

L5

Energetický a vodní cyklus I

Oddělení numerické předpovědi počasí

© ČHMÚ 2007

Plán přednášky

- Hydrologický cyklus
 - Fázové změny
 - prognostické proměnné
 - termodynamika;
 - Vývoj hydrometeorů
 - Explicitně popsané procesy: mikrofyzikální výpočty;
 - Parametrizace konvekce:
 - Pohled na klasická schémata;
 - Formalismus 3MT
 - Oblačnost

Fázové změny (1)

- Voda existuje v atmosféře ve stavu plynném, kapalném a tuhém. Fázové změny z jedné formy do druhé znamenají uvolnění či spotřebu latentního tepla a tím pádem mění také vstup do termodynamické rovnice. To může vést ke složitým numerickým problémům.
- Proto byly hledány cesty, jak změnit prognostické veličiny na takové, které by změny fáze odfiltrovaly, to znamená byly by vůči nim invariantní. Úspěch byl pouze částečný. Důvod je ten, že nejvhodnější konzervativní veličiny (θ_e , θ'_w nebo \mathbf{S}) nejsou naopak vhodné pro adiabatické rovnice.
- Při tzv. odfiltrování fázových změn je navíc nutné, aby nevypadávaly srážky. Použití „konzervativních proměnných“ je tudíž omezeno na procesy beze srážek.

Fázové změny (2)

- Budeme uvažovat termodynamický systém se základními zjednodušujícími hypotézami (viz lekce L1)
- Budeme uvažovat celkem 6 proměnných, vyjádřených jejich hmotností ku celkové hmotnosti částice vzduchu:

1. q_d suchý vzduch
2. q_v vodní pára
3. q_l suspendovaná (oblačná) kapalná voda
4. q_i suspendovaný (oblačný) led
5. q_r padající dešťová voda
6. q_s padající tuhá voda (sníh)

$$q_x = \frac{\rho_x}{\rho}$$

Pozor, nejde o směšovací poměry se suchým vzduchem, ale o měrné veličiny!

Nebudeme uvažovat zvlášť kroupy a krupky, protože z hlediska termodynamiky jsou to pouze pod-typy tuhé fáze.

Fázové změny (3)

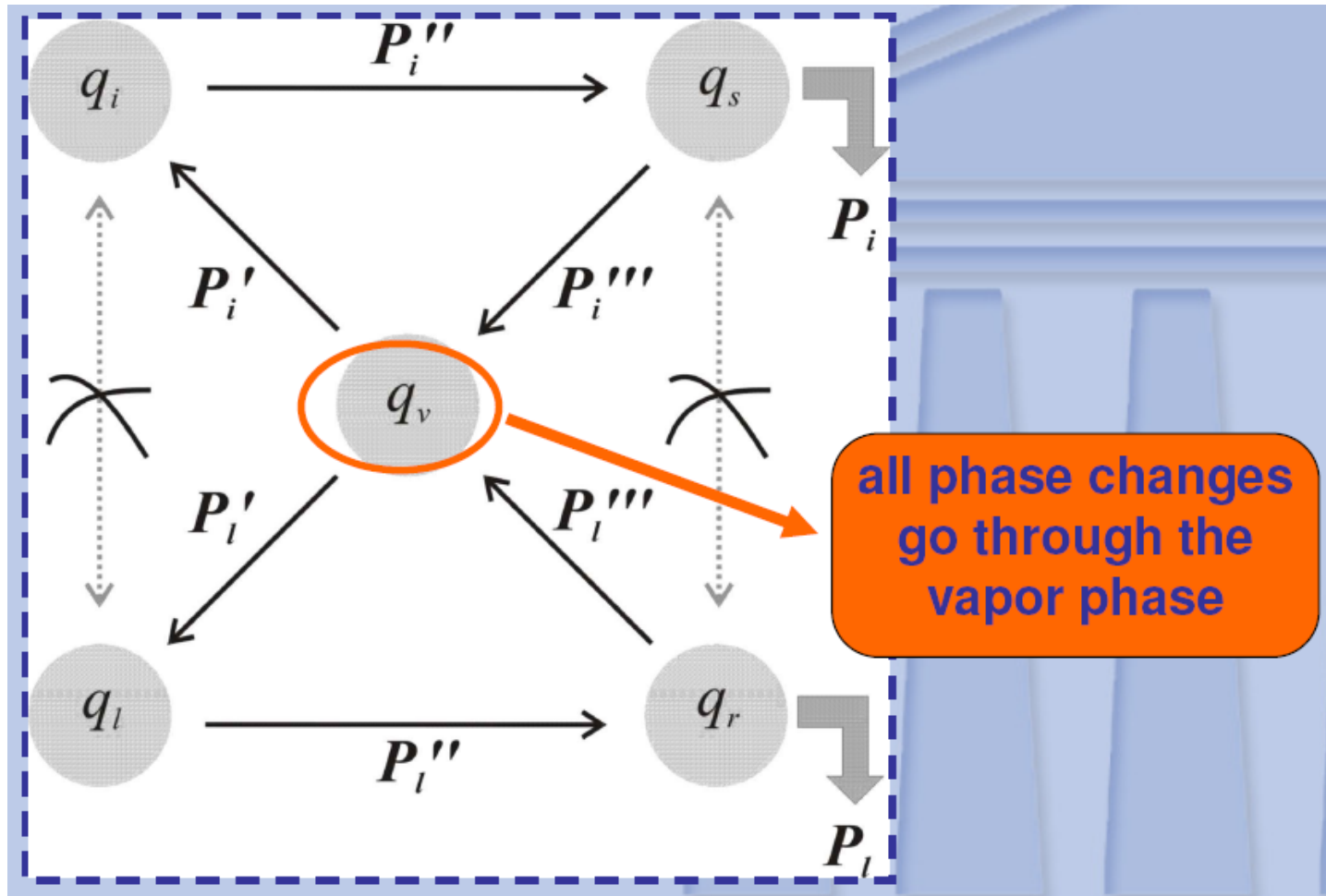


Schéma mikrofyziky: užitečný trik, kdy všechny fázové změny jdou přes vodní páru: termodynamicky ekvivalentní! Originální vývoj ALARO.

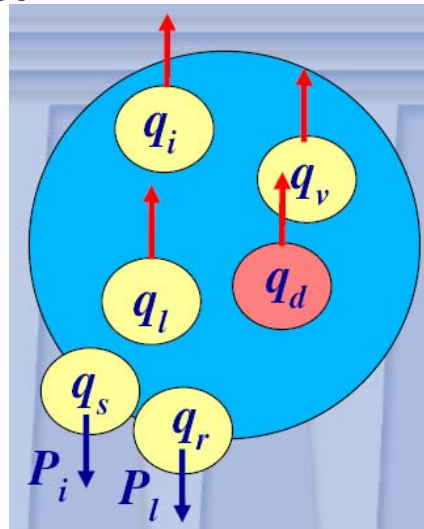
Vývoj hydrometeorů - rámec

- Ošetřen řídicími termodynamickými rovnicemi => zajištění interface s adiabatickou částí modelu „dynamikou“.
- ALARO: přechod na barycentrický systém rovnic: toky a rychlosti jsou vypočítány vzhledem k těžišti.

Pro vypadávající srážky platí:
Ostatní hydrometeory se pohybují
stejnou rychlostí vůči těžišti.



$$P_i = \rho_r w_r \text{ and } P_i = \rho_s w_s$$



Vývoj hydrometeorů - transport

- **Rozlišené** procesy: **advekce** dynamickou částí modelu.
 - ALARO: Semi-Lagrangeovská advekce; možnost SLHD difuze, důležitá vhodná volba SL interpolátorů.
- **Nerozlišené** procesy: **turbulence** a **konvekce**.
 - Turbulentní transport (může se využít konzervativní proměnná S pro transport q_l a q_i)
 - Konvektivní výstupy a sestupy
- Transport může obecně zavinit **záporné hodnoty** hydrometeorů.
 - Ošetření záporných hodnot tak, aby se **zachovala celková hmota**.

