

# Éghajlati modellezés

## 1. rész:

### A globális éghajlati rendszer és modellezése

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

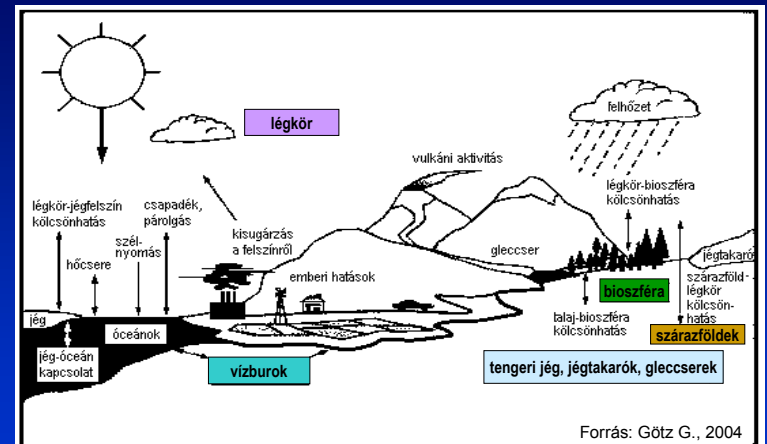
## TARTALOM

1. Az éghajlati rendszer
2. Éghajlati modellezés
3. Óceáni modellek, csatolás
4. Globális projekciók készítése
5. Kitekintés

## TARTALOM

1. Az éghajlati rendszer
2. Éghajlati modellezés
3. Óceáni modellek, csatolás
4. Globális projekciók készítése
5. Kitekintés

## Az éghajlati rendszer elemei

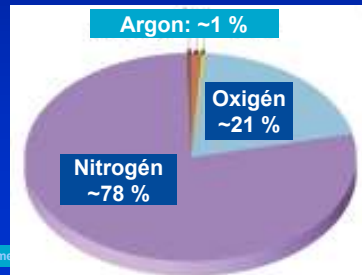


Éghajlati rendszer: a légkör és a vele érintkezésben levő négy geoszféra kölcsönhatásban álló együttese

## Légkör

- Az éghajlati rendszer központi, leginkább instabilis és legnagyobb változékonyságú komponense
    - Állandó összetevők
    - Üvegházhatású gázok (erről később)
    - Szilárd és cseppfolyós részecskék (aeroszolok)
    - Felhők
- Sugárzás elnyelése, szórása, visszaverése

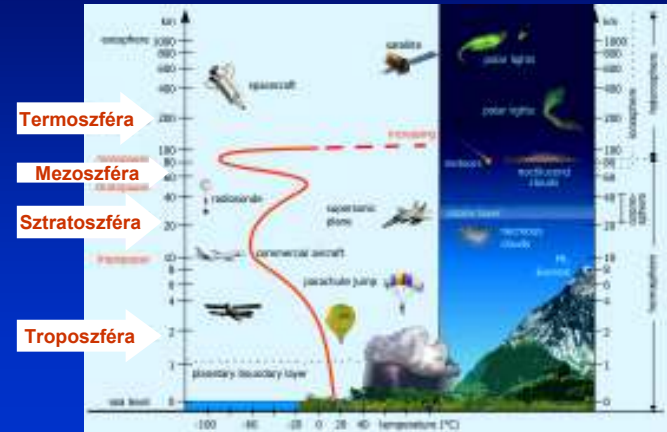
Összetevő	Koncentráció [%]	Tartózkodás
CO <sub>2</sub>	0,038	20-150 év
Metán	0,00017	4-5 év
Ózon	0,000004	2 év
CFC-k	0,00000002	100-1000 év
Vízgőz	Változó	10 nap



2010. április 15.

<http://nimbus.elte.hu/~nume/>

## A légkör vertikális szerkezete

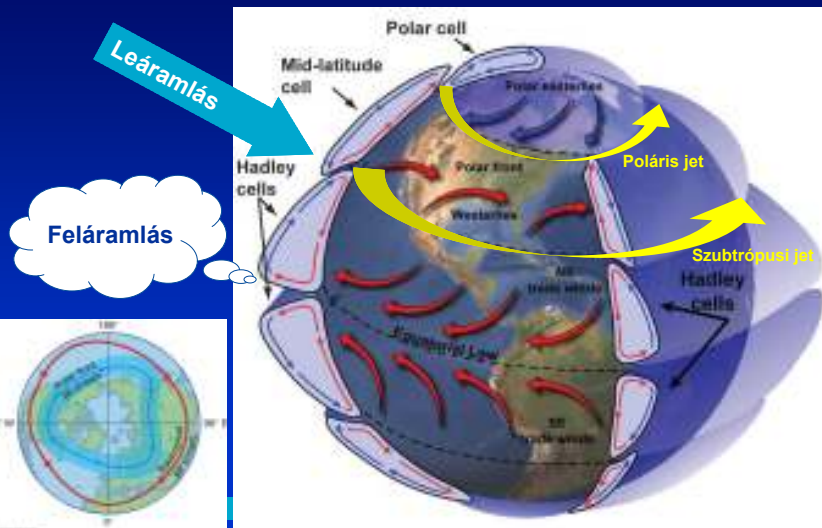


2010. április 15.

