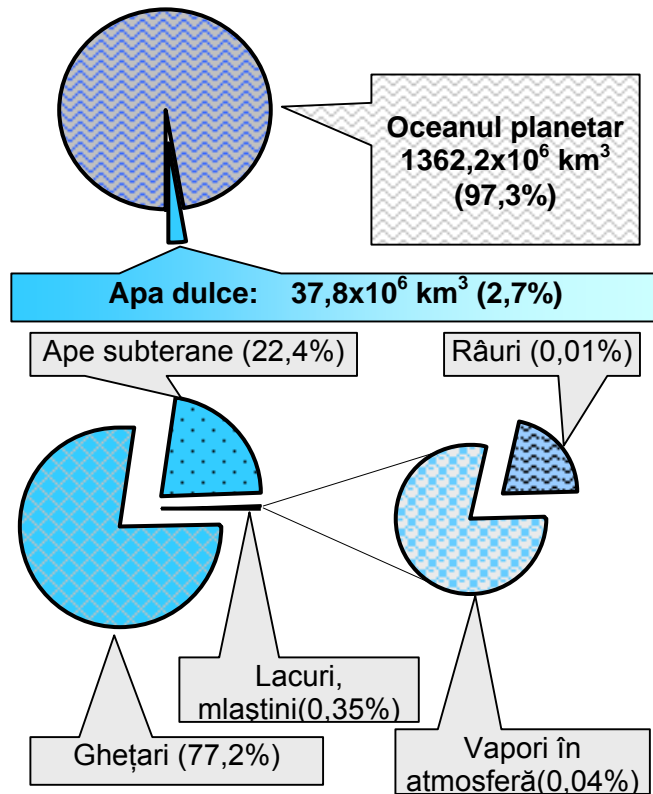
Pentru a putea răspunde provocărilor actuale ale **Hidrogeologiei** să parcurgem cele **XII** niveluri ale traseului apei „din cer” până în adâncurile Pământului!

## I. Câtă apă subterană este?

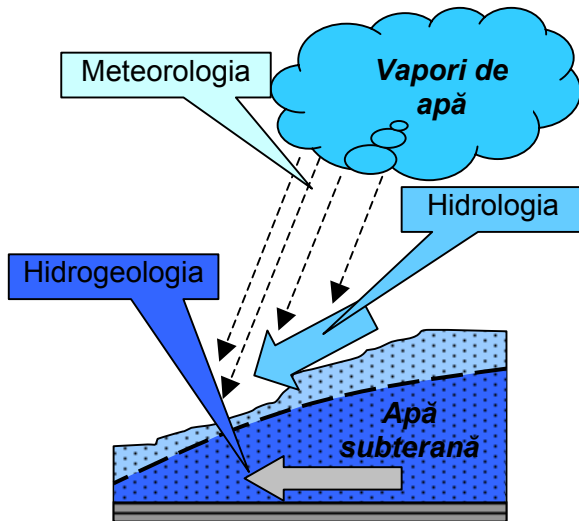
O estimare a volumelor de apă din **Hidrosferă** relevă faptul că **apei sărate** îi revine o proporție de 97,3% (**Fig.PRO.2**) din volumul total de apă al acesteia. Numai o mică parte din resursele de apă ale Pământului este disponibilă pentru necesitățile oamenilor.

**Apa dulce** din ghețari, lacuri, mlaștini și din atmosferă nu este utilizată în mod curent pentru necesitățile industriale și potabile.

Volumul de **ape subterane dulci** de 8,467 milioane  $\text{km}^3$  corespunde acviferelor situate până la circa 200 m adâncime, dar apele subterane dulci se pot găsi și la adâncimi mai mari. Până la 2000 m adâncime, acviferelor au o capacitate de 24 milioane  $\text{km}^3$ , iar până la 5000 m adâncime, capacitatea totală se estimează la 60 milioane  $\text{km}^3$  de apă subterană (Castany, G.,1980). Ultimele date UNESCO arată că numai **0,63 %** din volumul total de apă al Pământului este la dispoziția omului (ape dulci în stare lichidă).



**Fig. PRO.2.** Volumele de apă ale Hidrosferei



**Fig. PRO.3.** Din cer până în adâncurile structurilor geologice, apa este studiată de meteorolog, hidrolog și hidrogeolog.

de aventuri **meteorologice, hidrologice și hidrogeologice** (**Fig.PRO. 3**).

Un volum de apă de circa  $560 \times 10^3 \text{ km}^3$  (0,04 % din volumul total de apă aflat pe planeta noastră) participă anual la un circuit denumit **ciclu hidrologic global**, asigurând permanența apei și deci a vieții pe Pământ (**§1.1.**).

Circulația apei, atât la suprafață cât și în subteran este susținută de energia furnizată în principal de **radiațiile solare** (**§1.2.**). **Energia termică** provenită de la Soare transformă apa de la nivelul Oceanului Planetar (nivel cu energie potențială nulă) în vapori și o ridică în atmosferă (niveluri cu energie potențială pozitivă).

Din **atmosferă** până în adâncurile **structurilor geologice** unde se purifică și devine apă subterană este un drum lung și plin

## II. Care este sursa apelor subterane?

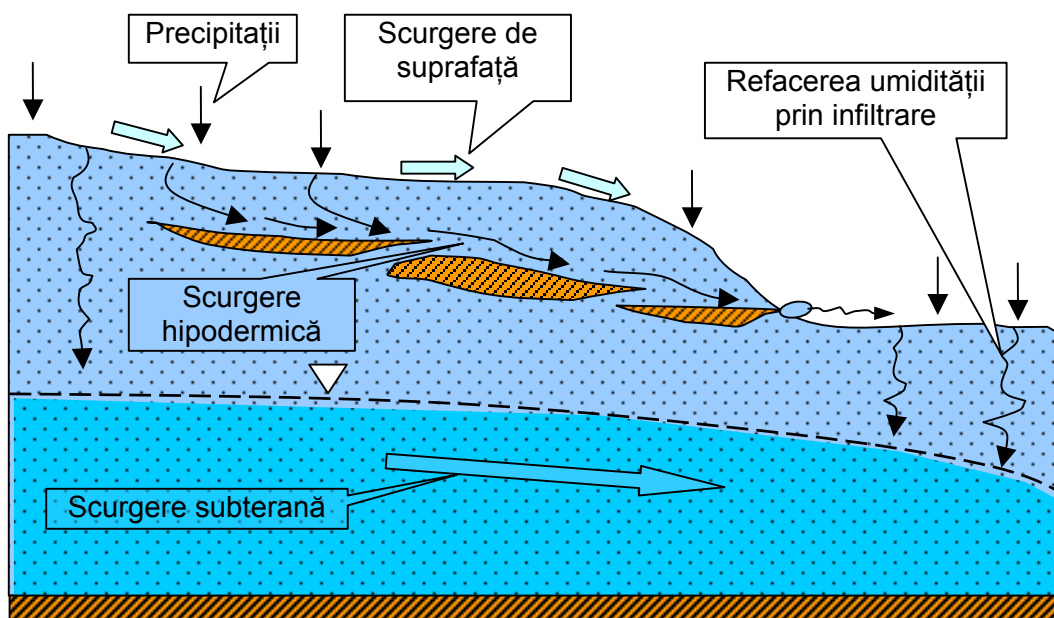
Principala sursă a **apelor subterane** sunt precipitațiile generate de vaporii de apă din atmosferă. O parte din precipitații se transformă în **apă subterană**, apa subterană având și surse **endogene**.

**Precipitațiile**, în funcție de procesele la care participă (§1.3., §1.4.), sunt reținute sub formă de **umiditate** în atmosferă sau în **zona de aerare/vadoasă** a acviferelor (§1.5.). Umiditatea contribuie la alimentarea acviferelor prin condensare și infiltrare.

În condiții hidrogeologice favorabile formării acviferelor (adică formațiuni acoperitoare nisipoase-argiloase), 15 % până la 20 % din precipitații se transformă în apă subterană. Pentru valorile extreme ale precipitațiilor din România rezultă că:

- la o precipitație minimă de 360 mm/an infiltrarea este de 72 mm/an;
- la o precipitație maximă de 1200 mm/an, infiltrarea este de 240 mm/an.