Vývoj hydrometeorů – termodynamické procesy

- **Rozlišené procesy (mikrofyzika):**
 - Kondenzace a výpar v oblaku.
 - Auto-konverze z oblačných kondenzátů na vypadávající srážky.
 - Nabalování (kolekce) oblačné vody a ledu padajícími srážkami.
 - Výpar/tání-mrznutí vypadávajících srážek.
 - Sedimentace vypadávajících srážek (interakce s auto-konverzí, sběrem, výparem/táním-mrznutím)
- **Konvektivní procesy:**
 - Kondenzace v konvektivním výstupu (up-draught).
 - Výpar/tání-mrznutí vypadávajících srážek v konvektivním sestupu (down-draught).

Příklad rovnice pro déšť

Auto-konverze a kolekce

$$\frac{d q_r}{dt} = g \frac{\partial}{\partial p} \left[P_{l_strat}'' + P_{l_conv}'' \right]$$

Výpar (tání/mrznutí)

$$- g \frac{\partial}{\partial p} \left[P_{l_strat}''' + P_{l_conv}''' \right]$$

Srážky

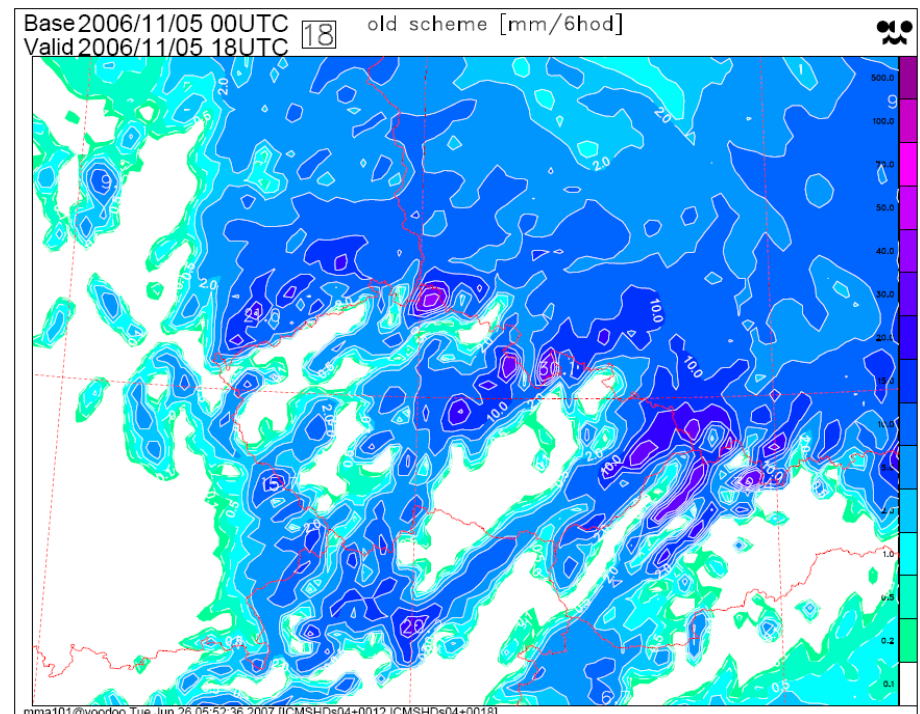
$$- g \frac{\partial}{\partial p} \left[P_{l_strat} + P_{l_conv} \right]$$

Změna veličiny je dána divergencí toků přes modelovou vrstvu.

Mikrofyzika – diagnostický případ

- Diagnostická schémata (dříve): výpočet byl proveden **naráz v každém časovém kroku** (neexistence proměnných q_l , q_i , .. pouze q_v).

Důsledek: všechny kondenzáty ihned vypadávají (nekonečná rychlost pádu srážek).
Nerealistické kontrasty na horských překážkách

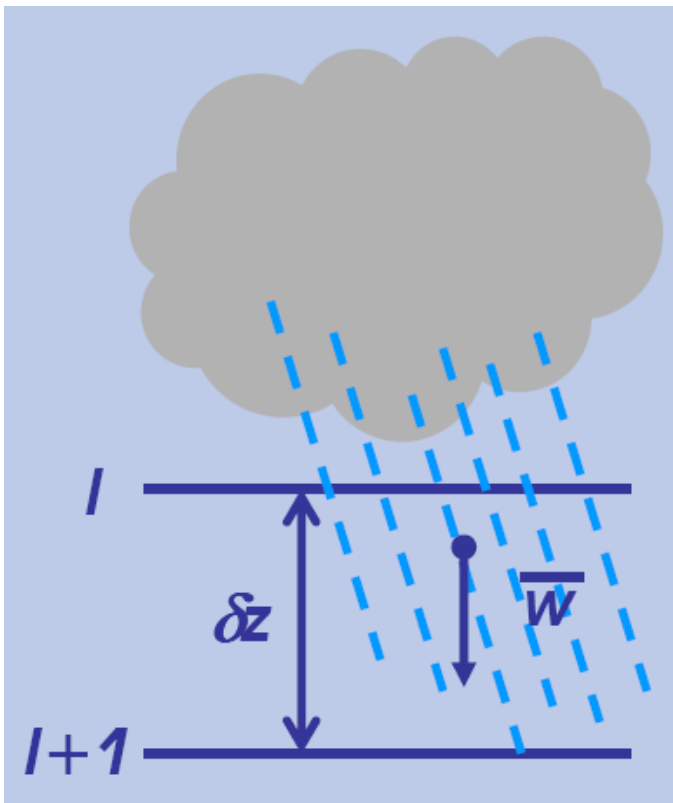


Mikrofyzika – prognostický případ: problém sedimentace

- Uvažujeme **padající srážky** q_r , q_s , ...
- Máme **celé spektrum rychlostí pádu** kapek/vloček (**Marshall-Palmer**) : problém jak toto počítat?
 - Existují tzv. **advektivní schémata**. Počítají ale nikoliv se spektrem rychlostí pádu, ale s jednou **střední hodnotou**. Navíc **jsou drahá** – je potřeba sestrojít dvojitý cyklus výpočtů ve vertikálním sloupci.
 - Alternativa (ALARO): **Statistická sedimentace**
 - Spektrum rychlostí pádu je nahraženo spektrem **dosažitelných vzdáleností** během časového kroku.

Mikrofyzika – statistická sedimentace (1)

Definujeme **základní pravděpodobnost**, že padající srážka proletí modelovou vrstvou za jeden časový krok:



$$P_0(\delta z / (\bar{w} \cdot \delta t)) = P_0(Z) = e^{-Z}$$

(inspirace ze zákona o radičním rozpadu)