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

6

## A légköri cirkuláció



## Hidroszféra

- A Földfelszín 71 %-a: a felszíni és a felszín alatti vizek összessége
- Nagy hőkapacitás – meridionális hőátvitel felét bonyolítja
- A légkörinél jóval lassabb, 3D áramlási rendszer:
  - Felszíni áramlatok: szél hajtotta rendszer
  - Sűrűségkülönbség által mozgatott mélységi áramlatok: hőmérséklet- és sótartalom-különbségek – termohalin cirkuláció
- Nagy tehetetlenség – hosszú igazodási idők (10-1000 év)
- Szén-dioxid elnyelő képesség

2010. április 15.

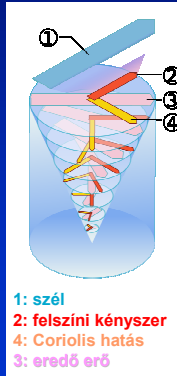
<http://nimbus.elte.hu/~numelo/mat/>

8

# A felszíni tengeráramlatok fizikája

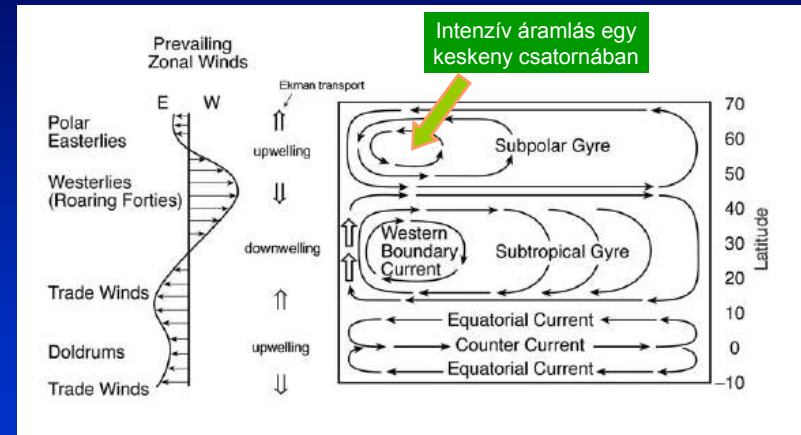
- Egyensúlyi áramlások: a hajtóerő és az eltérítőerő egyensúlya – geosztrofikus áramlások

$$\frac{1}{\rho_v} \text{grad}_h p = -2\vec{\Omega} \times \vec{v}_h$$



- Szél az óceán fölött – nyíróerő – a felszíni víz mozgásba jön – az áramló víz sebessége kb. a szélesebesség 3 százaléka
- Földforgás eltérítő ereje – szögeltérés a felszínen 10-15 (45?) fok, a mélységgel növekszik (Ekman-spirál)
- Ekman-sodrás: merőleges a szél irányára

# Felszíni tengeráramlatok vázlatja

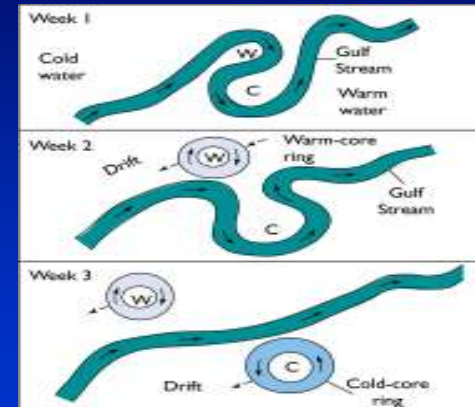
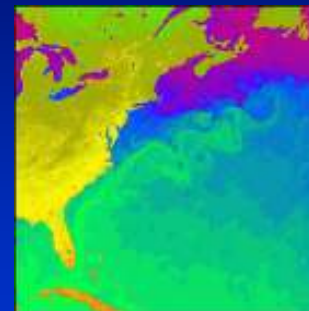


# A tengeráramlatok tényleges rendszere

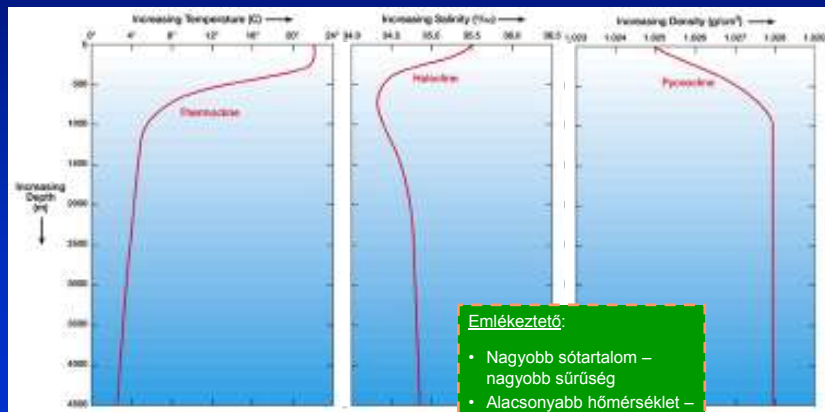


Hiányoznak körök

# A Golf-áramlatról leszakadó örvények



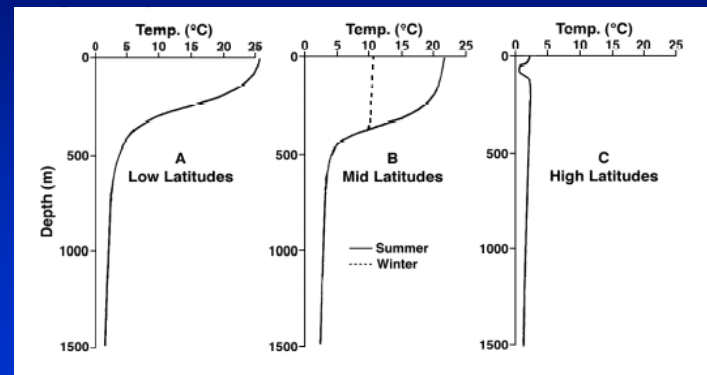
## Termohalin cirkuláció: sótartalom + hőmérséklet eltéréseiből adódó sűrűségkülönbségek