Raportul de 3,3 dintre valorile extreme ale infiltrației evidențiază, la scara unei compensări anuale, în condiții hidrogeologice favorabile, **alimentarea semnificativă prin infiltrare a apelor subterane din România**, dar și o variație importantă a acestui proces, în funcție de repartiția precipitațiilor (§1.6.).



**Fig. PRO.4.** Sursa principală a apelor subterane sunt precipitațiile generate de vaporii de apă din atmosferă

Din momentul contactului precipitațiilor cu suprafața terenului începe o distribuție continuă a acestora între **scurgerea de suprafață**, **scurgerea hipodermică**, **refacerea umidității** și **scurgerea subterană** (§1.7.). Scurgere hipodermică, cea subterană și refacerea umidității din zona de aerare/vadoasă prin infiltrare constituie **infiltrarea totală**, adică acea parte din **precipitații** care se transformă în **apă subterană** (Fig. PRO. 4).

### III. Unde se separă apele subterane de cele de suprafață?

Apele de suprafață și cele subterane circulă în **două** domenii spațiale distincte reunite în **bazinul de recepție** al cursului de apă (§1.8; Fig. PRO. 5):

- **bazinul hidrografic**: domeniul de suprafață care drenează toată scurgerea de suprafață în talvegul unui singur curs de apă;
- **bazinul hidrogeologic**: domeniul subteran în care apele subterane curg către același element de drenaj de suprafață (un curs de apă, un lac, o linie de izvoare).

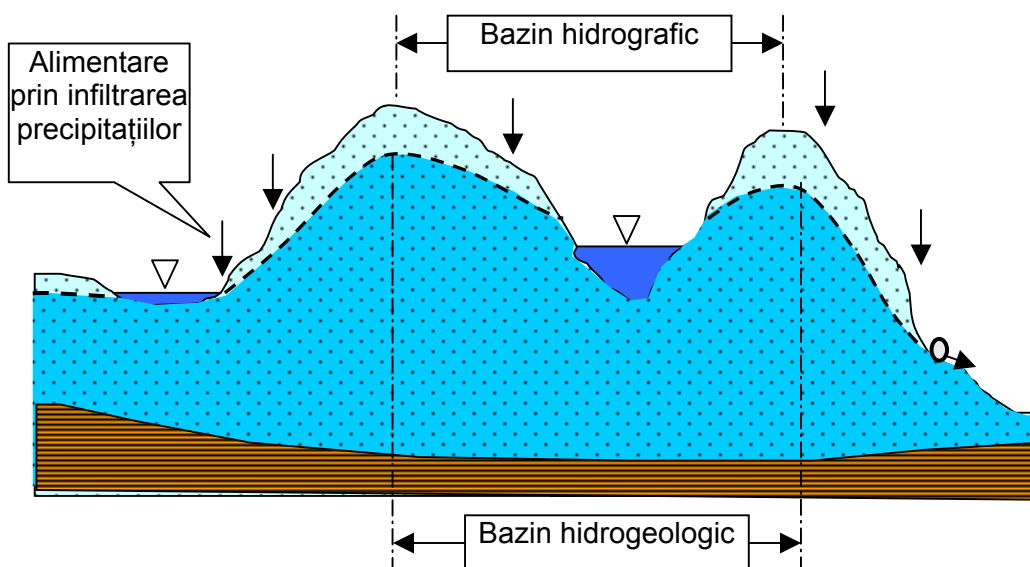


Fig. PRO.5. Componentele bazinului de recepție al unui râu

**Alimentarea** hidrostructurilor se face în principal prin **infiltrarea** precipitațiilor în zonele de aflorare ale formațiunilor permeabile sau prin **drenajul** cursurilor de suprafață.

**Morfologia bazinului hidrografic** (suprafața, panta; §1.8.) și caracteristicile suprafeței acestuia (grad de împădurire, constituția litologică) determină caracteristicile **hidrologice ale cursurilor de apă** (§1.9.) și intensitatea **infiltrației** (§1.10.) ce alimentează acviferele:

- **pantele mari** și caracterul **impermeabil** al formațiunilor acoperitoare determină variabilitatea mare a debitelor rețelei hidrografice, caracterul sezonier al cursurilor de apă și **alimentarea redusă** a hidrostructurilor;
- **pantele reduse** ale suprafeței topografice și **permeabilitatea mare** a formațiunilor acoperitoare determină creșterea infiltrării precipitațiilor, reducerea variabilității debitelor rețelei hidrografice și **favorizează alimentarea** hidrostructurilor.

Distribuția în adâncime a apelor infiltrate din precipitații sau a celor drenate din rețeaua hidrografică este condiționată de **structura geologică a formațiunilor**. Precizarea caracteristicilor **bazinelor hidrogeologice** (structură, parametri hidrogeologici) este o operațiune deosebit de dificilă și costisitoare în condițiile unei structuri geologice complicate.

Apele de suprafață și cele subterane se separă în bazinul de recepție dar păstrează legături permanente prin care reglează bilanțul global al resurselor de apă ale Pământului și calitatea acesteia.

#### IV. Ce relații sunt între apele de suprafață și cele subterane?

Relațiile între apele subterane și cele de suprafață sunt permanente și au o dinamică activă mai ales pentru acviferele de mică adâncime.

Efectul relației hidrodinamice între apele subterane și cele de suprafață se resimte vizibil în:

- **variabilitatea debitelor** rețelei hidrografice;
- **calitatea apelor subterane.**

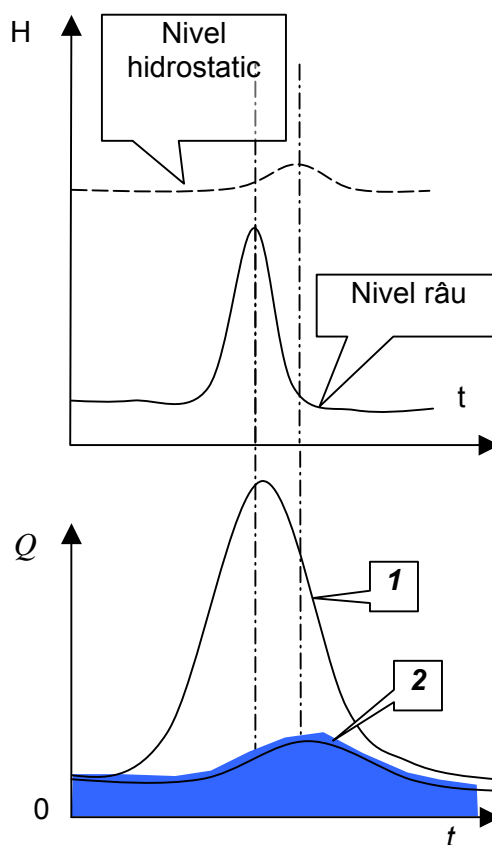
Râurile **alimentate din subteran** au un caracter **permanent** și o variabilitate redusă a debitului, în timp ce râurile **fără alimentare din subteran** au o variabilitate mare a debitului și un caracter **sezonier** (§1.11.).

Evaluarea cantitativă a contribuției acviferelor la alimentarea cursurilor de apă se face cu ajutorul **hidrografului debitelor scurgerii totale**. Metodologia de separare a **scurgerii subterane** din **scurgerea totală** se bazează pe relația între evoluția nivelului apei în râu și a nivelului apei în acviferul care îl alimentează. Cu cât cota nivelului apei în acvifer este mai mare în raport cu cota nivelului apei în râu, alimentarea râului din acvifer este mai importantă (**Fig. PRO.6**).

Pentru evaluarea contribuției acviferelor la alimentarea cursurilor de apă se utilizează și diferența dintre **calitatea apelor de suprafață** și calitatea apelor subterane (metoda hidrochimică). Vulnerabilitatea la poluare a apelor de suprafață fiind mai mare decât a apelor subterane, de cele mai multe ori comunicarea acviferelor cu apele de suprafață este în detrimentul calității apelor subterane.