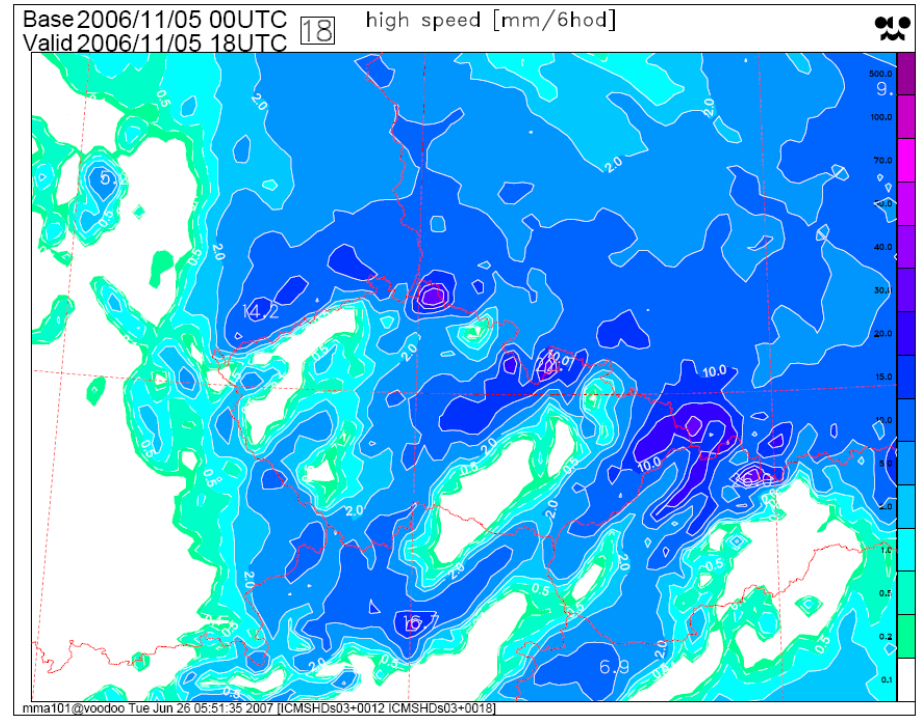
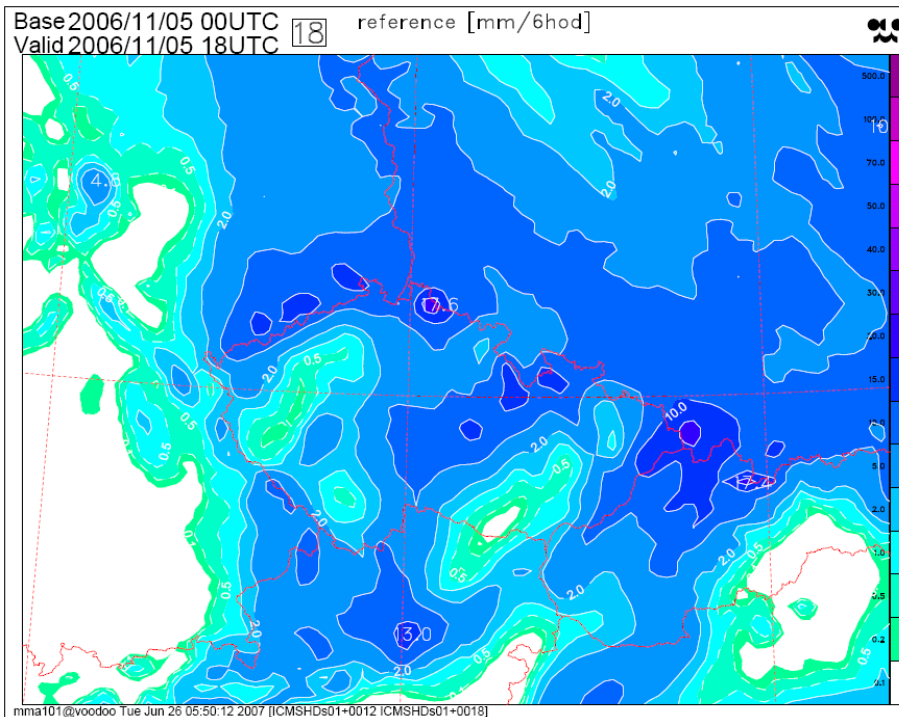
Pak spočteme další pravděpodobnosti:

1. **P1**: Kapky/vločky přítomné ve vrstvě;
2. **P2**: Kapky/vločky padající shora do vrstvy;
3. **P3**: Kapky/vločky vzniklé/zaniklé ve vrstvě.

Princip pravděpodobností se dá využít i pro jinou definici pravděpodobnostních funkcí: Dovoluje zahrnout i případ advektivního přístupu. Je početně úsporný – odpadá nutnost dvojitého vertikálního cyklu.

Mikrofyzika – statistická sedimentace (2)

Test schématu sedimentace: referenční a s úmyslně vysokou rychlostí pádu:



Při zadané vysoké rychlosti pádu kapek se řešení blíží diagnostickému schématu

Mikrofyzika - procesy

Závislost rychlosti pádu kapek na intenzitě deště: vypočtená střední rychlost vstupuje do schématu sedimentace.

$$\bar{w} = \Omega^r \left(\frac{R}{\rho^4} \right)^{1/6}$$

Vztahy pro kolekci, auto-konverzi a výpar/tání (zde neuvedeno). Zahrnují celkem 5 závislostí na teplotě vzduchu:

1. Auto-konverze je méně efektivní ve studeném vzduchu;
2. Auto-konverze oblačného ledu na sních je při nižších teplotách rychlejší;
3. Sních padá pomaleji při nižších teplotách;
4. Rychlost kolekce na krystalech ledu se snižuje ve studenějším vzduchu;
5. Ve studeném vzduchu jsou menší vločky; větší celková plocha naopak urychluje kolekci.

Wegener-Bergeron-Findeisenův proces je součástí auto-konverze oblačné vody na vypadávající sních.

Simulace krupek: pomocí vyšší rychlosti pádu zmrzlého deště.

Geometrie oblačnosti: přítomnost oblaku při kondenzaci a vypadávání srážek ovlivňuje průběh procesů. Máme celkem 4 kategorie (možné kombinace).

APLMPHYS STRUCTURE

INPUT

$q_v, q_l, q_i, q_s, T, \text{nebul}, q_w - q, L_v, L_s,$
condensation pseudo-fluxes,
fraction of convective activity

OUTPUT

Precipitation fluxes (liquid and solid)
Condensation pseudo-fluxes ($q_v \leftrightarrow q_l$ and $q_v \leftrightarrow q_i$)
Autoconversion pseudo-fluxes ($q_l \leftrightarrow q_r$ and $q_i \leftrightarrow q_s$)
Evaporation pseudo-fluxes ($q_r \leftrightarrow q_v$ and $q_s \leftrightarrow q_v$)
Fall speeds (liquid and solid)

JLEV-loop

1. Preparations

- Set upper boundary conditions for the (pseudo-) fluxes
- Initialize local arrays

JLEV-loop: partial fluxes from above are known

- Assign local copies for q_l and q_i
- Compute four types of q_r and q_s :
 1. cloudy part + seeded (from above)
 2. cloudy part + not seeded
 3. clear sky part + seeded
 4. clear sky part + not seeded (*)

- Determine temperature dependencies for:
- autoconversion (time scale and thresholds)
 - collection efficiencies
 - fall speed ratio (liquid/ice)

Initialize diagnostic graupel proportion

2. Autoconversion (+WBF)

Prepare call to ACACON for the **cloudy part** only: assign the correct input variables

Call ACACON:

I/O: local copies of q_l, q_i, q_r and q_s

Output: autoconversion pseudo-fluxes

$q_i \leftrightarrow q_s$
 $q_l \leftrightarrow q_r$
 $q_l \leftrightarrow q_s$ (WBF-process)

Update autoconversion pseudo-fluxes (take cloud cover into account)

Cloud running values of q_l, q_i, q_r and q_s already updated in ACACON

Perform first PDF-based sedimentation (using PDFs P1, P2 and P3 and including the graupel-effect)
→ intermediate precipitation fluxes

3. Collection

Prepare call to ACCOLL for the **cloudy + seeded part** (assign the correct input variables) ①

Call ACCOLL

I/O: local copies of q_l, q_i, q_r and q_s

Output: collection help-fluxes:
 $q_i \leftrightarrow q_s$
 $q_l \leftrightarrow q_r$
 $q_i \leftrightarrow q_r$
 $q_l \leftrightarrow q_s$ (not yet pseudo-fluxes)

Prepare call to ACCOLL for the **cloudy + not seeded part** (assign the correct input variables) ②

Call ACCOLL (similar as above)

Update collection help-fluxes (take fraction of grid-box into account) ①

Update running values of q_r and q_s (q_l and q_i not needed anymore) ②

Perform second PDF-based sedimentation (using PDF P3 and including the graupel-effect)
→ update of the precipitation fluxes

4. Evaporation and/or melting/freezing

Prepare call to ACEVMEL for the **clear sky + seeded part** (assign the correct input variables) ①

Call ACEVMEL

I/O: local copies of q_r, q_s

Output: "evaporation" pseudo-fluxes:
 $q_r \leftrightarrow q_v$
 $q_s \leftrightarrow q_v$
 $q_s \leftrightarrow q_r$ (includes sublimation and melting)

