

# Közelítő módszerek általános elmélete

Szépszó Gabriella  
[szepszo.g@met.hu](mailto:szepszo.g@met.hu)

Előadások: <http://nimbus.elte.hu/~numelo>

# Ismétlés: hidro-termodinamikai egyenletek

A légkörben zajló folyamatok fizikai törvényeknek engedelmeskednek, pl. Newton-törvények, energia-megmaradás, tömeg-megmaradás

Mozgásegyenletek	$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{g} - 2\bar{\Omega} \times \bar{v} + \bar{F} + \bar{S}$
------------------	---

Kontinuitási egyenlet	$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \cdot \text{div} \bar{v}$
-----------------------	---

Termodinamikai egyenlet	$\frac{dQ}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt}$
-------------------------	--

Nedvesség kontinuitási egyenlete	$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot M$
----------------------------------	---

Állapotegyenlet	$p = \rho RT$
-----------------	---------------

Nemlineáris parciális differenciálegyenlet-rendszer:

7 egyenlet – 7 változó: (u,v,w), T, p, ρ, ρ<sub>v</sub>

# Példák az egyenletek egyszerűsítésére

- Gömbi közelítés
- A légkör vastagságának elhanyagolása
- Hidrosztatikus közelítés
- Vízgőz hatásának elhanyagolása a levegő sűrűségében

**ANALITIKUSAN TOVÁBBRA SEM OLDHATÓ MEG!**

→ Analitikus megoldás hiányában numerikus módszerek

# Sekélyvíz (shallow water) egyenletek

A folyadék vertikális kiterjedése elhanyagolható a horizontálishoz képest, vertikálisan homogén, összenyomhatatlan, súrlódásmentes forgó közeg:

Horizontális mozgásegyenletek:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - f \cdot v$$

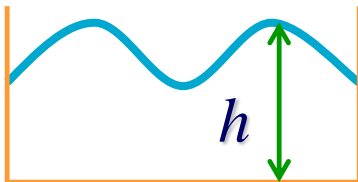
$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f \cdot u$$

Hidrosztatikus közelítés:

$$\frac{dw}{dt} = 0 \rightarrow \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho \cdot g$$

Divergencia-mentesség:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$



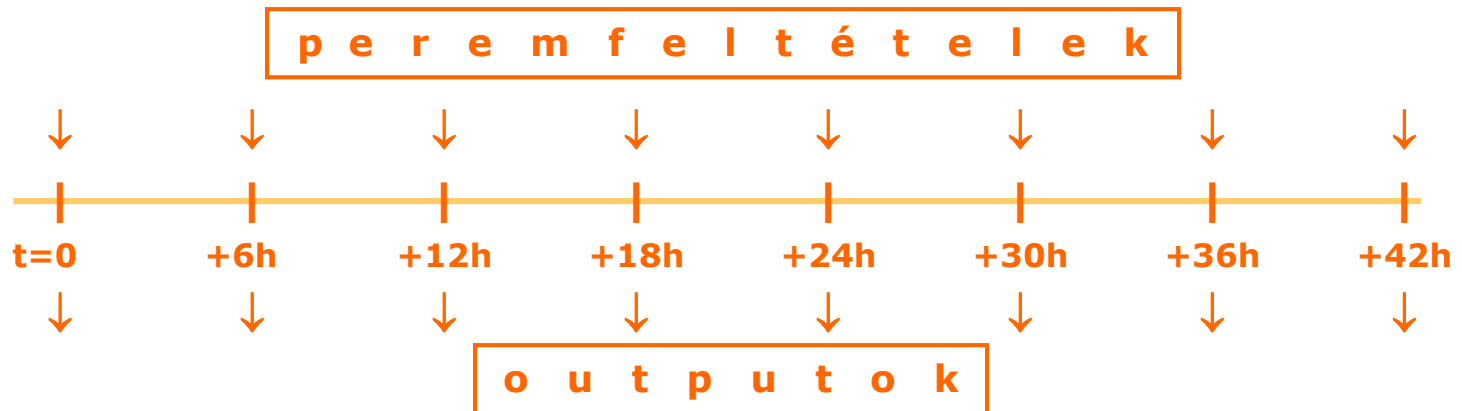
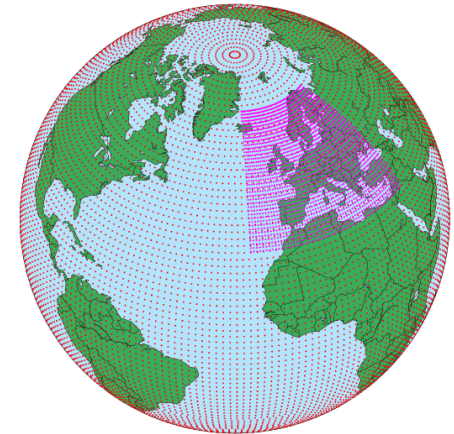
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + f \cdot v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} - f \cdot u$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = -h \cdot D$$

# Térbeli és időbeli diszkretizáció

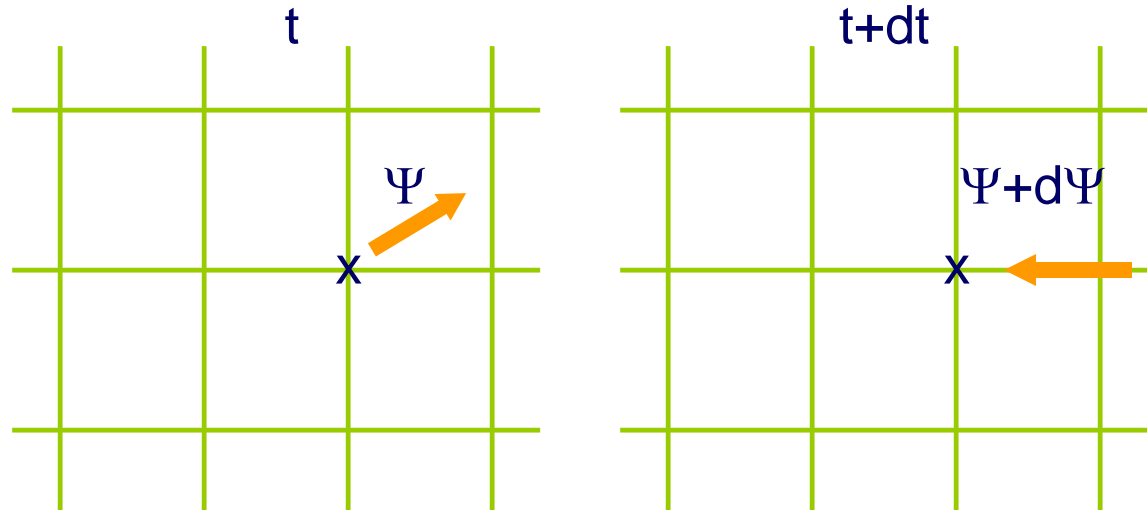
- Horizontális koordináták (gömbi koordináták, síkbeli leképezések)
- Véges differencia modellek (rácsok)
- Spektrális modellek (horizontális irányban ortogonális fgv. rendszer szerinti sorfejtés)
- Vertikális koordináták (felszínkövető, nyomási, hibrid..)
- Explicit, implicit és egyéb sémák