Efectele cantitative și calitative ale relațiilor hidrodinamice între apele de suprafață și cele subterane exprimate prin diverși parametri (§1.12.) permit o primă evaluare a extinderii și potențialului hidrostructurilor, validată pe **baza bilanțului mediu anual al bazinului de recepție** (§1.13.).

**Bilanțul hidrogeologic** al hidrostructurilor sau al unui acvifer, având o structură complexă și un necesar eterogen de informații, este recomandat să fie precedat de cunoașterea **bilanțului global al bazinului de recepție** în care este cuprinsă hidrostructura sau acviferul aflate în legătură hidrodinamică cu apele de suprafață.



**Fig.PRO.6.** Separarea scurgerii subterane pe hidrograful unui râu alimentat de un acvifer freatic fără legătură hidraulică cu râul.

- **1-variația debitului scurgerii totale;**
- **2-variația debitului scurgerii subterane**

## V. Cum s-a format apa subterană?

Formarea apelor subterane este explicată prin diverse teorii generate de:

- diversitatea condițiilor climatice din zonele de alimentare ale acviferelor;
- calitățile fizico-chimice ale apelor subterane (calde, reci, mineralizate, nemineralizate, cu gaze, fără gaze etc.);
- vârsta diferită a apelor subterane.

Teoriile privind originea apelor subterane pot fi separate în două categorii:

- teorii "**exogene**" care consideră apele subterane provenite din precipitațiile de la suprafața Pământului (teoria infiltrării: §2.1.1., teoria condensării: §2.1.2., teoria originii arteziene: §2.1.4., teoria apelor regenerate: §2.1.5., teoria apelor fosile: §2.1.6.);
- teorii "**endogene**" care consideră că sursa apelor subterane este condensarea vaporilor de apă rezultați din procesele fizico-chimice de adâncime (teoria juvenilă: §2.1.3.).

Într-o concepție unitară se admite că apele subterane în integralitatea lor au o **origine mixtă**, ponderea celor două surse (**endogenă** și **exogenă**) fiind condiționată de caracteristicile hidrostructurii (Fig.PRO.7).

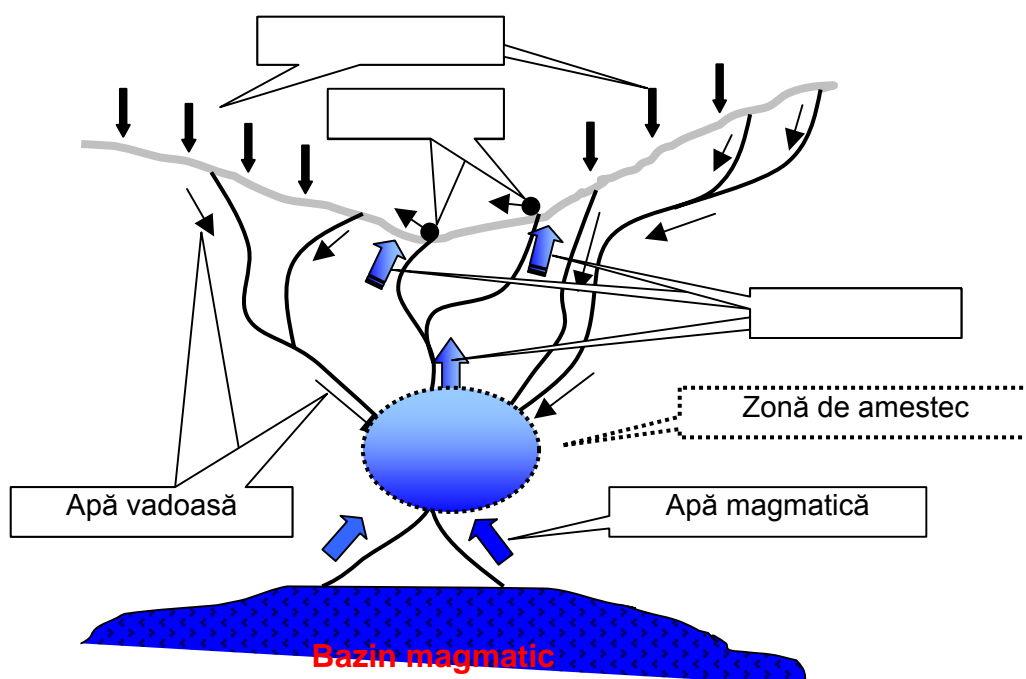


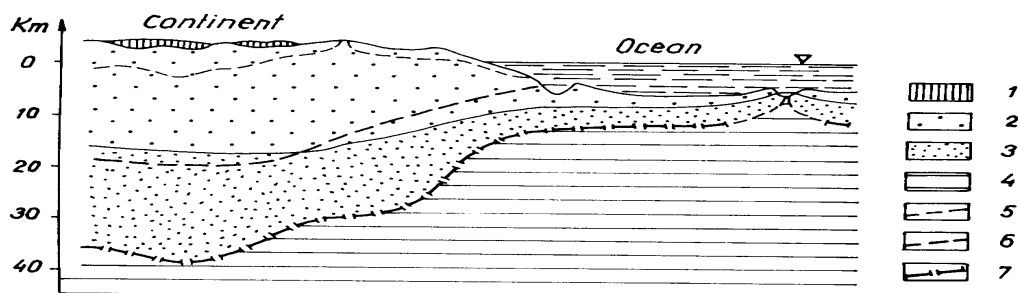
Fig. PRO.7. Schematizarea condițiilor de formare a apelor de origine mixtă

Pentru hidrostructurile de **mică adâncime**, cu acvifere freactice, ponderea componentei **exogene**, rezultată prin infiltrare și condensare, reprezintă **100%**, iar pentru hidrostructurile **adânci**, cu ape termo-minerale, ponderea componentei **endogene crește** proporțional cu adâncimea.

Cunoașterea proceselor și teoriilor care explică geneza apelor subterane fundamentează programele de cercetare a acumulărilor de ape subterane potabile, minerale sau termale.

## VI. Apă subterană este până la Moho!

Sub diversele ei forme, de la **starea de vapori** până la **starea supracritică** (§2.2.1.) apa este prezentă până la baza scoarței terestre (**Fig. PRO.8**).



**Fig.PRO.8.** Zonalitatea verticală a hidrosferei subterane (după Obsciaia ghidogheologia, 1980): 1-zona de îngheț; 2-zona de saturație; 3-zona cu apă în stare supracritică; 4-mantaua superioară; 5-limita dintre pătura sedimentară și cea granitică; 6-suprafața Conrad (limita dintre pătura granitică și cea bazaltică); 7-suprafața Mohorovicic.

Distribuția apelor subterane în scoarța terestră se face prin trei tipuri de forme geologice de mișcare (§2.2.4.):

- **mișcarea meteogenă** a apei subterane este localizată în partea superioară a scoarței terestre (adâncimi de 0,5-1,0 km, mai rar 3 km, iar în condiții favorabile se dezvoltă până la 5 km);
- **mișcarea litogenă** a apei subterane se produce în cadrul proceselor de diageneză a complexelor sedimentare, la adâncimi mai mari de 1-3 km;
- **mișcarea magmatogenă** a apei subterane este caracteristică pentru domeniile de mare adâncime, acolo unde se formează sisteme hidrominerale.

În cadrul marilor bazine hidrogeologice, ca rezultat al mișcării apei se pot separa, de sus în jos, trei zone hidrogeodinamice (§2.2.5.):

- **Zona schimbului activ** este cea care drenează rețeaua hidrografică și se găsește sub influența factorilor climatici sezonieri. Ea se dezvoltă până la **baza locală de eroziune**, apele sunt dulci, cu o mineralizație totală sub **1 gram/litru** iar durata schimbului de apă este de ordinul **lunilor** și a **anilor**, ajungându-se la adâncimi mai mari și la sute de ani.
- **Zona schimbului lent de ape** este slab influențată de rețeaua hidrografică iar factorii climatici se manifestă numai prin ciclurile de variație de lungă durată. Această zonă se dezvoltă sub baza locală de eroziune, mineralizația apelor este cuprinsă între **1 gram/litru** și **35 grame/litru** (deci apele sunt sărate), iar durata schimbului de apă ajunge la mii sau chiar zeci de mii de ani.
- **Zona schimbului pasiv de ape**, cu regim practic stagnant, prezintă mineralizații **mai mari de 35 grame/litru** (saramuri) și durate ale schimbului de apă de ordinul **milioanelor de ani**.