Prepare call to ACEVMEL for the **clear sky + not seeded part** (assign the correct input variables) ②

Call ACEVMEL

Prepare call to ACEVMEL for the **cloudy part** (assign the correct averaged input variables) ③

Call ACEVMEL

Update "evaporation" pseudo-fluxes (take fraction of grid-box into account) ① ② ③

Take into account the loss of precipitation due to evaporation and melting/freezing (using PDF P3)

5. End of loop

Compute the final pseudo-fluxes from the intermediate pseudo- and help-fluxes

Next level

Recompute the overlap of cloudy and rainy area's:
- compute seeded proportions of cloudy and clear sky parts
- compute partial precip. fluxes for the four possible geometric area's (*)

Update fall speeds and graupel proportions

Final sedimentation call to produce final precipitation fluxes (using PDF P3)

JLEV-loop

Updates

Sedimentation

Convection, a subgrid-scale phenomenon



Parametrizace konvekce

- Problém rozlišení modelu:
 - Velké kumulonimby: začínají být rozlišeny pro síť kolem 3km; Tzv. Cloud Resolving Models (CRM)
 - Tzv. mělká vlhká konvekce (menší kumuly, strato-kumuly, ...) je stále parametrizována v CRM;
 - Tzv. suchá konvekce, neboli LES (Large Eddy Simulations) vyžadují rozlišení asi 50m a vyšší.

Mechanismy konvekce

Koncepce 5 druhů instabilit:

CIFK= Conditional Instability of the First Kind. Zdroj energie: CAPE. Konvekce je řízena vlhkou vertikální instabilitou. Archimedes, 287 př. n. l.

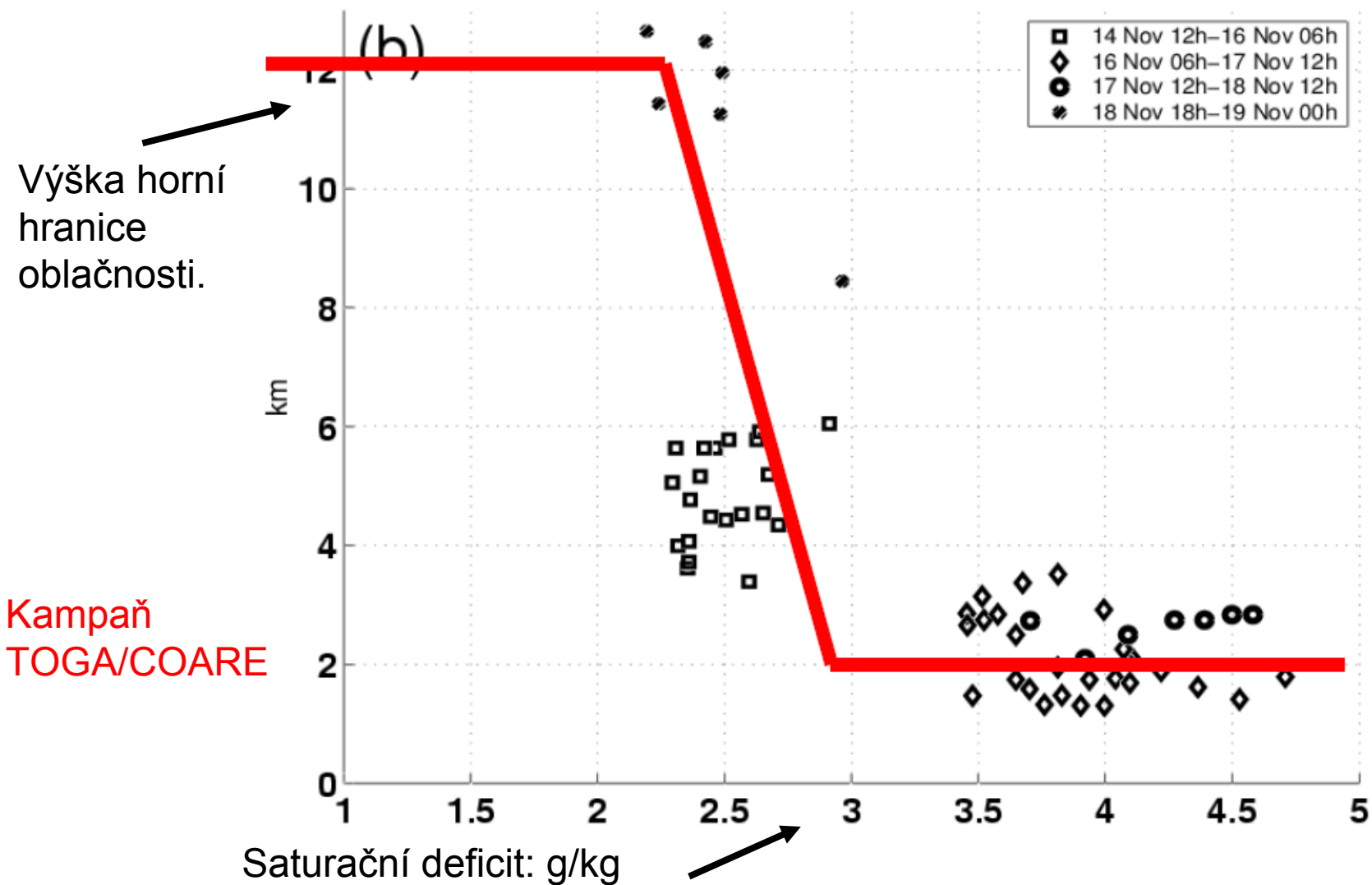
CISK= Conditional Instability of the Second Kind. Zdroj energie: latentní teplo konvergující q_v . Konvekci řídí dynamická konvergence vlhkosti. Charney, Eliassen, Kuo, Ooyama, GATE, Bougeault. 1960-1985.

WISHE=Wind Induced Surface Heat Exchange. Zdroj energie: latentní teplo q_v vypařené z povrchu. Konvekci řídí vlhčení vzduchu výparem. Emanuel, Yano, Raymond. 1984-1990.