# Euleri és Lagrange-i szemlélet

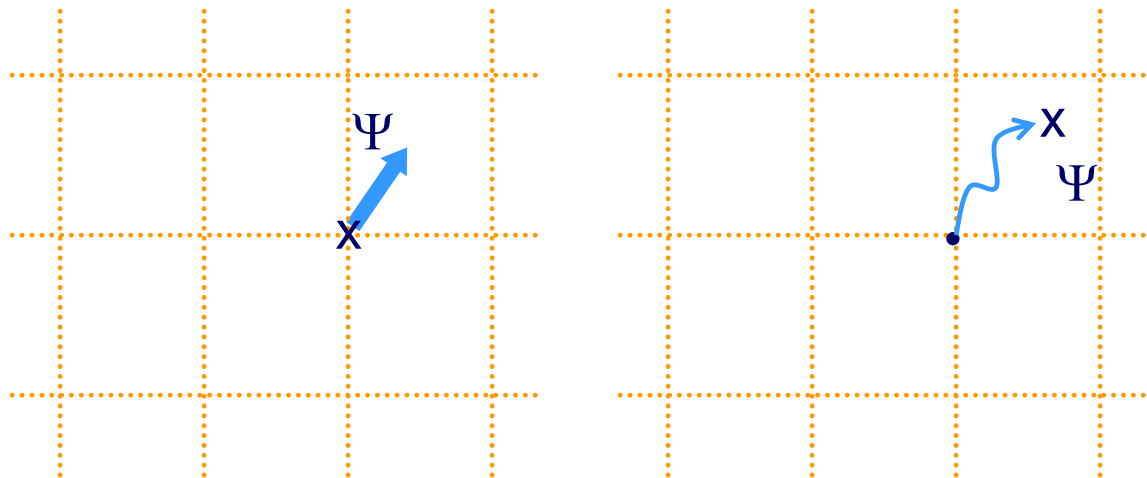
Euler-szemlélet:  
rögzített rács

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + c \frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0$$



Lagrange-szemlélet:  
a folyadékelem  
követése

$$\frac{d\Psi}{dt} = 0$$



# Vizsgálandó egyenletek

1D lineáris advekciós egyenlet:  $\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0$

Gravitációs-hullám tagokat tartalmazó egyenlet:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + H \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \end{cases}$$

Lineáris advekciót + gravitációs-hullám tagokat tartalmazó egyenlet:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u_0 \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + u_0 \frac{\partial h}{\partial x} + H \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial h}{\partial x} + f \cdot v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial h}{\partial y} - f \cdot u \\ \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} &= -h \cdot D \end{aligned}$$

# Közelítendő operátorok

Időbeli deriváltak:  $\frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial h}{\partial t}$

Térbeli deriváltak:  $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial x}$



# Folytonos feladat

Tekintsük a következő (t.f.h. korrekt kitűzésű) feladatot:

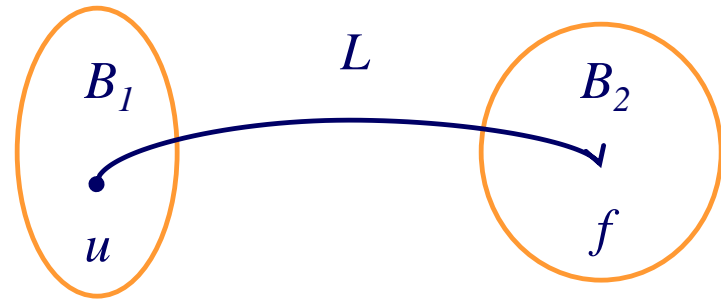
$$Lu = f,$$

$$u : \Omega \rightarrow R^n \in B_1, f \in B_2,$$

$B_1, B_2$  Banach - terek,

$L : B_1 \rightarrow B_2$  lineáris,

$$D(L) \subset B_1, R(L) \subset B_2.$$



A közelítő megoldásra kétféle módszer-család:

- 1.) Véges-differencia módszer (hamarosan)
- 2.) Projekciós-variációs módszerek, pl. Galjorkin módszer (később)

# Alapfogalmak

„Közelség”  $y = Ax$  pl.  $y = \int_a^b x(t)dt$

Közelítés: a)  $x$  bemenő adatot közelítjük

pl.  $x(t)$  polinomokkal, Fourier-sorral való közelítése  
(spektrális közelítés)

b) az  $A$  operátort közelítjük

pl.  $\int \rightarrow \sum$

(véges differenciák)

# Metrikus és normált terek

## Metrikus tér

$$X; \quad \rho : X \times X \rightarrow R^+$$

- $\rho(x_1, x_2) \geq 0$ ,
- $\rho(x_1, x_2) = 0 \Leftrightarrow x_1 = x_2$ ,
- $\rho(x_1, x_2) = \rho(x_2, x_1)$ ,
- $\rho(x_1, x_3) \leq \rho(x_1, x_2) + \rho(x_2, x_3)$ .

Teljes metrikus tér

## Normált tér

$$X; \quad \| \cdot \| : X \rightarrow R^+$$

- $\|x\| \geq 0$ ,
- $\|x\| = 0 \Leftrightarrow x = 0$ ,
- $\|\alpha x\| = |\alpha| \cdot \|x\|$ ,
- $\|x_1 + x_2\| \leq \|x_1\| + \|x_2\|$ .