Emlékeztető:

- Nagyobb sótartalom – nagyobb sűrűség
- Alacsonyabb hőmérséklet – nagyobb sűrűség

## A hőmérséklet vertikális profilja különböző szélességeken

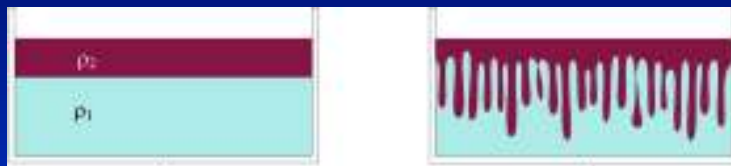


2010. április 15.

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

14

## Sós ujjak



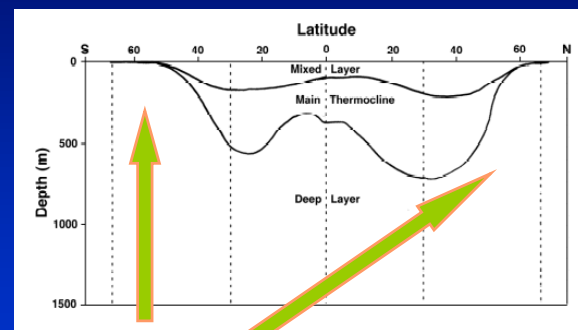
Forrás: ELTE, Kármán labor

Kezdetben:  
felül melegebb víz

Párolgás →  
növekvő sótartalom →  
sós víz leáramlása

Legnagyobb sűrűség a keveredési réteg alján

## A keveredési réteg és a termoklin zóna vastagsága



Eltűnik

2010. április 15.

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

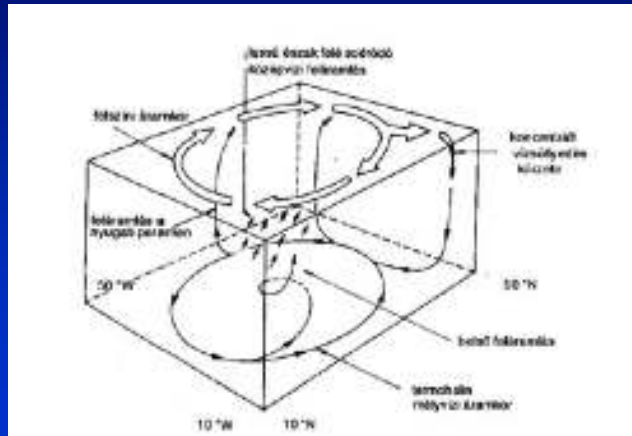
15

2010. április 15.

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

16

## Egy óceáni medence sematikus három-dimenziós áramlási rendszere



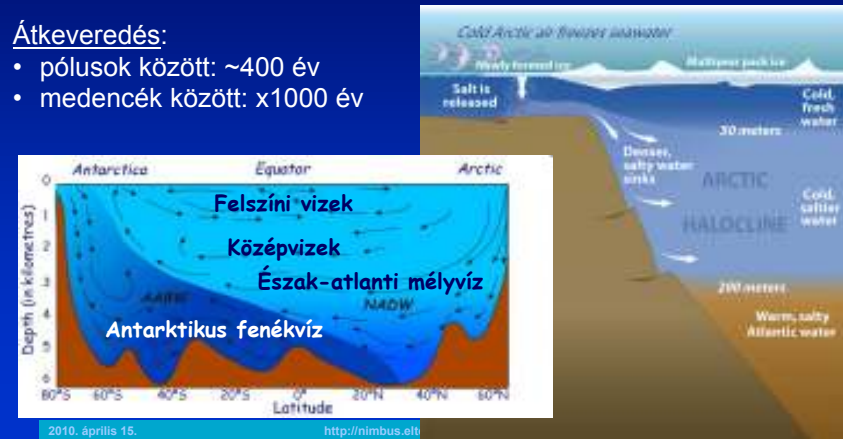
2010. április

17

## Az atlanti óceán mélységi áramlatainak sematikus metszete

Átkeveredés:

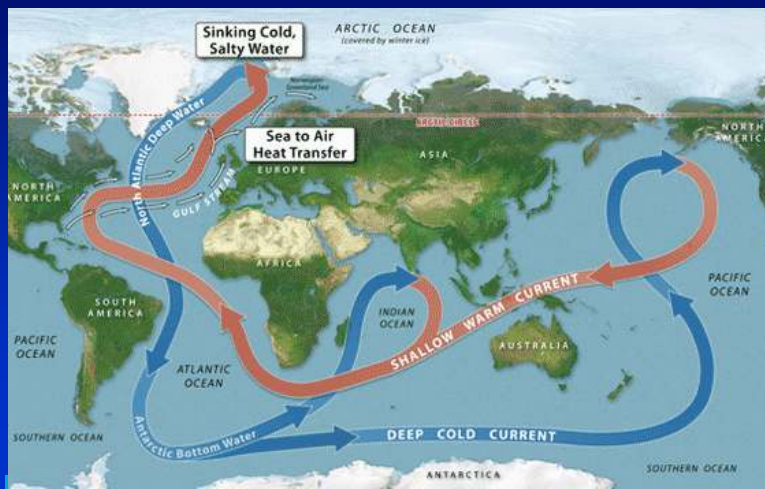
- pólusok között: ~400 év
- medencék között: x1000 év



2010. április 15.