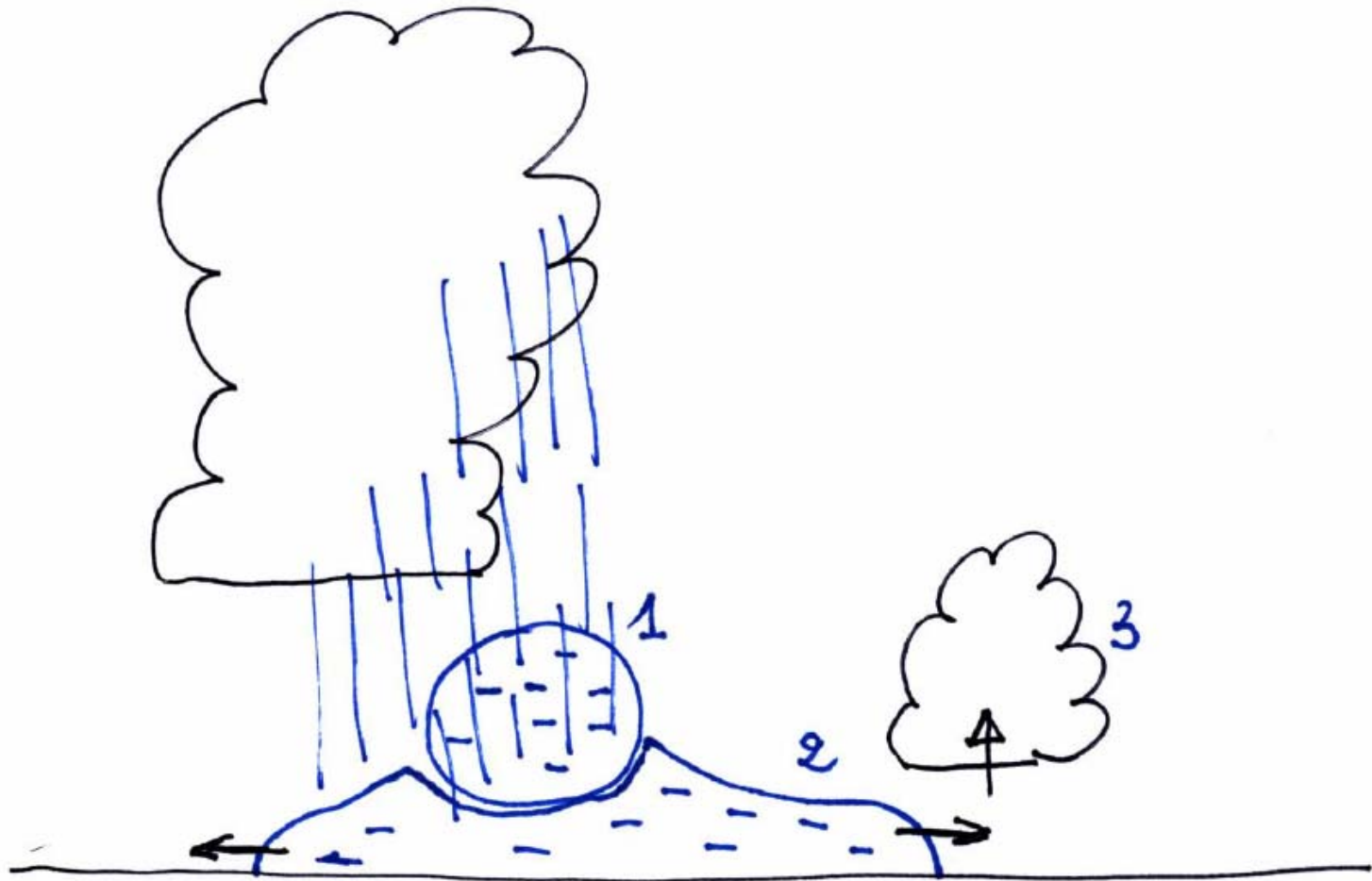
SATDEF= SATuration DEFicit. Zdroj energie: menší chlazení kvůli výparu uprostřed konvektivního výstupu. Konvekce v mírných šířkách potřebuje vlhkou vrstvu (2 až 5km). TOGA/COARE Redelsperger, Parsons, Guichard. 2002.

Studená jezera= Přejchod z mělké do hluboké konvekce závisí na interakci oblačnosti. Zdroj energie: adiabatický zdvih způsobený výlevem studeného vzduchu. Guichard, Khairoutdinov, Randall. 2004-2006.

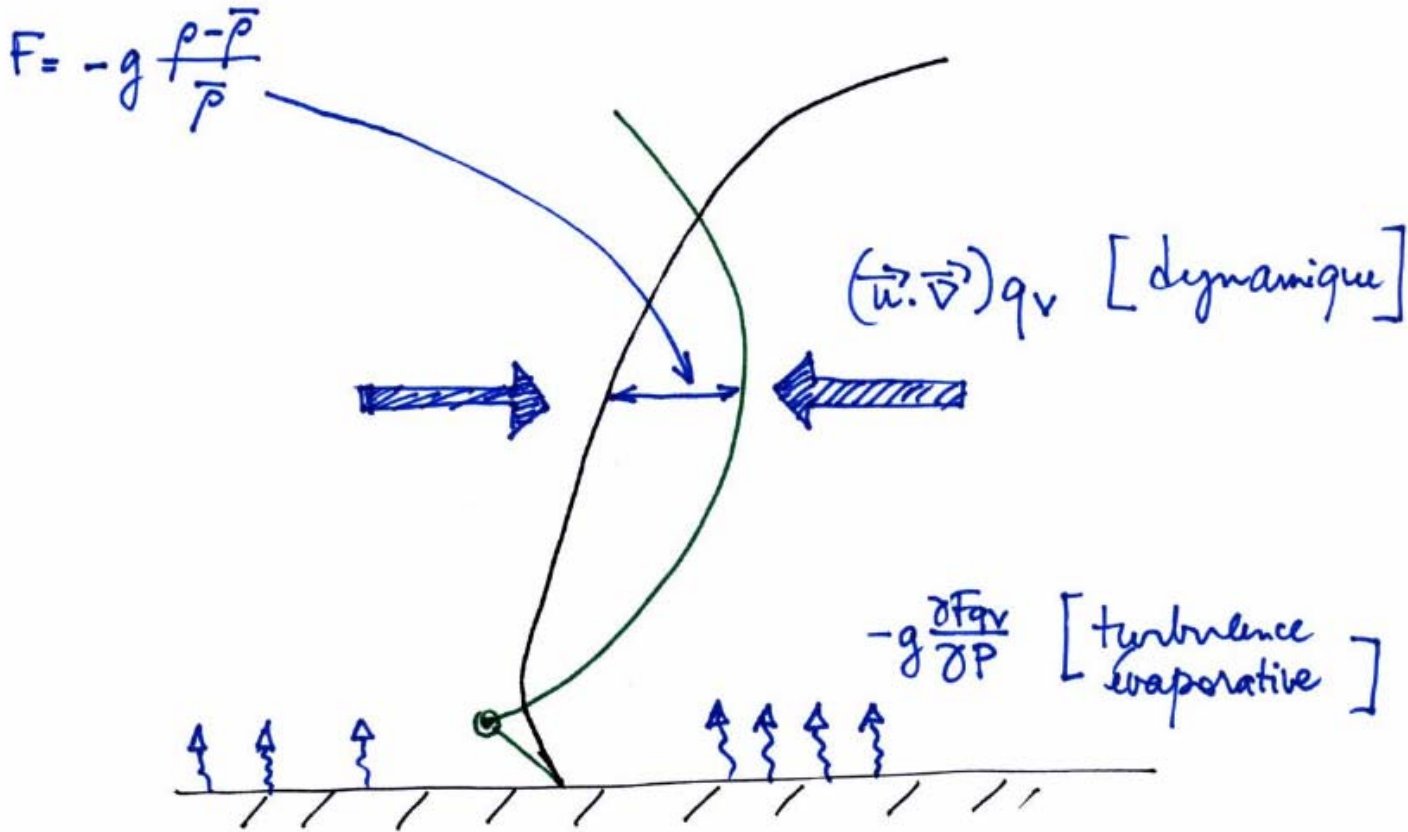
SATDEF: závislost hloubky oblaku na saturačním deficitu