Banach tér

# Normák

Példák: a)  $R$ :  $\|x\| = |x|$ ,

b)  $C[a,b]$  tér:  $\|x\|_C = \left| \max_{t \in [a,b]} x(t) \right|$ ,

c)  $L_p$  tér:  $\|x\|_{L_p} = \left[ \int_a^b |x(t)|^p dt \right]^{\frac{1}{p}} \longrightarrow$  Hilbert-tér

Reláció ezen normák között:  $\|x(t)\|_{L_1} \leq \|x(t)\|_{L_2} \leq \dots \leq \|x(t)\|_C$



A konvergencia iránya

Mátrix-normák:

$$\|A\|_1 = \max_j \sum_{i=1}^n |a_{ij}|,$$

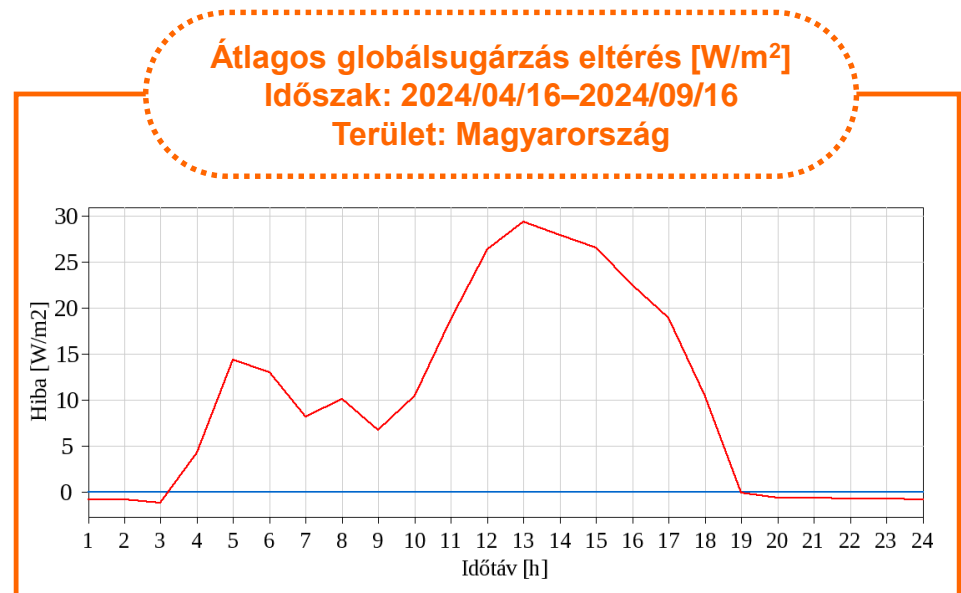
$$\|A\|_\infty = \max_i \sum_{j=1}^n |a_{ij}|,$$

$$\|A\| = \sup_{\bar{v} \neq 0} \frac{\|A \cdot \bar{v}\|}{\|\bar{v}\|}.$$

# Hibák

- A numerikus modell megoldása során jelentkező hibák forrása:
  1. A matematikai modell hibája
  2. Kiindulási adatok hibája
  3. Közelítő módszer hibája
  4. Kerekítések során fellépő hiba

Szisztematikus hiba



# Korrektség

Korrektség = egzisztencia + unicitás + stabilitás

**Belső tulajdonság!**

Bemenő adat:  $x + \delta x$

Ehhez tartozó megoldás:  $y + \delta y = A(x + \delta x)$

$$\delta y = A(x + \delta x) - A(x)$$

Példa nem korrekt feladatra:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \\ u(x, 0) = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial y}(x, 0) = \varphi(x) \end{array} \right.$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x, 0) = \varphi(x)$$



bemenő

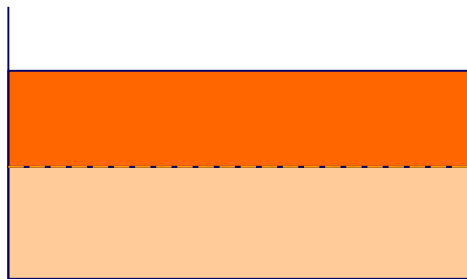
Hogyan függ a megoldás a bemenő adatoktól?

# Stabilitás

$\varphi(x) = 0 \rightarrow u(x, y) = 0$  triviális megoldás

$$\varphi_n(x) = \frac{1}{n} \cos(nx) \rightarrow u_n(x, y) = \frac{1}{n^2} \cos(nx) \frac{e^{ny} - e^{-ny}}{2}$$

A feladat a Rayleigh-Taylor instabilitást modellezi:



$$\rho_1 > \rho_2$$

$$\rho_2$$



<http://www.youtube.com/watch?v=QLMfu8p-EAc>

Stabilitás:  $y$  megoldás stabil, ha  $y$  folytonosan függ  $x$ -től.

Kezdeti kis  $\delta x$ -ből nagy  $\delta y \rightarrow$  instabilitás – ekkor a feladat közvetlen megoldására nem célszerű numerikus módszert alkalmazni

Stabil :  $\|\delta y\| < c \cdot \|\delta x\|$ , ha  $c \ll 1 \rightarrow$  ellenkező esetben a kezdeti hiba nagyon megnövekedhet (**gyenge stabilitás**)

Például:

$$\begin{cases} y''(x) = y(x) \\ y(0) = 1 \\ y'(0) = -1 \end{cases}$$

Általános megoldás:

$$y(x) = \frac{1}{2}[y(0) + y'(0)] \cdot e^x + \frac{1}{2}[y(0) - y'(0)] \cdot e^{-x}$$

Ezekkel a kezdeti feltételekkel:  $y(x) = e^{-x}$

De kis hiba a kezdeti feltételekben és a másik tag is megjelenik.