<http://nimbus.elte>

## Óceáni szállítószalag



## Krioszféra

- Grönlandi, antarktiszi jégmezők, gleccserek, felszíni hó, tengerjég
- Termikus tehetetlenség, alacsony hővezető képesség
- A beérkező Napsugárzás nagyarányú visszaverése („tükör” – albedo)
- Mélytengeri cirkuláció kormányzása



2010. április 15.

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

20

## A tengerjég kiterjedésének változása



Északi sark, szeptember és március, 1980–2002 átlag  
Antarktis, 1995. március és szeptember



2010. április 15.

21

## Kontinentális felszín

- Érdesség – dinamikai hatás
- Aeroszolok forrása
- Vegetáció és talajfelszín hatása:



- Rövidhullámú Napsugárzás visszaverése
- Infravörös sugárzás a légkörbe

2010. április 15.

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

22

## Bioszféra

- Az élet színtere a Földön: összes élőlényközösség (növények + állatok + emberek) a kölcsönhatásaikkal együtt
- Gyakorlatban: növénypopuláció (tengeri és szárazföldi)
- Befolyásolja az üvegházgázok biokémiai forgalmát – elsősorban a légkör és az óceán szén-dioxid forgalmát



2010. április 15.

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

## Alapfogalmak

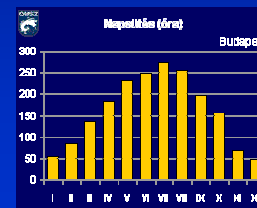
### Időjárás:

- A **légkör** egy adott időponthoz tartozó pillanatnyi **állapota**
- Jellemzése: pillanatnyi értékekkel



### Éghajlat (klíma):

- Az **éghajlati rendszer** (ami már nemcsak a légkör) hosszú idő folyamán tanúsított **szokásos viselkedése**
- Jellemzése: statisztikai paraméterekkel



2010. április 15.

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

24

## A legfontosabb éghajlat-alakító tényező

A Nap sugárzása (egyenlőtlen földrajzi eloszlás)

↓  
Sugárzás-átvitel

Korlátos: a Földön nincs sem nyelő, sem forrás

↓  
Hő – infravörös sugárzás az űrbe



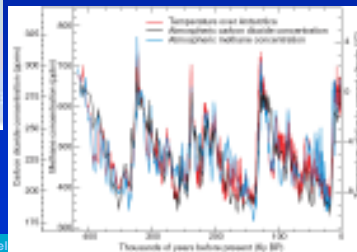
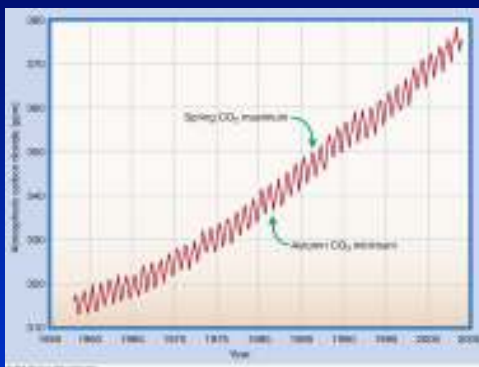
## Melyek az üvegházgázok és mi az üvegházhatás?



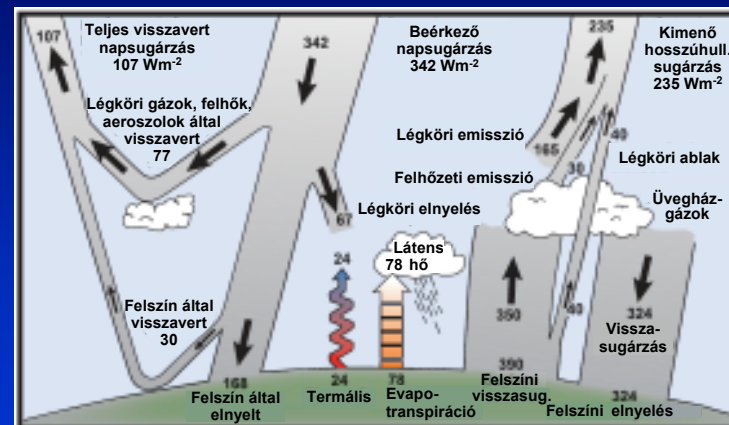
Természetes üvegházhatás: ha nem lenne, mintegy 35 fokkal lenne alacsonyabb a földi átlaghőmérséklet (most ~15 °C).



## A CO<sub>2</sub> koncentrációjának alakulása



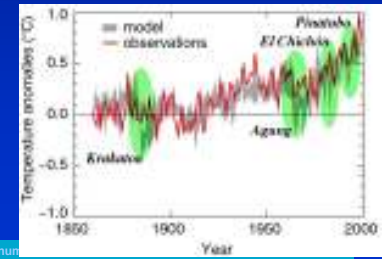
## Az éghajlati rendszer évi átlagos globális energia-egyensúlya