Distribuția apelor subterane la scara scoarței terestre și zonarea lor hidrogeodinamică, validate și pe baza originii și vârstei lor izotopice (§2.3.), sunt criterii generale care stau la baza proiectării prospecțiunilor pentru ape subterane.

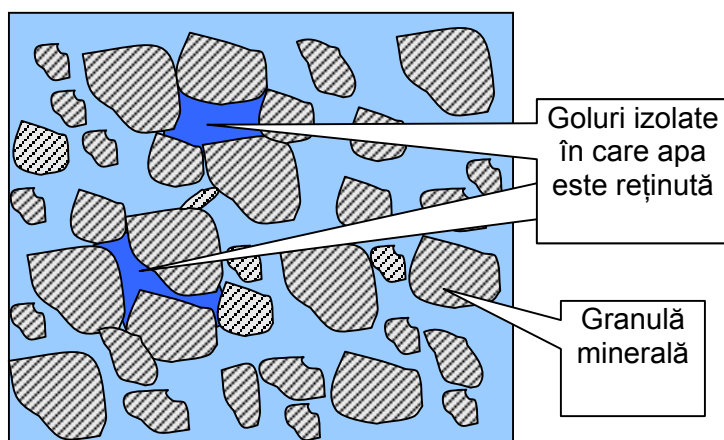
## VII. Apa subterană este un corp dinamic

Ajunsă în subteran apa **ocupă** spațiul pus la dispoziție de formațiunile geologice și își consumă energia de care dispune **deplasându-se** pe traseele accesibile.

Cât spațiu poate să ocupe **chiriașul** și cât de **dinamic** poate fi, depinde de **gazdă**, adică matricea minerală a terenurilor (terenuri reprezentate prin: sol, sedimente și roci). Caracteristicile **matricei minerale** pot fi exprimate cantitativ prin doi parametri sintetici:

- **Porozitatea** care precizează **spațiul** total pe care îl poate ocupa apa subterană într-un anumit volum de teren permeabil;
- **Permeabilitatea** care cuantifică **dimensiunea golurilor** prin care se poate deplasa apa subterană .

**Porozitatea totală** a unui teren este definită de proporția de **goluri**, de forme și dimensiuni diferite (**Fig.PRO.9**) pe care le conține într-un anumit volum. Ea



**Fig.PRO.9.** Matrice minerală granulară cu porozitate activă de 25% (pietrișuri și nisipuri).

determină capacitatea **colectoare (de stocare)** a terenului, este exprimată în procente și are valori de la **1% (calcare, granite, bazalte) la 87% (piatra ponce; §3.1.2.1)**. O parte din goluri sunt izolate, rețin apa și constituie **porozitatea de retenție**, restul golurilor, care permit circulația liberă a apei, definesc **porozitatea activă**. Mai riguros, **porozitatea activă** este exprimată prin raportul

dintre volumul de apă liberă pe care un teren saturat îl eliberează sub efectul unui drenaj complet (drenare liberă, gravitațională, a apei din **golurile aflate în comunicare**) și volumul său total. Domeniul de variație al porozității active este mai restrâns în raport cu cel al porozității totale: de la 0,1 % (pentru granite fisurate) până la 25 % (pentru nisipuri și pietrișuri; §3.1.2.3.).

Deplasarea apei subterane depinde nu numai de proporția golurilor în comunicare hidraulică ci și de **forma** și **dimensiunea** acestor goluri. **Permeabilitatea** este caracteristica intrinsecă a matricei minerale dependentă de **forma** și **dimensiunea** golurilor prin care se pot deplasa fluidele și se cuantifică prin intermediul **coeficientului de permeabilitate** ( $K_p$ ).

Valoarea coeficientului de permeabilitate pentru terenurile granulare este proporțională cu **pătratul diametrului mediu** al granulelor din care este constituit, valorile extreme fiind cuprinse între 0,001 darcy (pentru argilă, silt) și 1000 darcy (pentru pietriș bine sortat; §3.1.3; 1 darcy =  $9,87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ ).

### VIII. Relațiile apei subterane cu matricea minerală

Relațiile apei subterane cu matricea minerală sunt controlate de caracteristicile fizice ale apei (§3.2.), de gradul de **saturație** cu apă al matricei minerale (§3.3.1.) și de starea de **tensiune** de la contactul apă-matrice minerală (§3.3.2.). Din aceste relații rezultă răspunsul la următoarele întrebări:

- Cât **spațiu** are la dispoziție apa subterană (evaluat prin **capacitatea de înmagazinare**; §3.3.4.)?
- Cât de repede se poate **deplasa** apa subterană (estimare realizată prin **conductivitatea hidraulică**; §3.3.5)?
- Cât de **elastice** sunt relațiile între apa subterană și matricea minerală (sintetizate prin **difuzivitatea hidraulică**; §3.3.6)?

La **înmagazinarea apei** în acvifere cu **nivel liber** ( $h < M$ ; Fig.PRO.10) porozitatea este practic invariabilă în raport cu presiunea apei astfel încât **coeficientul de înmagazinare** este identic cu **porozitatea**. În cazul înmagazinării apei în acvifere sub **presiune** ( $h \geq M$ ), variația greutatei specifice, a porozității și grosimii acviferului, datorate variației presiunii nu pot fi neglijate iar valorile **coeficientului specific de înmagazinare** sunt mai mici decât porozitatea având valori cuprinse în intervalul  $10^{-5} \div 10^{-3} m^{-1}$  (corespunzător unei variații unitare a presiunii!!).

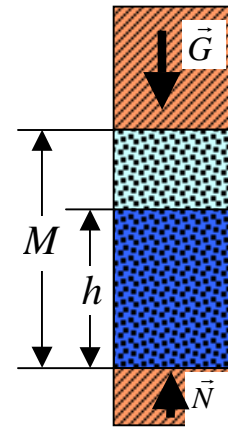


Fig.PRO.10. Capacitatea de înmagazinare

**Deplasarea** apei subterane în terenurile nesaturate se face cu atât mai ușor cu cât gradul de saturație este mai mare (§3.3.3.). După saturare, deplasarea apei subterane este favorizată de creșterea dimensiunii golurilor, reducerea vâscozității și creșterea greutatei specifice (§3.3.4.).

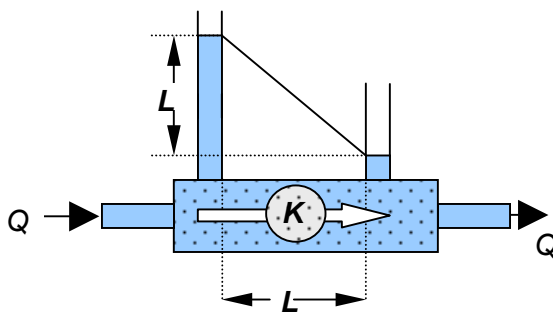


Fig.PRO.11. Experimentul lui Darcy

**Conductivitatea hidraulică** este parametrul care sintetizează caracteristicile deplasării apei subterane prin intermediul valorii **vitezei de deplasare** a apei în **condiții hidrodinamice standard** (§3.3.5.; Fig.PRO.11). Domeniul de variație a conductivității hidraulice este foarte mare: de la mai mult de 1000

m/zi pentru bolovănișuri și pietrișuri la mai puțin de 0,001 m/zi pentru argile și marne. Vitezele reale cu care se deplasează apa subterană sunt mult mai mici decât valorile conductivității hidraulice deoarece, în acvifere, gradientii hidraulici sunt sub 1%.

**Propagarea** perturbării echilibrelor hidrodinamice în acvifere este condiționată de caracteristicile **elastice** ale **apei** și **matricei minerale**. Ritmul de propagare al acestor perturbații este evaluat prin intermediul **coeficientului de difuzivitate hidraulică** a cărei valoare reprezintă suprafața baleiată de unda de perturbare în unitatea de timp. Forma frontului de perturbare poate fi circulară dacă acviferul este izotrop sau eliptică dacă acviferul este anizotrop (Fig.PRO.12). Valorile maxime ale acestor suprafețe ating  $10^6 m^2/zi$  pentru nisipuri fine.