A nem korrekt feladat helyettesíthető korrekt „közeli” feladattal:  $p$  paraméterrel,  $p \rightarrow 0$  esetén a feladat tart az eredeti feladathoz és a megoldás is tart az eredeti megoldáshoz – **regularizáció**



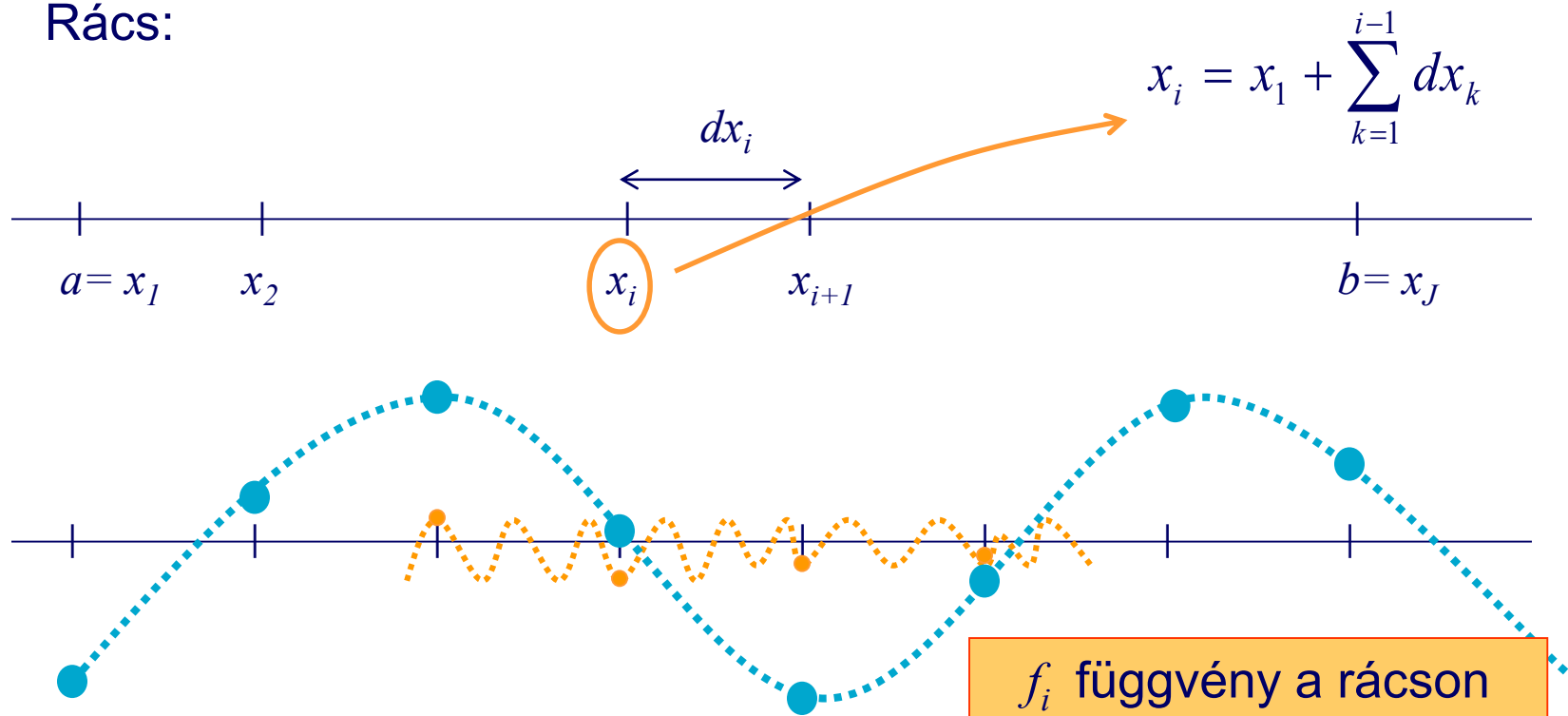
# Függvények rácson

$$X = [a, b]$$



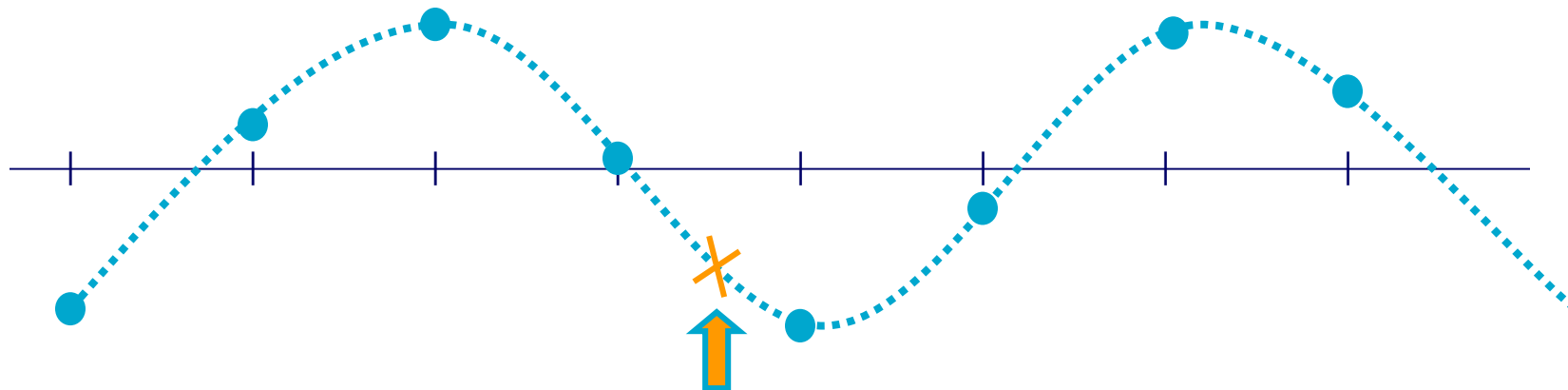
$f(x)$  folytonos függvény

Rács:



A rácson a  $dx_i$ -nél rövidebb hullámhosszak nem írhatók le.

$f(x)$  folytonos függvény,  $f_i$  függvény a rácson:



A folytonos  $f$  függvény adott pontban becsülhető:

$$f^* = \varepsilon \cdot f_{i+1} + (1 - \varepsilon) f_i, \quad \text{ahol} \quad \varepsilon = \frac{x' - x_i}{x_{i+1} - x_i}$$

A rácson a  $dx_i$ -nél rövidebb hullámhosszak nem írhatók le.  
A közelítés jóságát például Taylor-sorfejtéssel vizsgálhatjuk.