## A sugárzási egyenleg megváltozása

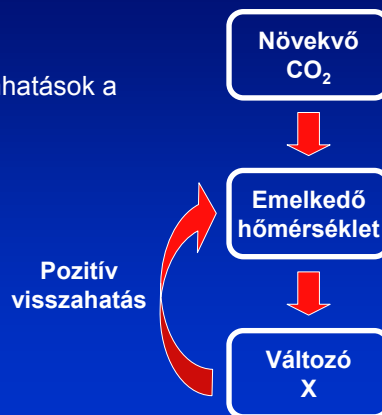
- Éghajlatalakító tényezők és ezekhez való igazodás:
  - Napsugárzás intenzitásának módosulása
  - Sugárzás-átvitel feltételeinek módosulása
  - Felszínközeli energiabevétel módosulása
- Hőegyenleg megváltozása → sugárzási kényszer (a tropopauzára vonatkoztatva számszerűsítik)

- Külső kényszerek:
  - Természetes: pl. a Napsugárzás intenzitásának, a Föld pályájának változása, vulkánkitörés
  - Antropogén: ipari tevékenység
- Belső éghajlatalakító mechanizmus – az éghajlati rendszer mindig egyensúlyra törekszik
- Kényszerhez történő igazodás – eltérő alkalmazkodási idők



## Az összetevők közötti kölcsönhatások

- Az összetevők közötti kölcsönhatások a klímaállapot természetes változékonyságát idézik elő
- Visszacsatolások:
  - Öngerjesztő – pozitív
  - Csillapító – negatív



## Visszacsatolások

- Hőmérséklet – jég–albedó visszacsatolás:



Felszíni hőmérséklet növekedése → jégtakaró csökkenése → sugárzás-visszaverődés csökkenése

- Felhőzet – sugárzás visszacsatolás:



Felhők: a bennük lévő vízgőz üvegházhatású (melegít), ugyanakkor a fehér felület sok Napsugárzást visszaver (hűt) → összességében inkább hűtenek, mint fűtenek



## TARTALOM

1. Az éghajlati rendszer
2. Éghajlati modellezés
3. Óceáni modellek, csatolás
4. Globális projekciók készítése
5. Kitekintés

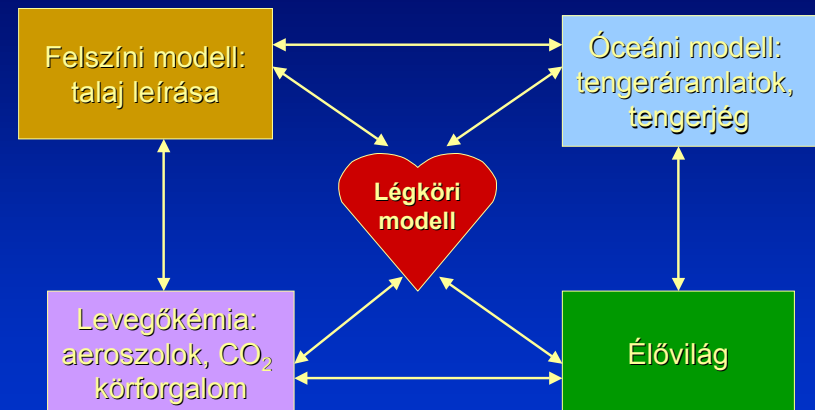
## Éghajlati modellezés

- Az éghajlati rendszer, illetve a rendszer összetevőinek tanulmányozására, s az összetevők közötti kölcsönhatások elemzésére
- Egyetlen válaszadási lehetőség a kérdésre: miként reagál az éghajlat egy feltételezett (hipotetikus) kényszerre?
- Fizikai törvények minden összetevő és kölcsönhatás esetében
- Matematikai egyenletrendszer: nemlineáris parciális differenciálegyenlet-rendszer + kezdeti és peremfeltételek – numerikus megoldás

## Sajátosságok

- A kezdeti feltételek hamar elveszítik hatásukat és a külső kényszerek kormányozzák a rendszert
- Az éghajlati modellek nem a HTER egyszerű kiterjesztései a hosszabb időtávok irányába
- Hanem: átalakítás kényszerített-disszipatív rendszerekké – megmaradási törvények teljesülése
- Fizikai parametrizációs eljárások fontossága: sugárzás, planetáris határréteg, felszíni folyamatok, nagyskálájú csapadék, konvekció (általában hidrosztatikus modellekről van szó)
- Kapcsolt modellrendszerek – csatolás jelentősége

## A globális éghajlati modellek összetevői



## TARTALOM

1. Az éghajlati rendszer
2. Éghajlati modellezés
3. Óceáni modellek, csatolás
4. Globális projekciók készítése
5. Kitekintés

## Az óceáni modellek típusai

1. „Swamp” óceán: a tengerfelszín-hőmérséklet (SST) a felszíni energia-egyensúly alapján számolódik, nincs hőtárolás és óceáni áramlatok;
2. „Slab” óceán: az SST a felszíni energia-egyensúlyból és egy egyszerű keveredési réteg hőtárolása alapján számítódik – továbbra sincsenek tengeráramlatok;
3. Óceáni általános cirkulációs modellek: az SST kiszámításánál a fentiekben túl figyelembe veszik az áramlatok és feláramlások hatását

Az első két leírásmód nem dinamikai alapon történik.