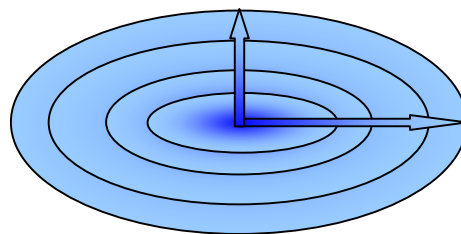


Fig.PRO.12. Difuzivitatea hidraulică într-un mediu anizotrop

Valorile maxime ale acestor suprafețe ating  $10^6 m^2/zi$  pentru nisipuri fine.

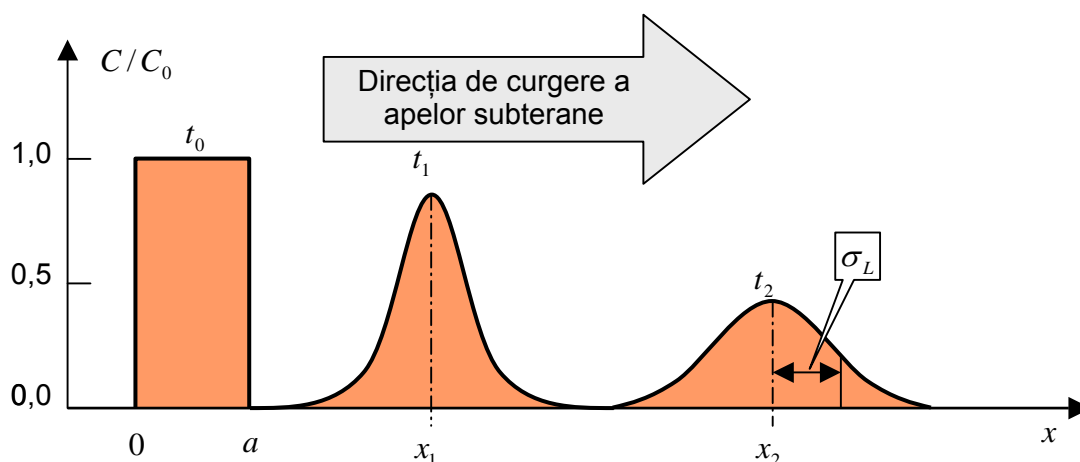
## IX. Relațiile apei subterane cu fluidele miscibile

Apa subterană nu tolerează mult timp alți „chiriași” în acvifere!

Substanțele care prin dizolvare se asociază intim cu apa subterană (**solide/fluide/gazoase**) sunt supuse unui **proces** complex care are ca rezultat final **eliminarea** lor și purificarea apei. Procesul, numit **autoepurare**, este perfid și nemilos chiar dacă în unele cazuri durează așa de mult că este necesară intervenția antropică pentru ameliorarea calității apelor subterane.

La primul contact, noul chiriaș este primit cu brațele deschise, înglobat în masa apei subterane prin **difuzie** și antrenat în mișcare prin **advecție**. Autoepurarea se face prin **sorbție**, **dezintegrare radioactivă**, **precipitare chimică**, **degradare biologică** etc.

Procesele de **difuzie moleculară** și de **advecție** care nu pot fi separate sunt evaluate cu ajutorul **coeficientului de dispersie hidrodinamică**, similar cu difuzivitatea hidraulică (**Fig.PRO.11**).



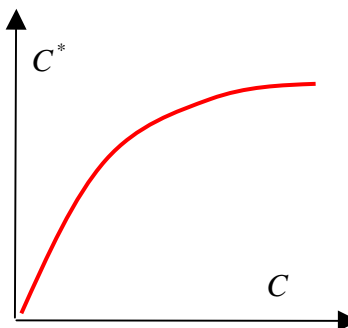
**Fig.PRO.11.** Schematizarea transferului unui fluid solubil prin dispersie și advecție

**Coeficientul de dispersie hidrodinamică** exprimă **suprafața** pe care se “împrăștie” fluidul dizolvat în unitatea de **timp** sub efectul **difuziei** și **dispersiei**. Raportul dintre masa dizolvată transportată prin **advecție** și cea transportată prin **difuzie** este în funcție de caracteristicile matricei minerale, viteza de curgere a apei și gradientul de concentrație.

Substanțele dizolvate în apă sunt fixate fizic prin **sorbție** de granulele minerale ale terenurilor în care sunt acumulate acviferele, fixate chimic de carbonul organic din apă, **precipitate** în reacție cu diverși compuși din apă, **degradate** biotic sau abiotic.

Ca efect al proceselor de **fixare (sorbție)**, unele substanțe (contaminanți) se deplasează mai încet (**retardare**) decât apa care-i transportă.

**Întârzierea** depinde de caracteristicile procesului de sorbție care pe baze experimentale se modelează sub forma izotermelor de sorbție (**Fig.PRO.12**) în care se sintetizează corelația între concentrația fluidului dizolvat în apă ( $C$ ) și cantitatea fixată prin sorbție pe substratul solid ( $C^*$ ).



**Fig.PRO.12.** Izotermă Langmuir:

## X. Relațiile apei subterane cu fluidele imiscibile

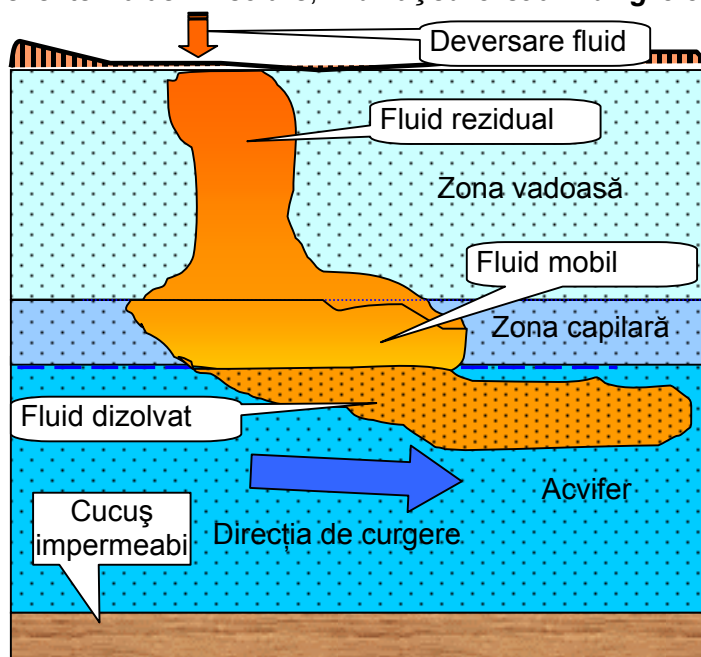
Când în acvifer sunt prezente fluide imiscibile, **mai ușoare** sau **mai grele** decât apa subterană, apar probleme de intoleranță grave. Prioritățile pentru ocuparea spațiului disponibil și deplasările fluidelor sunt reglate de caracteristicile fluidelor și ale matricei minerale.