Koncept studených jezer



Mechanisms in the current ARPEGE/ALADIN scheme

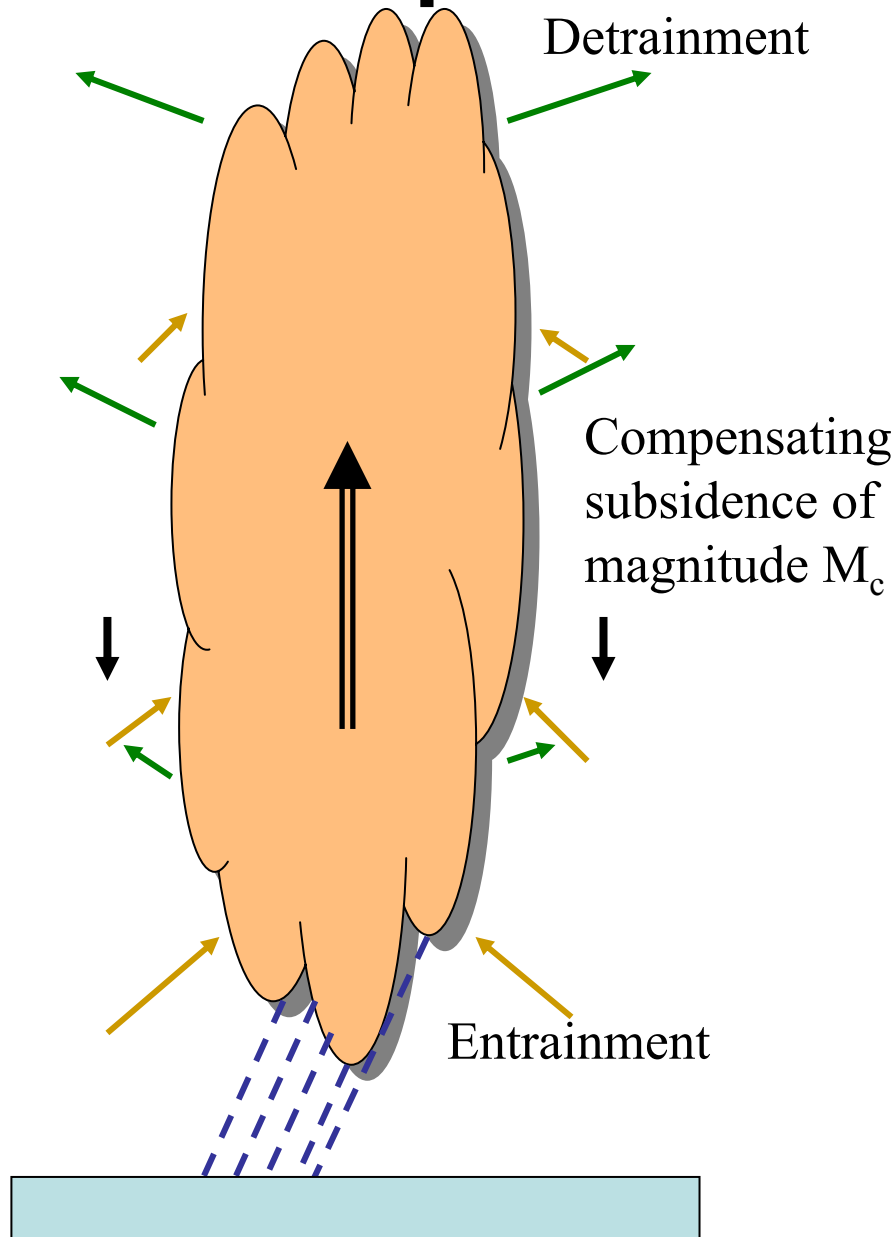


Processes **CIFK**, **CISK** and **WISHE** are included.

Známé problémy současných schémat

- **Schéma je** v denním cyklu „napřed“ s ohledem na ohřev povrchu. Mechanismus přechodu k hluboké konvekci asi není správně.
- **Podceněná citlivost na vlhkost** v troposféře (konvektivní oblačnost i v suchém vzduchu)
- Problém **kauzality**: koncepce instability CISK je používána jako uzávěr schémat. Co je a co není nerozlišená konvekce?
- Jedná se o **diagnostická schémata**: všechno se počítá během jednoho kroku modelu, konvektivní srážky vypadávají s nekonečnou rychlostí ...

Současná parametrizace: tok hmoty



Hypotézy:

-Stacionární oblak

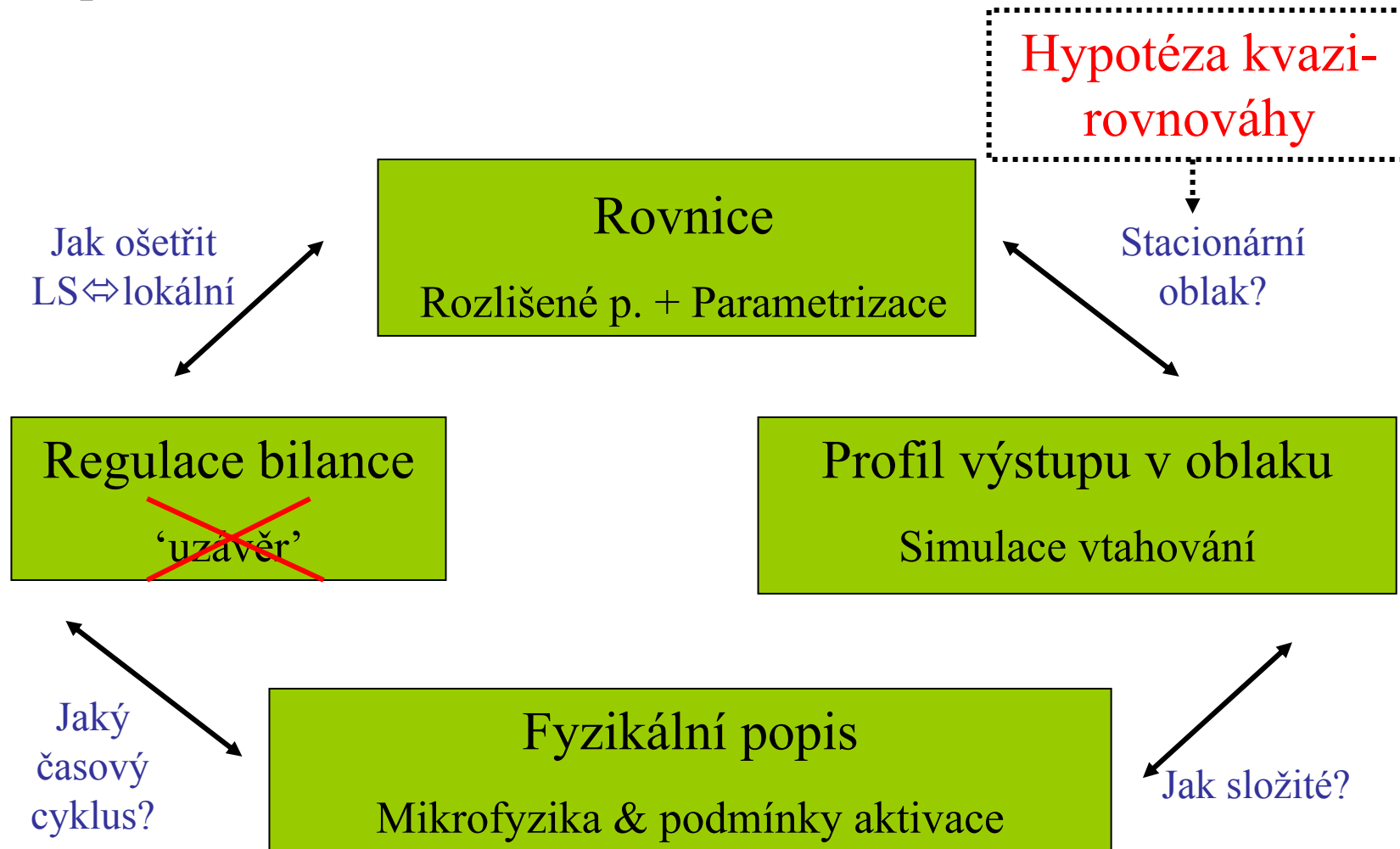
-zanedbatelná plocha výstupu

$$\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial p} [M_c (\bar{\psi} - \psi_c)]$$