## 1. Nedves felület – „swamp” óceán

- Az óceán egyszerű nedves felületként viselkedik ebben a leírásmódban
- A hőt nem tárolja, és a (felszíni és mélységi) óceáni áramlások sem befolyásolják az SST-t
- A tengerfelszín-hőmérséklet számítása:



$$S + F^{\downarrow} - F^{\uparrow} - H - LE = 0$$

ahol  $S$  az elnyelt Napsugárzás,  $F^{\downarrow}$  a lefelé irányuló IR-sugárzás,  $F^{\uparrow}$  a felfelé irányuló IR-sugárzás,  $H$  a szenzibilis hő,  $LE$  a párolgás látens hője

- Mivel nincs hőtárolás, ezért csak éves átlagos sugárzási kényszert képes figyelembe venni a modell – nincs évszakos menet
- A légköri kényszerekre azonnal reagál a modell, ezért számítási szempontból olcsó: elegendő néhány évre futtatni
- A légköri komponenshez csatolva jól vizsgálható vele például, mennyire érzékeny az éghajlati rendszer egy külső kényszerre – mint a megváltozó Napállandó vagy a növekvő szén-dioxid kibocsátás

## 2. Keveredési réteggel bíró, „slab” óceán

- Az óceán 50-100 méteres vastagsággal rendelkezik
- Lehetővé teszi egy egyszerű évszakos hőkapacitás leírását a felső óceáni rétegben
- Vizsgálható vele az éghajlati rendszer évszakos érzékenysége
- A modellrendszert egy egyensúly beálltáig futtatják (kb. 20 év)
- A modellben nincsenek óceáni áramlások, azaz a horizontális hőtranszportot nem írja le – szisztematikus SST-hibák
- Mellőzi a vertikális áramlások leírását is

- A tengerfelszín-hőmérséklet számítása



$$\rho \cdot c_p \cdot h \frac{\partial T}{\partial t} = S + F^\downarrow - F^\uparrow - H - LE$$

ahol T a tengerfelszín-hőmérséklet,  $\rho$  a vízsűrűség,  $c_p$  tengervíz fajlagos hőkapacitása, h a mélység

- Számítási szempontból sokkal költségesebb az előző modelltípusnál – mivel a hőtárolás miatt az óceán lassabban kerül egyensúlyba a légkörrel, viszont realiztikusabb viszonyokat ír le

## 3. Dinamikus óceáni cirkulációs modellek

- Az óceánt teljes mélységében tekinti
- Az előzőeken kívül tartalmazza:

- az óceáni áramlások,
- a mélyből való feláramlások,
- a szubgrid skálájú – vertikális és horizontális örvényes diffúziós – keveredési folyamatok leírását



- Új egyenletek bevezetésével leírja az óceáni áramlatokat, a hőmérséklet és a sótartalom változásait

- A teljes leírásmód felveti a spin-up (felpörgés) kérdését: a teljes óceáni tömeg igazodási ideje nagyon hosszú – milyen hosszú integrálási idő után éri el azt a pontot a modell, amelytől érzékenységi kísérletek kezdhetők?

- Néhány száz évet igényelhet, míg a legalsó rétegek is egyensúlyba kerülnek a felső réteggel vagy a légkörrel

- A számítási költséget fokozza a több egyenlet, a mélységi szintek megnövekedett száma, valamint a hosszú integrálási idő

- Kompromisszum: durva horizontális felbontás

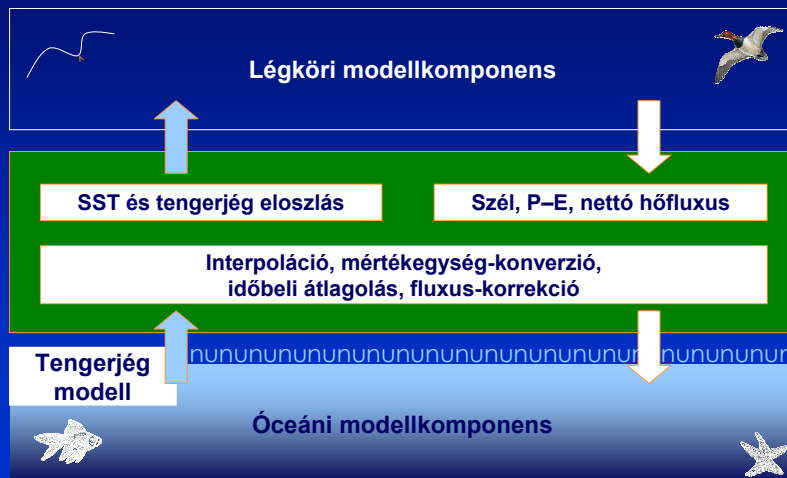
## A dinamikus óceáni modellek jellemzői

- Hidrosztatikus primitív egyenletek megoldása
- Rácsponti modellek – eltolt Arakawa-rácsok használatával
- Tipikus rácsfelbontás: 100-300 km
- Vertikális irányban felszínkövető vagy izopiknikus koordináta rendszer
- Felső határfeltételek: momentum, látens és szenzibilis hő, csapadék
- Hasonló dinamika – nagyobb különbségek a fizikai parametrizációs eljárásokban: horizontális és vertikális diffúzió, keveredés

## Csatolási stratégiák

- Az egyes – légköri, óceáni és tengeri jég – modellkomponensek közötti kommunikáció megvalósításához az információ bizonyos időközönként történő cseréjére van szükség
- Mivel a különböző modellkomponensek fejlesztése általában elkülönítve történik, ezért fontos a kapcsolatot biztosító felület kialakítása
- Átadandó paraméterek „kompatibilitása”: közös mértékegység, rács, stb.
- Csatolási frekvencia és az időbeli átlagolás megválasztása

## A csatolás sematikus rajza



## A légköri komponens kommunikációja az óceánnal és a tengeri jéggel

- T.f.h. egy modell-naponként történik a kommunikáció minden komponens között



- Az 1-napos légköri számítás során mindvégig a kapott SST- és jégborítottság értékekkel számolnak
- A számítás végén a légköri modellben az óceáni és jégmodellek által igényelt mezőket kiátlagolják időben (1 napra)