Pentru descrierea deplasării fiecărui fluid se utilizează parametrul **permeabilitate relativă**. Permeabilitatea relativă este condiționată de **gradul de saturație** a formațiunii cu fluid precum și de **unghiul de contact** dintre fluid și faza solidă:

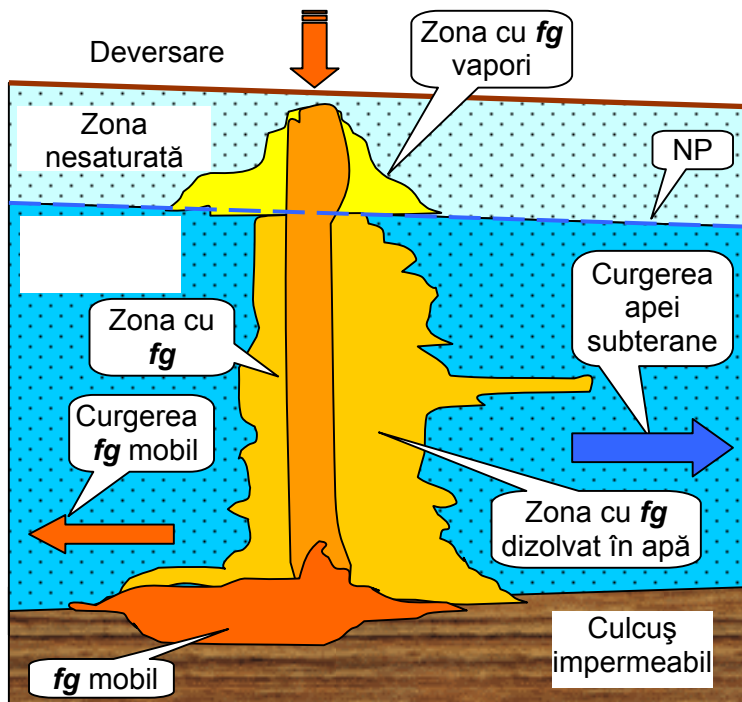
- dacă un fluid ocupă o fracțiune mai **mică** din spațiul poros disponibil și **udă** matricea minerală se va deplasa mai **greu** ;
- dacă fluidul ocupă o fracțiune mai **mare** din spațiul poros disponibil și **nu udă** matricea minerală se va deplasa mai **ușor**.

**Fluidele imiscibile și mai ușoare decât apa** (*fu*: gazolina, motorina etc.), migrează vertical în zona vadoasă și dacă există o cantitate suficientă care să asigure depășirea **saturației reziduale** (§3.4.2.1), fluidele imiscibile se **acumulează** la partea superioară a **zonei capilare** (Fig.PRO.13).

**Fluidele imiscibile și mai grele decât apa** (*fg*: tricloroetilena, pentaclorofenol), traversează **zona vadoasă**, nesaturată cu apă, **zona capilară**, saturată cu apă, **zona saturată (acviferul)** și dacă fluidul este în cantitate suficientă ajunge pe **culcușul impermeabil** al acviferului unde se poate acumula în zonele de depresionare sau se deplasează în funcție de morfologia acestuia și de dinamica acviferului (§3.4.2.2).



**Fig.PRO.13.** Acumularea fluidelor imiscibile mai ușoare decât apa (*fu*).

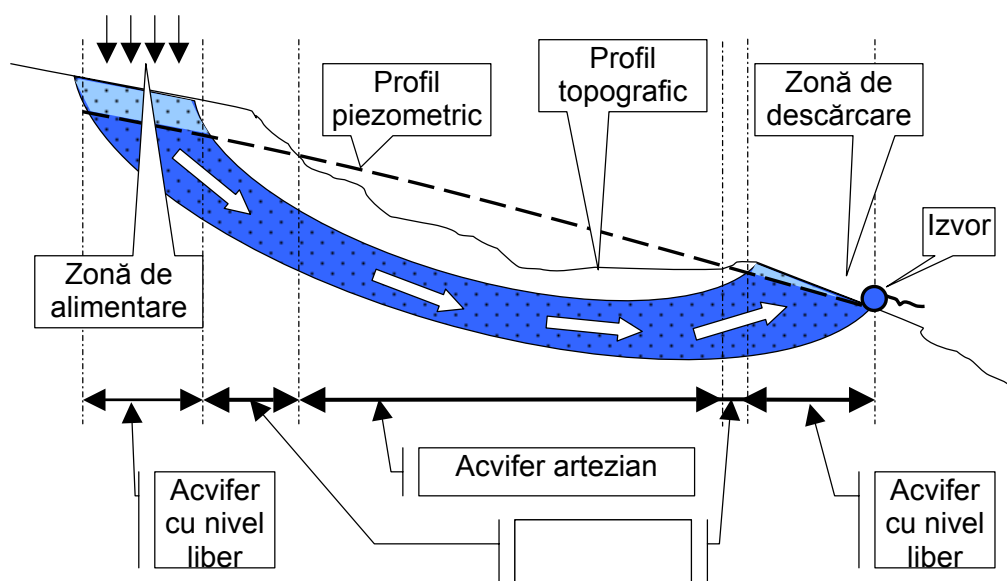


**Fig.PRO.14.** Distribuția fluidului imiscibil mai greu decât apa (*fg*) în zona vadoasă și în acvifer.

## XI. Hidrostructura și acviferul

**Hidrostructura** este spațiul geologic în care se produce curgerea apelor subterane, fiind constituită dintr-un ansamblu finit de terenuri diferențiate după caracteristicile lor geologice (vârstă, litologie, structură etc.) și comportamentul lor în raport cu apa (permeabile, impermeabile), conectate printr-o legătură hidrolică permanentă.

**Acviferul** este componenta elementară a **hidrostructurilor**, fiind situat pe prima treaptă într-o scară a complexității hidrogeologice care mai cuprinde **complexul acvifer, suita acviferă și bazinul acvifer (§4.1)**. **Acviferul** este partea **saturată** cu apă a unei formațiuni **permeabile suficient de conductoare** pentru a permite **curgerea semnificativă** a unui curent acvifer și captarea **profitabilă** a apei subterane. De la **acviferele cu nivel liber** cu drenaj activ, capacitate mare de stocare și vulnerabile la poluare, la cele **sub presiune**, cu dinamică mai lentă și protejate la poluare (**Fig.PRO.15**), acviferele sunt sediul unor procese dinamice



**Fig.PRO.15.** Structură acviferă sinclinală

complexe.

Diferențiate după caracteristicile litologice ale terenurilor permeabile în care se dezvoltă există **hidrostructuri în sedimente neconsolidate, în formațiuni sedimentare, în roci vulcanice și în roci intruzive și metamorfice**.

**Sedimentele neconsolidate** (nisipuri grosiere, pietrișuri și bolovănișuri) au cele mai mari conductivități hidraulice și se plasează de cele mai multe ori în vecinătatea surselor de alimentare a acviferelor (râuri și lacuri). Plasate în zona schimbului activ de ape, acvifere dezvoltate în sedimente neconsolidate au o mare vulnerabilitate la poluare dar și un potențial de autoepurare considerabil (§4.2).

Acviferele din **rocile sedimentare detritice** au un **potențial acvifer mediu**, o continuitate hidrodinamică semnificativă și o variabilitate parametrică relativ redusă, în comparație cu cele din rocile sedimentare carbonatice. Plasate la adâncimi mai mari decât acviferele din sedimente neconsolidate, aceste acvifere sunt mai puțin vulnerabile la poluare fiind de cele mai multe ori captive sau sub presiune (§4.3). Rocile vulcanice (tufuri, cenuși, curgeri de lave, bazalte) cu o foarte mare porozitate primară și o **permeabilitate redusă** datorită izolării golurilor pot acumula acvifere cu potențial mare în condiții speciale (§4.4). Rocile intruzive și metamorfice au o **porozitate primară** foarte mică în raport cu cele sedimentare, prezența acviferelor în aceste roci fiind condiționată de existența fracturilor, faliilor sau zonelor de alterare care determină apariția **porozității secundare** (§4.5).

## XII. Schematizarea hidrostructurilor

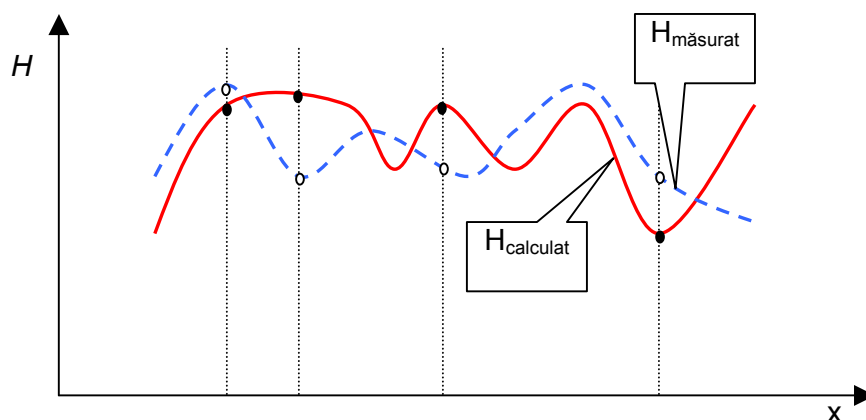
**Schematizarea** hidrostructurilor este o operațiune de **simplificare** a complexității structurii spațiale, a distribuției caracteristicilor hidrofizice și a energiei care determină curgerea apelor subterane. Rezultatul **schematizării** este un **model conceptual al hidrostructurii** care se obține în trei etape de prelucrare:

- **Schematizarea spațială** pentru precizarea **geometriei spațiului** în care are loc curgerea apelor subterane;
- **Schematizarea parametrică** pentru evaluarea **distribuției spațiale a caracteristicilor hidrofizice** ce descriu proprietățile acvifere ale terenurilor (porozitatea, conductivitatea hidraulică, transmisivitatea, difuzivitatea hidraulică etc.);
- **Schematizarea hidrodinamică** pentru precizarea condițiilor hidrodinamice (energetice) pe **frontierele** sistemului acvifer și a **condițiilor hidrodinamice inițiale** în interiorul acestuia.