$$\frac{\partial M_c}{\partial p} = D - E$$

$$M_c \frac{\partial \psi_c}{\partial p} = E (\psi_c - \bar{\psi})$$

Standardní komponenty parametrizace konvekce

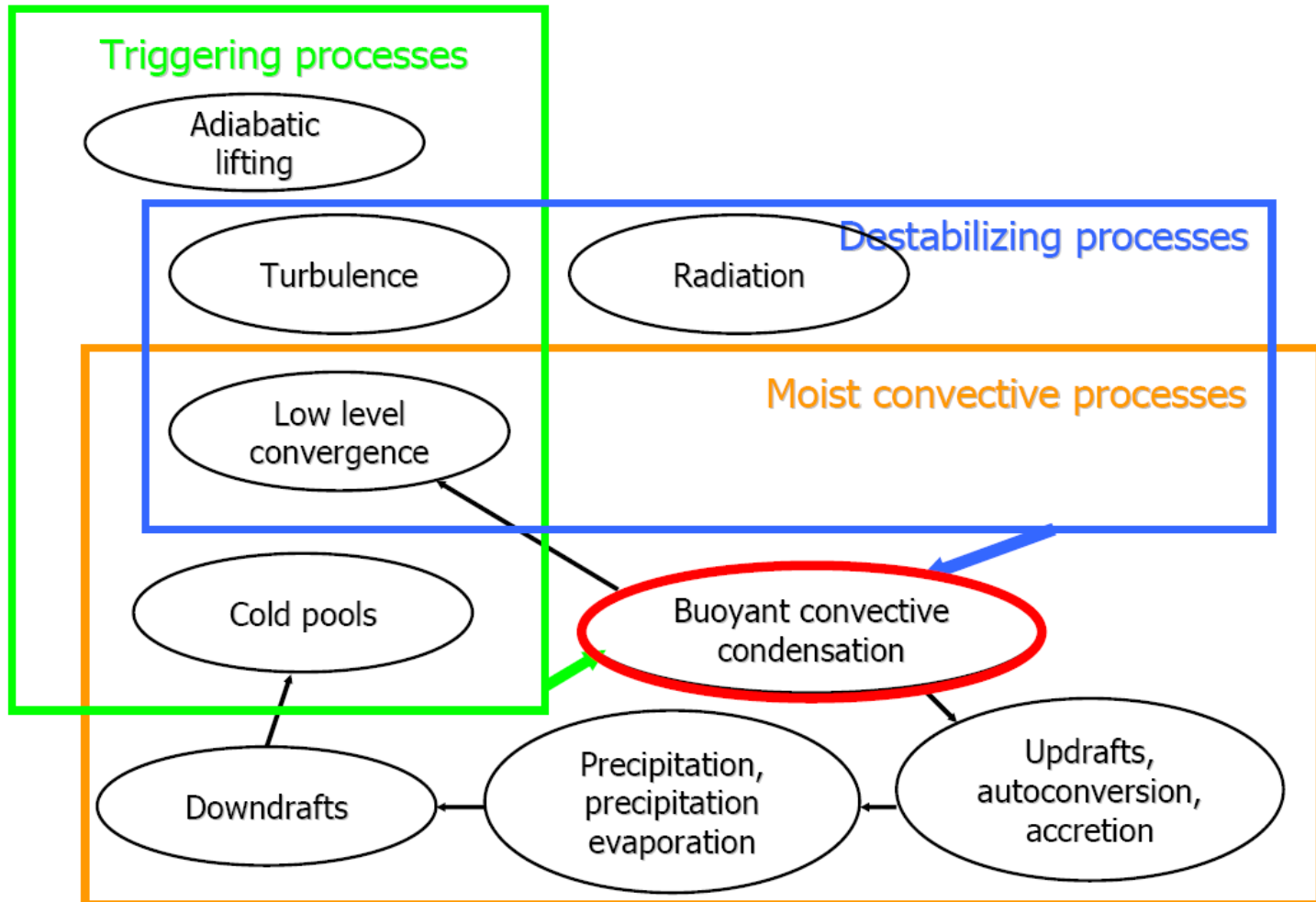


Nová koncepce: 3MT

- **M**odular (lego systém)
- **M**ultiscale (poradí si při jakémkoli rozlišení modelu: prognostická konvekce s „pamětí“, kaskáda volání procesů, prognostické vtahování)
- **M**icrophysics (mikrofyzikální výpočty jsou stejné jako pro „rozlišené“ procesy)
- **T**ransport (konvektivní výstupy a sestupy)

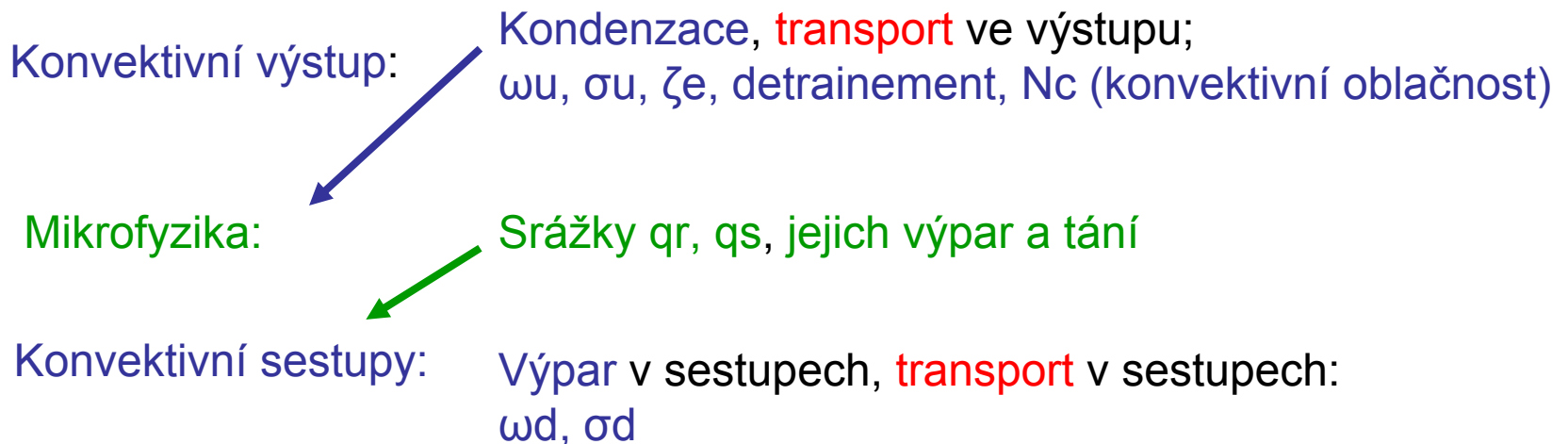
- Klíčová idea: **separace mikrofyziky a transportu**. Hypotéza stacionárního oblaku je odstraněna.
- Pomůže odstranit alespoň částečně problémy současných přístupů? První testy ukazují, že ano.

Centrální role konvektivní kondenzace



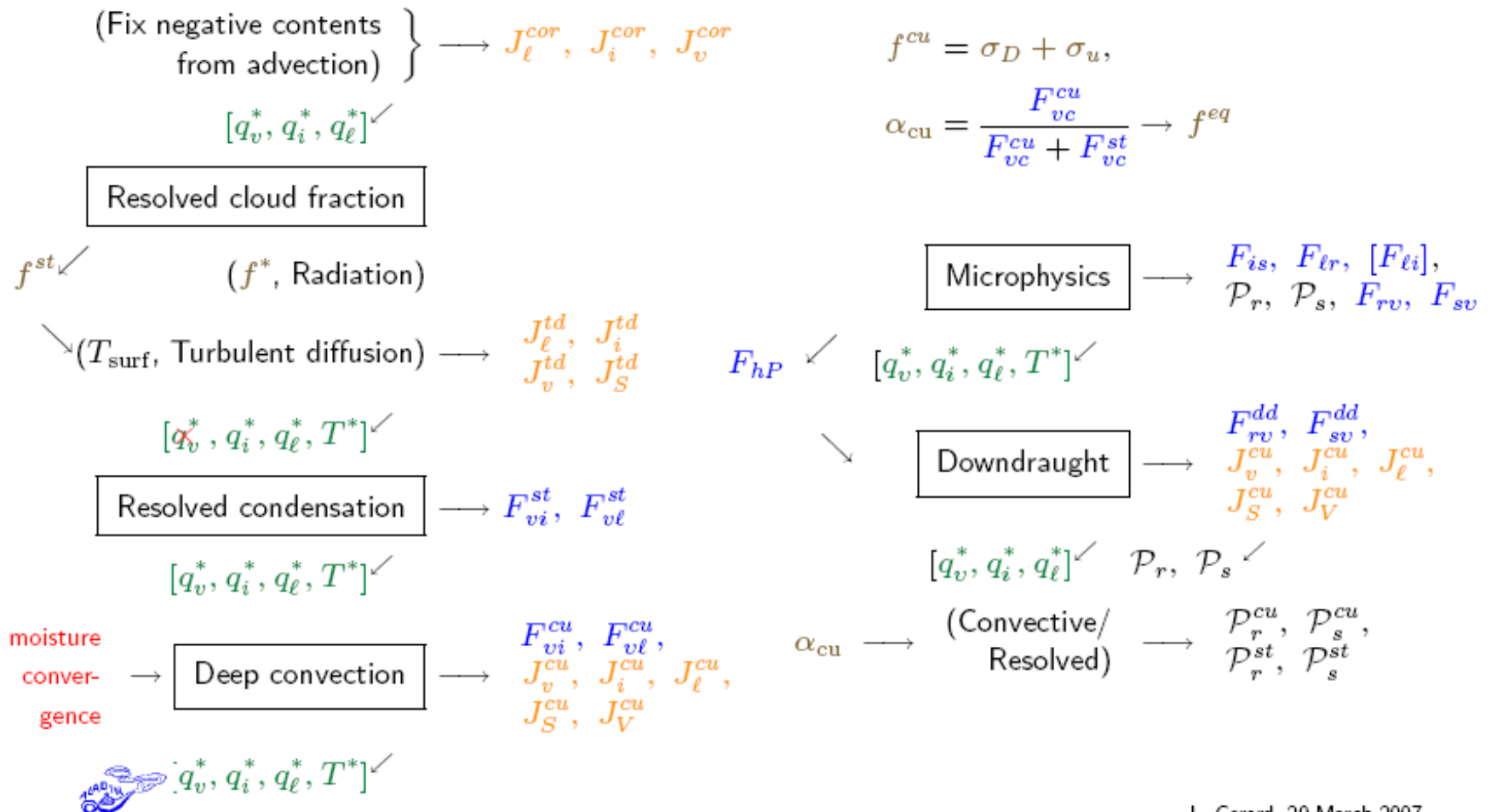
ALARO => posun k prognostickým schémátům