# Véges differencia módszerek

$$Lu = f \quad u \in B_1, f \in B_2.$$

A véges differencia séma megadásának lépései:

1.) Normált terek sorozatának megadása:

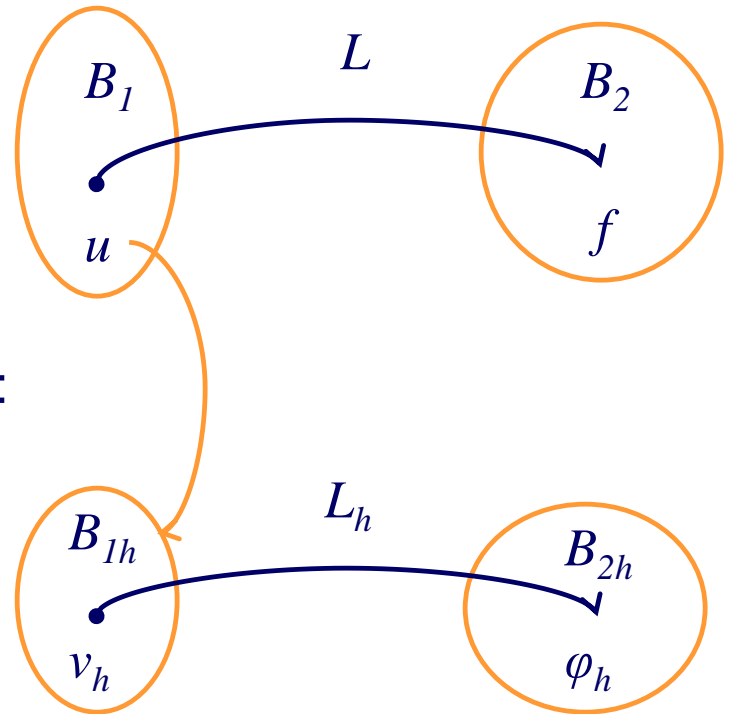
$$B_{1h}, B_{2h} \Rightarrow \|h\| \rightarrow 0.$$

2.) Véges differencia séma megadása:

$$L_h v_h = \varphi_h, v_h \in B_{1h}, \varphi_h \in B_{2h},$$

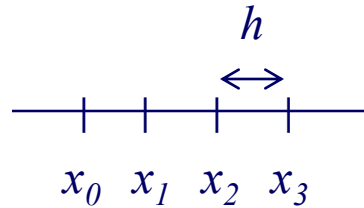
$$L_h : B_{1h} \rightarrow B_{2h}$$

3.)  $B_1$  és  $B_{1h}$  elemeinek összehasonlítása



## Példák rácsra:

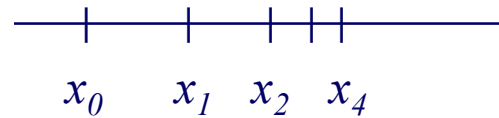
1.) Egyenletes rács:  $\Omega = \{a \leq x \leq b\}$ ,  $x_i = a + i \cdot h$ ,  $h = \frac{b-a}{n}$



$$\Omega_h = \left\{ x_i : x_i = a + i \cdot h; h = \frac{b-a}{n}; i = 0, n \right\}$$

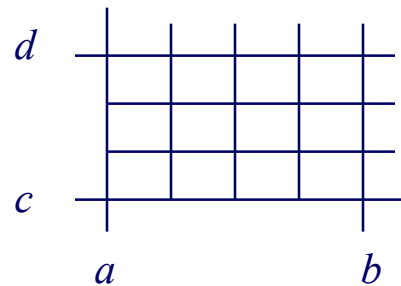
2.) Nem egyenletes rács:

$$x_0 = a, x_i = x_{i-1} + h_i, x_n = b$$

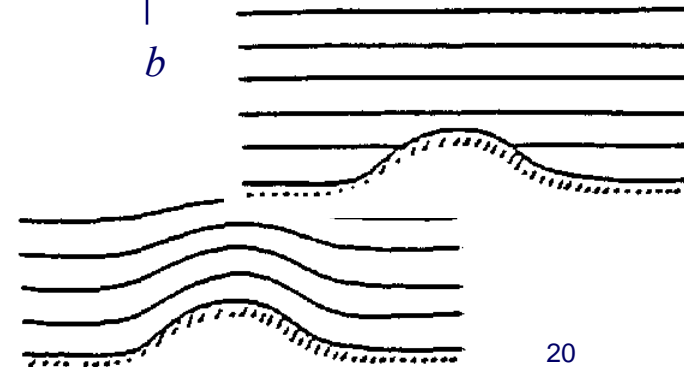
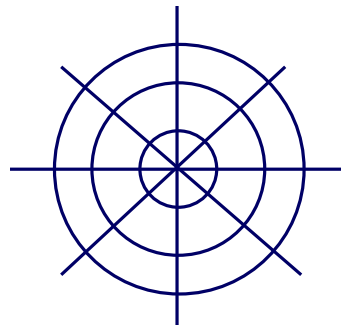


3.) Egyenletes rács síkon:

$$\Omega = \{a \leq x \leq b, c \leq y \leq d\}$$



4.) Izometrikus rács:



# Elvárt / vizsgált tulajdonságok

- Kompatibilitás
- Korrekt kitűzés (stabilitás)
- Approximáció, konzisztencia
- Konvergencia

# Kompatibilitás

Minden  $h$ -hoz létezzon egy  $P_{1h} : B_1 \rightarrow B_{1h}$  lineáris

operátor, amelyre  $P_{1h}u = u_h \in B_{1h}$  és legyenek

$\|\cdot\|_1$  valamint  $\|\cdot\|_{1h}$  és teljesüljön mindegyike a

kompatibilitási feltétel:

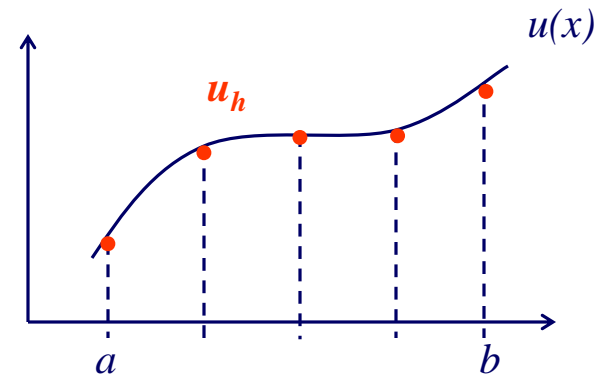
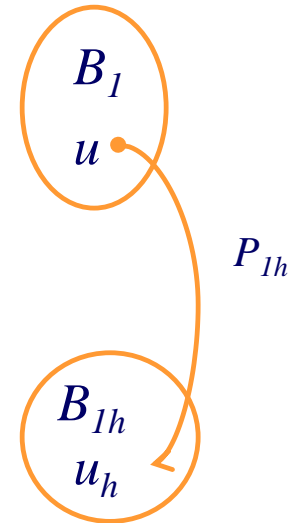
$$\forall u \text{ -ra } \|P_{1h}u\|_{1h} \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} \|u\|_1.$$