**Modelul conceptual al hidrostructurii** definește în detaliu condițiile pentru care se elaborează **modelul matematic al curgerii apelor subterane**. Corectitudinea evaluării cantitative a curgerii apelor subterane se bazează pe reprezentarea fidelă în model a hidrostructurii reale.

Asigurarea **reprezentativității modelelor** este o operațiune delicată care necesită o integrare completă și corectă a tuturor informațiilor disponibile și o cunoaștere profundă a metodelor de prelucrare a datelor.

**Dificil de obținut**, reprezentativitatea modelelor este **ușor de verificat** pe baza diferenței dintre caracteristicile curgerii apelor subterane **calculate** cu ajutorul modelului (ex.: sarcina piezometrică calculată:  $H_{\text{calculat}}$ ) și cele **măsurate** în



**Fig.PRO.18.** Evaluarea reprezentativității modelelor hidrostructurilor

hidrostructurile reale (ex.: sarcina piezometrică măsurată:  $H_{\text{măsurat}}$ ; **Fig.PRO.18**). Cu cât diferența ( $H_{\text{măsurat}} - H_{\text{calculat}}$ ) este mai mică, cu atât mai bună este reprezentativitatea modelului hidrostructurii.

Pentru **maximizarea** reprezentativității modelelor hidrostructurilor, **schematizarea** trebuie să fie o operațiune **iterativă** realizată concomitent cu modelarea matematică a curgerii apelor subterane. În prima etapă a schematizării se realizează o **inițializare hidrodinamică** și **parametrică** a modelului hidrostructurii, schematizarea definitivându-se în etapa de **calare** a modelului matematic.

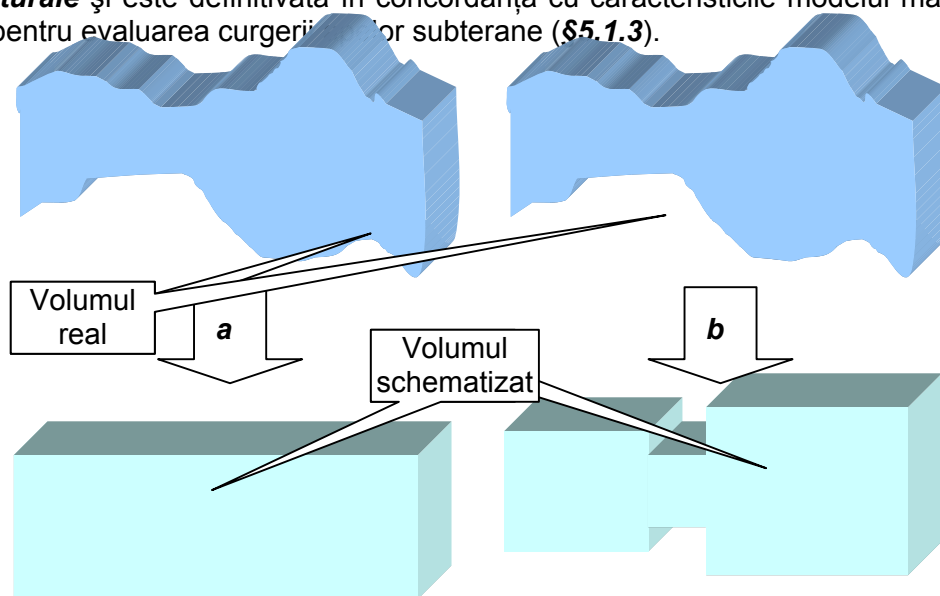
### Schematizarea spațială

Schematizarea **spațiului** în care are loc curgerea apelor subterane trebuie să țină seamă de: complexitatea **structurii geologice**, **extinderea** în spațiu a zonei cercetate, **modalitatea de soluționare** (analitică/numerică) a ecuațiilor modelului matematic (§.5.1).

Gradul de simplificare a formei hidrostructurii depinde de flexibilitatea metodelor de prelucrare utilizate de modelul matematic ales:

- **modelele matematice simple** cu soluții analitice exacte impun o **simplificare drastică** a formei hidrostructurilor;
- **modelele matematice complexe** cu soluții obținute prin metode numerice permit o **redare detaliată a formei reale** a hidrostructurilor.

Schematizarea spațială se face cu ajutorul **secțiunilor geologice** și **hărților structurale** și este definitivată în concordanță cu caracteristicile modelului matematic ales pentru evaluarea curgerii apelor subterane (§5.1.3).



**Fig.PRO.19.** Schematizarea spațială pentru modele matematice cu soluții analitice (a) și pentru modele matematice cu soluții numerice (b).

Forma reală a volumului în care are loc curgerea apelor subterane (**Fig.PRO. 19**) se poate schematiza printr-o **prismă dreptunghică** pentru modelele matematice cu soluții analitice (**Fig.PRO. 19.a**) sau printr-o rețea de prisme dreptunghice în cazul modelelor matematice rezolvate numeric (elemente finite/diferențe finite; **Fig.PRO. 19.b**). **Fidelitatea** redării spațiului în care are loc curgerea apelor subterane este invers proporțională cu **dimensiunea prismei elementare** utilizată pentru schematizare.

Există numeroase metode și instrumente care pot crește fidelitatea redării geometriei hidrostructurilor complexe. Eficiența schematizării spațiale a hidrostructurilor este condiționată de:

- precizia cu care este cunoscută forma structurii reale (erorile de măsurare a coordonatelor spațiale);
- sensibilitatea (**senzitivitatea**) modelului matematic la morfologia limitelor acviferului (acoperiș, culcuș, limite în plan orizontal etc.).

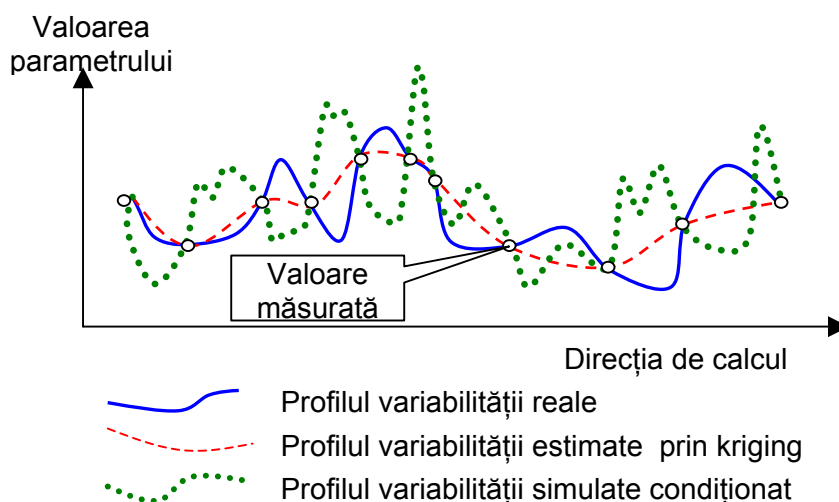
### Schematizarea parametrică

Rezultatul schematizării parametrice este **imaginea** distribuției spațiale a parametrilor studiați (porozitatea, conductivitatea hidraulică, coeficientul de înmagazinare etc.) în interiorul spațiului definit prin schematizarea spațială.