- Ezek a paraméterek:

- Felszíni szélnyírás:  $\tau_x = C_D \cdot \rho_1 \cdot V_1 \cdot u_1$

$$\tau_y = C_D \cdot \rho_1 \cdot V_1 \cdot v_1$$

ahol  $u$  és  $v$  a horizontális szélkomponensek a legalsó légköri szinten,  $V$  pedig az ezekből képzett sebesség,  $C_D$  (empirikus) ellenállási együttható

- Nettó édesvíz bevétel:  $F_{\text{fresh}} = P - E$
- (Lefolyás a szárazföldről)
- Az óceán felé irányuló nettó hőfluxus:  $H_{\text{net}} = S + F^{\downarrow} - F^{\uparrow} - H - LE$

## A tengeri jég modell kommunikációja az óceánnal és a légköri komponenssel

- Az SST, az áramlatok és a sótartalom igazodik a légkörtől kapott kényszerekhez az óceáni modellben
- A tengeri jég modellben hasonló adaptáció történik a légköri és az óceáni kényszerekhez
- A tengeri jég folyamatait leíró modell általában igen egyszerű – pedig nagy jelentőséggel bír, ugyanis a jégképződés módosíthatja a klímaérzékenységet

- A korai jégmodellek egyszerű termodinamikai modellek voltak: csak hőmérsékleti információkat használtak fel – a vizét alulról és a levegőt felülről –, s ez alapján határozták meg az olvadást vagy fagyást minden rácspontra
- A jég mozgását és sok fontos dinamikai folyamatot nem írtak le
- Léteznek bonyolultabb jégmodellek is: figyelembe veszik a jég mozgását, a repedések hatását és egy egyszerű jégdinamikai leírást is tartalmaznak
- Tehát a légköri komponens és az óceáni komponensek bemenő adatokat szolgáltatnak a jégmodell számára a hőmérsékletre és az áramlásokra vonatkozóan, amely alapján a jégmodell egy új jég-eloszlást számít
- Az adatok ugyanolyan egynapos ciklusokban és átlagolással kerülnek átadásra, mint a korábban ismertetett esetben

## TARTALOM

1. Az éghajlati rendszer
2. Éghajlati modellezés
3. Óceáni modellek, csatolás
4. Globális projekciók készítése
5. Kitekintés

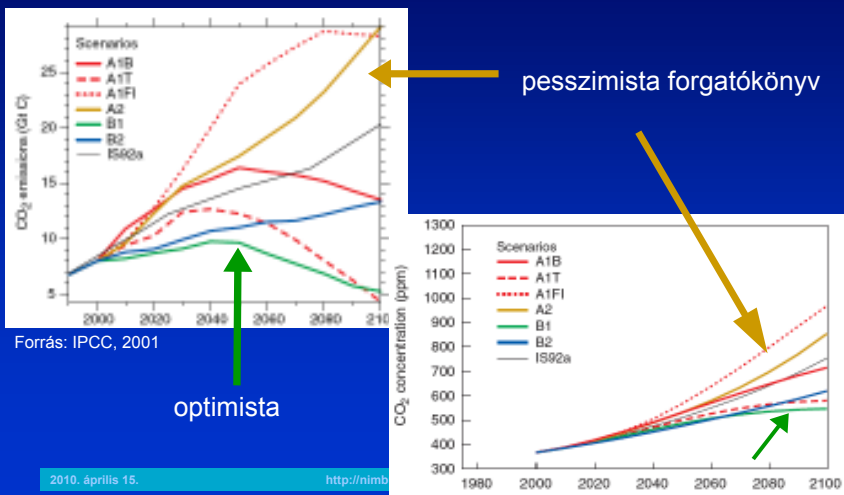
## Éghajlati projekciók készítése

- Egyensúlyi módszer: egy feltételezett kényszer megváltoztatásával (pl. a légköri CO<sub>2</sub> mennyiségének megduplázódása) integrálják a modellt egy új egyensúlyi állapot eléréséig
  - A kontroll és kísérleti futtatás összevetése
  - Akár x1000 éves integrálás is szükséges lehet
  - A klímaváltozás időbeli lefolyásáról nem ad információt
- Tranziens módszer: a kényszerek (pl. CO<sub>2</sub>-koncentráció) változási forgatókönyvei alapján történő gerjesztés
  - A klíma változásának időfüggése a kontrollal való összehasonlítás révén

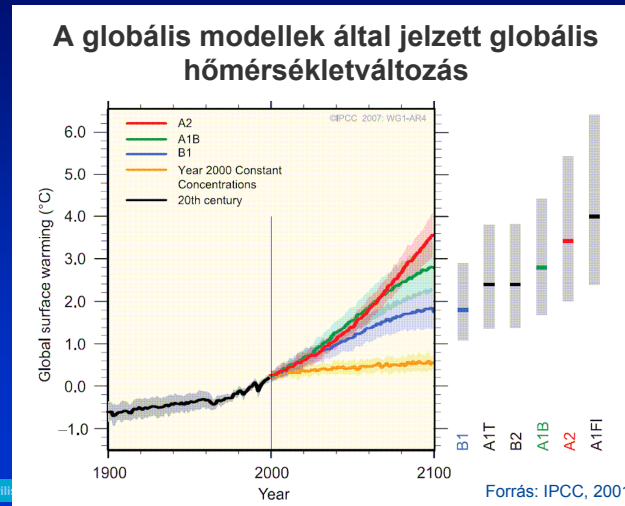
## A modellek alkalmazása

- A modellt először a múlttra vonatkozóan teszteljük – eredményeit összehasonlítjuk a múltban összegyűjtött megfigyelésekkel
- Elvárt pontosság: az éghajlat átlagos jellemzőinek visszatükrözése – egy éghajlati modell úgy is lehet „tökéletes”, hogy közben egyetlen időjárási eseményt sem jelzett előre
- A feltérképezett gyengeségek alapján a modellt fejlesztik
- A kellően pontos modellel a jövőre vonatkozó projekciókat készíteneek – feltételes prognózisok: „hipotézisek” az antropogén tevékenység alakulására