Példa:

$$B_1 = C[a, b], \quad u \in B_1 \rightarrow \|u\|_C = \max_{x \in [a, b]} |u(x)|.$$

$$\text{Legyen } P_h(u) = u_h = u \quad \forall x \in \Omega_h,$$

$$\|u_h\|_{C_h} = \max_{x \in \Omega_h} |u(x)|.$$



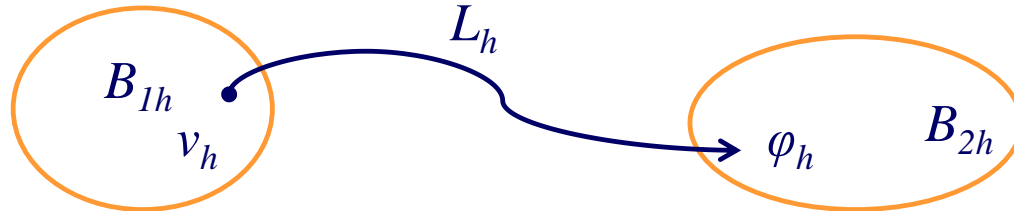
# Korrektség

Korrektség = egzisztencia + unicitás + stabilitás

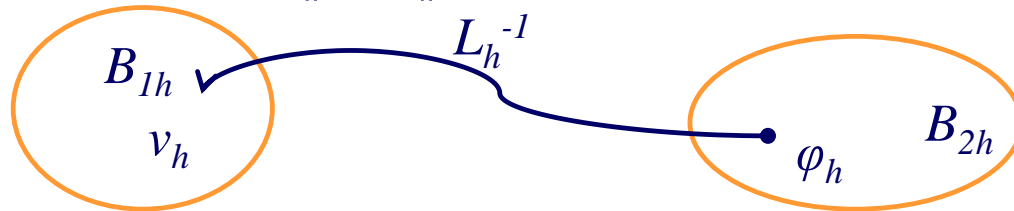
$$(1) + (2) : \forall \varphi_h \in B_{2h} \exists ! v_h : L_h v_h = \varphi_h,$$

(3) :  $v_h$  folytonosan függ  $\varphi_h$  - tól.

**Belső  
tulajdonság!**



Tehát:  $\exists$  olyan  $L_h^{-1} : B_{2h} \rightarrow B_{1h} : v_h = L_h^{-1} \varphi_h$ , amely  $h$  szerint egyenletesen korlátos  $\rightarrow \|L_h^{-1}\| \leq K$ .

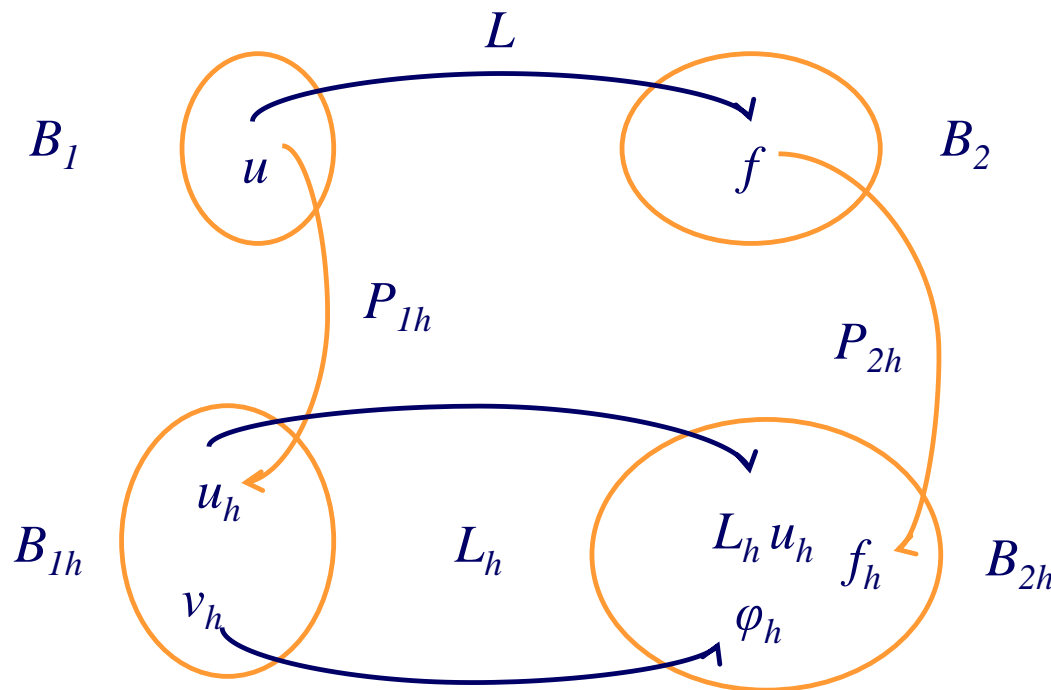


$$\text{Ekkor : } \|v_h\| = \|L_h^{-1} \varphi_h\| \leq \|L_h^{-1}\| \cdot \|\varphi_h\| \leq K \cdot \|\varphi_h\|$$

# Approximáció

Adottak:  $P_{1h} : B_1 \rightarrow B_{1h}, P_{1h}u = u_h,$   
 $P_{2h} : B_2 \rightarrow B_{2h}, P_{2h}f = f_h,$

és teljesítik a kompatibilitási feltételt:



$$\|P_{1h}u\|_{1h} \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} \|u\|_1,$$

$$\|P_{2h}f\|_{2h} \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} \|f\|_2.$$



Definíciók:

1. A véges diff. séma az  $u \in B_1$  elemen  $m$ -ed rendben approximál, ha

$$\|\Psi_h\|_{2h} := \|\varphi_h - L_h u_h\|_{2h} = o(|h|^m)$$

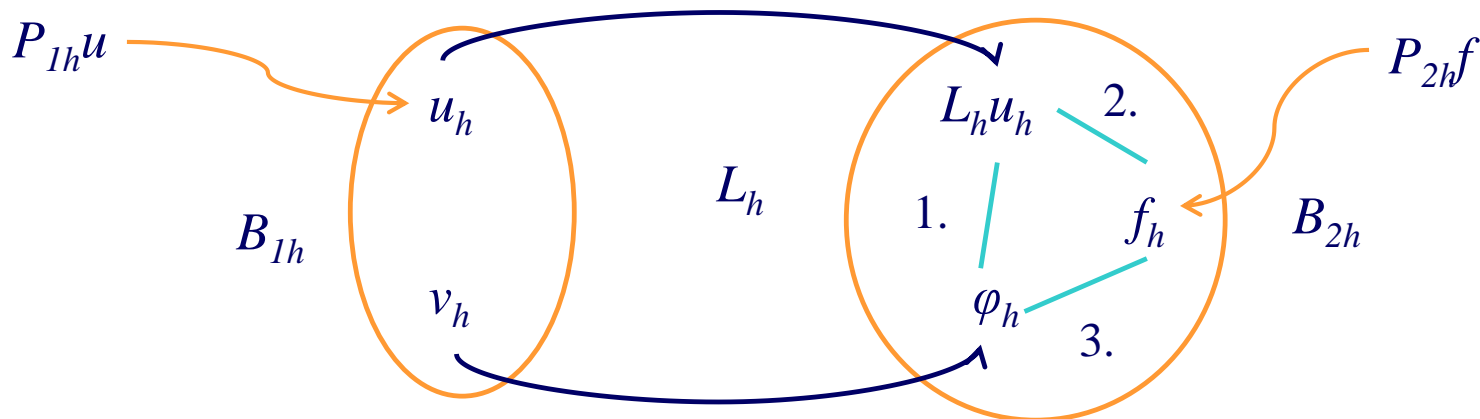
2. Az  $L_h$  az  $L$ -t  $m$ -ed rendben approximálja, ha

$$\forall u \in B_1 \text{ -re } \|L_h(P_{1h}u) - P_{2h}(Lu)\|_{2h} = o(|h|^m)$$

**Konzisztencia**

3. A  $\varphi_h$  az  $f$ -et  $m$ -ed rendben approximálja, ha

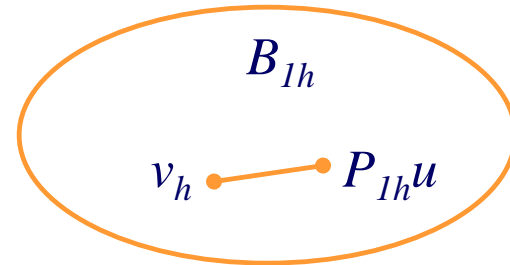
$$\|\varphi_h - P_{2h}f\|_{2h} = o(|h|^m)$$



# Konvergencia

Konvergencia: a véges differencia séma megoldása tart a pontos megoldáshoz, azaz

$$y_h = v_h - P_{1h}u \quad \text{és} \quad \|y\|_h \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$$

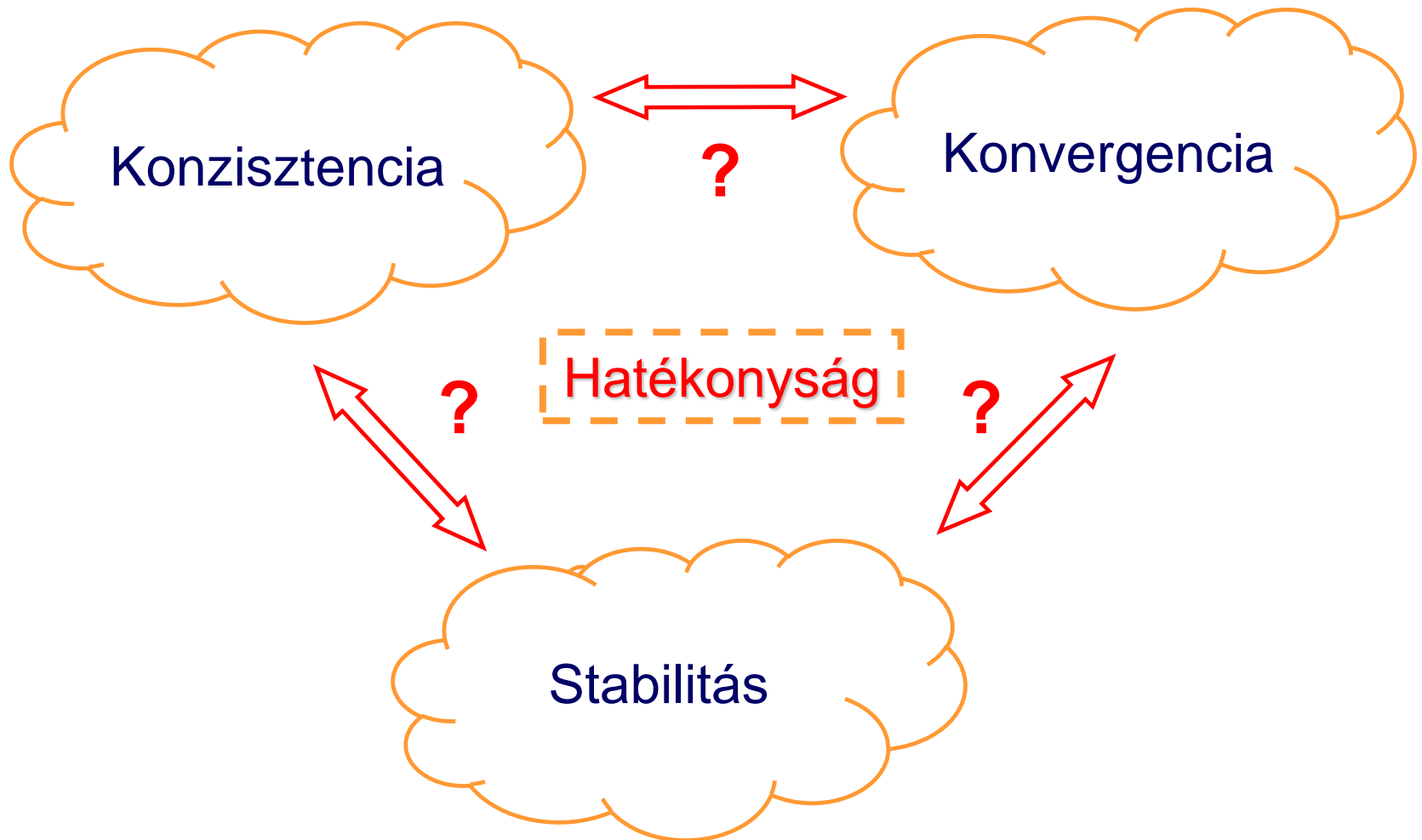


A konvergencia rendje megegyezik az approximáció rendjével:

$$\|y_h\|_{1h} = o\left(\|h\|^m\right) \quad \text{vagy} \quad \|y_h\|_{1h} \leq K \cdot \|h\|^m$$