Distribuția spațială a parametrilor este reprezentată sub forma **hărților și secțiunilor** realizate pe baza **valorilor** parametrilor determinate în diferite **puncte** din spațiu (aflorimentele cartate, forajele de cercetare, probele recoltate, profilele de rezistivitate, carotajele geofizice etc.).

Sunt posibile două variante de realizare a schematizării distribuției spațiale a parametrilor hidrostructurilor (**Fig.PRO.20; §5.2**):

- **estimarea** celei mai probabile distribuții spațiale, prin **kriging**, pe baza minimizării varianței erorilor de estimare;
- **simularea** domeniului de variabilitate maximă, prin **simulare condițională**, pe baza legilor de distribuție a parametrilor.



**Fig.PRO.20.** Schematizarea variabilității reale a parametrilor prin kriging și simulare condițională.

Mai mult decât schematizarea formei acviferelor, metodele de schematizare a distribuției parametrilor acviferelor trebuie să țină seamă de particularitățile modelului matematic ce va fi utilizat pentru evaluarea cantitativă a curgerii apelor subterane:

- pentru modelele cu soluții analitice se procedează la echivalarea acviferelor neomogene și anizotrope cu acvifere echivalente omogene și izotrope prin distorsiune parametrică sau geometrică (§5.2.3.1);
- pentru modelele cu soluții numerice se discretizează distribuția parametrilor într-o rețea a cărei orientare și densitate se aleg în funcție de caracteristicile anizotropiei și neomogenității (§5.2.3.2).

**Senzitivitatea modelului matematic** este determinantă pentru alegerea corectă a gradului de detaliere cu care este schematizată distribuția spațială a parametrilor hidrogeologici ai acviferului:

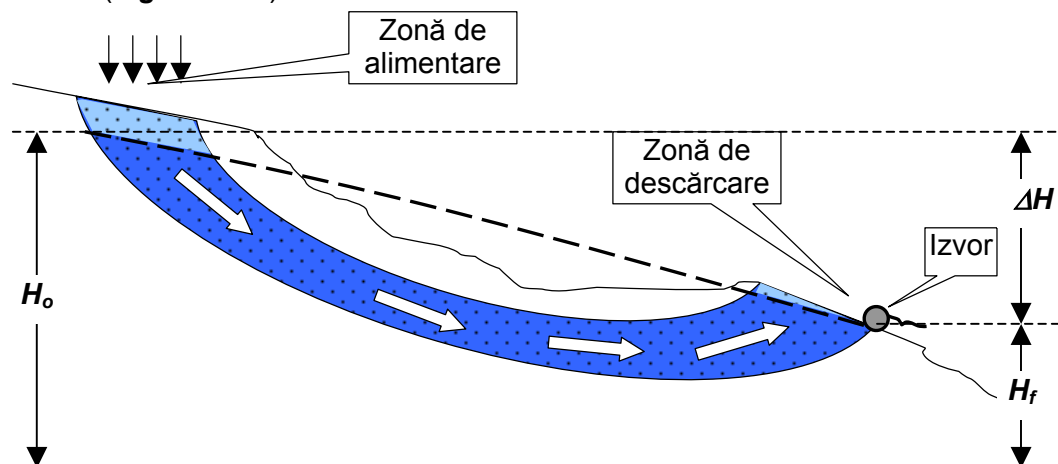
- dacă variația unui parametru se reflectă semnificativ în valoarea variabilei calculate prin model (senzitivitatea modelului este mare), schematizarea trebuie să reflecte cât mai detaliat distribuția reală a parametrului din hidrostructura modelată;
- dacă variația unui parametru are efect nesemnificativ asupra valorii variabilei calculate prin model (senzitivitate redusă a modelului), se reduce gradul de detaliu al schematizării distribuției acestuia.

## Schematizarea hidrodinamică

Schematizarea hidrodinamică precizează contextul **energetic** în care se desfășoară curgerea apelor subterane prin două categorii de condiții:

- **condițiile hidrodinamice pe frontierele** hidrostructurilor în care are loc curgerea apelor subterane (§5.3.1);
- **condițiile hidrodinamice inițiale** în **interiorul** hidrostructurilor (§5.3.2).  
*Frontierele hidrostructurilor* sunt reprezentate de:
  - **zonele de alimentare** ale acviferelor reprezentate prin **ariile de aflorare** a formațiunilor geologice permeabile sau **cursurile de apă** care le alimentează;
  - **zonele de drenaj** al acviferelor reprezentate prin **linii de izvoare** sau **cursurile de apă** care le drenează;
  - **acoperișul** și **culcușul acviferelor** constituite din terenuri impermeabile sau semipermeabile care stopează sau favorizează transferul apei prin drenanță;
  - **accidentele tectonice** (falii) care pun în contact formațiunile permeabile cu cele impermeabile sau semipermeabile etc.

**Energia de care dispune** apa subterană pentru curgere ( $\Delta H$ ) este egală cu diferența dintre energia cu care intră în hidrostructură ( $H_o$ ) și cea cu care iese ( $H_f$ ). Această energie este reprezentată prin **sarcina piezometrică** a acviferelor pe frontiere (**Fig.PRO.21**) sau de **debitele** care tranzitează frontierele hidrostructurilor.



**Fig.PRO.21.** Energia potențială a apei subterane la "intrare" ( $H_o$ ) și la "ieșire" ( $H_f$ ) dintr-o hidrostructură sinclinală.

În consecință, succesul **schematizării hidrodinamice** este asigurat dacă pe **frontierele** fizice ale hidrostructurilor se cunosc **sarcinile piezometrice** și **debitele** care le traversează.

Particularitățile curgerii apelor subterane în **interiorul** hidrostructurilor sunt determinate de structura geologică, distribuția spațială a caracteristicilor hidrofizice ale terenurilor și de perturbațiile hidrodinamice interne (pompări sau injecții de apă), sintetizate în distribuția spațială a sarcinii piezometrice (harta piezometrică) la un moment dat. Cunoașterea distribuției sarcinii piezometrice în regim natural de curgere (**condițiile hidrodinamice inițiale**) completează, alături de **condițiile hidrodinamice pe frontiere**, schematizarea hidrodinamică a hidrostructurii.

## Epilog la Prolog

Misiunea **Hidrogeologiei generale** se încheie cu schematizarea hidrostructurilor. Rezultatul exercitării complete a funcției **descriptive** a **Hidrogeologiei generale** este **modelul conceptual al hidrostructurii**.

Tot ce urmează în cercetarea hidrogeologică, fundamentală și aplicativă se bazează pe rezultatul schematizării și dacă modelul rezultat nu reflectă corect realitatea, orice tentativă de evaluare cantitativă a curgerii apelor subterane este sortită eșecului.

Suntem într-o perioadă în care ambianța informatică a începutului de mileniu este confortabilă. La orice adresă de pe internet găsim o ofertă generoasă de coduri pentru evaluarea debitelor unor captări, migrației unui poluant, duratei de asecare a unui perimetru, zonei de protecție a unei captări etc.

Nu trebuie decât să alegem modelul adecvat hidrostructurii în care curge apa subterană și să precizăm condițiile parametrice și energetice reprezentative.

Atenție la **descrierea** condițiilor hidrogeologice:

- Nu ignorați structura geologică a acviferelor!
- Stabiliți cu atenție zona de influență a modelului utilizat!
- Evaluați corect precizia de determinare a parametrilor și distribuția lor în spațiu și timp!
- În etapa de calare a modelului ales nu neglijați valorile parametrilor corect determinați doar pentru asigurarea erorii admisibile! E posibil ca modelul să fie ales greșit!
- Determinați cu rigoare condițiile energetice pe frontierele modelului (în plan orizontal și vertical) pe toată durata de modelare a curgerii apelor subterane!

Și la **final** nu uitați că puteți greși!

Orice model conceptual confruntat prin modelul matematic cu condițiile specifice ale aplicației poate fi ameliorat în etapa de evaluare cantitativă. Reveniți la schematizare dacă „nu puteți pune de acord” modelul cu datele experimentale! E mult mai corect decât să introduceți valori aberante ale caracteristicilor hidrofizice numai pentru a reuși calarea modelului.

Există un **final**?