- Rozlišené srážkové procesy => **mikrofyzika** (q_v , q_l , q_i , q_r , q_s)
- Konvektivní (nerozlišené) srážkové procesy => **3MT** (q_v , q_l , q_i , q_r , q_s , ω_u , σ_u , ω_d , σ_d , ζ_e : hydrometeory + rychlosti výstupů a sestupů, frakce výstupů a sestupů, vtahování).

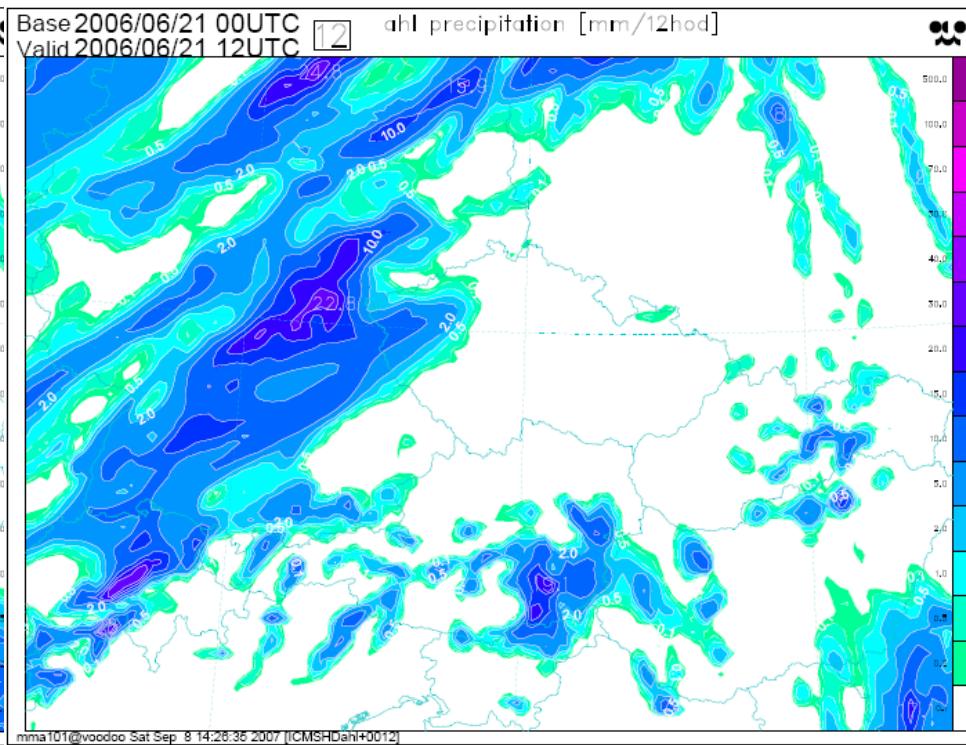
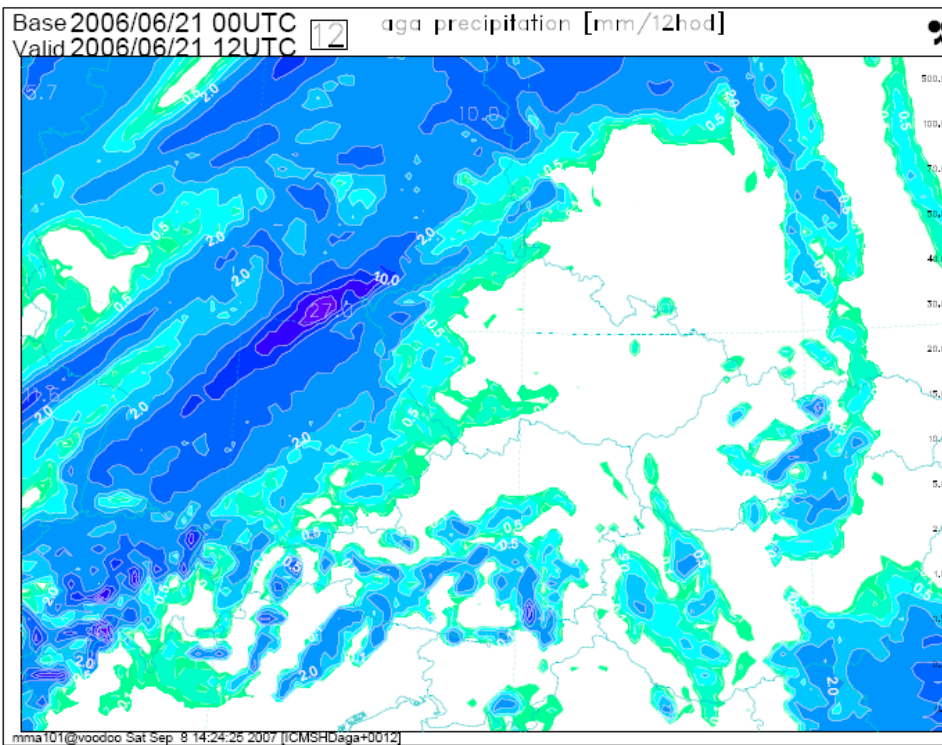


Kaskáda cyklu vody v ALARO

Cascade General layout



Výsledky předběžného testu



Bez 3MT

S 3MT

Oblačnost

- Role oblačnosti v modelu:
 - Ve schématu **záření**. Potřebujeme pokrytí oblačností N a vodní obsah (kapalná a tuhá fáze).
 - Způsob výpočtu: diagnosticky (současné schéma) + konvektivní N_c .
 - Prognostické q_i , q_l . Ale problém vstupu z konvekce: sladění možné v 3MT.
 - Ve schématech **vodního cyklu**: kondenzace, výpar, geometrie oblačnosti v mikrofyzice.
 - Ve schématu **turbulence**: transport q_i , q_l , q_v .
- Výstup z modelu: N použité ve schématu **záření**, rozdělené do kategorií N_v , N_s , N_n , N_c .

Závěr Lekce L5

- Modelování vodního cyklu odhaluje složité interakce.
- Problém současného modelování rozlišených a nerozlišených konvektivních procesů je jedním z nejtěžších, kdy současná klasická schémata konvekce jsou nepoužitelná (nejhorší pro kroky sítě 3 až 7 km).
- Po zhruba 20-ti letech se rodí nová generace parametrizací konvekce.