$K$   $h$ -tól független

# Gyakorlati vizsgálatok



# Konzisztencia

Konzisztencia:  $\Delta t, \Delta x \rightarrow 0$  esetén a véges differencia-feladat tartson az eredeti feladathoz

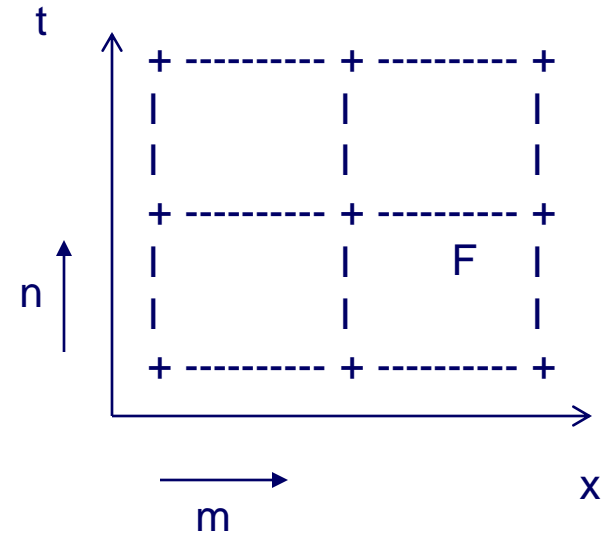
A gyakorlatban a differenciál- és a differencia-egyenlet különbségét vizsgáljuk.

## Példa: advekciós egyenlet (lineáris 1D)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + c \frac{\partial F}{\partial x} = 0.$$

A véges differenciás egyenlet:

$$\frac{F_{m,n+1} - F_{m,n}}{\Delta t} + c \frac{F_{m+1,n} - F_{m-1,n}}{2\Delta x} = 0.$$



A közelítés jósága (konzisztencia rendje) Taylor-sorfejtéssel vizsgálható – csonkítási hiba:

$$Tr = \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \cdot \frac{\Delta t}{2} + c \cdot \frac{\partial^3 F}{\partial x^3} \cdot \frac{\Delta x^2}{6} + o(\Delta x^3) + o(\Delta t^2)$$

elsőrendű

másodrendű



# Stabilitás a gyakorlatban

Stabilitás: a véges differencia séma belső tulajdonsága.

A numerikus megoldás korlátosságát szokták megkövetelni – általában a folytonos feladat megoldása nem korlátos.

Definíció: a numerikus séma hibája rögzített  $\Delta t$  és  $\Delta x$  esetén korlátos marad az időben

$\varepsilon_n$ : az  $n$ -edik időlépcsőben keletkező hiba

$$\varepsilon_{n+1} = g \cdot \varepsilon_n$$

→ áttérési együttható

Követelmény:  $|\varepsilon_{n+1}| \leq |\varepsilon_n| \Rightarrow |g| \leq 1$  → 1 dimenzióban

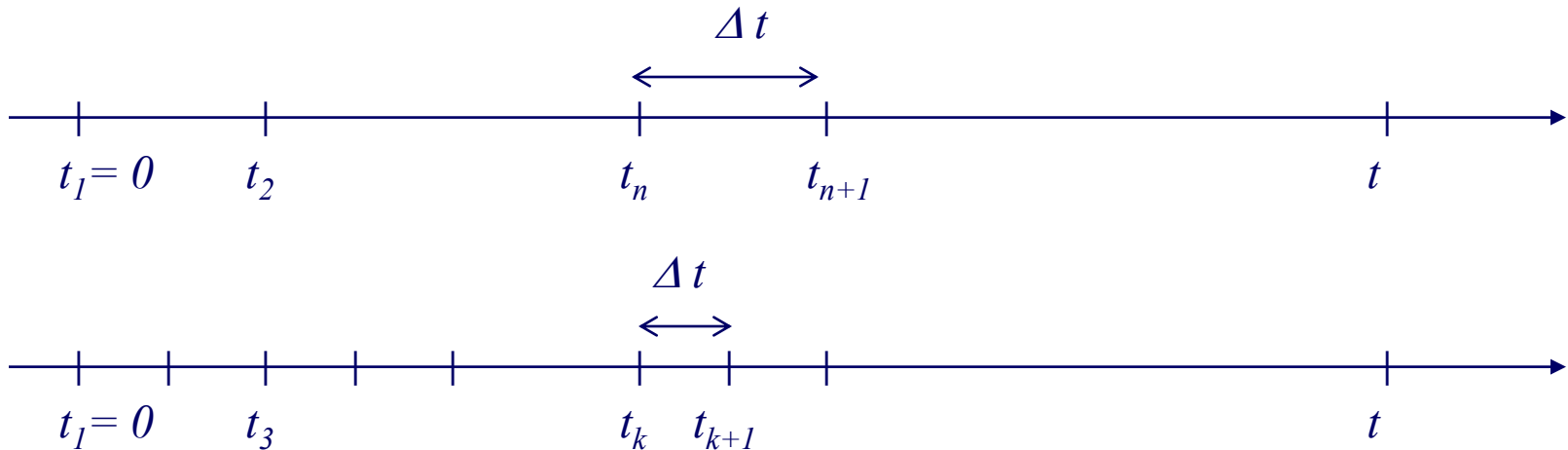
Több dimenzióban  $g$  helyett egy mátrix áll és ennek sajátértékeinek kell (abszolútértékben) 1-nél nem nagyobbak lenni:  $|\mu_i| \leq 1, i = 1, N.$

# Effektivitás

„Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances and at a cost less than the saving to mankind due to the information gained. But that is a dream.” (L.F. Richardson, 1922)

Hatékonyság:

- A számítógép véges kapacitása által szabott követelmény
- Ha nagy pontosságot szeretnénk, akkor nyilvánvalóan nagy lesz a számítási igény is



# Konvergencia

A numerikus séma megoldása tart a pontos megoldáshoz, ha a (térbeli és időbeli) rács felbontása kellően finom.

Lax-Richtmyer tétel:

**KONZISZTENCIA + STABILITÁS = KONVERGENCIA**

↓  
egyenletek

↓  
belső tulajdonság

↓  
megoldás