## Forgatókönyvek az emberi tevékenység jövőbeli alakulására



## Globális hőmérsékletváltozás



## Egyéb vizsgálatok: termohalin cirkuláció

- Az óceáni cirkulációt az óceánban fellépő sűrűségkülönbségek kiegyenlítésére irányuló törekvés határozza meg
- A sűrűségkülönbségeket a hőmérsékleti és sótartalom-eltérések okozzák – termohalin cirkuláció
- Éghajlati rendszerünk Achilles-sarka (Broecker, 1997)



2010. április 15.

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

57

## A változó felszíni kényszerek hatása a termohalin cirkulációra

- Az üvegházgázok koncentrációjának növekedése → globális melegedés
- Csökkenő meridionális hőmérsékleti különbség a poláris és a trópusi területek között – gyengülő felszíni hőtranszport
- Módosuló párolgás-csapadék-lefolyás egyensúly
- Melegebb klímaállapot → sarki jég olvadása → több édesvíz a poláris és szubpoláris tengerekbe → csökken a vízsüllyedés intenzitása
- A termohalin cirkuláció gyengülése, leállása

2010. április 15.

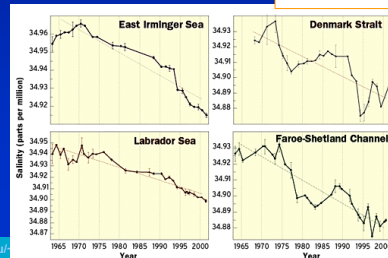
<http://nimbus.elte.hu/~numelo/mat/>

58

## Megfigyelések

- Az arktiszi tengeri jégmező kiterjedésének zsugorodása, a nyári átlagos jégvastagság csökkenése, az egész éven át fennmaradó tengeri jégmező területének csökkenése
- A grönlandi jégtömeg csökkenése
- A szubpoláris tengerek Atlanti-óceánba táplálódó vizének sótartalma az elmúlt negyven évben redukálódott
- A termohalin cirkuláció a „közelmúltban” is (~8500 évvel ezelőtt) leállt már

### Sótartalom



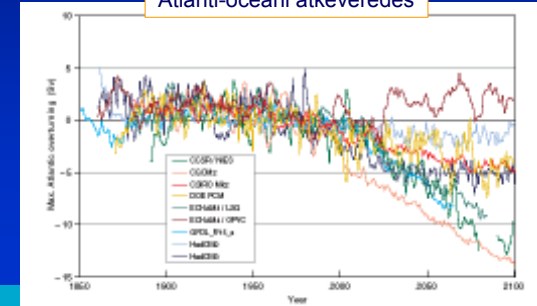
2010. április 15.

<http://nimbus.elte.hu/>

## Modellkísérletek

- A kapcsolt modell szimulációk megmutatták, hogy a termohalin cirkulációnak nem egy egyensúlyi állapota létezik
- Modellkísérletekkel vizsgálták a fokozódó üvegházgáz-koncentráció hatását
- A modellek többségében a kényszer hatására gyengült a termohalin cirkuláció, kisebb részük viszont nem reagált rá

### Atlanti-óceáni átkeveredés



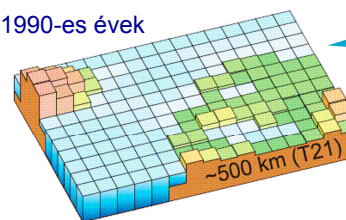
2010. április 15.

## TARTALOM

1. Az éghajlati rendszer
2. Éghajlati modellezés
3. Óceáni modellek, csatolás
4. Globális projekciók készítése
5. Kitekintés

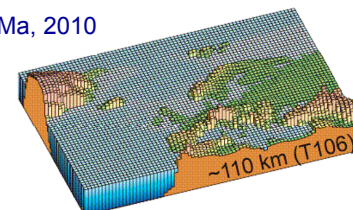
## A globális éghajlati modellek felbontás-változása

1990-es évek



Olaszország, Izland  
nem látható

Ma, 2010



2010. április 15.

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

Forrás: IPCC, AR4

## Regionális sajátosságok

- Globális modellek: 250-100 km-es vízszintes és 1 km-es függőleges rácssűrűség – Magyarország fölé ebből néhány (2-10) pont esik
- A regionális klímaváltozás iránya ellentétes lehet a globális változásokéval
- A globális információ finomítása szükséges

A következő óra témája

## Irodalom

- Czelnai R., Götz G., Iványi Zs., 1998: Bevezetés a meteorológiába II. (A mozgó légkör és óceán) Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, pp. 210–244.
- Götz G., 2006: Az éghajlat dinamikájának néhány nyitott kérdéséről (összefoglaló tanulmány). 31. Meteorológiai Tudományos Napok, beszámolókiötet, pp. 10–61.
- IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Basis
- <http://mathsci.ucd.ie/met/PHYC40050/>